

## Systemwerking Maas en waterveiligheid

Onderzoek voor beleidstafel wateroverlast en hoogwater



## **Systeemwerking Maas en waterveiligheid**

Onderzoek voor beleidstafel wateroverlast en hoogwater

### **Auteur(s)**

Jurjen de Jong  
Ferdinand Diermanse  
Ron Agtersloot  
Tjitske Geertsema

### **Partners**

Agtersloot Hydraulisch Advies B.V., BEESEL

## Systemwerking Maas en waterveiligheid

Onderzoek voor beleidstafel wateroverlast en hoogwater

<b>Opdrachtgever</b>	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
<b>Contactpersoon</b>	de heer A. Roos
<b>Referenties</b>	
<b>Trefwoorden</b>	Maas, zijrivieren, hoogwater

### Documentgegevens

<b>Versie</b>	0.3
<b>Datum</b>	7 november 2022
<b>Projectnummer</b>	11208036-012
<b>Document ID</b>	11208036-012-ZWS-0003
<b>Pagina's</b>	204
<b>Classificatie</b>	
<b>Status</b>	definitief

### Auteur(s)

	Jurjen de Jong	Deltares
	Ferdinand Diermanse	Deltares
	Ron Agtersloot	Agtersloot Hydraulisch Advies
	Tjitske Geertsema	Deltares

# Samenvatting

In juli 2021 leidde een grote hoeveelheid neerslag tot regionale overstromingen en grote wateroverlast in Limburg en in delen van Duitsland, België en Luxemburg. Het betrof een extreme en uitzonderlijke gebeurtenis met grote maatschappelijke gevolgen. Om te leren van de opgetreden situatie in Limburg en om ook op andere locaties in Nederland beter voorbereid te zijn op de gevolgen van een periode van extreme neerslag heeft de minister van Infrastructuur en Waterstaat met betrokken partijen het initiatief genomen voor de “Beleidstafel wateroverlast en hoogwater”. In het kader van deze beleidstafel worden adviezen geformuleerd aan de Tweede Kamer. De beleidstafel kent meerdere sporen. Vanuit ‘spoor 5’ (Maas en Waterveiligheid) van de beleidstafel zijn diverse onderzoeksvragen opgesteld, waarvan de antwoorden bijdragen aan voornoemde adviezen. De diverse onderzoeksvragen zijn opgedeeld in vijf hoofdthema’s (zie onder) die elk in een afzonderlijk hoofdstuk worden behandeld in dit rapport.

## **Rivierkundige aspecten (hoofdstuk 2)**

In dit thema zijn rivierkundige vraagstukken gebundeld. De vragen hebben betrekking op de nauwkeurigheid van model-simulaties, het effect van diverse uitgevoerde rivierwerken (zoals de aanleg van kaden en rivierverruiming) de invloed van zomervegetatie op waterstanden en het effect van de golfvorm bij Eijsden/Borgharen op waterstanden benedenstrooms.

Uit vergelijkingen van modelresultaten en metingen is gebleken dat het 2D hydraulisch model WAQUA over het algemeen redelijke resultaten geeft met afwijkingen in berekende waterstanden van maximaal enkele decimeters. De verschillen tussen metingen en berekeningen zijn over het algemeen groter voor de nieuwe meetstations dan voor de oude meetstations die zijn gebruikt bij de kalibratie van het model. Over het algemeen zijn de afwijkingen in SOBEK (een 1D hydraulisch model) iets groter dan de afwijkingen in WAQUA.

Uit modelsimulaties met verschillende maatregelpakketten zijn verschillende bevindingen gedaan over de impact van uitgevoerde riviermaatregelen. Ten gevolge van de aangelegde kaden (noodkaden en DGR-kaden) was in 2003 sprake van een beperkte verhoging van de waterstanden (5 à 10 cm) met als uitzondering de locaties Borgharen-Itteren, Meers en Roosteren; hier bedroeg de verhoging enkele decimeters. Ten gevolge van de uitgevoerde rivierverruiming zijn de waterstanden significant gedaald. Gemiddeld is de daling ongeveer 10 à 30 cm. Op de Grensmaas is de variatie groter: van 0 tot 220 cm. De locaties waar weinig of geen rivierverruiming heeft plaatsgevonden zijn morfologisch uit evenwicht. De stroomsnelheden zijn hier toegenomen. Als hierdoor de afdeklaag opbreekt, kunnen grote erosiekuilen ontstaan. Dit is vermoedelijk de oorzaak geweest van het ontstaan van de erosiekuilen bij het hoogwater van juli 2021.

Vervolgens is onderzocht wat het effect is van zomervegetatie op de ruwheid en daarmee op de opgetreden waterstanden. Het toevoegen van maisvelden aan de modelschematisatie leidt tot een gemiddelde verhoging van 23 cm in berekende waterstanden op de Maas, met lokaal toenamen tot ruim 50 cm. De weerstand van mais is echter nog een onzekere factor en vraagt nader onderzoek. Rekening houdend met de invloed van bladvorming van de gewassen op de ruwheid in de zomer leidt tot een verhoging in berekende waterstanden van gemiddeld 5 cm langs de Maas, oplopend tot lokaal 15 cm op de Grensmaas.

Uit een literatuurstudie naar het effect van de golfvorm op de afvoer en waterstanden benedenstreams is geconcludeerd dat de mate van topvervlakking afhankelijk is van onder andere het bodemverhang, de waterdiepte en de piekafvoer, maar bovenal van de vorm van de afvoergolf. Een stompe afvoergolf bij Borgharen kan benedenstreams nabij Den Bosch resulteren in een piekafvoer die 1000 m<sup>3</sup>/s groter is dan de piekafvoer van een spitse afvoergolf. De mate van topvervlakking neemt toe in benedenstroomse richting. Op de Grensmaas is het maximale effect op de waterstanden 10 cm. Vanaf de Plassenmaas (nabij Roermond) neemt dit toe naar 60 cm, om vervolgens toe te nemen tot 100 cm op de Getijdenmaas (nabij Den Bosch). De mate van topvervlakking was veel groter tijdens het hoogwater van 1993 dan tijdens het hoogwater van 1995 omdat de golfvorm van 1993 relatief spits was en die van 1995 juist relatief stomp. In nog extremere mate speelde de topvervlakking ook bij het hoogwater van 2021. De topvervlakking was vanaf de Plassenmaas dermate groot, dat ondanks het grote instromende debiet vanaf de Roer de piekafvoer bij Roermond al onder het niveau van de hoogwaters van 1993 en 1995 was gezakt, ondanks het feit dat de piekafvoer bij de grensovergang juist groter was dan in 1993 en 1995.

### **Opgave en oplossingen voor hoogwaterveiligheid (hoofdstuk 3)**

In dit thema is gekeken naar de mogelijkheden om de hoogwaterveiligheid te vergroten met een combinatie van dijkverhoging, rivierverruiming en retentie. Dijkversterking zorgt voor een vergroting van de hoogwaterveiligheid in de dijkkring zelf, maar kan de hoogwaterveiligheid in nog niet versterkte dijkkringen verlagen. Op dit moment is sprake van dijken langs de Maas die onder drie verschillende normen zijn ontworpen en slechts voor een deel voldoen aan de huidige normen. Rivierverruiming zorgt over een groot traject voor lagere waterstanden en hiermee een toename van de hoogwaterveiligheid. Wel zijn veel ingrepen nodig om voor de hele Maasvallei te komen tot een significant effect op de waterstanden. Retentie kan eveneens bijdragen aan de hoogwaterveiligheid zoals is gebleken tijdens het hoogwater van juli 2021.

Vervolgens is een analyse uitgevoerd van het verwachte waterstandseffect van vergunde maatregelen en van geplande maar nog niet vergunde of gerealiseerde maatregelen. Realisatie/voltooiing van reeds vergunde maatregelen zal ten opzichte van de situatie in 2021 leiden tot extra waterstandsverlaging, vooral op de Grensmaas. Nog geplande maatregelen, zoals bijvoorbeeld verruiming brug Oeffelt of Meanderende Maas kunnen binnen een periode van 5 tot 10 jaar aanvullende waterstandsverlaging geven. Voor de langere termijn (10 tot 50 jaar) zal de waterstandsverlaging het resultaat zijn van een lange termijn rivierverruimingspakket, bijvoorbeeld een variant van de Adaptieve Uitvoeringsstrategie Maas (AUM) of een nog nader te bepalen pakket uit IRM. Hiermee kan een deel van de hoogteopgave worden ingelost. Van belang hierbij is te vermelden dat de hoogteopgave voor de waterkeringen slechts één van de componenten van hoogwaterveiligheid is; zelfs als aan de hoogteopgave wordt voldaan, is het nog altijd mogelijk dat een dijk moet worden versterkt om te voldoen aan de eisen met betrekking tot andere faalmechanismen, zoals piping en macro-stabiliteit.

### **Afvoerstatistieken van de Maas (hoofdstuk 4)**

In dit thema is onderzoek uitgevoerd naar de kans op overschrijden van de piekafvoer van het hoogwater van juli 2021, en de kans dat dit in de zomer plaats vindt. Op basis van analyses van metingen is de terugkeertijd van dit hoogwater geschat op tussen de 90 en 200 jaar, afhankelijk van de keuze van de statistische rekenmethode en van het gegeven of het hoogwater van 2021 zelf wordt meegenomen in de rekenmethode. Als we ons in deze datasets beperken tot registraties in de zomer zijn de terugkeertijden substantieel groter, meer dan 600 jaar. GRADE, de vigerende methode voor de beoordeling van primaire waterkeringen, lijkt de kans op extreme zomerhoogwaters sterk te onderschatten.

Een complicatie bij het bepalen van de kansen op extremen is dat door klimaatverandering de kans op een extreem zomerhoogwater aan verandering onderhevig is; iets waar in de statistische methoden geen rekening mee wordt gehouden. Dat kan er verder aan bijdragen dat de kans op voorkomen van een dergelijk hoogwater wordt onderschat. De verwachting is namelijk dat extreme neerslag als gevolg van klimaatverandering gaat toenemen.

Aanvullend zijn analyses uitgevoerd naar de kans op de opgetreden golfvorm op basis van de dataset van GRADE. De hoogwaters van 1993 en 1995 zaten respectievelijk bij de 10% meest spitse, en 10% meest stompe afvoergolven. Het hoogwater van 2021 behoort tot de 1% meest spitse golfvormen uit de GRADE-dataset.

### **Samenhang tussen de Maas en het regionale watersysteem (hoofdstuk 5)**

In dit thema zijn analyses uitgevoerd naar het samenvallen van de afvoerpieken van de Maas in relatie tot regionale zijrivieren en de mogelijke impact op waterstanden. De huidige relaties tussen piekafvoeren van de Maas en de corresponderende piekafvoeren van de zijrivieren in Nederland die worden gebruikt voor operationeel beheer en voor de beoordelingen van waterkeringen zijn deterministisch. Dat wil zeggen dat bij een bepaalde piekafvoer van de Maas altijd wordt gerekend met één bijbehorende piekafvoer op de zijrivieren. De voorspellingen van de regressielijnen komen *gemiddeld* goed overeen met historische afvoeren. Voor individuele gevallen zijn de verschillen echter substantieel: vele tientallen m<sup>3</sup>/s.

Verder is geanalyseerd wat het effect kan zijn van het wel/niet samenvallen van piekafvoeren op de waterstanden van de Maas en zijrivieren. Deze effecten zijn het grootst op de zijrivieren nabij de monding. Vooral voor deze locaties is het meenemen van de samenhang tussen beide afvoeren en de onzekerheid daarom van belang voor doeleinden van hoogwaterveiligheid. Hierbij moet rekening gehouden worden met [a] de correlatie tussen piekafvoeren van de Maas en zijrivieren en [b] het samenvallen van de afvoergolven ("timing"). Analyse van de invloed daarvan op hoge waterstanden langs de Maas en langs de zijrivieren kan leiden tot een betere inschatting van herhalingstijden van waterstanden, vooral voor het benedenstroomse deel van de zijrivieren.

### **Beoordeling van waterkeringen Maas (hoofdstuk 6)**

In dit thema zijn enkele onderwerpen aan bod gekomen die relevant zijn voor het beoordelen van waterkeringen langs de Maas. Diverse elementen van het waterstandsverloop zijn relevant voor het (mogelijk) optreden van faalmechanismen bij dijken, zoals de piekwaterstand, de duur van de piekwaterstand en de stijgsnelheid en valsnelheid van de waterstand. De huidige benadering in WBI2017 maakt bij het kwantificeren van de belasting gebruik van een schematisering op basis van de gemiddelde afvoergolf; spitse of stompe golven worden dus niet beschouwd. Bij het onderzoek naar het effect van de golfvorm op topvervlakking blijkt dat deze vereenvoudiging zeer acceptabel is bij het schatten van kansen op extreme waterstanden. Bij de beoordeling van sterkte-mechanismen kan het een ander verhaal zijn. Als de duur van de belasting bepalend is voor falen volstaat het waarschijnlijk niet om met de gemiddelde golfvorm te rekenen.

Vervolgens is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd naar het effect van een 'worst-case' scenario van instromingen uit de zijrivieren op waterstanden benedenstrooms. Een dergelijk scenario heeft een beperkt effect op waterstanden in de Grensmaas (4 tot 8 cm). Benedenstrooms van Roermond kan de waterstandstoename oplopen tot ruim 20 cm.

# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>11</b>
1.1	Aanleiding en opzet van onderzoek	11
1.2	Organisatie en vraagstelling van landelijke beleidstafel	11
1.3	Onderzoeksvragen	11
1.4	Afbakening	13
<b>2</b>	<b>Rivierkundige aspecten</b>	<b>14</b>
2.1	Vergelijking gemodelleerde en gemeten waterstanden	14
2.1.1	Methode	14
2.1.2	Bespreking resultaten WAQUA	15
2.1.3	Bespreking resultaten SOBEK	17
2.1.4	Samenvattende tabel en conclusie	18
2.2	Effect uitgevoerde maatregelen sinds 1993/1995 [A.2]	20
2.2.1	De verschillende programma's met betrekking tot de waterkeringen	20
2.2.2	De verschillende programma's met betrekking tot rivierverruiming	22
2.2.3	Waterstandseffect van waterkeringen en rivierverruiming	25
2.2.4	Conclusies	28
2.3	Het effect van zomervegetatie op opgetreden waterstanden	28
2.3.1	Effect van verschillende kartering in zomer- en wintersituatie	29
2.3.2	Effect van verschillende weerstand van vegetatie in de zomer	32
2.3.3	Conclusies	33
2.4	Effect van de golfvorm op afvoer en waterstanden	34
2.5	Conclusies	37
<b>3</b>	<b>Opgave en oplossingen voor hoogwaterveiligheid van de Maas</b>	<b>40</b>
3.1	Beschouwing rivierverruiming of dijkversterking	40
3.1.1	Vergroting hoogwaterveiligheid door dijkversterking	40
3.1.2	Vergroting hoogwaterveiligheid door rivierverruiming	41
3.1.3	Vergroting hoogwaterveiligheid door retentie	42
3.1.3.1	Retentiegebieden Lateraalkanaal-West en Lob van Gennep conform Maaswerken (POL Zandmaas)	42
3.1.3.2	Retentie tijdens het hoogwater van juli 2021 (Fact Finding, 2021)	42
3.1.3.3	Retentiegebieden ten behoeve van systeemwerking Maas (RWS, 2016)	43
3.1.4	Afweging dijkversterking en rivierverruiming	44
3.1.4.1	Balans tussen rivierverruiming en dijkversterking (ENW advies, 2017)	44
3.1.4.2	Systeemwerking van de Maas	46
3.1.4.3	Adaptieve Uitvoeringsstrategie Maas	46
3.1.4.4	IRM en bouwstenen van de Maas	48
3.1.4.5	Beschouwing op de beleidsmatige koppeling tussen dijkversterking en rivierverruiming	49
3.1.5	Conclusies	50
3.2	Oplossingen voor hoogwaterveiligheid en waterstandseffect van maatregelen	51

3.2.1	Waterstandseffect vergunde maatregelen	51
3.2.2	Waterstandseffect van reeds geplande maatregelen	52
3.2.2.1	Waterstandseffecten BOI2023	52
3.2.2.2	Waterstandseffecten Noordelijke Sector Gemeenschappelijke Maas	54
3.2.2.3	Waterstandseffecten Adaptieve Uitvoeringsstrategie Maas	54
3.2.3	Conclusies	55
<b>4</b>	<b>Afvoerstatistieken van de Maas</b>	<b>56</b>
4.1	Overschrijdingskans van de piekafvoer van juli 2021	56
4.1.1	Analyse van de afvoerstatistiek	57
4.1.2	Terugkeertijd van het hoogwater van 2021	58
4.1.3	Bevindingen uit aanvullend onderzoek	61
4.2	Kans opgetreden golfvorm	63
4.2.1	Golfvormen in de GRADE-dataset	63
4.2.2	Vergelijking historische hoogwaters op golfvormparameters	65
4.3	Synthese op eigenschappen extreme hoogwaters	67
4.4	Conclusies	69
<b>5</b>	<b>Samenhang tussen de Maas en het regionale watersysteem</b>	<b>71</b>
5.1	Samenvallen van afvoergolven van de Maas en regionale zijrivieren	71
5.1.1	Correlaties in piekafvoeren	71
5.1.2	Validatie regressieformuleringen	74
5.2	Hydraulische samenhang tussen de regionale zijrivieren en Maas [D.2]	75
5.3	Conclusies	77
<b>6</b>	<b>Beoordeling van waterkeringen Maas</b>	<b>79</b>
6.1	Belang van de golfvorm in het ontwerpinstrumentarium [E.1]	79
6.1.1	Effect van het waterstandsverloop op de faalkans van een waterkering	79
6.1.2	Parameterrepresentatie van golfvorm en waterstandsverloop	81
6.1.3	Golfvorm als stochast	83
6.1.4	Conclusie	87
6.2	Samenhang met regionale zijrivieren	88
6.3	Conclusies	90
<b>7</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>92</b>
7.1	Conclusies	92
7.2	Aanbevelingen voor vervolgonderzoek	96
<b>8</b>	<b>Referenties</b>	<b>97</b>
	<b>Lijst van begrippen en afkortingen</b>	<b>101</b>
<b>A</b>	<b>Vergelijking metingen en WAQUA</b>	<b>102</b>
A.1	Korte beschrijving van het model waqua-maas-j21_5-v1	102
A.2	Figuren	103
A.2.1	Ongestoorde meetpunten	103
A.2.2	na hoogwater 1995 verplaatste meetpunten	115



A.2.3	Nieuwe Vlaamse meetpunten	118
A.2.4	Nieuwe meetpunten na hoogwater 1995	121
A.3	Analyse	125
A.3.1	Reproductie waterstanden bij ongestoorde meetpunten	125
A.3.2	Reproductie waterstanden bij verplaatste meetpunten	127
A.3.3	Reproductie waterstanden nieuwe Vlaamse meetpunten	128
A.3.4	Reproductie waterstanden nieuwe meetpunten na hoogwater 1995	129
<b>B</b>	<b>Vergelijking metingen en SOBEK [A.1]</b>	<b>131</b>
B.1	Korte beschrijving van het model sobek-maas-j21_5-v1	131
B.2	Figuren	132
B.2.1	Ongestoorde meetpunten	132
B.2.2	na hoogwater 1995 verplaatste meetpunten	140
B.2.3	Nieuwe Vlaamse meetpunten	143
B.2.4	Nieuwe meetpunten na hoogwater 1995	146
B.3	Bespreking resultaten	150
B.3.1	Reproductie waterstanden bij ongestoorde meetpunten	150
B.3.2	Reproductie waterstanden bij verplaatste meetpunten	151
B.3.3	Reproductie waterstanden nieuwe Vlaamse meetpunten	152
B.3.4	Reproductie waterstanden nieuwe meetpunten na hoogwater 1995	153
<b>C</b>	<b>Effect van uitgevoerde maatregelen</b>	<b>155</b>
C.1	Overzicht WAQUA-modellen	155
C.2	Effect van individuele ingrepen langs de Maas	155
<b>D</b>	<b>Effect zomerbedruwheid</b>	<b>158</b>
D.1	Parameters voor zomervegetatie	158
<b>E</b>	<b>Analyse topvervlakking</b>	<b>160</b>
E.1	Voorbeelden tijdreeks topvervlakking op de piekwaterstanden	160
<b>F</b>	<b>Argumentatie voor rivierverruiming</b>	<b>162</b>
<b>G</b>	<b>Afvoerstatistiek Maas en regionale zijrivieren</b>	<b>165</b>
G.1	Onzekerheden in afvoerstatistiek Maas	165
G.2	Beschrijving methode zijdelingse instromingen voor hydraulische modellen	166
G.3	Waterstandsverhoging per m <sup>3</sup> /s	168
G.4	Vergelijking van afvoergolven Maas en zijrivieren	168
G.4.1	Geul	169
G.4.2	Geleenbeek	171
G.4.3	Roer	173
G.4.4	Neerbeek	175
G.4.5	Niers	177
G.4.6	Dommel	179
G.4.7	Aa	181
G.5	Validatie regressieformuleringen op historische afvoergolven	182

<b>H</b>	<b>Analyse golfvormen</b>	<b>185</b>
H.1	Parameters waterstandsverloop	185
H.2	Parameters golfvormen	186
H.3	Relatie golfvorm en waterstandsverloop	187
H.4	Lineaire benadering	191
<b>I</b>	<b>Analyse golfvorm als stochast</b>	<b>193</b>
I.1	Methode	193
I.1.1	Overzicht	193
I.1.2	Statistiek van piekafvoeren golfvormen	194
I.1.3	Combinaties van piekafvoeren en golfvormen.	194
I.1.4	Topvervlakking	195
I.1.5	Waterstands-afvoer (Q-h) relaties	196
I.2	Verklaring van de belangrijkste conclusies	197
I.3	Gevoeligheidsanalyse en discussie	202

# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding en opzet van onderzoek

In juli 2021 leidde een grote hoeveelheid neerslag tot regionale overstromingen en grote wateroverlast in Limburg en in delen van Duitsland, België en Luxemburg. Het betrof een extreme en uitzonderlijke gebeurtenis met grote maatschappelijke gevolgen. Om te leren van de opgetreden situatie in Limburg en om ook op andere locaties in Nederland beter voorbereid te zijn op de gevolgen van een periode van extreme neerslag heeft de minister van Infrastructuur en Waterstaat met betrokken partijen het initiatief genomen voor de “Beleidstafel wateroverlast en hoogwater”. In het kader van deze beleidstafel worden adviezen geformuleerd aan de Tweede Kamer. De beleidstafel kent meerdere sporen. Vanuit ‘spoor 5’ (Maas en Waterveiligheid) van de beleidstafel zijn diverse onderzoeksvragen opgesteld, waarvan de antwoorden bijdragen aan voornoemde adviezen. Een deel van deze vragen is onderzocht door Deltares met medewerking van Agtersloot Hydraulisch Advies. Hiertoe onderhavige rapport beschrijft het onderzoek en de belangrijkste uitkomsten.

## 1.2 Organisatie en vraagstelling van landelijke beleidstafel

Op het landelijk niveau is naar aanleiding van het hoogwater een beleidstafel wateroverlast en hoogwater ingericht in oktober 2021 (Visser, 2021). Binnen deze beleidstafel zijn 7 sporen gedefinieerd:

- Spoor 1: Evaluatie van het regionale watersysteem (getrokken door PL en WL)
- Spoor 2: Klimaatrobuuste herstelmaatregelen Limburg (getrokken door WRL, PL en WL)
- Spoor 3: Extreme neerslag en functies, ofwel wat zou er zijn gebeurd als deze bui elders in Nederland zou zijn gevallen (getrokken door Staf DC)
- Spoor 4: Klimaatadaptatiebeleid nationaal (getrokken door DGWB)
- Spoor 5: Systeemwerking Maas en waterveiligheid (getrokken door IenW en DP Maas)
- Spoor 6: Internationaal (getrokken door IenW)
- Spoor 7: Klimaatbewustzijn (getrokken door UvW)

De beleidstafel is een jaar operationeel. De beleidstafel loopt officieel af in oktober 2022. Een eerste advies van de beleidstafel is gepubliceerd in maart 2022 (I&W, 2022). In de begeleidende brief aan de Tweede Kamer (Harbers, 2022) wordt gemeld dat het eindadvies naar verwachting “aan het eind van 2022” met de kamer gedeeld kan worden.

Binnen spoor 5 “*systeemwerking Maas en waterveiligheid*” wordt geëvalueerd wat we kunnen leren van het hoogwater van juli 2021 in relatie tot (1) de beleidslijn grote rivieren, (2) de prioritering van dijkversterkingstrajecten, en (3) de hydraulische modellen, afvoerstatistiek van de Maas en kans op het samenvallen met piekafvoeren op de zijrivieren in Limburg, mogelijke maatregelen en systeemwerking op en langs de Maas. Dit rapport beschrijft een verdiepend onderzoek van onderdeel (3).

## 1.3 Onderzoeksvragen

In het onderzoek staan de volgende onderzoeksvragen centraal:

### **A. Rivierkundige effecten** (hoofdstuk 2)

1. Kunnen de huidige modellen de waterstanden van juli 2021 reproduceren? Kunnen de verschillen worden verklaard?
2. Wat is het waterstandseffect van de uitgevoerde dijkversterking en rivierverruiming sinds 1993/1995? Kan het hydraulisch modelinstrumentarium<sup>1</sup> het effect van de uitgevoerde maatregelen voldoende nauwkeurig berekenen?
3. Wat is het effect van (zomer)vegetatie op de opgetreden waterstanden?
4. Wat is het effect van variatie in golfvorm op de afvoer en waterstanden?

### **B. Oplossingen voor hoogwaterveiligheid van de Maas** (hoofdstuk 3)

1. Hoe kun je hoogwaterveiligheid realiseren met dijkversterking en rivierverruiming? Hoe kan retentiewerking bijdragen aan de hoogwaterveiligheid?
2. Wat is het verwachte waterstandsverlagende effect van vergunde maatregelen? Wat is het effect van reeds geplande maar nog niet vergunde of gerealiseerde maatregelen?

### **C. Afvoerstatistieken van de Maas** (hoofdstuk 4)

1. Wat is de kans behorend bij de opgetreden afvoeren van juli 2021; voor het hele jaar én voor het zomerhalfjaar? Hoe verschilt deze kans voor verschillende locaties langs de Maas ten gevolge van de instromende zijrivieren en de topvervlakking?
2. Wat is de kans van de opgetreden golfvorm?
3. Bij welke omstandigheden (neerslag, smeltwater, etc.) worden extreme hoogwaters (hoger dan juli 2021) verwacht? Hoe zien golfvormen er in deze scenario's uit?

### **D. Samenhang tussen de Maas en het regionale watersysteem** (hoofdstuk 5)

1. Hoe groot is de kans dat een hoge afvoer vanuit de zijrivieren / het regionale watersysteem samenvalt met een hoge Maasafvoer?
2. Hoe is de hydraulische samenhang tussen de regionale zijrivieren en de Maas? Zou dit integraal gemodelleerd moeten worden?

### **E. Methode van beoordeling van waterkeringen Maas (en regionale zijrivieren)**

(hoofdstuk 6)

1. Zou de golfvorm als variabele parameter in het ontwerp- en beoordelingsinstrumentarium moeten worden meegenomen? Hoe draagt de lengte en steilheid (kop en staart) van de golfvorm bij aan de individuele componenten van de overstromingskans?
2. Hoe wordt de samenhang tussen de regionale zijrivieren en de Maas meegenomen in de beoordeling van de waterkeringen? Wat is de invloed van afvoeren van regionale zijrivieren op waterstanden langs de Maas en wat is de invloed van de afvoer van de Maas op waterstanden langs de regionale zijrivieren?. Is er aanleiding om deze samenhang anders mee te nemen in de beoordeling van de waterkeringen?

---

<sup>1</sup> In de scope van dit advies wordt (met name) gebruik gemaakt van de modellen van de 'vijfde generatie' in WAQUA, omdat deze modellen ten grondslag liggen aan recente maatregelbeoordeling en toetsingsopgaven. De 'zesde generatie' D-Hydro modellen zijn nog in ontwikkeling.

## 1.4 Afbakening

Dit rapport is onderdeel van spoor 5 van de beleidstafel wateroverlast en hoogwater. Spoor 5 gaat over de Maas; analyses voor het regionale watersysteem worden uitgevoerd in spoor 1 en 2. In dit rapport komen de regionale watersystemen daarom alleen aan bod waar het de samenhang met de Maas betreft.

De studie is afgebakend op de onderzoeksvragen die zijn vastgesteld in overleg met de opdrachtgever bij aanvang van het project (zie paragraaf 1.3). Waar met weinig inspanning waardevolle verbreding wordt verkregen, zijn aanvullende vragen opgepakt.

De studie vindt parallel plaats aan diverse andere onderzoeksporen, waaronder ook andere sporen van de Beleidstafel. Op specifieke deelvragen kan besloten worden geen diepgaand onderzoek te doen omdat dit al in een andere studie belegd is. De inzichten en geplande acties vanuit die studie worden dan in dit project besproken.

## 2 Rivierkundige aspecten

In dit hoofdstuk staan de volgende vraagstukken centraal:

A.1	Kunnen de huidige modellen de waterstanden van juli 2021 reproduceren? Kunnen de verschillen worden verklaard?
A.2	Wat is het waterstandseffect van de uitgevoerde maatregelen sinds 1993/1995? Kan het model het effect van de uitgevoerde maatregelen voldoende berekenen?
A.3	Wat is het effect van (zomer)vegetatie op de opgetreden waterstanden?
A.4	Wat is het effect van variatie in golfvorm op de afvoer en waterstanden?

### 2.1 Vergelijking gemodelleerde en gemeten waterstanden

In deze paragraaf staat de volgende vraag centraal:

*Kunnen de huidige modellen de waterstanden van juli 2021 reproduceren? Kunnen de verschillen worden verklaard?*

De methode om deze vraag te beantwoorden wordt geïntroduceerd in sectie 2.1.1. Vervolgens volgt een analyse waarbij de waterstandsmetingen van alle beschikbare meetstations worden vergeleken met de berekende waterstanden. De vergelijking met de waterstanden die zijn berekend met het 2D instrumentarium WAQUA is te vinden in sectie 2.1.2 en de vergelijking met de waterstanden die zijn berekend met het 1D instrumentarium SOBEK is te vinden in sectie 2.1.3.

#### 2.1.1 Methode

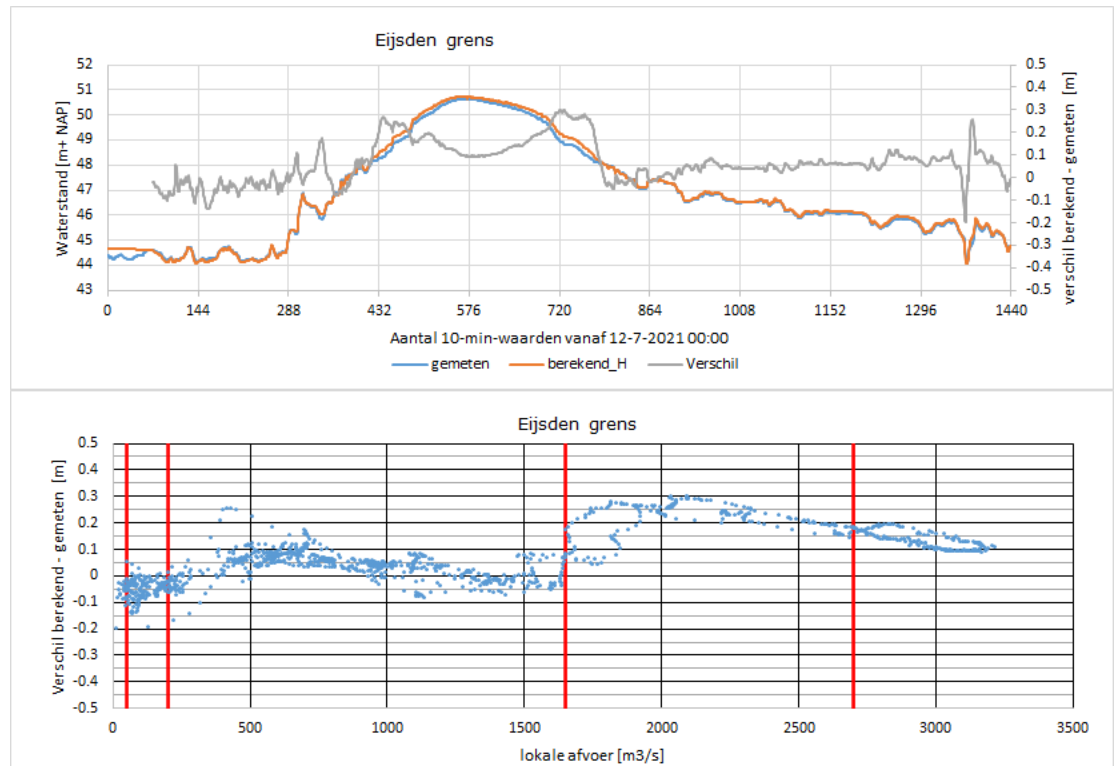
Voor de vraag of de bestaande modellen de waterstanden die zijn gemeten tijdens het hoogwater van 2021 kunnen reproduceren zijn de 21 formele meetpunten langs de Maas beschouwd. De gemeten (piek)waterstanden worden vergeleken met de berekende (piek) waterstanden. De modellen waarmee de waterstanden worden berekend zijn het 2D-model WAQUA en het 1D-model SOBEK.

Voor de randvoorwaarden (afvoer bij Eijsden, toestroming uit zijrivieren) die invoer zijn voor de hydraulische modellen is gebruik gemaakt van de resultaten uit een studie naar de piekafvoer op de Maas tijdens het hoogwater (Van der Veen e.a., 2021b). In de studie is met behulp van WAQUA-simulaties gekeken welke opgelegde afvoerreeks bij Eijsden leidt tot de gemeten afvoerreeks bij St. Pieter. Ook de berekende afvoeren op enkele andere locaties (Venlo, Megen) zijn vergeleken met gemeten afvoeren. De afgeleide afvoerreeks bij Eijsden is gebruikt in de hydraulische modellen om hiermee de waterstanden in de meetpunten te kunnen berekenen.

Figuur 2.1 geeft ter illustratie het resultaat van de vergelijking tussen gemeten en met WAQUA berekende waterstanden. In de bovenste deelfiguur worden de tijdreeksen van gemeten en berekende waterstanden vergeleken en wordt het verschil van berekende minus gemeten waterstanden weergegeven over de periode 12-7-2021 tot 22-7-2021.

In de onderste deelfiguur wordt het verschil berekende minus gemeten waterstanden uitgezet tegenover de lokale afvoer.

De verticale lijnen geven de afvoeren weer waarop de modellen gekalibreerd zijn en hebben de beschrijving “extreem laag”, “laag”, “midden” en “hoog” (van links naar rechts). Nabij deze kalibratieafvoeren zou het verschil *berekend* minus *gemeten* minimaal moeten zijn. Deze niveaus worden gebruikt om verschillende condities te onderscheiden en zijn bovendien vaak knikpunten in de prestaties van de modellen. Voor het hoogwater van 2021 is in het bijzonder aandacht voor het extrapolatiebereik. De piekafvoer van dit hoogwater (circa 3.310 m<sup>3</sup>/s) lag immers ruim boven de hoogste afvoer (circa 3.100 m<sup>3</sup>/s) die is gebruikt voor de modelkalibratie.



Figuur 2.1 Vergelijking tussen gemeten en gemodelleerde waterstanden. Boven: tijdserie van het hoogwater. Onder: verschil tussen meting en modeluitvoer, uitgezet tegen de lokale afvoer, met markeringen voor de afvoeren waarop de modellen gekalibreerd zijn.

Een aandachtspunt bij meetpunten langs de Maas is dat deze niet allemaal dezelfde geschiedenis hebben. Sommige meetpunten zijn qua ligging sinds 1993 ongewijzigd, sommige meetpunten bestonden al in 1993 maar zijn daarna verplaatst en weer andere meetpunten zijn pas na 1995 in gebruik genomen. De hydraulische modellen zijn gekalibreerd op metingen in de meetpunten die bestonden in 1993 en 1995, en van die meetpunten kan worden verwacht dat de resultaten het beste zullen overeenstemmen met de gemeten waterstanden van juli 2021. Voor nieuwe/tussenliggende punten is de verwachting dat de verschillen groter zullen zijn. Het hoogwater van 2021 biedt wel mogelijkheden om de modellen opnieuw op actuele gegevens te kalibreren op alle nu beschikbare meetpunten.

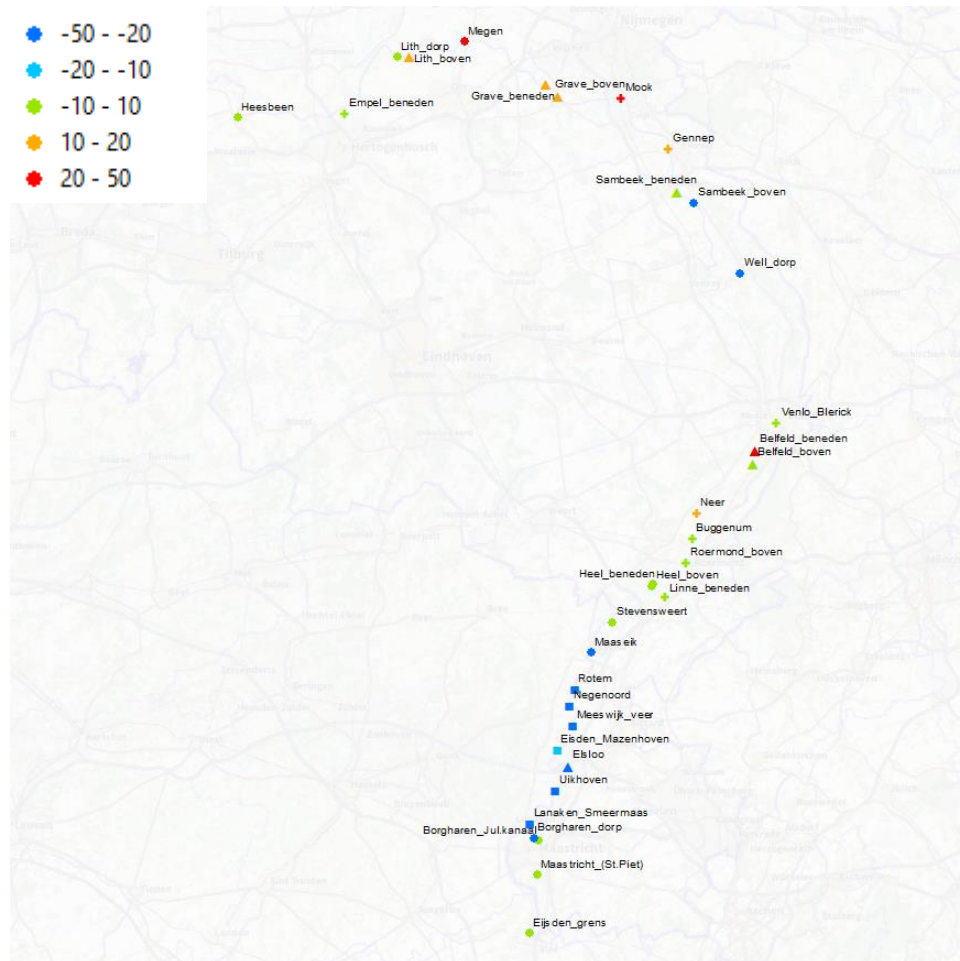
### 2.1.2 Bespreking resultaten WAQUA

In deze paragraaf worden de WAQUA-resultaten besproken. Voor de vergelijking wordt gebruik gemaakt van het model waqua-maas-j21\_5-v1 (Van der Veen et al., 2021). De opbouw en kalibratie van dit model staat beschreven in Bijlage A.1. Het model geeft een goede weergave van de geometrische situatie zoals deze in de zomer van 2021 daadwerkelijk aanwezig was.

Voor een simulatie van het hoogwater van juli 2021 is dit het meest actuele model wat beschikbaar is. Het model bevat een aanname van de vegetatie gebaseerd op de wintersituatie.

Een volledig overzicht van de vergelijking van de gemeten en berekende waterstanden inclusief alle figuren is opgenomen in Bijlage A.2 Bijlage A.3 bevat een synthese van deze vergelijkingen. Vanwege het vele materiaal is besloten enkel de hoofdlijnen in deze paragraaf samen te vatten. Aan lezers die gebruik maken van deze modellen, wordt aanbevolen om ook de bijlagen te lezen.

In de onderstaande figuur is de ligging van de meetpunten opgenomen in combinatie met het berekende verschil (WAQUA t.o.v. meting) van de piekwaterstand. Blauw betekent een te laag berekende waterstand, rood een te hoog berekende waterstand.



*Figuur 2.2 HW2021, verschil in maximale waterstand (cm), WAQUA t.o.v. meting, alle meetpunten. De symbolen hebben de volgende betekenis: oorspronkelijke meetpunten (rond), verplaatste meetpunten (driehoek), nieuwe meetpunten (plusteken) en Vlaamse meetpunten (vierkant).*

Enkele inzichten uit de validatie worden hier gedeeld. Omdat over het algemeen het model de metingen voldoende benadert (verschillen minder dan 20 cm) wordt hier vooral ingegaan op locaties waar het model bij de afvoerpiek afwijkt van de metingen en waarbij mogelijke suggesties worden gedaan om dit te verklaren.

- Het berekende verval over stuw Borgharen (berekend met het verschil in gemodelleerde waterstanden tussen meetpunten Borgharen-Julianakanaal en Borgharen-dorp) is ca. 20 cm groter dan het gemeten verval.



- Bij station Elsloo is de berekende waterstand circa 40 cm te laag. Mogelijk komt dit mede door bestorting in het zomerbed in de bocht Elsloo/Meers die in de modellering mogelijk onvoldoende nauwkeurig/gedetailleerd zit opgenomen. Hierdoor is in dit traject de ruwheid van het zomerbed te laag.
- Bij station Meeswijk-veer zijn de berekende waterstanden 46 cm te laag; dit suggereert dat de kalibratie op het langere traject (Elsloo – Grevenbicht) hier niet geldig is.
- Bij meetpunt Rotem zijn de berekende waterstanden 30 cm te laag. Dit kan veroorzaakt worden doordat maatregel Koeweide in uitvoering is. Voor een goede modellering is het nodig de precieze status van de maatregel in het model te verwerken.
- Bij meetpunt Maaseik is de berekende waterstand 28 cm te laag. Mogelijk wordt dit veroorzaakt door de afvoerverdeling tussen de Maas en de stroombaan via de Oude Maas. Mogelijk overschat het model de afvoer via de Oude Maas. Helaas ontbreken de metingen om dit te controleren.
- Bij meetpunt Heel-beneden zijn grote afwijkingen in het golffront. Dit is een indicatie dat het instromen van bergingsgebieden (zoals retentiegebieden) op een ander moment plaatsvindt dan aangenomen in het model.
- Bij het nieuwe station Neer zijn de berekende waterstanden 17 cm te hoog; bij Belfeld-beneden zijn de berekende waterstanden 22 cm te hoog.
- De afwijkingen zijn minder dan 10 cm bij Linne-Beneden, Roermond-Boven, Buggenum, Belfeld-Boven en Venlo, ondanks het feit dat deze stations niet gekalibreerd zijn.
- Bij Well zijn de berekende waterstanden ca. 30 cm te laag. Berekeningen tonen aan dat dit niet veroorzaakt wordt door het niet volledig strijken van stuw Sambeek. In eerste instantie leek de ruwere zomervegetatie het ook onvoldoende te verklaren, maar nieuwe berekeningen van Van Dongen (2022) geven aan dat hier mogelijk toch de verklaring gezocht kan worden. (zie sectie 2.3).
- Bij station Mook is het maximale verschil tijdens de hele periode 60 cm, waarschijnlijk veroorzaakt door vegetatie in het winterbed die niet in het model is opgenomen. Het verschil in de piekwaterstand is 35 cm.

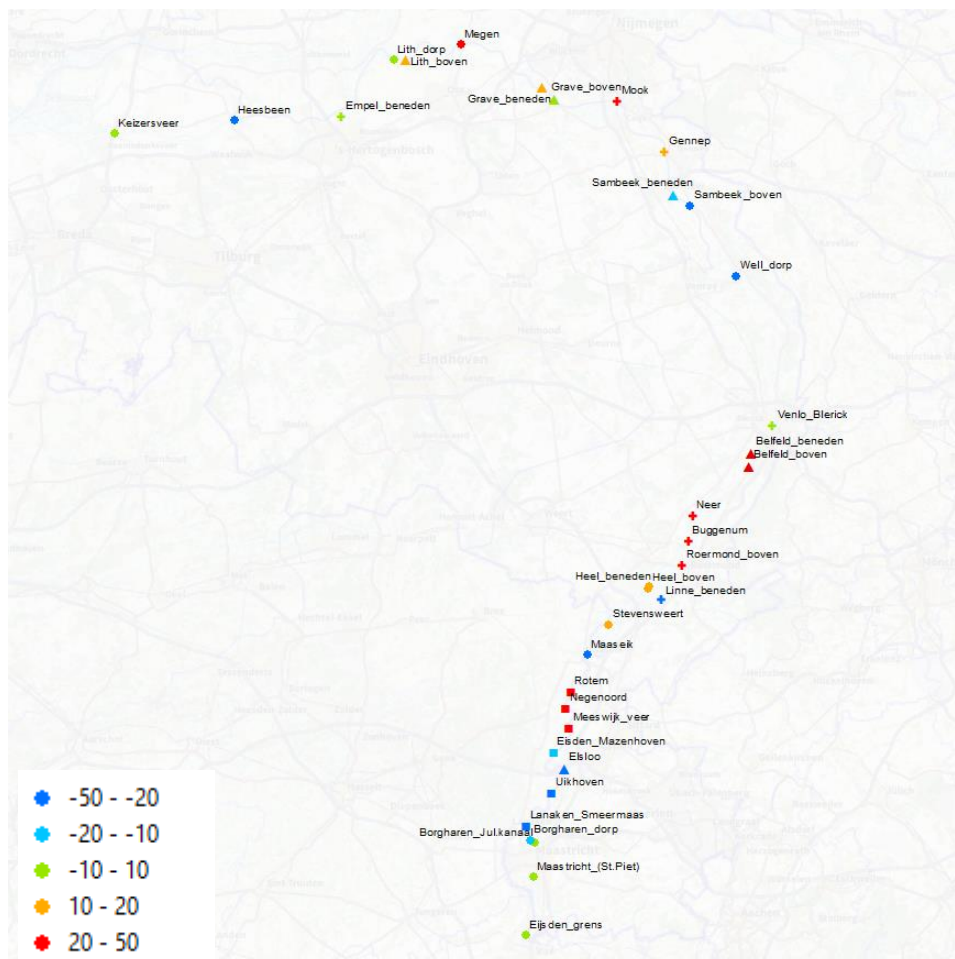
Geconcludeerd wordt dat WAQUA over het algemeen redelijke resultaten geeft met een afwijkingen van maximaal enkele decimeters. Er zijn hypothesen en suggesties geformuleerd om de modellering van deze stations te verbeteren.

### 2.1.3 Bespreking resultaten SOBEK

In deze paragraaf worden de SOBEK-resultaten besproken. Voor de toetsing van het SOBEK-model wordt gebruik gemaakt van het model sobek-maas-j21\_5-v1 (Van der Veen et al., 2021). De opbouw en kalibratie van dit model staat beschreven in Bijlage B.1. Een volledig overzicht inclusief alle figuren is opgenomen in Bijlage B.2. Bijlage B.3 bevat ook een synthese van de resultaten. Vanwege het vele materiaal is besloten enkel de hoofdlijnen in deze paragraaf samen te vatten. Aan lezers die gebruik maken van deze modellen, wordt aanbevolen om ook de bijlagen te lezen.

Er wordt hier niet nogmaals ingegaan op alle individuele stations. Voor een groot deel zou dat een herhaling zijn van de analyse van WAQUA. Over het algemeen zijn de afwijkingen in SOBEK iets groter. Dat is ook de verwachting voor een 1D model waarin de geometrie minder nauwkeurig beschreven kan worden. Zeker bij een spits hoogwater als in juli 2021 is het lastig om met een 1D model het mee stromen van de uiterwaarden goed mee te nemen, zowel in de timing als in de hoeveelheid afvoer.

In de onderstaande figuur is de ligging van de meetpunten opgenomen in combinatie met het berekende verschil (SOBEK t.o.v. meting) van de piekwaterstand. Blauw betekent een te laag berekende waterstand, rood een te hoog berekende waterstand.



Figuur 2.3. HW2021, verschil in maximale waterstand (cm), SOBEK t.o.v. meting, alle meetpunten. De symbolen hebben de volgende betekenis: oorspronkelijke meetpunten (rond), verplaatste meetpunten (driehoek), nieuwe meetpunten (plusteken) en Vlaamse meetpunten (vierkant).

#### 2.1.4 Samenvattende tabel en conclusie

De verschillen tussen de gemeten waterstanden en de berekende (WAQUA en SOBEK) waterstanden is samengevat in onderstaande tabel. Wat in deze tabel opvalt is dat op het traject rkm 39 – 45 WAQUA te lage waterstanden berekent, terwijl SOBEK juist te hoge waterstanden berekent. Een verklaring hiervoor kan zijn dat de aanwezige rivierverruiming in dit traject in het SOBEK model onvoldoende nauwkeurig is meegenomen, waardoor de waterstanden te hoog uitvallen. Daarnaast heeft de in het veld aanwezige vegetatie, die niet/deels in de modellen is opgenomen, invloed gehad op de waterstanden (zie paragraaf 2.3).

Tabel 2.1 Vergelijking verschillen tussen berekende en gemeten waterstanden

Meetpunten	Locatie (rkm)	Verschil 'berekend – gemeten' (cm)	
		WAQUA	SOBEK
Eijsden grens	2.560	10	-4
St. Pieter-noord	10.800	1	-5
Borgharen JK	15.250	-7	-2
Borgharen dorp	16.000	-21	-11
Lanaken-Smeermaas (HIC)	18.300	-28	-22
Uikhoven (HIC)	25.250	-52	-26
Elsloo	29.325	-42	-72
Eisden-Mazenhoven (HIC)	34.760	-11	-14
Meeswijk veer (HIC)	38.930	-46	38
Negenoord (HIC)	42.500	-34	36
Rotem Maas (HIC)	44.900	-30	29
Maaseik	52.720	-28	-35
Stevensweert	61.570	-9	20
Heel boven	67.300	6	17
Linne beneden	70.400	9	-33
Roermond boven	79.750	2	26
Heel beneden	85.075	8	17
Buggenum	85.770	9	36
Neer	90.120	17	46
Belfeld boven	100.750	0	21
Belfeld beneden	102.695	22	33
Venlo	107.470	0	7
Well dorp	132.100	-23	-26
Sambeek boven	144.960	-22	-42
Sambeek beneden	147.700	-8	-14
Gennep	155.100	18	20
Mook	165.800	35	33
Grave boven	174.620	12	-5
Grave beneden	177.000	18	20
Megen dorp	190.750	27	30
Lith boven	200.695	15	14
Lith dorp	202.370	1	5
Empel-beneden	215.400	8	0
Heesbeen	230.610	-8	-26
Keizersveer	247.600	2	0

*Gebaseerd op de bovenstaande tabel luidt het antwoord op de centrale vraag dan ook dat de modellen met een redelijke mate van exactheid de gemeten waterstanden kunnen reproduceren. De WAQUA resultaten zijn hierbij beter dan de SOBEK resultaten.*

Verder is gekeken naar de waterstandsverschillen in de verschillende typen meetpunten. Deze beoordeling is voor zowel WAQUA als SOBEK opgenomen in Tabel 2.2. De variantie van de fout voor ongestoorde meetpunten is, zoals verwacht, kleiner dan voor verplaatste meetpunten. Daarentegen ligt de gemiddelde waarde van de modelwaterstanden van verplaatste meetpunten dichter bij de metingen dan voor de ongestoorde meetpunten het geval is.

Anders gezegd: bij de verplaatste meetpunten is de 'bias' kleiner dan voor de onverstoorde meetpunten. Verder is duidelijk dat de variantie bij SOBEK groter is dan bij WAQUA, wat het gevolg is van de grotere uitschieters die in de SOBEK-resultaten zitten.

Tabel 2.2. Analyse van verschillen per type meetpunt.

Meetpunten typering	WAQUA verschil t.o.v. meting (cm)		SOBEK verschil t.o.v. meting (cm)	
	Gemiddelde	Variatie	Gemiddelde	Variatie
Ongestoord	-5	15	-4	21
Verplaatst	2	21	0	33
Nieuw	12	10	17	24
Vlaams	-34	13	7	28

## 2.2 Effect uitgevoerde maatregelen sinds 1993/1995 [A.2]

In deze paragraaf staat de volgende vraag centraal:

*Wat is het waterstandseffect van de uitgevoerde maatregelen sinds 1993/1995? Kan het model het effect van de uitgevoerde maatregelen voldoende berekenen?*

Na de hoogwaters op de Maas in 1993 en 1995 zijn verschillende maatregelen genomen om de hoogwaterveiligheid te vergroten. Het gaat hierbij om de aanleg (en later verbetering) van waterkeringen (sectie 2.2.1), en om de uitvoering van rivierverruimende ingrepen (sectie 2.2.2). In deze paragraaf worden de verschillende maatregelen op hoofdlijnen besproken en het totale effect van de maatregelen wordt voor verschillende momenten tijdens de uitvoering getoond en besproken. Ten slotte is modelmatig uitgerekend wat het totale waterstandseffect sinds 1993 is geweest (sectie 2.2.3).

### 2.2.1 De verschillende programma's met betrekking tot de waterkeringen

In deze paragraaf worden de verschillende programma's besproken die betrekking hebben op de waterkeringen. Deze programma's lopen deels parallel in de tijd, waardoor de normen waaraan de waterkeringen moeten voldoen niet altijd hetzelfde zijn. In de praktijk blijkt dit nogal eens tot spraakverwarring te leiden en daarom wordt hier een kort overzicht gegeven.

#### DGR-kaden (1995 – 2005)

Aanleg waterkeringen conform de Deltawet Grote Rivieren (DGR-kaden) langs de Limburgse Maas. De keringen werden ontworpen met een 1/50 norm conform de commissie Boertien (Wijbenga et al., 1993). De hoogte van de waterkering werd bepaald door de maximale waterstand van een 1/50 hoogwatergolf (maximale afvoer hoort van circa 2.700 m<sup>3</sup>/s bij Borgharen) en een waakhoogte van 50 cm. De meeste waterkeringen zijn aangelegd tussen 1995 en 1997, op enkele locaties duurde het tot 2005 voordat de waterkeringen aanwezig waren.

Vermeldingswaardig is nog dat in 2001 nieuwe hydraulische randvoorwaarden (de HR2001) zijn vastgesteld. Bij deze randvoorwaarden horen een 1/250 ontwerphoogwatergolf met een maximale afvoer van 3.275 m<sup>3</sup>/s en een 1/1250 ontwerphoogwatergolf met een maximale afvoer van 3.800 m<sup>3</sup>/s. Voor de DGR-kaden (aangelegd tussen 1995 en 1997) hebben deze randvoorwaarden geen betekenis, voor de latere programma's wel zoals beschreven in de navolgende alinea's.

#### RVG-kaden (2005 – 2012)

In 1997 was een groot deel van de dorpen langs de Limburgse Maas beschermd tegen overstromingen met een kans van 1/50 per jaar.

Door de minister van Waterstaat was al in 1995 beloofd dat bewoners voor 2005 beschermd zouden zijn tegen overstromingen met een kans van voorkomen van 1/250 jaar. In 1997 bleek het niet mogelijk om met de beschikbare budgetten met alleen rivierverruiming deze overstromingskansen te realiseren. Om toch zoveel mogelijk bewoners te beschermen werd in 1998 afgesproken dat de grote steden langs de Maas (Roermond, Venlo en Gennepe; kortweg RVG) op korte termijn beschermd moesten worden met waterkeringen die voldoen aan de 1/250 norm. Later werden ook de kernen Mook en Middelaar toegevoegd aan dit RVG-programma. Ontwerp van de RVG-kaden gebeurde tussen 1998 en 2000 waarbij alvast rekening werd gehouden met de nieuwe hydraulische randvoorwaarden, HR2001. De aanleg van de RVG-kaden begon in 2005 en werd in 2012 afgerond.

Vermeldingswaardig is dat tot 2005 de waterkeringen in Limburg een aparte status hadden en daarom 'kaden' heetten in plaats van dijken. In 2005 werden alle Limburgse waterkeringen opgenomen in de Waterwet en kregen ze de formele status van dijken (primaire keringen). Dit had consequenties voor de eisen waaraan de waterkeringen vanaf dat moment moeten voldoen. Voor de oude kaden golden (en gelden) de normen van Maaswerken. Voor waterkeringen waar nog geen Maaswerken-ontwerp voor was vastgesteld golden de normen van de Waterwet, en die waren zwaarder dan de normen van Maaswerken. Dat betekende dat na 2006, bij de toetsing van waterkeringen in de periode 2006-2011, keringen aan die normen getoetst werden. De HR2006 zijn nagenoeg gelijk aan de HR2001 en komen voor de Maas overeen met de getallen van Maaswerken. Doel was om de lopende projecten Ruimte voor de Rivier en Maaswerken, niet voor de voeten te lopen. In 2017, bij de vaststelling van de WBI2017, zijn de normen nog weer strenger geworden.

#### Maaswerken-kaden (2010 – 2020)

Vanaf ongeveer 2010 werd gewerkt aan de realisatie van kaden die, aanvullend aan de RVG-kaden, in het kader van het programma Maaswerken werden aangelegd. Deze kaden worden ook wel 'Sluitstukkaden' (SSK) genoemd omdat ze aanvullend zijn op de rivierverruiming van het programma Maaswerken en hiermee het sluitstuk zijn van het programma om dorpen langs de Limburgse Maas te beschermen tegen overstromingen. Uitvoering van dit onderdeel geschiedde deels door Maaswerken en Waterschap Limburg (Roosteren, Aasterberg, Merum, Stevensweert, Neer, Grubbenvorst, Lottum, Bergen-Aijen, Afferden, Mook), deels in opdracht van Consortium Grensmaas (Geulle a/d Maas, Meers-Maasband, Nattenhoven, Grevenbicht).

Typerend is dat nog altijd gesproken wordt over kaden, terwijl het sinds 2005 formeel gaat om dijken. Deze kaden werden aangelegd conform de kaders van Maaswerken en niet conform de kaders van de Waterwet (HR2006) of het WBI2017 (zie sectie 2.2.2). Dit heeft onder meer te maken met het feit dat de Maaswerken-kaden (evenals de RVG-kaden) in de meest extreme situaties (een hoogwater met een kans van 1/1250 of extremer) moeten kunnen overstromen om te voorkomen dat, als gevolg van de Maaswerken, op de bedijkte Maas een verhoging van waterstanden kan optreden. De Waterwet voorziet niet in verplicht overstroombare waterkeringen. Maar omdat de instroming alleen bij (voor Limburg) bovenmaatgevende hoogwaters kan optreden, is het concept niet strijdig met de Waterwet 2005. Immers boven de norm mag de kering falen (en instromen is een faalmechanisme). Rond 2012 werd duidelijk dat Maaswerken en het Waterschap niet op tijd klaar zouden zijn met de Sluitstukkaden. Er werden prioriteiten gesteld en wat niet prioritair was werd overgedragen aan een nieuw programma dat de hoogwaterveiligheid moest realiseren (HWBP, zie de volgende sectie). Voor de overgedragen trajecten gold dat er nog geen vastgesteld ontwerp lag.

#### HWBP-waterkeringen (2017 – 2050)

Sinds 1 januari 2017 is een nieuwe normering van kracht met een nieuw instrumentarium om waterkeringen te beoordelen, het Wettelijk BeoordelingsInstrumentarium (WBI2017).

Het WBI2017 bestaat uit de regeling Veiligheid primaire keringen 2017, de toelichting en 3 bijlagen. In de bijlagen wordt de procedure voor de beoordeling beschreven, de methode om de hydraulische belastingen af te leiden en de rekenregels die moeten worden gebruikt. Dijkversterking of dijkverbetering valt vanaf 2017 onder het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP), wat zelf weer onderdeel is van het Deltaprogramma Rivieren, klimaatopgave hoogwaterveiligheid 2050/2100. Het Deltaprogramma Rivieren combineert klimaatadaptieve rivierverruimende maatregelen gericht op waterstandsverlaging met traditionele waterkeringsmaatregelen gericht op het keren van extreem hoogwater. Vanaf 2023 zal het WBI2017 opgaan in het BOI, het Beoordelings- en OntwerpInstrumentarium.

De nieuwe normen (ondergrenzen) waaraan Limburgse waterkeringen moeten voldoen zijn:

- 39 trajecten met 1:100 ondergrens;
- 6 trajecten met 1:300 ondergrens (o.a. Gennep, Venlo, Meers);
- 1 traject met 1:1.000 ondergrens (Maastricht);
- 1 traject met 1:3.000 ondergrens (Molenhoek; overlap met Gelderland).

Voor vijf dijktrajecten langs de Limburgse Maas (Beegden, Buggenum, Beesel, Belfeld en Arcen) zijn na 2017 ontwerpen gemaakt en deels vastgesteld conform de HWBP-uitgangspunten. De dijktrajecten Beegden en Beesel zijn in 2021 in uitvoering genomen en deze trajecten zullen in de loop van 2022/2023 definitief worden opgeleverd. Naast de vijf genoemde dijktrajecten wordt voor nog twaalf dijktrajecten een ontwerpproces doorlopen voor de uitwerking van de dijkversterking ([Dijkversterkingen en dijkverleggingen in Limburg - Waterschap Limburg](#))

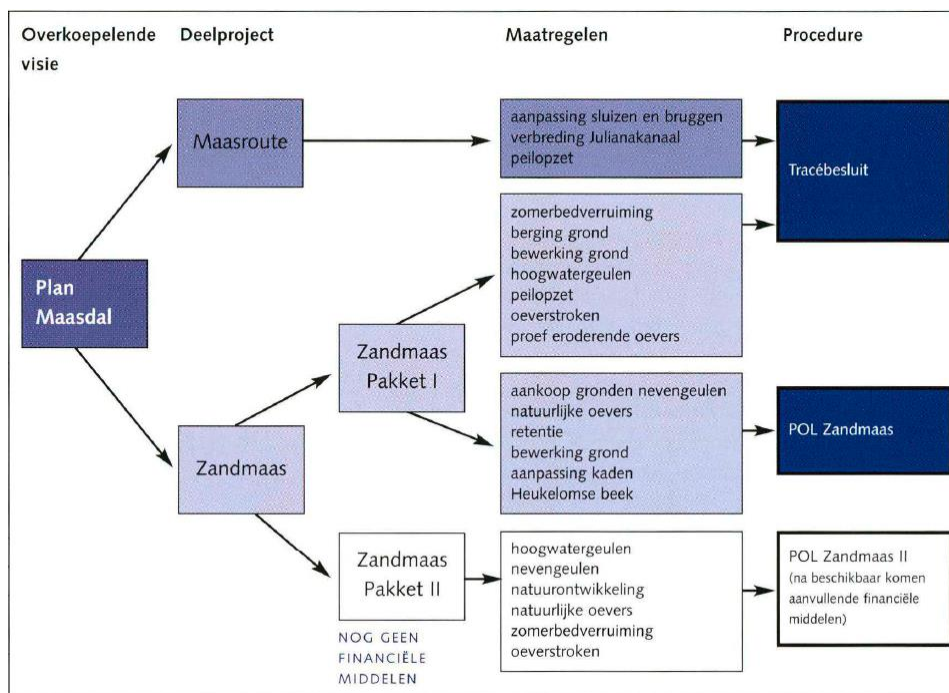
### **2.2.2 De verschillende programma's met betrekking tot rivierverruiming**

In deze paragraaf worden de verschillende programma's besproken die betrekking hebben op de rivierverruiming. Deze programma's kunnen betrekking hebben op verschillende deeltrajecten van de Maas.

#### Tracébesluit Zandmaas/Maasroute (2000)

Het Tracébesluit (Maaswerken, 2000) bevat een pakket aan maatregelen voor het project Zandmaas/Maasroute, dat bestaat uit het deelproject Maasroute en het deelproject Zandmaas. Dit pakket aan maatregelen beoogt (zie ook Figuur 2.4):

- het verbeteren van het traject Weurt-Ternaaien van de Maasroute tot scheepvaartklasse Vb waarbij de vaarroute minimaal geschikt is voor schepen met een diepgang van 3,5 m;
- het gedeeltelijk realiseren van een beschermingsniveau langs de onbedijkte Maas van 1:250 achter de kaden; en
- het gedeeltelijk realiseren van beperkte natuurontwikkeling langs de Maas.



Figuur 2.4 Planologische regeling van maatregelen van project Zandmaas/Maasroute (Maaswerken, 2000)

De aanpassing van de dijken is al in de voorgaande sectie 2.2.1 besproken; in de voorliggende paragraaf gaat het om de rivierverruimingsmaatregelen. Voor het pakket Zandmaas/Maasroute zijn de maatregelen gegeven in Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Overzicht rivierverruimingsmaatregelen Zandmaas/Maasroute (Pakket I) (r.o. = rechter oever)

Stuwpaand	Maatregel	Status (jaar afronding)
<b>Roermond rkm 68,3-80,9</b>	Retentiegebied Lateraalkanaal west - fase 1	Afgerond (2010)
<b>Belfeld rkm 80,9-101,1</b>	Zomerbedverbreding km 86,9-92,5 (proefproject 2)	Afgerond (2009)
<b>Sambeek rkm 101,1-146,8</b>	Zomerbedverdieping km 109,0-120,4	Afgerond (2015)
	Hoogwatergeul Lomm km 114,8-117,3 r.o.	In uitvoering (-)*
	Hoogwatergeul Well-Aijen km 132,7-138,2 r.o.	In uitvoering (-)*
<b>Grave rkm 146,8-175,7</b>	Zomerbedverdieping km 155,7-174,2 (proefproject 1)	Afgerond (1999)
	Zomerbedverdieping km 155,7-174,2 (overige werken)	Afgerond (2013)
<b>Lith rkm 175,7-201,0</b>	Zomerbedverdieping km 176,1-181,7	Afgerond (2007)

\* de benodigde waterstandsverlaging voor de hoogwaterveiligheid is in 2015 bereikt, de realisator is nu bezig met de uitvoering van een vergrootte versie van de hoogwatergeul (respectievelijk Lomm+ en Maaspark Well)

## Eindplan Grensmaas

De karakterisering van het Grensmaasproject volgens het Eindplan Grensmaas, vastgesteld door Gedeputeerde en Provinciale Staten op 21 december 2001 en het Provinciaal Omgevingsplan Limburg (POL) Grensmaas vastgesteld door Provinciale Staten op 1 juli 2005 en de ministeriële afspraken in de Vlaams-Nederlandse Verklaring met betrekking tot het uitvoeren van werken aan de Gemeenschappelijke Maas op 3 mei 2005, is weergegeven in onderstaande drie doelstellingen:

- Het door rivierverruiming verlagen van de hoogwaterstanden in de Maas met als maatstaf dat uiterlijk in 2017 de gebieden, die door de op basis van de Deltawet Grote Rivieren aangelegde kaden zijn beschermd, een kans op overstroming hebben van 1/250 per jaar bij een maatgevende afvoer 3275 m<sup>3</sup>/s.
- Het in de periode tot 2018 tot ontwikkeling brengen van tenminste 1000 ha natuur binnen het Grensmaasgebied. Deze natuurontwikkeling is gekoppeld aan het ecologisch herstel van de rivier zoals vastgelegd in de intentieverklaring voor de inrichting van het Maasdal in Limburg van 26 november 1992.
- Het winnen van ten minste 35 miljoen ton grind voor de nationale behoefte (provinciale taakstelling).

Daar waar hoogwaterbescherming mede moet worden bereikt door het verbeteren van de waterkeringen is dit al in de voorgaande paragraaf 2.2.1 besproken; in de voorliggende paragraaf gaat het om de overige maatregelen. Voor het project Grensmaas zijn dit de maatregelen gegeven in Tabel 2.4 die worden gerealiseerd door Consortium Grensmaas (CG) waarbij rekening is gehouden met de verschillende ontwerpwijziging sinds de vaststelling van het POL Grensmaas.

Tabel 2.4 Overzicht maatregelen eindplan Grensmaas door Consortium Grensmaas

Locatie	Maatregelen sv = stroomgeulverbreding, wv = weerdverlaging, ng = nevengeul, db = dekgrondberging, dv = dekgrondverwijdering no = natuurontwikkeling	Status (jaar afronding)
Boscherveld	dv, db, no	Afgerond (2017)
Borgharen	sv, wv, db, no	Afgerond (2014)
Itteren	sv, wv, db, no	Afgerond (2016)
Aan de Maas	sv, db, no	Afgerond (2015)
Meers	sv, wv, db, no	In uitvoering* (-)
Maasband	sv, wv, ng, no	Nog niet begonnen
Urmond	sv, wv, no	In uitvoering* (-)
Nattenhoven	sv, wv, db, no	Afgerond (2016)
Grevenbicht	sv, wv, no	Afgerond (2017)
Koeweide	sv, wv, db (2 delen), no	In uitvoering* (-)
Visserweert	sv, wv, ng, no	Afgerond (2017)

\* de benodigde waterstandsverlaging voor de hoogwaterveiligheid is in 2017 bereikt, CG is nu bezig met de afrondende werkzaamheden

Naast de maatregelen die door CG worden gerealiseerd zijn in opdracht van Rijkswaterstaat Limburg of Maaswerken ook de ingrepen weergegeven in Tabel 2.5 langs de Grensmaas gerealiseerd.



Tabel 2.5 Maatregelen langs de Grensmaas die niet gerealiseerd zijn door CG.

Locatie	Maatregelen	Status (jaar afronding)	Toelichting
Traject rkm 24 –26 en traject rkm 33 – 37	2 grinddrempels 7 grinddrempels	Afgerond (2010)	Mitigatiemaatregel tegen verdroging natuur
Proefproject Meers	sv, wv, db, no	Afgerond (2007)	Grindwinning die is uitgevoerd conform opzet Maaswerken
Roosteren	sv, wv	Afgerond (2002)	Compensatie voor kade-aanleg in 1996
Vlaamse Boertien locaties	sv, wv, no	Afgerond (2010)	Zie ook 2.2.2.3

#### Boertien locaties (2010)

Door de Commissie Boertien (1995) zijn locaties geïdentificeerd waar ingrepen aan de Vlaamse zijde van de Gemeenschappelijke Maas bijdragen aan het verminderen van hydraulische knelpunten. Het gaat hierbij om drie locaties, te weten Hochter Bampd, Herbricht en Kotem. Bij deze locaties zijn tussen 2006 en 2010 riviermaatregelen uitgevoerd die bij dragen aan de hoogwaterveiligheid langs de Gemeenschappelijke Maas.

#### Boertien-plus locaties (2020)

Tijdens de uitvoering van het project Grensmaas is geconstateerd dat het project zorgt voor een toename van de hoogwaterveiligheid, maar ook leidt tot nieuwe hydraulische knelpunten, met name als het gaat om een toename van de stroomsnelheden. Daarom is in overleg tussen Rijkswaterstaat, Waterschap Limburg en De Vlaamse Waterweg (de rivierbeheerder van het Vlaamse deel van de Gemeenschappelijke Maas) gekeken welke ingrepen deze knelpunten kunnen verminderen. Dit heeft geleid tot aanvullende rivierverruiming bij Maaswinkel, Mazenhoven, Leut-Meeswijk, Boyen-Veurzen en Geistingen. Al deze projecten zijn in de periode tussen 2016 en 2020 uitgevoerd.

#### Rivierverruiming Vlaamse zijde Gemeenschappelijke Maas

Buiten de voorgaande programma's is de volgende rivierverruiming uitgevoerd aan de Vlaamse zijde van de Gemeenschappelijke Maas:

- Negenoord / Kerkeweerd (2008);
- Bichterweerd (2016);
- Koggegreend (2017);
- Elerweerd (-);
- Randzones Kessenicht / Kollegreend / Koningssteen (2019).

#### Overige gerealiseerde / in uitvoering zijnde rivierverruimende ingrepen van betekenis

Ten slotte zijn de volgende maatregelen van betekenis:

- Hoogwatergeul Zuidgeul Well / De Baend (2015);
- Overdiepse Polder (2016);
- Rivierverruiming Ooijen – Wanssum (2021);
- Rivierverruiming Over de Maas (2022);
- Rivierverruiming Lus van Linne (-).

### **2.2.3 Waterstandseffect van waterkeringen en rivierverruiming**

Rijkswaterstaat en Deltares beheren gezamenlijk de modelmatige beschrijving van de Nederlandse rivieren. Rijkswaterstaat is verantwoordelijk voor de inhoudelijke beschrijving.

Daartoe stelt Rijkswaterstaat jaarlijks een overzicht op van de wijzigingen in het riviersysteem (veranderingen in zomerbedligging, vergravingen, dijkverbeteringen etc.) en levert deze wijzigingen in de vorm van Baseline-maatregelen aan Deltares. Deltares is verantwoordelijk voor de modelmatige beschrijving van het riviersysteem (SOBEK, WAQUA, D-HYDRO) en verwerkt de toegeleverde wijzigingen in de betreffende modelschematisatie.

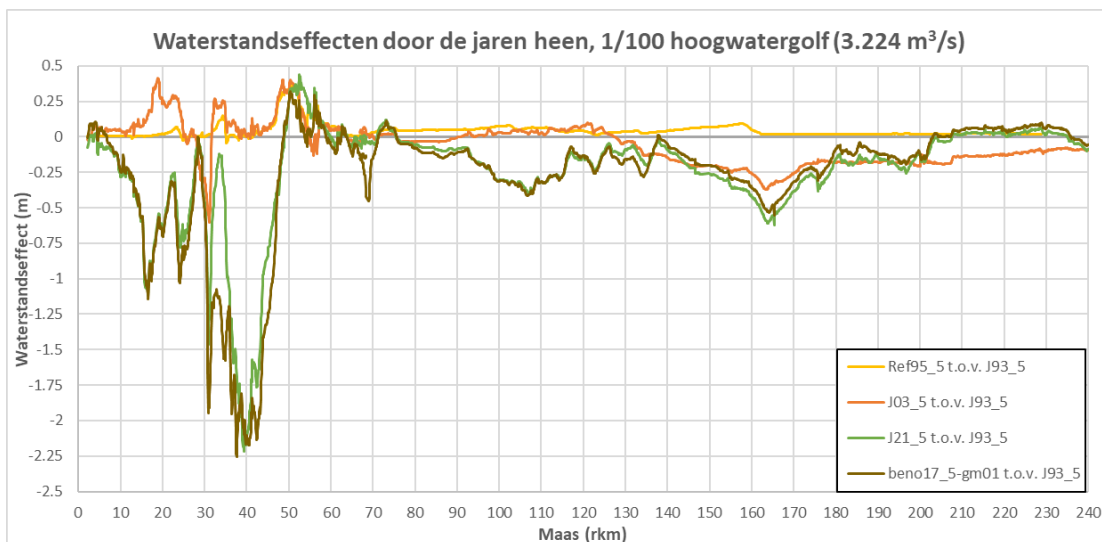
De modellen worden gekalibreerd met metingen. Door veranderingen in het systeem is er een risico dat modelresultaten minder goed worden omdat de kalibratie minder past bij de geldende geometrie (De Jong, 2021). In 1993/1995 was er geen rivierverruiming en waren er geen waterkeringen in het bovenstroomse deel van de Maas. Dat heeft natuurlijk invloed op de kalibratie aangezien er relatief veel afvoer door het winterbed stroomt en de invloed van het zomerbed dus beperkt is. Dat betekent dat een kleine fout in de zomerbedruwheden een beperkt effect heeft op de kalibratie. Nu is er sprake van veel rivierverruiming en waterkeringen, waardoor de invloed van het zomerbed veel groter is geworden. En dan kan een klein foutje van de kalibratie in één keer veel grotere gevolgen krijgen.

Om de modellen te toetsen is aanvullende validatie nodig. De verandering in waterstanden uit metingen kan vergeleken worden met het effect volgens modellen. Een voorzet voor het meetstation Borgharen Dorp is gegeven in bijlage C.2. Hieruit blijkt dat de gemeten verandering in waterstanden (-0.75 m) goed overeenkomt met de berekende waterstandsverandering (ook -0.75 m). Dit geeft vertrouwen in het gebruik van modellen om maatregelen te toetsen. Aanbevolen wordt dit onderzoek ook uit te voeren voor andere meetstations; in het kader van de voorliggende studie is er geen ruimte voor dit onderzoek.

Door deze wijze van gegevensbeheer en -verwerking zijn vanaf 1993 voor vrijwel ieder jaar modelschematisaties en hydraulische modellen beschikbaar. Door resultaten van verschillende hydraulische modellen met elkaar te vergelijken kan het gecombineerde effect van verschillende wijzigingen in beeld worden gebracht. Voor de voorliggende analyse is ervoor gekozen om een selectie te maken naar de volgende onderscheidende jaren:

- 1993: referentie situatie voor uitvoering maatregelen;
- 1995: 1993 + effect nooddaken;
- 2003: 1995 + effect DGR-kaden + effect Proefprojecten 1, 2 en 3;
- 2021: 1995 + alle ingrepen uit paragrafen 2.2.1 en 2.2.2;
- gm01: 2021 (eindsituaties ingrepen) + vergunde ingrepen (zie paragraaf 3.2.2).

Een (beknopte) toelichting op de verschillende modelschematisaties is opgenomen in Bijlage C.1. De waterstandseffecten worden getoond voor de ontwerphoogwatergolf met een kans van voorkomen van 1/100. Conform WBI2017 hoort hier een maximale afvoer bij van 3.224 m<sup>3</sup>/s (onzekerheden niet in aanmerking genomen). De waterstandseffecten zijn weergegeven in Figuur 2.5. Ter illustratie van de waterstandseffecten wordt een beschrijving gegeven van Proefproject 1, de verdieping stuwpand Grave (zie Tabel 2.2). Deze verdieping ligt tussen rkm 156 en rkm 175 en is uitgevoerd in 1999. Het effect van de verdieping is deels zichtbaar in de oranje lijn in Figuur 2.5. Van rkm 175 tot rkm 165 is sprake van een groter wordende waterstandsverlaging, namelijk van -20 cm naar -35 cm. Dat er sprake is van een waterstandsverlaging komt ook door de kaden die na 1995 zijn aangelegd. In de hier beschouwde 1/100 situatie raakt een deel van kaden overstroomd waardoor sprake is van berging en een waterstandsverlaging in het benedenstroomse gebied. De oorzaak van het zaagtand gedrag in de groene lijn ligt in de locatie van de ingrepen. Ter plekke van een ingreep is in bovenstroomse richting sprake van een toenemende waterstandsverlaging. Aan de bovenstroomse zijde van een ingreep is het effect maximaal en verder in bovenstroomse richting neemt het effect langzaam af (het stuwkromme effect) totdat het waterstandseffect van een andere ingreep merkbaar wordt. Dit geeft het karakteristieke zaagtandpatroon van de waterstandseffecten.



Figuur 2.5 Waterstandseffect door veranderingen in de riviergeometrie ten opzichte van 1993 (hoogwater T100 volgens WBI2017)

De situatie 1995 (gele of licht oranje lijn) toont het effect van de aangelegde noodkaden. Goed zichtbaar is dat het hier in het algemeen om beperkte waterstandseffecten (5 à 10 cm verhoging) gaat met uitzondering van de locatie Roosteren (rkm 50); hier is sprake van een verhoging van circa 25 cm door de aanleg van de noodkade.

De situatie 2003 (donker oranje lijn) toont het effect van de DGR-kaden in combinatie met de uitgevoerde proefprojecten. Goed zichtbaar zijn de verhogingen bij Borgharen en Itteren (rkm 17 - 23, circa 25 cm), de verhoging bij Meers (rkm 32 - 34, circa 25 cm) en nog altijd de verhoging bij Roosteren. Het effect van de proefprojecten komt ook terug in de resultaten. Proefproject 3 (Meers, rkm 30 – 32, circa 50 cm verlaging), proefproject 2 (Neer, rkm 87 – 92, circa 5 cm verlaging) en proefproject 1 (Grave, rkm 156 – 174, circa 25 cm verlaging) zijn goed zichtbaar in Figuur 2.5. De waterstandsverhoging bij Roosteren is nog altijd aanwezig.

De situatie 2021 (licht groene lijn) toont het waterstandseffect van de huidige situatie ten opzicht van de situatie in 1993. Goed zichtbaar zijn de grote waterstandsverlagingen op de Grensmaas tot circa 2 m (rkm 38 – 44). Op de Zandmaas zijn de verlagingen veel minder groot maar bedragen nog altijd circa 25 cm. In de omgeving van Roosteren is sprake van een verhoging van iets meer dan 25 cm.

De vergunde situatie (donker groene of bruine lijn) toont het effect van de verwachte eindsituatie na uitvoering van alle vergunde en waarschijnlijke ingrepen. Duidelijk zichtbaar zijn het effect van nevengeul Maasband, de afronding van Urmond en de ingreep Leut – Meeswijk (rkm 32 – 38, circa 60 cm) en de ingreep Heerenlaak (rkm 52 – 57, circa 20 cm). Op sommige trajecten liggen de waterstanden in de eindsituatie hoger dan in de huidige situatie. Dit kan komen door bijvoorbeeld natuurontwikkeling die in de eindsituatie in volgroeide toestand aanwezig is in tegenstelling tot de huidige situatie en hierdoor voor hogere waterstanden zorgt. Ook kan er een verschil zijn in de hoogte van het zomerbed, bijvoorbeeld doordat het gm01-model een minder actuele (en mogelijk hogere) zomerbedligging heeft dan het huidige j21-model. In de omgeving van Roosteren (rkm 50 - 55) zijn de waterstanden tot circa 25 cm hoger dan de waterstanden van 1993.

De grote waterstandsverlagingen hebben ook nadelige effecten.

Doordat trajecten met veel rivierverruiming (en dus een forse waterstandsval) worden afgewisseld met trajecten zonder rivierverruiming ontstaan er grote verschillen in stroomsnelheid en is de morfologie uit evenwicht (Meijer & Agtersloot, 2019). Dit treedt op bij trajecten met weinig of geen rivierverruiming waar wel sprake is van waterstandsverlaging als gevolg van een benedenstrooms gelegen rivierverruiming. In het niet verruimde traject neemt de stroomsnelheid toe, waardoor risico's ontstaan dat de afdeklaag (de afpleisteringslaag) opbreekt en het onderliggende zand-grindmengsels gaat eroderen. Tijdens het hoogwater van 2021 is dit vermoedelijk de oorzaak geweest van het ontstaan erosiekuilen (ENW, 2021). In diverse onderzoeken wordt dit vraagstuk nader geanalyseerd.

#### 2.2.4 Conclusies

In de voorgaande paragrafen zijn de verschillende ingrepen langs de Maas beschreven en beoordeeld. Aanvullend is een vergelijking gemaakt tussen de waterstanden die zijn berekend voor de situaties in 1993/1995 en de waterstanden die zijn berekend voor de situatie in 2021. Dat leidt tot het volgende antwoord op de centrale vraag.

*De conclusie is dat de combinatie van alle rivierkundige ingrepen (dijkverbetering en rivierverruiming) vrijwel overal heeft geresulteerd in een waterstandsverlaging ten opzichte van de situatie in 1993/1995. Bij een hoogwater zoals in juli 2021 varieert deze verlaging van enkele centimeters tot meer dan 1 meter. Een uitzondering is het traject rkm 50 – 58 (Roosteren), waar vooral vanwege de aanleg van de noedkade sprake is van verhoogde waterstanden ten opzichte van 1993.*

Een beoordeling of de hydraulische modellen het effect van ingrepen goed kunnen berekenen is niet eenduidig te geven. Zijn de verschillen tussen de gemeten en berekende waterstanden (zie paragraaf 2.1) het gevolg van een onjuiste berekening van het waterstandseffect van een ingreep, een niet geheel correcte kalibratie of een aspect wat niet goed is opgenomen in de hydraulische modellen (bijvoorbeeld zomervegetatie)? Om een onderbouwd antwoord te kunnen geven kan op basis van meerjarige waterstands- en afvoermetingen het effect van ingrepen worden geschat en vergeleken met de berekende effecten.

### 2.3 Het effect van zomervegetatie op opgetreden waterstanden

In deze paragraaf staat de volgende vraag centraal:

*Wat is het effect van (zomer)vegetatie op de opgetreden waterstanden?*

De waterstanden in de Maas worden sterk beïnvloed door de vegetatie in het winterbed. Doordat het hoogwater van juli 2021 in de zomer optrad wordt verondersteld dat de zomervegetatie heeft geleid tot hogere waterstanden dan wanneer eenzelfde afvoergolf in de winter zou optreden. Dit wordt gezien als een mogelijke verklaring voor de afwijkingen tussen modelresultaten en metingen (Van der Veen & Agtersloot, 2022). De hydraulische modellen worden namelijk afgeleid ten behoeve van het hoogwaterseizoen (de winter).

Pogingen om op basis van de metingen verdergaande conclusies over het effect van zomervegetatie te trekken, lijken een geringe toename te suggereren (Stroming, 2021), maar de diepgang in deze studie is nog onvoldoende om conclusies uit te kunnen trekken (Schropp, 2021).

Door Van Dongen (2022) is een methode beschreven om meer inzicht te krijgen in het effect van zomervegetatie. Een hogere ruwheid ontstaat door twee effecten:

- In de zomer staat in sommige gebieden een ander vegetatietype dan in de winter. Bijvoorbeeld maïsakkers in de zomer en kale akkers in de winter. Of ruigte in de zomer en gras in de winter.
- Een gegeven type vegetatie is in de zomer ruwer dan in de winter, bijvoorbeeld vanwege bladeren aan de takken.

De analyses door Van Dongen (2022) zijn vooral bedoeld om het effect van de verschillende gewassen op de waterstanden te beoordelen (verschil in kartering). Op basis van de gevoeligheidsberekeningen wordt echter ook enig inzicht verkregen in het verschil in ruwheid tussen zomer en winter. Vervolgwerkzaamheden van dit onderzoek worden momenteel nog geprogrammeerd.

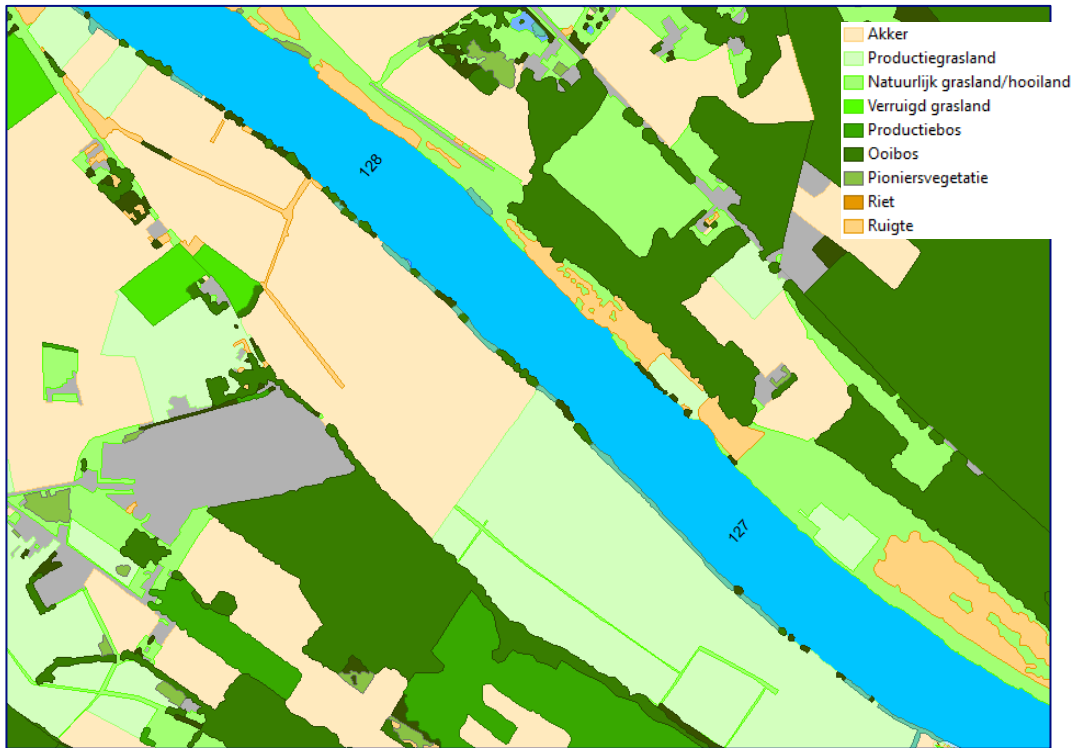
Op basis van simulaties Van Dongen geven we in sectie 2.3.1 een inschatting van het verschil in kartering. Vervolgens gaan we in sectie 2.3.2 in op het effect van de grotere bladdichtheid.

### **2.3.1 Effect van verschillende kartering in zomer- en wintersituatie**

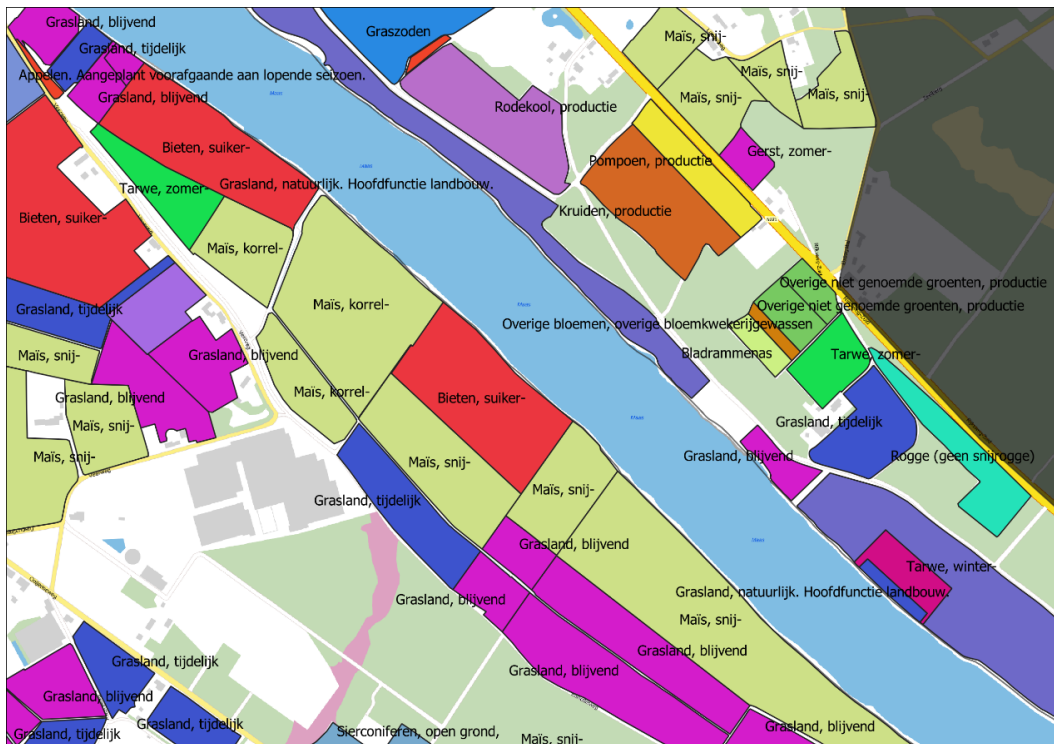
Door Van Dongen (2022) is onderzocht wat het effect van de verschillende kartering in de zomer is. Hiertoe is de Basisregistratie Gewaspercelen gevalideerd met luchtfotografie van augustus 2021. Dit gaf goede overeenkomsten voor de locatie van grote maïselden. De vergelijking tussen ecotopenkartering in de modellen (Figuur 2.6) en de geregistreerde gewassen (Figuur 2.7) leverde echter grote verschillen op. De figuur laat zien dat kale akkers en graslanden in de ecotopenkartering (representatief voor de winter) in de zomer begroeid zijn met maïs en bieten. Door Van Dongen is een simulatie uitgevoerd waarin langs de hele Maas alle percelen waarop maïs is verbouwd (circa 3228 Ha) zijn opgenomen in het WAQUA-model en vervolgens zijn gemodelleerd met de ruwheid van riet. Er is gekozen voor riet omdat maïs niet als ecotoop voorkomt in het vegetatiehandboek (Van Velzen et al., 2003a; 2003b) en de ruwheid van riet een goede benadering werd geacht.

Het resultaat is een opstuwung van de waterstanden van gemiddeld 23 cm, oplopend tot ruim 50 cm (Figuur 2.8) in een extreme situatie van een 1/1000 afvoer. Dit is een worst-case simulatie, aangezien de ruwheid van maïs waarschijnlijk lager is dan die van riet.

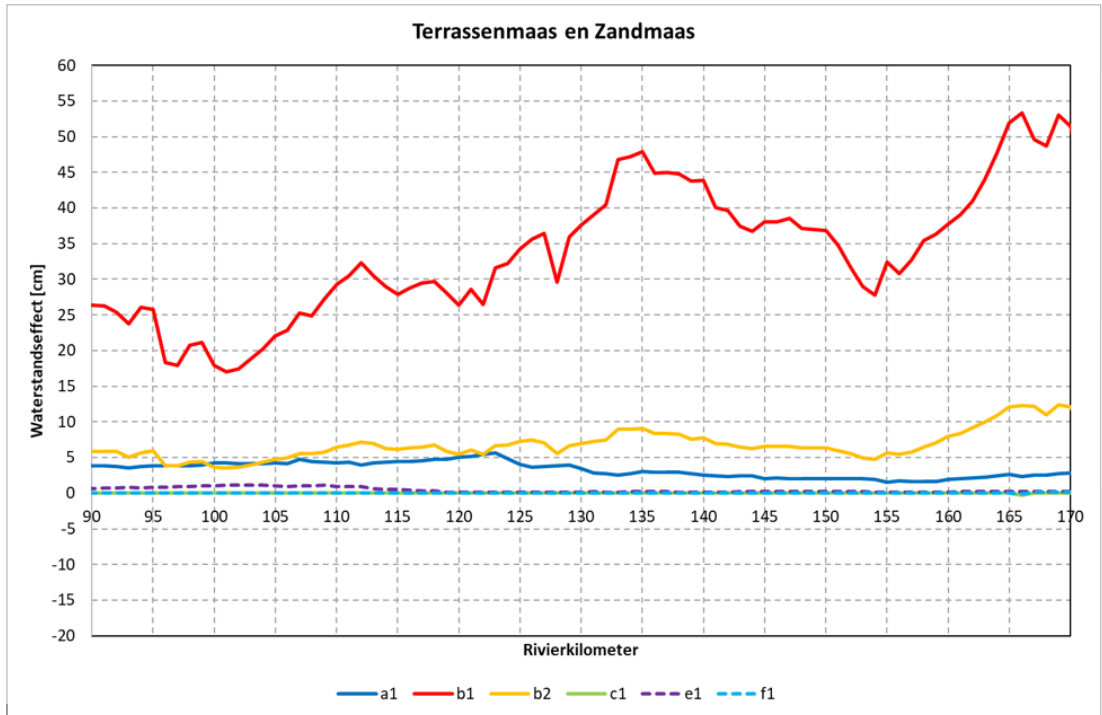
Deze simulatie houdt ook geen rekening met de dynamische effecten van vegetatie. Door stroming kan maïs platslaan en afbreken. De schaal waarop dit gebeurt is, is niet bekend, maar satellietbeelden tonen wel dat op overstroomde locaties (Figuur 2.9) over grote delen geen maïs meer groeide na afloop van het hoogwater (september 2021), terwijl in 2019 hier nog volop begroeiing was (Figuur 2.10). Het is bekend dat maïs na het hoogwater enige tijd dood op het veld heeft gestaan, waarna het in de periode augustus / september is verhakseld. Ook dit kan een verklaring zijn voor de lege maïselden.



Figuur 2.6 Ecotopenklassificatie in WAQUA-model j21\_5. Locatie bij rkm 127 – 128 (bij Blitterwijk).



Figuur 2.7 Gewassen volgens Basisregistratie gewassen. Locatie bij rkm 127 – 128 (bij Blitterwijk). De begrenzing van het winterbed is donker gekleurd.



Figuur 2.8 Gevoeligheidsberekeningen voor het opstuwende effect van riet: 'b1'. In deze berekening is 3228 hectare mais gemodelleerd als ruwheidstype riet. De overige berekeningen worden in dit rapport niet behandeld. (figuur uit Van Dongen, 2022).



Figuur 2.9 Luchtfoto van de overstrooming tijdens hoogwater 2021.<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Weergave en WMTS beschikbaar op: <https://storymaps.arcgis.com/stories/7488a4903f47499a9f765a23619eb2f4>



Figuur 2.10 Satellietbeelden van de begroeiing in september 2019 (links) en september 2021 (rechts). Rond rkm 128.<sup>3</sup>

### 2.3.2 Effect van verschillende weerstand van vegetatie in de zomer

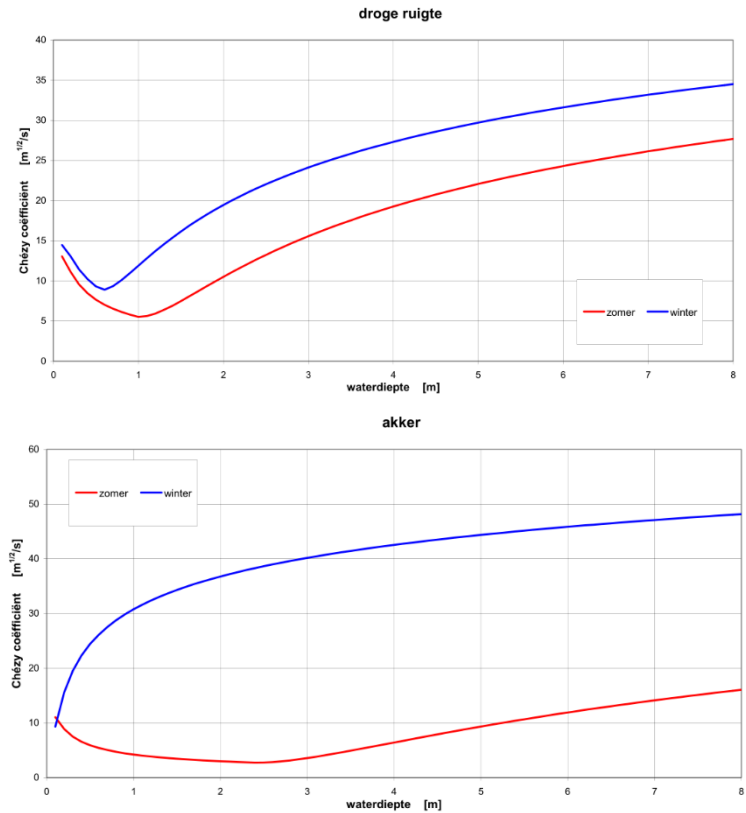
De analyse van Van Velzen & Jesse (2005) geeft inzicht in de mate waarin de ruwheid van een individuele ecotoop kan verschillen tussen het zomer- en het winterseizoen. In Figuur 2.11 is voor droge ruigte en voor akkers een vergelijking gegeven, uitgedrukt in de Chézy-coëfficiënt (een lagere waarde betekent een hogere ruwheid). Bij deze beide ecotopen is de verruwing in het zomerseizoen aanzienlijk. Een lagere Chézy-waarde werkt lineair door in de lokale stroomsnelheid. Als we uitgaan van een waterdiepte van 4 m, dan neemt de stroomsnelheid bij droge ruigte af met 30%, en op een akker met 80%. Voor het bepalen van de opstuwung op de waterstanden zijn modelsimulaties noodzakelijk.

Er is een enkele simulatie uitgevoerd om te evalueren wat het effect van de hogere ruwheidscoëfficiënten voor de zomer van door- en overstromde vegetatie (o.b.v. Van Velzen, 2005; zie Bijlage D.1). Dit resultaat is gegeven in Figuur 2.12. Uit de resultaten blijkt een gemiddelde waterstandstoename van 5 cm met een maximum op de Grensmaas van 15 cm. Het gemiddelde ligt ook iets hoger op de Grensmaas (9 cm). Bij de monding daalt de waterstand ten gevolge van (extra) topvervlakking doordat als gevolg van de ruwere uiterwaarden sprake is van een vertraging van de hoogwatergolf, waardoor de piekafvoer en dus de waterstand afneemt.

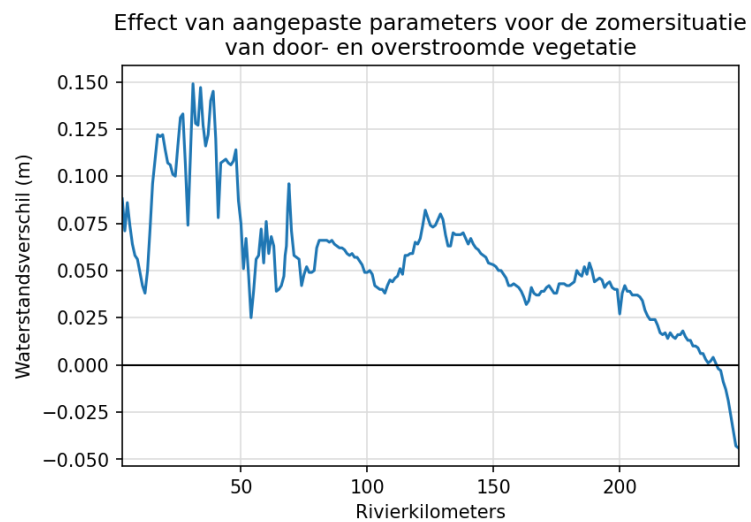
Geconcludeerd kan worden dat binnen de gegeven uitgangspunten het effect van de ruwheidscoëfficiënten (gemiddeld 5 cm) kleiner is dan het effect van verschillen in kartering (gemiddeld 23 cm). Het ontbreken van mais in de hydraulische modellen heeft dus een veel grotere bijdrage aan de te laag berekende waterstanden tijdens het hoogwater van 2021 dan het effect van een hogere bladdichtheid.

<sup>3</sup> Satellietbeelden afkomstig van: <https://satellietdataportaal.nl/>





Figuur 2.11 Analytische benadering van de vegetatieruwheid bij omrekening van de vegetatiekenmerken van zomer en winter (zie sectie 3.4 van Van Velzen, 2005) naar de Chézy-coëfficiënt. Een lagere Chézy-waarde geeft een hogere ruwheid. (figuren uit Bijlage 1 van Van Velzen, 2005)



Figuur 2.12 Waterstandsverschillen bij toepassing van parameters van de zomersituatie voor door- en overstromde vegetatie (zie Bijlage D.1). Simulaties uitgevoerd met een ontwerphoogwatergolf met piekafvoer van  $4118 \text{ m}^3/\text{s}$  met dflowm2d-maas-beno19\_6 (N.B. deze schematisatie wordt ook gebruikt door BOI2023).

### 2.3.3 Conclusies

In de voorgaande paragrafen is een schatting gemaakt van het effect van zomervegetatie op de opgetreden waterstanden.

*De conclusie is dat zomervegetatie een waterstandsverhogend effect heeft. Dit effect kan één tot enkele decimeters zijn.*

## 2.4 Effect van de golfvorm op afvoer en waterstanden

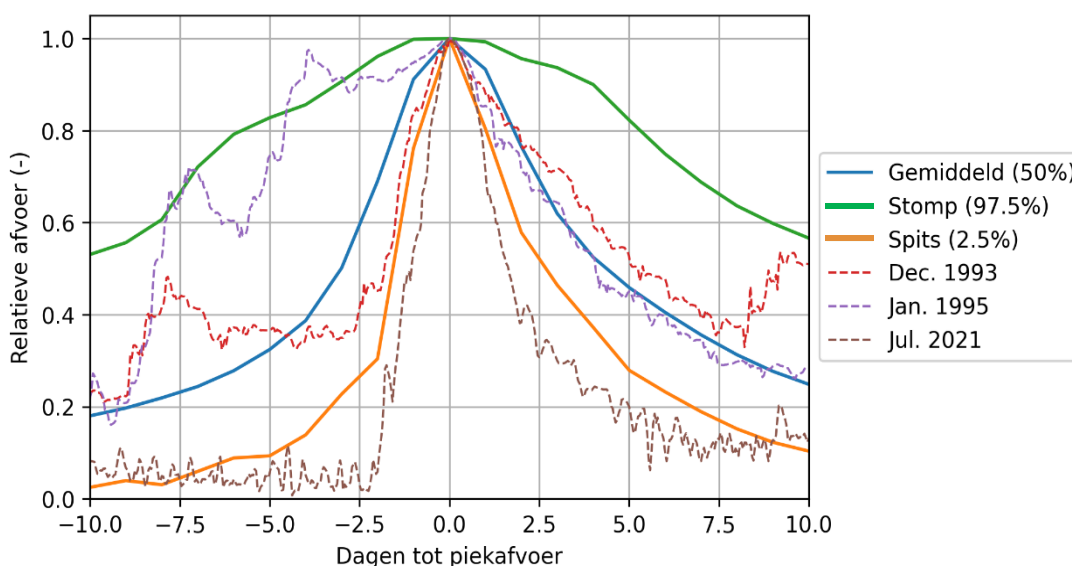
In deze paragraaf staat de volgende vraag centraal:

*Wat is het effect van variatie in golfvorm op de afvoer en waterstanden?*

Topvervlakking is het verschijnsel dat een afvoergolf, terwijl deze zich in stroomafwaartse richting voortplant, steeds verder afvlakt. De piekafvoer neemt daardoor af en waterstanden in de benedenloop van de rivier worden lager dan in de situatie zonder topvervlakking. Topvervlakking treedt op langs alle rivieren, maar is niet bij alle rivieren even sterk.

De mate van topvervlakking is afhankelijk van de geometrie van de rivier. Theoretisch onderzoek naar het effect van topvervlakking toont aan dat van de geometrie de waterdiepte en het bodemverhang het meest bepalend zijn (De Jong & Asselman, 2019). De mate van topvervlakking is daarnaast sterk afhankelijk van de vorm van de afvoergolf (een spitse afvoergolf leidt tot meer topvervlakking). Een tweede vorm van topvervlakking kan plaatsvinden door de instroming van dijkringen en retentiegebieden, waardoor het water tijdelijk aan de golf wordt onttrokken.

Op de Maas kan de golfvorm sterk variëren als gevolg van intensiteit en locatie van neerslag. Dit blijkt wel uit de golfvormen die zijn weergegeven in Figuur 2.13. Deze figuur toont historische hoogwatergolven (1993, 1995, 2021) en synthetische (gemiddelde) afvoergolven uit het project GRADE (Hegnauer et al., 2014). Het hoogwater van 1995 had een zeer stompe golfvorm en was daarin vergelijkbaar met de afvoergolf STOMP (de 97.5% meest stompe golf uit GRADE). Het hoogwater van 2021 was daarentegen zeer spits: spitsers dan de afvoergolf SPITS (de 2.5% meest spitse golfvorm uit GRADE). Meer informatie over de kans op verschillende golfvormen is gegeven in sectie 4.2.

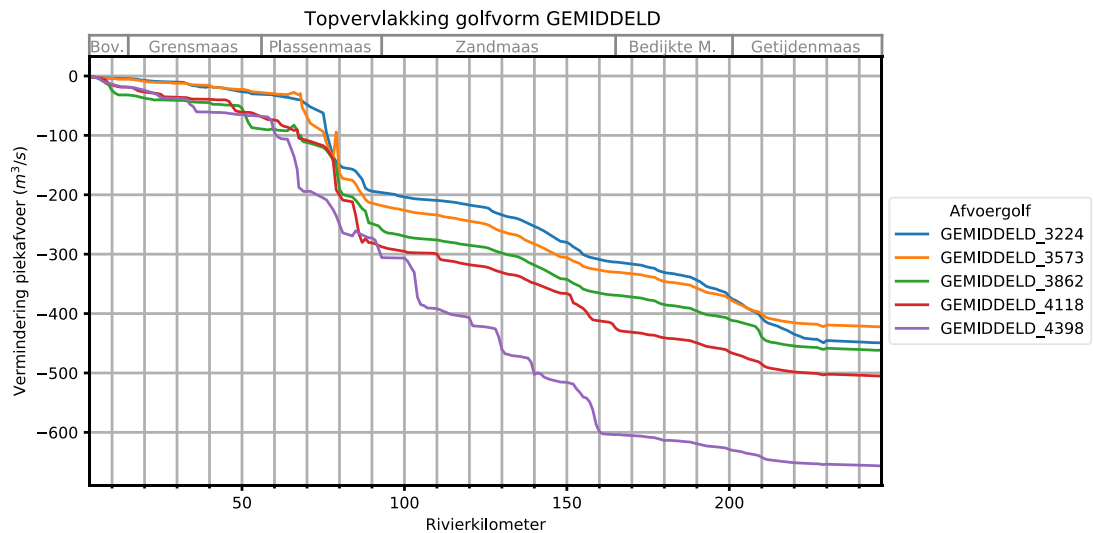


*Figuur 2.13 Vergelijking van de golfvorm van synthetische afvoergolven en historische hoogwaters bij Eijsden. Golfvorm weergegeven als relatieve afvoer ten opzichte van de piekafvoer.*

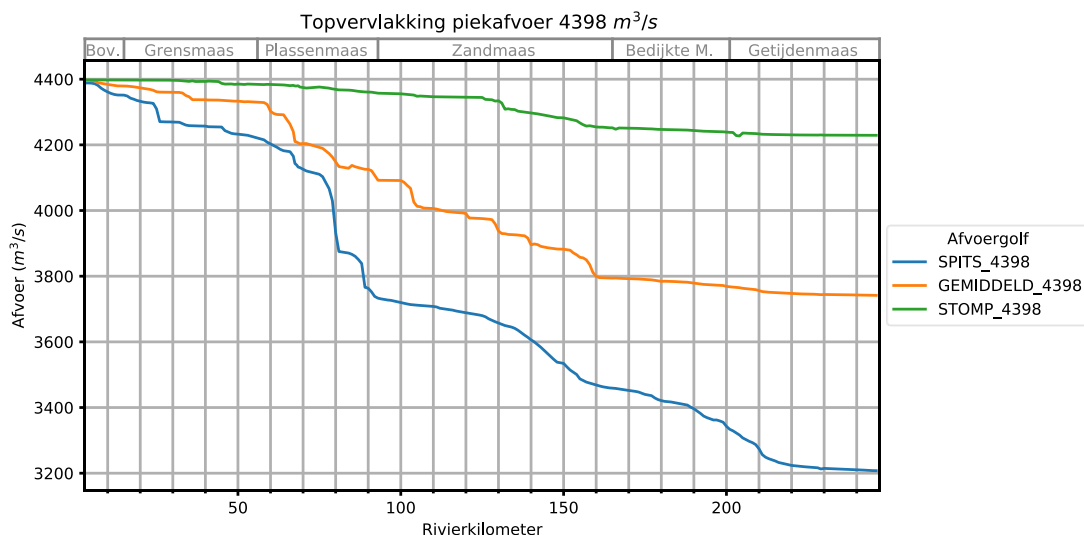
De mate van topvervlakking is berekend met het model WAQUA (De Jong & Asselman, 2019). Enkele resultaten hiervan zijn overgenomen in Figuur 2.14 en Figuur 2.15. In enige mate is de topvervlakking afhankelijk van de piekafvoer: een hogere afvoer resulteert doorgaans in meer topvervlakking. Het effect van de golfvorm op de topvervlakking is echter veel sterker. Figuur 2.15 laat zien dat door topvervlakking de piekafvoer kan reduceren met 200 tot 1200 m<sup>3</sup>/s, afhankelijk van de golfvorm. De afname in piekafvoer is slechts beperkt op de Grensmaas, en neemt op de Plassenmaas (rondom Roermond) sterk toe door de afname van het verhang, de grote waterdiepte en aanwezigheid van bergingsgebieden. Benedenstrooms hiervan zet de topvervlakking gestaag door.

Het effect hiervan op de waterstanden is groot. Figuur 2.16 toont dat door de afname in de piekafvoer van een spitse afvoergolf, een verschil in waterstanden van 100 cm kan ontstaan ten gevolge van de verschillende golfvorm. Dit verschil begint klein op de Grensmaas, met een het maximale effect van 10 cm. Vanaf de Plassenmaas (nabij Roermond) neemt dit toe naar 60 cm, om vervolgens toe te nemen tot 100 cm op de Getijdenmaas (nabij Den Bosch).

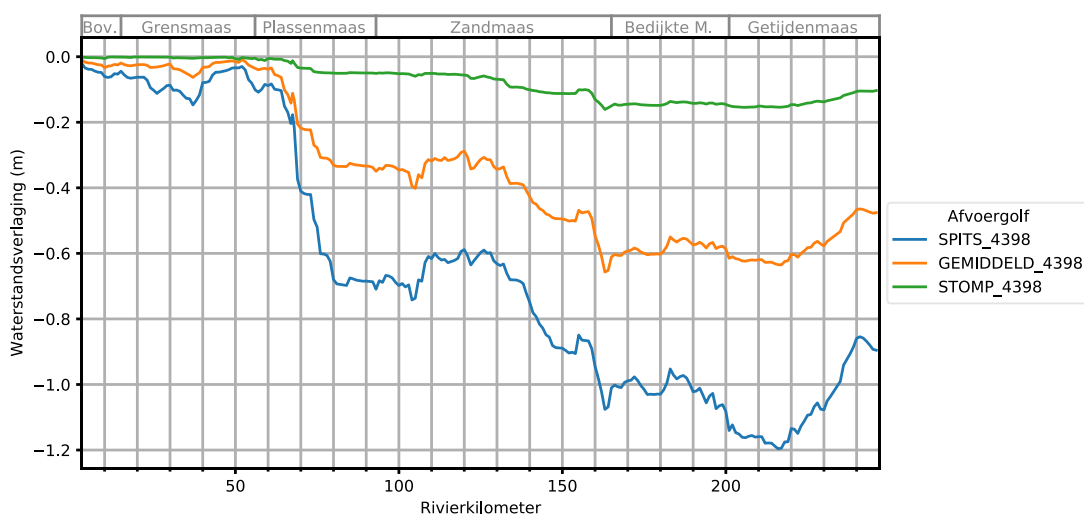
Momenteel wordt in het beoordelings- en ontwerpinstrumentarium (BOI, ook wel WBI en OI) gebruik gemaakt van enkel de mediane golfvorm. Hoe een andere golfvorm doorwerkt in de waterstanden bij een dijkvak, wordt besproken in hoofdstuk 6.



Figuur 2.14 Afname in de piekafvoer ten gevolge van topvervlakking voor verschillende piekafvoeren bij een gemiddelde golfvorm. (De Jong & Asselman, 2019)



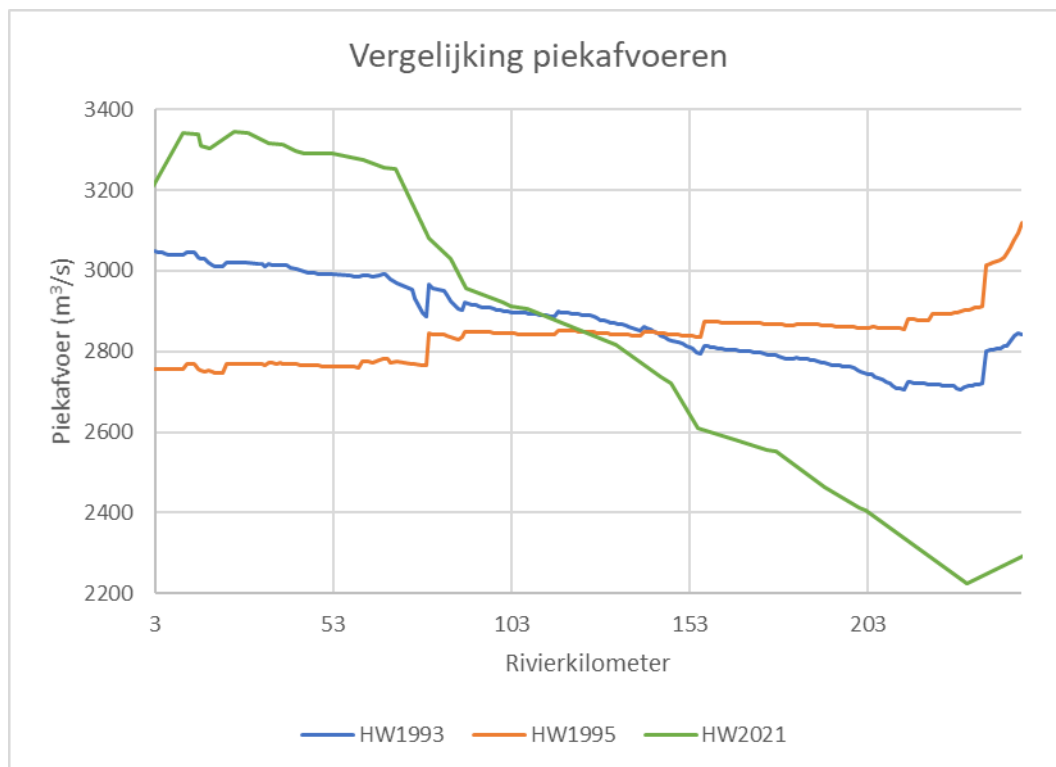
Figuur 2.15 Afname in de piekafvoer ten gevolge van topvervlakking voor verschillende golfvormen bij een piekafvoer van 4398 m<sup>3</sup>/s (De Jong & Asselman, 2019).



Figuur 2.16 Waterstandsverlaging door topvervlakking voor verschillende golfvormen bij een piekafvoer van 4398 m<sup>3</sup>/s (De Jong & Asselman, 2019).

Het belang van topvervlakking in maatgevende afvoeren blijkt ook uit de vergelijking van de hoogwaters van 1993 en 1995 in Figuur 2.17. We zien dat tijdens de spitse afvoergolf van 1993 de piekafvoer bij Eijsden hoog was, maar gedurende de loop door Nederland steeds verder afnam. Tijdens de stompe golf van 1995 is er nauwelijks sprake van topvervlakking en zorgen zijdelingse instromingen vanuit de Limburgse en Brabantse zijrivieren voor een significante toename in de piekafvoer. Het gevolg is dat bij de afvoergolf van het hoogwater 1995 vanaf de rkm 140 de afvoeren groter zijn dan bij de afvoergolf van 1993.

Ook bij het hoogwater van 2021 was het effect van topvervlakking aanwezig, en nog extremer dan in 1993. De piekafvoer is bovenstrooms zeer hoog, maar door de grote mate van topvervlakking vanaf de Plassenmaas neemt dit sterk af. Bij de samenvloeiing met de Geul neemt de afvoer van de Maas nog beperkt toe. De afvoer van de Roer was relatief groot tijdens het hoogwater van 2021, maar desondanks beperkt in vergelijking met de mate van topvervlakking tussen Borgharen en Roermond.



Figuur 2.17 Vergelijking in gemodelleerde piekafvoer van de historische hoogwaters. Piekafvoeren van hoogwater (HW) 1993 en 1995 zijn beschikbaar per rivierkilometer in simulaties van De Jong & Asselman (2019). Van het hoogwater 2021 zijn piekafvoeren beschikbaar per meetpunt uit simulaties door Van der Veen & Agtersloot (2021).

### Conclusies

In de voorgaande paragrafen is een beoordeling gemaakt van het effect van variatie in golfvorm op de waterstanden en afvoeren.

*De conclusie is dat de golfvorm een grote invloed heeft op de waterstanden en afvoeren. Voor de Grensmaas is het vooral de hoogte van de piek van de hoogwatergolf die bepalend is voor de waterstanden en afvoeren. Voor de Plassenmaas en in meerdere mate de Zandmaas is het vooral het volume van hoogwatergolf die bepalend is voor de maximale waterstanden en afvoeren.*

Het verschil wordt vooral veroorzaakt door de kenmerken van de Grensmaas. Vanwege het relatief grote verhang en de relatief kleine uiterwaarden is er vrijwel geen sprake van een afname in de afvoerpiek, zie bijvoorbeeld Figuur 2.15. In de Plassenmaas is sprake van een grote oppervlakte waar veel water kan worden gebufferd. Bij een kortdurende (spitse) hoogwatergolf zoals in 2021 betekent dit dat de piekafvoer snel kan afnemen, en dat wordt op de Zandmaas (met relatief grote uiterwaarden) nog verder versterkt. Bij een langere hoogwatergolf zoals in 1995 raakt de buffer van de Plassenmaas uiteindelijk vol en neemt de piekafvoer veel minder af.

## 2.5 Conclusies

Een vergelijking is uitgevoerd tussen gemeten waterstanden en met het WAQUA- en SOBEK-modelinstrumentarium berekende waterstanden (sectie 2.1).

Hieruit wordt het volgende geconcludeerd:

- WAQUA geeft over het algemeen redelijke resultaten met afwijkingen van maximaal enkele decimeters. Er zijn hypothesen en suggesties geformuleerd om de verschillen te verklaren. Zo zijn de verschillen tussen metingen en berekeningen voor de nieuwe meetstations in het algemeen groter dan voor de oorspronkelijke meetstations die zijn gebruikt bij de kalibratie. De variantie van de fout voor ongestoorde meetpunten is, zoals verwacht, kleiner dan voor verplaatste meetpunten. Daarentegen ligt de gemiddelde waarde van de modelwaterstanden van verplaatste meetpunten dicht bij de metingen dan voor de ongestoorde meetpunten het geval is. Anders gezegd: bij de verplaatste meetpunten is de 'bias' kleiner dan voor de onverstoorte meetpunten.
- Over het algemeen zijn de afwijkingen in SOBEK iets groter. Dat is ook de verwachting voor een 1D model waarin de geometrie minder nauwkeurig beschreven kan worden.

Modelmatig is berekend wat het waterstandseffect is geweest van de aangelegde waterkeringen en de uitgevoerde rivierverruimingsmaatregelen sinds 1993 (sectie 2.2).

Hieruit wordt het volgende geconcludeerd:

- Ten gevolge van de kaden (noodkaden en DGR-kaden) was in 2003 sprake van een beperkte verhoging van de waterstanden (5 à 10 cm) met als uitzondering de locaties Borgharen-Itteren, Meers en Roosteren; hier bedroeg de verhoging enkele decimeters.
- Ten gevolge van de rivierverruiming zijn de waterstanden significant gedaald. Gemiddeld is de daling ongeveer 10 à 30 cm, op de Grensmaas is de variatie echter groter: van 0 tot 220 cm.
- Effecten van maatregelen zijn terug te zien bij meetstation Borgharen Dorp. De gemeten verandering komt goed overeen met de gemodelleerde verandering. Aanbevolen wordt om deze studie te herhalen voor andere stations.
- De locaties met weinig rivierverruiming (de zogenaamde flessenhalzen) zijn morfologisch uit evenwicht. Hier is vaak sprake van (zeer) hoge stroomsnelheden die (veel) hoger zijn dan in de situatie voor rivierverruiming. Als hierdoor de afdeklaag opbreekt, kan grote erosie ontstaan. Dit is vermoedelijk de oorzaak geweest van het ontstaan van de erosiekuilen bij het hoogwater van juli 2021.

Onderzocht is wat het effect is van zomervegetatie op de opgetreden waterstanden (sectie 2.3). Hieruit wordt het volgende geconcludeerd:

- Enerzijds uit het verschil in vegetatie tussen zomer en winter zich in een andere begroeiing: kale velden in de winter kunnen begroeid zijn met mais in de zomer; grasland kan uitgroeien tot ruigte. Door Van Dongen (2022) zijn berekeningen gedaan waarbij in het winterbed van de Maas in totaal 3.228 Ha aan maisvelden is opgenomen. De mais is in het WAQUA-model vertaald als riet. Dit leidt tot een gemiddelde opstuwing van 23 cm, met lokale toenames tot ruim 50 cm. De weerstand van mais is echter nog een onzekere factor en vraagt nader onderzoek (mogelijk zijn de gerapporteerde effecten aan de hoge kant omdat de mais als riet is gemodelleerd).
- Daarnaast hebben veel ecotopen in de zomer meer bladeren (een grotere bladdichtheid), waardoor de weerstand op de stroming groter is. Onderzoek naar de weerstand in de zomer is reeds uitgevoerd bij de opzet van het vegetatiehandboek. Bij toepassing van deze ruwheidscoëfficiënten op de actuele modellen van de Maas wordt een opstuwing gevonden van gemiddeld 5 cm, met op de Grensmaas lokale effecten tot 15 cm.
- Geconcludeerd kan worden dat binnen de gegeven uitgangspunten het effect van de ruwheidscoëfficiënten (bladdichtheid) kleiner is dan het effect van verschillende vormen van begroeiing.

- Er wordt gekeken of de onderzoeksmethode zoals toegepast door Van Dongen (2022) verder uitgewerkt kan worden in een project. Dit zal meer inzicht geven in de effecten van vegetatiekartering.

Ten slotte is literatuurstudie uitgevoerd naar het effect van de golfvorm op afvoer en waterstanden (sectie 2.4). Hieruit wordt het volgende geconcludeerd:

- Topvervlakking is het verschijnsel dat een afvoergolf, terwijl deze zich in stroomafwaartse richting voortplant, steeds verder afvlakt. De piekafvoer neemt daardoor af en waterstanden in de benedenloop van de rivier worden lager dan in de situatie zonder topvervlakking. De mate van topvervlakking is afhankelijk van o.a. het bodemverhang en de waterdiepte, maar bovenal van de vorm van de afvoergolf.
- Op basis van de studie van De Jong & Asselman (2019) is het volgende geconcludeerd.
  - De piekafvoer heeft maar beperkt effect op de topvervlakking.
  - De golfvorm heeft veel meer effect op de mate van topvervlakking. Tussen de spitse en stompe golf kan benedenstrooms nabij Den Bosch een verschil in piekafvoer van 1000 m<sup>3</sup>/s ontstaan (waarbij de spitse golf veel sterker afvlakt dan de stompe golf).
  - De topvervlakking neemt toe over de loop van de Maas. Op de Grensmaas is het maximale effect op de waterstanden maar 10 cm. Vanaf de Plassenmaas (nabij Roermond) neemt dit toe naar 60 cm, om vervolgens toe te nemen tot 100 cm op de Getijdenmaas (nabij Den Bosch).
- Ook bij historische hoogwaters was het effect van topvervlakking duidelijk aanwezig: de piekafvoer van het hoogwater van 1993 bij Borgharen was hoger dan de piekafvoer van het hoogwater van 1995. Echter, de golfvorm was in 1995 veel breder dan in 1993. Bovendien waren de zijdelingse instromingen van de Roer en Niers veel groter in 1995. Waar door topvervlakking de piek van de spitse golf van 1993 in benedenstroomse richting steeds lager werd, werd door zijdelingse instromingen van de Roer en Niers de piek van de stompe afvoergolf van 1995 in benedenstroomse richting steeds hoger. In nog extremere mate speelde de topvervlakking ook bij het hoogwater van 2021. De topvervlakking was vanaf de Plassenmaas dermate groot, dat ondanks het grote instromende debiet vanaf de Roer, de piekafvoer bij Roermond al onder het niveau van de hoogwaters van 1993 en 1995 was gezakt, ondanks het feit dat de piekafvoer bij de grensovergang juist groter was dan in 1993 en 1995.

# 3 Opgave en oplossingen voor hoogwaterveiligheid van de Maas

In dit hoofdstuk staan de volgende vraagstukken centraal:

<b>B.1</b>	Hoe kun je de hoogwaterveiligheid vergroten met een combinatie of afweging van dijkversterking en rivierverruiming? Hoe kan retentiewerking bijdragen aan de hoogwaterveiligheid?
<b>B.2</b>	Wat is het verwachte waterstandseffect van vergunde maatregelen? Wat is het effect van reeds geplande maar nog niet vergunde of gerealiseerde maatregelen?

## 3.1 Beschouwing rivierverruiming of dijkversterking

In deze paragraaf staat de volgende vraag centraal:

*Hoe kun je de hoogwaterveiligheid vergroten met een combinatie of afweging van dijkversterking en rivierverruiming? Hoe kan retentiewerking bijdragen aan de hoogwaterveiligheid?*

### 3.1.1 Vergroting hoogwaterveiligheid door dijkversterking

Op dit moment voldoen de meeste dijktrajecten langs de Grensmaas en Zandmaas niet aan de wettelijke normering voor hoogwaterveiligheid. Juridisch is dit geen probleem aangezien Waterschap Limburg tot 2050 de tijd heeft om aan de wettelijke normering te voldoen. Voor de betrokken bewoners is het wel een probleem omdat nog niet overal aan de basisveiligheid van Maaswerken voldaan wordt. Het project sluitstukkaden had in 2015 (uiterlijk 2017) voltooid moeten zijn, maar dat is tot vandaag de dag niet het geval. De feitelijke gevolgen waren zichtbaar tijdens het hoogwater van juli 2021. De Zandmaas is alleen 'gered' omdat er zo'n sterke topvervlakking in het Maasplassengebied opgetreden is. Als de afvoergolf minder spits was geweest, had Limburg ten noorden van Roermond het voor een groot deel niet drooggehouden. Met de strategie van nu (tekorten Maaswerken bij het HWBP onderbrengen) is de termijn van 2015 naar 2050 verschoven, waardoor meerdere dijktrajecten nog meerdere jaren niet aan de veiligheidsnorm zullen voldoen<sup>4</sup>. Het HWBP streeft ernaar om ruim voor 2050 veel dijktrajecten in de Noordelijke Maasvallei aan de norm te laten voldoen.

Zoals al eerder genoemd, wordt onder de paraplu van het HWBP ingezet op dijkverbetering om te voldoen aan de normen voor hoogwaterveiligheid. Dijkverbetering wordt meestal gezien als een eenvoudige en relatief goedkope manier om de hoogwaterveiligheid te vergroten. In de praktijk blijkt dit vaak lastig, zie bijvoorbeeld de doorlooptijden van de verschillende programma's van de waterkeringen (paragraaf 2.2.1). Ook vallen kosten regelmatig hoger uit doordat bijzondere constructies (glazen wand bij Neer, oprijfbare kering bij Steijl) nodig zijn om de dijkverbetering geaccepteerd en gerealiseerd te krijgen. Tevens zijn er grenzen aan de hoogte van mobiele keringen, een concept dat in de steden (o.a. Venlo) grootschalig toegepast wordt. De HWBP-opgave confronteert ons met deze beperking. Bij Horn is duidelijk geworden dat het met mobiele keringen ook helemaal mis kan gaan. Hier begaf de noodkering het en kwamen circa 10 huizen in het water te staan. De gemeente had de regie over de hoogwaterveiligheid van Waterschap Limburg overgenomen (wat eigenlijk niet mag) en aan een aannemer uitbesteed, die bij hoogwater mobiele keringen (betonblokken) zou moeten plaatsen. Toen het hoogwater zich in 2021 aandiende bleek de onderneming failliet en waren de betonblokken spoorloos.

<sup>4</sup> Dit geldt overigens niet alleen voor dijken langs de Maas



Bewoners maakten een provisorische noodkering maar die begaf het. Ca. 10 huizen kwamen onder water te staan. Dit (bestuurlijke) faalmechanisme is geen onderdeel van WBI2017, maar heeft zich wel voorgedaan.

Aan een dijk(verbetering) zitten aanvullende nadelen:

- hoewel de kans op overstroming van het door de dijk beschermde gebied kleiner wordt, neemt tegelijkertijd het overstromingsrisico in andere (nog) niet beschermde gebieden toe;
- de mensen die achter deze dijk wonen kunnen een (onterecht) gevoel van veiligheid krijgen als het gaat om een niet formele kering (Ooijen-Wanssum, 2021), een nooddijk (Horn, 2021) of een demontabele kering (Steyl, 2011);
- Dijkverbetering kan ervoor zorgen dat:
  - het veiligheidsgevoel hoger wordt
  - hierdoor meer mensen in de dijkkring gaan wonen en de waarde van het gebied achter de dijk hoger wordt
  - de gevolgen van overstroming in geval van een dijkdoorbraak groter wordt
  - de dijk dus opnieuw verhoogd en versterkt moet worden om het risico (kans×gevolg) te beperken.

### 3.1.2 Vergroting hoogwaterveiligheid door rivierverruiming

Dijkversterking is niet de enige manier om de hoogwaterveiligheid te vergroten. In plaats van het verhogen van een waterkering kan ook worden gekeken naar de mogelijkheden om de waterstanden te verlagen door de rivier te verruimen. Argumenten voor rivierverruiming zijn gegeven in onderstaande opsomming. In bijlage F zijn afbeeldingen opgenomen waarmee bovenstaande argumenten worden toegelicht. Rivierverruiming zorgt voor lagere waterstanden, met als voordeel:

- Lagere dijken (vast en mobiel);
- Soms ook kortere dijken omdat aansluitingen naar hoge grond eenvoudiger kunnen worden gemaakt;
- Lagere stroomsnelheden omdat het water meer ruimte heeft gekregen (n.b. dit moet wel evenwichtig gebeuren om flessenhalzen in de rivier te voorkomen);
- Lagere snelheid van de golfvoortplanting waardoor meer tijd beschikbaar is voor (nood)maatregelen;
- Betere afwatering van zijrivieren;
- Bereikbaarheid van veren en dorpen omdat rivierverruiming ook in niet maatgevende situaties zorgt voor een waterstandsverlaging;
- Veiligheid van onbeschermde (buitendijkse) objecten neemt toe (en niet af zoals bij dijkversterking wel het geval is);
- Lager veiligheidsrisico (bij dezelfde faalkans);
- Ruimtelijke kwaliteit (natuur, stadsontwikkeling, etc.);
- Medefinanciering (andere programma's of particuliere initiatieven) door bijvoorbeeld delfstoffenwinning, KRW-maatregelen etc.;
- Meer infiltratie in het grondwater doordat bij rivierverruiming de dekgrond (veelal klei) wordt afgegraven en de ondergrond (zand/grind) aan het oppervlak komt te liggen waardoor (regen)water beter kan infiltreren.

Rivierverruiming kent ook nadelen. Vanwege de grootschaligheid van de ingrepen zijn opbrengsten in de vorm van delfstoffen meestal nodig om de projecten financieel haalbaar te maken. Als deze opbrengsten er niet/onvoldoende zijn kan het betekenen dat een rivierverruimingsproject geen doorgang vindt. Rivierverruiming in het winterbed gaat vaak ten koste van landbouwgebieden.

Daarnaast kan er sprake zijn van verlaging van grondwaterstanden doordat de rivierverruiming als drainage gaat fungeren. Als er sprake is van bijvoorbeeld dekgrondberging (zoals bij de Grensmaas) kan lokaal juist sprake zijn verhoogde grondwaterstanden die tot overlast kunnen leiden. Ook kunnen rivierverruimingsprojecten veel tijd kosten, bijvoorbeeld vanwege grondposities of een ontbrekende afzetmogelijkheid. Tenslotte verandert rivierverruiming ook het landschap, met als meest in oog springend voorbeeld de Maasplassen bij Roermond.

### 3.1.3 Vergroting hoogwaterveiligheid door retentie

Een derde mogelijkheid voor de vergroting van de hoogwaterveiligheid kan worden bereikt door de berging van water. Dit kan in gebieden die van nature bergend zijn (uiterwaarden, oude riviermeanders etc.) maar ook in daarvoor ingerichte retentiegebieden. Langs de Maas zijn drie retentiegebieden ingericht, twee bij het Lateraalkanaal (LKW-zuid en LKW-noord) en één bij Gennep (Lob van Gennep). Daarnaast is in het kader van de systeemwerking van de Maas onderzocht waar langs de Maas andere mogelijkheden zijn voor retentie. Op basis van verschillende onderzoeken, zowel naar aanleiding van het hoogwater van juli 2021 als op basis van modelstudies, is gekeken naar het effect van retentie tijdens hoogwater. De conclusie is dat retentie een bijdrage geeft aan hoogwaterveiligheid en bijdraagt aan een robuust riviersysteem.

#### 3.1.3.1 Retentiegebieden Lateraalkanaal-West en Lob van Gennep conform Maaswerken (POL Zandmaas)

De retentiegebieden Lateraalkanaal-West (LKW) en Lob van Gennep (LvG) zijn maatregelen uit het project Maaswerken en ontworpen met de ideeën en inzichten die er zo rond 2000 waren. Uitgangspunten bij het ontwerp van deze retentiegebieden zijn de Maaswerken-normen (HR2001). Retentiegebied LKW is ontworpen voor een 1/250 norm, voor LvG is een 1/1250 norm het uitgangspunt. Overwegingen hierbij waren dat LKW een maximaal effect moet hebben in de situatie waarvoor de keringen langs de Zandmaas zijn ontworpen (een 1/250 ontwerphoogwatergolf), terwijl LvG een maatregel is om de beneden-stroomse effecten (als gevolg van het project Maaswerken) op de bedijkte Maas te compenseren.

Door Maaswerken is uitgerekend dat voor de 1/250 ontwerphoogwatergolf retentiegebied LKW een maximaal waterstandsverlagend effect heeft van circa 15 cm bij Roermond, in benedenstroomse richting afnemend tot circa 5 cm waterstandsverlaging bij Mook. Voor retentiegebied LvG is in een 1/1250 ontwerphoogwatergolf een waterstandsverlaging berekend in de orde van 10 tot 15 cm voor de bedijkte Maas<sup>5</sup>.

#### 3.1.3.2 Retentie tijdens het hoogwater van juli 2021 (Fact Finding, 2021)

Tijdens het hoogwater van juli 2021 zijn de retentiegebieden LKW-zuid en LKW-noord ingestroomd. Het zuidelijk bekken is ontworpen op een 1/250 afvoer (3.275 m<sup>3</sup>/s, Maaswerken-normering); het noordelijk bekken op 1/50 (circa 2.700 m<sup>3</sup>/s). Omdat nog niet alle inlaten in de Zandmaas op Maaswerkenhoogte gebracht zijn, is de instroomdrempel van LKW-noord nog altijd gebaseerd op een 1/50 afvoer.<sup>6</sup>

De bekken zijn passief ingestroomd op respectievelijk 16 juli rond 9:00 (zuidelijk bekken) en 16 juli rond 21:00 uur (noordelijk bekken). De capaciteit van LKW-zuid is op basis van bodemhoogtes uit AHN3 geschat op 7,3 miljoen m<sup>3</sup> en dat van LKW-noord op 3,1 miljoen m<sup>3</sup>. Het noordelijk bekken is tijdens het hoogwater geheel gevuld.

---

<sup>5</sup> Benaming voor de Maas vanaf Boxmeer (links) en Heumen (rechts). De term is verouderd sinds de Limburgse Maas ook waterkeringen (dus dijken) heeft, maar de term wordt nog gebruikt.

<sup>6</sup> Dit betreft het deelprogramma Sluitstukkaden. Omdat dit niet zal plaatsvinden (immers de waterkeringen vallen nu onder het HWBP) is het onduidelijk wat het beleid ten aanzien van dit bekken is.

Op basis van hoogwater-markeringen en dronebeelden is vastgesteld dat de maximale waterstand in het noordelijk bekken ca. 20,35 m+NAP is geweest. Op basis van de Landsat satellietbeelden van 18 juli 2021 is het geborgen volume van het zuidelijk bekken geschat op 2,5 à 3 miljoen m<sup>3</sup>, dus ongeveer 1/3 van de capaciteit is benut. De maximale waterstand in het grootste deel van het zuidelijk bekken was circa 20,70 m+NAP; vastgesteld op basis van de Landsat satellietbeelden. Op de weilanden voor de instroomdrempel van het zuidelijk bekken stond mais. Hierdoor is de instroming van het gebied afgeremd, en heeft het gebied waarschijnlijk niet optimaal kunnen functioneren.

De afvoer naar de retentiegebieden is geschat op basis van waterstandsmetingen bij sluis Heel in combinatie met de dimensies van de inlaatwerken van LKW-zuid en LKW-noord. Hiervoor is gebruik gemaakt van formules voor stroming over een overlaat. De maximale afvoer-onttrekking is geschat op 35-60 m<sup>3</sup>/s (zuid) en 60-120 m<sup>3</sup>/s (noord). Nader onderzoek heeft uitgewezen, dat het verlagende effect op de waterstand bij Roermond 5 cm was, en dat dit benedenstrooms van Roermond 8 cm was (2 cm van LKW-zuid en 6 cm van LKW-noord). Het is onzeker of het noordelijk bekken al vóór de afvoerpiek vol was, of pas erna. Overigens stond op de noordelijke inlaat veel begroeiing, wat de instroom vertraagt en in dit geval een onbedoeld positief effect heeft gehad.

### 3.1.3.3 Retentiegebieden ten behoeve van systeemwerking Maas (RWS, 2016)

In opdracht van de stuurgroep Delta Maas van het Deltaprogramma heeft een werkgroep in 2013 onderzocht of er mogelijkheden zijn om van de Maas een robuuster systeem te maken, waarbij met name de onzekerheid rond het instromen van de dijkringen wordt beperkt en tegelijkertijd de bevolking in de bebouwingskernen goed beschermd blijft en de benedenstroomse effecten beperkt blijven.

Dit leidde tot een voorstel voor de aanpassing van een aantal dijkringen waarbij de dichtbebouwde (delen van) dijkringen in de Limburgse Maasvallei conform de landelijke richtlijnen en de nieuwe veiligheidsbenadering kunnen worden beschermd en voor een aantal grotere, niet of weinig bebouwde (delen van) dijkringen de ligging van de dijk wordt aangepast om tot een verbetering van hun stroomvoerende of bergende functie te komen. Dit wordt het verbeteren van de systeemwerking van de Maas genoemd.

De afspraak om het verlaten van het overstromingsvereiste te compenseren met maatregelen, heeft grotendeels als doel het verkrijgen van een robuust systeem door het behouden van rivierbed en het oplossen van knelpunten, en tevens op het beperken van een negatief waterstandseffect. Daarbij dienen de waterstanden bij een afvoer van 3800 m<sup>3</sup>/s zoveel mogelijk hetzelfde te blijven. Uit analyses is gebleken dat 12 van de 42 Limburgse dijktrajecten 'omdijkt' winterbed bevatten dat een belangrijke rol speelt in de hydraulische werking van het Maassysteem. Tegelijkertijd beschermen deze dijktrajecten geen volledig bebouwde kernen, maar juist delen van de vallei met minder bebouwing. Dit heeft geleid tot de volgende systeemmaatregelen (Tabel 3.1).

Tabel 3.1 Dijktrajecten systeemmaatregelen

Terugleggen van de dijk (verruiming)	Behoud bergende functie (retentie)
Geulle aan de Maas	Nattehoven – Grevenbicht – Roosteren
Baarlo	Ohé en Laak – Stevensweert
Venlo – Velden	Thorn – Wesseem
Lottum	Geijsteren
Arcen	Lob van Gennep
Well	
Bergen	

Het onderzoek van de werkgroep leidde tot de volgende conclusies met betrekking tot de werking van de vijf retentiegebieden en zeven dijkterugleggingen:

- De maatregelen dragen bij aan een robuust systeem in de Maasvallei.
- Het hele pakket van deze twaalf maatregelen zorgt voor een waterstandsverlaging zowel in de Maasvallei als in de bedijkte Maas. Daarmee wordt een belangrijke doelstelling van systeemwerking behaald.
- De retentie maatregelen (Well, Arcen, Baarlo - Hout-Blerick, Thorn–Wesseem en Venlo-Velden) zijn effectief voor de hele Maas en geven invulling aan de principes van de stuurgroep Delta Maas.

### 3.1.4 Afweging dijkversterking en rivierverruiming

#### 3.1.4.1 Balans tussen rivierverruiming en dijkversterking (ENW advies, 2017)

DGWB heeft aan het ENW gevraagd advies uit te brengen over de zogenaamde lange termijn ambitie voor het rivierengebied (LTAR). Het ENW heeft dit advies opgesteld samen met de Adviescommissie Water (AcW). Dit advies heeft betrekking op het rivierengebied, meer specifiek de Rijntakken en de Bedijkte Maas en het daaraan grenzende overstroombare gebied dat beschermd wordt door waterkeringen. De problematiek in de Maasvallei is afwijkend en maakt geen onderdeel uit van dit advies. Door het Expertise Netwerk Water (ENW) is in 2017 een advies geschreven over een balans tussen rivierverruiming en dijkversterking (ENW, 2017). Bij deze balans heeft het ENW zich gebaseerd op de volgende drie doorslaggevende (quote ENW) factoren:

1. *De doelmatigheid en kosteneffectiviteit van de bijdrage aan het verlagen van de overstromingskans van de waterkeringen*

De verwachting is dat het grootste deel van de dijken in het rivierengebied bij de wettelijke beoordeling in de komende jaren niet aan de nieuwe waterveiligheids-normen zal voldoen, met name omdat ze niet sterk genoeg zijn (macrostabiliteit, piping). Om het huidige grote tekort aan sterkte van de dijken in het rivierengebied op te lossen zijn dijkversterkende maatregelen meestal doelmatiger en kosteneffectiever dan rivierverruimende maatregelen. Dit komt doordat waterstandsverlaging slechts beperkt van invloed is op de faalkans van de waterkeringen vanwege faalmechanismen zoals piping en macrostabiliteit.

Met alleen rivierverruiming kan het huidige waterveiligheidsprobleem niet worden opgelost. Dat betekent dat in de regel alle afgekeurde waterkeringen versterkt moeten worden.

Indien toch al aan de waterkering gewerkt wordt, zijn de meerkosten voor het verhogen van de kering relatief gering. Dit verhoogt de kosteneffectiviteit van dijkversterkende maatregelen ten opzichte van rivierverruimende maatregelen.

Als op langere termijn als gevolg van klimaatverandering de piekafvoeren van de rivieren en daarmee de hoogwaterstanden toenemen, is er een gerede kans dat de situatie kan ontstaan dat de hoogte van de waterkeringen de meest kritische factor wordt bij het falen van de waterkering. Als de andere faalfactoren (piping, macrostabiliteit etc.) nog op orde zijn en om die reden versterking van de waterkeringen niet aan de orde zal zijn, zullen rivierverruimende maatregelen doelmatiger en kosteneffectiever worden.

2. *De mate waarin tevens een bijdrage geleverd kan worden aan het halen van vastgelegde doelen in het gebied, zowel binnendijks als buitendijks, voor onder meer:*

- Natuur (Natuurnetwerk Nederland, Natura2000)
- Waterkwaliteit, ecologisch en chemisch (KRW)
- Beheer vaarweg en uiterwaarden:
  - o Scheepvaart (o.a. bevaarbaarheidseisen)
  - o Ruwheidsbeheer (vegetatiebeheer, Stroomlijn)
  - o Sedimenthuishouding (o.a. erosie vaargeul)
- Winning bouwstoffen (zand, grind, klei)
- Economische en stedelijke ontwikkeling
- Recreatie
- Ruimtelijke en landschappelijke kwaliteit en belevingswaarde

Het is evident dat in de afweging maatregelen die meerdere doelen dienen en daarmee de integrale ontwikkeling van een gebied bevorderen en het potentiële draagvlak vergroten, hoger scoren dan maatregelen die slechts één doel dienen. Meerwaarde wordt vooral gecreëerd wanneer agenda's worden samengevoegd. Speciale aandacht bij rivierverruiming verdient de mogelijkheid tot winning van de bouwstoffen zand en klei omdat die meteen ook kunnen worden toegepast in de dijkversterking.

3. *Behoud veerkracht en flexibiliteit in het riviersysteem*

Een riviersysteem met veerkracht bezit het vermogen verschillende soorten impacts te kunnen opvangen. Tevens kunnen eventuele gevolgen van overstromingen relatief makkelijk hersteld worden (ENW advies, 2017). De veerkracht kan behouden dan wel vergroot worden door (meer) ruimte te geven aan de processen die bij een natuurlijk riviersysteem horen.

Het ENW en de AcW adviseren bij het zoeken van een balans tussen rivierverruimende en dijkversterkende maatregelen deze drie factoren te betrekken. De integrale afweging dient gebiedsgericht, met alle betrokken partijen (overheden, marktpartijen, terreinbeherende organisaties, NGO's) plaats te vinden. Het schaalniveau voor deze afweging is niet per dijkvak, maar minimaal op dat van een riviertak. Dit dient ook toekomstgericht te gebeuren, bijvoorbeeld door gebruik te maken van verschillende (bestaande) toekomstscenario's.

De conclusie is dat voor de korte termijn in het riviereengebied vanuit het oogpunt van doelmatigheid en kosteneffectiviteit dijkversterking de voornaamste maatregel is. In sommige delen van het riviereengebied zijn eventueel aanvullend op de dijkversterking rivierverruimende maatregelen mogelijk. Dit is het geval als waterstandsverlaging een significante bijdrage levert aan het verlagen van de overstromingskans van de waterkering en de rivierverruiming door functiecombinatie relatief goedkoop kan worden uitgevoerd.

ENW ziet met name buitendijks in de uiterwaarden potentie voor rivierverruimende maatregelen die goed in functiecombinatie opgepakt kunnen worden.

Met name bij beheer van vaarweg en uiterwaarden (scheepvaart, ruwheidsbeheer en sedimenthuishouding), waar het ministerie van I&W (Rijkswaterstaat) een belangrijke taak heeft. Ook de combinaties met de winning van bouwstoffen, natuur en/of waterkwaliteit zijn kansrijk; daarmee is de afgelopen jaren al veel ervaring opgedaan.

Gegeven zowel de verwachting dat rivierverruimende maatregelen op termijn van enkele decennia vanuit oogpunt van doelmatigheid en kosteneffectiviteit mogelijk weer aantrekkelijker worden, als het belang van het behoud en vergroting van de veerkracht in het riviersysteem dat naar de toekomst alleen maar belangrijker wordt, adviseren het ENW en de AcW om de binnendijkse gebieden (zie de systeemingrepen) die op termijn potentieel goed inzetbaar zouden zijn voor rivierverruiming zodanig ruimtelijk te bestemmen dat inzet als rivierverruimende maatregel dan nog mogelijk is.

#### 3.1.4.2 **Systeemwerking van de Maas**

In het rapport over de verbetering van de systeemwerking van de Maas (RWS, 2016) staat de volgende alinea over een robuust riviersysteem:

*“De maatregelen [n.b. systeemingrepen] hebben niet tot doel om klimaatveranderingen op te vangen of om tot realisering van de voorgestelde overstromingskansen te komen of daar aan bij te dragen. Voor die laatste opgaven (klimaat en overstromingskansen) wordt een maatregelpakket voor de gehele Maas ontwikkeld waar de compenserende maatregelen uit dit rapport autonoom onderdeel van uitmaken. De compenserende maatregelen zijn daarmee niet vergelijkbaar met andere rivier-verruimingsmaatregelen in de Maas. Ook zonder klimaatveranderingen of aanpassing van de normen, zouden de maatregelen uit dit rapport nodig zijn om van de huidige Maas een robuust systeem te maken en het verlaten van het overstromingsvereiste te compenseren.”*

In dit rapport wordt dus aangegeven dat een robuust riviersysteem gebaat is bij rivierverruiming om te anticiperen op gevolgen van klimaatverandering of aanpassing van de normering. Dat kan overigens gedaan worden in combinatie met dijkversterking. Elke vorm van rivierverruiming zal ook gedaan moeten worden onder het uitgangspunt dat alle waterkeringen in de Maasvallei voldoen aan de Maaswerken-normering.

#### 3.1.4.3 **Adaptieve Uitvoeringsstrategie Maas**

Met de programma's Ruimte voor de Rivier en Maaswerken zijn betekenisvolle rivierverruiming gerealiseerd. In het kader van het Deltaprogramma en het Nationaal Waterplan 2016-2021 is voorgesteld om de hoogwaterveiligheid vorm te geven via 'een krachtig samenspel van rivierverruiming en dijkversterking'. Dit uitgangspunt vormde ook de basis voor de Voorkeursstrategie voor de rivieren (VKS 2014, zie Deltaprogramma Rivieren, 2014).

Vanaf 2017 gelden nieuwe, aangescherpte wettelijke hoogwaterveiligheidsnormen in het rivierengebied. Vrijwel alle dijken langs de Maas hebben een versterkingsopgave tot 2050 (onder meer hoogte-, stabiliteit-, en piping-opgaven). Door verschillende karakteristieken pakt deze opgave heel verschillend uit voor deelgebieden van de Maas. Sterkteopgaven spelen in het hele Maasgebied maar de hoogteopgave varieert sterk. In het bedijkte deel van de Maas is de hoogteopgave minder groot dan in de Maasvallei, waar de hoogteopgave op sommige plekken zo groot is dat maatwerkoplossingen geboden zijn.

De Adaptieve Uitvoeringsstrategie Maas (AUM, zie Deltaprogramma Maas, 2019) biedt zicht op de mogelijkheden om de veiligheidsnormen te behalen met een combinatie van dijkversterking en rivierverruiming. Rivierverruiming wordt daarbij ingezet om de hoogteopgave te verminderen.

De inzet van rivierverruiming is beperkt ten opzichte van de VKS 2014, maar draagt nadrukkelijk bij aan een robuuste hoogwaterbescherming langs de Maas (Deltaprogramma Maas, 2019) met behoud van landschappelijke kernkwaliteiten en met regionaal draagvlak.

De AUM bouwt voort op de voorkeursstrategie van de Maasvallei en Bedijkte Maas uit 2014. Vanwege de nieuwe wettelijke norm heeft de Stuurgroep Deltaprogramma Maas (SDM) in 2017 opdracht gegeven om een Adaptieve Uitvoeringsstrategie Maas (AUM) op te stellen in de vorm van pakketten rivierverruimende maatregelen, die samen met de dijkversterking invulling geven aan het 'krachtig samenspel'. Binnen de doelstelling van de wettelijke veiligheidsnormen is de gezamenlijke ambitie van de overheden langs de Maas om samen te werken aan een Maasgebied dat nu en in de toekomst veilig en aantrekkelijk is, met een sterke economie en een duurzaam functionerende rivier. Hiermee wordt de lijn voortgezet uit Ruimte voor de Rivier en de reeds lopende Maasprojecten, die voortvloeien uit het Regionale Voorstel Maas 2016 (RVM2016). Dat zijn integrale projecten, met een meervoudige opgave, waaraan zowel het rijk als regionale partijen financieel bijdragen.

Bij het samenstellen van de AUM zijn alle maatregelen uit de eerdere potentiële voorkeursstrategieën beoordeeld op kosteneffectiviteit, ruimtelijke kwaliteit, de gevolgen voor het duurzaam functioneren van de rivier en de mate van (bestuurlijk) draagvlak. Voor de verschillende alternatieven is een waterstandsdeling bepaald waarmee is nagegaan in hoeverre knelpunten voor de ruimtelijke kwaliteit als gevolg van dijkverhogingen voorkomen kunnen worden. Als indicator hiervoor dienen zogeheten bijzondere oevers, fronten en dijktrajecten langs de Maas. De AUM bevat een referentie plus alternatief, een basispakket en twee alternatieven. De alternatieven betreffen maatregelen die aanvullend zijn op het basispakket vanuit de invalshoeken 'Ruimtelijke kwaliteit' (alternatief 3) en 'Ruimte waar het kan' (alternatief 4). Alle alternatieven voorzien in realisatie van de waterveiligheidsopgave.

De maatregelpakketten zijn geen blauwdruk voor 2050, maar bieden zicht op de potentiële waterstandsverlaging door rivierverruiming. Beoogd wordt om de waterstandsverlaging voor de periode 2020 – 2050 beleidsmatig vast te leggen en daarmee helderheid te bieden voor de ontwerphoogten van dijken en de inzet van gebieden voor rivierverruiming. De mogelijkheden om de waterstandslijn beleidsmatig te verankeren worden nog nader verkend.

De AUM biedt bouwstenen die ter inspiratie kunnen dienen voor verdere uitwerking in het gebied en voor het programma Integraal Riviermanagement (IRM). IRM is een initiatief van het Ministerie van IenW om, in samenwerking met andere partijen, na te gaan wat de samenhang is tussen verschillende opgaven in het rivierengebied (zoals de waterveiligheidsopgave, vervanging van/aanpassing aan kunstwerken en infrastructuur, bevaarbaarheid, zoetwaterbeschikbaarheid, natuur en waterkwaliteit). Beoogd wordt een integraal uitvoeringsprogramma te realiseren dat alle riviergebonden functies bedient. Dit programma wordt vastgelegd in de omgevingswet. De beleidsbeslissingen die medio 2023 zijn voorzien hebben vooral betrekking op 1) sedimentbeheer en rivierbodemplugging (welke ligging van de rivierbodem wordt nagestreefd?) en 2) de afvoercapaciteit van de rivier (in welke mate moet de afvoercapaciteit worden vergroot met rivierverruiming dan wel dijkversterking?).

De AUM geeft invulling aan het gewenste samenspel tussen dijkversterking en rivierverruiming vanuit de volgende drie aspecten:

1. de doelen van waterveiligheid;
  2. de wens om de ruimtelijke kwaliteit zoveel mogelijk te behouden en te versterken;
  3. het belang om de rivier duurzaam te kunnen beheren.
- De waterstandsdeling varieert per deeltraject van de Maas vanwege verschillende (historisch gegroeide) kenmerken van de deelgebieden.

Bij het ontwikkelen van de pakketten is gebleken dat integratie met andere doelen, opgaven en ambities het beste op projectniveau concreet gemaakt kan worden.

#### 3.1.4.4 IRM en bouwstenen van de Maas

Sinds 2019 loopt het programma Integraal Riviermanagement (IRM). Binnen IRM werken het Rijk, provincies, waterschappen en gemeenten samen aan de toekomst van de rivier gebieden. In juli 2022 is het rapport 'Systeembeschouwing Rijn en Maas' uitgebracht (IRM, 2022) waarin een toekomstperspectief is geschetst voor de wijze waarop het rivierengebied zich richting 2050 kan ontwikkelen. Het onderzoeksrapport beschrijft hoe onze rivieren zich ontwikkelen en schetst mogelijke oplossingen om het riviersysteem toekomstbestendig te maken. De Systeembeschouwing geeft adviezen vanuit rivierkundige visie en doet géén beleidsuitspraken. Uit dit rapport is de volgende toekomstvisie overgenomen.

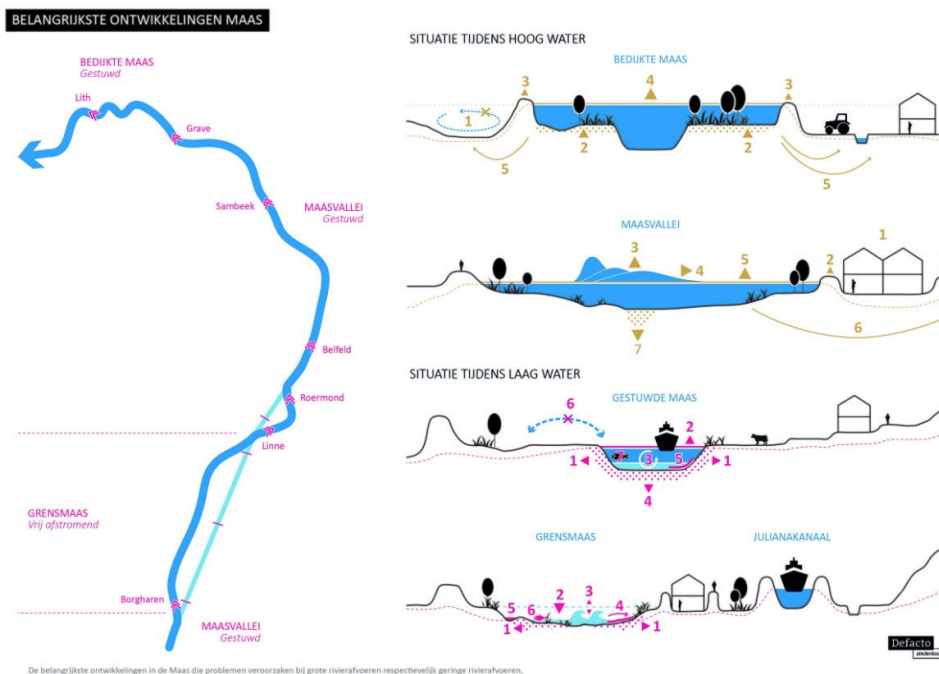
Voor de Maas is de grootste opgave de veilige afvoer van 10-20% grotere hoogwaterafvoeren (t.o.v. huidig), waarvoor de afvoercapaciteit moet worden vergroot. Een principiële vraag daarbij is of wordt beoogd te voorkomen dat de hoogwaterstanden hoger worden (in welke trajecten wel, en in welke niet?) en of de bedijkte riviertrajecten robuuster moeten worden met het oog op onzekerheden. Voor de bedijkte Maas komt daar nog één belangrijke afhankelijkheid bij, nl. die tussen bovenstrooms en benedenstrooms; of specifieker: dat de precieze opgave voor de afvoercapaciteit op de bedijkte Maas mede afhankelijk is van de topvervlakkingscapaciteit in de Maasvallei (in het bijzonder Plassenmaas en Zandmaas).

De tweede grote opgave voor de Maas is de uitgesproken ambitie om de natuurwaarden te vergroten, hetgeen een aantal aanpassingen vraagt die (soms) goed samengaan met vergroting van de afvoercapaciteit, maar meestal haaks staan op de gewenste condities vanuit de scheepvaart (kanaalfunctie) en waarschijnlijk ook lastig te combineren zijn met het vasthouden van zoetwater door te stuwen in tijden van watertekorten. Ook hier is sprake van een relevante afhankelijkheid, namelijk als eerdere zomerbedverdiepingen (ingevolge Maaswerken) teniet worden gedaan (om de hydrodynamiek en sedimenthuishouding enigszins te herstellen) en de afvoercapaciteit daardoor zou afnemen. Dan is compensatie nodig: en dat moet dan eerst. Een logische volgorde van beslissen is dan verder:

- 1) Over behoud topverflakking in de Maasvallei, dus:
  - a) wel of niet toestaan dijkverhogingen (hele Maasvallei) en rivierverruiming van de Zandmaas door terrasverlaging en -verbreding waardoor de topvervlakkingscapaciteit afneemt (als niet, dan is een duurzaam alternatief het geleidelijk aanpassen van het landgebruik en de bebouwing aan frequentere hoogwaters en een in de toekomst steeds groter wordend rivierbed);
  - b) met wel of niet eis tot compensatie van dat verlies aan topvervlakkingscapaciteit (met zgn. 'systeemmaatregelen').
- 2) Over vergroting van de afvoercapaciteit en het hoe, dus:
  - a) rivierverruiming of niet (accepteren breder rivierbed Maasvallei), c.q. rivierverruiming of dijkverhoging (bedijkte Maas) (als dijkverhoging, dan gevaar van lock-out: dijkverlegging wordt in de toekomst door intensivering ruimtegebruik waarschijnlijk steeds moeilijker);
  - b) als rivierverruiming: in de breedte, d.w.z. met dijkverleggingen en bypasses (veel ruimtebeslag, grote toekomstwaarde: uitbreidbaar) of in de diepte, d.w.z. met vergraving van het winterbed (minder ruimtebeslag, geringere toekomstwaarde, wel (beperkte) natuurontwikkeling mogelijk);
  - c) als met hogere dijken: aantasting bestaande landschapskwaliteit (dijkenlandschap) mogelijk, geen synergie met natuurontwikkeling (tenzij overruimte biedend).



- 3) Over de balans tussen scheepvaart en natuur (ruimtelijke kwaliteit) en of (en waar) die door verweving of nadrukkelijker scheiding van functies moet worden gerealiseerd. Bijv. door:
- de scheepvaartklasse voor een aantal trajecten of de gehele Maas te heroverwegen (lees: verlagen);
  - of vaker voor nieuwe lateraalkanalen te kiezen,
  - of door het verminderen van het aantal stuwen waar zulke kanalen al bestaan (Maasplassengebied).



Figuur 3.1 Systeemingrepen uit de Systeembeschuwing Rijn en Maas (IRM, 2022).

#### 3.1.4.5

#### Beschouwing op de beleidsmatige koppeling tussen dijkversterking en rivierverruiming

Het advies van de ENW (ENW, 2017) is om dijkversterking en rivierverruiming niet als alternatieve benaderingen tegenover te stellen, maar om een balans tussen deze beide maatregelen te kiezen. Een uitwerking van zo'n balans is in 2014 gegeven in de Voorkeursstrategie (VKS) voor de Maas van het Deltaprogramma. Het dijkverbeteringsprogramma van Maaswerken (project Sluitstukkaden) is hierin als uitgangspunt genomen, waarna een groot pakket aan rivierverruimingsmaatregelen de norm- en klimaatopgave dient op te lossen. De VKS is via een regioproces, een groot aantal onderbouwende onderzoeken en een maatschappelijke kosten-batenanalyse (MKB) tot stand gekomen. Het was bedoeld als richtinggevend visie op een strategie om hoogwaterveiligheid te bereiken door middel van rivierverruiming.

Deze strategie is echter tot dusver niet tot realisatie gekomen. Het project Sluitstukkaden is langs grote delen van de Maas niet voltooid en de VKS-rivierverruimingsmaatregelen zijn niet bestuurlijk vastgelegd. Indien dit zo blijft, zal het HWBP de gehele opgave (inclusief de achterstanden van programma Maaswerken) met dijkverhogingen aanpakken, een oplossing die nooit de voorkeur heeft gehad en ook nooit een expliciete beleidskeuze is geweest, maar het gevolg van het niet-realiseren van eerdere beleidskeuzes. De vraag is op welke wijze het (vroegere) beleid voor rivierverruiming gekoppeld kan worden aan de veiligheidstaakstelling van het HWBP.

Het juridisch beleidskader in Nederland is op dit moment dusdanig strak ingekaderd dat een dijk in één keer moet voldoen aan de gehele veiligheidsnormering; een gedeeltelijke verbetering is niet mogelijk (behoudens een marginale aanpassing in de zichthorizon). Het is dus een kwestie van bijna alles of niets. Toch zijn er mogelijkheden om dijkversterking en rivierverruiming te koppelen:

- 1 Officieel is het beleid nog steeds dat Maaswerken een 1/250 veiligheid moet opleveren (oude normering), maar aan het HWBP heeft overgedragen wat niet afgekomen is (de Sluitstukkaden).
- 2 In verschillende programma's is aangegeven dat een combinatie van rivierverruiming en dijkversterking noodzakelijk is om te komen tot een robuust riviersysteem.

Het is afdoende wanneer de VKS of de AUM op nationaal niveau planologisch worden vastgesteld, vergelijkbaar met de wijze waarop de Planologische Kernbeslissing Ruimte voor de Rivier (PKB RvdR) is vastgesteld. Daarmee wordt het de taak van het HWBP om de sluitstukkaden alsnog uit te voeren, met vergelijkbare ontwerphoogten, maar nu volgens de sterktenormen van het WBI2017 met aanvullende (beperkte) verhogingen op de trajecten waar de norm verhoogd is naar 1/1000 en 1/3000.

De rivierverruimingslocaties dienen dan voor 2050 met een hydraulische taakstelling nader uitgewerkt en gerealiseerd te worden (ook vergelijkbaar met het programma Ruimte voor de Rivier), een tijdspanne die te overzien is en het uitvoerend bedrijfsleven continuïteit biedt (dit geldt ook voor hierbij vrijkomende bouwgrondstoffen).

### 3.1.5 Conclusies

In de voorgaande paragrafen is een beoordeling gemaakt de effecten van de ingrepen dijkversterking, rivierverruiming en retentie op hun bijdrage aan de hoogwaterveiligheid. Ook is een beschouwing gemaakt over een afweging tussen deze ingrepen.

*De conclusie is dat alle ingrepen op hun eigen manier bijdragen aan hoogwaterveiligheid. Bij een afweging van de verschillende ingrepen is van belang dat nagedacht moet worden over de veiligheid die keringen moeten bieden en in welke mate andere ingrepen (rivierverruiming, retentie) bijdragen aan de hoogwaterveiligheid. Het gaat om de combinatie van ingrepen die het Maasdal hoogwaterveilig moet maken.*

Dijkversterking zorgt voor een vergroting van de hoogwaterveiligheid in de dijkkring zelf, maar kan de hoogwaterveiligheid in nog niet versterkte dijkkringen verlagen. Op dit moment is sprake van dijken langs de Maas die onder drie verschillende normen zijn ontworpen en slechts voor een deel voldoen aan de huidige normen.

Rivierverruiming zorgt over een groot traject voor lagere waterstanden en hiermee een toename van de hoogwaterveiligheid. Wel zijn veel ingrepen nodig om voor de hele Maasvallei te komen tot een significant effect op de waterstanden.

Retentie kan eveneens bijdragen aan de hoogwaterveiligheid zoals is gebleken tijdens het hoogwater van juli 2021.

Er zijn verschillende adviezen waarin een afweging wordt gemaakt tussen dijkversterking en rivierverruiming. Deze adviezen stellen dat hoogwaterveiligheid gevonden moeten worden in een krachtig samenspel tussen dijkversterking en rivierverruiming.

## 3.2 Oplossingen voor hoogwaterveiligheid en waterstandseffect van maatregelen

In deze paragraaf staat de volgende vraag centraal:

*Wat is het verwachte waterstandseffect van vergunde maatregelen? Wat is het effect van reeds geplande maar nog niet vergunde of gerealiseerde maatregelen?*

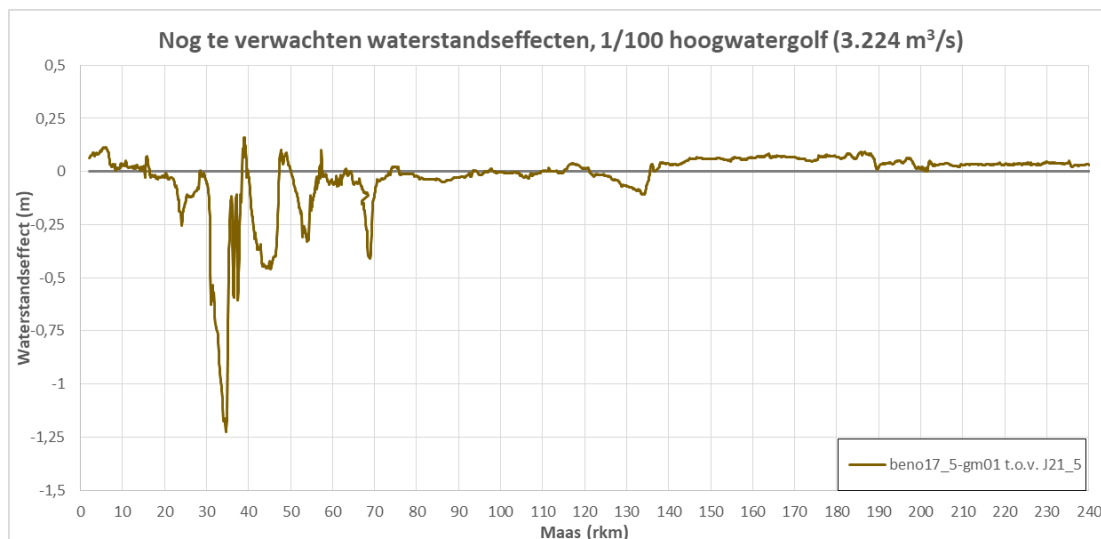
Om te bepalen wat het waterstandseffect van een maatregel is, moet niet alleen duidelijk zijn welke maatregelen zijn vergund, maar ook worden bepaald ten opzichte van welke situatie het effect moet worden berekend. Zoals zichtbaar is in Figuur 2.5 is het een groot verschil of de effecten worden bekeken ten opzichte van 1993 (de donkergroene lijn) of ten opzichte van de huidige situatie (het verschil tussen de lichtgroen en donkergroene lijn). In deze paragraaf nemen we de situatie ten tijde van het hoogwater van juli 2021 als uitgangspunt.

Voor de beantwoording van de tweede vraag moet een keuze worden gemaakt als het gaat om 'reeds geplande maatregelen'. Het kan hierbij gaan om plannen die onderdeel zijn van een MIRT-verkenning (Maastricht, Venlo, Oeffelt, Meanderende Maas), een samenwerking met Vlaanderen (Noordelijke sector Grensmaas), één van de alternatieven uit het AUM of de ingrepen die meegenomen zijn in het BOI2023.

Een waterstandsverlaging als gevolg van rivierverruimende maatregelen zorgt voor een vermindering van de kans op overstroming van een waterkering. Voor de bepaling van de hoogwaterveiligheid van het achterliggende gebied van een waterkering zijn ook de aspecten piping en macro-stabiliteit van belang, onderdelen van de sterkte van een waterkering. Nadrukkelijk wordt dan ook gesteld dat als wordt voldaan aan de hoogteopgave er nog wel sprake kan zijn van een versterkingsopgave (onder meer piping en stabiliteit). Deze versterkingsopgave wordt in de volgende analyses niet meegenomen omdat dit buiten de scope van het onderzoek valt.

### 3.2.1 Waterstandseffect vergunde maatregelen

Sinds 1995 is een groot pakket aan maatregelen uitgevoerd langs de Maas. De ontwikkeling van de waterstandseffecten in de loop van de jaren is zichtbaar in Figuur 2.5. Een groot deel van de beoogde waterstandsverlaging als gevolg van vergunde maatregelen is al bereikt en het nog resterende effect moet komen van de afronding van enkele lopende projecten. Het gaat hier om enkele projecten langs de Vlaamse zijde van de Maas (Maaswinkel, Elerweerd, Heerenlaak), de afronding van het project Grevenbicht (Grensmaas) en de afronding van de projecten Lomm en Maaspark Well (Zandmaas). Afronding van deze projecten zal leiden tot een extra waterstandsverlaging ten opzichte van de situatie in 2021, met name op de Grensmaas.



Figuur 3.2 Nog te verwachten waterstandseffect vergunde maatregelen.

### 3.2.2 Waterstandseffect van reeds geplande maatregelen

Er is geen eenduidig beeld bij 'geplande maatregelen'. Het kan hierbij gaan om plannen die onderdeel zijn van een MIRT-verkenning (Maastricht, Venlo, Oeffelt, Meanderende Maas), de ingrepen die meegenomen zijn in het BOI2023, een samenwerking met Vlaanderen (Noordelijke sector Grensmaas) of één van de alternatieven uit het AUM. Deze plannen zijn nog niet vergund (want dan zouden ze al in het rivierkundig model zijn opgenomen) en hebben dus in dat opzicht ook geen formele status. Ter indicatie zal van verschillende plannen wel het waterstandseffect worden getoond. Het is belangrijk om te beseffen dat de plannen verschillende stadia van uitwerking hebben, beoordeeld zijn met verschillende rivierkundige modellen, vaak een andere referentiesituatie bevatten en niet altijd met dezelfde hydraulische randvoorwaarden zijn beoordeeld. De getoonde effecten kunnen dus niet 1-op-1 met elkaar worden vergeleken.

#### 3.2.2.1 Waterstandseffecten BOI2023

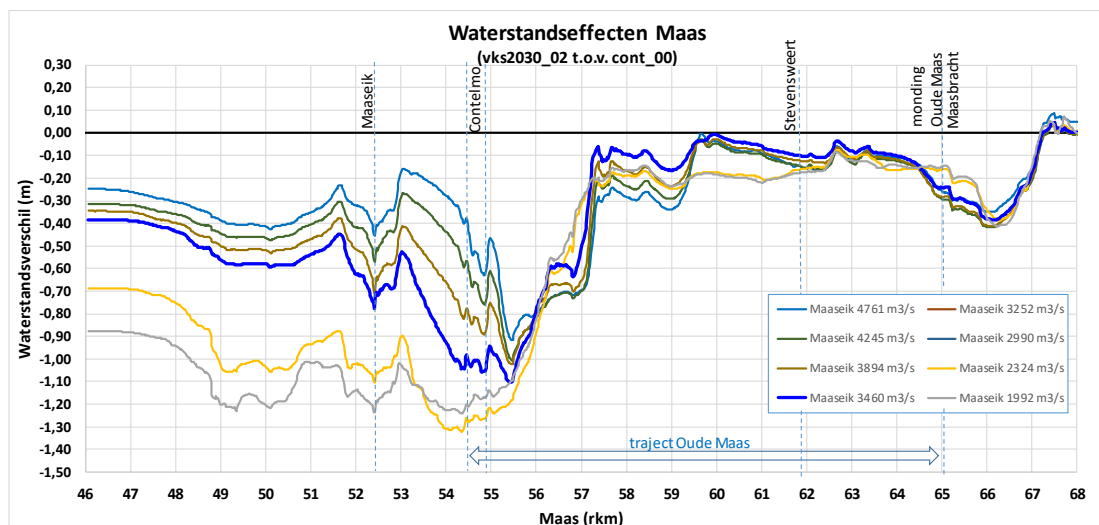
Voor het nieuwe Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium (BOI2023) heeft Deltares een hydraulisch model gemaakt waarin alle vergunningen en concrete plannen (MIRT-beslissingen, PPW's) zijn opgenomen. Daarnaast bevat dit model een actuele zomer- en winterbedpeiling (Deltares, 2021). De resultaten van dit model (werknaam BenO19) zijn vergeleken met het oude BenO17\_5 model van de Maas. Het verschil in waterstanden geeft een beeld van de verwachte waterstandseffecten.

De effecten bij rkm 50 komen redelijk overeen met die van de Noordelijke Sector. Verder springen vooral de effecten van Oeffelt (rkm 154), Demen-Dieden (183 – 186) en Meanderende Maas (rkm 187 – 200) in het oog met verlagingen in de orde van 40 tot 50 cm.



### 3.2.2.2 Waterstandseffecten Noordelijke Sector Gemeenschappelijke Maas

In opdracht van NV De Scheepvaart (tegenwoordig NV De Vlaamse Waterweg) en RWS-ZN is onderzocht welke rivierverruimende maatregelen mogelijk zijn in de noordelijke sector van de Gemeenschappelijke Maas, grofweg het traject tussen Roosteren en Maasbracht (Meijer e.a., 2016).

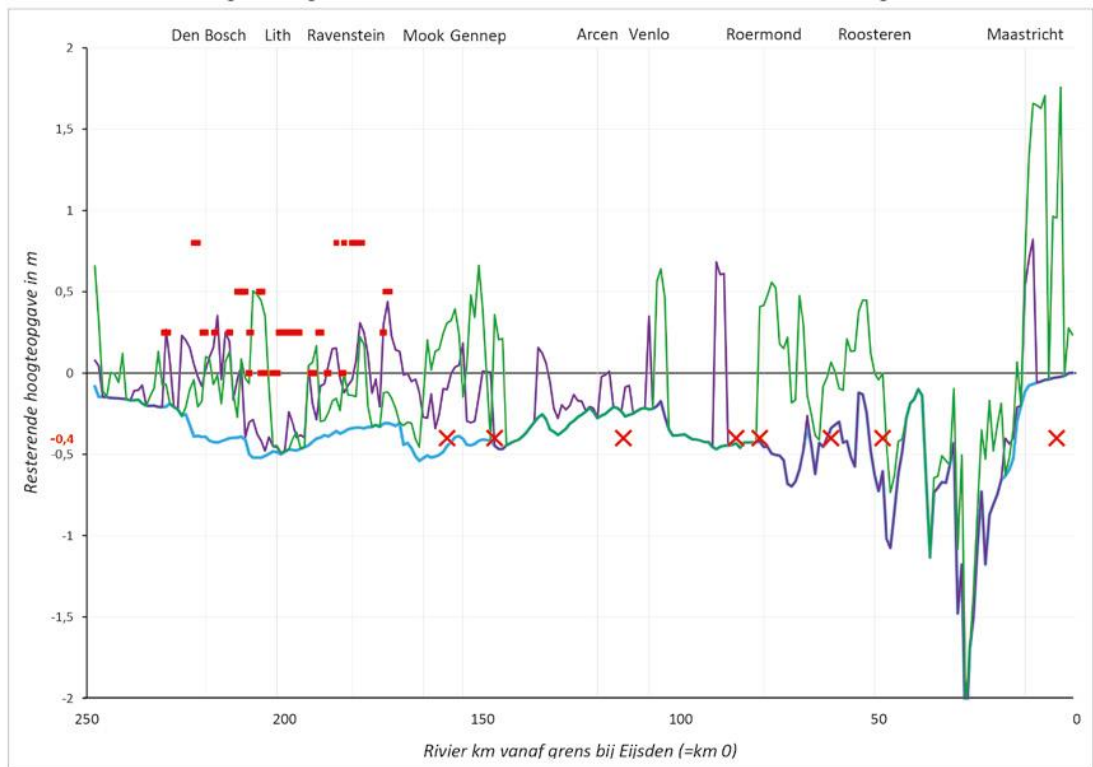


Figuur 3.4 Waterstandseffecten in de Maas als gevolg van het maatregelenpakket (2030)

Zichtbaar is een fors waterstandseffect dat in een maatgevende situatie op kan lopen tot circa 1m waterstandsverlaging. Dit pakket zorgt voor een significante verbetering van de hoogwaterveiligheid van Roosteren en Maaseik.

### 3.2.2.3 Waterstandseffecten Adaptieve Uitvoeringsstrategie Maas

In het rapport (Deltaprogramma Maas, 2019) zijn verschillende alternatieven beoordeeld op de waterstandseffecten en de resterende opgave voor dijkverbetering. Deze alternatieven zijn bedoeld om een doorkijk te geven naar toekomstige scenario's; het zijn nog geen concrete maatregelpakketten. In Figuur 3.5 is dit zichtbaar voor Alternatief 4, 'Ruimte waar het kan'. Goed zichtbaar zijn de grote opgave voor Maastricht (rkm 10) en de opgaven bij Roermond (rkm 80) en Venlo (rkm 105). Duidelijk is dat er een restopgave blijft om aan de hoogwaterveiligheid te voldoen.



Figuur 3.5 Resterende hoogteopgave en waterstandseffect (inclusief 14 uitgevoerde HWBP-projecten)

### 3.2.3 Conclusies

In de voorgaande paragrafen is een analyse gemaakt van de waterstandseffecten van nog niet gerealiseerde en/of niet vergunde rivierverruiming.

*Realisatie/voltooiing van reeds vergunde maatregelen zal ten opzichte van de situatie in 2021 nog leiden tot extra waterstandsverlaging, vooral op de Grensmaas. Nog geplande maatregelen kunnen aanvullende waterstandsverlaging geven. De grootte van deze verlaging is afhankelijk van de gekozen rivierverruiming, bijvoorbeeld een variant van de Adaptieve Uitvoeringsstrategie Maas (AUM) of een nog nader te bepalen pakket uit IRM. Hiermee kan een deel van de hoogteopgave worden ingelost.*

Van belang hierbij is te vermelden dat de hoogteopgave voor de waterkeringen slechts één van de componenten van hoogwaterveiligheid is; zelfs als aan de hoogteopgave wordt voldaan, is het nog altijd mogelijk dat een dijk moet worden versterkt om te voldoen aan de eisen met betrekking tot andere faalmechanismen, zoals piping en macro-stabiliteit.

## 4 Afvoerstatistieken van de Maas

In dit hoofdstuk staan de volgende vraagstukken centraal:

C.1	Wat is de kans behorend bij de opgetreden afvoeren van juli 2021; voor het hele jaar én voor het zomerhalfjaar? Hoe verschilt deze kans voor verschillende locaties langs de Maas ten gevolge van de instromende zijrivieren en de topvervlakking?
C.2	Wat is de kans van de opgetreden golfvorm?
C.3	Bij welke omstandigheden (neerslag, smeltwater, ...) worden extreme hoogwaters (hoger dan juli 2021) verwacht? Hoe ziet de golfvorm er in deze scenario's uit?

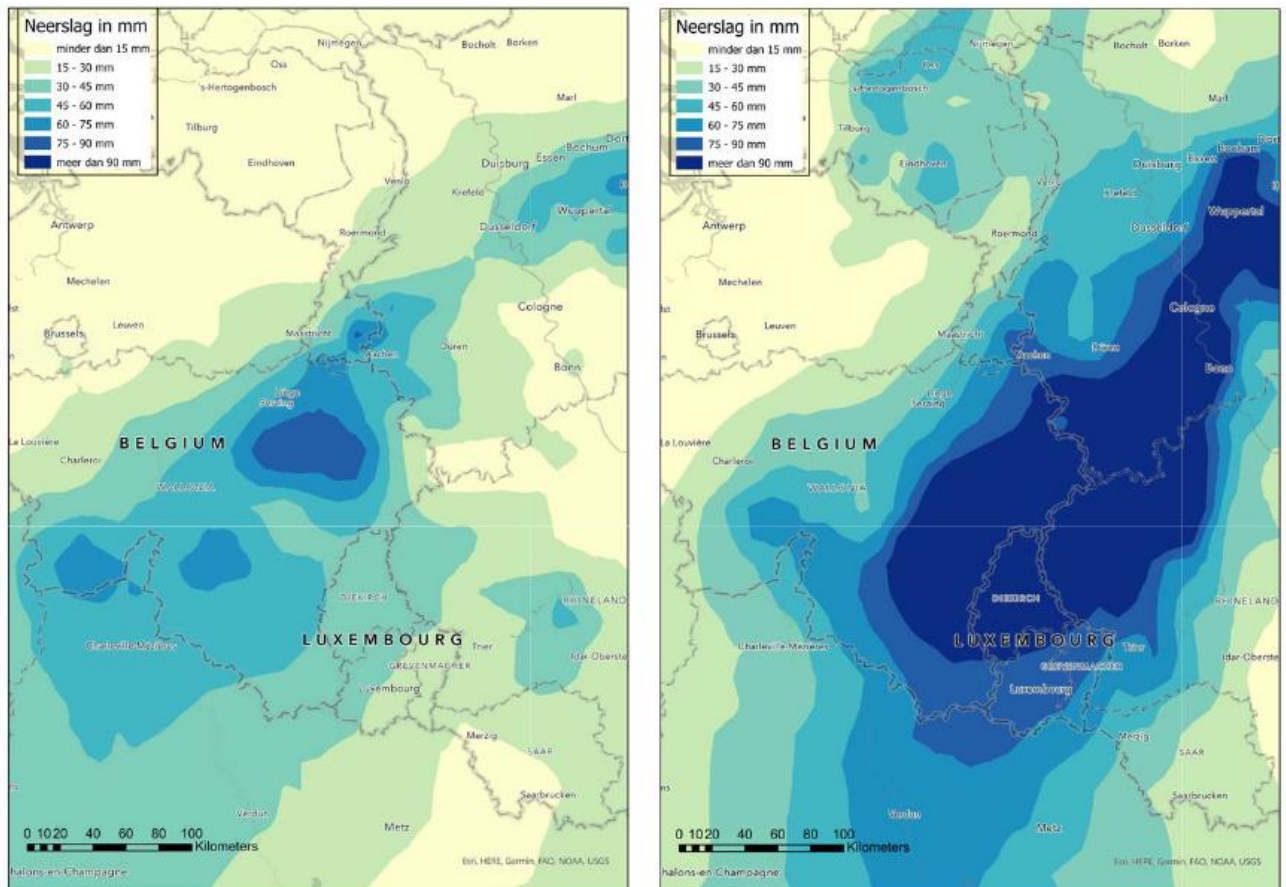
### 4.1 Overschrijdingskans van de piekafvoer van juli 2021

In deze paragraaf staat de volgende vraag centraal:

*Wat is de kans behorend bij de opgetreden afvoeren van juli 2021; voor het hele jaar én voor het zomerhalfjaar? Hoe verschilt deze kans voor verschillende locaties langs de Maas ten gevolge van de instromende zijrivieren en de topvervlakking?*

Op 13, 14 en 15 juli ontstond er een weersysteem in het grensgebied van Duitsland, België, Luxemburg en Nederland (ENW, 2021), wat veel vochtige lucht bevatte en langzaam bewoog. Dit weersysteem leidde tot extreme neerslag. Er viel 182 mm regen in 48 uur in Ubachsberg een gemeente in Limburg, Nederland. In Limburg valt er gemiddeld in de maand juli 74 mm. In de buurt van Aywaille, België op 13 juli en in het gebied van Essen in Duitsland tot Mersch in Luxemburg viel op 14 juli nog veel meer regen in deze periode (Figuur 4.1). Deze neerslag vertaalde zich uiteindelijk in extreme afvoeren. Van der Veen & Agtersloot (2021) berekenden een afvoer van 3.284 m<sup>3</sup>/s bij Borgharen en 3.310 m<sup>3</sup>/s bij Sint Pieter. In het vervolg van deze paragraaf wordt geanalyseerd hoe extreem deze afvoeren zijn. Daarbij wordt onderscheid gemaakt in de kans dat een dergelijke afvoer wordt overschreden in een jaar en de kans dat dat in het zomerhalfjaar gebeurt.





Figuur 4.1: Neerslag (mm) op 13 juli en 14 juli 2021, afgeleid uit de E-OBS dataset<sup>7</sup> (Bron: ENW, 2021).

#### 4.1.1 Analyse van de afvoerstatistiek

In dit rapport wordt de afvoerstatistiek afgeleid door toepassing van de volgende drie methoden:

- 1 Het fitten van een GEV verdeling op data van piekafvoeren (GEV = Generalized Extreme Value);
- 2 Het fitten van een Gumbel-verdeling op data van piekafvoeren;
- 3 Het afleiden van een empirische kansverdeling uit modelresultaten van GRADE (Generator of Rainfall And Discharge Extremes).

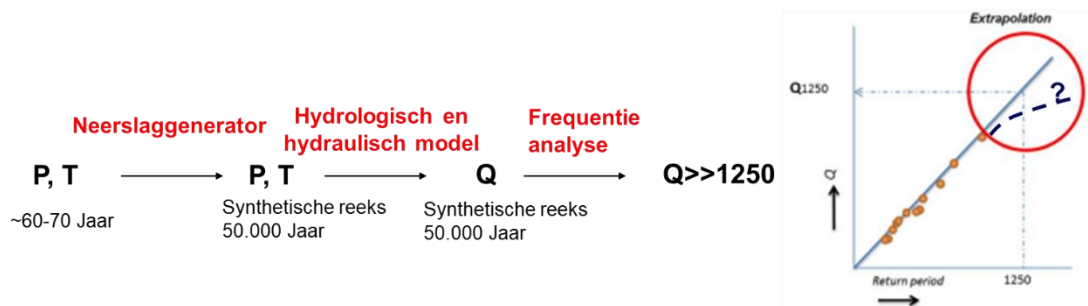
De GEV- en de Gumbel-verdeling gebruiken de gemeten afvoeren als basis. De verdelingen worden vervolgens geëxtrapoleerd om afvoeren voor grote terugkeertijden te kwantificeren. Het nadeel van het gebruik van deze kansverdelingen is dat er geen rekening kan worden gehouden met mogelijke fysieke beperkingen van afvoeren die kunnen optreden in het extreme bereik. Een voorbeeld van deze fysieke beperkingen is de afvoercapaciteit van de rivier; overstromingen bovenstrooms reduceren over het algemeen piekafvoeren benedenstrooms. De extrapolatie van de GEV- en Gumbel-verdeling kan dus te hoge afvoeren geven voor grote terugkeertijden. Het GRADE instrumentarium houdt wel rekening met dergelijke fysieke karakteristieken van het watersysteem door gebruik te maken van hydrologische en hydraulische modellen.

<sup>7</sup> De E-OBS is een Europese dataset van het ECMWF met onder meer neerslag op basis van metingen

Een gedetailleerde beschrijving van GRADE is te vinden in Hegnauer et al. (2014). Ter introductie volgt hier een korte beschrijving. De neerslaggenerator stelt een synthetische reeks van 50.000 jaar aan dagwaarden van neerslag, temperatuur en verdamping samen door trekkingen uit te voeren uit de gemeten historische reeks van ongeveer 65 jaar. Deze synthetische tijdreeks wordt vervolgens gebruikt als invoer in de hydrologische en hydraulische modellen om een 50.000 jaar lang afvoertijdreeks te genereren (Figuur 4.2). bij het uitvoeren van trekkingen wordt rekening gehouden met het feit dat de volgorde van dagen realistisch moet zijn. Dat betekent onder andere dat de verschillende seizoenen niet door elkaar gebruikt worden. Een koude winterdag kan dus niet optreden direct na een warme zomerdag. In GRADE geldt dus ook dat de kans op een hoogwater in de wintermaanden groter is dan in de zomermaanden, conform de meetreeks van 65 jaar.

Door gebruik te maken van fysisch-gebaseerde hydrologische en hydraulische modellen geeft GRADE voor de Maas uiteindelijk minder hoge afvoeren bij extreme terugkeertijden (vanwege overstromingen in binnendijkse gebieden) in vergelijking met de GEV- en Gumbel-verdeling, zie Figuur 4.3. Een andere oorzaak van de lagere uitkomsten van GRADE is dat de grootste dagneerslag in de synthetische reeks van 50.000 jaar nooit groter kan zijn dan de grootste dagneerslag in de reeks van 65 jaar waaruit de trekkingen zijn uitgevoerd. Voor grote herhalingstijden worden corresponderende dagneerslagen daardoor mogelijk onderschat. Meerdaagse neerslagsommen kunnen wel groter zijn dan waargenomen in de reeks van 65 jaar doordat nieuwe combinaties van opeenvolgende dagen worden gegenereerd met GRADE. Voor kleinere stroomgebieden zoals de Vecht en de Maas is de kans op onderschatting van piekafvoeren groter dan voor grotere stroomgebieden zoals de Rijn, als gevolg van het feit dat dagneerslagen in de synthetische reeksen nooit groter zijn dan de grootste dagneerslag uit de meetreeks.

Het GRADE instrumentarium wordt sinds 2014 gebruikt voor beleidsadvies en sinds 2017 voor het bepalen van de randvoorwaarden voor het Beoordelings- en Ontwerp Instrumentarium (BOI) voor zowel het huidige als het toekomstige klimaat. Met GRADE is ook een analyse uitgevoerd waarin rekening is gehouden met onzekerheden in de neerslaggenerator en de hydrologische en hydraulische modellen (Hegnauer et al., 2014). Dit resulteert in iets hogere afvoeren voor het bereik van grote herhalingstijden (zie Bijlage G.1).



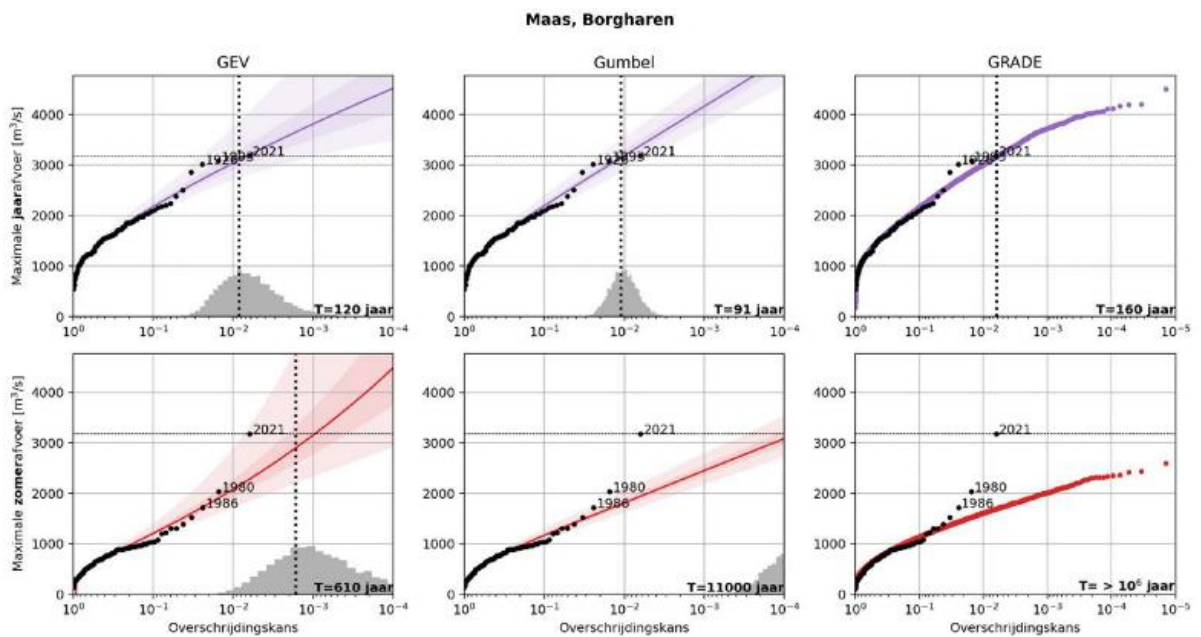
Figuur 4.2: Illustratie van de GRADE instrumentarium waarmee de extreme afvoeren worden bestudeerd door gebruik te maken van de neerslaggenerator, hydrologische en hydraulische modellen. P staat voor neerslag, T voor temperatuur en Q voor afvoer.

#### 4.1.2 Terugkeertijd van het hoogwater van 2021

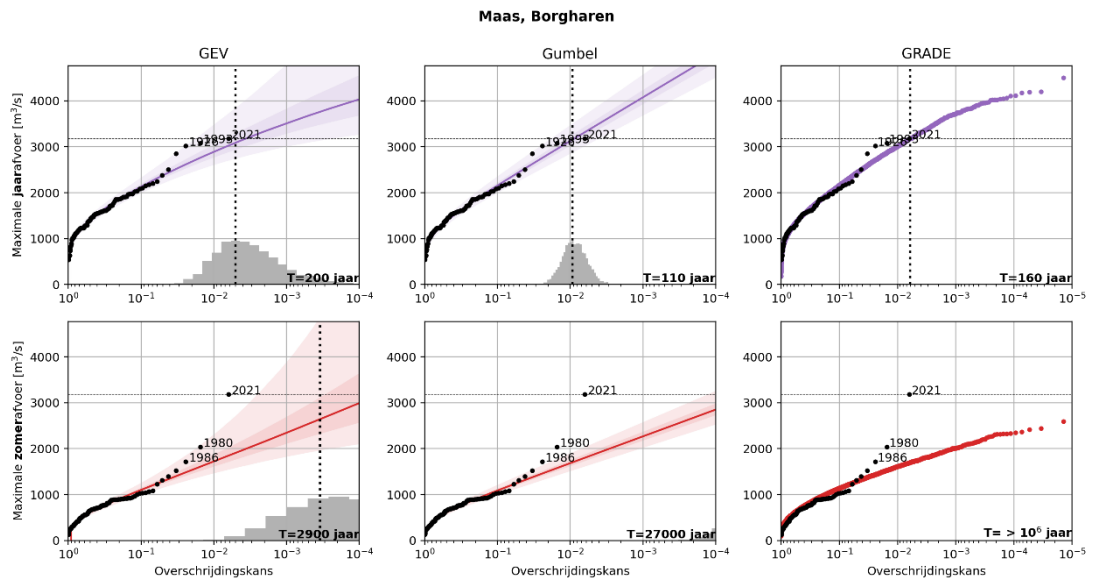
In Figuur 4.3 is de piekafvoer van juli 2021 uitgezet tegen piekafvoeren van andere hoogwaters (boven: alle afvoeren, onder alleen zomerhoogwaters) en de afgeleide kansverdelingen. De stippellijn geeft aan wat de geschatte piekafvoer is volgens de kansverdelingen bij een terugkeertijd van ongeveer 100 jaar. De terugkeertijd (of herhalingstijd) van het hoogwater van 2021 is gelijk aan respectievelijk 120, 91 en 160 jaar voor de GEV-, Gumbel en GRADE kansverdelingen (Figuur 4.3). Voor de Gumbel- en GEV verdelingen betreft het terugkeertijden die zijn afgeleid op basis van alle metingen in de

meetreeks, dus inclusief het hoogwater van 2021. In de analyse van GRADE is het hoogwater van 2021 niet meegenomen, zie paragraaf 4.1.3 voor een toelichting. De onderlinge vergelijking tussen de methoden is in die zin dus niet helemaal eerlijk. Als ook voor de GEV- en Gumbel verdelingen het hoogwater van 2021 niet wordt meegenomen zijn de herhalingstijden respectievelijk 200 en 110 jaar (zie Figuur 4.4) in plaats van 120 en 91 jaar.

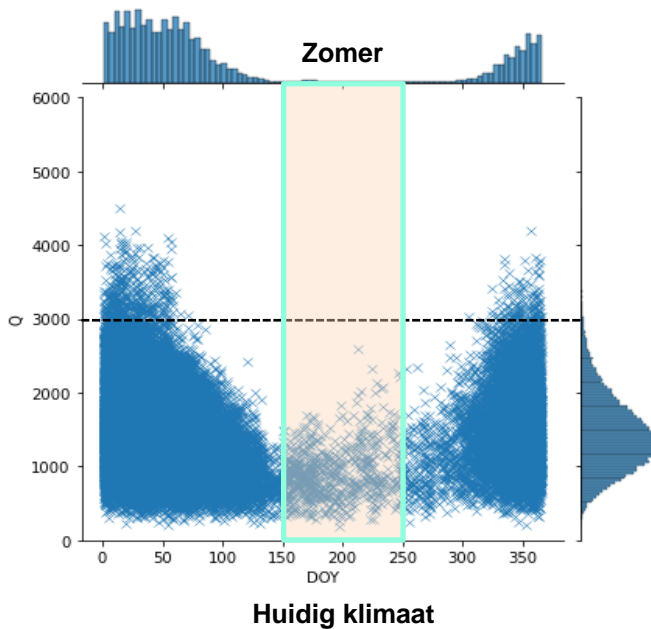
Als alleen zomerhoogwaters worden beschouwd nemen de geschatte terugkeertijden van het hoogwater van 2021 aanzienlijk toe. Ook de verschillen in uitkomsten tussen de drie methoden onderling nemen aanzienlijk toe: 600, 11.000 en >1 miljoen jaar voor respectievelijk de GEV-, Gumbel en GRADE kansverdelingen. Als we ook hier consistent het hoogwater van 2021 niet meenemen in de kansbepaling zijn de herhalingstijden respectievelijk 2.900, 27.000 en >1 miljoen jaar. Deze zeer uiteenlopende uitkomsten zijn te verklaren doordat het zomerhoogwater van 2021 veel extremer is dan de andere zomerhoogwaters uit de meetreeks (bijvoorbeeld de hoogwaters van 1980 en 1986). Bovendien is er in het GRADE instrumentarium nauwelijks sprake van zomerhoogwaters (Figuur 4.5). Dit komt doordat GRADE gebruik maakt van een resampling techniek, waardoor de neerslag op één dag in de synthetische reeks van 50.000 jaar nooit groter kan zijn dan de grootste dagneerslag uit de meetreeks van 65 jaar. De piekafvoer van het zomerhalfjaar van 1980 heeft volgens GRADE een terugkeertijd van ongeveer 1000 jaar (als alleen zomerhoogwaters beschouwd worden). GRADE lijkt de kans op optreden van zomerpieken dus (sterk) te onderschatten. Voor Gumbel en GEV lijkt het ook waarschijnlijk dat ze de kans op optreden van extreme zomerpieken onderschatten, omdat de berekende herhalingstijden van het hoogwater van 2021 substantieel groter zijn dan de lengte van de onderliggende meetreeksen. De mate van onderschatting is echter minder groot dan voor GRADE het geval is.



Figuur 4.3: Extreme waarden verdeling voor de piekafvoer van de Maas bij Borgharen Dorp, bepaald met een Generalized Extreme Value (GEV) verdeling (links), een Gumbelverdeling (midden) en het GRADE instrumentarium (rechts) op basis van de maximale afvoer in een kalenderjaar (bovenste rij) en het zomerhalfjaar (onderste rij). De kleurarcering geeft het betrouwbaarheidsinterval van de extreme waarde verdelingen weer (2.5-97.5% en 25-75%), en de histogrammen de kansverdeling van de herhalingstijd van de 2021 piekafvoer. De beste schatting van de herhalingstijd is weergegeven in elk panel. (Bron: ENW, 2021)



Figuur 4.4: Vergelijkbaar als Figuur 4.3, met als enige verschil dat de Gumbel- en GEV verdelingen nu gefit zijn op de meetreeks zonder het hoogwater van 2021 (Bron: Guus Rongen, persoonlijke communicatie).



Figuur 4.5: Verdeling van de berekende piekafvoer bij Borgharen over het jaarkalender (day-of-year; DOY) op basis van 50.000 jaar GRADE berekeningen voor het huidige klimaat. De zwarte stippellijn geeft bij benadering de gemeten afvoer op 15 juli 2021 weer. Het histogram aan de bovenzijde toont het aantal keer dat deze afvoer wordt overschreden. Een afvoer van meer dan 3.000 m<sup>3</sup>/s is in de zomermaanden van de synthetische reeks niet voorgekomen (Bron: ENW, 2021)

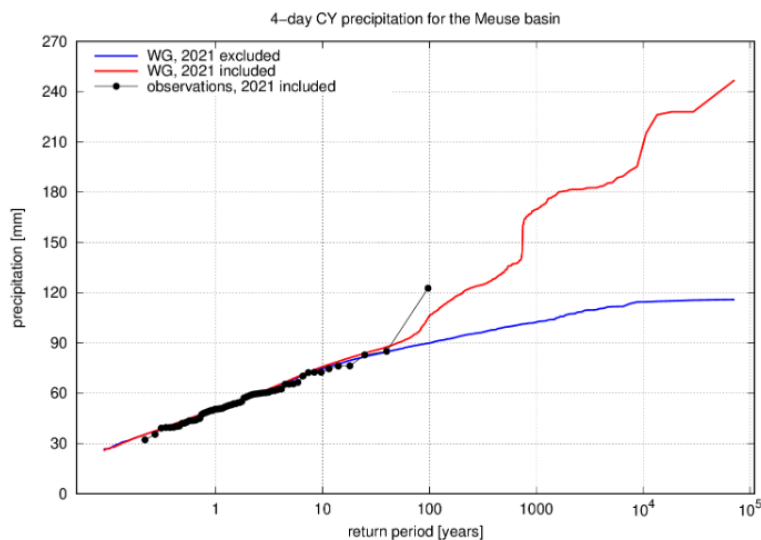
Een aanvullende complicatie bij het bepalen van de kansen op extremen is dat door klimaatverandering de kans op een extreem zomerhoogwater de laatste jaren mogelijk (sterk) is toegenomen. In de statistische methoden wordt daar geen rekening mee gehouden. Dat kan er verder aan bijdragen dat de kans op voorkomen van een dergelijk hoogwater wordt onderschat.

Er is in het kader van onderhavige studie geen analyse uitgevoerd naar de herhalingstijd van de neerslag in het gebied. Een complicatie bij het schatten van de herhalingstijd op basis van de neerslag is dat er mogelijke uitkomsten zijn. Zo kan de uitkomst sterk afhangen van de beschouwde locatie en/of stroomgebied. En verder is de keuze van de duur/periode van belang; de hoogste dagneerslag kan een andere herhalingstijd hebben dan de hoogste 2-, 3 of 4-daagse neerslagsom. Er is daarom besloten om de herhalingstijd alleen te bepalen op basis van de afvoer omdat dat de “integrator” is van de neerslag die in de verschillende deelgebieden en de verschillende perioden valt. Overigens heeft de “World Weather Attribution Community” wel een uitgebreide analyse gedaan van de neerslag (Kreienkamp et al., 2021). Zij kwamen tot de conclusie dat de neerslag een herhalingstijd had van 400 jaar. Echter, deze herhalingstijd heeft alleen betrekking op het gebied waar de extreme neerslag viel. Dat gebied bevat niet het bovenstroomse deel van de Maas en wel enkele zijrivieren van de Rijn zoals de Ahr en de Erft. Verder blijkt ook uit hun analyse dat er significante ruimtelijke variaties zijn in geschatte herhalingstijden.

#### 4.1.3 Bevindingen uit aanvullend onderzoek

Door Van Voorst & Van den Brink (2022) is het zomerhoogwater van 2021 toegevoegd aan de invoergegevens van de neerslaggenerator van het GRADE instrumentarium. Na deze toevoeging genereert de neerslaggenerator echter een synthetische tijdreeks van de neerslag die onrealistisch is. Figuur 4.6 toont de resulterende frequentielijn van 4-daagse neerslagsommen. De blauwe lijn illustreert de 4-daagse neerslagsom uit de neerslaggenerator van de Maas zonder hoogwater van 2021 en de rode lijn illustreert de 4-daagse neerslagsom uit de neerslaggenerator van de Maas na toevoegen van hoogwater van 2021.

Door het ontbreken van neerslaggebeurtenissen in de zomer van een vergelijkbare orde als juli 2021 is de weergenerator niet in staat om verschillende extreme gebeurtenissen te genereren, wat leidt tot overmatige aanwezigheid van de gebeurtenis van juli 2021 in de synthetische tijdreeks. Het resultaat is een onregelmatig verloop van de frequentieverdeling in Figuur 4.6 (rode lijn).

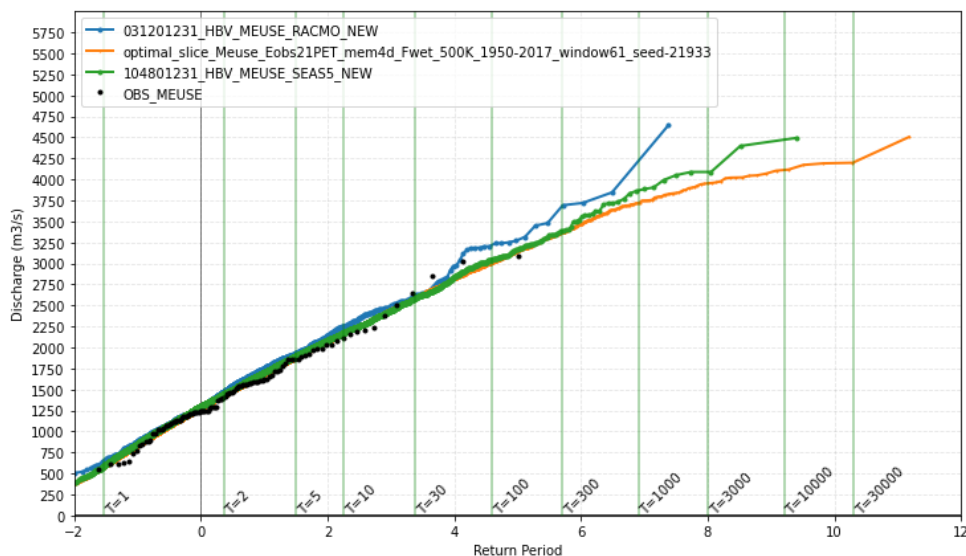


Figuur 4.6: De gesimuleerde vierdaagse neerslag in de neerslaggenerator. De blauwe lijn geeft de gesimuleerde vierdaagse neerslag zonder het hoogwater van 2021 weer en de rode lijn geeft de gesimuleerde vierdaagse neerslag met het hoogwater van 2021 weer. De zwarte lijn geeft de observaties weer met het hoogwater van 2021 (Bron: Van Voorst & Van den Brink, 2022)

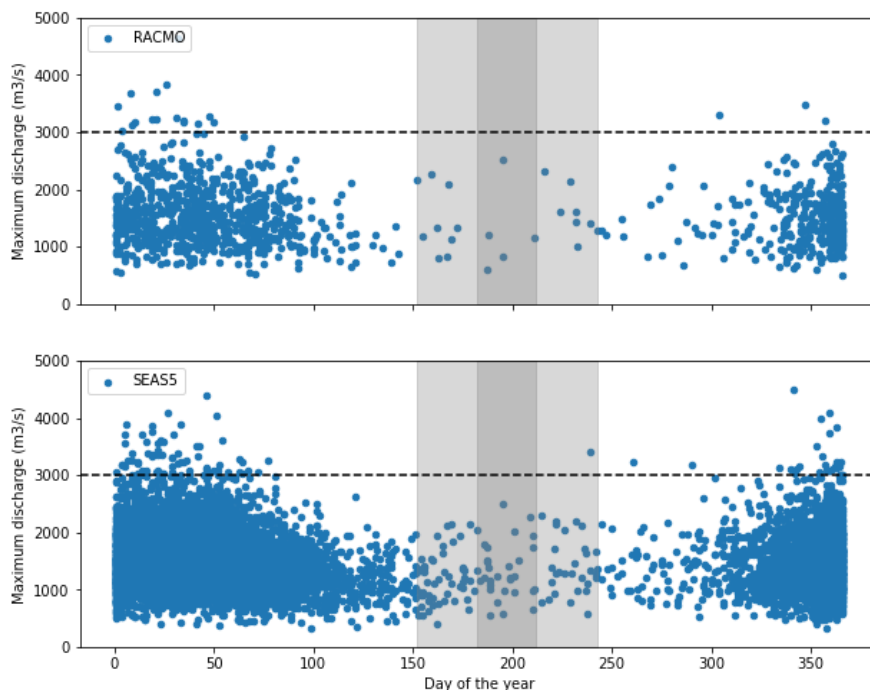
Als mogelijk alternatief kunnen weer- en klimaatmodellen dienen als basis voor synthetische tijdreeksen. Bijvoorbeeld de dataset van het RACMO model ([RACMO](#)) bevat 16 realisaties van weerscenario's van elk 72 jaar (1950 tot 2021), wat resulteert in een dataset van totaal 1152 jaar. De SEAS5 ([SEAS5](#)) dataset (seizoensverwachtingen van EMCWF) bevat een reeks van in totaal 8496 jaar aan weerscenario's. Het gebruik van de weer- en klimaatmodellen om met GRADE synthetische tijdreeksen af te leiden wordt momenteel onderzocht. De resultaten van dat onderzoek kunnen echter niet meegenomen worden binnen het onderhavige onderzoek. Er zijn, mede naar aanleiding van het hoogwater van 2021, wel enkele analyses uitgevoerd over de mogelijke impact op de uitkomsten van GRADE (Hegnauer, 2022). Door het toevoegen van de weer- en klimaatmodellen worden de afvoeren voor de grote terugkeertijden naar boven bijgesteld en de lage afvoeren blijven gelijk (Figuur 4.7). Verder blijft de statistiek voor het kalenderjaar vrijwel gelijk, maar neemt de kans op zomerhoogwaters wel iets toe (Figuur 4.8).

We kunnen concluderen dat het toevoegen van het hoogwater 2021 leidt tot onrealistische resultaten in de huidige methode, vanwege de beperkte lengte van de basisdataset. Deze beperkte lengte zou kunnen worden aangevuld met weer- en klimaatmodellen. De eerste resultaten zien er veelbelovend uit, omdat de zomerhoogwaters beter zijn gerepresenteerd in de reeksen van de weer- en klimaatmodellen.

Bovendien hebben de weer- en klimaatmodellen een bijkomend voordeel dat klimaatverandering, samenvallen van de rivieren Rijn, Maas en Vecht en samenvallen van wind op zee en rivierafvoeren beter kunnen worden voorspeld met deze modellen, waardoor ook voor de lange synthetische reeks deze processen kunnen worden meegenomen. Om een beter onderbouwde kans van het hoogwater van 2021 te geven, is meer onderzoek naar de uitkomsten van de weer- en klimaatmodellen nodig.



Figuur 4.7: De afvoerstatistiek van de Maas gebaseerd op de neerslaggenerator met als basis de observaties zonder het hoogwater van 2021 (oranje lijn), met als basis de RACMO dataset (blauwe lijn) en de SEAS5 dataset (groene lijn). De zwarte punten zijn de observaties zonder de hoogwater van 2021 toegevoegd (Bron: Hegnauer, 2022). De groene lijnen op de x-as geven de terugkeertijden weer en de zwarte lijnen de Gumbelverdeling.



Figuur 4.8: Verdeling van de berekende piekafvoer bij Borgharen over de jaarkalender op basis van 50.000 jaar GRADE berekeningen met de RACMO dataset (bovenste paneel) of SEAS5 (onderste paneel). De zwarte stippellijn geeft bij benadering de gemeten afvoer op 15 juli 2021 weer. (Bron: Hegnauer, 2022)

## 4.2 Kans opgetreden golfvorm

In deze paragraaf staat de volgende vraag centraal:

*Welke onderschrijdingskans heeft de golfvorm van juli 2021?*

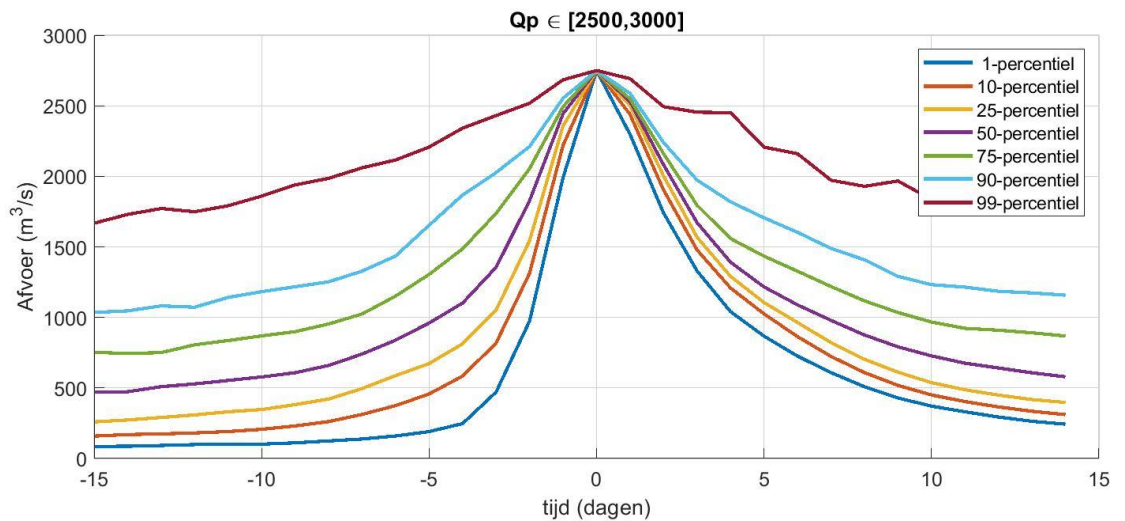
Om deze vraag te beantwoorden wordt in sectie 4.2.1 eerst ingegaan op de kennis over golfvormen uit de GRADE-dataset. Vervolgens wordt in sectie 4.2.2 nagegaan hoe zich dit verhoudt tot het hoogwater van juli 2021.

### 4.2.1 Golfvormen in de GRADE-dataset

De statistiek van golfvormen is afgeleid met het GRADE modelinstrumentarium. Met GRADE is een synthetische reeks afvoeren van 50.000 jaar gegenereerd. Uit die lange reeks is elk jaar de afvoergolf geselecteerd met de hoogste piekafvoer. Deze zijn vervolgens ingedeeld in verschillende “klassen” van piekafvoeren. Voor elke klasse zijn daaruit percentielen van golfvormen afgeleid.<sup>8</sup> Figuur 4.9 toont, als voorbeeld, de klasse van piekafvoeren in het interval van 2.500 m<sup>3</sup>/s tot 3.000 m<sup>3</sup>/s, met daarbij zeven golfvormen corresponderend met percentielwaarden van 1, 10, 25, 50, 75, 90 en 99%. De waarde van de percentielen geven de kans op een smallere golfvorm aan. Dus, bijvoorbeeld, er is een kans van 75% dat een afvoergolf optreedt die smaller is dan de 75-percentiel golfvorm. Dat betekent automatisch dat er een kans van 25% is op een bredere golfvorm.

In WBI2017 wordt gebruik gemaakt van de gemiddelde golfvorm van alle afvoergolven groter dan 3.500 m<sup>3</sup>/s (Hegnauer et al., 2014). Dit komt vrijwel overeen met het 50-percentiel (de mediaan).

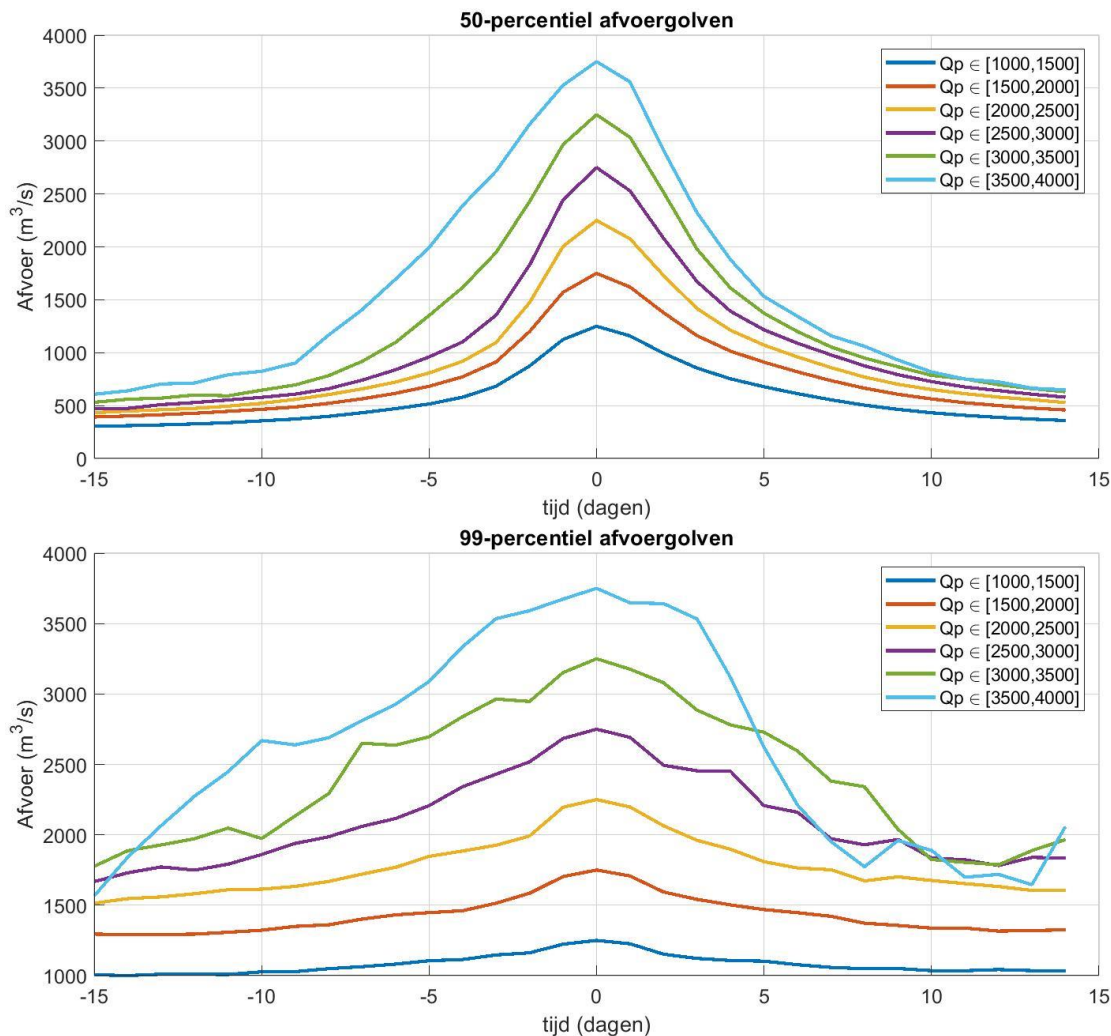
<sup>8</sup> De analyse is in ‘verticale richting’ uitgevoerd. Dat wil zeggen dat het percentiel per dag is berekend.



*Figuur 4.9 Percentielen van golfvormen voor afvoeren met pieken in het interval van 2500 m<sup>3</sup>/s tot 3000 m<sup>3</sup>/s.*

Uit Figuur 4.9 blijkt dat de 99-percentiel golfvorm een “wiebelig” verloop heeft. Dat is mede ingegeven door het feit dat deze brede golfvorm doorgaans gebaseerd is op een relatief beperkt aantal golfvormen uit de reeks van GRADE. Immers, de kans op optreden van een dergelijk brede golfvorm is relatief klein. Dat geldt helemaal voor de klassen met extreem hoge pieken, omdat in die klassen minder afvoergolven voorkomen dan in de lagere afvoerklassen. Dat leidt zelfs tot resultaten die in strijd zijn met de logica, zoals te zien in Figuur 4.10. In deze figuur staan 50- en 99-percentielen voor afvoeren van verschillende klassen weergegeven. Daaruit blijkt dat de afvoergolven van het 99-percentiel voor de klassen [3.000 m<sup>3</sup>/s, 3.500 m<sup>3</sup>/s] en [3.500 m<sup>3</sup>/s, 4.000 m<sup>3</sup>/s] elkaar kruisen. Dat is het gevolg van het relatief beperkte aantal golfvormen met pieken in het interval [3.500 m<sup>3</sup>/s, 4.000 m<sup>3</sup>/s] dat GRADE genereert. De factor “toeval” speelt dan een relatief grote rol. Het is daarom aan te bevelen om terughoudend te zijn met het gebruik van de resultaten voor afvoeren > 3.500 m<sup>3</sup>/s.





Figuur 4.10 Afvoergolven uit zes verschillende klassen van piekafvoeren voor 50-percentiel (boven) en 99-percentiel (onder) golfvormen.

Ten slotte wordt er een kanttekening geplaatst dat bij het uitmiddelen van een grote variatie in afvoergolven in percentielen veel kenmerken van een golfvorm verloren gaan. Zo bevatten de uitgemiddelde golfvormen geen dubbele pieken, terwijl opgetreden golfvormen die wel kunnen bevatten. De 99-percentiel golfvorm is mede bepaald op basis van golfvormen die voorafgaand aan de (hoogste) piekafvoer al een kleinere piek hadden, alsook de golfvormen die juist na de (hoogste) piekafvoer nog een tweede (lagere) piek hadden. Daarnaast geeft de benadering ook altijd relatief symmetrische golfvormen. De eigenschappen van de golfvormen (zie sectie 6.1.2) kunnen dus niet volledig beschreven worden in de percentielbenadering. Dat is echter onvermijdelijk omdat er altijd vereenvoudigingen moeten worden ingebracht bij het afleiden van gestandaardiseerde golfvormen. Mogelijk heeft deze conclusie ook effect op de conclusies van de hierop volgende sectie 4.2.2, waar de hoogwatergolf van 2021 spitsers blijkt dan het 1%-percentiel. Een vergelijking van de distributie in golfvormen tussen GRADE en de historische hoogwaters wordt aanbevolen. Vermoedelijk is het aantal historische hoogwaters echter te beperkt om hier goede conclusies uit te trekken. Aanbevolen wordt om hier binnen GRADE nader onderzoek naar te doen.

#### 4.2.2 Vergelijking historische hoogwaters op golfvormparameters

Een kwalitatieve vergelijking van het hoogwater van 2021 met afvoergolven uit GRADE was reeds gegeven in Figuur 2.13.

Om de kans op optreden van de (zeer smalle) golfvorm van juli 2021 te kwantificeren, is het noodzakelijk de golfvorm te parametriseren. Op basis van onderzoek van Pol (2014) is gekozen de volgende parameters<sup>9</sup> te onderzoeken die de relevante kenmerken van de golfvorm representeren:

- $C_2$ : golfkromming: de absolute waarde van de tweede afgeleide van het afvoerverloop in de periode van 2 dagen voorafgaand tot 2 dagen na afloop van de piekafvoer;
- $D_{85}$ : duur (uur) van 85% van de piekafvoer;
- $V_{85}$ : volume ( $m^3$ ) van 85% van de piekafvoer.

Grote waarden van  $C_2$  corresponderen met spitse golven, terwijl grote waarden van  $D_{85}$  en  $C_{85}$  juist corresponderen met stompe golven. De golfvormen uit GRADE worden gebruikt om statistieken van golfvormen af te leiden, zoals de kansverdeling van  $C_2$ . Vervolgens worden dezelfde waarden afgeleid voor historische golven en bepaald welke percentielen daarbij horen (op basis van de statistiek die met GRADE is afgeleid). De versie van GRADE die hiervoor gebruikt is, is dezelfde versie als die voor het BOI2023 is toegepast. Van de golven uit GRADE is besloten enkel te kijken naar de afvoerklasse 3000-3500  $m^3/s$ , omdat zowel de hoogwaters van 1993 als 2021 in deze klasse vielen (het hoogwater van 1995 hoort bij een lagere klasse). Voor alle golfvormen uit deze klasse in GRADE en voor drie historische hoogwaters (1993, 1995 en 2021) zijn de genoemde golfvormparameters uitgerekend. De resultaten hiervan zijn gegeven in Tabel 4.1 en Figuur 4.11.

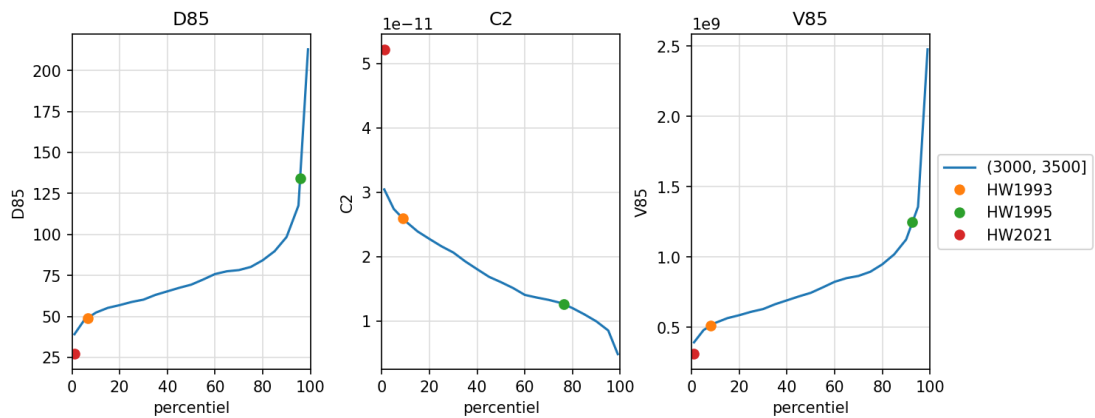
Hieruit blijkt dat het hoogwater van 1993 hoort bij de 10% meest spitse golven uit GRADE en het hoogwater van 1995 bij de 10% meest stompe golven uit GRADE (voor  $C_2$ , zie voetnoot bij Tabel 4.1). Het hoogwater 2021 is in alle eigenschappen spitsers dan het 1%-percentiel in de GRADE dataset. Omdat dergelijke “uiterste” percentielen gebaseerd zijn op een relatief beperkt aantal golfvormen is deze uitkomst omgeven met relatief grote onzekerheid. Met andere woorden, het is goed mogelijk dat in werkelijkheid de golfvorm van juli 2021 een grotere percentielwaarde dan 1% heeft. Desalniettemin bevestigt deze analyse dat de golfvorm van juli 2021 zeer smal was.

Tabel 4.1 Golfparameters van hoogwater 1993, 1995 en 2021. En percentiel van deze parameters binnen de afvoerklasse (3000, 3500] van GRADE.

	Golfparameters			Percentiel in afvoerklasse van GRADE (3000, 3500]		
	D85 (uur)	C2 (-) *	V85 ( $m^3$ )	o.b.v. D85	o.b.v. C2 *	o.b.v. V85
HW1993	49	2.60E-11	5.12E+08	6.5	8.7	8.0
HW1995	134	1.26E-11	1.25E+09	95.7	76.5	92.6
HW2021	27	5.22E-11	3.1E+08	<1.0	<1.0	<1.0

\* Opgemerkt wordt dat parameter C2 mogelijk niet nauwkeurig wordt berekend voor niet-synthetische afvoergolven. Het maakt gebruik van de momentane steilheid van de golf, die in een werkelijke golf een schokkerig karakter kan hebben.

<sup>9</sup> Opgemerkt wordt dat de methode is opgesteld voor synthetische afvoergolven. De robuustheid van deze golfparameters op historische golven is niet onderzocht, maar verdient wel de aanbeveling.



Figuur 4.11 Vergelijking van de golfparameters van de afvoergolven uit GRADE in afvoerklasse (3000, 3500] met eigenschappen van historische hoogwaters. Een laag percentiel komt overeen met een spitse golf, een hoog percentiel met een stompe golf.

### 4.3 Synthese op eigenschappen extreme hoogwaters

In deze paragraaf staat de volgende vraag centraal:

*Bij welke omstandigheden (neerslag, smeltwater, etc.) worden extreme hoogwaters (hoger dan juli 2021) verwacht?*

Extreme hoogwaters worden voornamelijk veroorzaakt door een combinatie van veel neerslag, weinig verdamping, sneeuwsmelt en hoge antecedente bodemvochtigheid. De kans op deze condities is het grootst in de winter. De verwachting is dat de neerslag als gevolg van klimaatverandering gaat toenemen. Door de (wereldwijde) temperatuurstijging neemt de verdamping toe waardoor meer neerslag mogelijk is. Verder zullen veranderingen in atmosferische circulatie naar verwachting ook leiden tot een toename in de neerslag. Dit leidt ertoe dat de kans op voorkomen van een gebeurtenis met een piekafvoer van juli 2021 zal toenemen.

Met de GRADE methode zijn verschillende omstandigheden doorgerekend voor het huidige klimaat en toekomstig klimaat. In het huidige klimaat zijn 226 piekafvoeren die gegeneerd zijn in GRADE hoger dan de piekafvoer van juli 2021, dus minder dan eens per 200 jaar in de synthetische reeks. De 226 afvoergolven met hogere pieken vinden alle plaats in het winterhalfjaar (voornamelijk december, januari en februari met een paar gebeurtenissen in november en februari). Winterhoogwaters worden veroorzaakt door hoge neerslag, weinig verdamping, sneeuwsmelt en antecedente hoge bodemvochtigheid. Hoogwaters in de Maas tijdens de lente worden soms veroorzaakt door smeltwater. Een extreme neerslaggebeurtenis zoals in juli 2021 zal ongeacht het seizoen altijd tot een hoogwater leiden.

In de toekomst zullen extreme gebeurtenissen naar verwachting in frequentie en intensiteit toenemen door klimaatverandering. In de gepresenteerde analyse hebben we de meest recent KNMI klimaatscenario's van 2014 gebruikt. In de KNMI klimaatscenario's van 2014 worden 4 scenario's gebruikt, waarbij we in onze analyse concentreren op de warme scenario's met globale temperatuurstijging van 2 graden voor 2050 en 4 graden voor 2100 met een verschil in zwakke (WL) en sterke (WH) atmosferische circulatie. Deze klimaatscenario's voorspellen een toename in neerslag van 2 tot 16% in 2050 en 3 tot 25% in 2085 in de herfst en winter (Tabel 4.2). Figuur 4.12 geeft de gevolgen van deze veranderingen op de afvoerstatistiek weer.

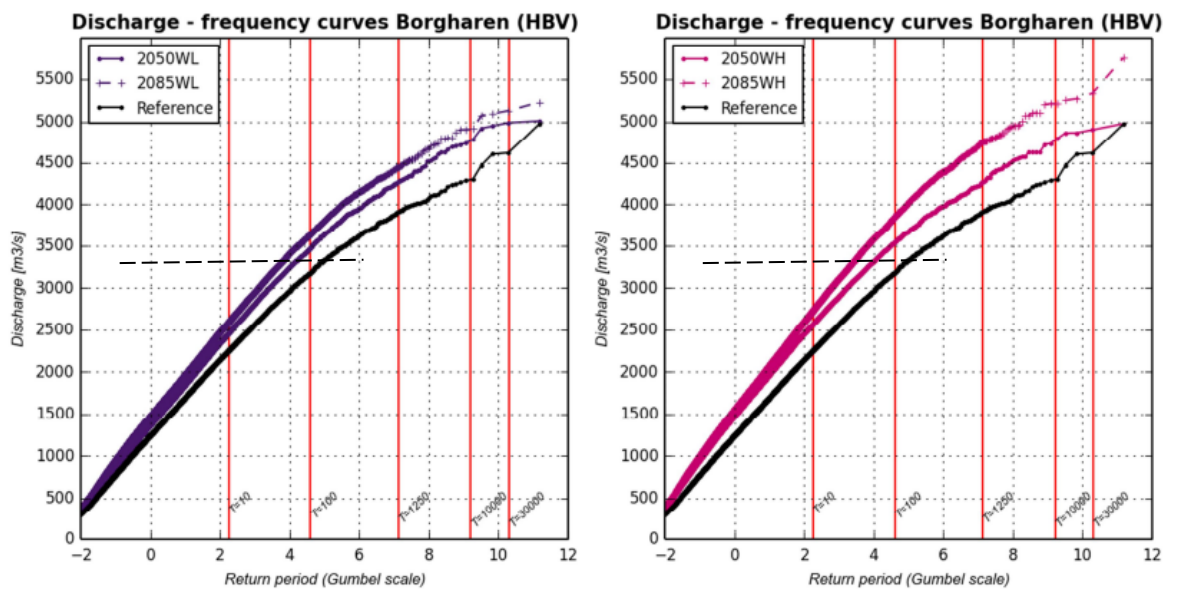
De gebeurtenis van het hoogwater van juli 2021 heeft in het huidige klimaat ongeveer een kans van voorkomen van 1/160 per jaar bij Borgharen volgens GRADE. Voor het zichtjaar 2100 met opwarming van 2 graden zal deze kans toenemen naar ongeveer 1/50 per jaar. In 2023 komen de nieuwe klimaatscenario's voor Nederland uit en daarbij behorende afvoerscenario's voor Rijn, Maas en Vecht. Hierin wordt extra aandacht besteed aan de duiding van veranderingen in extreme hoogwaters.

Kreienkamp et al. (2021) hebben de klimatologie van de neerslag in juli 2021 intensief bestudeerd. De tweede auteur en klimaatwetenschapper bij het KNMI, Sjoukje Philip, heeft over dit artikel gezegd: "Het weer is grillig, en in dit geval pakten zowel de timing als de locatie van de langdurige zware regens bijzonder slecht uit".

Of de regenval in juli ook zonder opwarming van het klimaat zo hevig zou zijn geweest valt niet te zeggen, concludeerde zij samen met 38 andere klimaatwetenschappers van de World Weather Attribution-werkgroep. Maar de káns op een dergelijke hoeveelheid regen is wel groter geworden.

Tabel 4.2: Relatieve verandering van seizoengemiddelde neerslag in de herfst (september, oktober, november) en winter (december, januari, februari) in het Maasafvoergebied (Bron: Sperna Weiland, 2015)

Scenario	Herfst		Winter	
	2050	2085	2050	2085
WL	+2%	+3%	+6%	+13%
WH	+5%	+5%	+16%	+25%



Figuur 4.12: Afvoer-frequentielijnen voor de Maas bij Borgharen voor alle klimaatscenario's en zichtjaren (Bron: Sperna Weiland et al., 2015).

## 4.4 Conclusies

Er is onderzoek uitgevoerd naar de kans op overschrijden van de piekafvoer van het hoogwater van juli 2021, en de kans dat dit in de zomer plaats vindt. Hieruit wordt het volgende geconcludeerd:

- Op basis van analyse van metingen *inclusief* het hoogwater van 2021 is de geschatte terugkeertijd van dit hoogwater 120 jaar (GEV-verdeling) en 90 jaar (Gumbel-verdeling) voor het kalenderjaar. Op basis van metingen *exclusief* het hoogwater van 2021 is de geschatte herhalingstijd respectievelijk 200 jaar (GEV-verdeling), 110 jaar (Gumbelverdeling) en 160 jaar (GRADE). Met GRADE was het niet mogelijk een betrouwbare schatting te bepalen op basis van metingen inclusief het hoogwater van 2021.
- Als alleen waargenomen hoogwaters in de zomerperiode worden beschouwd zijn de terugkeertijden substantieel groter: 600 jaar (GEV) en 11.000 jaar (Gumbel). Als hier het hoogwater van 2021 niet wordt meenemen zijn de geschatte herhalingstijden 2.900 jaar (GEV), 27.000 jaar (Gumbel) en >1 miljoen jaar (GRADE).
- Mede vanwege de uiteenlopende resultaten is het niet mogelijk om scherp te bepalen wat de werkelijke terugkeertijd is van het zomerhoogwater van 2021. GRADE lijkt de kans op extreme zomerhoogwaters sterk te onderschatten. Voor Gumbel en GEV lijkt het ook waarschijnlijk dat ze de kans op optreden van zomerpieken onderschatten, omdat de berekende herhalingstijden substantieel groter zijn dan de lengte van de onderliggende meetreeksen.
- Binnen het project GRADE is onderzoek lopende om de terugkeertijden scherper te kunnen vaststellen. Een mogelijkheid die wordt getest is de uitbreiding van de onderliggende dataset. Het toevoegen van het hoogwater van 2021 aan de invoerdata van de neerslaggenerator geeft onbetrouwbare resultaten. Door het gebruik van langere tijdreeksen afkomstig van weer en klimaatmodellen worden betere resultaten bereikt: er komen in de dataset meer zomerhoogwaters voor. Echter, het aantal zomerhoogwaters met piekafvoeren van meer dan 3.000 m<sup>3</sup>/s is nog steeds zeer beperkt in de lange synthetische reeksen. Dat duidt er op dat ook na toevoeging van de data uit klimaatmodellen de kans op dergelijk extreme zomerhoogwater mogelijk nog steeds (sterk) wordt onderschat.
- Een aanvullende complicatie bij het bepalen van de kansen op extremen is dat door klimaatverandering de kans op een extreem zomerhoogwater de laatste jaren mogelijk (sterk) is toegenomen. In de statistische methoden wordt daar geen rekening mee gehouden. Dat kan er verder aan bijdragen dat de kans op voorkomen van een dergelijk hoogwater wordt onderschat.

Aanvullend zijn analyses uitgevoerd naar de kans op de opgetreden golfvorm. Hieruit wordt het volgende geconcludeerd:

- De dataset van GRADE is voldoende groot om naast afvoerstatistiek, ook statistische eigenschappen van golfvormen uit te bepalen. Bij zeer extreme situaties (zeer hoge afvoeren in combinatie met uitzonderlijke golfvormen) worden soms onrealistische resultaten verkregen. De resultaten geven inzicht in de spreiding in golfvormen die kan optreden.
- De hoogwaters van 1993 en 1995 zaten respectievelijk bij de 10% meest spitse, en 10% meest stompe afvoergolven uit de GRADE-dataset. Het hoogwater van 2021 is spitser dan 1% meest spitse golfvormen uit de GRADE-dataset.

Over de belangrijkste kenmerken van extreme Maashoogwaters is het volgende geconcludeerd:

- Extreme hoogwaters worden voornamelijk veroorzaakt door een combinatie van veel neerslag, weinig verdamping, sneeuwsmelt en hoge antecedente bodemvochtigheid. De kans op deze condities is het grootst in de winter.
- De verwachting is tevens dat de neerslag als gevolg van klimaatverandering gaat toenemen. Door de (wereldwijde) temperatuurstijging neemt de verdamping toe waardoor meer neerslag mogelijk is. Verder zullen veranderingen in atmosferische circulatie naar verwachting ook leiden tot een toename in de neerslag. Dit leidt ertoe dat de kans op voorkomen van een gebeurtenis met een piekafvoer van juli 2021 zal toenemen.

## 5 Samenhang tussen de Maas en het regionale watersysteem

In dit hoofdstuk staan de volgende vraagstukken centraal:

D.1	Hoe groot is de kans dat een hoge afvoer vanuit de zijrivieren / het regionale watersysteem samenvalt met een hoge Maasafvoer?
D.2	Hoe is de hydraulische samenhang tussen de regionale zijrivieren en de Maas? Zou dit integraal gemodelleerd moeten worden?

### 5.1 Samenvallen van afvoergolven van de Maas en regionale zijrivieren

In deze paragraaf staat de volgende vraag centraal:

*Hoe groot is de kans dat een hoge afvoer vanuit de zijrivieren/ het regionale watersysteem samenvalt met een hoge Maasafvoer?*

Door Van der Veen (2018) is onderzoek uitgevoerd naar de beschrijving van zijdelingse instromingen op de Maas. Voor de beoordeling van waterkeringen langs de Maas zijn aannames gedaan over de relatie tussen de Maasafvoer bij Borgharen enerzijds en de verwachte piekafvoer van de zijrivieren anderzijds. Deze relaties zijn vastgelegd in zogenaamde “regressievergelijkingen”. Ook voor operationele voorspellingen wordt gebruik gemaakt van dergelijke regressievergelijkingen. In dit hoofdstuk zullen beide toepassingen (beoordeling en operationeel beheer) belicht worden. Het werk van Van der Veen (2018) bouwt voort op relaties zoals beschreven in RIZA (2005) die toegepast zijn in het WBI2017. Daarbij zijn enkele verbeteringen<sup>10</sup> gerealiseerd ten behoeve van BOI2023.

Een beschrijving van de methode van Van der Veen (2018) is opgenomen in Bijlage G.1. In het kort wordt door gebruik gemaakt van een deterministische aanpak: een lineaire regressie tussen de afvoerpieken van Borgharen en van de regionale zijrivieren. Ook het tijdsverschil van de piekafvoer van de Maas met de piekafvoeren van de zijrivieren wordt deterministisch vastgesteld op basis van het gemiddelde uit de historische tijdreeksen. De kans op een hogere piekafvoer of een andere timing wordt niet meegenomen.

In het vervolg van dit hoofdstuk wordt de correlatie van piekafvoeren van de zijrivieren met de afvoer van de Maas bij Borgharen (sectie 5.1.1) geanalyseerd. Op basis daarvan worden de regressievergelijkingen gevalideerd (sectie 5.1.2). Dit geeft inzicht in hoeverre de relaties zich deterministisch laten benaderen.

#### 5.1.1 Correlaties in piekafvoeren

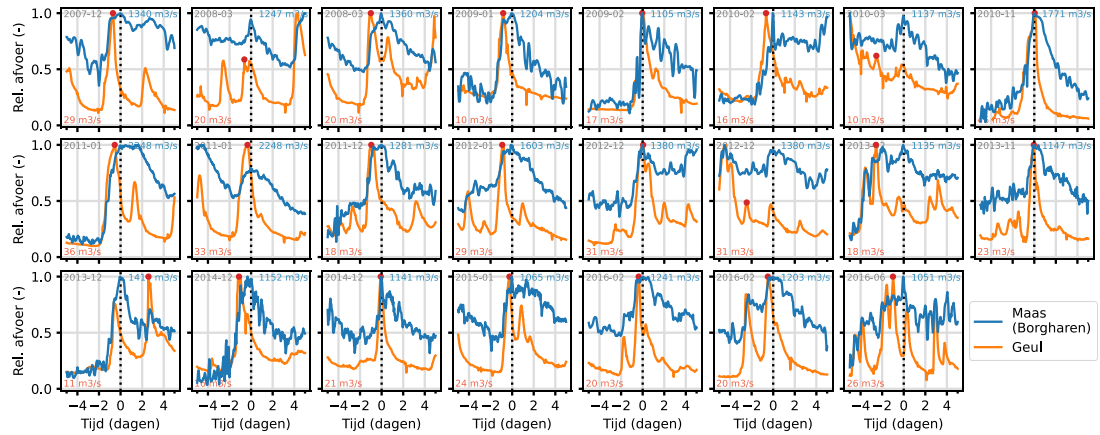
Op basis van de data uit Van der Veen (2018) is een analyse uitgevoerd van de correlatie in de metingen. Van der Veen kijkt echter enkel naar een selectie van 35 afvoergolven en neemt niet mee dat in een jaar meerdere afvoergolven kunnen plaatsvinden. In onze analyse selecteren we alle afvoergolven die voldoen aan de volgende criteria: piekafvoer Maas groter dan 1.000 m<sup>3</sup>/s, minimaal 1 dag tussen opeenvolgende maxima, en tussen de maxima moet de afvoer ten minste 300 m<sup>3</sup>/s gedaald zijn om als aparte piek te tellen (zie Bijlage G.4). Dit resulteerde in 87 geselecteerde piekafvoeren.

---

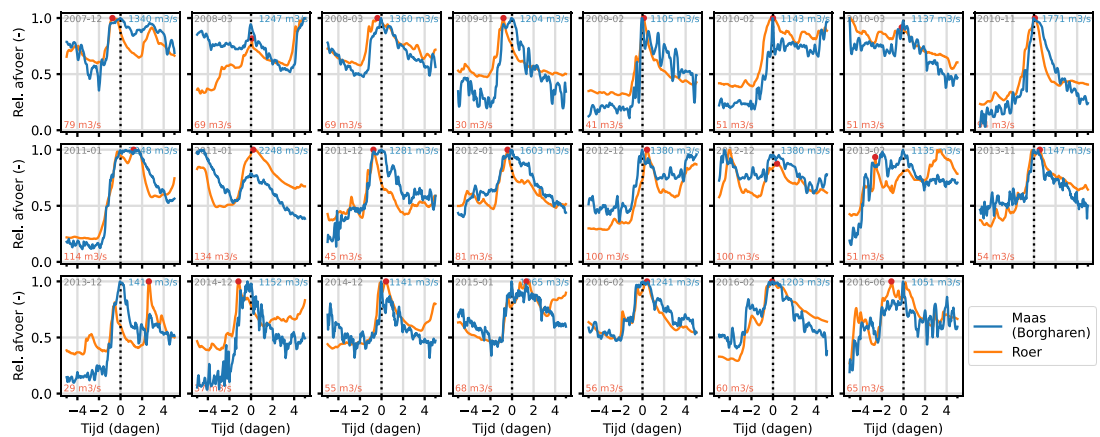
<sup>10</sup> Deze verbeteringen bevatten onder andere uitbreiding van de geanalyseerde tijdreeks. De aanpassingen voor de grote beken zijn beperkt en bediscussieerd in Van der Veen (2018).

Van de meest recente geselecteerde hoogwaters is de relatieve golfvorm opgenomen van de Maas en zijrivier: Figuur 5.1 (Geul) en Figuur 5.2 (Roer).

Uit deze figuren blijkt al dat er veel variatie bestaat in de historische tijdreeksen. In de meeste gevallen is er een piekafvoer op de zijrivier tijdens een hoogwater op de Maas. Soms is de piek later, soms is de piek eerder. Met name bij de Geul valt op dat de pieken veel korter duren en dat het aantal secundaire pieken groter is. Verder piekt de Geul over het algemeen net iets eerder dan de Maas.



*Figuur 5.1 Selectie van (de laatste 23) afvoergolven van de analyse Borgharen en de Geul. De afvoer is relatief ten opzichte van de piekafvoer. In kleine letters staat linksboven de jaar-maand, rechtsboven de piekafvoer Maas en links onder de piekafvoer Geul.*



*Figuur 5.2 Selectie van (de laatste 23) afvoergolven van de analyse Borgharen en de Roer. De afvoer is relatief ten opzichte van de piekafvoer. In kleine letters staat linksboven de jaar-maand, rechtsboven de piekafvoer Maas en links onder de piekafvoer Roer.*

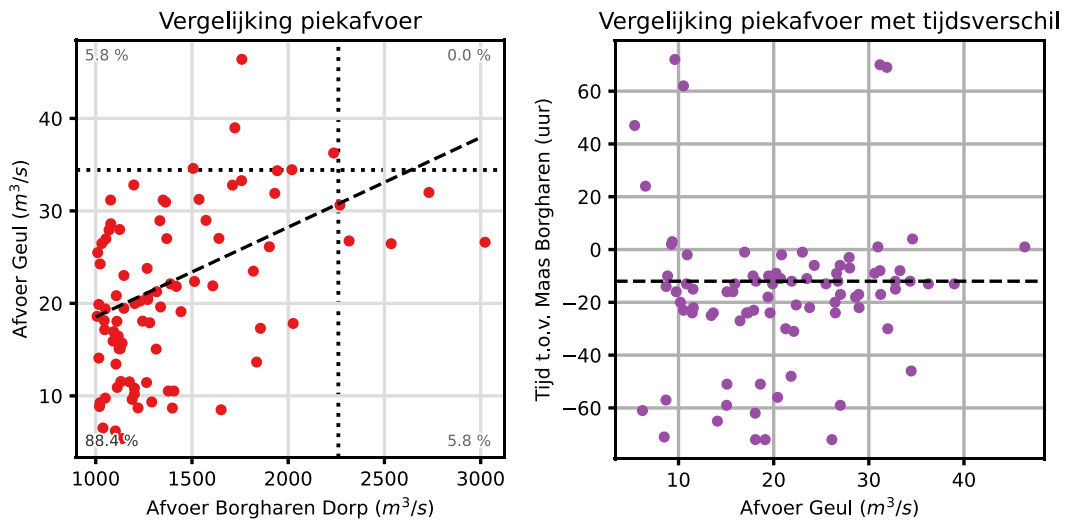
Een volledige statistische analyse is in de afbakening van ons onderzoek niet mogelijk. Voor een dergelijke analyse wordt adviseer we de data te analyseren met een Bayesiaans inferentiemodel, waarbij de distributie van de timing van de afvoergolven op de zijrivieren kan worden bepaald gegeven een afvoer op de Maas. Een statistisch analyse met een (non-parametric) Bayesian network, met toevoeging van *Evidence based expert judgement* wordt momenteel uitgevoerd in het PhD onderzoek van Guus Rongen aan de TU Delft<sup>11</sup>.

<sup>11</sup> Persoonlijke communicatie met Guus Rongen (TU Delft) d.d. 28 juli 2022

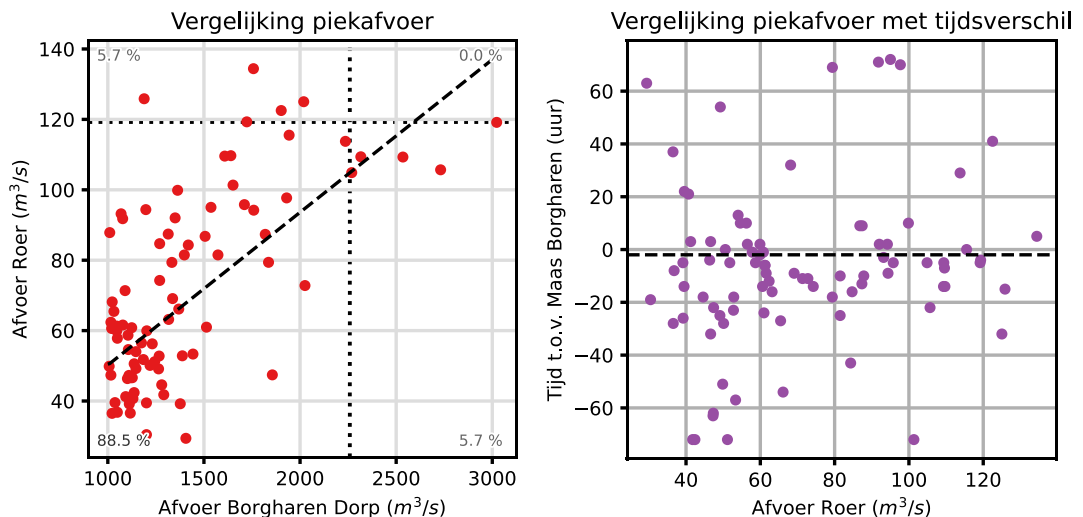


In ons onderzoek beperken we ons tot een benadering van de voorgestelde aanpak om inzicht te krijgen in de correlatie. Enkele statistieken uit de dataset zijn weergegeven in Figuur 5.3 (Geul) en Figuur 5.4 (Roer). Bij de vergelijking van de piekafvoeren (linker figuur) is een kwadrant ingetekend door lijnen te trekken bij de (afgerond) 5% hoogste Maasafvoer en 5% hoogste beekafvoer (methode conform Geertsema et al., 2018). Bij beide figuren valt op dat het kwadrant rechtsboven leeg is: de 5% hoogste piekafvoeren zijn nooit gelijktijdig voorgekomen. Bij de hoogste afvoeren op de Maas waren de beekafvoeren echter wel ruim boven de gemiddelde piekafvoer en bij de hoogste afvoeren op de zijrivier waren de Maasafvoeren ook ruim boven de gemiddelde piekafvoer. Dat duidt op een relevante correlatie tussen (hoge) piekafvoeren.

Bij de vergelijking van de *timing* van de piekafvoeren (rechts) valt op dat de puntenwolk in het midden geclusterd is; de tijdsverschillen zijn doorgaans kleiner dan 25 uur. De spreiding in de puntenwolk kan effect hebben op de maximale afvoeren in de Maas benedenstrooms van de samenvloeiing. Een tijdsverschil van 25 uur is echter klein ten opzichte van de duur van de afvoerpiek op de Maas. Hieruit kan worden geconcludeerd dat de afvoer piek van de zijrivier doorgaans min of meer samenvalt met de Maas.



Figuur 5.3 Vergelijking tussen piekafvoeren Geul en Maas bij Borgharen Dorp (links). Een vergelijking timing piekafvoer Geul, met het tijdsverschil tot de afvoerpiek op de Maas bij Borgharen (rechts). De stippellijn geeft de regressie uit Van der Veen (2018).



Figuur 5.4 Gelijk aan Figuur 5.3, maar nu voor de Roer

### 5.1.2 Validatie regressieformuleringen

Tijdens de afleiding van de regressieformulering (Van der Veen, 2018) worden de nauwkeurigheid van iedere regressieformulering uitgedrukt in een  $R^2$  waarde. Dit geeft echter niet het volledige inzicht in de voorspelkracht van de lineaire regressie bij verschillende condities. In deze paragraaf doen we onderzoek naar de voorspelkracht van de timing, de maximale piekafvoer en het berekende volume van de afvoergolf van de zijrivieren. In Figuur 5.5 en Figuur 5.6 zijn resultaten gegeven voor respectievelijk Geul en Roer, in Bijlage G.5 zijn de overige zijrivieren opgenomen.

De figuren geven resultaten met beide sets van regressies: de regressies voor synthetische afvoergolven (GRADE; blauwe markeringen) en de regressies bij operationeel gebruik (oranje markeringen). Hoe dichter de markeringen bij de diagonale stippellijn, des te beter de schatting op basis van de regressielijn. Voor de timing (linker plot) geldt dat een constant tijdsverschil is aangenomen. Het tijdsverschil is dus onafhankelijk van de hoogte van de Maasafvoer.

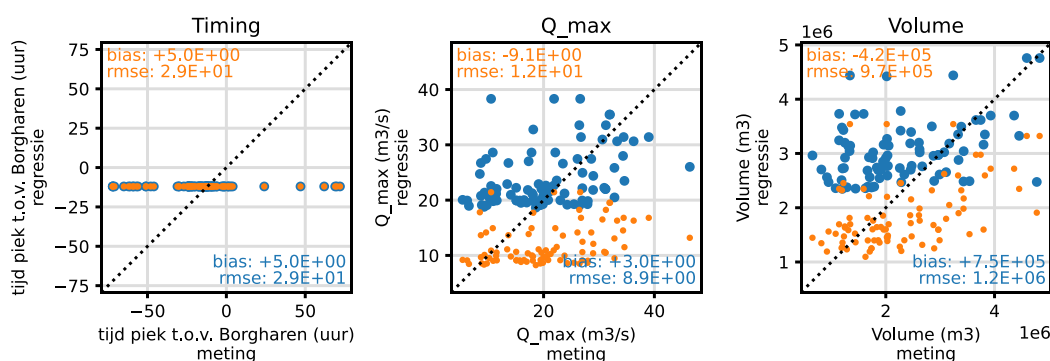
Voor de Geul valt direct op dat de operationele regressielijnen (oranje punten) veel lagere piekafvoeren en golfvolumes berekenen dan de regressielijnen van GRADE. Dat komt doordat de operationele regressies gebruikt worden onder alle condities en dus ook toepasbaar moeten zijn voor lagere afvoeren. Het gevolg is dat deze minder presteren bij hoge afvoergolven. Op de totale afvoer op de Maas zal dit weinig verschil maken, maar deze regressie kan dus niet worden gebruikt om de interactie tussen de Maas en zijrivieren tijdens hoogwaters nauwkeurig te kwantificeren.

De regressielijnen voor GRADE (blauwe punten) geven een beperkte overschatting van de afvoeren (gemiddeld verschil:  $+3 \text{ m}^3/\text{s}$  ten opzichte van de metingen) en van het totale golfvolume in de Geul (gemiddeld verschil:  $+750,000 \text{ m}^3$  ten opzichte van de metingen). De figuren laten echter ook grote uitschieters zien in beide richtingen. Dat is een indicatie dat de afvoer van de Geul onzeker is en niet goed te vangen is met een deterministische relatie.

De resultaten voor de Roer (Figuur 5.6) tonen een vergelijkbaar beeld voor de piekafvoer: gemiddeld een beperkte overschatting. Het volume wordt daarentegen onderschat, maar deze onderschatting is (gemiddeld) zeer beperkt.

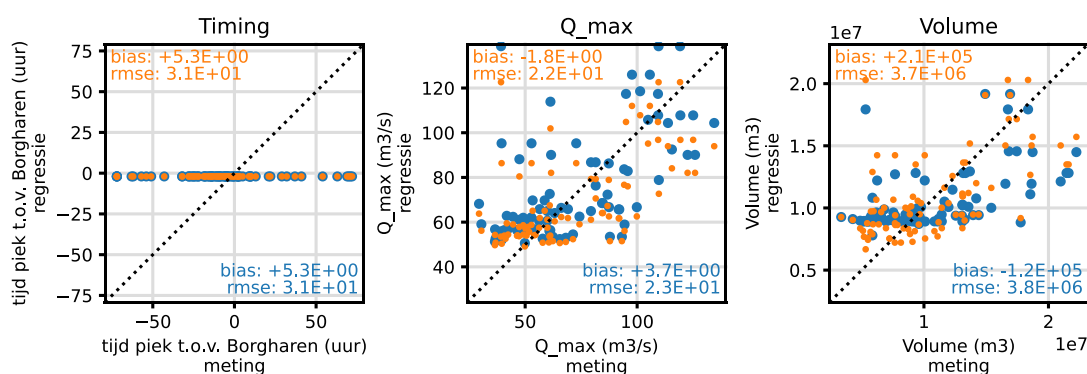
Deze analyse geeft inzicht in de kwaliteit van de regressies. Binnen de beperkingen van een deterministische methode lijken de regressielijnen kwalitatief voldoende. Echter, naast de relatie tussen piekafvoeren is ook de timing van piekafvoeren van invloed op waterstanden langs de Maas en zijrivieren. Dit wordt gekwantificeerd in sectie 5.2.

### Validatie regressies op historische afvoergolven: Geul



Figuur 5.5 Vergelijking tussen (3) eigenschappen van de golfvorm uit de metingen (x-as) en berekend op basis van regressieformuleringen t.o.v. Borgharen (y-as) voor de Geul. De blauwe markeringen (en tekst) geven resultaten bij gebruik van de regressies synthetische golven (GRADE) en de oranje markeringen (en tekst) bij gebruik van operationele regressies. Bij de operationele regressies is gebruik gemaakt van regressies t.o.v. Borgharen, terwijl Van der Veen (2018) ook regressies adviseert met meetreeksen bij andere zijrivieren. Overige figuren zijn opgenomen in G.5

### Validatie regressies op historische afvoergolven: Roer



Figuur 5.6 Gelijk aan Figuur 5.5, maar nu voor de Roer

## 5.2 Hydraulische samenhang tussen de regionale zijrivieren en Maas [D.2]

In deze paragraaf staat de volgende vraag centraal:

*Wat is het effect van samenvallen van afvoerpieken tussen de regionale zijrivieren en de Maas? Zou dit integraal gemodelleerd moeten worden?*

In de Maas monden verschillende regionale zijrivieren uit. Voorbeelden zijn Chiers, Semois, Sambre, Ourthe, Ambleve, de Roer en de Dommel en Aa (via Dieze en Drongelens kanaal). De hydraulische samenhang tussen deze regionale zijrivieren en de Maas is voor elk beekstelsysteem verschillend, maar hangt voornamelijk af van de waterstanden bij de monding. In deze paragraaf bestuderen we eerst de theoretische hydraulische samenhang voor de Roer, waarna we met behulp van de theorie andere beeksystemen aan de Maas bespreken.

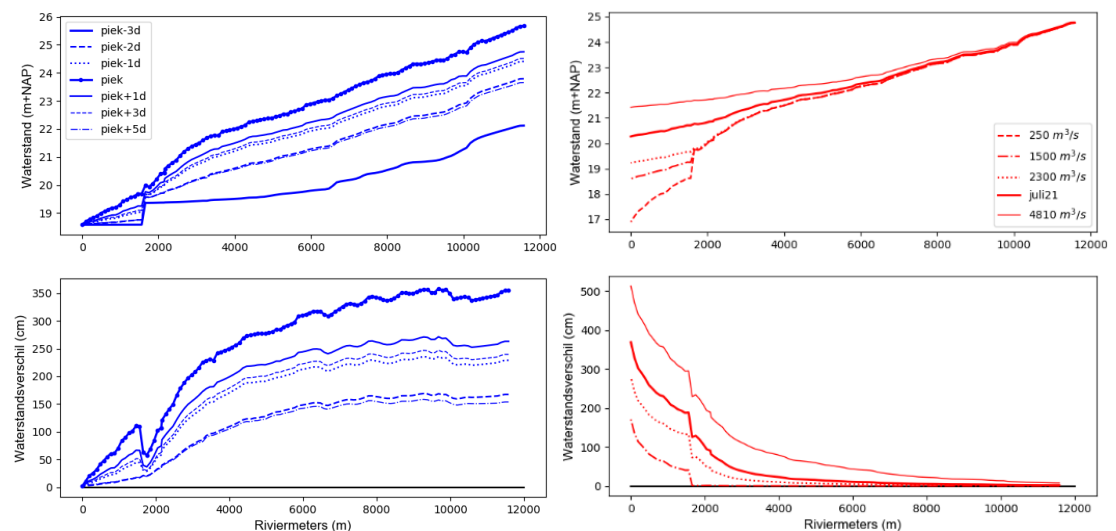
Voor het analyseren van de van de hydraulische samenhang hebben we ervoor gekozen om de Roermonding als voorbeeld te gebruiken vanwege grote beschikbaarheid aan data en modeluitvoer. De modeluitvoer van een SOBEK-RE model van de Roer (met de waterstand van de Maas als randvoorwaarde) met verschillende Roer- en Maasafvoeren zijn gebruikt en zijn verder beschreven in het rapport van Geertsema en Asselman (2021).

Figuur 5.7 geeft het waterstandsverloop op de Roer met aan de linkerkant het effect van verschillende Roerafvoeren op de waterstand (bij een gelijke Maasafvoer) en aan de rechterkant het effect van verschillende Maasafvoeren op de waterstand (bij een gelijke Roerafvoer).

In de linker figuur is te zien dat bij hoge Roerafvoeren de waterstanden bovenstrooms op de Roer 3.5 m hoger kunnen uitvallen dan bij gemiddelde of lage afvoeren. Bij de monding van de Roer is de invloed van de Roerafvoer echter nihil: in de Roermonding worden de waterstanden vooral bepaald door de waterstanden op de Maas. De rechterpanelen laten daarnaast zien dat de opstuwung vanaf de Maas bij de monding groot kan zijn: tijdens het hoogwater van juli 2021 steeg de waterstand bij de monding van de Hambeek met bijna 4m. Het waterstandsverschil als gevolg van de hoge maasafvoer wordt in bovenstroomse richting van de Roer exponentieel kleiner. Dit verloop komt overeen met de klassieke opstuwingsleer (Chow, 1959; Chanson, 1999).

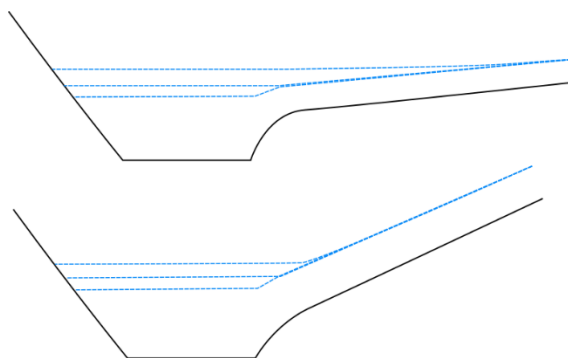
Geconcludeerd kan worden dat bij de monding van de Roer de waterstand wordt bepaald door de Maasafvoer de waterstanden beïnvloedt en dat bovenstrooms juist enkel de Roerafvoer de waterstanden beïnvloedt. Daar tussenin (tussen ongeveer 1 en 6 km vanaf de monding) hebben beide rivierafvoeren invloed op de waterstand en is een integrale benadering noodzakelijk.5.1

Om het effect te beoordelen van de instroming van zijrivieren op de Maaswaterstand, wordt alvast vooruit verwezen naar sectie 0. De daar beschreven analyse toont dat extra afvoer vanuit de zijrivieren (tezamen) een verhoogde waterstand op de Maas kan opleveren van enkele decimeters. Dit effect is dus beperkt ten opzichte van de opstuwung die in de zijrivieren kan ontstaan ten gevolge van een hoge Maasafvoer.



Figuur 5.7: Waterstandsverloop op de Roer bij verschillende Roerafvoeren (blauwe lijnen) en Maasafvoeren (rode lijnen). De onderste panelen geven het waterstandsverschil weer voor de scenario's ten opzichte van het laagste waterstandsverhang. De linkerpanelen illustreren het waterstandsverhang bij een afvoer van  $1500 \text{ m}^3/\text{s}$  bij St. Pieter op de Maas (terugkeertijd van eens in 2 jaar) met de afvoergolf van juli 2021 op de Roer (voor verschillende dagen rondom de piekafvoer). Daarbij zijn meerdere grafieken opgenomen voor de verschillende momenten in de hoogwatergolf. De rechterpanelen illustreren het waterstandsverloop bij een afvoer van  $140 \text{ m}^3/\text{s}$  bij Stah op de Roer (terugkeertijd van eens in de 20-50 jaar) met waterstanden op de Maas gerelateerd aan Maasafvoer van juli 2021, en bij  $250$ ,  $1500$ ,  $2300$  en  $4810 \text{ m}^3/\text{s}$  (terugkeertijden van ongeveer het langjarig gemiddelde,  $1/2$  jaar,  $1/10$  jaar en  $1/50.000$  jaar). Op de Roer ligt een stuw bij  $x=1474 \text{ m}$ . Bij afvoeren kleiner dan  $2300 \text{ m}^3/\text{s}$  op de Maas is er geen effect op het waterstandsverhang bovenstrooms van de stuw.

Het waterstandsverloop is per zijrivier verschillend, omdat het waterstandsverloop afhankelijk is van de afvoer, verhang van de bedding en ruwheid in hoofdriever en zijrivier. Voor andere de zijrivieren van de Maas kunnen de waterstandsverlopen dus afwijken van die van de Roer. Vooral het verhang van de bedding op de zijrivier bepaalt hoe ver de opstuwing in de zijrivier optreedt. Bij steile rivieren kan de opstuwingslengte slechts een paar honderd meter zijn, terwijl in rivieren met kleine gradiënten de opstuwingslengte tientallen kilometers kan bestrijken. Een illustratie van dit effect is weergegeven in Figuur 5.8. De meeste zijrivieren van de Maas in België zijn zeer steil en ondervinden over een kortere lengte opstuwing dan in de zijrivieren in Nederland. De Geul en Roer zijn voor Nederlandse begrippen steil, maar kunnen desondanks opstuwing vanuit de Maas ondervinden van kilometers vanaf de monding. De Niers en Dommel en Aa hebben een veel kleiner verhang. Deze zijrivieren ondervinden geregeld opstuwing vanuit de Maas. In de Dommel en Aa kan de opstuwing van de Maas bijvoorbeeld toenemen met 1 m op 4 kilometer van de monding, mits er hoogwater is in de Dommel en Aa zelf (Geertsema et al., 2019) en van de Niers is bekend dat de opstuwing vanuit de Maas tot zo'n 10 km van de monding, voorbij de Duitse grens, optreedt (Peters et al., 2007).



Figuur 5.8: Illustratie van de opstuwingskromme bij een hoofdriever en een zijrivier. De zwarte lijn illustreert de bedding bij de monding, waarbij het dwarsprofiel van de hoofdriever en het langsprofiel van de zijrivier als zijaanzicht is getoond. De drie blauwe stippellijnen illustreren waterstanden bij verschillende afvoeren op de hoofdriever en een gemiddelde afvoer van de zijrivier. De bovenste figuur laat opstuwing bij een flauwe helling zien en de onderste figuur bij een steilere helling. Er is duidelijk te zien dat de lengte van opstuwing van de hoofdriever op de zijrivier afneemt bij een steilere helling.

### 5.3 Conclusies

In dit hoofdstuk zijn analyses uitgevoerd naar het samenvallen van de afvoerstatistiek van de Maas in relatie tot regionale zijrivieren en de mogelijke impact op waterstanden. Hieruit wordt het volgende geconcludeerd:

- De huidige relaties tussen afvoeren van de Maas en zijrivieren die worden gebruikt voor operationeel beheer en voor beoordelingen van waterkeringen zijn deterministisch. Kansen op afwijkingen van deze relatie worden niet meegenomen. Uit analyses in dit rapport blijkt dat deze afwijkingen soms substantieel kunnen zijn.
- De voorspellingen van de regressielijnen komen *gemiddeld* goed overeen met historische afvoeren. Voor individuele gevallen zijn de verschillen echter substantieel: vele tientallen m<sup>3</sup>/s.
- Afvoerpieken van de Roer en de Geul treden doorgaans op binnen een periode van 25 uur voor of na het optreden van de afvoerpiek van de Maas. Een tijdsverschil van 25 uur is doorgaans klein ten opzichte van de duur van de afvoergolf op de Maas. Hieruit kan worden geconcludeerd dat de afvoer piek van de zijrivier doorgaans min of meer samenvalt met die op de Maas.

Verder is geanalyseerd wat het effect kan zijn van het wel/niet samenvallen van piekafvoeren op de waterstanden van de Maas en zijrivieren. Hieruit wordt het volgende geconcludeerd:

- Op de Roer nemen bij de monding de waterstanden met maximaal 4 m toe wanneer op de Maas sprake is van een extreem hoogwater. Deze opstuwning neemt in bovenstroomse richting exponentieel af en is op 2 km vanaf de monding nog maar maximaal 1 m. Een hoge Roerafvoer zorgt daarentegen voor een toename van de waterstanden over het gehele Roer (tot 3.5 m), met uitzondering van het gebied nabij de monding waar de waterstand volledig wordt bepaald door de afvoer (en waterstand) op de Maas.
- Vooral in het overgangsgedebied van de zijrivier waar afvoeren van de zijrivier en de Maas beide invloed hebben op de waterstand is het meenemen van de samenhang tussen beide afvoeren en de onzekerheid daarin belangrijk. Hierbij zijn de volgende aspecten van belang: [a] de correlatie tussen piekafvoeren van de Maas en zijrivieren en [b] het samenvallen van de afvoergolven ("timing"). Analyse van de invloed daarvan op hoge waterstanden langs de Maas en langs de zijrivieren kan leiden tot een aanscherping van geschatte herhalingstijden. Vooral voor het benedenstroomse deel van de zijrivieren kan een gecombineerde analyse van kansen op samenvallen met hoge Maasafvoeren en hydraulische modelsimulaties resulteren in een substantiële aanscherping van waterstanden die corresponderen met relevante terugkeertijden.

# 6 Beoordeling van waterkeringen Maas

In dit hoofdstuk staan de volgende vraagstukken centraal:

E.1	Zou de golfvorm als variabele parameter in het ontwerp- en beoordelings-instrumentarium moeten worden meegenomen? Hoe draagt de lengte en steilheid (kop en staart) van de golfvorm bij aan de individuele componenten van de overstromingskans?
E.2	Hoe wordt de samenhang tussen de regionale zijrivieren en de Maas meegenomen in de beoordeling van de waterkeringen? Wat is de invloed van afvoeren van regionale zijrivieren op waterstanden langs de Maas en wat is de invloed van de afvoer van de Maas op waterstanden langs de regionale zijrivieren?. Is er aanleiding om deze samenhang anders mee te nemen in de beoordeling van de waterkeringen?

## 6.1 Belang van de golfvorm in het ontwerpinstrumentarium [E.1]

In deze paragraaf staat de volgende vraag centraal:

*Hoe draagt de lengte en steilheid (kop en staart) van de golfvorm bij aan de individuele componenten van de overstromingskans? Zou de golfvorm als variabele parameter in het ontwerp- en beoordelings-instrumentarium moeten worden meegenomen?*

In deze paragraaf wordt eerst onderzocht hoe het waterstandsverloop bijdraagt aan de faalkans (sectie 6.1.1). Ten behoeve van het onderzoek worden golfvorm en waterstandsverloop in parameters uitgedrukt (sectie 6.1.2). Ten slotte volgt het statistische onderzoek naar de golfvorm als stochast<sup>12</sup> (sectie 6.1.3) en de conclusies (sectie 6.1.4).

### 6.1.1 Effect van het waterstandsverloop op de faalkans van een waterkering

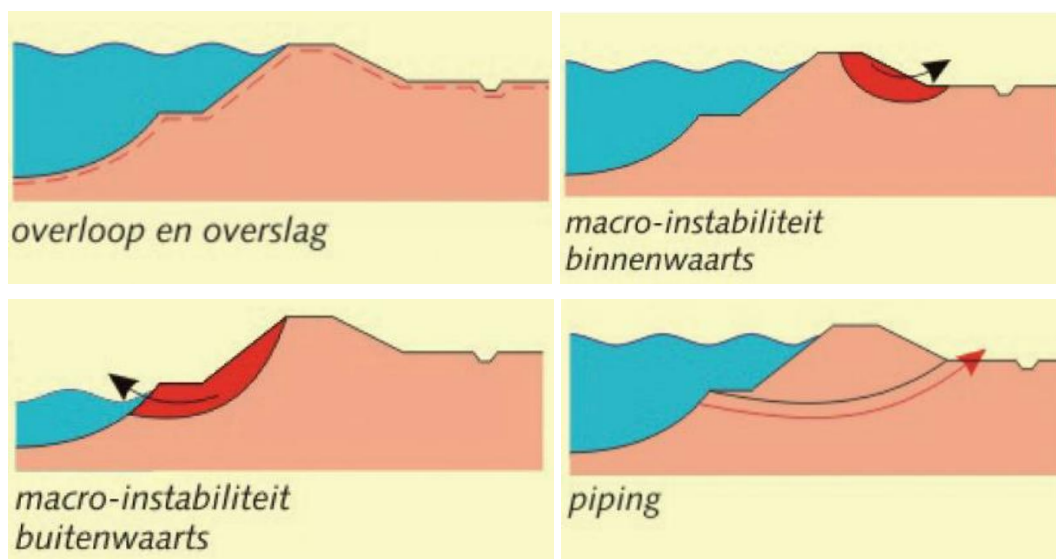
Bij het beoordelen en ontwerpen van waterkeringen wordt rekening gehouden met verschillende faalmechanismen. Voor de onderhavige analyse is het relevant om inzicht te hebben in de invloed van de golfvorm op het optreden van deze faalmechanismen. We beperken ons daarbij tot de volgende vier belangrijke faalmechanismen (zie ook Figuur 6.1):

- **Erosie door overloop en golfoverslag:** Erosie is een cumulatief proces, hoe langer de duur van de golfoverslag of overloop, hoe groter de kans dat erosie tot een overstroming kan leiden.
- **Macro-instabiliteit binnenwaarts:** Het afschuiven van grote delen van een grondlichaam aan de binnendijkse kant van de dijk, meestal langs rechte of gebogen glijvlakken. De stabiliteit hangt, naast onder andere de geometrie en grondeigenschappen, af van de waterspanningen in het dijklichaam en de ondergrond. Hoe hoger de waterspanningen in de grond, hoe lager de korrelspanning en de weerstand die de grond kan bieden tegen een afschuiving. De waterspanningen nemen toe als gevolg van een hoge rivierwaterstand. De opbouw van waterspanningen kost echter tijd en naast de hoogte van de piek rivierwaterstand is de duur van de piek en aanloop van belang. Hoe stomper de afvoergolf, hoe meer tijd de waterspanningen hebben om zich op te bouwen en hoe groter de kans op een instabiliteit.

---

<sup>12</sup> Deze vraag is eerder al eens onderzocht in HKV (2013). Het onderhavige onderzoek kijkt op een aantal onderdelen af van de studie van HKV (2013): we voeren de analyse uit voor meer locaties (alle km-raaien), we gebruiken meer variaties van golfvormen (20), we gebruiken andere bron voor golfvormen (GRADE versus de golfvormgenerator), we analyseren meerdere kenmerken van de golfvorm (vier parameters in plaats van alleen de piekwaterstand).

- **Macro-instabiliteit buitenwaarts:** Hetzelfde proces aan de buitendijkse kant van de dijk. Een buitenwaartse afschuiving is het meest waarschijnlijk wanneer de waterspanningen in de dijk hoog zijn in combinatie met een lage buitenwaterstand (Van der Meer, 2020). Dit wordt veroorzaakt door onder andere een lange aanloop naar de piekwaterstand met een lange duur van de waterstandspiek (zorgend voor hoge waterspanningen in het dijklichaam), gevolgd door een snelle val van de rivierwaterstand. Deze afschuiving is enkel een risico als na afschuiving een nieuw hoogwater (een tweede piek) passeert.
- **Piping:** Het ontwikkelen van een open verbinding (pipe) onder een dijklichaam door het uitspoelen van zand. Naast de geotechnische eigenschappen is met name de duur van het hoogwater van invloed op de faalkans. Net als bij macrostabiliteit hebben hoge waterspanningen in de ondergrond een negatieve invloed op piping. Als een beginnende *pipe* zich heeft gevormd is er vervolgens nog tijd nodig voor de *pipe* om onder de dijk door te groeien. Hoe langer de duur van het hoogwater, hoe groter de kans dat piping tot een overstroming leidt.



Figuur 6.1 Selectie van faalmechanismen met groot belang van het waterstandsverloop (figuren uit Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007).

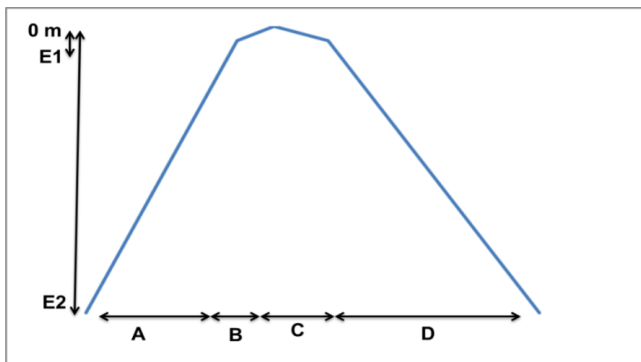
Voor het toetsen van het effect van de golfvorm op deze faalmechanismen, wordt eerst gegeven hoe deze processen (in hoofdlijnen) zijn geschematiseerd in het huidige beoordelings- en instrumentarium. Op basis van deze uitgangspunten enkele parameters van het waterstandsverloop gedefinieerd die gebruikt worden in onze analyse van het effect van golfvorm.

Het vigerende instrumentarium is gebaseerd op de hydraulische randvoorwaarden van WTI2017 (Agtersloot & Paarlberg, 2016). Hierin geldt de afvoergolf niet als basisstochast en is in alle simulaties gebruik gemaakt van een gemiddelde afvoergolf (Chbab, 2017 op basis van Geerse, 2013). Per rivierkilometer (rkm) is het waterstandsverloop bij deze gemiddelde golfvorm geschematiseerd naar een standaard trapeziumverloop (een van 5 varianten) zoals gegeven in Figuur 6.2 (Chbab, 2016). Uitzondering hierop zijn de trajecten rkm 3 tot 84 en rkm 104 tot 199 waar de gemodelleerde waterstandsverloop wordt toegepast.<sup>13</sup>

<sup>13</sup> Deze WBI waterstandsverlopen zijn ontsloten in de tool Waterstandsverlopen:

<https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/applicaties-modellen/applicaties-per/omgevings/omgevings/waterstandsverlopen/>





Figuur 6.2 Standaard trapeziumverloop voor het schematiseren van waterstandsverlopen (Chbab, 2016)

Voor graserosie door overslag is in het WBI2017 een belastingduur, duur van de golfoverslag, van 6 uur aangehouden (Deltares, 2015). Voor de geotechnische mechanismen (macrostabiliteit en piping) zijn in de ontwerp praktijk aanvullende aannames betreffende de afvoergolf noodzakelijk of worden de aangehouden waterspanningen met stationaire grondwaterstromingsberekeningen onderbouwd. Het expliciet maken van de golfvorm kan, in combinatie met waterspanningsmetingen, tot een accuratere inschatting van de waterspanningen en faalkans van de dijk leiden, zoals onder andere blijkt uit een case studie voor macrostabiliteit buitenwaarts (Van der Meer, 2020).

### 6.1.2 Parametervoorstelling van golfvorm en waterstandsverloop

Om in de volgende secties in te schatten hoe golfvormen doorwerken in faalmechanisme, wordt in dit onderzoek het lokale waterstandsverloop beschreven in vier parameters:

- $dH$ : Topvervlakking in piekwaterstand (m);
- $u_{stijg}$ : Maximale stijgsnelheid over 2 dagen (m/dag);
- $u_{val}$ : Maximale valsnelheid over 2 dagen (m/dag);
- $T_p$ : Duur piekwaterstand min -0.5 m (uur).

De waterstandsverlopen van alle gesimuleerde afvoeren van de studie van De Jong & Asselman (2019) zijn op deze statistieken geanalyseerd. In die studie zijn afvoergolven voor combinaties van 5 pieken en 3 golfvormen gesimuleerd met een hydraulisch model. Langsdoorsneden van deze simulatieresultaten zijn opgenomen in Bijlage H.1.

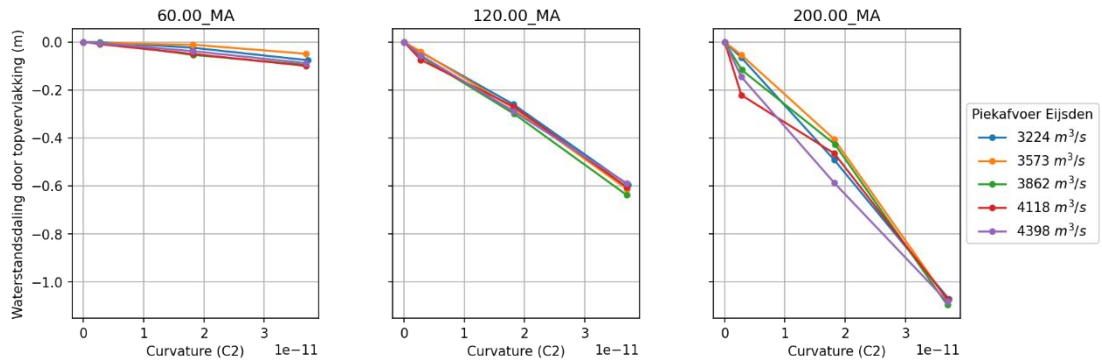
Om een inschatting te kunnen maken van het waterstandsverloop bij golfvormen waar geen simulaties voor beschikbaar zijn, is onderzocht of het mogelijk is een relatie op te stellen tussen de golfvorm en de bovenstaande parameters van het waterstandsverloop. Hierbij wordt gebruik gemaakt van dezelfde parameters als eerder gepresenteerd in sectie 4.2.2 (o.b.v. Pol, 2014):

- $C_2$ : golfkromming (curvature) voor +/- 2 dagen van de golfvorm;
- $D_{85}$ : duur (uur) van overschrijden van 85% van de piekafvoer;
- $V_{85}$  volume ( $m^3$ ) van overschrijden van 85% van de piekafvoer.

Alle golfvormen uit De Jong & Asselman (2019) zijn in deze parameters uitgedrukt. Een tabel hiervan is opgenomen in Bijlage H.2.

Door de drie parameters van de golfvorm ( $C_2$ ,  $D_{85}$  en  $V_{85}$ ) uit te zetten tegen de vier parameters die bepalend zijn voor de faalmechanismen ( $dH$ ,  $u_{stijg}$ ,  $u_{val}$  en  $T_p$ ) wordt onderzocht of hier verbanden in herkend kunnen worden.

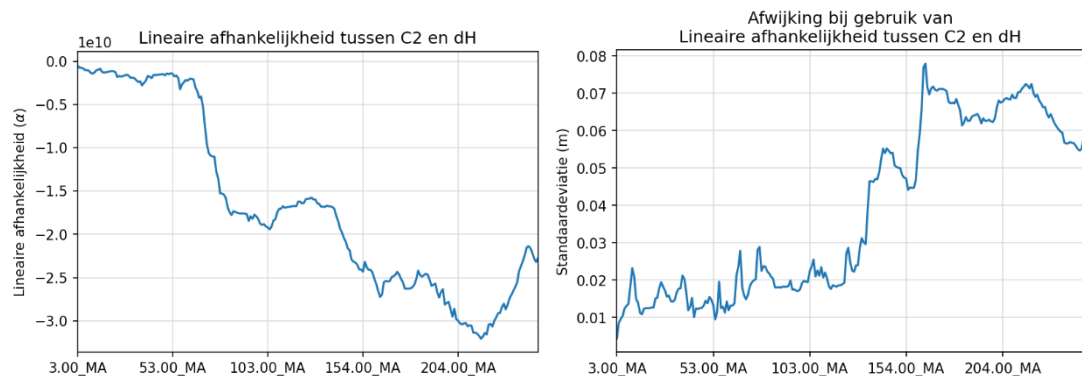
Uit deze vergelijking blijkt dat de waterstandsdeling (dH) door topvervlakking een goede relatie laat zien met de golfkromming  $C_2$  (zie Figuur 6.3). Conform de eerdere conclusies in sectie 2.4 is de piekafvoer nauwelijks van invloed op de topvervlakking. De waterstandsdeling (dH) uitgezet tegen de golfkromming ( $C_2$ ) geeft bij benadering een lineair verloop.



Figuur 6.3 Waterstandsdeling door topvervlakking uitgezet tegen de golfkromming.

De waterstandsdeling kan per rivierkilometer dus uitgedrukt worden in de golfkromming vermenigvuldigd met een coëfficiënt (te noemen: alfa). Voor iedere rkm is een least-square fit uitgevoerd om alfa te bepalen. Het resultaat is weergegeven in een langsdoorsnede in Figuur 6.4 (links) met een alfa variërend tussen  $-0.05 \cdot 10^{10}$  en  $3.2 \cdot 10^{10}$ . Er is een (kleine) afwijking tussen deze benadering en de originele simulaties, dit is weergegeven in de rechter figuur en loopt voor het benedenstroomse traject op tot een fout van 0.08 m. Deze afwijking is klein genoeg voor de huidige analyse, maar geeft aan dat modelsimulaties een nauwkeuriger beeld zouden geven en vervolgonderzoek met gebruik van een groter aantal modelsimulaties is te overwegen.

$$dH = \alpha \cdot C_2$$



Figuur 6.4 (links) Lineaire afhankelijkheid tussen golfkromming en topvervlakking en (rechts) de afwijking van de lineaire relatie met de originele berekeningen uitgedrukt in de standaarddeviatie (m)

Vergelijkbaar onderzoek is uitgevoerd voor de andere parameters van golfvorm en het waterstandsverloop (Bijlage H.3). Hieruit blijkt dat ook de stijgsnelheid en waterstandsverloop bij benadering lineair gerelateerd zijn aan de golfkromming. De duur van de piekwaterstand is bij benadering lineair gerelateerd aan de duur van afvoergolf ( $D_{85}$ ). Ook tussen de andere combinaties van parameters van de golfvorm enerzijds en het waterstandsverloop anderzijds is een duidelijk verband te zien. De lineaire verbanden van de gekozen combinaties zijn gegeven in Bijlage H.4.

### 6.1.3 Golfvorm als stochast

Om te bepalen of de golfvorm als (stochastische) variabele moet worden meegenomen leiden we op twee manieren statistieken af van parameters die relevant zijn voor de beoordeling en het ontwerp van waterkeringen langs de Maas: [1] met inachtneming van verschillende golfvormen en [2] met gebruik van alleen de mediane golfvorm. Als de verschillen in resultaten substantieel zijn is het aan te raden om de golfvorm als stochast mee te nemen.

Bij de beoordeling en het ontwerp van waterkeringen wordt rekening gehouden met meerdere faalmechanismen. De analyse moet daarom in principe uitgevoerd worden voor alle belastingparameters die relevant zijn voor deze faalmechanismen. We beperken ons voorsnog tot de in de vorige paragraaf genoemde vier parameters:  $dH$ ,  $u_{stijg}$ ,  $u_{val}$  en  $T_p$ . De analyse voor de eerste parameter (topvervlakking,  $dH$ ) verschilt van de analyse voor de overige drie parameters. Voor  $dH$  wordt een volledig probabilistische analyse uitgevoerd waarin het effect van het wel/niet meenemen van de golfvorm als stochast op de frequentiecurve van de waterstand wordt berekend (door de onzekerheid in de golfvorm "uit te integreren"). Voor de overige drie parameters beperkt de analyse zich tot het kwantificeren van variaties van deze parameterwaarden over de verschillende golfvormen.

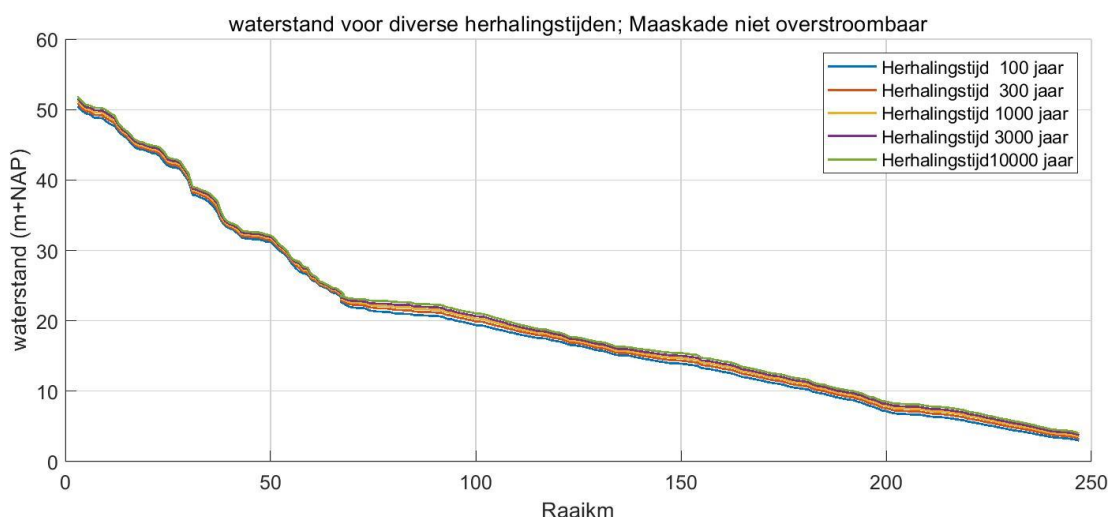
Voor de analyse van parameter  $dH$  zijn twee methoden toegepast voor het berekenen van de frequentielijnen van de waterstand voor alle rivierkilometers:

- (1) Met de golfvorm als stochast;
- (2) Met alleen de mediane golfvorm.

Deze berekeningen zijn uitgevoerd met gebruik van twee verschillende waterstands-afvoer (Q-h) relaties die worden toegepast in het kader van WBI/BOI:

- (a) Q-h op basis van simulaties waarbij de Maaskaden niet kunnen overstromen;
- (b) Q-h op basis van simulaties waarbij de Maaskaden wel kunnen overstromen.

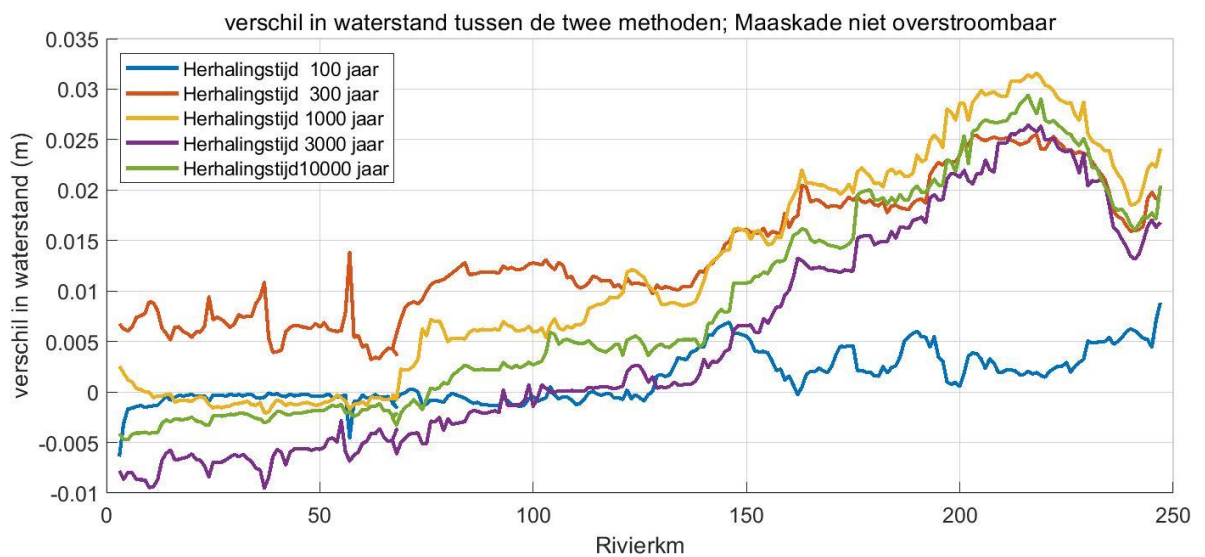
Voor een uitgebreide beschrijving van de toegepaste methode wordt verwezen naar bijlage I.1. Figuur 6.5 toont berekende waterstanden voor diverse herhalingstijden voor combinatie (1a): de methode met golfvorm als stochast en de situatie waarin de Maaskaden niet overstroombaar zijn.



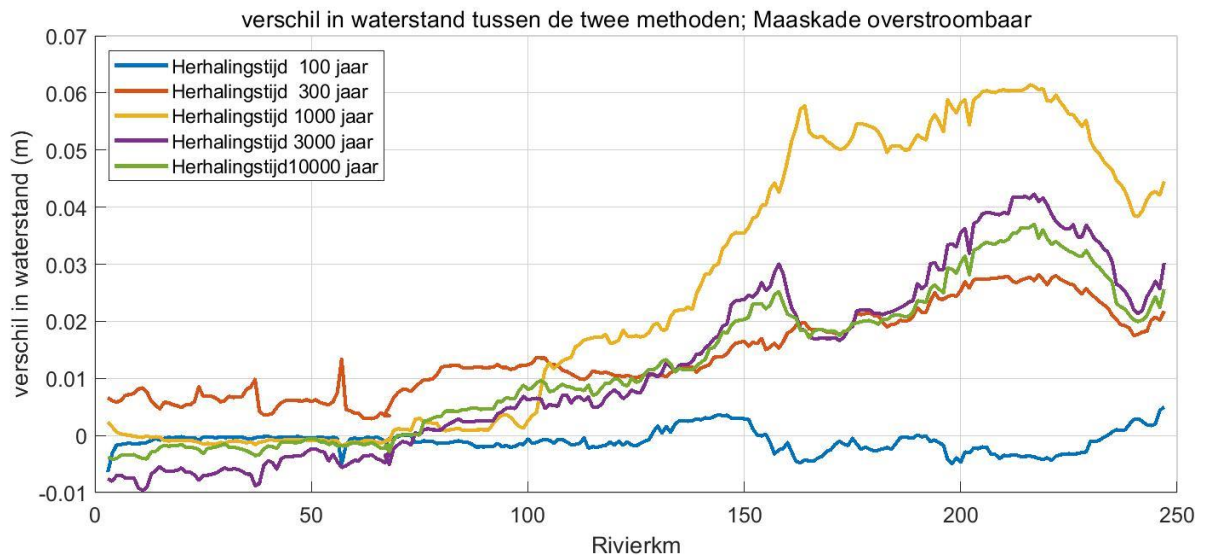
Figuur 6.5 Berekende waterstand voor diverse herhalingstijden; methode met golfvorm als stochast, situatie waarin de Maaskaden niet overstroombaar zijn.

De figuren voor de overige combinaties zijn zeer vergelijkbaar en om die reden niet getoond. Figuur 6.6 toont het verschil in berekende waterstanden tussen methoden (1) en (2) voor de situatie waarin de Maaskaden niet overstroombaar zijn. Positieve verschilwaarden corresponderen met situaties waarin de methode met de golfvorm als stochast resulteert in een hogere waterstand dan de methode met de mediane golfvorm. Figuur 6.7 toont het verschil in berekende waterstanden voor de situatie waarin de Maaskaden *wel* overstroombaar zijn. In deze figuren kan het volgende worden waargenomen:

- C1) De verschillen in resultaten tussen methode (1) en methode (2) zijn over het algemeen beperkt, maximaal 0.06 m.
- C2) De methode met de golfvorm als stochast resulteert over het algemeen in een hogere waterstand dan de methode met de mediane golfvorm.
- C3) De verschillen nemen over het algemeen toe in benedenstroomse richting.
- C4) De verschillen zijn over het algemeen maximaal rond kilometerraai 220
- C5) De verschillen zijn het grootst voor een herhalingstijd van 1000 jaar voor de situatie met overstromen van de Maaskaden;



*Figuur 6.6 Verschil in berekende waterstanden tussen enerzijds de methode met golfvorm als stochast en anderzijds de methode met de mediane golfvorm; situatie waarin de Maaskaden niet overstroombaar zijn. Positieve verschilwaarden corresponderen met situaties waarin de methode met de golfvorm als stochast resulteert in een hogere waterstand dan de methode met de mediane golfvorm.*



*Figuur 6.7 Verschil in berekende waterstanden tussen enerzijds de methode met golfvorm als stochast en anderzijds de methode met de mediane golfvorm; situatie waarin de Maaskaden wel overstroombaar zijn. Positieve verschilwaarden corresponderen met situaties waarin de methode met de golfvorm als stochast resulteert in een hogere waterstand dan de methode met de mediane golfvorm.*

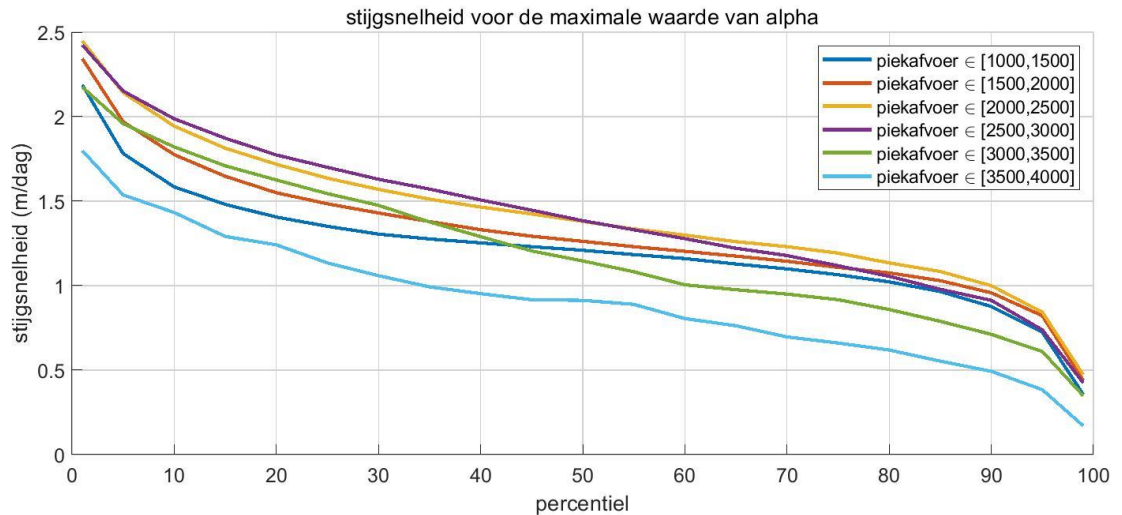
In bijlage I.2 worden deze conclusies nader geanalyseerd en verklaard. Op basis van waarneming C1 kan geconcludeerd worden dat het meenemen van de golfvorm als stochast niet noodzakelijk is om het gemiddelde effect van topverflakking op de piekwaterstand te modelleren. De mediane golfvorm is een goede afspiegeling van wat gemiddeld aan topverflakking verwacht kan worden en het gebruik van deze mediane golfvorm leidt niet tot een substantiële onderschatting van extreme piekwaterstanden.

Voor de andere drie parameters ( $u_{stijg}$ ,  $u_{val}$  en  $T_p$ ) die relevant zijn voor faalmechanismen van dijken is het niet mogelijk om een vergelijkbaar sluitende conclusie te trekken, omdat daarvoor een probabilistische analyse met inachtneming van de faalmechanismen waar deze parameters relevant voor zijn (zoals macrostabiliteit binnenwaarts en buitenwaarts) uitgevoerd zou moeten worden. Een dergelijke analyse past niet binnen het tijdsbestek van deze studie en wordt daarom voor vervolgstudies aanbevolen. In plaats daarvan geven we een indicatie van de mate van variatie van deze parameters voor het relevante bereik aan afvoergolven.

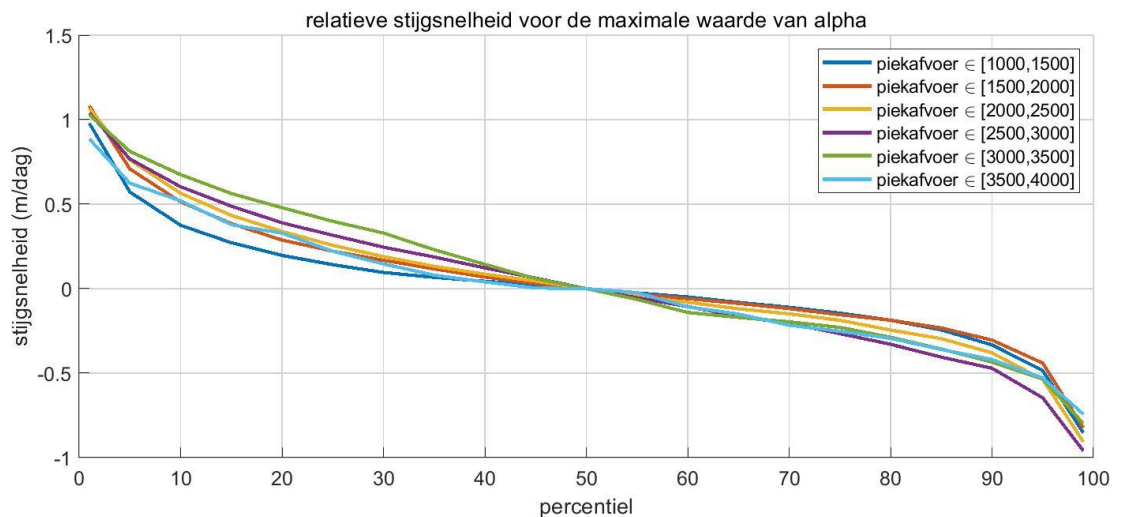
Figuur 6.8 toont de stijgsnelheid ( $u_{stijg}$ ) voor verschillende combinaties van (percentielen van) golfvormen en piekafvoeren. Deze grafiek is afgeleid voor de rivierkilometer met de maximale waarde van alpha (in absolute zin). Met andere woorden: de locatie waar de stijgsnelheid naar verwachting het grootst is van alle locaties langs de Maas. Figuur 6.9 toont voor deze zelfde locatie de stijgsnelheid relatief ten opzichte van de stijgsnelheid van de mediane golfvorm (50-percentiel). De mediaan correspondeert met de golfvorm die in WBI/BOI wordt gehanteerd<sup>14</sup>. De waarden van Figuur 6.9 kunnen daarom worden beschouwd als afwijkingen van WBI/BOI die zullen ontstaan door rekening te houden met de grotere (kleinere) mate van stijgsnelheid van spitse (stompe) golven in vergelijking met de mediane golfvorm. Daarom geldt in Figuur 6.8 dat de afwijking positief is voor spitse golfvormen (percentielen < 50) en negatief voor stompe golfvormen (percentielen > 50).

<sup>14</sup> Formeel is in WBI/BOI de gemiddelde golfvorm gebruikt, maar deze is nagenoeg gelijk aan de mediane golfvorm, zie bijlage I.3.

Uit Figuur 6.9 blijkt dat de stijgsnelheid voor zeer spitse golven (1-percentiel) in de orde van een meter per dag groter kan zijn in vergelijking met de mediane golf. In hoeverre dat impact heeft op de berekende faalkans van de kering (rekening houdend met de relatief kleine kans op voorkomen van een dergelijk spitse golfvorm) moet zoals aangegeven verder uitgewerkt worden in een probabilistische analyse met inachtneming van de faalmechanismen waar deze parameter relevant voor is. Het relatief grote verschil van 1 m/dag ten opzichte van de stijgsnelheid van de mediane golfvorm (in de orde van 1-1.5 m/dag, zie Figuur 6.8) lijkt een dergelijk vervolgonderzoek wel te rechtvaardigen.

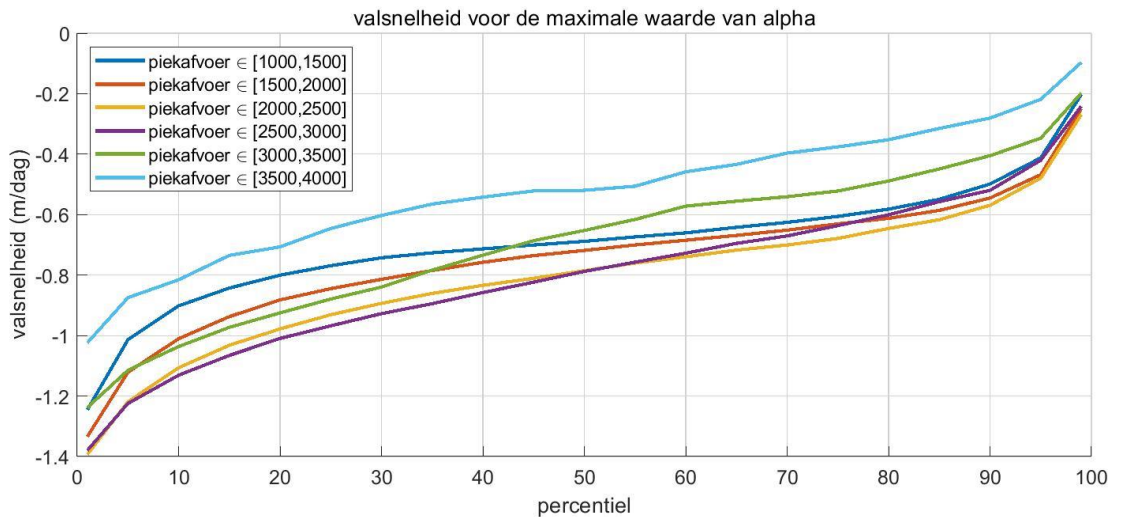


Figuur 6.8 Stijgsnelheid voor verschillende combinaties van (percentielen van) golfvormen en piekafvoeren

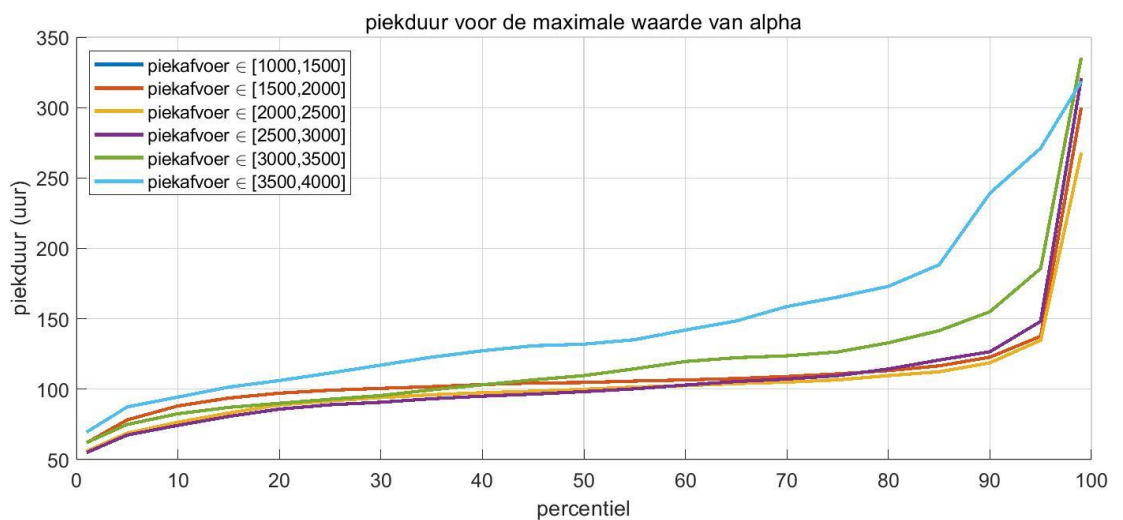


Figuur 6.9 Berekende stijgsnelheid relatief ten opzichte van de mediane golfvorm (50-percentiel)

Figuur 6.10 en Figuur 6.11 tonen vergelijkbare grafieken als Figuur 6.8 voor respectievelijk de valsnelheid en de piekduur. Spitse golven leiden tot de grootste waarden van de valsnelheid (in absolute zin), terwijl stompe golven leiden tot de grootste waarden van de topduur. Ook voor deze parameters geldt dat geen sluitende conclusie getrokken kan worden over de noodzaak van het meenemen van de golfvorm als stochast en dat een nadere uitwerking met inachtneming van faalmechanismen aan te bevelen is.



Figuur 6.10 Valsnelheid voor verschillende combinaties van (percentielen van) golfvormen en piekafvoeren



Figuur 6.11 Piekduur voor verschillende combinaties van (percentielen van) golfvormen en piekafvoeren

#### 6.1.4 Conclusie

Voor faalmechanismen waarbij de piekwaterstand bepalend is voor de belasting is het meenemen van de golfvorm als stochast niet noodzakelijk. De mediane golfvorm geeft een goede afspiegeling van wat er gemiddeld aan topvervlakking verwacht kan worden en het gebruik van deze mediane golfvorm leidt niet tot een substantiële onderschatting van extreme piekwaterstanden.

Op basis van deze studie is het niet mogelijk om een vergelijkbare conclusie te trekken voor faalmechanismen waarbij de stijgsnelheid, de valsnelheid en/of de piekduur relevant zijn. Voor deze parameters zou een probabilistische analyse met inachtneming van de faalmechanismen waar deze parameters relevant voor zijn (zoals macrostabiliteit binnenwaarts en buitenwaarts) uitgevoerd zou moeten worden. Een dergelijke analyse paste niet binnen het tijdsbestek van deze studie. Het is aan te bevelen een dergelijke studie als vervolgonderzoek uit te voeren.

## 6.2 Samenhang met regionale zijrivieren

In deze paragraaf staan de volgende vragen centraal:

Hoe wordt de samenhang tussen de regionale zijrivieren en de Maas meegenomen in de beoordeling van de waterkeringen? Wat is de invloed van afvoeren van regionale zijrivieren op waterstanden langs de Maas en wat is de invloed van de afvoer van de Maas op waterstanden langs de regionale zijrivieren?. Is er aanleiding om deze samenhang anders mee te nemen in de beoordeling van de waterkeringen?

De methode waarop regionale zijrivieren worden meegenomen bij het afleiden van hydraulische belastingen is voor een groot deel al beschreven in sectie 5.1: via deterministische relaties tussen de Maasafvoer bij Borgharen en de afvoer op de zijrivieren. De relaties zijn afgeleid op basis van de historische meetreeks. In deze paragraaf onderzoeken we wat het effect van meer extreme afvoeren van zijrivieren op de Maaswaterstanden zou kunnen zijn.

Om inzicht te geven in keuzes van de piekafvoer en timing van de regionale zijrivieren bij het beoordelen van waterkeringen, en het effect van deze keuzes op de waterstanden van de Maas, is uitgezocht hoeveel hoger de waterstanden kunnen worden bij een worst-case scenario. Hiervoor zijn eerst verschillende bronnen van piekafvoeren naast elkaar gezet in Tabel 6.1:

- De piekafvoer in simulaties WBI2017 (met een piekafvoer op de Maas van 4.000 m<sup>3</sup>/s): zowel de piekafvoer op de zijrivier als de afvoer, bij passage van de piekafvoer van de Maas.
- De maximale afvoer van elke zijrivier uit de metingen van 1988 – 2016.
- Inschattingen van de piekafvoer van elke zijrivier van het hoogwater van juli 2021.

Opgemerkt wordt dat dit overzicht niet volledig is; het aanbevolen statistische onderzoek (zie sectie 5.1.1) zal meer inzicht in moeten bieden in mogelijke extremen en bijbehorende kansen. De tabel laat zien dat tijdens het hoogwater van 2021 de afvoer op de Geul en Roer veel hoger was dan berekend met de relaties die gebruikt worden in het WBI. Bij de overige zijrivieren was de afvoer juist lager dan berekend met de relaties die gebruikt worden in het WBI.



Tabel 6.1 Maximale piekafvoeren voor de zijrivieren. Maximale piekafvoer afkomstig uit modelbestanden WBI2017 (Agtersloot & Paarlberg, 2016). Het moment van passage is berekend door uit te gaan van de looptijd tot de monding zoals afgeleid door Van der Veen (2018), t.o.v. Eijsden komt hier 2 uur bij. Maximum van de metingen afkomstig uit dataset Van der Veen (2018). Maximum van hoogwater 2021 is afkomstig uit Van der Veen & Agtersloot (2021), merk op dat deze getallen soms nog ter discussie staan.

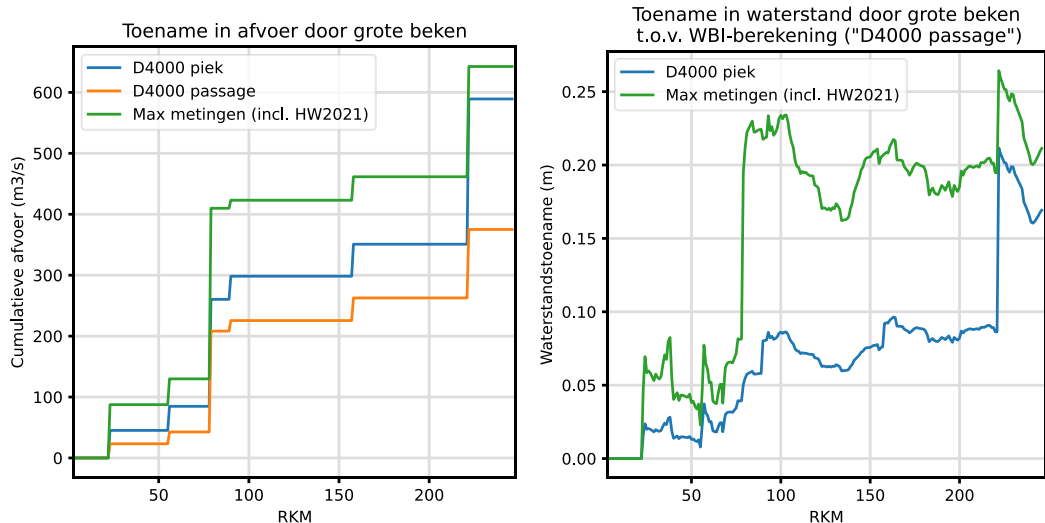
	RKM	Looptijd vanaf Borgharen (uur)	Maximale berekende piekafvoer	Maximale berekende afvoer bij passage Maaspiek Conform WBI	Max Metingen 1988 - 2016	HW 2021 meting   monding
Geul	22.5	1	45.2	23.3	46.4	87.5   54.5
Geleenbeek	55.2	9	39.5	19.4	42.3	29.6
Roer	78.1	26	175.6	165.5	134.4	280   242.9
Neerbeek	89.9	30	38.0	17.4	13.2	5.5
Niers	157.2	56	52.5	37.1	38.5	15.1   16.5
Aa	221.0*	84	106.4	42.8	77.2	51.4
Dommel	221.0*	84	132.0	69.5	103.8	42.7

\* Monding Dieze

Op basis van de gegevens in Tabel 6.1 is een inschatting gemaakt van de cumulatieve afvoer vanuit de zijrivieren (Figuur 6.12, links). Tijdens de gebruikte productieberekeningen van WBI is dus de totale instroming (kolom 5) van de Nederlandse zijrivieren ongeveer 380 m<sup>3</sup>/s. Als de piekafvoer van iedere zijrivier precies tegelijk met de Maaspiek zou vallen (kolom 4), zou de piekafvoer op de Maas met ruim 200 m<sup>3</sup>/s hoger uitvallen. Echter, door de waterkering bij de monding van de Dieze zal dit in de praktijk niet plaatsvinden, de maximale toename is dan maar 80 m<sup>3</sup>/s. Als de veel hogere gemeten afvoeren (van het hoogwater van 2021; kolom 7) worden gebruikt, kan de piekafvoer op de Maas nog ruim 100 m<sup>3</sup>/s hoger zijn, met name door de hogere Roer-afvoer.

De toename in afvoer kan met kentallen (zie bijlage G.3) vertaald worden naar een toename in waterstanden. Uit de resultaten blijkt een onzekerheid in afvoeren slechts een zeer beperkt effect heeft op waterstanden op de Grensmaas (4 tot 8 cm). Benedenstreams van Roermond neemt de onzekerheid echter significant toe tot ruim 23 cm. Dit komt doordat de Roer een relatief grote bijdrage kan leveren aan de piekafvoer op de Maas.

Deze resultaten geven een eerste inzicht in de mogelijke bijdrage van de zijrivieren aan extreme afvoeren en waterstanden op de Maas. Beter zou zijn om dit volledig statistisch te onderzoeken. Op dit moment is hiervoor echter onvoldoende informatie beschikbaar. Op basis van de resultaten wordt ingeschat dat voor gemiddelde situaties de onzekerheid in waterstanden op de Maas hooguit enkele centimeters is, maar dat bij een ongelukkige samenloop van de afvoer op de Maas en de afvoer uit de zijrivieren dit toe kan nemen tot 1-2 decimeter.



Figuur 6.12 Bijdrage van de grote zijrivieren in hydraulische simulatie weergegeven als langsdoorsnede van de rivier (op basis van Tabel 6.1). Links geeft de cumulatieve toename in de afvoer. Rechts geeft het waterstandseffect ten opzichte van de 'D4000 passage' dat een benadering van WBI2017 geeft. De waterstanden zijn uitgerekend door vermenigvuldiging met de  $dH/dQ$  (per rkm) zoals berekend in Bijlage C.3 van De Jong & Asselman (2019).

### 6.3 Conclusies

Onderzoek is uitgevoerd naar het effect van de belang van het meenemen van de golfvorm in het ontwerpinstrumentarium. Hieruit wordt het volgende geconcludeerd:

- Diverse elementen van het waterstandsverloop zijn relevant voor het (mogelijk) optreden van faalmechanismen bij dijken, zoals de piekwaterstand, de duur van de piekwaterstand en de stijgsnelheid en valsnelheid van de waterstand.
- De sterkte voor macro-instabiliteit binnenwaarts wordt minder bij een stompe golf, waarbij de waterstanden meer tijd hebben zich op bouwen.
- Macro-instabiliteit buitenwaarts heeft het grootste risico bij een langdurig hoge piek en een snelle val. De kans op piping neemt toe bij een langdurig hoogwater.
- De huidige benadering in WBI2017 maakt gebruik van schematisering op basis van de gemiddelde afvoergolf. Uitzonderingen met spitse of stompe golven worden niet beschouwd. Daarbij wordt bij de beoordeling van faalmechanismen aanvullende aannames gedaan over het waterstandsverloop. Het expliciet maken van de golfvorm kan tot accuratere berekeningen van de faalkans van de dijk leiden.
- Het waterstandsverloop is geparametriseerd middels kentallen voor topvervlakking, stijgsnelheid, valsnelheid en duur piekwaterstand. Op basis van simulaties blijkt dat een redelijke benadering te verkrijgen is van het geparametriseerde waterstandsverloop door dit te correleren aan de golfvorm bij Eijsden. Hierdoor kan het waterstandsverloop benaderd worden zonder in dit stadium grote hoeveelheden hydraulische berekeningen uit te voeren.
- Bij het onderzoek naar de golfvorm op topvervlakking blijkt dat piekwaterstanden bij gebruik van de golfvorm als stochast over het algemeen hoger zijn dan bij gebruik van alleen de mediane golf. Het verschil is echter beperkt: maximaal 0.06 m. Voor faalmechanismen waarbij de piekwaterstand bepalend is voor de belasting is het meenemen van de golfvorm als stochast daarom niet noodzakelijk.

- De stijgsnelheid van zeer spitse afvoergolven kan 1 m/dag groter zijn in vergelijking met de mediane golf (~2,5 m/dag respectievelijk ~1,5 m/dag). In hoeverre dat impact heeft op de berekende faalkans van de kering (rekening houdend met de relatief kleine kans op voorkomen van een dergelijk spitse golfvorm) moet verder uitgewerkt worden in een probabilistische analyse met inachtneming van de faalmechanismen waar deze parameter relevant voor is. Vergelijkbare conclusies worden getrokken voor de valsnelheid en de duur van de topwaterstand. Voor zeer spitse golven is de valsnelheid 0.5 m/d groter dan de mediane situatie. Voor zeer stompe golven kan de duur van de piek toenemen van 140 uur naar 330 uur. Voor faalmechanismen die meer geotechnische van aard zijn, zoals piping en macrostabiliteit, kan daarom op basis van het onderhavige onderzoek nog niet vastgesteld worden in hoeverre het gebruik van de golfvorm als stochast zal leiden tot een substantiële verandering van de berekende faalkans. We bevelen aan om dat in een volgende studie uit te werken.

Ten slotte is een gevoeligheidsstudie uitgevoerd naar het effect van worst-case van instromingen uit de zijrivieren. Hieruit wordt het volgende geconcludeerd:

- De piekafvoeren van zijrivieren die volgen uit de deterministische relatie van WBI bij een afvoerpiek van 4.000 m<sup>3</sup>/s, zijn vergelijkbaar of hoger dan de gemeten maximale afvoeren van diezelfde zijrivieren in de periode tot 2016.
- De afvoeren tijdens het hoogwater van 2021 op de Geul en Roer zijn hoger dan de piekafvoeren van deze twee zijrivieren die volgen uit de deterministische relatie van WBI. Bij de overige zijrivieren was de afvoer juist lager dan berekend met de relaties die gebruikt worden in het WBI.
- Als de piekafvoer van iedere zijrivier precies tegelijk met de Maaspiek zou vallen, dan zou de piekafvoer op de Maas theoretisch ruim 200 m<sup>3</sup>/s hoger uitvallen. Echter, door de aanwezigheid en werking van de waterkering bij de monding van de Dieze zal deze toename in werkelijk niet plaatsvinden. De maximale toename is daardoor 80 m<sup>3</sup>/s. Als daarnaast de afvoer van de zijrivieren in de WBI benadering verhoogd worden tot het maximum uit de meetreeks, dan is vanaf Roermond de totale toename in afvoer bijna 200 m<sup>3</sup>/s. Uit de vertaling naar waterstanden blijkt dat dit slechts een zeer beperkt effect heeft op de Grensmaas (4 tot 8 cm); benedenstrooms van Roermond is de waterstandstoename ruim 23 cm.

# 7 Conclusies en aanbevelingen

## 7.1 Conclusies

### Rivierkundige aspecten (hoofdstuk 2)

Uit de vergelijking tussen gemeten en de met WAQUA en SOBEK berekende waterstanden wordt het volgende geconcludeerd:

- WAQUA geeft over het algemeen redelijke resultaten met afwijkingen van maximaal enkele decimeters. De verschillen tussen metingen en berekeningen zijn over het algemeen groter voor de nieuwe meetstations dan voor de oude meetstations die zijn gebruikt bij de kalibratie.
- De variantie van de fout voor ongestoorde meetpunten is, zoals verwacht, kleiner dan voor verplaatste meetpunten. Daarentegen ligt de gemiddelde waarde van de modelwaterstanden van verplaatste meetpunten dichter bij de metingen dan voor de ongestoorde meetpunten het geval is. Anders gezegd: bij de verplaatste meetpunten is de 'bias' kleiner dan voor de onverstoorte meetpunten.
- Over het algemeen zijn de afwijkingen in SOBEK iets groter dan de afwijkingen in WAQUA.

Modelmatig is berekend wat het waterstandseffect is geweest van de aangelegde waterkeringen en de uitgevoerde rivierverruimingsmaatregelen sinds 1993. Hieruit is het volgende geconcludeerd:

- Ten gevolge van de kaden (noodkaden en DGR-kaden) was in 2003 sprake van een beperkte verhoging van de waterstanden (5 à 10 cm) met als uitzondering de locaties Borgharen-Ifteren, Meers en Roosteren; hier bedroeg de verhoging enkele decimeters.
- Ten gevolge van de rivierverruiming zijn de waterstanden significant gedaald. Gemiddeld is de daling ongeveer 10 à 30 cm. Op de Grensmaas is de variatie groter: van 0 tot 220 cm.
- Bij meetstation Borgharen Dorp zijn de effecten van maatregelen op de waterstanden zichtbaar. De gemeten verandering komt goed overeen met de gemodelleerde verandering. Voor andere stations is een dergelijke vergelijking nog niet gemaakt.
- De locaties waar weinig of geen rivierverruiming heeft plaatsgevonden zijn morfologisch uit evenwicht. Dit komt doordat de stroomsnelheden op de niet verruimde trajecten zijn toegenomen. Als hierdoor de afdeklaag opbreekt, kan sterke erosie optreden. Dit is vermoedelijk de oorzaak geweest van het ontstaan van de erosiekuilen bij het hoogwater van juli 2021.

Vervolgens is onderzocht wat het effect is van zomervegetatie op de opgetreden waterstanden. Hieruit is het volgende geconcludeerd:

- Het toevoegen van maisvelden aan de modelschematisatie leidt tot een gemiddelde verhoging van 23 cm in berekende waterstanden op de Maas, met lokaal toenamen tot ruim 50 cm. De weerstand van mais is echter nog een onzekere factor en vraagt nader onderzoek.
- Rekening houden met het effect van bladvorming in de zomer op ruwheden leidt tot een verhoging in berekende waterstanden van gemiddeld 5 cm langs de Maas, met op de Grensmaas lokaal tot 15 cm.

Ten slotte is literatuurstudie uitgevoerd naar het effect van de golfvorm op afvoer en waterstanden. Hieruit is het volgende geconcludeerd:

- De mate van topvervlakking is afhankelijk van onder andere het bodemverhang, de waterdiepte en de piekafvoer, maar bovenal van de vorm van de afvoergolf. Een stompe afvoergolf bij Borgharen kan benedenstrooms nabij Den Bosch resulteren in een piekafvoer die 1000 m<sup>3</sup>/s groter is dan de piekafvoer van een spitse afvoergolf.
- De mate van topvervlakking neemt toe in benedenstroomse richting. Op de Grensmaas is het maximale effect op de waterstanden 10 cm. Vanaf de Plassenmaas (nabij Roermond) neemt dit toe naar 60 cm, om vervolgens toe te nemen tot 100 cm op de Getijdenmaas (nabij Den Bosch).
- De mate van topvervlakking was veel groter tijdens het hoogwater van 1993 dan tijdens het hoogwater van 1995 omdat de golfvorm van 1993 relatief spits was en die van 1995 juist relatief stomp. In nog extremere mate speelde de topvervlakking ook bij het hoogwater van 2021. De topvervlakking was vanaf de Plassenmaas dermate groot, dat ondanks het grote instromende debiet vanaf de Roer de piekafvoer bij Roermond al onder het niveau van de hoogwaters van 1993 en 1995 was gezakt, ondanks het feit dat de piekafvoer bij Borgharen/Eijsden juist groter was dan in 1993 en 1995.

### **Opgave en oplossingen voor hoogwaterveiligheid (hoofdstuk 3)**

We hebben een analyse uitgevoerd naar de effecten van de ingrepen dijkversterking, rivierverruiming en retentie op hun bijdrage aan de hoogwaterveiligheid. Hieruit is het volgende geconcludeerd:

- Dijkversterking zorgt voor een vergroting van de hoogwaterveiligheid in de dijkkring zelf, maar kan de hoogwaterveiligheid in nog niet versterkte dijkkringen verlagen. Op dit moment is sprake van dijken langs de Maas die onder drie verschillende normen zijn ontworpen en slechts voor een deel voldoen aan de huidige normen.
- Rivierverruiming zorgt over een groot traject voor lagere waterstanden en hiermee een toename van de hoogwaterveiligheid. Wel zijn veel ingrepen nodig om voor de hele Maasvallei te komen tot een significant effect op de waterstanden.
- Retentie kan eveneens bijdragen aan de hoogwaterveiligheid zoals is gebleken tijdens het hoogwater van juli 2021.

Vervolgens is een analyse uitgevoerd van het verwachte waterstandseffect van vergunde maatregelen en van geplande maar nog niet vergunde of gerealiseerde maatregelen. Hieruit is het volgende geconcludeerd:

- Realisatie/voltooiing van reeds vergunde maatregelen zal ten opzichte van de situatie in 2021 leiden tot extra waterstandsverlaging, vooral op de Grensmaas.
- Nog geplande maatregelen kunnen aanvullende waterstandsverlaging geven. Een indicatie hiervan is zichtbaar in de effecten van het model BenO19, de basis van het BOI2023.
- Voor aanvullende waterstandsverlaging zijn verkenningen uitgevoerd naar verschillende varianten van rivierverruiming. De grootte van de te bereiken waterstandsverlaging is afhankelijk van de gekozen rivierverruiming, bijvoorbeeld een variant van de Adaptieve Uitvoeringsstrategie Maas (AUM) of een nog nader te bepalen pakket uit IRM. Hiermee kan een deel van de hoogteopgave worden ingelost.
- Van belang hierbij is te vermelden dat de hoogteopgave voor de waterkeringen slechts één van de componenten van hoogwaterveiligheid is; zelfs als aan de hoogteopgave wordt voldaan, is het nog altijd mogelijk dat een dijk moet worden versterkt om te voldoen aan de eisen met betrekking tot andere faalmechanismen, zoals piping en macro-stabiliteit.

#### Afvoerstatistieken van de Maas (hoofdstuk 4)

Er is onderzoek uitgevoerd naar de kans op overschrijden van de piekafvoer van het hoogwater van juli 2021, en de kans dat dit in de zomer plaats vindt. Hieruit is het volgende geconcludeerd:

- Op basis van analyses van metingen is de terugkeertijd van dit hoogwater geschat tussen de 90 en 200 jaar, afhankelijk van de keuze van de statistische rekenmethode en afhankelijk van het gegeven of het hoogwater van 2021 zelf wordt meegenomen in de rekenmethode.
- Als alleen waargenomen hoogwaters in de zomerperiode worden beschouwd zijn de terugkeertijden substantieel groter: 600 jaar tot zelfs meer dan een miljoen jaar (methode GRADE). De grote verschillen worden hoofdzakelijk veroorzaakt doordat de piekafvoer van 2021 veel groter was dan de overige piekafvoeren in de zomer. Mede vanwege de uiteenlopende resultaten is het niet mogelijk om scherp te bepalen wat de werkelijke terugkeertijd is van het hoogwater van 2021. GRADE, de vigerende methode voor de beoordeling van primaire waterkeringen, lijkt de kans op extreme zomerhoogwaters sterk te onderschatten.
- Een aanvullende complicatie bij het bepalen van de kansen op extremen is dat door klimaatverandering de kans op een extreem zomerhoogwater de laatste jaren mogelijk (sterk) is toegenomen. In de statistische methoden wordt daar geen rekening mee gehouden. Dat kan er verder aan bijdragen dat de kans op voorkomen van een dergelijk hoogwater wordt onderschat.

Aanvullend zijn analyses uitgevoerd naar de kans op de opgetreden golfvorm op basis van de dataset van GRADE. Hieruit is het volgende geconcludeerd:

- De hoogwaters van 1993 en 1995 zaten respectievelijk bij de 10% meest spitse, en 10% meest stompe afvoergolven.
- Het hoogwater van 2021 is spitzer dan 1% meest spitse golfvormen uit de GRADE-dataset.

Over de belangrijkste kenmerken van extreme Maashoogwaters is het volgende geconcludeerd:

- Extreme hoogwaters worden voornamelijk veroorzaakt door een combinatie van hoge neerslag, weinig verdamping, sneeuwsmelt en hoge antecedente bodemvochtigheid. De kans op deze condities is het grootst in de winter.
- De verwachting is dat extreme neerslag als gevolg van klimaatverandering gaat toenemen. Door de (wereldwijde) temperatuurstijging neemt de verdamping toe waardoor meer neerslag mogelijk is. Verder zullen veranderingen in atmosferische circulatie naar verwachting ook leiden tot een toename in de neerslag. Dit leidt ertoe dat de kans op voorkomen van een gebeurtenis met een piekafvoer van juli 2021 zal toenemen.

#### Samenhang tussen de Maas en het regionale watersysteem (hoofdstuk 5)

Vervolgens zijn analyses uitgevoerd naar het samenvallen van afvoerpieken van de Maas in relatie tot afvoerpieken van de zijrivieren in Nederland en de mogelijke impact daarvan op waterstanden. Hieruit is het volgende geconcludeerd:

- De huidige relaties (regressielijnen) tussen afvoeren van de Maas en zijrivieren die worden gebruikt voor operationeel beheer en voor beoordelingen van waterkeringen zijn deterministisch. Dat wil zeggen dat bij een bepaalde piekafvoer van de Maas altijd wordt gerekend met één bijbehorende piekafvoer op de zijrivieren. De voorspellingen van de regressielijnen komen *gemiddeld* goed overeen met historische afvoeren. Voor individuele gevallen zijn de verschillen echter substantieel: vele tientallen m<sup>3</sup>/s.

- Afvoerpieken van de Roer en de Geul treden doorgans op binnen een periode van 25 uur voor en na het optreden van de afvoerpiek van de Maas.

Verder is geanalyseerd wat het effect kan zijn van het wel/niet samenvallen van piekafvoeren op de waterstanden van de Maas en zijrivieren. Hieruit is het volgende geconcludeerd:

- Op de Roer nemen bij de monding de waterstanden met maximaal 4 m toe wanneer op de Maas sprake is van een extreem hoogwater. Deze opstuwning neemt in bovenstroomse richting exponentieel af en is op 2 km vanaf de monding nog maar maximaal 1 m. Een hoge Roerafvoer zorgt daarentegen voor een toename van de waterstanden over het gehele Roer (tot 3.5 m), met uitzondering van het gebied nabij de monding waar de waterstand volledig wordt bepaald door de afvoer (en waterstand) op de Maas.
- Vooral in het overgangsgebied van zijrivieren waar afvoeren van de zijrivier en de Maas beide invloed hebben op de waterstand is het meenemen van de samenhang tussen beide afvoeren en de onzekerheid daarin belangrijk. Hierbij zijn de volgende aspecten van belang: [a] de correlatie tussen piekafvoeren van de Maas en zijrivieren en [b] het samenvallen van de afvoergolven ("timing"). Analyse van de invloed daarvan op hoge waterstanden langs de Maas en langs de zijrivieren kan leiden tot een betere inschatting van herhalingstijden van hoge waterstanden, vooral voor het benedenstroomse deel van de zijrivieren.

### **Beoordeling van waterkeringen Maas (hoofdstuk 6)**

- Diverse karakteristieken van het waterstandsverloop zijn relevant voor het (mogelijk) optreden van faalmechanismen bij dijken, zoals de piekwaterstand, de duur van de piekwaterstand en de stijgsnelheid en valsnelheid van de waterstand.
- De huidige benadering in WBI2017 maakt gebruik van schematisering op basis van de gemiddelde afvoergolf. Uitzonderingen met spitse of stompe golven worden dus niet beschouwd. Daarbij worden bij de beoordeling van faalmechanismen aanvullende aannames gedaan over het waterstandsverloop.
- Bij het onderzoek naar de golfvorm op topvervlakking blijkt dat piekwaterstanden bij gebruik van de golfvorm als stochast over het algemeen hoger zijn dan bij gebruik van alleen de mediane golf. Het verschil is echter beperkt: maximaal 0,06 m.
- De stijgsnelheid van zeer spitse afvoergolven kan 1 m/dag groter zijn in vergelijking met de mediane golf (~2,5 m/dag respectievelijk ~1,5 m/dag). In hoeverre dat impact heeft op de berekende faalkans van de kering (rekening houdend met de relatief kleine kans op voorkomen van een dergelijk spitse golfvorm) moet verder uitgewerkt worden in een probabilistische analyse met inachtneming van de faalmechanismen waar deze parameter relevant voor is.
- Vergelijkbare conclusies worden getrokken voor de valsnelheid en de duur van de topwaterstand. Voor zeer spitse golven is de valsnelheid 0,5 m/d groter dan de mediane situatie. Voor zeer stompe golven kan de duur van de piek toenemen van 140 uur naar 330 uur.

Ten slotte is een gevoeligheidsstudie uitgevoerd naar het effect van worst-case van instromingen uit de zijrivieren. Hieruit is het volgende geconcludeerd:

- De piekafvoeren van zijrivieren die volgen uit de deterministische relatie van WBI bij een afvoerpiek van 4.000 m<sup>3</sup>/s, zijn vergelijkbaar of hoger dan de gemeten maximale afvoeren van diezelfde zijrivieren in de periode tot 2016.
- De afvoeren tijdens het hoogwater van 2021 op de Geul en Roer zijn hoger dan de piekafvoeren van deze twee zijrivieren die volgen uit de deterministische relatie van WBI. Bij de overige zijrivieren was de afvoer juist lager dan berekend met de relaties die gebruikt worden in het WBI.

- Als de piekafvoer van iedere zijrivier precies tegelijk met de Maaspiek zou vallen, dan zou de piekafvoer op de Maas zoals bepaald in het kader van WBI (waarin pieken niet exact samenvallen) theoretisch ruim 200 m<sup>3</sup>/s hoger uitvallen. Echter, door de aanwezigheid en werking van de waterkering bij de monding van de Dieze zal deze toename in werkelijk niet plaatsvinden. De maximale toename is daardoor 80 m<sup>3</sup>/s. Als daarnaast de afvoer van de zijrivieren in de WBI benadering verhoogd worden tot het maximum uit de meetreeks van de periode 1988 t/m 2016, dan is vanaf Roermond de totale toename in afvoer bijna 200 m<sup>3</sup>/s. Uit de vertaling naar waterstanden blijkt dat dit slechts een zeer beperkt effect heeft op de Grensmaas (4 tot 8 cm); benedenstrooms van Roermond is de waterstandstoename ruim 23 cm.

## 7.2 Aanbevelingen voor vervolgonderzoek

Aanbevolen wordt het onderzoek naar het effect van vegetatie op ruwheden en waterstanden door te zetten. Een aanzet voor het vaststellen van het belang van goede zomerkartering is gegeven door Van Dongen (2022). Daarnaast is onderzoek nodig naar de dynamische effecten van vegetatie: hoe verandert de ruwheid door platslaan en afbreken van mais. Dit kan bijdragen aan een betere basis van onderzoek naar seizoensafhankelijke ruwheidscoëfficiënten.

Aanbevolen wordt verder om metingen en modellen te evalueren over een lange periode. Metingen van Borgharen Dorp laten goed zien hoe de waterstanden zijn gedaald door rivierverruiming en bieden daarin waardevolle inzichten in de effectiviteit van dergelijke maatregelen. Door dit te vergelijken met het berekende waterstandseffect vanuit de modellen wordt inzicht verkregen in de nauwkeurigheid van deze modellen bij het bepalen van waterstandseffecten als gevolg van maatregelen. Het is waardevol deze vergelijking van metingen en modelresultaten uit te breiden naar andere meetstations.

In de analyse van afvoergolven zijn de extreme gebeurtenissen uit GRADE nader geanalyseerd. Het lijkt erop dat GRADE vooral de extreme zomerhoogwaters sterk onderschat. Aanbevolen wordt om onderzoek te doen naar hoe de kansschatting op extreme zomerhoogwaters verbeterd kan worden. Een mogelijke verbetering is het toevoegen van uitvoer van weer- en klimaatmodellen aan de invoerdatabase van GRADE. Dat leidt tot een toename van extreme weersituaties in de database (en daarmee en mogelijk ook meer informatie over zomerhoogwaters) en meer mogelijkheden om effecten van klimaatverandering in kaart te brengen. Een andere mogelijke verbetering is om GRADE ook op sub-dagelijkse basis toe te passen, waardoor de mogelijkheid geboden wordt dat dagneerslagen in de synthetische reeks hoger kunnen uitvallen dan historische dagneerslagen.

Er is veel onbekend over correlatie tussen afvoeren uit de zijrivieren en Maasafvoeren. Aanbevolen wordt om hier nader onderzoek naar te doen. In het PhD onderzoek van Guus Rongen wordt hier al onderzoek naar uitgevoerd. Ook de uitbreiding van de GRADE aanpak naar de zijrivieren zal hier meer kennis over opleveren. Hierbij zijn de volgende aspecten van belang: [a] de correlatie tussen piekafvoeren van de Maas en zijrivieren en [b] het samenvallen van de afvoergolven ("timing"). Analyse van de invloed daarvan op hoogwaterstanden langs de Maas en langs de benedenstroomse delen van de zijrivieren kan leiden tot een betere inschatting van geschatte herhalingstijden.



## 8 Referenties

- Agtersloot, R. & Paarlberg, A.J. (2016): WAQUA Productieberekeningen Bovenrivieren Maas. Wettelijk beoordelingsinstrumentarium 2017. Deltares rapport 1220082-001-HYE-0012 (v4)
- Asselman, N., J.S. de Jong, D. Kroekenstoel, S. Folkertsma (2022) The importance of peak attenuation for flood risk management, exemplified on the Meuse River, the Netherlands. *Water Security* 15 (2022) 100114, <https://doi.org/10.1016/j.wasec.2022.10011>
- Becker, A. (2012), Maas-modellen 5de generatie: Modelopzet kalibratie en verificatie. Deltares rapport, 1204280-000-ZWS-0011-v3
- Chanson, H. (2004) *Hydraulics of Open Channel Flow*. Elsevier. May 2004
- Chbab, H. (2016) Waterstandsverlopen Rijntakken en Maas, Wettelijk Toetsinstrumentarium WTI-2017. Deltares rapport 1220082-002-HYE-0002 d.d. februari 2016
- Chbab, H. (2017) Basisstochasten WBI-2017. Statistiek en statistische onzekerheid. Deltares rapport 1209433-012-HYE-0007 v4
- Chow, V.T. (1959) *Open channel hydraulics*, McGraw-Hill Hui
- Deijl, E. van der (2022) Validatie hoogwater Maas juli 2021. Deltares rapport 11208036-012-ZWS-0003 in voorbereiding.
- Deltaprogramma Maas (2019). Werkdocument Adaptieve Uitvoeringsstrategie Maas 2020-2050, Mogelijkheden voor waterstandsverlaging bij hoogwatersituaties als bouwsteen voor Integraal Riviermanagement, september 2019
- Deltaprogramma Rivieren (2014). Synthesedocument Rivieren, Achtergronddocument B6, 1 juli 2014
- Deltares (2015). Verdelingen kritisch overslagdebiet WT12017. Deltares memo 1220086-005-HYE-0003, dd. 10 september 2015
- Dongen, B. van (2022) Methodiek voor bepalen effect zomervegetatie. Arcadis rapport d.d. 11 januari 2022
- ENW (2021) Hoogwater 2021 Feiten en Duiding. Expertise Netwerk Waterveiligheid. Versie 2, 20 september 2021. Met bijdragen van TU Delft, Deltares, Wageningen University, Erasmus MC, HKV, Universiteit Utrecht, IVM, VU, KNMI, Universiteit Twente
- Geerse, C.P.M., 2013. Belastingmodellen WBI-2017. Gevoeligheidsanalyses en adviezen voor eventuele aanpassingen aan Hydra-Ring. HKV rapport PR2647.40. HKV lijn in Water, september 2013.
- Geertsema, T.J., Asselman, N. E. M. (2022) analyse hoogwater Roermond. Watersysteemevaluatie Waterschap Limburg. Deltares rapport 11207700-000-ZWS-0020, mei 2022
- Geertsema, T. J., Teuling, A. J., Uijlenhoet, R., Torfs, P. J., & Hoitink, A. J. (2018). Anatomy of simultaneous flood peaks at a lowland confluence. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(10), 5599-5613. <https://doi.org/10.5194/hess-22-5599-2018>

- Harbers, M. (2022) Informeren over het rapport 'Eerste advies Beleidstafel wateroverlast en hoogwater'. Kamerbrief IENW/BSK-2022/45527 d.d. 11 maart 2022  
<https://www.rijksoverheid.nl/documenten/kamerstukken/2022/03/11/informeren-over-het-rapport-eerste-advies-beleidstafel-wateroverlast-en-hoogwater>
- Hegnauer, M., Beersma, J.J., Van den Boogaard, H.F.P., Buishand, T.A., 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. (2022). Discharge statistics different weather generator methods Deltares Memo, 11208037-003-ZWS-0002. Februari 2022
- HKV, 2013: Belastingmodellen WTI2017; Gevoeligheidsanalyses en adviezen voor eventuele aanpassingen aan Hydra-Ring. HKV in opdracht van Deltares, September, 2013
- Jesse, P. (2005) Vegetatie in de zomer. RIZA memo
- Jong, J.S. de (2016d): Verificatie modellen Maas Jaarsom 2014. Deltares rapport 1230071-002-ZWS-0019
- Jong, J.S. de (2016b): Herkalibratie 5de generatie WAQUA Maas. Deltares rapport 1230071-002-ZWS-0008
- Jong, J.S. de (2016c): Herkalibratie SOBEM 3.4 Maas. Deltares rapport 1230071-002-ZWS-0015
- Jong, J.S. de (2021) Advisering in de keuze van kalibratiefactoren voor MHW-afvoeren. Zesde-generatie modellering Maas. Deltares rapport 11206813-002-ZWS-0012 d.d. 12 oktober 2021
- Jong, J.S. de, Asselman, N. (2019) Topvervlakking Maas - Het effect van golfvormen, bergingsgebieden en rivierverruiming. Deltares rapport 11203684-003-ZWS-0002.
- Kreienkamp, Frank, Sjoukje Y. Philip, Jordis S. Tradowsky, Sarah F. Kew, Philip Lorenz, Julie Arrighi, Alexandre Belleflamme, Thomas Bettmann, Steven Caluwaerts, Steven C. Chan<sup>14</sup>, Andrew Ciavarella, Lesley De Cruz, Hylke de Vries<sup>2</sup>, Norbert Demuth<sup>18</sup>, Andrew Ferrone, Erich M. Fischer, Hayley J. Fowler, Klaus Goergen, Dorothy Heinrich<sup>7</sup>, Yvonne Henrichs, Geert Lenderink, Frank Kaspar, Enno Nilson, Friederike E L Otto, Francesco Ragone, Sonia I. Seneviratne, Roop K. Singh, Amalie Skålevåg, Piet Termonia, Lisa Thalheimer, Maarten van Aalst, Joris Van den Bergh, Hans Van de Vyver, Stéphane Vannitsem, Geert Jan van Oldenborgh, Bert Van Schaeybroeck, Robert Vautard, Demi Vonk, Niko Wanders, 2021. World weather Attribution report.
- Rapid attribution of heavy rainfall events leading to the severe flooding in Western Europe during July 2021
- Maaswerken (2000) Tracébesluit Zandmaas/Maasroute - aanvulling II
- Meer, A. van der (2020) POVM Actuele Sterkte. Macrostabieleit Buitenwaarts, een verkennende studie. D.d. 24 april 2020
- Meijer, D. (2015) Hoogwatermodellering Voorkeurstrategie Deltaprogramma Maasvallei (fase 2), Verkenning van toekomstscenario's op basis van de nieuwe normering, opdrachtgever: Provincie Limburg, 2 juli 2015, project 003.10 / VPL 73830, concept 2.0, RiQuest, Agtersloot Hydraulisch Advies, Anneke de Joode Rivierkundig Advies
- Meijer, D. & R. Agtersloot (2020). Stroomsnelheden in de Gemeenschappelijke Maas. Verslag hydraulisch modelonderzoek. P0010.23 / 107.02 d.d. 18 december 2020

- Ministerie van Infrastructuur & Waterstaat (2022) Eerste advies beleidstafel wateroverlast en hoogwater. d.d. 11 maart 2022. <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2022/03/11/bijlage-eerste-advies-beleidstafel-wateroverlast-en-hoogwater>
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat (2007) Voorschrift Toetsen op Veiligheid Primaire Waterkeringen. September 2007
- Peters, B., Herik K.J., Kurstjens (2007). Streefbeelden en herstelmaatregelen van beekmondingen in het Maasdal. Achtergronddocument herstelmaatregelen. Bureau Drift, Berg en Dal.
- Pol, J.C. (2014) Hydrograph shape variability on the river Meuse. Evaluation of design hydrograph methods and probabilistic methods to estimate design water levels on the river Meuse. MSc Thesis TU Delft
- Pol, J. & Kok, M. & Barneveld, H. & Morales Napoles, O. & Schielen, R.M.J. (2015). Evaluation of design hydrograph methods and probabilistic methods for estimating design water levels on the river Meuse. Conference proceedings of the 36th IAHR World Congress
- Rijkswaterstaat Zuid-Nederland (2016). Verbeteren Systeemwerking Maas, 10 maart 2016
- RIZA (2005) Laterale toestroming Maas en Rijn onder maatgevende omstandigheden; Memo ADV\*2005-003 (A); 27 april 2005
- Schropp, M. (2021) Review notitie Maashoogwater 2021 van Bureau Stroming d.d. 18 november 2021
- Sperna Weiland, F., Hegnauer, M., Bouaziz, L. en Beersma, J., (2015) Implications of the KNMI'14 cliamte scenarios for the discharge of the Rhine and Meuse, comparison with earlier scenario studies. Deltares-rapport 1220042-000-ZWS-0004. Oktober 2015.
- Stroming (2021) Analyse waterstandsverloop Grensmaas tijdens hoogwater juli 2021
- Veen, R. van der, R. Agtersloot & C. Michels (2021). Jaarlijkse Actualisatie Modellen Maas. Rura-Arnhem P210315R d.d. 25 mei 2021
- Veen, R. van der & R. Agtersloot (2021). Topafvoeren hoogwater Maas juli 2021. Rura-Arnhem en Agtersloot Hydraulisch Advies rapport P210910R v2.0 d.d. 16 december 2021
- Veen, R. van der & R. Agtersloot (2022). Analyse hoogwater Maas juli 2021 (metingen – verwachtingen). In opdracht van RWS-ZN / RWS-CIV. Rura-Arnhem en Agtersloot Hydraulisch Advies rapport 4500322103 v2.3 d.d. 16 maart 2022
- Veen, R. van der (2018). Actualisatie beschrijving laterale toestroming Maas. Rura-Arnhem rapport P180510R d.d. 30-08-2018
- Velzen, E.H. van, Jesse, P., Cornelissen P. & Coops, H. (2003). Stromingsweerstand van vegetatie in uiterwaarden, Deel 1 Handboek, versie 1-2003, RIZA rapport 2003.028, ISBN 9036956420.
- Velzen, E.H. van, Jesse, P., Cornelissen P. & Coops, H. (2003). Stromingsweerstand van vegetatie in uiterwaarden, Deel 2 Achtergronddocument, versie 1-2003, RIZA rapport 2003.029, ISBN 9036956439.
- Velzen, E.H. van & P. Jesse (2005) Extreme hoogwaters in de zomer, iets om rekening mee te houden? RIZA Werkdocument 2005.189x
- Velzen, E.H. van & P. Jesse (2005) Extreme hoogwaters in de zomer, iets om rekening mee te houden? RIZA Werkdocument 2005.189x

- Vermulst, J.A.P.H. (2014) Watersysteemtoets Geul, Geleenbeek en Roer.
- Vieira da Silva, J., Lokin, L. (2019). Jaarlijkse Actualisatie Modellen: Maas 2019. HKV rapport 3817.20
- Visser, B. (2021). Beleidstafel Wateroverlast en Hoogwater. Kamerbrief IENW/BSK-2021/272972 d.d. 12 oktober 2021. <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/kamerstukken/2021/10/12/beleidstafel-wateroverlast-en-hoogwater>
- Vorst, L. van & H. van den Brink (2022) Improving the GRADE weather generator by using synthetic datasets from RACMO and SEAS5. KNMI rapport <https://cdn.knmi.nl/knmi/pdf/bibliotheek/knmipubTR/TR398.pdf>
- Wijbenga, J.H.A., J.J.P. Lambek, E. Mosselman, R.L.J. Nieuwkamer & R.H. Passchier (1993) Toetsing uitgangspunten rivierdijkversterkingen. Deelrapport 2: Maatgevende belastingen. Rapport voor Commissie Boertien, Waterloopkundig Laboratorium en European-American Center for Policy Analysis
- de Wit, M. J. M. (2009). Van regen tot Maas: grensoverschrijdend waterbeheer in droge en natte tijden. Veen Magazines.

# Lijst van begrippen en afkortingen

Begrip / afkorting	Toelichting
<b>BOI</b>	Beoordeling en Ontwerp Instrumentarium voor primaire waterkeringen in Nederland
<b>CG</b>	Consortium Grensmaas
<b>D-HYDRO</b>	2D modelinstrumentarium dat gebruikt gaat worden bij o.m. BOI2023
<b>DGR-Kaden</b>	Waterkeringen conform Deltawet Grote Rivieren (1995 – 2005)
<b>GRADE</b>	<b>Generation of Rainfall and Discharge Extremes</b>
<b>HR</b>	Hydraulische randvoorwaarden
<b>hw</b>	hoogwater
<b>HWBP</b>	Hoogwaterbeschermingsprogramma
<b>l.o.</b>	linkeroever
<b>POL</b>	Provinciaal Omgevingsplan Limburg
<b>r.o.</b>	rechteroever
<b>rkm</b>	Rivierkilometer
<b>RVG-kaden</b>	Kaden bij Roermond, Venlo en Gennep. Later uitgebreid met Mook en Middelaar. (2005-2012)
<b>SOBEK</b>	1D modelinstrumentarium, gebruik in operationele systemen (RWsOS)
<b>SSK</b>	Sluitstukkaden
<b>VKS</b>	Voorkeursstrategie
<b>WAQUA</b>	2D modelinstrumentarium, gebruikt bij o.m. WBI2017
<b>WBI</b>	Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium, vaak specifiek gebruikt voor het WBI2017

# A Vergelijking metingen en WAQUA

Deze bijlage beschrijft analyses die zijn uitgevoerd voor de beantwoording van vraag A.1:

“Kunnen de huidige modellen de waterstanden van juli 2021 reproduceren? Kunnen de verschillen worden verklaard?”

## A.1 Korte beschrijving van het model waqua-maas-j21\_5-v1

De j21\_5-v1 schematisatie is gebaseerd op de j19\_5 schematisatie, die weer een geactualiseerde versie van het gebiedschematisatie baseline-maas-j17\_5-v2 is. De j19\_5-v1 schematisatie bevat een nieuwe ecotopenmaatregel 2017 met de nog niet gecorrigeerde land/watergrens (4e cyclus), 60 maatregelen voor j17-j18 en 40 maatregelen voor j18-j19 die zijn gemixt om te komen tot baseline-maas-j19\_5-v1, waqua-maas-j19\_5-v1 en sobek-j19\_5-v1 (Viera da Silva & Lokin, 2019). Om van de j19\_5-v1 naar de j21\_5-v1 te komen zijn nog eens 88 maatregelen ingemixt (Van der Veen et al., 2021).

### **Aandachtspunten in de schematisatie:**

J95\_5 multibeam bodem afgeleid uit singlebeam-bodem (Grensmaas, rkm 15.4 t/m 57.0: -30 cm, rest van de Maas: -15 cm). jaren na 1995 multibeam-bodem.

In 2016 is een herkalibratie uitgevoerd van alle recente modellen (de Jong, 2016b). Bij deze kalibratie is het afvoerniveau “extreem laag” toegevoegd, is gekalibreerd op recente perioden en zijn (waar mogelijk) metingen van Belgische meetstations meegenomen. Dit resulteerde in ruwheidsdefinitie roughcombination-maas-2015-5-v3.

Tabel 8.1 Kalibratieniveaus in WAQUA (De Jong, 2016b)

	Afvoer (m <sup>3</sup> /s)	Kalibratie	Verificatie
Extreem Laag	20-50	Juli 2015	Juni 2014
Laag	200-250	November 2014	September 2015
Midden	1400-1650	November 2010	Januari 2011
Hoog	2700-2875	Februari 1995	Hoogwater 1993

Daarnaast is met de nieuwe modellen een verificatiejaarsom uitgevoerd op de periode 1 juli 2014 tot 1 januari 2016 (De Jong, 2016d).

De hoogte van de niveaus verschilt beperkt over de stations door topvervlakking en instromende zijrivieren tijdens de kalibratieperiode. De knikpunten per locatie staan opgegeven in Tabel 8.2.

Tabel 8.2 Knikpunten in de kalibratieniveaus in WAQUA (lokale afvoeren in m<sup>3</sup>/s)

Traject	Knikpunten kalibratie			
	Extreem Laag	Laag	Midden	Hoog
Eijsden – St. Pieter	50	200	1650	2700
Borgharen-Jukanaal - Borgharen-dorp	20	200	1650 <sup>1</sup>	2700
Borgharen-dorp – Stevensweert	20	200	1600	2700
Heel-boven – Linne-beneden	50	200	1400	2700
Roermond boven	50	200	1400	2750
Heel-beneden – Empel-beneden	50	250	1400	2750
Heesbeen -keizersveer	50	250	1400	2875

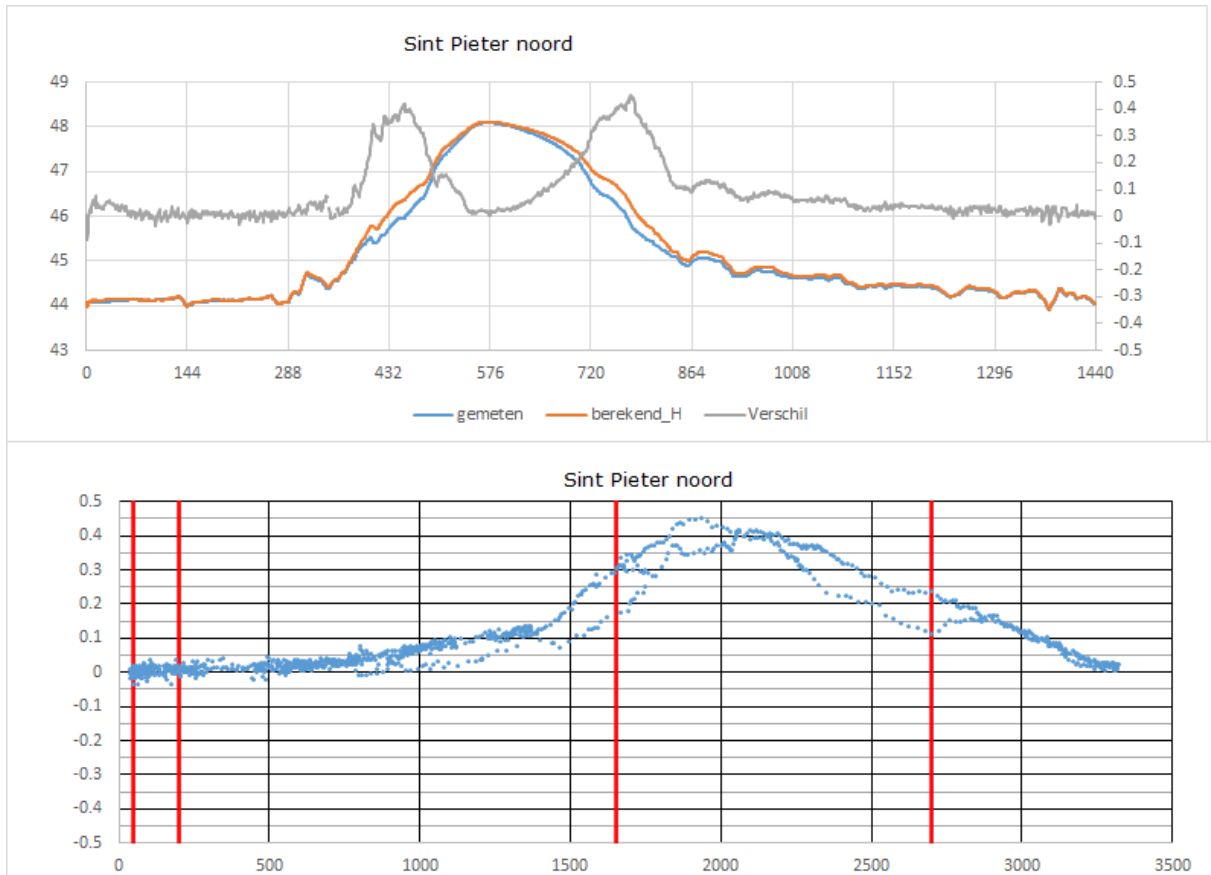
<sup>1</sup> Vermoedelijk staat dit onjuist in de rapportage De Jong (2016b).

## A.2 Figuren

### A.2.1 Ongestoorde meetpunten

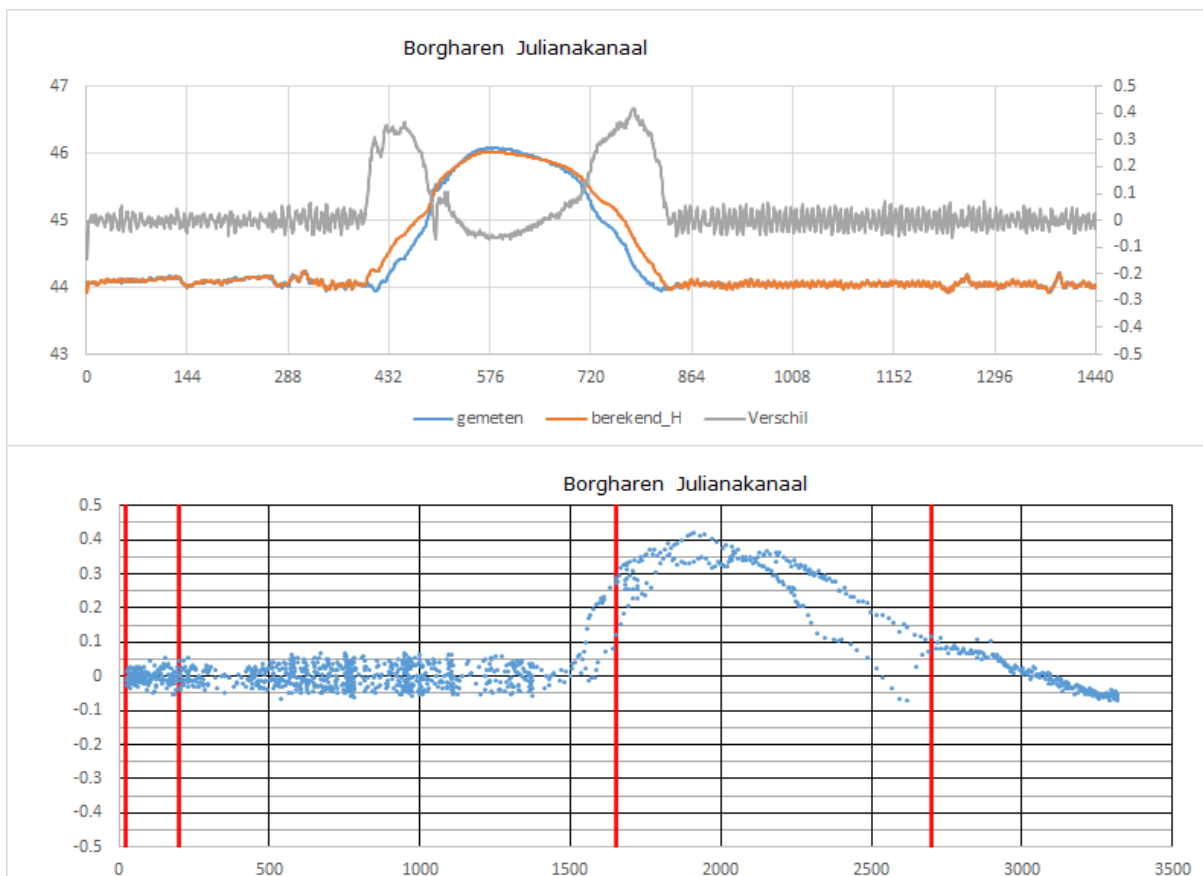


Bij afvoeren lager dan 1650 m<sup>3</sup>/s zijn de verschillen tussen de berekende en de gemeten waterstand kleiner dan plus of min 10 cm. Bij afvoeren rond de 2000 m<sup>3</sup>/s zijn de berekende waterstanden maximaal 30 cm hoger dan de gemeten waterstanden. De berekende maximale waterstand is 10 cm hoger dan de gemeten waterstand.

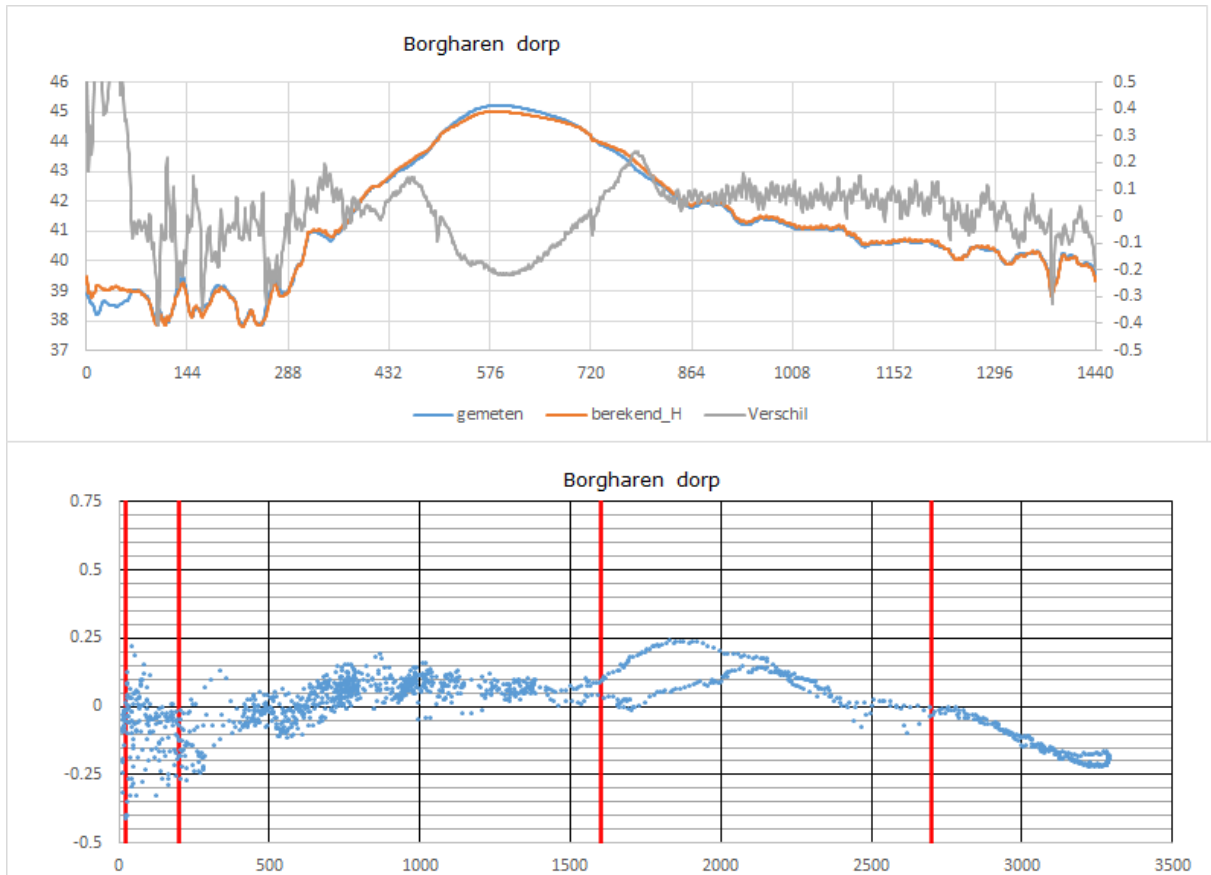


Bij Sint Pieter noord zijn de berekende waterstanden bij lage afvoeren en ten tijde van de afvoerpiek gelijk aan de gemeten waterstanden. Echter, bij afvoeren rond de 2000 m<sup>3</sup>/s zijn de berekende waterstanden tot maximaal 40 cm hoger dan de gemeten waterstanden.

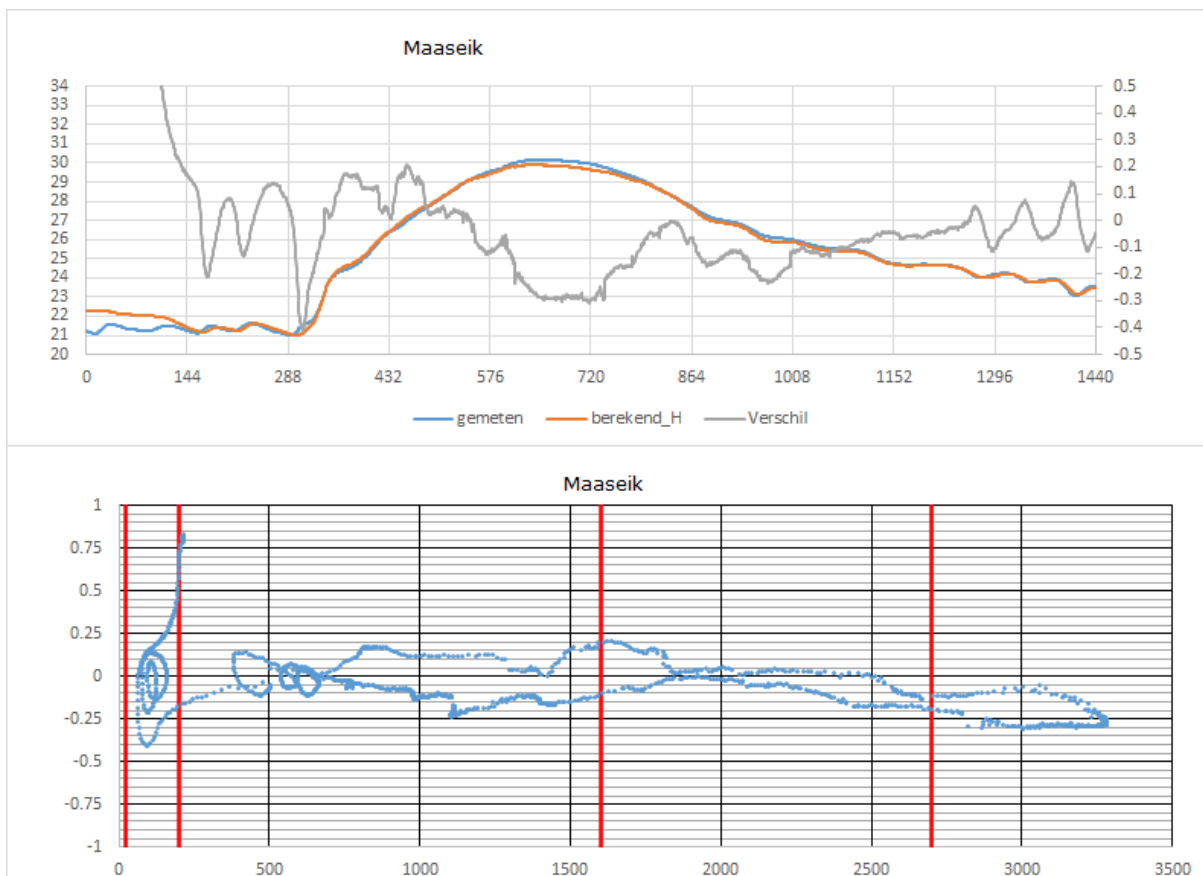




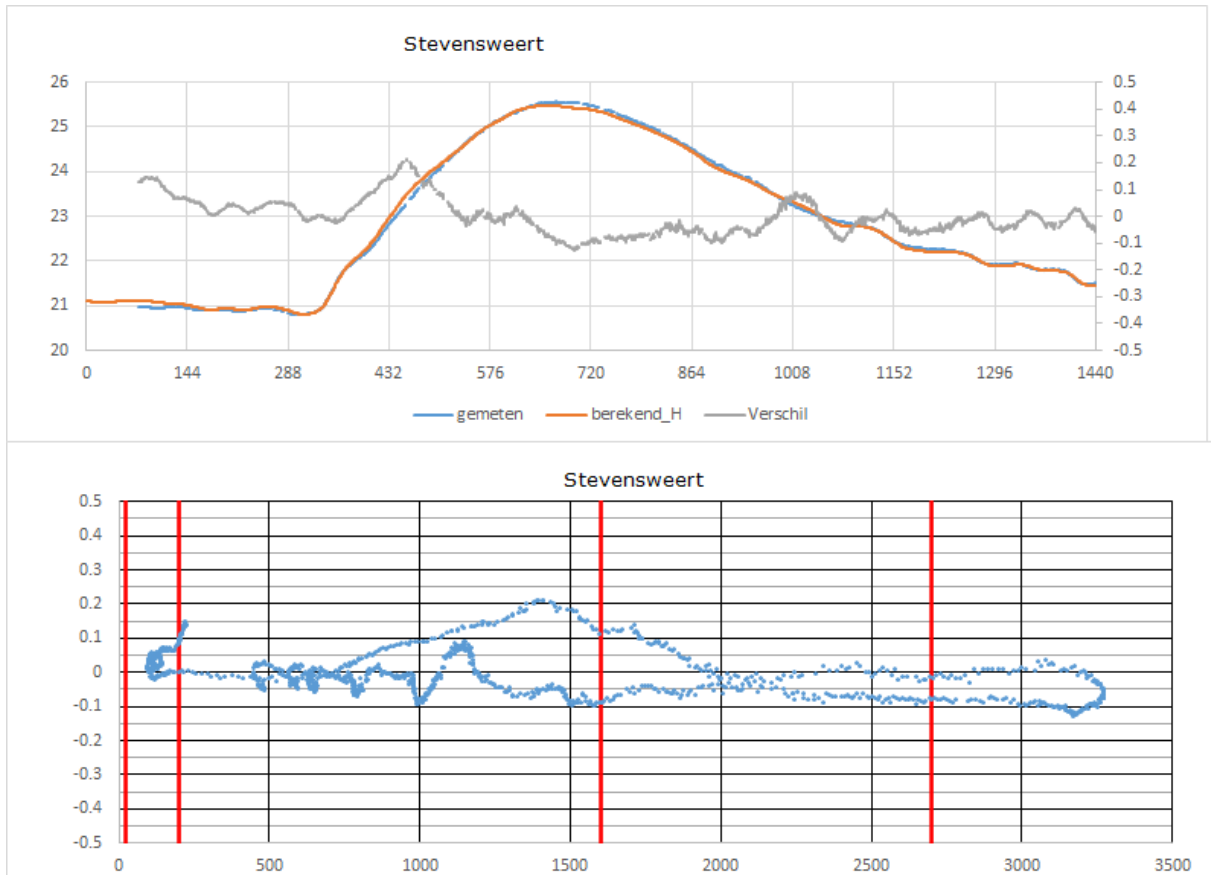
Bij Borgharen Julianakanaal zijn de verschillen tussen de berekende en gemeten waterstanden bij lage afvoeren en ten tijde van de afvoerpiek kleiner dan plus of min 5 cm. Echter, bij afvoeren rond de 2000 m<sup>3</sup>/s zijn de berekende waterstanden tot maximaal 40 cm hoger dan de gemeten waterstanden.



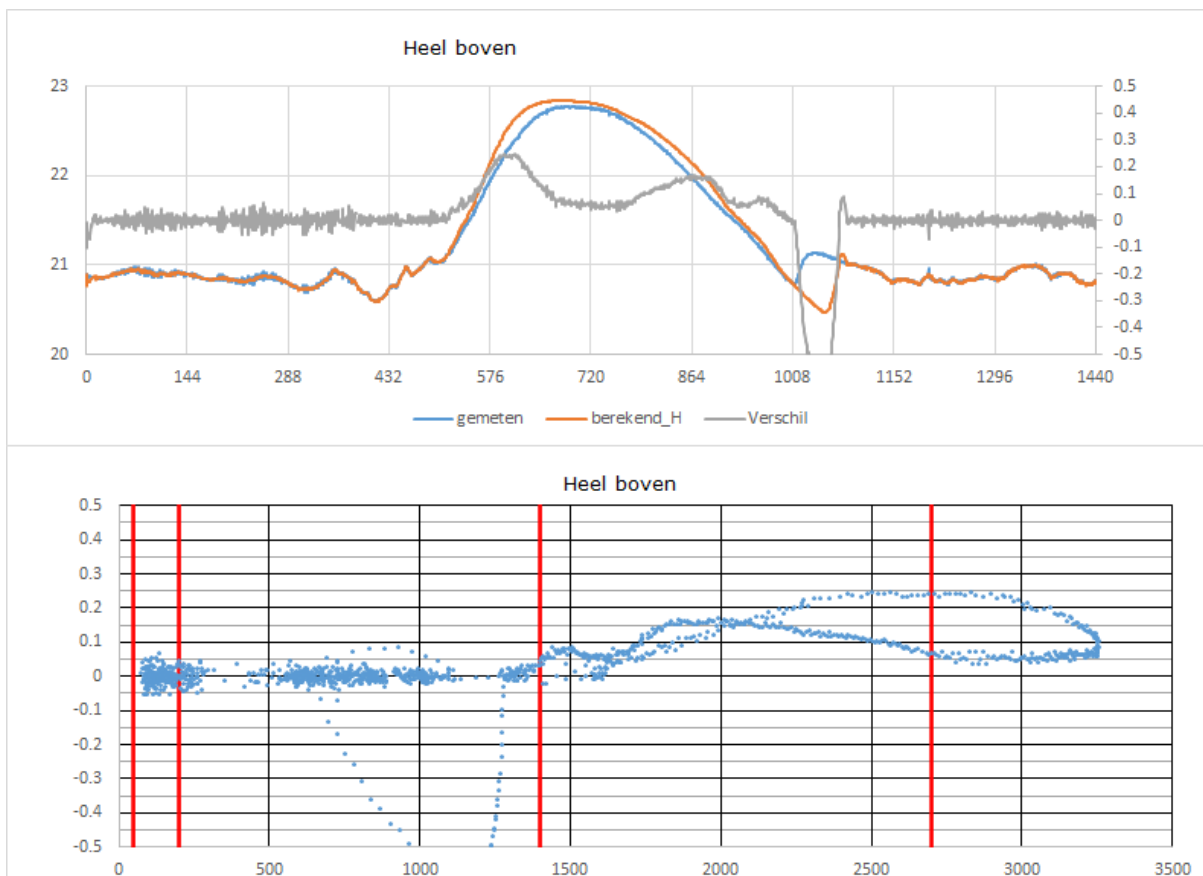
Bij Borgharen dorp zijn bij alle afvoerniveaus verschillen te zien tot maximaal plus of min 25 cm.



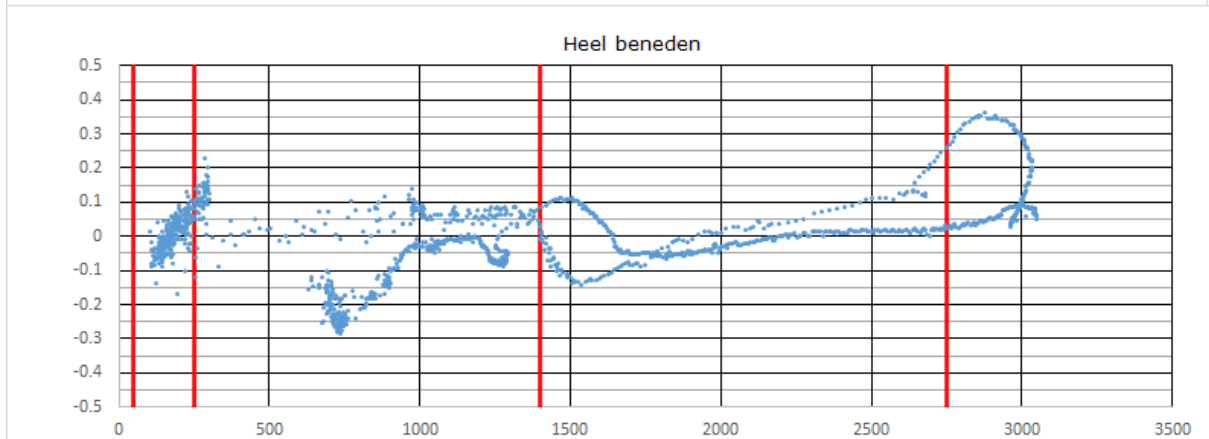
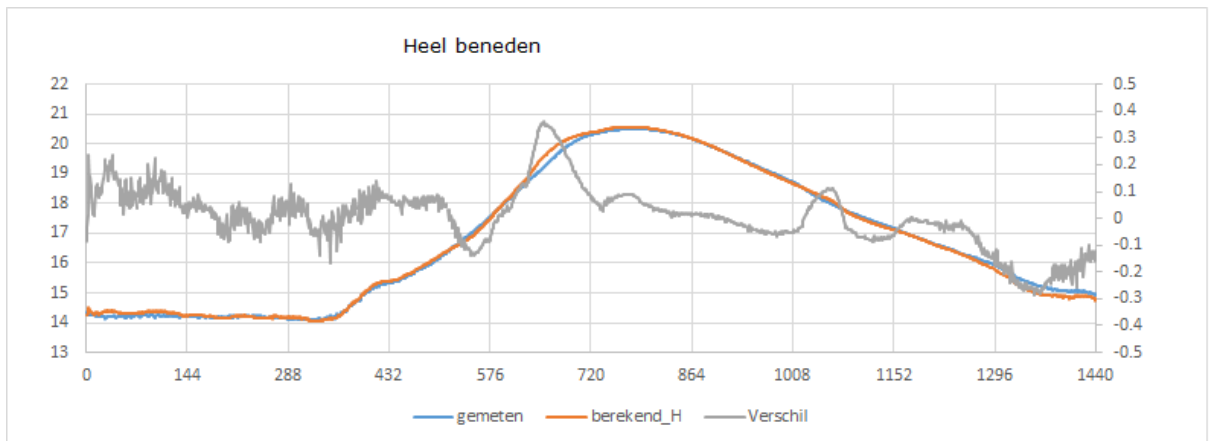
Bij Maaseik bedraagt het verschil tussen de berekende en gemeten waterstanden bij alle afvoeren maximaal plus of min 25 cm.



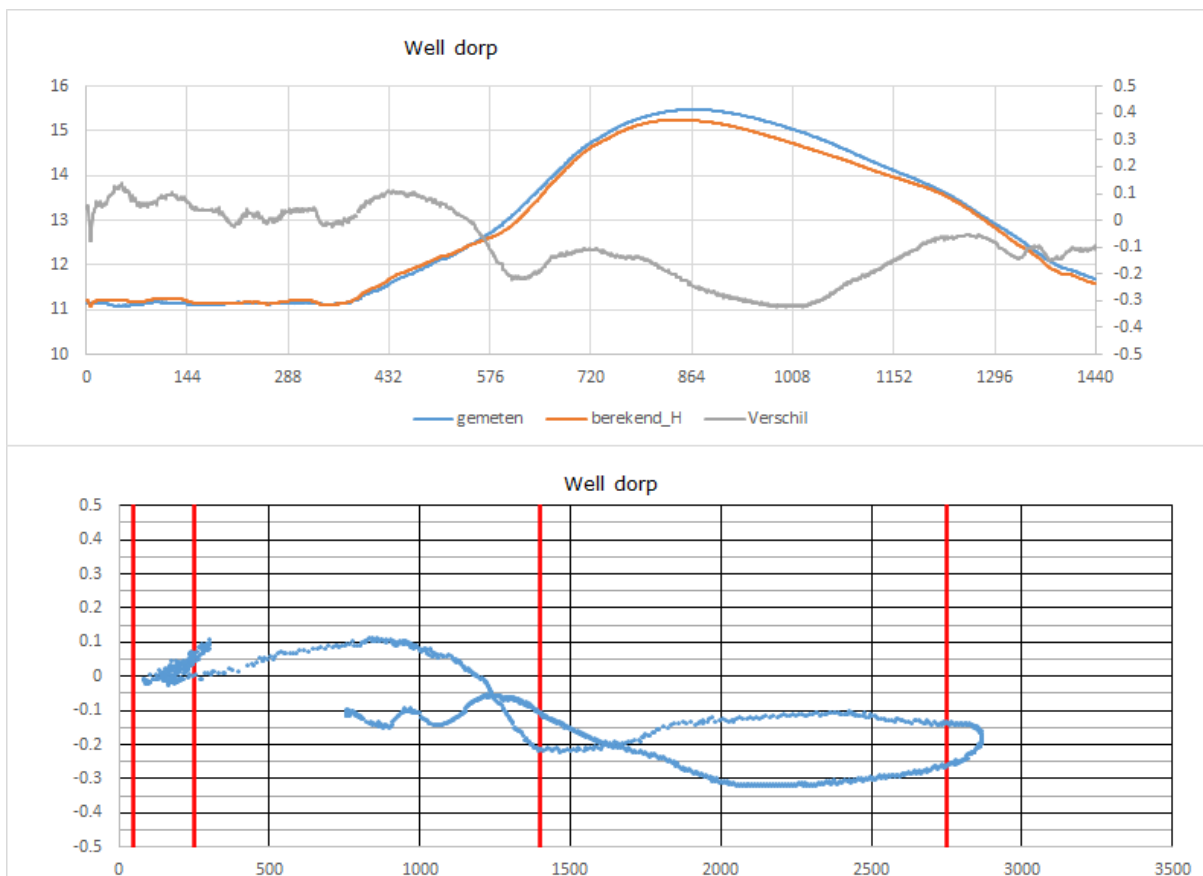
Het model lijkt de waterstanden bij Stevensweert met enkele cm te onderscatten. Alleen bij afvoeren rond de 1400 m<sup>3</sup>/s berekent het model bij stijgende afvoeren tot maximaal 20 cm te hoge afvoeren.



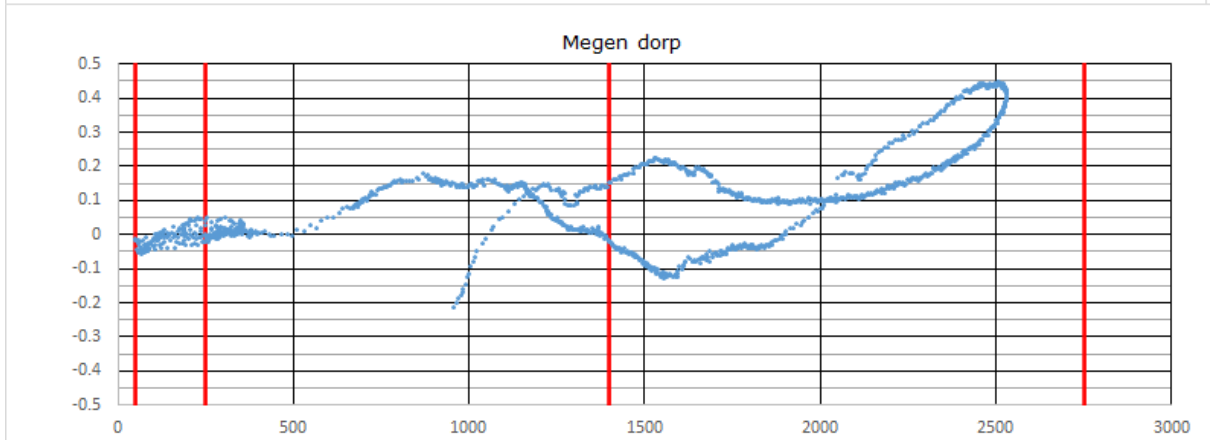
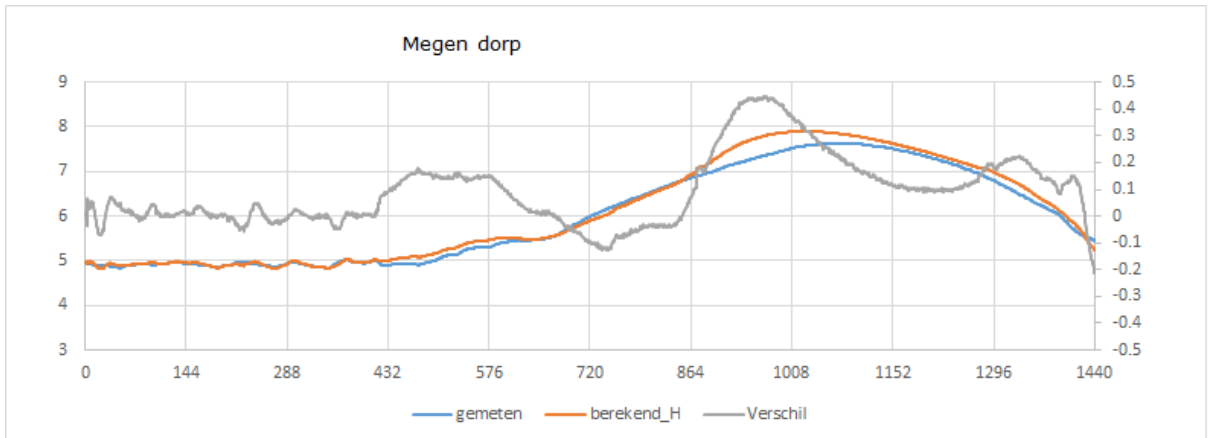
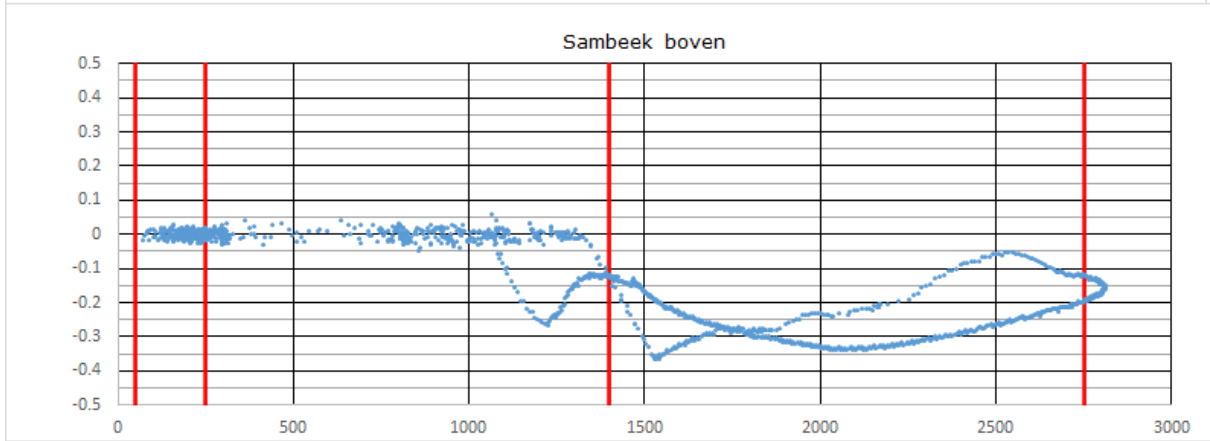
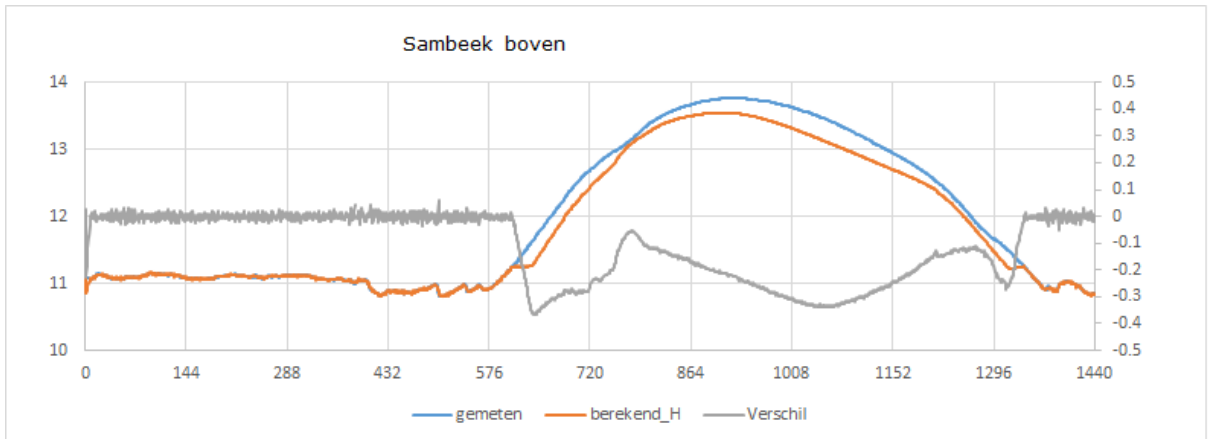
Bij Heel boven treden de grootste verschillen tussen berekende en gemodelleerde waterstanden op bij afvoeren boven de 2000 m<sup>3</sup>/s. Het model overschat de waterstand dan met gemiddeld ongeveer 15 cm. Het grote verschil rond tijdstip 1050 komt waarschijnlijk door verschil in stuwsturing.



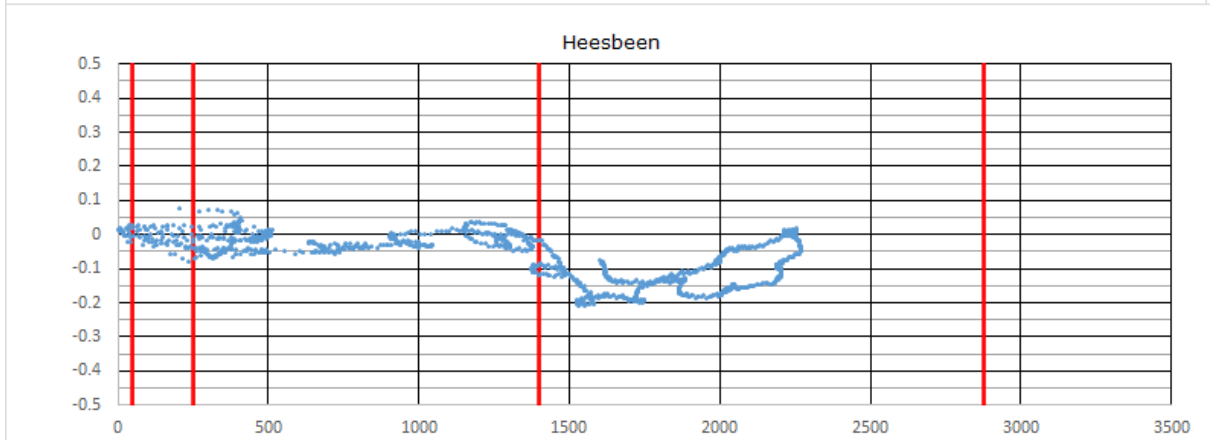
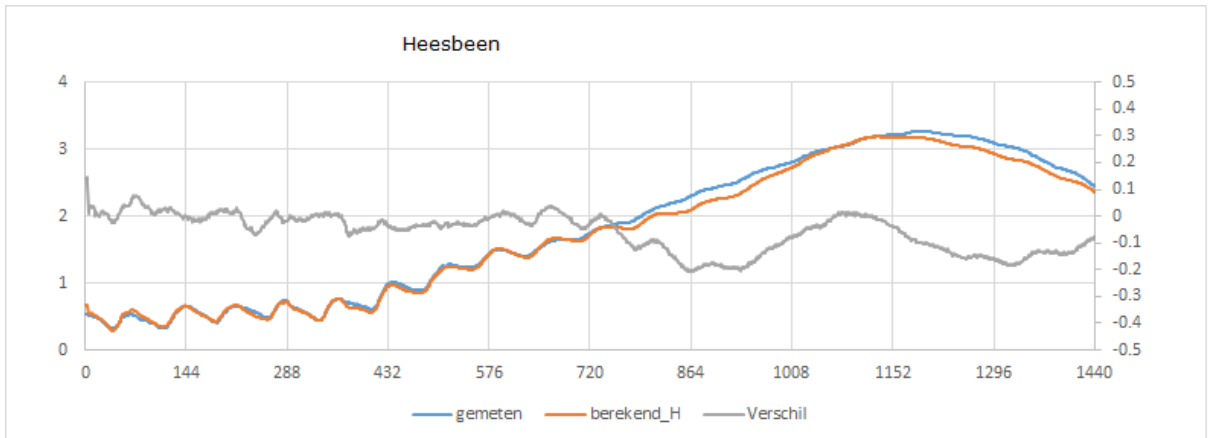
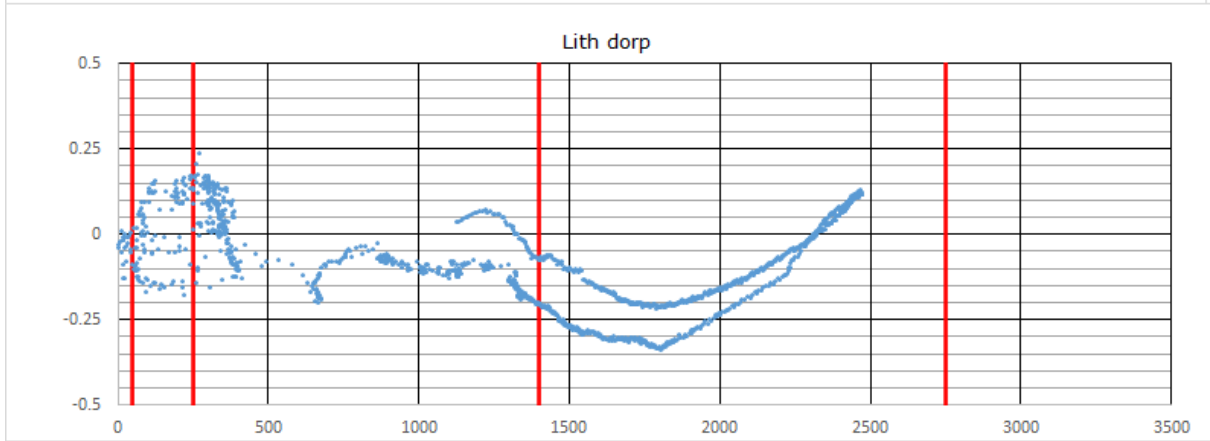
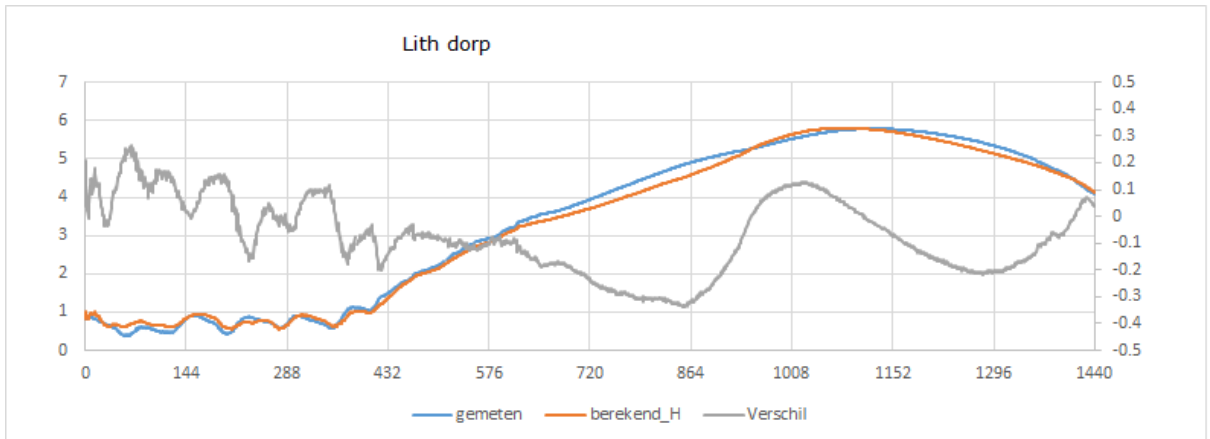
De verschillen bij Heel beneden zijn veel beperkt tot plus of min 10 cm. Echter, bij afvoeren boven de 2700 m<sup>3</sup>/s loopt het verschil op tot maximaal 0.35 m.

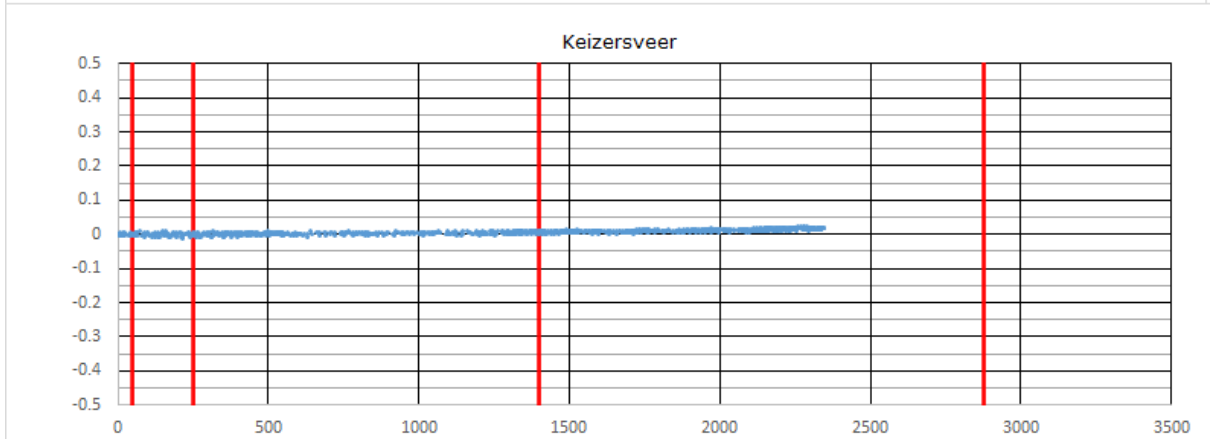
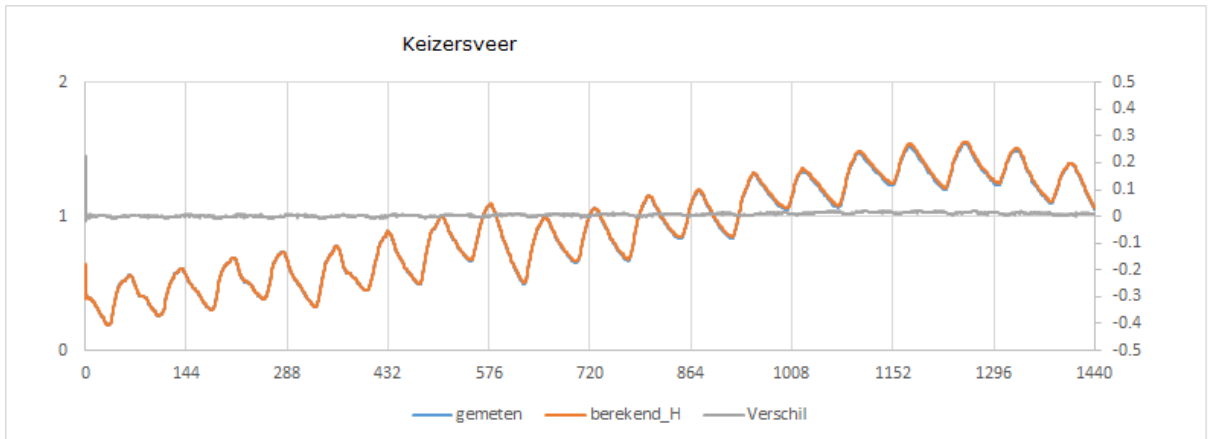


De verschillen bij Well dorp zijn bij lage afvoeren beperkt tot plus of min 10 cm. Echter, bij afvoeren boven de 1300 m<sup>3</sup>/s lijkt het model de waterstanden te onderschatten. De onderschatting bedraagt maximaal 0.3 m. Dit verschil kan niet volledig worden verklaard met het niet volledig kunnen strijken van de stuw. Ruwere (zomer)vegetatie heeft er vermoedelijk ook aan bij gedragen.

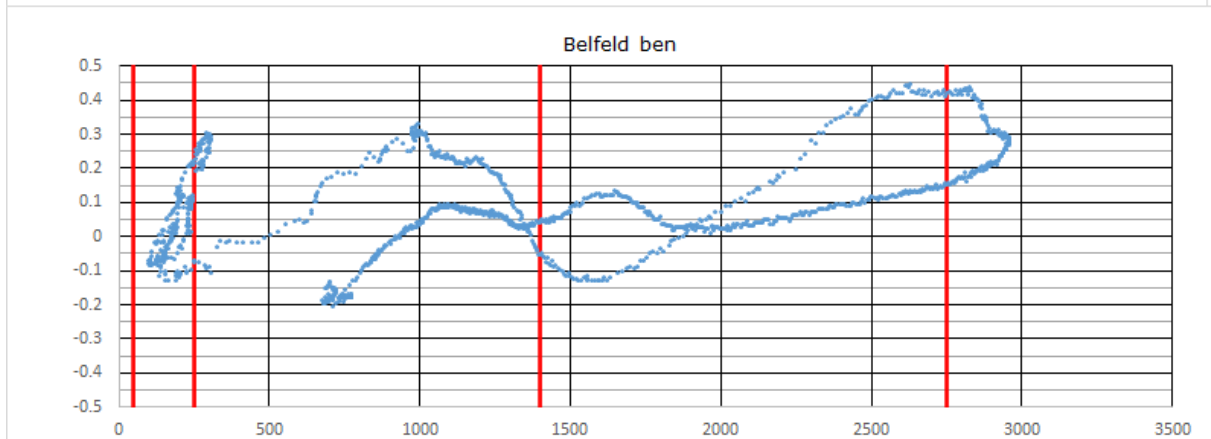
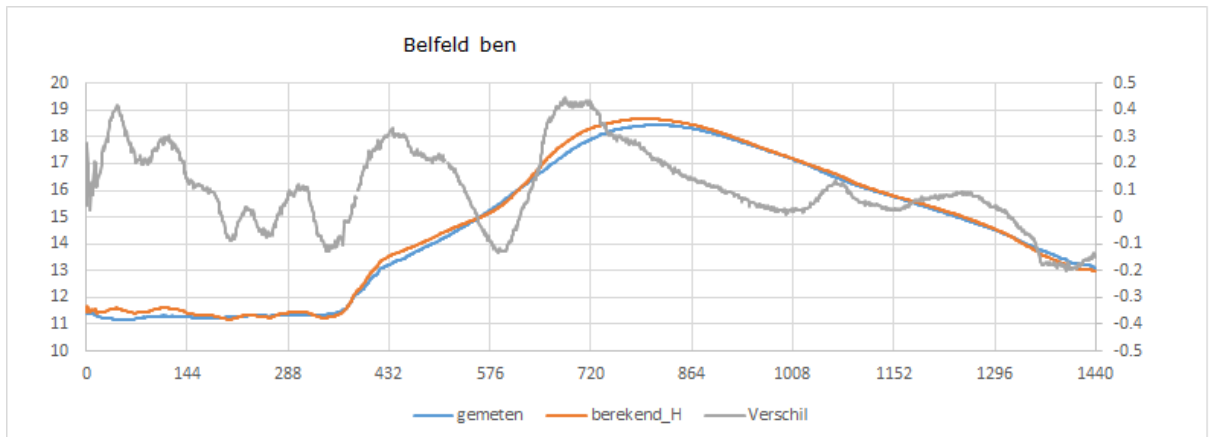
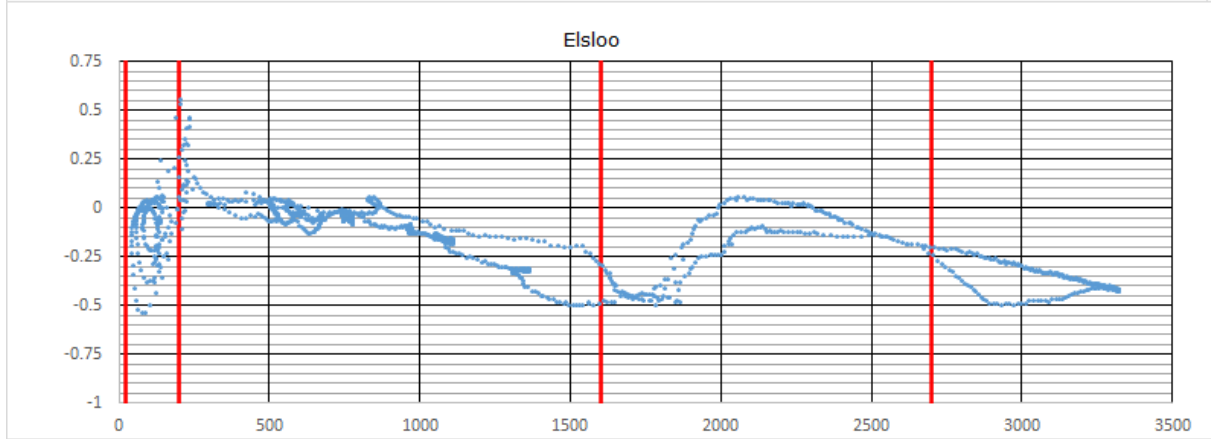
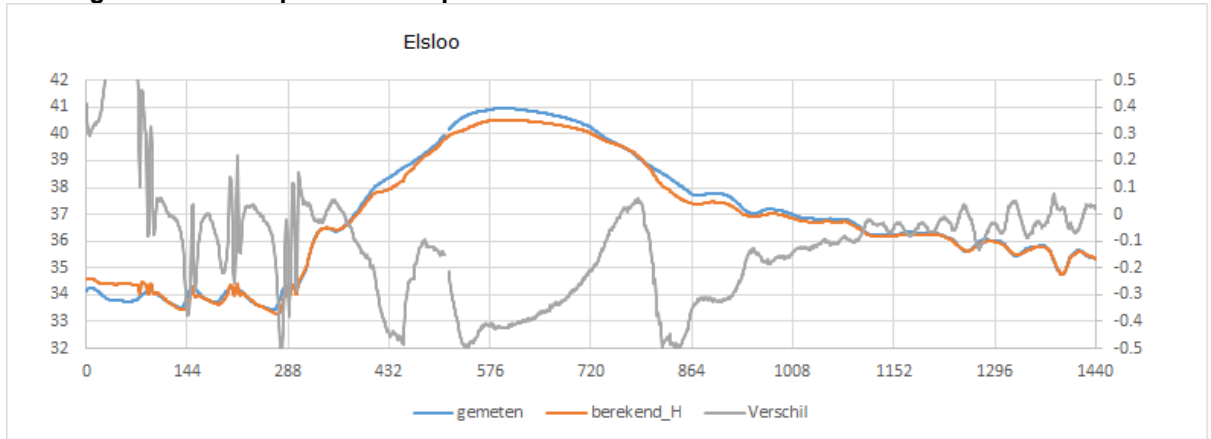


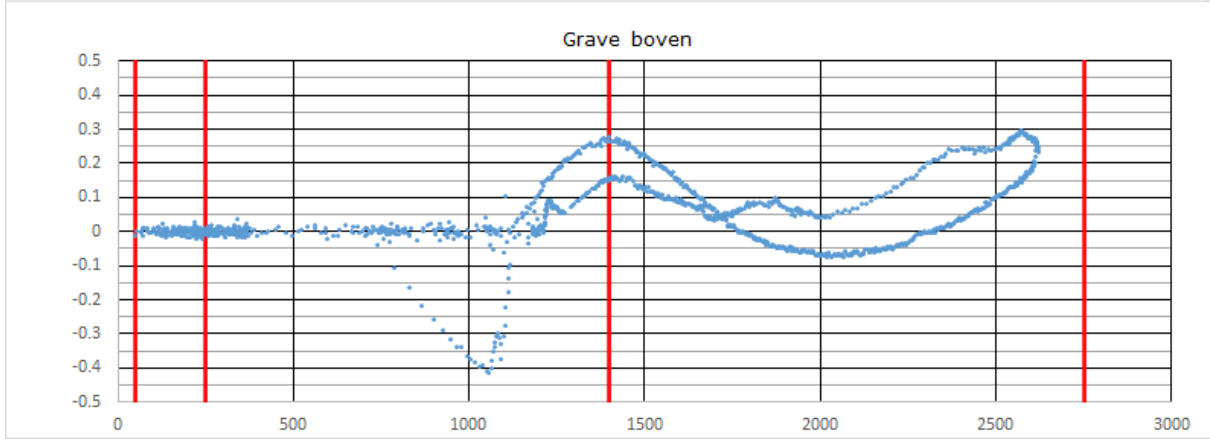
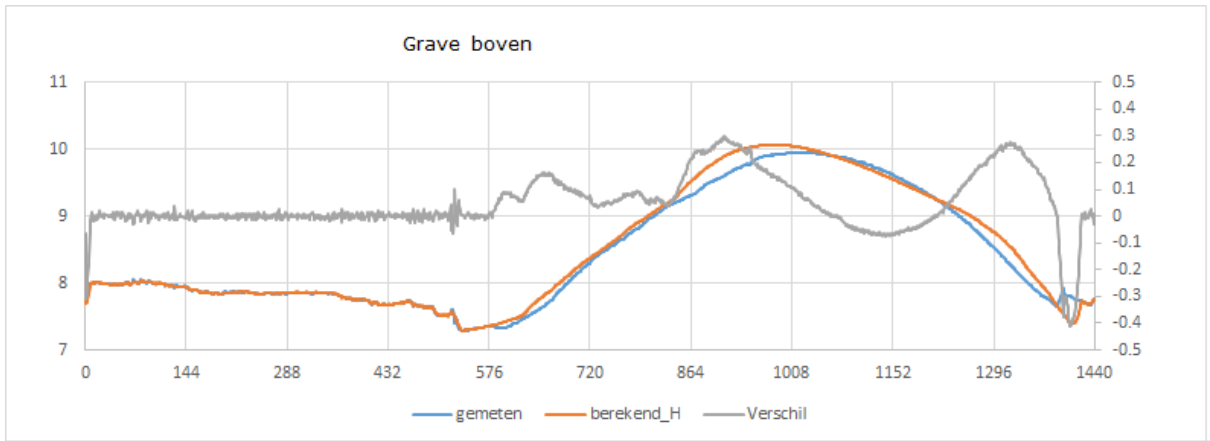
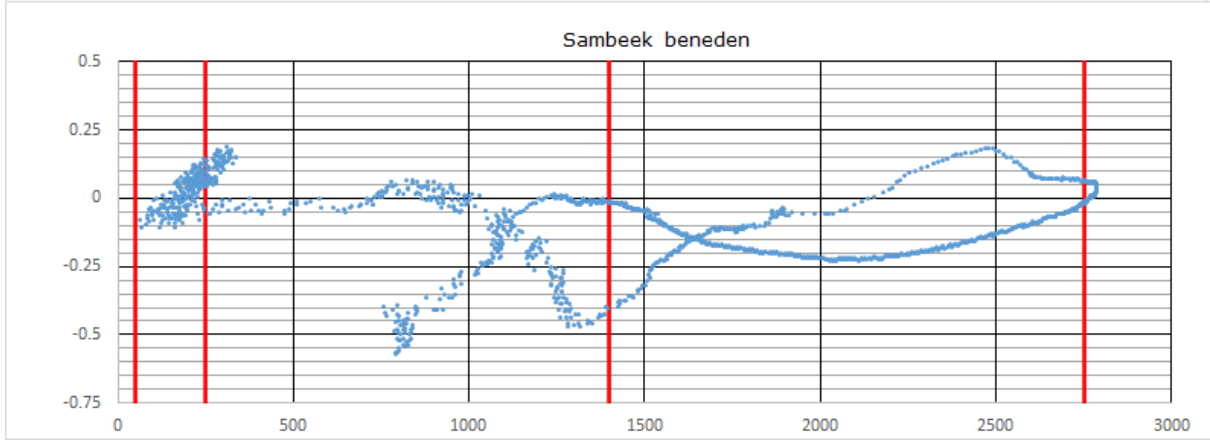
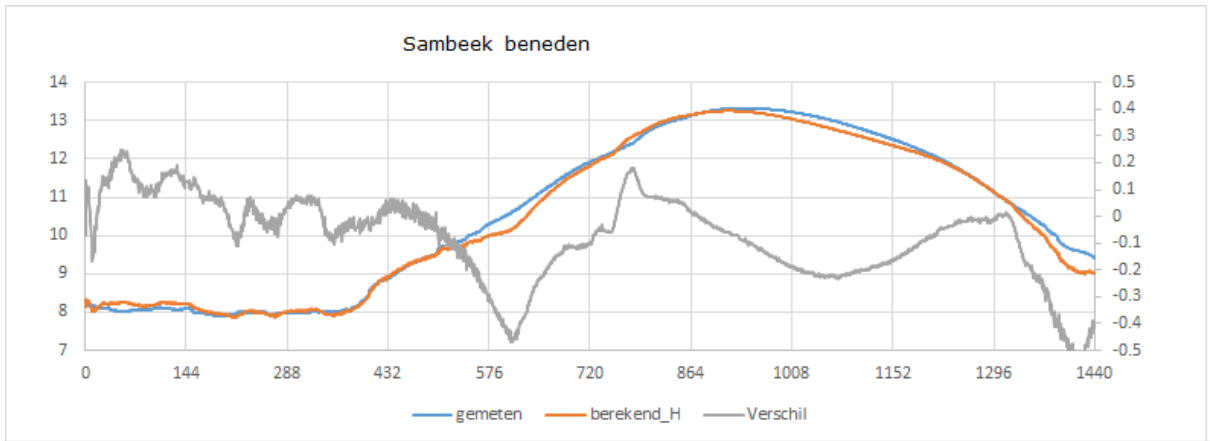


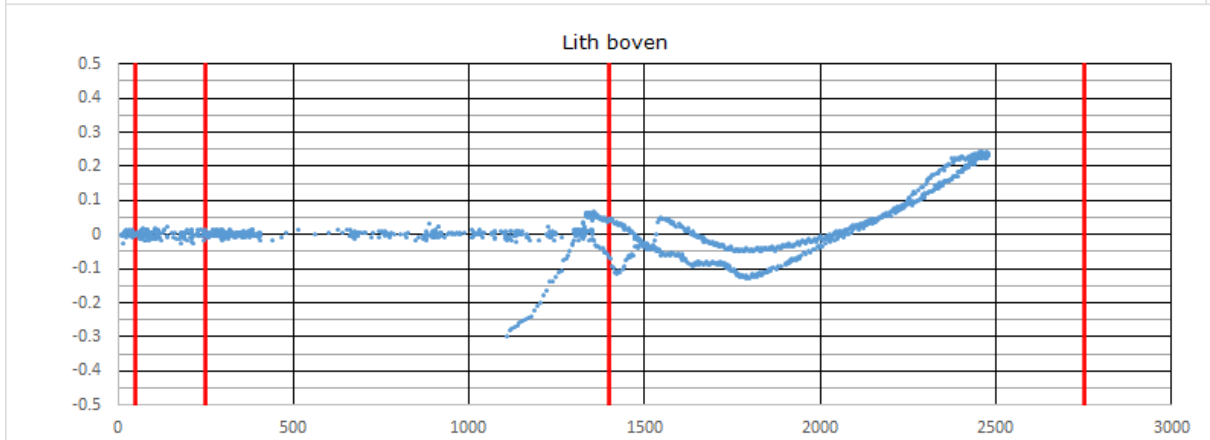
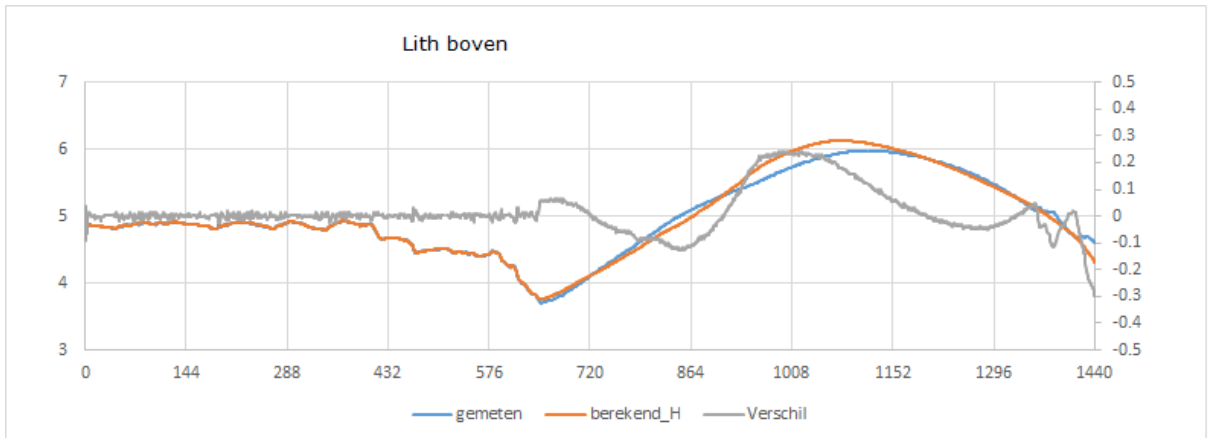
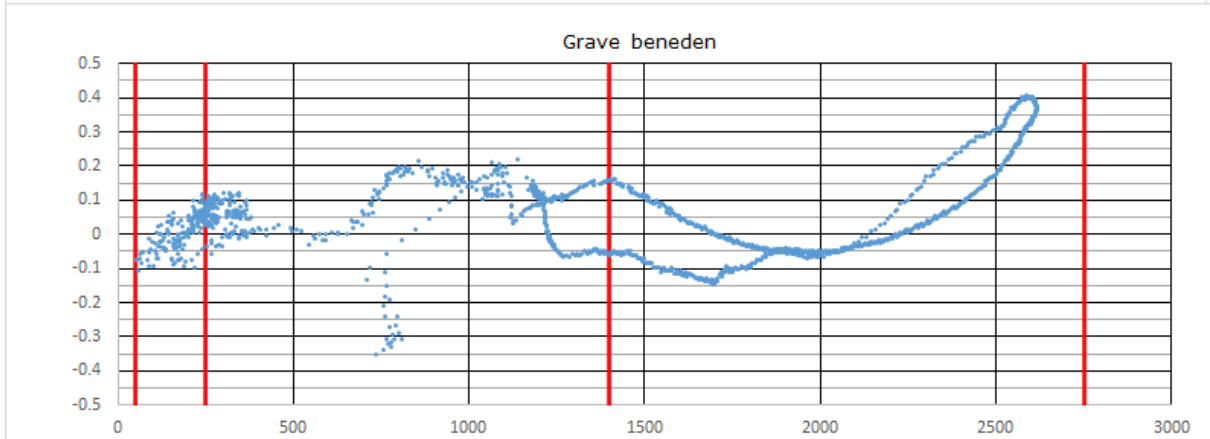
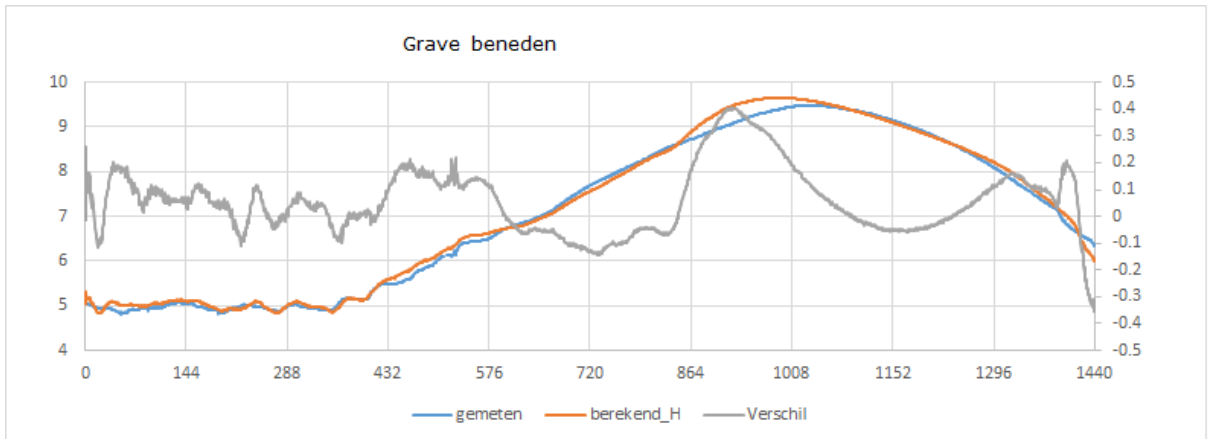




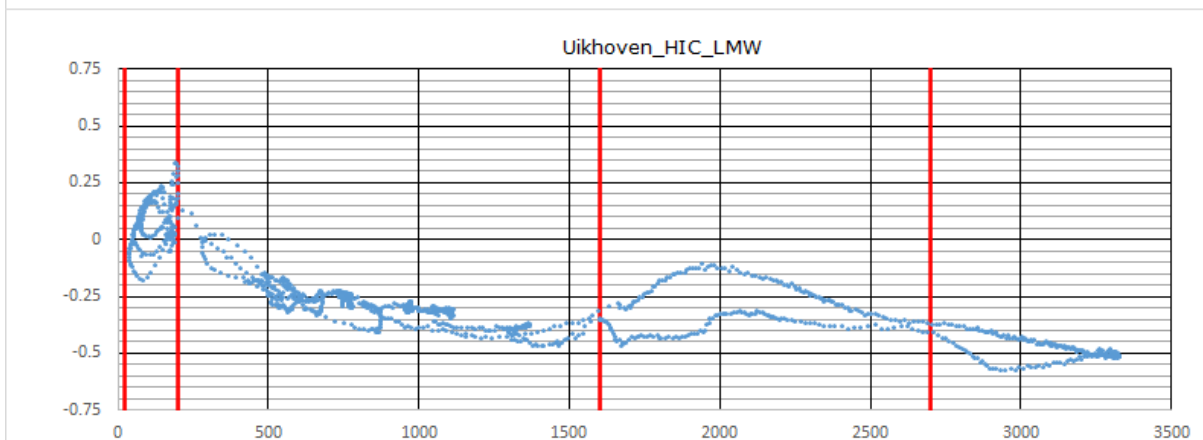
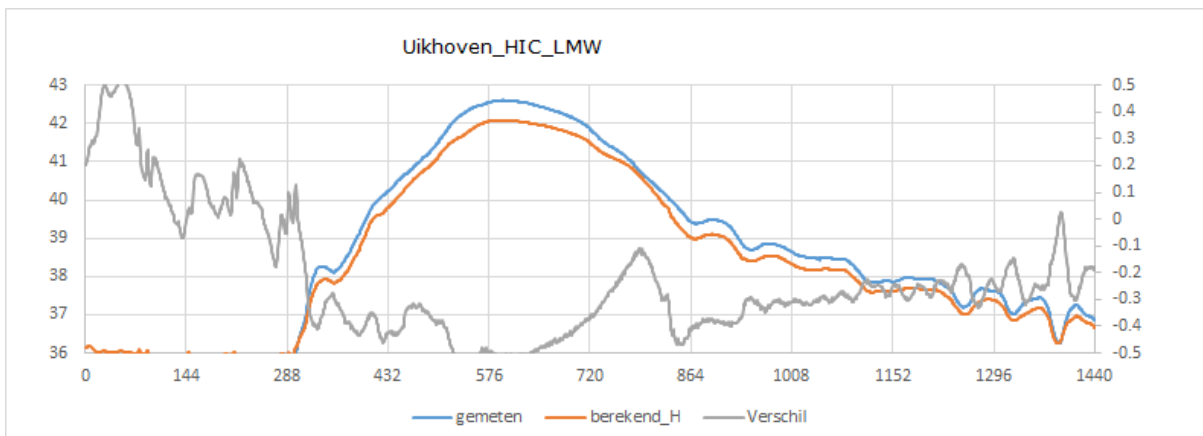
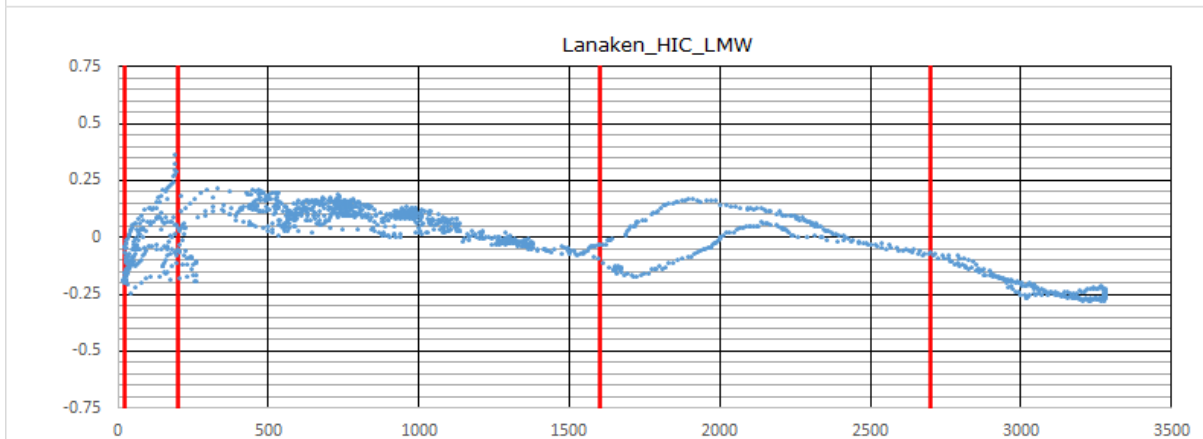
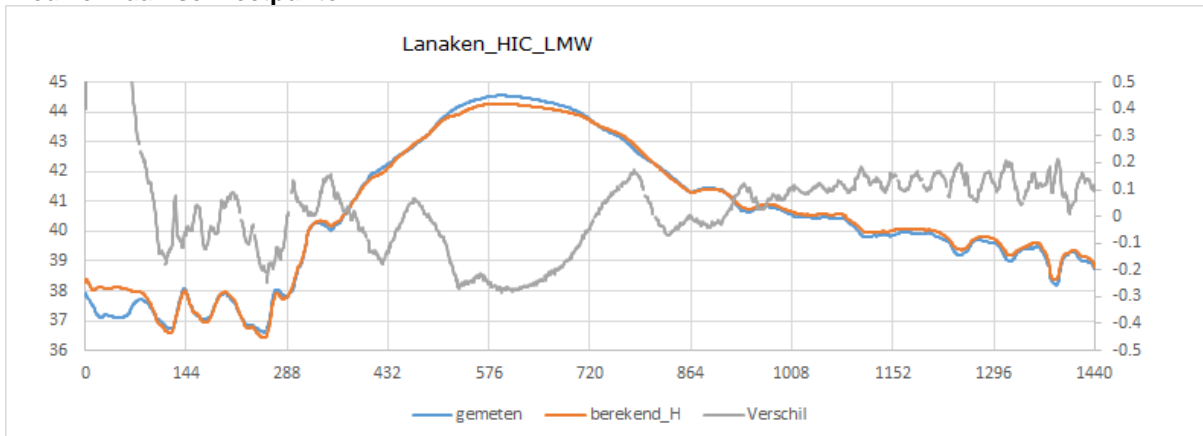
**A.2.2 na hoogwater 1995 verplaatste meetpunten**

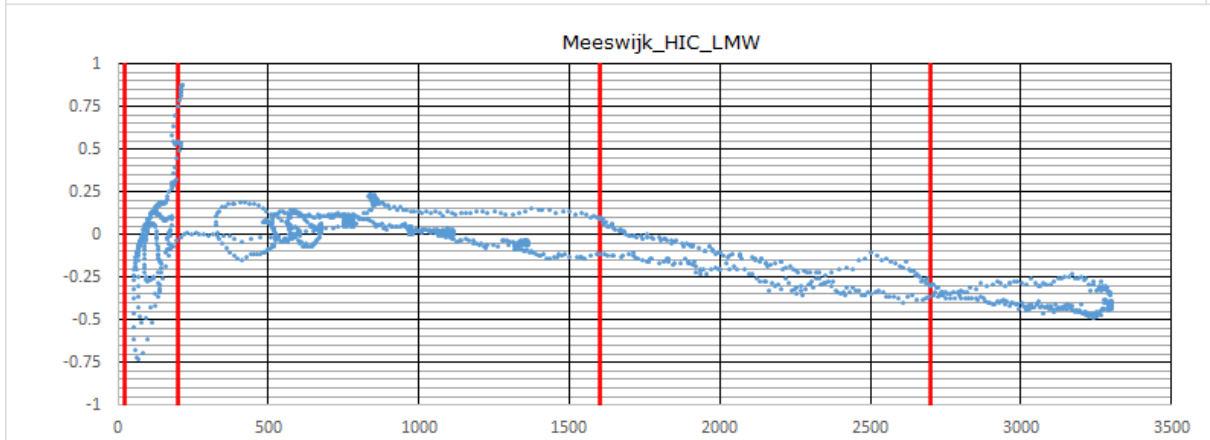
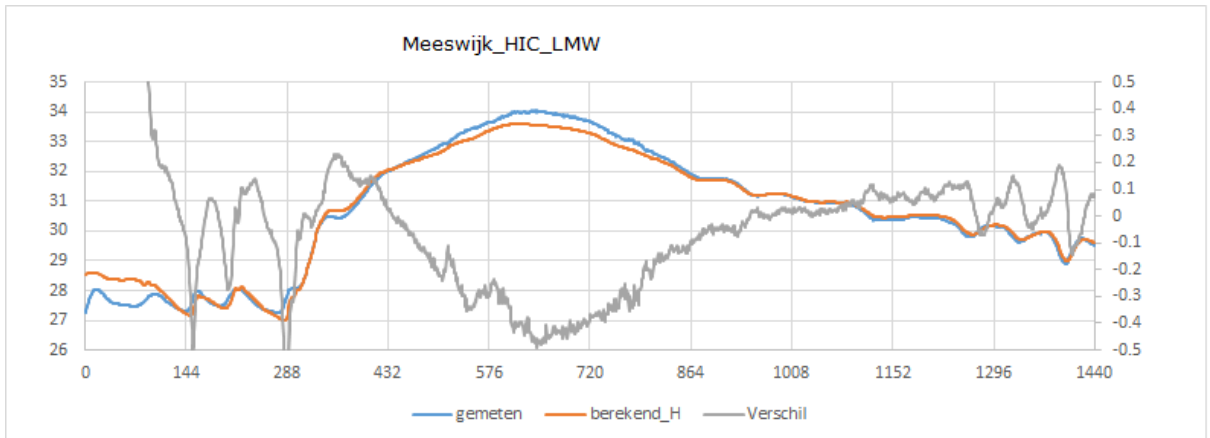
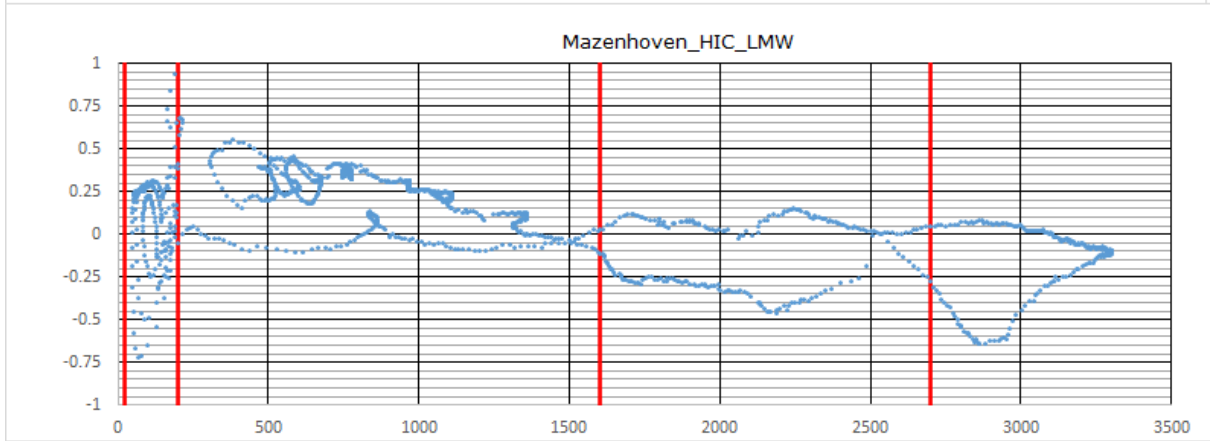
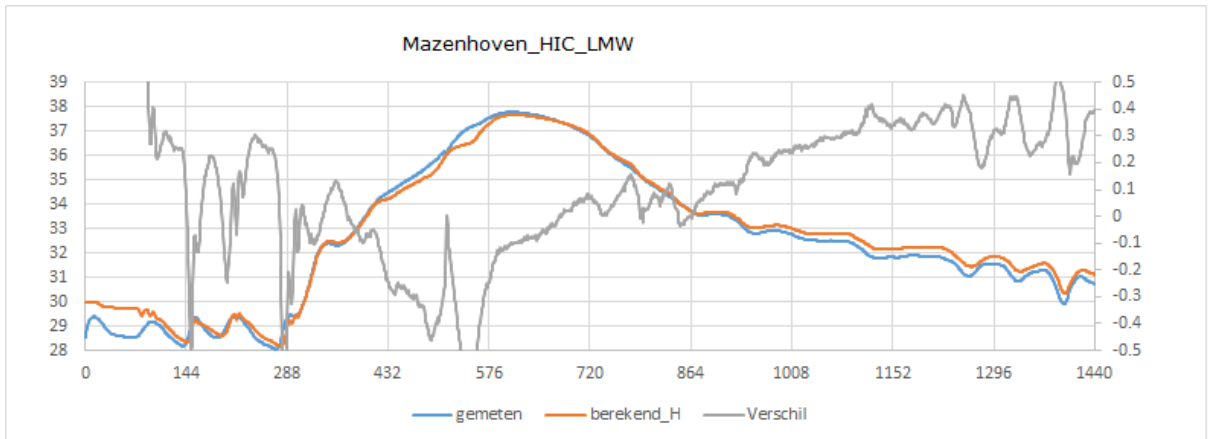


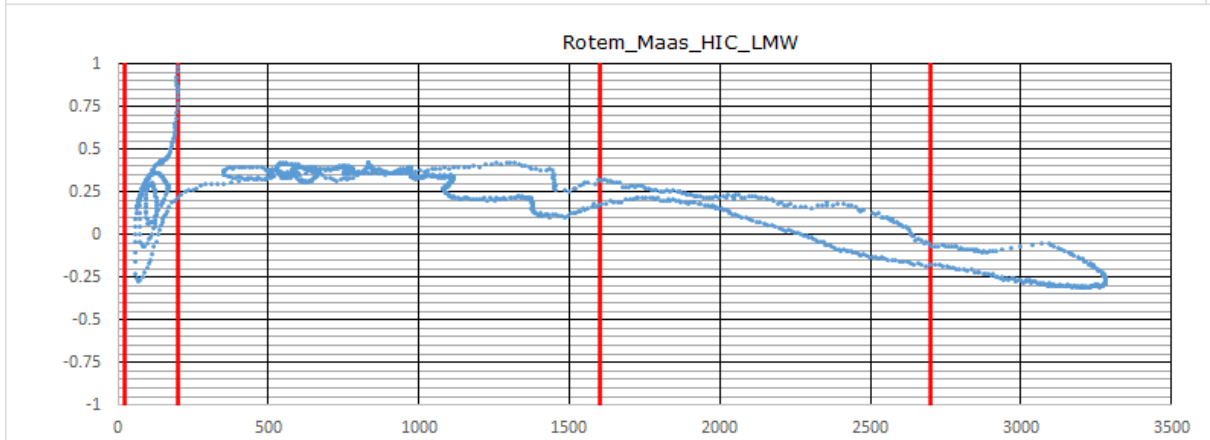
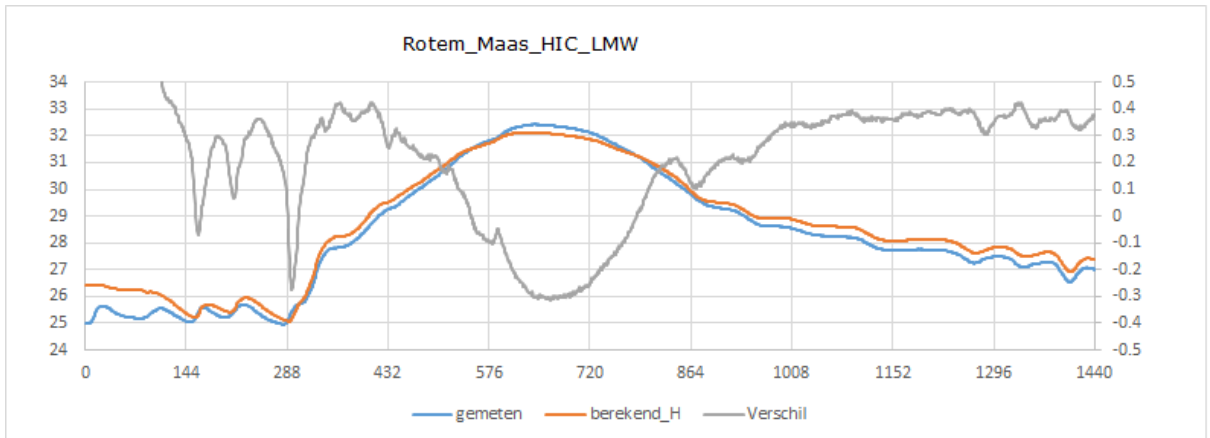
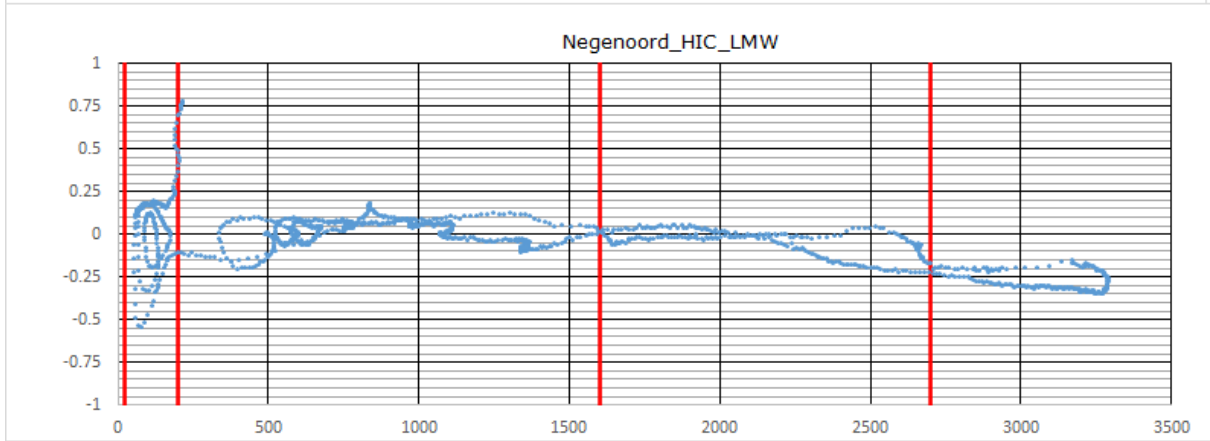
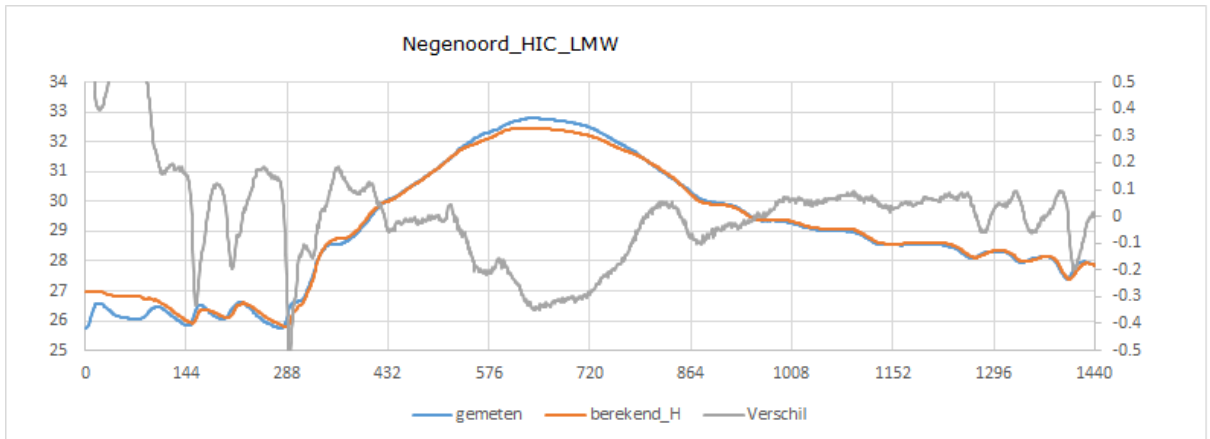




**A.2.3 Nieuwe Vlaamse meetpunten**

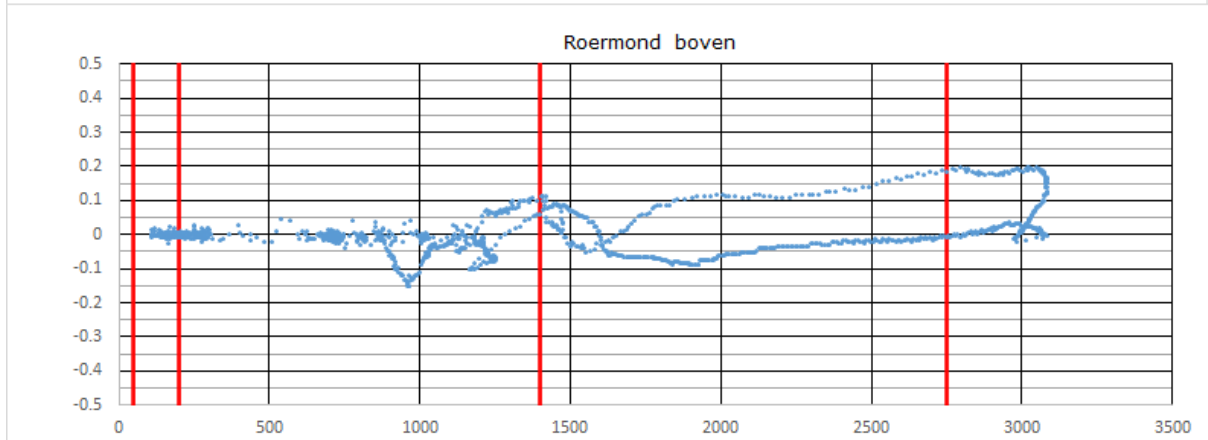
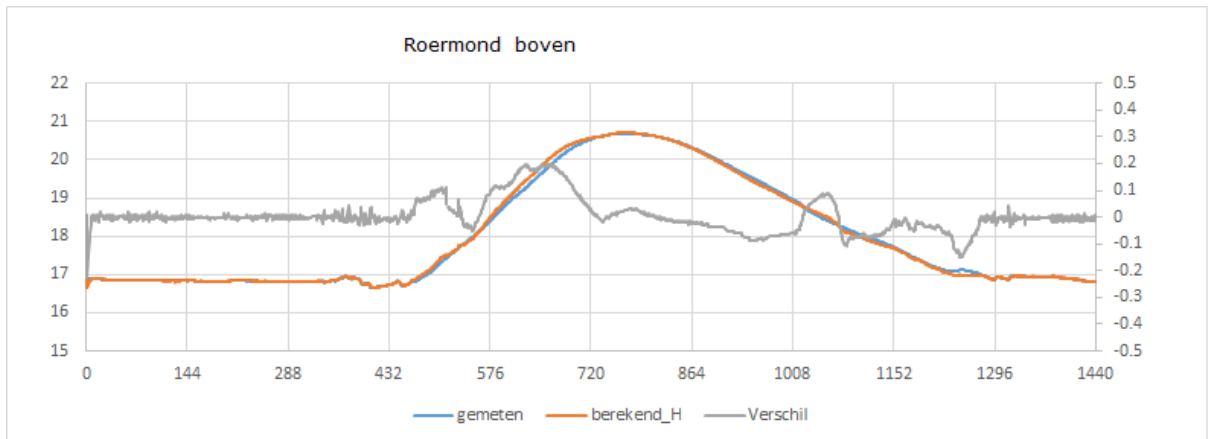
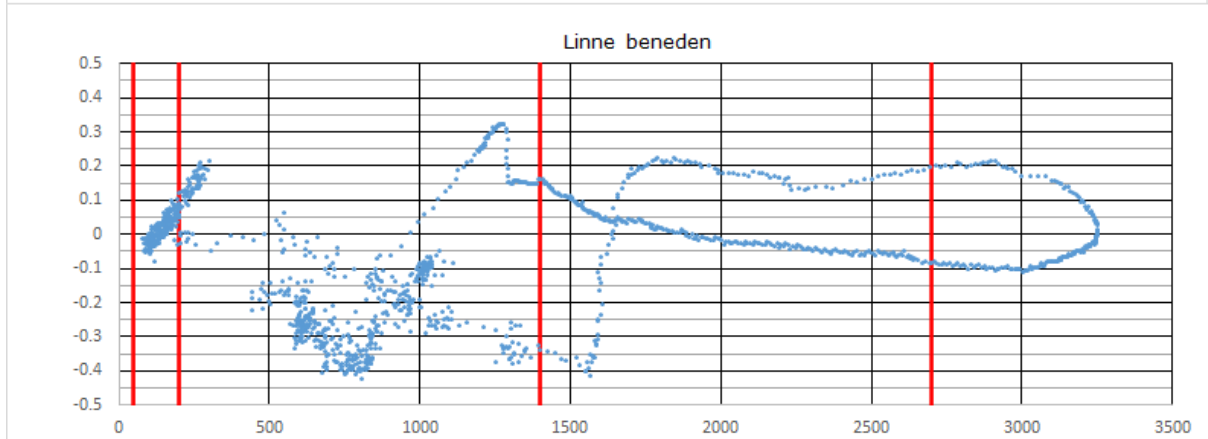
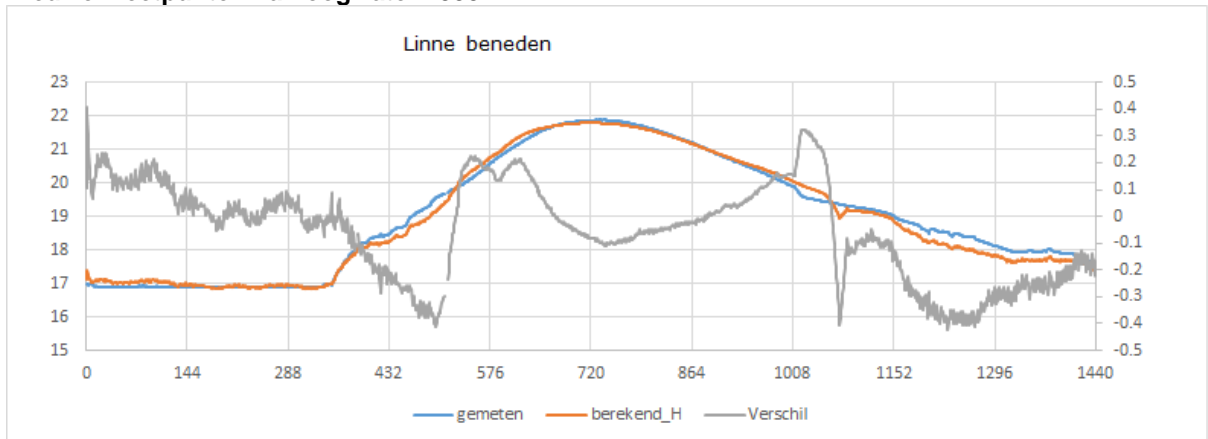


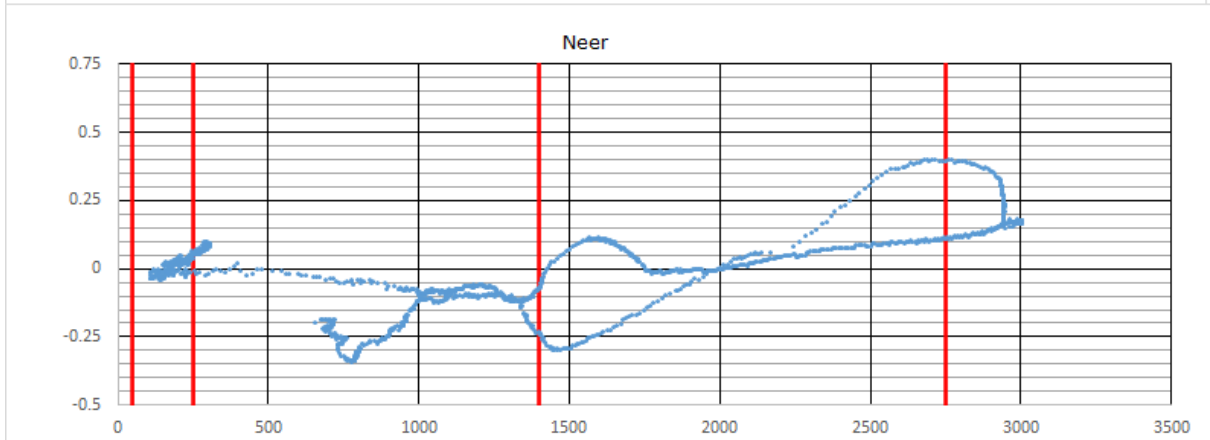
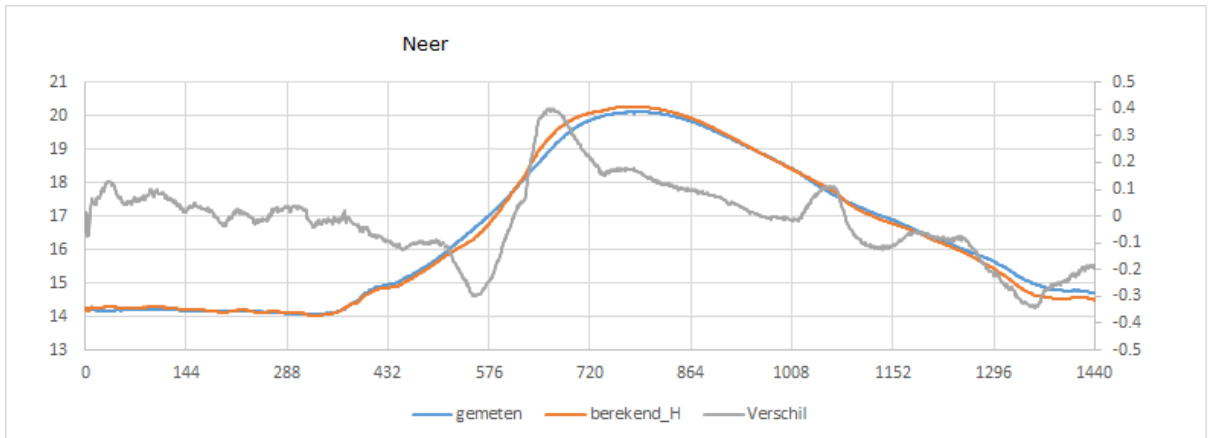
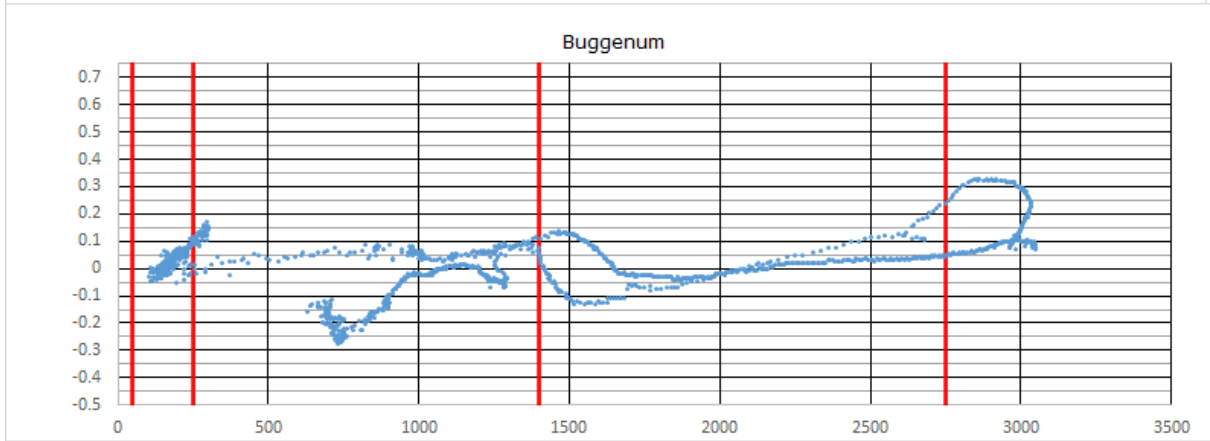
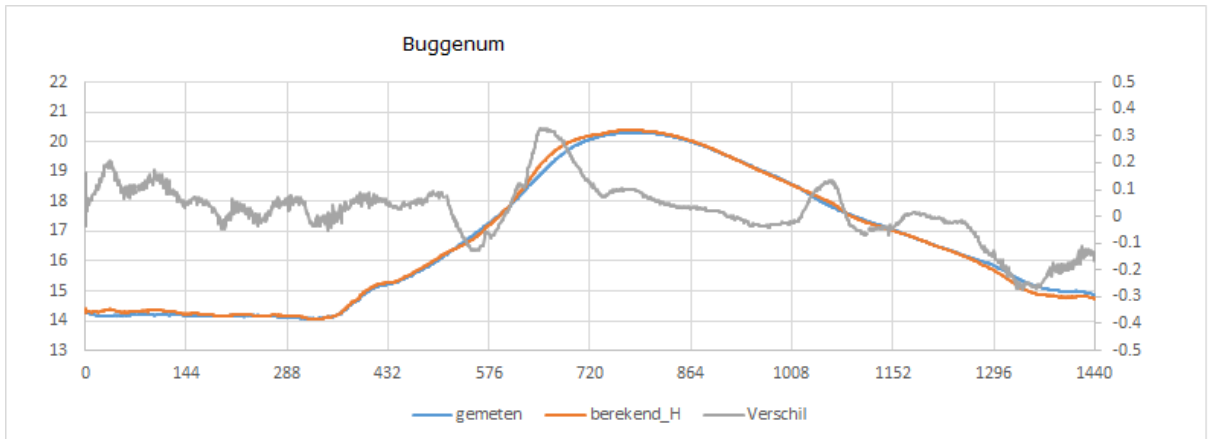


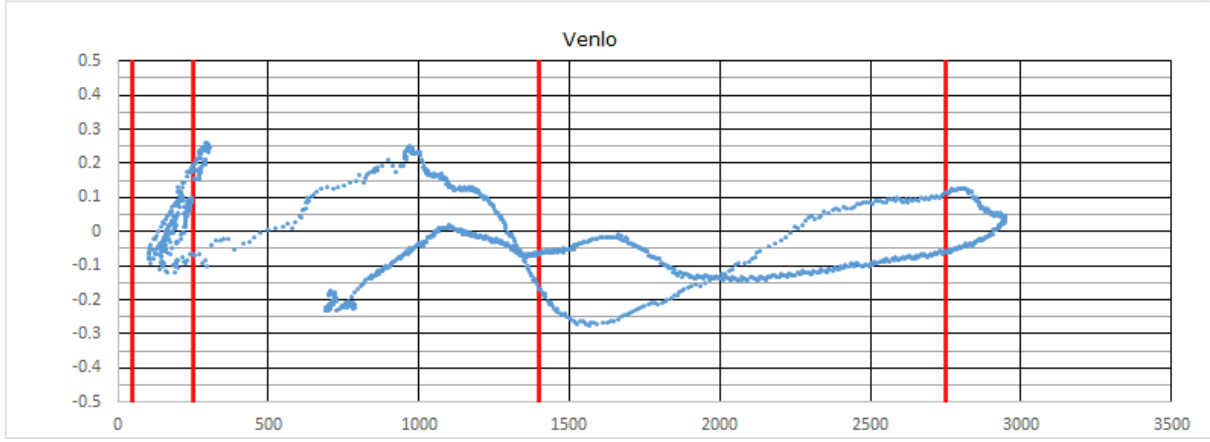
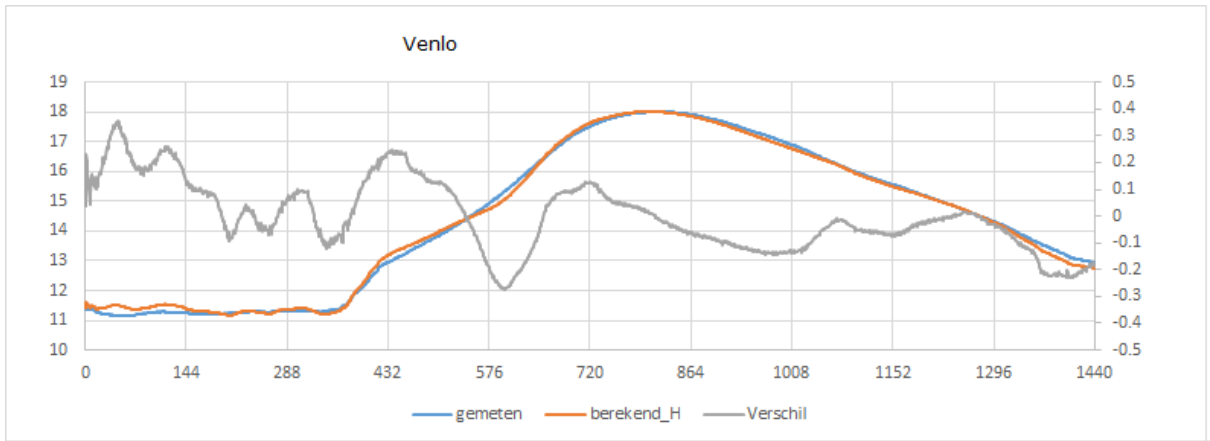
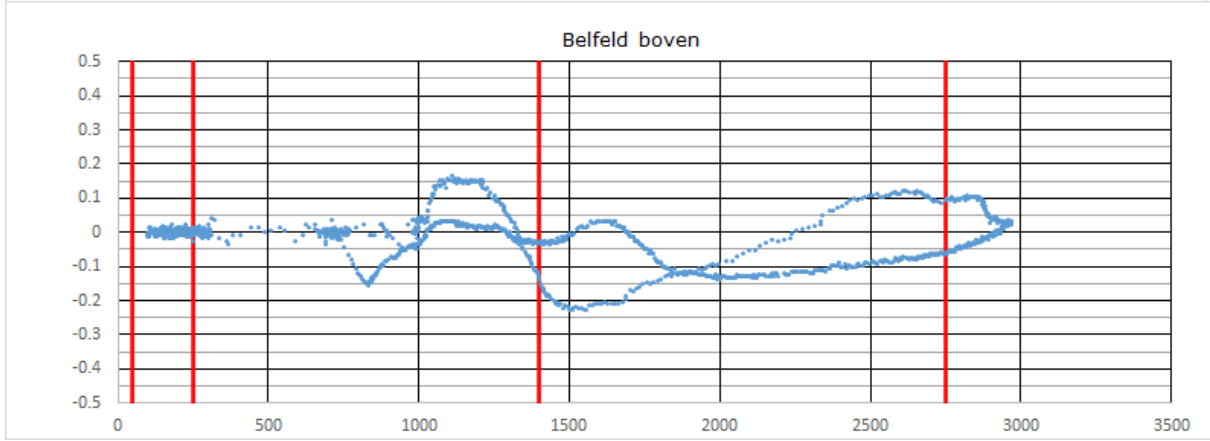
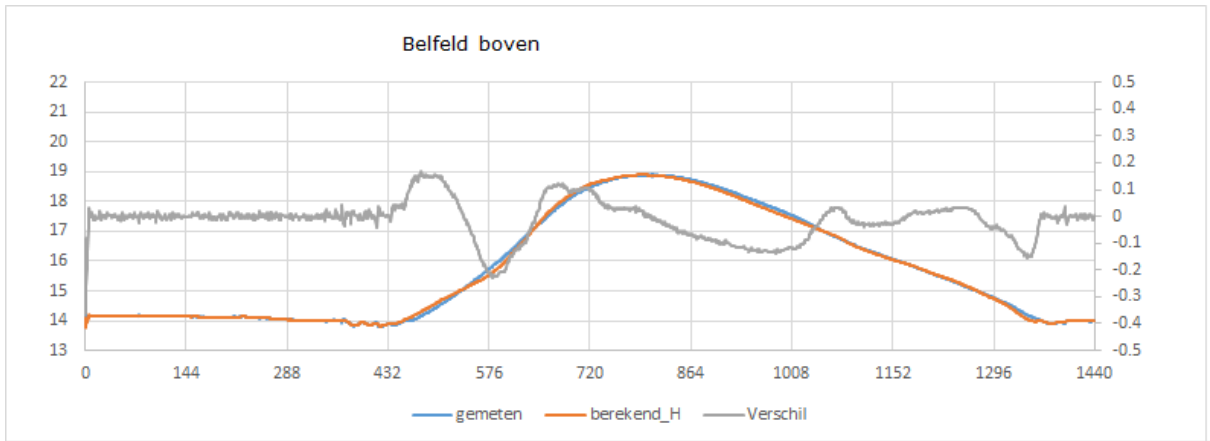


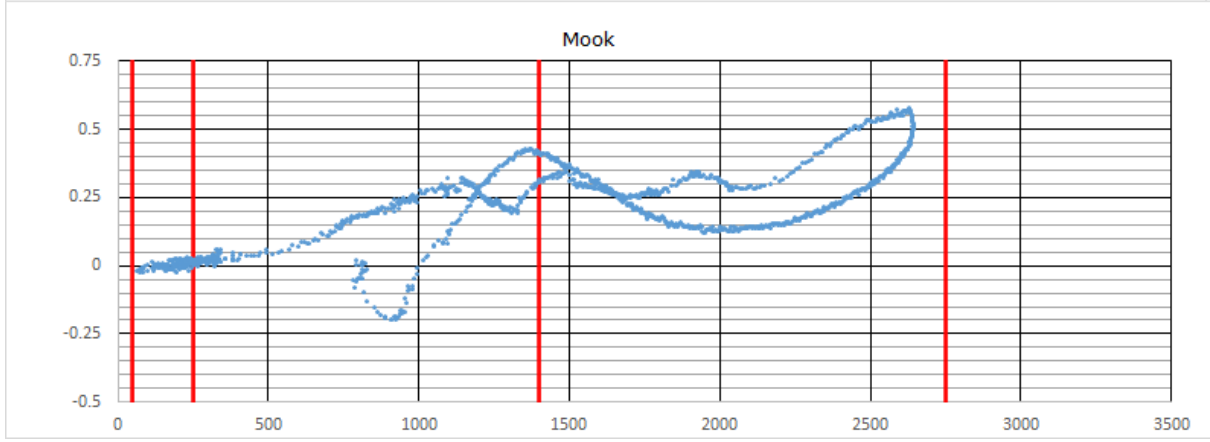
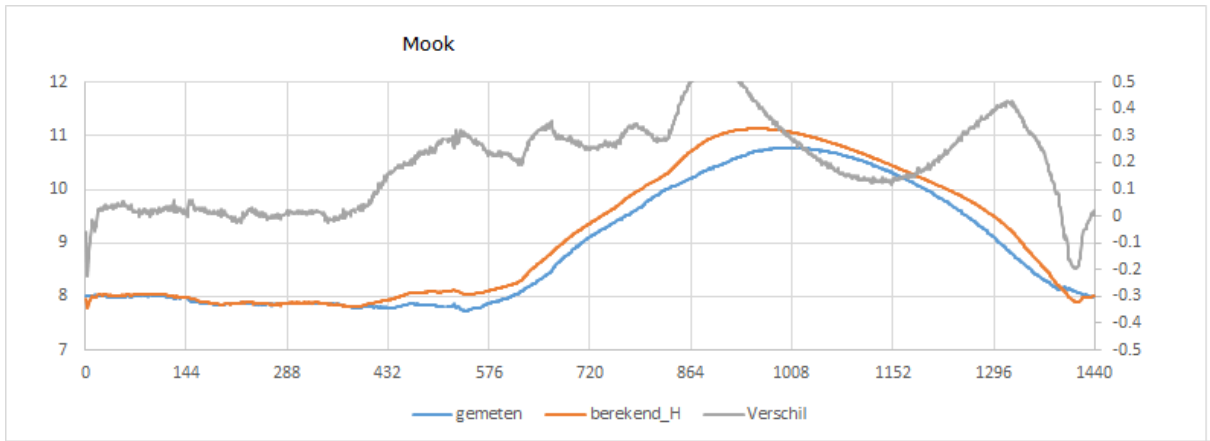
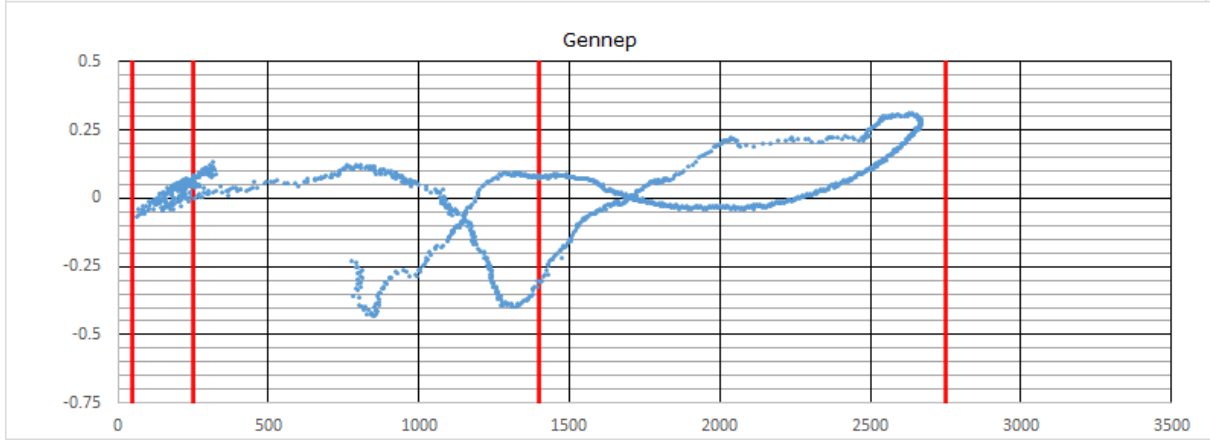
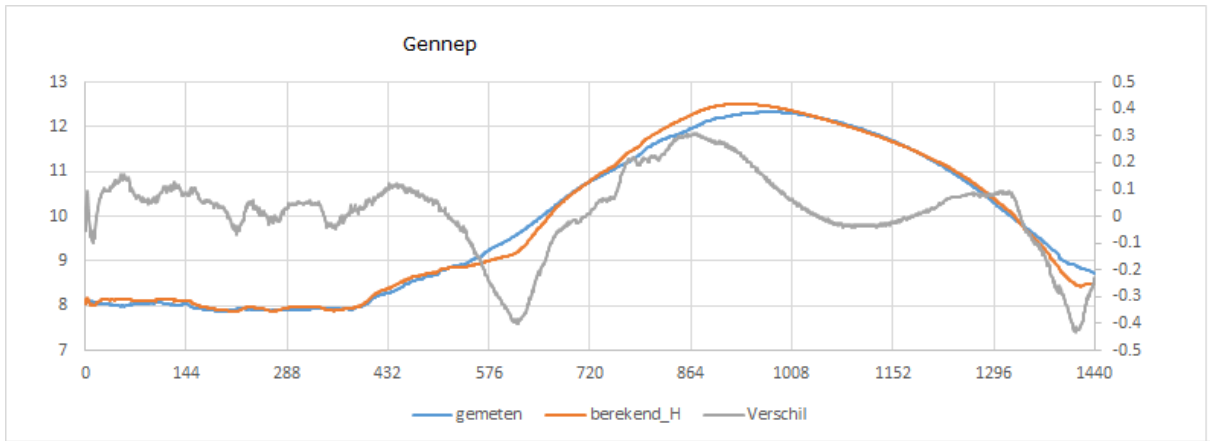


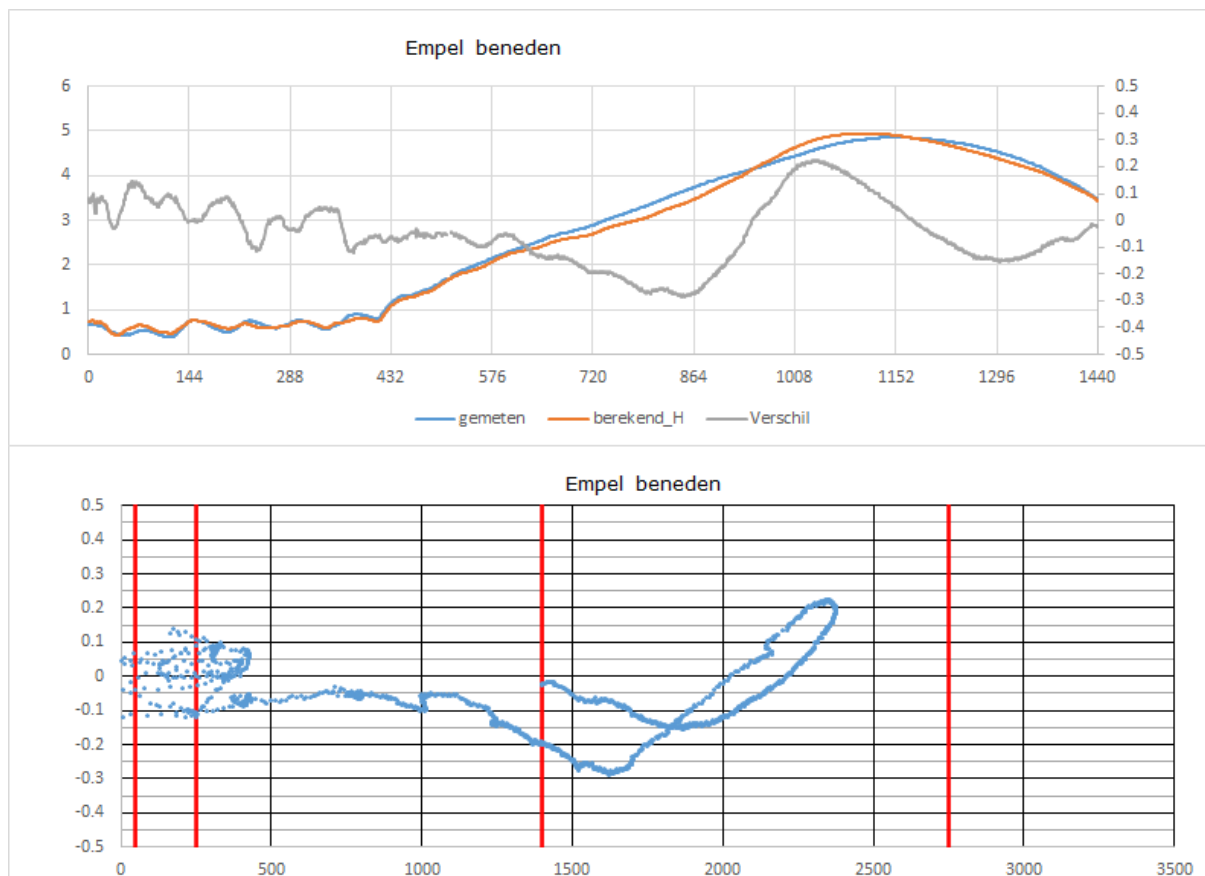
A.2.4 Nieuwe meetpunten na hoogwater 1995











## A.3 Analyse

### A.3.1 Reproductie waterstanden bij ongestoorde meetpunten

Bij Borgharen-dorp zijn de verschillen groter voor kalibratieniveau “extreem laag” en “laag”, maar dat hangt vooral samen met timing van het stuwbeheer. Nabij de kalibratieniveaus “extreem laag” en “laag” bij Eijsden-grens, St. Pieter en Borgharen-Julianakanaal blijven de verschillen in het algemeen beperkt tot ca. 0.10 m. Bij het kalibratie niveau “midden” geldt dat ook voor Eijsden en voor Borgharen-dorp. Bij het kalibratieniveau “midden” bij St. Pieter en Borgharen-Julianakanaal zijn echter belangrijk grotere afwijkingen.

Dit hangt samen met het verval over stuw Borgharen in aanloop en afloop van de afvoergolf. Bij ca. 2000 m<sup>3</sup>/s bedraagt de afwijking berekend-gemeten bij Borgharen-dorp ca. 0.15 m terwijl dat verschil bij Borgharen-Julianakanaal (750 m bovenstrooms) ca. 0.35 m bedraagt. Het berekende verval over de stuw is daarmee ca. 0.20 m hoger dan het gemeten verval. In bovenstroomse richting wordt dit doorgegeven naar St. Pieter. Bij Eijsden is hier mogelijk ook nog iets van zichtbaar, maar daar kan ook een fout in de afvoer of een systematische modelfout een rol spelen.

Bij kalibratieniveau “hoog” valt op dat de berekende waterstanden bij Eijsden St. Pieter, en Borgharen-Julianakanaal over het algemeen te hoog zijn. Bij Borgharen-dorp is de berekende waterstand vrijwel correct. In het extrapolatiegebied bij afvoeren boven kalibratieniveau “hoog” valt op dat het verschil berekend – gemeten afneemt en bij Borgharen-dorp zelfs negatief wordt (berekende waterstand 0.21 m te laag).

Tussen de kalibratieniveaus zijn incidenteel systematische verschillen zichtbaar in het afvoerafhankelijke verschil berekend minus gemeten waterstand. Bij Eijsden-grens bij ca. 600 m<sup>3</sup>/s, en bij 2000 m<sup>3</sup>/s. Bij St. Pieter bij 2000 m<sup>3</sup>/s. Bij Borgharen-dorp bij 750 en 1750 m<sup>3</sup>/s.

Bij Stevensweert, Heel-boven en Heel-beneden zijn de verschillen berekend-minus gemeten waterstand zeer beperkt voor kalibratieniveau “extreem laag”, “laag” en “midden”. Bij kalibratieniveau “hoog” valt op dat de grootste afwijking optreden in het golffront bij Heel-beneden. Dit wijst op mogelijke fouten in de bergingsbeschrijving bij dit spitse hoogwater. De afwijking op de piek bedraagt bij deze drie meetpunten minder dan 0.10 m. Dat mag zonder meer goed worden genoemd.

Meetpunt Maaseik is bij kalibratieniveau “hoog” gebruikt. De kalibratieniveaus “extreem laag”, “laag” en “midden” voldoen bij dit meetpunt. Boven kalibratieniveau “midden” blijft de berekende waterstand vanaf een afvoer van ca. 2200 m<sup>3</sup>/s achter bij de gemeten waterstand. Op kalibratieniveau “hoog” is de berekende waterstand ca. 0.15 m lager dan de gemeten waterstand. Op de piek is de berekende waterstand 0.28 m lager dan de gemeten waterstand.

Als mogelijke oorzaken kunnen aangewezen worden:

- Verlaagde afvoer via oude Maas in vergelijk met hoogwater 1993 en 1995;
- Verruwd winterbed rechteroever direct benedenstrooms van het meetpunt op de ‘Rug van Roosteren’.

Bij Well-dorp en Sambeek-boven zijn de verschillen berekend-minus gemeten waterstand zeer beperkt voor kalibratieniveau “extreem laag” en “laag” maar nemen deze verschillen bij kalibratieniveau “midden” beduidend toe. Voor Well-dorp blijft het verschil in het golffront beperkt tot 0.10 m maar na passage van de piek neemt het verschil toe tot ca. 0.30 m. Bij Sambeek-boven is een vergelijkbaar patroon zichtbaar, maar lijken de verschillen bij toenemende afvoer iets af te nemen. De berekende afwijking op de piek bedraagt bij deze meetpunten ca. 0.23 m (te laag).

Om een gevoel te krijgen voor de verschillen bij Well-dorp zijn met het WAQUA-model drie mogelijke oorzaken onderzocht:

- 1 Het niet geheel kunnen strijken van stuw Sambeek
- 2 Het niet goed meestromen van het Heukelomse beekdal als gevoel van hier aanwezige mais
- 3 Een hogere ruwheid in het natuurgebied direct benedenstrooms van het meetpunt

Alle drie de oorzaken bij elkaar hebben een waterstandsverhogend effect, maar dit bedraagt ter plekke van meetpunt Well-dorp niet meer dan in totaal 5 á 10 cm. Dit betekent dat bij meetpunt Well-dorp nog altijd sprake is van een niet verklaarde afwijking van 13 tot 18 cm.

Bij Megen, Lith-dorp en Heesbeen zijn de verschillen berekend-minus gemeten waterstand zeer beperkt voor kalibratieniveaus “extreem laag”, “laag” en “midden” maar nemen deze verschillen bij kalibratieniveau “hoog” beduidend toe. Over het algemeen wordt de piek eerder en hoger berekend dan dat blijkt uit de metingen. Opvallend is verder dat boven het kalibratieniveau “midden” de verschillen direct toenemen. Bij Megen vanaf ca. 1750 m<sup>3</sup>/s, Bij Lith-dorp en Heesbeen vanaf 1400 m<sup>3</sup>/s.

De berekende afwijking op de piek bedraagt bij Megen ca. 0.27 m te hoog. Bij Lith-dorp en Heesbeen bedraagt de afwijking minder dan ca. 0.10 m.

Bij Keizersveer zijn de verschillen uitermate beperkt omdat dit de modelrand vormt. Door kleine verschillen tussen het meetpunt Keizersveer en de modelrand in WAQUA is er sprake van een klein maar systematisch afvoerafhankelijk verschil.

Over het algemeen worden de waterstanden bij de kalibratieniveaus “extreem laag”, “laag” en “midden” goed beschreven, maar zijn er bij kalibratieniveau “hoog” soms grotere verschillen. Voor het stuwpand Borgharen moet aandacht uitgaan naar het verval over stuw Borgharen. Benedenstreams moet de aandacht uitgaan naar de afvoerbeschrijving en de bergingsbeschrijving.

### A.3.2 Reproductie waterstanden bij verplaatste meetpunten

Bij Elsloo blijven de verschillen bij kalibratieniveau “extreem laag” en “laag” redelijk beperkt. Wel is er in de simulatie sprake van enige instabiliteit bij waterstanden van ca. 34 m+ NAP. Dit verdient nader onderzoek.

Tussen kalibratie “laag” en “midden” zijn de berekende waterstanden vanaf ca. 750 m<sup>3</sup>/s te laag. Dit verschil neemt toe tot ca. 0.50 m bij 1600 m<sup>3</sup>/s om vervolgens bij ca. 2200 m<sup>3</sup>/s m<sup>3</sup>/s weer terug te lopen naar ca. 0.05 m. Bij kalibratieniveau “hoog” zijn de berekende waterstanden ca. 0.20 m lager dan de gemeten waterstanden. Dit verschil neemt toe tot ca. 0.40 m bij de piek van het hoogwater. Dit verloop van de verschillen kan met de beschikbare kalibratieniveaus niet goed worden opgelost omdat de beschrijving van de waterstanden tussen de kalibratieniveaus significant verslechterd als de kalibratieniveaus “midden” en “hoog” worden geoptimaliseerd. Vermoedelijk spelen hier tekortkomingen in de modellering een rol. Zo is in de bocht van Elsloo/Meers sprake van een bestorting die deels in het zomerbed ligt. Deze bestorting heeft een vaste ruwheid, wat betekent dat over de lengte van de bestorting (circa 2 kilometer) de invloed van de zomerbedruwheid beperkt is. Het verdient de aanbeveling om te kijken of de steenbestorting niet op een andere wijze in de schematisatie zou moeten worden meegenomen.

Belfeld-boven wordt op alle kalibratieniveaus goed beschreven terwijl Belfeld-beneden bij kalibratieniveau “hoog” slecht wordt beschreven. De berekende piekwaterstand bij Belfeld-beneden is ca. 0.22 m te laag terwijl die bij Belfeld-boven exact goed is. Dat betekent dat het verval over de stuw te laag wordt berekend. Met een foute waterstand bij Belfeld-beneden en een fout verval over de stuw is de waterstand bij Belfeld boven toevallig goed.

Bij Sambeek-beneden zijn de modelresultaten bij kalibratieniveaus “extreem laag” en “laag” goed als in aanmerking wordt genomen dat de eerste dag van de simulatie beïnvloed wordt door het opgelegde initiële veld van 250 m<sup>3</sup>/s. Pas na ca. 24 uur is het effect daarvan bij Sambeek-beneden uitgewerkt. Bij kalibratieniveau “midden” worden de waterstanden in de simulatie in het golffront beduidend te laag gesimuleerd. In de dalende fase functioneert kalibratie niveau “midden” juist goed. Voor het verschil in het golffront zijn twee mogelijke oorzaken aan te wijzen:

- Bergingseffecten (zichtbaar vanaf Roermond-boven);
- Verschillen tussen model en werkelijkheid rondom trekken stuwen.

Op het einde van de simulatie worden fors te lage waterstanden gesimuleerd. Vermoedelijk wordt dit veroorzaakt door het sluiten van de stuwen, waardoor de afvoerbeschrijving incorrect is (zie ook Grave-boven). Een tweede oorzaak kan liggen in het leegstromen van geïsoleerde lage delen van het winterbed wat in WAQUA niet wordt meegenomen.

Het verdient aanbeveling om de tijdreeks zowel aan golffront als aan het golfeinde uit te breiden, zodat beter zicht ontstaat op het verdere verloop.

Opvallend is verder dat de piekstand bij Sambeek-beneden ca. 0.08 m te laag wordt berekend terwijl de piekstand bij Sambeek-boven 0.22 m te laag wordt berekend. Het verval over de stuw is daarmee 0.14 m te laag. Tijdens het hoogwater bleek het niet mogelijk om de onderste rij schuiven van het Poirée-gedeelte van de stuw te trekken. Bijgevolg zijn ook de jukken van het Poirée gedeelte blijven staan.

Dit veroorzaakt mogelijk een deel van de extra opstuwung. Met een WAQUA-simulatie is onderzocht hoe groot dit effect kan zijn geweest. Bij Sambeek-boven gaat het dan om een opstuwung in de orde van enkele cm's, wat niet voldoende is de te lage waterstand geheel te verklaren.

Bij Grave-boven en Grave-beneden is het modelresultaat bij kalibratieniveau "extreem laag" en "laag" goed. Voor Grave beneden geldt dat ook voor kalibratieniveau "midden". Voor Grave-boven geldt bij dit kalibratieniveau enige onzekerheid ten aanzien van het al dan weghalen van de jukken van stuw Grave. Bij het hoogwater van juli 2021 was direct al duidelijk dat de jukken verwijderd moesten worden. Waarschijnlijk is dat eerder gebeurd dan gebruikelijk waardoor de gemeten waterstanden lager bleven dan in de simulatie. Kalibratieniveau "hoog" wordt bij Grave niet bereikt, maar de tendens is bij beide meetpunten naar toenemend te hoge waterstanden in de simulatie. Waar de piekstand bij Grave-beneden ca. 0.18 m hoger is dan de metingen is dat bij Grave-boven ca. 0.12 m hoger. Het verval over de stuw is daarmee ca. 0.06 m te laag over het traject tussen beide meetpunten.

Bij Lith-boven en Lith-dorp is het modelresultaat bij kalibratieniveau "extreem laag" en "laag" goed. Voor Lith-boven geldt dat ook voor kalibratieniveau "midden". Bij Lith-dorp zijn de berekende waterstanden bij dat kalibratieniveau systematisch wat te laag. Kalibratieniveau "hoog" wordt bij Lith niet bereikt, maar de tendens is bij beide meetpunten naar toenemend te hoge waterstanden in de simulatie. Waar de piekstand bij Lith-dorp ca. 0.01 m hoger is dan de metingen is dat bij Lith-boven ca. 0.15 m hoger. Het verval over de stuw is daarmee ca. 0.14 m te hoog over het traject tussen beide meetpunten.

### **A.3.3 Reproductie waterstanden nieuwe Vlaamse meetpunten**

Bij Lanaken voldoet het kalibratieniveau extreem-laag minder goed. Het aantal beschikbare gegevens is echter te laag om dit goed te kunnen beoordelen. De waterstanden bij kalibratieniveau "laag" zijn goed en bij kalibratieniveau "midden" is de berekende waterstand fractioneel te laag. Tussen deze kalibratieniveaus worden rond ca 600 m<sup>3</sup>/s echter systematisch ca. 0.15 m te hoge waterstanden berekend. Bij kalibratieniveau "hoog" zijn de berekende waterstanden iets te laag. Bij nog hogere afvoeren neemt dit verschil toe tot ca. 0.25 m bij ca 3100 m<sup>3</sup>/s bij nog hogere afvoeren lijkt het verschil te stabiliseren. Op de piek is de berekende waterstand ca. 0.28 m lager dan de gemeten waterstand.

Bij Uikhoven voldoen kalibratieniveaus "extreem laag" en "laag" enigermate. Bij toenemende afvoeren direct boven kalibratieniveau "laag" (200 m<sup>3</sup>/s) blijven de berekende waterstanden steeds verder achter bij de gemeten waterstanden. Rond 1250 m<sup>3</sup>/s lijkt het verschil te stabiliseren op ca. 0.35 m. Bij kalibratieniveau "midden" is het verschil nog steeds ca. 0.35 m. Boven dit kalibratieniveau neemt het verschil iets af tot 2000 m<sup>3</sup>/s om vervolgens weer toe te nemen. Bij kalibratie niveau "hoog" zijn de berekende waterstanden 0.40 m te laag. Bij nog hogere afvoeren neemt het verschil toe tot meer dan 0.50 m. Op de piek is de berekende waterstand 0.52 m lager dan de gemeten waterstand. De kalibratie op hoogwater 1995 voor het traject Borgharen-dorp – Elsloo is bij lange na niet geldig voor meetpunt Uikhoven. Daarnaast lijkt de effectiviteit van maatregelen belangrijk lager te zijn dan verwacht.

Bij Eijsden-Mazenhoven voldoen kalibratieniveaus "extreem laag", "laag" en "midden" bij benadering redelijk. Tussen kalibratieniveau "laag" en "midden" zijn berekende waterstanden systematisch te hoog bij afvoeren tussen 500 en 1000 m<sup>3</sup>/s. Mogelijk is dit echter een gevolg van morfologische veranderingen als gevolg van het hoogwater. Bij kalibratieniveau "hoog" is een opvallend verschil tussen de stijgende en de dalende fase van de afvoergolf. In de stijgende fase lijkt sprake te zijn van retentie-effecten die in de metingen niet zichtbaar zijn. De bergingsbeschrijving in het model dient hier nader onderzocht te worden. Opvallend bij dit meetpunt is verder de grote bandbreedte die zichtbaar is in de verschillen bij stijgende en bij dalende waterstanden.



Bij Meeswijk-veer voldoen kalibratieniveaus “extreem laag”, “laag” en “midden”. Bij toenemende afvoeren direct boven kalibratieniveau “midden” (1600 m<sup>3</sup>/s) blijven de berekende waterstanden steeds verder achter bij de gemeten waterstanden. Bij kalibratie niveau “hoog” zijn de berekende waterstanden ca. 0.35 m te laag. Op de piek is de berekende waterstand 0.46 m lager dan de gemeten waterstand. De kalibratie op hoogwater 1995 voor het traject Elsloo – Grevenbicht (inmiddels door meetpunt Rotem-maas vervangen) is bij lange na niet geldig voor meetpunt Meeswijk-veer. Daarnaast lijkt de effectiviteit van rivierverruimende maatregelen belangrijk lager te zijn dan verwacht.

Bij Negenoord voldoen kalibratieniveaus “extreem laag”, “laag” en “midden”. Vanaf afvoeren boven 2250 m<sup>3</sup>/s blijven de berekende waterstanden steeds achter bij de gemeten waterstanden. Bij kalibratie niveau “hoog” zijn de berekende waterstanden ca. 0.20 m te laag. Op de piek is de berekende waterstand 0.34 m lager dan de gemeten waterstand. De kalibratie op hoogwater 1995 voor het traject Elsloo – Grevenbicht (inmiddels door meetpunt Rotem-maas vervangen meetpunt) is bij lange na niet geldig voor meetpunt Meeswijk-veer. Daarnaast lijkt de effectiviteit van maatregelen lijkt belangrijk lager te zijn dan verwacht.

Meetpunt Rotem vervangt sinds 2019 het meetpunt Grevenbicht. Nabij het meetpunt is maatregel Koeweide in uitvoering. De status van de voortgang van de werkzaamheden passen niet noodzakelijkerwijs bij de modellering in het model. Dat kan een belangrijke bron van verschillen zijn. Vanaf kalibratieniveau “laag” zijn de berekende waterstanden ca. 0.38 m hoger dan de gemeten waterstand. Boven ca. 1100 m<sup>3</sup>/s neemt het verschil af. Bij kalibratieniveau “midden” zijn de berekende waterstanden ca. 0.25 m te hoog. Bij kalibratieniveau “hoog” zijn de berekende waterstanden ca. 0.10 m lager dan de gemeten waterstanden. Op de piek is de berekende waterstand 0.30 m lager dan de gemeten waterstand. Voor dit meetpunt moet nader onderzocht worden wat de status van de werkzaamheden was tijdens het hoogwater van juli 2021 voordat een uitspraak gedaan kan worden ten aanzien van de geschiktheid van het model.

#### **A.3.4 Reproductie waterstanden nieuwe meetpunten na hoogwater 1995**

Bij Linne-beneden voldoen kalibratieniveaus “extreem laag” en “laag”. Bij kalibratieniveau “midden” is er een zeer groot verschil tussen stijgende fase (berekend tot ca. 0.30 m te hoog) en de dalende fase (tot 0.4 m te laag). Het strijken en zetten van stuw Linne speelt een rol in dit verschil. Tussen kalibratieniveau “laag” en “midden” is bij een afvoer van ca. 750 m<sup>3</sup>/s sprake van tot 0.40 m te laag berekende waterstanden. Dit wijst op onvolkomenheden in de schematisatie. Bij kalibratieniveau “hoog” zijn de waterstanden in de stijgende fase te hoog en in de dalende fase te laag. Op de piek is de berekende waterstand 0.09 m lager dan de gemeten waterstand. De kalibratie op hoogwater 1995 op het traject Heel-boven – Heel-beneden lijkt voor dit meetpunt redelijk geldig te zijn.

Bij Roermond-boven en Buggenum voldoen kalibratieniveaus “extreem laag” en “laag”. Bij kalibratieniveau “midden” is er een kleine systematische afwijking mogelijk als gevolg van het net wel of net niet strijken of zetten van stuw Roermond. Bij kalibratieniveau “hoog” zijn de waterstanden in de stijgende fase te hoog en in de dalende fase vrijwel goed. Op de piek is de berekende waterstand bij Roermond-boven 0.02 m hoger dan de gemeten waterstand. Bij Buggenum is dat 0.09 m. De kalibratie op hoogwater 1995 op het traject Heel-boven – Heel-beneden en Heel-beneden – Belfeld-beneden lijkt voor deze meetpunten redelijk geldig te zijn.

Bij Neer voldoen kalibratieniveaus “extreem laag” en “laag”. Bij kalibratieniveau “midden” zijn de berekende waterstanden ca. 0.15 m lager dan de gemeten waterstanden. Vanaf dit kalibratieniveau worden de verschillen kleiner. Bij ca. 2000 m<sup>3</sup>/s zijn gemeten en berekende waterstanden gelijk. Bij kalibratieniveau “hoog” zijn de berekende waterstanden ca. 0.25 m hoger dan de gemeten waterstanden.

Op de piek is de berekende waterstand bij Neer 0.17 m hoger dan de gemeten waterstand. Het kalibratie-niveau “hoog” op het traject Heel-beneden – Belfeld-beneden lijkt voor dit meetpunten minder geldig te zijn.

Bij Belfeld-boven voldoen kalibratieniveaus “extreem laag” en “laag” en “hoog”. Bij kalibratieniveau “midden” zijn de berekende waterstanden ca. 0.10 m lager dan de gemeten waterstanden. Vanaf 2000 m<sup>3</sup>/s worden de verschillen kleiner. Bij kalibratieniveau “hoog” zijn de verschillen beperkt en worden vooral veroorzaakt door een looptijdverschil. Op de piek is de berekende waterstand bij Belfeld-boven gelijk aan de gemeten waterstand. Het kalibratie-niveau “hoog” op het traject Heel-beneden – Belfeld-beneden lijkt voor dit meetpunt nog steeds geldig te zijn.

Bij Venlo voldoen kalibratieniveaus “extreem laag”, “laag” en “hoog”. Bij kalibratieniveau “midden” zijn de berekende waterstanden ca. 0.10 m lager dan de gemeten waterstanden. Dat verschil neemt toe tot ca. 1600 m<sup>3</sup>/s om vervolgens geleidelijk af te nemen. Bij kalibratieniveau “hoog” is het verschil verwaarloosbaar. Op de piek is de berekende waterstand bij Venlo gelijk aan de gemeten waterstand. Het kalibratie-niveau “hoog” op het traject Belfeld-beneden – Well lijkt voor dit meetpunt nog steeds geldig te zijn.

Bij Gennep voldoen kalibratieniveaus “extreem laag” en “laag”. Voor kalibratieniveau “midden” en “hoog” wordt het beeld enigszins verstoord door looptijdverschillen en bergings-effecten. Kalibratieniveau “hoog” wordt niet bereikt. De tendens is echter naar een toenemende overschatting van gemeten waterstanden. Op de piek is de berekende waterstand bij Gennep 0.18 m. hoger dan de gemeten waterstand. In de dalende fase sluiten de berekende waterstanden belangrijk beter aan op de gemeten waterstanden.

Bij Mook voldoen kalibratieniveaus “extreem laag” en “laag”. Voor kalibratieniveau “midden” en bij de piek zijn echter forse verschillen zichtbaar van 0.35 m. Bij 2000 m<sup>3</sup>/s zijn de berekende waterstanden ca. 0.25 m hoger dan de gemeten waterstanden. De tendens is daarboven is een toenemend verschil. Deels wordt dit veroorzaakt door looptijd-verschillen tussen model en metingen. Kalibratieniveau “hoog” wordt niet bereikt.

Bij Empel-beneden voldoen kalibratieniveaus “extreem laag” en “laag”. Voor kalibratieniveau “midden” zijn de berekende waterstanden ca. 0.10 m te laag. Vanaf 1600 m<sup>3</sup>/s worden de verschillen kleiner. Bij de piek zijn de berekende waterstanden ca. 0.08 m hoger dan de gemeten waterstanden. De tendens is daarboven is een toenemend verschil. Deels wordt dit veroorzaakt door looptijd-verschillen tussen model en metingen. Kalibratieniveau “hoog” wordt niet bereikt.

## B Vergelijking metingen en SOBEK [A.1]

Deze bijlage beschrijft analyses die zijn uitgevoerd voor de beantwoording van vraag A.1:

*“Kunnen de huidige modellen de waterstanden van juli 2021 reproduceren? Kunnen de verschillen worden verklaard?”*

### B.1 Korte beschrijving van het model sobek-maas-j21\_5-v1

De knopen-takken structuur van de SOBEKschematisatie is gebaseerd op de ligging van de rivieras in baseline-maas-j95\_5-v1, waarbij de (x,y)-coördinaten (in Rijksdriehoek) van de knopen zijn afgerond op hele meters. De locaties van de knopen zijn gebaseerd op een inschatting van toekomstig gebruik van het model in het Landelijk Sobek Model (LSM) en verwachte toekomstige uitbreidingen.

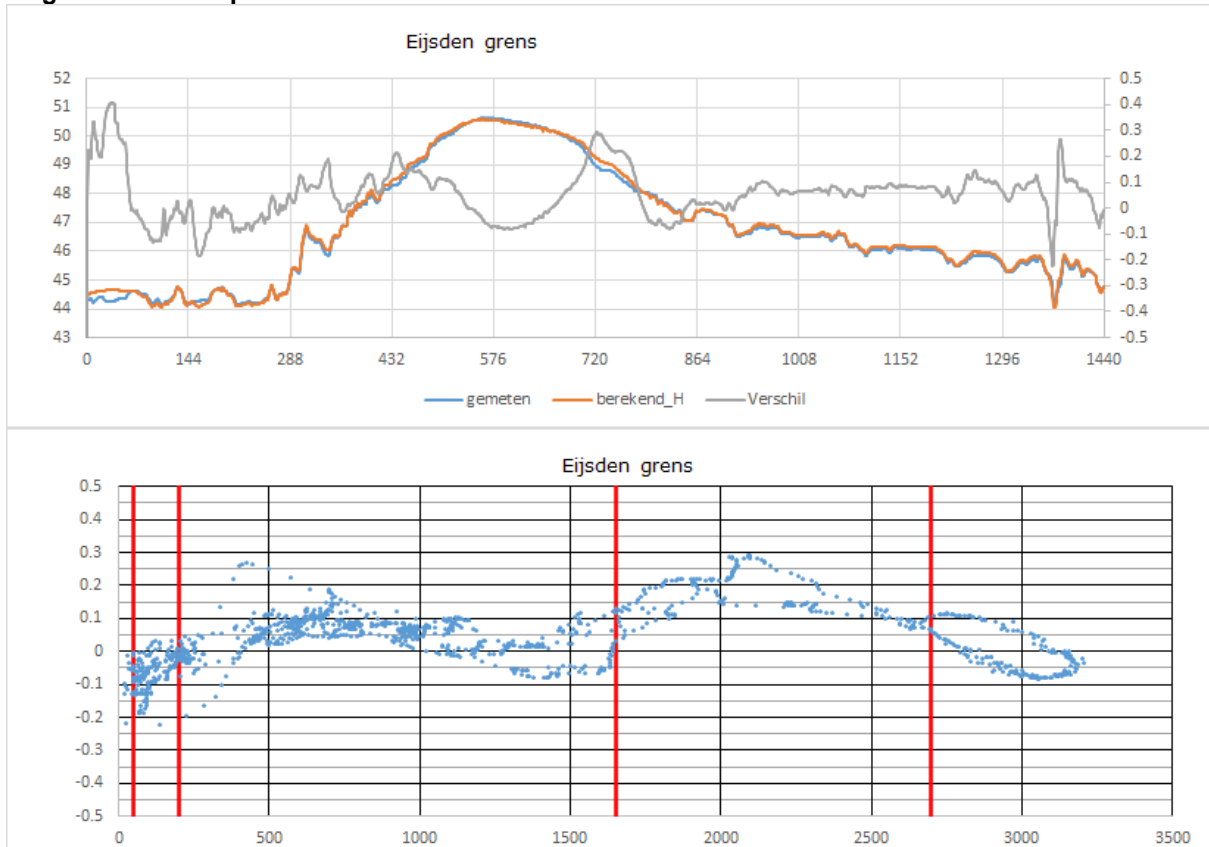
De dwarsprofielen en winterbedruwheden van de takken zijn gebaseerd op de overeenkomstige Baseline- en WAQUA-schematisaties door middel van de vertaling naar SOBEK-profielen en winterbedruwheden via het programma WAQ2PROF.

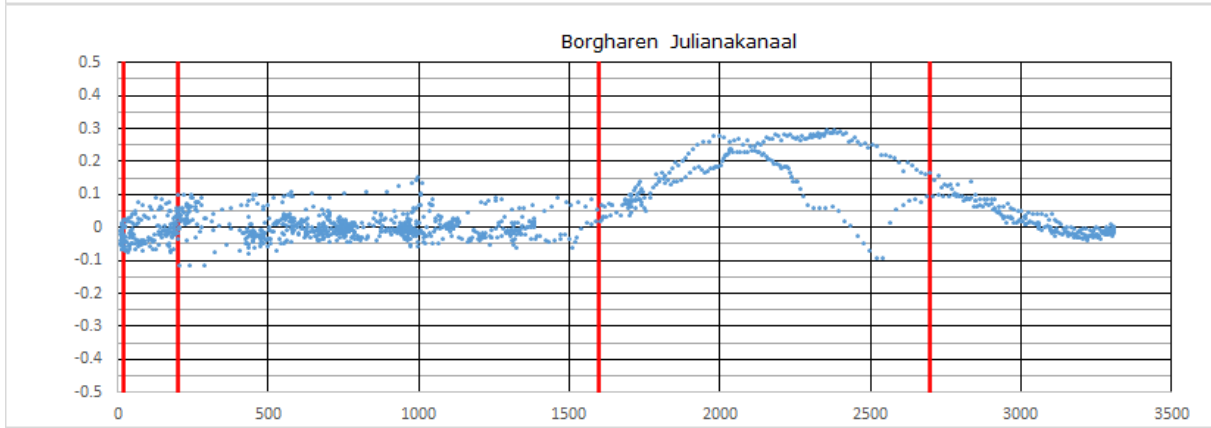
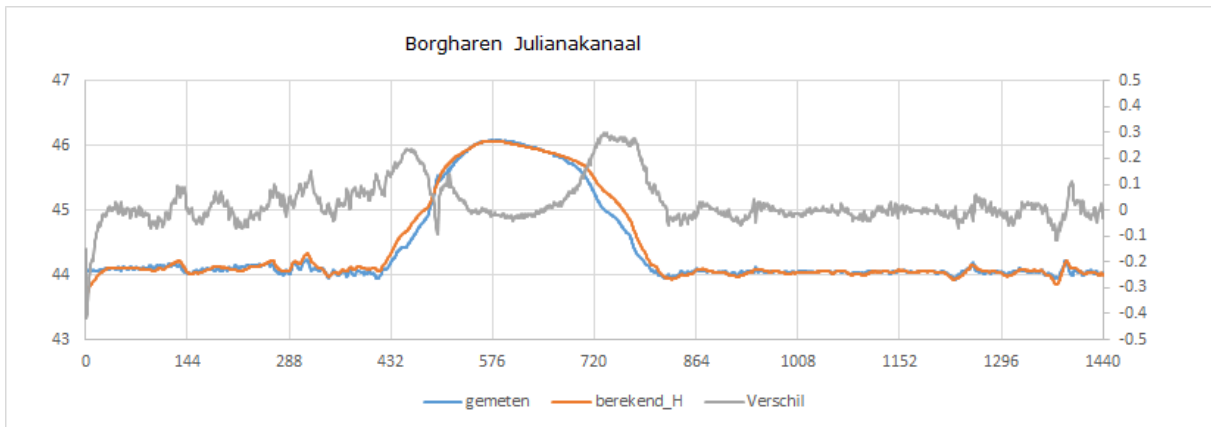
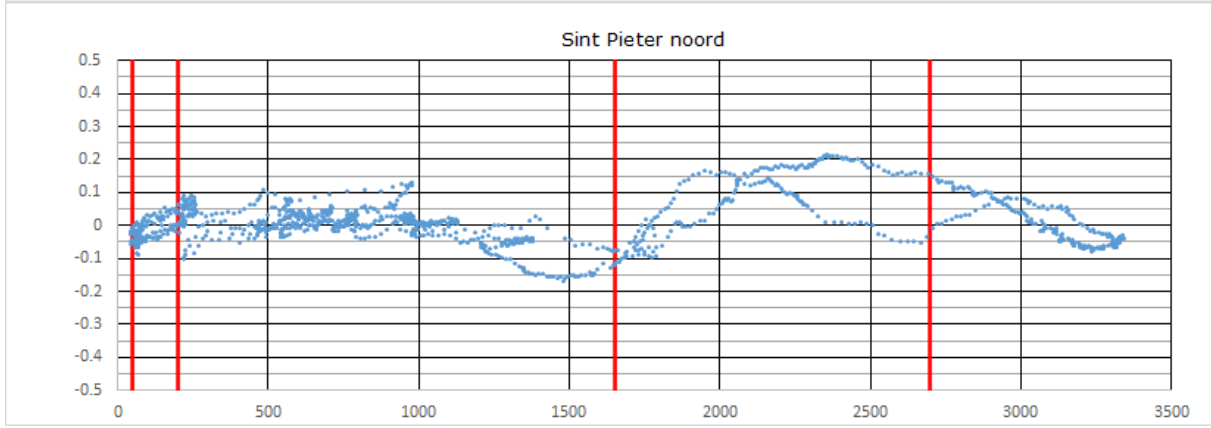
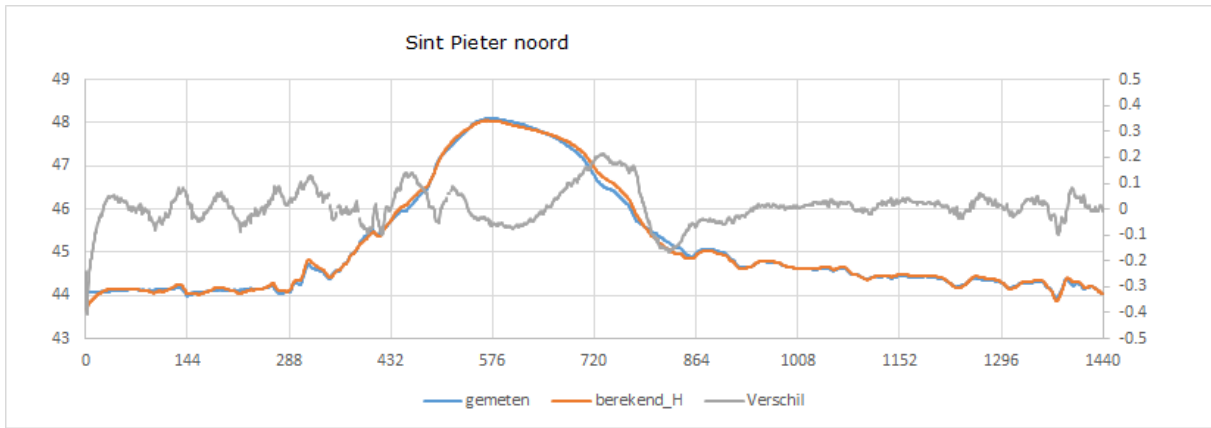
In 2016 is een herkalibratie uitgevoerd van alle recente modellen (de Jong, 2016c). Bij deze kalibratie is overgestapt op SOBEK 3.4.1, numerieke parameter limtyphu1D=1 (upwind), nieuwe PID-coëfficiënten (KP=0.1, KI=0, KD=4.0), grinddrempels op de Grensmaas toegevoegd, het afvoerniveau “extreem laag” toegevoegd, is gekalibreerd op recente perioden, zijn (waar mogelijk) metingen van Belgische meetstations meegenomen, bevat de nieuwe ecotopenkartering en de ruwheidsformulering Manning. Daarnaast zijn aanpassingen gedaan aan stuwsturing en grinddrempels. De nieuwe kalibratieperioden en afvoerniveaus zijn gedefinieerd in onderstaande tabel.

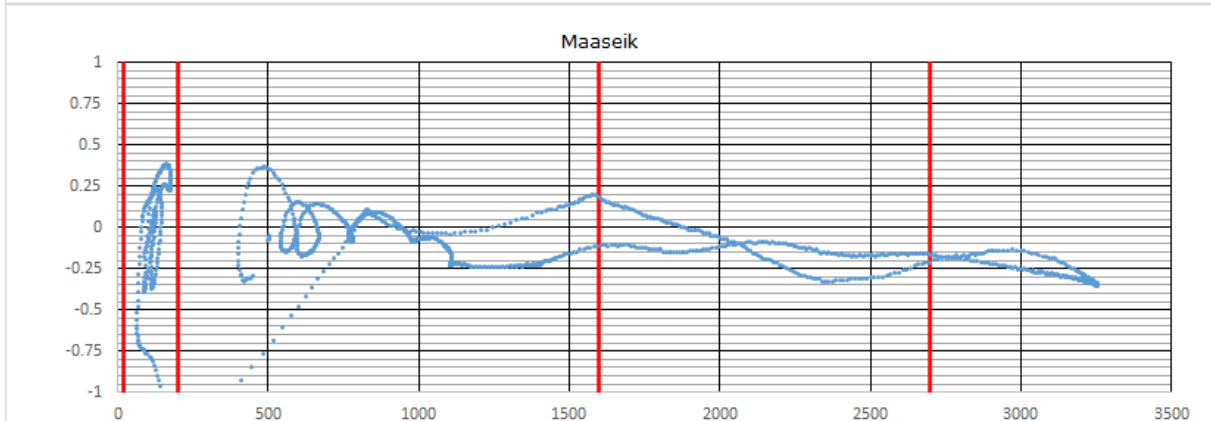
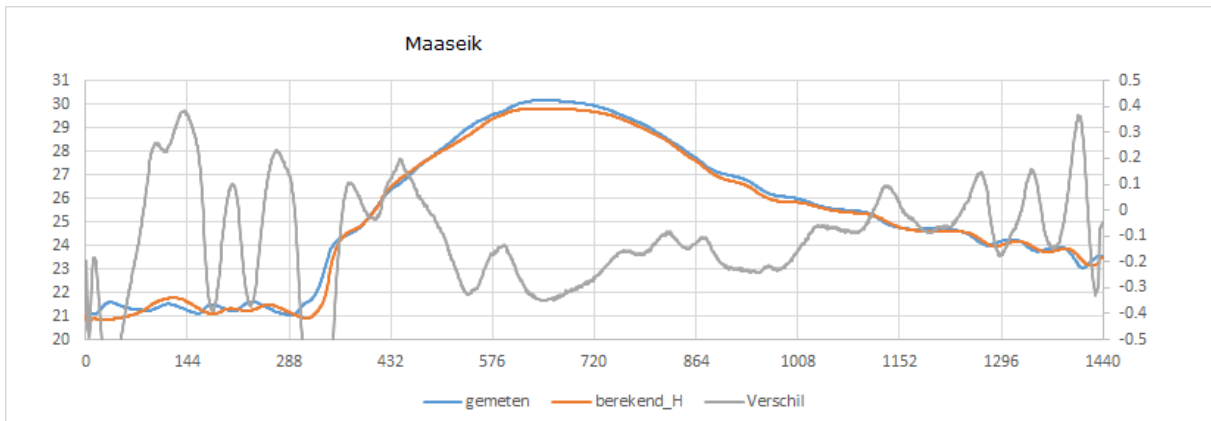
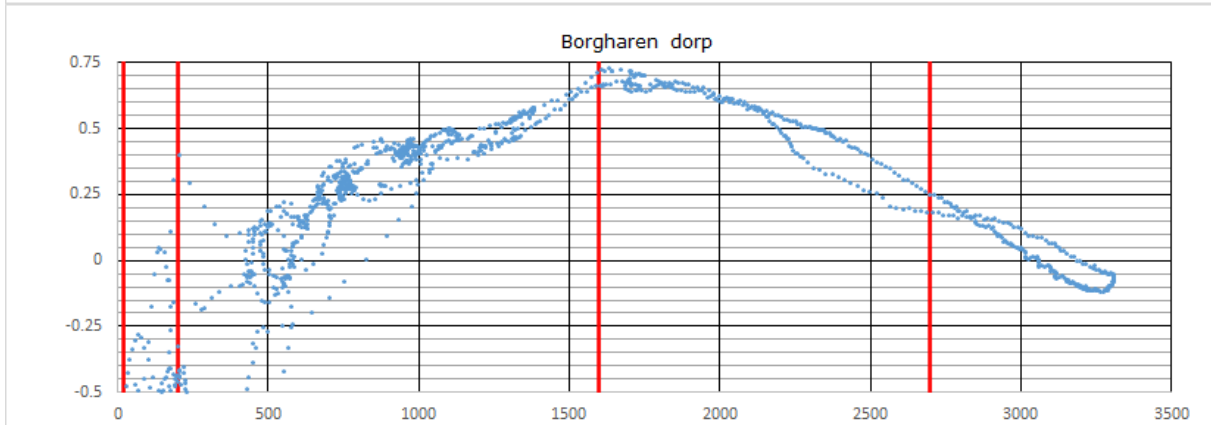
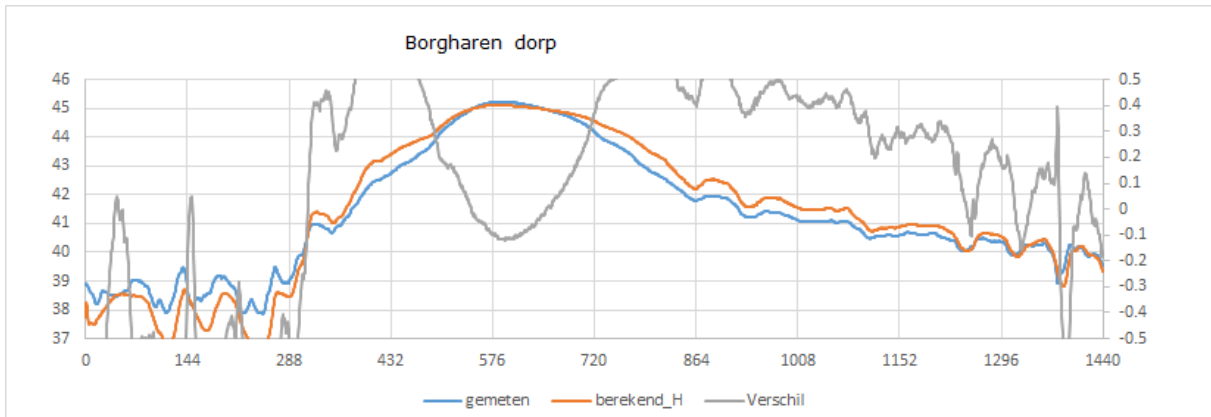
Afvoer	Kalibratie	Verificatie
Extreem Laag 25±15	Juli 2015	Juni 2014
Laag 150±75	November 2014	September 2015
Midden 1450±150	November 2010	Januari 2011
Hoog 2550±150	Februari 1995	December 1993
Extreem Hoog 3950±100	WAQUA-j15	WAQUA-j11

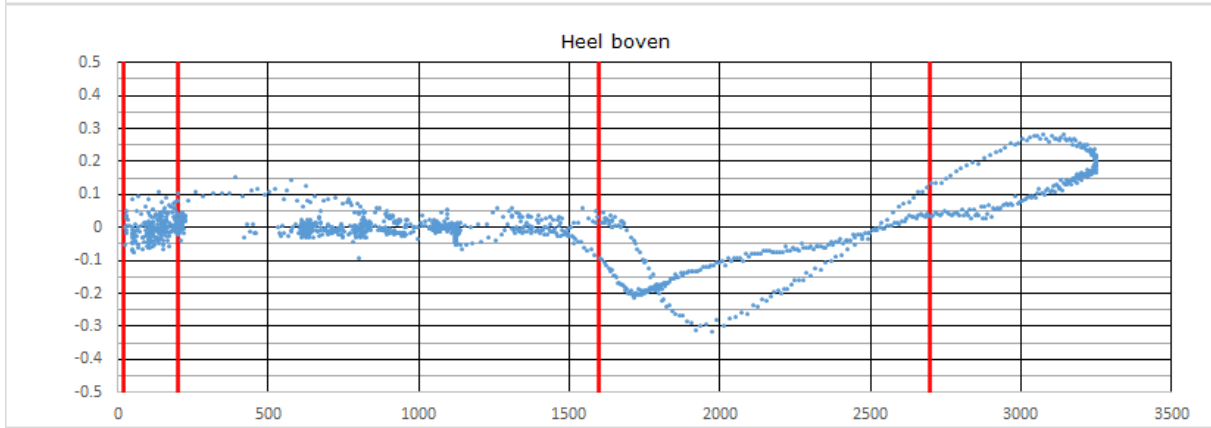
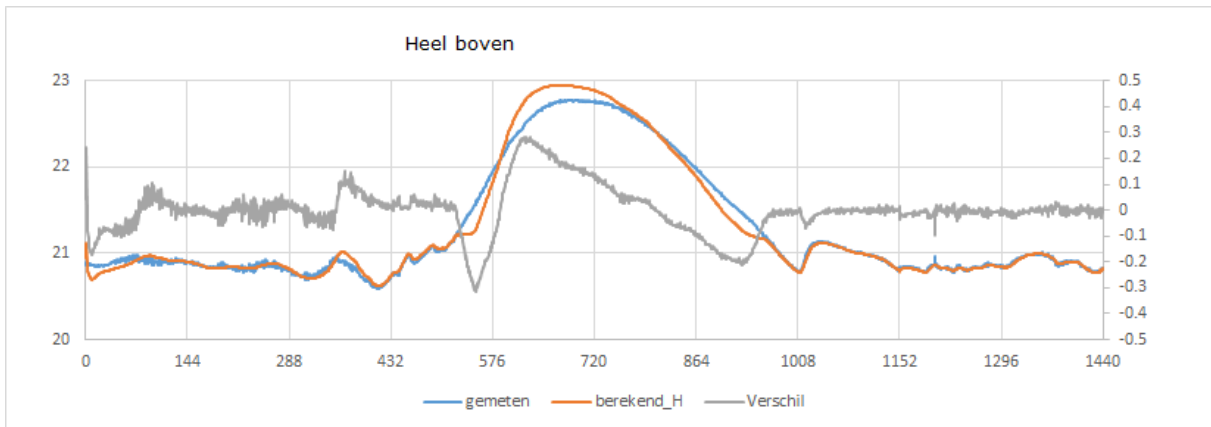
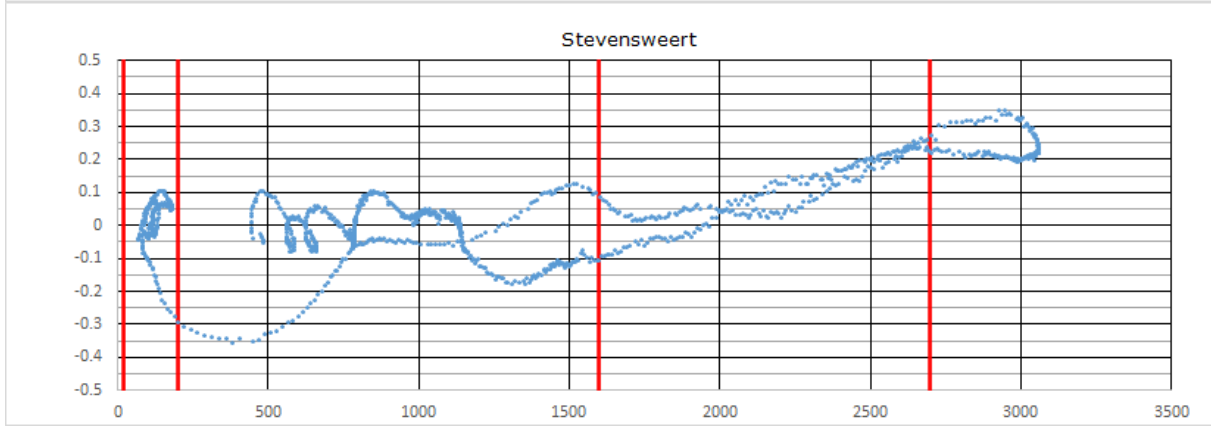
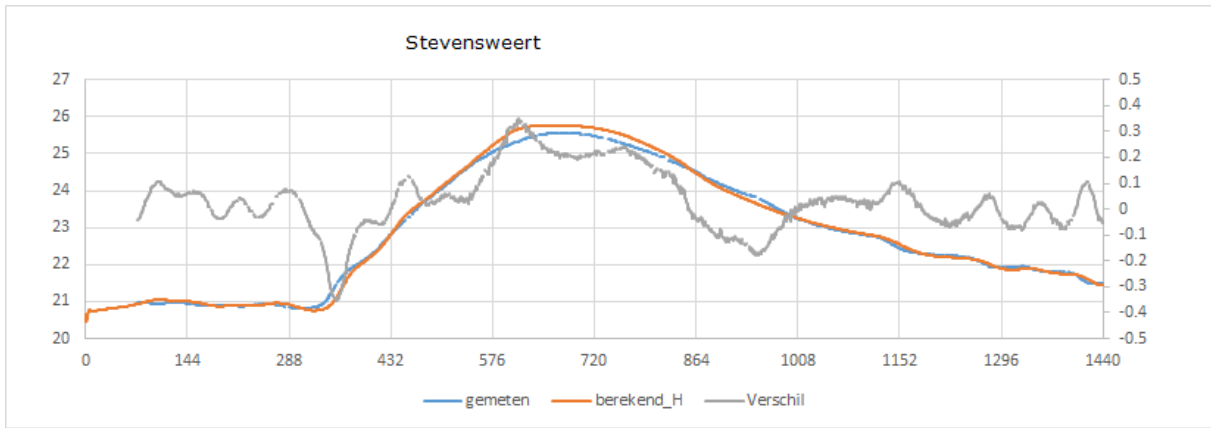
## B.2 Figuren

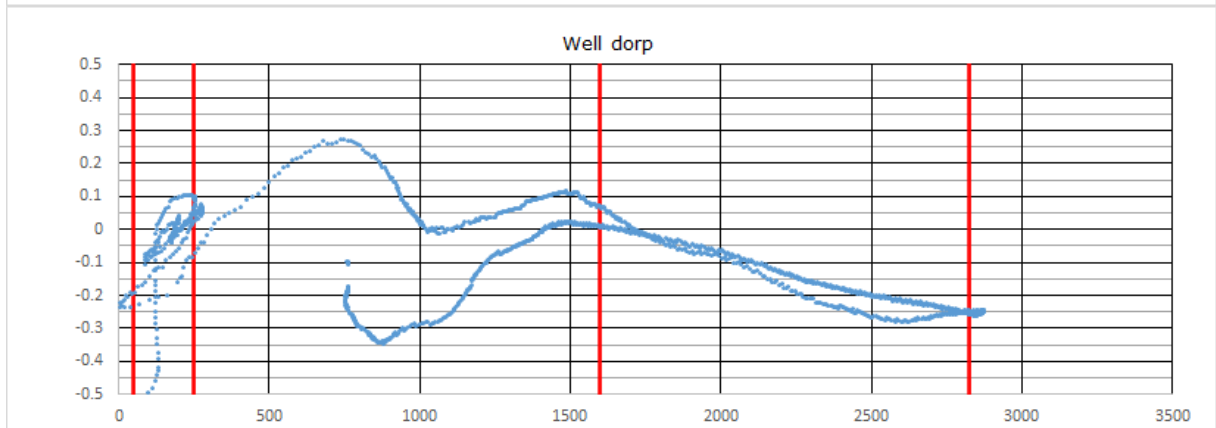
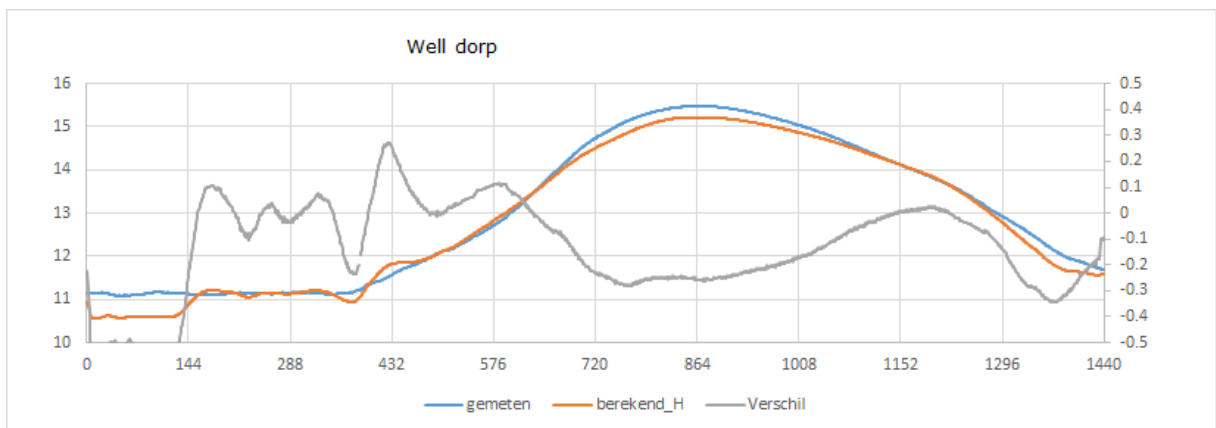
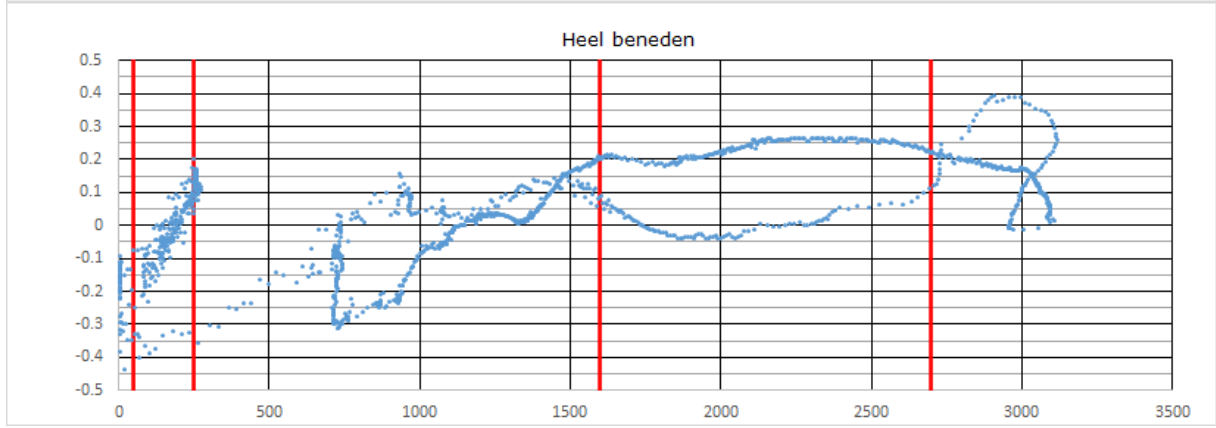
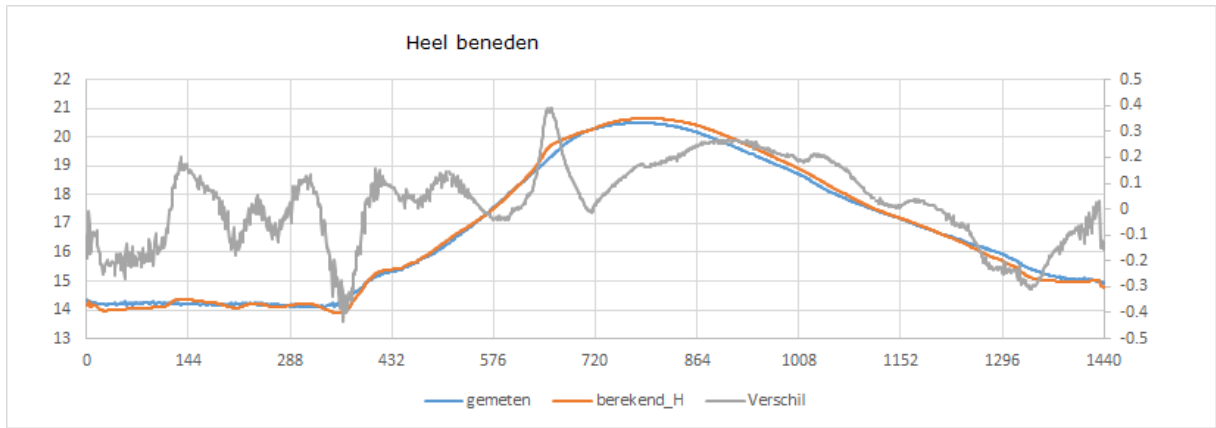
### B.2.1 Ongestoorde meetpunten



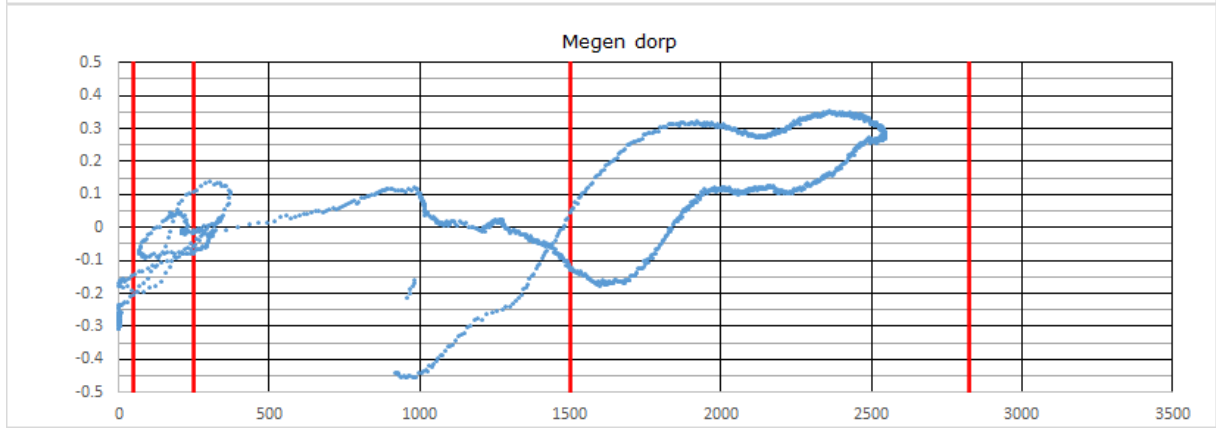
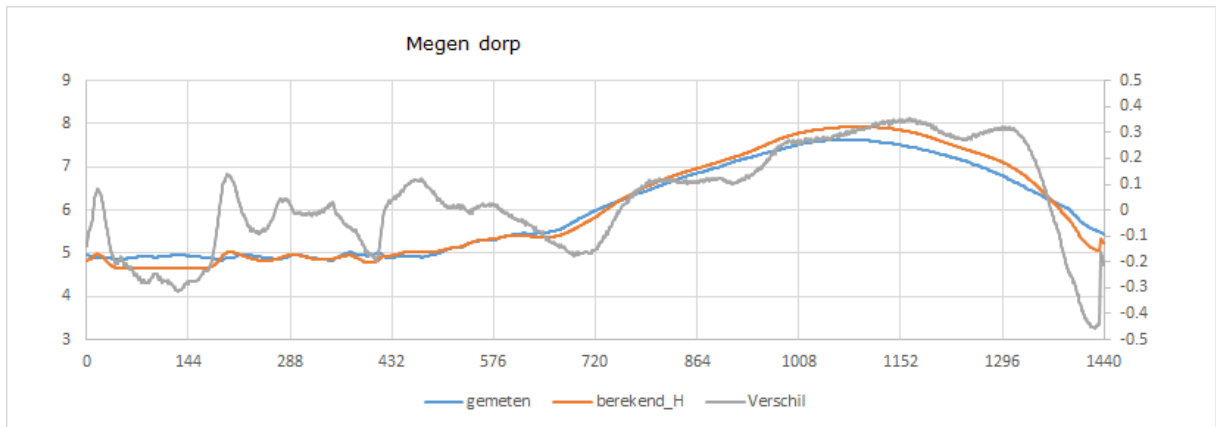
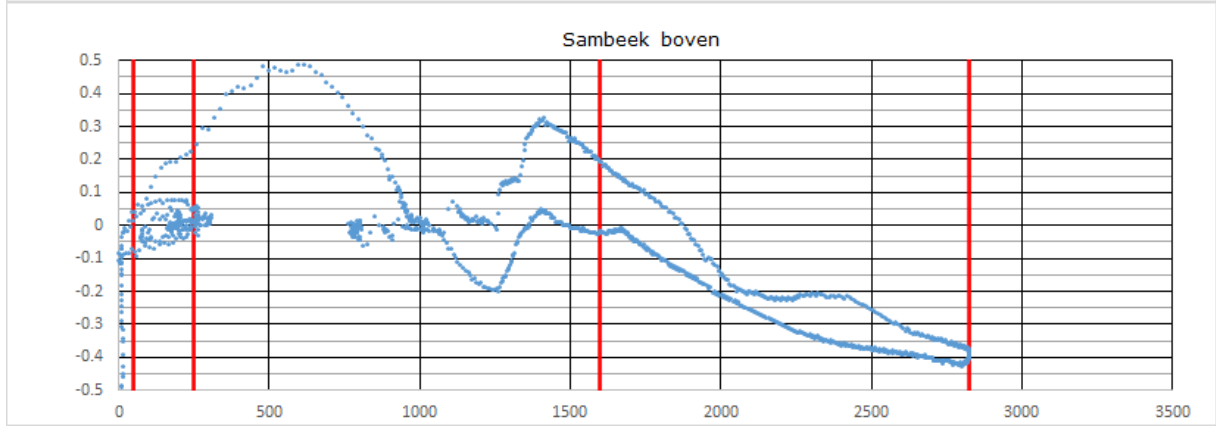
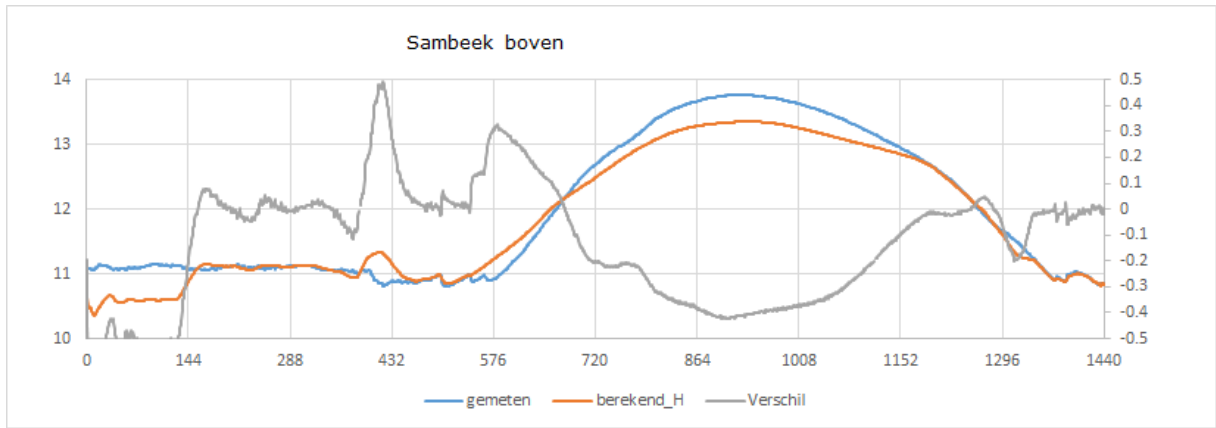


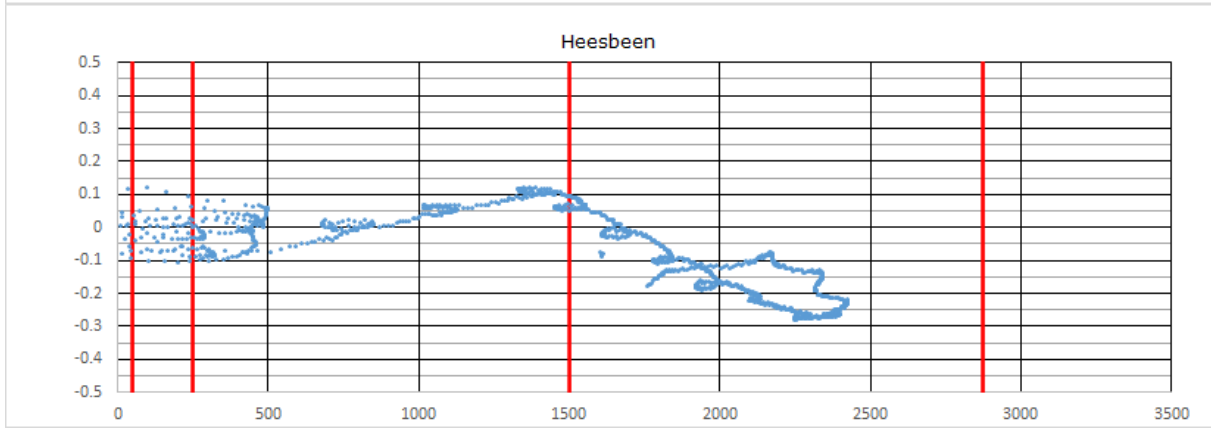
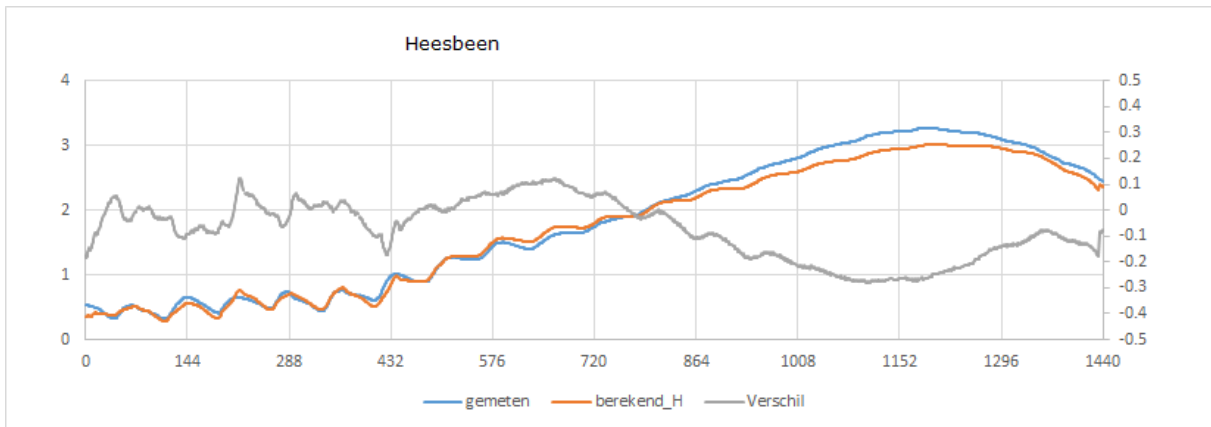
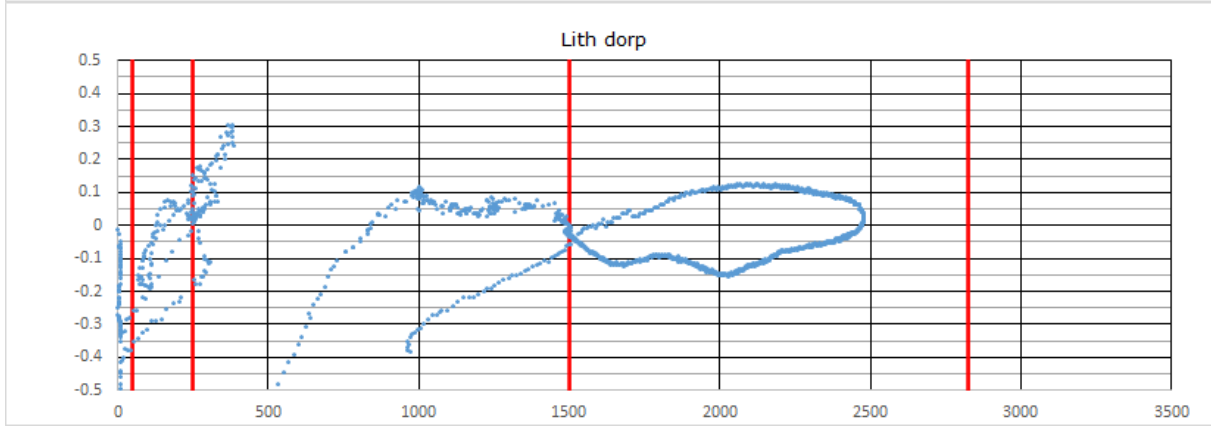
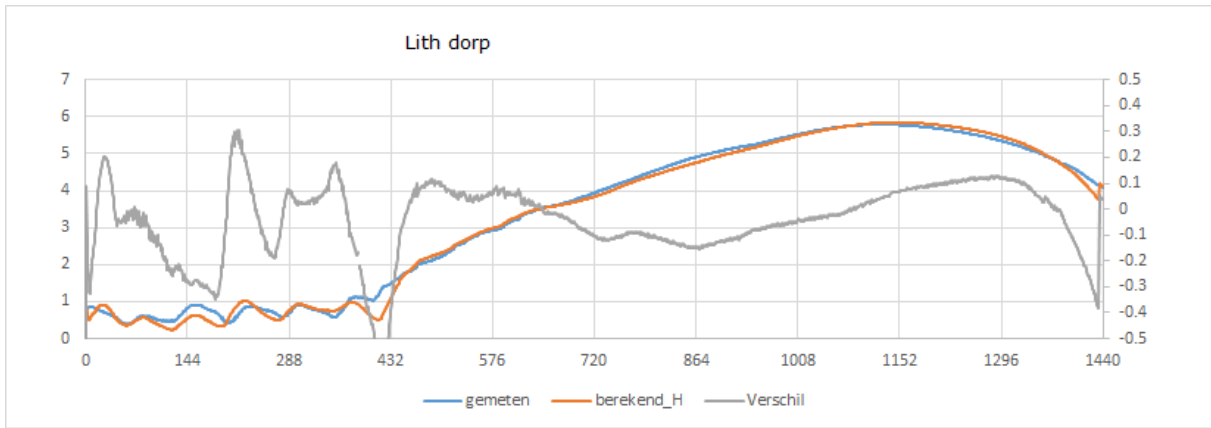


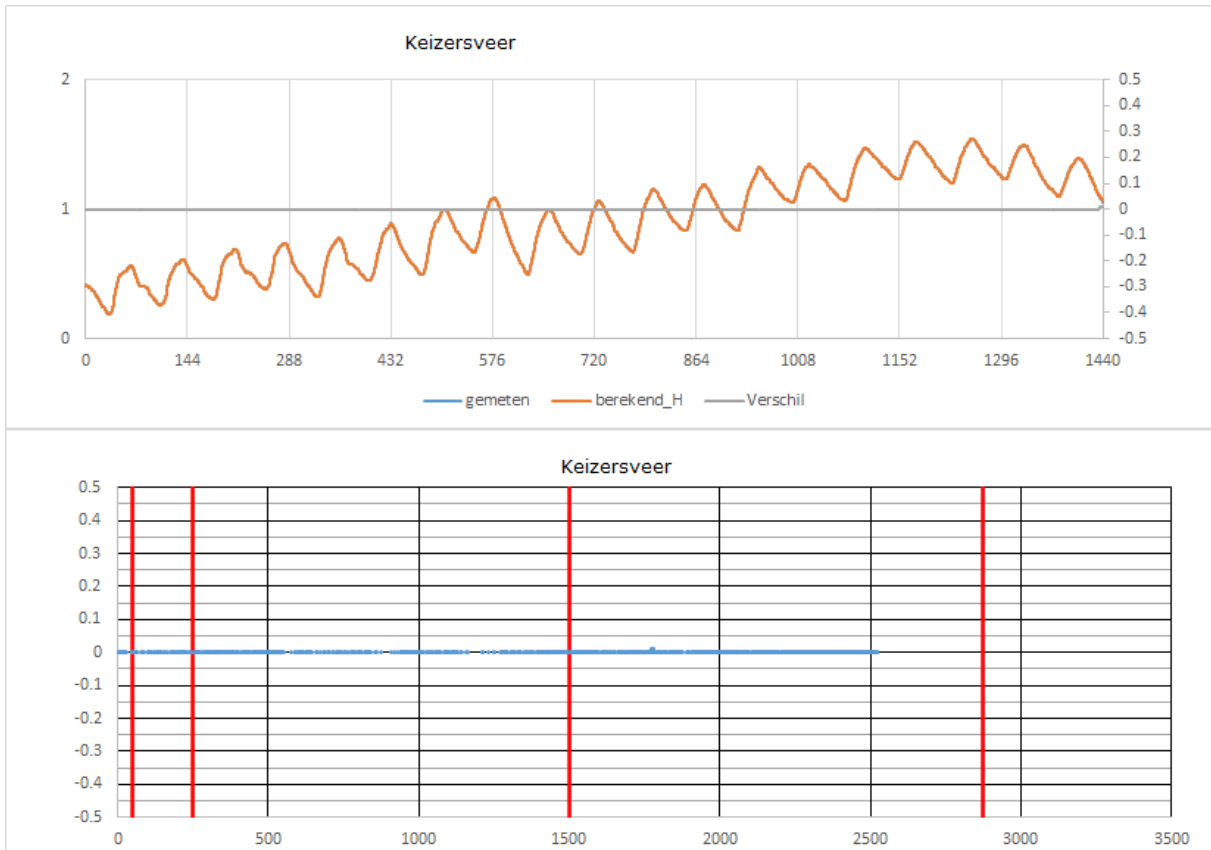




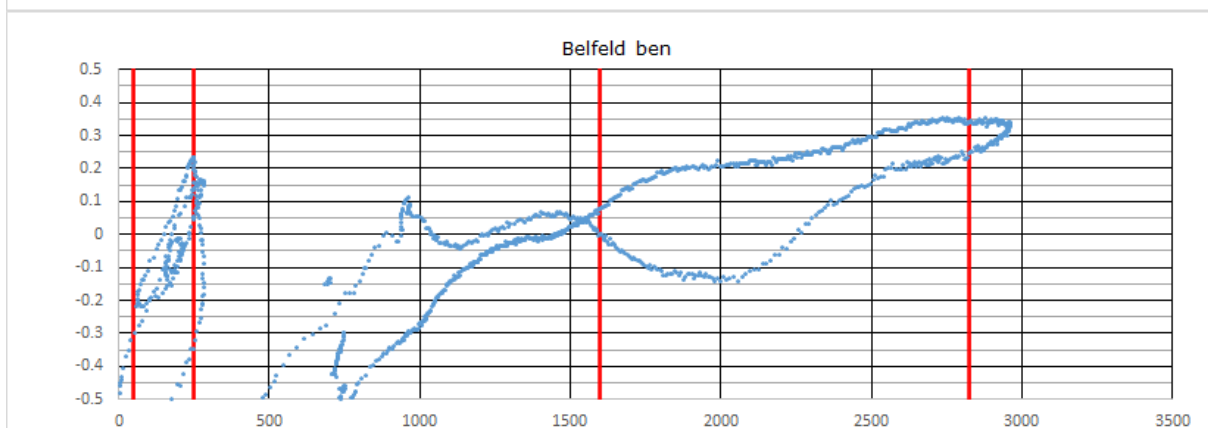
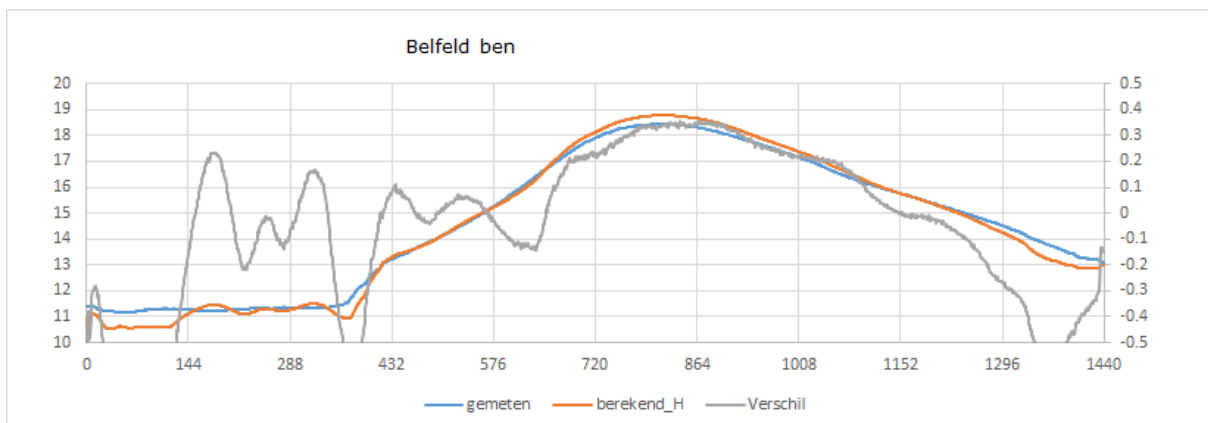
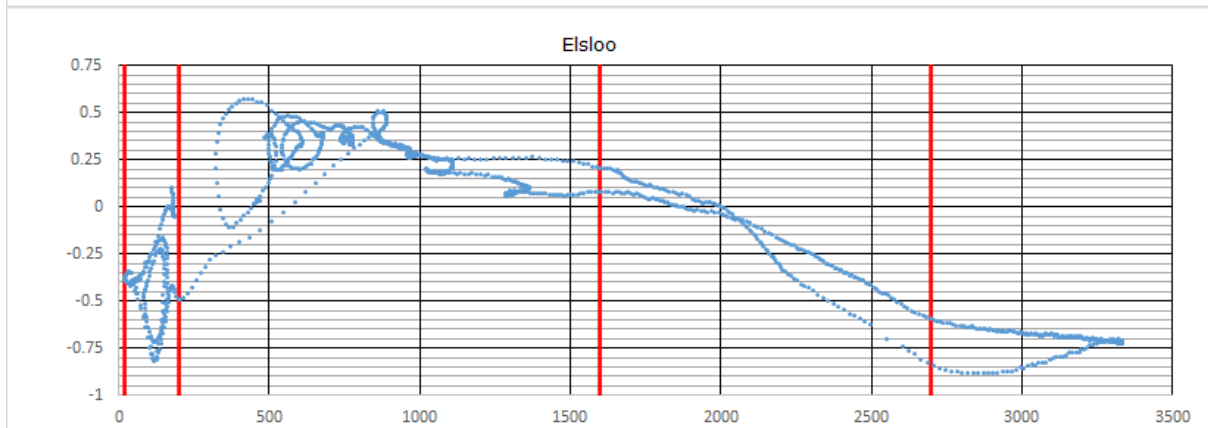
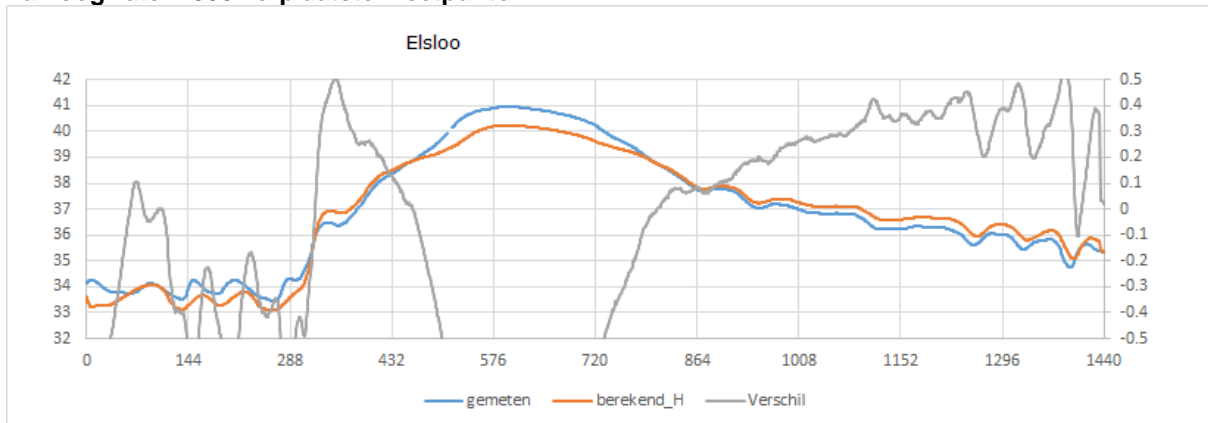


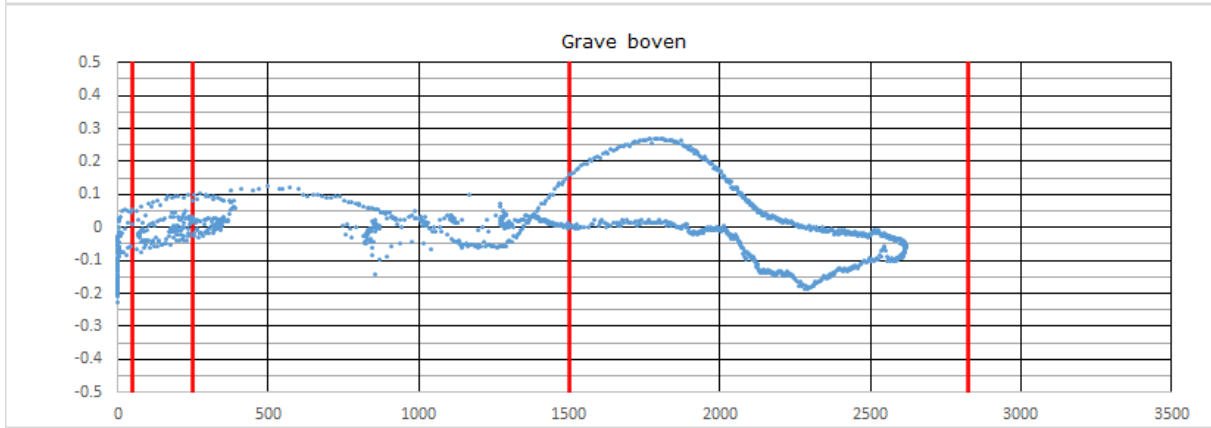
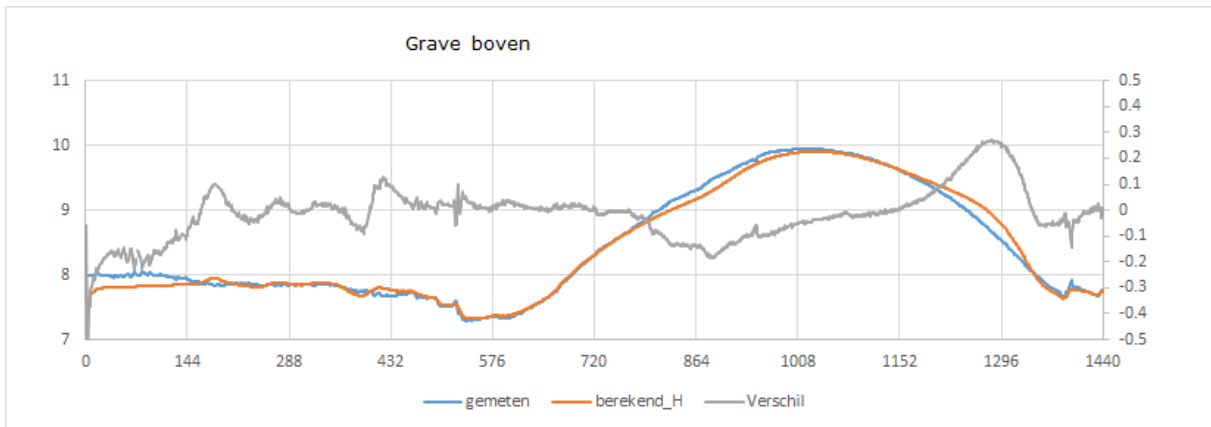
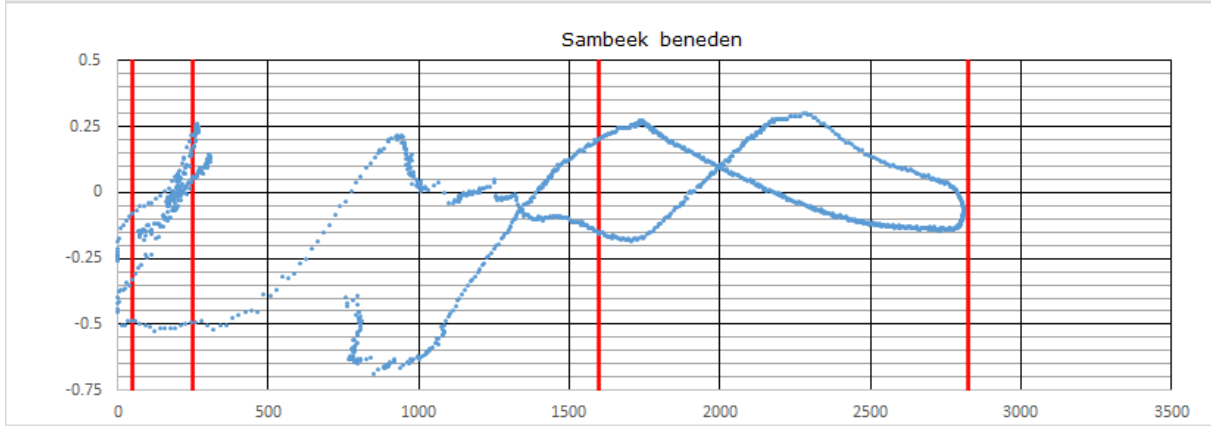
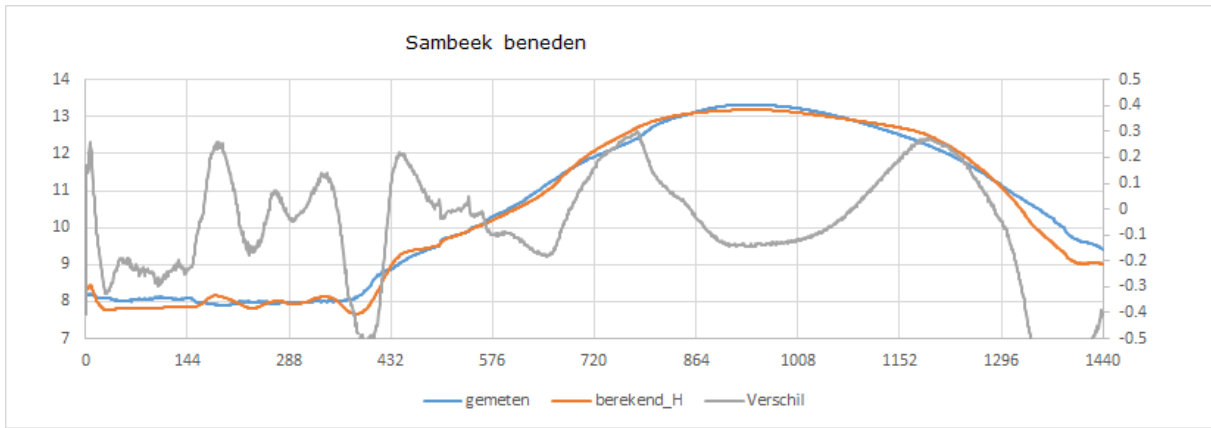


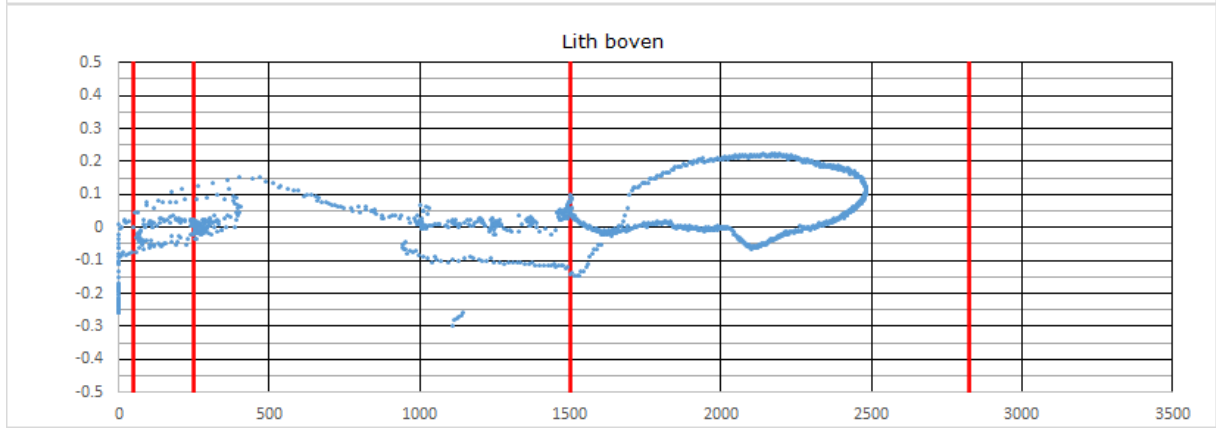
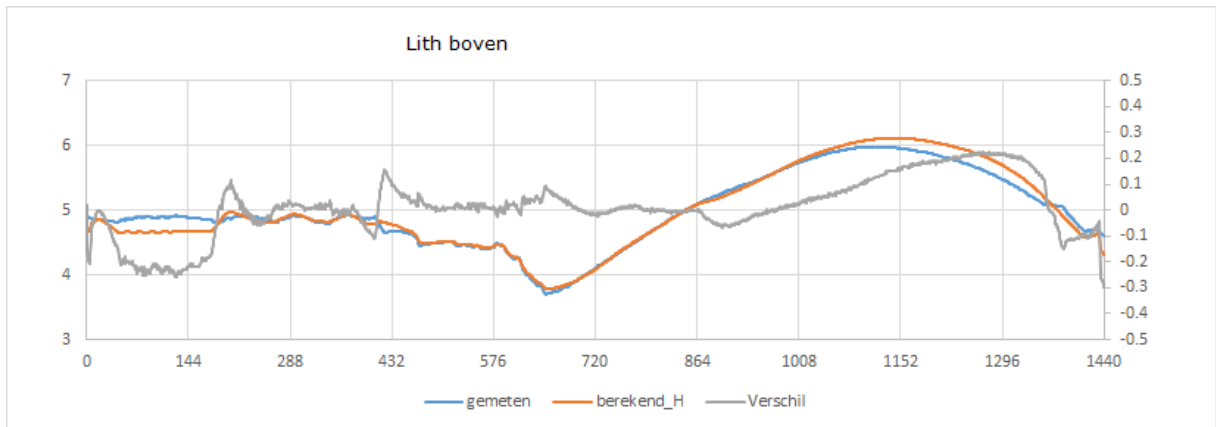
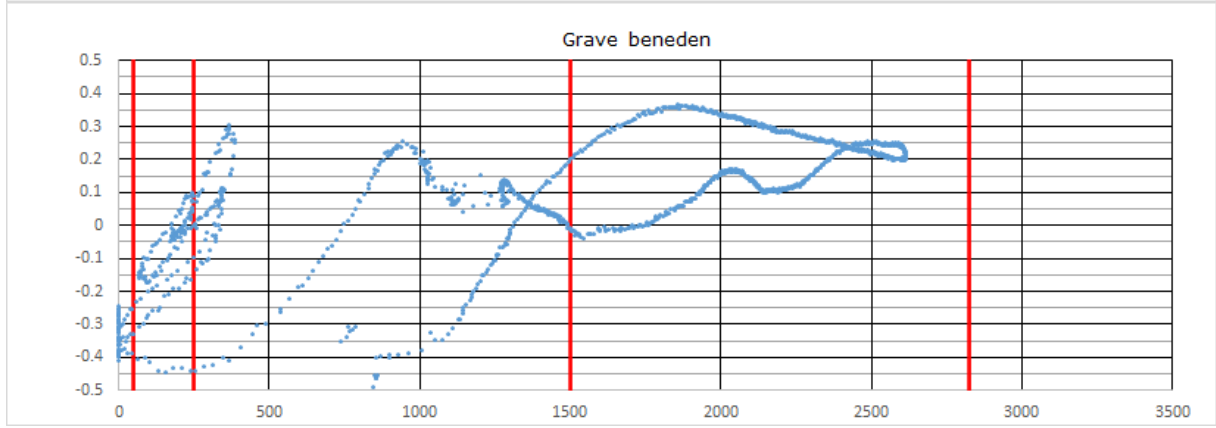
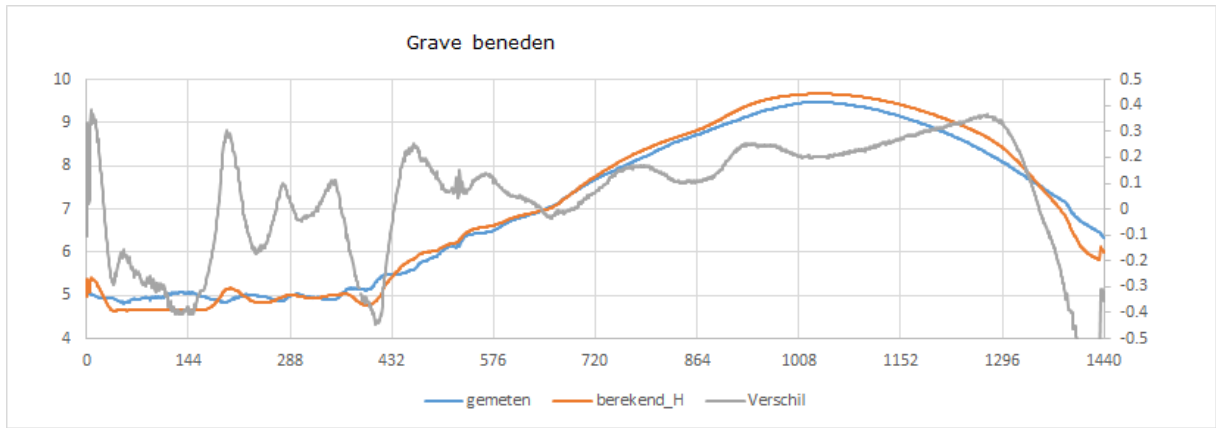




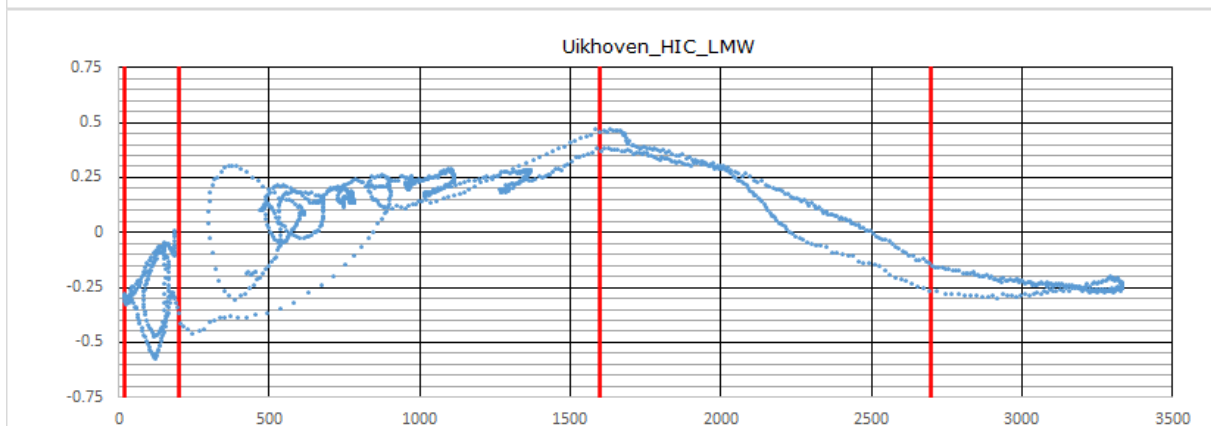
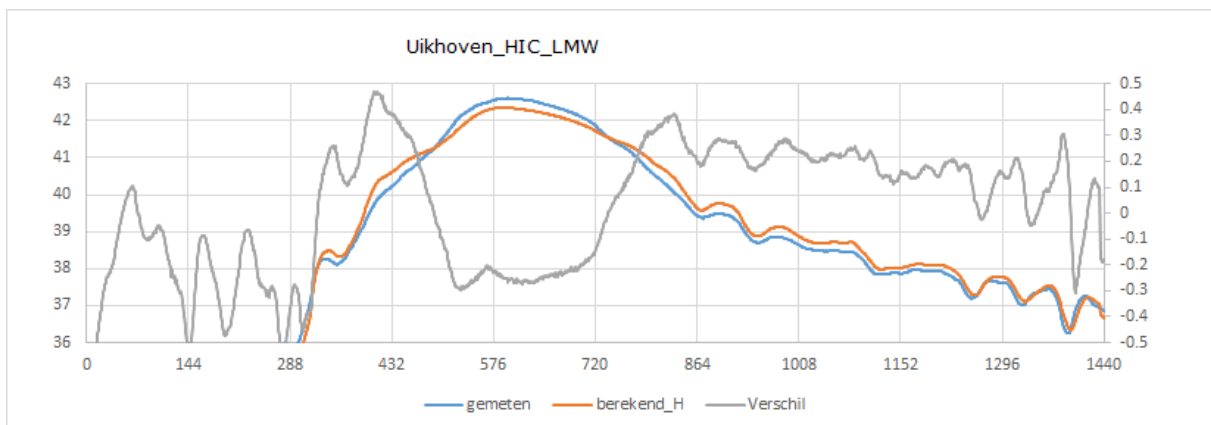
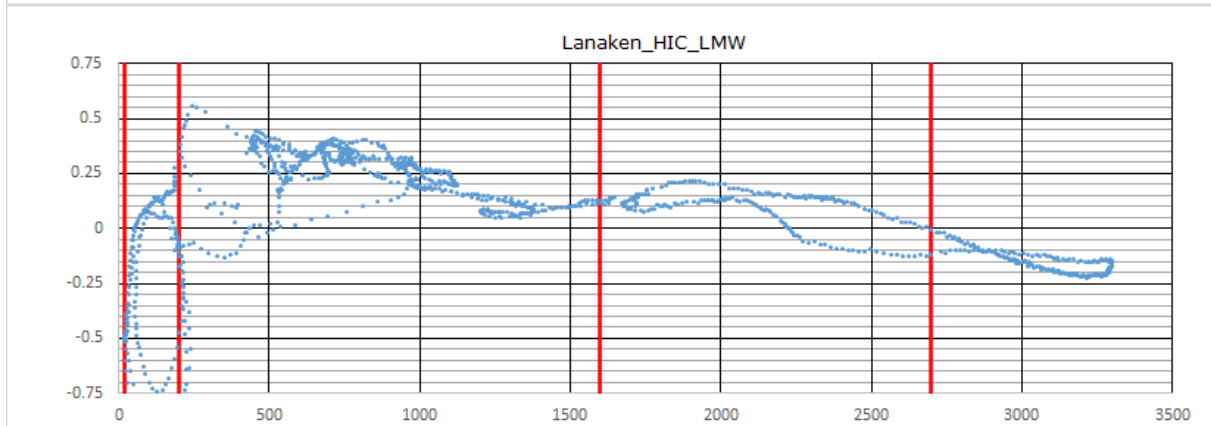
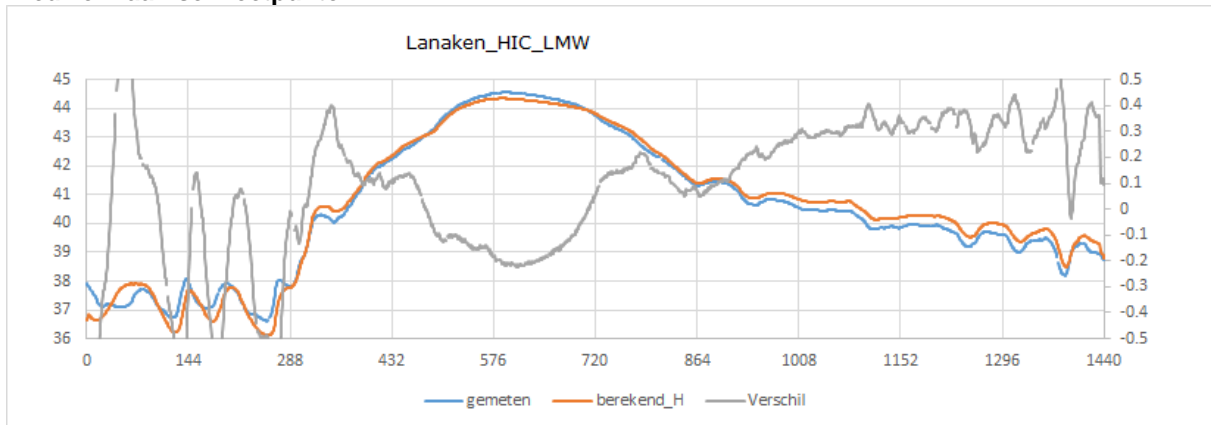
**B.2.2 na hoogwater 1995 verplaatste meetpunten**

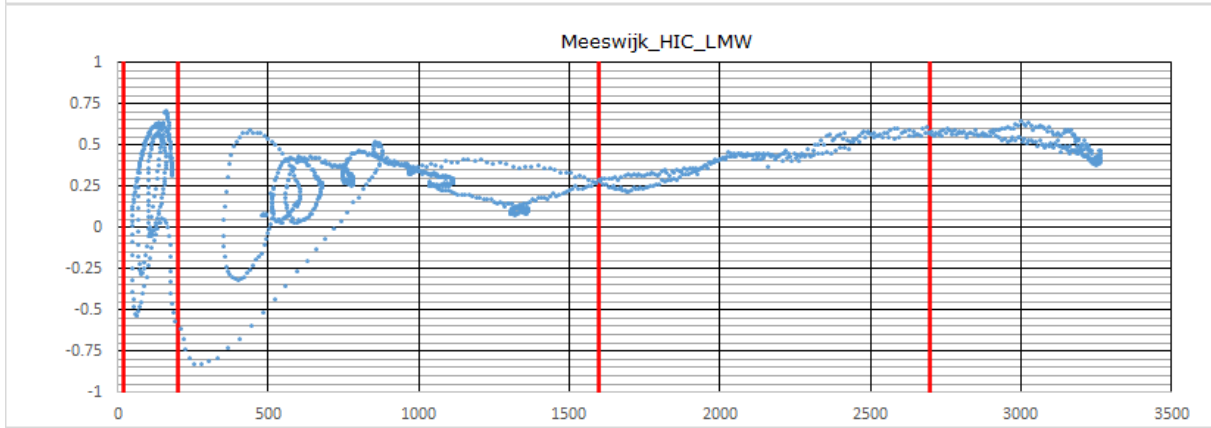
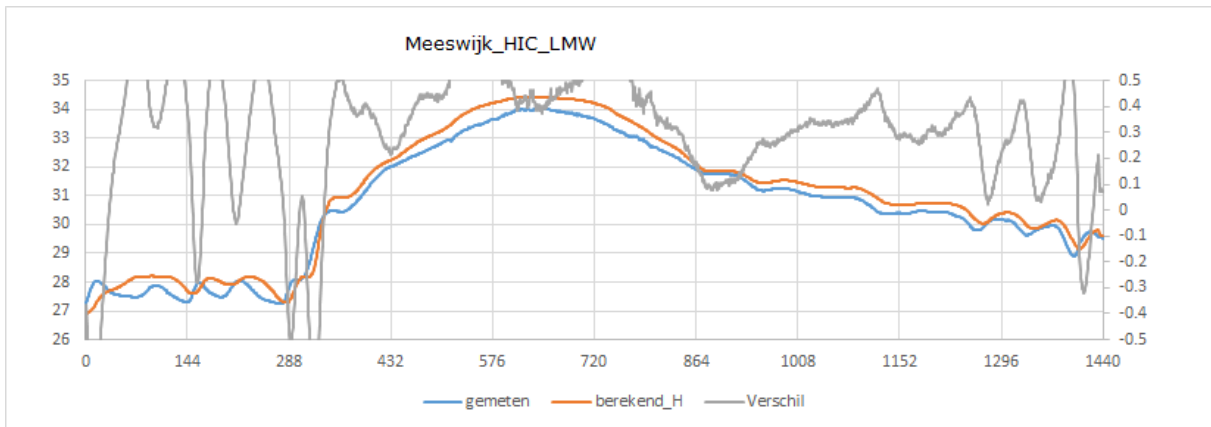
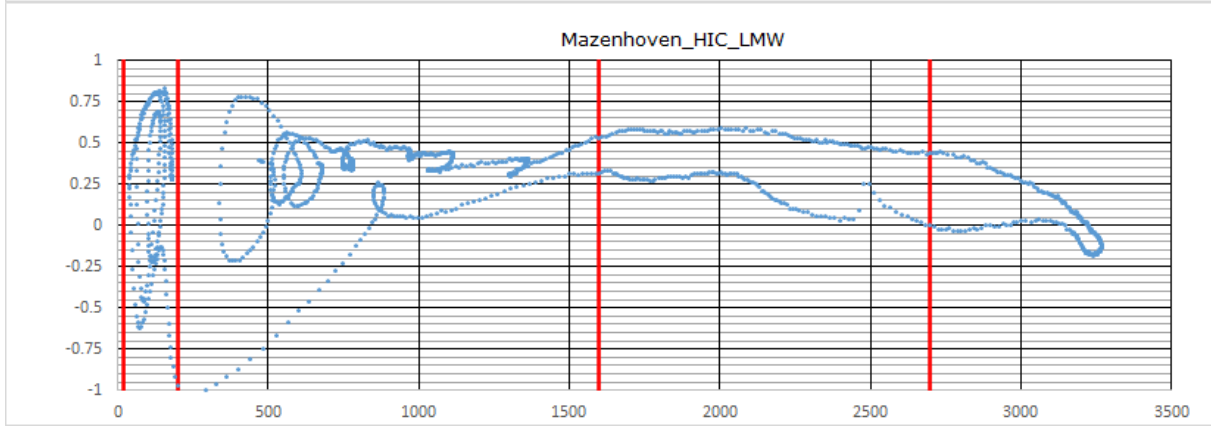
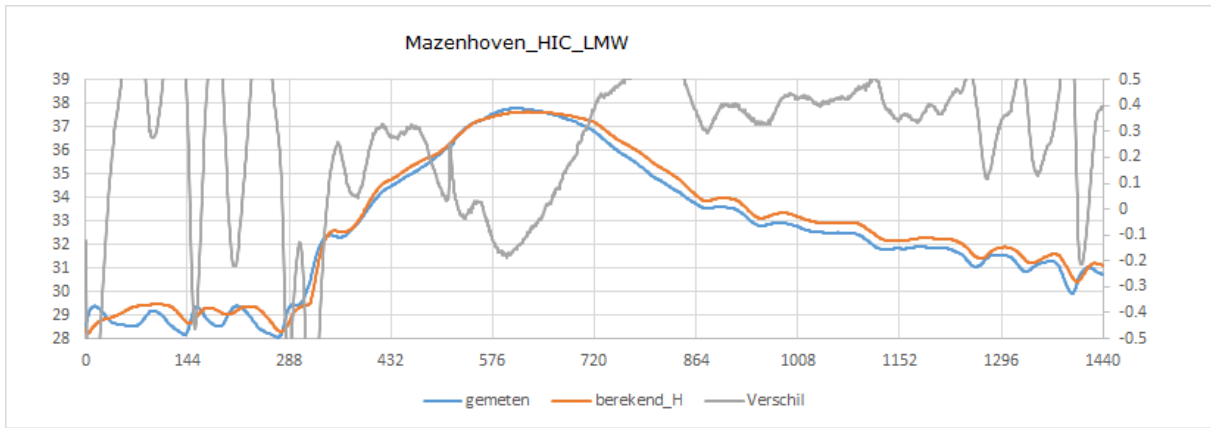




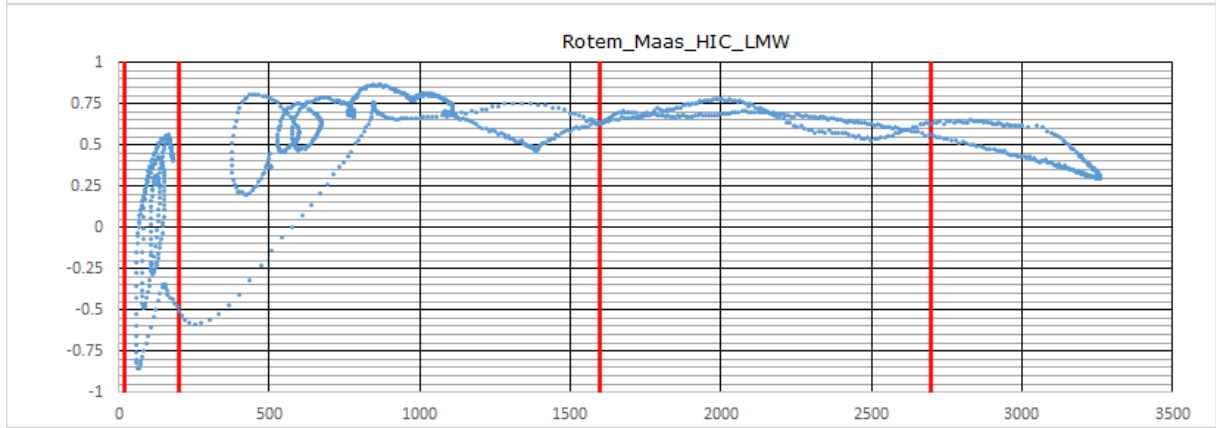
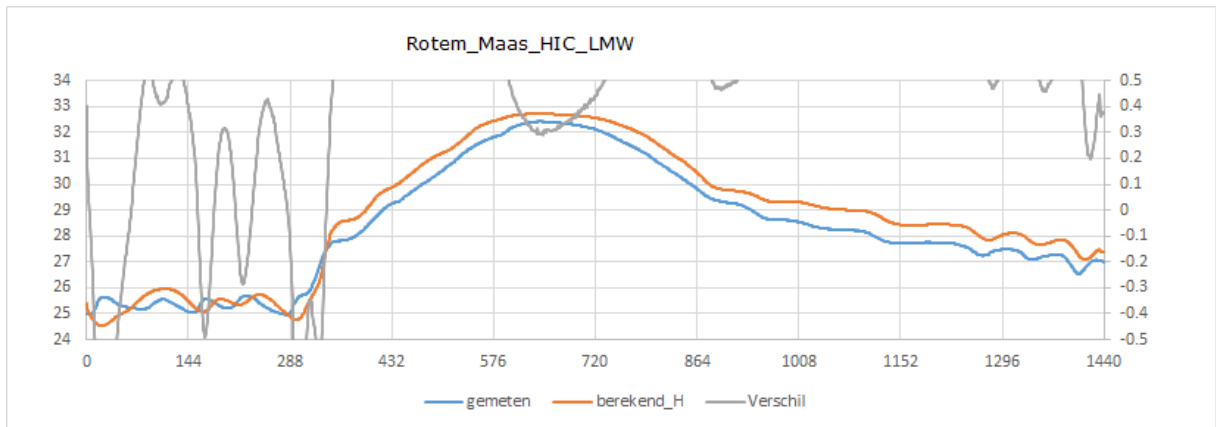
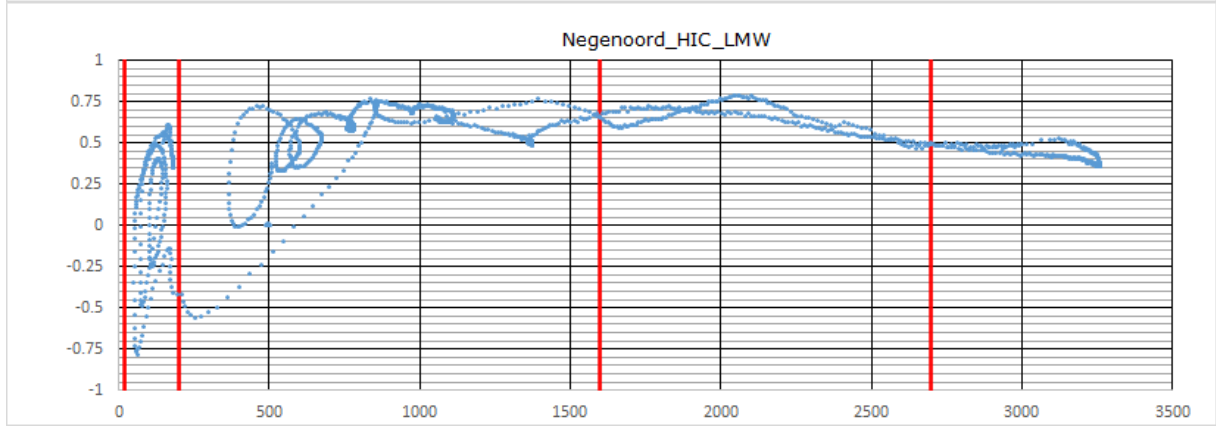
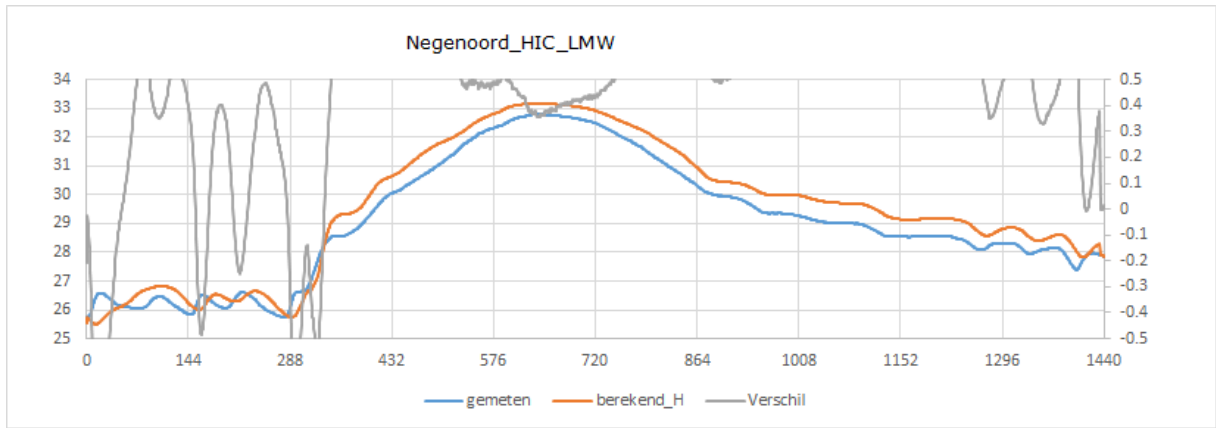


### B.2.3 Nieuwe Vlaamse meetpunten

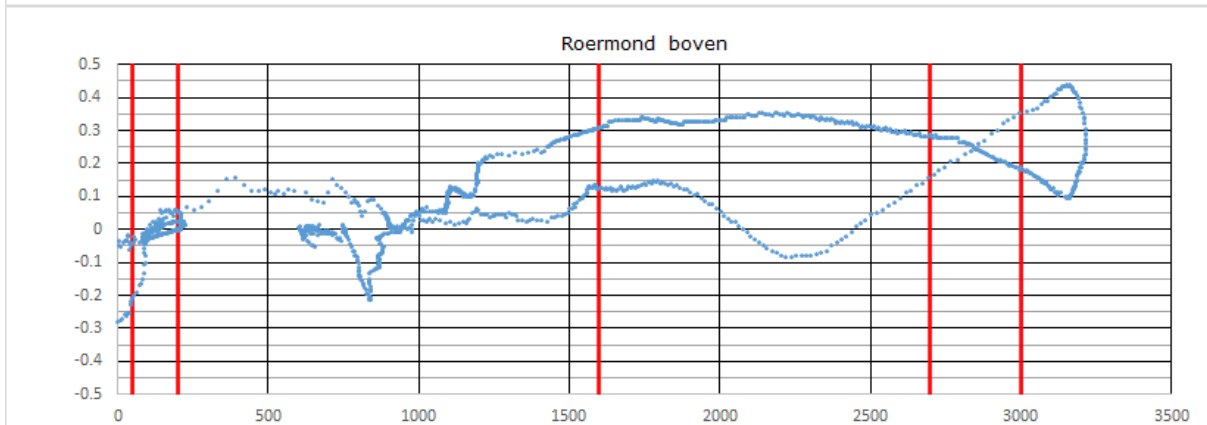
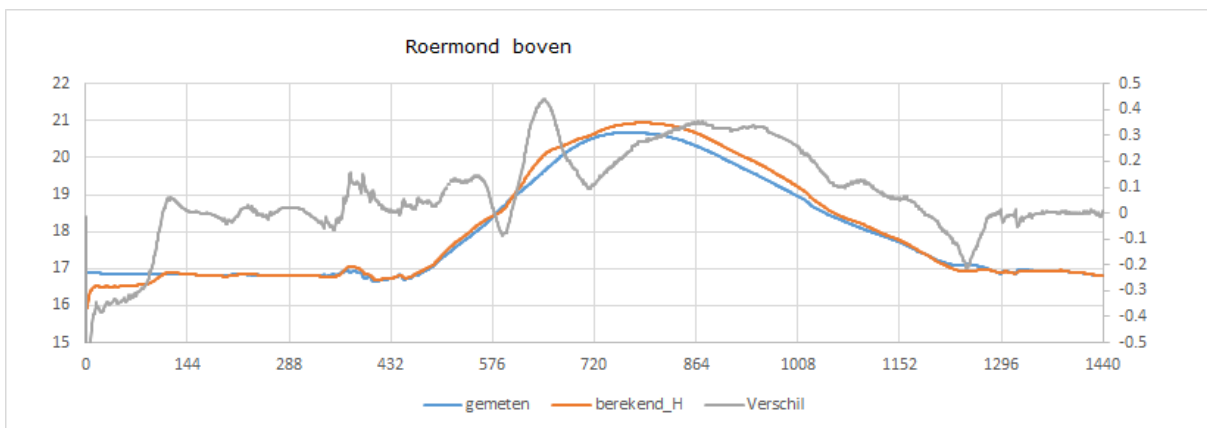
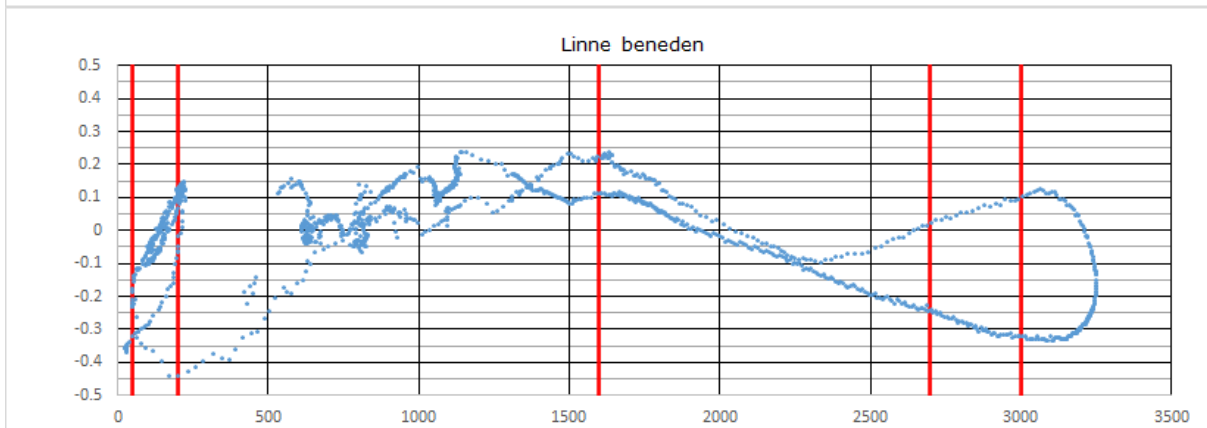
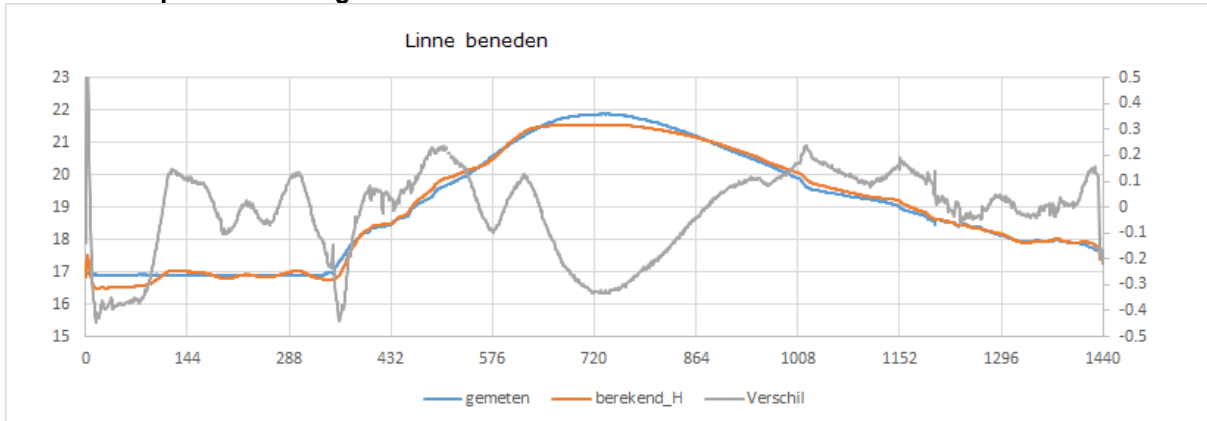


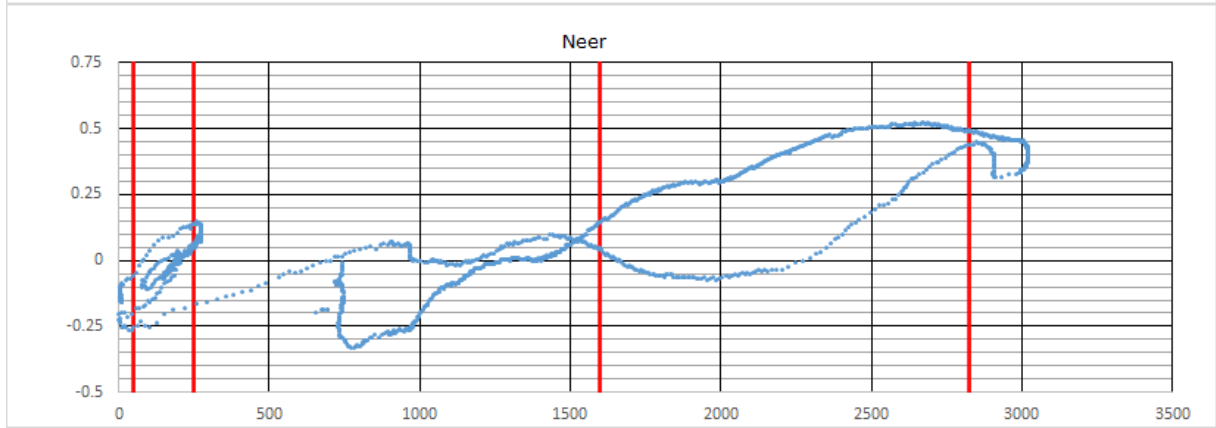
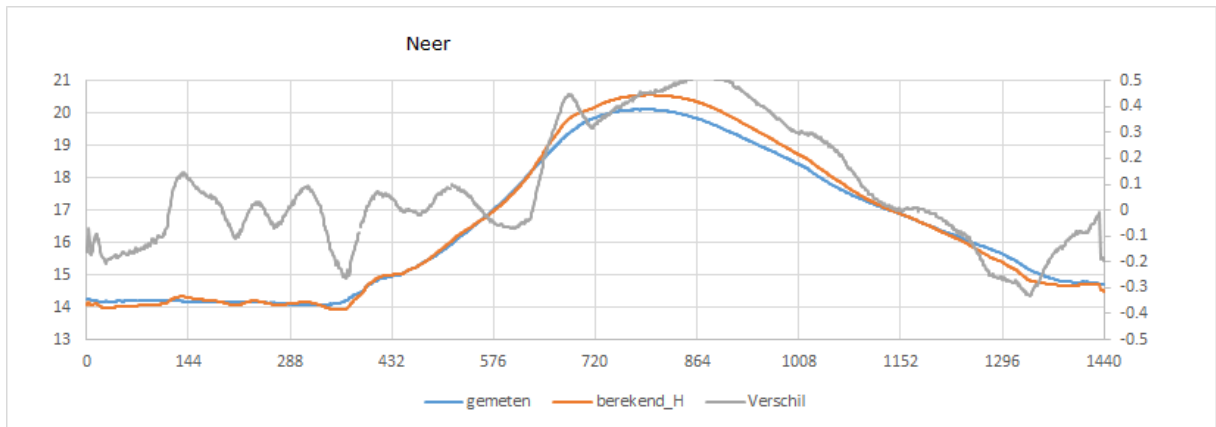
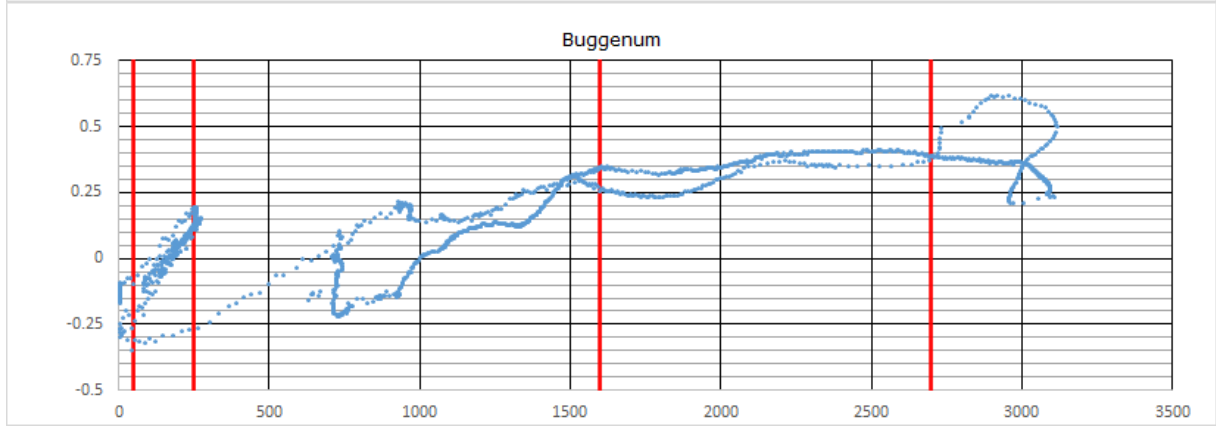
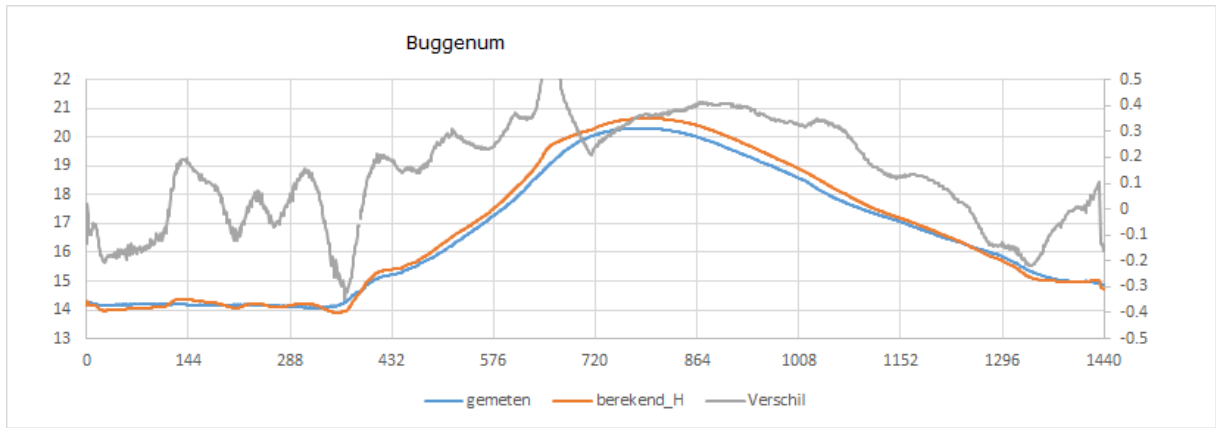


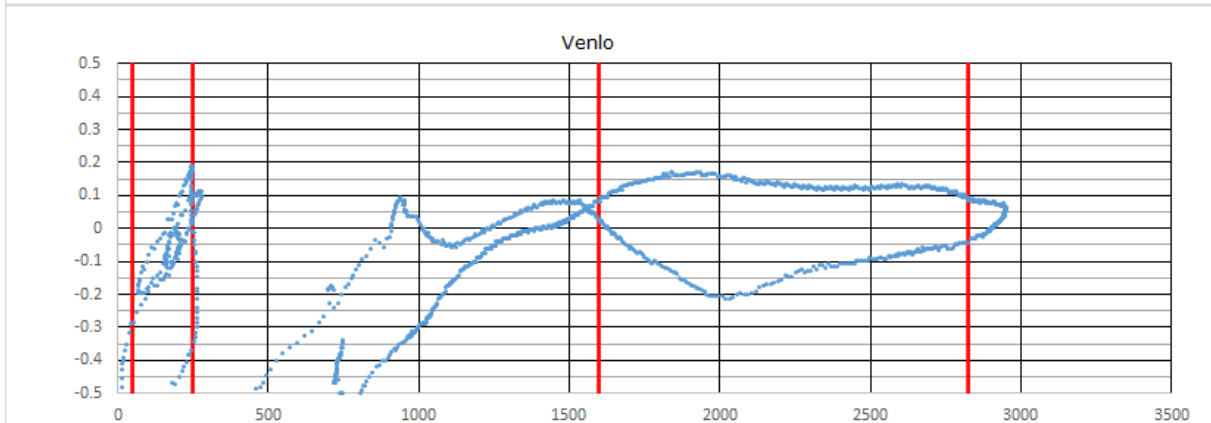
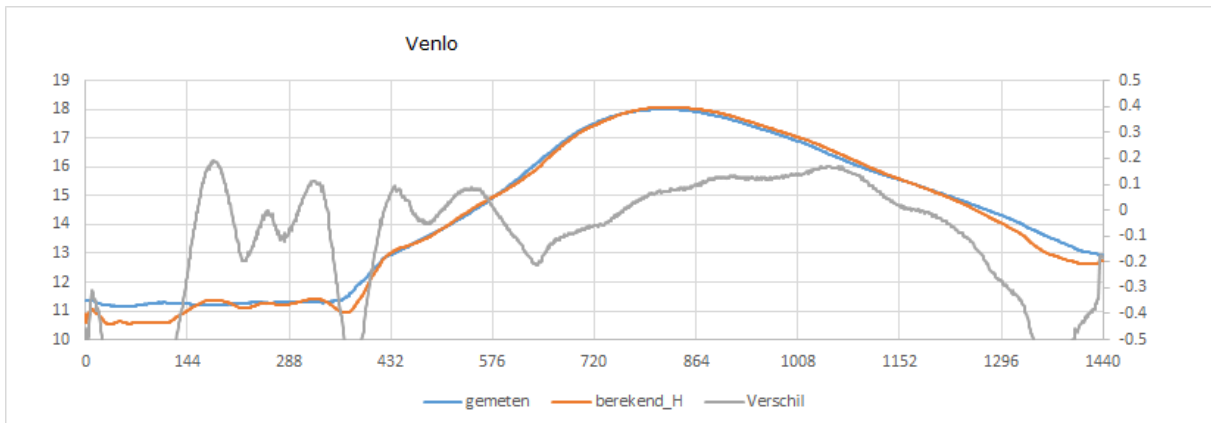
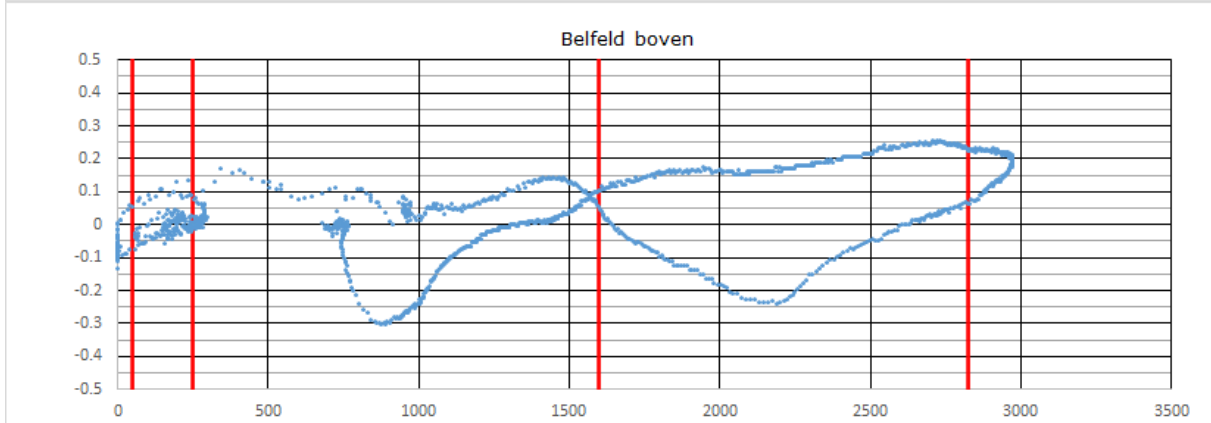
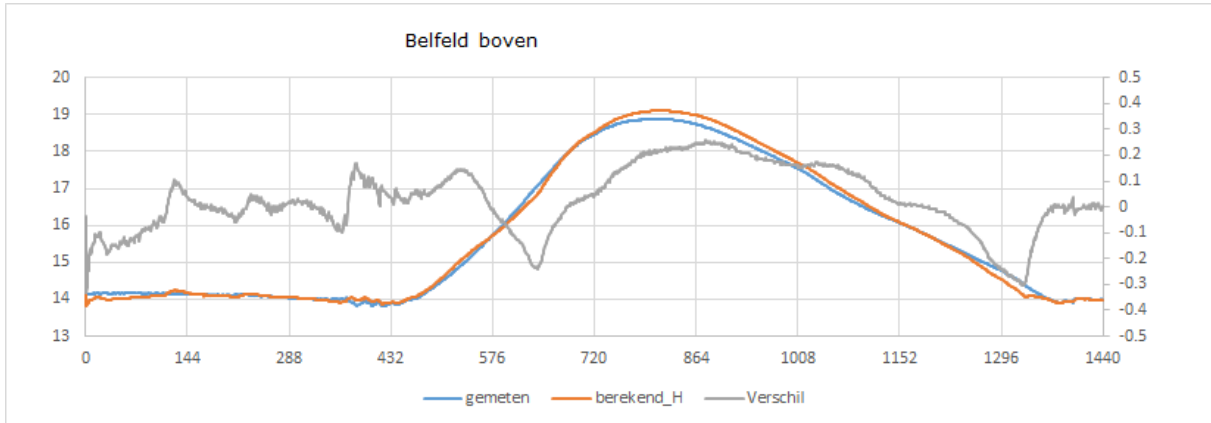


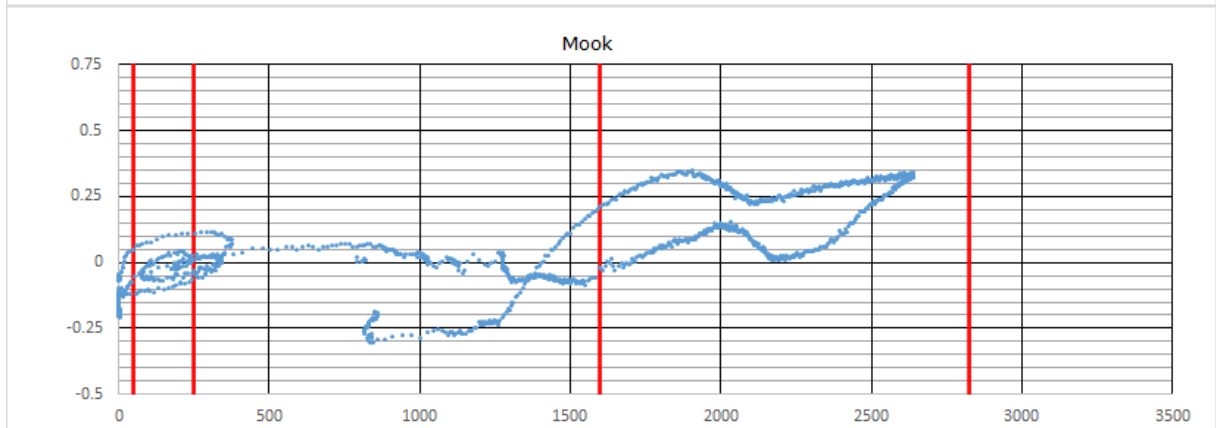
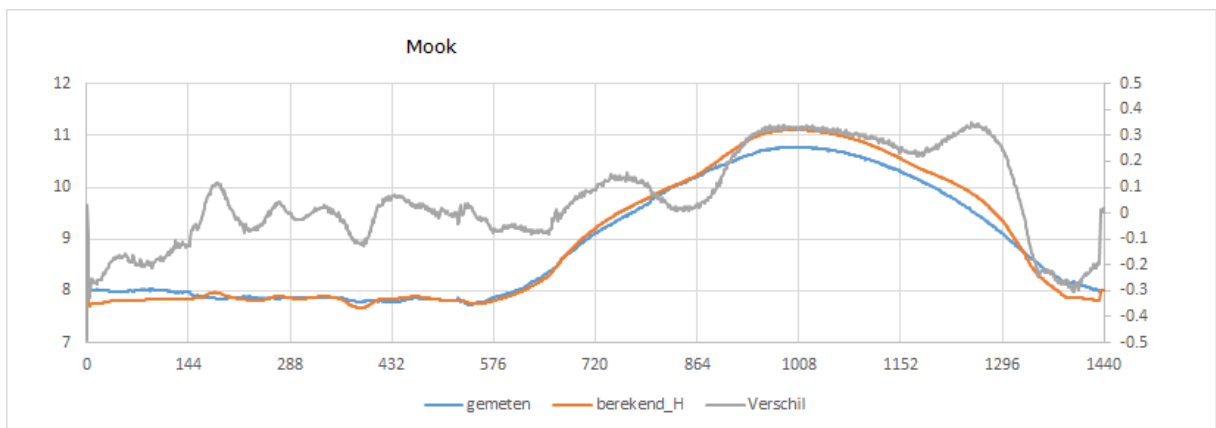
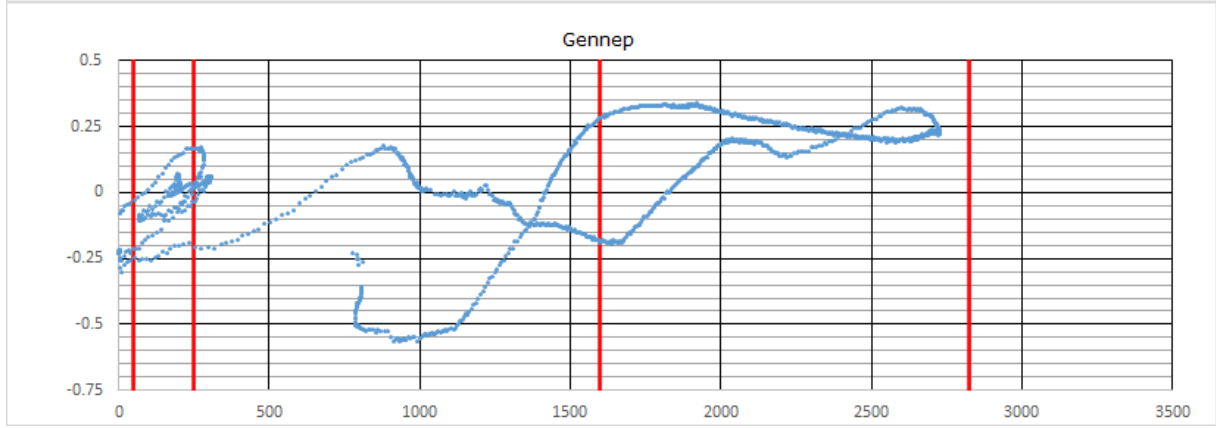
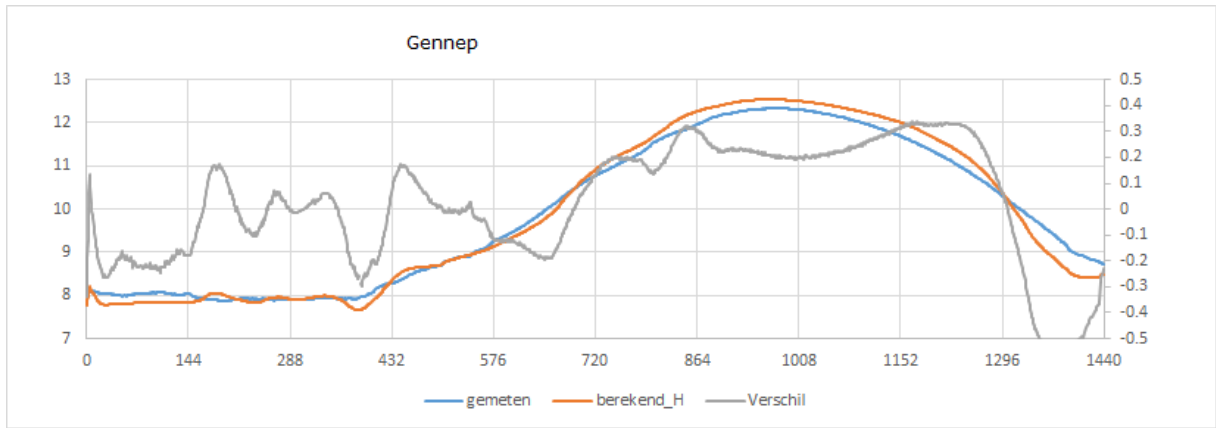


**B.2.4 Nieuwe meetpunten na hoogwater 1995**









## B.3 Bespreking resultaten

### B.3.1 Reproductie waterstanden bij ongestoorde meetpunten

Bij Borgharen-dorp zijn de verschillen zeer groot voor kalibratieniveau “midden”. Rond 1600 m<sup>3</sup>/s werkt dit ook door in bovenstroomse richting waardoor bij dit niveau ook bij Borgharen-Julianakanaal veel te hoge waterstanden worden berekend. Nabij de kalibratieniveaus “extreem laag” en “laag” bij Eijsden-grens, St. Pieter en Borgharen-Julianakanaal blijven de verschillen in het algemeen beperkt tot ca. 0.10 m. Bij het kalibratie niveau “midden” geldt dat ook voor Eijsden en St. Pieter.

Het berekende verval over stuw Borgharen is nabij de piek onjuist. Bij de top bij Borgharen-dorp bedraagt de afwijking berekend-gemeten ca. -0.11 m terwijl dat verschil bij Borgharen-Julianakanaal (750 m bovenstrooms) ca. -0.02 m bedraagt. Het berekende verval over de stuw is daarmee ca. 0.09 m hoger dan het gemeten verval.

Bij kalibratieniveau “hoog” valt op dat de berekende waterstanden bij Eijsden, St. Pieter, en Borgharen-Julianakanaal over het algemeen iets te hoog zijn. Bij Borgharen-dorp is de berekende waterstand 0.20 - 0.25 m te hoog. In het extrapolatiegebied bij afvoeren boven kalibratieniveau “hoog” valt op dat het verschil berekend – gemeten afneemt en bij Borgharen-dorp zelfs negatief wordt (berekende waterstand 0.11 m. te laag).

Tussen de kalibratieniveaus zijn incidenteel systematische verschillen zichtbaar in het afvoerafhankelijke verschil berekend minus gemeten waterstand. Bij Eijsden-grens bij ca. 600 m<sup>3</sup>/s, en bij 2000 m<sup>3</sup>/s. Bij St. Pieter bij 2000 m<sup>3</sup>/s.

Meetpunt Maaseik is bij kalibratieniveau “hoog” gebruikt. De kalibratieniveaus “extreem laag”, “laag” en “midden” voldoen bij dit meetpunt. Boven kalibratieniveau “midden” blijft de berekende waterstand vanaf een afvoer van ca. 2200 m<sup>3</sup>/s achter bij de gemeten waterstand. Op kalibratieniveau “hoog” is de berekende waterstand ca. 0.20 m lager dan de gemeten waterstand. Op de piek is de berekende waterstand 0.35 m lager dan de gemeten waterstand.

Als mogelijke oorzaken kunnen aangewezen worden:

- Verlaagde afvoer via oude Maas in vergelijking met hoogwater 1993 en 1995;
- Verruwd winterbed rechteroever direct benedenstrooms van het meetpunt.

Bij Stevensweert, Heel-boven en Heel-beneden zijn de verschillen berekend-minus gemeten waterstand zeer beperkt voor kalibratieniveau “extreem laag”, “laag” en “midden”. Bij kalibratieniveau “hoog” valt op dat de grootste afwijking optreden in het golffront bij Heel-beneden. Dit wijst op mogelijke fouten in de bergingsbeschrijving bij dit spitse hoogwater. De afwijking op de piek loopt bij deze drie meetpunten op tot ca. 0.20 m. In het extrapolatiegebied lijken deze verschillen te stabiliseren.

Bij Well-dorp en Sambeek-boven zijn de verschillen berekend-minus gemeten waterstand zeer beperkt voor kalibratieniveau “extreem laag” en “laag” maar nemen deze verschillen bij kalibratieniveau “midden” iets toe. De berekende afwijking op de piek bedraagt bij deze meetpunten ca. 0.26 m en 0.42 m (te laag). Bij Sambeek-boven is dit wellicht mede te wijten aan de problemen bij stuw Sambeek, waar de onderste rij Poirée-schuiven en de jukken van het Poirée-gedeelte niet verwijderd konden worden.

Bij Megen, Lith-dorp en Heesbeen zijn de verschillen berekend-minus gemeten waterstand beperkt tot maximaal ca. 0.10 m voor kalibratieniveaus “extreem laag”, “laag” en “midden” maar nemen deze verschillen bij kalibratieniveau “hoog” beduidend toe.

Over het algemeen wordt de piek op hetzelfde moment berekend als blijkt uit de metingen. Opvallend is verder dat boven het kalibratieniveau “midden” de verschillen direct toenemen bij Lith-dorp en Heesbeen vanaf 1500 m<sup>3</sup>/s. De berekende afwijking op de piek bedraagt bij Megen ca. 0.30 te hoog en bij Heesbeen 0.26 m te laag. Bij Lith-dorp bedraagt de afwijking minder dan ca. 0.10 m.

Bij Keizersveer zijn de verschillen uitermate beperkt omdat dit de modelrand vormt. Door kleine verschillen tussen het meetpunt Keizersveer en de modelrand in WAQUA is er sprake van een klein maar systematisch afvoerafhankelijk verschil

Over het algemeen worden de waterstanden bij de kalibratieniveaus “extreem laag”, “laag” en “midden” goed beschreven, maar zijn er bij kalibratieniveau “hoog” soms grotere verschillen. Voor het stuwpand Borgharen moet aandacht uitgaan naar het verval over stuw Borgharen. Benedenstrooms moet de aandacht uitgaan naar de afvoerbeschrijving en de bergingsbeschrijving.

### **B.3.2 Reproductie waterstanden bij verplaatste meetpunten**

Bij Elslloo zijn de verschillen op alle kalibratieniveaus behalve “midden” en “laag” hoog.

Tussen kalibratie “laag” en “midden” zijn de berekende waterstanden bij ca. 750 m<sup>3</sup>/s ca. 0.30 – 0.40 m te laag. Dit verschil neemt af tot ca. 0.15 m bij 1600 m<sup>3</sup>/s om vervolgens bij ca. 2700 m<sup>3</sup>/s weer op te lopen naar ca. 0.70 m. (te laag) Dit verschil stabiliseert vervolgens in het extrapolatiegebied.

Dit verloop van de verschillen kan met de beschikbare kalibratieniveaus niet goed worden opgelost omdat de beschrijving van de waterstanden tussen de kalibratieniveaus significant verslechterd als de kalibratieniveaus “midden” en “hoog” worden geoptimaliseerd. Vermoedelijk spelen hier tekortkomingen in de modellering een rol.

Belfeld-boven wordt op alle kalibratieniveaus tot en met “midden” redelijk goed beschreven. Vanaf kalibratieniveau “midden” zijn de berekende waterstanden in toenemende mate te hoog. Bij kalibratieniveau “hoog” is de berekende waterstand ca. 0.15 m te hoog. Boven dit niveau lijkt deze modeloverschatting verder toe te nemen.

Bij Belfeld-beneden worden de waterstanden bij kalibratieniveau onder “hoog” goed beschreven. Op de piek is de berekende waterstand 0.33 m te hoog. In de simulatie moet de eerste 1 dag buiten beschouwing blijven omdat deze sterk beïnvloed wordt door de initiële condities in de simulatie.

De berekende piekwaterstand bij Belfeld-beneden is ca. 0.32 m. te hoog terwijl die bij Belfeld-boven 0.21 m te hoog is. Dat betekent dat het verval over de stuw te laag wordt berekend.

Bij Sambeek-beneden zijn de modelresultaten bij kalibratieniveaus “extreem laag” en “laag” goed als in aanmerking wordt genomen dat de eerste dag van de simulatie beïnvloed wordt door het opgelegde initiële veld van 250 m<sup>3</sup>/s. Pas na ca. 24 uur is het effect daarvan bij Sambeek-beneden uitgewerkt. Bij kalibratieniveau “midden” worden de waterstanden in de simulatie in het golffront redelijk gesimuleerd. In de dalende fase functioneert kalibratie niveau “midden” minder goed. Voor het verschil in het golffront zijn twee mogelijke oorzaken aan te wijzen:

- Bergingseffecten (zichtbaar vanaf Roermond-boven);
- Verschillen tussen model en werkelijkheid rondom trekken stuwen.

Op het einde van de simulatie worden fors te lage waterstanden gesimuleerd. Vermoedelijk wordt dit veroorzaakt door het sluiten van de stuwen, waardoor de afvoerbeschrijving incorrect is (zie ook Grave-boven). Een tweede oorzaak kan liggen in het leegstromen van geïsoleerde lage delen van het winterbed wat in SOBEK erg kunstmatig wordt meegenomen.

Het verdient aanbeveling om de tijdreeks zowel aan golffront als aan het golfeinde uit te breiden, zodat beter zicht ontstaat op het totale verloop.

Opvallend is verder dat de piekstand bij Sambeek-beneden ca. 0.14 m te laag wordt berekend terwijl de piekstand bij Sambeek-boven 0.42 m te laag wordt berekend. Het verval over de stuw is daarmee 0.28 m te laag.

Tijdens het hoogwater was het niet mogelijk gebleken om de onderste rij schuiven van het Poirée-gedeelte van de stuw te trekken. Bijgevolg zijn ook de jukken van het Poirée gedeelte blijven staan. Dit veroorzaakt mogelijk een deel van de extra opstuwing.

Bij Grave-boven en Grave-beneden is het modelresultaat bij kalibratieniveau “extreem laag” en “laag” goed. Voor Grave boven geldt dat ook voor kalibratieniveau “midden”. Voor Grave-boven geldt bij dit kalibratieniveau enige onzekerheid ten aanzien van het al dan weghalen van de jukken van stuw Grave. Bij het hoogwater van juli 2021 was direct al duidelijk dat de jukken verwijderd moesten worden. Waarschijnlijk is dat eerder gebeurd dan gebruikelijk waardoor de gemeten waterstanden lager bleven dan in de simulatie.

Kalibratieniveau “hoog” wordt bij Grave niet bereikt, maar de tendens is bij beide meetpunten naar stabilisatie van het verschil berekend - gemeten

Waar de piekstand bij Grave-beneden ca. 0.20 m hoger is dan de metingen is dat bij Grave-boven ca. 0.05 m lager. Het verval over de stuw is daarmee ca. 0.25 m. te laag over het traject tussen beide meetpunten.

Bij Lith-boven en Lith-dorp is het modelresultaat bij kalibratieniveau “extreem laag”, “laag” en “midden” goed. Kalibratieniveau “hoog” wordt bij Lith niet bereikt, maar de tendens is bij Lith-boven is naar toenemend te hoge waterstanden in de simulatie. Op de piek zijn de berekende waterstanden ca. 0.14 m te hoog.

Waar de piekstand bij Lith-dorp ca. 0.05 m. hoger is dan de metingen is dat bij Lith-boven ca. 0.14 m hoger. Het verval over de stuw is daarmee ca. 0.09 te hoog over het traject tussen beide meetpunten.

### **B.3.3 Reproductie waterstanden nieuwe Vlaamse meetpunten**

Bij Lanaken voldoet het kalibratieniveau “extreem-laag” en “laag” minder goed. Het aantal beschikbare gegevens is echter te laag om dit goed te kunnen beoordelen. De waterstanden bij kalibratieniveau “midden” is de berekende waterstand 0.10 m. te hoog. Tussen deze kalibratieniveaus worden rond ca 600 m<sup>3</sup>/s echter systematisch ca. 0.40 m te hoge waterstanden berekend. Bij kalibratieniveau “hoog” zijn de berekende waterstanden iets te laag. Bij nog hogere afvoeren neemt dit verschil toe tot ca. 0.15 m bij ca 3100 m<sup>3</sup>/s bij nog hogere afvoeren lijkt het verschil te stabiliseren. Op de piek is de berekende waterstand ca. 0.22 m. lager dan de gemeten waterstand.

Bij Uikhoven voldoen kalibratieniveaus “extreem laag” en “laag” matig. De berekende waterstanden zijn ca 0.3 m te laag. Bij toenemende afvoeren boven kalibratieniveau “laag” (200 m<sup>3</sup>/s) slaat dit om. En bij ca. 600 m<sup>3</sup>/s zijn de berekende waterstanden ca. 0.25 te hoog. Dat verschil blijft tot ca. 1250 m<sup>3</sup>/s stabiel. Bij nog hogere afvoeren tot ca. 1600 m<sup>3</sup>/s. loopt het verschil op tot ca. 0.40 m. Bij nog hogere afvoeren neemt het verschil af. Bij kalibratieniveau hoog zijn de berekende waterstanden ca. 0.20 m lager dan de gemeten waterstanden. Bij nog hogere afvoeren stabiliseert dit verschil op ca. 0.25 m.



De kalibratie op hoogwater 1995 voor het traject Borgharen-dorp – Elsloo is bij lange na niet geldig voor meetpunt Uikhoven. Daarnaast lijkt de effectiviteit van maatregelen lijkt belangrijk lager te zijn dan verwacht.

Bij Eijsden-Mazenhoven voldoen kalibratieniveaus “extreem laag”, “laag” en “midden” matig. De berekende waterstanden zijn 0.30 – 0.40 m te hoog. Bij kalibratieniveau “hoog” loopt dit terug naar ca. 0.25 m. Op de piek is de berekende waterstand ca. 0.14 te laag. Opvallend bij dit meetpunt is verder de grote bandbreedte die zichtbaar is in de verschillen bij stijgende en bij dalende waterstanden.

Bij Meeswijk-veer voldoen kalibratieniveaus “extreem laag”, “laag” en “midden” matig. De berekende waterstanden zijn 0.30 – 0.40 m te hoog. Bij toenemende afvoeren direct boven kalibratieniveau “midden” (1600 m<sup>3</sup>/s) blijven de berekende waterstanden steeds verder achter bij de gemeten waterstanden. Bij kalibratie niveau “hoog” zijn de berekende waterstanden ca. 0.50-0.60 m. te laag. Op de piek is de berekende waterstand 0.38 m lager dan de gemeten waterstand. De kalibratie op hoogwater 1995 voor het traject Elsloo – Grevenbicht (inmiddels door meetpunt Rotem-maas vervangen meetpunt) is bij lange na niet geldig voor meetpunt Meeswijk-veer. Daarnaast lijkt de effectiviteit van maatregelen lijkt belangrijk lager te zijn dan verwacht.

Bij Negenoord voldoen kalibratieniveaus “extreem laag” en “laag” matig. Vanaf afvoeren boven 500 m<sup>3</sup>/s blijven de berekende waterstanden steeds 0.60 – 0.70 m achter bij de gemeten waterstanden. Bij kalibratie niveau “hoog” zijn de berekende waterstanden ca. 0.50 m te hoog. Op de piek is de berekende waterstand 0.36 m hoger dan de gemeten waterstand. De kalibratie op hoogwater 1995 voor het traject Elsloo – Grevenbicht (inmiddels door meetpunt Rotem-maas vervangen meetpunt) is bij lange na niet geldig voor meetpunt Meeswijk-veer.

Meetpunt Rotem vervangt sinds 2019 In het model ontbreekt dit meetpunt en is uitgegaan van Grevenbicht. Nabij het meetpunt is maatregel Koeweide in uitvoering. De status van de voortgang van de werkzaamheden passen niet noodzakelijkerwijs bij de modellering in het model. Dat kan een belangrijke bron van verschillen zijn.

Vanaf afvoeren boven 500 m<sup>3</sup>/s blijven de berekende waterstanden steeds 0.60 – 0.70 m achter bij de gemeten waterstanden. Bij kalibratie niveau “hoog” zijn de berekende waterstanden ca. 0.60 m te hoog. Op de piek is de berekende waterstand 0.29 m hoger dan de gemeten waterstand. De kalibratie op hoogwater 1995 voor het traject Elsloo – Grevenbicht (inmiddels door meetpunt Rotem-maas vervangen meetpunt) is bij lange na niet geldig voor meetpunt Rotem\_Maas.

#### **B.3.4 Reproductie waterstanden nieuwe meetpunten na hoogwater 1995**

Bij Linne-beneden voldoen kalibratieniveaus “extreem laag” en “laag”. Bij Kalibratieniveau “midden” zijn de berekende waterstanden ca. 0.15 m. te hoog.

Bij kalibratieniveau “hoog” zijn de waterstanden systematisch ca. 0.20 m te laag Op de piek is de berekende waterstand 0.33 m lager dan de gemeten waterstand. Vermoedelijk wordt een deel van het verschil veroorzaakt door de in het model opgenomen kortsluiting (rkm 72.8) waarmee water onttrokken wordt (rkm 69.4) en verder benedenstrooms weer wordt geloosd (rkm 72.8).

Bij Roermond-boven en Buggenum voldoen kalibratieniveaus “extreem laag” en “laag”. Bij kalibratieniveau “midden” en “hoog” zijn de berekende waterstanden respectievelijk 0.25 en 0.30 m. te hoog. Bij Buggenum neemt dat verschil nog verder toe bij hogere afvoeren. Op de piek is de berekende waterstand bij Roermond-boven 0.26 m hoger dan de gemeten waterstand. Bij Buggenum is dat 0.36 m.

Bij Neer voldoen kalibratieniveaus “extreem laag” en “laag”. Bij kalibratieniveau “midden” zijn de berekende waterstanden ca. 0.10 m hoger dan de gemeten waterstanden. Vanaf dit kalibratieniveau worden de verschillen groter. Bij kalibratieniveau “hoog” zijn de berekende waterstanden ca. 0.45 m hoger dan de gemeten waterstanden. Op de piek is de berekende waterstand bij Neer 0.46 m hoger dan de gemeten waterstand.

Bij Belfeld-boven voldoen kalibratieniveaus “extreem laag” en “laag”. Bij kalibratieniveau “midden” zijn de berekende waterstanden ca. 0.05 m hoger dan de gemeten waterstanden. Bij kalibratieniveau “hoog” zijn de verschillen toegenomen tot 0.10 – 0.20 m. Op de piek is de berekende waterstand bij Belfeld-boven 0.21 m hoger dan de gemeten waterstand.

Bij Venlo voldoen kalibratieniveaus “extreem laag”, “laag” en “midden”. Bij kalibratieniveau “hoog” zijn de berekende waterstanden ca. 0.05 m hoger dan de gemeten waterstanden. Op de piek is de berekende waterstand bij Venlo 0.07 m hoger dan de gemeten waterstand.

Bij Gennep voldoen kalibratieniveaus “extreem laag” en “laag”. Kalibratieniveau “hoog” wordt niet bereikt. De tendens tot 2000 m<sup>3</sup>/s is echter een toenemende overschatting van gemeten waterstanden. Bij nog hogere afvoeren stabiliseert dit verschil. Op de piek is de berekende waterstand bij Gennep 0.21 m. hoger dan de gemeten waterstand.

Bij Mook voldoen kalibratieniveaus “extreem laag” en “laag”. Vanaf ca. 1400 m<sup>3</sup>/s worden de berekende waterstanden systematisch hoger dan de gemeten waterstanden. Bij kalibratieniveau “midden” zijn de berekende waterstanden ca. 0.15 m. te hoog en op de piek 0.20 m.

Empel-beneden ontbreekt in de uitvoerpunten van het SOBEK-model.

## C Effect van uitgevoerde maatregelen

Deze bijlage beschrijft analyses die zijn uitgevoerd voor de beantwoording van vraag A.2:

“Wat is het waterstandseffect van de uitgevoerde maatregelen sinds 1993/1995? Kan het model het effect van de uitgevoerde maatregelen voldoende berekenen?”

### C.1 Overzicht WAQUA-modellen

Schematisatie	Achtergrond en documentatie
- J93_5 - Ref95_5 - J03_5	Deze WAQUA-modellen zijn gemaakt door Deltares in het kader van de kalibratie en validatie van de 5G WAQUA-modellen. (Becker, 2012)
- J21_5	Dit WAQUA-model is gemaakt in het kader van de jaarlijkse actualisatie van WAQUA- en SOBEK-modellen van de Maas. (Van der Veen et al., 2021)
- beno17-GM01	Dit WAQUA-model is gemaakt voor het Grensmaas-project in het kader van onderzoek naar stroomsnelheden in verschillende situaties (Meijer & Agtersloot, 2020)

### C.2 Effect van individuele ingrepen langs de Maas

Het is lastig om het singuliere effect van een (rivierverruimende) ingreep te bepalen uit metingen. Een alternatief is het bepalen van veranderingen in Qh-relaties uit zowel metingen als berekeningen. Belangrijk hierbij is dan dat er sprake is van één duidelijk te onderscheiden ingreep en een MWS-waterstandsmmeetpunt in de (bovenstroomse) nabijheid van de ingreep. Kijkend naar de rivierverruimingsproject die door Maaswerken zijn uitgevoerd levert dit onderstaand overzicht op.

Ingreep	Start	Klaar	Traject	Referentie	Hoogwater(s)	MSW-check
DGR-kaden	1995	1998	2 – 160	1995	2003, 2011	Alle
VSL	2006	2007	176 – 182	2003	2007, 2011	Mook, Grave_boven, Gennep
VSG	2010	2013	156 – 175	2007	2012, 2014	Gennep, Sambeek_beneden, Sambeek_boven, Well
VSS	2013	2015	109 – 120	2012	2014, 2017	Venlo, Belfeld_beneden, Belfeld_boven
Borgharen	2011	2012	17 – 20	2011	2012, 2014	Borgharen-dorp, Borgharen-Julianakanaal

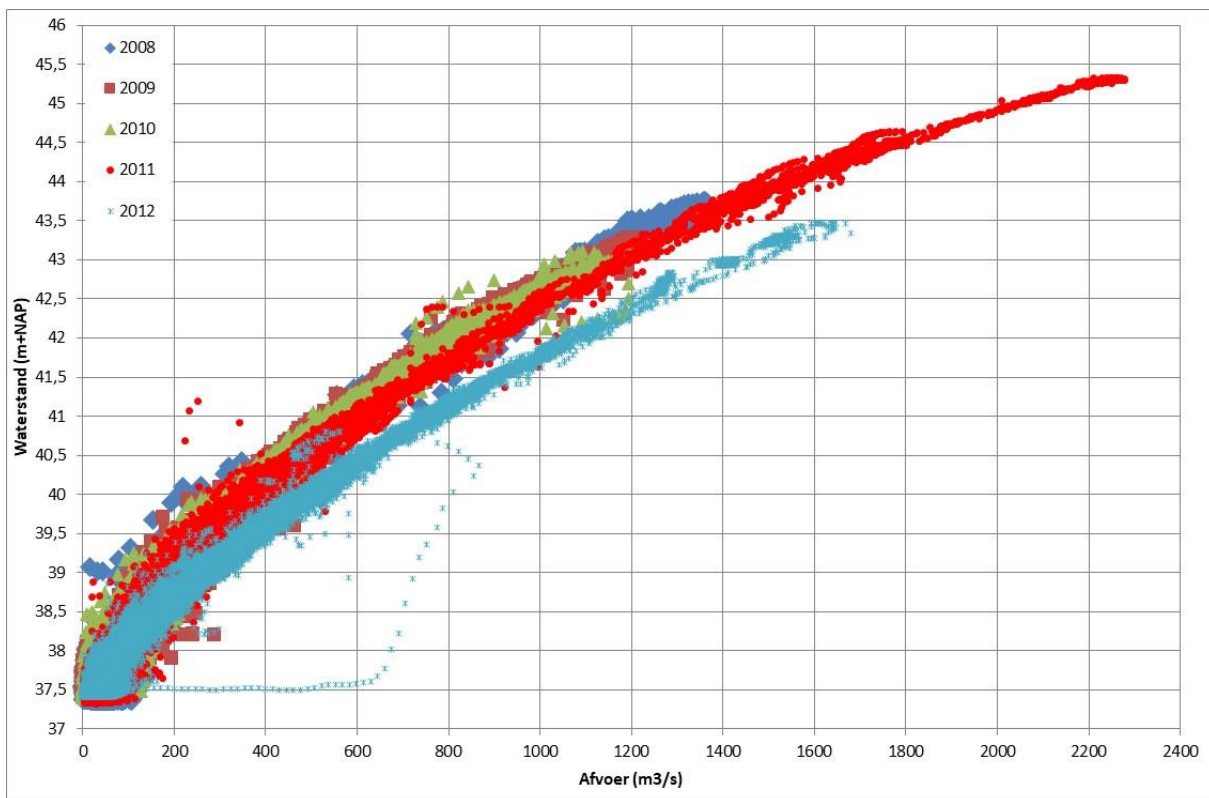
Na 1995 zijn tien hoogwaters / hoge afvoer situaties geweest die gebruikt kunnen worden bij de beoordeling van effecten van ingrepen.

Situatie (jaar_maand)	Piekafvoer (m <sup>3</sup> /s)
HW1995_01	2750
HW2001_01	1930
HW2001_03	1860
HW2002_01	2030
HW2003_01	2550
HW2007_01	1660
HW2011_01	2300
HW2012_01	1680
HW2014_12	1160
HW2017_03	1010

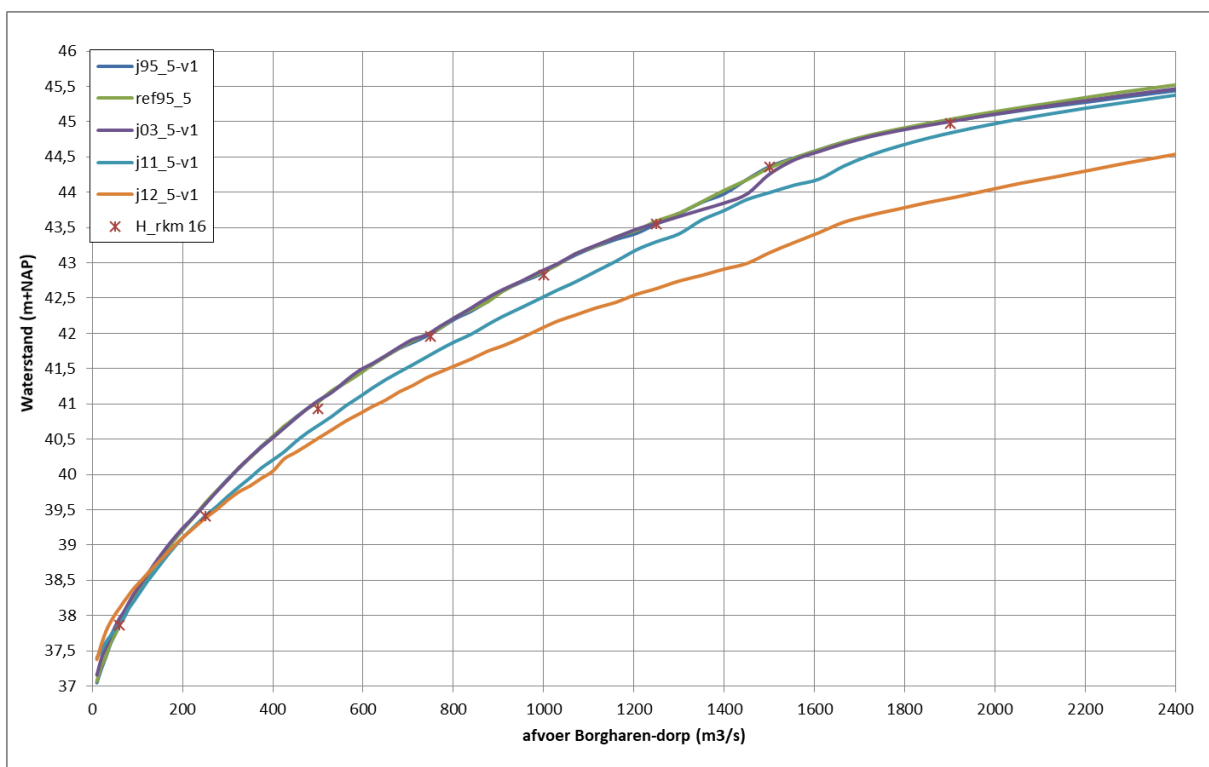
Het prettige is dat van heel veel jaren ook 5G WAQUA-modellen bestaan. Met de meeste van die modellen zijn simulaties uitgevoerd (89 stationaire afvoeren waarbij tussen twee afvoerniveaus circa 10 cm waterstandsverschil zit) waaruit eenvoudig voor alle locaties Qh-relaties kunnen worden bepaald. Vervolgens kunnen de gemeten en berekende waterstanden met elkaar worden vergeleken.

In theorie werkt de bovenbeschreven methode (verandering in Qh-relaties), maar is het ook in de praktijk zichtbaar? Het antwoord daarop is 'ja, uit metingen van waterstanden en afvoeren zijn veranderingen in een Qh-relatie zichtbaar'. Er is een test uitgevoerd voor de ingreep Borgharen en het meetpunt Borgharen-dorp. De onderstaande twee figuren laten voor het meetpunt Borgharen-dorp de Qh-relatie zien van verschillende jaren.

Duidelijk zichtbaar is de verandering in 2012 als gevolg van (de start van) de uitvoering van de rivierverruiming Borgharen. De gemeten verandering (circa 0,75 meter) komt redelijk goed overeen met de berekende verandering (circa 0,75 meter). Ook is de overeenkomst tussen de absolute waterstanden behoorlijk goed.



Figuur 8.1 Relatie tussen gemeten waterstand en afvoer bij Borgharen Dorp in verschillende jaren



Figuur 8.2 Relatie tussen gemodelleerde waterstand en afvoer bij Borgharen Dorp in verschillende jaren

## D Effect zomerbedruwheid

Deze bijlage beschrijft analyses die zijn uitgevoerd voor de beantwoording van vraag A.3:

“Wat is het effect van (zomer)vegetatie op de opgetreden waterstanden?”

### D.1 Parameters voor zomervegetatie

Bestanden uit het onderzoek van Van Velzen et al. (2005) zijn aangeleverd door RWS. In de modelsimulaties is gebruik gemaakt van onderstaande beschrijving van de ecotopen. Alle overige ecotopen in de beschrijving zijn gelijk gehouden.

Onderstaande tekst verwijst naar Jesse (2005). Dit memo bevat gelijke informatie als opgenomen Van Velzen et al. (2005). De invoer voor de winterbedvegetatie is vergeleken met actuele modellen (Van der Veen et al., 2021) en wordt nog altijd met deze parameters toegepast.

#### Winterbedvegetatie

```
# CODE 1201-1300 : Ruwheids formulering voor door- en overstroomde vegetatie
# r_code          : de ruwheids code
# a              : de vegetatie hoogte          (0.001 - 0.2 - 50.)
# b              : de vegetatie dichtheid      (0.0001 - 0.2 - 100.)
# c              : drag coefficient            (0.1 - 1.8 - 10.)
# d              : k-Nikuradse (onderlaag begroeiing) (0.001 - 0.2 - 100.)
#
r_code = 1201 a = 0.06 b = 45.   c = 1.8 d = 0.1 # productiegrasland
r_code = 1202 a = 0.10 b = 12.   c = 1.8 d = 0.1 # natuurlijk gras/hooiland
r_code = 1203 a = 0.20 b = 15.   c = 1.8 d = 0.1 # verruigd grasland
r_code = 1211 a = 0.30 b = 3.    c = 1.8 d = 0.1 # akkerdistelruigte
r_code = 1212 a = 0.56 b = 0.23 c = 1.8 d = 0.1 # droge ruigte
r_code = 1213 a = 0.50 b = 0.56 c = 1.8 d = 0.1 # dauwbraamruigte
r_code = 1214 a = 0.95 b = 0.13 c = 1.8 d = 0.1 # wilgenroosje ruigte
r_code = 1215 a = 2.00 b = 0.16 c = 1.8 d = 0.1 # rietruigte
r_code = 1221 a = 0.35 b = 0.25 c = 1.8 d = 0.1 # natte ruigte homogeen
r_code = 1222 a = 0.30 b = 1.2   c = 1.8 d = 0.1 # zegge homogeen
r_code = 1223 a = 1.00 b = 0.4   c = 1.8 d = 0.1 # rietgras homogeen
r_code = 1224 a = 0.50 b = 1.2   c = 1.8 d = 0.1 # biezen homogeen
r_code = 1225 a = 1.50 b = 0.35 c = 1.8 d = 0.1 # lisdodde homogeen
r_code = 1226 a = 2.50 b = 0.37 c = 1.8 d = 0.1 # riet homogeen
r_code = 1231 a = 6.00 b = 0.13 c = 1.5 d = 0.4 # zachthoutstruweel
r_code = 1232 a = 3.00 b = 0.041 c = 1.5 d = 0.4 # griend
r_code = 1233 a = 5.00 b = 0.17 c = 1.5 d = 0.4 # doornstruweel
r_code = 1241 a = 10.00 b = 0.011 c = 1.5 d = 0.3 # productiebos hardhout
r_code = 1242 a = 10.00 b = 0.010 c = 1.5 d = 0.3 # productiebos zachthout
r_code = 1243 a = 10.00 b = 0.016 c = 1.5 d = 0.3 # productiebos naaldbout
r_code = 1244 a = 10.00 b = 0.023 c = 1.5 d = 0.4 # hardhoutoobos
r_code = 1245 a = 10.00 b = 0.028 c = 1.5 d = 0.6 # zachthoutoobos
r_code = 1246 a = 3.00 b = 0.024 c = 1.5 d = 0.2 # boomgaard laagstam
r_code = 1247 a = 6.00 b = 0.01 c = 1.5 d = 0.2 # boomgaard hoogstam
r_code = 1250 a = 0.15 b = 0.15 c = 1.8 d = 0.1 # pioniervegetatie
```

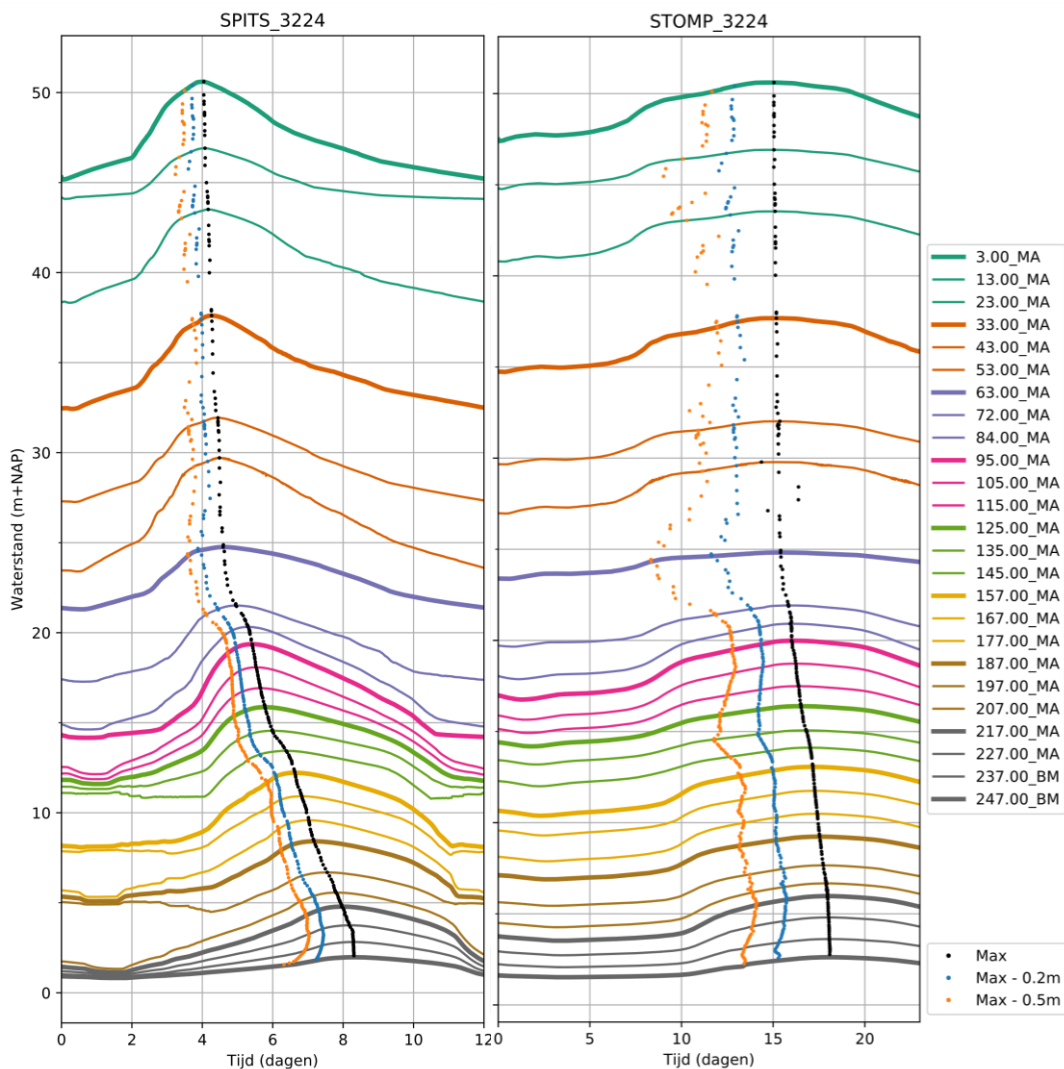
## Zomervegetatie

```
# CODE 1201-1300 : Ruwheids formulering voor door- en overstroomde vegetatie
# r_code       : de ruwheids code
# a           : de vegetatie hoogte           (0.001 - 0.2 - 50.)
# b           : de vegetatie dichtheid       (0.0001 - 0.2 - 100.)
# c           : drag coefficient              (0.1 - 1.8 - 10.)
# d           : k-Nikuradse (onderlaag begroeiing) (0.001 - 0.2 - 100.)
#
# waarden aangepast voor zomeromstandigheden (Ref. Jesse, Vegetatie in de zomer, 17-11-2005)
r_code = 1201 a = 0.13 b = 45.    c = 1.8 d = 0.1 # productiegrasland
r_code = 1202 a = 0.19 b = 12.    c = 1.8 d = 0.1 # natuurlijk gras/hooiland
r_code = 1203 a = 0.45 b = 0.50   c = 1.8 d = 0.1 # verruigd grasland
r_code = 1211 a = 0.80 b = 0.30   c = 1.8 d = 0.1 # akkerdistelruigte
r_code = 1212 a = 1.00 b = 0.35   c = 1.8 d = 0.1 # droge ruigte
r_code = 1213 a = 0.80 b = 0.84   c = 1.8 d = 0.1 # dauwbraamruigte
r_code = 1214 a = 1.50 b = 0.20   c = 1.8 d = 0.1 # wilgenroosje ruigte
r_code = 1215 a = 2.00 b = 0.24   c = 1.8 d = 0.1 # rietruigte
r_code = 1221 a = 0.80 b = 0.38   c = 1.8 d = 0.1 # natte ruigte homogeen
r_code = 1222 a = 1.00 b = 0.34   c = 1.8 d = 0.1 # zegge homogeen
r_code = 1223 a = 1.00 b = 0.60   c = 1.8 d = 0.1 # rietgras homogeen
r_code = 1224 a = 2.00 b = 0.37   c = 1.8 d = 0.1 # biezen homogeen
r_code = 1225 a = 1.50 b = 0.53   c = 1.8 d = 0.1 # lisdodde homogeen
r_code = 1226 a = 2.50 b = 0.56   c = 1.8 d = 0.1 # riet homogeen
r_code = 1231 a = 6.00 b = 0.20   c = 1.5 d = 0.4 # zachthoutstruweel
r_code = 1232 a = 3.00 b = 0.06   c = 1.5 d = 1.0 # griend
r_code = 1233 a = 5.00 b = 0.26   c = 1.5 d = 0.4 # doornstruweel
r_code = 1241 a = 10.00 b = 0.011  c = 1.5 d = 0.6 # productiebos hardhout
r_code = 1242 a = 10.00 b = 0.010  c = 1.5 d = 0.6 # productiebos zachthout
r_code = 1243 a = 10.00 b = 0.016  c = 1.5 d = 0.6 # productiebos naaldhout
r_code = 1244 a = 10.00 b = 0.028  c = 1.5 d = 1.0 # hardhoutoibos
r_code = 1245 a = 10.00 b = 0.034  c = 1.5 d = 1.0 # zachthoutoibos
r_code = 1246 a = 3.00 b = 0.041  c = 1.5 d = 0.4 # boomgaard laagstam
r_code = 1247 a = 6.00 b = 0.01    c = 1.5 d = 0.4 # boomgaard hoogstam
r_code = 1250 a = 0.30 b = 0.23   c = 1.8 d = 0.1 # pioniervegetatie
r_code = 1251 a = 2.40 b = 0.60   c = 1.8 d = 0.1 # akker
```

# E Analyse topvervlakking

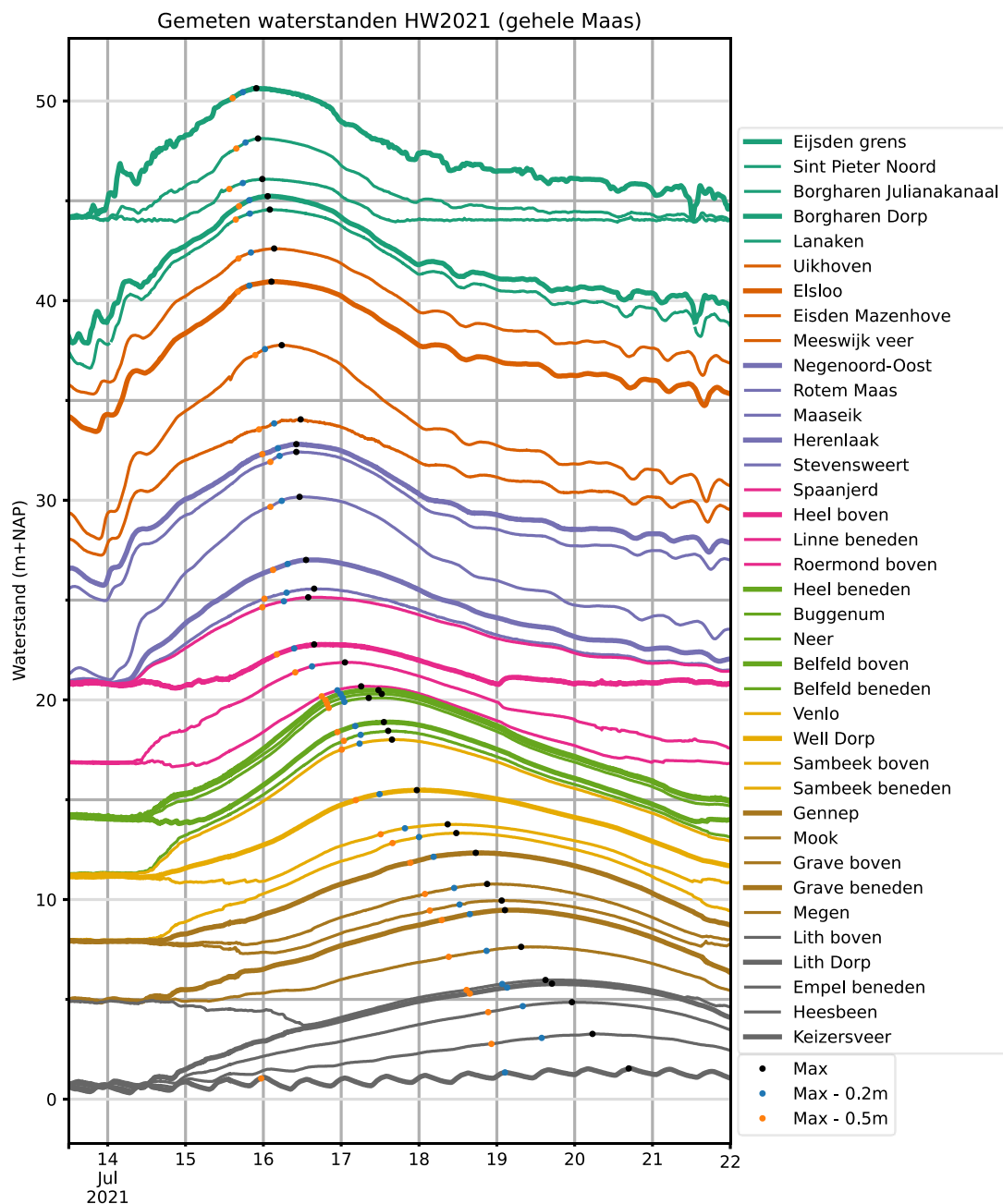
Deze bijlage beschrijft analyses die zijn uitgevoerd voor de beantwoording van vraag A.4:

## E.1 Voorbeelden tijdreeksen topvervlakking op de piekwaterstanden






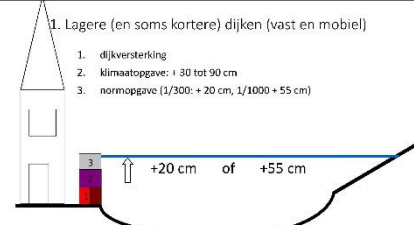
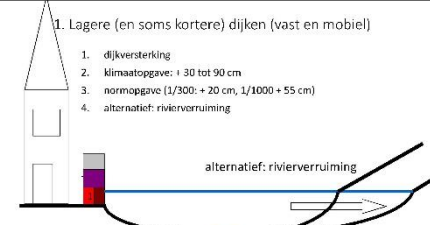


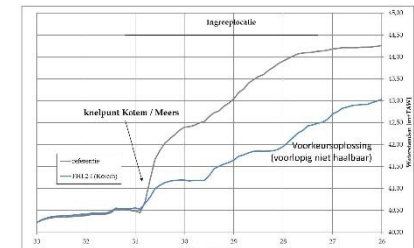

Figuur 8.3 Voorbeeld van tijdreeksen van topvervlakking voor een spitse en stompe afvoergolf met een piekafvoer van 3224 m<sup>3</sup>/s bij Borgharen. (De Jong & Asselman, 2019)

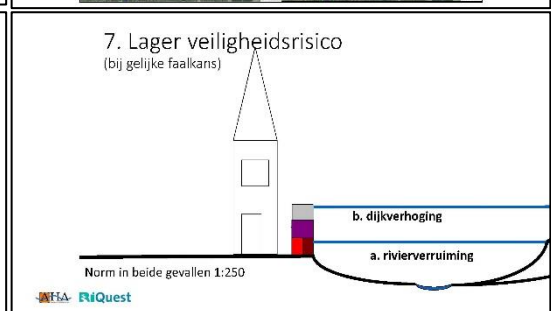
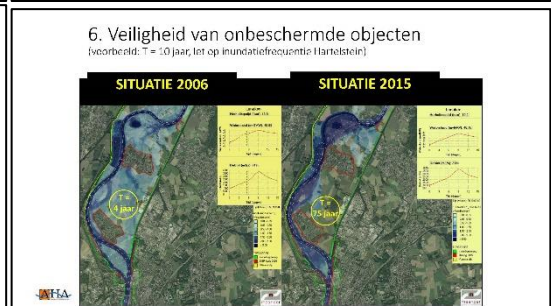
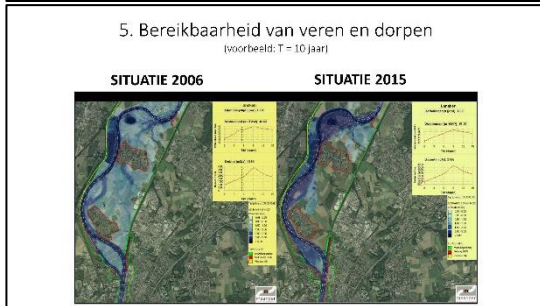
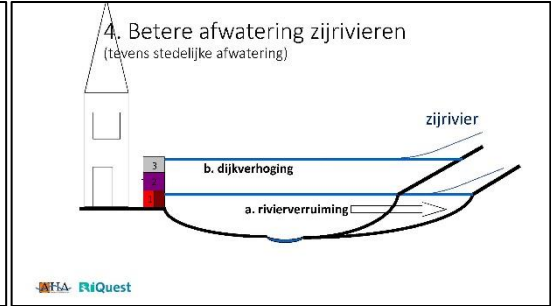
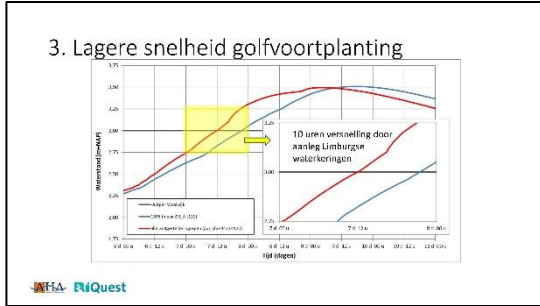
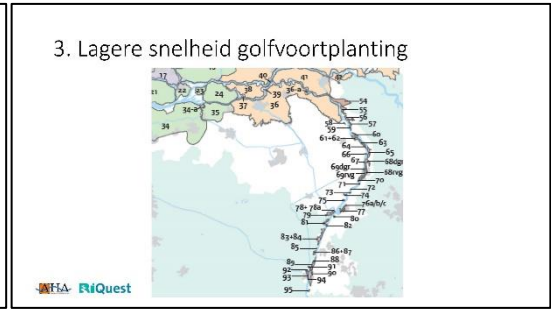


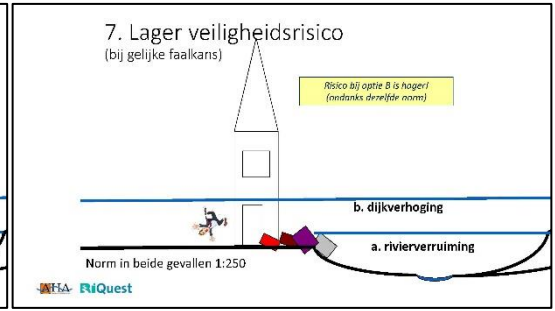
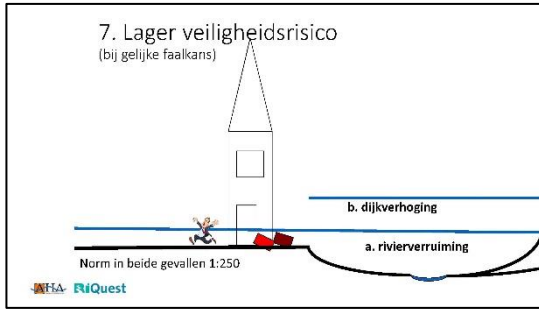


Figuur 8.4 Voorbeeld van tijdreeksen van topvervlakking van hoogwater 2021 op basis van metingen. (ENW, 2021)

# F Argumentatie voor rivierverruiming

<p><b>Argumenten voor ruimte voor de rivier</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Lagere (en soms kortere) dijken (vast en mobiel)</li> <li>2. Lagere stroomsnelheid</li> <li>3. Lagere snelheid golfvoortplanting</li> <li>4. Beter afwatering van zijrivieren</li> <li>5. Bereikbaarheid van veren en dorpen</li> <li>6. Veiligheid van onbeschermden objecten</li> <li>7. Lager veiligheidsrisico (bij dezelfde waarschijnlijkheid)</li> <li>8. Ruimtelijke kwaliteit (natuur, stadontwikkeling, ...)</li> <li>9. Medefinanciering (andere programma's of particuliere initiatieven)</li> <li>10. Infiltratie in het grondwater</li> </ol> <p><b>RiQQuest</b></p>	<p>1. Lagere (en soms kortere) dijken (vast en mobiel)</p>  <p>Huidige norm 1: 250</p> <p><b>RiQQuest</b></p>
<p>1. Lagere (en soms kortere) dijken (vast en mobiel)</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. dijkversterking</li> </ol>  <p>Huidige norm 1: 250</p> <p><b>RiQQuest</b></p>	<p>1. Lagere (en soms kortere) dijken (vast en mobiel)</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. dijkversterking</li> <li>2. klimaatopgave: + 30 tot 90 cm</li> </ol>  <p>Huidige norm 1: 250</p> <p><b>RiQQuest</b></p>
<p>1. Lagere (en soms kortere) dijken (vast en mobiel)</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. dijkversterking</li> <li>2. klimaatopgave: + 30 tot 90 cm</li> <li>3. normopgave (1/300: + 20 cm, 1/1000 + 55 cm)</li> </ol>  <p>Huidige norm 1: 250</p> <p><b>RiQQuest</b></p>	<p>1. Lagere (en soms kortere) dijken (vast en mobiel)</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. dijkversterking</li> <li>2. klimaatopgave: + 30 tot 90 cm</li> <li>3. normopgave (1/300: + 20 cm, 1/1000 + 55 cm)</li> <li>4. alternatief: rivierverruiming</li> </ol>  <p>Huidige norm 1: 250</p> <p><b>RiQQuest</b></p>
<p>1. Lagere (en soms kortere) dijken (vast en mobiel)</p>  <p><b>RiQQuest</b></p>	<p>2. Lagere stroomsnelheid</p>  <p><b>RiQQuest</b></p>
 <p><b>RiQQuest</b></p>	 <p><b>RiQQuest</b></p>





# G Afvoerstatistiek Maas en regionale zijrivieren

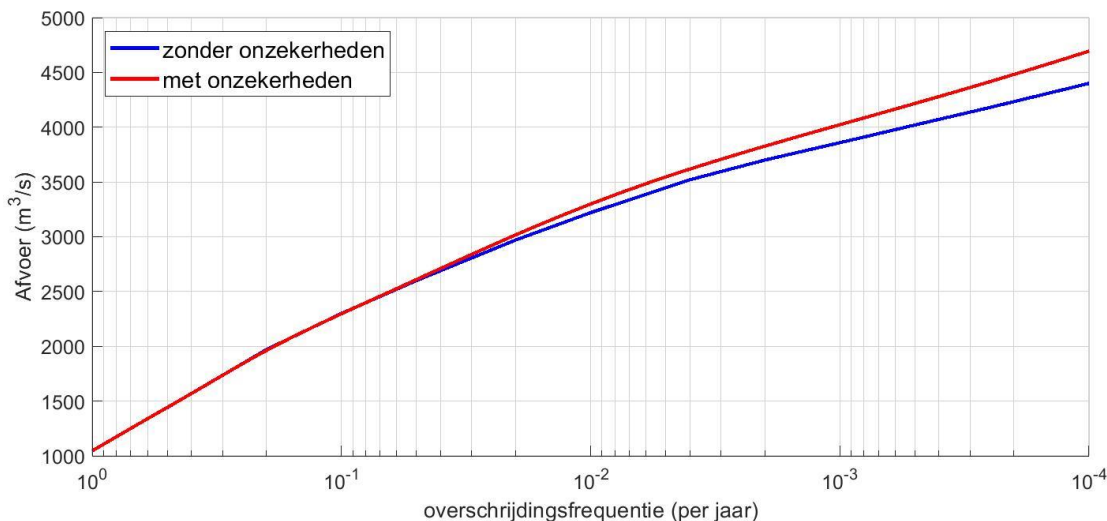
Deze bijlage beschrijft analyses die zijn uitgevoerd voor de beantwoording van vraag D1 en vraag E2::

D1: *Hoe groot is de kans dat een hoge afvoer vanuit de zijrivieren / het regionale watersysteem samenvalt met een hoge Maasafvoer?*

E2: *Hoe wordt de samenhang tussen de regionale zijrivieren en de Maas meegenomen in de beoordeling van de waterkeringen? Wat is de invloed van afvoeren van regionale zijrivieren op waterstanden langs de Maas en wat is de invloed van de afvoer van de Maas op waterstanden langs de regionale zijrivieren?. Is er aanleiding om deze samenhang anders mee te nemen in de beoordeling van de waterkeringen?*

## G.1 Onzekerheden in afvoerstatistiek Maas

Voor het bepalen van overschrijdingskansen van hoge en extreme afvoeren van de Maas bij Borgharen is de beschikbare statistiek van het BOI<sup>15</sup> gebruikt. Deze statistiek is afgeleid met GRADE<sup>16</sup>. Het BOI kent twee varianten van deze frequentielijn, namelijk met en zonder onzekerheden. In de variant met onzekerheden is rekening gehouden met het feit dat de uitkomsten van de modellen waarmee deze frequentielijn is afgeleid onzekerheden bevatten. Deze onzekerheden zijn 'uitgeïntegreerd' wat in het kort betekent dat rekening is gehouden met alle mogelijke onder- en overschattingen van deze modellen. Netto resulteert dat in een frequentielijn waarvan de afvoeren bij kleine frequenties hoger zijn dan in de frequentielijn waarin geen rekening is gehouden met deze onzekerheden. In de regel wordt de variant met onzekerheden gehanteerd in de beoordeling van waterkeringen, daarom is besloten om in het onderhavige project dezelfde keuze te maken.



Figuur G.1. Frequentielijn van de afvoer van de Maas bij Borgharen; met en zonder onzekerheden.

<sup>15</sup> Beoordeling en Ontwerp Instrumentarium voor primaire waterkeringen in Nederland

<sup>16</sup> Generation of Rainfall and Discharge Extremes, een combinatie van een stochastische weergenerator, een hydrologisch model en een hydrodynamisch model

## G.2 Beschrijving methode zijdelingse instromingen voor hydraulische modellen

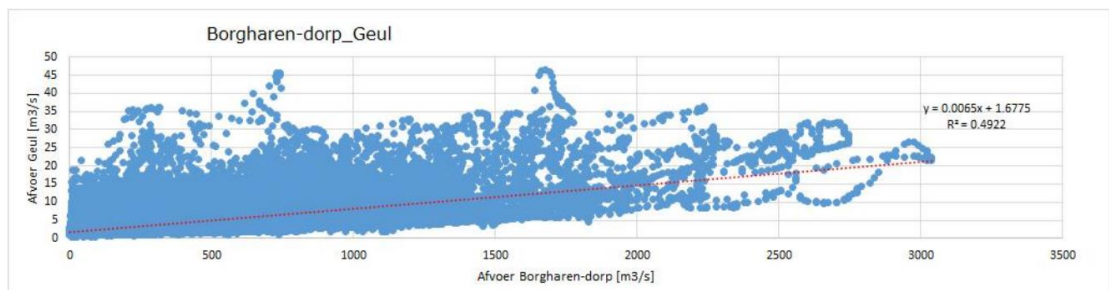
De studie Van der Veen (2018) bestaat uit een drie stappen:

- 1 Berekening afvoer belangrijke zijrivieren;
  - 2 Berekening afvoer overige zijrivieren;
  - 3 Berekening afvoer overige zijdelingse instromingen en onttrekkingen.
- In deze bijlage wordt enkel ingegaan op de opgezette methode voor de belangrijke zijrivieren. Dit bestaat uit: Roer, Geul, Geleenbeek, Swalm, Dommel, Niers, Neerbeek en Aa.

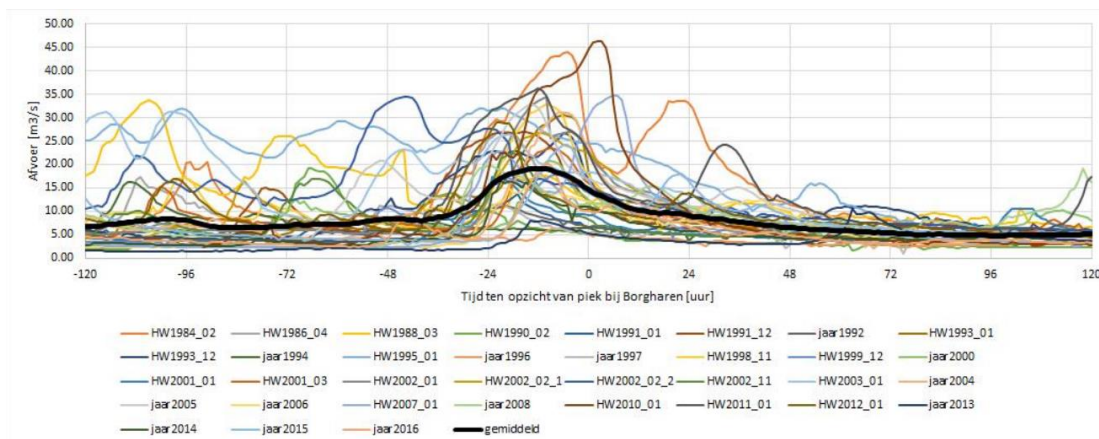
Historische afvoerreeksen zijn geanalyseerd voor de periode 1988 tot 2016. De studie bestaat uit twee onderdelen: analyse gehele tijdreeks en analyse afvoergolven:

- Analyse gehele tijdreeks (t.b.v. operationeel gebruik): Opstellen van een lineaire regressie (alfa / beta). Door aanpassen van de tijdsverschuiving wordt de maximale R2 waarde gezocht ("Beken\_onderling.xlsx")
- Analyse van 35 afvoergolven (t.b.v. fictieve afvoergolven zoals WBI):
  - Piekafvoeren van beek en Borgharen tegen elkaar uitzetten in een lineaire regressie Piek-Piek en Piek-Passage (bij gebruik van 1 uur looptijd tussen Borgharen en Geulmonding) ("Borgharen\_Geul.xlsx")
  - De gemiddelde afvoergolf van de Geul wordt uitgezet tegen het moment van passage van de Borgharen afvoeren als een soort kansverdeling. Hieruit blijkt de tijdsverschuiving: ofwel door de modus (12 uur) of door de mediaan (13 uur) ("kansverdeling\_pieken.xlsx")
  - De resulterende gemiddelde golfvorm, wordt vervolgens geschaald (in tijdsrichting geknepen) zodat in de resulterende golf zowel de piek-piek als de piek-passage regressie klopt. ("schaalfactoren\_tijd.xlsx")

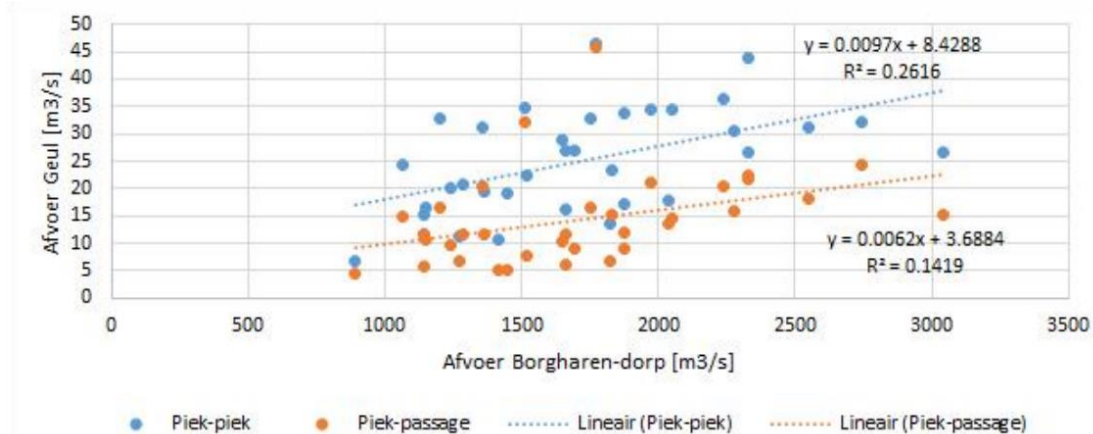
Vergelijkbare figuren voor andere zijrivieren staan opgenomen in Van der Veen (2018).



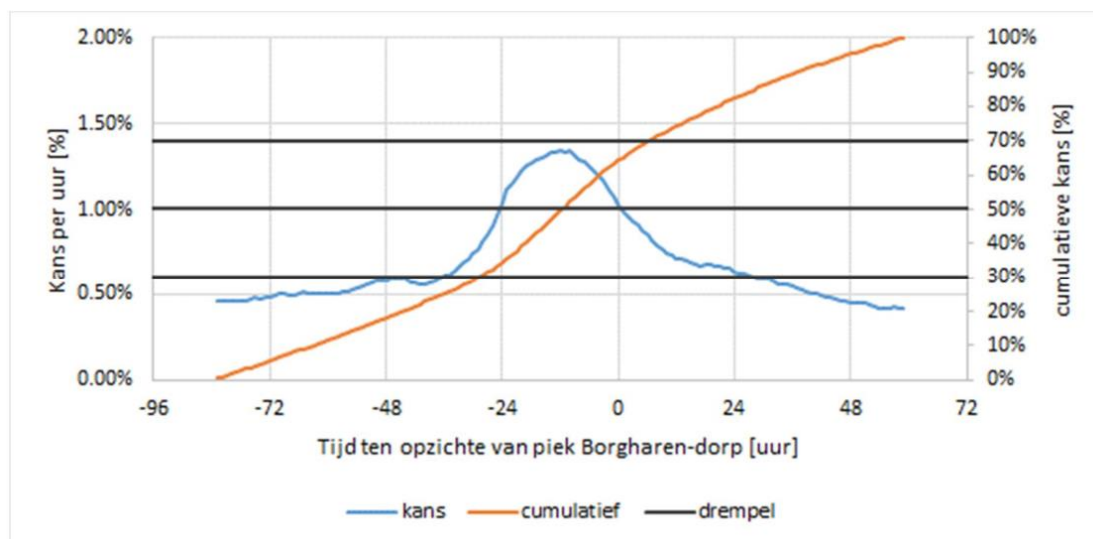
Figuur 8.5 regressie op gehele tijdreeksen tbv historische afvoergolven



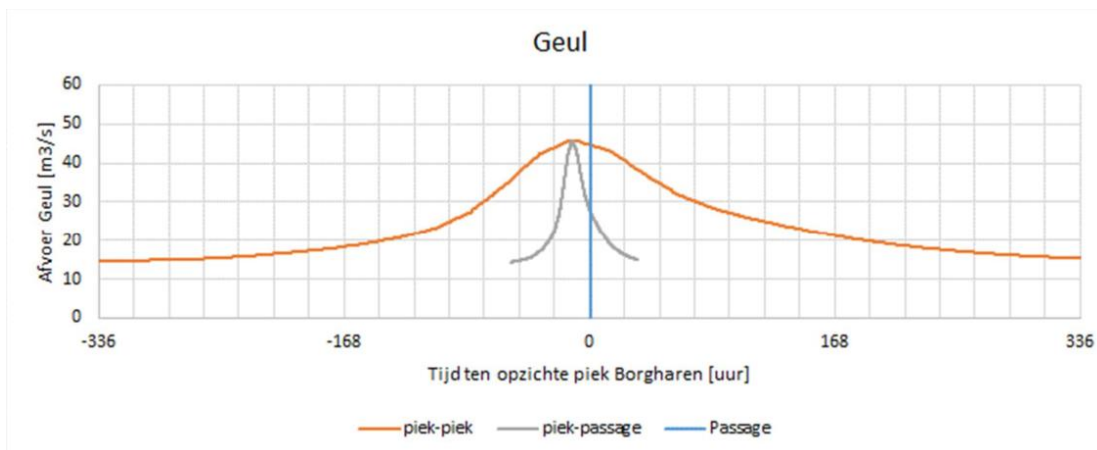
Figuur 8.6 Relatieve afvoerreeds van 35 afvoergolven



Figuur 8.7: Lineaire regressie tussen afvoerpiek Borgharen en afvoerpiek Geul (blauw) en de afvoer op de Geul op het moment van passage van de Maaspijk (oranje)

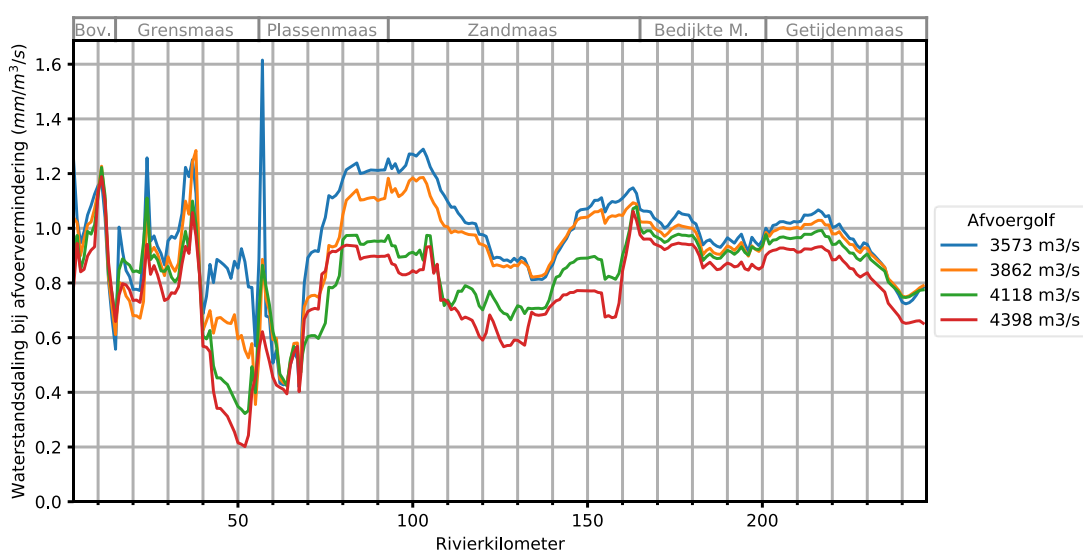


Figuur 8.8 Gemiddelde golfvorm Geul ten opzichte van afvoerpiek Borgharen



Figuur 8.9: Schalen van de lineaire regressie (oranje) over de tijds-as zodat de piek-passage relatie van de geschaalde golf (grijs) overeen komt met de eerdere statistiek.

### G.3 Waterstandsverhoging per m<sup>3</sup>/s



Figuur 8.10 Effect van 1 m<sup>3</sup>/s afvoervermindering op de waterstand (in mm). (De Jong & Asselman, 2019)

### G.4 Vergelijking van afvoergolven Maas en zijrivieren

Onderstaande figuren zijn gegenereerd op basis van de dataset van Van der Veen (2018). Dit bevat de periode 1988 tot en met 2016.

Uit deze periode zijn alle afvoergolven van de Maas onttrokken door gebruikmaking van de volgende criteria:

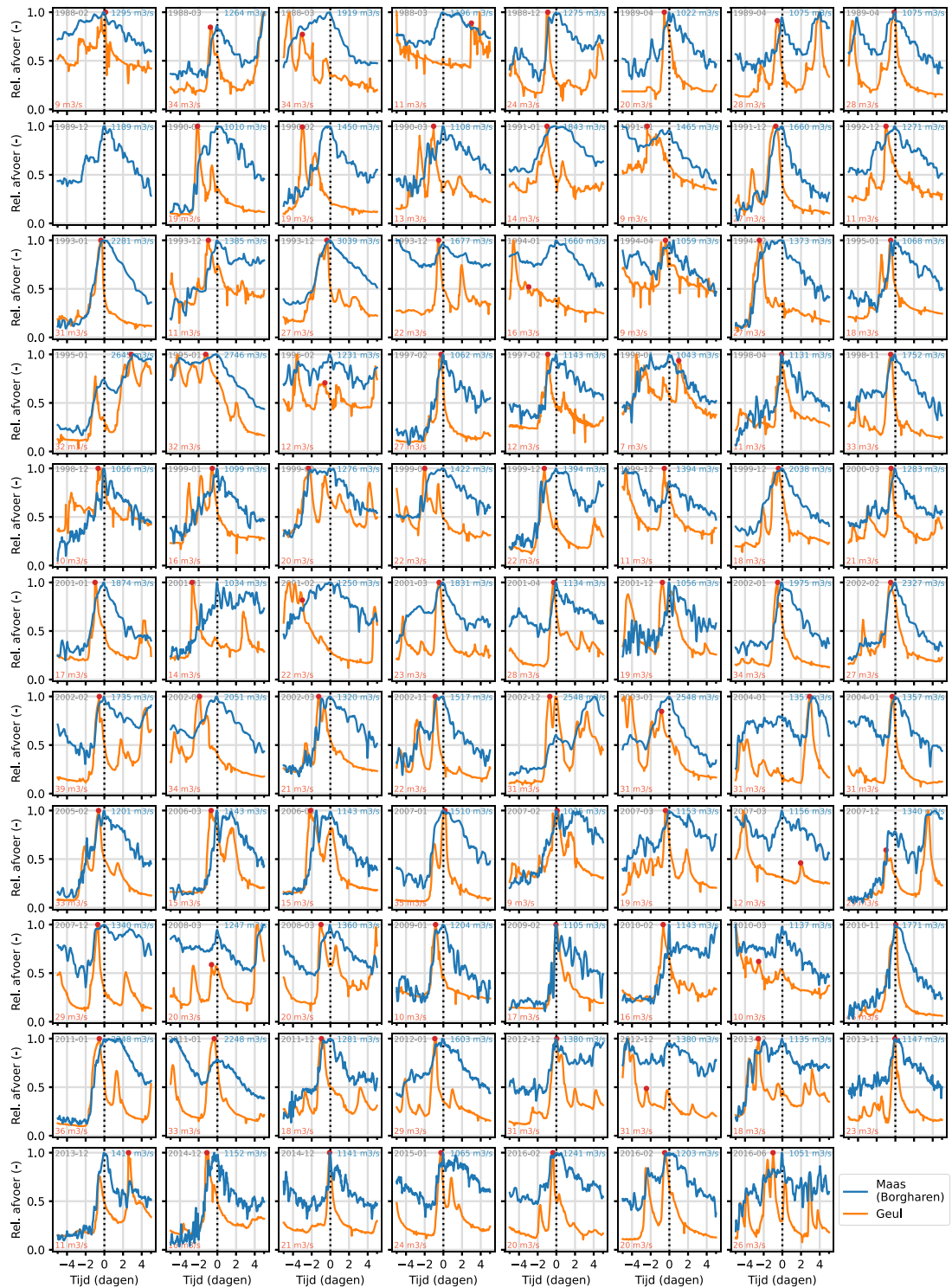
- Lokaal maximum;
- Minimaal 1000 m<sup>3</sup>/s;
- Minimaal 1 dag tussen opeenvolgende maxima;
- Tussen twee maximum moet de afvoer minimaal 300 m<sup>3</sup>/s zijn gezakt ten opzichte van het laagste maximum.

Voor iedere hoogwatergolf is de hoogste piekafvoer van de regionale beek bepaald door te zoeken naar de maximale afvoer voor de periode +/- 3 dagen. Opgemerkt wordt dat hiermee soms de piek niet wordt opgepakt.

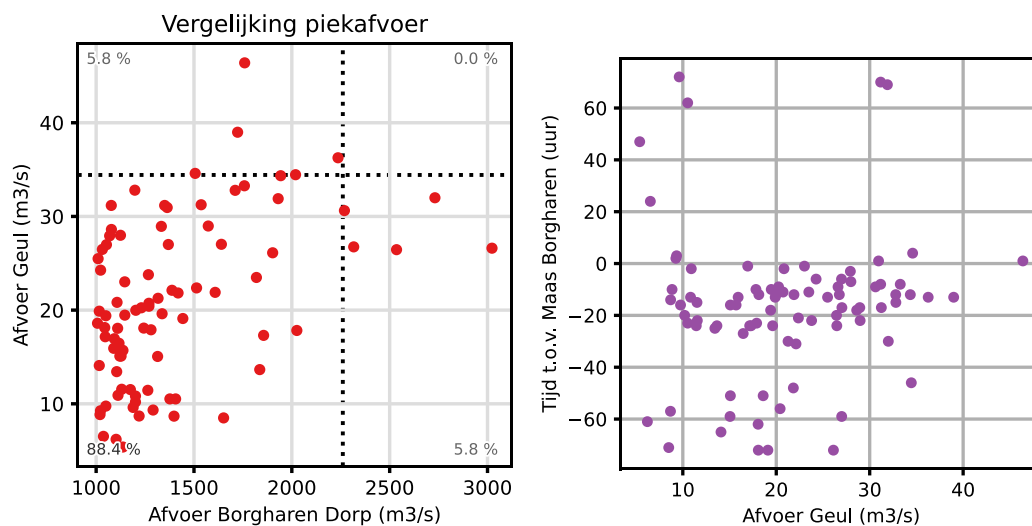


Een langere periode is echter ook niet voldoende omdat dat onvoldoende werkt bij opeenvolgende golven. Aanbevolen wordt om dit criterium nader te verfijnen.

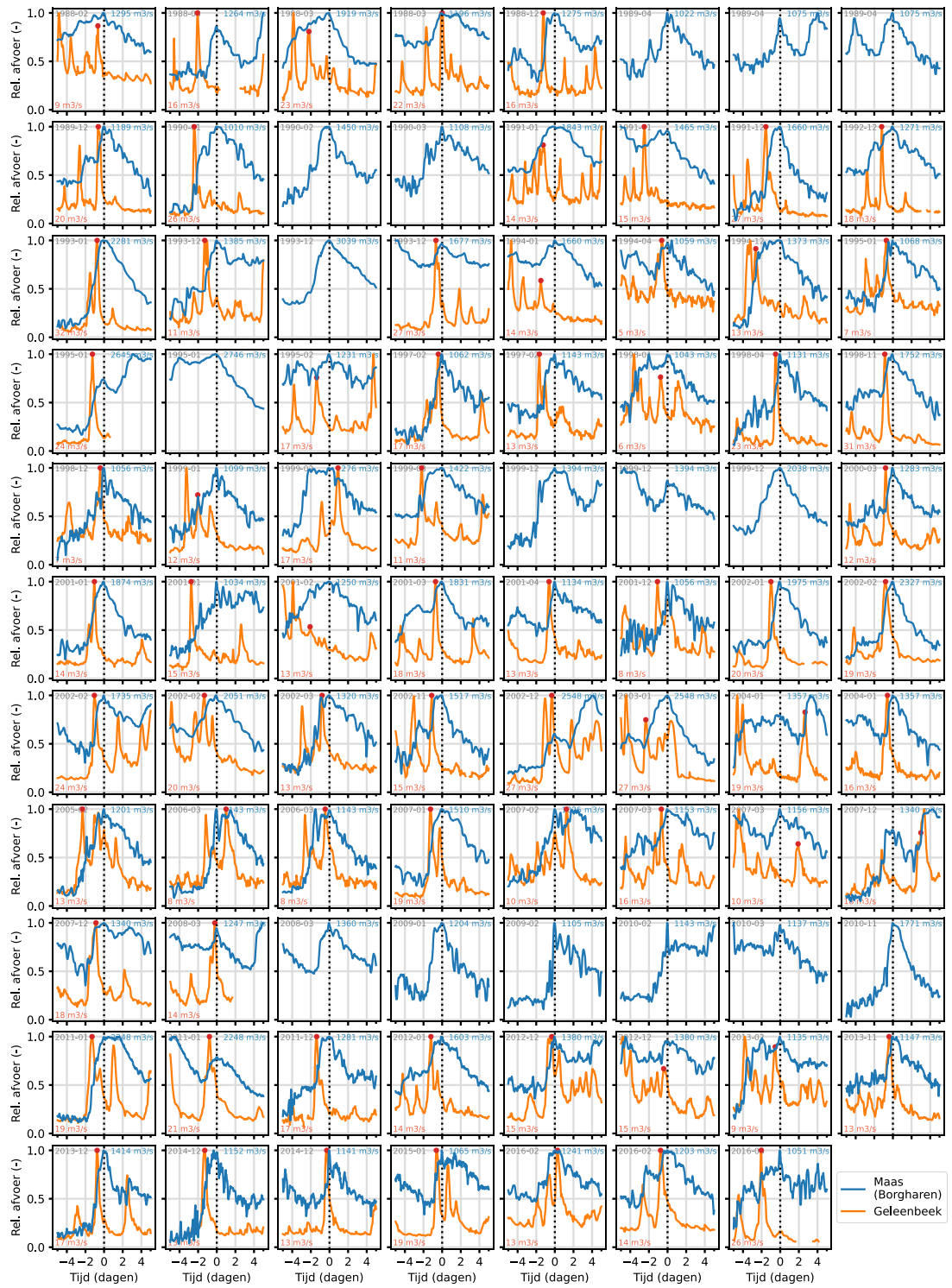
### G.4.1 Geul



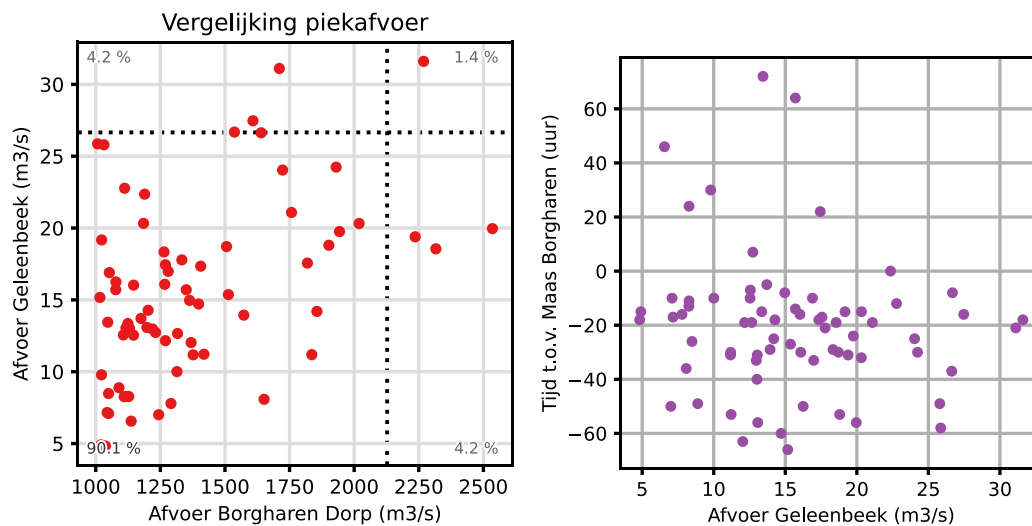
Figuur 8.11 Selectie van afvoergolven van de analyse Borgharen en de Geul. De afvoer is relatief ten opzichte van de piekafvoer.



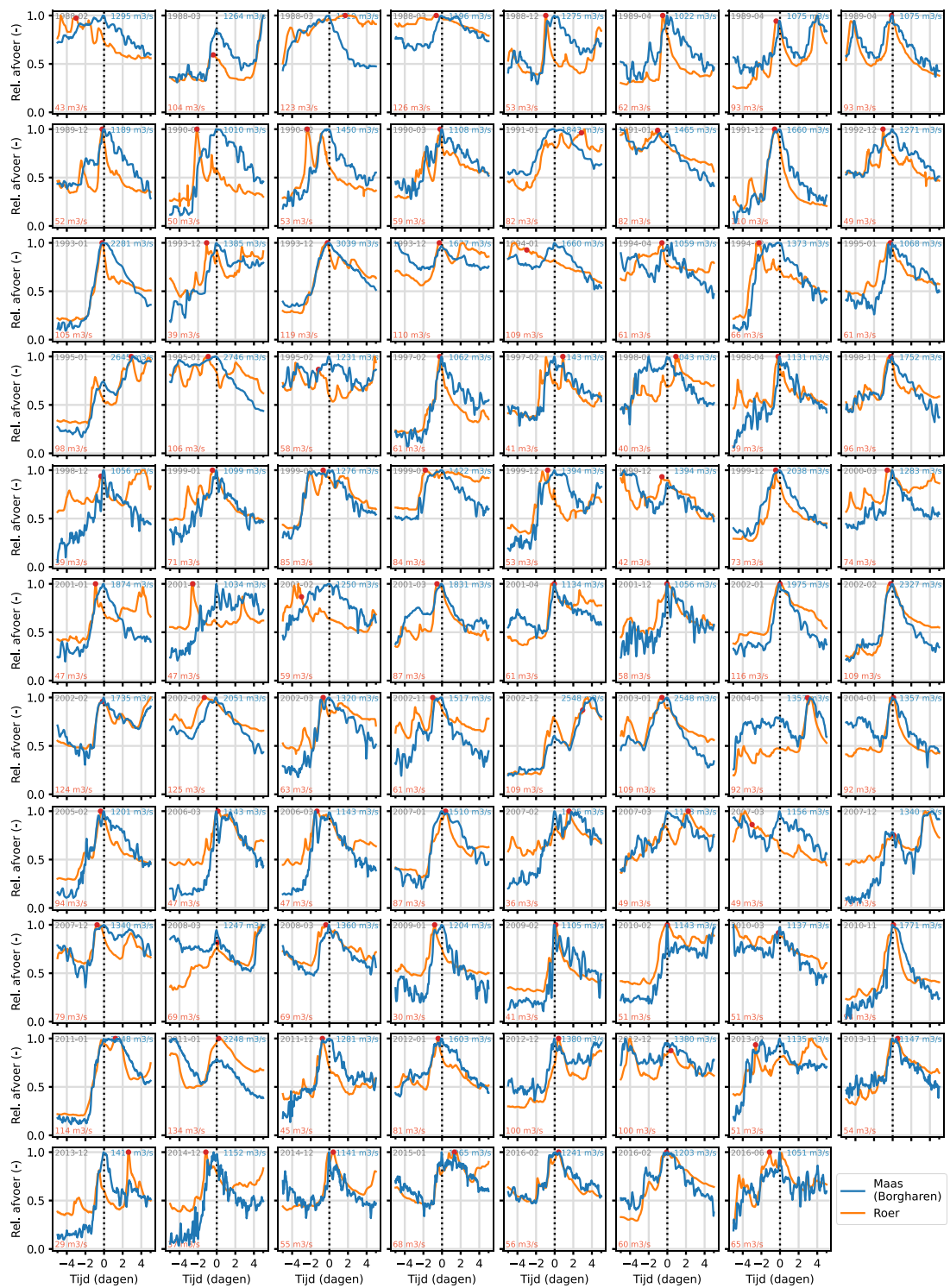
Figuur 8.12 Vergelijking tussen piekafvoeren Geul en Maas bij Borgharen Dorp (links). Een vergelijking timing piekafvoer Geul, met het tijdsverschil tot de afvoerpiek op de Maas bij Borgharen (rechts).



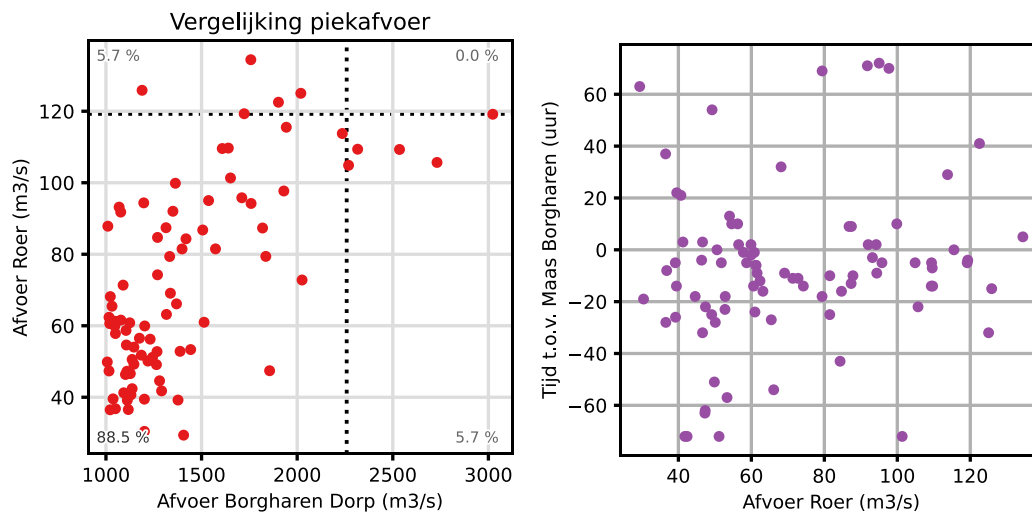
Figuur 8.13 Selectie van afvoergolven van de analyse Borgharen en de Geleenbeek. De afvoer is relatief ten opzichte van de piekafvoer.



Figuur 8.14 Vergelijking tussen piekafvoeren Geleenbeek en Maas bij Borgharen Dorp (links). Een vergelijking timing piekafvoer Geul, met het tijdsverschil tot de afvoerpiek op de Maas bij Borgharen (rechts).

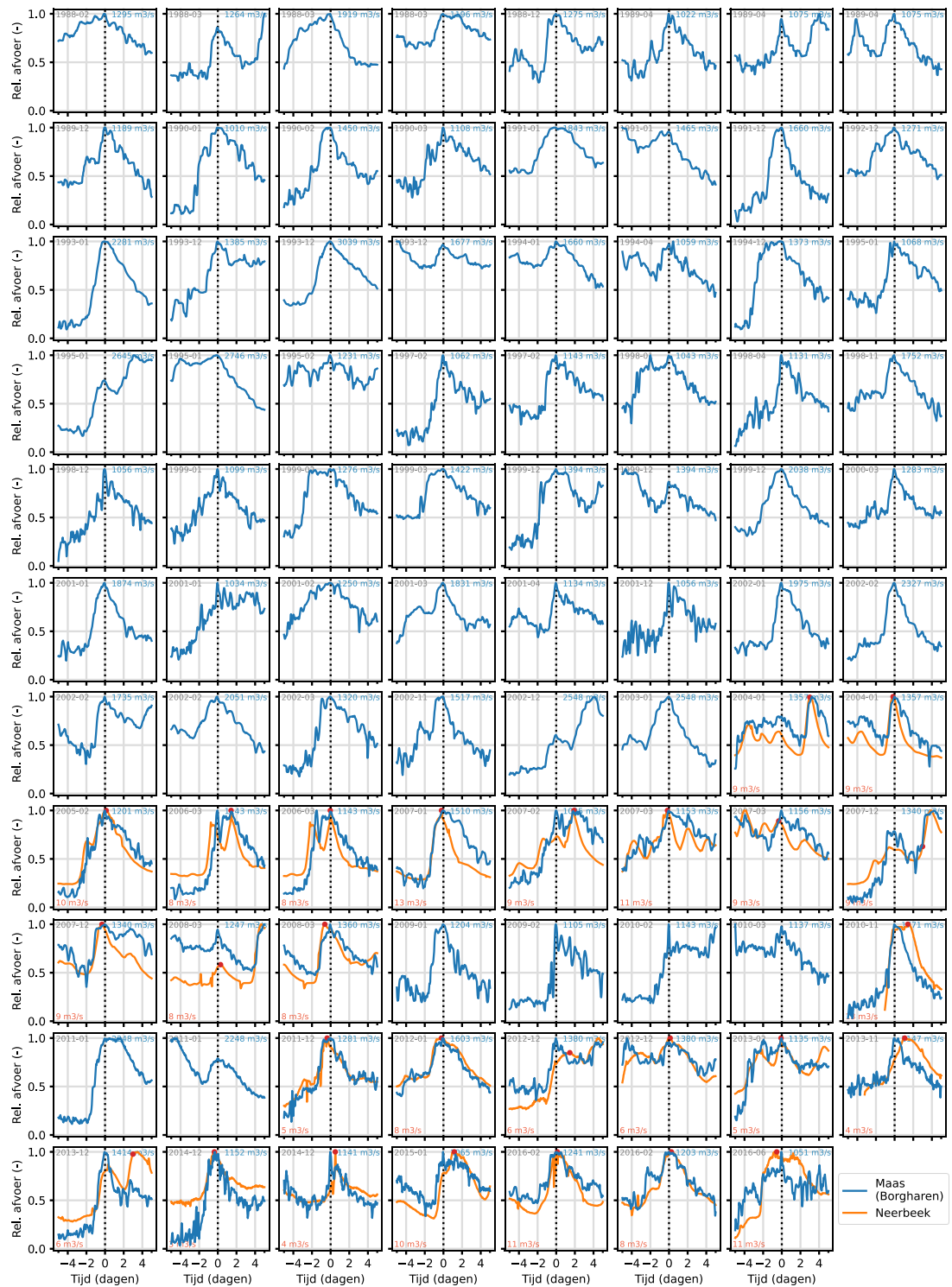


Figuur 8.15 Selectie van afvoergolven van de analyse Borgharen en de Roer. De afvoer is relatief ten opzichte van de piekafvoer.

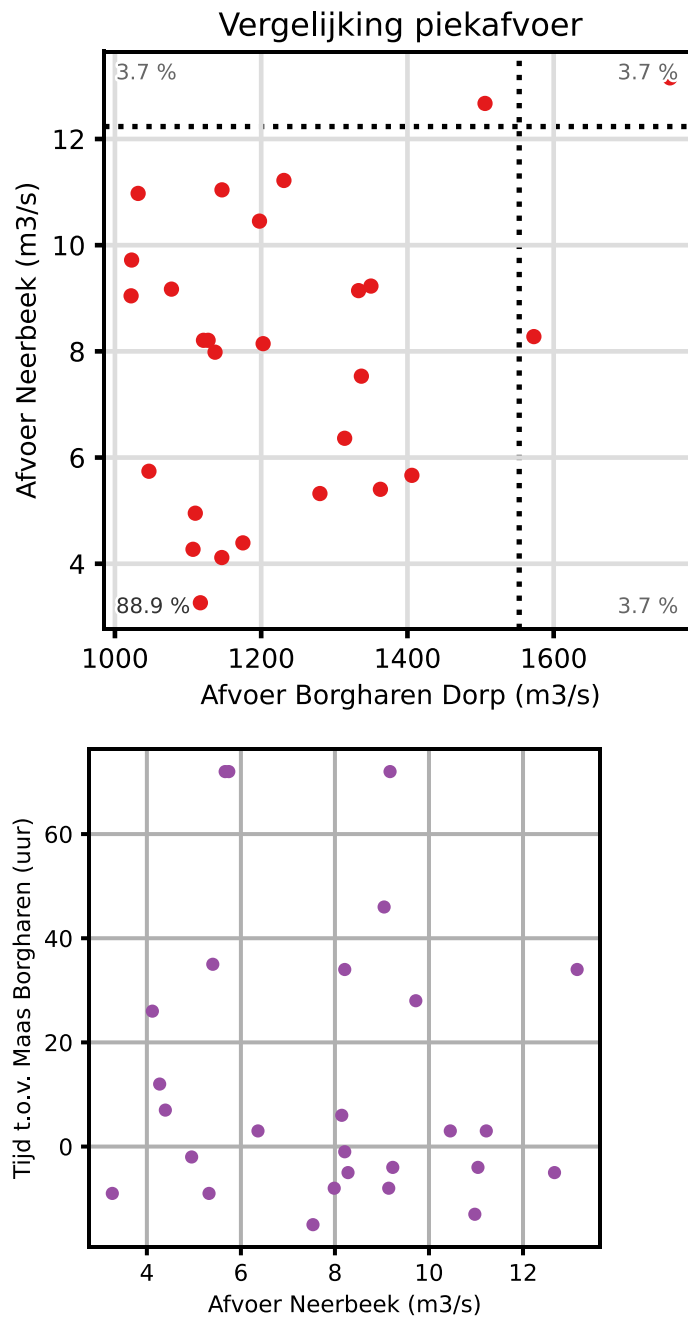


Figuur 8.16 Vergelijking tussen piekafvoeren Roer en Maas bij Borgharen Dorp (links). Een vergelijking timing piekafvoer Geul, met het tijdsverschil tot de afvoerpiek op de Maas bij Borgharen (rechts).

G.4.4 Neerbeek

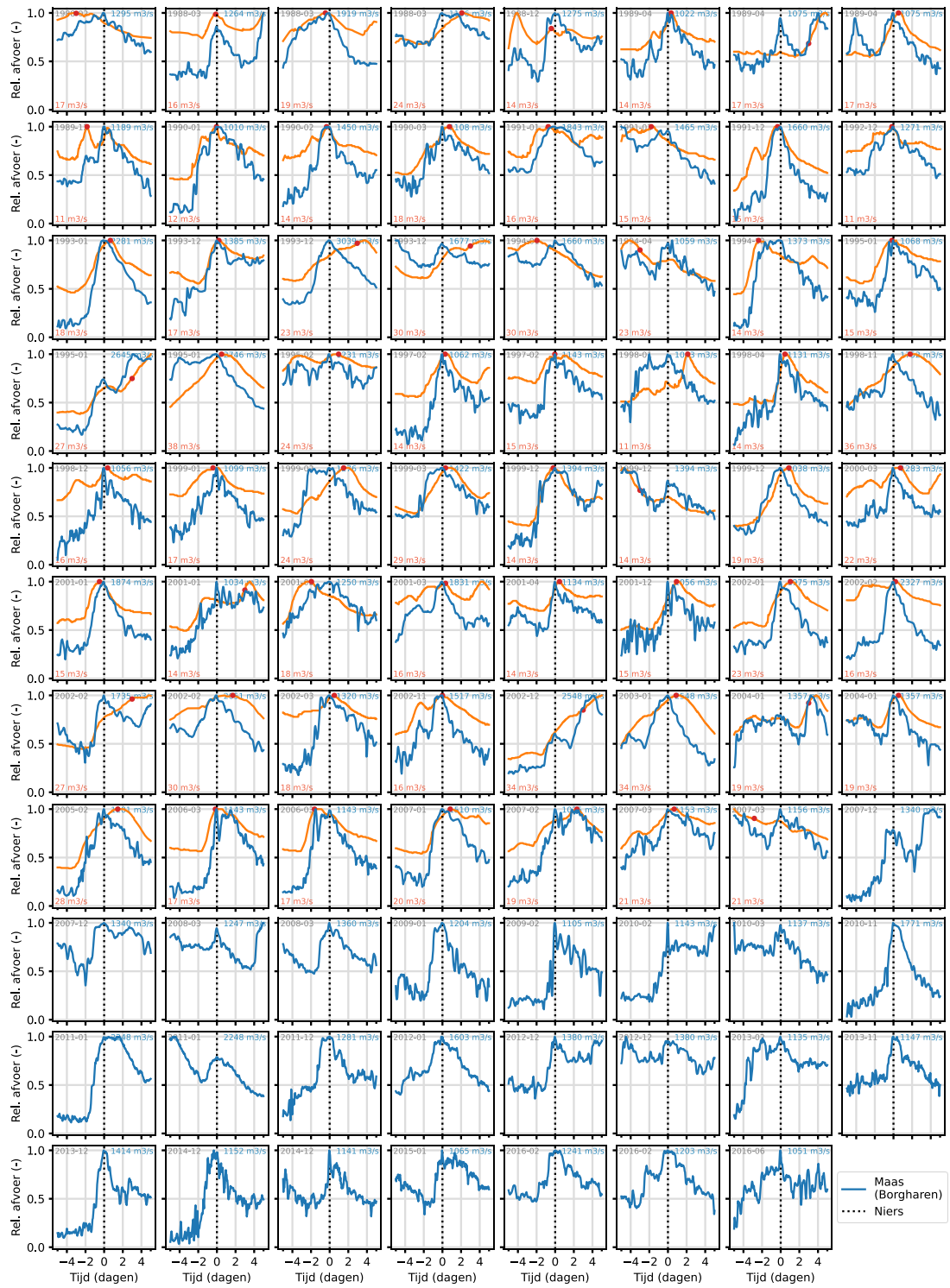


Figuur 8.17 Selectie van afvoergolven van de analyse Borgharen en de Neerbeek. De afvoer is relatief ten opzichte van de piekafvoer.



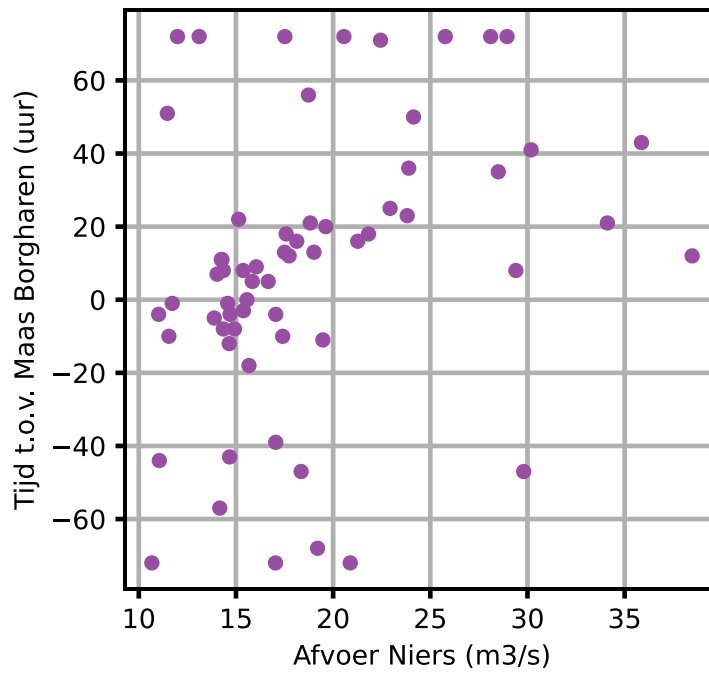
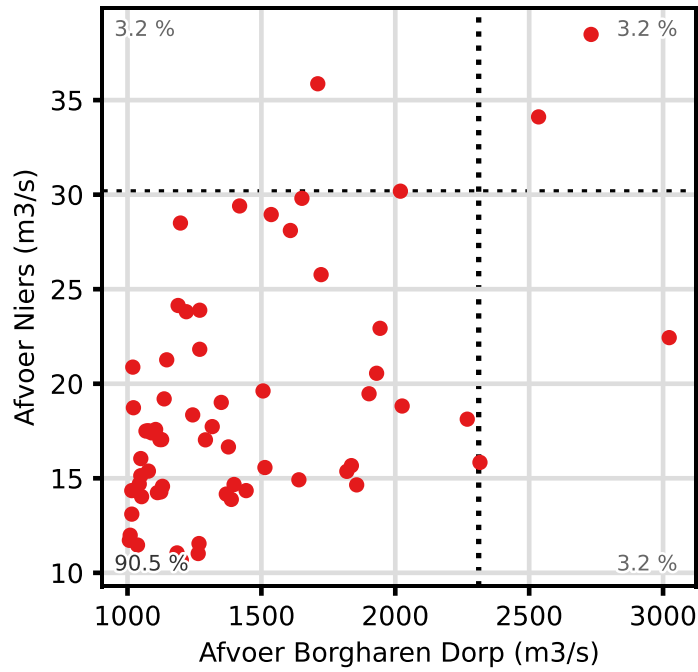
Figuur 8.18 Vergelijking tussen piekafvoeren Neerbeek en Maas bij Borgharen Dorp (links). Een vergelijking timing piekafvoer Geul, met het tijdsverschil tot de afvoerpiek op de Maas bij Borgharen (rechts).



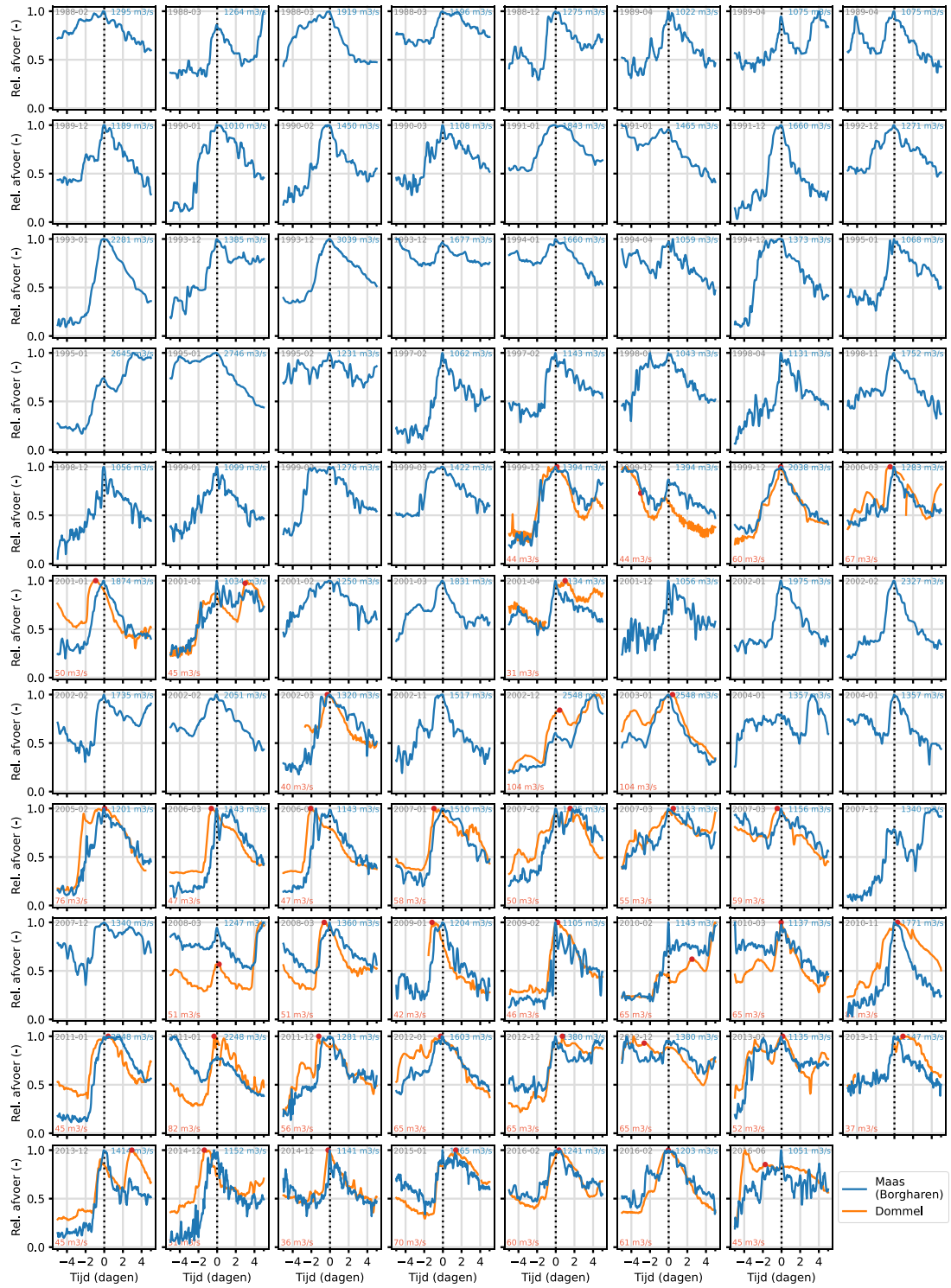


Figuur 8.19 Selectie van afvoergolven van de analyse Borgharen en de Niers. De afvoer is relatief ten opzichte van de piekafvoer.

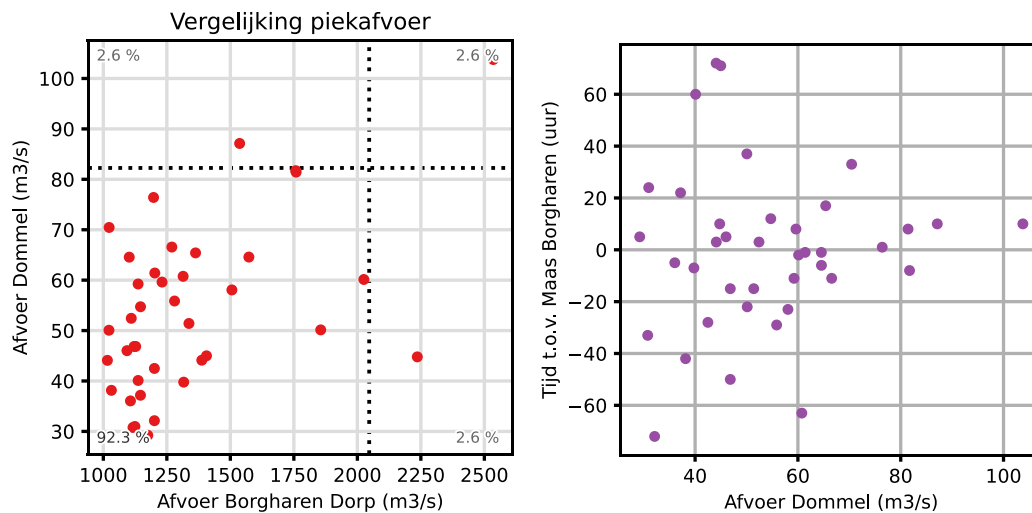
### Vergelijking piekafvoer



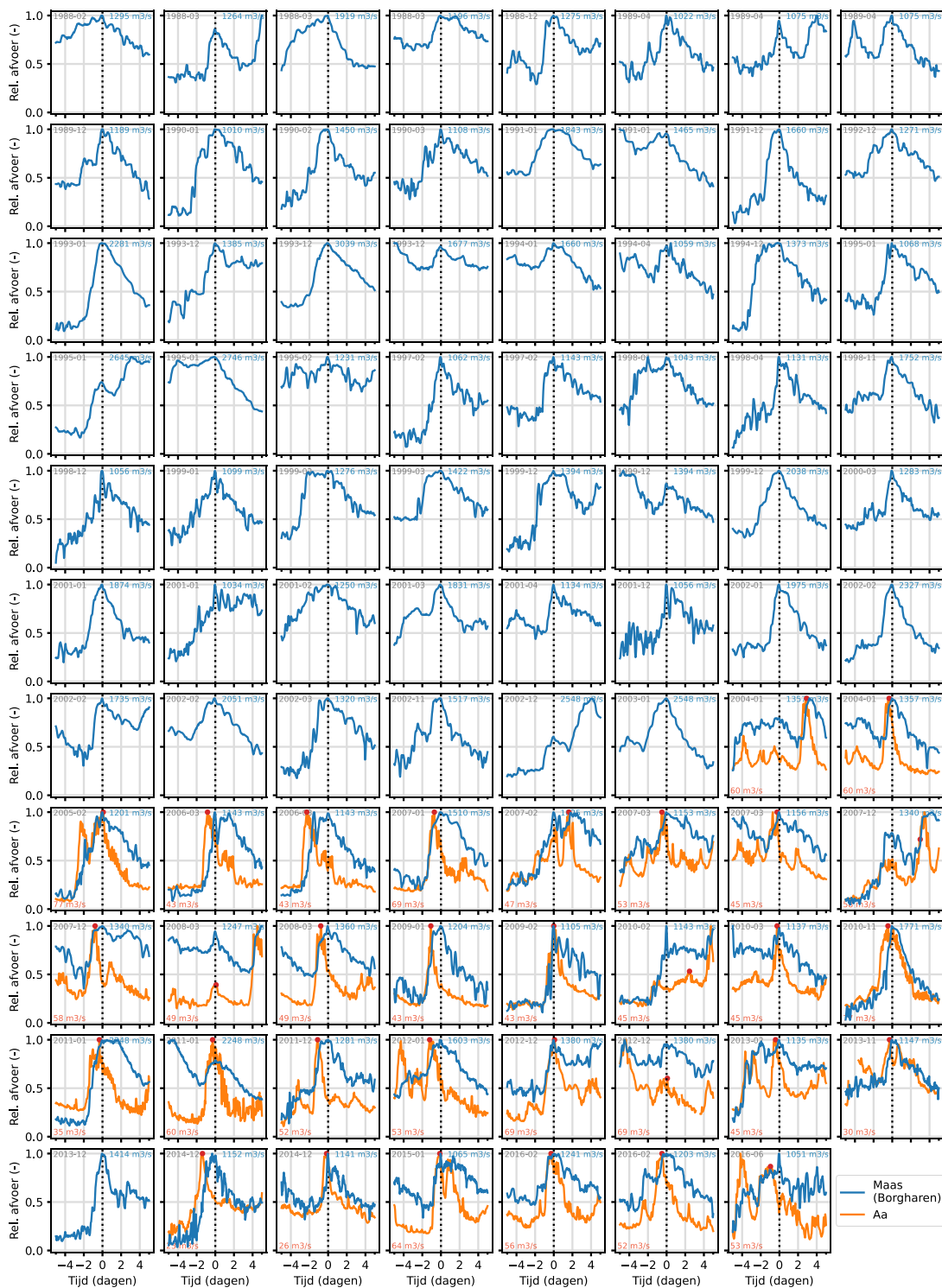
Figuur 8.20 Vergelijking tussen piekafvoeren Niers en Maas bij Borgharen Dorp (links). Een vergelijking timing piekafvoer Geul, met het tijdsverschil tot de afvoerpiek op de Maas bij Borgharen (rechts).



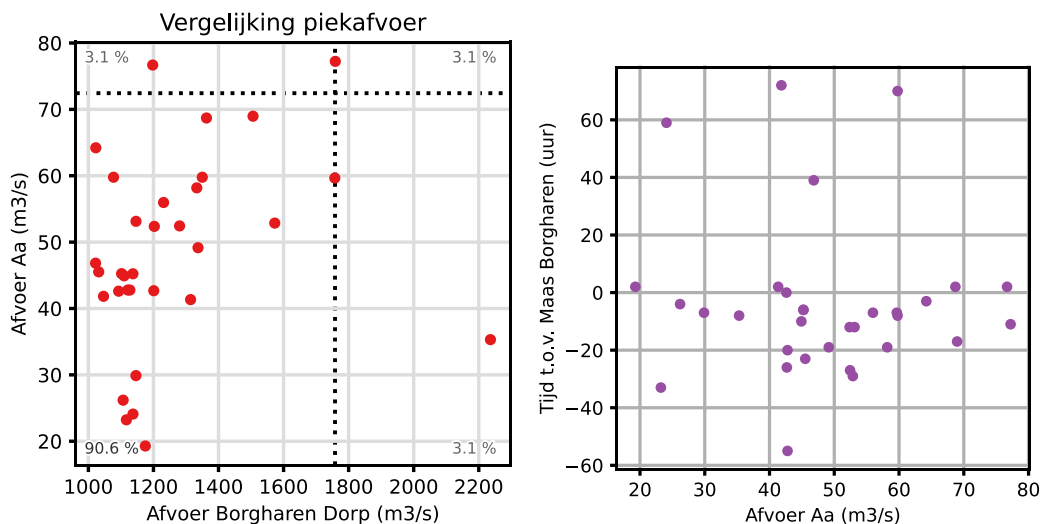
Figuur 8.21 Selectie van afvoergolven van de analyse Borgharen en de Dommel. De afvoer is relatief ten opzichte van de piekafvoer.



Figuur 8.22 Vergelijking tussen piekafvoeren Dommel en Maas bij Borgharen Dorp (links). Een vergelijking timing piekafvoer Geul, met het tijdsverschil tot de afvoerpiek op de Maas bij Borgharen (rechts).



Figuur 8.23 Selectie van afvoergolven van de analyse Borgharen en de Aa. De afvoer is relatief ten opzichte van de piekafvoer.



Figuur 8.24 Vergelijking tussen piekafvoeren Aa en Maas bij Borgharen Dorp (links). Een vergelijking timing piekafvoer Geul, met het tijdsverschil tot de afvoerpiek op de Maas bij Borgharen (rechts).

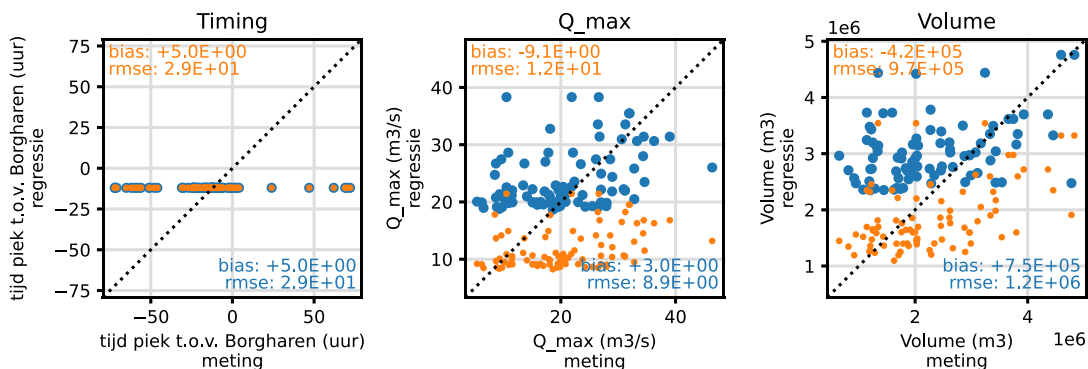
## G.5 Validatie regressieformuleringen op historische afvoergolven

De regressieformuleringen van Van der Veen (2018) zijn toegepast op alle geselecteerde hoogwaters van Bijlage G.4. Er is gebruik gemaakt van zowel de operationele regressies en de synthetische regressies. Deze laatste zouden beter resultaat moeten geven bij afvoergolven. De resultaten zijn gevalideerd op drie aspecten:

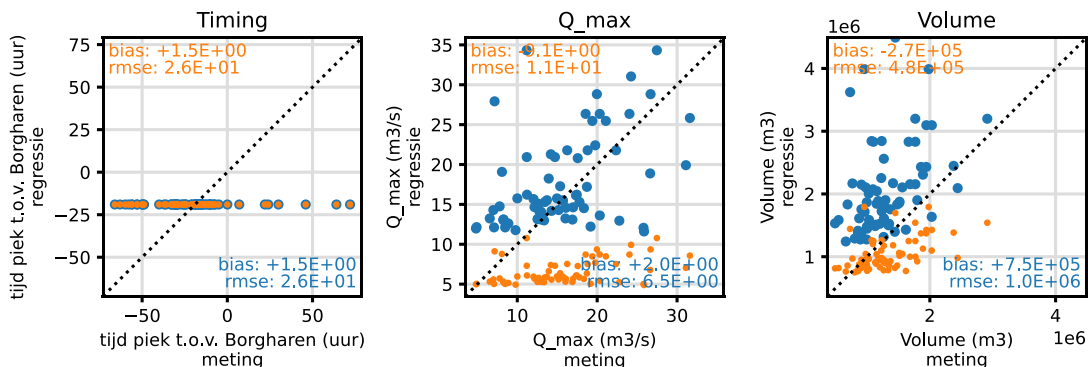
- Het moment van de piekafvoer, in vergelijking met de piekafvoer op de Maas bij Borgharen (uur);
- De maximale afvoer ( $\text{m}^3/\text{s}$ );
- Het totale volume van de afvoergolf in de periode van 2 dagen (dus +/- 1 dag) rondom de piekafvoer van de beek ( $\text{m}^3$ ).

Voor deze drie aspecten is op de volgende pagina's voor alle zijrivieren een figuur geproduceerd waarin de metingen zijn vergeleken met de uitkomsten van de regressielijnen.

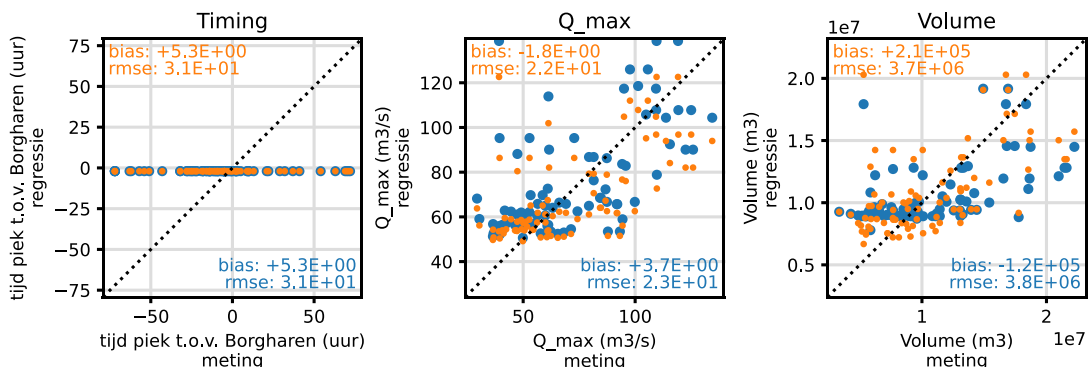
Validatie regressies op historische afvoergolven: Geul



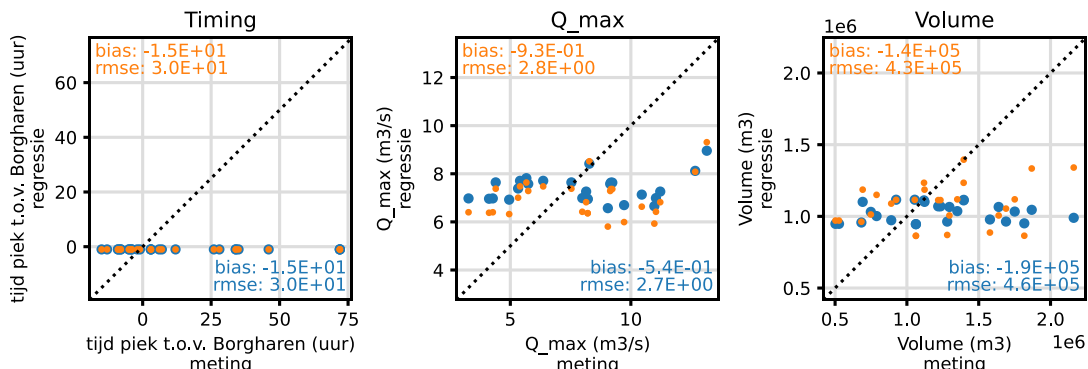
Validatie regressies op historische afvoergolven: Geleenbeek



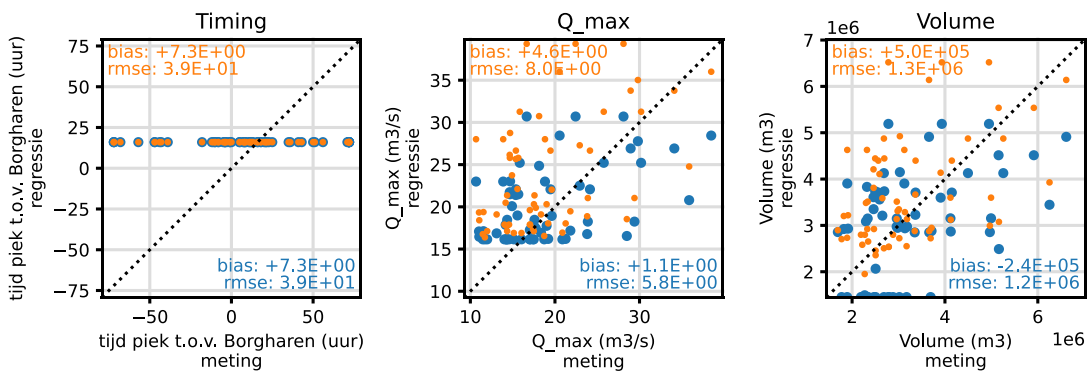
Validatie regressies op historische afvoergolven: Roer



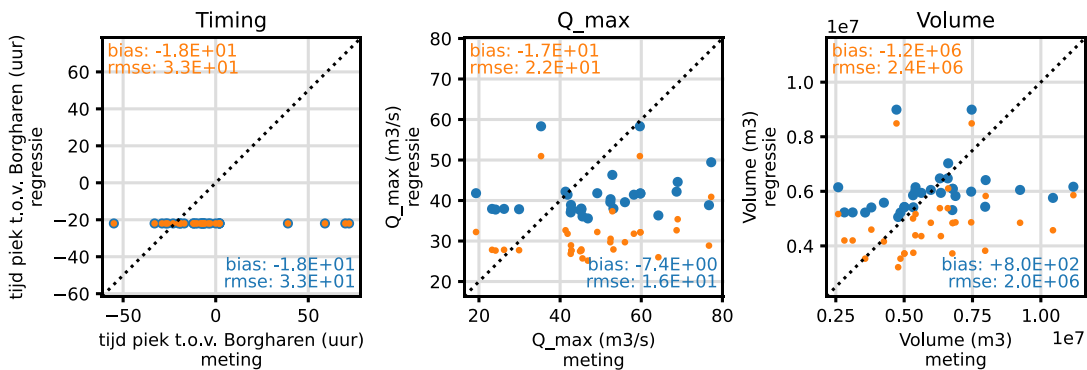
Validatie regressies op historische afvoergolven: Neerbeek



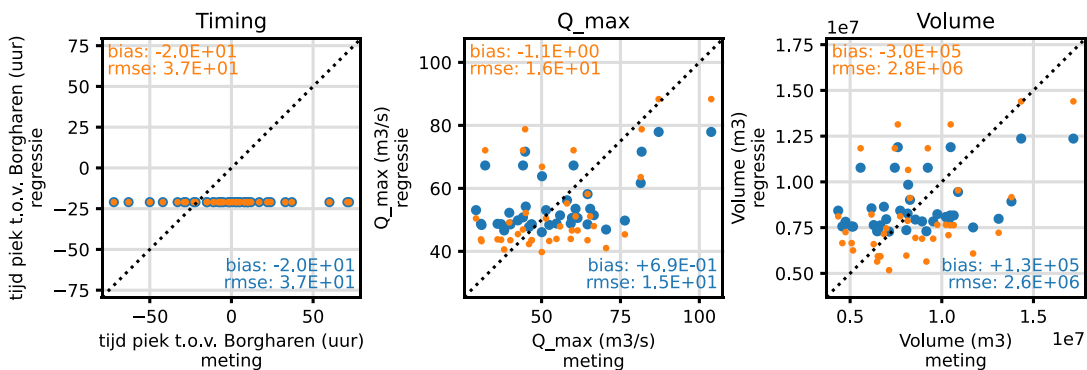
Validatie regressies op historische afvoergolven: Niers



Validatie regressies op historische afvoergolven: Aa



Validatie regressies op historische afvoergolven: Dommel





# H Analyse golfvormen

Deze bijlage beschrijft analyses die zijn uitgevoerd voor de beantwoording van vraag E1:

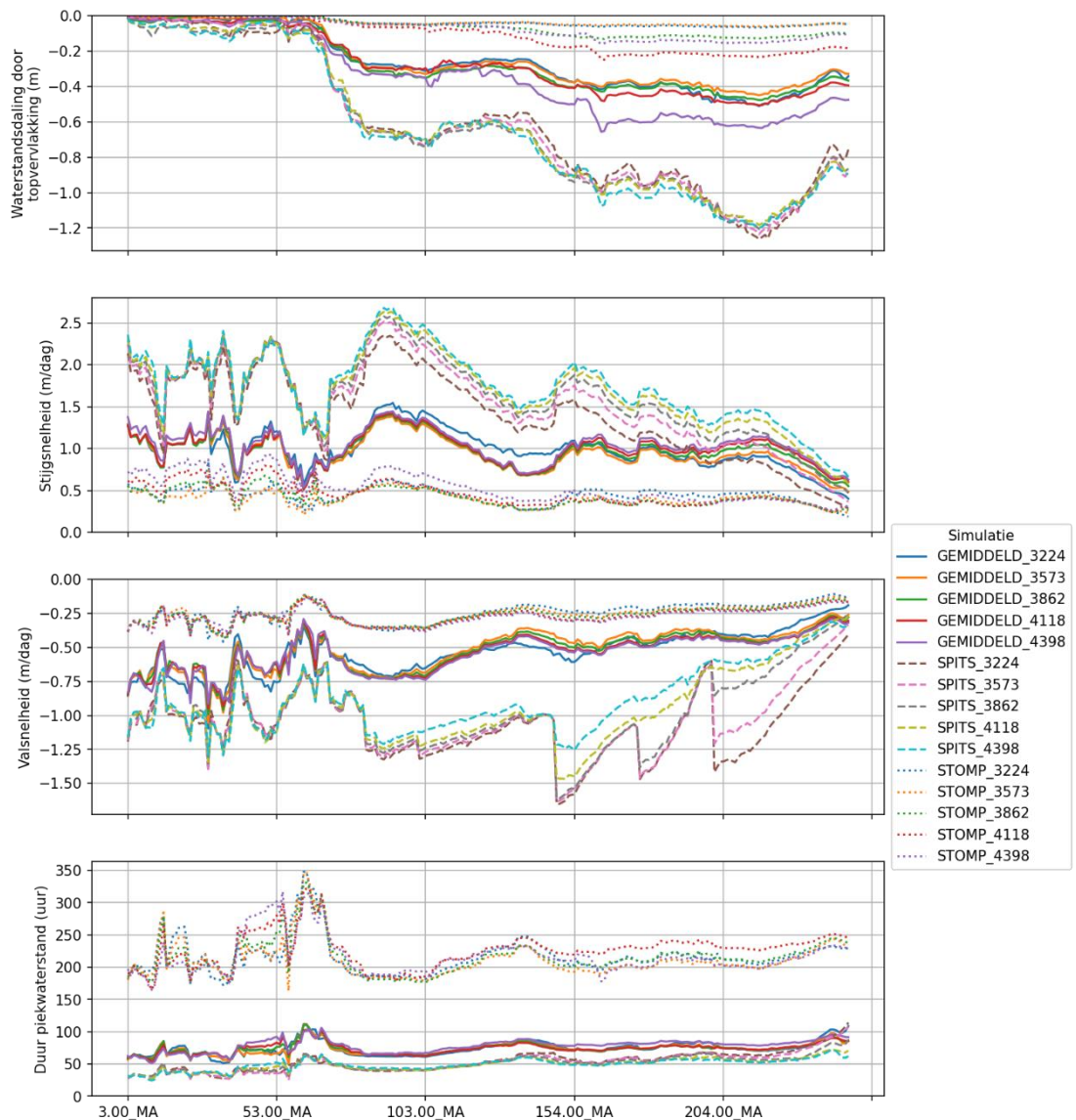
*“Zou de golfvorm als variabele parameter in het ontwerp- en beoordelingsinstrumentarium moeten worden meegenomen? Hoe draagt de lengte en steilheid (kop en staart) van de golfvorm bij aan de individuele componenten van de overstromingskans?”*

## H.1 Parameters waterstandsverloop

Het waterstandsverloop zoals relevant voor faalmechanismen van dijklichamen wordt samengevat door te kijken naar de volgende parameters:

- $dH$ : Topvervlakking in piekwaterstand (m);
- $u_{\text{stijg}}$ : Maximale stijgsnelheid over 2 dagen (m/dag);
- $u_{\text{val}}$ : Maximale valsnelheid over 2 dagen (m/dag);
- $T_p$ : Duur piekwaterstand min -0.5 m (uur).

Opgemerkt wordt dat bij de spitse afvoergolven sterk de maximale valsnelheid sterk wordt beïnvloed door de stuwsturing. Dit blijkt ook uit de tijdreeksen van de topvervlakking. Er is gekozen hier geen handmatige correcties voor uit te voeren, bij verdere verdieping wordt dat wel aanbevolen.



Figuur H.1: Langsdoorsnede eigenschappen waterstandsverloop

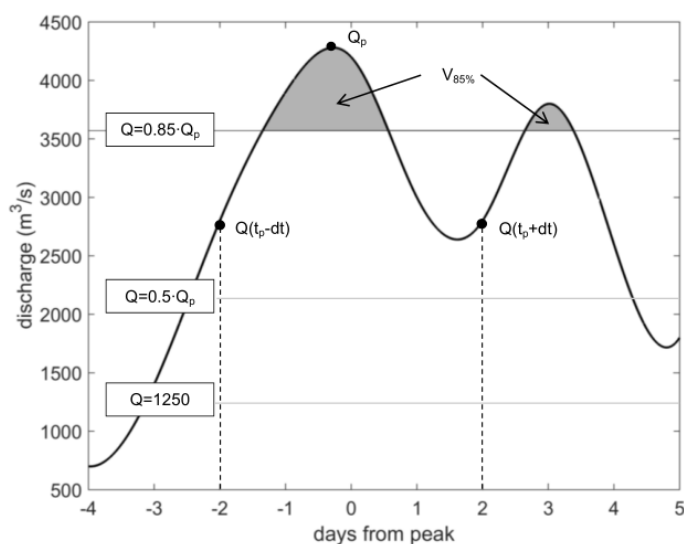
## H.2 Parameters golfvormen

Om de golfvorm te beschrijven wordt de afvoergolf bij Eijsden geschematiseerd. Op basis van onderzoek van Pol (2014) is besloten te kijken naar de volgende parameters.

- $D_{85\%}$ : duur (uur) van 85% van de piekafvoer;
- $V_{85\%}$ : volume ( $m^3$ ) van 85% van de piekafvoer;
- $C_2$ : golfkromming (curvature) voor +/- 2 dagen van de golfvorm.

Tabel 8.3 Golfparameters van alle golven uit De Jong & Asselman (2019)

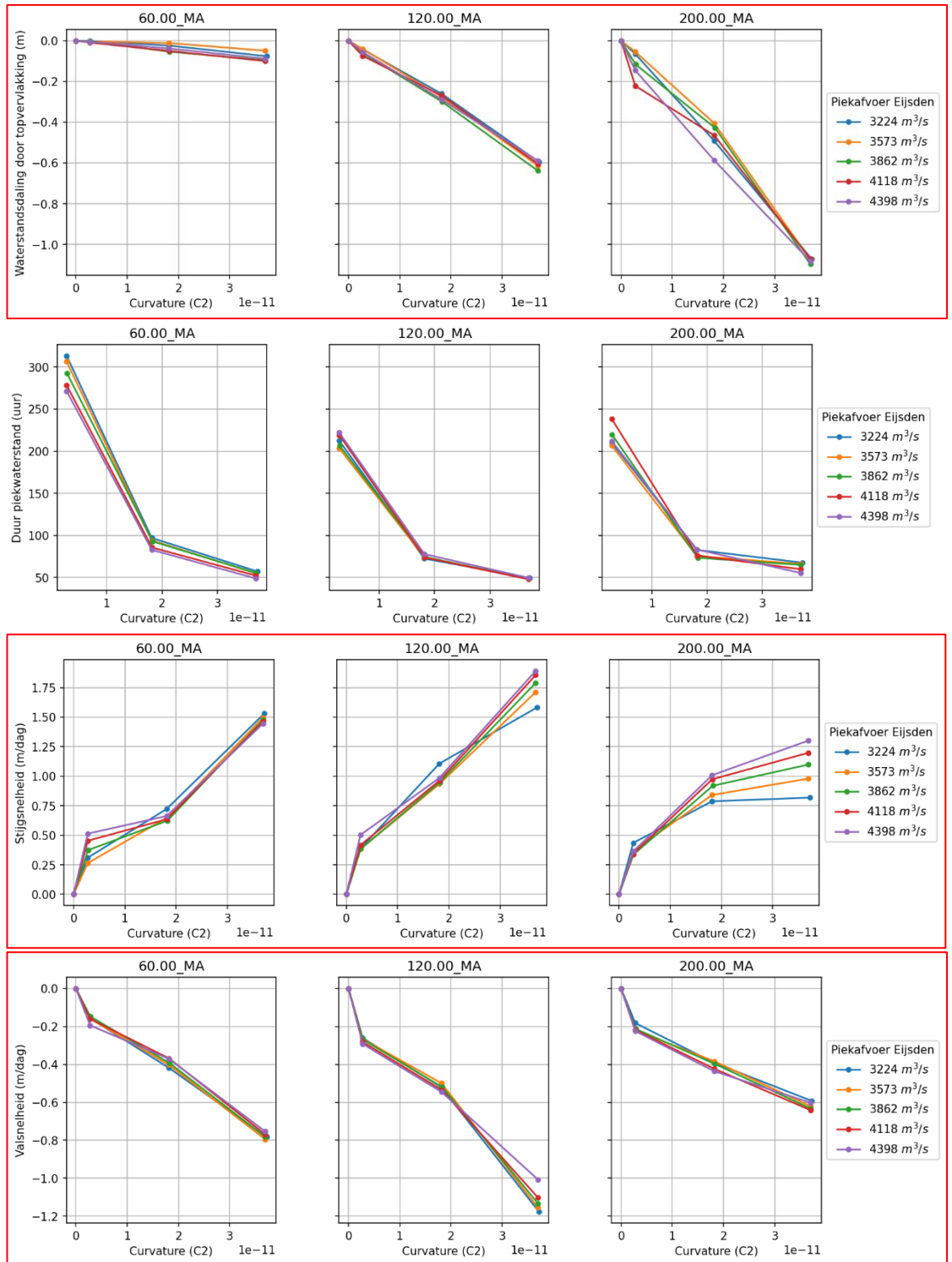
	C2 (-)	D85 (uur)	V85 (m <sup>3</sup> )
GEMIDDELD_3224	1.8E-11	66.3	7.3E+08
GEMIDDELD_3573	1.8E-11	66.3	8.1E+08
GEMIDDELD_3862	1.8E-11	66.3	8.7E+08
GEMIDDELD_4118	1.8E-11	66.3	9.3E+08
GEMIDDELD_4398	1.8E-11	66.3	9.9E+08
SPITS_3224	3.7E-11	34.7	3.8E+08
SPITS_3573	3.7E-11	34.7	4.2E+08
SPITS_3862	3.7E-11	34.7	4.5E+08
SPITS_4118	3.7E-11	34.7	4.8E+08
SPITS_4398	3.7E-11	34.7	5.2E+08
STOMP_3224	2.8E-12	212.5	2.3E+09
STOMP_3573	2.8E-12	212.5	2.6E+09
STOMP_3862	2.8E-12	212.5	2.8E+09
STOMP_4118	2.8E-12	212.5	3.0E+09
STOMP_4398	2.8E-12	212.5	3.2E+09



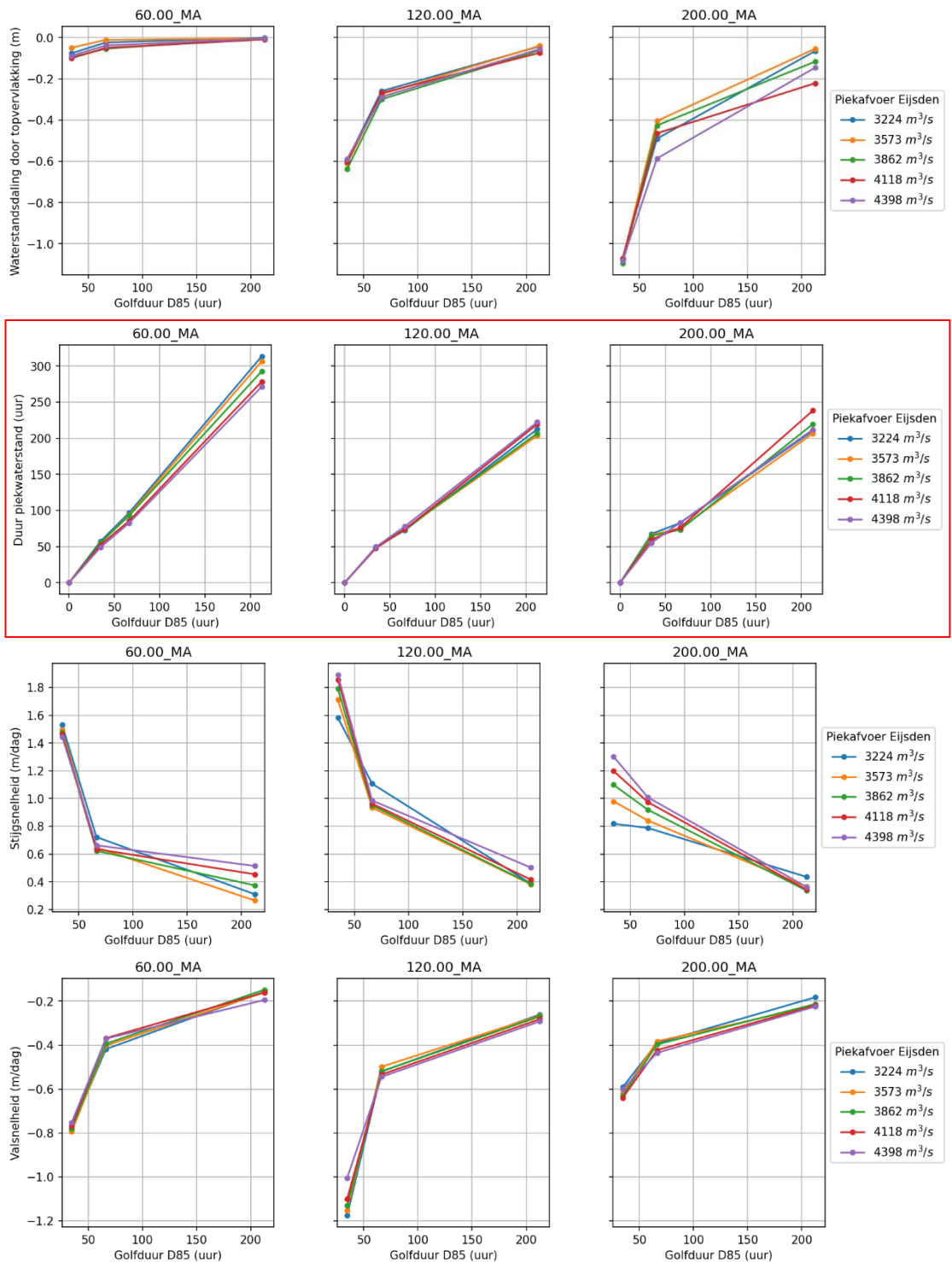
Figuur 8.25 Definitie van golfvorm parameters (Pol, 2015)

### H.3 Relatie golfvorm en waterstandsverloop

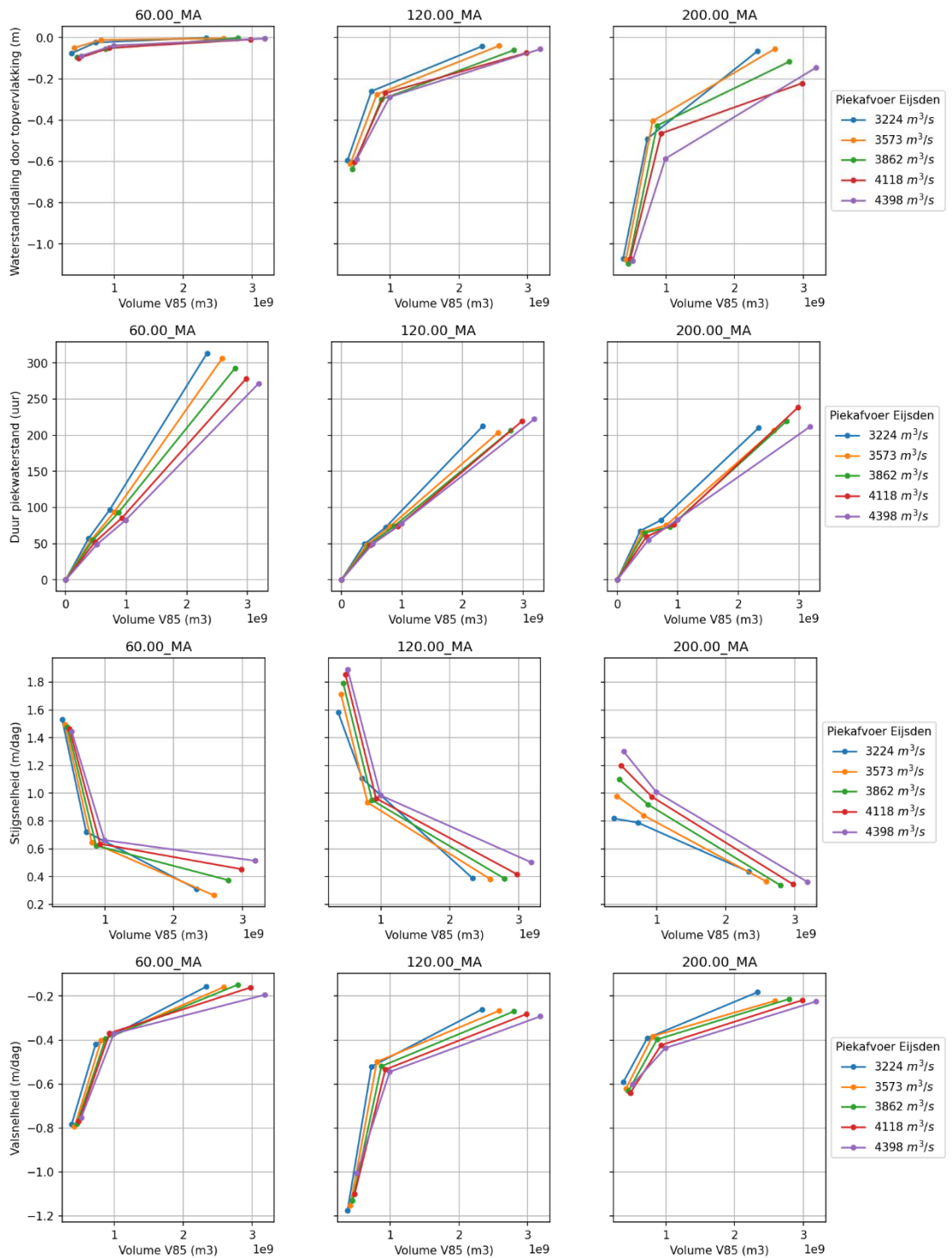
Onderstaande 12 figuren tonen de relaties tussen verschillende parameter golfvorm en de parameters van het waterstandsverloop. Bij relaties waar een lineaire relatie door de oorsprong relevant is, is ter visualisatie het punt (0,0) toegevoegd. Er worden telkens 3 locaties weergegeven waarvan verwacht wordt dat deze een verschillend beeld geven. De relaties die verder in dit rapport gebruikt worden zijn rood omkaderd.



Figuur 8.26 Parameters van het waterstandsverloop uitgezet tegen de golfkromming (curvature) van de piekafvoer bij Eijsden voor drie locaties langs de Maas.



Figuur 8.27 Parameters van het waterstandsverloop uitgezet tegen de duur van de hoogste 85% piekafvoer bij Eijsden voor drie locaties langs de Maas.



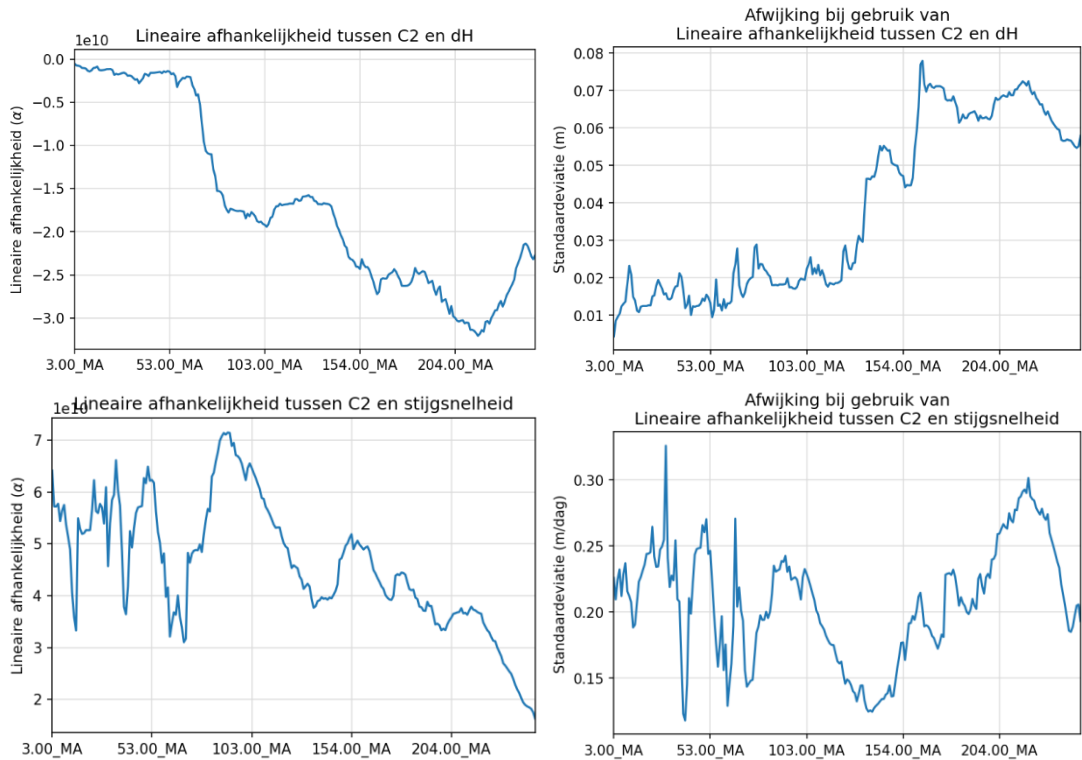
Figuur 8.28 Parameters van het waterstandsverloop uitgezet tegen het volume van de hoogste 85% piekafvoer bij Eijsden voor drie locaties langs de Maas.

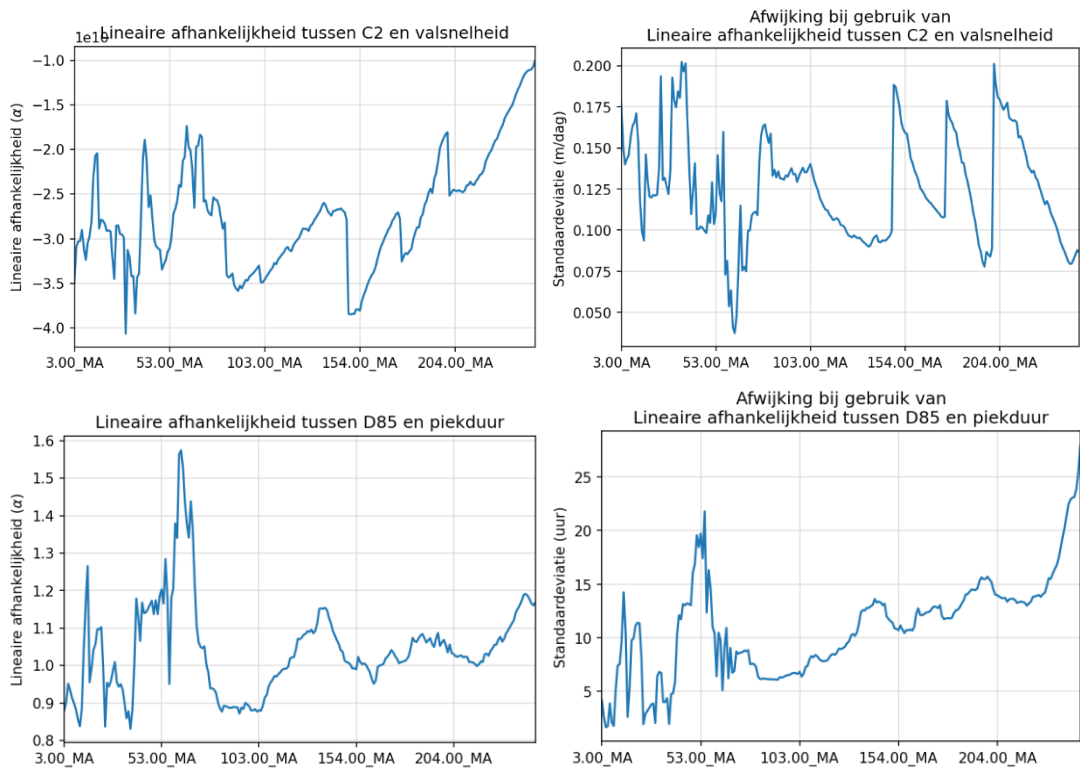
## H.4 Lineaire benadering

Op basis van de weergegeven afhankelijkheden in de voorgaande sectie, zijn de volgende lineaire relaties opgesteld voor de waterstandsvaling door topvervlakking (dH) de stijgsnelheid ( $u_{stijg}$ ) de valsnelheid ( $u_{val}$ ) en de duur van de piek ( $T_p$ ):

$$\begin{aligned}dH &= \alpha_1 \cdot C_2 \\u_{stijg} &= \alpha_2 \cdot C_2 \\u_{val} &= \alpha_3 \cdot C_2 \\T_p &= \alpha_4 \cdot D_{85}\end{aligned}$$

Onderstaande figuren geven telkens (links) de alfa-coëfficiënt tussen golfparameter en waterstandsverloopp parameter en (rechts) de standaarddeviatie wanneer uitgegaan wordt van deze lineaire relatie.





Figuur 8.29 Lineaire relatie tussen parameter golfvorm en parameter waterstandsverloop



# I Analyse golfvorm als stochast

Deze bijlage beschrijft analyses die zijn uitgevoerd voor de beantwoording van vraag E1:

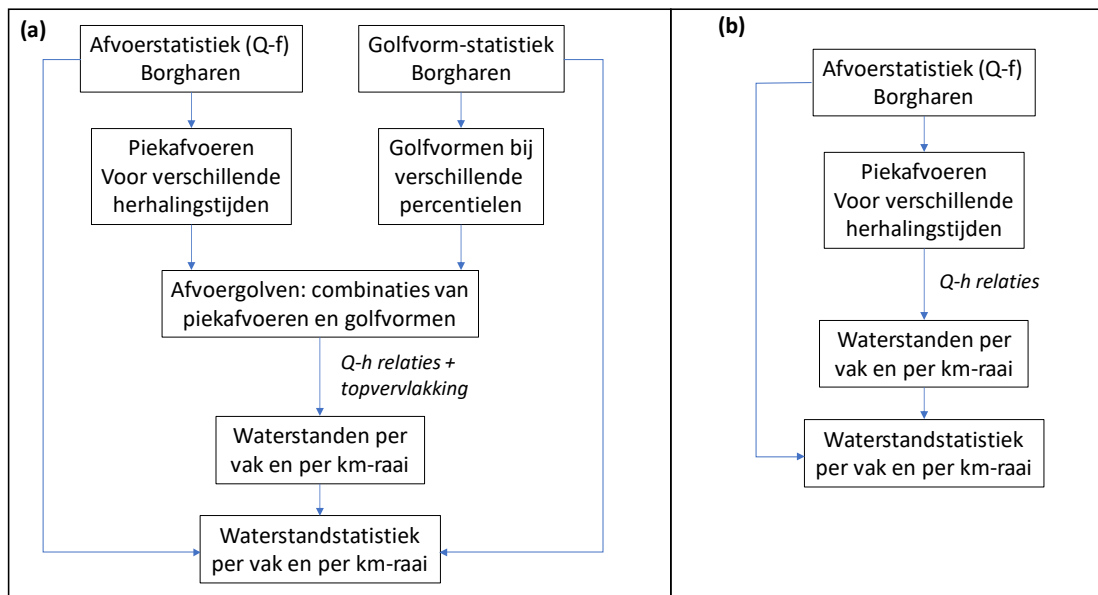
*“Zou de golfvorm als variabele parameter in het ontwerp- en beoordelingsinstrumentarium moeten worden meegenomen? Hoe draagt de lengte en steilheid (kop en staart) van de golfvorm bij aan de individuele componenten van de overstromingskans?”*

In paragraaf 6.1.3 is beschreven wat de impact kan zijn als bij het beoordelen en ontwerpen van waterkeringen de golfvorm als stochast wordt meegenomen, als alternatief voor de huidige methode met één gemiddelde golfvorm. Deze bijlage geeft nadere achtergrondinformatie van de gebruikte methode om frequentiecurven van de waterstand af te leiden met inachtneming van de golfvorm als stochast (bijlage I.1). Vervolgens worden de resultaten van de analyse in detail geanalyseerd en verklaard (bijlage I.2) en aan een gevoeligheidsanalyse onderworpen (bijlage I.3).

## I.1 Methode

### I.1.1 Overzicht

Figuur I.1a geeft schematisch weer hoe de statistiek voor piekwaterstanden wordt bepaald met inachtneming van de golfvorm als stochastische variabele. De methode begint met het vastleggen van de statistieken van piekafvoeren en golfvormen (bij Borgharen). Op basis van deze statistiek wordt uit het relevante bereik een verzameling piekafvoeren en golfvormen geselecteerd. Alle combinaties van piekafvoeren en golfvormen resulteren in een verzameling afvoergolven. Met gebruik van beschikbare waterstands-afvoer(Q-h) relaties wordt de afvoergolf vertaald naar piekwaterstanden voor alle kilometerraaien en/of dijkvakken langs de Maas. Deze Q-h relaties zijn bepaald met gebruik van de gemiddelde golfvorm. Voor bredere golfvormen zal de mate van topvervlakking kleiner zijn en de piekwaterstand daarmee hoger dan de Q-h relatie aangeeft; voor smallere golfvormen geldt precies het omgekeerde. Op de Q-h relatie wordt daarom voor elke beschouwde afvoergolf een correctie toegepast voor het verschil in de mate van topvervlakking met de gemiddelde golfvorm. Op basis van de berekende piekwaterstanden van alle beschouwde afvoergolven en de kansen op voorkomen van deze afvoergolven (volgend uit de statistieken van piekafvoeren en golfvormen) wordt de frequentieverdeling van de waterstand berekend voor alle dijkvakken en raaien.



Figuur 8.30 Schematische weergave van de methode voor het berekenen van waterstandstatistiek per dijkvak en per raai. (a) rekening houdend met variatie in golfvormen en (b) alleen gebruik makend van de gemiddelde golfvorm.

Figuur I.1b geeft schematisch weer hoe de statistiek voor piekwaterstanden wordt bepaald zonder inachtneming van de golfvorm als stochastische variabele. In deze methode is alleen de statistiek van de piekafvoer relevant; de statistiek van golfvormen speelt geen rol. Op basis van de afvoerstatistiek wordt uit het relevante bereik een verzameling piekafvoeren geselecteerd. Met gebruik van bestaande Q-h relaties wordt de afvoergolf vertaald naar piekwaterstanden voor alle kilometerraaien en/of dijkvakken langs de Maas. In dit geval hoeft geen correctie voor topvervlakking te worden toegepast, omdat de deze Q-h relaties zijn bepaald met gebruik van de gemiddelde golfvorm. Op basis van de berekende piekwaterstanden van alle beschouwde afvoerpieken en de kansen op voorkomen van deze afvoerpieken wordt de frequentieverdeling van de waterstand berekend voor alle dijkvakken en raaien.

De diverse onderdelen van Figuur I.1 worden in de volgende paragrafen nader toegelicht.

### I.1.2 Statistiek van piekafvoeren golfvormen

Voor het bepalen van overschrijdingskansen van hoge en extreme afvoeren van de Maas bij Borgharen is de beschikbare statistiek van het BOI<sup>17</sup> gebruikt. De statistiek van golfvormen is afgeleid met het model GRADE. Voor een beschrijving van beide wordt verwezen naar de paragrafen 4.1 en 4.2.

### I.1.3 Combinaties van piekafvoeren en golfvormen.

De mate van topvervlakking wordt berekend voor een groot aantal (synthetische) afvoergolven. Deze afvoergolven zijn combinaties van piekafvoeren en percentielen van golfvormen. De door te rekenen afvoergolven zijn alle combinaties van:

- Piekafvoeren van 1300 m<sup>3</sup>/s tot 6500 m<sup>3</sup>/s met stapgrootte 20 m<sup>3</sup>/s (260 piekafvoeren);
- Percentielen van afvoergolven van 0% tot 100% met stapgrootten van 2% (50 golfvormen).

<sup>17</sup> Beoordeling en Ontwerp Instrumentarium voor primaire waterkeringen in Nederland

In totaal worden dus  $260 \cdot 50 = 13.000$  afvoergolven doorgerekend. Voor elke afvoergolf kan de kans op voorkomen berekend worden uit de onderliggende statistiek (zie voorgaande paragrafen).

#### I.1.4 Topvervlakking

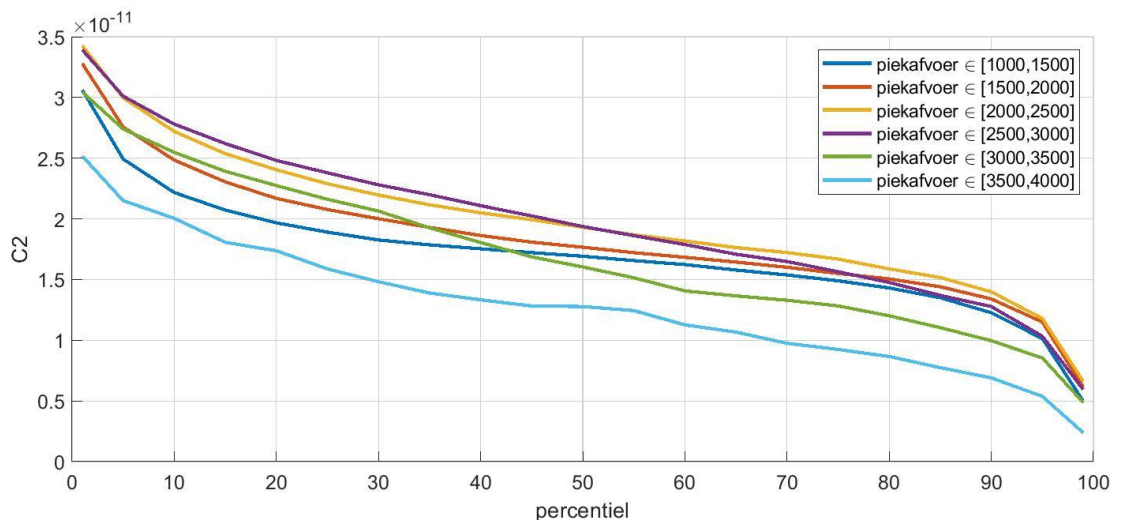
De mate van topvervlakking wordt berekend met de formule:

$$dH = \alpha C_2$$

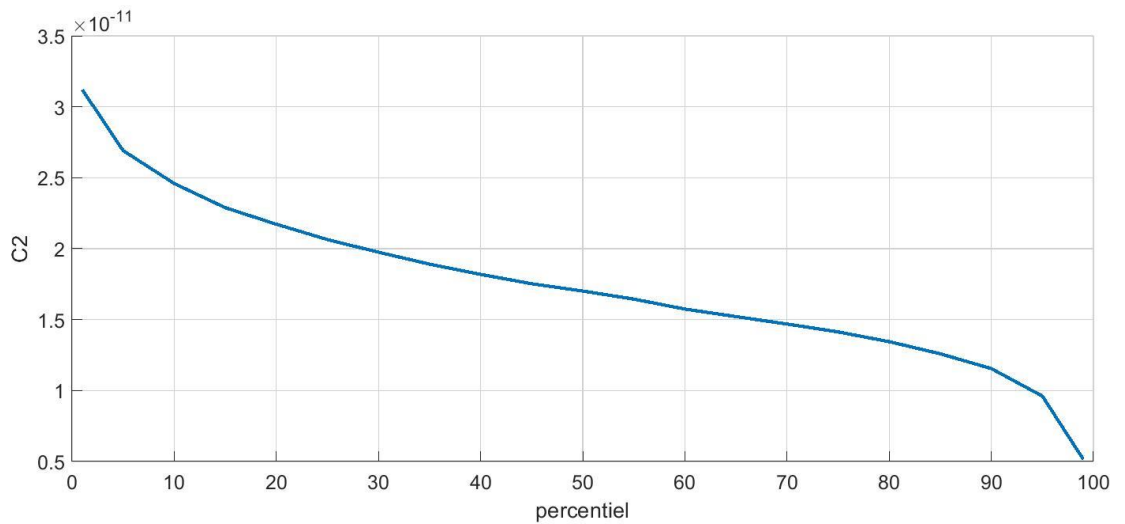
De waarde van  $C_2$  wordt afgeleid uit afvoergolfvormen. Figuur I.2 toont de berekende  $C_2$ -waarden voor verschillende combinaties van (percentielen van) golfvormen en piekafvoeren. De kleine percentielen van de golfvormen staan aan de linkerkant van de figuur. Dat zijn de relatief smalle afvoergolven. Deze hebben een relatief grootte mate van “kromming” bij de top van de afvoergolf en daardoor een relatief grote  $C_2$ -waarde. Hoe groter de  $C_2$ -waarde, des te groter de mate van topvervlakking.

Het verloop van de  $C_2$ -waarde als functie van het golfvorm-percentiel is mede afhankelijk van de piekafvoer. De laagste waarden van  $C_2$  worden berekend voor de twee klassen van hoogste afvoeren ( $[3.000 \text{ m}^3/\text{s}, 3.500 \text{ m}^3/\text{s}]$  en  $[3.500 \text{ m}^3/\text{s}, 4.000 \text{ m}^3/\text{s}]$ ). Echter, uit de onderlinge vergelijking van de  $C_2$ -waarden van de andere vier klassen blijkt dat de  $C_2$ -waarde niet consistent afneemt voor toenemende piekafvoer. Het is daarom niet zeker of de relatief lage  $C_2$ -waarden van de twee klassen van hoogste afvoeren een fysisch fenomeen zijn of het gevolg van “toeval” omdat er relatief weinig afvoeren in deze klassen zijn.

In het kader van BOI zijn golfvormen ‘opgeschaald’. De onderliggende aanname van dat opschalen impliceert dat golfvormen gemiddeld gezien dezelfde vorm hebben, ongeacht de piekafvoer. Uit die aanname volgt dat de  $C_2$ -waarde onafhankelijk is van de piekafvoer. Daarom is besloten om de  $C_2$ -waarde te ‘middelen’ over de verschillende klassen van de piekafvoer om vervolgens voor elke piekafvoer dit gemiddelde verloop aan te nemen. Figuur I.3 toont het resultaat van deze uitmiddeling. De  $C_2$ -waarde is dan alleen nog afhankelijk van de (percentielwaarde van) de golfvorm. In paragraaf I.3 zal aangetoond worden dat de impact van deze aanname op de eindresultaten en conclusies nihil is.



Figuur 8.31 Berekende  $C_2$ -waarden voor verschillende combinaties van (percentielen van) golfvormen en piekafvoeren



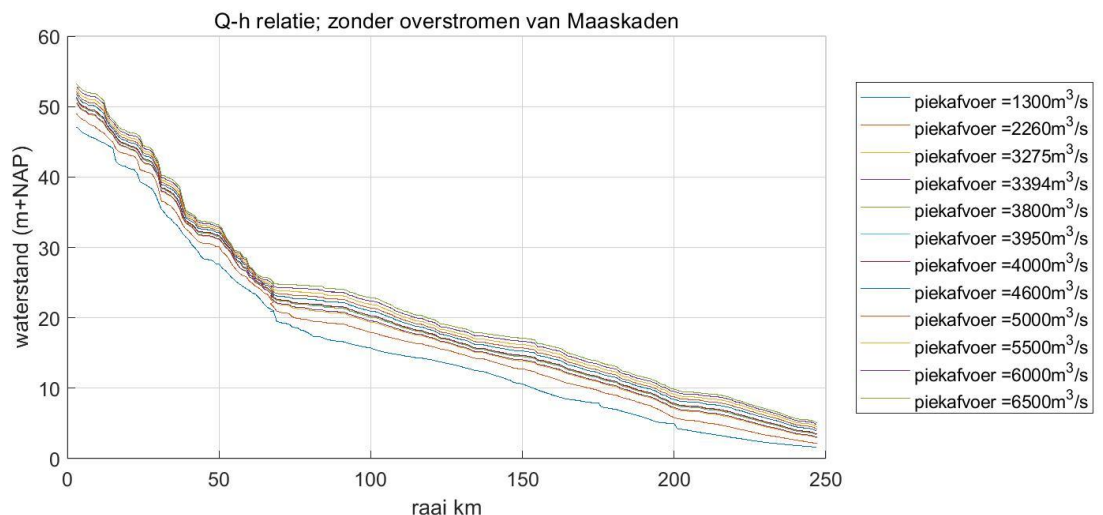
Figuur 8.32 C2-waarden voor verschillende (percentielen van) golfvormen, gemiddeld over alle klassen van piekafvoeren

### I.1.5 Waterstands-afvoer (Q-h) relaties

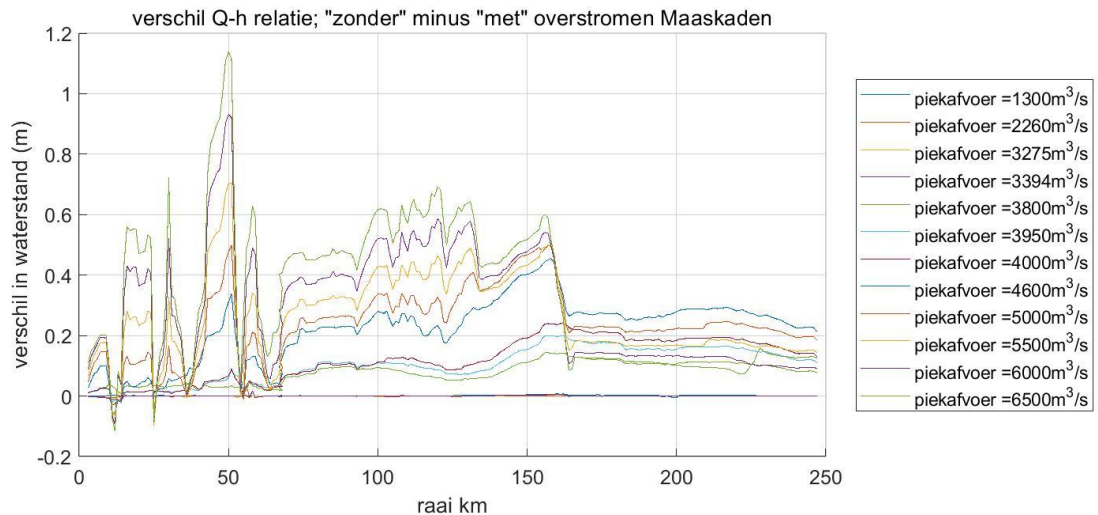
In het kader van BOI zijn modelsimulaties uitgevoerd waarmee de relatie is vastgelegd tussen enerzijds de piekafvoer bij Borgharen (Q) en anderzijds de waterstanden benedenstrooms langs de Maas. Er zijn twee situaties doorgerekend:

- (a) Een simulatie waarbij de Maaskaden niet kunnen overstromen;
- (b) Een simulatie waarbij de Maaskaden wel kunnen overstromen;

In beide simulaties is gerekend met een gemiddelde golfvorm, vergelijkbaar met de mediane golfvorm (50-percentiel). Het overstromen van Maaskaden zorgt voor een daling van de waterstanden benedenstrooms. Figuur I.4 toont de Q-h relaties voor de situatie zonder overstromen van de Maaskaden. Figuur I.5 toont het verschil in waterstanden tussen de twee simulaties. Daaruit blijkt dat het effect van de overstromingen van de Maaskaden op de waterstand enkele decimeters kan zijn en toeneemt naarmate de piekafvoer groter is. Het maximale verschil is zelfs meer dan een meter, maar dat is bij een extreem hoge afvoer van 6500 m<sup>3</sup>/s.



Figuur 8.33 Waterstanden langs de Maas bij verschillende afvoeren (Q-h relatie), situatie zonder overstromen van Maaskaden.



Figuur 8.34 Verschil in Q-h relatie tussen de situaties “zonder” en “met overstroom van Maaskaden.

## I.2 Verklaring van de belangrijkste conclusies

In paragraaf 6.1 zijn frequentiecurves van waterstanden afgeleid voor alle raaien op basis van twee methoden:

- (1) Met de golfvorm als stochast;
- (2) Met alleen de mediane golfvorm.

Deze berekeningen zijn uitgevoerd met gebruik van twee verschillende Q-h relaties:

- (a) Op basis van simulaties waarbij de Maaskaden niet kunnen overstroom;
- (b) Op basis van simulaties waarbij de Maaskaden wel kunnen overstroom.

Dit heeft geresulteerd in de volgende conclusies (zie paragraaf 6.1):

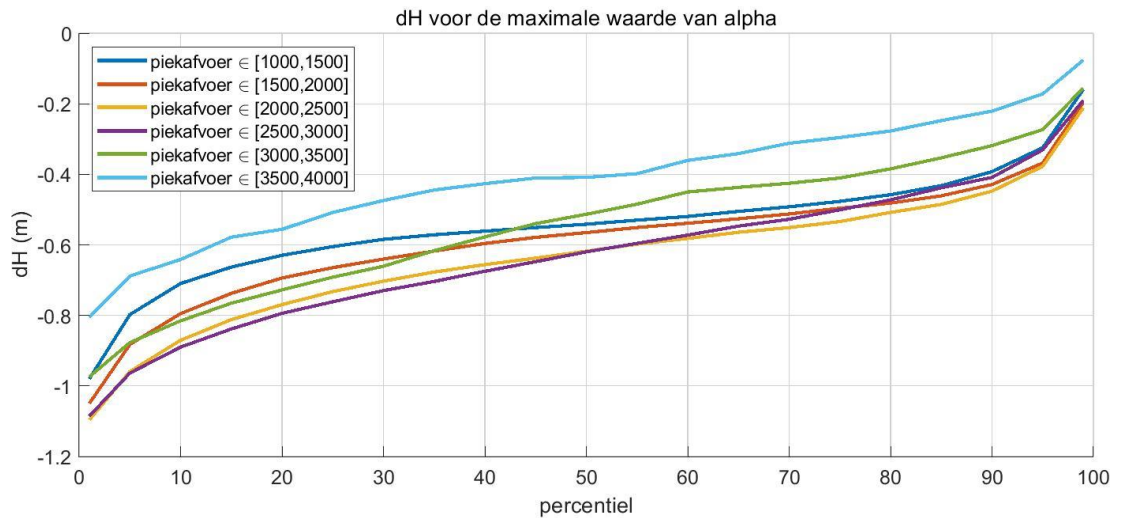
- C1) De verschillen in resultaten tussen methode (1) en methode (2) zijn over het algemeen beperkt, maximaal 0.06m.
- C2) De methode met de golfvorm als stochast resulteert over het algemeen in een hogere waterstand dan de methode met de mediane golfvorm.
- C3) De verschillen nemen over het algemeen toe in benedenstroomse richting.
- C4) De verschillen zijn over het algemeen maximaal rond kilometerraai 220
- C5) De verschillen zijn het grootst voor een herhalingsjijd van 1000 jaar voor de situatie met overstroom van de Maaskaden;

In het vervolg van deze bijlage worden deze conclusies nader verklaard.

*C1) De verschillen in resultaten tussen methode (1) en methode (2) zijn over het algemeen beperkt, maximaal 0.06m.*

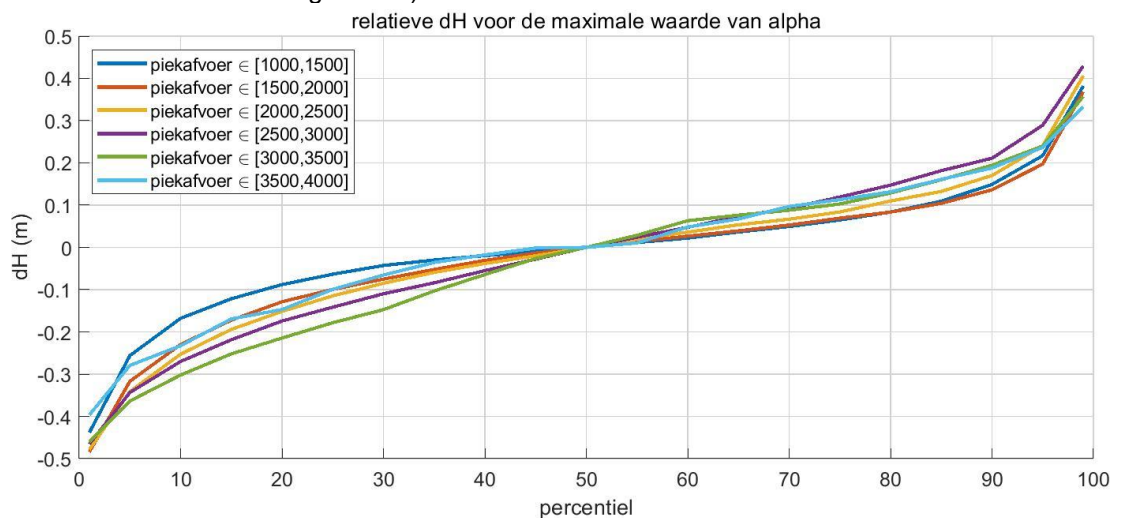
Het feit dat de verschillen klein zijn geeft aan dat het gebruik van de mediane golfvorm een goede ‘gemiddelde’ weergave geeft van de mate van topvervlakking. Het, in vergelijking met de mediane golfvorm, waterstandsverhogende effect van relatief stompe golfvormen wordt dus grotendeels opgeheven door het waterstandsverlagende effect van spitse golven. De eerder besproken Figuur I.2 toont de berekende waarde van parameter C2 voor verschillende combinaties van golfvormen (percentielen) en klassen van afvoerpieken. De mate van topvervlakking is proportioneel met deze parameter C2.

De mate van topvervlakking is maximaal rond kilometerraai 220, waar de waarde van parameter alpha maximaal is (ongeveer  $-3,2E10$ ). Vermenigvuldiging van deze waarde van alpha met de C2-waarden van Figuur I.2 geeft de mate van topvervlakking voor verschillende combinaties van golfvormen (percentielen) en klassen van afvoerpieken (zie Figuur I.6).

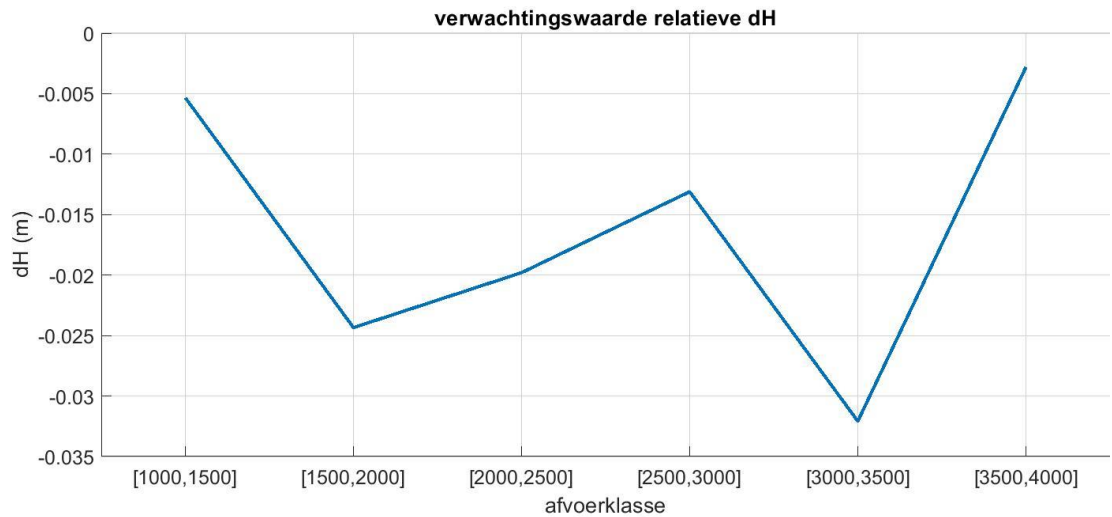


Figuur 8.35 Berekende topvervlakking voor verschillende combinaties van (percentielen van) golfvormen en piekafvoeren

Figuur I.7 toont het verschil van de mate van topvervlakking van alle golfvormen met de topvervlakking van de mediane golfvorm (50-percentiel). De mediaan correspondeert met de golfvorm waarmee de Q-h relaties zijn afgeleid. De waarden van Figuur I.7 kunnen daarom worden beschouwd als correcties die worden toegepast op de Q-h relaties om (in methode (1)) rekening te houden met de grotere (kleinere) mate van topvervlakking van spitse (stompe) golven in vergelijking met de mediane golfvorm. Daarom geldt in Figuur I.7 dat de correctie op de Q-h relatie negatief is voor spitse golfvormen (percentielen  $< 50$ ) en positief voor stompe golfvormen (percentielen  $> 50$ ). Door deze waarden uit te middelen over alle percentielen kan bepaald worden de gemiddelde waarde is van de correctie over alle mogelijke golfvormen. Figuur I.8 toont deze gemiddelden voor elk van de klassen van afvoerpieken. De gemiddelde correctie op de Q-h relatie is in absolute zin kleiner dan 0,04 meter. En het (in absolute zin) maximum treedt op bij kilometerraai 220 waar de mate van topvervlakking het grootst is. Voor andere locaties zijn deze gemiddelden in absolute zin nog kleiner. Dit verklaart waarom het verschil tussen de twee rekenmethoden (golfvorm als stochast versus mediane golfvorm) maximaal enkele centimeters is.



Figuur 8.36 Berekende topvervlakking relatief ten opzichte van de mediane golfvorm (50-percentiel)



Figuur 8.37 Uitmiddeling van de relatieve dH waarden van Figuur 8.36 over alle percentielwaarden.

C2) De methode met de golfvorm als stochast resulteert over het algemeen in een hogere waterstand dan de methode met de mediane golfvorm.

Deze conclusie lijkt in strijd met Figuur I.8. Immers, gemiddeld over alle percentielwaarden is de topvervlakking enkele centimeters extra ten opzichte van de topvervlakking van de mediane golfvorm (zie Figuur I.8). Op grond daarvan zou verwacht worden dat de methode met de golfvorm als stochast ook enkele centimeters lager uit zou komen dan de methode met de mediane golfvorm. Dat juist het omgekeerde het geval is heeft te maken met het effect van “uitintegreren van onzekerheden”. In methode (1) is de golfvorm een stochast. Dat betekent dat deze feitelijk een extra onzekerheid is in vergelijking met methode (2). Deze onzekerheid wordt uitgeïntegreerd bij het berekenen van de frequentielijn. Bij het uitintegreren van onzekerheden geldt dat “tegvallers” (in dit geval een stompe golfvorm met relatief beperkte topvervlakking) zwaarder doorwegen dan “meevallers” (in dit geval een scherpe golfvorm met relatief grote topvervlakking). Om dezelfde reden heeft de frequentielijn van de afvoer bij Borgharen bij grote herhalingstijden een hogere afvoer als onzekerheden worden meegenomen dan wanneer deze niet worden meegenomen (zie Figuur G.1).

C3) De verschillen nemen over het algemeen toe in benedenstroomse richting.

Dit is uiteraard eenvoudig te verklaren uit het feit dat de mate van topvervlakking over het algemeen toeneemt in benedenstroomse richting.

C4) De verschillen zijn over het algemeen maximaal rond kilometerraai 220

Dit heeft te maken met het feit dat de mate van topvervlakking het grootst is rond deze kilometerraai. Dat uit zich in het feit dat de alpha-waarde in dit gebied het grootst is, zie Figuur 6.4.

C5) De verschillen zijn het grootst voor een herhalingstijd van 1000 jaar voor de situatie met overstromen van de Maaskaden;

Figuur I.9 toont de frequentielijnen van de waterstand bij kilometerraai 220, zoals berekend met de beide methoden voor de situatie met overstromen van Maaskaden. De frequentielijn die is berekend met de mediane golfvorm vertoont rond een herhalingstijd van 1.000 jaar (overschrijdingsfrequentie 1/1.000 per jaar) een kleine “knik”. Deze knik is niet aanwezig in frequentielijn die is berekend met de methode met de golfvorm als stochast.

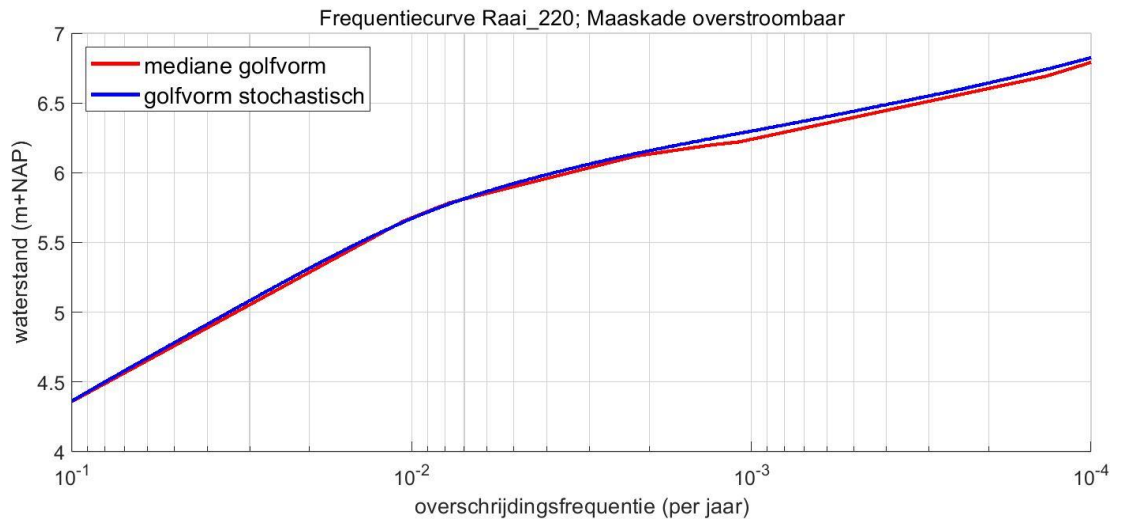
Dat is de reden waarom juist voor een herhalingstijd van 1.000 jaar de verschillen het grootst zijn. De knik in de frequentielijn wordt grotendeels veroorzaakt door een vergelijkbare knik in de Q-h relatie rond een afvoer van 4.000 m<sup>3</sup>/s (zie Figuur I.10). Dat is de afvoer met een herhalingstijd van ongeveer 1.000 jaar.

De vraag is dan waarom deze knik niet te zien is in de frequentielijn die berekend is met de golfvorm als stochast. De oorzaak daarvoor ligt, net als bij de verklaring van conclusie C2, in het effect van het uitintegreren van onzekerheden. Van analyses in het kader van WBI/BOI is bekend dat het uitintegreren van onzekerheden voor locaties met een relatief vlakke Q-h relatie kan leiden tot een overschatting van de frequentielijn van de waterstand. Dat kan het beste toegelicht worden aan de hand van een extreem voorbeeld. Stel dat de waterstand bij kilometerraai 220 nooit hoger kan worden dan de waterstand die correspondeert met een afvoer van 4.000 m<sup>3</sup>/s (~ NAP+6.4 m) omdat bovenstrooms grote overstromingen plaatvinden bij afvoeren > 4.000 m<sup>3</sup>/s. Voor deze fictieve situatie kunnen we opnieuw de frequentielijn van de waterstand uitrekenen met de beide methoden, zie Figuur I.11. De frequentielijn die is berekend met de mediane golfvorm wordt keurig “afgekapt” boven NAP+6.4 m. Echter, de frequentielijn die is berekend met de golfvorm als stochast geeft aan dat waterstanden boven NAP+6.4 m nog steeds mogelijk zijn, terwijl dat in dit fictieve voorbeeld fysisch niet mogelijk is.

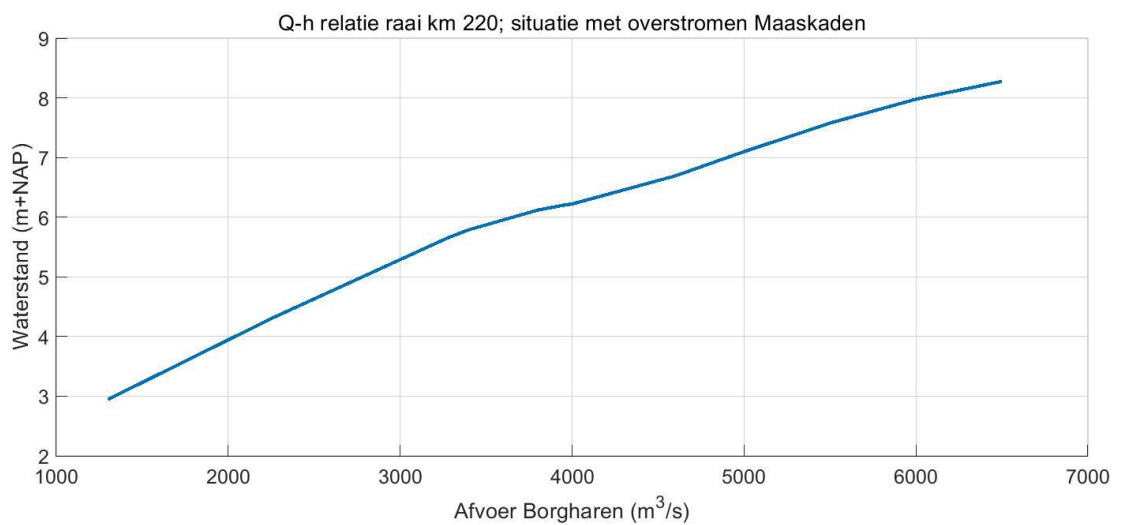
Dit tegenstrijdige resultaat is een artefact van de rekenmethode waarin onzekerheden zoals de golfvorm worden uitgeïntegreerd. In deze rekenmethode worden correcties op de Q-h relatie toegepast om rekening te houden met het feit dat bij spitse golfvormen de maximale waterstand lager uitkomt dan de mediane golfvorm (waar de Q-h relatie op gebaseerd is) en dat bij stompe golfvormen de maximale waterstand hoger uitkomt dan de mediane golfvorm. De “positieve” correctie bij stompe golfvormen zorgt ervoor dat in deze berekening de waterstand nog steeds hoger uit kan komen dan NAP+6.4m. Dat is dus, zoals gezegd, een artefact van de rekenmethode. Dit kan voorkomen worden door modelberekeningen uit te voeren voor alle denkbare combinaties van piekafvoeren en golfvormen, in plaats van de benadering zoals hier gebruikt met correctie op de waterstand als functie van parameters alpha en C2. Dat vergt echter wel een aanzienlijke toename in rekentijd; er zullen dan veel meer modelsimulaties moeten worden uitgevoerd met het Hydraulische model van de Maas.

In het fictieve voorbeeld van Figuur I.11 heeft dit artefact van de rekenmethode een relatief grote impact op de rekenresultaten. In de meer realistische situatie van Figuur I.9 is de invloed kleiner, maar zoals gezegd wel grotendeels de oorzaak van het feit dat bij een herhalingstijd van 1.000 jaar (waar de Q-h relatie tijdelijk iets vlakker verloopt) de verschillen groter zijn dan voor andere herhalingstijden. Voor herhalingstijden > 1.000 jaar zijn de verschillen al weer kleiner in Figuur I.9, maar ook deze verschillen worden naar verwachting grotendeels veroorzaakt door het genoemde artefact. De werkelijke verschillen als gevolg van het wel/niet meenemen van de golfvorm als stochast zal daarom naar verwachting nog kleiner zijn dan aangegeven in Figuur 6.6 en Figuur 6.7.

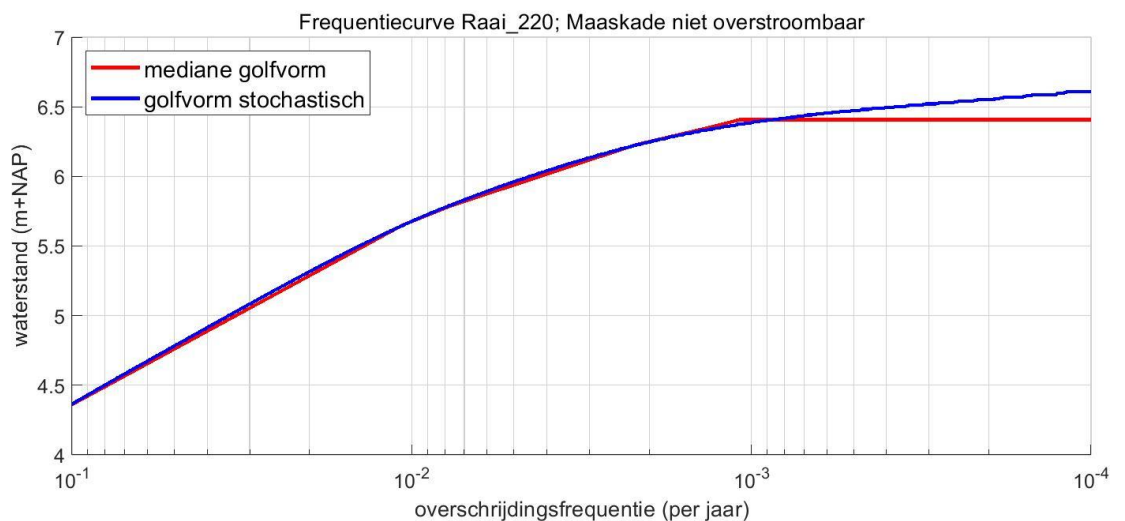




Figuur 8.38 Frequentielijnen van de waterstand bij kilometterraai 220, zoals berekend met de beide methoden; situatie met overstromen van Maaskaden.



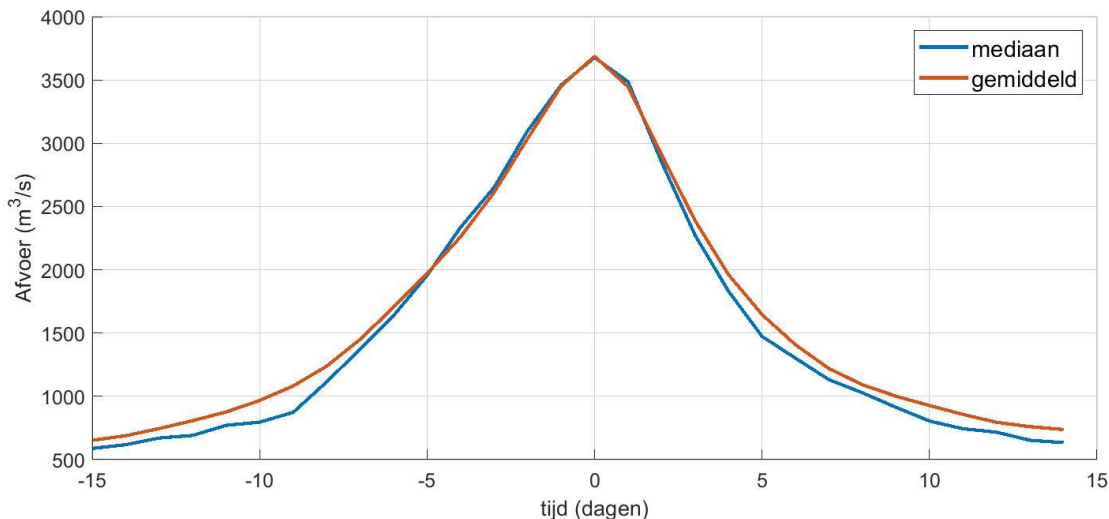
Figuur 8.39 Q-h relatie voor kilometterraai 220; situatie met overstromen van Maaskaden



Figuur 8.40 Frequentielijnen van de waterstand bij kilometterraai 220, zoals berekend met de beide methoden; in de fictieve situatie dat waterstanden nooit hoger dan NAP+6.4 m uitkomen.

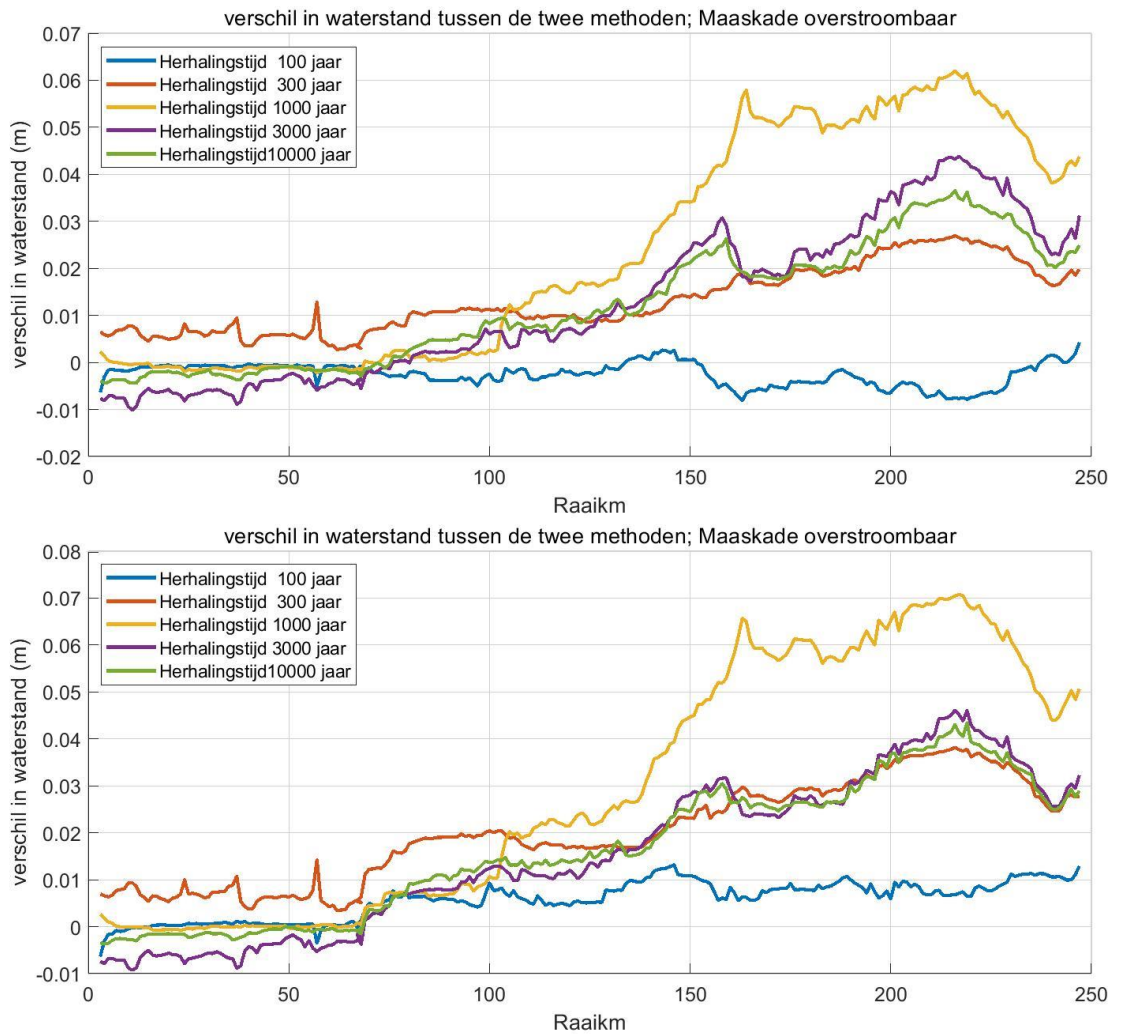
### I.3 Gevoeligheidsanalyse en discussie

In de analyses in paragraaf 6.1.3 en de vorige secties van deze bijlage is telkens aangegeven dat de Q-h relatie is afgeleid van simulaties met een mediane golfvorm. Dat is niet helemaal correct, in het kader van WBI/BOI is bij het afleiden van de Q-h relaties gebruik gemaakt van de gemiddelde golfvorm. Het verschil tussen deze twee golfvormen is echter klein, zie het voorbeeld van Figuur I.12. Vooral in de top zijn de verschillen klein. Het onderlinge verschil in C2-waarde is ongeveer gelijk aan 1.5% en daarmee van weinig invloed op de resultaten.



Figuur 8.41 Vergelijking van de gemiddelde golfvorm en de mediane golfvorm volgens GRADE.

In paragraaf I.1.4 is besloten om te rekenen met C2-waarden die zijn gemiddeld over alle klassen van piekafvoeren. Om de invloed van deze keuze te kwantificeren zijn de berekeningen herhaald met andere keuzes van C2-waarden, namelijk de twee “uitersten” van Figuur I.2: de C2-waarden van de afvoerklasse van 2.000 m³/s tot 2.500 m³/s en de C2-waarden van de afvoerklasse van 3.500 m³/s tot 4.000 m³/s. Figuur I.13 toont de resultaten van deze exercities en daaruit blijkt dat deze in dezelfde orde van grootte zijn als in Figuur 6.6 en Figuur 6.7. De keuze om te rekenen met gemiddelde C2-waarden heeft dus nauwelijks invloed op de berekende verschillen tussen de rekenmethode met de afvoer stochast enerzijds en de rekenmethode met de mediane golfvorm anderzijds. De keuze van de C2-waarden heeft overigens wel invloed op de absolute waarde van de berekende waterstanden van de frequentielijnen. Dat is voor deze analyse echter niet relevant omdat we hier alleen geïnteresseerd in de verschillen tussen de beide rekenmethoden.



Figuur 8.42 Vergelijkbare rekenexercitie als Figuur 6.7, met in dit geval de C2-waarden gelijk aan de C2-waarden van de afvoerklasse van 2.000 m<sup>3</sup>/s tot 2.500 m<sup>3</sup>/s (boven) en van de afvoerklasse van 3.500 m<sup>3</sup>/s tot 4.000 m<sup>3</sup>/s (onder). De grafieken tonen de verschillen tussen enerzijds de methode met golfvorm als stochast en anderzijds de methode met de mediane golfvorm; situatie waarin de Maaskaden overstroombaar zijn.

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)