



UNIVERSITY OF TWENTE.

Faculteit Engineering Technology,
Civiele Techniek

Hydraulica - Evaluatie afvoerbepaling van de IJssel te Olst

Eray Bilgili

Bachelor eindopdracht
Individueel onderzoeksoopdracht
2018

Begeleiders:

Msc. D. van Putten
dr. ir. B. Vermeulen

Faculteit Engineering Technology,
Civiele Techniek & WEM-MFS
Universiteit Twente
7522 NB Enschede
Nederland

Voorwoord

Voor u ligt het rapport 'evaluatie afvoerbepaling van de IJssel te Olst.' Dit rapport is geschreven in het kader van mijn afstuderen aan de opleiding Civiele Techniek aan de Universiteit Twente en in opdracht van de instelling Rijkswaterstaat Oost-Nederland. Van 9 april 2018 tot en met 16 juni 2018 ben ik actief geweest met het onderzoek en schrijven van het rapport. Binnen Rijkswaterstaat Oost-Nederland ben ik werkzaam geweest binnen de afdeling NOV (Netwerk Ontwikkeling Visie) te Arnhem. Ik kijk met plezier terug naar de mooie momenten in slechts een korte periode, waar ik in contact ben gekomen met het bedrijfsleven.

Met behulp van mijn stagebegeleider, Msc. Daniël van Puten, heb ik het doel van het onderzoek en de te beantwoorden onderzoeksvragen geformuleerd. Het uitvoeren van het onderzoek was niet altijd gemakkelijk. Echter met de hulp van Daniël van Putten is het toch gelukt om de uitdagingen in het onderzoek aan te gaan. In de eerste plaats zou ik daarom graag Daniël van Putten willen bedanken die mij op inhoudelijk gebied heeft begeleid door duidelijkheid, literatuur en feedback te verschaffen. Daarnaast zou ik Daniël van Putten nogmaals willen bedanken voor het promoten van mijn onderzoek binnen Rijkswaterstaat Oost-Nederland. Dit heeft mij gestimuleerd om een succesvol onderzoek en rapport op te leveren. Ook wil ik Susanne Quartel bedanken voor de geleverde literatuur en input voor het onderzoek.

Tevens wil ik mijn begeleider vanuit de Universiteit Twente, dr.ir. Bart Vermeulen, bedanken voor zijn bijdrage in een goede voorbereiding naar mijn onderzoek en geleverde feedback. Ook wil ik dr.ir. M.J. Booij bedanken voor zijn hulp bij de aanstelling van mijn stage bij Rijkswaterstaat.

Bovendien wil ik mijn collega's bij Rijkswaterstaat Oost-Nederland binnen de afdeling NOV bedanken voor de fijne samenwerking en werksfeer. Zo ben ik sinds mijn stagedag goed ontvangen en heb ik met een effectieve wijze kunnen communiceren met ze. Overigens wil ik mijn vrienden en familie danken voor hun wijze raad en hulp tijdens mijn onderzoek. Zo wil ik ter aanvulling Stan Weerkamp bedanken voor zijn ondersteuning tijdens het schrijven van dit rapport. Zijn hulp heeft een belangrijke rol gespeeld in de totstandkoming van dit onderzoek.

Ten slotte hoop ik dat het onderzoek verhelderend is, zodat het gebruikt kan worden in een vervolgonderzoek. Het onderzoek is namelijk binnen een kort tijdsbestek tot stand gekomen. Op deze manier zijn er nog steeds interessante vragen met betrekking tot het onderzoek onbeantwoord. Toch ben ik content met het eindresultaat van het onderzoek. Dit rapport bevat immers antwoorden op belangrijke onderzoeksvragen.

Ik wens u veel leesplezier toe.

Eray Bilgili

Arnhem, 16 juni 2018

Samenvatting

De afvoer is een belangrijke parameter binnen het waterbeheer. Aangezien het continu meten duur is, worden afvoeren van de rivieren in Nederland bepaald door middel van een Qh-relatie. Zo'n relatie kan gezien worden als een functievoorschrift, waarbij aan de hand van gemeten waterstanden de afvoeren bepaald worden. Echter is het mogelijk dat afvoerbepalingen sterk verschillen met de afvoermetingen ten gevolge van natuurlijke processen of geometrische veranderingen van de rivier. Zo zijn er significante verschillen waargenomen tussen de afvoermetingen-en bepalingen tijdens het hoogwater in januari 2018 van de IJssel bij Olst. Om deze verschillen te verkleinen is inzicht in hoe deze afwijkingen ontstaan noodzakelijk.

Dit rapport onderzocht hoe de verschillen tussen afvoermetingen-en bepalingen van het hoogwater in januari 2018 bij Olst te verklaren zijn en of er verbetermogelijkheden zijn voor de huidige afvoerbepaling. Hiervoor is de volgende onderzoeksvraag opgesteld: *Welke verbetermogelijkheden zijn er voor de huidige Qh-relatie van de IJssel bij Olst?* Ten eerste is inzicht verkregen in hoe de huidige Qh-relatie is afgeleid. Zo is deze relatie opgesteld in 2010 en zijn daarvoor afvoermetingen verzameld en beoordeeld. Daarnaast is bij de afleiding gebruik gemaakt van de inbreng van een 2D-model. Aan de hand van het 2D-model en de afvoermetingen is een kromme gefit. Deze kromme representeert de Qh-relatie, waar met gemeten waterstanden de afvoeren bepaald worden. Ten tweede zijn na de afleiding van de huidige Qh-relatie, afvoermetingen gebruikt ter evaluatie. Deze evaluatie resulteerde in grotere verschillen tussen afvoermetingen-en bepalingen bij oplopende waterstanden. Zo is geconstateerd dat bij lage waterstanden deze verschillen klein zijn, terwijl bij hogere waterstanden aanzienlijk grotere verschillen waargenomen zijn.

Voor verbetermogelijkheden van de huidige Qh-relatie is de gevoeligheid van de afvoerbepaling voor bodemverandering, vegetatie, ruimtelijke ingrepen (verlaagde uiterwaarden bij Olst, hoogwatergeul Veessen-Wapenveld en Ruimte voor de Rivier projecten bij Zwolle en Kampen) en niet-permanente stromingsomstandigheden (tijdsafhankelijke stroming) afzonderlijk geanalyseerd. Zo werd duidelijk welke natuurlijke processen en geometrische veranderingen een significante invloed hebben. Deze analyse is verricht met onder meer een vernieuwd 2D-model. Zo is gebleken dat bodemverandering, vegetatie, de verlaagde uiterwaarden bij Olst, Ruimte voor de Rivier projecten bij Zwolle en Kampen, en niet-permanentie een kleine bijdrage leverden aan veranderingen in afvoeren bij afvoergroottes die gemeten zijn in januari 2018. Echter viel op dat door gebruik van een vernieuwd 2D-model afvoerbepalingen meer overeenkomen met de afvoergroottes van januari 2018 dan met de Qh-relatie 2010. Dit ligt in lijn met de evaluatie van de Qh-relatie in 2013. Daarnaast is uit de gevoeligheidsanalyse naar voren gekomen dat bij gebruik van de hoogwatergeul Veessen-Wapenveld, waterstanden significant lager worden en zo een grote impact hebben op de onderschatting van afvoerbepalingen.

Op basis van deze bevindingen wordt aanbevolen om een nieuwe Qh-relatie te ontwerpen voor de locatie Olst met vernieuwde 2D-modellen. Daarnaast is het raadzaam om de effecten die optreden bij gebruik van de hoogwatergeul Veessen-Wapenveld op te nemen in de afvoerbepaling. Zodoende kunnen afvoerverschillen die optreden door deze geul gecorrigeerd worden, wat moet leiden tot een betere overeenkomst tussen de afvoermetingen-en bepalingen na opening van de geul. Een eventueel vervolgonderzoek zou zich kunnen richten op de effecten van de hoogwatergeul op de afvoerbepaling.

Inhoudsopgave

1	Introductie	1
2	Theorie	3
3	Qh-relatie 2010	5
3.1	Afleiding Qh-relatie 2010	5
3.2	Data voor afleiding Qh-relatie 2010	5
3.3	Qh-kromme 2010	7
3.4	Concept Qh-relatie 2013	8
4	Evaluatie Qh-relatie 2010	10
4.1	Data voor evaluatie	10
4.2	Afwijkingen	11
5	Verbetermogelijkheden	12
5.1	Bodemverandering	12
5.2	Vegetatie	12
5.3	Ruimtelijke ingrepen	13
5.4	Hysteresis-effect (niet-permanentie)	14
5.5	Wind	14
6	Gevoeligheidsanalyse	15
6.1	Referentiemodel	15
6.2	Gevoeligheid bodemverandering	17
6.3	Gevoeligheid Vegetatie	19
6.4	Gevoeligheid uiterwaarden Olst	19
6.5	Gevoeligheid hoogwatergeul Veessen-Wapenveld	20
6.6	Gevoeligheid RvdR, Zwolle en Kampen	21
6.7	Totale gevoeligheid	22
6.8	Correctie voor niet-permanentie	23
6.8.1	Energieverhang	24
6.8.2	Voortplantingssnelheid	25
6.8.3	Term energieverhang en voortplantingssnelheid	26
6.8.4	Tijdsafgeleide waterstand	27
6.8.5	Afvoercorrectie voor niet-permanentie	28
7	Toepassing hoogwater 2018	30
8	Conclusie	31
9	Discussie	32
	Referenties	34
	Bijlage A Analyse huidige Qh-relatie	36
A.1	Afvoermetingen 1986-2010 voor afleiding Qh-relatie 2010	36
A.2	Datapunten afvoermetingen en WAQUA-berekening	37
A.3	Validatie afvoermetingen concept Qh-relatie 2013	37
	Bijlage B Evaluatie huidige Qh-relatie	38
B.1	Toegeleverde afvoermetingen	38
B.2	Qh-relatie 2010 ten opzichte van afvoermetingen	39
	Bijlage C Verbetermogelijkheden	41
C.1	Correctie voor niet-permanente volgens Jones	41

Bijlage D Gevoeligheidsanalyse	43
D.1 Maatregelen referentiemodel Baseline	43
D.2 Invoer referentiemodel WAQUA-berekening	44
D.3 Waterstandsverloop referentiemodel	45
D.4 Gevoeligheid bodemverandering	45
D.5 Gevoeligheid vegetatie	46
D.6 Gevoeligheid uiterwaarden Olst	47
D.7 Gevoeligheid Veessen-Wapenveld	49
D.8 Gevoeligheid RvdR.: Zwolle en Kampen	52
D.9 Totale gevoeligheid	55
D.10 Invoer hoogwatergolf WAQUA-berekening	59
D.11 Afvoercorrectie	60

Lijst van figuren

2.1 Loop-rating kromme door hysteresis effect (Muste & Lee, 2013)	4
3.1 Relatie waterstands- en afvoermetingen Olst (Wijbenga & Haaren, 2010)	6
3.2 Voorbeeld dwarsprofiel (Wijbenga & Haaren, 2010)	7
3.3 Qh-kromme 2010	8
3.4 Qh-kromme 2010 en concept Qh-kromme 2013	9
4.1 Qh-kromme 2010 en waterstands- en afvoermetingen 2011-2018	10
6.1 Opgelegde (getrapte) afvoerterloop op instroomrand bij Zutphen	16
6.2 Lineair geïnterpoleerde datapunten referentiemodel en Qh-kromme 2010	16
6.3 Datapunten referentiemodel en variant bodemverandering	17
6.4 Relatief waterstandsverschil referentiemodel en variant bodemverandering	18
6.5 Relatieve afvoerafwijkingen referentiemodel en variant bodemverandering	18
6.6 Datapunten referentiemodel, variant-2017 en Qh-kromme 2010	22
6.7 Relatieve bijdrage factoren aan afvoerverschil	23
6.8 Energieverhang voor permanentie ter plaatse van Olst	25
6.9 Afvoergolf op de instroomrand bij Zutphen	26
6.10 Voortplantingssnelheid ter plaatse van Olst	26
6.11 $\frac{1}{S_{ec}}$ voor niet-permanentie ter plaatse van Olst	27
6.12 Afvoermetingen Olst na correcties voor niet-permanentie	29
6.13 Relatieve groottes van correcties ten opzichte van afvoermetingen	29
A.1 Relatie waterstand en afvoer Olst op basis van metingen en WAQUA (Wijbenga & Haaren, 2010)	37
A.2 Gebruikte metingen voor concept Qh-relatie 2013 (Van der Veen, 2013)	37
B.1 Waterstands- en afvoermetingen 2011-2018	39
B.2 Afvoermetingen 2011-2018 uitgezet tegen afvoeren Qh-relatie 2010	39
B.3 Qh-kromme 2010 en waterstands- en afvoermetingen 1986-2010	40
B.4 Afvoermetingen 1986-2010 uitgezet tegen afvoeren Qh-relatie 2010	40
D.1 Waterstandsverloop referentiemodel over de tijd	45
D.2 Afvoerafwijkingen tussen referentiemodel en variant bodemverandering	45
D.3 Datapunten referentiemodel en variant vegetatie	46
D.4 Relatief waterstandsverschil referentiemodel en variant vegetatie	46
D.5 Relatieve afvoerafwijkingen referentiemodel en variant vegetatie	47
D.6 Afvoerafwijkingen tussen referentiemodel en variant vegetatie	47
D.7 Datapunten referentiemodel en variant verlaagde uiterwaarden	48
D.8 Relatief waterstandsverschil variant referentiemodel en verlaagde uiterwaarden	48
D.9 Relatieve afvoerafwijkingen referentiemodel en variant verlaagde uiterwaarden	49
D.10 Afvoerafwijkingen tussen referentiemodel en variant verlaagde uiterwaarden	49
D.11 Datapunten referentiemodel en gecorrigeerde variant hoogwatergeul	50
D.12 Datapunten referentiemodel en variant hoogwatergeul	50
D.13 Relatief waterstandsverschil referentiemodel en gecorrigeerde variant hoogwatergeul	51
D.14 Relatief waterstandsverschil referentiemodel en variant hoogwatergeul	51
D.15 Relatieve afvoerafwijkingen referentiemodel en variant hoogwatergeul	52
D.16 Afvoerafwijkingen tussen referentiemodel en variant hoogwatergeul	52
D.17 Datapunten referentiemodel en variant RvdR. Zwolle en Kampen	53

D.18	Relatief waterstandsverschil variant referentiemodel en RvdR. Zwolle en Kampen .	53
D.19	Relatieve afvoerafwijkingen referentiemodel en variant RvdR. Zwolle en Kampen .	54
D.20	Afvoerafwijkingen tussen referentiemodel en variant RvdR. Zwolle en Kampen . .	54
D.21	Relatief waterstandsverschil variant referentiemodel en variant-2017	55
D.22	Relatieve afvoerafwijkingen referentiemodel, variant 2017 en Qh-kromme 2010 . . .	56
D.23	Afvoerafwijkingen tussen referentiemodel, variant 2017 en Qh-kromme 2010	56
D.24	Absolute bijdrage factoren aan afvoerverschil	57
D.25	Absolute grootte correcties ten opzichte van afvoermetingen	60
D.26	Relatieve grootte correcties ten opzichte van Qh-kromme 2010	60
D.27	Absolute grootte correcties ten opzichte van Qh-kromme 2010	61
D.28	Afvoeren volgens Qf-relatie met correctie voor niet-permanentie	61

Lijst van tabellen

3.1	Parameters voor Qh-relatie 2010	8
3.2	Parameters concept Qh-relatie 2013	9
4.1	RVE-waarden met afvoermetingen 1986-2010 en 2011-2018	11
6.1	Verschillen referentiemodel en variant bodemverandering	19
6.2	Verschillen referentiemodel en variant vegetatie	19
6.3	Verschillen referentiemodel en variant verlaagde uiterwaarden	20
6.4	Verschillen referentiemodel en variant hoogwatergeul	21
6.5	Verschillen referentiemodel en variant RvdR. Zwolle en Kampen	21
6.6	Verschillen referentiemodel en variant-2017	23
6.7	Verschillen Qh-relatie 2010 en variant-2017	23
6.8	Correctiecoëfficiënten voor niet-permanentie	27
6.9	RVE-waarden met (niet-)gecorrigeerde afvoeren	29
7.1	Verschil afvoermetingen-en bepalingen januari 2018	30
7.2	Bijdrage aan afvoerverschil	30
A.1	Afvoermetingen 1986-2010 (Wijbenga & Haaren, 2010)	36
B.1	Toegeleverde afvoermetingen 1986-2018	38
D.1	Maatregellijst referentiemodel inclusief naamgeving	43
D.2	Invoer referentiemodel WAQUA-berekening	44
D.3	Toegevoegde maatregelen bodemverandering inclusief naamgeving	45
D.4	Toegevoegde maatregelen verandering vegetatie inclusief naamgeving	46
D.5	Toegevoegde maatregelen uiterwaarden Olst inclusief naamgeving	47
D.6	Toegevoegde maatregelen Veessen-Wapenveld inclusief naamgeving	49
D.7	Toegevoegde maatregelen RvdR. Zwolle en Kampen inclusief naamgeving	52
D.8	Toegevoegde maatregelen variant-2017 inclusief naamgeving	55
D.9	Relatieve bijdrage in afvoerverschil	57
D.10	Absolute bijdrage in afvoerverschil	58
D.11	Invoer hoogwatergolf WAQUA-berekening	59

1 Introductie

Afvoer is een sleutelparameter in het waterbeheer. Het is een invoerparameter voor waterbewegingsmodellen, hoogwatervoorspellingen en het vaststellen van hoge waterstanden. Het is cruciaal dat de afvoerbepalingen betrouwbaar zijn. Echter is het direct meten van afvoeren (bijvoorbeeld ADM-'s) tijdrovend, duur en lastig uit te voeren. Daarom bestaan er ook methoden om de afvoer te bepalen aan de hand van de gemeten waterstand en een functievoorschrift. Een afvoer-waterstandsrelatie (Qh-relatie) is zo'n functievoorschrift. Deze relatie is uitgedrukt in een afvoerkromme (Qh-kromme). Door onder meer uitvoeringen van diverse werken ('Ruimte voor de Rivier' en het 'Stroomlijn' programma) en natuurlijke processen, zoals bodemverandering en vegetatie, kunnen afvoerbepalingen echter sterk verschillen met de afvoermetingen. Daarom is het belangrijk om Qh-relaties te heroverwegen binnen een bepaalde tijd.

Qh-relaties zijn gebaseerd op gemeten en gesimuleerde informatie, zoals waterstanden en afvoeren. Op de Rijntakken zijn er meerdere locaties waar afvoeren bepaald worden, namelijk Lobith, splitsingspunten, Tiel, Hagestein en Olst. Lobith is waar de Rijn Nederland instroomt en is daarom de bovenrand van het rivierensysteem. De Qh-relaties bij de splitsingspunten zijn nodig in verband met de afvoerbepaling voor de takken van de Rijn. Voor Tiel, Hagestein en Olst zijn Qh-relaties belangrijk, omdat dit de bovenranden zijn van de benedenstroomse modellen, zoals de IJssel-Vechtdelta en het IJsselmeer model, en het Rijn-Maasmondingsmodel. Het is van belang om te beschikken over afvoerbepalingen die goed overeenkomen met de daadwerkelijk optredende afvoeren in de rivier. Voor het begrijpen, uitleggen en voorspellen van watersystemen, is het daarom noodzakelijk om kritisch te kijken naar de verkregen kennis van afvoeren uit Qh-relaties.

Zo zijn voor het splitsingspunt Olst tijdens het hoogwater in januari 2018 afvoeren gemeten die significant afweken van de verwachte (volgens Qh-relatie) afvoeren. Van de vijf metingen bleek de Qh-relatie afvoeren met circa $100 \text{ m}^3/\text{s}$ te onderschatten, waarbij het grootste verschil $120 \text{ m}^3/\text{s}$ was. Al met al zijn deze verschillen dusdanig waardoor een evaluatie nodig is. Deze evaluatie moet zich richten op een analyse van de systematische fouten van de Qh-relatie bij Olst. Er kan onder meer afgevraagd worden of geometrische veranderingen in het rivierengebied van de IJssel een bijdrage heeft geleverd aan deze afvoerverschillen. Zo is de Qh-relatie bij Olst voor het laatst vernieuwd in 2010. Echter hebben er in het rivierengebied van de IJssel na 2010 ingrijpende veranderingen plaatsgevonden. Vanaf 2005 tot en met 2016 zijn er diverse projecten uitgevoerd om de waterstanden te reduceren. Deze projecten betreffen onder andere de herinrichting van de uiterwaarden van de IJssel en aanleg van de nevengeulen Fortmonderwaard en Welsumerwaard. Daarnaast is een hoogwatergeul aangelegd tussen Veessen en Wapenveld die de waterstand van de IJssel verlaagt bij extreme waterstanden. Ook kan afgevraagd worden of natuurlijke processen geen inbreng hebben in de systematische fouten van de Qh-relatie. Meer inzicht in hysteresis-effecten (Dottori, Martina, & Todini, 2009) of veranderingen in de bodem, zoals bij Lobith (Wijbenga, van Haaren, & Versteeg, 2009), kan bijdragen aan de verklaringen tussen de verschillen in afvoermetingen en bepalingen in januari 2018. Er zijn diverse manieren om hysteresis-effecten te analyseren. Zo benoemt Dottori e.a. (2009) onder meer de Jones-vergelijking, waarbij de voortplantingssnelheid, energieverhang en tijdsafgeleide waterstanden meegenomen worden in de afvoerbepaling.

Na aanleiding van de significante onderschattingen tussen de gemeten en verwachte (volgens Qh-relatie) afvoeren bij het hoogwater in januari 2018 richt dit rapport zich op de evaluatie van de Qh-relatie bij het splitsingspunt Olst. Het doel is om de afvoerverschillen tussen de Qh-relatie en afvoermetingen van januari 2018 te verklaren en eventuele verbeteringen inzichtelijk te krijgen. Daarbij moet onder meer duidelijk worden hoe de Qh-relatie in 2010 is opgesteld en wat de afwijkingen zijn tussen de afvoermetingen en bepalingen na 2010. Vervolgens moet inzicht verkregen worden in de verbetermogelijkheden van de Qh-relatie bij Olst. Op basis van het doel beantwoordt dit rapport respectievelijk de volgende hoofdvraag en deelvragen:

Welke verbetermogelijkheden zijn er voor de huidige Qh-relatie van de IJssel bij Olst?

1. *Wat is de huidige Qh-relatie?*
 - (a) *Hoe is de huidige Qh-relatie opgesteld?*
 - (b) *Hoe ziet de afvoerkromme eruit?*
2. *In hoeverre wijken de afvoermetingen af van de afvoerbepalingen?*

- (a) *Welke data moet gebruik worden voor de evaluatie van de huidige Qh-relatie?*
- (b) *Hoe groot zijn de systematische fouten van de huidige Qh-relatie ten opzichte van de afvoermetingen??*
- 3. *Welke extra functies zouden een eventuele bijdrage kunnen leveren aan een afvoerverschil?*
- 4. *Hoe beïnvloeden de extra functies de Qh-kromme?*
 - (a) *Hoe ziet de Qh-kromme eruit na het opnemen van een extra factor of een combinatie van factoren?*
 - (b) *In hoeverre wijken deze Qh-krommes af ten opzichte van een referentie Qh-kromme?*

Om de deelvragen en zo de hoofdvraag te beantwoorden, wordt ten eerste gebruik gemaakt van rapporten omtrent de huidige Qh-relatie. Op deze manier moet duidelijk worden welke stappen men heeft ondernomen om de huidige relatie op te stellen. De evaluatie moet vervolgens leiden tot een kwantitatief onderzoek op basis van afvoermetingen tussen 1986 en 2018. Daarnaast zullen figuren helpen om een beeld te krijgen van de optredende afvoerverschillen. Ten slotte, volgen op basis van simulaties gevoeligheden van de afvoerbepaling voor diverse factoren. Daarbij worden Qh-kromme's vergeleken met een referentie Qh-kromme. Zo moet duidelijk worden in hoeverre een verandering in het rivierengebied of door implementatie van een natuurlijk proces in de Qh-relatie de afvoeren beïnvloed. Deze gevoeligheden worden zowel kwantitatief als kwalitatief (met figuren) gerepresenteerd.

Kortom dit rapport evalueert de huidige Qh-relatie bij het splitsingspunt Olst en doet een analyse naar eventuele verbeteringen. Allereerst beschrijft sectie 2 de theorie omtrent de Qh-relatie. Sectie 3 behandelt vervolgens de huidige Qh-relatie. Deze relatie wordt door sectie 4 geëvalueerd. Sectie 5 gaat daarna in op de verbetermogelijkheden, waarbij aandacht wordt besteed aan de oriëntatie van deze mogelijkheden. Daaropvolgend belicht sectie 6 de gevoeligheid van de verbetermogelijkheden, zodat inzicht verkregen wordt in het effect van een eventuele verbetering van de Qh-relatie bij Olst. Tot slot, verklaart sectie 7 de verschillen tussen de afvoermetingen-en bepalingen van januari 2018 aan de hand van de resultaten van de gevoeligheidsanalyse.

2 Theorie

De afvoeren (Q) en waterstanden (h) zijn parameters die processen beschrijven die tijdsafhankelijk zijn. Aangezien deze parameters beide tijdsafhankelijk zijn, beschrijven Bhattacharya en Solomatine (2015) de afvoer als een functie van de tijd (t) (Vergelijking 2.1). Om inzicht te verkrijgen in de tijdsafhankelijkheid zijn datasets noodzakelijk.

$$\text{Indien } h = h(t) \text{ and } Q = Q(h), \text{ geldt } Q = Q[h(t)] = Q(t) \quad (2.1)$$

De Qh-relatie is uitgedrukt in een afvoerkromme, ook wel Qh-kromme. Deze kromme wordt verkregen als een continu machtsfunctie en helpt bij het bepalen van de afvoeren wanneer de waterstanden bekend zijn. Bij de Qh-kromme is de afvoer een functie van de waterstand (vergelijking 2.2) (Braca, 2008).

$$Q = C(h - a)^\alpha \quad (2.2)$$

In vergelijking 2.2 zijn C , a and α kalibratie-coëfficiënten. Vergelijking 2.2 is gebaseerd op de Manning vergelijking (vergelijking 2.3). Bij stationaire (permanente) uniforme problemen is de Manning vergelijking een veelgebruikte functie voor de Qh-kromme (Braca, 2008).

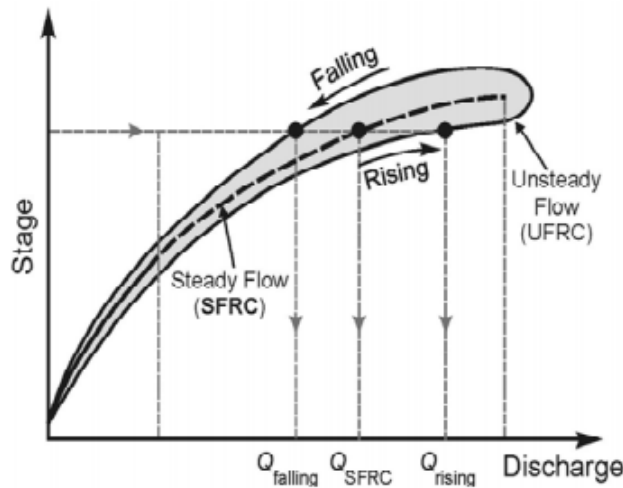
$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} S_0^{1/2} \quad (2.3)$$

In vergelijking 2.3 is n de Manning's ruwheid coefficient, S_0 is het verhang van de bodem van de rivier, A is het doorstroomoppervlak and R is de hydraulische straal. Echter kan voor rivierprofielen aangenomen worden dat deze een rechthoekig dwarsprofiel hebben (breedte rivier $\gg$ waterhoogte). De term $AR^{2/3}$ kan daarom beschreven als een simpele machtsfunctie (vergelijking 2.4) (Braca, 2008).

$$Q = \frac{1}{n} Bh^{5/3} S_0^{1/2} = Ch^{5/3} \quad (2.4)$$

Desalniettemin is vergelijking 2.4 een vereenvoudiging. De Qh-kromme bestaat normaal gesproken uit segmenten voor verschillende stroombereiken. Elk segment heeft andere waarden voor C , a and α , zelfs al volgt elk segment de vorm van de machtsfunctie van vergelijking 2.2. Daarnaast heeft voor watersystemen in de praktijk, zoals de IJssel, het grafisch fitten van datapunten (afvoeren en waterstanden) de voorkeur (Braca, 2008; Vermeulen, 2016).

Echter zijn er bezwaren tegen het grafisch fitten van datapunten. Zo houdt deze bijvoorbeeld geen rekening met hysteresis-effecten. In dat geval is er geen sprake van uniforme stroming. Tijdens 'wassend water' ondervindt een hoogwatergolf minder hinder in de voortplanting dan tijdens 'vallend water'. Dit komt neer op een zelfde waterstand, maar een hogere afvoer tijdens wassend water dan bij vallend water. Het hysteresis-effect resulteert in 'loop-rating' kromme en illustreert het principe dat een afvoer gerelateerd is aan de waarden van de voorgaande afvoer en waterstand (figuur 2.1) (Bhattacharya & Solomatine, 2004; Lohani, N.K., & Bhatia, 2006; Van Vuuren, Moll, & Vervoorn, 1999).



Figuur 2.1: Loop-rating kromme door hysteresis effect (Muste & Lee, 2013)

Naast het hysteresis-effect wordt onder meer de morfologische toestand van de rivier niet direct meegenomen bij het fitten van een Qh-relatie. Factoren zoals bodemverandering en vegetatie worden in principe alleen indirect meegenomen (door afvoermetingen) wanneer een nieuwe Qh-relatie wordt ontwikkeld (Vervoorn, 1998).

Door bezwaren en de interesse in het verkrijgen van een nauwkeurigere Qh-relatie, zijn er nieuwe methoden ontwikkeld. Eén van die methoden is het concept 'Qf-relatie'. In plaats van de Qh-relatie, maakt de Qf-relatie gebruik van extra functies voor het beschrijven van de afvoer. Zo beschrijven Bhattacharya en Solomatine (2004) de afvoer als een vector van de functie f met als inputvector x (Vergelijking 2.5)

$$Q = f(x) \quad (2.5)$$

De Qf-relatie is te definiëren volgens een regressievergelijking^{2.1} (vergelijking 2.6). Het is ook mogelijk om de Qf-relatie te definiëren als vergelijking 2.2, waarbij correctiefactoren zijn toegevoegd. Zo beschrijven Ogink en Stolker (2004) en Van Vuuren e.a. (1999) de Qf-relatie met twee toegevoegde functies voor niet-permanente stromingsomstandigheden (hysteresis-effect) en bodemverandering (vergelijking 2.7)

$$Q = a_0 + a_1 H + a_2 H^2 + a_3 H^3 + a_4 H^4 + a_5 \frac{\partial h}{\partial t} + a_6 t \quad (2.6)$$

$$Q = C(h - a)^\alpha + \Delta Q_{np} + \Delta Q_{bv} \quad (2.7)$$

In vergelijking 2.6 zijn a_0 tot en met a_6 de regressiecoëfficiënten, h is de waterstand, $\frac{\partial h}{\partial t}$ is de verandering van de waterstand over de tijd en t is het dagnummer sinds 1-1-1956. De eerste term in vergelijking 2.7 is de afvoer voor stationaire stroming (zie vergelijking 2.2). Q_{np} en Q_{bv} zijn respectievelijk de correctiefactoren voor niet permanente stroming en bodemverandering (Ogink & Stolker, 2004; Van Vuuren e.a., 1999).

Voor het ontwikkelen van Qh-relaties zijn datapunten van metingen en berekeningen essentieel. Echter is het daarbij van belang om onzekerheden in de metingen mee te nemen in de ontwikkeling van een nieuwe relatie. Ten tweede is het belangrijk om de onzekerheid in de Qh-kromme in acht te nemen. Deze onzekerheid kan opgesplitst worden in 3 delen: interpolatie en extrapolatie fouten, aanwezigheid van niet-stationaire stroming^{2.2} en seizoensverandering in de ruwheid van de rivier (Di Baldassarre & Montanari, 2009).

^{2.1}statistische methode voor het analyseren van relaties tussen variabelen

^{2.2}plaatselijke veranderingen in stromingssnelheden

3 Qh-relatie 2010

Deze sectie richt zich op het inzichtelijk maken van hoe de huidige relatie (Qh-relatie 2010) van de IJssel bij Olst eruitziet. Daarbij zal sectie 3 eerst behandelen hoe en met welke data de Qh-relatie 2010 is afgeleid. Daarna zal het de afvoerkromme voor de Qh-relatie 2010 belichten. Ten slotte brengt deze sectie een concept rapport uit 2013 aanbod. Dit rapport was bedoeld als actualisatie voor de huidige relatie. Deze concept Qh-relatie 2013 wordt tot op heden niet operationeel gebruikt.

3.1 Afleiding Qh-relatie 2010

Om de afvoergegevens van rivieren zo nauwkeurig mogelijk te voorspellen is in 2010 een optimalisatieslag uitgevoerd. Het doel was om de veelgebruikte methodiek voor het bepalen van de relatie tussen afvoer en waterstand (Qh-relatie) van de IJssel bij Olst te vervangen door een Qf-relatie (zie sectie 2). Deze Qf-relatie moet onder meer rekening houden met niet-permanente stromingsomstandigheden (Wijbenga & Haaren, 2010).

Voor het opstellen van de stationaire Qf-relatie is gebruik gemaakt van de afvoermetingen uit de periode 1986 tot en met 2010. Hiervoor is gekozen omdat de lengte van deze tijdreeks aansluit bij de tijdreeks van de afvoermetingen die gebruikt zijn voor het opstellen van de Qf-relatie voor de locaties Lobith, Pannerdensch Kop - Waal, Pannerdensch Kop -Pannerdensch Kanaal, IJsselkop - Nederrijn en IJsselkop - IJssel (Wijbenga & Haaren, 2010).

De metingen zijn verricht met onder andere een akoestische dopplerstroommeter, ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler). Deze is in gebruik genomen sinds 2001. Hierbij wordt de ADCP aan een varende schip gemonteerd zodat de ADCP de stroomsnelheidsprofielen meet tot aan de bodem. Van 1986 tot en met 2000 zijn de metingen uitgevoerd met een Ott-molen. Daarbij wordt de Ott-molen handmatig op verschillende punten in het doorstroomprofiel van de rivier geplaatst om de stroomsnelheid te meten (Wijbenga & Haaren, 2010; Wikipedia, 2013; Nortek-bv, 2018).

Voor de Qf-relatie bij Olst is uitgegaan van het concept dat de lokale afvoer is opgebouwd uit een stationair deel en nodige correcties (zie vergelijking 2.7). Om de Qf-relatie op te stellen zijn de volgende stappen doorlopen:

1. *Verzamelen van de afvoermetingen*
2. *Validatie van de afvoermetingen*
3. *Correctie van de afvoermetingen voor niet-permanente stromingsomstandigheden*
4. *Correctie voor het effect van bodemverandering*
5. *Indien relevant, correctie voor de invloed van uitgevoerde rivierwerken benedenstrooms van Olst*
6. *Het aanvullen van gegevens voor extreme afvoeren, die niet zijn bemeten*
7. *Bepaling van de afvoerkromme voor de stationaire toestand*
8. *Het in omgekeerde volgorde aan de afvoer onder permanente omstandigheden toevoegen van correctietermen voor de bodemdaling en het niet-permanente karakter van de stroming*

Vanwege relatief weinig metingen voor het uitvoeren van de correcties voor niet permanente omstandigheden en bodemverandering, is besloten om de Qf-relatie op te stellen zonder correcties voor deze invloeden. Dit komt neer op een Qf-relatie dat alleen bestaat uit een stationair deel, ook wel de veelgebruikte Qh-relatie. Zo vervallen stappen 3 t/m 5 en 8.

3.2 Data voor afleiding Qh-relatie 2010

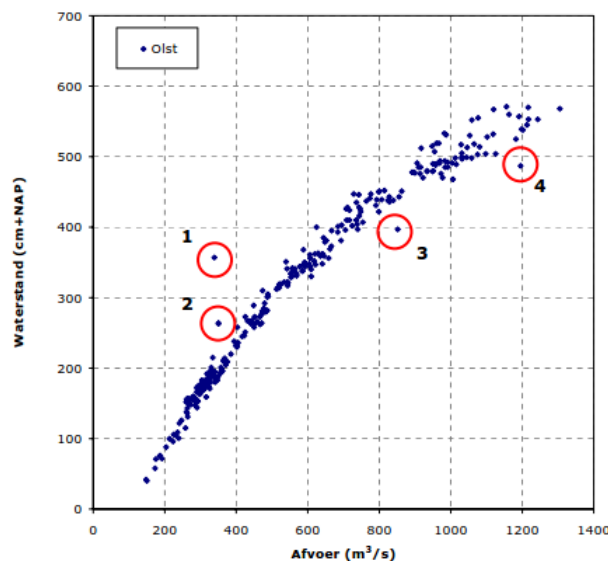
De eerste stap die is ondernomen voor het opstellen van de Qh-relatie 2010 is het verzamelen van data. Zo zijn metingen nabij Deventer ook meegenomen, omdat tijdens hoogwater uitgeweken wordt naar deze locatie. Voor deze metingen is een zogenoemde 'looptijdcorrectie' van 5 uur uitgevoerd. Dit principe is ook toegepast voor de evaluatie van de Qh-relatie 2010 in sectie 4. Sectie 4 zal de looptijdcorrectie daarom verder belichten. Voor de Qh-relatie 2010 zijn afvoermetingen tussen 1986 en 2010 gebruikt (bijlage A tabel A.1).

Voor het valideren van de meetgegevens (stap 2) zijn de metingen weergegeven in een grafiek om zo uitschieters waar te nemen (figuur 3.1). Deze uitschieters zijn geïllustreerd met rode cirkels. De uitschieters voor Olst komen voor in de volgende perioden:

1. 21-1-1987 10:11 uur
2. 24-10-1993 11:38 uur en 24-10-1993 13:50 uur
3. 24-02-1999 12:52 uur
4. 26-02-1999 11:57 uur

Uitschieters 1 en 2 zijn verworpen omdat deze dusdanig afwijken van de Qf-relatie. Daarnaast zijn dit geïsoleerde metingen waardoor deze niet verder geanalyseerd zijn. Uitschieters 3 en 4 zijn onderdeel van een afvoergolf, waarin een reeks van metingen zijn uitgevoerd. Deze zijn daarom verder geanalyseerd. Voor uitschieter 3 is vernomen dat deze een te hoge afvoer heeft voor de gemeten waterstand. Om deze reden is uitschieter 3 ook verworpen.

Uitschieter 4 is echter wel meegenomen. Waarom deze niet is verworpen heeft verdere toelichting nodig. Op dagen dat metingen uitgevoerd zijn, zijn veelal twee metingen na elkaar verricht. Op 26-2-1999 was dit ook het geval. Waarbij de eerste meting om 11:57 uur resulteerde in een gemeten afvoer van $1195 \text{ m}^3/\text{s}$ en de tweede meting om 14:05 uur een afvoer aangaf van $1015 \text{ m}^3/\text{s}$. De uitgevoerde metingen geven een onrealistische fluctuatie in de afvoer. Dit verschijnsel is vaker voorgekomen, maar is op basis van data nog niet te verklaren. Opvallend is dat de uitgevoerde metingen gemiddeld een goede afvoer weergeven. Zodoende is aangenomen dat de fluctuaties weinig invloed hadden op het bepalen van de stationaire Qf-relatie, waardoor uitschieter 4 niet verworpen is.



Figuur 3.1: Relatie waterstands- en afvoermetingen Olst (Wijbenga & Haaren, 2010)

Voor het afleiden van de afvoerkromme zijn naast de afvoer- en waterstandsmetingen ook gesimuleerde datapunten betrokken. Dit om dat er doorgaans weinig data voor extreme omstandigheden (hoge afvoeren) beschikbaar is. Extreme data is verkregen door een gesimuleerde WAQUA-schematisatie^{3.1} van de IJssel bij Olst, die geijkt is op het hoogwater van 1995. Zo is de afvoerkromme mede bepaald voor dergelijke situaties.

In de simulaties is het hysteresis-effect niet meegenomen in de relatie tussen de afvoer en waterstand. In andere woorden, er is uitgegaan van permanente afvoeren. De Ketelbrug is als benedenstroomse randvoorwaarde genomen.

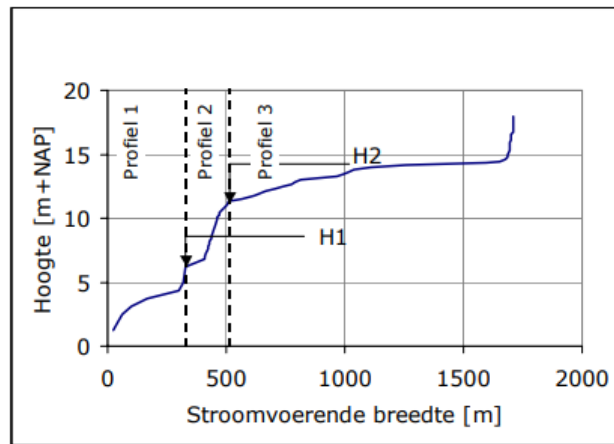
De resultaten van de WAQUA-berekeningen leveren een goede overeenkomst op tussen de gemeten waterstanden en afvoeren voor het lage bereik. Echter is er geen goede overeenkomst tussen

^{3.1}Numeriek simulatie programma dat werkt in een 2D-rooster. Daarbij wordt aangenomen dat verticale snelheden 0 zijn (Simona, 2016).

de metingen en de WAQUA-resultaten in het hoge bereik ($> 800m^3/s$) gevonden. WAQUA lijkt structureel lagere waterstanden te berekenen bij hogere afvoeren. Als oplossing is een machtsfunctie gefit door de metingen en worden de WAQUA-resultaten getransformeerd zodat deze goed aansluiten op de metingen (bijlage A.2 figuur A.1).

3.3 Qh-kromme 2010

Voor het fitten van de afvoerkromme is voor de locatie Olst gekozen voor dezelfde vorm functie als de afvoerkromme bij Lobith (zie sectie 2 vergelijking 2.2). Het voorbeeld in figuur 3.2 representeert de kenmerken van de riviergeometrie. Er zijn drietal stroken te zien. Het zomerbed is de eerste strook, waarbij h_0 de bodemligging van het zomerbed is. h_1 is de hoogte waarbij het zomerbed merkbaar breder wordt (bijvoorbeeld door kribben). De hoogte waarop het rivierprofiel wederom significant wijzigt, wordt aangegeven met h_2 . Bijvoorbeeld een oever of zomerkade.



Figuur 3.2: Voorbeeld dwarsprofiel (Wijbenga & Haaren, 2010)

De bodem van het zomerbed van de IJssel bij Olst ligt op circa $-3,0m$ +NAP. De kribben bij Olst hebben een hoogte van $3,5m$ +NAP. De hoogte van het zomerbed en kribben zijn aangehouden als de waarden voor h_0 en h_1 . Echter kunnen samengestelde dwarsprofielen niet met één machtsfunctie worden uitgedrukt. Daarom geldt voor Olst voor ieder aangegeven strook een machtsfunctie op basis van de daar aanwezige waterdiepte. Daarnaast sluiten de machtsfuncties op elkaar aan. Voor de afvoeren binnen het zomerbed ($h_0 \leq h < h_1$) geldt:

$$Q = a_1(h - h_0)^{p_1} \quad (3.1)$$

Voor afvoeren binnen het zomerbed en tot met de zomerlade ($h_1 < h \leq h_2$) geldt:

$$Q = a_1(h - h_1)^{p_1} + a_2(h - h_1)^{p_2} \quad (3.2)$$

Voor de afvoeren binnen het zomerbed, oeversectie en uiterwaarden ($h > h_2$) geldt:

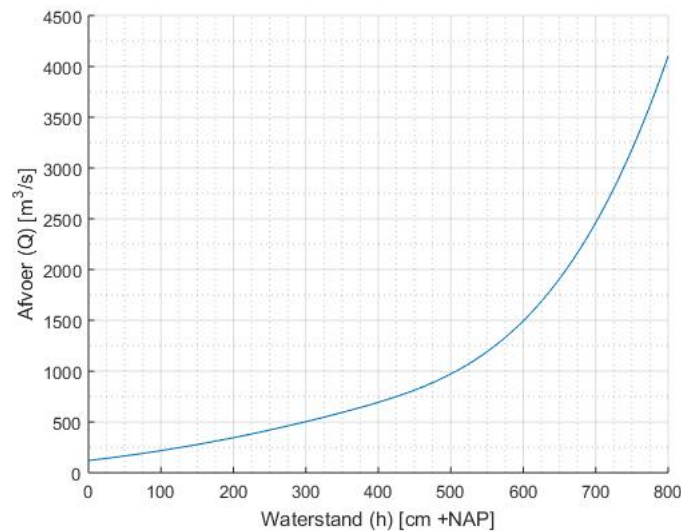
$$Q = a_1(h - h_0)^{p_1} + a_2(h - h_1)^{p_2} + a_3(h - h_2)^{p_3} \quad (3.3)$$

Gebaseerd op de metingen en aanvullende WAQUA-berekeningen voor het hogere bereik, is gebleken dat de Qh-relatie 2010 bestaande uit twee stroken een goede fit oplevert. Bovendien zijn er geen duidelijke knikpunten te zien tussen de overgangen van de machtsfuncties. Verder zijn bij het fitten de parameters a_1 , a_2 , p_1 en p_2 vrijgelaten. Tabel 3.1 geeft de uiteindelijke parameters voor de Qh-relatie 2010 weer.

Tabel 3.1: Parameters voor Qh-relatie 2010

Parameter	Waarde
h_0	-3,00 [m] +NAP
h_1	3,50 [m] +NAP
a_1	12,396 [m]
a_2	15,793 [m]
p_1	2,0678 [-]
p_2	3,324 [-]

Op basis van de machtsfuncties en de bijbehorende parameters is de afvoerkromme voor de Qh-relatie 2010 voor het splitsingspunt Olst bepaald (figuur 3.3).



Figuur 3.3: Qh-kromme 2010

3.4 Concept Qh-relatie 2013

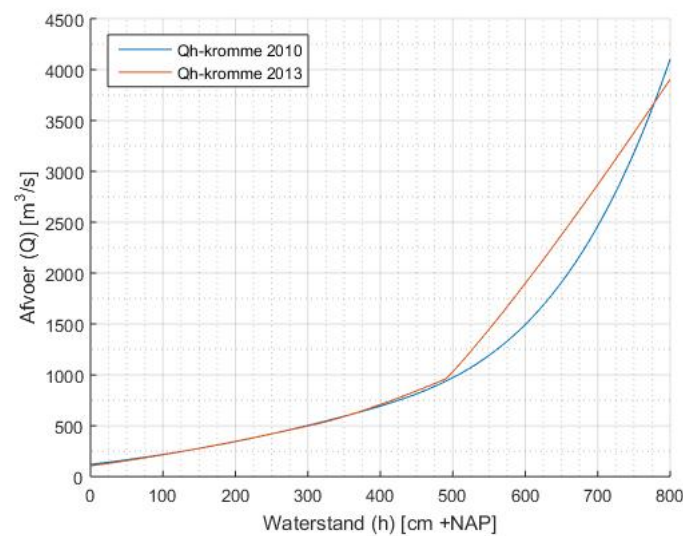
Na aanleiding van meer beschikbare metingen sinds 2010 en een nieuw opgeleverd WAQUA-model waarin afvoerafhankelijke kalibratie is uitgevoerd, heeft RWS Oost-Nederland Rura-Arnhem de opdracht gegeven om de Qh-relatie bij Olst te actualiseren. Wederom zijn afvoermetingen verzameld, gevalideerd en zijn aanvullende data punten toegevoegd voor het hoge afvoerbereik met behulp van WAQUA. Daarnaast is ook door Rura-Arnhem gekozen voor een Qh-relatie (Van der Veen, 2013).

Voor het afleiden van de Qh-relatie bij Olst zijn 297 waarnemingen uit de jaren 1986 t/m 2012 gebruikt (bijlage A.3 figuur A.2). Wederom zijn de metingen nabij Deventer meegenomen. Voor de WAQUA-simulaties is uitgegaan van Emmerich als bovenrand en Ketelbrug als benedenstroomse randvoorwaarde. Tussen de afvoerniveaus wordt steeds een halve dag opgeschaald naar het nieuwe afvoerniveau. Tussen het opschalen worden afvoerniveaus 6,5 dag constant gehouden. Datapunten uit de WAQUA-simulaties zijn verkregen aan de laatste tijdstap voordat opschaling van de afvoer heeft plaatsgevonden. Op deze manier is er sprake van permanente stroming en kunnen hystereseeffecten buiten beschouwing gelaten worden in de relatie tussen de afvoer en waterstand. Na uitvoeren van de WAQUA-simulaties blijkt dat deze goed overeenkomen met de metingen. Dit was niet het geval bij de bepaling van de Qh-relatie 2010. De concept Qh-relatie uit 2013 is beschreven in dezelfde vorm als de huidige relatie in 2010. Echter bestaat deze uit drie machtsfuncties in plaats van twee. De parameters waarmee de Qh-relatie 2013 beschreven is, lijken niet gebaseerd te zijn op de ligging van het zomerbed, de oever en kribben zoals dat bij de Qh-relatie 2010 wel het geval schijnt te zijn (tabel 3.2) (Van der Veen, 2013).

Tabel 3.2: Parameters concept Qh-relatie 2013

Parameter	Waarde
h_0	-1,65 [m] +NAP
h_1	3,20 [m] +NAP
h_2	4,90 [m] +NAP
a_1	49,689 [m]
a_2	57,04 [m]
a_3	339,65 [m]
p_1	1,5 [-]
p_2	1,5 [-]
p_3	1,10 [-]

Op basis van de machtsfuncties en de bijbehorende parameters is de afvoerkromme voor de concept Qh-relatie bepaald (figuur 3.4). In tegenstelling tot de Qh-kromme 2010, is bij de Qh-kromme 2013 een duidelijke knik te zien tussen de tweede en derde machtsfunctie. Daarnaast valt op dat met het vernieuwde WAQUA-model en de derde machtsfunctie afvoeren hoger worden ingeschat dan met de Qh-relatie 2010. Zo kan onder meer afgevraagd worden of het beter is om drie stroken te gebruiken in plaats van twee. De concept Qh-relatie 2013 is niet in gebruik genomen. De reden daarvoor is onduidelijk. Aanbevolen wordt om na te vragen waarom de relatie uit 2013 niet operationeel gebruikt wordt.



Figuur 3.4: Qh-kromme 2010 en concept Qh-kromme 2013

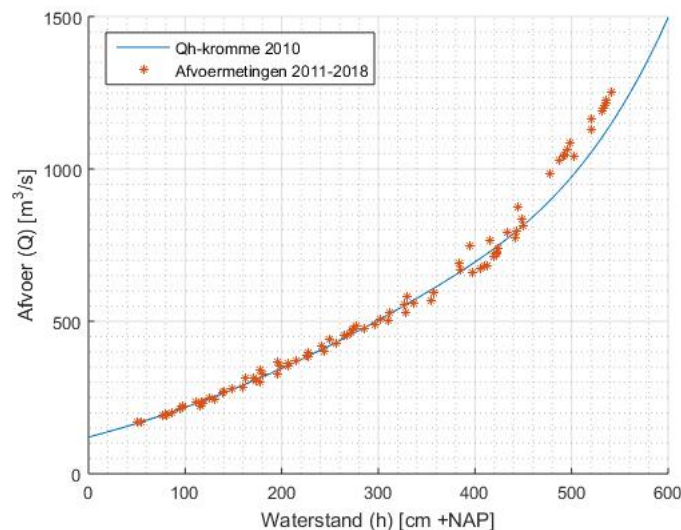
4 Evaluatie Qh-relatie 2010

Deze sectie richt zich op de evaluatie van de Qh-relatie 2010 van de IJssel bij Olst op basis van onder meer metingen na 2010. Daarbij zal sectie 4 eerst analyseren welke data bruikbaar is om vervolgens de afwijkingen in de afvoer tussen de metingen en Qh-relatie 2010 te bepalen.

4.1 Data voor evaluatie

Om de opgestelde Qh-relatie uit 2010 te evalueren is het verzamelen van data noodzakelijk. De data die is toegeleverd zijn afvoermetingen tussen 1986 en 2018 (bijlage B.1 tabel B.1). Echter bevat deze dataset metingen die corresponderen met twee meetlocaties. Zo worden afvoermetingen voor de locatie Olst verzameld bij Olst (957 rkm^{4.1}) en Deventer (944 rkm). Afvoermetingen die zijn verzameld in Deventer kunnen gebruikt worden wanneer (zoals in sectie 3.1 benoemd is) een looptijdcorrectie toegepast wordt. Op basis van betrekkinglijnen Rijn-versie 2012 is de looptijdcorrectie tussen Deventer en Olst circa 5 uur. Om de waterstanden voor Olst te bepalen voor de afvoermetingen bij Deventer zijn daarom de waterstanden bij Olst gebruikt van 5 uur later dan het tijdstip waarop gemeten is bij Deventer. Ter illustratie: een afvoermeting bij Deventer op 1-januari-2018 10:00:00 correspondeert met een waterstandsmeting bij Olst op 1-januari-2018 15:00:00 (Van der Veen, 2013).

Voor het evalueren van de Qh-relatie zijn meetgegevens tussen 2011 en 2018 gevalideerd. Bij het valideren zijn de metingen gecontroleerd op afwijkingen met behulp van een plot van de afvoermetingen (bijlage B.1 figuur B.1). Aangenomen is dat na 2011 de metingen niet significant afwijken. Er zijn namelijk geen grote uitschieters waar te nemen. Daarom worden alle toegeleverde afvoermetingen tussen 2011 en 2018 gebruikt voor de evaluatie van de Qh-relatie 2010. Wanneer de Qh-kromme 2010 vergeleken wordt met de afvoerenmetingen tussen 2010 en 2018 valt op dat bij afvoeren in het hoge bereik systematische fouten optreden (figuur 4.1 en bijlage B.2 figuur B.2). Deze fouten zijn minder bij lagere waterstanden. Om meer inzicht te verkrijgen in de volumefouten in het hogere bereik worden ook de metingen tussen 1986 en 2010 gebruikt voor een vergelijking met de Qh-kromme 2010. Daarbij zijn de uitschieters zoals in sectie 3 niet weggelaten. Wat opvalt is dat ook de verschillen tussen de metingen voor 2010 en Qh-kromme 2010 kleiner zijn in het lage bereik dan in het hoge bereik (bijlage B.2 figuren B.3 en B.4). Sterker nog, in het hogere bereik is een 'puntenwolk' aan datapunten te herkennen. Dit zou kunnen duiden op het hysteresis-effect bij hogere afvoeren.



Figuur 4.1: Qh-kromme 2010 en waterstands-en afvoermetingen 2011-2018

^{4.1}Rivierkilometer

4.2 Afwijkingen

Om de kwaliteit van de huidige relatie te analyseren, moet inzicht verkregen worden in het verschil tussen de metingen en de Qh-kromme. Dit is gedaan door het berekenen van de relatieve volume fout (RVE), omdat de uitkomst beter in de context van deze analyse past. De RVE-waarde kan berekend worden met vergelijking 4.1. Daarbij is Q_o de gemeten afvoer (ook wel geobserveerde afvoer) en Q_m de afvoer volgens de Qh-relatie. Daarnaast is Q_o^t de gemeten afvoer op tijdstip t , waarbij T de totale tijdstap is. Het optimale resultaat uit deze berekening is 0, waarbij er geen significant verschil is tussen de gemeten afvoer en afvoer volgens de Qh-relatie. Over het algemeen wordt een relatieve volumefout tussen -5% en +5% als acceptabel gezien (Booij, 2016).

$$RVE = 100 \frac{\sum_{t=1}^T (Q_m^t - Q_o^t)}{\sum_{t=1}^T Q_m^t} \quad (4.1)$$

De RVE-waarde met de afvoermetingen tussen 2011 en 2018 voor de Qh-relatie 2010 is -3,0%. Dit betekent dat de Qh-relatie over het algemeen lagere afvoeren bepaald dan daadwerkelijk gemeten wordt. De uitkomst ligt binnen een marge van 5% en is gebaseerd op de metingen tussen 2011 en 2018. Deze metingen reiken van $168 \text{ m}^3/\text{s}$ tot en met $1251 \text{ m}^3/\text{s}$. Met de metingen tussen 1986 en 2010, die reiken van $147 \text{ m}^3/\text{s}$ tot en met $1305 \text{ m}^3/\text{s}$, geldt met de Qh-relatie 2010 een RVE-waarde van -0,1%. Zodoende lijkt de Qh-relatie 2010 een goede fit op basis van de afvoermetingen voor 2010. Opgemerkt moet worden dat afvoeren in het hoge bereik de mogelijkheid hebben om elkaar te corrigeren, doordat er metingen zijn die zich zowel boven als onder de Qh-kromme bevinden. De RVE-waarde zegt dus niks over de mate van spreiding die ontstaat in het hoge bereik. Het richt zich meer op structurele fouten. Om meer inzicht te verkrijgen in de relatieve fouten in lage en hoge bereiken, wordt het afvoerbereik van de afvoermetingen tussen 1986 en 2010 opgedeeld in drie bereiken (tabel 4.1). Zo blijkt de RVE-waarden voor de afvoermetingen voor 2010 en de Qh-relatie 2010 nauwelijks te veranderen bij de drie bereiken, terwijl er relatief grotere fouten optreden bij hogere bereiken tussen de Qh-relatie 2010 en de afvoermetingen na 2010 (tabel 4.1). Al met al berekent de Qh-relatie 2010 in het hoge bereik significant lagere afvoeren dan werkelijk gemeten wordt, wat wijst op structurele fouten van de Qh-relatie 2010 (figuren 4.1, B.2 en RVE-berekeningen).

Tabel 4.1: RVE-waarden met afvoermetingen 1986-2010 en 2011-2018

Bereik [m^3/s]	$Q \leq 1305$	$Q \leq 435$	$435 < Q \leq 1305$	$870 < Q \leq 1305$
RVE				
1986-2010 en Qh-relatie 2010	-0,1%	0,7%	-0,3%	-1,3%
2011-2018 en Qh-relatie 2010	-3,0%	-0,7%	-3,7%	-9,1%

5 Verbetermogelijkheden

In sectie 3 is naar voren gekomen dat afvoeren bij Olst bepaald worden voor permanente stromingsomstandigheden. Daarnaast is het rivierengebied bij Olst ingrijpend veranderd. Zo is het onduidelijk wat de invloeden van bodemverandering, vegetatie en diverse ruimtelijke ingrepen zijn op de afvoer van de IJssel bij Olst. Ten slotte is nog niet geanalyseerd wat eventuele invloeden van wind kan zijn op de afvoer. Om na te gaan of niet-permanente stromingsomstandigheden, wind of veranderingen in het rivierengebied een significant effect heeft op de nauwkeurigheid van de afvoerbepaling belicht sectie 5 welke factoren in de gevoeligheidsanalyse (sectie 6) meegenomen zullen worden. Daarbij worden de keuzes beargumenteerd.

5.1 Bodemverandering

Inzicht verkrijgen in de rol van bodemverandering in rivieren bij de bepaling van afvoeren kan een belangrijke rol spelen. Zo ook voor de IJssel bij Olst. Er zijn diverse manieren om een functie voor bodemverandering te implementeren in een Qf-relatie. Om de invloeden van de bodemverandering afzonderlijk te analyseren, is het niet mogelijk om metingen te gebruiken. Dit geldt ook voor het analyseren van de gevoeligheid voor vegetatie en ruimtelijke ingrepen. Er zijn tenslotte geen metingen waar diverse factoren los van elkaar gezien kunnen worden. Om het rivierengebied in Oost-Nederland te beheren, actualiseert Rijkswaterstaat Oost-Nederland onder andere de IJssel. Zo zijn de bodemhoogten ook bijgewerkt over de tijd. Om het effect van de bodemverandering op de afvoerbepaling te onderzoeken kunnen bijgewerkte bodemhoogten vergeleken worden met bodemhoogten uit het verleden. Dit kan gedaan worden door WAQUA-berekeningen uit te voeren voor beide versies en deze met elkaar te vergelijken.

Naast de haalbaarheid om de gevoeligheid van de veranderingen in bodemhoogte te analyseren, laat sectie 4 zien dat in het hogere bereik de Qh-relatie 2010 afvoeren bepaalt die significant lager zijn dan de afvoermetingen tussen 2011 en 2018. Bovendien zijn er geen afvoeren bepaald (in het hoge bereik) die hoger zijn dan de afvoermetingen tussen 2011 en 2018. In het verleden zijn er daarentegen wel afvoeren bepaald die significant hoger zijn dan de afvoermetingen. Dit zou eventueel kunnen duiden op een invloed van de bodemverandering. Al zijn er wel minder metingen tussen 2011 en 2018 beschikbaar dan tussen 1986 en 2010. Naast de metingen, is bij Lobith gebleken dat bodemverandering een significante invloed heeft op de afvoerbepaling. Aan de hand van de haalbaarheid en eventuele invloed zal sectie 6 de gevoeligheid van de afvoerbepaling voor bodemverandering belichten.

5.2 Vegetatie

De afvoer zou door vegetatie beïnvloed kunnen worden. Vegetatie kan namelijk weerstand bieden aan de stroming. Zo zullen op plekken met vegetatie de snelheden van het water lager zijn dan op plekken zonder vegetatie. Daarnaast kan de hoeveelheid vegetatie invloed hebben op het wegspoelen en afzetten van zand en slib in een rivier. Een mogelijk gevolg daarbij is bodemverandering. Al met al leiden interacties tussen water en vegetatie tot karakteristieke patronen in riviervorm en vegetatie. Echter is er tot op heden weinig inzicht verkregen in deze interacties, terwijl dit wel noodzakelijk is om afvoeren met meer zekerheid te bepalen (Van Oorschot & Kleinhans, 2017).

Bovendien zijn de maatregelen van het project Stroomlijn^{5.1} langs de IJssel gestart in 2015 en volbracht in eind 2017. Zo is de doorstroming van de IJssel verbeterd door de begroeiing te verwijderen in de Duursche Waarden^{5.2}. Op deze manier veranderen de ruwheden in de rivier, wat invloed kan hebben op de afvoeren. Kortom, recente hoeveelheid vegetatie in de uiterwaarden bij Olst zou invloed kunnen hebben op de momentane afvoeren.

Om de invloeden van vegetatie te analyseren is het, net als bij de bodemverandering, mogelijk actualisaties omtrent vegetatie te vergelijken met een rivierengebied met vegetatie condities uit het verleden. Zo heeft Rijkswaterstaat Oost-Nederland ook het rivierengebied in Oost-Nederland geactualiseerd voor de uitgevoerde maatregelen omtrent het Stroomlijn programma langs de IJssel.

^{5.1}Het Programma Stroomlijn zorgt voor betere doorstroming van de rivieren bij hoogwater, door bomen en struiken die in de stroombaan van de rivier staan te verwijderen. Hierdoor wordt het risico op overstromingen verkleind (Stroomlijnijsel, 2018).

^{5.2}120 hectare natuurgebied van Staatsbosbeheer in gemeente Olst-Wijhe nabij buurtschap Fortmond. De Duursche Waarden bestaan uit stukken bos, rivierarmen en moerassen in de uiterwaarden van de IJssel (Wikipedia, 2018).

Op deze manier zijn dus ook de veranderingen van onder meer de Duursche Waarden opgenomen in het nieuwe rivierengebied. In andere woorden, om het effect van vegetatie op de afvoerbepaling te analyseren kan het rivierengebied waarin het Stroomlijn programma is geïmplementeerd vergeleken worden met het rivierengebied zonder het Stroomlijn programma. Deze vergelijking moet een implicatie geven van de gevoeligheid van de afvoerbepaling voor vegetatie. Om meer inzicht te verkrijgen in het effect van kleinere veranderingen in vegetatie op de afvoerbepaling is uiteraard meer onderzoek nodig dan slechts een vergelijking met en zonder Stroomlijn programma. De vergelijking tussen een rivierengebied met en zonder Stroomlijn programma kan echter uitstekend dienen als oriëntatie. Aan de hand van het belang naar meer inzicht in de invloeden van vegetatie en haalbaarheid van de analyse zal sectie 6 de gevoeligheid van de afvoerbepaling voor vegetatie belichten.

5.3 Ruimtelijke ingrepen

In 2006 is de PKB^{5.3} Ruimte voor de Rivier definitief vastgesteld. Er zijn in het rivierengebied in heel Nederland de nodige maatregelen uitgevoerd. Zo ook voor de IJssel. Deze ingrepen moeten resulteren in een verlaging van de waterstanden bij maatgevende afvoeren. De verwachting is dat geometrische veranderingen daarentegen invloed kunnen hebben op de afvoeren in de rivier. De Ruimte voor de Rivier projecten waarvan een significant effect op de afvoerbepaling verwacht wordt zijn de herinrichting van de uiterwaarden bij Olst en aanleg van de hoogwatergeul tussen Veessen en Wapenveld.

Zo zijn de uiterwaarden ingrijpend veranderd door de realisatie van de nevengeulen in de Fortmonderwaard en Welsumerwaard. Deze nevengeulen zijn verkregen door uitgraving van de uiterwaarden en zijn voltooid in 2015. Dit betekent dat vanaf 2015 de uiterwaarden bij een lagere waterstand onderdeel zullen zijn van het doorstroomprofiel van de IJssel. Het resultaat zou dan bij een zelfde afvoer als voor de realisatie van de nevengeulen kunnen zijn, alleen corresponderend met een lagere waterstand (Van de Laar, Heikens, Voorwinden, Rademarkers, & Scholl, 2011; provincie Overijssel, 2017; Neefjes & Koffijberg, 2016).

De hoogwatergeul tussen Veessen en Wapenveld is sinds 23 februari 2017 in gebruik gesteld. Deze geul wordt echter gebruikt wanneer sprake is van extreem hoogwater (+5,65m NAP te Veessen). Dit komt overeen met een waterstand van +5,85m NAP bij Olst. Na verwachting komt zulk hoogwater eens in de tachtig jaar voor. Het gebruik van de hoogwatergeul zal resulteren in een sterk dalende waterstand van de IJssel. Net als bij de uitgegraven uiterwaarden bij Olst zal dus een afvoer kunnen corresponderen met een lagere waterstand. Dit effect zal vermoedelijk sterker aanwezig zijn bij het gebruik van de hoogwatergeul Veessen-Wapenveld. Kortom, vanwege de bovenstaande verwachtingen analyseert sectie 6 in hoeverre de afvoerbepaling gevoelig is voor de uiterwaardvergraving bij Olst en gebruik van de hoogwatergeul Veessen-Wapenveld (Rijkswatertaat, 2017; vhbinfra, 2018).

Daarnaast zijn er ook Ruimte voor de Rivier projecten in Zwolle en Kampen. Ruimte voor de Rivier Zwolle omvat de aanleg van geulen in de uiterwaarden van Scheller en Oldeneler Buitenwaarden en een dijkverlegging bij Westenholtte. Bij Kampen is in de eerste plaats het zomerbed verlaagd. Tevens is men momenteel bezig met de constructie van de 'bypass', het Reevediep. Het Reevediep wordt een zijtak van de IJssel en zal uitstromen op het Drontermeer. De bypass moet afgerond zijn en meestromen in 2022. Deze ingrijpende maatregelen moeten leiden tot een waterstandsdeling van de IJssel bij Zwolle en Kampen. Om inzicht te verkrijgen of deze benedenstroomse geometrische aanpassingen effect hebben op de bovenstroomse afvoer bij Olst is het zinvol om ook de gevoeligheid van de afvoerbepaling voor de Ruimte voor de Rivier projecten bij Zwolle en Kampen te analyseren. Sectie 6 gaat daarom ook de gevoeligheid voor de Ruimte voor de Rivier projecten bij Zwolle en Kampen belichten.

Doormiddel van de actualisatie die Rijkswaterstaat Oost-Nederland uitvoert, is het ook mogelijk om een rivierengebied te vergelijken waarbij een project wel of niet in gebruik is genomen. Zo kan dus de hoogwatergeul Veessen-Wapenveld geanalyseerd worden door een afvoer door de IJssel te simuleren met een waterstand boven +5,65m NAP bij Veessen. Omdat de Ruimte voor de Rivier projecten bij Kampen nog niet zijn afgerond, wordt de maatregel met betrekking tot de zomerbed verdieping bij Kampen gebruikt voor de vergelijking met een verouderd rivierengebied.

^{5.3}Planologische kernbeslissing (MIRT, 2018)

5.4 Hysteresis-effect (niet-permanentie)

Zoals sectie 3 heeft laten zien, geldt de huidige Qh-relatie alleen voor permanente stroming. Echter is dit in de praktijk zelden het geval. Bovendien zijn er methoden ontwikkeld om de invloeden van niet-permanente stromingsomstandigheden mee te nemen in de bepaling van de afvoeren. Één van die methoden is om de permanente afvoeren te corrigeren voor niet-permanentie. Deze correctie kan volgens Dottori e.a. (2009) toegepast worden met behulp van de Jones-formule (vergelijking 5.1). Deze formule is in het verleden geïmplementeerd in de Qf-relatie voor het splitsingspunt Lobith (Wijbenga e.a., 2009).

$$Q = Q_s \sqrt{1 + \frac{1}{S_e c} \frac{dh}{dt}} \quad (5.1)$$

In vergelijking 5.1 is Q de gecorrigeerde afvoer en is Q_s de afvoer onder permanente stromingsomstandigheden. Om de Jones-correctie toe te passen moet onder andere de term $S_e c$ bepaald worden. Dit is het energieverhang onder permanente stromingsomstandigheden S_e vermenigvuldigd met de voorplantingssnelheid van een hoogwatergolf c . De grootte van deze term kan met een 1D-model (SOBEK^{5.4}) of 2D-model (WAQUA) bepaald worden. Door de keuze om alleen WAQUA te gebruiken binnen het onderzoek naar de verbetermogelijkheden van de Qh-relatie voor Olst, vanwege beperkingen in tijd, is het gebruik van SOBEK uitgesloten. De verandering van de waterstand over de tijd $\frac{dh}{dt}$ kan bepaald worden wanneer beschikking is over metingen van waterstanden en het tijdstip waarop gemeten wordt.

Kortom, door gebruik van een 2D-hydraulisch instrumentarium en een dataset aan waterstandsmetingen is de gevoeligheid voor het hysteresis-effect te bepalen. Naast de haalbaarheid laat sectie 4 zien dat in het hogere bereik meer afwijkingen optreden, wat kan duiden op de invloeden van het hysteresis-effect. Aan de hand van deze verwachtingen en de haalbaarheid zal sectie 6 de gevoeligheid van de afvoerbepaling voor het hysteresis-effect belichten.

5.5 Wind

Door effecten van wind kan het water in de rivier opgestuwd worden. Dit verschijnsel kan leiden tot een dusdanig waterstandsverschil en wordt opwaaiing respectievelijk afwaaiing genoemd. De grootte wordt onder ander bepaald door de windkracht, windduur, afmetingen van het windveld en waterstand. Zo bestaan er kansen op significante afwijkingen tussen de afvoerbepalingen en de werkelijke afvoeren. De waterstand wordt namelijk verhoogd door opstuwing, terwijl de afvoer door de rivier niet wezenlijk hoeft te veranderen. Significante effecten door wind worden voornamelijk waargenomen langs de kust. Echter zou opwaaiing vanuit het IJsselmeer invloed kunnen hebben op de waterstanden bij Olst. Daarnaast kunnen ook lokale windeffecten waargenomen worden bij Olst. De gevoeligheid van de afvoerbepaling voor wind zou bepaald kunnen worden door golven vanuit het IJsselmeer richting Olst te simuleren. Dit zou lokale windeffecten en/of opwaaiing vanuit het IJsselmeer kunnen nabootsen. Echter zijn bij een oriënterend onderzoek zoals deze SOBEK-simulaties zinvoller om uit te voeren, omdat berekeningen in een 1D-model een kortere duur hebben en zo meer data genereren dan WAQUA-simulaties. Aan de hand van de haalbaarheid wordt zodoende in sectie 6 geen verdere analyse gedaan naar de invloeden van op- of afwaaiing door wind.

^{5.4}De deelmodellen van SOBEK simuleren complexe stromingen en watergerelateerde processen, in een eendimensionaal netwerk en tweedimensionale grids. SOBEK is een integrale softwareomgeving voor alle toepassingen en modellen zoals rivieren, delta's, afvoer- en irrigatiesystemen en stormenHelpdeskwater, 2018

6 Gevoeligheidsanalyse

Om meer inzicht te verkrijgen in de invloed van diverse factoren op de afvoerbepaling, analyseert sectie 6 de gevoeligheid voor de bodemverandering, vegetatie, ruimtelijke ingrepen en niet-permanentie. Allereerst start deze sectie met een referentiemodel die als basis dient voor de gevoeligheidsanalyse. Daarna volgen de gevoeligheidsanalyses voor bodemverandering, vegetatie en ruimtelijke ingrepen. Vervolgens komt het effect van al deze maatregelen samen aanbod, waarbij ook andere bijwerkingen van het rivierengebied toegevoegd worden. Zo zal duidelijk worden in hoeverre welk van de onderzochte ingrepen of natuurlijke processen, naast de waterstand, de meeste invloed hebben op de totale afvoerbepaling. Ten slotte behandelt sectie 6 de gevoeligheid voor niet-permanente stromingsomstandigheden.

6.1 Referentiemodel

Om het effect van verschillende factoren op de afvoerbepaling te analyseren, is inzicht in de invloeden van deze factoren op afvoerbepaling vereist. Om de invloed van iedere factor in kaart te brengen, is een referentiemodel nodig. Dit model bevat datapunten bestaande uit waterstanden en afvoeren. Omdat de huidige Qh-relatie in 2010 in gebruik is genomen, is 2010 het referentiejaar. Zo laat het referentiemodel veranderingen in onder andere geometrie en ruwheden na 2010 buiten beschouwing.

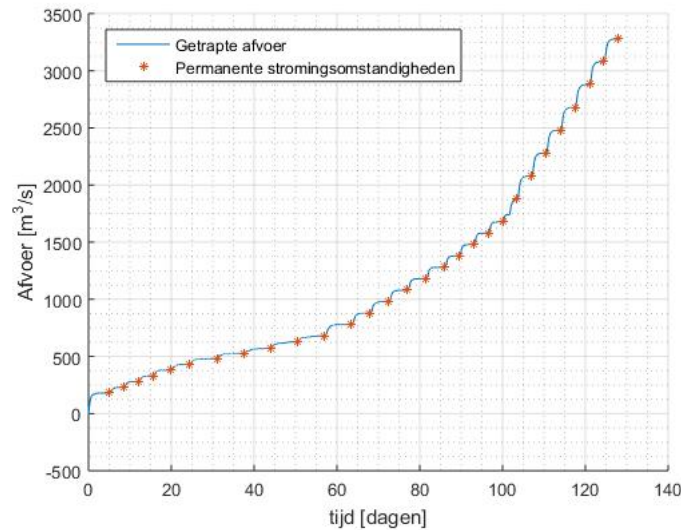
Om de invloeden van ontwikkelingen in ruimtelijke ingrepen en veranderingen in bodemhoogte en vegetatie in kaart te brengen wordt Baseline^{6.1} gebruikt. In Baseline kunnen deze ontwikkelingen en veranderingen na 2010 afzonderlijk van elkaar geïmplementeerd worden. Deze veranderingen worden toegevoegd als maatregelen. Ten slotte kunnen WAQUA-berekeningen uitgevoerd worden door de maatregelen na het 'mixin' met het referentiemodel te converteren naar WAQUA. Zo worden datapunten verkregen. Maatregelen van het Stroomlijn programma kunnen bijvoorbeeld opgenomen worden door deze toe te voegen aan het referentiemodel.

De datapunten uit de WAQUA-berekening moeten vergeleken worden met het referentiemodel. Zo worden veranderingen ten opzichte van het jaar 2010 geanalyseerd. Echter is de huidige Qh-relatie 2010 opgesteld met onder andere datapunten corresponderend met rivier condities voor 2010. Bovendien bestaat een aanzienlijk deel van de datapunten uit metingen in plaats van datapunten verkregen uit WAQUA. Het referentiemodel gebaseerd op slechts WAQUA berekeningen voor de rivier condities uit 2010 lijkt daarom logischer. Echter zijn modelschematisaties van 1995 en 2017 beschikbaar. Om een referentiemodel te maken voor het jaar 2010, zijn maatregelen na 2010 niet opgenomen in het Baseline-model. Kortom, het referentiemodel bestaat uit maatregelen tussen 1995 en 2010 (bijlage D tabel D.1).

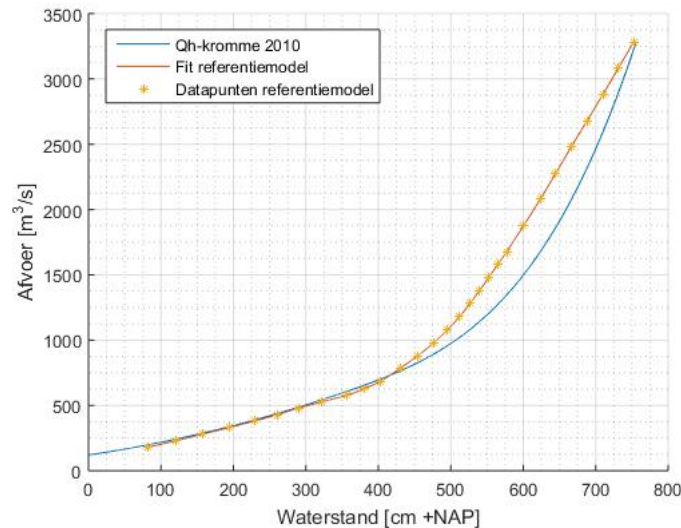
De resultaten van de WAQUA-berekening bevat datapunten waar een afvoerkromme uit af te leiden valt. Om datapunten te verkrijgen voor extreme omstandigheden, zoals hoge afvoeren, reikt het invoerbereik voor de WAQUA-berekening van $180\text{m}^3/\text{s}$ tot en met $3280\text{m}^3/\text{s}$ (bijlage D.2 tabel D.2). Daarnaast is in de WAQUA-berekening voor het referentiemodel op de instroomrand Zutphen uitgegaan van semipermanente afvoeren met 29 discrete afvoerniveaus. Dit resulteert in het zogenoemde 'trapjes' model (figuur 6.1). De afvoerniveaus worden iedere keer met een tijdsduur van een halve dag opgeschaald. De tijd die uiteindelijk gebruikt wordt om de afvoerniveaus constant te houden verschilt van 3 tot 6 dagen. Zo kunnen datapunten verzameld worden voor de waterstand en afvoer op tijdstappen waar permanente stromingsomstandigheden zijn. Op deze manier worden hysteresis-effecten uitgesloten voor het referentiemodel. Uit WAQUA-berekeningen is gebleken dat voor afvoeren tussen $480\text{m}^3/\text{s}$ en $780\text{m}^3/\text{s}$ meer tijd benodigd is om constante afvoeren te krijgen. Verwacht wordt dat wanneer de uiterwaarden onderdeel beginnen uit te maken van het doorstroomoppervlak, de benodigde tijd om afvoeren constant te krijgen langer is. Tevens is voor de initialisatie van de WAQUA-berekening gekozen voor 5 dagen en liggen de benedenstroomse randvoorwaarden bij de Ketelbrug. Daarnaast bevat het 2D-model de IJssel en zijn tak het Twentekanaal. Deze afvoeren dienen als datapunten voor het referentiemodel. Naast het verloop van de afvoer over de tijd, is het ook mogelijk om de waterstandsverloop tegen de tijd uit te zetten (bijlage D.3 figuur D.1). De tijdstippen waarop permanente stromingsomstandigheden optreden valt op basis van de waterstandsverloop de waterstand te bepalen. Deze waterstanden dienen ook als datapunten voor het referentiemodel. De 29 gesimuleerde afvoerniveaus leiden

^{6.1}Een instrument binnen ArcGIS om de geometrie van modelschematisatie te bouwen en beheren. Samen met WAQUA is het onderdeel van het rivierkundig beoordelingskader van Rijkswaterstaat.

uiteindelijk tot 29 datapunten. Zo kan met de datapunten voor de afvoeren en waterstanden het afvoerverloop ten opzichte van de waterstand bepaald worden (figuur 6.2). Er is gekozen om de datapunten lineair te interpoleren, zodat onder andere verkregen afvoeren uit de gevoeligheidsanalyses vergeleken kunnen worden met de geïnterpoleerde Qh-kromme. Een gefitte polynoom daarentegen zal het gemiddelde verloop van alle datapunten weergeven. Daarnaast bestaat er ook de mogelijkheid om de datapunten van het referentiemodel afzonderlijk te vergelijken met de datapunten verkregen uit een WAQUA-berekening waar een maatregel is in verwerkt. Tevens is het mogelijk om het referentiemodel te vergelijken met de Qh-kromme 2010 (figuur 6.2).



Figuur 6.1: Opgelegde (getrapte) afvoerverloop op instroomrand bij Zutphen



Figuur 6.2: Lineair geïnterpoleerde datapunten referentiemodel en Qh-kromme 2010

Wat opvalt is dat het referentiemodel in het lage bereik goed aansluit op de Qh-kromme 2010 (figuur 6.2). Echter geeft het referentiemodel in het hoge breik, net als de Qh-relatie 2013, hogere afvoeren dan de Qh-kromme 2010. Deze hogere afvoeren lijken te komen door het gebruik van het vernieuwde WAQUA-model en lijken daarom meer overeen te komen met de afvoergroottes van januari 2018.

De gevoeligheid van de afvoerbepaling met een correctie voor het hysteresis-effect kan niet bepaald worden door een maatregel, zoals het Stroomlijn programma, toe te voegen aan een modelschematisatie. Hysteresis is namelijk een gevolg van niet-uniforme stroming. Om de gevoeligheid

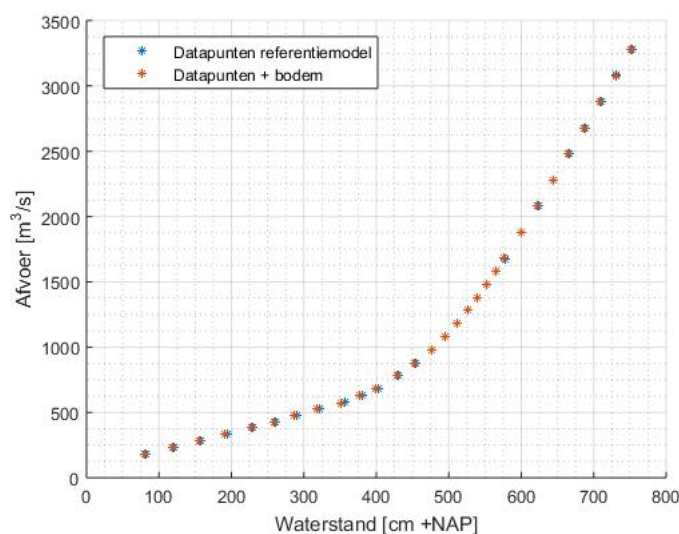
van de afvoerbepaling voor het hysteresis-effect te analyseren, zal de prestatie van de Qh-relatie 2010 met afvoermetingen vergeleken moeten worden met de prestatie van een Qf-relatie, waarbij de metingen gecorrigeerd zijn voor niet-permanente stromingsomstandigheden. Zo zal duidelijk worden of het corrigeren van afvoeren een significant effect gaat hebben op de afvoerbepaling. Kortom, om de gevoeligheid van het hysteresis-effect te onderzoeken is de Qh-relatie 2010 met afvoermetingen het referentiemodel.

6.2 Gevoeligheid bodemverandering

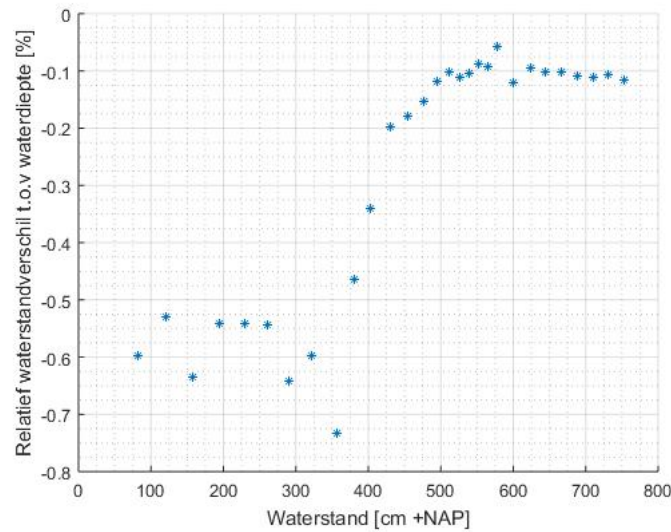
Om te onderzoeken in hoeverre afvoeren bij Olst beïnvloed worden door bodemverandering, zullen veranderingen in het rivierengebied na 2010 omtrent bodemverandering toegevoegd moeten worden. Om te beginnen worden de maatregelen, met betrekking tot bodemverandering (bijlage D.4 tabel D.3), toegevoegd aan een maatregellijst voor een Baseline-variant. De maatregellijst wordt vervolgens ingemixt in Baseline, zodat de maatregelen worden opgenomen en een bijgewerkt rivierengebied ontstaat. De vervolgstap is de conversie naar een WAQUA-rooster wat als input moet dienen voor de WAQUA-berekening. De WAQUA-berekening zal dan dezelfde invoer (trapjes model) moeten hebben als het referentiemodel. Zo worden de afvoeren verhoogd en constant gehouden op dezelfde tijdstippen als het referentiemodel alleen onder een afwijkende rivier condities, namelijk de verandering in de bodem.

Datapunten voor afvoeren en waterstanden worden bepaald onder permanente stromingsomstandigheden. Zo wordt het eventuele hysteresis-effect genegereerd. Omdat de invoercondities voor zowel het referentiemodel als de variant met bodemverandering hetzelfde zijn, zullen de datapunten voor de afvoeren ook nagenoeg hetzelfde zijn. Echter kunnen berekende afvoeren voor de variant met bodemverandering corresponderen met andere waterstanden dan bij het referentiemodel. Wanneer dusdanige verschillen aanwezig zijn tussen waterstanden kan dit duiden op een significante gevoeligheid van de afvoerbepaling voor bodemverandering.

Bij het referentiemodel en de bodemverandering variant treden bij dezelfde afvoeren nagenoeg dezelfde waterstanden op (figuur 6.3). Dit wordt nogmaals bevestigd doordat bij hoge waterstanden nauwelijks relatieve verschillen zijn tussen de waterstanden van het referentiemodel en de variant met bodemverandering bij overeenkomende afvoeren (figuur 6.4). Bij lagere waterstanden zijn er relatief enigszins meer verschillen. De relatieve verschillen tussen waterstanden ten opzichte van de waterdieptes van het referentiemodel variëren van $-0,73\%$ tot en met $-0,058\%$. Om een goed overzicht te krijgen van de verschillen tussen het referentiemodel en de variant met bodemverandering, geeft tabel 6.1 onder meer het bereik van de relatieve verschillen in waterstand weer voor het lage, midden en hoge bereik. Het lage, midden en hoge bereik gelden respectievelijk voor de waterstanden $0\text{cm} - 250\text{cm}$, $250\text{cm} - 500\text{cm}$ en $> 500\text{cm}$ van het referentiemodel.

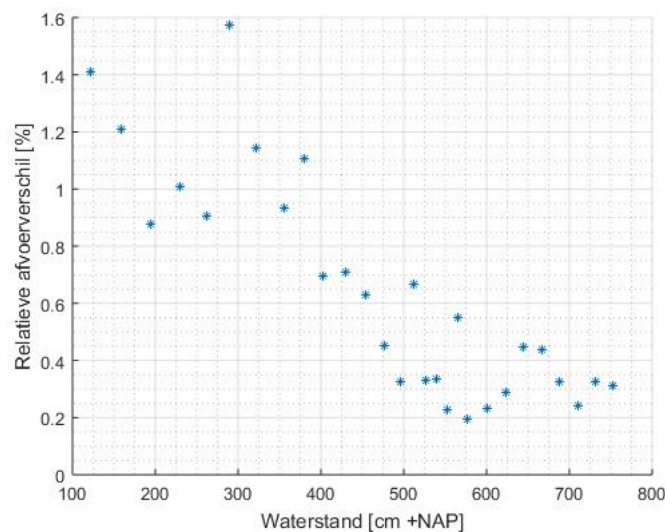


Figuur 6.3: Datapunten referentiemodel en variant bodemverandering



Figuur 6.4: Relatief waterstandsverschil referentiemodel en variant bodemverandering

Echter is het ook mogelijk om de verkregen datapunten van de variant met bodemverandering (figuur 6.3) te vergelijken met de geïnterpoleerde fit van het referentiemodel (figuur 6.2). Zo kunnen voor de overeenkomende waterstanden de afwijkingen in afvoeren bepaald worden. Dit is zinvol, omdat diverse Qf-relaties stationaire afvoeren corrigeren voor functies zoals onder meer bodemverandering. Zo ook de Qf-relatie voor Lobith (Wijbenga e.a., 2009). Op deze manier wordt inzicht verkregen in de grootte van de afvoerafwijkingen tussen het referentiemodel en de variant met bodemverandering. Zo is wederom de afvoerbepaling relatief het gevoeligst voor de verandering van de bodem in het lage en midden bereik (figuur 6.5). De afvoerafwijkingen tussen het referentiemodel en de variant met bodemverandering reiken van 0,193% (hoge bereik) tot en met 1,57% (lage en midden bereik). In absolute waarden komt dit neer op een bereik tussen $2,88\text{m}^3/\text{s}$ (lage en midden bereik) en $10,9\text{m}^3/\text{s}$ (hoge bereik). In tegenstelling tot de relatieve verschillen in afvoeren, bevinden absoluut de grootste verschillen in het hogere bereik (bijlage D.4 figuur D.2 en tabel 6.1). Kortom, voor overeenkomende waterstanden geeft de variant met bodemverandering hogere afvoeren dan het referentiemodel. Dit kan dus duiden bodemdaling. Overeenkomende waterstanden hoeven immers niet te corresponderen met zelfde waterdieptes.



Figuur 6.5: Relatieve afvoerafwijkingen referentiemodel en variant bodemverandering

Tabel 6.1: Verschillen referentiemodel en variant bodemverandering

	Totaal bereik	Laag bereik	Midden bereik	Hoog bereik
Rel. waterstandsverschil [%]	[-0,73, -0,058]	[-0,63, -0,53]	[-0,73, -0,12]	[-0,12, -0,058]
Rel. afvoerverschil [%]	[0,193, 1,57]	[0,88, 1,41]	[0,33, 1,57]	[0,19, 0,67]
Abs. afvoerverschil [m^3/s]	[2,88, 10,8]	[2,88, 3,79]	[3,52, 7,44]	[3,24, 10,79]

Rel.=Relatief en Abs.=Absoluut

6.3 Gevoeligheid Vegetatie

De gevoeligheid van de afvoerbepaling voor vegetatie kan, net als voor de bodemverandering, onderzocht worden door veranderingen in het riviereengebied na 2010 met betrekking tot vegetatie toe te voegen aan een Baseline-variant. De stappen die ondernomen zijn om de gevoeligheid voor bodemverandering te bepalen, moeten opnieuw uitgevoerd worden. Dit resulteert wederom in datapunten onder afwijkende rivier condities. Dit keer door de verandering in vegetatie. Daarnaast moet de WAQUA-berekening dezelfde invoer hebben als de variant met bodemverandering en het referentiemodel. Zo kunnen de datapunten voor de variant met vegetatie eveneens bepaald worden onder permanente stromingsomstandigheden. De veranderingen die na 2010 hebben plaatsgevonden omtrent vegetatie en die beschikbaar zijn, is het Stroomlijn programma (bijlage D.5 tabel D.4). Ter illustratie representeert sectie 6.2 in het hoofdrapport de figuren voor de gevoeligheid voor bodemverandering. In bijlage D.5, D.6, D.7 en D.8 zijn daarom de figuren voor de gevoeligheden voor vegetatie en ruimtelijke ingrepen opgenomen.

Voor dezelfde afvoeren bij het referentiemodel en de variant met vegetatie lijken de optredende waterstanden, net als voor bodemverandering, vrijwel hetzelfde te zijn (bijlage D.5 figuur D.3). Desalniettemin zijn er in het hoge bereik relatief meer verschillen aanwezig dan in het lage en midden bereik (bijlage D.5 figuur D.4 en tabel 6.2). Dit zou te verklaren kunnen zijn, doordat het Stroomlijn programma betrekking heeft op de verwijdering van de vegetatie in de uiterwaarden van de IJssel bij Olst. Zo zou de stroming minder weerstand kunnen ondervinden voor afvoeren waarbij de uiterwaarden onderdeel zijn van het doorstroomprofiel van de IJssel. Het bereik waarin de relatieve verschillen zich bevinden is tussen $-0,49\%$ en $0,033\%$. In andere woorden, bij een zelfde afvoer geeft de variant met vegetatie lagere waterstanden dan het referentiemodel. Dit geldt overigens bij waterstanden groter dan $400cm + NAP$.

Andersom komen lagere waterstanden bij dezelfde afvoeren neer op een hogere afvoer bij overeenkomende waterstanden voor de variant met vegetatie dan voor het lineair gefitte referentiemodel. Zo blijkt wederom de afvoerbepaling het gevoeligst voor vegetatie bij hogere afvoeren (bijlage D.5 figuur D.5). De relatieve afvoerafwijkingen tussen het referentiemodel en de variant met vegetatie reiken van $-0,30\%$ tot en met $1,50\%$. In absolute waarden komt dit neer op een bereik tussen $-0,69m^3/s$ en $48,32m^3/s$ (bijlage D.5 figuur D.6 en tabel 6.2). Deze verschillen in afvoer zijn groter dan de verschillen die optreden tussen het referentiemodel en variant met bodemverandering. Dit kan duiden op een afvoerbepaling die gevoeliger is voor vegetatie dan voor bodemverandering.

Tabel 6.2: Verschillen referentiemodel en variant vegetatie

	Totaal bereik	Laag bereik	Midden bereik	Hoog bereik
Rel. waterstandsverschil [%]	[-0,49, 0,033]	[-0,023, 0,033]	[-0,14, 0,00]	[-0,49, -0,14]
Rel. afvoerverschil [%]	[-0,30, 1,50]	[-0,30, 0,18]	[-0,14, 0,44]	[0,67, 1,50]
Abs. afvoerverschil [m^3/s]	[-0,69, 48,32]	[-0,69, 0,51]	[-0,68, 4,33]	[7,85, 48,32]

Rel.=Relatief en Abs.=Absoluut

6.4 Gevoeligheid uiterwaarden Olst

De analyse van de gevoeligheid voor de verlaagde uiterwaarden wordt uitgevoerd met een vergelijking tussen het referentiemodel en een variant met de uitgegraven uiterwaarden. Om een riviereengebied met verlaagde uiterwaarden bij Olst te verkrijgen zullen daarom de maatregelen met betrekking tot deze verlaging toegevoegd moeten worden. De maatregelen betreft de realisatie van de nevengeulen Fortmonderwaard en Welsumerwaard (bijlage D.6 tabel D.5).

In het hoge bereik, wanneer de uiterwaarden onderdeel worden van het doorstroomprofiel van de IJssel, gelden er bij overeenkomstige afvoeren tussen het referentiemodel en de variant met

verlaagde uiterwaarden lagere waterstanden (bijlage D.6 figuur D.7). Dit wordt nogmaals bevestigd doordat in het hogere bereik relatief lagere waterstanden optreden bij de uiterwaarden-variant (bijlage D.6 figuur D.8). Desalniettemin treden er bij de transitie tussen het wel en niet meestromen van de uiterwaarden van de variant met verlaagde uiterwaarden hogere waterstanden op dan bij het referentiemodel. Het relatieve verschil tussen de waterstand van de uiterwaarden-variant en het referentiemodel is bij de overgang kleiner dan 0,4%. De relatieve verschillen tussen de waterstanden ten opzichte van de waterdieptes van het referentiemodel variëren van $-0,76\%$ en $0,35\%$ (tabel 6.3).

Wanneer gekeken wordt naar de verschillen in afvoer bij overeenkomende waterstanden tussen de uiterwaarden-variant en het lineair gefitte referentiemodel, blijkt dat er bij dezelfde waterstanden over het algemeen hogere afvoeren gelden voor de uiterwaarden-variant (bijlage D.6 figuren D.9 en D.10). Wederom blijkt de afvoerbepaling het gevoeligst in het hogere bereik, terwijl bij de overgang tussen het wel en niet meestromen van de uiterwaarden opnieuw afwijkingen waar te nemen zijn. De relatieve afvoerafwijkingen tussen het referentiemodel en de variant met uiterwaarden vergraving reiken van $-1,11\%$ tot en met $3,09\%$. In absolute waarden is dit $-10,28^3/s$ en $68,05m^3/s$ (tabel 6.3). Daarbij gelden $-1,11\%$ en $-7,6m^3/s$ bij de overgang tussen het wel en niet meestromen van de uiterwaarden.

Tabel 6.3: Verschillen referentiemodel en variant verlaagde uiterwaarden

	Totaal bereik	Laag bereik	Midden bereik	Hoog bereik
Rel. waterstandsverschil [%]	[-0,76, 0,35]	[-0,023, 0,038]	[0,012, 0,35]	[-0,76, -0,072]
Rel. afvoerverschil [%]	[-1,11, 3,09]	[-0,25, 0,17]	[-1,11, 0,016]	[0,15, 3,09]
Abs. afvoerverschil [m^3/s]	[-10,28, 68,05]	[-0,77, 0,46]	[-10,28, 0,078]	[1,76, 68,05]

Rel.=Relatief en Abs.=Absoluut

6.5 Gevoeligheid hoogwatergeul Veessen-Wapenveld

Het effect van de hoogwatergeul Veessen-Wapenveld is te analyseren door de maatregelen met betrekking tot deze geul toe te voegen aan het referentiemodel (bijlage D.7 tabel D.6). Zo ontstaat een Baseline-variant waar de hoogwatergeul in is opgenomen. In werkelijkheid wordt deze operationeel gebruikt bij extreem hoogwater van $5,65m + NAP$ bij Veessen. Echter omdat de Baseline-variant met de hoogwatergeul te allen tijden onderdeel is van het doorstroomprofiel, zal in de WAQUA-simulatie de hoogwatergeul ook gebruikt worden voor de doorstroom van het water. Kortom, het effect van de opening van de hoogwatergeul bij een waterstanden van $5,65m + NAP$ te Veessen is niet gesimuleerd. Daarnaast zal bij de opening van de hoogwatergeul vermoedelijk een stroming optreden die sterk beïnvloed wordt door niet-permanente stromingsomstandigheden. De verwachting is immers dat de waterstand bij Veessen sterk daalt binnen een kort tijdsbestek. Dit komt neer op een grotere verandering in waterstand in slechts een klein periode van tijd. Daarnaast is de verwachting is dat bij een hoogwatergolf bij een zelfde waterstand drie afvoeren kunnen optreden. Zo treden de drie afvoeren op in aanloop naar de waterstand van $5,65m + NAP$, direct na opening van de hoogwatergeul en na enig gebruik van de hoogwatergeul waarbij de waterstanden en afvoeren wederom verder toenemen. Voor de analyse van de transitie tussen de wel en niet in gebruik genomen geul zijn meer simulaties vereist. Om deze reden richt dit rapport zich op de vergelijking tussen het referentiemodel en de variant met de hoogwatergeul die te allen tijden onderdeel is van de doorstroom van de IJssel. Om enigzins een inzicht te krijgen in de invloed na opening van de geul op de afvoerbepaling, worden voor de variant met de hoogwatergeul alle verkregen datapunten voor de waterstanden tot en met een $5,85m + NAP$ te Olst vervangen door de waterstanden van het referentiemodel. De waterstanden na $5,85m + NAP$ moeten echter wel corresponderen met de hoogwatergeul-variant (bijlage D.7 figuur D.11).

Het gebruik van de hoogwatergeul Veessen-Wapenveld resulteert in significante invloeden op de afvoeren van de IJssel bij Olst (bijlage D.7 figuur D.11). Ook zijn relatief lagere waterstanden merkbaar bij gebruik van de geul (bijlage D.7 figuur D.13). Bovendien is de gevoeligheid voor Veessen-Wapenveld significant groter dan de hiervoor behandelde invloeden. De relatieve verschillen tussen waterstanden na opening van de hoogwatergeul Veessen-Wapenveld ten opzichte van de waterdieptes van het referentiemodel variëren van $-6,29\%$ en $-4,74\%$. Dit betekent dus dat bij dezelfde afvoeren de hoogwatergeul-variant na opening lagere waterstanden berekent dan het referentiemodel. Andersom betekent dit over het algemeen een hogere afvoer bij overeenkomende

waterstanden voor de variant met de hoogwatergeul (met of zonder eventueel gecorrigeerde waterstanden). Wanneer de geul ten allen tijden opstaat nemen de afvoerverschillen verder toe (Bijlage D.7 figuren D.15 en D.16). De relatieve afvoerverschillen tussen het referentiemodel en de variant met de hoogwatergeul reiken van $-0,32\%$ tot en met $24,84\%$ (tabel 6.4). Wanneer de hoogwatergeul pas bij $5,65m$ +NAP te Veessen geopend wordt variëren de afvoerverschillen tussen $22,06\%$ en $22,80\%$. Dit duidt op vrij constante verschillen die bij afvoeren in het hoge bereik de afvoerbepalingen dusdanig onnauwkeurig zouden kunnen maken. In absolute waarden komt dit overeen met afvoerverschillen van $-0,73m^3/s$ tot en met $608,89m^3/s$ wanneer de hoogwatergeul te allen tijden open is. Wanneer de hoogwatergeul in gebruik genomen wordt bij $5,65m$ +NAP te Veessen zullen afvoerverschillen optreden tussen $337,90m^3/s$ en $608,89m^3/s$. Dit zijn wederom significant verschillen die wijzen op een afvoerbepaling die zeer gevoelig is voor het dan wel niet meestromen van de hoogwatergeul Veessen-Wapenveld.

Tabel 6.4: Verschillen referentiemodel en variant hoogwatergeul

	Totaal bereik	Laag bereik	Midden bereik	Hoog bereik
Rel. waterstandsverschil [%]	[-6,29, 0,046]	[-0,0050, 0,044]	[-1,89, 0,046]	[-6,29, -2,30]
Rel. afvoerverschil [%]	[-0,32, 24,84]	[-0,32, 0,23]	[-0,16, 7,88]	[10,22, 24,84]
Abs. afvoerverschil [m^3/s]	[-0,73, 608,89]	[-0,73, 0,63]	[-0,70, 78,88]	[109,35, 608,89]

Rel.=Relatief en Abs.=Absoluut

6.6 Gevoeligheid RvdR. Zwolle en Kampen

De analyse van de gevoeligheid voor de Ruimte voor de Rivier projecten bij Zwolle en Kampen wordt uitgevoerd met een vergelijking tussen het referentiemodel en een variant waar de aangelegde geulen Scheller en Oldeneler Buitenwaarden, dijkverlegging Westenholte en zomerbed verlaging bij Kampen in zijn meegenomen (bijlage D.8 tabel D.7). Dit resulteert in de RvdR. Zwolle en Kampen variant. Deze Baseline-variant bevat niet de bypass Reevediep. Deze bypass wordt na verwachting afgerond in 2022. Het is wel mogelijk om deze herinrichting van het rivierengebied van de IJssel te onderzoeken, omdat Rijkswaterstaat Oost-Nederland deze ontwikkeling al heeft bijgewerkt voor het gebruik in 2022. Vanwege een kort tijdsbestek zal de invloed van de Ruimte voor de Rivier projecten met de bypass Reevediep niet verder geanalyseerd worden. Bovendien wordt zo inzicht verkregen in de invloed van de huidige staat van het Ruimte voor de Rivier project bij Zwolle en Kampen.

In het hoge bereik zijn er bij overeenkomende afvoeren lagere waterstanden waar te nemen bij de RvdR. Zwolle en Kampen variant dan bij het referentiemodel (bijlage D.8 figuur D.17). Dit effect is ook zichtbaar bij de relatieve waterstandsverschillen (bijlage D.8 figuur D.18). Echter zijn er ook verschillen in waterstanden tussen beide varianten op te merken wanneer de uiterwaarden wel of niet onderdeel zijn van het doorstroomprofiel. Ook deze verschillen leiden uiteindelijk tot lagere waterstanden bij de RvdR. Zwolle en Kampen variant dan bij het referentiemodel. De relatieve waterstandsverschillen tussen beide varianten varieert tussen $-1,11\%$ en $-0,31\%$ (tabel 6.5). Wanneer gekeken wordt naar de afvoerverschillen bij overeenkomende waterstanden tussen het lineair gefitte referentiemodel en de RvdR. Zwolle en Kampen variant, blijkt de RvdR. Zwolle en Kampen variant hogere afvoeren te berekenen dan het referentiemodel (bijlage D.8 figuren D.19 en figuur D.20). Daarbij zijn de afwijkingen tussen beide varianten het grootst in het hoge bereik en zijn de verschillen in het lage en midden bereik minder dominant. De relatieve afvoerafwijkingen tussen het lineair gefitte referentiemodel en RvdR. Zwolle en Kampen variant reiken van $0,55\%$ tot $3,33\%$. Absoluut gezien verschillen de afvoeren tussen beide varianten van $1,81m^3/s$ tot en met $105,56m^3/s$.

Tabel 6.5: Verschillen referentiemodel en variant RvdR. Zwolle en Kampen

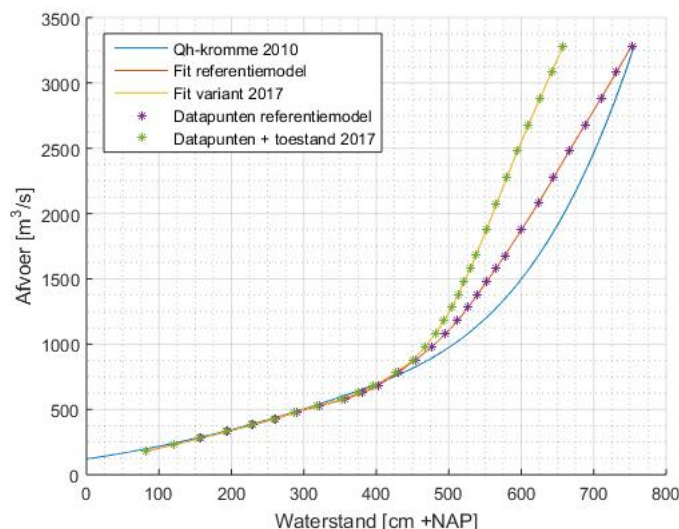
	Totaal bereik	Laag bereik	Midden bereik	Hoog bereik
Rel. waterstandsverschil [%]	[-1,11, -0,31]	[-0,44, -0,31]	[-1,02, -0,43]	[-1,11, -0,39]
Rel. afvoerverschil [%]	[0,55, 3,33]	[0,55, 1,01]	[0,93, 2,29]	[1,57, 3,33]
Abs. afvoerverschil [m^3/s]	[1,81, 105,56]	[1,81, 3,81]	[3,97, 21,97]	[20,00, 105,56]

Rel.=Relatief en Abs.=Absoluut

6.7 Totale gevoeligheid

Nu de invloed van bodemverandering, vegetatie en ruimtelijke ingrepen afzonderlijk onderzocht is, volgt een vergelijking tussen het referentiemodel en een variant waarbij alle actualisaties tot en met 2017^{6.2} geïmplementeerd zijn. De Baseline-variant voor het jaar 2017 zal naast de maatregelen van bodemverandering, vegetatie en ruimtelijke ingrepen ook andere maatregelen bevatten met betrekking tot het rivierengebied tussen Zutphen en de Ketelbrug (bijlage D.9 tabel D.8). Zo worden veranderingen na 2010 van bijvoorbeeld de IJssel bij Zutphen en van het Twentekanaal (zijtak IJssel) ook meegenomen. Op deze manier kunnen wederom met dezelfde invoer voor het WAQUA-model datapunten verkregen worden voor een vergelijking met het referentiemodel. Zo zal onder meer duidelijk worden wat de bijdrage is van bodemverandering, vegetatie en de ruimtelijke ingrepen op de verschillen tussen het referentiemodel en de variant-2017. Daarnaast helpt het om een totaal beeld te krijgen van de verschillen tussen zowel het referentiemodel en de variant-2017, maar ook de verschillen van deze varianten met de Qh-relatie 2010. De Qh-relatie 2010 is immers gebaseerd op metingen en getransformeerde WAQUA-resultaten. Tevens wordt de berekening in het WAQUA-model voor de variant-2017 uitgevoerd waarbij wederom de hoogwatergeul bij alle waterstanden openstaat. Er is voor gekozen om de datapunten van de 2017-variant niet te corrigeren voor een gesloten hoogwatergeul, omdat nog niet duidelijk is welke effecten er optreden bij de opening van de hoogwatergeul Veessen-Wapenveld. Net als het referentiemodel worden de datapunten voor de variant 2017 lineair gefit.

Bij dezelfde afvoeren treden er significante verschillen op tussen de variant-2017, Qh-relatie 2010 en het referentiemodel (figuur 6.6). Deze verschillen zijn voornamelijk aanwezig bij hogere afvoeren ($> 750 \text{ m}^3/\text{s}$). De relatieve waterstandsverschillen tussen de 2017-variant en het referentiemodel variëren tussen de $-9,1\%$ en $-0,32\%$. Dit betekent dat er in de 2017-variant beduidend lagere waterstanden berekend worden bij dezelfde afvoeren. Deze verschillen komen overeen met het verloop van de relatieve waterstandsverschillen (bijlage D.9 figuur D.21). Daarnaast zijn er ook aanzienlijke verschillen tussen de variant-2017 en Qh-relatie 2010. Zo geeft bij overeenkomende afvoeren in het hoge bereik de Qh-relatie 2010 hogere waterstanden dan de variant-2017 (bijlage D.9 figuur D.21). Desalniettemin berekent de Qh-relatie 2010 in het lage bereik lagere waterstanden dan de variant-2017.



Figuur 6.6: Datapunten referentiemodel, variant-2017 en Qh-kromme 2010

Andersom leiden lagere waterstanden bij variant-2017 tot hogere afvoeren bij de variant-2017 dan bij het lineair gefitte referentiemodel (bijlage D.9 figuren D.22 en D.23). De relatieve afvoerverschillen tussen het referentiemodel en de variant-2017 variëren tussen de $0,56\%$ en $37,06\%$ (tabel 6.6). In absolute waarden variëren de verschillen tussen het referentiemodel en de variant-2017 $1,57 \text{ m}^3/\text{s}$ en $877,61 \text{ m}^3/\text{s}$. Daarnaast zijn de relatieve en absolute afvoerverschillen in het

^{6.2}Gekozen is voor 2017, omdat Rijkswaterstaat Oost-Nederland nog geen beschikking heeft over een Baseline-variant van het jaar 2018.

hoge bereik (waterstand > 500 cm) tussen de variant-2017 en Qh-relatie 2010 beduidend groter dan de verschillen tussen de variant-2017 en het referentiemodel (tabel 6.7 en bijlage D.9 figuren D.22 en D.23). In het lage en midden bereik geeft de Qh-relatie 2010 relatief lagere afvoeren dan variant-2017. In absolute waarden zijn deze verschillen tussen de Qh-relatie 2010 en variant-2017 echter significant kleiner dan de verschillen die optreden in het hogere bereik. De grote verschillen ontstaan voornamelijk door invloed van de hoogwatergeul Veessen-Wapenveld (bijlage D.9 figuren D.24) en 6.7 en bijlage D.9 tabellen D.9 en D.10).

Tabel 6.6: Verschillen referentiemodel en variant-2017

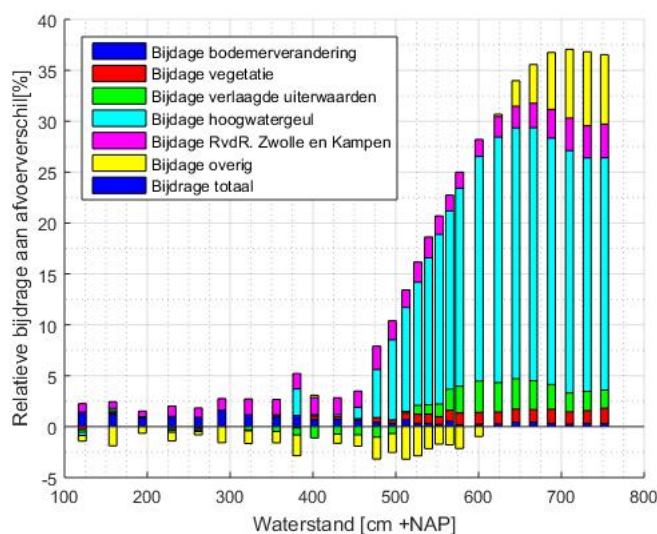
	Totaal bereik	Laag bereik	Midden bereik	Hoog bereik
Relatief waterstandsverschil [%]	[-9,1, -0,32]	[-0,43, -0,32]	[-1,88, -0,41]	[-9,1, -2,35]
Relatief afvoerverschil [%]	[0,56, 37,06]	[0,56, 0,86]	[1,04, 7,87]	[10,24, 37,06]
Absoluut afvoerverschil [m^3/s]	[1,57, 877,62]	[1,57, 2,83]	[4,43, 78,76]	[109,58, 877,62]

Rel.=Relatief en Abs.=Absoluut

Tabel 6.7: Verschillen Qh-relatie 2010 en variant-2017

	Totaal bereik	Laag bereik	Midden bereik	Hoog bereik
Rel. waterstandsverschil [%]	[-10,84, 4,88]	[0,73, 4,88]	[-5,58, -1,88]	[-10,84, -6,42]
Rel. afvoerverschil [%]	[-8,64, 70,62]	[-8,64, -1,35]	[-3,81, 18,96]	[23,89, 70,62]
Abs. afvoerverschil [m^3/s]	[-22,85, 1289,51]	[-17,03, -4,51]	[-22,85, 172,11]	[227,58, 1289,51]

Rel.=Relatief en Abs.=Absoluut



Figuur 6.7: Relatieve bijdrage factoren aan afvoerverschil

6.8 Correctie voor niet-permanentie

Momentane afvoeren kunnen gecorrigeerd worden voor niet-permanente stromingsomstandigheden volgens de Jones-correctie (Dottori e.a., 2009). Hierbij wordt onder meer de stationaire Qh-relatie vermenigvuldigd met de Jones-correctie. Een bepalende parameter daarbij is de term S_{ec} . Om meer inzicht te verkrijgen in het gedrag van deze term is wederom een WAQUA-simulatie nodig, waarbij als randvoorwaarde is uitgegaan van extreem lage afvoeren tot aan extreem hoge afvoeren. De bovenstroomse en benedenstroomse randlocatie is respectievelijk Zutphen en ketelbrug.

Om een goede vergelijking te maken met de Qh-relatie 2010 en een Qf-relatie met correctie voor niet-permanentie, wordt de Qh-relatie 2010 met afvoermetingen tussen 1986 en 2018 het referentiemodel. Deze wordt vergeleken met de Qf-relatie waarbij de metingen gecorrigeerd zijn.

Zo moet inzicht worden verkregen in het effect van het implementeren van de Jones-correctie op de afvoeren die gemeten zijn in de periode tussen 1986 en 2018. Daarnaast zullen sterk afwijkende afvoermetingen ook gebruikt worden in de gevoeligheidsanalyse. Op deze manier zal onder meer duidelijk worden wat de grootte van de Jones-correctie kan zijn voor sterk afwijkende metingen. Voor het corrigeren van meetresultaten zullen S_e , c en $\frac{dh}{dt}$ bepaald worden.

6.8.1 Energieverhang

Het energieverhang is het verschil in energieniveau ΔH over een afstand Δx (vergelijking 6.1). Het energieniveau is vervolgens te bepalen met de wet van Bernoulli (vergelijking 6.2). De wet van Bernoulli is een vereenvoudiging van de wet van behoud van energie en kan gezien worden als de wet van behoud van de energiedichtheid langs een stroomlijn voor stationaire stromingen waarbij viskeuze krachten verwaarloosd worden en de dichtheid constant blijft (Wikipedia, 2016).

$$S_e = \frac{\Delta H}{\Delta x} \quad (6.1)$$

$$\frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh + p = \text{constant} \quad (6.2)$$

In vergelijking 6.2 is ρ de massadichtheid, v de snelheid, g de valversnelling, h het hoogteverschil en p de druk. De wet van Bernoulli kan omgeschreven worden naar lengte-eenheden wat het totale energieniveau H van een stromende vloeistof oplevert (vergelijking 6.3) (Wikipedia, 2016).

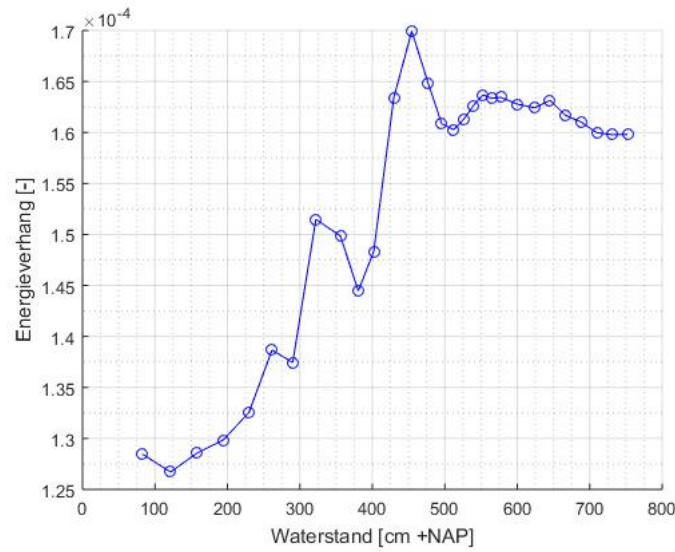
$$H = \frac{v^2}{g} + h + \frac{p}{\rho g} \quad (6.3)$$

Omdat het energieverhang het verschil in energieniveau is over een afstand, is het noodzakelijk om het energieniveau te bepalen voor een bovenstrooms (H_1) en benedenstrooms (H_2) punt bij Olst (vergelijking 6.4). Er is gekozen voor een onderlinge afstand (Δx) van 2 kilometer tussen het boven-en benedenstroomse punt. Dit omdat voor de correctie voor niet-permanente stroming bij het splitsingspunt Lobith ook gekozen is voor een afstand van 2 kilometer (Wijbenga e.a., 2009). Voor de bovenstroomse en benedenstroomse locatie zijn respectievelijk rivierkilometers 957 en 959 genomen.

$$\Delta H = \frac{v_2^2 - v_1^2}{g} + h_2 - h_1 \quad (6.4)$$

Om het verschil in energieniveau te bepalen, moet het verschil in snelheid en waterdiepte tussen de boven-en benedenstroomse locatie bekend zijn (vergelijking 6.4). Aan de hand van de getrapte WAQUA-berekening voor het referentiemodel (afvoerbereik: $180m^3/s - 3280m^3/s$) is het mogelijk om de snelheden en waterstanden (ten opzichte van NAP) te verkrijgen voor permanente stromingsomstandigheden. Waterdieptes kunnen bepaald worden door de bodemhoogten van de boven-en benedenstroomse locaties van de waterstanden af te trekken. Het energieverhang is uiteindelijk net als de waterstand en afvoer voor het referentiemodel steeds bepaald aan het eind van een periode met constante afvoer. In andere woorden, voor de verhoging van de afvoer. Daarnaast is het energieverhang bepaald in de as van de rivier.

Het energieverhang voor het splitsingspunt Olst neemt toe bij oplopende waterstanden (figuur 6.8). Omdat het afvoerbereik reikt van een extreem lage afvoer ($Q_{Olst} = 180m^3/s$) tot aan extreem hoge afvoer ($Q_{Olst} = 3280m^3/s$) is er geen extrapolatie nodig. Verder geven de symbolen (rondjes) in figuur 6.8 de permanente situatie weer (afvoer en waterstand constant).



Figuur 6.8: Energieverhang voor permanentie ter plaatse van Olst

6.8.2 Voortplantingssnelheid

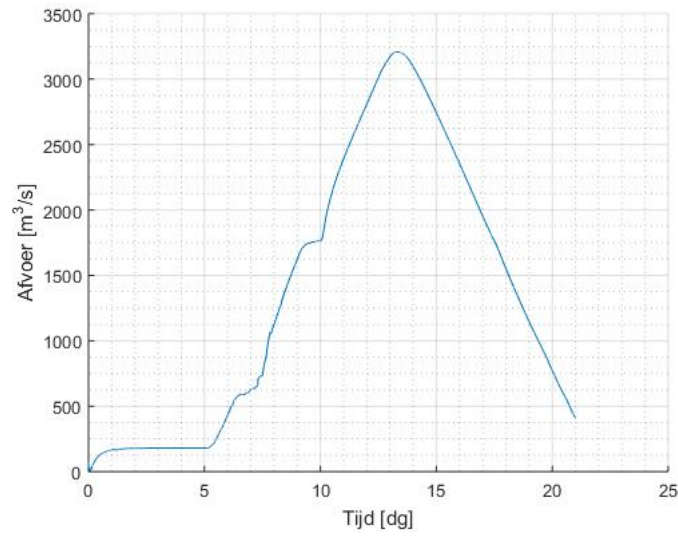
De voortplantingssnelheid van een afvoergolf is de verandering in de afvoer dQ over de verandering van het natte oppervlak van de rivier dA (vergelijking 6.5). Voor het natte oppervlak kan aangenomen worden dat deze gelijk is aan een natte breedte B vermenigvuldigd met een verandering in de waterstand dh (Wijbenga e.a., 2009; Ogink & Stolker, 2004).

$$c = \frac{dQ}{dA} \approx \frac{1}{B} \frac{dQ}{dh} \quad (6.5)$$

Bij gebruik van WAQUA voor het in 2D bepalen van stromingsomstandigheden kan door het definiëren van dwarsraaien de waterstand en afvoer opgeslagen worden tijdens de berekening. Zo is op iedere tijdstap van de berekening de verandering van de afvoer en waterstand eenvoudig te bepalen. Echter is de verandering in het natte oppervlak geen grootheid die berekend kan worden door WAQUA. Zo is het toepassen van WAQUA voor het bepalen van de voortplantingssnelheid minder geschikt dan bij de bepaling van het energieverhang. Met WAQUA kan de natte breedte ter plaatse van het meetpunt bepaald worden door het aantal natte cellen op te vragen. Echter is de verwachting dat de natte breedte bij uitzondering een roosterlijn van het WAQUA-model zal volgen. Er moet dus een keuze gemaakt worden om de natte breedte te bepalen op basis van de originele gegevens uit BASELINE of het WAQUA-model.

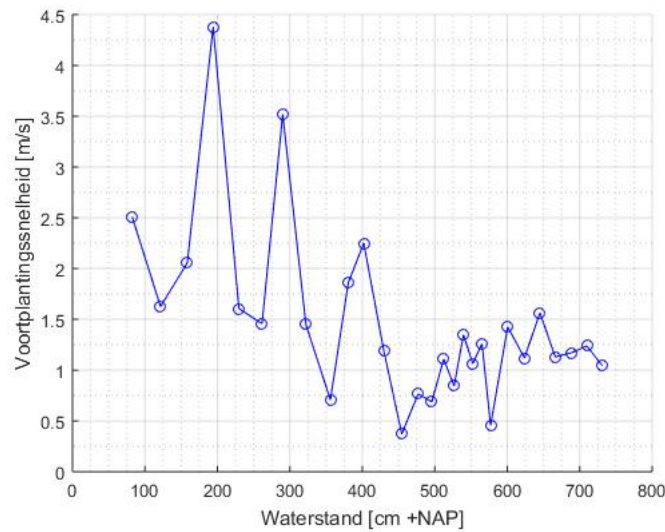
Een tweede mogelijkheid is om een SOBEK-model te gebruiken om de natte breedte corresponderend met een waterstand te bepalen. Dit betekent dat er naast een WAQUA-model voor het referentiemodel ook een SOBEK-model gebouwd moet worden. Vanwege beperkingen in tijd is overwogen om als toevoeging geen SOBEK-berekeningen uit te voeren. Kortom, de bepaling van de voortplantingssnelheid voor de correctie voor niet-permanente stromingsomstandigheden is gebaseerd op alleen de WAQUA-berekening. Daarbij zal ter consistentie de natte breedte bepaald worden aan de hand van het WAQUA-rooster en niet uit de originele BASELINE-gegevens.

Het afvoerbereik voor de bepaling van de voortplantingssnelheid is net als voor de bepaling van het energieverhang $180\text{m}^3/\text{s} - 3280\text{m}^3/\text{s}$. Echter kan voor de afvoergolf niet dezelfde invoer gebruikt worden als voor de getrapte WAQUA-berekening (bijlage D.10 tabel D.11). Voor de afvoergolf geldt wederom een opwarm-periode aanwezig van 5 dagen, waarna geen permanente situaties aanwezig zijn (figuur 6.9). De hoogwatergolf eindigt na 21 dagen. Tussen de tijdseenheden worden afvoeren wederom opgeschaald.



Figuur 6.9: Afvoergolf op de instroomrand bij Zutphen

Voor elke afvoer is met de getrapte permanenties in figuur 6.1 een waterstand te bepalen. Andersom kan voor de bepaalde waterstanden voor het energieverhang de afvoergradiënt als functie van de waterstand ($\frac{dQ}{dh}$) bepaald worden. Zo kunnen voor alle waterstanden waarbij permanente stromingsomstandigheden gelden de term S_{ec} bepaald worden (figuur 6.10).

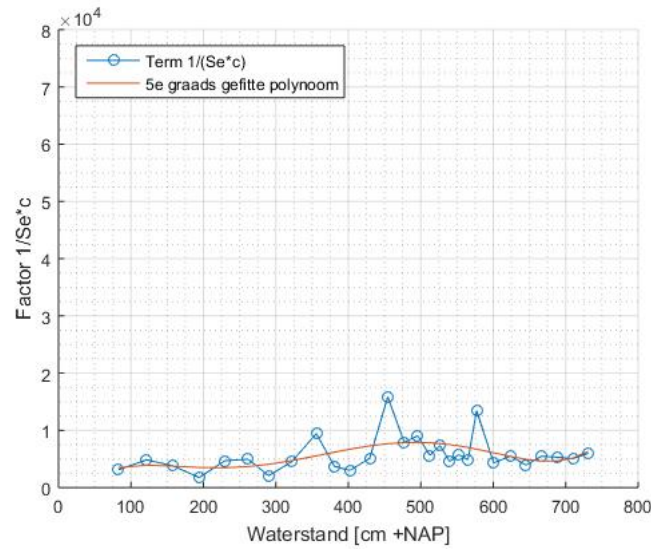


Figuur 6.10: Voortplantingssnelheid ter plaatse van Olst

6.8.3 Term energieverhang en voortplantingssnelheid

De term $\frac{1}{S_{ec}}$ is te bepalen door het energieverhang en de voortplantingssnelheid met elkaar te vermenigvuldigen corresponderend met dezelfde waterstand. Om het verloop van de term $\frac{1}{S_{ec}}$ te kunnen toepassen in de correctie voor niet-permanente afvoer is een 5^e graadspolynoom gefit (figuur 6.11). Vergelijking 6.6 geeft de gedaante van deze polynoom weer, waarin p_1 tot en met p_6 de correctiecoëfficiënten voor niet permanente stromingsomstandigheden zijn en h de waterstand. De waarden van deze correctiecoëfficiënten lopen van kleine waarden op naar grotere waarden (tabel 6.8).

$$\frac{1}{S_{ec}} = p_1 h^5 + p_2 h^4 + p_3 h^3 + p_4 h^2 + p_5 h + p_6 \quad (6.6)$$



Figuur 6.11: $\frac{1}{S_{e^c}}$ voor niet-permanentie ter plaatse van Olst

Tabel 6.8: Correctiecoëfficiënten voor niet-permanentie

Correctiecoëfficiënt	Waarde
p_1	3,69246e-09
p_2	-6,96826e-06
p_3	0,00467
p_4	-1,33661
p_5	164,32900
p_6	-3274,02185

6.8.4 Tijdsafgeleide waterstand

Om de afvoermetingen tussen 1986 en 2018 te corrigeren is naast de term S_{e^c} ook de tijdsafgeleide van de gemeten waterstanden $\frac{dh}{dt}$ benodigd. Bij de meetlocatie Olst zijn waterstandsmetingen van ieder uur bekend tussen de periode 1 januari 1968 00:00:00 uur en 25 november 2013 23:00:00 uur. Vanaf 26 november 2013 00:00:00 tot en met 1 maart 2018 23:50:00 uur zijn er metingen geleverd voor elke 10 minuten. De waterstanden zijn met een nauwkeurigheid van 1 centimeter bepaald. De tijdsafgeleide wordt berekend door het verschil in waterstand te delen door het tijdsverschil (vergelijking 6.7).

$$\frac{dh}{dt} = \frac{h(t) - h(t - \Delta t)}{\Delta t} \quad (6.7)$$

In vergelijking 6.7 is h de waterstand, t de tijd en Δt het tijdsinterval tussen de metingen. Tijdens hoogwater veranderen waterstanden tamelijk langzaam (orde cm's/uur). Daarnaast is het tijdsinterval tussen twee opeenvolgende metingen vanaf 26 november 2013 00:00:00 uur 10 minuten. Deze tijdsintervallen en kleine veranderingen in waterstand kunnen grote variaties veroorzaken in tijdsafgeleide van de waterstand. Tijdens het implementeren van de correctie voor niet-permanente afvoeren voor Lobith is verondersteld dat de tijdsafgeleide van de waterstand goed bepaald wordt indien een tijdsinterval gebruikt wordt van vier uur (Wijbenga e.a., 2009). Voor het toedienen van Jones-correctie is daarom gekozen voor een tijdsinterval van vier uur, zodat ook bij Olst kleine variaties in de tijdsafgeleide van de waterstand overblijven.

Omdat de gevoeligheid van het hysteresis-effect getoetst wordt aan de hand van de toegeleverde afvoermetingen, wordt alleen voor de waterstanden corresponderend met de afvoermetingen de tijdsafgeleide waterstand bepaald. Zo worden deze waterstanden (eventueel met looptijdcorrectie) vergeleken met de waterstanden van vier uur geleden. Echter is de toegeleverde dataset met waterstandsmetingen bij Olst tussen de periode 1 januari 1986 en 1 maart 2018 incompleet. Er zijn tijdstippen waarop de waterstand niet bekend is. Het interpoleren van datapunten behoort tot een

optie. Dit is echter niet gedaan, omdat het sporadisch voorkomt dat er datapunten niet beschikbaar zijn binnen een interval van circa 20 dagen. Voor 2 waterstandsmetingen corresponderend met afvoermetingen is het niet mogelijk om de tijdsafgeleide van de waterstand te berekenen. De tijdstippen waarop de tijdsafgeleide van de waterstand niet te berekenen zijn:

1. 8-2-2017 14:00:00 uur
2. 24-2-2017 12:00:00 uur

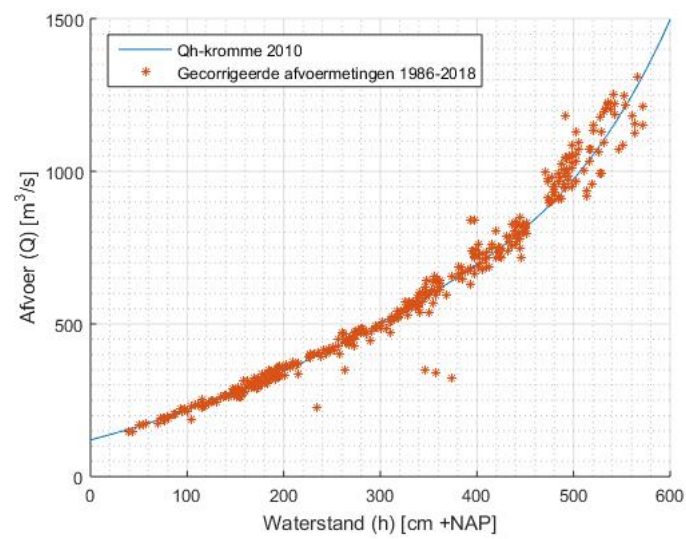
Verder zijn de te gebruiken waterstandsmetingen van vier uur geleden gecontroleerd op uitschieters in de waterstand. Dit is gedaan ter verificatie van waterstandsmetingen bij Olst. Daarnaast bevat de dataset met waterstanden (bij Olst) een kwaliteitsoordeel en een statuswaarde. Ook deze zijn opgenomen in de afweging of metingen van de waterstand representatief zijn. Na afloop is geconstateerd dat slechts de bovenstaande twee meettijdstippen niet gecorrigeerd worden voor niet-permanentie. Kortom, de overige toegeleverde afvoermetingen zullen gecorrigeerd worden voor niet-permanentie, omdat voor deze metingen de tijdsafgeleide van de waterstand goed bepaald kan worden voor een tijdsinterval van vier uur.

6.8.5 Afvoercorrectie voor niet-permanentie

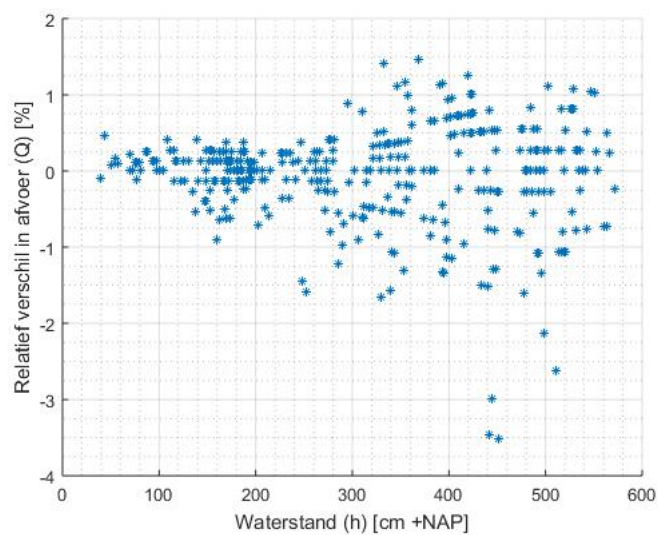
Nu inzicht is verkregen in het verloop van de term S_{ec} en tijdsafgeleide van de waterstand $\frac{dh}{dt}$ kunnen de afvoermetingen voor Olst gecorrigeerd worden met de Jones-correctie. Het doel van de correctie is om na te gaan of door het implementeren van de Jones-correctie de afvoermetingen zich dichterbij de Qh-kromme voor permanente stromingsomstandigheden zullen bevinden. Om de gemeten afvoeren te corrigeren moeten deze gedeeld worden door de correctie volgens Jones (vergelijking 6.8). Deze correctie moet overeenkomen met het tijdstip en de gemeten waterstand van de afvoermeting.

$$Q = \frac{Q_o}{\sqrt{1 + \frac{1}{S_{ec}} \frac{dh}{dt}}} \quad (6.8)$$

Het corrigeren van afvoermetingen met de Jones-correctie lijkt niet dusdanig te zijn dat de metingen op de Qh-kromme 2010 terecht komen (figuur 6.12). Het effect van het toevoegen van de Jones-correctie aan de huidige Qh-relatie geeft nagenoeg dezelfde afvoeren als de afvoermetingen (figuur 6.12). Zodoende schijnt het corrigeren van afvoermetingen met de Jones-correctie niet dusdanig te zijn dat de metingen op de Qh-kromme 2010 terecht komen. Het relatieve verschil is voor meerendeel van de uitgevoerde correcties namelijk minder dan $\pm 2\%$ (figuur 6.13). Tevens zijn de absolute afvoerverschillen tussen de gecorrigeerde en niet-gecorrigeerde afvoeren tamelijk klein (bijlage D.11 figuur D.25). Andersom zijn de relatieve en absolute verschillen tussen de Qh-kromme en afvoermetingen (na correctie) onveranderd groot (bijlage D.11 figuren D.26 en D.27). Wanneer de Qf-relatie met correctie voor niet-permanentie operationeel gebruikt zou zijn, zouden de afvoerbepalingen bij een sterke invloed van hysteresis aanzienlijk gecorrigeerd moeten worden. Echter worden ook afvoeren geldend voor permanente stromingsomstandigheden nauwelijks gecorrigeerd (bijlage D.11 figuur D.28). Overigens kan de correctie voor niet-permanente stromingsomstandigheden zowel positief als negatief kan zijn (figuur 6.13). Dit komt omdat de Jones-correctie afhankelijk is van de gradiënt van de tijdsafgeleide in de waterstand. Zo kunnen afvoermetingen die zich onder de Qh-kromme 2010 bevinden gecorrigeerd worden naar boven. Dit geldt andersom ook voor de afvoermetingen die zich boven de kromme bevinden. Ten slotte verschillen de RVE-waarden voor zowel de gecorrigeerde als niet-gecorrigeerde afvoeren ten opzichte van de Qh-kromme 2010 niet (tabel 6.9). Tevens is op te merken dat voor beide gevallen de RVE-waarde acceptabel is. Echter moet rekening gehouden worden met dat afvoermetingen elkaar dusdanig corrigeren. Kortom, afvoeren volgens de niet-stationaire Qf-relatie verschillen weinig met de afvoeren van Qh-relatie 2010.



Figuur 6.12: Afvoermetingen Olst na correcties voor niet-permanentie



Figuur 6.13: Relatieve groottes van correcties ten opzichte van afvoermetingen

Tabel 6.9: RVE-waarden met (niet-)gecorrigeerde afvoeren

RVE \ Bereik [m^3/s]	$Q \leq 1305$	$Q \leq 435$	$435 < Q \leq 1305$	$870 < Q \leq 1305$
Gecorrigeerde afvoeren	-0,7%	2,6%	-1,6	-2,7%
Niet-gecorrigeerde afvoeren	-0,7%	2,6%	-1,6	-2,7%

7 Toepassing hoogwater 2018

Met de inzichten die zijn verkregen uit de gevoeligheidsanalyse, geeft sectie 7 mogelijke verklaringen voor de verschillen tussen de gemeten en bepaalde afvoeren tijdens het hoogwater in januari 2018. Van dit hoogwater zijn vijf metingen beschikbaar. Om de verschillen tussen Qh-relatie 2010 en de afvoermetingen van januari 2018 te verklaren, worden de afvoerverschillen door bodemverandering, vegetatie, uiterwaarden Olst en Ruimte voor de Rivier Zwolle en Kampen toegevoegd aan de bepaalde afvoeren tijdens het hoogwater in januari 2018. Daarbij is gebruik gemaakt van een geïnterpoleerde fit tussen de datapunten van de afvoeren en waterstanden van de varianten van bodemverandering, vegetatie en de hierboven beschreven ruimtelijke ingrepen. Zo kunnen voor meerdere waterstanden de afvoerverschillen bepaald worden in plaats van voor de 29 berekende afvoerniveaus. Ook worden de afvoerverschillen door het hysteresis-effect (D.9 tabel D.25) opgeteld bij de verwachte afvoeren in januari 2018. Op deze manier worden de onderzochte factoren in de gevoeligheidsanalyse afzonderlijk meegenomen voor de verklaring van de opgetreden systematische fout in januari 2018. Daarnaast wordt ook het verschil tussen het referentiemodel 2010 en Qh-relatie 2010 meegenomen. Zo kan duidelijk worden in hoeverre het gebruik van het vernieuwde WAQUA-model invloed heeft op de afvoerbepaling.

De verschillen tussen de afvoermetingen en bepalingen tijdens het hoogwater in januari 2018 bleek circa $100 \text{ m}^3/\text{s}$ te zijn, met als grootste verschil $117,1 \text{ m}^3/\text{s}$ (tabel 7.1). Met behulp van de gevoeligheidsanalyse lijken de Ruimte voor de Rivier ingrepen bij Zwolle en Kampen enigszins een bijdrage te hebben geleverd aan de opgetreden afvoerverschillen (tabel 7.2). Daarnaast lijkt het hysteresis-effect, samen met de bodemverandering en vegetatie een geringe invloed te hebben gehad (tabel 7.2). Het gebruik van een vernieuwd WAQUA-model schijnt echter de verschillen tussen de afvoermetingen en bepaalde afvoeren het meest te verklaren (tabel 7.2). Zodoende is het verschil tussen de Qh-relatie 2010 en afvoermetingen grotendeels te verklaren. Desalniettemin kan opgemerkt worden dat de totale bijdrage (tabel 7.2) groter is dan de opgetreden afvoerverschillen (tabel 7.1). Een mogelijke verklaring hiervoor is dat invloeden van het hysteresis-effect, de bodemverandering, vegetatie en ruimtelijke ingrepen in werkelijkheid in combinatie plaatsvinden in plaats van afzonderlijk, waar in deze analyse vanuit is gegaan. Bovendien kunnen er andere factoren zijn die net als de verlaagde uiterwaarden bij Olst zorgen voor een negatief afvoerverschil bij de voorgekomen waterstanden in januari 2018.

Tabel 7.1: Verschil afvoermetingen en bepalingen januari 2018

h	Afvoermeting	Qh-relatie 2010	Verschil
478	984	898,2	85,8
487	1028	928,0	100
493	1046	948,9	97,1
498	1084	966,9	117,1
491	1040	941,8	98,2

h=waterstand [cm]

Tabel 7.2: Bijdrage aan afvoerverschil

h	Hyst.	Bodem.	Veg.	Uitw.-Olst	RvdR. Z-K	Ref2010	Totale bijdrage
478	2,7	5,1	5,0	-9,3	24,4	87,2	115,1
487	5,6	4,3	4,2	-8,6	21,4	105,2	132,1
493	2,9	3,7	3,7	-7,4	20,4	116,2	139,5
498	0,0	4,8	4,8	-6,8	21,7	126,5	150,9
491	-5,7	3,9	3,9	-7,8	20,1	112,6	127,0

h=waterstand [cm], Bodem.=Bodemverandering, Veg.=Vegetatie, Uitw.-Olst=Verlaagde uiterwaarden Olst, RvdR. Z-K=RvdR. Zwolle en Kampen en Ref2010=Referentiemodel 2010

8 Conclusie

Dit rapport doet onderzoek naar de afvoerbepaling van IJssel bij Olst. Zo is de huidige Qh-relatie geëvalueerd en is gekeken of de implementatie van diverse factoren significante verschillen teweegbrengen. Ten eerste is inzicht verkregen in de huidige relatie om afvoeren te bepalen. Deze relatie wijkt in het hoge bereik (vanaf 500 cm) af van het referentiemodel 2010 en de concept Qh-relatie 2013. Na een waterstand van 500 cm geeft de Qh-kromme 2010 namelijk lagere afvoeren. Een mogelijke verklaring is het gebruik van vernieuwde WAQUA-berekeningen. Bij het ontwerp van de Qh-relatie 2010 moesten immers de WAQUA-resultaten getransformeerd na een slechte fit. Daarnaast lijkt de concept Qh-relatie 2013 hoge afvoeren te geven door het gebruik van 3 machtsfuncties (stroken) in plaats van 2, zoals bij de Qh-relatie 2010. Zodoende lijken de verschillen tussen de afvoermetingen-en bepalingen, bij afvoergroottes die gemeten zijn in januari 2018, enigszins te liggen aan het aangevulde hoge bereik met de getransformeerde WAQUA-resultaten en het gebruik van 2 stroken.

Ten tweede is de Qh-relatie 2010 geëvalueerd met afvoermetingen na 2010. Zo is duidelijk geworden wat de kwaliteit is van de Qh-relatie 2010 in verschillende afvoerbereiken. Wat opviel is dat er relatief weinig fouten optreden bij lage afvoerbereiken, terwijl bij hoge afvoerbereiken significante verschillen aanwezig zijn tussen de afvoermetingen-en bepalingen. Sterker nog, de Qh-relatie 2010 geeft in het hoge bereik lagere afvoeren dan daadwerkelijk het geval is. Zodoende kan afgevraagd worden of de Qh-relatie 2013 geen verbetering is voor de nauwkeurigheid van de afvoerbepaling in het hoger bereik. De Qh-relatie 2013 levert immers hogere afvoeren op in een hoog bereik dan de Qh-relatie 2010. Daarnaast viel op dat bij oplopende waterstanden en afvoeren er grotere verschillen optreden tussen afvoermetingen-en bepalingen (puntwolk). Dit effect was ook terug te zien bij de afvoermetingen tussen 1986 en 2010.

In het onderzoek naar afvoerbepaling is ten derde nagedacht over eventuele gevoeligheden van afvoerbepalingen voor diverse factoren. Zo is het rivierengebied ingrijpend veranderend na 2010. De vergelijking tussen het referentiemodel en de variant met bodemverandering toonde aan dat bodemverandering een zeer kleine invloed heeft op de afvoerbepaling. Veranderingen in het rivierengebied door het Stroomlijn programma, de verlaagde uiterwaarden bij Olst en Ruimte voor de Rivier projecten bij Zwolle en Kampen hebben allen aangetoond enigszins invloed te hebben op de afvoerbepaling in het hoge bereik. Bovendien volgen uit WAQUA-simulaties herhaaldelijk hogere afvoeren na toevoeging van maatregelen omtrent de bovenstaande veranderingen. In werkelijkheid treden deze factoren uiteraard in combinatie op, in plaats van afzonderlijk. Zodoende lijken de opgetreden verschillen tussen de afvoermetingen-en bepalingen van januari 2018 voor een deel veroorzaakt te zijn door een combinatie van de bovenstaande vier factoren. Al met al kan geconcludeerd worden dat met een nieuwe Qh/Qf-relatie gebaseerd op een aanvulling van WAQUA-resultaten (nieuw WAQUA-model), 3 stroken en nieuwe afvoermetingen met betrekking tot het huidige rivierengebied, er minder systematische fouten in afvoerbepalingen optreden.

Tevens viel op dat de hoogwatergeul Veessen-Wapenveld bij opening een significante impact heeft op de afvoerbepaling. Zo is bij de variant met de hoogwatergeul terug te zien dat er lagere waterstanden optraden bij dezelfde afvoer dan bij het referentiemodel. Andersom betekende dit een hogere afvoer bij dezelfde waterstand. Echter moet opgemerkt worden dat de variant met de hoogwatergeul ten allen tijden van de WAQUA-simulatie in gebruik is. Zodoende is dus niet duidelijk welk effect er optreedt bij een de opening van de geul bij 5,85m +NAP. Desalniettemin kan geconcludeerd worden dat de afvoerbepaling zeer gevoelig is voor de in gebruik genomen hoogwatergeul.

Het corrigeren van afvoermetingen bij Olst voor niet-permanente stroming met de Jones-correctie bleek daarentegen weinig invloed te hebben op de nauwkeurigheid van de afvoerbepaling. Verschillen tussen afvoermetingen-en bepalingen in het hoge bereik bleven zo nagenoeg hetzelfde. Dit resultaat is ook terug te zien bij de Qf-relatie bij Lobith. De combinatie tussen de verschillen in waterstanden en de term met de voortplantingssnelheid en energieverhang leidden dus niet tot een beduidende correctie. Opgemerkt moet worden dat de natte breedte op een accuratere manier bepaald kan worden in plaats van met een WAQUA-berekening. Desalniettemin wordt verwacht dat dit weinig invloed heeft, waardoor geconcludeerd kan worden dat de afvoerbepaling niet gevoelig is voor niet-permanente stromingsomstandigheden en dat hysteresis-effecten geen invloeden hebben gehad op de afvoerverschillen in januari 2018.

9 Discussie

In het onderzoek naar de huidige afvoerbepaling is naar voren gekomen dat er naast de operationeel gebruikte Qh-relatie 2010 ook een concept Qh-relatie in 2013 is ontworpen. De relatie uit 2013 is in tegenstelling tot de Qh-relatie 2010, opgesteld met een vernieuwd WAQUA-model. Bij het ontwerp van de Qh-relatie 2010 zijn immers de WAQUA-resultaten getransformeerd na een slechte fit. Door het nieuwe WAQUA-model sloten de WAQUA-resultaten bij het ontwerp van de Qh-relatie 2013 daarentegen wel goed aan. Daarnaast bestaat de Qh-relatie 2013 uit drie machtsfuncties in plaats van twee zoals bij de Qh-relatie 2010. Door middel van het vernieuwde WAQUA-model en de drie machtsfuncties lijkt de relatie uit 2013 afvoeren rond de afvoergroottes van januari 2018 beter te bepalen dan de Qh-relatie 2010. Echter is niet duidelijk om welke redenen de Qh-relatie 2013 niet operationeel gebruikt wordt. Advies is om na te gaan waarom deze de Qh-relatie 2013 niet operationeel gebruikt wordt. Echter voldoet ook deze relatie niet aan het huidige rivierengebied.

Ten tweede is uit het onderzoek naar voren gekomen dat de afvoermetingen tussen 1986 en 2010 in het hoge bereik zich zowel boven als onder de Qh-relatie 2010 bevinden in tegenstelling tot de afvoermetingen na 2010. Het verschil tussen de metingen voor en na 2010 is dat er voor 2010 ook hoge afvoermetingen waren die lager zijn dan de Qh-relatie 2010. Daarnaast viel te zien dat er bij oplopende waterstanden een wolk aan datapunten ontstaat wanneer de afvoermetingen tussen 1986 en 2010 geplot worden. Echter kan gevraagd worden of het zinvol is om deze meetbereiken met elkaar te vergelijken. Zo gelden afvoermetingen van 1986 immers voor de rivierkarakteristieken van de riviertoestand in 1986. Om conclusies te trekken over overeenkomsten tussen beide meetbereiken is het daarom zinvol om de metingen tussen 1986 en 2010 te homogeniseren voor het huidige rivierengebied. Zodoende kan duidelijk worden of ook dan significant lagere afvoeren worden bepaald dan feitelijk het geval is.

Ten derde is tot op heden de oorzaak van de puntenwolk aan datapunten onduidelijk. Het hysteresis-effect bleek onder meer geen verklaring te zijn voor de optredende afwijkingen in het hoge bereik. Raadzaam is om te onderzoeken welke processen de afwijkingen kunnen verklaren en of deze meegenomen kunnen worden in de afvoerbepaling. Zo zou gevraagd kunnen worden of duinvorming op de rivierbodem de afvoeren dusdanig beïnvloed. Daarnaast kan een onderzoek naar de meetfouten meer inzicht geven in de mogelijke verschillen tussen afvoermetingen-en bepalingen. Het hoeft tenslotte niet te zo te zijn dat slechts de afvoerbepalingen de oorzaak zijn van de systematische fouten die onder meer hebben opgetreden tijdens het hoogwater in januari 2018.

In de gevoeligheidsanalyse is naar voren gekomen dat de afvoerbepaling enigszins beïnvloed werd door de Ruimte voor de Rivier projecten. Echter is het belangrijk om ook onderzoek te doen naar de gevoeligheid van de afvoerbepaling voor de aanleg van het Reevediep. Verwacht wordt dat wanneer het project Reevediep afgerond is (2022), het een invloedrijke rol zal hebben op de afvoeren bij Olst. Het resultaat zou een eventuele verklaring kunnen geven voor toekomstige afvoerverschillen bij Olst door gebruik van het Reevediep.

Tevens is duidelijk geworden dat de afvoerbepaling zeer gevoelig is voor de hoogwatergeul Veessen-Wapenveld. Niettemin is er weinig bekend over de invloed van de opening van de geul op de Qh-relatie. Zo zal binnen een korte tijdperiode de waterstand sterk dalen met wellicht hysteresis-effecten als gevolg. Het is daarom raadzaam om verdere onderzoek te doen naar de nodige effecten die zullen optreden na opening van de geul. Dit kan onder meer gedaan worden door WAQUA-berekeningen uit te voeren met en zonder de hoogwatergeul Veessen-Wapenveld. De variant zonder de hoogwatergeul zou een invoer kunnen hebben tot en met een waterstand van $5,65m +NAP$ bij Veessen, terwijl de variant met hoogwatergeul zou kunnen beginnen met een invoer die begint bij $5,65m +NAP$ bij Veessen. Echter kan het zinvoller zijn om SOBEK-berekeningen uit te voeren, omdat deze minder tijd in beslag nemen en zo meerdere malen herhaald kunnen worden. Op deze manier zouden diverse scenario's uitgewerkt kunnen worden, waarbij een goed beeld kan ontstaan over welke effecten er plaatsvinden. Wanneer dit beeld bekend is, wordt aanbevolen om het openen van de hoogwatergeul op te nemen in de Qf-relatie bij Olst. Ook al is de verwachting dat hoogwatergeul Veessen-Wapenveld eens in een mensenleven gebruikt gaat worden, vermoedelijk zullen de verschillen tussen de afvoermetingen-en bepalingen beduidend groot zijn wanneer in de afvoerbepaling geen rekening wordt gehouden met de opening van de geul. Het openen de geul kan door middel van een correctiefactor worden opgenomen in de Qf-relatie. Uiteraard bestaan er ook andere mogelijkheden om dit te doen.

Ten slotte zijn invloeden van de wind besproken. Echter zijn deze niet verder geanalyseerd, met weinig inzicht in de invloeden van de wind op de optredende afvoeren als gevolg. Zo is het tot

op heden onduidelijk in hoeverre de waterstanden zouden kunnen stijgen door opstuwing vanuit het IJsselmeer en of plaatselijke windeffecten een significante invloed kunnen uitoefenen op de afvoerbepaling. Het is daarom raadzaam om verdere onderzoek te doen naar de gevoeligheid van de afvoerbepaling voor de invloeden van wind.

Al met al heeft dit rapport de verschillen tussen de gemeten en bepaalde afvoeren van januari 2018 grotendeels verklaard. Bij gebruik van vernieuwde WAQUA-berekeningen en 3 stroken voor de fit van de Qh-relatie, bleek dat afvoeren in het hoge bereik hoger worden ingeschat en zo in zekere zin meer overeenkomen met de afvoermetingen. Daarnaast resulteerde de gevoeligheidsanalyse in een goede verklaring voor verschillen in afvoermetingen-en bepalingen. Op basis van het bovenstaande wordt daarom sterk aanbevolen om een geactualiseerde Qh-relatie te ontwerpen voor het splitsingspunt Olst.

Referenties

- Bhattacharya, B. & Solomatine, D. P. (2004). Neural networks and M5 model trees in modelling water level–discharge relationship. *ScienceDirect*, 16, 1–16.
- Bhattacharya, B. & Solomatine, D. P. (2015). Application of artificial neural network in stage–discharge relationship. *ResearchGate*, 7, 1–7.
- Booij, M. (2016). Opdracht 1 hydrologie. Verkregen van https://blackboard.utwente.nl/bbcswebdav/pid-980302-dt-content-rid-2200837_2/xid-2200837_2
- Braca, G. (2008). *Stage–discharge relationships in open channels: practices and problems*. Trento: Università degli Studi di Trento Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale.
- Brilhuis, R. (1988). Enkele hydraulische en morfologische parameters van de Nederlandse Rijntakken. *Rijkswaterstaat*, 153, 1–53.
- Di Baldassarre, G. & Montanari, A. (2009). Uncertainty in river discharge observations: a quantitative analysis. *Hydrology and Earth System Sciences*, 9, 1–9.
- Dottori, F., Martina, M., & Todini, E. (2009). A dynamic rating curve approach to indirect discharge measurement. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17, 1–17.
- Helpdeskwater. (2018). SOBEK. Verkregen 22 mei 2018, van <https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/applicaties-modellen/applicaties-per/watermanagement/watermanagement/sobek/>
- Lohani, A., N.K., G., & Bhatia, K. (2006). Takagi–Sugeno fuzzy inference system for modeling stage–discharge relationship. *ScienceDirect*, 15, 1–15.
- MIRT. (2018). Ruimte voor de rivier. Verkregen 22 mei 2018, van <https://www.mirtoverzicht.nl/projecten/ruimte-voor-de-rivier>
- Muste, M. & Lee, K. (2013). Hysteresis in River Discharge Rating Curves. Verkregen van https://www.iahr.org/uploadedfiles/userfiles/files/Hysteresis%202013_03_25_V2.pdf
- Neefjes, M. & Koffijberg, M. (2016). IJsseluitwaarden Olst. *De Lynx*, 20, 1–20.
- Nortek-bv. (2018). Capaciteitsmetingen. Verkregen 16 april 2018, van <http://www.nortek-bv.nl/servicio/debiet/capaciteitsmetingen-van-gemalen>
- Ogink, H. & Stolker, C. (2004). Verbetering Qf-relaties. *Delft Hydraulics*, 53, 1–53.
- provincie Overijssel. (2017). IJsseluitwaarden Olst. Verkregen 16 maart 2018, van <http://www.overijssel.nl/thema's/water/waterprojecten/ijsseluitwaarden/>
- Rijkswaterstaat. (2017). Hoogwatergeul Veessen-Wapenveld klaar voor extreem hoog water op de IJssel. Verkregen 22 mei 2018, van <https://www.rijkswaterstaat.nl/over-ons/nieuws/nieuwsarchief/p2017/02/hoogwatergeul-veessen-wapenveld-klaar-voor-extreem-hoog-water-op-de-ijssel.aspx>
- Simona. (2016). WAQUA/TRIWAQ - two- and three-dimensional shallow water flow model. Technical documentation. Verkregen 28 maart 2018, van <http://simona.deltares.nl/release/doc/techdoc/waquapublic/sim1999-01.pdf>
- Stroomlijnijssel. (2018). Stroomlijn IJssel. Verkregen 17 mei 2018, van <https://stroomlijnijssel.nl/>
- Van de Laar, R., Heikens, D., Voorwinden, A., Rademarkers, J., & Scholl, O. (2011). Gebiedsgericht Project IJsseluitwaarden Olst. Verkregen 22 mei 2018, van <http://api.commissiener.nl/docs/mer/p25/p2531/2531-002notrw.pdf>
- Van der Veen, R. (2013). Memo 130812R-2: Samenstellen Qh-relaties Tiel en Olst. *Rura Arnhem*, 26, 1–26.
- Van Oorschot, M. & Kleinhans, M. (2017). Het dynamische samenspel van rivieren en oevervegetatie. Verkregen 22 mei 2018, van <http://edepot.wur.nl/419762>
- Van Vuuren, W., Moll, R., & Vervoorn, H. (1999). De QH-relatie zijn langste tijd gehad? Op weg naar het Qf-tydperk voor de Rijntakken. Verkregen 18 maart 2018, van <http://edepot.wur.nl/363506>
- Vermeulen, B. (2016). College 4 - Stroming met vrij oppervlak. Verkregen van https://blackboard.utwente.nl/bbcswebdav/pid-981873-dt-content-rid-2210598_2/xid-2210598_2
- Vervoorn, H. (1998). Qh-analyses rijntakken. *Haskoning ingenieurs-en Architectenbureau*, 96, 1–96.
- vhbinfra. (2018). Ruimte voor de Rivier IJsseldelta Kampen. Verkregen 22 mei 2018, van <https://www.vhbinfra.nl/nl/projecten/detail/ruimte-voor-de-rivier-ijsseldelta>
- Wijbenga, J. & Haaren, D. V. (2010). Qf-relaties. 25, 1–25.
- Wijbenga, J., van Haaren, D., & Versteeg, R. (2009). Beheer en onderhoud afvoerreeksen Rijntakken. *HKV*, 131, 1–131.
- Wikipedia. (2013). ADCP. Verkregen 16 april 2018, van <https://nl.wikipedia.org/wiki/ADCP>

Wikipedia. (2016). Wet van Bernoulli. Verkregen 25 april 2018, van https://nl.wikipedia.org/wiki/Wet_van_Bernoulli

Wikipedia. (2018). Duursche Waarden. Verkregen 22 mei 2018, van https://nl.wikipedia.org/wiki/Duursche_Waarden

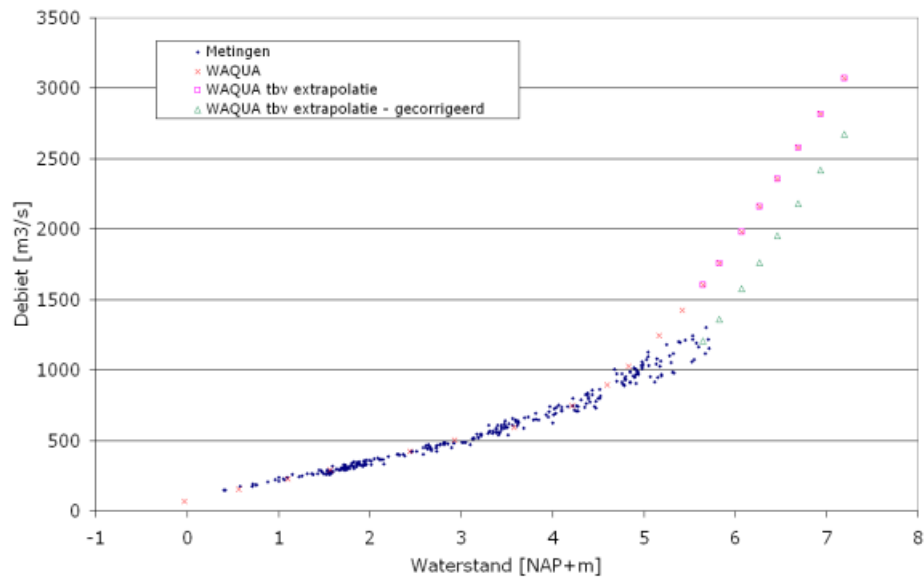
Bijlage A Analyse huidige Qh-relatie

A.1 Afvoermetingen 1986-2010 voor afleiding Qh-relatie 2010

Tabel A.1: Afvoermetingen 1986-2010 (Wijbenga & Haaren, 2010)

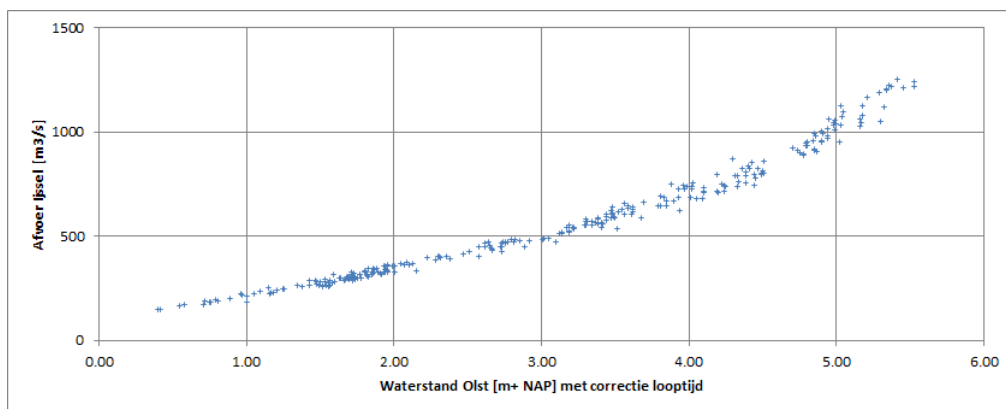
Jaar	Aantal	Methode
2010	4	ADCP
2009	26	ADCP
2008	17	ADCP
2007	6	ADCP
2006	2	ADCP
2005	5	ADCP
2004	3	ADCP
2003	8	ADCP
2003	7	Ott-molen
2002	-	-
2001	14	ADCP
2000	17	Ott-molen
1999	79	Ott-molen
1998	29	Ott-molen
1997	4	Ott-molen
1996	6	Ott-molen
1995	2	Ott-molen
1994	-	-
1993	10	Ott-molen
1992	-	
1991	-	-
1990	-	-
1989	18	Ott-molen
1988	10	Ott-molen
1987	23	Ott-molen
1986	13	Ott-molen
Totaal	303	

A.2 Datapunten afvoermetingen en WAQUA-berekening



Figuur A.1: Relatie waterstand en afvoer Olst op basis van metingen en WAQUA (Wijbenga & Haaren, 2010)

A.3 Validatie afvoermetingen concept Qh-relatie 2013



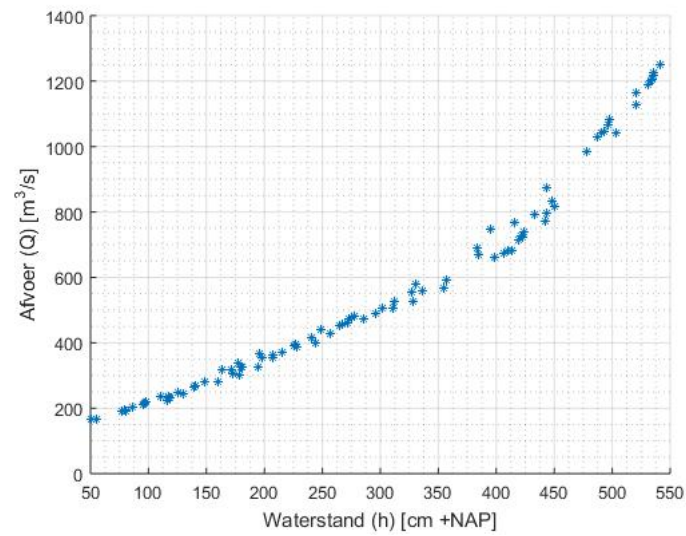
Figuur A.2: Gebruikte metingen voor concept Qh-relatie 2013 (Van der Veen, 2013)

Bijlage B Evaluatie huidige Qh-relatie

B.1 Toegeleverde afvoermetingen

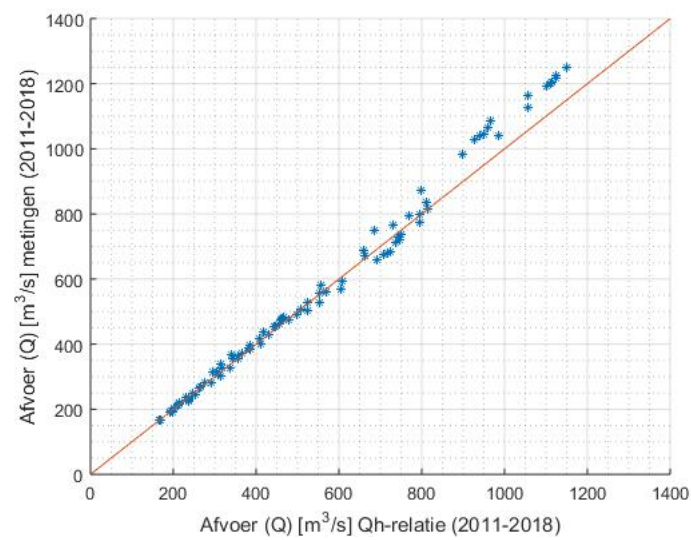
Tabel B.1: Toegeleverde afvoermetingen 1986-2018

Jaar	Aantal	Methode
2018	5	ADCP
2017	4	ADCP
2016	12	ADCP
2015	14	ADCP
2014	5	ADCP
2013	9	ADCP
2012	16	ADCP
2011	26	ADCP
2011	26	ADCP
2010	9	ADCP
2009	26	ADCP
2008	17	ADCP
2007	2	ADCP
2006	0	-
2005	5	ADCP
2004	3	ADCP
2003	13	ADCP
2003	7	Ott-molen
2002	0	-
2001	14	ADCP
2000	18	-
1999	73	-
1998	29	-
1997	4	-
1996	6	-
1995	2	-
1994	0	-
1993	10	-
1992	0	-
1991	0	-
1990	0	-
1989	18	-
1988	10	-
1987	23	-
1986	13	-
Totaal	397	

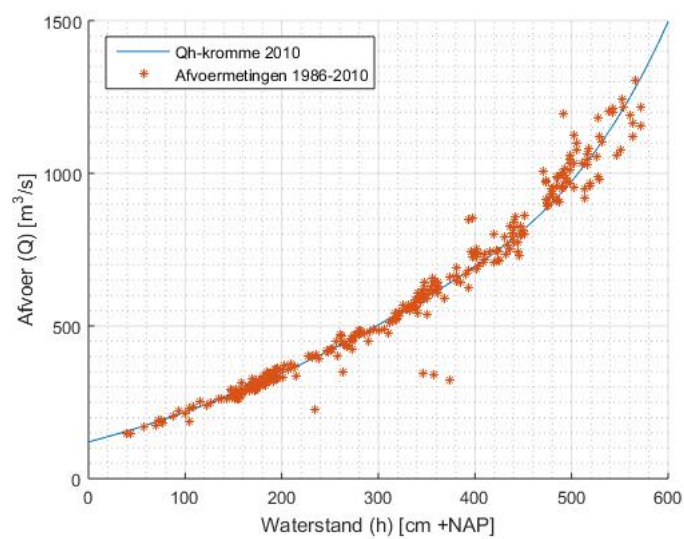


Figuur B.1: Waterstands-en afvoermetingen 2011-2018

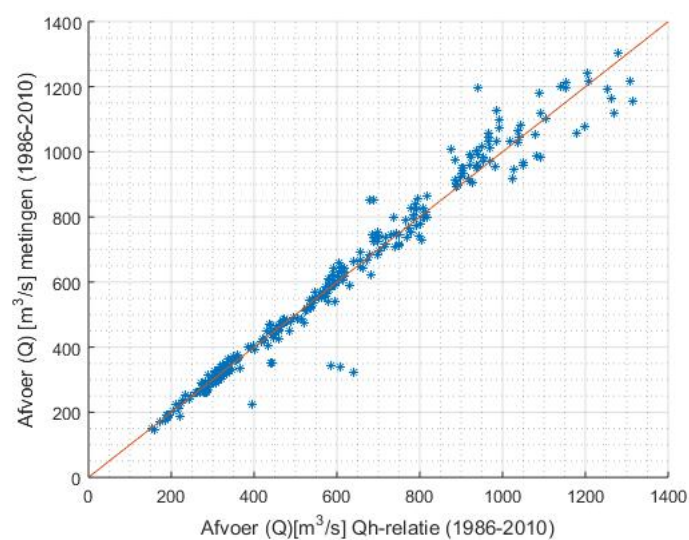
B.2 Qh-relatie 2010 ten opzichte van afvoermetingen



Figuur B.2: Afvoermetingen 2011-2018 uitgezet tegen afvoeren Qh-relatie 2010



Figuur B.3: Qh-kromme 2010 en waterstands-en afvoermetingen 1986-2010



Figuur B.4: Afvoermetingen 1986-2010 uitgezet tegen afvoeren Qh-relatie 2010

Bijlage C Verbetermogelijkheden

C.1 Correctie voor niet-permanente volgens Jones

De afvoer is door middel van de 'Saint Venant' vergelijkingen voor de eindimensionale waterbeweging volgens Ogink en Stolker (2004) uit te drukken als een functie van de waterdiepte en hydraulische en geometrische karakteristieken van de rivier. Vergelijkingen C.1 en C.2 geven de Saint Venant vergelijkingen (Continuïteitsvergelijking zonder zijdelingse toestromingen en bewegingsvergelijking zonder windeffecten en lokale energieverliezen) weer (Ogink & Stolker, 2004).

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (C.1)$$

$$\frac{1}{gA_s} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{gA_s} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A_s} \right) + \frac{\partial h}{\partial x} - S_0 + \frac{Q|Q|}{C^2 A_s^2 R} = 0 \quad (C.2)$$

Waarin:

- A_s = oppervlakte van het stroomvoerende profiel
- Q = afvoer
- C = hydraulische ruwheidsparementen volgens Chézy
- h = waterdiepte
- R = hydraulische straal
- S_0 = bodemverhang
- g = gravitatieversnelling
- x = afstand
- t = tijd

Vergelijking C.2 kan herschreven worden naar de afvoer als functie van de waterdiepte en hydraulische en geometrische karakteristieken van de rivier (vergelijking C.3) (Ogink & Stolker, 2004).

$$Q = CA_s \sqrt{RS_0} \sqrt{1 - \frac{1}{S_0} \left(\left(\frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{1}{gA_s} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{gA_s} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A_s} \right) \right)} \quad (C.3)$$

Vergelijking C.3 kan volgens Ogink en Stolker (2004) weer verder vereenvoudigd worden. Dit wordt gedaan door de versnellingstermen te herschrijven (vergelijking C.5), waarbij aangenomen wordt dat het stroomvoerende profiel A_s gelijk is aan het product van de stroomvoerende breedte B_s en de verandering in de waterdiepte ∂h (vergelijkingen C.4).

$$\frac{\partial A_s}{\partial x} = B_s \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial A_s}{\partial x} \bigg|_{h \text{ constant}} \approx B_s \frac{\partial h}{\partial x} \quad (C.4)$$

$$\frac{1}{gA_s} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{gA_s} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A_s} \right) = \frac{1}{gA_s} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{2Q}{gA_s^2} \frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{B_s Q^2}{gA_s^3} \frac{\partial h}{\partial x} \quad (C.5)$$

De partiele afgeleiden $\frac{\partial Q}{\partial x}$ en $\frac{\partial Q}{\partial t}$ volgen uit de continuïteitsvergelijking C.1 en vergelijking voor de voortplantingssnelheid van een hoogwatergolf (zie sectie 6 vergelijking 6.5) (Ogink & Stolker, 2004).

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{dQ}{dA} \frac{dA}{dh} \frac{\partial h}{\partial x} \approx cB \frac{\partial h}{\partial x} \quad (C.6)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{dQ}{dA} \frac{dA}{dt} = c \frac{\partial A}{\partial t} = -c \frac{Q}{x} = -c^2 B \frac{\partial h}{\partial x} \quad (C.7)$$

Vergelijking C.8 volgt wanneer de vergelijking van de voortplantingssnelheid en vergelijkingen C.6 en C.7 gesubstitueerd wordt in vergelijking C.5 (Ogink & Stolker, 2004).

$$\begin{aligned} \frac{1}{gA_s} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{2Q}{gA_s^2} \frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{B_s Q^2}{gA_s^3} \frac{\partial h}{\partial x} &\approx \frac{\partial h}{\partial x} \left(-\frac{c^2 B}{gA_s} + 2\frac{cB}{gA_s} - \frac{B_s}{gA_s} \frac{Q^2}{A_s^2} \right) \\ &\approx \frac{\partial h}{\partial x} \left(-\frac{9}{4} \frac{B_s}{B} \frac{B_s}{gA_s} \frac{Q^2}{A_s^2} + 2\frac{B_s}{gA_s} \frac{Q^2}{A_s^2} \right) \end{aligned} \quad (C.8)$$

In vergelijking C.8 kan het kwadraat van het froude getal (vergelijking C.9) worden gesubsitu-eerd (vergelijking C.10). Uit vergelijking C.10 volgt vergelijking C.11 (Ogink & Stolker, 2004).

$$F^2 = \frac{Q^2}{gA_s^3/B_s} = \frac{B_s}{gA_s} \frac{Q^2}{A_s^2} \quad (C.9)$$

$$\frac{1}{gA_s} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{2Q}{gA_s^2} \frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{B_s Q^2}{gA_s^3} \frac{\partial h}{\partial x} \approx \frac{\partial h}{\partial x} F^2 \left(-\frac{9}{4} \frac{B_s}{B} + 2 \right) \quad (C.10)$$

$$Q = CA_s \sqrt{RS_0} \sqrt{1 - \frac{1}{S_0} \frac{\partial h}{\partial x} \left(1 + F^2 \left(2 - \frac{9}{4} \frac{B_s}{B} \right) \right)} \quad (C.11)$$

Vergelijking C.11 kan verder herschreven worden door onder andere door gebruik van verge-lijkingen C.12 en C.13. Ten slotte kan de hand van de continuïteitsvergelijking (vergelijking C.1) het waterspiegelverhang ten opzichte van de bodem vervangen worden (vergelijking C.14). De herschrijving van vergelijking C.11 resulteert in vergelijking C.15. Daarbij is $CA_s \sqrt{RS_0}$ vervangen door de term Q_s . Dit is de term voor afvoeren met uniforme permanente stroming (Ogink & Stolker, 2004).

$$\beta = 1 + F^2 \left(2 - \frac{9}{4} \frac{B_s}{B} \right) \quad (C.12)$$

$$b = \frac{B_s}{B} \quad (C.13)$$

$$B \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{dQ}{dh} \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \rightarrow \frac{\partial h}{\partial t} + c \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \rightarrow \frac{\partial h}{\partial t} = -\frac{1}{c} \frac{\partial h}{\partial x} \quad (C.14)$$

$$Q = CA_s \sqrt{RS_0} \sqrt{1 + \frac{\beta}{S_0 c} \frac{\partial h}{\partial t}} = Q_s \sqrt{1 + \frac{\beta}{S_0 c} \frac{\partial h}{\partial t}} \quad (C.15)$$

In Nederland geldt voor de meeste rivieren een subkritische stroming ($F < 1$). Dit is ook het geval voor de IJssel, waar het froude getal ($F < 0,15$) erg klein is. Daarnaast geldt bij benadering $0,7 < b \leq 1$ (vergelijking C.16). Onder deze omstandigheden kan daarom gezegd worden dat $\beta \approx 1$. Echter kan de verandering in het stroomprofiel bij constante waterstand verwaarloosd worden. Om de Jones-vergelijking breder inzetbaar te maken, kan het bodemverhang vervangen worden door het energieverhang S_e (vergelijking C.17). Deze houdt naast de waterstand ook rekening met onder andere de verandering in snelheid (Brilhuis, 1988; Ogink & Stolker, 2004).

$$Q = Q_s \sqrt{1 + \frac{1}{S_0 c} \frac{dh}{dt}} \quad (C.16)$$

$$Q = Q_s \sqrt{1 + \frac{1}{S_e c} \frac{dh}{dt}} \quad (C.17)$$

Bijlage D Gevoeligheidsanalyse

D.1 Maatregelen referentiemodel Baseline

Tabel D.1: Maatregellijst referentiemodel inclusief naamgeving

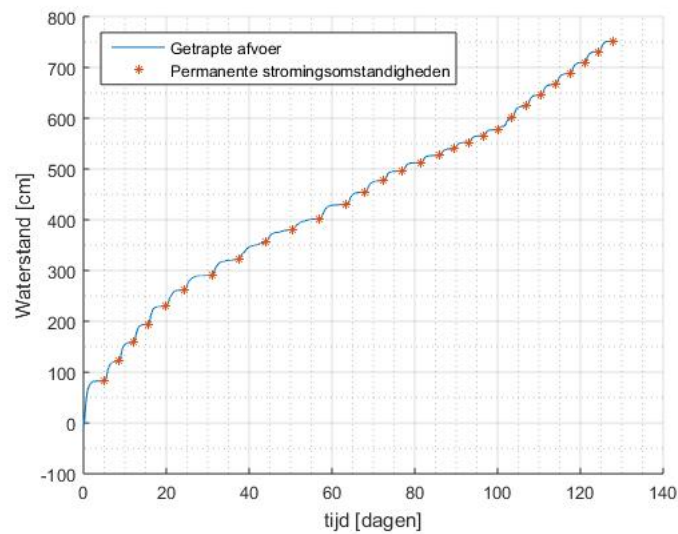
Maatregel	Naamgeving		Maatregel	Naamgeving
1.	ij_vreug95_a1		29.	ij_hathave_a1
2.	ij_fortm95_a1		30.	ij_brugn50_a2
3.	ij_zutph95_a1		31.	ij_pijper_a1
4.	ij_hatte95_a1		32.	ij_vreugde_a2
5.	ij_epsew95_a1		33.	rt_veg04_b1
6.	ij_terwo95_a1		34.	rt_veg04_e1
7.	ij_harcu95_a1		35.	rt_eco05_b1
8.	ij_twent95_a2		36.	rt_eco05_e1
9.	ij_ramme95_a1		37.	ij_olstac3_b1
10.	ij_kribvak_a2		38.	km_zbhgt06_a3
11.	ij_zutph95_b1		39.	ij_twentka_a1
12.	ij_zutph95_c1		40.	rt_eco08_b1
13.	ij_delta95_a1		41.	rt_eco08_e1
14.	ij_delta95_b1		42.	ij_zalk_a1
15.	rt_meetp95_b1		43.	ij_zzeehvn_a2
16.	rt_meetp95_e1		44.	ij_fortmon_a1
17.	rt_uitvl95_b1		45.	rt_meetp09_b1
18.	rt_uitvl95_e1		46.	rt_meetp09_e1
19.	ij_kribvak_b2		47.	ij_hathave_b1
20.	ij_kribvak_c1		48.	rt_zbhgt09_b1
21.	ij_kater95_a2		49.	rt_zbhgt09_e1
22.	ij_kater95_b1		50.	rt_zbhgt10_b1
23.	km_oever95_a1		51.	rt_zbhgt10_e1
24.	ij_dvldeve_a2		52.	rt_meetp10_b1
25.	rt_eco97_b1		53.	rt_meetp10_e1
26.	rt_eco97_e1		54.	ij_welsum_a1
27.	ij_dvskamp_a2		55.	rt_eco12_b1
28.	ij_have998_a2		56.	rt_eco12_e1

D.2 Invoer referentiemodel WAQUA-berekening

Tabel D.2: Invoer referentiemodel WAQUA-berekening

	Dag	Uur	Min	Afvoer m^3/s		Dag	Uur	Min	Afvoer m^3/s
Tijd	0	0	0	180		77	0	0	1080
Tijd	5	0	0	180		77	12	0	1180
Tijd	5	12	0	230		81	12	0	1180
Tijd	8	12	0	230		82	0	0	1280
Tijd	9	0	0	280		86	0	0	1280
Tijd	12	0	0	280		86	12	0	1380
Tijd	12	12	0	330		89	12	0	1380
Tijd	15	12	0	330		90	0	0	1480
Tijd	16	0	0	380		93	0	0	1480
Tijd	20	0	0	380		93	12	0	1580
Tijd	20	12	0	430		96	12	0	1580
Tijd	24	12	0	430		97	0	0	1680
Tijd	25	0	0	480		100	0	0	1680
Tijd	31	0	0	480		100	12	0	1880
Tijd	31	12	0	530		103	12	0	1880
Tijd	37	12	0	530		104	0	0	2080
Tijd	38	0	0	580		107	0	0	2080
Tijd	44	0	0	580		107	12	0	2280
Tijd	44	12	0	630		110	12	0	2280
Tijd	50	12	0	630		111	0	0	2480
Tijd	51	0	0	680		114	0	0	2480
Tijd	57	0	0	680		114	12	0	2680
Tijd	57	12	0	780		117	12	0	2680
Tijd	63	12	0	780		118	0	0	2880
Tijd	64	0	0	880		121	0	0	2880
Tijd	68	0	0	880		121	12	0	3080
Tijd	68	12	0	980		124	12	0	3080
Tijd	72	12	0	980		125	0	0	3280
Tijd	73	0	0	1080		128	0	0	3280

D.3 Waterstandsverloop referentiemodel

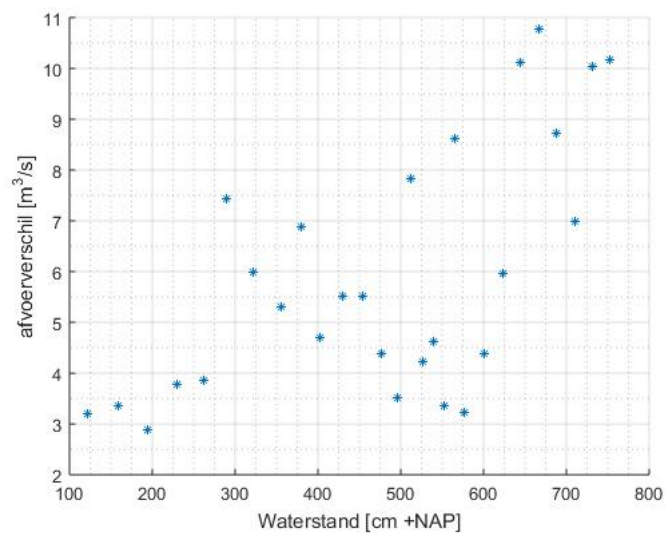


Figuur D.1: Waterstandsverloop referentiemodel over de tijd

D.4 Gevoeligheid bodemverandering

Tabel D.3: Toegevoegde maatregelen bodemverandering inclusief naamgeving

Toegevoegde maatregel	Naamgeving
1.	rt_zbhgt15_b1
2.	rt_zbhgt15_e1

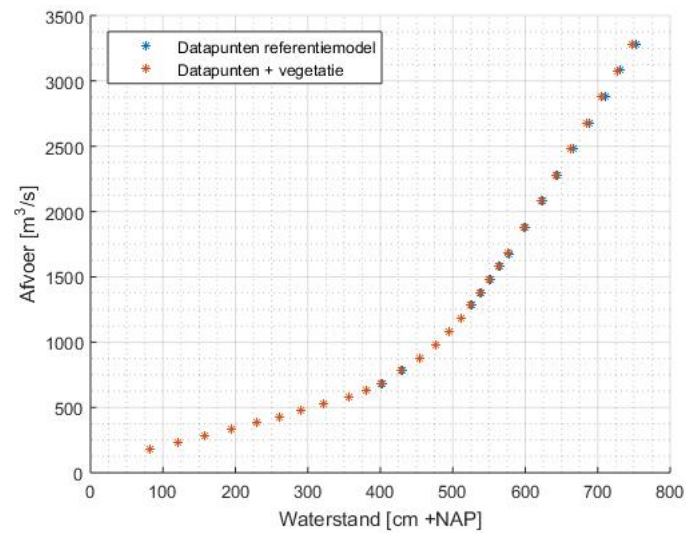


Figuur D.2: Afvoerafwijkingen tussen referentiemodel en variant bodemverandering

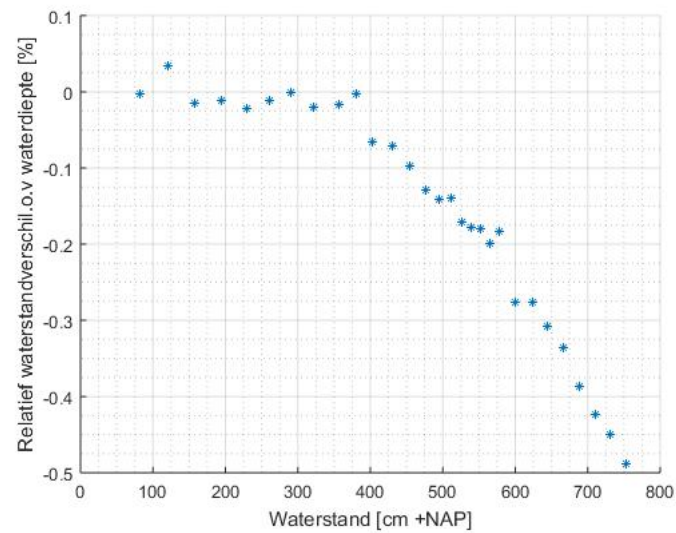
D.5 Gevoeligheid vegetatie

Tabel D.4: Toegevoegde maatregelen verandering vegetatie inclusief naamgeving

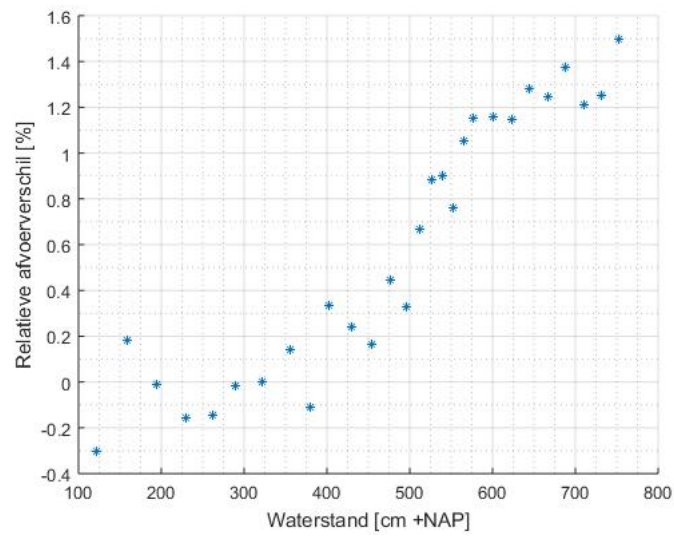
Toegevoegde maatregel	Naamgeving
1.	str_ijssel01



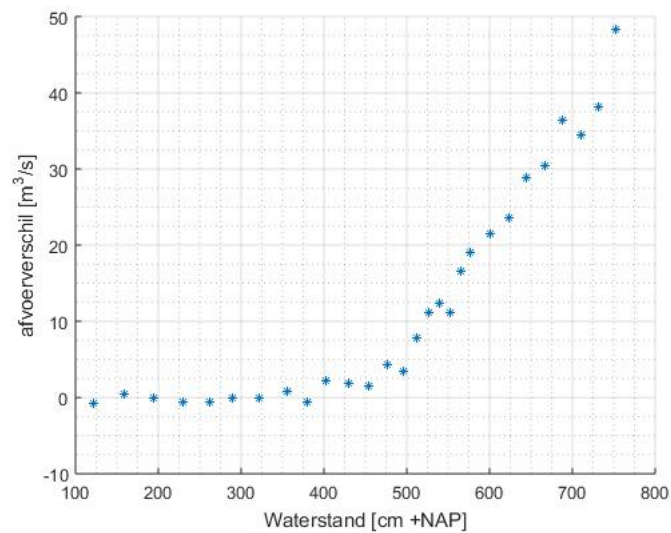
Figuur D.3: Datapunten referentiemodel en variant vegetatie



Figuur D.4: Relatief waterstandsverschil referentiemodel en variant vegetatie



Figuur D.5: Relatieve afvoerafwijkingen referentiemodel en variant vegetatie

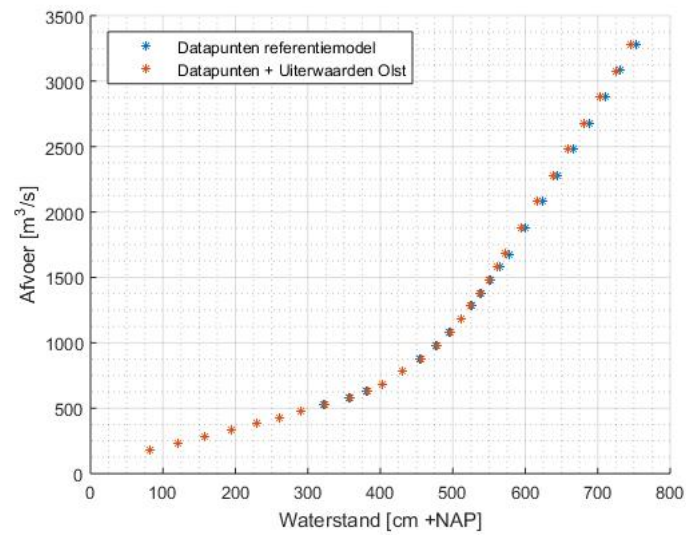


Figuur D.6: Afvoerafwijkingen tussen referentiemodel en variant vegetatie

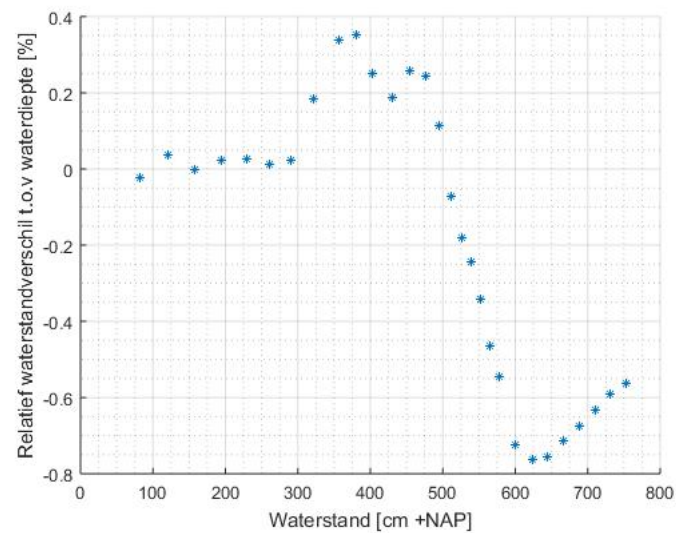
D.6 Gevoeligheid uiterwaarden Olst

Tabel D.5: Toegevoegde maatregelen uiterwaarden Olst inclusief naamgeving

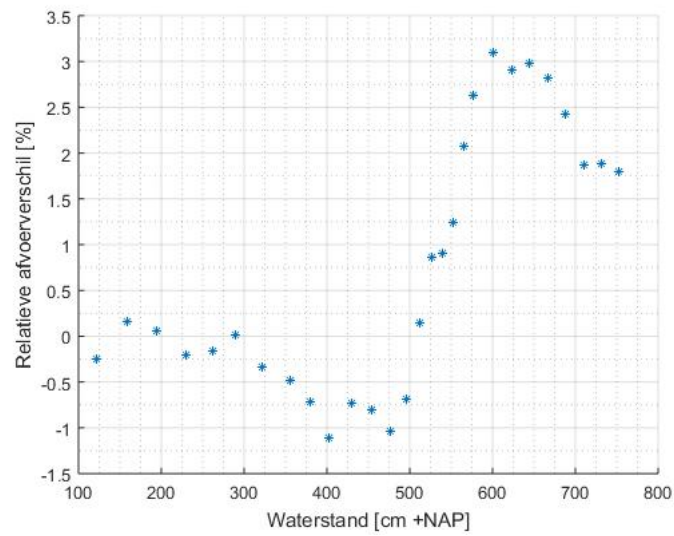
Toegevoegde maatregel	Naamgeving
1.	ij_olstin8_a1
2.	ij_welsum_b1



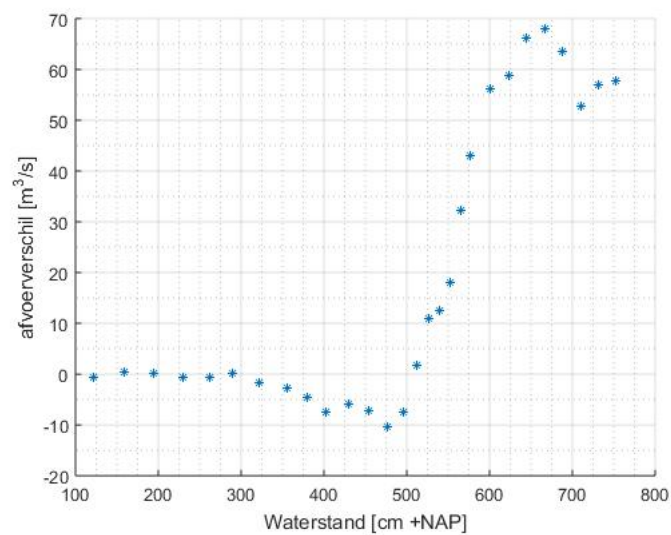
Figuur D.7: Datapunten referentiemodel en variant verlaagde uiterwaarden



Figuur D.8: Relatief waterstandverschil variant referentiemodel en verlaagde uiterwaarden



Figuur D.9: Relatieve afvoerafwijkingen referentiemodel en variant verlaagde uiterwaarden

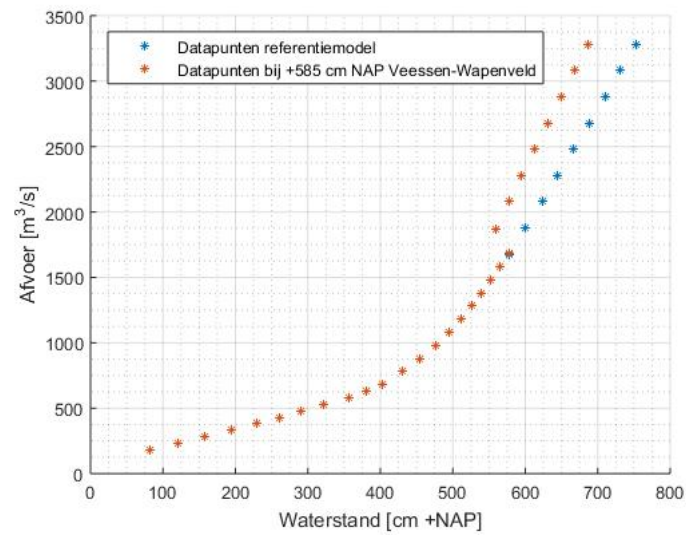


Figuur D.10: Afvoerafwijkingen tussen referentiemodel en variant verlaagde uiterwaarden

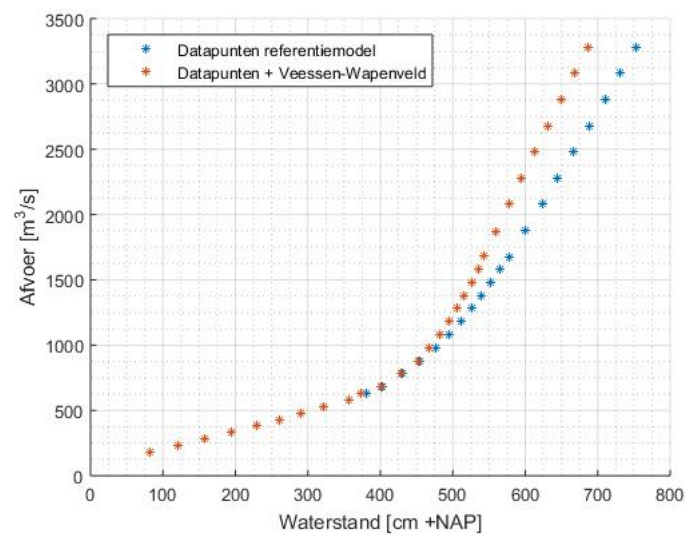
D.7 Gevoeligheid Veessen-Wapenveld

Tabel D.6: Toegevoegde maatregelen Veessen-Wapenveld inclusief naamgeving

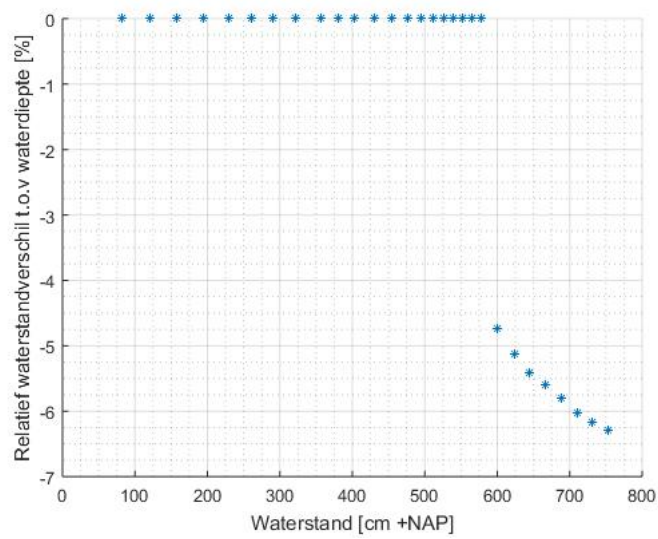
Toegevoegde maatregel	Naamgeving
1.	ij_vwdo_a1
2.	ij_vwdo40m_a1



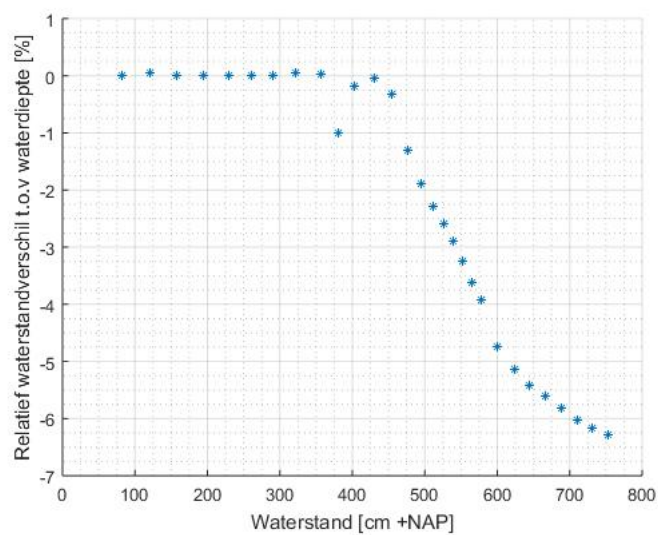
Figuur D.11: Datapunten referentiemodel en gecorrigeerde variant hoogwatergeul



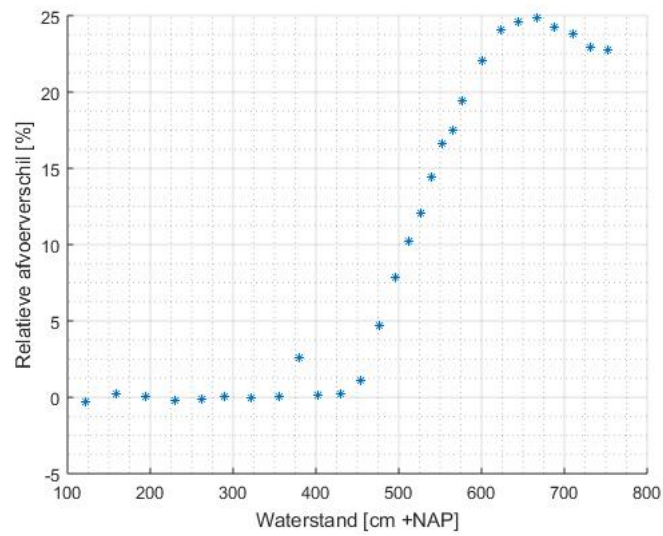
Figuur D.12: Datapunten referentiemodel en variant hoogwatergeul



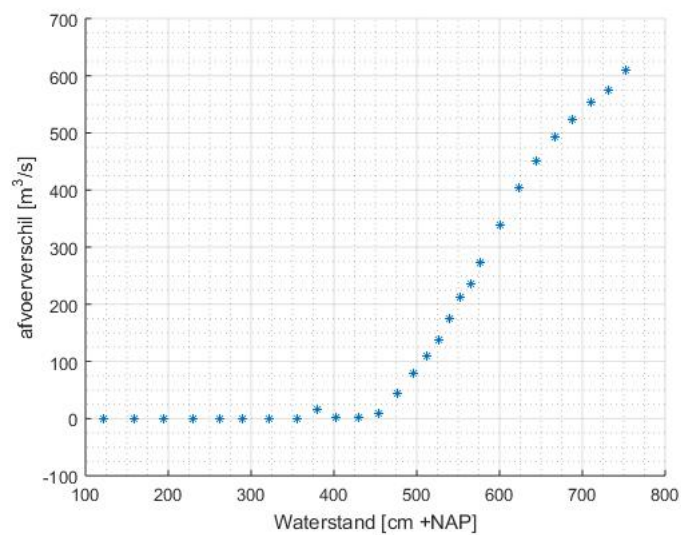
Figuur D.13: Relatief waterstandsverschil referentiemodel en gecorrigeerde variant hoogwatergeul



Figuur D.14: Relatief waterstandsverschil referentiemodel en variant hoogwatergeul



Figuur D.15: Relatieve afvoerafwijkingen referentiemodel en variant hoogwatergeul

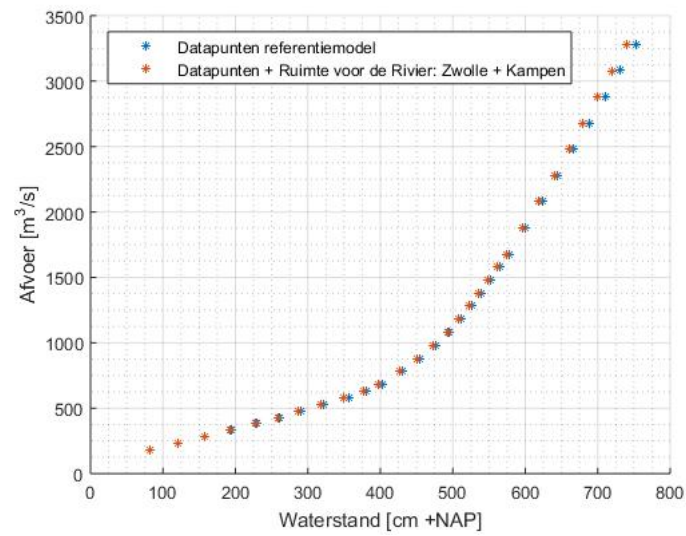


Figuur D.16: Afvoerafwijkingen tussen referentiemodel en variant hoogwatergeul

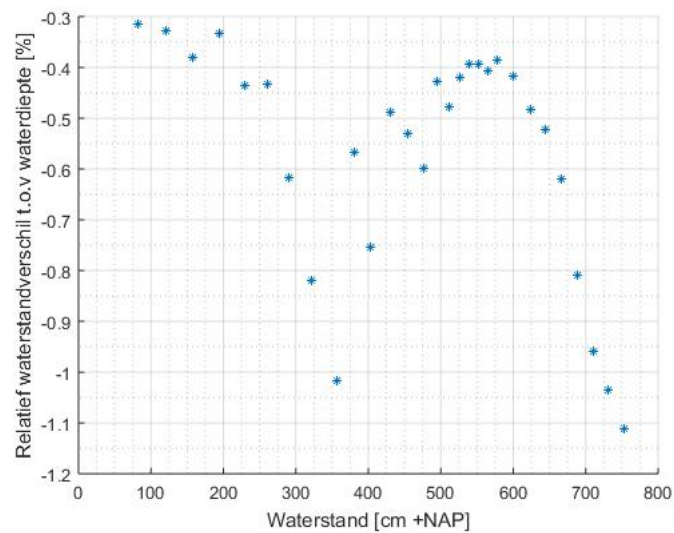
D.8 Gevoeligheid RvdR.: Zwolle en Kampen

Tabel D.7: Toegevoegde maatregelen RvdR. Zwolle en Kampen inclusief naamgeving

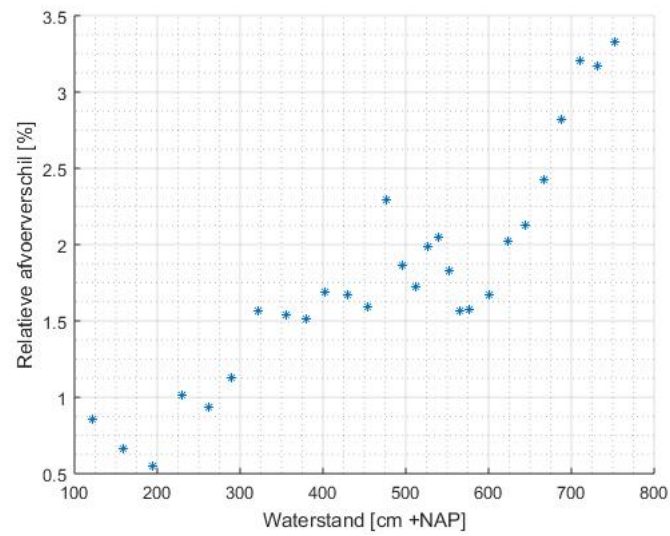
Toegevoegde maatregel	Naamgeving
1.	ij_schela9_a1
2.	ij_whotta7_a1
3.	ij_z_bvkamp_a1



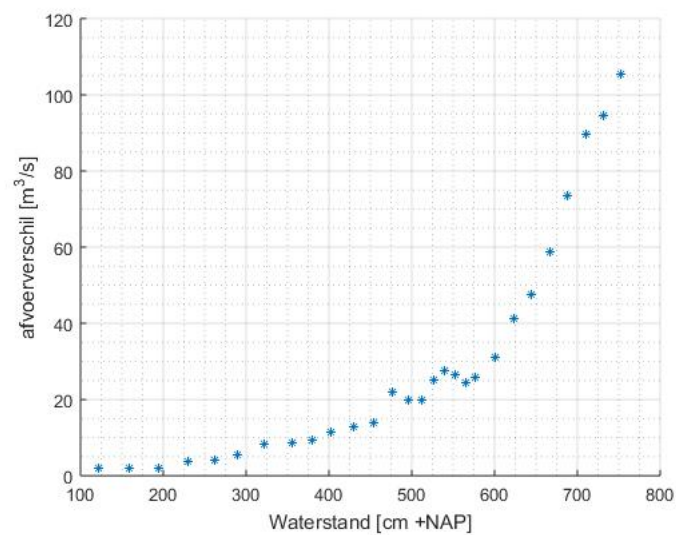
Figuur D.17: Datapunten referentiemodel en variant RvdR. Zwolle en Kampen



Figuur D.18: Relatief waterstandsverschil variant referentiemodel en RvdR. Zwolle en Kampen



Figuur D.19: Relatieve afvoerafwijkingen referentiemodel en variant RvdR. Zwolle en Kampen

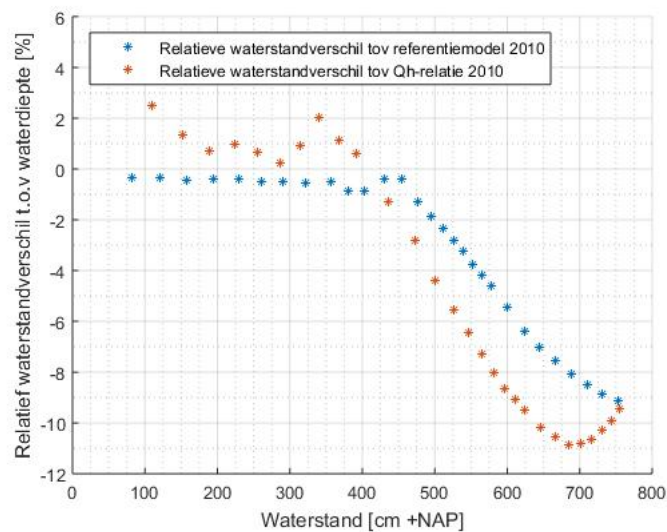


Figuur D.20: Afvoerafwijkingen tussen referentiemodel en variant RvdR. Zwolle en Kampen

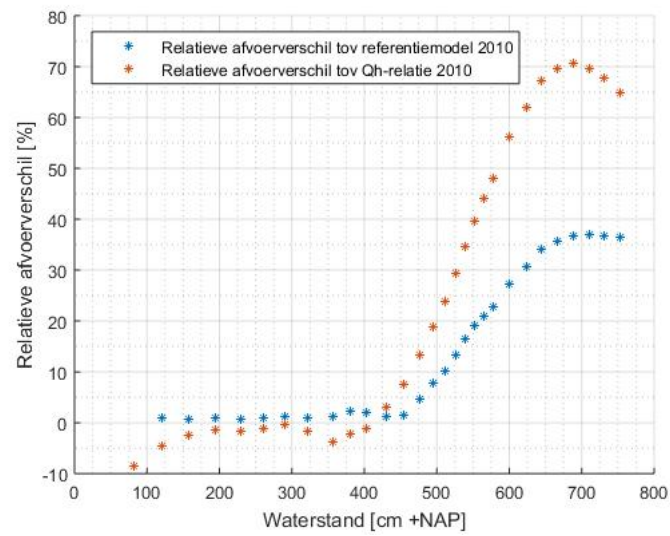
D.9 Totale gevoeligheid

Tabel D.8: Toegevoegde maatregelen variant-2017 inclusief naamgeving

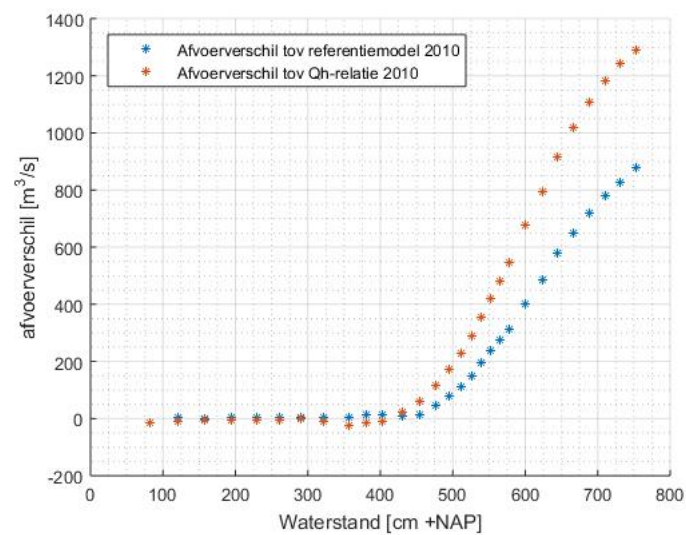
Maatregel	Naamgeving		Maatregel	Naamgeving
1.	ij_harcbw_c1		16.	ij_olstin8_a1
2.	rt_zbhgt11_b1		17.	ij_bsob4_a1
3.	rt_zbhgt11_e1		18.	ij_ksh_a5
4.	ij_welsum_b1		19.	rt_plasrvr_a2
5.	ij_spbzwol_a2		20.	ij_vodob20_a1
6.	rt_zbhgt12_b1		21.	ij_vwdo_a1
7.	rt_zbhgt12_e1		22.	ij_schela9_a1
8.	ij_rammelw_b1		23.	ij_whohta7_a1
9.	rt_zbhgt13_b1		24.	ij_zutphvn_a1
10.	rt_zbhgt13_e1		25.	rt_zbhgt16_b1
11.	rt_zbhgt14_b1		26.	rt_zbhgt16_e1
12.	rt_zbhgt14_e1		27.	km_oever95_b1
13.	rt_zbhgt15_b1		28.	ij_twen40m_a2
14.	rt_zbhgt15_e1		29.	ij_vwdo40m_a1
15.	str_ijssel01			



Figuur D.21: Relatief waterstandsverschil variant referentiemodel en variant-2017



Figuur D.22: Relatieve afvoerafwijkingen referentiemodel, variant 2017 en Qh-kromme 2010

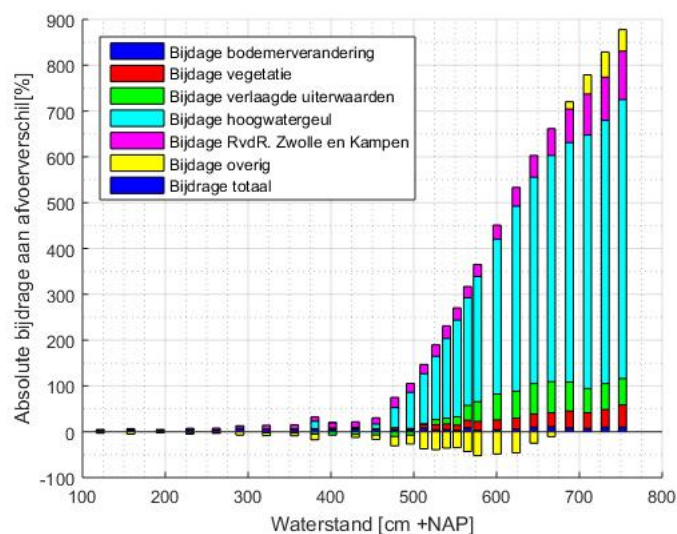


Figuur D.23: Afvoerafwijkingen tussen referentiemodel, variant 2017 en Qh-kromme 2010

Tabel D.9: Relatieve bijdrage in afvoerverschil

Datapunt	Bodem.	Veg.	Uit.-Olst	Hg.	RvdR._Z-K	overig 2017	Totaal 2017
1.	-	-	-	-	-	-	-
2.	1,41	-0,30	-0,25	-0,32	0,85	-0,56	0,83
3.	1,21	0,18	0,17	0,23	0,67	-1,89	0,56
4.	0,88	-0,01	0,06	0,03	0,55	-0,65	0,86
5.	1,01	-0,16	-0,20	-0,19	1,01	-0,86	0,61
6.	0,90	-0,14	-0,17	-0,16	0,93	-0,33	1,04
7.	1,57	-0,01	0,02	0,03	1,13	-1,55	1,18
8.	1,15	0,00	-0,33	-0,08	1,57	-1,25	1,05
9.	0,93	0,14	-0,48	0,07	1,54	-1,11	1,09
10.	1,11	-0,11	-0,71	2,61	1,51	-2,03	2,38
11.	0,70	0,34	-1,11	0,14	1,69	0,22	1,97
12.	0,71	0,24	-0,74	0,22	1,67	-0,91	1,19
13.	0,63	0,16	-0,80	1,12	1,59	-1,12	1,58
14.	0,45	0,44	-1,04	4,71	2,29	-2,15	4,72
15.	0,33	0,33	-0,68	7,88	1,87	-1,85	7,87
16.	0,67	0,67	0,15	10,22	1,72	-3,19	10,24
17.	0,33	0,88	0,86	12,10	1,99	-2,87	13,31
18.	0,34	0,90	0,91	14,44	2,05	-2,16	16,46
19.	0,23	0,76	1,24	16,65	1,83	-1,72	18,98
20.	0,55	1,06	2,08	17,50	1,57	-1,79	20,96
21.	0,19	1,15	2,63	19,44	1,57	-2,15	22,84
22.	0,23	1,16	3,09	22,06	1,67	-0,96	27,25
23.	0,29	1,15	2,90	24,10	2,02	0,23	30,69
24.	0,45	1,28	2,99	24,63	2,13	2,50	33,97
25.	0,44	1,25	2,82	24,85	2,42	3,79	35,57
26.	0,33	1,38	2,43	24,21	2,82	5,60	36,75
27.	0,24	1,21	1,87	23,78	3,21	6,75	37,06
28.	0,33	1,25	1,88	22,92	3,17	7,27	36,82
29.	0,31	1,50	1,79	22,80	3,33	6,81	36,53

Bodem.=Bodemverandering, Veg.=Vegetatie, Uit.-Olst=Verlaagde uiterwaarden Olst, Hg.=Hoogwatergeul Veessen-Wapenveld en RvdR. Z-K=RvdR. Zwolle en Kampen



Figuur D.24: Absolute bijdrage factoren aan afvoerverschil

Tabel D.10: Absolute bijdrage in afvoerverschil

Datapunt	Bodem.	Veg.	Uit.-Olst	Hg.	RvdR. Z-K	overig 2017	Totaal 2017
1.	-	-	-	-	-	-	-
2.	3,20	-0,69	-0,57	-0,73	1,94	-1,24	1,90
3.	3,35	0,51	0,46	0,63	1,85	-5,24	1,57
4.	2,88	-0,03	0,21	0,11	1,81	-2,14	2,83
5.	3,79	-0,60	-0,77	-0,73	3,81	-3,21	2,29
6.	3,85	-0,61	-0,71	-0,70	3,97	-1,37	4,43
7.	7,44	-0,07	0,08	0,16	5,35	-7,35	5,61
8.	5,99	0,00	-1,75	-0,42	8,16	-6,48	5,51
9.	5,31	0,83	-2,78	0,38	8,69	-6,18	6,24
10.	6,88	-0,68	-4,49	15,97	9,34	-12,42	14,61
11.	4,70	2,27	-7,60	0,94	11,28	1,52	13,11
12.	5,51	1,89	-5,80	1,68	12,81	-6,88	9,21
13.	5,50	1,42	-7,12	9,73	13,79	-9,62	13,71
14.	4,39	4,33	-10,28	44,12	21,97	-20,37	44,16
15.	3,52	3,52	-7,43	78,88	19,77	-19,50	78,76
16.	7,83	7,85	1,76	109,35	20,00	-37,21	109,58
17.	4,24	11,19	10,97	138,18	24,98	-39,24	150,31
18.	4,63	12,31	12,41	174,10	27,67	-36,03	195,08
19.	3,36	11,15	18,06	211,25	26,53	-34,87	235,47
20.	8,62	16,50	32,18	235,32	24,41	-43,20	273,83
21.	3,24	19,09	43,10	273,45	25,98	-52,42	312,43
22.	4,37	21,52	56,28	337,90	30,92	-48,53	402,47
23.	5,95	23,60	58,69	403,89	41,19	-46,23	487,09
24.	10,10	28,89	66,12	450,50	47,52	-25,05	578,09
25.	10,79	30,52	68,05	493,48	58,66	-10,83	650,66
26.	8,73	36,40	63,48	522,27	73,46	15,86	720,21
27.	6,99	34,42	52,74	553,34	89,47	41,88	778,85
28.	10,03	38,15	56,94	574,29	94,62	54,84	828,87
29.	10,17	48,32	57,76	608,89	105,56	46,92	877,61

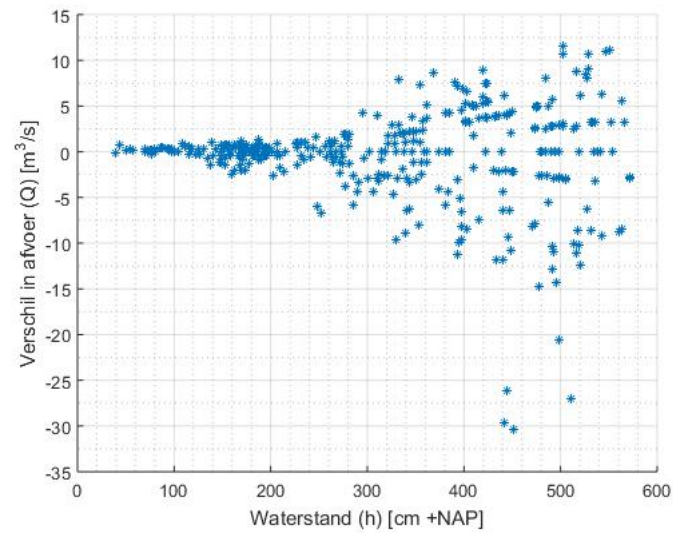
Bodem.=Bodemverandering, Veg.=Vegetatie, Uit.-Olst=Verlaagde uiterwaarden Olst,
Hg.=Hoogwatergeul Veessen-Wapenveld en RvdR. Z-K=RvdR. Zwolle en Kampen

D.10 Invoer hoogwatergolf WAQUA-berekening

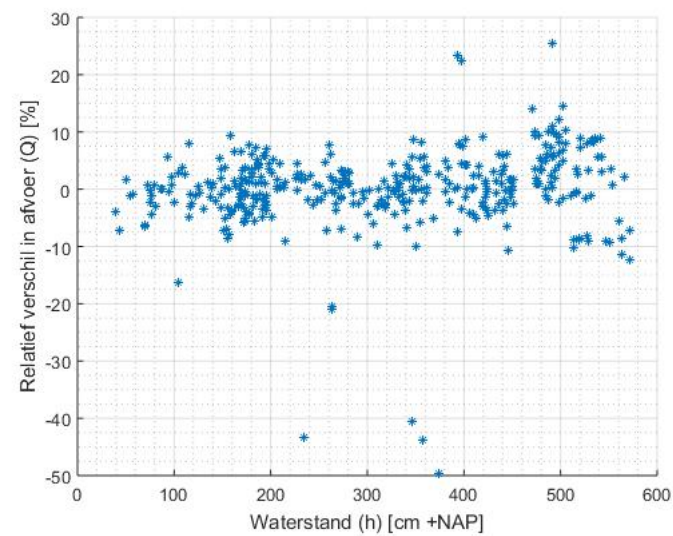
Tabel D.11: Invoer hoogwatergolf WAQUA-berekening

	Dag	Uur	Min	Afvoer m^3/s
Tijd	0	0	0	180
Tijd	5	0	0	180
Tijd	5	12	0	380
Tijd	6	0	0	580
Tijd	6	12	0	780
Tijd	7	0	0	980
Tijd	7	12	0	1180
Tijd	8	0	0	1380
Tijd	8	12	0	1580
Tijd	9	0	0	1780
Tijd	9	12	0	1980
Tijd	10	0	0	2180
Tijd	10	12	0	2380
Tijd	11	0	0	2580
Tijd	11	12	0	2780
Tijd	12	0	0	2980
Tijd	12	12	0	3180
Tijd	13	0	0	3280
Tijd	13	12	0	3180
Tijd	14	0	0	2980
Tijd	14	12	0	2780
Tijd	15	0	0	2580
Tijd	15	12	0	2380
Tijd	16	0	0	2180
Tijd	16	12	0	1980
Tijd	17	0	0	1780
Tijd	17	12	0	1580
Tijd	18	0	0	1380
Tijd	18	12	0	1180
Tijd	19	0	0	980
Tijd	19	12	0	780
Tijd	20	0	0	580
Tijd	20	12	0	380
Tijd	21	00	0	180

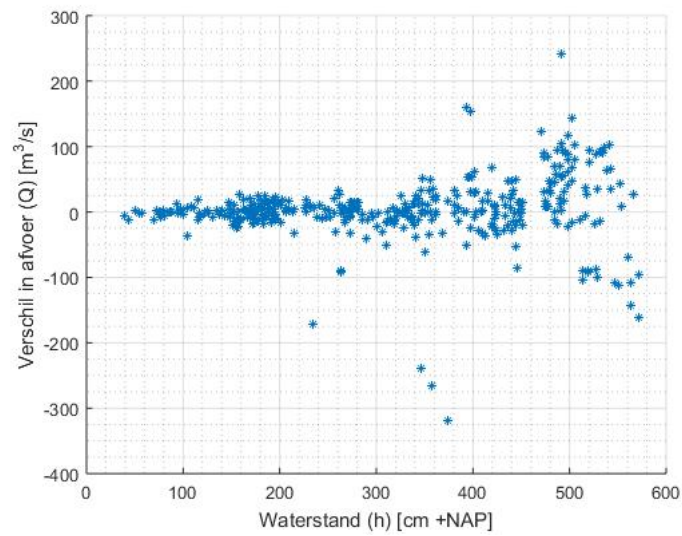
D.11 Afvoercorrectie



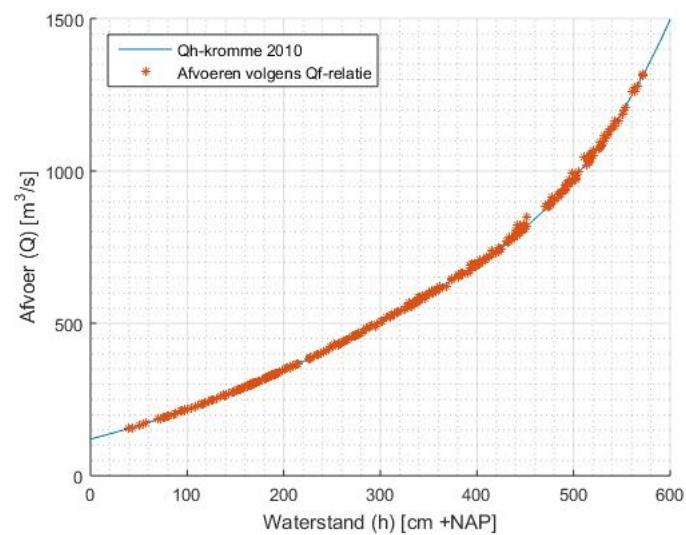
Figuur D.25: Absolute grootte correcties ten opzichte van afvoermetingen



Figuur D.26: Relatieve grootte correcties ten opzichte van Q_h -kromme 2010



Figuur D.27: Absolute grootte correcties ten opzichte van Qh -kromme 2010



Figuur D.28: Afvoeren volgens Qf -relatie met correctie voor niet-permanentie