Deltares

Afleiding van Qh-relaties en Qf-relaties in rivieren

Onderzoekstrends en reflectie op de praktijk

Afleiding van Qh-relaties en Qf-relaties in rivieren
Onderzoekstrends en reflectie op de praktijk

Auteur(s)
Frans Buschman
Anna Kosters
Koen Berends

Deltares

Afleiding van Qh-relaties en Qf-relaties in rivieren
Onderzoekstrends en reflectie op de praktijk

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	Yvo Snoek, Dénes Beyer
Referenties	SITO PS Rivierkundig onderzoek
Trefwoorden	Afvoerkromme, afvoerbepaling, uniform, stationair, hysterese, stuwcorrectie, Rijn, Maas

Documentgegevens	
Versie	1.0
Datum	28-10-2025
Projectnummer	11211565-013
Document ID	11211565-013-ZWS-0001
Pagina's	89
Classificatie	
Status	Definitief

Auteur(s)		
	Frans Buschman Anna Kosters Koen Berends	

Samenvatting

Rijkswaterstaat gebruikt statistische modellen om gemeten waterstanden in rivieren om te zetten naar afvoer. Dergelijke Qh-relaties en Qf-relaties zijn opgesteld op verschillende locaties in de rivieren die bij Rijkswaterstaat in beheer zijn. De afvoerdata die hiermee worden geproduceerd worden gebruikt in veel primaire processen, onder meer operationeel en bij het opzetten van numerieke riviermodellen. Rijkswaterstaat heeft aan Deltares gevraagd om de werkwijze voor het afleiden van deze Qh-relaties en Qf-relaties samen te vatten en te analyseren. Hierdoor draagt dit rapport bij aan het verkrijgen van een gedeelde kennisbasis en het opstellen van een langetermijnvisie over een methodiek.

In tegenstelling tot waterstand, kan afvoer niet direct worden gemeten. Afvoer wordt afgeleid uit stroomsnelheidsmetingen, waarvan er meestal slechts enkele tientallen per jaar vanaf een boot worden uitgevoerd. Een relatie tussen afvoer (*Q*) en waterstand (*h*) stelt ons in staat om de afvoer te schatten bij een gemeten waterstand wanneer een directe meting niet beschikbaar is. Deze relatie wordt ook wel een Qh-relatie genoemd. De vorm van deze relatie wordt doorgaans bepaald door een sterk versimpelde stromingsvergelijking (zie 2.2). Daarbij worden aannames gedaan die in de praktijk vaak geschonden worden.

Wanneer de aannames van een traditionele Qh-relatie niet geldig zijn, zoals bij hysterese, stuwwerking, bodemverandering of rivierwerken, kan hiervoor gecorrigeerd worden. Correcties hiervoor zijn uitgewerkt als aanvullende functies ten opzichte van de Qh-relatie. Rijkswaterstaat noemt zo'n complexe Qh-relatie een Qf-relatie. Op veel locaties in de Rijn en Maas wordt een Qf-relatie gebruikt. Tabel 5-1 geeft een overzicht van alle correcties die worden uitgevoerd op de verschillende locaties.

De Qf-relaties voor locaties in de Rijn en de Maas zijn op een verschillende manier afgeleid. Deels komt dit omdat de stroming bij Eijsden in de Maas een ander karakter heeft dan die in de Rijn. Daarnaast is de beschikbaarheid van metingen, die de basis van de Qf-relaties vormen, verschillend voor de Maas en de Rijn. Ten slotte speelt een rol dat bij de ontwikkeling van de relaties in de Rijn een ander team betrokken is geweest dan bij de ontwikkeling in de Maas. De afleiding van de Qf-relaties in de Rijn en de Maas sluit deels aan bij theoretische principes, maar wijkt hier op belangrijke punten ook vanaf. Daarnaast worden zowel voor de Rijn als de Maas resultaten uit modelsimulaties gebruikt ter aanvulling op de metingen. Omdat voor de modelkalibratie gebruik is gemaakt van afvoerreeksen uit Qf-relaties als modelinvoer zijn de modelresultaten echter niet onafhankelijk van de Qf-relatie. Hier wordt op dit moment geen rekening mee gehouden.

Op basis van deze studie hebben wij enkele beperkingen vastgesteld van de huidige methodiek. Samengevat zijn onze aanbevelingen:

1 Momenteel worden de **Qh-relaties en Qf-relaties niet gevalideerd**, waardoor de meerwaarde van de toegevoegde complexiteit (correcties) niet kan worden aangetoond en de voorspellende waarde onbekend is (voor methodiek, zie paragrafen 5.3.1 en 5.3.2). Wij raden aan om bij toekomstige actualisaties validatie uit te voeren.

2 **Er is een sterke wederzijdse afhankelijkheid tussen Qf-relatie en het numeriek model**, waardoor er geen zuivere lijn is tussen de 'waarheid' en het numeriek model, en actualisatie van de Qf-relatie erg arbeidsintensief is.

Wij raden aan om de afhankelijkheid te verbreken door het gebruik van alternatieve databronnen, het reduceren van de databehoefte of het gebruik van andere modellen (paragraaf 5.3.3).

3 **Er is geen uniforme aanpak voor datavalidatie**, waardoor de herkomst en onzekerheid van de data waarop de Qf-relaties worden gebaseerd onduidelijk is. Bovendien vindt bij **Eijsden en Borgharen-dorp geen continue afvoermeting** plaats. Wij raden aan, ondanks uitdagingen, ook op deze locaties afvoer te bepalen uit stroomsnelheidsmetingen om de onzekerheid van de Qf-relatie te verkleinen. Wij raden aan om verslaglegging van de methodiek om van ruwe meetdata naar invoer voor de Qf-relatie te komen standaard op te nemen in de documentatie, meetonzekerheid in te schatten, en te onderzoeken welk type metingen de onzekerheid in Qf-relaties het meeste kan reduceren (paragraaf 5.3.4).

4 **De Qf-relaties zijn erg complex en onderling inconsistent**, waardoor de operationele kennis over de relatie is versnipperd en het moeilijk is om te achterhalen hoe de methode in de praktijk wordt gebruikt. Wij raden aan om het beheer en onderhoud van de Qf-relatie te stroomlijnen, door het als een volwaardig model op te nemen in het instrumentarium van Rijkswaterstaat (paragraaf 5.3.5).

Los van de huidige beperkingen, merken we op dat in verschillende studies probabilistische methoden worden gebruikt die veel van bovenstaande problemen kunnen aanpakken. Wij raden aan om deze methode te overwegen als een nieuwe oplossingsrichting voor toekomstige ontwikkelingen (paragraaf 5.3.6). Tot slot raden wij aan om de kennis gebundeld in dit rapport te dissemineren in de relevante expertgroep (paragraaf 5.3.7).

Inhoud

	Samenvatting	**4**
1	**Inleiding**	**9**
1.1	Aanleiding	9
1.2	Doelstelling	9
1.3	Aanpak en afbakening	10
1.4	Team	10
1.5	Leeswijzer	10
2	**Theorie**	**11**
2.1	Methoden voor het berekenen van afvoer	11
2.1.1	Uit stroomsnelheidsmetingen	11
2.1.1.1	Vanaf een meetboot	11
2.1.1.2	Vanaf een vaste meetopstelling	12
2.1.2	Uit waterstandsmetingen	13
2.2	Fysische basis voor een Qh-relatie	13
2.2.1	Massa en impulsbalans 1D	13
2.2.2	Afleiding Chézy-vergelijking	14
2.2.3	Evenredigheid afvoer en waterdiepte	15
2.3	Opzetten van een Qh-relatie	15
2.3.1	Algemeen	15
2.3.2	Eenduidig	15
2.3.3	Meervoudig	16
2.4	Omgaan met niet-stationariteit	17
2.4.1	Algemeen	17
2.4.2	Hysterese	18
2.4.2.1	Formule van Jones	18
2.4.2.2	Variant van Ogink & Stolker	19
2.4.3	Seizoensafhankelijkheid	20
2.4.4	Bodemhoogteverandering	21
2.5	Omgaan met niet-uniformiteit	22
2.5.1	Algemeen	22
2.5.2	Stuwwerking	23
2.6	Omgaan met meetonzekerheid	24
2.6.1	Onnauwkeurigheid en standaardafwijking	24
2.6.2	Nauwkeurigheid bootmetingen	25
2.7	Methoden voor het afleiden van een Qh-relatie	25
2.7.1	Lineaire regressie	25
2.7.2	Bayesiaanse regressie	26
2.7.3	Metingen van meerdere locaties gebruiken	27
3	**Praktijk voor locaties in de Rijn**	**29**
3.1	Overzicht locaties en toepassingen	29

3.2 Qf-relaties Lobith en splitsingspunten 30
3.2.1 Historie 30
3.2.2 Globale afleidingsmethodiek en gebruik 31
3.2.3 Waterstands- en afvoermetingen 31
3.2.4 Correctie: hysterese 33
3.2.5 Correctie: stuwwerking 35
3.2.6 Correctie: bodemverandering en rivierwerken 37
3.2.7 Toevoegen extreme afvoeren 40
3.2.8 Afleiden stationaire Qh 40
3.2.9 Verificatie Qf-relatie 41

3.3 Tiel, Hagestein en Olst 41
3.3.1 Achtergrond 41
3.3.2 Globale afleidingstechniek 42
3.3.3 Waterstands- en afvoermetingen en datavalidatie 43
3.3.4 Correcties 44
3.3.5 Toevoegen extreme afvoeren 44
3.3.6 Afleiden stationaire Qh-relatie 44
3.3.7 Validatie Qf-relatie 46
3.3.8 Discussie 47

3.4 Qh-relaties Oberrhein (WSA Oberrhein) 47

4 Praktijk voor locaties in de Maas 49

4.1 Overzicht locaties 49

4.2 Eijsden 50
4.2.1 Achtergrond 50
4.2.2 Globale afleidingsmethodiek 51
4.2.3 Correctie waterstands- en afvoermetingen 52
4.2.4 Inverse routing afvoermetingen 53
4.2.5 Toevoegen hoge afvoeren op basis van simulaties en correcties 56
4.2.6 Afleiden stationaire Qh-relatie 58
4.2.7 Correctie voor momentane stuwbeheer 60
4.2.8 Correctie voor hysterese 62

4.3 St. Pieter 65
4.3.1 Algemeen 65
4.3.2 Correctie waterstands- en afvoermetingen 65
4.3.3 Toevoegen hoge afvoeren 65
4.3.4 Afleiden Qh-relatie 66

4.4 Borgharen Dorp 67
4.4.1 Algemeen 67
4.4.2 Correctie en routing afvoer 68
4.4.3 Afleiden Qh-relatie 68

4.5 Maaseik 69
4.5.1 Globale afleidingsmethodiek 69
4.5.2 Correctie voor stuwwerking 69
4.5.3 Afleiden Qh-relatie 70

4.6 Venlo 71
4.6.1 Algemeen 71
4.6.2 Correctie waterstands- en afvoermetingen 72
4.6.3 Toevoegen hoge afvoeren 72
4.6.4 Afleiden Qh-relatie 73

4.7 Megen 74
4.7.1 Algemeen 74
4.7.2 Correctie waterstands- en afvoermetingen 74
4.7.3 Toevoegen hoge afvoeren 75
4.7.4 Afleiden Qh-relatie 76
4.7.5 Correctie voor momentane stuwbeheer 77
4.7.6 Correctie voor hysterese 77

5 Discussie, conclusie en aandachtspunten 79

5.1 Discussie 79
5.1.1 Vergelijking methodieken Rijn en Maas 79
5.1.2 Vergelijking methodieken Nederland en Duitsland 80
5.1.3 Beperkingen aan dit rapport 80

5.2 Conclusie 80
5.2.1 Gedeelde kennisbasis 80
5.2.2 In kaart brengen van de beperkingen van de huidige praktijk 81

5.3 Aandachtspunten 83
5.3.1 Valideer Qf-relaties 83
5.3.2 Test correcties op toegevoegde waarde 83
5.3.3 Verbreek de onderlinge afhankelijkheid van numeriek stromingsmodel en Qf-relatie 83
5.3.4 Verbetering aan de hoeveelheid, kwaliteit van en informatie over metingen 84
5.3.5 Vergroot onderlinge consistentie en stroomlijn het beheer en onderhoud 84
5.3.6 Probabilistische methoden als nieuwe oplossingsrichting 85
5.3.7 Disseminatie 85

6 Referenties 86

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Rijkswaterstaat gebruikt statistische modellen om gemeten waterstanden in rivieren om te zetten naar afvoer. Wereldwijd wordt een stationaire relatie gebruikt, waarbij de afvoer volgt uit de gemeten waterstand op diezelfde locatie (Qh-relatie). Voor enkele locaties in Nederland zijn de stationaire Qh-relaties uitgebreid met functies met als doel om nauwkeuriger de afvoer te bepalen. Dergelijke meer ingewikkelde relaties worden Qf(unctie)-relaties genoemd. Op basis van de Qh-relaties en Qf-relaties wordt afvoer bepaald op verschillende locaties in de rivieren die bij Rijkswaterstaat in beheer zijn. Deze afvoertijdseries worden gebruikt in veel primaire processen, zoals bij het opzetten van numerieke riviermodellen. Daarnaast kan iedereen de reeksen eenvoudig downloaden via Rijkswaterstaat Waterinfo (https://waterinfo.rws.nl/).

Op sommige locaties is de Qh-relatie eenvoudig, zoals in de Rijntakken bij Tiel, Hagestein en Olst. Op die locaties wordt een Qh-relatie met 1 breedtesectie (eenduidig) gebruikt, die geldig is voor een bepaalde periode. In andere gevallen, bijvoorbeeld in de Maas bij Eijsden en in de Rijn bij Lobith, wordt de invloed van stuwwerking, bodemerosie en hysterese meegenomen middels correcties op de stationaire Qh-relatie, en wordt dus gesproken van een Qf-relatie. Hysterese is het verschijnsel dat voor een bepaalde waterstand de afvoer kan verschillen, bijvoorbeeld doordat de afvoer bij een stijgende waterstand vaak hoger is dan bij een dalende waterstand. Bij de correcties wordt vaak rekening gehouden met variabelen die met de tijd veranderen, zoals de verandering van de waterstand in de tijd voor hysterese. De Qf-relaties bij Lobith, Eijsden en de splitsingspunten van de Rijntakken zijn van bijzonder belang voor Nederland.

Bij het afleiden van de relaties zijn vele keuzes gemaakt die betrekking hebben op de selectie van meetgegevens, de homogenisatie (vertalen van een meting naar de periode waarvoor de relatie geldig is), het bepalen van de verschillende correctietermen, het uitvoeren van de regressie en het gebruik van numerieke modellen. Recent zijn door Rijkswaterstaat vragen gesteld over de huidige werkwijze. Zo is bekend dat de Qf-relaties voor de verschillende Rijntakken onderling geen sluitende waterbalans hebben en dat de relaties mede zijn bepaald op basis van numerieke modellen, terwijl de modellen worden gekalibreerd op afvoerreeksen uit Qf-relaties (er kan dus sprake zijn van een cirkelredenering). In de Maas spelen vergelijkbare vragen als bij Lobith en de splitsingspunten rondom het afleiden en gebruiken van de relaties. Daarom is er behoefte aan een langetermijnvisie op het vernieuwen en onderhouden van de Qf-relaties, waarbij huidige beperkingen aangepakt worden en de specifieke informatie- en praktijkbehoefte van Rijkswaterstaat centraal staat. Deze behoeftes omvatten bijvoorbeeld geldigheid voor het hele afvoerbereik en onderhoudbaarheid in het kader van een veranderend riviersysteem.

1.2 Doelstelling

Het doel van dit rapport is tweeledig:

- Ten eerste vergroot dit rapport de gedeelde kennisbasis over het afleiden van Qh-relaties en Qf-relaties door de theoretische basis en huidige praktijk in één rapport te beschrijven.
- Ten tweede draagt deze studie bij aan een langetermijnvisie door beperkingen van de methodiek voor het afleiden en onderhouden van Qh-relaties en Qf-relaties toe te lichten en beknopt alternatieve methoden te beschrijven.

1.3 Aanpak en afbakening

Voor de analyse van de huidige praktijk is voor de meeste locaties in de Rijn en Maas in Nederland de afleiding van de relatie samengevat op basis van bestaande rapporten. Voor de locatie Maaseik in de Maas is gebruik gemaakt van een rapport van de Vlaamse overheid. Daarnaast is de theorie onderliggend aan Qh-relaties en Qf-relaties samengevat en zijn recent ontwikkelde (probabilistische) methoden beschreven voor het afleiden van relaties. Op basis van de literatuur zijn inzichten gedeeld en zijn vragen bediscussieerd met Rijkswaterstaat. Voor de Rijn vond deze gezamenlijke reflectie in 2024 plaats. In 2025 vond een reflectie plaats met direct betrokkenen voor de locaties in de Maas. Op basis daarvan is een algemene reflectie gegeven, waarin de Rijn en Maas worden vergeleken. Hieruit volgen enkele aanbevelingen voor de Nederlandse praktijk.

Deze studie is vooral gericht op de afleiding, maar we hebben ook beknopt het gebruik van de Qh-relaties en Qf-relaties beschreven. Dat draagt bij aan het verspreiden van de kennisbasis buiten de groep deskundigen die de relaties afleidt en onderhoudt, en aan een langetermijnvisie.

1.4 Team

De theoretische basis is beschreven door Frans Buschman en aangevuld door Anna Kosters voor hysterese en stuwwerking. De afleiding van verschillende in gebruik zijnde relaties in de Rijn zijn uitgewerkt door Anna Kosters en Koen Berends. Voor locaties in de Maas hebben Frans Buschman en Anna Kosters de relaties samengevat.

Vanuit Rijkswaterstaat waren Dénes Beyer, Susanne Quartel (beide voor de Rijn) en Lianita Suryawinata (voor de Maas) direct betrokken bij het onderzoek. Rolf van der Veen (RURA-Arnhem) heeft zijn kennis en ervaring gedeeld in het opstellen en actualiseren van verschillende relaties. Daarnaast hebben Max Schropp en Daniël van Putten waardevolle feedback gegeven. Voor de Oberrhein heeft Torben Gerlach (afdeling hydrologie, WSA Oberrhein) informatie aangeleverd. Het project is geïnitieerd door Dénes Beyer (Rijkswaterstaat Oost-Nederland) en Koen Berends (Deltares).

1.5 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 behandelen we beknopt de theorie achter Qh-relaties en Qf-relaties en beschrijven we beknopt recente ontwikkelingen. In hoofdstuk 3 vatten we de relaties samen die in gebruik zijn voor locaties in de Rijn, en reflecteren we daarop. Net zo vatten we in hoofdstuk 4 de relaties samen voor locaties in de Maas. In de synthese, hoofdstuk 5, bediscussiëren we de methodiek in het algemeen, vergelijken we de relaties voor locaties in de Rijn en in de Maas, en beschrijven we conclusies en aanbevelingen.

2 Theorie

2.1 Methoden voor het berekenen van afvoer

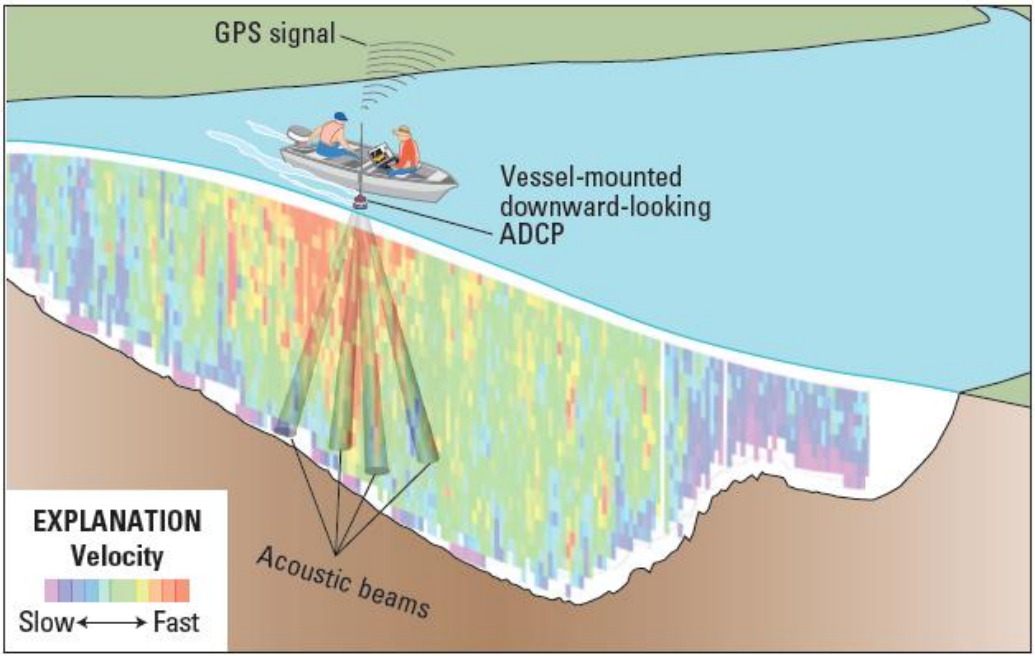
2.1.1 Uit stroomsnelheidsmetingen

Afvoer kan worden bepaald door stroomsnelheid in een dwarsdoorsnede van de rivier te meten en te integreren. Over het algemeen wordt niet in de hele dwarsdoorsnede stroomsnelheid gemeten. Er zijn verschillende methoden om op basis van gemeten stroomsnelheid in een deel van de doorsnede afvoer te bepalen. Deze methoden verschillen voor metingen vanaf een boot (niet-continue) en voor metingen vanaf een meetopstelling (in principe continue). Een afvoer die wordt gebaseerd op stroomsnelheidsmetingen wordt ook wel een direct bepaalde afvoer genoemd, in tegenstelling tot een indirect bepaalde afvoer die alleen op basis van waterstand wordt bepaald (een Qh-relatie of de ingewikkeldere Qf-relatie).

2.1.1.1 Vanaf een meetboot

Bij metingen vanaf een boot wordt over het algemeen in een groot deel van de dwarsdoorsnede stroomsnelheid gemeten. Daarbij is het relevant dat de meetmethode is veranderd vanaf 2002 (Berends et al., 2021). Voor die tijd werd afvoer bepaald door een stang met Ott-molens onder water te houden vanaf een stil liggende boot. Vanaf ongeveer 2002 werd als alternatief stroomsnelheid gemeten met een ‘Acoustic Doppler Current Profiler’ (ADCP) vanaf een boot, waarbij van de ene oever naar de andere oever wordt gevaren (Figuur 2-1). Door dwars op de stroomrichting te varen wordt in een doorsnede de 3D stroomsnelheid gemeten. Na extrapolatie van de stroomsnelheid naar het wateroppervlak, de bodem en de oevers kan de afvoer worden berekend door de stroomsnelheid in langsrichting te integreren over de doorsnede. Samen leveren deze stappen de onzekerheid van de afvoerbepaling. In het vervolg van dit rapport noemen we dit de meetonzekerheid. We gebruiken voorspelonzekerheid voor het verschil van een resultaat op basis van een model of relatie met metingen.

Door de afvoer over enkele overtochten te middelen wordt de meetonzekerheid verkleind, mits de afvoer niet varieert tijdens de overtochten. Het resultaat is een afvoer op een tijdstip. Wanneer de meting goed wordt uitgevoerd en verwerkt, is de meetonzekerheid ten opzichte van andere methoden klein mede doordat de stroomsnelheid in een groot deel van de doorsnede wordt gemeten. Een beperking van bootmetingen is dat een meetvaartuig en bemensing nodig zijn waardoor ze slechts incidenteel worden uitgevoerd. Een alternatief is om vanaf een veerpont stroomsnelheid te meten en automatisch te verwerken tot afvoer (Schroevers, 2014). Echter, voor zover we weten wordt deze meetmethode nog niet operationeel ingezet.



Figuur 2-1 Een voorbeeld van een stroomsnelheidsmeting vanaf een boot om afvoer te bepalen. Bron: Mueller et al. (2013).

2.1.1.2 Vanaf een vaste meetopstelling

Voor afvoerbepaling op basis van stroomsnelheid gemeten vanaf een vaste meetopstelling bestaan grofweg twee verschillende methoden. Voor beide methoden gaan we uit van de meest gangbare situatie, waarbij stroomsnelheid wordt gemeten op één hoogte, zoals bij een looptijdmeter (Akoestische Debietmeter, ADM) of bij een horizontale ADCP (HADCP). Bij deze meettechniek worden minimaal twee transducenten geplaatst op één hoogte: een op de ene oever en de andere onder een hoek van ongeveer 45 graden met de hoofdstroom aan de overzijde. De looptijd wordt gemeten tussen het uitzenden van een akoestisch signaal aan de ene zijde en het ontvangen van dit signaal aan de overzijde. Uit de looptijd en de geluidssnelheid bij de actuele temperatuur wordt de breedtegemiddelde snelheid op de specifieke hoogte bepaald. Door een tweede paar transducenten kruiselings (een zogenoemd meetkruis) te installeren kan bovendien variatie in stroomrichting worden bepaald.

De eerste methode voor afvoerbepaling is om de gemeten stroomsnelheid in langsrichting te extrapoleren naar het wateroppervlak, de bodem en de oevers en vervolgens over de doorsnede te integreren. De tweede methode is om de gemeten stroomsnelheid als index te gebruiken en te relateren aan de over de dwarsdoorsnede gemiddelde stroomsnelheid. Deze tweede methode wordt vaak gebruikt als alleen in een deel van de breedte stroomsnelheid is gemeten, zoals bij een HADCP. Hiervoor zijn afvoeren op basis van stroomsnelheidsmetingen in een groter deel van de dwarsdoorsnede nodig, zoals afvoer uit bootmetingen. Op basis van de natte doorsnede en een verband tussen de index-stroomsnelheid en de over de dwarsdoorsnede gemiddelde stroomsnelheid kan de afvoer worden berekend voor ieder tijdsinterval.

De meetonzekerheid van de resulterende afvoer volgens deze twee methoden verschilt per locatie en hangt af van de condities. Over het algemeen kan de afvoer alleen met een voldoende kleine meetonzekerheid worden bepaald uit metingen vanaf een vaste meetopstelling voor een bepaald afvoerbereik. Bijvoorbeeld is het nodig dat het stromingsprofiel is ontwikkeld tot een logaritmisch profiel: dit is vaak niet het geval bij de laagste afvoeren.

Een ander voorbeeld is dat de meetonzekerheid in de afvoer vaak te groot wordt, wanneer uiterwaarden mee stromen en geen stroomsnelheid gemeten wordt in de uiterwaarden.

2.1.2 Uit waterstandsmetingen

De afvoer kan ook indirect worden bepaald uit alleen de waterstand, wanneer op basis van eerdere afvoerbepalingen op basis van stroomsnelheidsmeting een relatie tussen waterstand en afvoer is bepaald. Dit is aantrekkelijk, omdat het meten van de waterstand eenvoudig continu uitgevoerd kan worden en aanzienlijk goedkoper is dan het bepalen van afvoer op basis van stroomsnelheidsmetingen met een vaste meetopstelling of vanaf een boot.

De relatie tussen afvoer en waterstand kan worden beschreven door stromingsvergelijkingen. Door de stromingsvergelijkingen op basis van enkele aannames te vereenvoudigen, kan een praktische relatie worden opgesteld die de gebruikers in staat stelt om de afvoer direct te bepalen uit (gemeten) waterstanden. Deze relaties worden Qh-relaties genoemd (naar het symbool *Q* voor afvoer en *h* voor waterstand).

2.2 Fysische basis voor een Qh-relatie

2.2.1 Massa en impulsbalans 1D

De afvoer in een doorsnede is afhankelijk van onder andere de waterdiepte in die doorsnede en het verhang. Om de afvoer en waterstand dynamisch op te lossen zijn twee vergelijkingen nodig. Omdat we afvoer willen bepalen door een doorsnede van de rivier, worden de breedte- en dieptegemiddelde impulsvergelijking en de massabalans gebruikt.

Voor een onsamendrukbare vloeistof is de dichtheid constant en reduceert de wet van massabehoud zich tot volumebehoud. We nemen aan dat geen zijdelingse uitwisseling van water plaats vindt, zoals in het specifieke geval van het volstromen van een uiterwaard. Het volumebehoud voor een dergelijke waterloop is:

$$B\frac{\partial(h-z_b)}{\partial t}+\frac{\partial Q}{\partial s}=0$$

met daarin (Figuur 2-2):

- B volledige breedte [m]
- h hoogte van het wateroppervlak t.o.v. een referentievlak [m]
- z_b hoogte van de bodem t.o.v. een referentievlak [m]
- t tijd [s]
- Q afvoer [m^3s^{-1}]
- s afstand in stroomafwaartse richting [m]

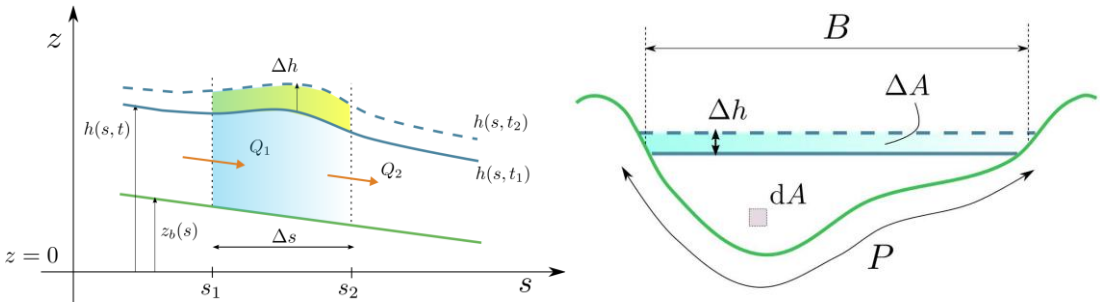
De impulsvergelijking in termen van afvoer is voor een doorsnede langs een recht gedeelte van de rivier (geen centrifugaaleffecten door bochtstroming) en voor een niet samendrukbare vloeistof:

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial s}\left(\frac{Q^2}{A}\right)+gA\frac{\partial h}{\partial s}+c_f\frac{|Q|Q}{AR}=0$$

met daarin:

- A stroomvoerend oppervlak [m^2]
- g zwaartekrachtversnelling [$m.s^{-2}$]
- c_f Darcy-Weisbach-weerstandscoëfficiënt [-]
- R hydraulische straal [m]

De eerste term is de verandering in de tijd van de over de dwarsdoorsnede gemiddelde stroomsnelheid maal het stroomvoerend oppervlak, de tweede term representeert advectie, de derde representeert het krachtsverschil door druk en de vierde is de wrijvingsterm. In de wrijvingsterm wordt de hydraulische straal gebruikt, welke is gedefinieerd als het stroomvoerend oppervlak gedeeld door de natte omtrek. Voor de Rijn en de Maas is de hydraulische straal nagenoeg gelijk aan de waterdiepte. Voor deze impulsvergelijking is aangenomen dat er geen windinvloed is en dat de wrijving wordt veroorzaakt door de bodem en niet door objecten als bijvoorbeeld boomstammen in de doorsnede.



Figuur 2-2 Links: Doorsnede langs een rivier met afvoer op locaties s_1 en s_2, en een stijgende waterstand. Rechts: Dwarsdoorsnede van een rivier bij dezelfde stijgende waterstand, waarbij de gehele doorsnede stroomvoerend is. Bron: Battjes en Labeur (2014).

2.2.2 Afleiding Chézy-vergelijking

Het oplossen van de massa- en impulsbalans tot afvoer en waterstand als functie van de tijd en langs de rivier kan zelfs breedte- en dieptegemiddeld (1D) alleen numeriek. Voor het berekenen van afvoer op basis van waterstand is het nodig twee aannames te doen, waarmee de vergelijkingen zo vereenvoudigen dat de relatie tussen waterstand en afvoer direct kan worden opgelost. Deze aannames zijn stationariteit en uniformiteit.
De impulsvergelijking reduceert door de aanname van stationariteit ($\frac{\partial Q}{\partial t} = 0$) tot:

$$\frac{\partial}{\partial s}\left(\frac{Q^2}{A}\right) + gA\frac{\partial h}{\partial s} + c_f\frac{|Q|Q}{AR} = 0$$

Bij uniformiteit veranderen de stroomsnelheid, de diepte en dus ook de afvoer langs de waterloop niet. Dat betekent ook dat het verhang ($-\frac{\partial h}{\partial s}$) gelijk is aan de bodemhelling (S_0). De aanname van uniformiteit ($\frac{\partial Q}{\partial s} = 0$ en $\frac{\partial h}{\partial s} = -S_0$) leidt voor afvoer in de positieve (stroomafwaartse) richting tot:

$$-gAS_0 + c_f\frac{Q^2}{AR} = 0$$

en voor de breedte- en dieptegemiddelde stroomsnelheid (U) tot:

$$U = \left(R\frac{gS_0}{c_f}\right)^{\frac{1}{2}}$$

Chézy introduceerde een dimensierijke coëfficiënt met eigen naam volgens $C = \sqrt{g/c_f}$. Dit geeft de “Wet van Chézy”:

$$U = \sqrt{\frac{g}{c_f}}\sqrt{RS_0} = C\sqrt{RS_0}$$

De Chézy-coëfficiënt (*C* met eenheid $[\mathrm{m}^{1/2}/\mathrm{s}]$) is een maat voor de ruwheid en tegelijk ook voor de intensiteit van de turbulentie (een hogere waarde betekent een gladdere bodem en een lagere ruwheid).

Voor de totstandkoming van de “Wet van Chézy” is het van belang dat Chézy als eerste een recht evenredig verband vond tussen het verhang en de stroomsnelheid in het kwadraat. Dat is een empirisch verband. Gebaseerd op dat empirische verband wordt in de impulsvergelijking (tweede vergelijking in paragraaf 2.2.1) aangenomen dat de weerstandsterm evenredig is met de stroomsnelheid in het kwadraat. Het gevolg is dat in de “Wet van Chézy” stroomsnelheid recht evenredig is met de wortel uit het verhang.

Op een vergelijkbare manier als voor de “Wet van Chézy” kan ook de empirische Manning-coëfficiënt $[\mathrm{s}/\mathrm{m}^{1/3}]$ worden afgeleid. Welke ruwheidsformulering wordt gebruikt hangt onder andere af van nationale tradities. In Nederland wordt voor rivieren traditioneel de Chézy-coëfficiënt gebruikt.

2.2.3 Evenredigheid afvoer en waterdiepte

Met de aannames van stationariteit en uniformiteit, kunnen we nu voor een doorsnede van een rivier een evenredigheid vinden. Wanneer de breedte veel groter is dan de waterdiepte is de hydraulische straal vrijwel gelijk aan de waterdiepte ($d = h - z_b$). Omdat afvoer gelijk is aan stroomsnelheid maal de natte doorsnede geldt dan :

$$Q = UA = C\sqrt{dS_0}Bd = C\sqrt{S_0}Bd^{3/2}$$

We zien dat afvoer door een rechthoekig dwarsprofiel recht evenredig is met de waterdiepte tot de macht 3/2:

$$Q \propto d^{3/2}$$

2.3 Opzetten van een Qh-relatie

2.3.1 Algemeen

Op een locatie in de rivier kan een stationaire Qh-relatie worden opgezet op basis van het gevonden theoretische verband tussen waterstand en afvoer op die locatie. De locatie waarvoor een Qh-relatie bepaald wordt dient zo gekozen te worden dat de stroming uniform en stationair is en er geen berging van stilstaand water plaats vindt. Een Qh-relatie kan ook worden gebruikt om de afvoer te bepalen voor hogere waterstanden dan voor de hoogste waterstand waarbij een afvoer uit bootmeting beschikbaar is. Echter levert een dergelijke extrapolatie naar dergelijke extreme waarden extra voorspelonzekerheid op.

2.3.2 Eenduidig

De meest eenvoudige Qh-relatie wordt een eenduidige relatie genoemd:

$$Q = a(h - h_0)^b$$

met daarin:

- h waterstand [m]
- h_0 waterstand waarbij juist geen afvoer meer plaats vindt [m]
- a constante
- b constante

Daarbij wordt de waterstand waarbij juist geen afvoer plaats vindt gebruikt: h_0. Het niveau h_0 zal op de meeste locaties gelijk zijn aan het bodemniveau, behalve als de bodemligging op de specifieke locatie lager is dan verder stroomafwaarts.

De constanten *a* en *b* en de h_0 worden bepaald door de afvoer uit metingen (meestal uit bootmetingen) op die locatie te relateren aan de waterstand op dat moment.
Het resultaat is een machtsfunctie ook wel afvoerkromme genoemd. Volgens de Chézy-vergelijking voor rechthoekige dwarsprofielen is de verwachting voor parameter *b* een waarde van 3/2. Echter, de waarde is afhankelijk van de vorm van het profiel en lokale omstandigheden en kan afwijken van deze verwachtingswaarde.

2.3.3 Meervoudig

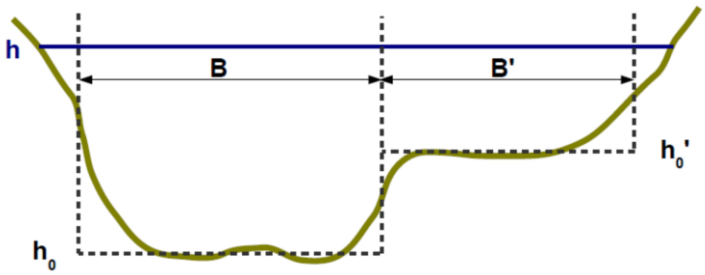
Wanneer de breedte te veel varieert met de waterhoogte, zoals in het geval van de aanwezigheid van uiterwaarden, wordt vaak een meervoudige Qh-relatie bepaald. Dat kan op meerdere manieren. Figuur 2-3 geeft een voorbeeld van een doorsnede waarin een uiterwaard mee stroomt vanaf een bepaalde waterhoogte. Een meervoudige Qh-relatie kan in dit geval uit 2 gecombineerde eenduidige relaties bestaan:

$$Q = a(h - h_0)^b + a'(\max\,(h - h_0'\,, 0))^{b'}$$

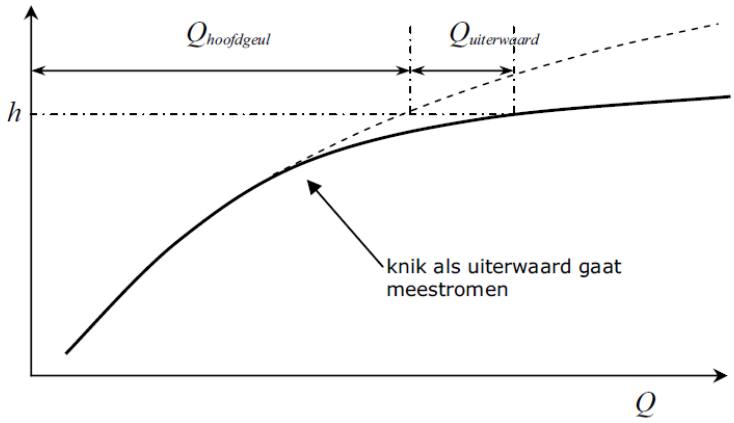
Of in algemene vorm:

$$Q = \sum_{n=0} a_n(\max(h - h_n\,, 0))^{b_n}$$

Merk op dat in het voorbeeld met twee secties 6 parameters bepaald moeten worden. De verwachting voor *a'/a* is volgens de theorie gelijk aan *B'/B* wanneer hydraulische ruwheid en bodemhelling in beide secties gelijk zijn. Figuur 2-4 toont een mogelijk resulterende Qh-relatie. Wanneer de uiterwaard begint mee te stromen is de Qh-relatie vlakker, onder andere door de grotere breedte.



Figuur 2-3 Twee secties in een dwarsdoorsnede met links de hoofdgeul en rechts een uiterwaard. Bron: Mansanarez (2016).



Figuur 2-4 Effect van het mee stromen van de uiterwaard in de Qh-relatie, waarbij vanaf de waterstand waar de 'knik' staat aangegeven de afvoer over de hele breedte sneller toeneemt met de waterstand dan voor de hoofdgeul alleen. Bron: Stowa (2009).

2.4 Omgaan met niet-stationariteit

2.4.1 Algemeen

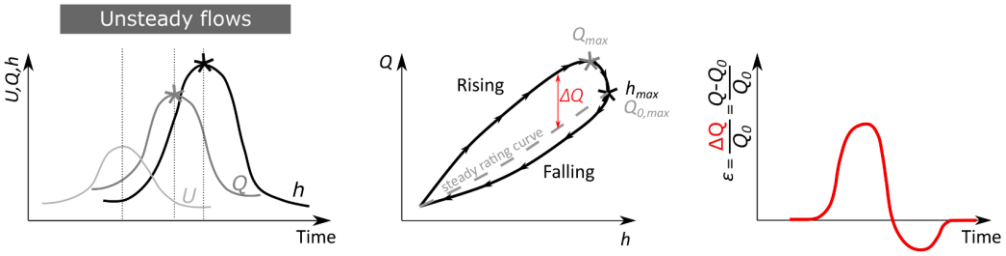
In werkelijkheid zijn waterstand en afvoer in de rivier vaak niet-stationair. We gaan in deze paragraaf in op hoe je met dergelijke niet-stationariteit kunt omgaan.
We beperken ons daarbij tot niet-stationariteit van het systeem. Op meerdere tijdschalen treedt niet-stationariteit op in het watersysteem:

- Op de kortste tijdschaal (uren-dagen):
  - na regenval in (een deel van) het stroomgebied kan de afvoer toenemen.
  - door getij of stormopzet kan de afvoer worden beïnvloed.
  - Hoewel getij voor de afvoermeetlocaties benedenstrooms in Nederland (bijvoorbeeld Hagestein) wel van belang kan zijn, beschouwen we deze variatie niet verder. Voor de verder bovenstrooms gelegen locaties is getij niet van belang.
- Op middellange termijn (dagen-maanden):
  - is er seizoensafhankelijkheid in de hydraulische ruwheid, bijvoorbeeld onder invloed van vegetatiegroei.
  - kan het doorstroomoppervlak variëren als gevolg van sedimentatie en erosie tijdens een hogere afvoer(periode).
  - kan de hydraulische ruwheid veranderen door duinvorming tijdens een hogere afvoer(periode).
- Op de lange termijn (jaren):
  - speelt netto bodemhoogteverandering een rol.
  - kunnen hoge afvoeren vaker voorkomen door klimaatverandering.
  - kan de afvoer op benedenstroomse locaties vaker worden beïnvloed door de zeewaterstand, als gevolg van zeespiegelstijging.
  - veranderen ingrepen in de rivier mogelijk de relatie tussen afvoer en waterstand op een locatie.

We gaan in op het effect van drie fenomenen op de Qh-relatie die betrekking hebben op deze verschillende tijdschalen, en hoe deze fenomenen worden meegenomen in correcties op de Qh-relatie, waardoor het een Qf-relatie wordt.

2.4.2 Hysterese

Onder het begrip hysterese verstaan we hier het feit dat de afvoer bij een bepaalde waterstand groter is in de aanloop naar een hoogwaterpiek dan in de fase na de piek (Figuur 2.5). Kort gezegd komt dit doordat het waterstandsverhang voor de piek groter is dan na de piek.



Figuur 2-5 Een voorbeeld van het effect van een afvoergolf op de Qh-relatie Bron: Perret et al. (2022).

2.4.2.1 Formule van Jones

Om dit effect te kunnen kwantificeren gaan we uit van de vergelijkingen voor massa- en impulsbehoud (zie paragraaf 2.2.1), waarbij we de lokale en advectieve versnellingsterm in de impulsbalans verwaarlozen:

$$B\frac{\partial(h-z_b)}{\partial t}+\frac{\partial Q}{\partial s}=0$$

$$gA\frac{\partial h}{\partial s}+c_f\frac{Q^2}{AR}=0$$

Deze vereenvoudiging is geldig wanneer de snelheid en de waterstand als gevolg van het hoogwater slechts langzaam veranderen. Dit is bij hoogwatergolven op de grote rivieren in Nederland doorgaans het geval. Met $h=d+z_b$ en $\frac{\partial z_b}{\partial s}=-S_0$ kunnen we de impulsvergelijking ook schrijven als:

$$\frac{\partial d}{\partial s}-S_0+c_f\frac{Q^2}{gA^2R}=0$$

Voor uniforme stroming is $\frac{\partial d}{\partial s}=0$ en geldt, zo zagen we ook al in paragraaf 2.2.2:

$$Q_0=A\sqrt{\frac{g}{c_f}}\sqrt{RS_0}$$

Waarin Q_0 de afvoer bij uniforme en stationaire stroming aanduidt. Door de twee bovengenoemde vergelijkingen te combineren krijgen we:

$$Q=Q_0\sqrt{1-\frac{1}{S_0}\frac{\partial d}{\partial s}}$$

Hiermee kunnen we het effect van hysterese uitdrukken als een correctie op de afvoer bij uniforme stroming. De afvoer bij uniforme stroming volgt in de praktijk vaak uit een Qh-relatie. De waarde van $\frac{\partial d}{\partial s}$ bepalen is in de praktijk echter problematischer, omdat in dat geval de waterstand op twee locaties tegelijk gemeten moet worden. Daarom wordt vaak een extra vereenvoudiging geïntroduceerd, die gebaseerd is op de aanname van uniforme stroming. Omdat we weten dat de stroming bij een hoogwatergolf niet echt uniform kan zijn spreken we hier van de **aanname van quasi-uniforme stroming**.

Deze aanname is geldig wanneer het verschil tussen het waterstandsverhang en het bodemverhang klein is, ofwel bij lange en lage hoogwatergolven. In dit geval kunnen we de vergelijking voor massabehoud schrijven als:

$$\frac{\partial d}{\partial t} + \frac{1}{B}\frac{\mathrm{d}Q_0}{\mathrm{d}d}\frac{\partial d}{\partial s} = 0$$

Uit deze vergelijking blijkt dat voor een waarnemer die beweegt met een snelheid gelijk aan $\frac{1}{B}\frac{dQ_0}{dd}$ geen veranderingen in de waterdiepte d optreden (en als gevolg van quasi-uniformiteit ook niet in de afvoer Q). Daarmee kunnen we de term $\frac{1}{B}\frac{dQ_0}{dd}$ definiëren als de snelheid van de hoogwatergolf c. Daarmee kunnen we schrijven:

$$\frac{\partial d}{\partial s} = -\frac{1}{c}\frac{\partial d}{\partial t} = -\frac{1}{c}\frac{\partial h}{\partial t}$$

Hierin hebben we gesteld dat $\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial d}{\partial t}$. Dit is geldig wanneer wordt verondersteld dat $\frac{\partial z_b}{\partial t} = 0$, dus geen verandering van de bodemhoogte tijdens de hoogwatergolf. Als we dit weer invullen in de vergelijking van Q ten opzichte van Q_0 krijgen we:

$$Q = Q_0\sqrt{1 + \frac{1}{S_0 c}\frac{\partial h}{\partial t}}$$

Dit wordt de formule van Jones genoemd, naar Jones (1916). Uit de formule kunnen we opmaken dat het effect van hysterese toeneemt naarmate het bodemverhang S_0 kleiner is en de stijgsnelheid van de waterstand $\frac{\partial h}{\partial t}$ groter.

De formule van Jones is populair omdat het effect van hysterese hiermee eenvoudig kan worden bepaald op basis van een tijdserie van gemeten waterstanden tijdens een hoogwatergolf, de bodemtopografie en een schatting van de golfsnelheid. Het Jones-effect is overigens niet de enige bron van hysterese. Hysterese ontstaat ook doordat beddingvormen zich met vertraging aanpassen aan de stroming, waardoor de hydraulische ruwheid verandert.

2.4.2.2 Variant van Ogink & Stolker

Voor Q_0 zijn we tot nu toe uitgegaan van stationaire en uniforme stroming. Ogink & Stolker (2004) stellen echter dat de stroming in de Rijn onder stationaire condities niet uniform is, vanwege de wisselende dwarsdoorsnede langs de rivier bij hoogwater. Dit betekent dat de advectieve versnellingsterm in de impulsvergelijking niet verwaarloosd mag worden:

$$\frac{\partial}{\partial s}\left(\frac{Q^2}{A}\right) + gA\frac{\partial h}{\partial s} + c_f\frac{Q^2}{AR} = 0$$

Ofwel:

$$\frac{1}{gA}\frac{\partial}{\partial s}\left(\frac{Q^2}{A}\right) + \frac{\partial h}{\partial s} + c_f\frac{Q^2}{gA^2R} = 0$$

En door de eerste term te herschrijven:

$$\frac{1}{2g}\frac{\partial}{\partial s}\left(\frac{Q^2}{A^2}\right) + \frac{\partial h}{\partial s} + c_f\frac{Q^2}{gA^2R} = 0$$

$$\frac{1}{2g}\frac{\partial}{\partial s}\left(\frac{Q^2}{A^2}\right)+\frac{\partial d}{\partial s}-S_0+c_f\frac{Q^2}{gA^2R}=0$$

Dan wordt gesteld dat $\frac{\partial d}{\partial s}$ bestaat uit twee bijdragen: één als gevolg van de niet-uniformiteit bij stationaire stroming, en één als gevolg van de niet-uniformiteit van de afvoergolf:

$$\frac{1}{2g}\frac{\partial}{\partial s}\left(\frac{Q^2}{A^2}\right)+\left.\frac{\partial d}{\partial s}\right|_{stationair}+\left.\frac{\partial d}{\partial s}\right|_{afvoergolf}-S_0+c_f\frac{Q^2}{gA^2R}=0$$

Vervolgens wordt het energieverhang bij stationaire stroming gedefinieerd als:

$$-S_e=\frac{1}{2g}\frac{\partial}{\partial s}\left(\frac{Q^2}{A^2}\right)+\left.\frac{\partial d}{\partial s}\right|_{stationair}-S_0$$

Zodat, bij stationaire stroming:

$$-S_e+c_f\frac{Q^2}{gA^2R}=0$$

$$Q_0=A\sqrt{\frac{g}{c_f}}\sqrt{RS_e}$$

En bij niet-stationaire stroming:

$$-S_e+\left.\frac{\partial d}{\partial s}\right|_{afvoergolf}+c_f\frac{Q^2}{gA^2R}=0$$

Zodat:

$$Q=Q_0\sqrt{1-\frac{1}{S_e}\left.\frac{\partial d}{\partial s}\right|_{afvoergolf}}$$

En, volgens dezelfde afleiding als eerder:

$$Q=Q_0\sqrt{1+\frac{1}{S_e c}\frac{\partial h}{\partial t}}$$

Deze variant werd voor het eerst voorgesteld door Wiggins (1925). In de praktijk wordt deze variant zelden gebruikt, omdat de bepaling van het energieverhang niet eenvoudig is.

2.4.3 Seizoensafhankelijkheid

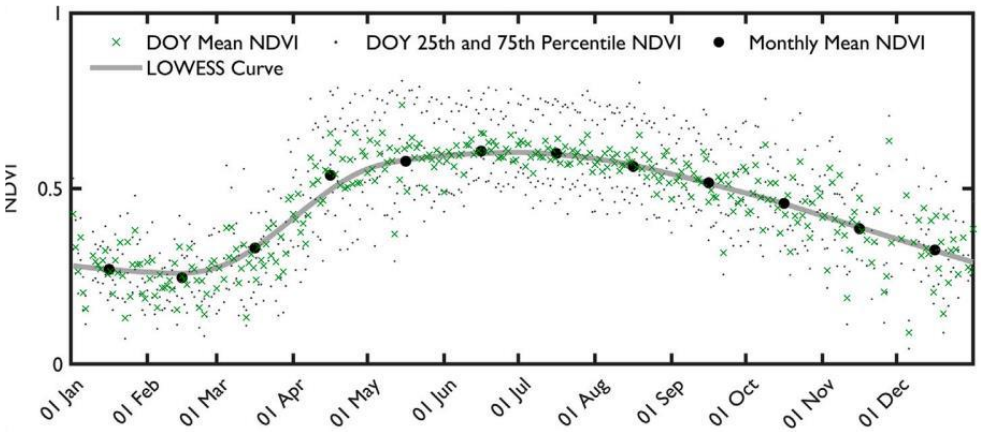
De hydraulische ruwheid door vegetatie onder water en in overstroomde uiterwaarden varieert met het seizoen. Over het algemeen is de hydraulische ruwheid in de winter kleiner dan in de zomer, doordat vegetatie in de zomer groeit en bladeren heeft en in de winter is gestorven of geen blad heeft. Onderhoud zoals maaien speelt ook een belangrijke rol. Het is bekend dat vegetatie met blad kan leiden tot een hogere waterstand in vergelijking met de situatie zonder blad, maar niet tot hoeveel waterstandsverhoging deze seizoensafhankelijkheid leidt (Berends et al. 2023). Modellen geven de seizoensafhankelijkheid weer, maar dit effect kan door de meetonzekerheid die inherent is aan het doen van metingen in de rivier niet worden bevestigd.

Voor een waterloop in Frankrijk van ongeveer 25 m breed en met vegetatiegroei onder water in een groot deel van de waterloop, is een seizoensafhankelijke Qh-relatie ontwikkeld (Perret et al., 2022). De relatieve fout in afvoer reduceerde hierdoor van gemiddeld 50% tot 20%. Voor bredere rivieren met beperkte vegetatiegroei in de hoofdgeul is het effect naar verwachting minder groot, maar het is evident dat de variatie van vegetatie met het seizoen en het onderhoud van begroeiing een rol spelen bij verhoogde afvoer.

Seizoensafhankelijkheid door vegetatiegroei (Figuur 2-6) werkt door in de ruwheid van de uiterwaarden. Voor een tweevoudige Qh-relatie kan dit worden ingebouwd door de introductie van een tijdsafhankelijke coëfficiënt *a'*. Deze coëfficiënt beschrijft bodemverhang, ruwheid en geometrie. Omdat bodemverhang en ruwheid ongewijzigd blijven, kan een seizoensafhankelijke Qh-relatie als volgt worden beschreven:

$$Q = a(h - h_0)^b + \phi(t)c'(h - h_0{}')^{b'}$$

Waarbij $\phi(t)$ de tijdsafhankelijke ruwheid is en c' de ongewijzigde verzamelparameter voor verhang en geometrie. De vorm van $\phi(t)$ kan bijvoorbeeld een harmonisch signaal zijn (Berends et al. 2023).



Figuur 2-6 Seizoensafhankelijkheid van vegetatie in termen van 'Normalised Difference Vegetation Index' (NDVI) in de rivier de Po. Bron: Boothroyd et al. (2021).

2.4.4 Bodemhoogteverandering

Wanneer door erosie en sedimentatie een netto bodemhoogteverandering optreedt, verandert h_0 en zal ook de waterstand veranderen. Bodemhoogteverandering kan op verschillende manieren opgenomen worden in een Qh-relatie. Uit Berends et al. 2021 blijkt dat h_0 voor de Waal kan worden gemodelleerd als een lineaire functie. In Gensen et al. 2022 is een trend voor de lokale bodemhoogteverandering toegevoegd voor verschillende Rijntakken van de vorm:

$$Q(h,t) = a(h - (b_c + \beta t))^b + a'(h - h_0{}')^{b'}$$

met daarin:

- b_c bodemhoogte in hoofdgeul, waarbij geen afvoer plaats vindt op 1-1-1988 [m NAP]
- β bodemhoogteverandering per jaar [m/jaar]
- t tijd vanaf 1-1-1988 [jaar]

Bij de Pannerdense Kop werden voor de jaarlijkse bodemhoogteverandering voor ieder van de takken waarden tussen -0,02 en -0,01 m/jaar, overeenkomstig met trends uit metingen.

Het effect van de vaste jaarlijkse netto bodemerosie is duidelijk zichtbaar bij een vergelijking van de Qh-relatie voor 1988 met die van 2018 (Gensen et al., 2022). De vergelijking met gemeten waterstand en afvoer afzonderlijk voor die jaren laat zien dat dit een verbetering is.

Een tweede-orde-effect kan optreden wanneer bodemverandering niet lokaal is, maar een uitdrukking van een aanpassing van het verhang over een groter gebied. Wanneer alleen in de beschouwde dwarsdoorsnede erosie of sedimentatie optreedt en niet langs het hele traject, is bovendien de aanname van uniformiteit mogelijk niet langer geldig (zie paragraaf 2.5).

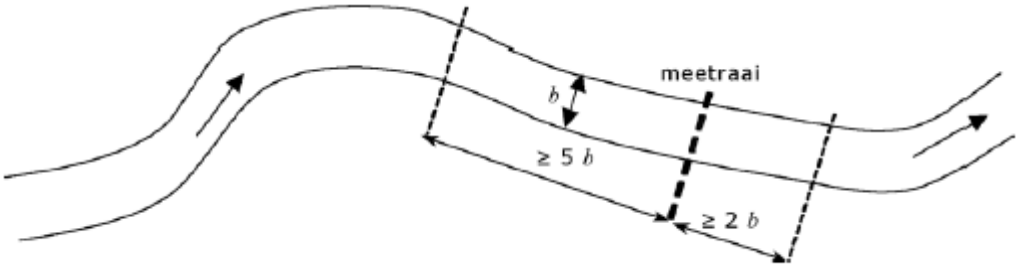
Vanwege bodemhoogteverandering door allerlei oorzaken is het nodig de Qh-relatie regelmatig te actualiseren. In de literatuur voor rivieren en beken wordt vaak genoemd dat een Qh-relatie ieder jaar geactualiseerd moet worden. Daarbij is het goed om te benadrukken dat voor een bepaling van de Qh-relatie alleen afvoermetingen kunnen worden gebruikt van de actuele situatie, ofwel passend bij de actuele bodemligging. Met andere woorden, wanneer gemeten afvoer uit een periode met bijvoorbeeld een hogere bodemligging worden gebruikt, zal de Qh-relatie leiden tot een systematische onderschatting van de afvoer. Om toch afvoermetingen te kunnen gebruiken van langer geleden worden correcties toegepast, alsof die afvoer optrad in de huidige situatie. Een dergelijke correctie leidt tot aanvullende voorspelonzekerheid van de Qh-relatie, maar kan nuttig zijn wanneer in recente jaren het aantal extreme (hoge en lage) afvoeren beperkt was.

2.5 Omgaan met niet-uniformiteit

2.5.1 Algemeen

Voor een eenduidige of meervoudige Qh-relatie zoals hierboven beschreven is verondersteld dat de stroming en diepte uniform zijn langs de rivier rondom de locatie waar de relatie voor wordt opgesteld. De aanname van uniformiteit betekent ook dat het waterspiegelverhang gelijk blijft aan de helling van de bodem rondom de locatie waar de Qh-relatie voor wordt opgesteld. Dit betekent dat er op die locatie geen invloed mag zijn van benedenstrooms door bijvoorbeeld een stuw, een vernauwing van de rivier of een zijrivier die benedenstrooms uitstroomt. Ook een splitsingspunt benedenstrooms (zoals voor Lobith) kan leiden tot opstuwing, wanneer bijvoorbeeld in een tak de waterdiepte onevenredig klein is of de weerstand hoog is.

In werkelijkheid zijn er niet veel locaties in een rivier waar de stroming over het gehele waterstandsbereik uniform kan worden verondersteld. In een laaglandrivier zal een relatief recht gedeelte van de rivier met vergelijkbare bodemligging in de stromingsrichting zo goed mogelijk voldoen aan uniformiteit (Figuur 2-7). Aan de andere kant is in een laaglandrivier de invloed van benedenstrooms groter dan in een rivier met groter verhang. Een stelregel is de locatie voor de Qh-relatie zo te kiezen dat de rivier vijfmaal de breedte bovenstrooms en tweemaal benedenstrooms recht is en het dwarsprofiel in dit gedeelte hetzelfde is. Een locatie in een recht gedeelte van de rivier kan nog altijd worden beïnvloed door opstuwing benedenstrooms. Kan dat niet vermeden worden, dan is het nodig voor de opstuwing te corrigeren met een waterstand die ter hoogte van de opstuwing is gemeten (Rantz, 1982). Hoe de waterstand die benedenstrooms wordt gemeten gebruikt wordt in de relatie is afhankelijk van de locatie, en mogelijk ook afhankelijk van het afvoerregime.



Figuur 2-7 Een meetlocatie die zo goed mogelijk voldoet aan uniformiteit in een rivier. Bron: Stowa (2009)

2.5.2 Stuwwerking

Zowel bij Lobith in de Rijn als bij Eijsden in de Maas wordt de Qh-relatie beïnvloed door stuwwerking benedenstrooms (van respectievelijk stuw Driel en stuw Borgharen). Door stuwwerking wordt het waterstandsverhang immers beïnvloed. Net als voor hysterese kunnen we deze invloed eenvoudig kwantificeren wanneer we de lokale en advectieve versnellingstermen in de impulsbalans verwaarlozen:

$$gA\frac{\partial h}{\partial s} + c_f\frac{Q^2}{AR} = 0$$

$$\frac{\partial h}{\partial s} + c_f\frac{Q^2}{gA^2R} = 0$$

Als we van deze vergelijking uitgaan voor een referentiesituatie waarvoor we de afvoer Q_r en het verhang $S_r = \frac{\partial h_r}{\partial s}$ kennen, en voor een tweede situatie waarvoor we het verhang $S = \frac{\partial h}{\partial s}$ gemeten hebben, kunnen we de vergelijking voor beide situaties als volgt herschrijven:

$$Q = A\sqrt{\frac{g}{c_f}}\sqrt{RS}$$

$$Q_r = A\sqrt{\frac{g}{c_f}}\sqrt{RS_r}$$

En vervolgens kunnen we deze vergelijkingen als volgt combineren:

$$\frac{Q}{Q_r} = \frac{A\sqrt{\frac{g}{c_f}}\sqrt{RS}}{A\sqrt{\frac{g}{c_f}}\sqrt{RS_r}}$$

Als we er vervolgens vanuit gaan dat c_f, A en R voor beide situaties gelijk zijn, kunnen we stellen dat:

$$Q = Q_r\sqrt{\frac{S}{S_r}}$$

Deze vergelijking is dus alleen geldig wanneer de stuw benedenstrooms slechts kleine veranderingen in snelheid en waterstand introduceert (zodat de versnellingstermen verwaarloosd kunnen worden), en wanneer de waterdiepte (bij $R \approx d$) in beide situaties gelijk is.

Om de vergelijking in de praktijk te kunnen gebruiken als correctie van de afvoer uit een Qh-relatie (Qf-relatie) moeten gelijktijdig metingen van waterstand (h_1) en afvoer beschikbaar zijn op de locatie van de Qh-relatie, en benedenstrooms daarvan (maar wel bovenstrooms van de stuw) een tweede waterstandsmeting (h_2). Hiermee kunnen de volgende stappen worden doorlopen:

1 Eerst wordt uit de waterstandsmetingen het verhang S_r als functie van h_1 bepaald. S_r kan bijvoorbeeld het gemiddelde verhang bij een bepaalde waterstand zijn (aangezien het verhang als gevolg van stuwwerking natuurlijk kan variëren), of het verhang in de situatie zonder stuwinvloed.

2 Vervolgens wordt voor elke [Q,h_1,h_2]-meting de referentieafvoer bepaald via:

$$Q_r = Q\sqrt{\frac{S_r}{S}}$$

3 Nu kan een relatie tussen Q_r en h_1 worden opgesteld door een lijn te fitten door de [Q_r,h_1]-combinaties. Nu kennen we zowel Q_r als S_r als functie van h_1.
4 Vervolgens kan voor nieuwe metingen [h_1,h_2] de afvoer worden bepaald via:

$$Q = Q_r\sqrt{\frac{S}{S_r}}$$

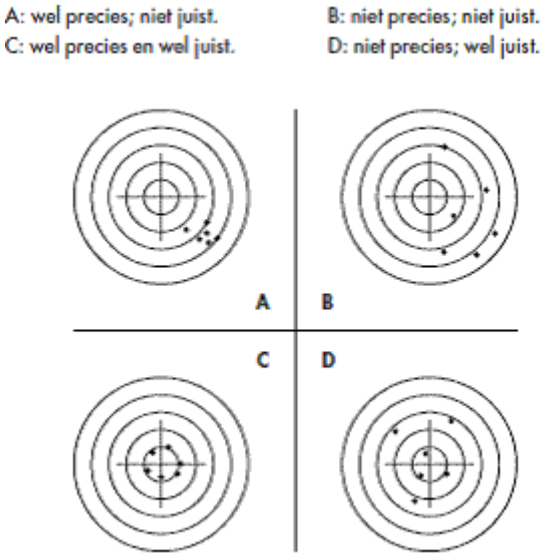
2.6 Omgaan met meetonzekerheid

2.6.1 Onnauwkeurigheid en standaardafwijking

Een afvoer berekend op basis van stroomsnelheidsmetingen heeft een onzekerheid door onzekerheid in de metingen en door extrapolatie van stroomsnelheid en plaats meetonzekerheid. De meetonzekerheid kan je uitdrukken in een betrouwbaarheidsinterval. De definitie van het betrouwbaarheidsinterval is het gebied waarbinnen met een bepaalde kans de werkelijke waarde voor de afvoer ligt. Vaak wordt dit interval gegeven relatief ten opzichte van de werkelijke waarde. Als voorbeeld geven we het betrouwbaarheidsinterval voor een **relatieve meetonzekerheid van 5%**: [0,95×Q;1,05×Q]. In dit geval valt de voorspelde afvoer in 19 van de 20 gevallen binnen het betrouwbaarheidsinterval en 1 op de 20 keer erbuiten. In de praktijk kennen we de werkelijke waarde van de afvoer niet. De werkelijke waarde kan dus niet gebruikt worden om de meetonzekerheid te bepalen.

Vaak wordt in de praktijk de term onnauwkeurigheid gebruikt om de meetonzekerheid aan te geven. Hoe kleiner de onnauwkeurigheid, hoe kleiner de totale fout. Een methode om de onnauwkeurigheid van een serie voorspelde afvoeren (bijvoorbeeld met een Qh-relatie) te bepalen is om ze te vergelijken met de direct bepaalde afvoer op dat moment. Vaak wordt de onnauwkeurigheid van een dergelijke serie van voorspelde afvoeren bepaald door de wortel van de gemiddelde kwadratische afwijking (root mean square error; RMSE) te bepalen.
De nauwkeurigheid van een serie metingen bestaat uit juistheid en precisie, en is voor een serie metingen met dezelfde verwachtingswaarde weergegeven in Figuur 2-8. Juistheid geeft de mate van overeenstemming aan tussen de (gemiddelde) waarde die verkregen wordt uit een reeks waarnemingen en de werkelijke waarde, ofwel de systematische fout. Precisie geeft de mate waarin de metingen onderling verschillen, ofwel de toevallige fout. Wenselijk is dat de serie juist en precies is (C in Figuur 2-8) en daarna het meest wenselijk is dat door middeling van de metingen een juist resultaat wordt verkregen (D in Figuur 2-8).

In het geval dat er geen systematische afwijking is (C en D in Figuur 2-8) en sprake is van een normale verdeling, is de RMSE gelijk aan de **standaardafwijking**. Het 95%-betrouwbaarheidsinterval dat hierbij hoort is [Q-2σ; Q+2σ]. Een onnauwkeurigheid uitgedrukt als standaardafwijking (5% van het gemiddelde van de meetserie) heeft dus een twee keer zo breed betrouwbaarheidsinterval als het betrouwbaarheidsinterval bij een meetonzekerheid van 5%. Dit onderstreept het belang om expliciet te zijn hoe een meetonzekerheid is ingeschat.



Figuur 2-8 Onnauwkeurigheid bestaat uit juistheid en precisie. Bron: Milieubelastende activiteiten lucht | Informatiepunt Leefomgeving.

2.6.2 Nauwkeurigheid bootmetingen

De bepaling van afvoer op basis van bootmetingen op een geschikte locatie (paragraaf 2.3.1) wordt over het algemeen gezien als de meest nauwkeurige methode. Het is dus niet zinvol om onnauwkeurigheid van bootmetingen in te schatten door te vergelijken met andere metingen. Vaak wordt de afvoer uit bootmetingen gebruikt als referentie om andere metingen mee te vergelijken, en natuurlijk om de Qh-relaties af te leiden.

Voor de afvoer uit bootmetingen is het mogelijk om de onzekerheid van een meting in te schatten op basis van optelling van meetonzekerheid in de metingen (van stroomsnelheid en waterstand), de condities tijdens de metingen, de extrapolatie over de doorsnede en de duur van de inwinperiode. Bij een grotere variatie in afvoer tijdens de inwinperiode en bij minder frequent varen van een overtocht zal de meetonzekerheid groter zijn.

De precisie van het resultaat wordt groter door middeling van (bijvoorbeeld 10) overtochten. Echter is dit geen garantie voor een juist resultaat. Daarnaast kan de variatie in afvoer per overtocht gebruikt worden als indicatie van de meetonzekerheid van het gemiddelde resultaat. Bij grote verschillen tussen de afvoer per overtocht is de onnauwkeurigheid van de resulterende afvoer groter.

2.7 Methoden voor het afleiden van een Qh-relatie

2.7.1 Lineaire regressie

Vaak worden de parameters van de Qh-relatie of Qf-relatie voor een locatie deterministisch bepaald met lineaire regressie. Bij deze vorm van regressie wordt de kwadratische fout geminimaliseerd. Het resultaat hangt af van de set metingen die wordt gebruikt.

Bij het gebruik van de absolute afvoer (en niet de relatieve fout) is het gewicht van een afvoer in het hoge bereik groter dan gemiddeld, doordat de absolute fout over het algemeen groter is dan voor gemiddeld afvoerbereik. Het resultaat is een machtsfunctie die monotoon toeneemt met de waterstand. Een regressie geeft niet direct de voorspelonzekerheid van deze relatie als functie van de waterstand weer, maar de totale restfout.

Er is brede consensus in de literatuur dat het belangrijk is om voorspelonzekerheid voor afvoeren bepaald met een Qh-relatie (of Qf-relatie) te kwantificeren. Onder andere geeft de voorspelonzekerheid inzicht in de betrouwbaarheid bij extrapolatie van de Qh-relatie (of Qf-relatie). Kiang et al. (2018) beschrijven verschillende methoden om deze voorspelonzekerheid te bepalen. Eén methode is regressie op basis van de fouten ten opzichte van metingen, maar deze methode wordt niet vaak toegepast (waarschijnlijk bij gebrek aan goede referentiemetingen). Ook wordt als methode genoemd de vergelijking met hydraulische modellen, maar die modellen zijn gekalibreerd op metingen en dus niet onafhankelijk.

2.7.2 Bayesiaanse regressie

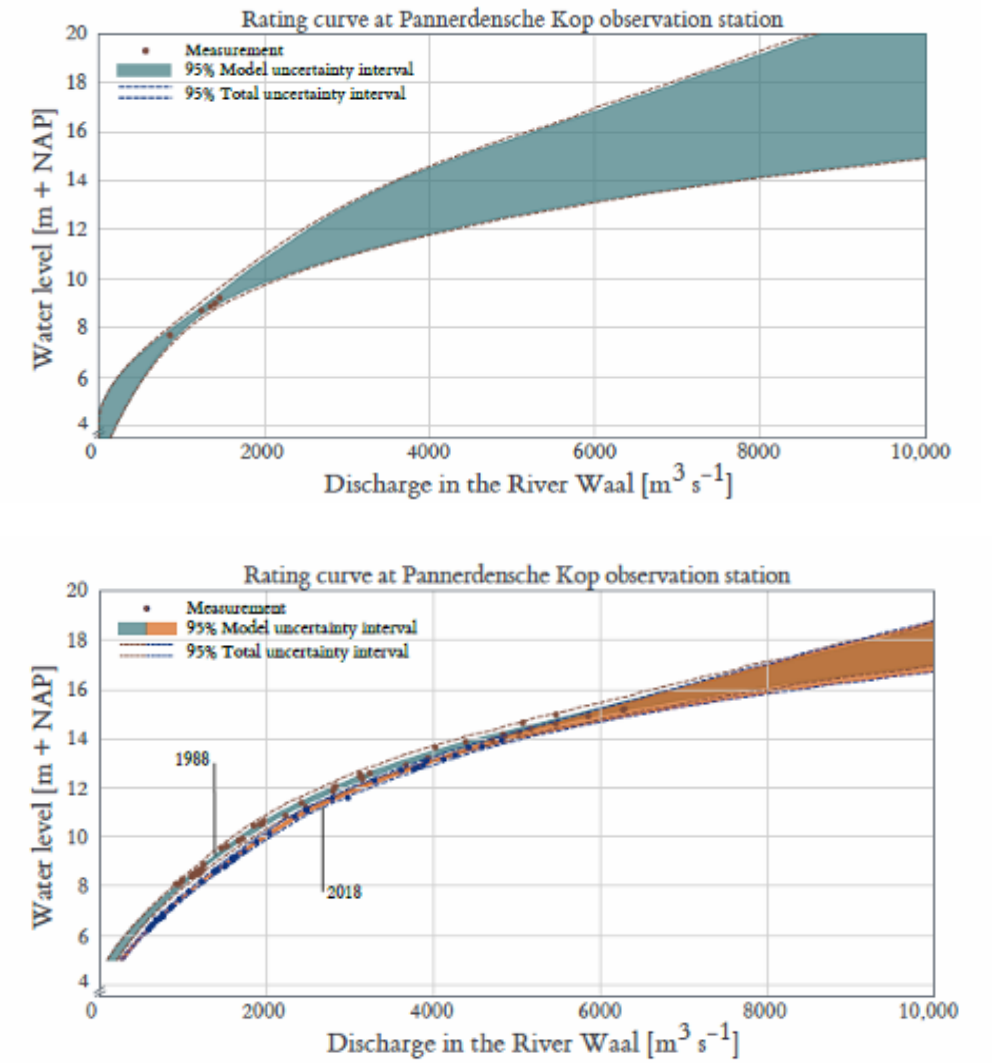
Het voornaamste verschil tussen Bayesiaanse regressie (probabilistisch) met lineaire regressie (deterministisch) is dat de parameters die gekalibreerd moeten worden (bv. *a*, *b*, *a*' en *b*') geen getallen zijn, maar kansdichtheidsfuncties (Le Coz et al. 2014; Berends et al. 2021). Daardoor zijn de parameters zelf onzeker: ook na kalibratie. Het voordeel hiervan is dat de modelonzekerheid (de voorspelonzekerheid in de afvoer ten gevolge van de voorspelonzekerheid in de parameters van de Qh-relatie) expliciet wordt bepaald. In termen van de Qh-relatie werkt Bayesiaanse regressie dus op dezelfde formule:

$$Q = a(h - h_0)^b + a'(h - h_0{}')^{b'}$$

maar zijn de parameters $\theta(a, b, a', b', h_0, h_0{}')$ kansdichtheidsfuncties. Deze functies kunnen op verschillende manieren bepaald worden. Berends et al. (2021) gebruiken een numerieke integratiemethode: het zogenaamde Markov Chain Monte Carlo algoritme.

Voor locaties in de Rijntakken hebben Berends et al. (2021) een drievoudige Qh-relatie afgeleid, grofweg overeenkomend met de drie breedtesecties hoofdgeul, kribsectie en de uiterwaarden. Per jaar is opnieuw het Bayesiaanse model bepaald. Als initiële kansverdeling is een verdeling gebruikt rondom de deterministisch bepaalde waarde (met 5/3 voor *b*, *b'* en *b''*, de drie gebruikte machtparameters, overeenkomstig de Manning-ruwheid). De bodemligging per sectie was vrij, maar kon niet met elkaar overlappen. Om een idee te geven van het verkregen resultaat, toont Figuur 2-9 twee resulterende Qh-relaties voor twee afzonderlijke jaren. Voor 1997 zijn er maar 5 metingen, waardoor het 95%-betrouwbaarheidsinterval buiten het bereik van deze 5 metingen erg breed wordt.

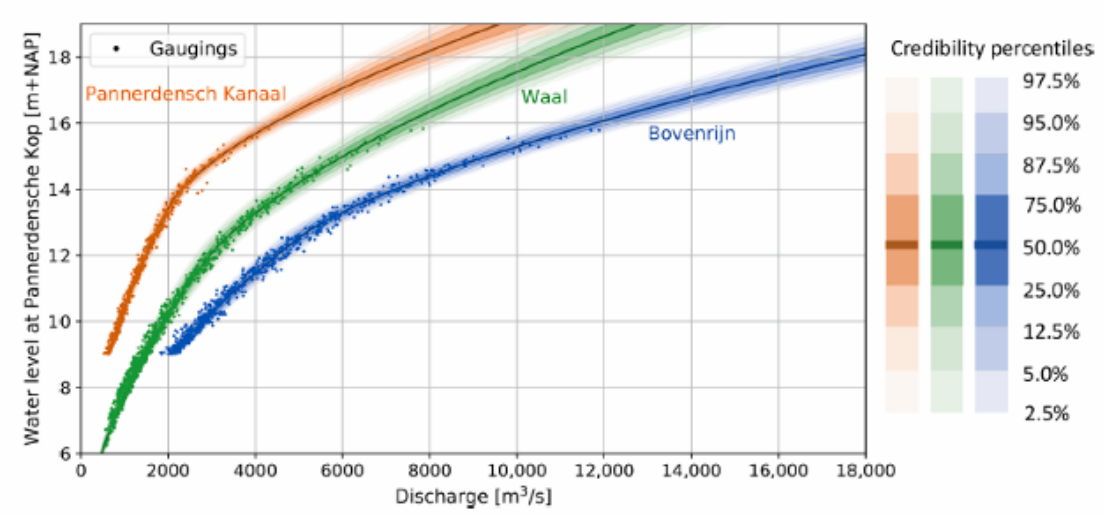
Voor 1988 en 2018 zijn er >40 metingen en is het betrouwbaarheidsinterval kleiner (Figuur 2-9 onder). Mogelijk is de meetonzekerheid groter in 1988, omdat toen nog met Ott-molens stroomsnelheid werd gemeten en in 2018 met een ADCP. Uit de twee betrouwbaarheidsintervallen kunnen we direct afleiden dat tot 6000 m^3/s de waterstand significant lager is in 2018, zoals verwacht door bodemerosie. Echter, voor afvoeren groter dan 8000 m^3/s overlappen de twee betrouwbaarheidsintervallen en kunnen we deze conclusie niet langer trekken. Met andere woorden, de voorspelonzekerheid door extrapolatie is in dat geval groter dan de veronderstelde lagere waterstand die het resultaat is van voortschrijdende erosie in de tussenliggende periode.



Figuur 2-9 Boven: de voorspelonzekerheid uit een drievoudige Qh-relatie voor 1997 met slechts 5 afvoermetingen; Onder: voor 1988 en 2018 (met 50 en 44 afvoermetingen, respectievelijk). Bron: Berends et al. (2021).

2.7.3 Metingen van meerdere locaties gebruiken

Een speciale methode die nog niet vaak werd toegepast in de literatuur is mogelijk relevant voor Nederland. Bij splitsingen zijn de condities vaak niet uniform, bijvoorbeeld doordat de waterstand wordt beïnvloed door afvoer of opstuwing in de andere benedenstroomse tak. Wanneer toch dichtbij de splitsing een Qh-relatie wordt afgeleid voor ieder van de drie takken, is het goed om op te leggen dat de massabalans rondom de splitsing sluitend is: de afvoer bovenstrooms van de splitsing is dan in evenwicht met de som van de afvoeren benedenstrooms, behalve de (tijdelijke) berging in tussenliggend gebied, op voorwaarde dat er geen aanstroom is via andere riviertakken, grondwater of regenval. Daarbij is het goed te realiseren dat doorgaans in iedere tak de afvoer op een verschillend tijdstip wordt gemeten. De afvoer moet geïnterpoleerd of geëxtrapoleerd worden naar hetzelfde tijdstip om de massabalans op te kunnen stellen. Bij het bepalen van Qh-relaties bij riviersplitsingen hebben Gensen et al. (2020) gebruik gemaakt van het opleggen van een massabalans (Figuur 2-10). Merk op dat bij het Pannerdensch Kanaal en de Bovenrijn de laagste waterstanden uit de dataset zijn gehaald, omdat in dat regime de stuwen bij Driel een verstorend effect hebben.



Figuur 2-10 Combinatie van tweevoudige Qh-relatie voor de Pannerdense kop. Bron: Gensen et al. (2020).

3 Praktijk voor locaties in de Rijn

In dit hoofdstuk beschrijven we hoe Qh-relaties en Qf-relaties in de praktijk zijn afgeleid voor een selectie van locaties in de Rijn in Nederland en in Duitsland.

3.1 Overzicht locaties en toepassingen

In tegenstelling tot waterstand, is afvoer in natuurlijke systemen niet eenvoudig te meten. Op de meeste locaties zijn daarom slechts enkele tientallen metingen per jaar beschikbaar, terwijl er vaak behoefte is aan een continue afvoerreeks. Op basis van de incidenteel uitgevoerde afvoermetingen wordt de relatie tussen afvoer en continu gemeten waterstand bepaald (zie hoofdstuk 2 voor de theoretische achtergrond), die vervolgens in de praktijk wordt gebruikt om de afvoer te bepalen.

In de Rijntakken wordt afvoer op de meeste locaties bepaald met een Qh-relatie of Qf-relatie over het gehele afvoerbereik. Bij Hagestein en Driel wordt afvoer bij lage waterstanden direct gemeten met een ADM bovenstrooms van de stuw, en is een Qh-relatie afgeleid voor een locatie benedenstrooms van de stuw (zie paragraaf 3.3). De met Qh-relaties en Qf-relaties bepaalde afvoer is beschikbaar in het Landelijk Meetnet Water (LMW) en kan door iedereen worden gedownload van Rijkswaterstaat Waterinfo. De relaties worden voor veel toepassingen gebruikt.

In het operationele systeem van Rijkswaterstaat (RWsOS) wordt een Qf-relatie gebruikt om de afvoer te bepalen ten behoeve van rapportage (tijdseries, en online berichtgeving). De afvoerreeksen die als bovenstroomse randvoorwaarde van de operationele modellen worden gebruikt, worden afgeleid uit de Qf-relatie op basis van de waterstandsverwachting bij Lobith. Ook worden voorspelmodellen (zoals het Rijn-Maasmondingmodel) van randvoorwaarden voorzien met Qf-relaties. Overigens wordt vanwege praktische redenen voor operationele toepassing (RWsOS) een variant van de Qf-relatie gebruikt. Dit betreft een getabelleerde versie (het Excel model is omgezet naar lookup-tables) *zonder* hysteresecorrectie (de Jones-coëfficiënt wordt op 1 gezet). Daarnaast worden de Qh-relaties en Qf-relaties voor allerlei andere toepassingen gebruikt, zoals modelontwikkeling (kalibratie, validatie), (model)onderzoek en het opstellen van betrekkingslijnen.
Tabel 3-1 somt de locaties per Rijntak van boven- naar benedenstrooms op. Vanwege vergelijkbare methodiek beschrijven we hierna eerst de locaties dichtbij Lobith (paragraaf 3.2), vervolgens de locaties Tiel, Hagestein en Olst (paragraaf 3.3) die benedenstrooms liggen, en als laatste geven we beknopt de generieke afleiding weer voor de OberRhein (paragraaf 3.4).

Tabel 3-1 Overzicht van type relatie (Qh of Qf) en jaar van actualisatie in LMW voor de locaties in de Rijntakken waar afvoer wordt bepaald met de relatie.

Locatie	Actuele relatie in meetnet	Opmerking
Lobith-Bovenrijn	Qf-relatie 2014	De Qf-relatie is geactualiseerd in 2020 (maar niet geïmplementeerd in LMW)
Pannerdense Kop-Waal	Qf-relatie 2018	Svašek Hydraulics (2019) beschrijft de meest actuele relatie (wel in LMW)
Pannerdense Kop-Pannerdensch Kanaal	Qf-relatie 2025	AHA (2024): Naar aanleiding van Krib- en Oeververlaging Pannerdens Kanaal is een actualisatie gemaakt.

Locatie	Actuele relatie in meetnet	Opmerking
Pannerdense Kop-Bovenrijn	Qf-relatie 2025	”
Tiel- Waal	Qh-relatie 2010	HKV (2010). Er is ook een actuelere relatie (RURA-Arnhem, 2013), maar deze is niet ingebouwd.
IJsselkop-IJssel	Qf-relatie 2018	Svašek Hydraulics (2019)
IJsselkop-Nederrijn	Qf-relatie 2018	Svašek Hydraulics (2019)
Olst- IJssel	Qh-relatie 2010	De relatie is feitelijk stationair en is geactualiseerd in 2013 (maar niet geïmplementeerd)
Hagestein- Lek	Qf-relatie 2018	De locatie is *na* de stuw (dus ongestuwd) De relatie is niet gebaseerd op metingen, enkel modelsimulaties.

3.2 Qf-relaties Lobith en splitsingspunten

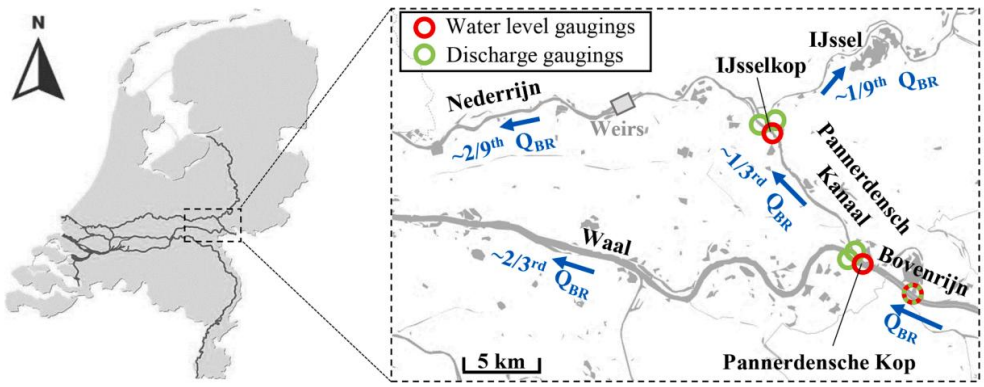
3.2.1 Historie

Rijkswaterstaat gebruikt Qf-relaties sinds 2009 in de praktijk. In dat jaar heeft HKV (2009) in opdracht van Rijkswaterstaat Qf-relaties afgeleid voor de volgende locaties (zie Figuur 3-1):

- Lobith
- Pannerdense Kop-Waal
- Pannerdense Kop-Pannerdensch Kanaal
- IJsselkop-Nederrijn
- IJsselkop-IJssel

De methode die HKV (2009) gebruikt voor het opstellen van de Qf-relaties is gebaseerd op Haskoning (1998) en Ogink & Stolker (2004), die de methode van Haskoning verbeterd hebben. In 2019 heeft Svašek Hydraulics de methode voor het afleiden van de Qf-relaties herzien. Daarnaast is de afleiding van de relaties gebaseerd op een nieuwe dataset uit de periode 2008 – 2018 aangevuld met extreme gebeurtenissen uit eerdere jaren.

We richten onze beschouwing met name op de methodiek van Svašek Hydraulics (2019), omdat deze de basis vormt voor de vigerende Qf-relaties. In plaats van de referentie ‘Svašek Hydraulics (2019)’ gebruiken we in het vervolg de verkorte titel Qf2018 om naar dit rapport te verwijzen.

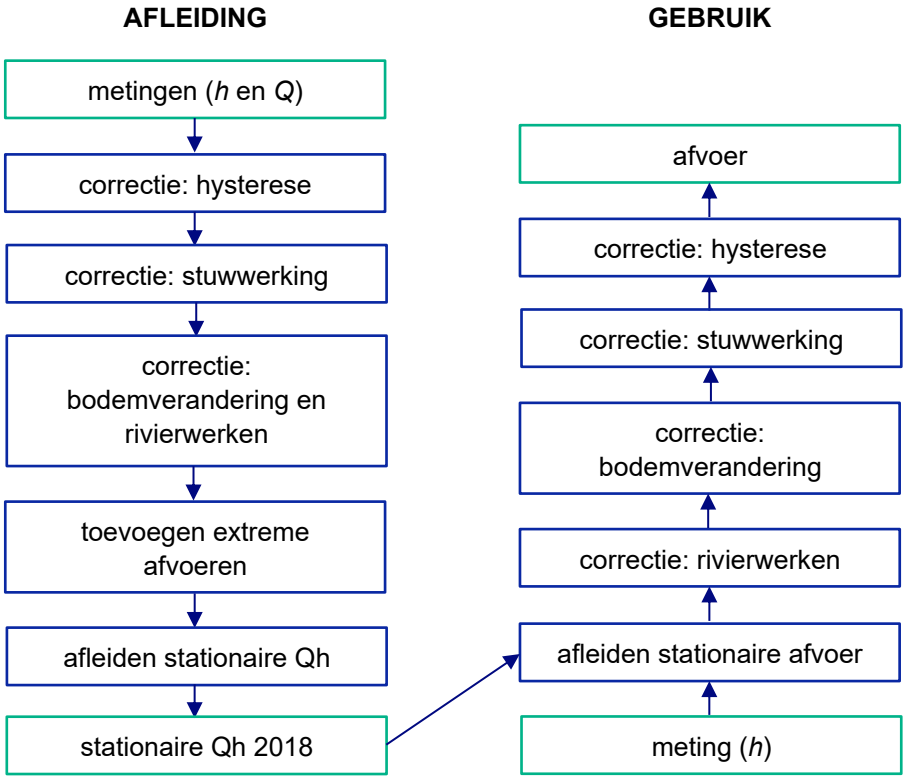


Figuur 3-1 Meetlocaties gebruikt voor het opstellen van Qf-relaties in de Rijn. Bron: Gensen et al. (2022).

3.2.2 Globale afleidingsmethodiek en gebruik

De globale afleidingsmethodiek en het gebruik van de Qf-relaties is schematisch weergegeven in Figuur 3-2. Het idee van deze methodiek is als volgt: in uniforme en stationaire condities bestaat er een vaste relatie tussen waterstanden en afvoeren op een bepaalde locatie (zie paragraaf 2.2.2). Op de Qf-locaties in de Rijn wordt echter niet aan deze condities voldaan. Stuwwerking (niet-uniformiteit) zorgt ervoor dat de vorm van de relatie afwijkt van die uit de theorie, en hysterese, ingrepen in de rivier en bodemveranderingen (niet-stationariteit) zorgen ervoor dat de relatie door de tijd heen verandert. Door op een dataset van gemeten afvoeren en waterstanden correcties uit te voeren voor deze invloedsfactoren wordt een 'stationaire en uniforme' dataset verkregen waaruit een Qh-relatie kan worden afgeleid. Dit wordt 'homogenisatie' genoemd. Door aan de dataset $[Q,h]$-punten uit modelsimulaties toe te voegen kan het bereik van de dataset worden vergroot. De resulterende Qh-relatie is geldig voor één (arbitrair) moment in de tijd (in dit geval 1 mei 2018). De Qh-relatie en de bijbehorende correcties worden vervolgens gebruikt om voor andere momenten in de tijd een Qh-relatie af te leiden. Door de correctie voor stuwwerking wel of niet toe te passen kan een relatie voor zowel werkende als open stuwen worden verkregen.

In de volgende paragrafen wordt elke stap in de linker kolom van Figuur 3-2 nader toegelicht en bediscussieerd.



Figuur 3-2 Afleiding en gebruik Qf2018 (aangepast van Beyer & Quartel, 2023).

3.2.3 Waterstands- en afvoermetingen

In Qf2018 bijlage A beschrijft Rijkswaterstaat de aanlevering van de meetgegevens voor de afleiding van de Qf-relaties. In principe wordt gebruik gemaakt van data uit de periode 2008 – 2018. Hieraan zijn extra metingen toegevoegd voor hoog- en laagwatercondities om het meetbereik te vergroten. Daarnaast zijn metingen met geopende stuwen toegevoegd.

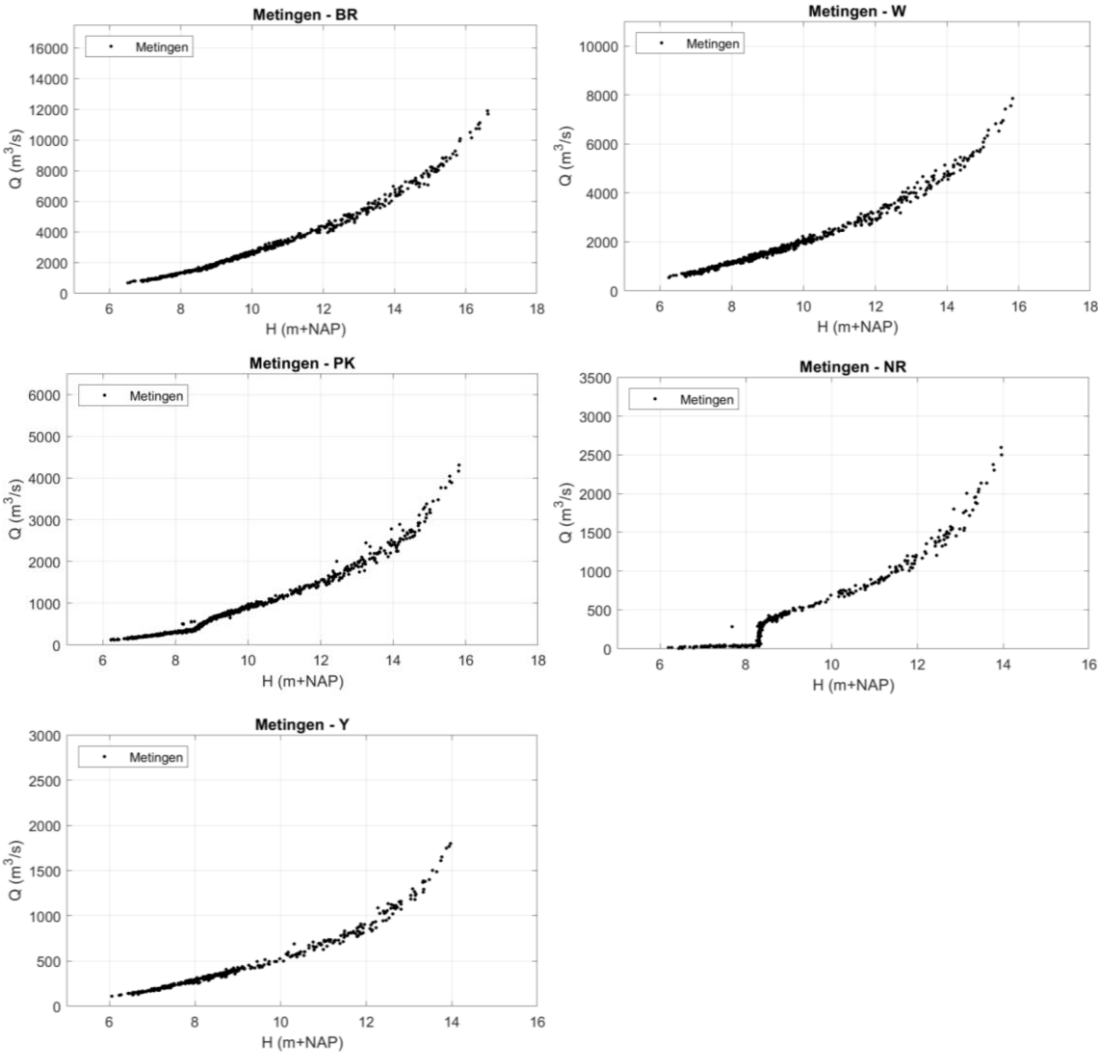
Dit gebeurt bij strenge vorst, wanneer bij het dichtlaten van de stuwen het risico bestaat dat deze vastvriezen en daardoor niet meer getrokken kunnen worden. Met deze metingen kan de correctie voor stuwwerking worden gevalideerd.

Bij de dataset maakt Rijkswaterstaat de volgende opmerkingen die informatie geven over de meetonzekerheid van de afvoerdata (de onzekerheid van de bijbehorende waterstandsmetingen wordt hiermee vergeleken klein geacht):

- In 2001 is Rijkswaterstaat overgegaan van een Ott-molen naar een Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) om de afvoer te meten. Dit heeft invloed op de nauwkeurigheid van de metingen (zie paragraaf 2.6.1). Deze invloed is in de metingen echter niet zichtbaar. De reden die hiervoor wordt aangedragen is dat de onzekerheid van de meetmethode klein is vergeleken met de meetonzekerheid van de afvoer in het deel van de dwarsdoorsnede dat niet bemeten kan worden. Deze afvoer wordt geschat door middel van extrapolatie. Met name de schatting van de afstand tot de oever is een belangrijke foutbron in de extrapolatie. Hoe kleiner de afvoer, hoe groter – relatief – de onzekerheid die hierdoor wordt geïntroduceerd in de metingen. Dit betekent dat de meetonzekerheid op de takken met minder afvoer (bijvoorbeeld de IJssel) groter is dan op de takken met meer afvoer (bijvoorbeeld de Boven-Rijn), en dat de meetonzekerheid bij laagwater groter is dan bij hoogwater.
- Andere factoren die zorgen voor meetonzekerheid zijn een bewegende bodem (morfologische activiteit) en verstorende invloeden zoals van scheepvaart.
- Sinds 2004 werkt Rijkswaterstaat met een protocol voor de debietbepaling met ADCP. Naar verwachting is de onzekerheid van de metingen sindsdien 4 à 5 procent bij hoge afvoeren (waarbij de extrapolatie minder uitmaakt). Vóór 2004 is de meetonzekerheid groter.
- Bij hoogwater wordt voor de splitsingspunten gebruik gemaakt van de aanname van behoud van massa (waterbalans) om de nauwkeurigheid van de metingen te vergroten.
- Rijkswaterstaat heeft voor verschillende condities vaste afvoermeetlocaties aangewezen. Voor Qf2018 zijn alleen afvoermetingen aangeleverd die binnen 1 km van deze officiële meetlocaties zijn uitgevoerd. Dit betekent onder andere dat alle metingen op de Nederrijn tussen gemaal Kandia en de IJsselkop zijn verwijderd.

De resulterende dataset is zichtbaar in Figuur 3-3.

Discussie
In de selectie van data zijn veel metingen afgevallen vanwege verwachte onnauwkeurigheid. De vraag is of de nauwkeurigheid van de Qf-relaties hiermee toeneemt. Mogelijk kan het effect van bijvoorbeeld trends in bodemveranderingen – een proces dat speelt op een relatief grote tijdschaal – beter worden gekwantificeerd wanneer data over een langere periode worden bekeken.



Figuur 3-3 Aangeleverde metingen per Qf-locatie. Bron: Svašek Hydraulics (2019).

3.2.4 Correctie: hysterese

De eerste stap in het homogeniseren van de aangeleverde dataset is het corrigeren voor hysterese. Als basis hiervoor wordt de variatie van Ogink & Stolker (2004) op de formule van Jones (1916) gebruikt, zie paragraaf 2.4.2:

$$Q = Q_0 \sqrt{1 + \frac{1}{S_e c} \frac{\partial h}{\partial t}}$$

Met S_e het energieverhang bij stationaire stroming:

$$S_e = -\frac{1}{2g} \frac{\partial}{\partial s}(u^2) - \frac{\partial h}{\partial s}\Big|_{stationair}$$

Door het gebruik van het energieverhang is het niet eenvoudig om de hysteresecorrectie alleen op basis van metingen te bepalen. Voor Qf2018 zijn vier methoden getest:

1 De term $S_e c$ wordt bepaald op basis van metingen en bovengenoemde vergelijking van Ogink & Stolker (2004). Q_0 wordt bepaald door een Qh-relatie te fitten door de metingen, die gecorrigeerd zijn voor stuwwerking, bodemveranderingen en rivierwerken. Q en $\frac{\partial h}{\partial t}$

volgen direct uit de gecorrigeerde metingen, waarbij $\frac{\partial h}{\partial t} \approx \frac{\Delta h}{\Delta t}$ met Δt = 4 uur zodat korte fluctuaties minder invloed hebben. Vanwege de onzekerheid van de metingen, de uitgevoerde correcties en de Qh-relatie kon de term $S_e c$ hiermee echter niet eenduidig bepaald worden (zie Figuur 3-4).

2 De parameters S_e en c worden direct bepaald uit stationaire modelsimulaties in WAQUA, met $c = \frac{\partial Q}{\partial A}$ en

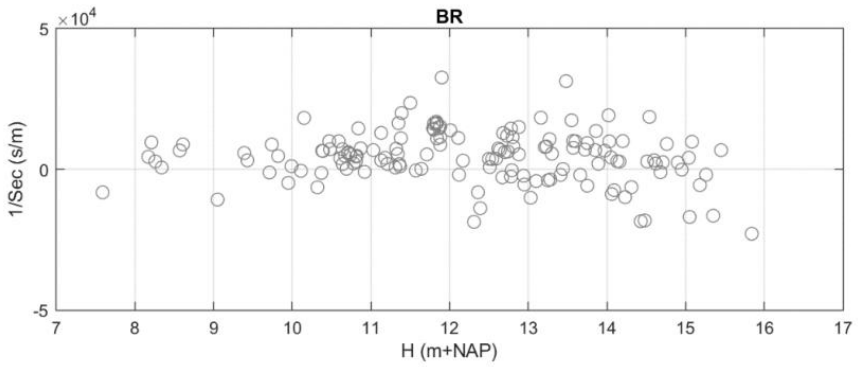
$$S_e = \frac{h_1 + \frac{u_1^2}{2g} - \left(h_2 + \frac{u_2^2}{2g}\right)}{\Delta s}$$

Hierbij zijn de locaties (1) en (2) op twee kilometer afstand van elkaar gekozen.

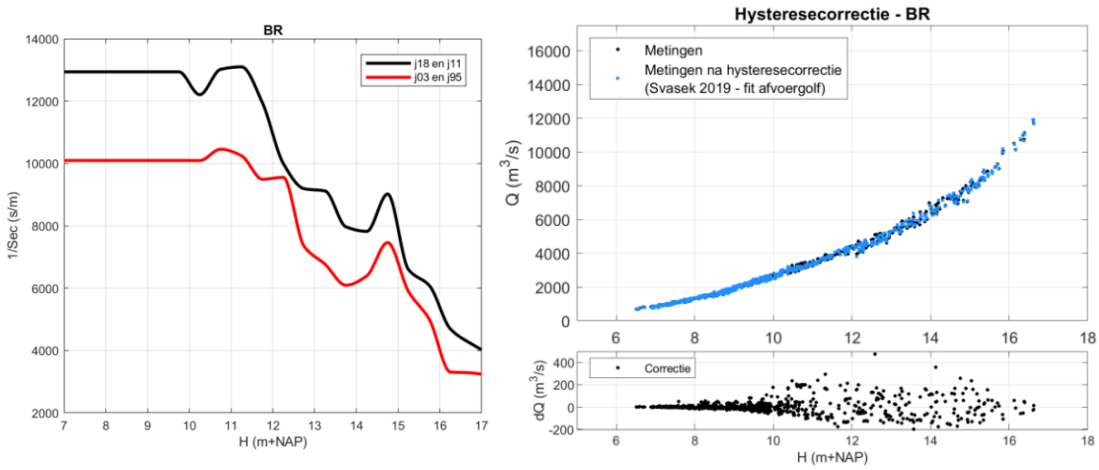
3 S_e wordt net als in methode (2) uit stationaire modelsimulaties bepaald, maar c wordt bepaald uit modelsimulaties van afvoergolven, door te kijken hoe snel aanpassingen in de afvoer zich door het model verplaatsen.

4 De term $S_e c$ wordt bepaald uit modelsimulaties van afvoergolven. Hoe dit is gedaan wordt in het rapport niet nader gespecificeerd, maar aangenomen wordt dat deze methode gelijk is aan methode 1, waarbij de 'metingen' van Q en $\frac{\partial h}{\partial t}$ nu volgen uit de modelsimulaties.

Uiteindelijk is de vierde methode gekozen om er de hysteresecorrectie mee uit te voeren. Daarbij is onderscheid gemaakt tussen verschillende jaren: in modelschematisaties voor 1995 en 2003 is de term $S_e c$ anders dan in de schematisaties voor 2011 en 2018. Dit kan worden verklaard door veranderingen in de riviergeometrie in deze periode. Om een beeld te geven van het effect van de correctie is in Figuur 3-5 $1/(S_e c)$ als functie van de waterstand op de Boven-Rijn opgenomen, en ook het effect van de correctie op de metingen voor deze tak.



Figuur 3-4 $S_e c$ bepaald uit metingen op de Boven-Rijn (alleen waarden behorend bij de 10% metingen met grootste $\partial h/\partial t$). Merk op dat $S_e c$ in de vergelijking van Ogink & Stolker een positief getal moet zijn. Bron: Svašek Hydraulics (2019).



Figuur 3-5 $1/(S_e c)$ als functie van de waterstand op de Boven-Rijn (links) en het effect van de hysteresecorrectie op de metingen op de Boven-Rijn (rechts). Bron: Svašek Hydraulics (2019).

Discussie

- Uit Qf2018 wordt niet duidelijk of de hysteresecorrectie uiteindelijk tot een meer homogene dataset leidt. Op basis van een validatie op metingen van de Qf-relatie met en zonder correctie voor hysterese kan worden bepaald of de correctie tot een beter resultaat leidt. Zo niet, dan is er op dit moment geen reden om deze correctie toe te passen. Eerst is dan meer onderzoek nodig naar hysterese in de Rijntakken.
- In de operationele praktijk wordt de hysteresecorrectie niet gebruikt (zie paragraaf 3.1).
- Door het gebruik van modelsimulaties om een hysteresecorrectie af te leiden ontstaat in wezen een cirkelredenering: de modellen zijn immers gekalibreerd op historische perioden waarbij de bovenstrooms opgelegde afvoer (in principe) is gebaseerd op de vigerende Qf- of Qh-relatie ten tijde van het uitvoeren van de kalibratie. De cirkelredenering ontstaat doordat wordt aangenomen dat de Qf- of Qh-relatie ‘waar’ is, terwijl deze op basis van de modelresultaten nog moet worden afgeleid. Een hysteresecorrectie op basis van modelsimulaties kan dus misleidend zijn.
- Voor de hysteresecorrectie is uitgegaan van de formule van Ogink & Stolker (2004). In paragraaf 2.4.2 hebben we echter nog andere varianten voor de hysteresecorrectie gezien, bijvoorbeeld:

$$Q = Q_0 \sqrt{1 - \frac{1}{S_0}\frac{\partial d}{\partial s}}$$

Het is mogelijk interessant te kijken welke correcties deze variant oplevert wanneer S_0 en $\frac{\partial d}{\partial s}$ worden bepaald op basis van metingen.

3.2.5 Correctie: stuwwerking

De correctie voor stuwwerking (die alleen geldt voor de Neder-Rijn, het Pannerdensch Kanaal en de Boven-Rijn) wordt in eerste instantie uit WAQUA-modelsimulaties afgeleid, door de afvoer als functie van de waterstand in simulaties met stuwwerking af te trekken van diezelfde functie in simulaties zonder stuwwerking. Er zijn immers slechts beperkt metingen beschikbaar voor situaties zonder stuwwerking. In Qf2018 wordt geconcludeerd dat het afvoerverschil veroorzaakt door stuwwerking weinig varieert tussen verschillende jaren (gerepresenteerd met verschillende modelschematisaties) voor de periode 1995-2018.
Dit wordt toegeschreven aan het feit dat de geometrie van de Neder-Rijn bovenstrooms van Driel vrij constant is in deze periode. In het vervolg wordt daarom alleen gebruik gemaakt van de stuwcorrectie op basis van de modelsimulaties representatief voor 2018.

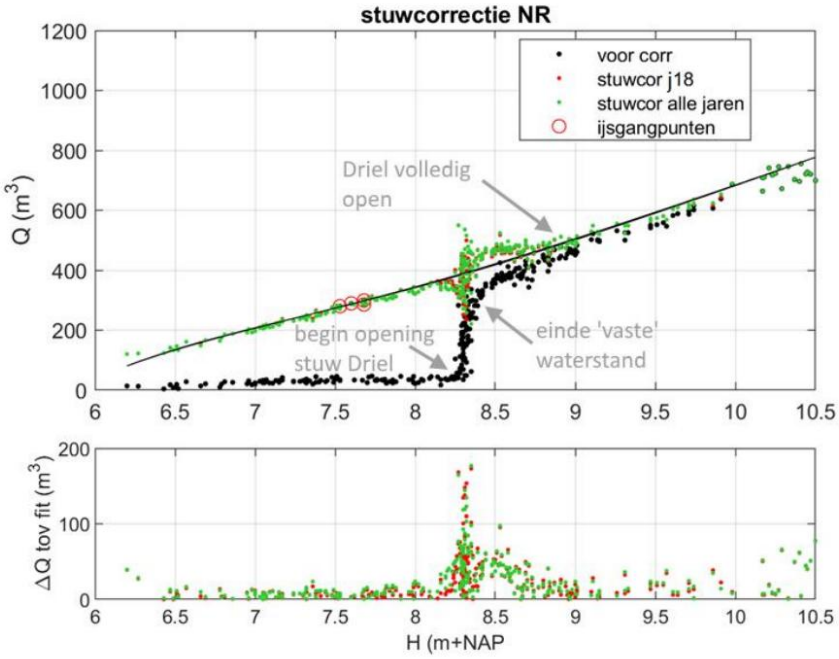
Als de op deze manier bepaalde correctie vervolgens wordt toegepast op de metingen blijkt dat de correctie niet leidt tot een vloeiend verloop in de datapunten. Met name rondom het moment dat stuw Driel wordt geopend (waterstand ongeveer 8,3 m +NAP bij IJsselkop) ontstaat een discontinuïteit als gevolg van afwijkingen tussen het model en de metingen (Figuur 3-6). Deze wordt waarschijnlijk deels veroorzaakt doordat wijzigingen in het stuwprogramma in 2016 niet zijn doorgevoerd in het model.

Een andere afwijking is zichtbaar in het waterstandsbereik waarin stuw Driel volledig gestreken is maar stuw Amerongen nog niet (8,8 m NAP < $H_{IJsselkop}$ < ongeveer 10 m NAP). Dit wordt toegeschreven aan een onderschatting van de waterstanden in ongestuwde toestand in het model, waardoor stuw Amerongen in het model een groter effect heeft dan in werkelijkheid (de stuw moet in het model verder dicht om het streefpeil te handhaven).

Om de dataset verder te homogeniseren wordt de correctie in het bereik waarin Driel opengaat aangepast. De nieuwe correctie wordt bepaald op basis van de volgende stappen:

1 Eerst wordt een lijn getrokken door $[Q,h]$-metingen in het ongestuwde bereik (H_{Lobith} > 10 m +NAP), metingen ten tijde van ijsgang (waarbij de stuwen openstaan) en de afvoer behorende bij de laagste waterstand die met het model zonder stuwwerking is doorgerekend (zwarte lijn in Figuur 3-6).
2 In het waterstandsbereik waarin Driel steeds verder opengaat wordt het verschil in afvoer tussen de metingen en de lijn uit stap 1 bepaald.
3 Door de resulterende verschillen wordt vervolgens weer een lijn getrokken. Dit is de nieuwe correctie.

Met de aangepaste correctie wordt een vloeiender verloop in de gecorrigeerde metingen verkregen. Rond het moment dat wordt gestart met het strijken van stuw Driel (8,3 m +NAP bij IJsselkop) blijft echter een grote variatie in de metingen bestaan. Dit komt omdat bij Nederrijn-afvoeren tussen 40 en 200 m^3/s een waterstand van 8,3 m +NAP wordt gehandhaafd bij IJsselkop (door de stuw steeds iets verder te openen). Op basis van alleen de waterstand bij IJsselkop kan dus geen eenduidige correctie voor stuwwerking worden bepaald.



Figuur 3-6 Correctie voor stuwwerking op de Neder-Rijn. Bron: Svašek Hydraulics (2019).

Discussie

- Ook hier geldt dat de bepaling van de correctie voor stuwwerking eigenlijk niet kan afhangen van een model waarin de Qf-relatie als invoer wordt gebruikt.
- Het stapelen van verschillende correcties – de één op basis van modelsimulaties, de ander op basis van metingen – is een ingewikkeld proces. De uitdaging is dat het aantal metingen bij een ongestuwde situatie op een hand te tellen is, waarmee een aanpak alleen op basis van metingen niet eenvoudig is.
- In paragraaf 2.5.2 wordt een methode gesuggereerd waarin de afvoercorrectie als gevolg van stuwwerking wordt bepaald aan de hand van het verhang. Het is interessant om te kijken wat voor correcties dit oplevert, en of hiermee bijvoorbeeld het resultaat rondom het openen van stuw Driel kan worden verbeterd.

3.2.6 Correctie: bodemverandering en rivierwerken

Ook voor het corrigeren voor trends op de langere termijn wordt een combinatie van WAQUA-modelsimulaties en metingen gebruikt.

Ten eerste worden modelresultaten voor de jaren 1995, 2003, 2011 en 2015 vergeleken met de resultaten voor 2018. Het idee is dat hiermee een correctie voor de combinatie van bodemverandering en rivierwerken wordt bepaald. Vervolgens wordt aangenomen dat bodemveranderingen (in het zomerbed) met name effect hebben bij lage afvoeren, terwijl de rivieringrepen in deze periode juist leiden tot verschillen bij hoge afvoeren (het gaat in deze periode immers vooral om ingrepen in het winterbed, hoewel in 1994 en 1996 ook nog de bodemkribben bij Erlecom zijn aangelegd). De verschillen die zijn gevonden tussen de modelschematisaties worden daarom lineair geïnterpoleerd in de tijd bij lage afvoeren, en juist discreet toegepast bij hoge afvoeren, op het moment dat belangrijke rivierwerken gereed zijn gekomen.

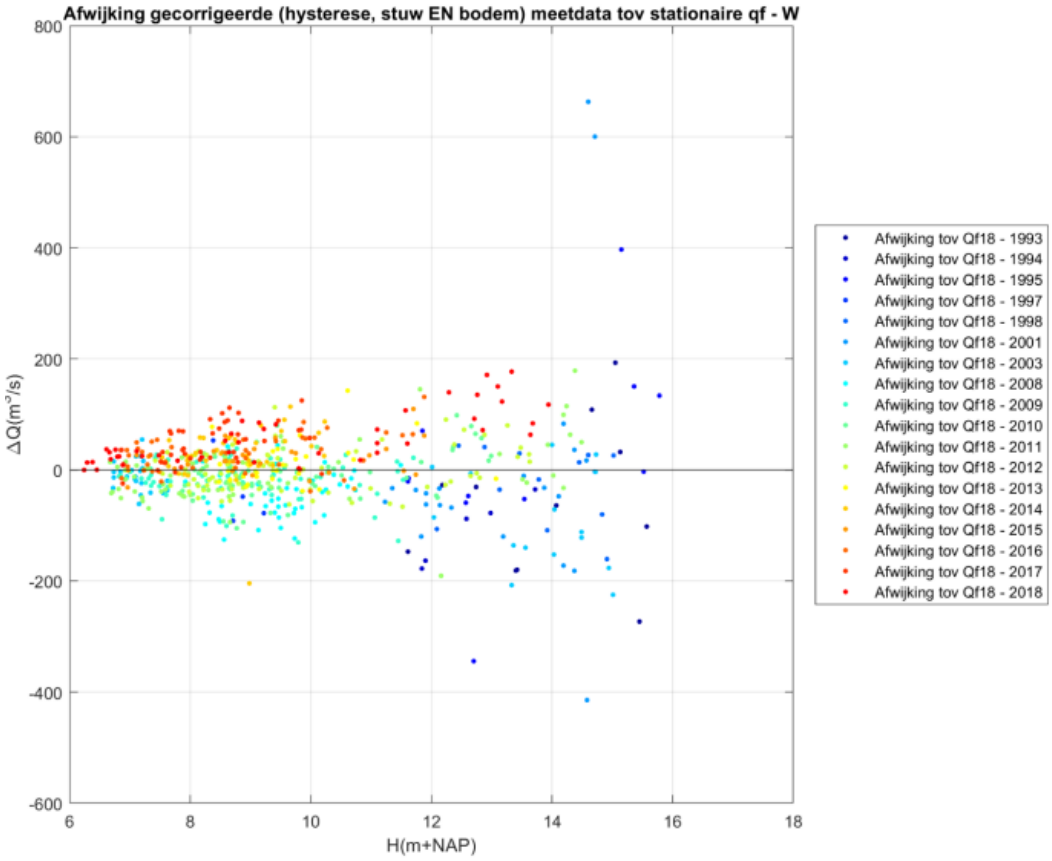
Met deze methode wordt echter ook gecorrigeerd voor andere verschillen tussen de modelschematisaties, bijvoorbeeld systematische fouten in de modelinvoer.

De resulterende ‘stationaire’ Qh-relatie voor 2018 (met correcties voor hysterese, stuwwerking, bodemverandering en rivierwerken) wordt vervolgens vergeleken met de voor dezelfde invloeden gecorrigeerde metingen (zie Figuur 3-7 voor een voorbeeld).

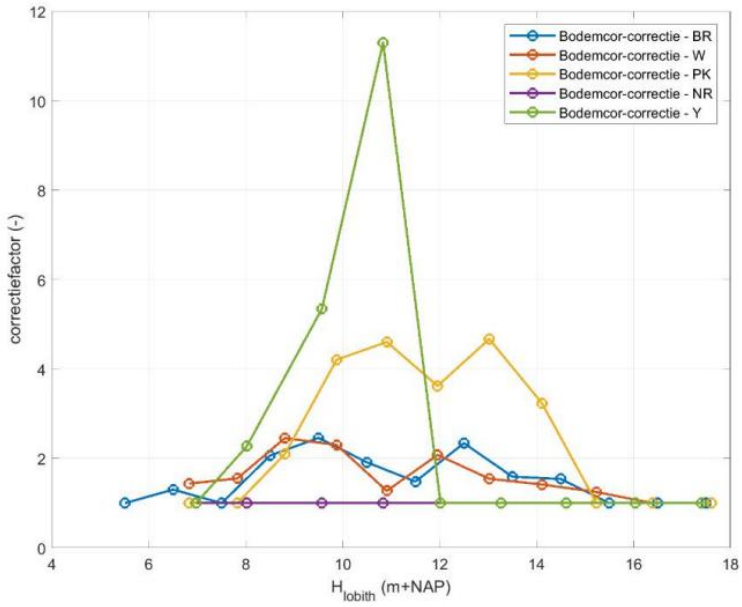
Hieruit blijkt dat de langetermijntrends in de waterstand worden onderschat door de modellen: voor recente metingen onderschat de Qf-relatie de afvoer, terwijl de afvoer voor oudere metingen juist wordt overschat. Dit geldt in het hele bereik van lage en middelhoge afvoeren (Q_{Lobith} < 5000 m^3/s). Blijkbaar missen de modellen processen waardoor de gemeten waterstand bij een bepaalde afvoer door de jaren heen daalt (meer dan de daling die wordt veroorzaakt door bodemverandering en rivierwerken). Dit werd ook geconstateerd tijdens de ontwikkeling van de zesde-generatiemodellen (Kosters et al., 2022), waarbij één set zomerbedruwheden voor alle modelschematisaties niet goed voldeed: voor de oudere schematisaties zijn eigenlijk hogere ruwheden nodig om aan te sluiten bij gemeten waterstanden. Overigens kan het dus ook zo zijn dat de trend door (veranderingen in) de bepaling van waterstanden, afvoeren, bodemligging of andere modelinvoer wordt geïntroduceerd.

Vanwege de resterende afwijking wordt de correctie voor bodemveranderingen en rivierwerken aangepast door de trend (de helling van de correctie over de tijd heen) aan te passen door middel van een correctiefactor f_{cor}: $\Delta Q_{b+r,cor} = f_{cor} \Delta Q_{b+r}$. Dit gebeurt alleen voor locaties en waterstandsranges waar een betrouwbare trend door de metingen vastgesteld kan worden, die afwijkt van de eerder gevonden trend op basis van modelsimulaties.

De correctiefactor vertoont voor drie van de takken – Boven-Rijn, Waal en Pannerdensch Kanaal – een patroon met 2 pieken (Figuur 3-8). Voor de IJssel is de eerste piek ook zichtbaar, maar kan in het hogere bereik geen correctiefactor worden bepaald vanwege onvoldoende beschikbaarheid van data. Ook in de data voor de Neder-Rijn kan geen betrouwbare trend worden vastgesteld. Dit tweepiekige karakter kan een aanwijzing zijn voor de oorzaak van de residuele afwijking.



Figuur 3-7 Afwijking van de gehomogeniseerde metingen ten opzichte van de stationaire Qh-relatie voor de Waal. Bron: Svašek Hydraulics (2019).



Figuur 3-8 Correctiefactor f_{cor}.

Discussie

- Wederom geldt dat het gebruik van modelresultaten leidt tot een cirkelredenering.
- Het stapelen van verschillende correcties – de één op basis van modelsimulaties, de ander op basis van metingen – is een ingewikkeld proces. De vraag rijst of hetzelfde resultaat ook met een eenvoudiger proces, bijvoorbeeld op basis van alleen metingen, kan worden behaald. Hiervoor is dan wel een (veel) grotere dataset nodig.

3.2.7 Toevoegen extreme afvoeren

Het uitgangspunt voor de Qf-relaties is dat deze geldig zijn voor Lobithafvoeren tussen 500 en 16000 m^3/s. De hoogste afvoer waarvoor metingen beschikbaar zijn ligt echter rond 12000 m^3/s, de laagste rond 800 m^3/s. In de bereiken 12000-16000 m^3/s en 500-800 m^3/s zijn daarom $[Q,h]$-combinaties uit stationaire WAQUA-modelsimulaties met j18 toegevoegd aan de meetdata.

Discussie

- In het hoge-afvoerbereik zijn de modellen gekalibreerd op de meest extreme metingen die beschikbaar zijn. De toegevoegde extremen uit modelsimulaties zijn daardoor sterk gecorreleerd met deze metingen. In het hoge-afvoerbereik zijn de meest extreme metingen afkomstig van slechts één hoogwatersituatie die ook nog eens lang geleden is opgetreden (1995). De onzekerheid van de gecorrigeerde metingen is hier dus groot. Door het gebruik van modelresultaten in een bereik waarin kalibratie of validatie niet mogelijk is wordt deze onzekerheid nog verder vergroot. Deze onzekerheid is echter niet zichtbaar in de deterministische formulering van de Qf-relatie. Dit kan een schijnzekerheid geven in de afvoerbepaling bij hoge waterstanden.
- In Qf2018 wordt gesteld dat de goede aansluiting van de modelextremen op de gecorrigeerde metingen vertrouwen geeft. Deze aansluiting is echter een logisch gevolg van de sterke verweving van modellen en metingen – enerzijds worden metingen gebruikt om de modellen te kalibreren, anderzijds worden de modellen gebruikt om de metingen te homogeniseren. Dit kan een bepaalde schijnnauwkeurigheid tot gevolg hebben.

3.2.8 Afleiden stationaire Qh

Na het toevoegen van extremen uit modelsimulaties worden deze nog eens lineair geëxtrapoleerd naar aanvullende $[Q,h]$-combinaties die worden gebruikt om de helling aan de uiteinden van de Qh-relatie te forceren. Vervolgens wordt door de dataset een 10^e-orde polynoom gefit op basis van kleinste kwadraten. Dit polynoom heeft de volgende vorm (met n=10):

$$Q(h) = p_1 h^n + p_2 h^{n-1} + \cdots + p_n h + p_{n+1}$$

Discussie

- Er is geen theoretische basis om modelresultaten lineair te extrapoleren. Het wordt niet duidelijk waarom voor dit type extrapolatie gekozen is.
- Voor een 10^e-orde polynoom is gekozen omdat dit visueel de beste overeenkomst geeft met de dataset. Voor rechthoekige dwarsprofielen wordt echter een vergelijking van de volgende vorm verwacht (zie paragraaf 2.3.1):

  $$Q(h) = a(h - h_0)^b$$

  Hierbij heeft de constante *b* een waarde van ongeveer 3/2. Wanneer de dwarsdoorsnede uit meerdere componenten bestaat die met meerdere rechthoeken benaderd worden (samengestelde dwarsdoorsnede) kan van een gestapelde functie gebruik worden gemaakt.

De gekozen vorm van de functie komt dus niet overeen met de functievorm die op basis van de theorie wordt verwacht. Het verdient aanbeveling om te kijken welk resultaat wordt bereikt als wel van de theoretische (gestapelde) functievorm gebruik wordt gemaakt. Dit is overigens gedaan in HKV (2009) en herhaald in de tussenfase van de actualisatie van de Qf-relaties (Svašek Hydraulics, 2018). In deze tussenfase wordt geconcludeerd dat niet alle gecorrigeerde [Q,h]-metingen goed gevolgd kunnen worden met een functie van deze vorm. In Qf2018 is daarom gekozen voor een 10^{e}-orde polynoom, zoals hierboven beschreven. Een afwijking tussen de theoretische vorm van de Qh-relatie en gecorrigeerde [Q,h]-metingen kan echter ook een aanwijzing zijn voor tekortkomingen in het homogeniseren van de data, of voor afwijkingen in de meting zelf. Het verdient dus aanbeveling deze [Q,h]-combinaties nader te onderzoeken alvorens deze afwijking al dan niet te accepteren.

3.2.9 Verificatie Qf-relatie

Omdat alle gemeten [Q,h]-combinaties zijn gebruikt in de afleiding van de Qf-relaties is geen onafhankelijke dataset (behalve bij Driel) beschikbaar om de relaties te valideren. In plaats daarvan zijn de volgende verificaties uitgevoerd:

- Vergelijking van resulterende [Q,h]-combinaties voor 2017 en 2018 met metingen (dat wil zeggen een deel van de dataset die gebruikt is voor de afleiding).
- Voor Driel is vergeleken met de afvoer op basis van de ADM.
- Een check in hoeverre de Qf-relaties een sluitende waterbalans opleveren.

Uit de derde check blijkt dat de waterbalans redelijk sluitend is (afwijkingen tot maximaal ongeveer 3%) wanneer de betrekkingslijnen van 2018 worden gebruikt.

Discussie

- In het rapport van Qf2018 is geen achtergrond opgenomen over de nauwkeurigheid van de ADM bij Driel. Deze informatie zou helpen om de afwijkingen tussen de Qf-relatie en de ADM beter te kunnen beoordelen.
- Een toelichting waarom een 10^{e}-orde-polynoom nodig was ontbreekt, ondanks het risico op overfitting.
- Voor een beter beeld van de prestaties van de Qf-relatie zou het beter zijn om een deel van de dataset alleen voor validatie te gebruiken, en niet voor het opstellen van de Qf-relatie. Metingen die sinds het gereedkomen van de Qf-relaties zijn gedaan (dus in de periode 2019 – 2024) kunnen hiervoor gebruikt worden.

3.3 Tiel, Hagestein en Olst

3.3.1 Achtergrond

Naar aanleiding van het opstellen van een Qf-relatie voor Lobith en de splitsingspunten in 2009 (zie paragraaf 3.2) heeft Rijkswaterstaat in 2010 aan HKV de opdracht gegeven om eveneens een Qf-relatie op te stellen voor Olst, Tiel en Hagestein (HKV, 2010). In 2013 heeft Rijkswaterstaat gevraagd deze relaties te actualiseren aan de hand van nieuwe metingen (RURA-Arnhem, 2013). Voor zover bekend zijn deze geactualiseerde relaties echter niet in het meetnet opgenomen en worden ze in de praktijk niet gebruikt (Bilgili, 2018).
De drie locaties hebben elk hun eigen, unieke aandachtspunten:

- bij Tiel staan onder 3.20 m + NAP de Bernhardsluizen open. Daardoor is er een open verbinding met de Lek (stuwpand Hagestein). Er vindt dan doorgaans een onttrekking plaats van de Waal-afvoer. Daarom is het belangrijk dat metingen benedenstrooms van Tiel plaatsvinden, wat in de praktijk dan ook standaard is. Daarnaast zijn de langsdammen aangelegd met regelbare instoomopeningen. De regelbaarheid heeft invloed op de waterstand bij Tiel dus de relatie tussen waterstand en afvoer is afhankelijk van de instroomopeningen geworden.
- locatie Hagestein bevindt zich ter hoogte van de gelijknamige stuw, die de relatie sterk beïnvloedt. De relatie is bepaald voorsituaties met een open stuw, zodat stuwstanden de waterstand niet beïnvloeden, en waterstanden boven 2 m + NAP, omdat getij bij lage afvoeren dominant is. . Er is sprake van getij dat bij geopende stuw nog aanwezig is en bij toenemende afvoer afneemt. Voor Ruimte voor de Rivier is de toegangsdam naar het stuweiland verlaagd. Bij lage afvoeren staat het Betuwepand open (zie hierboven). De relatie tussen waterstand en afvoer is dan niet eenduidig, maar wordt bepaald door de stuwbediening.
- locatie Olst bevindt zich net bovenstrooms van de hoogwatergeul Veessen-Wapenveld. Hoewel de huidige meetserie is opgezet *voor* de constructie van de hoogwatergeul, heeft onderzoek laten zien dat de invloed van het meestromen van de geul op de Qh-relatie bij Olst groot kan zijn (Bilgili, 2018). Dit is van belang voor toekomstige actualisaties, dan wel herontwerp van de relatie. Een tweede aandachtspunt is dat de hoogwatermetingen bij Deventer gedaan worden. Om de relatie bij Olst te bepalen is bij de actualisatie van 2013 een looptijdcorrectie gedaan (RURA-Arnhem, 2013), maar het is onduidelijk of dat bij de vigerende relatie ook is gebeurd (HKV, 2010).

Voor alle locaties geldt dat de afvoer door de uiterwaarden niet gemeten kan worden met het vaartuig dat wordt gebruikt bij de reguliere ADCP-meting en daarom wordt bijgeschat[1]. RURA-Arnhem (2013) vermoedt op basis van modelberekeningen dat deze schatting te laag is, waardoor er bij hogere afvoeren een discrepantie ontstaat tussen model en meting. Dat de afvoer door het winterbed moet worden bijgeschat is overigens niet uniek voor de locaties Tiel, Hagestein en Olst, maar speelt op de gehele Rijn.

3.3.2 Globale afleidingstechniek

In Tabel 3-2 is een overzicht opgenomen van de methodes die zijn gebruikt bij het afleiden van de Qf-relaties Tiel, Olst en Hagestein.

[1] Deze situatie verbetert mogelijk in de toekomst. In het nieuwe hoogwatermeetprogramma zijn extra metingen opgenomen om de totale afvoer te kunnen meten (Dénes Beyer, Rijkswaterstaat Oost-Nederland, persoonlijke communicatie).

*Tabel 3-2 Overzicht methodiek relaties Tiel, Olst en Hagestein. Onderdelen aangegeven met een * gelden enkel voor de relatie van 2013, die niet in de praktijk wordt gebruikt.*

Locatie	Tiel	Olst	Hagestein
Metingen	1991-2000 ott-molen 2001-2010 ADCP *2010-2012 ADCP	1986-2000 ott-molen 2001-2010 ADCP *2010-2012 ADCP	2009-2010 ADCP
Datavalidatie	Uitschieters handmatig verwijderd *looptijdcorrectie	Uitschieters handmatig verwijderd *looptijdcorrectie	*Metingen zijn niet gebruikt, relatie is volledig gebaseerd op modelresultaten*
Correcties			
Hysterese	Geen correcties		
Stuwwerking			
Bodemverandering en rivierwerken			
Extreme waarden	WAQUA HR2006 model Permanenties	WAQUA HR2006 model + correcties Permanenties	WAQUA HR2006 model Permanenties
Afleiden stationaire Qh	Standaardkromme met 2 niveaus * Standaardkromme met 3 niveaus	Standaardkromme met 2 niveaus *Standaardkromme met 3 niveaus	Standaardkromme met 1 niveau
Validatie Qf-relatie	Geen onafhankelijke validatie	Geen onafhankelijke validatie	Geen onafhankelijke validatie

3.3.3 Waterstands- en afvoermetingen en datavalidatie

De Qf-relaties zijn gebaseerd op afvoermetingen met een Ott-molen of ADCP-meting tussen 1986 en 2010. Voor alle locaties zijn er over deze periode relatief weinig metingen beschikbaar (Tiel: 206, Olst: 303, Hagestein: 22), vergeleken met de locaties bij Lobith en de splitsingspunten.
Datavalidatie is uitgevoerd door visuele controle van de metingen en het verwijderen van op het oog geconstateerde uitschieters. Bij datavalidatie is vastgesteld dat metingen die vlak na elkaar zijn uitgevoerd soms fysisch niet-verklaarbare variatie in afvoer laten zien. Deze metingen zijn niet verworpen.

In 2013 is in aanvulling op het verwijderen van uitschieters een looptijdcorrectie uitgevoerd. De locatie waar de Qf-relatie geldt en de locatie waar afvoermetingen worden gedaan kunnen ver uit elkaar liggen. De looptijdcorrectie behelst het aanpassen van de tijd waarop de afvoermeting wordt uitgevoerd op basis van de betrekkingslijnen van de Rijn (RURA-Arnhem 2013). Hierbij moet worden gemeld dat de betrekkingslijnen zelf zijn gebaseerd op modelsimulaties.

Bij Hagestein zijn dermate weinig metingen beschikbaar, dat de Qf-relatie volledig is afgeleid op basis van modelsimulaties.

3.3.4 Correcties

Bij geen van de drie locaties zijn correcties uitgevoerd, omdat er is aangenomen dat deze correcties niet goed kunnen worden uitgevoerd vanwege het geringe aantal metingen (HKV, 2010).

3.3.5 Toevoegen extreme afvoeren

Op alle drie de locaties is de dataserie van metingen aangevuld met modelsimulaties. De modelsimulaties zijn permanenties (stationaire afvoer, geen getijwerking) op basis van het model WAQUA-Rijn (HR2006). De specifieke permanenties zijn niet genoemd in de rapportage (HKV, 2010). Vermoedelijk is gebruik gemaakt van de standaardpermanenties[2].

Voor de benedenstroomse randvoorwaarden is voor Tiel en Olst uitgegaan van een situatie met maximaal getij, hoewel hierbij wordt opgemerkt dat de invloed van de benedenstroomse rand bij deze twee locaties zeer beperkt is. Bij Hagestein is gerekend met gemiddeld getij als benedenstroomse rand bij Krimpen a/d Lek.

In de actualisatie van 2013 is gebruik gemaakt van het model waqua-rijn_j13_5-v1 en een semipermanente afvoerkromme[3]. De benedenstroomse randvoorwaarden zijn de TMR2006-Qh-relaties.

3.3.6 Afleiden stationaire Qh-relatie

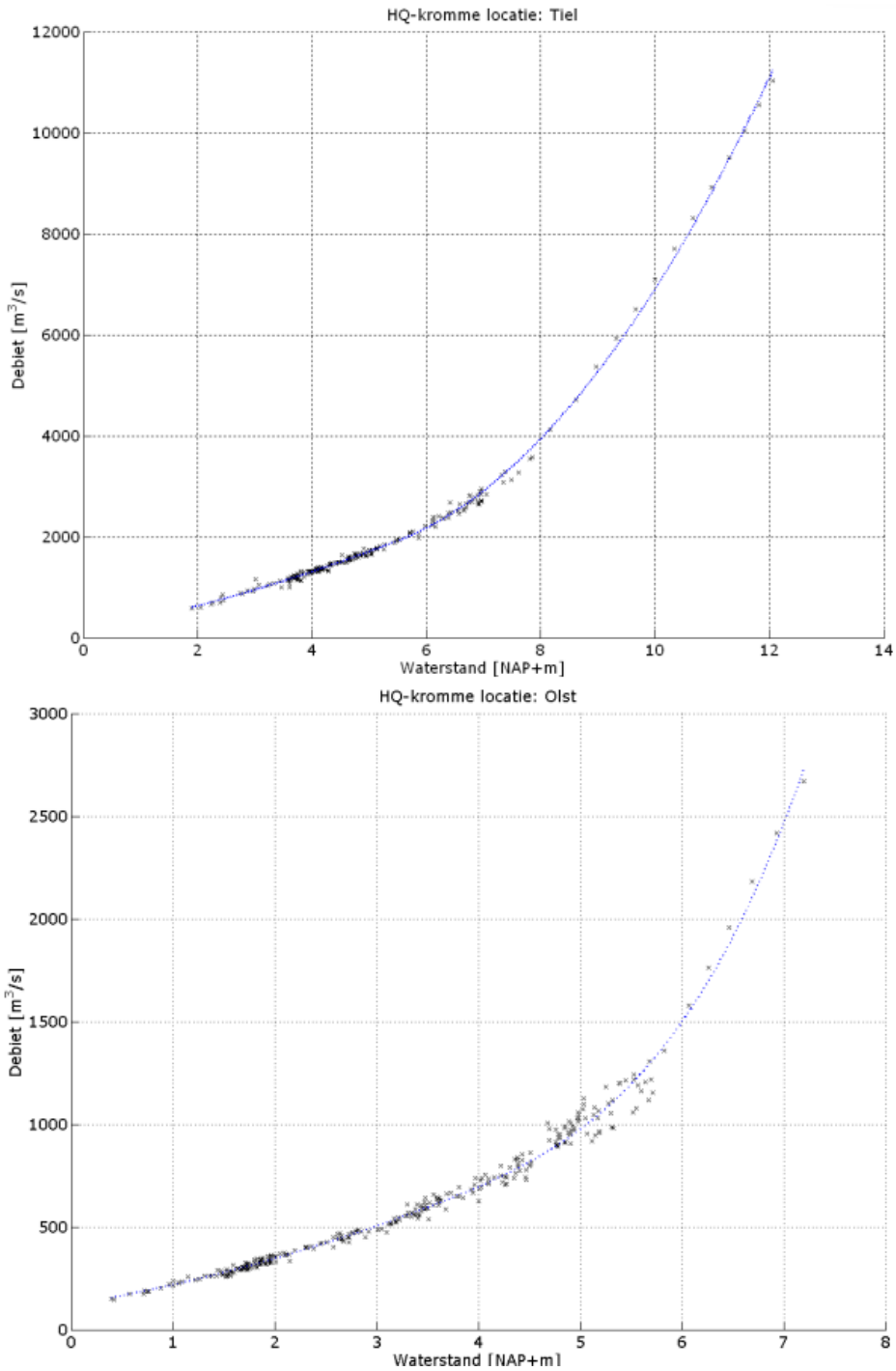
De relaties zijn afgeleid door het fitten van een meervoudige relatie (zie paragraaf 2.3.3), waarbij wordt uitgegaan van twee secties. De parameters h_0 en h_1 zijn vastgelegd, overige parameters zijn gefit. In Figuur 3-9 en Figuur 3-10 zijn de QH relaties ter illustratie overgenomen uit HKV (2010).

Tabel 3-3 Overzicht van de wijze van parameterkeuze voor de Qf-relaties van Tiel, Olst en Hagestein

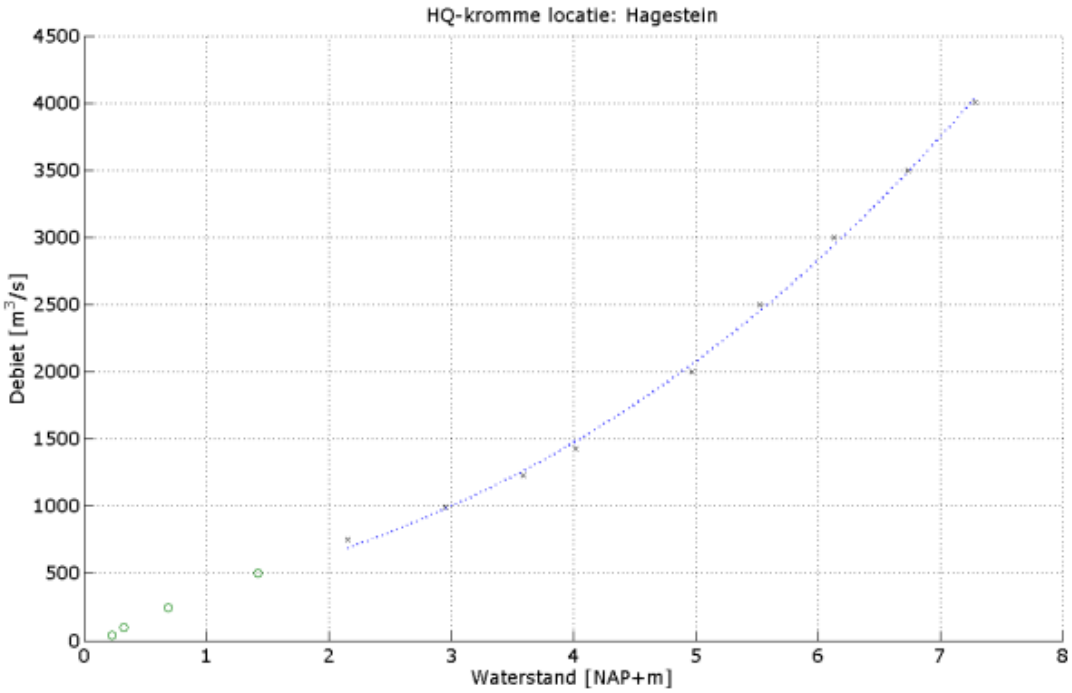
Parameter	Tiel	Olst	Hagestein
h_0	Bodemhoogte (-1,5 m + NAP)	Bodemhoogte (-3 m + NAP)	Bodemhoogte (-4,5 m + NAP)
h_1	Hoogte van de kribben (5,5 m + NAP)	Hoogte van de kribben (3,5 m + NAP)	*Niet gebruikt*
a_0, b_0, a_1, b_1	Gefit	Gefit	Gefit

[2] De officiële modellen worden getest met een serie standaardsommen, die bestaan uit een serie golven en permanenties. Doordat alle modellen met dezelfde sommen worden doorgerekend, is het verschil tussen twee verschillende modellen vast te stellen.

[3] Dit is één berekening waarbij de afvoer in 18 stappen wordt verhoogd, en elke stap 6 ½ dag wordt vastgehouden om een stationaire toestand te bereiken.



*Figuur 3-9 De relaties voor Olst en Tiel. Overgenomen uit HKV (2010)_*



Figuur 3-10 De Qh-relatie bij Hagestein, overgenomen uit HKV (2010)

In de actualisatie van 2013 is een meervoudige relatie met drie secties gebruikt. In tegenstelling tot de relatie van 2010 zijn alle parameters --- dus ook h_n --- gefit.

Tabel 3-4 Overzicht van de modelparameters voor de Qf-relaties Tiel, Olst en Hagestein.

Parameter	Tiel		Olst		Hagestein
	2010	**2013**	**2010**	**2013**	**2010**
h_0	-1,5	-1,14	-3	-1,65	-4,5
h_1	5,5	5,6	3,5	3,2	-
h_2	-	8,2	-	4,9	-
a_0	85,975	112,916	12,396	49,689	1,9761
a_1	127,59	178,935	15,793	57,04	-
a_2	127,59	648,95	-	522,95	-
b_0	1,597	1,5	2,0678	1,5	3,0899
b_1	2,20207	1,5	3,324	1,5	-
b_2	-	1,08	-	1,10	-

3.3.7 Validatie Qf-relatie

Geen van de Qf-relaties zijn gevalideerd met data die niet zijn gebruikt bij het fitten van de relatie.

3.3.8 Discussie

Over de relaties voor Tiel, Hagestein en Tiel geven wij de volgende discussiepunten:

- Hoewel de relaties voor Olst en Tiel zijn geactualiseerd, zijn deze nooit in de praktijk gebracht. De reden hiervoor is onduidelijk, maar het heeft na navraag bij Rijkswaterstaat vermoedelijk praktische oorzaken en geen inhoudelijke.
- Looptijdcorrectie voor metingen is mogelijk significant, met name voor Olst. Deze correctie is niet uitgevoerd voor de operationele relatie (2010). De looptijdcorrectie is voor de 2013-relatie uitgevoerd op basis van het modelinstrumentarium.
- De huidige relaties, maar ook die van 2013, zijn door veranderingen in het systeem waarschijnlijk verouderd. Bij Olst heeft Bilgili (2018) dit bijvoorbeeld aangetoond. Dit betreft niet alleen de parameterwaarden, maar ook het fundamenteel ontwerp van de relaties. Door de hoogwatergeul Veessen-Wapenveld bijvoorbeeld, kan de Qh-relatie niet uniek zijn: de relatie is anders als de geul in gebruik is dan wanneer deze niet in gebruik is.

3.4 Qh-relaties Oberrhein (WSA Oberrhein)

Voor het beschrijven van de praktijk met betrekking tot de afleiding van Qh-relaties in Duitsland is een deel van een interne handleiding van de afdeling hydrologie (Gewässerkunde) van WSA (Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt) Oberrhein bestudeerd. Hierin wordt een stappenplan gegeven voor het afleiden van Qh-relaties, maar het is niet duidelijk of deze stappen voor vigerende Qh-relaties altijd zijn gevolgd, en hoe invulling is gegeven aan deze stappen. Toch krijgen we op basis van de handleiding een globaal idee van de praktijk op de Oberrhein (en waarschijnlijk elders in Duitsland).

Voor afvoerbepaling wordt op de federale waterwegen in Duitsland normaal gesproken ADCP gebruikt (persoonlijke communicatie Torben Gerlach). De metingen worden in principe uitgevoerd door WSV (Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes) en bij uitzondering door een externe partij.

Binnen bovengenoemde afdeling van WSA Oberrhein wordt voor het opstellen van Qh-relaties op basis van metingen gebruik gemaakt van een editor (Schlüsselkurveneditor, afkorting SKED) in WISKI, een softwarepakket ontwikkeld door KISTERS. Hierin kunnen verschillende typen functies worden gefit door een $[Q,h]$-dataset. De handleiding beveelt aan om de vorm van de Qh-relatie via trial-and-error te optimaliseren, zodat deze zo goed mogelijk aansluit bij de metingen.

Voor extrapolatie buiten het bemeten bereik wordt aanbevolen het verloop van oudere Qh-relaties te volgen, als die aanwezig zijn.
Extrapolatie kan ook worden gebaseerd op gegevens over de snelheid en de dwarsdoorsnede bij de aanwezige afvoermetingen. Afvoeren buiten het gemeten bereik kunnen dan bepaald worden door een relatie te fitten door de snelheidsmetingen als functie van de waterstand, en door de dwarsdoorsnede als functie van de waterstand. Vervolgens kunnen deze twee worden vermenigvuldigd. Als alternatief voor extrapolatie van de dwarsdoorsnede kan de gebruiker ook zelf een dwarsdoorsnede in het extreme bereik opgeven, bijvoorbeeld op basis van hoogtemetingen. Door deze te vergelijken met de waarden die tijdens de afvoermetingen zijn bepaald kan iets worden gezegd over de betrouwbaarheid van het opgegeven dwarsprofiel. In plaats van de dwarsdoorsnede en de snelheid kunnen ook de parameters $C\sqrt{S_0}$ en $Bd^{3/2}$ geëxtrapoleerd worden.

Ter controle van de Qh-relatie wordt aanbevolen te beoordelen of de eerste en tweede afgeleide van de Qh-relatie er ‘vloeiend’ uitzien, en of de relatie op dubbellogaritmische schaal een rechte lijn benadert.

Wij merken op dat er redenen kunnen zijn dat een ‘knik’ in de eerste of tweede afgeleide van de Qh-relatie de werkelijkheid goed kan beschrijven, bijvoorbeeld bij de laagste waterstand waarbij stroming in de uiterwaarden plaats vindt (Figuur 2-4). Ten slotte wordt gesteld dat de gemeten afvoeren (zonder uitbijters) maximaal 5% mogen afwijken van de opgestelde relatie, en idealiter maximaal 3%. De afwijkingen kunnen ook worden afgezet tegen de tijd, waarmee eventuele niet-stationariteit van de metingen in beeld kan worden gebracht. Wanneer dit het geval is kan worden overwogen meerdere relaties op te stellen, elk geldig voor een kortere periode.

4 Praktijk voor locaties in de Maas

4.1 Overzicht locaties

In vergelijking met de Rijn, zijn de temporele variaties in de Maasafvoer over het algemeen groot. Het is bijvoorbeeld mogelijk dat de afvoer bij Eijsden toeneemt van 0 naar 240 m^3/s in 10 minuten, als gevolg van ingebruikname waterkrachtcentrale Lixhe in België. De afvoer neemt vaak plotseling toe met de capaciteit van een of meerdere turbines (80 m^3/s voor de grootste turbines) en even later weer af tot het originele niveau, waardoor sprake is van een bloksgewijze toe- en afname van de afvoer. Daarbij wordt de afvoer bij St. Pieter bij lage en gemiddelde afvoeren in hoge mate beïnvloed door translatiegolven door schutten van schepen in het stuwpand. Een hoogwaterafvoergolf duurt doorgaans korter dan in de Rijn. In juli 2021 was deze extreem spits: in 2 dagen steeg en daalde de afvoer door extreme regenval bovenstrooms (RURA-Arnhem en AHA, 2021).

In de Maas worden op 6 locaties in Nederland Qh-relaties toegepast (Tabel 4-1). Langs het traject verandert de Maas van een diep ingesneden rivier (vanaf Eijsden grens), via een ondiep en vrij afstromende rivier (de Grensmaas; vanaf Borgharen) in een gestuwde rivier met flauwere bodemhelling (vanaf Thorn). Deze gestuwde rivier heeft eerste veel plassen (door grindwinning) en beekaanvoer, en vanaf Roermond wordt de bodem zandig. Er zijn 7 stuwen, waarmee de rivier bevaarbaar wordt gehouden vanaf sluis Ternaaien tot stuw Borgharen en benedenstrooms van Maaseik. Voor de 6 locaties is de eis om continu met een interval van 10 minuten de afvoer te bepalen met een onnauwkeurigheid van maximaal 10%.

Bij St. Pieter en Megen wordt afvoer continu bepaald op basis van stroomsnelheidsmetingen met een Akoestisch Debietmeter (ADM). Echter, afvoer kan niet continu worden bepaald doordat uitval van deze ADM’s optreedt bij hogere sedimentconcentraties, en doordat afvoer niet nauwkeurig kan worden bepaald als de uiterwaarden meestromen. Daarom is het belangrijk om voor St. Pieter en Megen ook afvoer te bepalen op basis van een actuele Qh-relatie. De afvoertijdserie wordt voor verschillende doelen gebruikt. In Tabel 4-1 is slechts het voornaamste doel beschreven. Borgharen dorp is een belangrijke locatie voor de afspraak over de waterverdeling in het grensgebied met België. Voor die afspraak worden ook debiet tijdseries bepaald met een ADM bij Bunde in het Julianakanaal en met een ADM bij Smeermaas in de Zuid-Willemsvaart (Figuur 4.1). Operationeel zijn Eijsden grens en St. Pieter (waar afvoer wordt bepaald met stroomsnelheidsmetingen) van belang: Eijsden is de randvoorwaarde van het operationele model en Sint-Pieter is het referentiepunt voor de (hoogwater)berichtgeving.

Tabel 4-1 Overzicht van voornaamste doel, type relatie (Qh of Qf) en jaar van actualisatie in LMW voor de 6 locaties in de Maas waar afvoer wordt bepaald

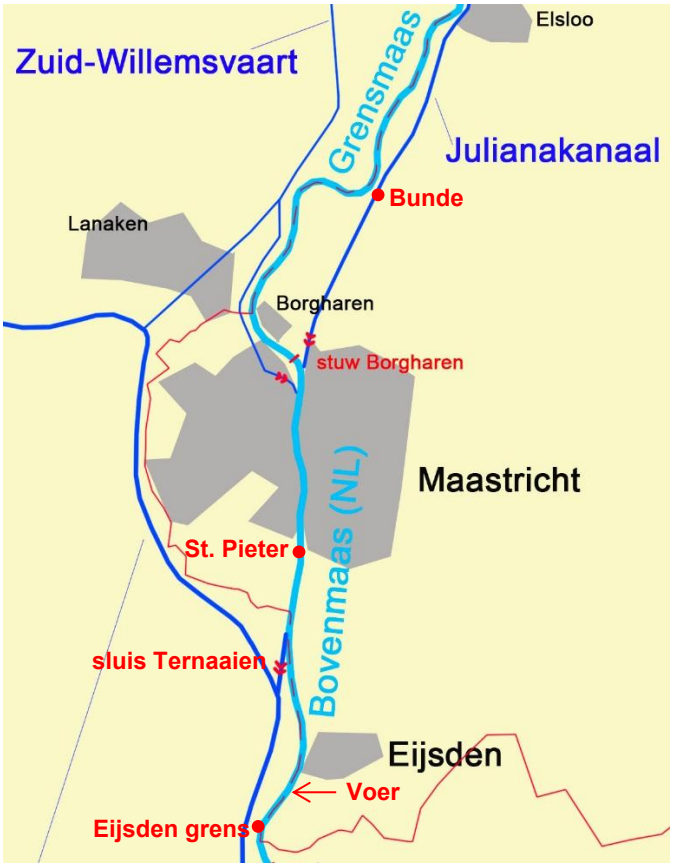
Locatie	Voornaamste doel	Actuele relatie in meetnet	Opmerking
Eijsden grens	Operationeel	**Qf**-relatie 2014	De Qf-relatie is geactualiseerd in 2020 (maar niet geïmplementeerd in LMW)
St. Pieter	Achtervang ADM, operationeel;	Qh-relatie 2019	Relatie (opgesteld in 2019 en geldig vanaf 2016) dient als back-up.
Borgharen Dorp	Afspraak over waterverdeling met België	Qh-relatie 2002	Niet meer geldig door werkzaamheden Grensmaas (2019 controle: nog niet stabiel); nieuw onderzoek CIV gestart
Venlo	Operationeel	Qh-relatie 2015	Opgesteld in 2017
Megen	Achtervang ADM; Rand Rijn-Maasmonding-model	Qh-relatie 2002	Een Qf-relatie is in 2016 afgeleid (maar niet geïmplementeerd)

4.2 Eijsden

4.2.1 Achtergrond

Bij Eijsden grens (Figuur 4-1 hierna aangeduid als Eijsden) worden geen afvoermetingen uitgevoerd. Als alternatief wordt de continue afvoer op basis van de afvoer bij St. Pieter gebruikt om een Qf-relatie op te stellen. Omdat tussen Eijsden en Borgharen water vanuit de Voer en door sluis Ternaaien de Maas in stroomt (Figuur 4-1), zijn deze afvoerreeksen nodig om de afvoer bij Eijsden te bepalen. In 2009 is voor de Maas bij Eijsden een eerste Qf-relatie opgesteld en in gebruik genomen (IMDC, 2009ab; volledige naam: ‘International Marine & Dredging Consultants’). In 2014 en 2016 is de Qf-relatie verder geoptimaliseerd (RURA-Arnhem, 2014b, 2016a). Inmiddels is de Qf-relatie uit 2014 verouderd en sluit de afvoer die ermee bepaald wordt minder goed aan bij de afvoer op basis van de ADM bij St. Pieter en is een nieuwe relatie voorgesteld (RURA-Arnhem, 2020). Vanwege capaciteitsgebrek is deze meest actuele Qf-relatie nog niet opgenomen in het Landelijk Meetnet Water (LMW).

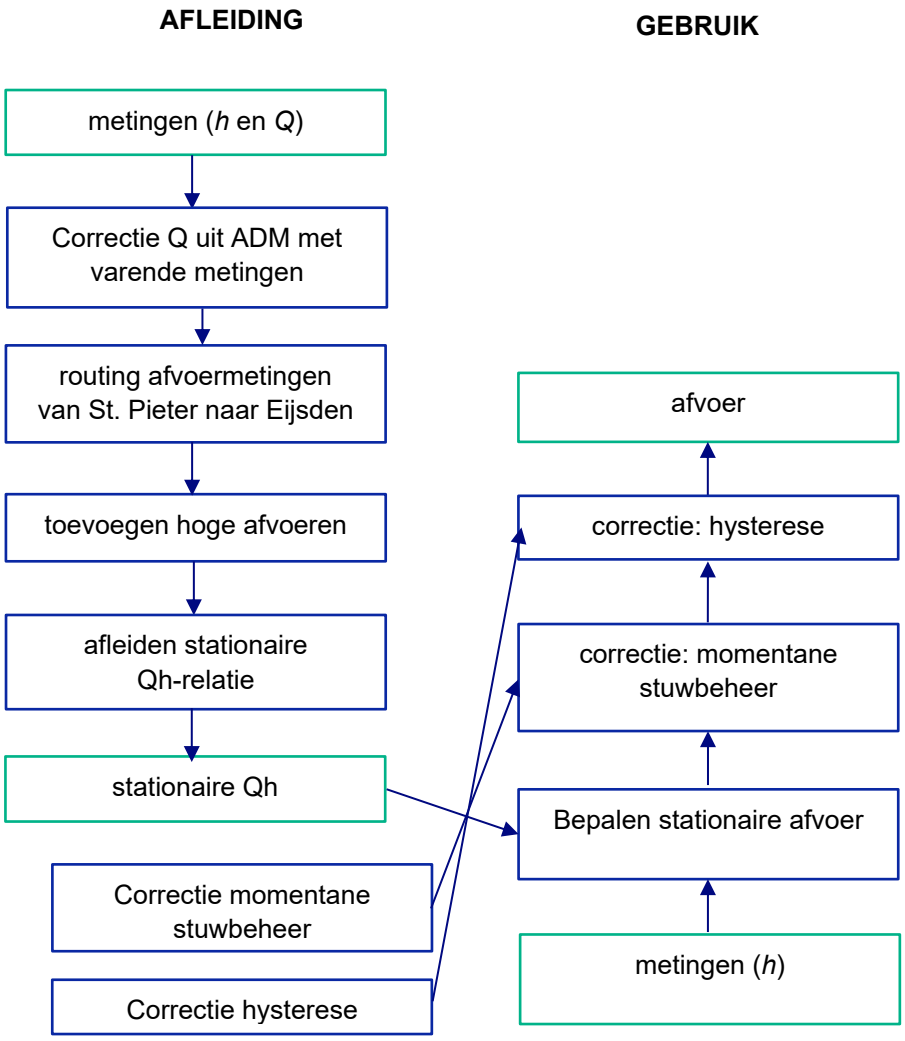
De ontwikkeling van de Qf-relatie bouwt voort op de eerder door IMDC afgeleide Qh-relatie voor Eijsden (IMDC, 2007b). De voornaamste reden om een Qf-relatie te ontwikkelen was om de invloed van het beheer van stuw Borgharen (benedenstrooms van Eijsden) en stuw bij waterkrachtcentrale Lixhe (bovenstrooms van Eijsden) beter te kunnen beschrijven (IMDC, 2009a). IMDC (2009a) noemt dat Rijkswaterstaat in eerste instantie de wens had om de Qf-relatie voor Eijsden op dezelfde manier af te leiden als voor de Rijn: Ogink & Stolker (2004) en HKV (2009). Echter, gezien vooral grotere waterstandsgradiënten en de grote temporele variaties met soms negatieve afvoer, bleek een andere aanpak nodig. De meest actuele Qf-relatie is beschreven in RURA-Arnhem (2020) en vatten we hieronder samen.



Figuur 4-1 Situatieschets van de Bovenmaas. Aangepast van Waterpeilen.nl.

4.2.2 Globale afleidingsmethodiek

Figuur 4-2 toont de belangrijkste stappen voor de afleiding van de Qf-relatie bij Eijsden. Omdat bij Eijsden alleen incidenteel afvoer wordt gemeten, worden de ADM-meetreeksen van St. Pieter, de Voer en sluis Ternaaien gebruikt. Na eventuele aanvulling en validatie van de tijdseries, wordt een afvoerreeks voor Eijsden bepaald op basis van de metingen via inverse routing. De afvoerreeks geldt bij het werkelijke stuwbeheer. Door aan de dataset $[Q,h]$-punten uit modelsimulaties toe te voegen voor hoge afvoeren op basis van zowel een afvoergolf als een stationaire afvoer wordt het bereik van de dataset vergroot. Vervolgens wordt een stationaire Qh-relatie bepaald door regressie van de afvoermeetreeks aangevuld met de hoge afvoer simulaties. Parallel aan de afleiding van de stationaire Qh-relatie worden correcties afgeleid voor momentaan stuwbeheer en hysterese, welke worden toegepast bij het gebruik van de relatie.



Figuur 4-2 Methodiek voor de afleiding en het gebruik van de Qf-relatie Eijsden.

4.2.3 Correctie waterstands- en afvoermetingen

Voor de afleiding van de Qf-relatie Eijsden zijn waterstandsmetingen en afvoermetingen voor St. Pieter, Bunde en de Voer uit de periode 1 januari 2016 t/m 31 mei 2019 gebruikt (RURA-Arnhem, 2020). De meetgegevens worden gevalideerd: hiaten worden verwijderd en de data wordt verwerkt tot een reeks op een vast interval van 10 minuten.

De ADM-reeks bij St. Pieter wordt standaard gecorrigeerd aan de hand van ADCP-metingen nabij St. Pieter uit dezelfde periode, waarbij de varende metingen worden verschoven in de tijd (RURA-Arnhem, 2016a). De ADM St. Pieter geeft geen afvoer uit zodra de uiterwaarden overstromen, omdat dan de onnauwkeurigheid te groot kan zijn. De stroomsnelheid wordt continu gemeten, ook bij overstroomde uiterwaarden (dit komt niet vaak voor, aangezien pas vanaf ongeveer 3400 m^3/s de uiterwaarden overstromen). Alleen soms wanneer de sedimentconcentratie zo hoog is dat geen signaal wordt ontvangen, zijn er geen snelheidsmetingen beschikbaar. Echter, de ADM-metingen worden niet bewaard bij overstroomde uiterwaarden. Aanbeveling is om deze ADM-metingen wel te bewaren, zodat ze later gebruikt kunnen worden voor verificatie van (berekende) stroomsnelheid gemiddeld over de hoofdgeul bij hoge afvoeren.

De afvoer bij sluis Ternaaien wordt veroorzaakt door schutten, een lekverlies en wegzijging. Geen van deze bijdragen aan de afvoer wordt gemeten.

Eerder is gebleken dat het langjarig gemiddelde debiet als gevolg van lekverlies ongeveer 4 m^3/s is en als gevolg van wegzijging 2 m^3/s. Hiervan gebruik makend, en gebruik makend van de variatie binnen een dag op basis van de afvoer gemeten bij Bunde, wordt de afvoer bij Ternaaien geschat volgens deze vergelijking (RURA-Arnhem, 2016a en 2020):

$$Q_{Ternaaien} = \frac{10}{16}(Q_{Bunde} - 2{,}5)F$$

Daarin wordt Q_{Bunde} bepaald als het gemiddelde over 6 uur en is F een wegingsfactor, welke wordt bepaald uit interpolatie van een knikpuntentabel op basis van de 9-uursgemiddelde afvoer bij Borgharen-dorp (Tabel 2.8 in RURA-Arnhem, 2020). De waarde van F is 1 bij een afvoer van 0-25 m^3/s bij Borgharen, neemt af voor toenemende afvoer bij Borgharen en is minimaal 0,59 bij afvoeren groter en gelijk aan 4001 m^3/s.

Voor de afvoer bij de Voer (doorgaans kleiner dan 1 m^3/s en daarmee mogelijk van belang bij lage afvoer) hebben de aangeleverde reeksen een interval van 15 minuten. Deze wordt via een interpolatie op een 30minuteninterval, lineaire interpolatie van hiaten en vervolgens interpolatie op een 10-minuteninterval voorbereid voor de bepaling van de afvoer bij Eijsden.

4.2.4 Inverse routing afvoermetingen

Op basis van de gecorrigeerde afvoer- en waterstandsreeksen wordt de afvoerreeks voor Eijsden bepaald via inverse routing van de afvoer bepaald bij St. Pieter (ongeveer 8 km benedenstrooms). IMDC (2007a, 2007b) heeft hiervoor de methode van Muskingum (McCarthy, 1938) voorgesteld. Deze methode is gebaseerd op de massabalans (zie paragraaf 2.2.1), waarbij deze vergelijking over het controlevolume, de Maas tussen Eijsden en St. Pieter, op de tijdstap van de metingen (dt is 10 minuten) wordt geïntegreerd:

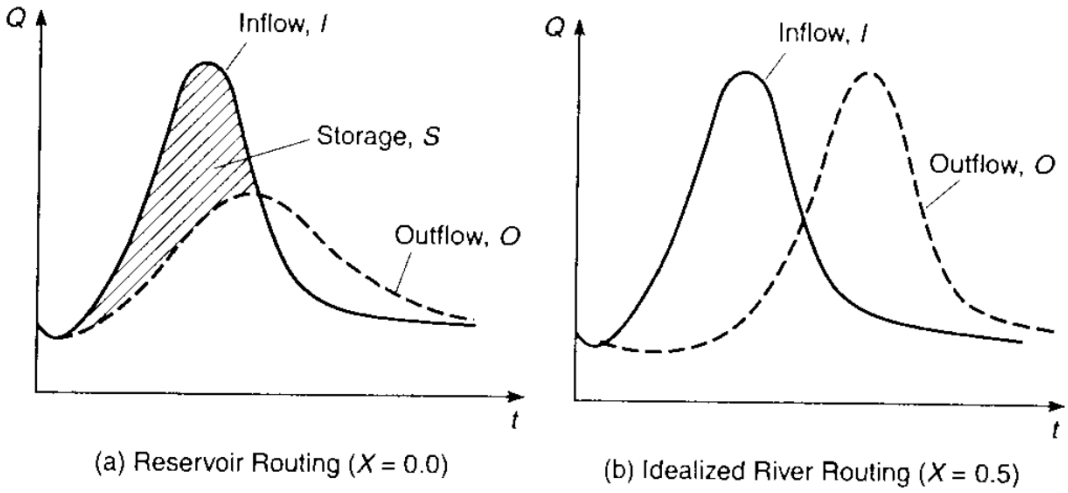
$$Q_{uit} - Q_{in} + \frac{dV_b}{dt} = 0$$

met daarin:
$Q_{in} = Q_{Eijsden} + Q_{Voer}$
$Q_{uit} = Q_{Sint\text{-}Pieter} - Q_{Ternaaien}$
V_b de berging in het controlevolume.

Voor Q_{uit} wordt een lopend gemiddelde over 2 uur bepaald om stabiliteitsredenen (IMDC, 2007b), waarmee hoogfrequente afvoerfluctuaties worden gereduceerd. Omdat deze vergelijking twee onbekenden heeft (Q_{in} en de berging V_b) is een tweede vergelijking nodig. In de methode van Muskingum wordt hiervoor de volgende eenvoudige relatie met een vaste weegfactor gebruikt (en wordt dus geen gebruik gemaakt van de impulsvergelijking):

$$V_b = K\,(X\,Q_{in} + (1 - X)\,Q_{uit})$$

Hierin stelt K de looptijd van de golf voor, en X een weegfactor die over het algemeen in het bereik 0 – 0,5 ligt. Figuur 4.3 toont het gedrag als gevolg van de uitersten van X: met $X = 0$ wordt het gedrag van een stuwmeer benaderd (alleen berging, geen transport), terwijl met $X = 0{,}5$ een pure translatiegolf wordt weergegeven (alleen transport, geen berging, verwaarlozing van wrijving). In rivieren ligt het gedrag van een afvoergolf hier ergens tussenin.



Figuur 4-3 Routing met X=0 (links) en X=0,5 (rechts). Bron: Sturm, 2001.

Door bovengenoemde vergelijkingen te combineren en te discretiseren in de tijd wordt de volgende relatie verkregen:

$$Q_{uit}(t) = aQ_{in}(t) + bQ_{in}(t-1) + cQ_{uit}(t-1)$$

met:

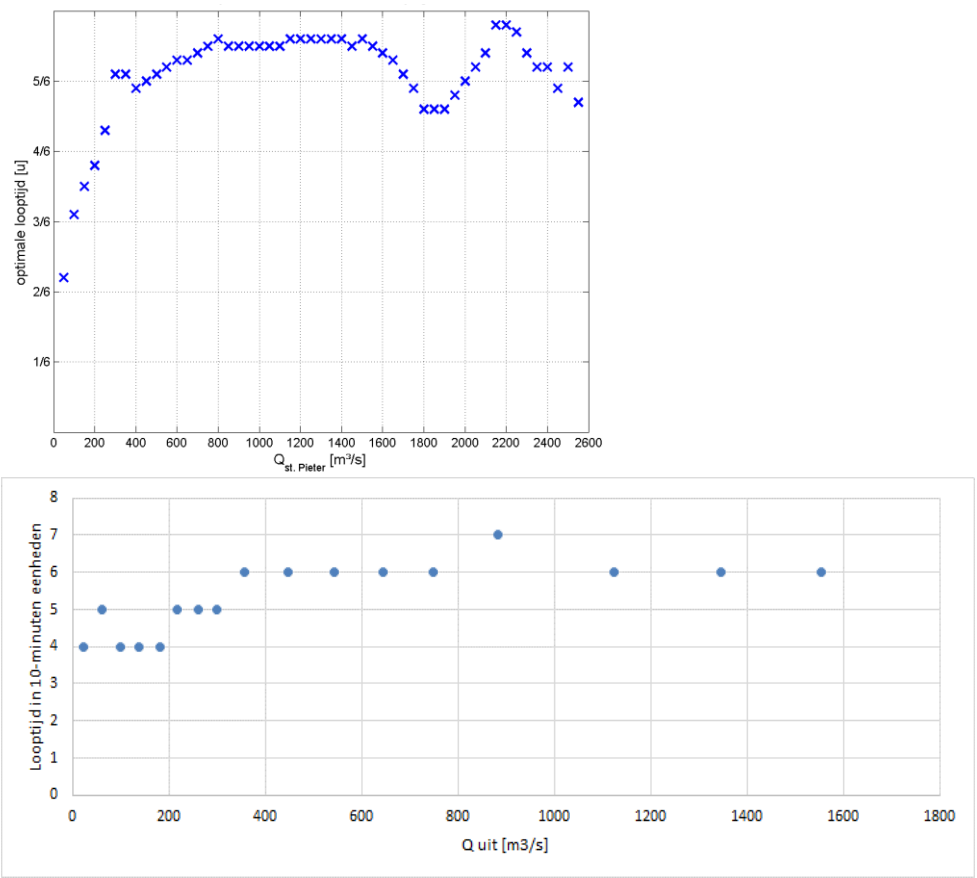
$$a = \frac{-KX + 0{,}5\mathrm{d}t}{K(1-X) + 0{,}5\mathrm{d}t}$$

$$b = \frac{KX + 0{,}5\mathrm{d}t}{K(1-X) + 0{,}5\mathrm{d}t}$$

$$c = \frac{K(1-X) - 0{,}5\mathrm{d}t}{K(1-X) + 0{,}5\mathrm{d}t}$$

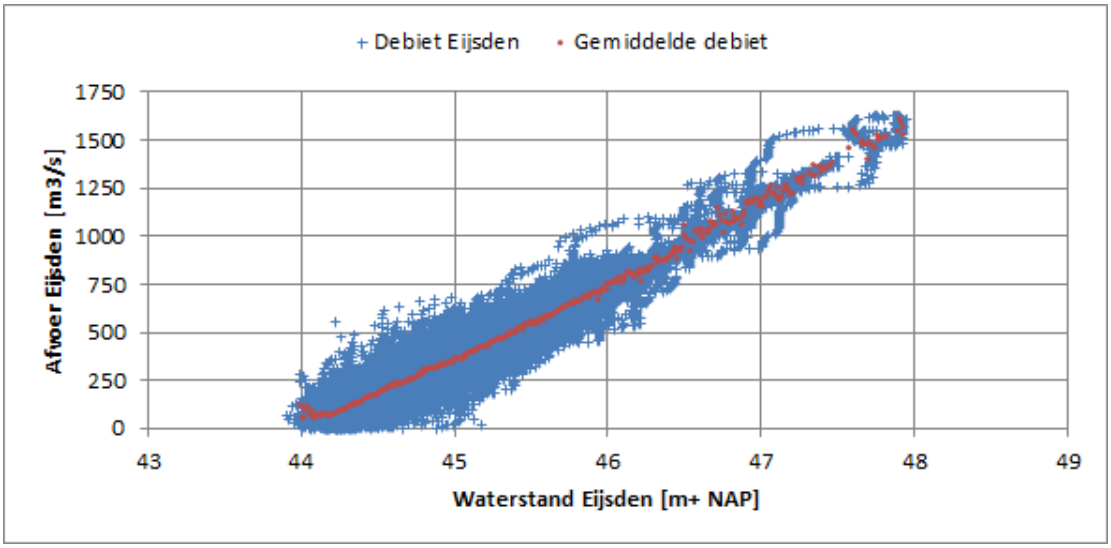
Voor het traject Eijsden – St. Pieter is de waarde van *K* bepaald voor verschillende afvoerklassen bij St. Pieter. In IMDC (2007b) is per afvoerinterval van 50 m^3/s een *K*-waarde gekozen waarbij de kruiscorrelatie[4] tussen de waterstandsreeksen bij Eijsden en St. Pieter maximaal is. Het resultaat ligt tussen 20 minuten voor de laagste afvoer tot bijna 60 minuten voor de hogere afvoer 2200 m^3/s. In RURA-Arnhem (2020) is de afvoerafhankelijke looptijd opnieuw bepaald voor afvoerintervallen die in grootte verschillen. Het resultaat ligt tussen 40 en 70 minuten. Hoewel de minimale looptijd bij lage afvoer verschilt, is het patroon vergelijkbaar en zijn veranderingen in looptijd in de tussengelegen periode waarschijnlijk beperkt.

[4] De kruiscorrelatie wordt bepaald door voor alle (equidistante) tijdstippen de waterstand bij Eijsden op tijdstip *t* te vermenigvuldigen met de waterstand bij St. Pieter op tijdstip *t* + *K* en de resultaten vervolgens bij elkaar op te tellen. In formulevorm, voor continue functies (reeksen) *f* en *g*: $R_{fg}(K) = (f \star g)(K) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)g(t+K)\,dt$



Figuur 4-4 Looptijd (K-waarde) voor traject Eijsden – St. Pieter door IMDC (2007b; boven) en door RURA-Arnhem (2020; onder).

Voor de weegfactor *X* voert IMDC (2007b) een gevoeligheidsanalyse uit. Voor verschillende waarden van *X* worden de geroute debieten $Q_{Eijsden}$ uitgezet tegen $H_{Eijsden}$. Vervolgens wordt een relatie tussen *Q* en *H* bepaald door middel van LOWESS (locally weighted scatterplot smoothing). Geconcludeerd wordt dat variatie van *X* leidt tot een debietverschil van maximaal 2,5 m^3/s in de Qh-relatie. Dit komt omdat variatie van *X* met name invloed heeft op de spreiding in afvoeren bij een bepaalde waterstand, maar niet zozeer op de gemiddelde Qh-relatie. Voor de eenvoud wordt daarom gekozen voor *X* = 0,5: een golf met alleen transport en geen berging. Deze waarde is overgenomen door RURA-Arnhem (2016, 2020). Het resultaat voor de periode 1-1-2016 tot en met 1-6-2019 is getoond in Figuur 4-5, waarbij hiaten veroorzaakt door initialisatie die groter waren dan 2% van de verwachtingswaarde zijn verwijderd. Figuur 4-5 toont ook dat bij een waterstand van 45 m NAP een grote variatie in afvoer voorkomt. Deze variatie wordt voor een groot deel veroorzaakt door de variatie in afvoer als gevolg van plotseling starten en eindigen van lozingen bij waterkrachtcentrale Lixhe en de stand van de stuw bij Borgharen.



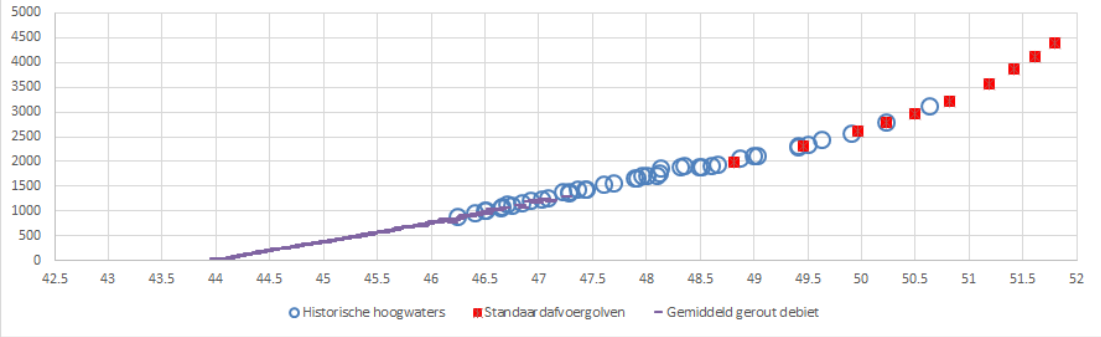
Figuur 4-5 Afvoer Eijsden bepaald via Muskingum-routing (blauw) en het debiet gemiddeld per cm waterstand (rood); Bron: RURA-Arnhem (2020).

Discussie

Muskingum-routing kan alleen worden gebruikt wanneer de stroming op elk moment als stationair kan worden beschouwd. Deze aanname is geldig wanneer de stroming langzaam varieert. Als gevolg van stuwbeheer en lozingen waterkrachtcentrale Lixhe kan de afvoer op het traject Eijsden – St. Pieter echter sterk fluctueren. Op deze momenten levert de inverse Muskingum-routing geen goede schatting van de afvoer bij Eijsden.

4.2.5 Toevoegen hoge afvoeren op basis van simulaties en correcties

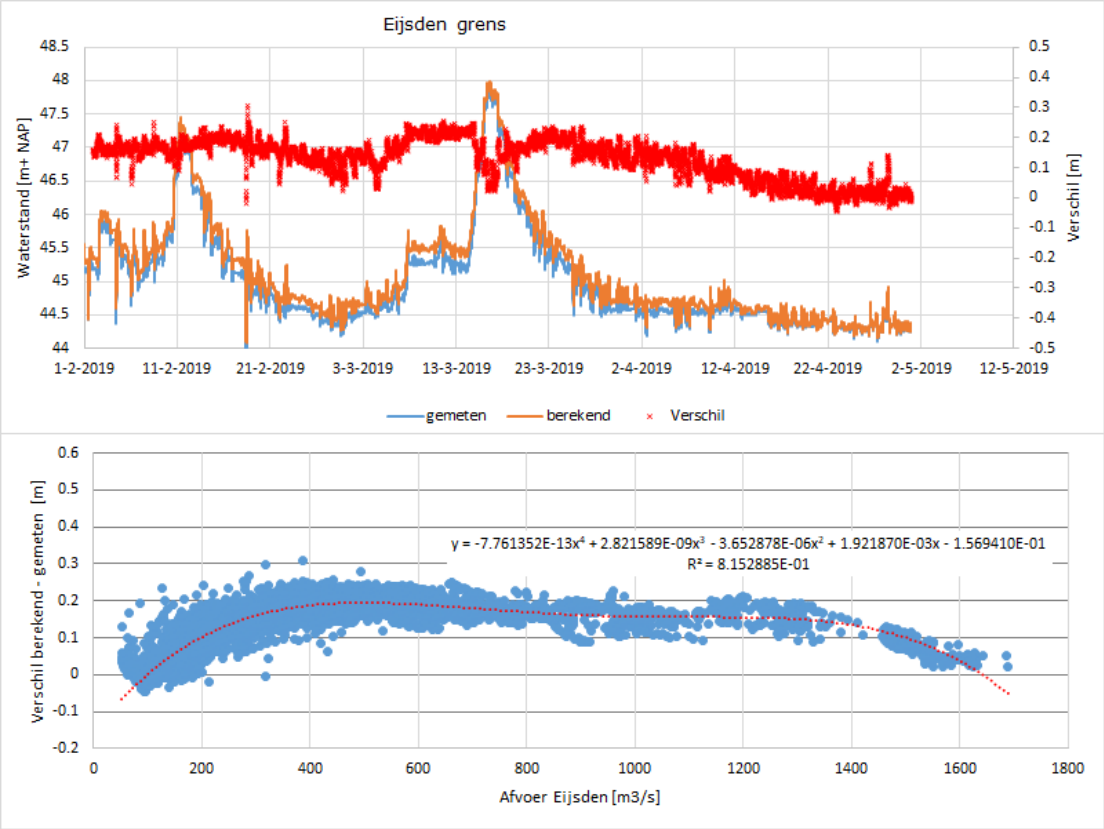
Omdat er beperkt afvoermetingen zijn in het hoge bereik, worden berekende waterstand-afvoer koppels toegevoegd op basis van historische afvoergolven, standaardafvoergolven en stationaire afvoeren. De WAQUA-berekeningen zijn uitgevoerd met modelschematisatie waqua-maas-j19-5-v1 voor zowel ongestuwde als gestuwde afvoeren. De Qf-relatie wordt afgeleid op basis van de afvoeren met gemiddeld stuwbeheer (Figuur 4-6). Rond de overgang van afvoer bepaald uit metingen via routing en berekend afvoer, in het bereik tussen 47,1 en 48,5 m NAP, is een ‘bult’ zichtbaar: de afgeleide van de afvoer neemt niet monotoon toe met de waterstand. Dit is wel een eis voor een Qh-relatie. Wanneer op basis van de gegevens in Figuur 4-6 een meervoudige Qh-relatie wordt bepaald, kan één van de machtsfuncties een negatieve en fysisch incorrecte waarde krijgen. Om dit te voorkomen is ervoor gekozen de datakoppels in het bereik tussen 47,1 en 48,5 m NAP te elimineren. Als laatste zijn de overgebleven berekende waterstanden op basis van de standaardafvoergolven en historische afvoergolven gecorrigeerd. Bij deze correctie zijn de ruwe WAQUA-resultaten gecorrigeerd om ze op de metingen te laten aansluiten, conform de methode van IMDC (2010).



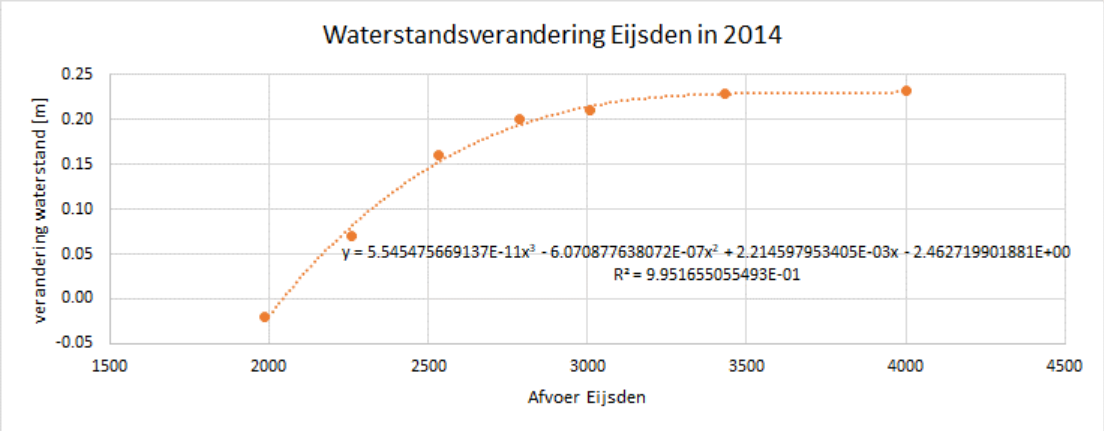
Figuur 4-6 Gestuwde afvoer Eijsden bepaald voor historische hoogwaters, standaardafvoergolven en stationaire afvoeren; Aangepast van RURA-Arnhem (2020).

Voor de correcties van de waterstand berekend met WAQUA is, na het uitwerken van verschillende opties, per afvoerbereik voor de volgende methode gekozen (RURA-Arnhem, 2020):

- 800 < Afvoer Eijsden <= 1584 m^3/s: correctie volgens regressiefunctie in Figuur 4-7. De regressiefunctie is bepaald door ruwe WAQUA-resultaten te vergelijken met metingen voor de periode 01-02-2019 t/m 30-04-2019 waarin een hogere afvoer optrad. In die simulatie is rekening gehouden met het werkelijke stuwbeheer bij stuw Borgharen. De berekeningen boven 800 m^3/s laten een overschatting zien tot 0,2 m. Het verschil tussen berekende en gemeten waterstand bij Eijsden is uitgezet tegen de afvoer bij Eijsden volgens de Qf-relatie uit 2016 (RURA-Arnhem, 2020). Merk op dat deze afvoer is bepaald op basis van de verouderde Qf-relatie.
- 1584 < Afvoer Eijsden <= 2167 m^3/s: correctie is +0,05 m, op basis van de overschatting voor afvoeren groter dan 1584 m^3/s (aangenomen grenswaarde, Figuur 4-7)
- 2167 < Afvoer Eijsden <= 3910 m^3/s: correctie volgens regressiefunctie op basis van verschillende hoogwaters (Figuur 4-8). Boven ongeveer 2100 m^3/s zijn de berekende waterstanden systematisch hoger dan de gemeten waterstanden. Het is niet plausibel dat bij de vijf hoogste opgetreden afvoeren de waterstand hoger is dan volgens metingen. De overschatting bij de hoogwaters van 1993 en 2003 bedraagt ongeveer 0,2 m en komt daarmee overeen met de verandering van waterstanden volgens WAQUA in 2014. Dit heeft waarschijnlijk te maken met de overgang van de 4^e naar de 5^e generatie WAQUA-modellen. Besloten is de waterstand voor dit hoge afvoerbereik te corrigeren volgens de regressie in Figuur 4-8.
- Afvoer Eijsden >3910 m^3/s: +0,23. Deze grenswaarde wordt aangenomen voor de hoogste afvoeren, gezien het horizontale verloop van het verschil rechts in Figuur 4-8.



Figuur 4-7 Waterstandtijdseries bij Eijsden voor een periode met een hogere afvoer berekend en gemeten (boven) en het verschil met in rood een fit die wordt gebruikt als correctie (onder); Bron: RURA-Arnhem (2020).



Figuur 4-8 Overschatting van waterstand berekend met WAQUA in het hoge afvoerbereik, waarbij de twee punten rechts in de figuur zijn toegevoegd om de foutfunctie constant op 0,23 m te houden bij extreme afvoer (deze twee punten zijn niet gemeten); Bron: RURA-Arnhem (2020).

4.2.6 Afleiden stationaire Qh-relatie

Voordat een Qh-relatie afgeleid kan worden op basis van gemiddeld stuwbeheer, is het belangrijk te verifiëren of er geen wijzigingen zijn geweest in het effect van stuw Borgharen op het verval tussen Eijsden en Borgharen-Julianakanaal. IMDC (2010) heeft dit effect met een relatie beschreven als functie van de waterstand bij Eijsden. Een controle met verval in de periode 2011-2013 laat zien dat die functie nog geldig is tot 47,0 m NAP.

Voor hoge afvoeren en waterstanden tussen 47,00 en 47,65 m NAP is er een significant verschil dat veroorzaakt wordt door de ingrepen benedenstrooms van stuw Borgharen en de stuwstand (RURA-Arnhem, 2016). Daarboven is de stuw normaalgesproken getrokken. Voor de Maas bij Eijsden wordt de Qh-relatie beschreven door een drievoudige functie van de vorm $Q(h) = a(h - h_0)^b$, zoals beschreven bij de theorie (paragrafen 2.2 en 2.3). De deelbereiken die hierbij worden onderscheiden (dat wil zeggen de waarden voor h_0) worden niet direct afgeleid uit de geometrie van de dwarsdoorsnede, maar op basis van LOWESS op de datapunten [$H_{Eijsden}$, $Q_{Eijsden}$], waarbij $Q_{Eijsden}$ het resultaat is van de inverse Muskingum-routing beschreven in paragraaf 4.2.4. Vervolgens worden voor elk deelbereik de waarden van *a* en *b* geoptimaliseerd op basis van de Mean Squared Error (MSE). Hierbij wordt *b* gevarieerd tussen 0,5 en 2,5, terwijl aan *a* geen limieten worden gesteld (IMDC, 2009a).

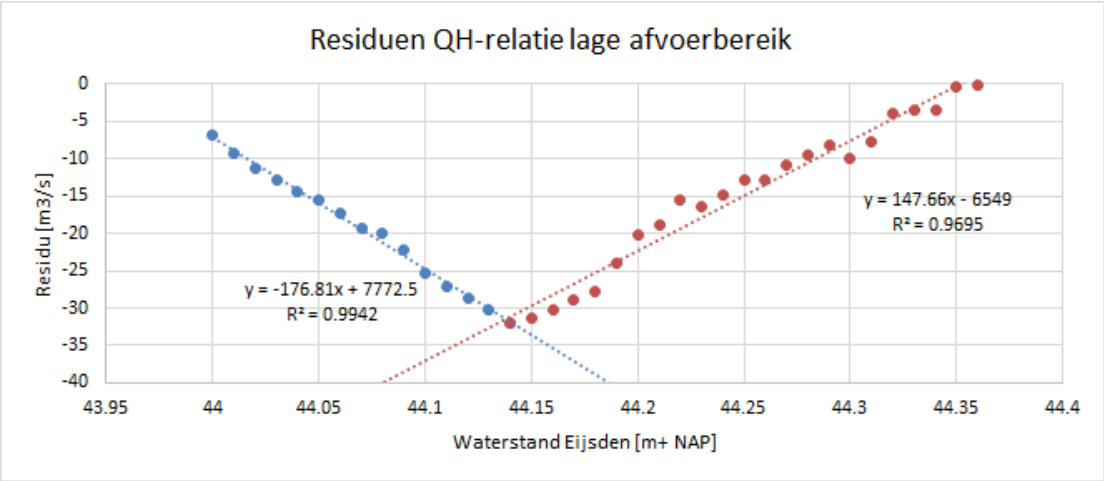
RURA-Arnhem (2020) komt op basis van deze methode uit op de volgende stationaire Qh-relatie voor Eijsden:

$h_E \leq 47{,}7$	$Q_s^{(1)} = Q_s^{(2)} - 25{,}2\ (47{,}7 - h_E)^{1{,}4}$
$47{,}7 < h_E \leq 49{,}5$	$Q_s^{(2)} = 138{,}3397\ (h_E - 42{,}78)^{1{,}5}$
$49{,}5 < h_E \leq 50{,}6$	$Q_s^{(3)} = Q_s^{(2)} + 181{,}75\ (h_E - 49{,}50)^{1{,}5}$
$h_E > 50{,}6$	$Q_s^{(4)} = Q_s^{(3)} + 224{,}296\ (h_E - 50{,}60)^{1{,}5}$

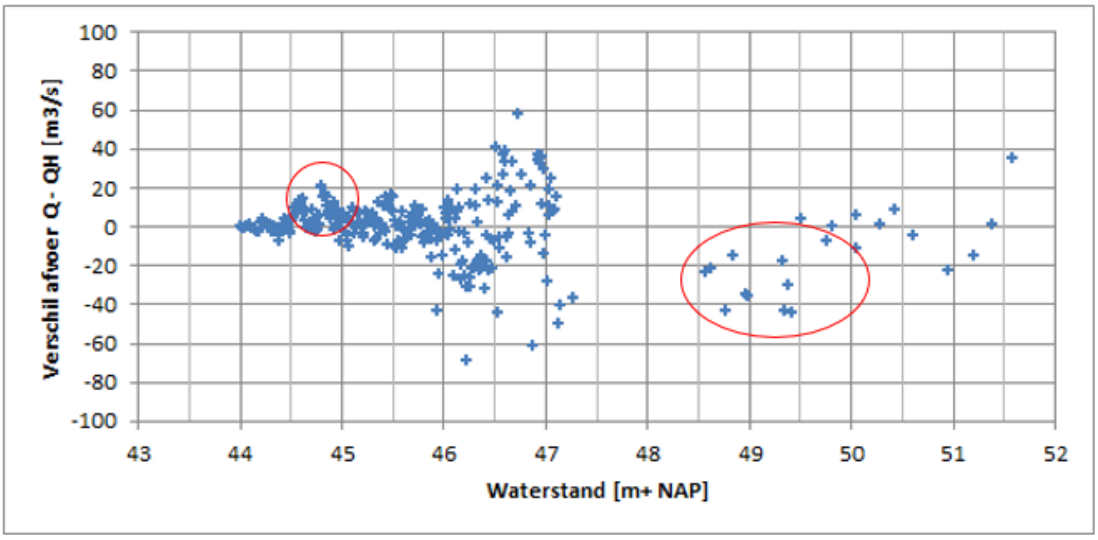
In het residu is voor lage waterstanden een afhankelijkheid zichtbaar (Figuur 4-9) met gebruik van de Qh-relatie hierboven. Deze afwijking is lineair afhankelijk van de afvoer, en hiervoor kan worden gecorrigeerd door twee relaties toe te voegen aan de Qh-relatie voor de laagste waterstanden:

$43{,}9\ h_E < 44{,}15$	$Q_s^{(1)} = Q_s^{(2)} - 25{,}2\ (47{,}7 - h_E)^{1{,}4} - 176{,}81\ h_E + 7772{,}5$
$44{,}15\ h_E \leq 44{,}35$	$Q_s^{(1)} = Q_s^{(2)} - 25{,}2\ (47{,}7 - h_E)^{1{,}4} + 147{,}66\ h_E - 6549$

De Qh-relatie 2020 om afvoer te bepalen uit gemeten waterstand bij Eijsden bij gemiddeld stuwbeheer bestaat uit deze zes vergelijkingen. Figuur 4-10 toont dat binnen twee waterstandsbereiken een systematische fout optreedt. Er zijn testen gedaan om deze systematische fouten te verminderen, maar dit heeft niet geleid tot verbetering (RURA-Arnhem, 2020).



Figuur 4-9 Residu (afvoer Eijsden op basis van inverse routing minus de afvoer Eijsden op basis van relatie) voor de laagste waterstanden; Bron: RURA-Arnhem (2020).



Figuur 4-10 Residu voor hele waterstandsbereik met systematischere afwijking aangegeven als rode ellips; Bron: RURA-Arnhem (2020).

4.2.7 Correctie voor momentane stuwbeheer

De Qh-relatie (zes vergelijkingen) gaat uit van gemiddeld stuwbeheer en is stationair. Door de grote variatie in afvoer en waterstand die kan optreden op locaties in de Boven-Maas is ervoor gekozen te corrigeren voor momentaan stuwbeheer en voor hysterese ná het bepalen van de afvoer op basis van de stationaire Qh-relatie. We beschrijven hier hoe die correcties zijn afgeleid.

Bij eenzelfde waterstand bij Eijsden kan er hoger of lager worden gestuwd dan in het gemiddelde stuwbeheer waarop de stationaire Qh-relatie is gebaseerd (een deel van de grote variatie in afvoer bij een lagere waterstand wordt hierdoor verklaard, zie bijvoorbeeld Figuur 4-5). De afvoer na correctie voor stuwbeheer volgt uit:

$$Q_{stationair_stuw} = Q_{stationair} + Q_{stuw}$$

met daarin:

$$Q_{stuw} = C_{stuw}\, Q_{stuwinvloed}$$

Om het effect van momentaan stuwbeheer mee te nemen wordt een correctie bepaald door een Qh-relatie af te leiden voor verschillende klassen van de waterstand bij Borgharen-Julianakanaal. Hiermee wordt impliciet een afhankelijkheid van het verval tussen Eijsden en Borgharen-Julianakanaal geïntroduceerd. In RURA-Arnhem (2016a) is onderzocht hoe een middeling van de waterstand bij Borgharen-Julianakanaal tot een beter resultaat leidt. De uitkomst is dat deze waterstand het beste gemiddeld kan worden over de metingen op tijdstip *t* tot en met *t*-4, zodat de invloed van translatiegolven als gevolg van schuttingen bij sluis Born (verder benedenstrooms op het Julianakanaal, met een typische duur van 1 tijdstap) wordt verminderd en voldoende representatief is voor tijdstip *t*.

Voor iedere klasse van die waterstand is de relatie gefit van dezelfde vorm als de stationaire Qh-relatie in het lage waterstandsbereik voor de waterstand bij Eijsden (paragraaf 4.2.6):

$$Q_{stationair_stuw} = -25{,}2\,(47{,}7-h_E)^{1,4} + C_{stuw}\,(47{,}7-h_E)^{1,4} \qquad h_E \leq 47{,}7$$

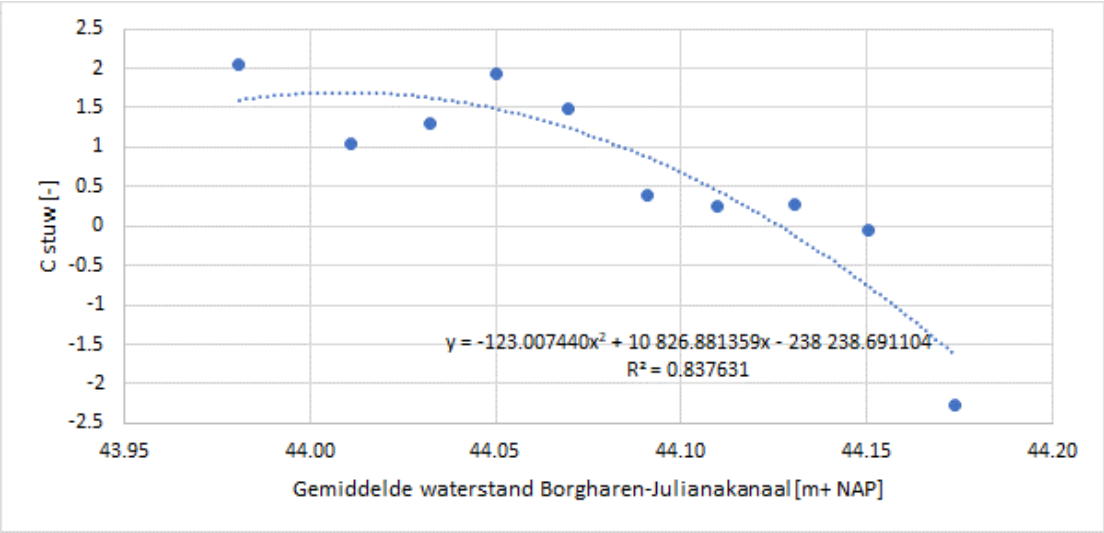
Daarbij is per waterstandsklasse bij Borgharen-Julianakanaal de optimale C_{stuw} bepaald, zodat:

$$\frac{\sum_n^1 Q_{routing} - Q_{Qh} + C_{stuw}\, f_{stuw}}{n} = 0$$

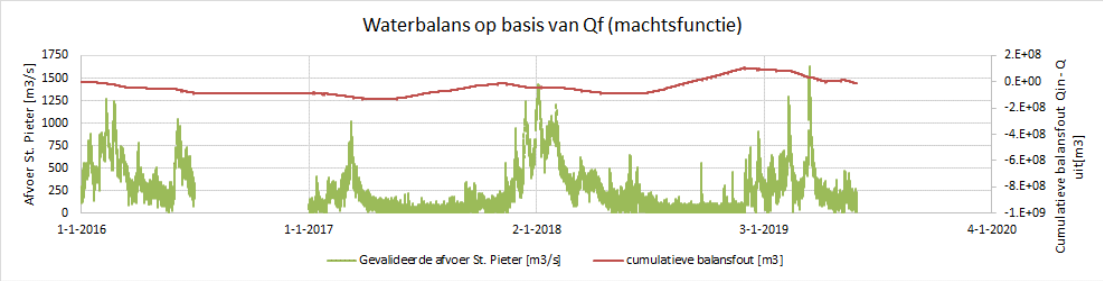
met:

$Q_{routing}$ = debiet uit inverse Muskingum routing
Q_{Qh} = debiet uit stationaire Qh – relatie
$f_{stuw} = (47{,}7 - h_E)^{1,4}$

Figuur 4-11 toont het resultaat per klasse (de punten). Door deze punten is een tweedegraads polynoom gefit. Op basis van dit resultaat kan met C_{stuw} (gemiddelde waterstand Borgharen-Julianakanaal) en de waterstand bij Eijsden de afvoer bij Eijsden worden bepaald. Merk op dat de relatie door deze correctie voor momentaan stuwbeheer een Qf-relatie is. Ter verificatie van deze Qf-relatie bepaalt RURA-Arnhem (2020) een waterbalans met over 3 jaar slechts een sluitfout van – 12 miljoen m^3 (gemiddeld 0,13 m^3/s te laag bij Eijsden ten opzichte van de getransleerde afvoer (Figuur 4-12). Echter, te zien is dat de balans toeneemt bij lagere afvoeren en juist een systematische onderschatting vertoont bij hoge afvoeren. Om deze reden zijn andere methoden zoals een polynoomfit voor de stuwfunctie getest, maar die leverde een onrealistische steile afgeleide van afvoer naar waterstand in het hogere bereik. Vanwege de betere fysische basis is de machtsfunctie voorgesteld (RURA-Arnhem, 2020).



Figuur 4-11 C_{stuw} als functie van de gemiddelde waterstand bij Borgharen-Julianakanaal. Bron: RURA-Arnhem (2020).



Figuur 4-12 Cumulatieve Q_{in}-Q_{uit} cumulatief (rood; as rechts) en de afvoer bij St. Pieter (groen; as links). Bron: RURA-Arnhem (2020).

Discussie

- In RURA-Arnhem (2016a; 2020) wordt de correctie voor momentaan stuwbeheer niet gevalideerd door een grafiek met [$Q_{Eijsden}$, $h_{Eijsden}$] voor verschillend stuwpeil bij Borgharen. Het is nu zonder analyse van de meegeleverde Excel bestanden niet inzichtelijk wat het effect is van de correctie voor momentaan stuwbeheer ten opzichte van de stationaire Qh-relatie. Gezien de kleine verschillen in waterstandsvariatie bij Borgharen is niet duidelijk of de correctie noodzakelijk is en hoe groot deze is ten opzichte van de fluctuaties in waterstand en afvoer die optreden.
- Daarnaast wordt de theoretische achtergrond van de toegepaste correctie niet duidelijk. De methode die wordt gepresenteerd in paragraaf 2.5.2 is in het verleden ook toegepast voor Eijsden (IMDC, 2009a), maar deze bleek onvoldoende geschikt omdat de condities vaak te zeer afwijken van uniforme en stationaire stroming. Zo kunnen het gemeten verval en het referentieverval een tegengesteld teken hebben. Een ander probleem is dat het verval tussen Eijsden en Borgharen naar nul gaat voor een lage waterstand bij Eijsden. Als gevolg van onzekerheid in de invoerparameters kunnen dan onrealistisch grote afvoercorrecties gevonden worden.

4.2.8 Correctie voor hysterese

Als laatste vatten we hier de correctie voor hysterese samen die bij Eijsden wordt toegepast na de correctie voor momentaan stuwbeheer. Bij Eijsden wordt net als bij de Rijn gebruik gemaakt van de variant van Ogink & Stolker (2004) op de formule van Jones (1916), zie paragraaf 2.4.2. Voor de Maas kunnen de lokale en advectieve versnellingstermen in de impulsvergelijking echter niet (altijd) verwaarloosd worden tijdens hoogwatergolven, omdat snelle veranderingen in stroomsnelheid en waterstand kunnen optreden. Dit komt tot uitdrukking in relatief hoge Froudegetallen (ten opzichte van de Rijn), waarbij niet meer wordt voldaan aan de voorwaarde dat $Fr \ll 1$, met $Fr = \frac{u}{\sqrt{gd}}$.

In navolging van Ogink & Stolker (2004) wordt het effect van deze versnellingstermen meegenomen middels een parameter β, waarbij:

$$\beta = 1 + Fr^2\left(2 - \frac{9}{4}\frac{B_s}{B}\right)$$

met B_s de stroomvoerende breedte [m] en B de totale breedte [m], en:

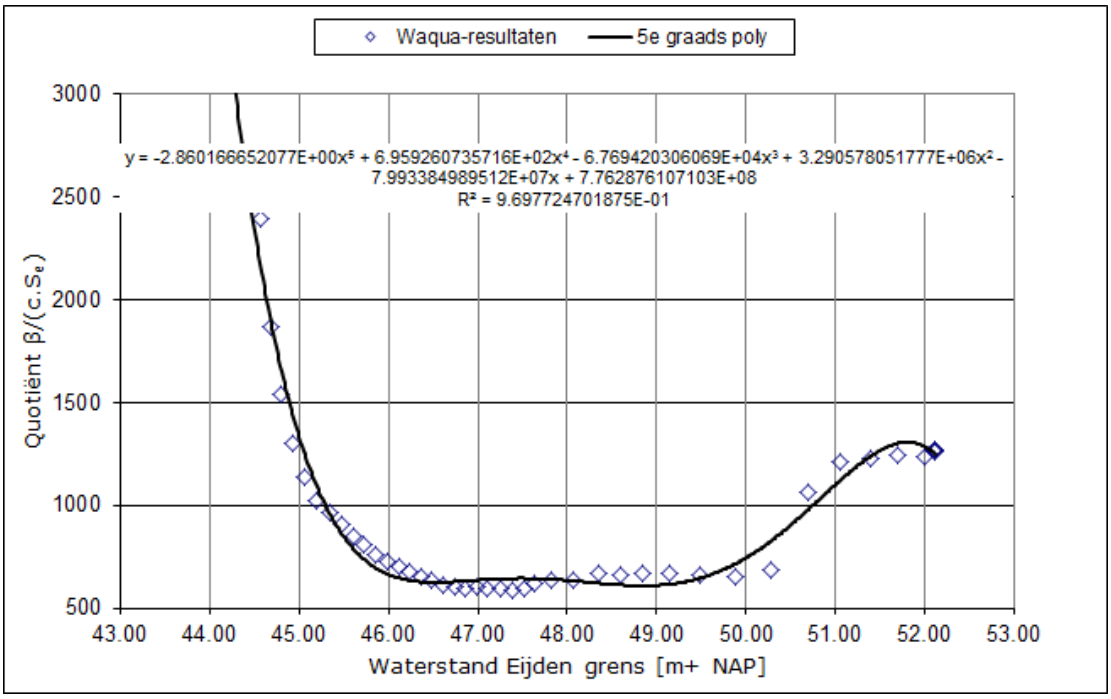
$$Q = Q_0\sqrt{1 + \frac{\beta}{S_e c}\frac{\partial h}{\partial t}}$$

In paragraaf 3.2.4 zagen we dat voor de Rijn is aangenomen dat $\beta \approx 1$.

Een andere complicerende factor is dat als gevolg van stuwwerking de term $1 + \frac{\beta}{S_e c}\frac{\partial h}{\partial t}$ in bepaalde situaties (S_e klein en positief, $\frac{\partial h}{\partial t}$ groot en negatief) negatief kan worden. In dit bereik is de formule van Jones (en ook bovengenoemde variant van Ogink & Stolker) niet geldig, omdat de stroming in dit geval niet als quasi-uniform kan worden beschouwd (voorwaarde voor de introductie van de golfsnelheid c). In de praktijk wordt dit ondervangen door in eerste instantie het energieverhang S_e te vervangen door het (grotere) bodemverhang S_0. Als dit nog steeds tot een negatieve waarde voor de term $1 + \frac{\beta}{S_0 c}\frac{\partial h}{\partial t}$ leidt, wordt geen correctie voor hysterese toegepast:

$$1 + \frac{\beta}{S_e c}\frac{\partial h}{\partial t} < 0 \Rightarrow Q = Q_0\sqrt{1 + \frac{\beta}{S_0 c}\frac{\partial h}{\partial t}}$$
$$1 + \frac{\beta}{S_0 c}\frac{\partial h}{\partial t} < 0 \Rightarrow Q = Q_0$$

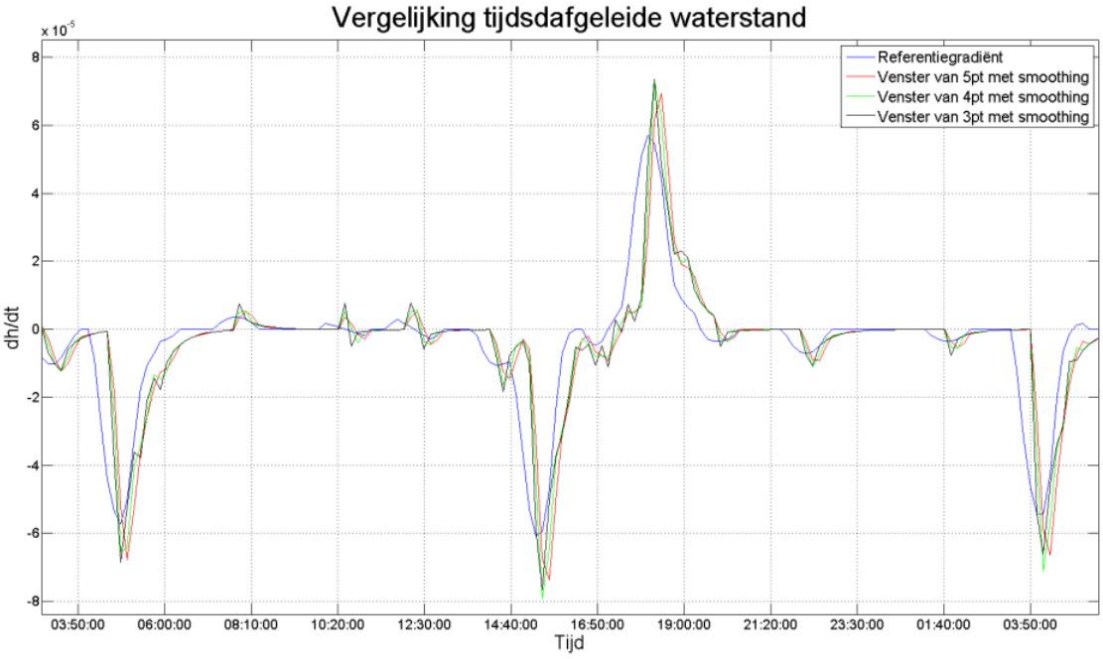
Net als voor de Rijn worden de variabelen (in dit geval S_e, S_0, c, Fr, B_s en B) afgeleid uit modelsimulaties conform IMDC (2009a). Uit WAQUA simulaties, en met gebruikmaking van spiegelverhang in plaats van het niet -representatief bodemverhang voor S_0, worden deze variabelen bepaald per waterstand (Figuur 4-13 voor de quotiënt β/(c*Se)). IMDC (2009a) toonde aan dat gevonden waarden representatief zijn voor iedere afvoergebeurtenis. Door de resulterende waarden voor $\frac{\beta}{S_e c}$ en $\frac{\beta}{S_0 c}$ als functie van de waterstand bij Eijsden worden vervolgens vijfdegraadspolynomen gefit. Omdat voor lage waterstand, de polynomen naar oneindig kunnen gaan, wordt voor h_E < 44,5 m NAP (RURA-Arnhem, 2016a) de waarde gebruikt behorend bij h_E = 44,5 m NAP (2342.51 s/m voor β/(c S_e) en 2074,54 s/m voor β/(c S_0)).



Figuur 4-13 Quotiënt β/(c S_e) als functie van de waterstand bij Eijsden. Bron: RURA-Arnhem (2016a).

Daarnaast is een waarde voor $\frac{\partial h}{\partial t}$ nodig. In IMDC (2009a) wordt deze gradiënt in eerste instantie bepaald door een tweedegraadspolynoom te fitten door 7 opeenvolgende metingen in een symmetrisch venster rond tijdstip *t*, en hiervan de afgeleide te bepalen op tijdstip *t*.

Deze methode wordt gebruikt om het resultaat van de Jones-correctie te vergelijken met dat van andere correctiemethoden, en als referentie om het effect van vereenvoudiging van de bepaling van $\frac{\partial h}{\partial t}$ te beoordelen. In operationele toepassingen is het immers niet mogelijk om toekomstige metingen te gebruiken. In deze toepassing wordt daarom gebruik gemaakt van een tweedegraadspolynoom door de waterstanden op *t*, *t*-1 en *t*-2. Op de resulterende afgeleide wordt vervolgens nog een filtering toegepast dat de afgeleide in de vorige tijdstip gebruikt, waarmee een vloeiender verloop van de afgeleide over de tijd wordt verkregen. Figuur 4-14 toont de tijdsafgeleide met dit filter en verschillende tijdsvensters voor een dag, waarin te zien is dat de gehanteerde afgeleide voor 3-punten verschillende lokale minima en maxima heeft en na-ijlt in vergelijking met de referentie.



Figuur 4-14 Stijgsnelheid waterstand bepaald op basis van een verschillend aantal waterstandspunten, voor een periode van 1 dag (20 – 21 mei 2007). Bron: IMDC (2009a).

Discussie

- Hysterese treedt in de Maas vooral op bij de plotselinge start en beëindiging van lozingen bij waterkrachtcentrale Lixhe bij zowel hoge als lage afvoer, en bij hoogwatergolven. De formule van Jones is niet altijd toepasbaar voor deze situaties, omdat het kan gaan om plotselinge fluctuaties waarbij de quasi-uniforme aanpak niet geldig is. Daarbij komt dat voor de bloksgewijze toe- en afname van de afvoer de stijgsnelheid $\frac{\partial h}{\partial t}$ niet goed kan worden geschat op basis van 3 opeenvolgende waterstanden. Een alternatieve methode om hysterese door dit soort blokvormige variaties te corrigeren is niet bekend.
- Bij Eijsden werd geen afvoer uit metingen gebruikt voor het opstellen van de relatie. Momenteel worden wel metingen uitgevoerd, maar die zijn nog niet gebruikt voor het afleiden van de relaties inclusief correcties. Daarmee is het niet direct te onderbouwen dat de hysteresecorrectie bij normale afvoervariaties tot afvoertijdseries leidt die beter overeenkomen met de werkelijkheid. Wel kan de afvoer bij Eijsden als invoer voor een numeriek model worden gebruikt, en lijkt het resultaat bij St. Pieter inclusief de toename met de capaciteit van de turbines overeen te komen met metingen.

4.3 St. Pieter

4.3.1 Algemeen

Bij de LMW-locatie St. Pieter (Figuur 4-1) wordt waterstand en afvoer gemeten. De afvoer wordt gemeten met een ADM en sinds 2016 aanvullend met een Horizontale Acoustic Doppler Current Profiler (HADCP). De ADM-afvoer is geregeld niet beschikbaar. Een oorzaak is uitval van de ADM bij hoge sediment concentratie, waardoor het signaal onvoldoende doordringt tot de oever aan de overzijde. Een tweede oorzaak is dat de afvoer (en ook de gemeten stroomsnelheid) niet wordt geregistreerd, wanneer de waterstand zo hoog is dat de uiterwaarden meestromen. Om deze redenen wordt een stationaire Qh-relatie afgeleid, zodat voor ontbrekende afvoertijdstappen afvoer kan worden bepaald op basis van de lokale waterstandsmeting. Voor St. Pieter worden slechts een aantal stappen gevolgd vergeleken met de stappen voor Eijsden in Figuur 4-2.

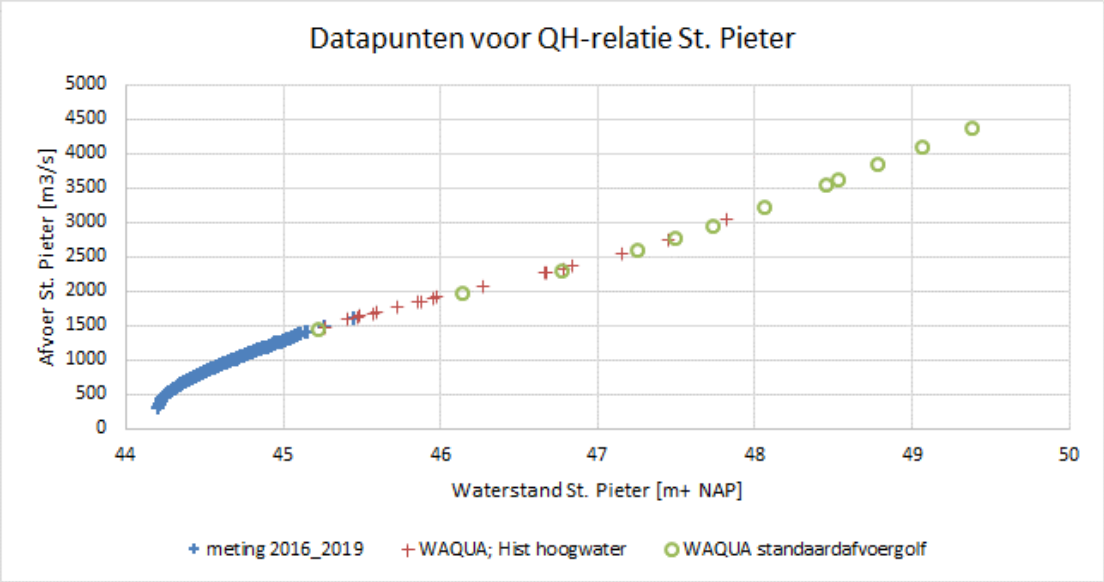
4.3.2 Correctie waterstands- en afvoermetingen

Voor de afleiding van de actuele Qh-relatie St Pieter zijn metingen gebruikt in de periode van 1-1-2016 t/m 31-5-2019, waarin een hoge afvoer optrad van 1633 m^3/s (RURA-Arnhem, 2019). Voor de correctie van waterstands- en afvoermetingen zijn globaal de stappen gevolgd zoals beschreven in paragraaf 4.2.3. Tijdens enkele uren op 23-9-2018, 9-1-2019 en 9-1-2019 was het stuwpeil sterk verlaagd of verhoogd, waarop is besloten deze waterstandsmetingen te verwijderen. De afvoer voor St. Pieter wordt gecorrigeerd en vervolgens in LMW getoond. Deze correctie is niet aangepast, omdat de verschillen te klein waren. De gemiddelde afvoer per 1 cm interval waterstand is gebruikt voor de afleiding.

4.3.3 Toevoegen hoge afvoeren

Het toevoegen van hoge afvoeren is ook voor St. Pieter nodig. Historische hoogwaters van 1984 tot 2019 en verschillende standaardafvoergolven zijn doorgerekend met de WAQUA schematisatie voor 2019. De maximale afvoer en waterstand per simulatie is uitgelezen bij St. Pieter.

Om deze waarden te laten aansluiten op de metingen van 2019 is een correctie doorgevoerd. Met werkelijk stuwbeheer en met afvoer bij Eijsden volgens de Qf-relatie is een WAQUA simulatie uitgevoerd voor de periode 1-2-2019 t/m 30-4-2019. Voor deze periode met daarin het hoogwater in maart 2019 is het systematische verschil bepaald tussen gemeten en berekende afvoer bij St. Pieter. De berekende afvoer onderschatte met ongeveer 25-50 m^3/s. Ter verificatie is dit verschil toegevoegd aan de afvoer bij Eijsden in een nieuwe simulatie, waarmee de afvoer bij St. Pieter voor deze periode goed overeenkomt met metingen. Per afvoer is een waterstandsverschil van 0,0-0,2 m vastgesteld dat is opgeteld bij de berekende waterstand uit de historische hoogwaters en standaardafvoergolven (RURA-Arnhem, 2019). Deze maximale waterstanden per afvoer zijn het uitgangspunt voor het afleiden van de Qh-relatie (Figuur 4-15).



Figuur 4-15 Het resultaat van de gecorrigeerde WAQUA simulaties en de gemeten afvoer per 1 cm waterstandsinterval. (bron: RURA-Arnhem, 2019)

4.3.4 Afleiden Qh-relatie

Conform de procedure zoals beschreven in paragraaf 4.2.6 wordt een stationaire Qh-relatie bepaald. In deze relatie wordt direct het stuwbeheer gefit middels een 5e graads-polynoom afhankelijk van alleen de waterstand bij St. Pieter.

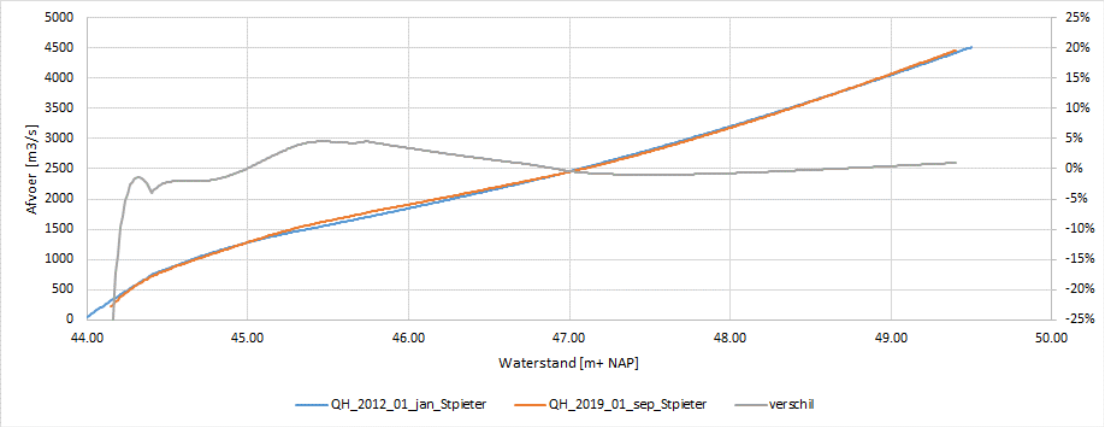
Voor deze fit zijn alleen waterstanden gebruikt vanaf 44,20 m NAP (ongeveer 300 m^3/s) bij St. Pieter, omdat bij lagere waterstanden de stuwstanden aanzienlijk kunnen verschillen en er geen eenduidige Qh-relatie mogelijk is. De resulterende Qh-relatie is (RURA-Arnhem, 2019):

$H_{stP} < 45{,}73$	$Q_s^{(1)} = Q_s^{(2)} + Q_{stuw}$
$45{,}73 \leq H_{stP} <= 46{,}98$	$Q_s^{(2)} = 130{,}15\ (H_{stP} - 40{,}28)^{1{,}54}$
$46{,}98 < H_{StP} <= 48{,}00$	$Q_s^{(3)} = Q_s^{(2)} + 145{,}36\ (H_{stP} - 46{,}98)^{1{,}5}$
$H_{stP} > 48{,}00$	$Q_s^{(4)} = Q_s^{(3)} - 10\ (H_{stP} - 48{,}0)^{4{,}5}$

Met voor de vijfdegraadpolynoom voor het stuwbeheer (voor de waarden van a_x verwijzen we naar RURA-Arnhem, 2019):

$Q_{stuw} = a_1 * H_{stp}^5 + a_2 * H_{stp}^4 + a_3 * H_{stp}^3 + a_4 * H_{stp}^2 + a_5 * H_{stp} + a_6$

Variatie door stuwbeheer treedt volgens deze relatie alleen op voor $H_{stP} < 45{,}73$. Vooral in dit bereik is de relatie veranderd ten opzichte van 2012 (Figuur 4-16). Het verschil voor de laagste waterstand is verklaarbaar is doordat voor de periode van 2019 hoger werd gestuwd dan die voor de relatie van 2012 (RURA-Arnhem, 2019). Voor de hogere waterstanden, is het goed om te realiseren dat het WAQUA-resultaat boven 2700 m^3/s (ongeveer 47,38 m NAP) niet is gecorrigeerd op basis van de afvoergolf in 2019 (de maximale gemeten afvoer was 1633 m^3/s). Het is niet uit te sluiten dat het WAQUA-model ook voor dit hoge bereik te hoge waterstanden berekend. Dat kan echter niet met metingen worden onderbouwd.



Figuur 4-16 Vergelijking 2019 Qh-relatie St. Pieter met 2012, inclusief het relatieve verschil. (bron: RURA-Arnhem, 2019)

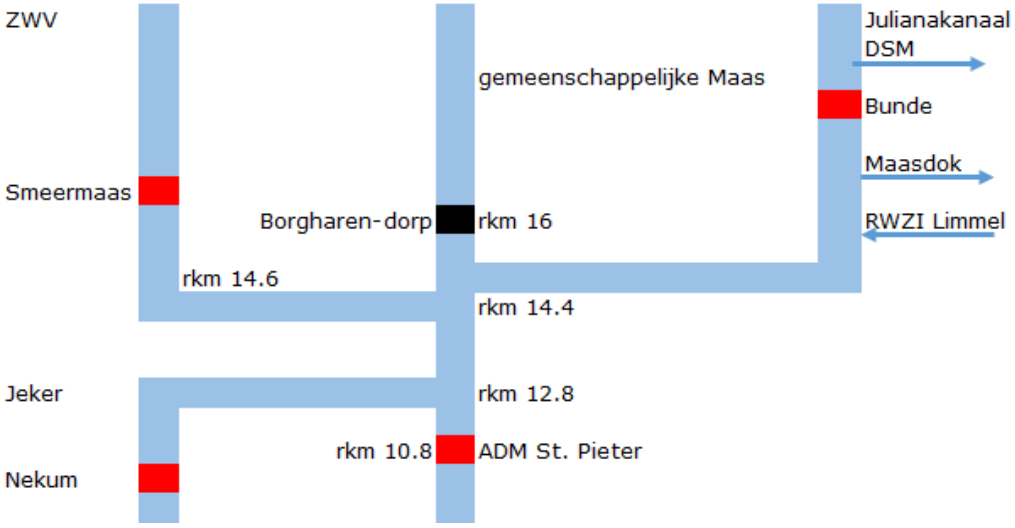
Discussie
De macht in de Qh-relatie voor het hoogste bereik (4,5) wijkt aanzienlijk af van de theoretische waarde 1,5 en wordt vooraf gegaan door een minteken. Het minteken is volgens de theorie niet mogelijk. De invloed van deze term is echter klein in vergelijking tot de overige termen. Toch moet rekening worden gehouden met een grotere relatieve onzekerheid in dit hoge bereik. IMDC (2007a) laat zien dat de originele Qh-relatie op basis van WAQUA sommen ten opzichte van extrapolatie van metingen een verschillend lineair verband laat zien, wat ook wijst op onzekerheid in dit hoogste bereik.

4.4 Borgharen Dorp

4.4.1 Algemeen

Bij Borgharen Dorp is geen recente afvoerreeks beschikbaar op basis van metingen. Voor de waterstand is uitgegaan van dezelfde periode als voor St. Pieter en Eijsden, waarmee een Qh-relatie voor deze locaties zo consistent mogelijk is. RURA-Arnhem (2014a) heeft de historische bepaling van afvoer bij Borgharen op een rij gezet: sinds 1911 zijn zeven verschillende afleidingsmethodes gehanteerd voor het opstellen van een Qh-relatie. Vanwege werkzaamheden aan de Gemeenschappelijke Maas (Grensmaas nabij Borgharen) en de veranderingen in geometrie wordt voor de periode vanaf 2012 de afvoer bij Borgharen tijdelijk afgeleid uit een balansberekening tussen de meetpunten St. Pieter, Jeker, Bunde (Julianakanaal) en Smeermaas (Zuid-Willemsvaart). Figuur 4-17 toont een schematisch overzicht van de meetlocaties en waterlopen.

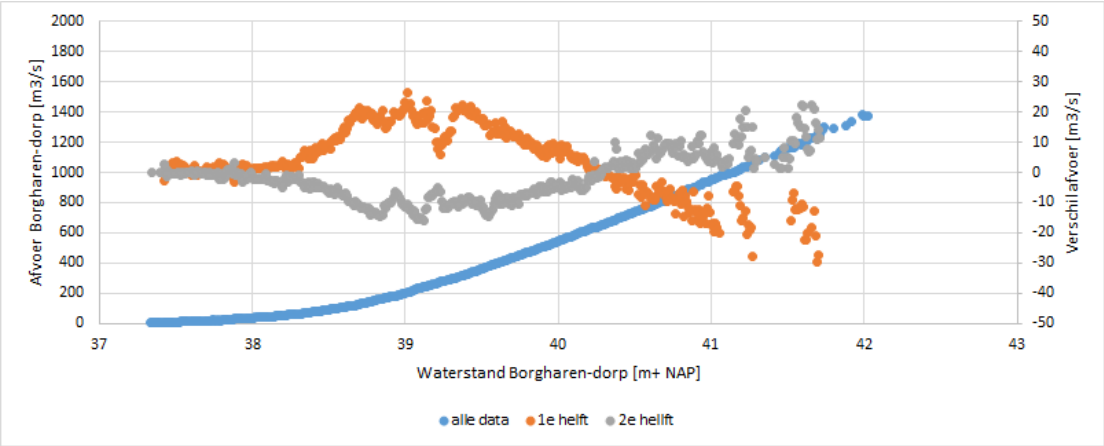
Voor de recente situatie is de afvoerreeks gebaseerd op de afvoer van St. Pieter dat wordt getransleerd naar Borgharen Dorp en worden onttrekkingen en lozingen naar de Zuid-Willemsvaart en Julianakanaal meegenomen. De afvoer via sluis Bosscherveld is onderdeel van de gemeten afvoer bij Smeermaas. Het debiet via overlaat Bosscherveld is onderdeel van de totale afvoer van de gemeenschappelijke Maas. In de Qh-relatie van Borgharen-dorp wordt uitgegaan van deze totale afvoer.



Figuur 4-17 Schematisch overzicht Maas en aansluitende open waterlopen op het traject St. Pieter – Borgharen-dorp.Sluis Bosscherveld en overlaat Bosscherveld ontbreken in de figuur (bron: RURA-Arnhem, 2019).

4.4.2 Correctie en routing afvoer

Dezelfde correcties worden doorgevoerd als voor St. Pieter. Rekening houdend met een looptijd als functie van afvoer voor de meetlocaties is de afvoer bij Borgharen-dorp bepaald voor de periode 1-1-2016 t/m 31-5-2019. Als controle van homogeniteit is de afvoer gemiddeld per 1 cm bepaald voor de eerste helft en de tweede helft van deze periode. Er bleken systematische verschillen op te treden in het verloop van de [Q,h] punten (Figuur 4-18), welke verklaard zouden kunnen worden door erosie en sedimentatie (RURA-Arnhem, 2019). Om die reden is voor het vervolg alleen de tweede helft van de periode gebruikt: 1-9-2017 t/m 31-5-2019. De getransleerde afvoer kwam voldoende goed overeen met beschikbare ADCP metingen bij Borgharen (en St. Pieter).

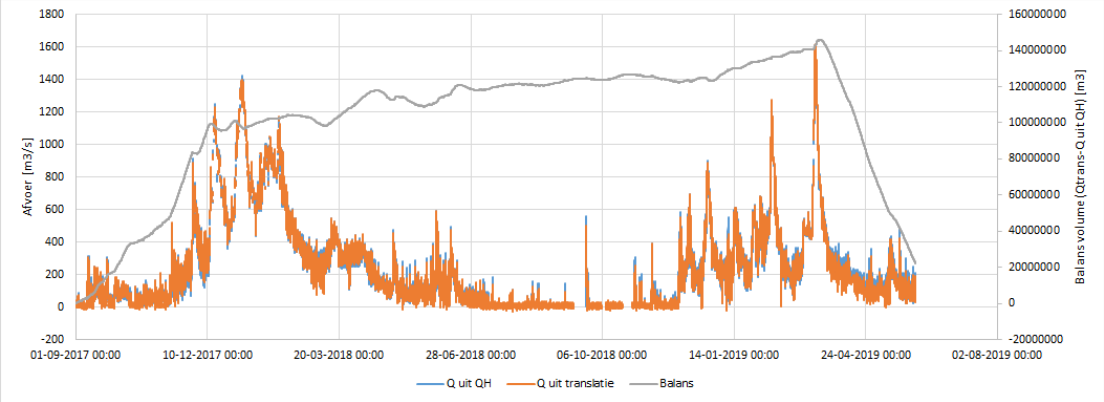


Figuur 4-18 Gemiddelde afvoer per 1 cm waterstandsinterval en het verschil in afvoer voor de eerste en tweede helft van de tijdserie (bron: RURA-Arnhem, 2019).

4.4.3 Afleiden Qh-relatie

Met dezelfde methoden als voor St. Pieter zijn hoge afvoeren toegevoegd en gecorrigeerd op basis van metingen uit 2019 (paragraaf 4.3.3) en is de Qh-relatie afgeleid (paragraaf 4.3.4). Als verificatie van de Qh-relatie is cumulatief het volumeverschil bepaald tussen de afvoer uit de Qh-relatie en de afvoer op basis van de translatie opgeteld (Figuur 4-19).

Netto over de periode ligt het verschil niet ver van 0 m^3 af (de gemiddelde afvoer verschilt minder dan 1 m^3/s), maar in de periode tot 14-12-2017 onderschat de Qh-relatie met gemiddeld 12 m^3/s, terwijl de Qh-relatie onderschat met bijna 20 m^3/s in de periode na 21-3-2019. De conclusie is dat de Qh-relatie zelfs alleen voor de tweede helft van de metingen niet stabiel is, en niet gebruikt kan worden om afvoer te bepalen. Door de hogere afvoeren in 2017 is de geometrie veranderd, zodat er een aanzienlijk effect is op de relatie tussen waterstand en afvoer. Voordat een Qh-relatie opgesteld kan worden die voor een langere periode geldig is, zal eerst de Qh-relatie voor meerdere afvoergolven stabiel moeten zijn.



Figuur 4-19 De cumulatieve volumeverschil voor de tweede helft van de metingen voor Borgharen-Dorp (bron: RURA-Arnhem, 2019).

4.5 Maaseik

4.5.1 Globale afleidingsmethodiek

De Vlaamse overheid (departement Mobiliteit en Openbare Werken) onderhoudt een Qh-relatie voor Maaseik. Bij Maaseik wordt de afvoer vooral beïnvloed door de benedenstroom gelegen stuw Linne. IMDC (2022) heeft de Qh-relatie geactualiseerd en een correctie voor stuwwerking toegevoegd.
Het uitgebreidere onderliggende rapport met de afleiding voor de Qh-relatie was niet beschikbaar voor de voorliggende studie. De stappen voor afleiding verschillen van de stappen voor locaties in Nederlands beheer en zijn beperkt tot:

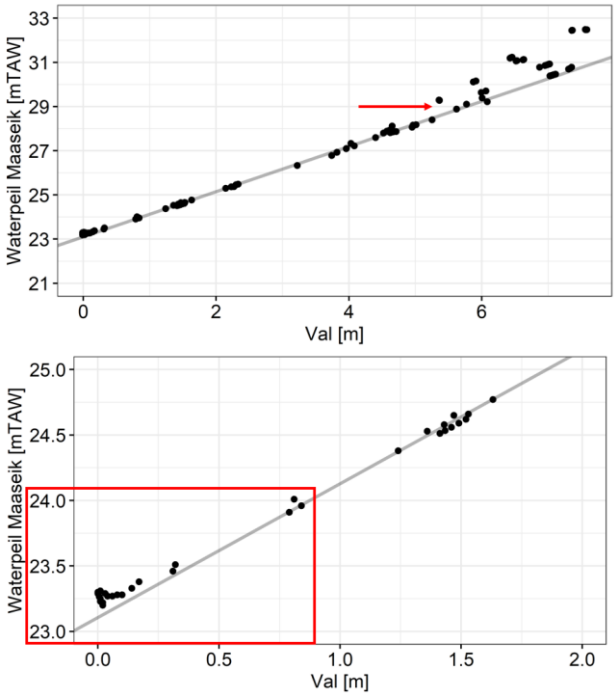
1 Correctie voor stuwwerking
2 Qh-relatie afleiden

4.5.2 Correctie voor stuwwerking

Er zijn ijkingsmetingen beschikbaar voor een breed bereik aan afvoeren. In 2007 vond een verdieping plaats, dus is gekozen alle ijkingsmetingen van na de verdieping tot 16-7-2021 te gebruiken voor het afleiden van een actuele Qh-relatie (IMDC, 2022). Als correctie voor de stuwwerking, wordt op basis van de gemeten waterstand bij Maaseik een ongestuwde waterstand berekend op basis van het verval tot aan Heel (direct bovenstrooms van stuw Linne). De ijkingsmetingen zijn gemiddeld over een periode 15 minuten. Om die reden, en waarschijnlijk ook om kortstondige fluctuaties in de waterstand uit te middelen, wordt de waterstand Heel gemiddeld over het voorafgaande uur om het verval te bepalen. Voor het bereik 23,45 – 29,0 m TAW wordt een lineair verband gevonden voor de waterstand bij Maaseik zonder opstuwing:

$$h_{M,zonder\ opstuwing} = 1{,}02\ (h_M - h_{H,\text{uur}}) + 23{,}11$$

Bij waterstanden hoger dan 29,0 m TAW wijkt het verband af vanwege overstromingseffecten (IMDC, 2022). Bij waterstanden lager dan 23,45 m TAW wijkt het verband af doordat er een grote range aan opstuweffecten is. Deze lage waterstanden worden gecorrigeerd naar de ongestuwde waterstand bij Maaseik met het lineaire verband voor de afleiding van de Qh-relatie.



Figuur 4-20 De waterstand voor Maaseik op momenten van de ijkingsmetingen tegen het verval tussen Maaseik en Heel. Boven: hoge bereik met knikpunt bij 29,0 TAW; Onder: detail voor lage waterstand met de punten beïnvloed door stuwwerking onder 23,45 m TAW (zie rode rechthoek). De grijze lijn toont de lineaire relatie tussen de val en de gemeten waterpeilen voor de ijkingsmetingen tussen de twee knikpunten. Bron: IMDC (2022).

4.5.3 Afleiden Qh-relatie

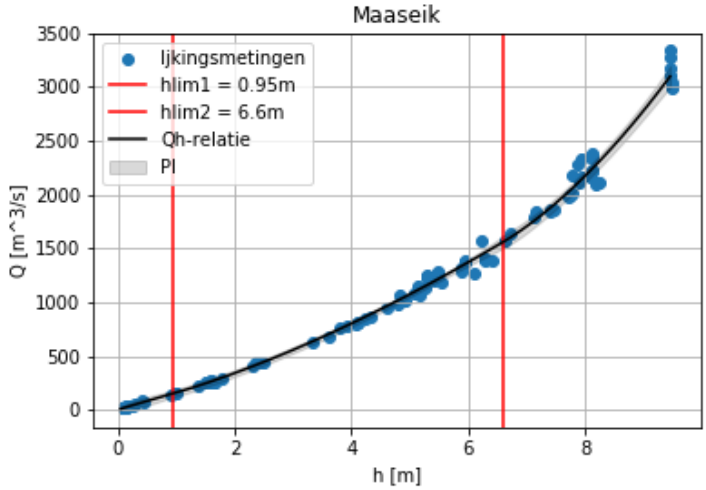
Bij het afleiden van de Qh-relatie is gebruik gemaakt van de knikpunten die zijn gevonden bij het bepalen van het lineaire verband. Dit is elegant, aangezien bij de knikpunten het verband tussen waterstand en afvoer om een fysische reden verandert. De volledige relatie is beschreven als relatieve waterstand, waarbij de relatieve waterstand (h_{rel}) 0 is wanneer de afvoer 0 is. In het document staat niet vermeld hoe de relatieve en absolute waterstand precies gerelateerd zijn. Uitgaande van het eerste knikpunt lijkt 22,50 m TAW overeen te komen met h_{rel} = 0 m. De volledige Qh-relatie is (IMDC, 2009a):

$h_{rel} < 0{,}95$	$Q_s^{(1)} = 157{,}83\ (h_{rel})^{0{,}98}$
$0{,}95 \leq h_{rel} <= 6{,}60$	$Q_s^{(2)} = Q_s^{(1)} + 26{,}32\ (h_{rel} - 0{,}95)^{1{,}77}$
$h_{rel} > 6{,}60$	$Q_s^{(3)} = Q_s^{(2)} + 73{,}26\ (h_{rel} - 6{,}60)^{.87}$

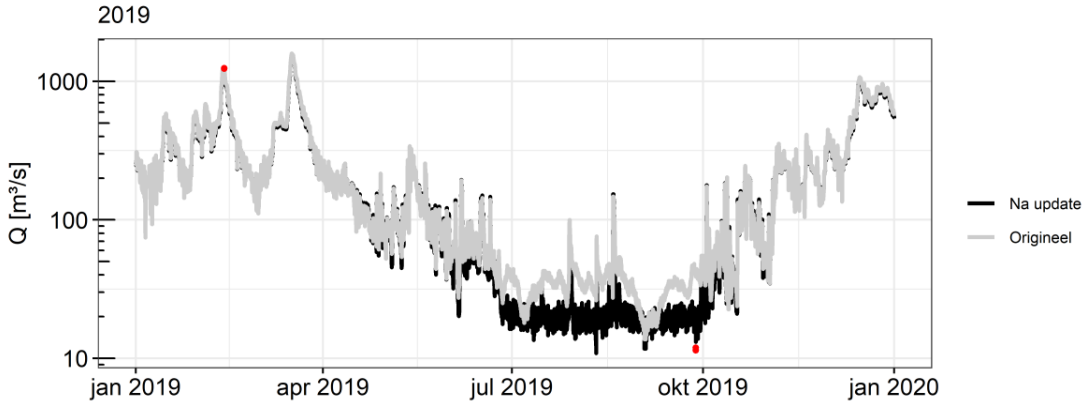
Figuur 4-21 toont het resultaat voor de ijkingsmetingen. De verschillen tussen de voorgaande Qh-relatie zonder correctie voor stuwbeheer en de actuele Qh-relatie staat in Figuur 4-22. Vooral bij de lage waterstanden tussen juli en oktober 2019 is de waterstand lager en deze komt beter overeen met de ijkingsmeting.

Voor gebruik van deze relatie moeten dezelfde stappen worden doorlopen als voor de afleiding (net als voor de Rijn, zie paragraaf 3.2.2).

Wanneer de ongestuwde waterstand lager is dan 23,45 m TAW, moet deze worden gebruikt in plaats van de waterstand gemeten bij Maaseik. In het speciale geval dat de ongestuwde waterstand kleiner is dan de gemeten waterstand bij Maaseik, beveelt IMDC (2022) aan om de gemeten waterstand te gebruiken.



Figuur 4-21 Resulterende Qh-relatie voor Maaseik (zwarte lijn) met de ijkingsmetingen zonder opstuweffecten (blauwe punten). De verticale rode lijnen duiden de grenzen aan van de Qh-relatie (hlim1 = 0,95m en hlim2 = 6,6m). (bron: IMDC, 2022)



Figuur 4-22 Effect van actualisatie en toevoegen correctie stuwwerking voor 2019 op logaritmische schaal (bron: IMDC, 2022).

4.6 Venlo

4.6.1 Algemeen

De afvoer bij Venlo wordt direct beïnvloed door de stuw Sambeek. Bij Venlo zijn continumetingen van afvoer beschikbaar op basis van een ADM, net als voor St. Pieter. De methode voor afleiding van een Qh-relatie is uitvoerig beschreven in IMDC (2007b), en is vergelijkbaar met de methode voor St. Pieter. De meest recente Qh-relatie is beschreven in RURA-Arnhem (2017). Deze relatie vatten we hier samen.

4.6.2 Correctie waterstands- en afvoermetingen

Bij het opstellen van de nieuwe Qh-relatie is gebruik gemaakt van waterstand en ADM-metingen bij Venlo over de periode 1 juli 2015 t/m 30 juni 2017. Correcties die specifiek zijn voor deze locatie zijn:

- Wanneer de waterstand bij Sambeek-beneden onder 7,80 m NAP lag, is deze verwijderd. Dergelijke lage waterstanden zijn voorgekomen tijdens de calamiteit bij stuw Grave.
- Bij ongewenst stuwbeheer wordt de waterstand bij Venlo voor die periode verwijderd bij een waterstand bij Venlo lager dan 11,0 m NAP. Ook wordt in de meeste situaties bij een verval over stuw Sambeek van meer dan 1,0 m, de waterstand bij Venlo 2,5 uur verwijderd. De 2,5 uur is de looptijd van Venlo naar Sambeek-beneden.

Omdat er geen afvoeren zijn gemeten in de recente periode boven ongeveer 1200 m^3/s, is aanvullend gebruik gemaakt van ADCP-metingen uitgevoerd bij rkm 109,6 in 2015 en 2016 (ADM Venlo ligt bovenstrooms op rkm 107,47). Uitgaande van een looptijd van 20 minuten zijn de recente ADCP-metingen gebruikt om de ADM-afvoeren te corrigeren tot een afvoer van 1843 m^3/s (RURA-Arnhem, 2017):

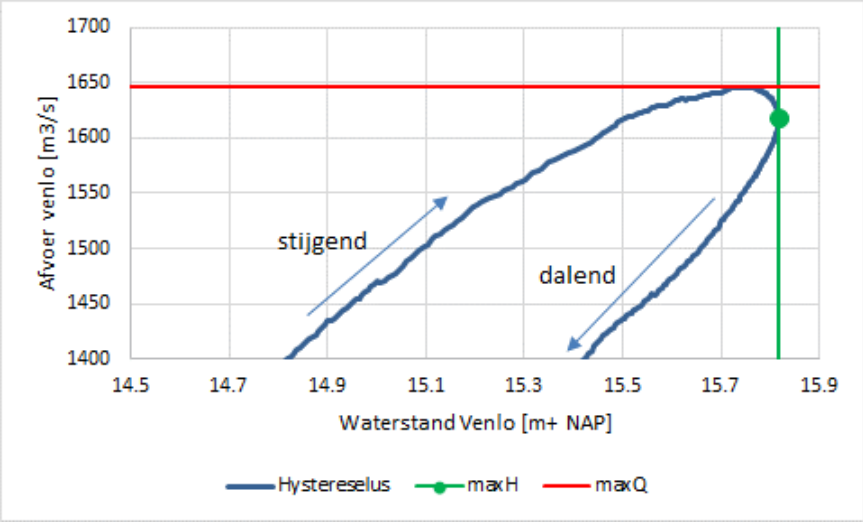
Q_{ADM} <= 737 m^3/s: $Q_{ADM\ correctie} = 0{,}9368\ Q_{ADM} + 0{,}1261$
737 < Q_{ADM} <=1843 m^3/s: $Q_{ADM\ correctie} = 1{,}0863\ Q_{ADM}^{0{,}9776}$

De datakoppels [H_{Venlo}; $Q_{ADM\ gecorrigeerd}$] zijn per waterstandsklasse vanaf 11,12 m NAP gemiddeld. De gemiddelde afvoer per klasse is gebruikt voor de afleiding van de Qh-relatie.

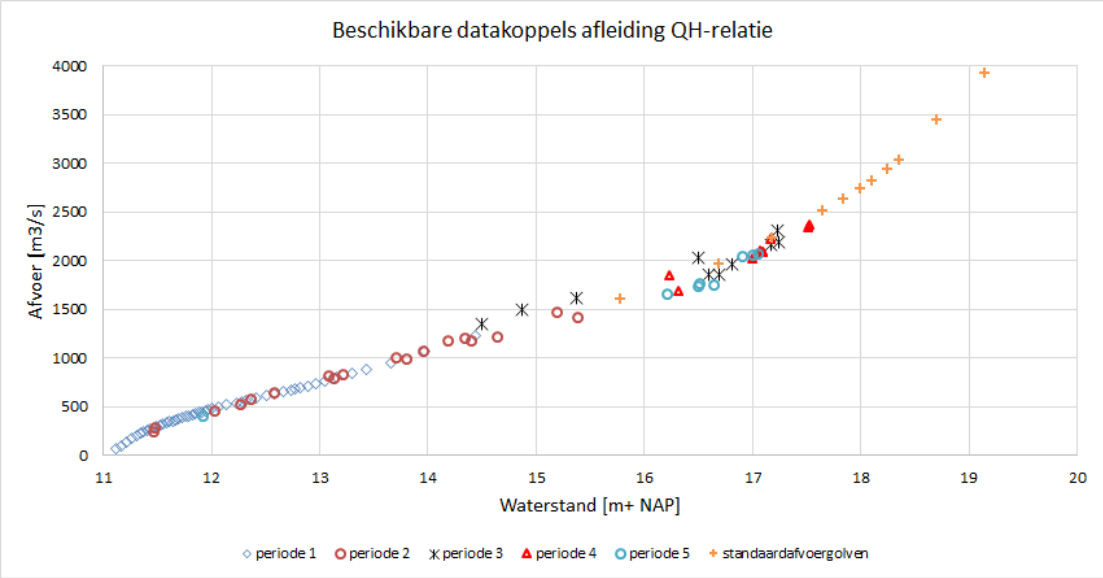
4.6.3 Toevoegen hoge afvoeren

Door het ontbreken van hoogwaters in de recente periode en door de rivierkundige ingrepen nabij Venlo zijn er voor het hoge afvoerbereik geen bruikbare directe metingen beschikbaar. Voor het toevoegen van hoge afvoeren voor Venlo worden verschillende stappen doorlopen om ADCP-metingen tijdens historische hoogwaters te homogeniseren. Daarnaast worden voor de meest extreme situatie standaardafvoergolven toegevoegd.

Er zijn ADCP-metingen beschikbaar voor de hoogwaters 2002-2003 en 2011-2012. Voor de hoogwaters met een afvoer hoger dan 1000 m^3/s bij St. Pieter is zowel de situatie van tijdens het hoogwater als de situatie van 2017 (WAQUA-Maas-j17_5-v2) doorgerekend. De maximale waterstand en afvoer treden niet tegelijk op en zijn bepaald volgens Figuur 4-23. Op deze manier zijn 37 koppels van maximale waterstand en afvoer bepaald bij Venlo. Het verschil is bepaald tussen de waterstand met waqua-maas-j17_5-v2 en de waterstand uit het model dat past bij het hoogwater, en heeft waarden tussen -0,3 en 0,3 m. Het resultaat voor de gehomogeniseerde ADCP-data (perioden 2-5 in Figuur 4-24), van de recente periode (periode 1) en van standaardafvoergolven is getoond in Figuur 4-24. Daarbij wordt opgemerkt dat er geen homogenisatie heeft plaats gevonden voor hysterese. Dat kan tot een systematisch afwijking hebben geleid, aangezien de meeste ADCP-metingen in de dalende fase zijn uitgevoerd. Samenvattend, vooral tussen 14 en 17 m NAP is ofwel sprake van meet- en homogenisatiefouten, of het effect van hysterese.



Figuur 4-23 Hystereselus bij Venlo met maximale afvoer bij maximale waterstand. (bron: RURA-Arnhem, 2017)



Figuur 4-24 Afvoer en waterstand bij Venlo, waarbij punten aangeduid met periode 1 zijn gebaseerd op recente metingen en punten aangeduid als perioden 2-5 zijn bepaald uit homogenisatie van ADCP-metingen. (bron: RURA-Arnhem, 2017)

4.6.4 Afleiden Qh-relatie

Net als voor St. Pieter bleek de correctie voor stuwbeheer niet goed weer te geven met alleen machtsfuncties. Een vierdegraads polynoom is gebruikt om het effect van het stuwbeheer te beschrijven:

$H_V < 12{,}74$ $\quad Q_s^{(1)} = Q_s^{(2)} + (-124{,}2\ H_V^4 + 6049{,}72\ H_V^3 - 110510{,}20\ H_V^2 + 897328{,}1\ H_V - 2733036{,}0)$

$12{,}74 <= H_V < 13{,}0$ $\quad Q_s^{(2)} = 64{,}56*(H_V-8{,}05)^{1.52}$

$13.00 <= H_V < 16.6$ $\quad Q_s^{(3)} = Q_s^{(2)} + 110{,}73*(H_V-13{,}0)^{0{,}5}$

$H_V >= 16{,}6$ $\quad Q_s^{(4)} = Q_s^{(3)} + 181*(H_V-16{,}60)^2$

Zoals RURA-Arnhem (2017) opmerkt, wijken de gevonden machtscoëfficiënten van 0,5 en 2,0 voor het hoge bereik aanzienlijk af van de theoretische waarde van 1,5. Het ontbreken van metingen in dit hoge bereik vergroot de onzekerheid van het resultaat.

Voor het lage afvoer bereik tot ongeveer 1200 m^3/s wordt de relatie wel ondersteund door recente directe afvoermetingen. Voor het hoge bereik zijn ADCP-metingen nodig bij Venlo ter verificatie van deze Qh-relatie, en gezien de omvang van de hysterese-lus zowel in de stijgende als in de dalende fase. Gezien de hysterese kan het voor Venlo ook nuttig zijn om een Jones correctie toe te passen (RURA-Arnhem, 2017), zoals bij Eijsden (paragraaf 4.2.8).

Discussie
Bij Venlo is zowel hysterese als stuwwerking van belang. Daarnaast zijn aanpassingen uitgevoerd aan de geometrie die de relatie in de tijd hebben veranderd. Aanbeveling is deze relatie ofwel te actualiseren en hysterese mee te nemen, en ook de ADCP-metingen voor hysterese te corrigeren, of de afvoer te bepalen op basis van die bij Maaseik en Megen.

4.7 Megen

4.7.1 Algemeen

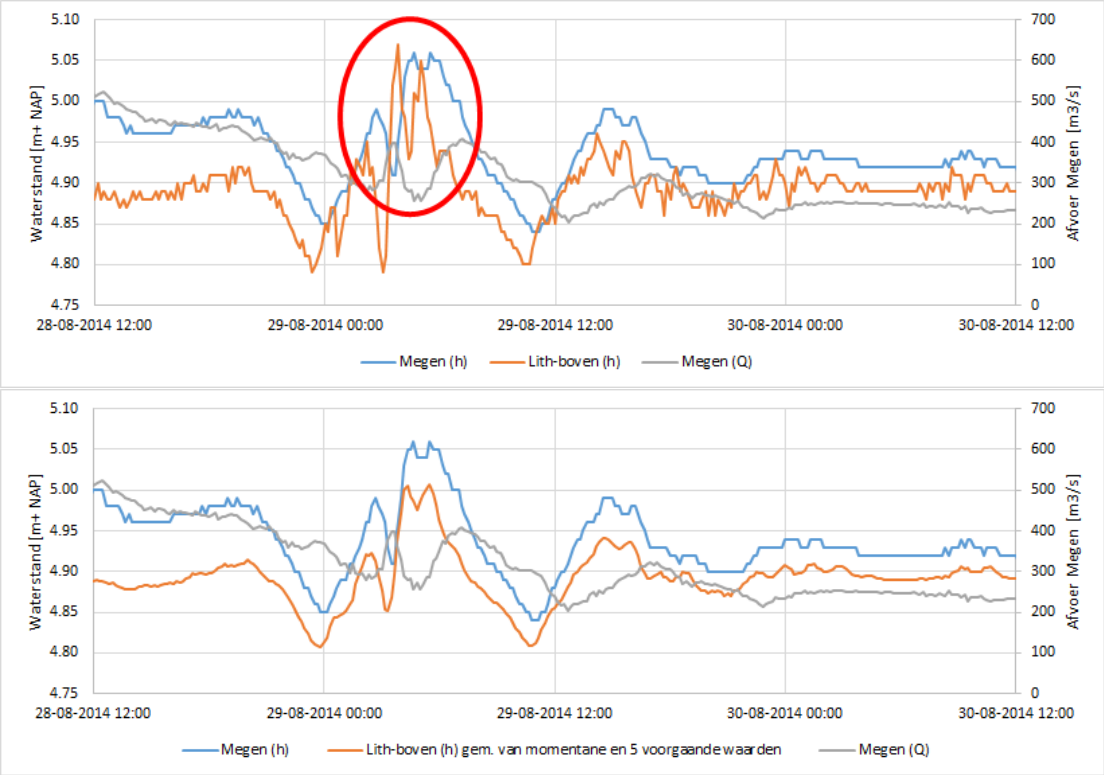
Megen is de meest benedenstrooms gelegen locatie in de Maas waarvoor een relatie is afgeleid. De afvoer wordt direct beïnvloed door stuw Lith. Bij Megen zijn continumetingen van afvoer beschikbaar op basis van een ADM, net als voor St. Pieter en Venlo. Eerder was een Qh-relatie afgeleid die nog altijd binnen LMW wordt gebruikt. Sinds 2016 is een Qf-relatie beschikbaar (RURA-Arnhem, 2016b). De afleiding van deze Qf-relatie vatten we hier samen. Deze lijkt op de methode voor Eijsden, maar dan zonder inverse routing (Figuur 4-2).

Voor het afleiden van parameters voor de Qf-relatie wordt gebruik gemaakt van drie typen WAQUA-simulaties:

1. Simulaties met standaardafvoergolven en waqua-maas-j15_5-v2. Het resultaat bij Megen wordt voor zover mogelijk vergeleken met de metingen en wordt gebruikt in het extrapolatiegebied waar metingen ontbreken.
2. Simulaties voor het bepalen van het effect van het stuwbeheer.
3. Simulaties voor het afleiden van de Jones-correctie.

4.7.2 Correctie waterstands- en afvoermetingen

Bij het opstellen van de Qh-relatie is gebruik gemaakt van de waterstand bij Megen, Lith Boven en Lith Dorp over de periode 1-1-2011 t/m 12-6-2012 (uurwaarden) en 13-6-2012 t/m 31-12-2015 (10 minuten waarden). Enkele hiaten zijn terug gezet naar de oorspronkelijke waarde, omdat ze juist lijken en samenvallen met ADCP-metingen uitgevoerd bij Ravenstein. In de tijdseries valt op dat er met Kerst 2012 afwijkend stuwbeheer is geweest en dat het momentane verval Megen-Lith Boven 4,4% van de tijd negatief is. Figuur 4-25 toont een voorbeeld met het grootste negatieve verval van -0,13 m in deze periode. Door middeling over de laatste 6 metingen (60 minuten) neemt het grootste negatieve verval af tot -0,05 m en treedt dit nog maar 3,2% van de tijd op.



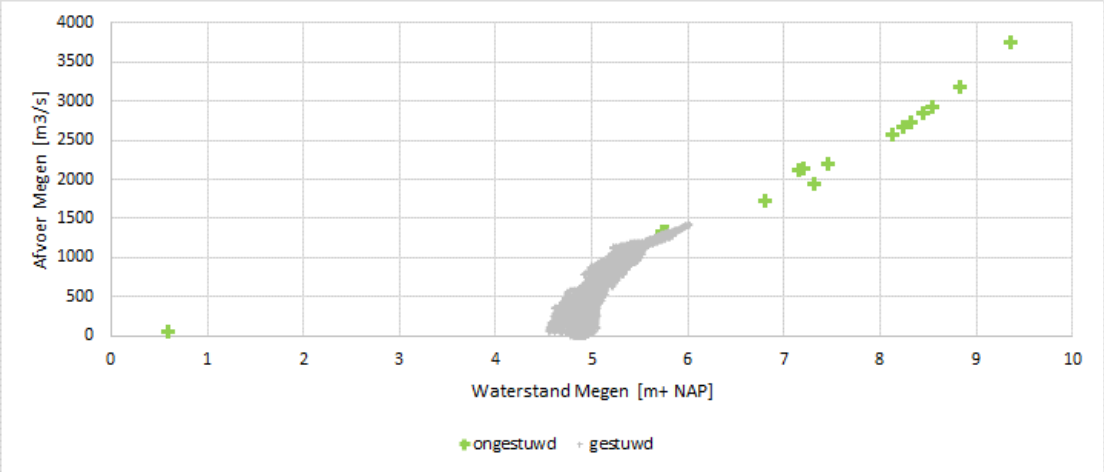
Figuur 4-25 Voorbeeld van een tijdserie met negatief verval op traject Megen-Lith Boven op originele 10 minuten interval (boven) en gemiddeld over de laatste 6 metingen (onder). Bron: RURA-Arnhem (2016b).

Bij een waterstand Megen tot en met 6,02 m NAP zijn afvoeren op basis van de ADM Megen beschikbaar. Bij een hogere waterstand overstroomt Den Gouden Ham en wordt de ADM-data niet bewaard (aanbeveling is dit wel te doen). Om de ADM-data te corrigeren zijn ADCP-metingen gebruikt bij Ravenstein. De ADCP-meting voor 14 juli 2014 is gecorrigeerd, omdat toen ten onrechte was gecorrigeerd voor een bewegende bodem. Een looptijd van 45 minuten is aangenomen tussen Ravenstein en Megen op basis van gemiddelde omstandigheden , waarmee het tijdstip van de ADCP-metingen is aangepast om ze geldig te maken voor Megen. Met deze ADCP-metingen zijn de ADM-data gecorrigeerd volgens:

$$Q_{ADM\ corr} = 0{,}966185 * Q_{ADM}$$

4.7.3 Toevoegen hoge afvoeren

Standaardafvoergolven zijn doorgerekend en per afvoerklasse gecorrigeerd om ze beter op de metingen te laten aansluiten. Rekening houdend met afwijkend stuwbeheer zijn correcties bepaald per afvoerklasse voor de waterstand Megen. De waterstand Megen wordt maximaal met -0,135 m gecorrigeerd (bij een afvoer 950 m^3/s). Hierbij is aangenomen dat de afvoer gestuwd is vanaf een waterstand 4,15 m NAP bij Lith-dorp. Figuur 4-26 toont het beschikbaar aantal datapunten op basis van metingen, de standaardafvoergolven en stationaire afvoersommen. Het valt op dat in het gestuwde bereik veel variatie voorkomt: bij een waterstand van bijvoorbeeld 4,8 m NAP bij Megen kan de afvoer variëren tussen ongeveer -20 en 700 m^3/s.



Figuur 4-26 Overzicht beschikbare datapunten voor Qf-relatie Megen (bron: RURA-Arnhem, 2016b).

4.7.4 Afleiden Qh-relatie

Net als voor Eijsden wordt de Qf-relatie bepaald na het bepalen van de stationaire Qh-relatie met gemiddeld stuwbeheer. Door de grote invloed van stuw Lith ontbreekt een eenduidige relatie tussen waterstand en afvoer en zijn verschillende oplossingsrichtingen overwogen voor het gestuwde bereik:

1. Open rivier: deze benadering komt overeen met die voor de Qf-relaties voor Rijntakken. Uitgangspunten zijn dat het verval tussen Lith-boven en Lith-dorp kleiner moet zijn dan ongeveer 0,35 m en dat de waterstand bij Megen hoger moet zijn dan 4,55 m NAP. Bij een gestuwde waterstand wordt de afvoer verlaagd. Deze correctie voor het stuwbeheer kan oplopen tot ongeveer 1000 m^3/s. Voor de lagere ongestuwde afvoeren zijn weliswaar WAQUA-resultaten beschikbaar, maar deze komen niet goed overeen met metingen, waardoor de statische Qh-relatie in dit bereik minder goed is te onderbouwen dan voor de andere oplossingsrichtingen.
2. Gedeeltelijk gestuwde rivier: deze methode sluit het beste aan bij de methode voor Eijsden. Deze methode gaat uit van de laagste gestuwde waterstand waarbij voldoende data beschikbaar is voor het afleiden van een stationaire Qh-relatie. Voor nog lagere stuwstanden bij Lith-boven en voor hogere stuwstanden kan een stuwcorrectie worden afgeleid. Deze correctie voor het stuwbeheer kan oplopen tot ongeveer 500-600 m^3/s. Deze relatie geldt niet voor waterstanden onder ongeveer 4.55 m NAP bij Megen.
3. Open rivier en verval: deze methode werd ook gebruikt in de originele Qf-relatie voor de IJsselkop (HKV, 2009). Voor het gestuwde bereik wordt het verval tussen Megen en Lith-boven gebruikt worden in de Qh-relatie, en op het ongestuwde bereik de waterstand bij Megen. Op basis van het momentane verval en het debiet bij ADM-Megen kan vervolgens een eenduidige functie worden gedefinieerd voor het gestuwde bereik. De benodigde stuwcorrectie blijft beperkt tot maximaal ongeveer 50 m^3/s.
4. Een alternatief is om zoveel mogelijk uit te gaan van de ADM-metingen, ook wanneer de Gouden Ham overstroomt. Daarvoor moeten de stroomsnelheidsmetingen voor minimaal een hoogwaterperiode opgeslagen worden en moet de afvoer door de uiterwaarden worden afgeleid uit ADCP-metingen. Deze methode was in 2016 niet mogelijk, maar heeft als voordeel dat het verband afvoer en waterstand tot in gedeeltelijk gestuwd bereik bepaald kan worden uit directe metingen.

Deze vier oplossingsrichtingen zijn uitvoerig beschreven en vergeleken in RURA-Arnhem (2016b). Gekozen is voor oplossingsrichting 3, omdat dit naar verwachting de beste afvoerschatting geeft, ook gezien de relatief kleine stuwcorrectie. Een nadeel is dat de relatie niet glad is op de overgang gestuwd naar ongestuwd.

Dit heeft ook te maken met de afvoerafhankelijke ruwheid in het model, waarmee de afvoer niet bij iedere stuwstand goed beschreven wordt. Daarnaast was een beschrijving van de stuwcorrectie met polynomen nog niet goed te implementeren in LMW. Gekozen is om LMW hiervoor geschikt te gaan maken. De Qh-relatie volgens de methode open rivier en verval is:

Verval Megen – Lith-boven (ΔH) < 1,56 én waterstand Megen >= 4,85 m NAP

$$Q_M = -968{,}5964\ \Delta H^4 + 3640{,}2397\ \Delta H^3 - 4776{,}3262\ \Delta H^2 + 3068{,}6540\ \Delta H + 157{,}5437$$

Verval Megen – Lith-boven (ΔH) >= 1,56:

H_m <= 6,03	$Q_s^{(2)} = 97{,}836*(H_m-0{,}04)^{1,5}$
6,03 < H_m <= 8,40	$Q_s^{(3)} = Q_s^{(2)} + 117{,}66*(H_m-6{,}03)^{1,5}$
H_m > 8,40	$Q_s^{(4)} = Q_s^{(3)} + 288{,}16*(H_m-8{,}40)^{1,5}$

De stationaire Qh-relatie voor Megen is alleen geschikt als back-up als de ADM gedurende langere tijd (dagen) niet beschikbaar is en de waterstand bij Megen >= 4,85 m+ NAP, of als de waterstand bij Megen boven 6,02 m +NAP komt.

4.7.5 Correctie voor momentane stuwbeheer

Voor acht stuwpeilen is de correctie voor momentaan stuwbeheer bepaald door het verschil uit metingen en de Qh-relatie te bepalen. Onder een waterstand on 4,55 m NAP bij Lith-boven zijn geen metingen beschikbaar en lijkt een correctie niet nodig. Om die reden wordt alleen voor waterstanden daarboven gecorrigeerd volgens:

$H_{Lith\text{-}bov}$> 4,55 m+ NAP $\quad Q_s = Q_s + 24{,}36\ (-6{,}5632\ H_{Lith\text{-}bov} + 31{,}843)$

Met $H_{Lith\text{-}bov}$ = gemiddelde van de laatste 6 metingen met 10-minuten interval

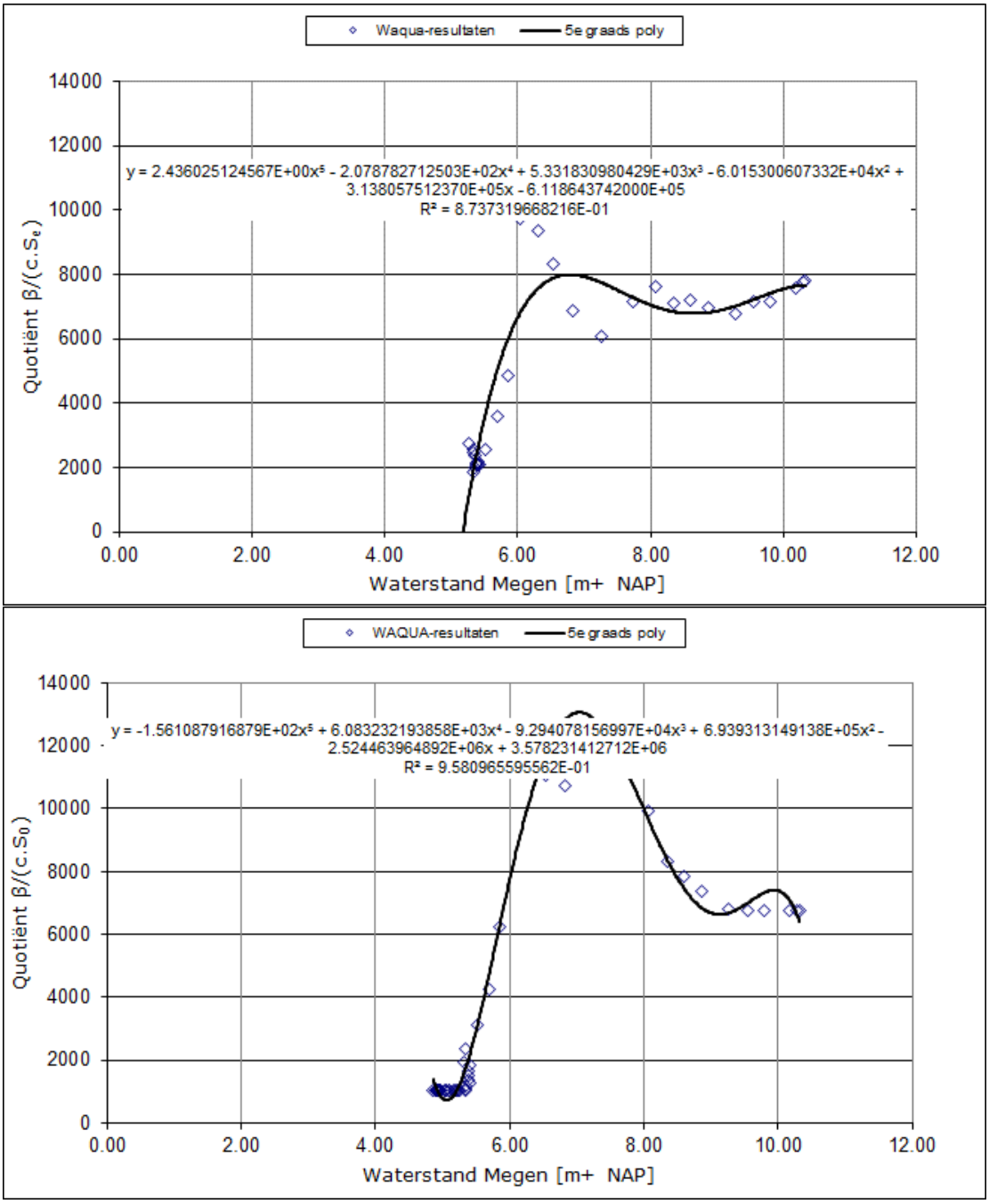
4.7.6 Correctie voor hysterese

In de Qf-relatie voor Megen worden zowel de Jones als aangepaste Jones correctie gebruikt, net als voor Eijsden (waarvoor ook modelresultaten worden gebruikt, zie paragraaf 4.2.8). Voor S_0 wordt niet het grillige bodemverhang, maar het waterspiegelverhang bij 50 m^3/s gebruikt: 11,9 10^{-5}. Uit de WAQUA-simulaties worden golfvoortplantingssnelheid, energieverhang (S_e) en de vermenigvuldigingsfactor voor waterspiegelverhang (β) bepaald. De voortplantingssnelheid bleek niet goed overeen te komen met metingen, dus is deze bepaald uit $\sqrt{gd}$ met d de diepte. Dit gaf een snellere reactie en kwam goed overeen met metingen. Conform IMDC (2009) is door de WAQUA resultaten een vijfdegraadspolynoom gefit (Figuur 4-27).

Uiteindelijk is gekozen om de Jones correctie toe te passen tot 5,51 m NAP bij Megen, en vanaf deze waterstand een constant quotiënt voor de aangepaste Jones correctie te hanteren (voor parameterwaarden b_x, zie RURA-Arnhem, 2016b):

H_M < 5,51m => $\frac{\beta}{S_o C} = b_1(h-b_7)^5 + b_2(h-b_7)^4 + b_3\ (h-b_7)^3 + b_4(h-b_7)^2 + b_5(h-b_7) + b_6$

$H_M \geq$ 5,51m => $\frac{\beta}{S_e C}$ = 3000 s/m.



Figuur 4-27 Quotiënt β/(c S_e) (boven) en Quotiënt β/(c S_0) (onder) als functie van de waterstand bij Megen. Bron: RURA-Arnhem (2016b).

5 Discussie, conclusie en aandachtspunten

5.1 Discussie

5.1.1 Vergelijking methodieken Rijn en Maas

De methodieken die zijn gebruikt voor de Rijn en de Maas verschillen op enkele in het oog springende onderdelen.

Meer afvoermetingen voor Maaslocaties

Over het algemeen zijn voor de Maaslocaties langere tijdseries van afvoermeting beschikbaar, terwijl voor de meeste locaties in de Rijntakken alleen incidenteel varende ADCP-metingen beschikbaar zijn. Om voldoende meetpunten te hebben inclusief hoge afvoeren worden voor locaties in de Rijn en voor Venlo in de Maas de (oudere) ADCP-metingen gehomogeniseerd door gebruikmaking van numerieke modellen van de toenmalige en huidige situatie. Voor de continue metingen op Maaslocaties was homogenisatie meestal niet nodig. Om een systematische fout te voorkomen, is het nodig dat de afvoer uit stroomsnelheidsmetingen regelmatig wordt gevalideerd en dat het dwarsprofiel wordt aangepast indien dat nodig is.

Opvallend is dat voor de Maas de ADM-data gecorrigeerd worden op basis van ADCP-metingen bij de afleiding van de Qh- en Qf-relaties. Aanbeveling is dat iedere gebruiker van de afvoertijdseries van LMW deze correcties toepast, of dat de gecorrigeerde afvoer in LMW (met enige vertraging) beschikbaar wordt gemaakt.

Voor enkele locaties in de Maas (Maaseik en Venlo) en voor enkele locaties in de Rijntakken (Tiel en Olst) wordt een **Qh-relatie** gebruikt. Voor de andere locaties samengevat in deze studie is een Qf-relatie afgeleid. Bij de **globale afleidingsmethodiek van de Qf-relaties valt een aantal verschillen op** ten opzichte van de methode voor de Rijn (paragraaf 3.2.2) en Maas bij Eijsden en Megen (paragraaf 4.2.2):

1. Voor Eijsden is de eerste stap inverse routing afvoermetingen. Dit is nodig, omdat geen continue afvoerbepaling plaats vindt bij Eijsden maar verder benedenstrooms bij St. Pieter waar de Maas dieper is. Ook bij Borgharen-dorp wordt geen continue afvoer gemeten in de Maas en is routing nodig. Voor de Rijn, en overige locaties in de Maas, is deze stap niet nodig. Net als voor de Rijn-locaties is de volgende stap voor Eijsden om afvoeren toe te voegen op basis van modelberekeningen.
2. Vervolgens wordt voor Eijsden de ‘stationaire’ Qh-relatie afgeleid voor gemiddeld stuwbeheer met een machtsfunctie (RURA-Arnhem, 2020), terwijl voor Rijnlocaties de stationaire relatie wordt afgeleid voor een open rivier. In vergelijking met de Rijnlocaties, wordt niet gecorrigeerd voor hysterese bij de afleiding. De reden hiervoor is dat de variatie van afvoer binnen een dag groter is voor de Maas en zelfs negatief kan zijn. Ook wordt niet gecorrigeerd voor momentane stuwwerking voor de stationaire Qh-relatie van de Maas, terwijl dat wel wordt gedaan voor de Qf-locaties in de Rijn.
3. Een correctie voor (momentane) stuwwerking is voor zowel de Qf-locaties in de Rijn en voor de meeste locaties in de Maas gebruikt. Een verschil is dat deze correctie voor de Rijnlocaties voorafgaand aan het opstellen van de stationaire Qh-relatie wordt uitgevoerd, terwijl dit voor de Maaslocaties daarna wordt gedaan. Dit is verklaarbaar, omdat een correctie in de Maas vooraf wordt bemoeilijkt doordat typisch een grotere fluctuatie in afvoer en waterstand optreedt en negatieve afvoeren voorkomen.
4. Een correctie voor bodemerosie is voor de Rijn als lineair verband met de tijd opgenomen, terwijl een dergelijke correctie niet wordt gehanteerd in de Maas.

Deze keuze lijkt goed te verdedigen, omdat de geometrie in de Maas (bij Eijsden en Megen) vooral verandert door incidentele baggerwerkzaamheden.

5.1.2 Vergelijking methodieken Nederland en Duitsland

Voor de **Oberrhein** wordt op basis van de bestudeerde informatie geconcludeerd dat hier geen gebruik wordt gemaakt van correcties op Qh-relaties voor niet-stationariteit of niet-uniformiteit. Voor het afleiden van de Qh-relatie wordt gebruik gemaakt van theoretische principes, maar ook van expert judgement, bijvoorbeeld door de overeenkomst met metingen visueel te controleren.

5.1.3 Beperkingen aan dit rapport

Bij de hierna volgende conclusie en aandachtspunten is het van belang de beperkingen van dit rapport in ogenschouw te nemen. De afleiding van de Qh-relaties en Qf-relaties is in dit rapport beschreven op basis van de beschikbaar gestelde documentatie en aanvullende mondelinge toelichtingen. De relaties zelf zijn niet onderzocht of getest. Ook is het beheer en onderhoud niet beschreven, en het gebruik van de relaties slechts beknopt.

Uit dit onderzoek komt het beeld naar voren van een complex geheel van methoden en praktijken voor de afleiding van relaties. Niet alles is volledig gedocumenteerd, en veel kennis was enkel beschikbaar bij specifieke kennisdragers. Dit rapport geeft een vollediger documentatie, maar wij sluiten niet uit dat het op punten onvolledig is.

We hebben een beschrijving toegevoegd van de algemene theorie van Qh-relaties en Qf-relaties (hoofdstuk 2), waarbij we ook beknopt recent ontwikkelde methodieken voor het afleiden van Qh-relaties hebben samengevat (paragraaf 2.7). De verschillende operationele relaties gebruiken onderdelen van deze theorie. De beschrijving van de theorie is geen uitgebreide review van de huidige stand van de wetenschappelijke literatuur.

5.2 Conclusie

5.2.1 Gedeelde kennisbasis

Rijkswaterstaat gebruikt sinds 2009 Qh-relaties met (tijdsafhankelijke) correcties (ook wel Qf-relaties genoemd) om afvoerreeksen in de Rijn en Maas af te leiden uit waterstandsmetingen. Deze afvoerreeksen worden voor allerlei doeleinden ingezet. Het viel op dat het aantal mensen bij Rijkswaterstaat met expertise over de afleiding van deze relaties beperkt is.

De relaties zijn tot stand gekomen door verschillende correcties uit te voeren op datasets van afvoeren en waterstanden op de Qf-locaties, en door op basis van deze datasets [Q,h]-functies te bepalen. In dit rapport hebben we de theoretische basis van Qh-relaties en Qf-relaties bestudeerd, en hebben we enkele recente ontwikkelingen in het wetenschappelijk onderzoek op dit gebied beschreven. Daarnaast hebben we de Qf-relaties voor locaties in de Rijn en Maas bestudeerd. Ook is kort aandacht besteed aan de afleiding van Qh-relaties in Duitsland. Tabel 5-1 geeft een overzicht van de verschillen tussen de Qh- en Qf-relaties voor de locaties in de Rijn en Maas.

*Tabel 5-1 Overzicht van methodische verschillen tussen de Qh- en Qf-relaties voor de bestudeerde locaties in de Rijn en Maas: groen betekent aanwezig en grijs betekent niet aanwezig. *Looptijdcorrectie of routing is het corrigeren van een afvoermeting naar een andere locatie. **Gesimuleerde metingen betreft het verrijken van de meetreeks met gesimuleerde afvoer/waterstands-combinaties uit een numeriek model. Voor de meeste relaties is dit enkel gebruikt bij extreme afvoeren. De relatie Hagestein is volledig gebaseerd op gesimuleerde metingen (uit modelresultaten).*

Locatie	Oberrehin (D)	Lobith & Splitsingspunten	Tiel	Olst	Hagestein	Eijsden	St. Pieter	Borgharen Dorp	Maaseik	Venlo	Megen
Metingen afvoer											
Looptijdcorrectie*											
Homogenisatie metingen	?										
Datavalidatie											
Correcties											
Hysterese											
Stuwwerking											
Jaarlijkse bodemverandering											
Gesimuleerde metingen**											
Toetsing											
Validatie Qf-relatie	?										

5.2.2 In kaart brengen van de beperkingen van de huidige praktijk

In dit rapport is beschreven hoe de verschillende Qf-relaties zijn opgebouwd. Op basis hiervan geven wij hieronder een puntsgewijze conclusie van de meest in het oog springende beperkingen van de huidige praktijk in volgorde van belang:

1 De Qf-relaties worden niet gevalideerd

Ondanks dat er een theoretische basis is die gestoeld is op fysische aannames (zie hoofdstuk 2), gedragen de relaties zich sterk als statistische modellen. Deze zijn in hoge mate afhankelijk van de gekozen parameters. Bij dergelijke modellen is het gangbaar om een zogenaamde kruisvalidatie (zie ook Berends, Diermanse & de Jong, 2021) te doen om te voorkomen dat de relatie (het model) is overgedimensioneerd of te sterk afhankelijk is van een te kleine dataset.

Geen van de Qh-relaties en Qf-relaties die worden gebruikt is gevalideerd. Dit heeft verschillende nadelen:

a er bestaat een groot risico dat de relaties een aanzienlijk minder groot voorspellend vermogen hebben dan kalibratie doet vermoeden, en;

b het is niet vast te stellen of de verschillende correcties de relatie verbeteren. Het laatste punt klinkt wellicht tegenstrijdig, omdat alle correcties de fit verbeterden.

Echter, dit is te verwachten: hoe complexer de relatie, hoe beter het te fitten is op data. Uit kruisvalidatie blijkt of de verbetering in operationeel gebruik ook werkt.

2 **Er is een sterke wederzijdse afhankelijkheid tussen Qf-relatie en het numeriek modelinstrumentarium.**
Alle correcties voor locaties in de Rijn, en veel voor locaties in de Maas, zijn gebaseerd op informatie uit een numeriek stromingsmodel. Het voordeel hiervan is dat er aanvullende, op stromingstheorie gebaseerde informatie kan worden gebruikt om de Qh-relatie te verbeteren. Zo waaiert het stromingsmodel in het extreme bereik minder ver uit dan de statistische Qh-relatie, omdat het wordt beperkt door stromingsvergelijkingen. Het stromingsmodel is echter op zijn beurt gekalibreerd op basis van het uit de Qf-relatie verkregen randvoorwaarden. Deze wederkerige afhankelijkheid heeft verschillende nadelen:

a Er is geen zuivere lijn tussen de 'waarheid' (*ground truth)* en het model. Recursiviteit tussen modellen kan fouten introduceren in beide modellen (Qf-relatie *en* het numeriek modelinstrumentarium) die niet te achterhalen zijn.
b Het actualiseren van de Qf-relatie is arbeidsintensiever en complexer omdat er ook berekeningen met het numeriek stromingsmodel moeten worden gemaakt.

3 **Er is geen uniforme aanpak voor datavalidatie**
Tot slot valt op dat er bij verschillende locaties verschillend wordt omgegaan met het verwerken van 'ruwe' meetdata naar de meetdata die de basis vormen voor de Qf-relaties. Zo wordt op sommige locaties looptijdcorrectie (cq. routing) toegepast, en op sommige locaties niet. Correctie op uitschieters gebeurt in alle gevallen 'op het oog', en is daarmee subjectief. Ook wordt er in veel gevallen geen melding gemaakt van de onzekerheid van metingen. Zo wordt in RURA-Arnhem (2013) genoemd dat de afvoermetingen in de uiterwaard worden bijgeschat (door Rijkswaterstaat, niet door de hydraulisch adviseur), omdat enkel de afvoer in de hoofdgeul wordt gemeten. De methode van deze bijschatting is echter geen onderdeel van de rapportage.

4 **De Qf-relaties zijn erg complex en onderling inconsistent**
Complexiteit in deze context betekent niet 'moeilijk te begrijpen', maar 'veel onderdelen'. Voor locaties in de Rijn en Maas wordt in veel stappen een Qh-relatie of Qf-relatie afgeleid, zeker wanneer ook voor stuwwerking en hysterese wordt gecorrigeerd (bijvoorbeeld Figuur 3-2 en Figuur 4-2). De stappen hebben vaak wel een fysische basis, maar de vraag is of iedere stap en correctie daarbinnen een duidelijke verbetering oplevert (vergelijk onze eerste conclusie). In principe kan gesteld worden: hoe minder datapunten, hoe eenvoudiger de relatie zou moeten zijn. Of: hoe complexer de relatie, hoe groter de databehoefte. Bovendien wordt niet elke stap in de praktijk daadwerkelijk gebruikt – zo wordt de hysteresecorrectie operationeel niet toegepast. Tot slot zijn de relaties onderling inconsistent: de stappen worden niet op elke locatie op dezelfde manier toegepast. De hoge complexiteit heeft verschillende nadelen:

a Jaarlijkse actualisatie op basis van relatief weinig datapunten leidt sneller tot minder robuuste relaties. Zo weten we dat bij Eijsden significante verschillen in de relaties zijn opgetreden (RURA-Arnhem, 2014b, 2016a en 2020). IMDC (2007b) stelt dat ieder jaar een Qh-relatie geactualiseerd moet worden met de metingen van het afgelopen jaar en dat herziening vereist is wanneer de relatieve afwijking van de afvoer op basis van een Qh-relatie voor een waterstandsbereik groter is dan 2,5 %. Ondanks dat de verschillen tussen relaties (bijvoorbeeld de Qf-relaties voor Eijsden van 2014, 2016 en 2020) niet expliciet zijn gerapporteerd, is het aannemelijk dat door kleine verschillen in de methode systematische verschillen van meer dan 2,5% voorkwamen. Dat pleit voor het gebruik van een langere periode dan een jaar.

De vraag is dus of de actualisaties robuust zijn en niet te veel afhangen van de periode die wordt gebruikt om de relatie voor die actuele situatie af te leiden.

b Versnipperde kennis en een beperkt aantal kennisdragers over de complexe relaties in de locatie-afhankelijke methodiek kan leiden tot gebrekkig onderhoud aan de relaties.

5.3 Aandachtspunten

Hieronder geven wij puntsgewijs aanbevelingen ter verbetering van huidige of toekomstige Qf-relaties. De aanbevelingen volgen uit de conclusies ten aanzien van het in kaart brengen van de beperkingen van de huidige praktijk (paragraaf 5.2.2).

5.3.1 Valideer Qf-relaties

Qf-relaties zijn in de basis statistische modellen die de relatie tussen afvoer en waterstand beschrijven op basis van een beperkte dataset. Dergelijke modellen kunnen als ze relatief veel vrijheidsgraden hebben (te complex worden) hun voorspellend vermogen verliezen. Daarom raden wij aan om bij het opstellen van nieuwe relaties of het actualiseren van huidige relaties validatie uit te voeren. Hierbij dient een deel van de meetdata niet gebruikt te worden bij de kalibratie (het fitten) van de Qf-relatie. Voor een overzicht van de verschillende validatiestrategieën verwijzen we naar Berends, Diermanse en De Jong (2021).

5.3.2 Test correcties op toegevoegde waarde

Wij raden aan om niet *a priori* aan te nemen dat de verschillende uitbreidingen en correcties het voorspellend vermogen verbeteren. In tegenstelling tot numerieke stromingsmodellen, leidt het toevoegen van meer op het fysisch proces gebaseerde aannames niet noodzakelijkerwijs tot een betere relatie – maar wel tot meer vrijheidsgraden.

Een uitbreiding (bijvoorbeeld een tweede of derde sectie) of correctie (bijvoorbeeld de hysteresecorrectie) verbetert het voorspellend vermogen als de variantie van de validatie afneemt door die correctie. De variantie van de fit (kalibratie) zal vrijwel altijd afnemen door het meenemen van een correctie – dit is echter geen maat voor de kwaliteit van de correctie, maar een gevolg van de toename van het aantal vrijheidsgraden van de relatie.

Ook praktische bruikbaarheid kan een reden zijn om een correctie niet door te voeren. Zo wordt de hysteresecorrectie operationeel voor sommige locaties niet gebruikt. Door de afweging tussen praktische inzetbaarheid en door validatie bewezen verbetering van de nauwkeurigheid expliciet te maken kan een goed onderbouwde motivatie worden gegeven voor de benodigde complexiteit van de relatie.

5.3.3 Verbreek de onderlinge afhankelijkheid van numeriek stromingsmodel en Qf-relatie

Momenteel worden ‘gesimuleerde metingen’ uit numerieke stromingsmodellen gebruikt om meer informatie te krijgen voor het fitten van de Qf-relatie. Bijvoorbeeld informatie over het energieverhang om het hysterese-effect te bepalen. Door numerieke stromingsmodellen te gebruiken die zelf zijn afgeregeld met uit de Qf-relatie afkomstige randvoorwaarden ontstaat een wederzijdse afhankelijkheid, waardoor het niet mogelijk is om meting en model strikt te scheiden, met moeilijk te kwantificeren gevolgen voor de kwaliteit van zowel de Qf-relaties als het numeriek modelinstrumentarium.

Daarom raden wij aan om deze relatie te verbreken. Hiervoor zijn verschillende mogelijkheden:

- Het gebruik van aanvullende databronnen, zoals gevalideerde ADM-metingen op locaties waar deze beschikbaar zijn of het combineren van data van verschillende locaties (zie bijvoorbeeld paragraaf 2.7.3).
- Het reduceren van de databehoefte door reductie van de complexiteit van de Qf-relatie, of door het gebruik van alternatieve modelformuleringen (zie bijvoorbeeld paragraaf 2.7.2).
- Het gebruik van modellen die niet op informatie uit de Qf-relatie zijn afgeleid.

5.3.4 Verbetering aan de hoeveelheid, kwaliteit van en informatie over metingen

De kwaliteit van metingen is essentieel voor de kwaliteit van de Qf-relatie. Het is daarom belangrijk om zowel zoveel mogelijk metingen te hebben als zoveel mogelijk informatie over die metingen. De documentatie van de datavalidatie van Qf-relaties is beperkt, niet zozeer door een gebrek van de documentatie zelf, maar doordat een significant deel van de validatie plaatsvond voordat deze aan de opstellers van deze relatie is verstrekt.

Ten aanzien van de verwerking van de huidige data adviseren wij – voor zover dit niet reeds gedaan is:

- Een heldere verslaglegging van de verwerking van ruwe stroomsnelheidsmetingen naar afvoermetingen, inclusief de methode van het bijschatten van afvoer door de uiterwaarden (zie paragraaf 3.3.1).
- een inschatting van de meetonzekerheid, op basis van de onzekerheid van meetinstrumenten en methodiek.

Indien deze informatie reeds beschikbaar is, adviseren wij dit bij toekomstige actualisatie van de Qf-relatie expliciet op te nemen.

Ten aanzien van investeringen in aanvullende datasets adviseren wij:

- Voor de Maas bij Eijsden wordt aanbevolen ofwel een meetstation in te richten bij Eijsden met bijvoorbeeld een horizontale ADCP of met een varende drone metingen te doen, wanneer het te ondiep is om met een bemande boot uit te varen. Hiermee kan in de toekomst de stap waarin afvoeren bij St. Pieter vertaald worden naar Eijsden overgeslagen worden. De onzekerheid van de Qf-relatie kan hiermee mogelijk sterk worden verkleind.
- Een analyse uit te voeren op bestaande meetreeksen, die als doel hebben om in te schatten welk type metingen leidt tot een grote reductie van de modelonzekerheid van de Qf-relatie. Denk hierbij aan:
  - Gelijktijdige metingen bij Lobith en de splitsingspunten, zodat deze metingen tezamen kunnen worden gebruikt voor splitsingspuntenmodellen (zie paragraaf 2.7.3).
  - Aangescherpte meetprotocollen om de invloed van looptijd en rivierwerken te reduceren (zoals Veessen-Wapenveld, zie paragraaf 3.3).
  - Metingen op het stijgende en dalende deel van een afvoergolf, om hysteresemetingen uit te voeren.
  - Innovatieve methodes om afvoer door uiterwaarden te meten.

5.3.5 Vergroot onderlinge consistentie en stroomlijn het beheer en onderhoud

De operationele kennis over de verschillende Qf-relaties is versnipperd, wat de aanleiding was voor het opstellen van dit rapport. Voor een gebruiker van de afvoergegevens is het lastig om vast te stellen op welke Qf-relatie (actualisatie van welk jaar bijvoorbeeld) de gegevens zijn gebaseerd.

Gegeven het belang van Qf-relaties voor zowel operationele berichtgeving als het aansturen van het numeriek modelinstrumentarium, raden wij aan om de Qf-relaties als volwaardige modellen op te nemen in het regulier beheer-en-onderhoud-programma. Wij raden bovendien aan om een standaardmethodiek te ontwikkelen voor de (data)validatie, ontwikkeling en actualisatie van Qf-relaties voor Rijn en Maas.

5.3.6 Probabilistische methoden als nieuwe oplossingsrichting

In de afgelopen jaren zijn er verschillende wetenschappelijke studies uitgekomen waarin Qh-relaties centraal stonden. Zo is het gebruik van probabilistische methoden (Berends et al., 2021 en Gensen et al., 2022; paragraaf 2.7.2) getest op locaties in de Rijn.

Deze methodes bevatten enkele innovaties die relevant zijn voor het vergroten van de dataset (zie paragraaf 5.3.4), zoals het uitvoeren van meerjarige analyses. Ook zijn uit de literatuur vergelijkbare methodes bekend waarin hysterese wordt meegenomen (Mansanarez, 2016).

Ook op andere domeinen worden probabilistische methodes met succes ingezet. Zo wordt voor het modelleren van zeespiegelstijging (door Deltares en KNMI) gebruik gemaakt van vergelijkbare methodes (Stolte et al., 2023). Het interessante van deze laatste aanpak is dat het al of niet optreden van een trendbreuk (versnelde zeespiegelstijging of niet) niet aangenomen wordt, maar statistisch getest. Analoog hieraan kan voor de rivieren een trendbreuk in bodemerosie (versnelde bodemerosie of niet) of rivierwerken (meetbaar effect op de Qh-relatie of niet) statistisch worden vastgesteld en robuust onderbouwd.

Een bijkomend voordeel van probabilistische methoden is dat model- en voorspelonzekerheid expliciet wordt berekend. Dit is extra informatie waarmee de kwaliteit van de Qf-relatie kan worden beoordeeld. Zo’n relatie kan echter ook gebruikt worden op de huidige manier, door enkel de gemiddelde voorspelling te gebruiken.

5.3.7 Disseminatie

In het kader van het onderzoek naar Qh- relaties en Qf-relaties is gezamenlijk gereflecteerd op de afleiding en het gebruik van Qf-relaties voor locaties in de Rijn, en later voor locaties in de Maas (voor het team zie paragraaf 1.4). Ook is gezamenlijk gereflecteerd op de verschillen in aanpak tussen de twee rivieren en hoe de aandachtspunten in de praktijk verwerkt zouden kunnen worden.

Aanbeveling is om een webinar te organiseren voor gebruikers van afvoerreeksen uit Qh-relaties en Qf-relaties, zodat zij beter weten hoe deze resultaten zijn afgeleid en hoe nauwkeurig ze zijn.

6 Referenties

AHA (2024), R. Agtersloot, R. van der Veen en B. Deuss, Correctie Qf-relaties Rijntakken: bepaling effect KOP-project [notitie], d.d. 17 december 2024.

Battjes, J. A., and R. J. Labeur (2014). Open channel flow. TU Delft.

Berends, K.D., F. Diermanse en J. de Jong (2021). Naar een conceptuele basis voor omgaan met onzekerheid in stromingsmodellen van Rijkswaterstaat. Deltares rapport 11206813-018-ZWS-0003, december 2021.

Berends, K. D., Gensen, M. R. A., Warmink, J. J., & Hulscher, S. J. M. H. (2021). Multidecadal Analysis of an Engineered River System Reveals Challenges for Model-Based Design of Human Interventions. CivilEng, 2(3), 580–598. doi.org/10.3390/civileng2030032

Berends, Koen, Jasper Dijkstra, Aukje Spruyt en Melissa Latella (2023). State of the art and research trends in fluvial vegetation resistance modelling: With a focus on implementation in Rijkswaterstaat hydraulic models. Deltares report 11208033-018-ZWS-0002.

Beyer, D. en Quartel, S. (2023). Rhine discharge data explained. Knowing the discharge distribution? Presentatie NCR themadag afvoerverdeling Rijn, 13 september 2023.

Bilgili, E. (2018). Hydraulica - Evaluatie afvoerbepaling van de IJssel te Olst. Bachelor eindopdracht. Universiteit Twente, afdeling WEM-MFS. url: https://purl.utwente.nl/essays/75308

Boothroyd, R. J., Nones, M., & Guerrero, M. (2021). Deriving Planform Morphology and Vegetation Coverage From Remote Sensing to Support River Management Applications. *Frontiers in Environmental Science*, *9*. https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.657354.

Gensen M.R.A., J.J. Warmink, K.D. Berends, F. Huthoff and S.J.M.H. Hulscher (2022). Improving rating curve accuracy by incorporating water balance closure at river bifurcations. Journal of Hydrology, doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127958.

Haskoning (1998). QH-analyses Rijntakken, Vervolgonderzoek. Eindverslag, november 1998.

HKV (2009). Beheer en onderhoud afvoerreeksen Rijntakken; Deelonderzoek A: Operationaliseren Qf-relatie Boven-Rijn, Waal, Pannerdensch Kanaal, Nederrijn en IJssel. Rapport Q1444.20, oktober 2009.

HKV (2010). Qf-relaties; Qf-relaties Tiel, Olst en Hagestein. Conceptrapport PR1444.40, november 2010

IMDC (2007a). Beheer & Onderhoud QH-krommes St. Pieter – Maaseik. Eindrapport. 16 juli 2007.

IMDC (2007b). Beheer & Onderhoud QH-krommes Eijsden, Venlo & Megen. Eindrapport. 25 oktober 2007.

IMDC (2009a). Operationaliseren van Qf-relatie Eijsden en opstellen B&O. Eindrapport. 26 oktober 2009.

IMDC (2009b). Operationaliseren van Qf Eijsden met stuwinvloed en opstellen B&O. Eindrapport. 23 december 2009.

IMDC (2010). Operationaliseren van Qf-relatie Eijsden met stuwinvloed en opstellen B&O, kenmerk I/RA/12059/09.157/GLE, Januari 2010.

IMDC (2022). Opstellen en toepassen van het nieuwe Q-h verband voor Maaseik, Documentref I/NO/11624/21.215/EVU/EVU, 12 september 2022.

Jones, B. E. (1916). A method of correcting river discharge for a changing stage (No. 375-E). US Geological Survey.

Kiang, J. E., Gazoorian, C., McMillan, H., Coxon, G., Le Coz, J., Westerberg, I. K., et al. (2018). A comparison of methods for streamflow uncertainty estimation. Water Resources Research, 54, 7149–7176. https://doi.org/10.1029/2018WR022708

Kosters, A., Spruyt, A. en Niesten, I. (2022). Ontwikkeling zesde-generatie Rijntakken model; Modelbouw, kalibratie en validatie. Deltares rapport 11206813-003-ZWS-0012.

Le Coz, J.; Renard, B.; Bonnifait, L.; Branger, F.; Boursicaud, R.L. (2014). Combining hydraulic knowledge and uncertain gaugings in the estimation of hydrometric rating curves: A Bayesian approach. J. Hydrol. 2014, 509, 573–587.

Mansanarez, Valentin (2016). Non-unique stage-discharge relations: Bayesian analysis of complex rating curves and their uncertainties. PhD thesis, Hydrology. Université Grenoble Alpes.

McCarthy, G.T. (1938). The unit hydrograph and flood routing. Niet-gepubliceerd manuscript, gepresenteerd op een conferentie van de North Atlantic Division, U.S. Army, Corps of Engineers, 24 juni 1938.

Mueller, David S., Chad R. Wagner, Michael S. Rehmel, Kevin A. Oberg, and Francois Rainville (2013). Measuring Discharge with Acoustic Doppler Current Profilers from a Moving Boat. USGS, Book 3, Applications of Hydraulics.

Ogink, H.J.M. en C. Stolker (2004). Verbetering Qf-relaties. WL | Delft Hydraulics, verslag Q3847.00, november 2004.

Perret, E., M. Lang, J. Le Coz (2022). A framework for detecting stage-discharge hysteresis due to flow unsteadiness: Application to France's national hydrometry network. Journal of Hydrology, doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127567.

Rantz, S. E. (1982). Measurement and computation of streamflow. Vol 2: Computation of discharge, 2. U.S. Geological Survey, Water Supply Paper 2175. DOI: 10.3133/wsp2175.

RURA-Arnhem (2013). Samenstellen Qh-relaties Tiel en Olst, kenmerk P130812R, 22-10-2013

RURA-Arnhem (2014a). Analyse Afvoerreeks Borgharen-dorp, kenmerk P140415R, 01-07-2014.

RURA-Arnhem (2014b) Optimalisering Qf-relatie Eijsden-grens; december 2014; kenmerk P141010R.

RURA-Arnhem (2016a). Qf-relaties Eijsden-grens en Megen. Deel 1: Qf-relatie Eijsden-grens. Rapport 4500250254, 1 juni 2016.

RURA-Arnhem (2016b). Qf-relaties Eijsden-grens en Megen. Deel 2: Qf-relatie Megen. Rapport 4500250254, 15 augustus 2016.

RURA-Arnhem (2017). QH-relatie Venlo, P170912R, 14 november 2017.

RURA-Arnhem (2019) Actualisatie QH-relatie Borgharen-dorp, augustus 2019, kenmerk P190527R.

RURA-Arnhem (2020). Aanpassingen Qf-relatie Eijsden-grens. Rapport 4300045459, 27 april 2020.

RURA-Arnhem en AHA (2021) Topafvoeren hoogwater Maas juli 2021, kenmerk P210910R, 16 december 2021.

Schroevers, Rinus (2014) Verkenning ontwikkelingen aanbod natte informatie t.b.v. RWS: Waterbeweging, waterkwaliteit en bodemligging, Deltares kenmerk 1209377-002-ZKS-0003, juli 2024.

Stowa (2009). Handboek debietmeten in open waterlopen. HKV lijn in water, auteurs H. Hartong en P. Termes, rapportnummer 2009-41, ISBN 978.90.5773.450.2.

Stolte, W., Baart, F., Muis, S., Hijma, M., Taal, M., Le Bars, D., Drijfhout, S. (2023). Zeespiegelmonitor 2022, Deltares rapport 11209266-000-ZKS-0001 i.s.m. KNMI

Sturm, T.W. (2001). Open Channel Hydraulics. First edition, McGraw-Hill.

Svašek Hydraulics (2018). Verbeterde Qf-relaties Rijntakken 1993-1998 en 2008-2009. Definitief rapport. 1903/U17294/C/PvdR, januari 2018.

Svašek Hydraulics (2019). Opstellen Qf relaties 2018; Data-analyse en modelstudie. Rapport 1961/U19462/E/BvL, december 2019.

Wiggins, W.C. (1925). Correcting Discharge Measurements for Changing Stage. Water Resources Branch. Circular No. 479. unpublished manuscript of the Water-Resources Branch of the U.S. Geological Survey, 10 p.

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

Deltares

www.deltares.nl