



ALTERRA

WAGENINGEN UR

Onzekerheden in debietmetingen

Analyse van debietgegevens voor Monitoring Stroomgebieden

H.M. Mulder, T.P. van Tol-Leenders, C. Siderius, D.J.J. Walvoort en F.J.E. van der Bolt

Alterra-rapport 1956, ISSN 1566-7197
Reeks Monitoring Stroomgebieden 20



Onzekerheden in debietmetingen
Analyse van debietgegevens voor Monitoring Stroomgebieden

Dit onderzoek is uitgevoerd binnen het kader van het LNV-programma Beleidsondersteunend
Onderzoek thema Water / cluster Vitaal Landelijk Gebied

(BO-12.07-005-006)

Onzekerheden in debietmetingen

Analyse van debietgegevens voor Monitoring Stroomgebieden

H.M. Mulder

T.P. van Tol-Leenders

C. Siderius

D.J.J. Walvoort

F.J.E. van der Bolt

Alterra-Rapport 1956

Alterra, Wageningen, 2009

REFERAAT

Mulder, H.M., T.P. van Tol-Leenders, C. Siderius, D.J.J. Walvoort, F.J.E. van der Bolt, 2009. *Onzekerheden in debietmetingen; Analyse van debietgegevens voor Monitoring Stroomgebieden*. Wageningen, Alterra, Alterra-Rapport 1956. 78 blz.; 17 fig.; 13 tab.; 23 ref.

Deze rapportage “Onzekerheden in debietmetingen” vormt een onderdeel van het project ‘Monitoring Stroomgebieden’. Voor het kwantificeren van de landbouw in de belasting van het oppervlaktewater en de ontwikkeling van een monitoringsmethodiek is het noodzakelijk om een goed beeld te hebben van de waterkwaliteit, maar ook van de waterkwantiteit in een stroomgebied. Over onzekerheden in waterkwantiteitsmetingen is relatief veel bekend, echter de informatie over onzekerheden in debietmetingen is gering. Omdat inzicht in deze onzekerheden van belang is voor de hierboven beschreven doelen van het project Monitoring Stroomgebieden is onderzoek verricht naar de onzekerheden van debietmetingen en de consequenties van deze bevindingen voor het project ‘Monitoring stroomgebieden’.

Trefwoorden: Hydrologie, debietmetingen, onzekerheid, “Monitoring Stroomgebieden”.

ISSN 1566-7197

Dit rapport is gratis te downloaden van www.alterra.wur.nl (ga naar ‘Alterra-rapporten’). Alterra verstrekt geen gedrukte exemplaren van rapporten. Gedrukte exemplaren zijn verkrijgbaar via een externe leverancier. Kijk hiervoor op www.boomblad.nl/rapportenservice.

© 2009 Alterra

Postbus 47; 6700 AA Wageningen; Nederland

Tel.: (0317) 480700; fax: (0317) 419000; e-mail: info.alterra@wur.nl

Niets uit deze uitgave mag worden veelelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Alterra.

Alterra aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Inhoud

Woord vooraf	7
Samenvatting	9
1 Inleiding	11
1.1 Aanleiding	11
1.2 Meten van debieten	11
1.3 Doelstelling	12
1.3.1 Inventarisatie debietmetingen	12
1.3.2 Kwantificeren van onzekerheden in debietmetingen	13
1.3.3 Consequenties van onzekerheden in debietmetingen	13
1.4 Leeswijzer	13
2 Debietmetingen in de stroomgebieden	15
2.1 Drentse Aa	15
2.2 Schuitenbeek	18
2.3 Krimpenerwaard	20
2.4 Quarles van Ufford	23
2.5 Bevindingen van de inventarisatie	26
3 Onzekerheid in afzonderlijke debietmetingen	27
3.1 Onzekerheidstermen	27
3.2 Bronnen van onzekerheden	29
3.3 Kwantificeren van onzekerheid	30
4 Onzekerheden debietmetingen Monitoring Stroomgebieden	33
4.1 Kwantificeren van onzekerheid in debietmetingen Monitoring Stroomgebieden	33
4.2 Aanvullende onzekerheden	38
5 Consequenties en aanbevelingen voor Monitoring Stroomgebieden	41
6 Conclusies en aanbevelingen	45
Literatuur	47
Bijlage 1 Velocity-area methode	51
Bijlage 2 Stage-discharge	55
Bijlage 3 Meetstuwen	59
Bijlage 4 Gemalen	73
Bijlage 5 Akoestisch debietmeetmethode	77

Woord vooraf

Deze rapportage ‘Onzekerheden in debietmetingen’ vormt een onderdeel van het project ‘Monitoring Stroomgebieden’. Het primaire doel van het project is het leveren van een bijdrage aan de evaluatie van het mestbeleid door het kwantificeren van het aandeel van de landbouw in de belasting van het oppervlaktewater en de verandering van dit aandeel van de landbouw als gevolg van (mest)beleid in een aantal representatieve stroomgebieden in karakteristieke landschappelijke regio’s. Het secundaire doel is om een methodiek te ontwikkelen die het mogelijk maakt en perspectieven biedt om deze methodiek ook in andere stroomgebieden in te voeren.

Voor dit project zijn vier stroomgebieden geselecteerd: Drentse Aa, Schuitenbeek, Krimpenerwaard en Quarles van Ufford. De waterbeheerders Hoogheemraadschap van Schieland en Krimpenerwaard, Waterschap Veluwe, Waterschap Rivierenland, Waterschap Hunze en Aa’s en Waterlaboratorium Noord participeren actief in dit project.

Het project wordt aangestuurd door een stuurgroep. In de stuurgroep hebben de Ministeries LNV, VROM en V&W als opdrachtgevers en de Unie van Waterschappen/de betrokken waterbeheerders zitting. Het project wordt uitgevoerd door Alterra Research Instituut voor de Groene Ruimte onderdeel van Wageningen Universiteit en Researchcentrum en Deltares.

Voor het kwantificeren van de landbouw in de belasting van het oppervlaktewater en de ontwikkeling van een monitoringsmethodiek is het noodzakelijk om een goed beeld te hebben van de waterkwaliteit, maar ook van de waterkwantiteit in een stroomgebied. Over onzekerheden in waterkwantiteitsmetingen is relatief veel bekend, echter de informatie over onzekerheden in debietmetingen is gering. Omdat inzicht in deze onzekerheden van belang is voor de hierboven beschreven doelen van het project Monitoring Stroomgebieden is onderzoek verricht naar de onzekerheden van debietmetingen en de consequenties van deze bevindingen voor het project Monitoring Stroomgebieden.

Dank gaat uit naar de waterbeheerders Harry de Jager (waterschap Hunze en Aa’s), Jaya Sicco Smit en Wim de Boer (waterschap Veluwe), Wim Twisk en Michel van Cappellen (Hoogheemraadschap Schieland en Krimpenerwaard), Hella Pomarius (waterschap Rivierenland) voor het aanleveren van informatie met betrekking tot debietmetingen. Ook gaat dank uit naar collega’s Patrick Bogaart en Jan Roelsma voor het werpen

van een kritische blik op deze rapportage. Verder gaat dank uit naar senior hydroloog en specialist in meetstuwen Wubbo Boiten voor begeleiding bij het opzetten van deze studie.

Voor informatie over het project Monitoring Stroomgebieden kunt u terecht op www.monitoringstroomgebieden.nl of bij:

Dorothee van Tol-Leenders
0317 - 48 42 79
dorothee.vantol-leenders@wur.nl

Frank van der Bolt
0317 - 48 64 44
frank.vanderbolt@wur.nl

Samenvatting

In het project Monitoring Stroomgebieden wordt gestreefd naar een operationeel, geoptimaliseerd monitoringsysteem, waarmee de bijdrage van de landbouw aan de belasting van het oppervlaktewater door nutriënten kan worden gekwantificeerd en waarmee de effecten van het mestbeleid en veranderingen binnen het stroomgebied kunnen worden gevolgd en voorspeld. Voor dit project zijn vier stroomgebieden geselecteerd: Drentse Aa (een met nutriënten laagbelast zandgebied), Schuitenbeek (een met nutriënten hoogbelast zandgebied), Krimpenerwaard (een veengebied) en Quarles van Ufford (een kleigebied).

Door de betrokken waterbeheerders bij het project Monitoring Stroomgebieden worden op veel locaties debietgegevens verzameld. Deze gegevens worden in het project ondermeer gebruikt voor het toetsen en opzetten van een modelsysteem. Het is echter tot nu toe niet bekend in hoeverre deze metingen de werkelijkheid representeren. Onzekerheden in kwantitatieve meetgegevens zorgen voor een onzekerheid in het kwantificeren van het aandeel van de landbouw in de belasting van het oppervlaktewater. Het is dus belangrijk om inzicht te hebben in de onzekerheid die meespeelt bij debietmetingen om zo ook een beeld te krijgen in hoeverre onzekerheden in debietmetingen doorwerken in onderzoeken, beleidsanalyses, beoordelingen van de bedrijfsvoering en bij het afleiden van een geschikt monitoringssysteem.

Met behulp van literatuurgegevens is op basis van de debietmeetmethode die gehanteerd wordt een algemeen beeld van de onzekerheid in de debietmetingen te verkrijgen. Bij deze onzekerheid hoort echter wel een aantal randvoorwaarden. Zo moet de nodige zorgvuldigheid worden gehanteerd bij de totstandkoming van een nieuw afvoermeeetstation of kalibratie van een bestaand kunstwerk. Ook dient regelmatig onderhoud en controle van referentieniveaus plaats te vinden. In de praktijk is het echter de vraag of deze zorgvuldigheid wordt gehanteerd en of het onderhoud en controle aan de meetopstellingen ook daadwerkelijk plaatsvindt in het veld. In deze studie is daarom per meetlocatie een analyse verricht naar de onzekerheid die meespeelt bij een bepaalde debietsbepaling aan de hand van gegevens uit het veld.

Om de onzekerheid in debietmetingen goed te kunnen kwantificeren, is deze studie gestart met het inventariseren welke kwantitatieve meetgegevens beschikbaar zijn voor de vier stroomgebieden en middels welke debietmeetmethode deze kwantitatieve meetgegevens tot stand zijn gekomen. Het gaat hierbij, naast de debietmeetmethode, ook om gedetailleerde informatie zoals: wordt de meetopstelling (tegenwoordig)

geijkt en welke referentiemethode wordt hiervoor gebruikt, is de meting ISO-gestandaardiseerd, welke afvoerrelatie wordt er gebruikt, wat zijn de bijbehorende afmetingen van de meetopstelling en is er een beeld van de betrouwbaarheid (of van de afzonderlijke componenten waaruit de debietmeting bestaat).

Tijdens de inventarisatiefase van de studie is echter gebleken dat veel gedetailleerde informatie slecht of zelfs helemaal niet beschikbaar/bekend waren bij de waterbeheerders. Dit heeft tot gevolg dat het bepalen van de onzekerheid die meespeelt in debietsbepalingen niet alleen aan de hand van veldgegevens kan plaatsvinden. Indien geen veldgegevens voorhanden zijn is gebruik gemaakt van literatuurgegevens en expert-kennis. De bepaalde onzekerheden aan de hand van veldgegevens lijken hoger uit te vallen dan de onzekerheden beschreven in de literatuur. Daarnaast kunnen zich nog aanzienlijke systematische fouten voordoen en uitbijters voorkomen in afzonderlijke debietmetingen. Naast onzekerheden in de afzonderlijke debietmetingen kleven er ook nog temporele en ruimtelijke onzekerheden aan de debietmetingen vast.

Onzekerheden in debietmetingen hebben consequenties voor het project Monitoring Stroomgebieden. Voor het toetsen/valideren van het modelsysteem is beschikking over onzekerheid in debietgegevens van essentieel belang. Zo is het verschil tussen een gemeten en berekende waterafvoer soms alleen al te verklaren aan de hand van de onzekerheid in de meting. Doordat er bij het project Monitoring Stroomgebieden veel met nutriëntenvrachten wordt gewerkt, speelt naast de onzekerheid in debietmetingen ook de onzekerheid in metingen van nutriëntenconcentraties een essentiële rol.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

De aanleiding voor de beoordeling van de kwantitatieve meetgegevens ligt in het project Monitoring Stroomgebieden. Het doel van het project is het leveren van een bijdrage aan de evaluatie van het mestbeleid door het kwantificeren van het aandeel van de landbouw op de nutriëntenbelasting van het oppervlaktewater en de invloed van het (mest)beleid hierop. Hiertoe wordt in het project Monitoring Stroomgebieden een monitoringsprogramma voor de nutriëntenstromen in een viertal gebieden ontwikkeld door het combineren van meten en modelleren. De vier gebieden in het project Monitoring Stroomgebieden zijn uitgekozen op hun unieke kenmerken en zijn samen representatief voor een groot deel van Nederland. In Tabel 1-1 zijn kenmerken van de verschillende stroomgebieden weergegeven. De aanpak dient als een blauwdruk voor andere gebieden. Om deze methode van monitoren uit te werken, wordt het modelsysteem gefaseerd opgezet.

Tabel 1-1: Stroomgebieden van het project Monitoring Stroomgebieden

Stroomgebied	Kenmerken
Drentse Aa	Vrij afwaterend, zandgebied, laag belast (qua nutriënten)
Schuitensbeek	Vrij afwaterend, zandgebied, hoog tot middelmatig belast
Krimpenerwaard	Polder, veenweidegebied, hoog tot middelmatig belast
Quarles van Ufford	Bemalingsgebied, rivierkleigrond (zwarte klei) in combinatie met lichte klei/zavel (oeverwallen), 'normaal' belast

Voor het project Monitoring Stroomgebieden worden op veel locaties debietgegevens verzameld door de waterschappen die gebruikt worden voor het toetsen en opzetten van het modelsysteem voor de vrachtbepaling van N en P. Het is echter tot nu toe niet bekend in hoeverre deze metingen de waarheid representeren. Onzekerheden in kwantitatieve meetgegevens zorgen voor een onzekerheid in het kwantificeren van het aandeel van de landbouw in de belasting van het oppervlaktewater. Daarnaast is inzicht in de onzekerheden van kwantitatieve meetgegevens noodzakelijk om een goede monitoringsmethodiek te ontwikkelen. Daarom is in het kader van het project Monitoring Stroomgebieden onderzoek verricht naar de onzekerheden van debietmetingen en de consequenties van deze bevindingen voor de projectdoelen.

1.2 Meten van debieten

Het debiet kan bepaald worden met behulp van verschillende debietmeetmethoden. Wanneer een bepaalde methode in meerdere

landen over de gehele wereld gangbaar is, bestaat de mogelijkheid deze methode vast te leggen in een internationale standaard. Eén van de internationale organisaties die zich bezig houdt met standaardisatie is de “International Organization for Standardization” (ISO). De ISO kent tal van “Technical Committees” (TC’s), waarvan het technisch comité ISO/TC 113 “Liquid flow measurement in open channels” zich bezig houdt met de standaardisatie van methoden en opstellingen voor het meten van afvoeren en sedimenttransport in open waterlopen. Bij ISO standaardisatie wordt door samenwerkende landen de vormgeving van de meetstuw, de randvoorwaarden voor het toepassingsgebied en de afvoerrelatie vastgesteld.

In Nederland bestaat intussen redelijk veel ervaring met het meten van hydrologische grootheden bij de Rijksoverheid, provinciale diensten voor waterbeheer en milieu, en een aantal regionale waterbeheerders. Het meten van debieten is gecompliceerd: de vele verschillende methoden en instrumenten maken de keuze voor de meest geëigende debietmeetmethode verre van eenvoudig. Ook bestaat er weinig uniformiteit in de toepassing van deze methoden onder de waterbeheerders. De keuze van een bepaalde methodiek voor het meten van het debiet wordt bepaald door systeemeigenschappen (zoals de dimensies van het dwarsprofiel, variatie van stroomsnelheden, beschikbare verval, aanstroomcondities en sedimenttransport) en de wensen van de waterbeheerder (zoals toelaatbare meetfout, beschikbaar budget en de benodigde meetfrequentie).

Als gevolg van de vele verschillende methoden, instrumenten en randvoorwaarden voor het verrichten van debietmetingen is het merendeel van de verschillende typen meetstuwen bij slechts kleine groepen gebruikers favoriet. En dat leidt ertoe dat deze meetstuwen niet snel in aanmerking komen voor (ISO) standaardisatie omdat het draagvlak daarvoor te smal is. Veel niet-gestandaardiseerde meetstuwen zijn echter, ook in Nederland, vrij breed geaccepteerd. En hoewel de geometrie, de hydraulische randvoorwaarden en de afvoerrelaties niet zijn vastgelegd in de ISO-standaards, is over een aantal stuwen voldoende bekend om ze te kunnen toepassen (Bos, 1989; Boiten et al., 1995; Hartong et al., 2009).

1.3 Doelstelling

Deze studie heeft drie doelstellingen die hieronder zijn beschreven.

1.3.1 Inventarisatie debietmetingen

Tijdens het begin van de studie is geïnventariseerd welke kwantitatieve meetgegevens beschikbaar zijn voor de vier stroomgebieden en middels

welke debietmeetmethode deze kwantitatieve meetgegevens tot stand zijn gekomen.

1.3.2 Kwantificeren van onzekerheden in debietmetingen

Na de inventarisatie kan de onzekerheid in de beschikbare debietmetingen gekwantificeerd worden. Met behulp van literatuurgegevens is aan de hand van de debietmeetmethode een algemeen beeld van de onzekerheid in de debietmetingen te verkrijgen. Om debietmetingen te verrichten binnen de bandbreedte van deze algemene onzekerheid dient echter wel voldaan te worden aan een aantal randvoorwaarden, zoals controle en onderhoud aan de meetopstellingen. Deze studie probeert aan de hand van informatie uit het veld een beeld te schetsen van de onzekerheid die in de praktijk meespeelt bij een debietmeting.

1.3.3 Consequenties van onzekerheden in debietmetingen

Als het kwantificeren van de onzekerheden in debietmetingen is afgerond kan gekeken worden wat de consequenties zijn van de onzekerheden in debietmetingen voor het project Monitoring Stroomgebieden.

1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 worden resultaten van de inventarisatie van kwantitatieve meetgegevens beschreven. Hierbij wordt gekeken naar welke debietgerelateerde meetgegevens in de vier stroomgebieden beschikbaar zijn. Aan het einde van het hoofdstuk zullen de bevindingen kort worden samengevat. In hoofdstuk 3 wordt eerst een korte toelichting gegeven op de achterliggende theorie die speelt bij onzekerheden in debietmetingen. Vervolgens wordt hoofdstuk 4 de onzekerheid in debietmetingen gekwantificeerd voor alle meetlocaties van het project Monitoring Stroomgebieden. In hoofdstuk 5 worden tenslotte enkele voorbeelden gegeven van wat de consequenties van onzekerheden in debietmetingen zijn voor het project Monitoring Stroomgebieden. In hoofdstuk 6 zijn de conclusies van deze studie verwoord. Nadere details over veel toegepaste methoden voor afvoermeting staan in de bijlagen.

2 Debietmetingen in de stroomgebieden

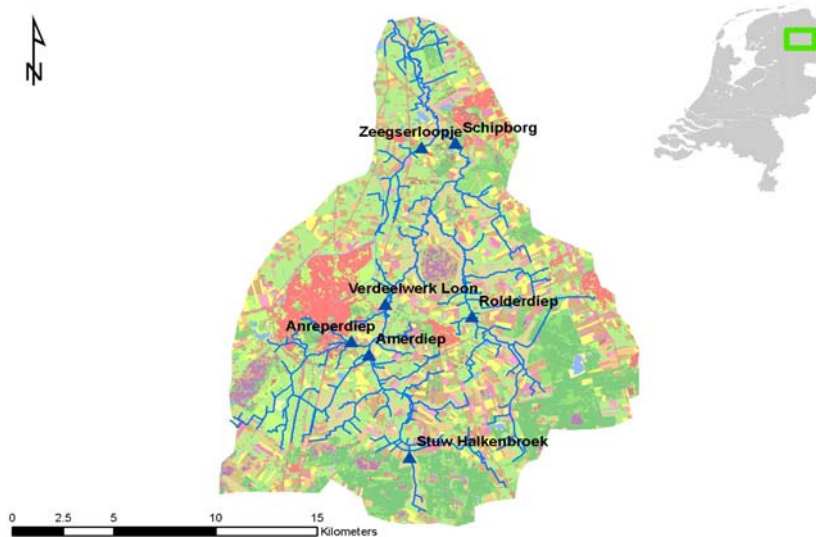
Om te achterhalen wat de kwaliteit van de debietmetingen zijn, is er in deze studie een analyse uitgevoerd naar de onzekerheid in de debietmetingen. Om de onzekerheid in debietmetingen goed te kunnen kwantificeren, is deze studie gestart met het inventariseren welke kwantitatieve meetgegevens beschikbaar zijn voor de vier stroomgebieden en middels welke debietmeetmethode deze kwantitatieve meetgegevens tot stand zijn gekomen. Voor de analyse van de onzekerheid in een debietmeting is het van belang om te achterhalen hoe de debietmeting precies bepaald wordt. Daarvoor is het weten van de debietmeetmethode alleen niet genoeg maar is er ook gedetailleerde informatie nodig om zo de nauwkeurigheid van de verschillende componenten waaruit de debietsbepaling bestaat te kunnen analyseren. Hierbij valt te denken aan informatie zoals: wordt de meetopstelling (tegenwoordig) geijkt en welke referentiemethode wordt hiervoor gebruikt, is de meting ISO-gestandaardiseerd, welke afvoerrelatie wordt er gebruikt, wat zijn de bijbehorende afmetingen van de meetopstelling en is er een beeld van de betrouwbaarheid (of van de afzonderlijke componenten waaruit de debietmeting bestaat).

Hieronder zijn de resultaten van de inventarisatie per stroomgebied beschreven. Bij de beschrijving wordt onderscheidt gemaakt tussen de inventarisatie van algemene kwantiteitgegevens (meetlocatie, meetperiode en de debietmeetmethode) en de inventarisatie van (de hierboven genoemde) gedetailleerde informatie met betrekking tot kwantiteitgegevens. Aan het einde van het hoofdstuk worden de bevindingen kort samengevat voor de vier stroomgebieden.

2.1 Drentse Aa

Inventarisatie algemene kwantiteitgegevens

In het stroomgebied van de Drentse Aa worden op 7 verschillende locaties debietmetingen uitgevoerd, te weten: Schipborg, verdeelwerk Loon, Amerdiep, Anreepdiep, Rolderdiep, Zeegserloopje en Halkenbroek (Figuur 2-1) (Roelsma et al., 2009). De gemeten afvoeren van het meetpunt Schipborg en de noodoverlaat bij het verdeelwerk Loon vormen tezamen de gemeten afvoeren van nagenoeg het gehele stroomgebied van de Drentse Aa. Meetpunten Amerdiep en Rolderdiep liggen elk in een middenloop van het beekstelsel. Meetpunten Anreepdiep, Zeegserloopje en Halkenbroek liggen elk in een bovenloop van het beekstelsel (Roelsma et al., 2008).



Figuur 2-1: Ligging van debietmetingen in Drentse Aa

In het stroomgebied van de Drentse Aa worden verschillende methoden gehanteerd voor het meten van het debiet, zie Tabel 2-1. Een uitgebreide omschrijving van de debietmeetmethoden is weergegeven in onderdeel A van de bijlagen 1 tot en met 5.

Tabel 2-1: Kwantiteitgegevens debietmetingen Drentse Aa

Locatie	Meetmethodiek	Frequentie	Periode
Schipborg	stage-discharge	dag / uur	1981 - 2009
Verdeelwerk Loon			
- Meander Loon	meetstuw (klepstuw)	dag / uur	1990 - 2009
- Debiet Drentse Aa	meetstuw (klepstuw)	dag / uur	1990 - 2009
- Debiet afleidingskanaal	meetstuw (klepstuw)	dag / uur	1990 - 2009
Rolderdiep	stage-discharge	dag	1992 - 1999
Amerdiep	meetstuw (lange overlaat)	dag / uur	1992 - 2006
Anreperdiep	meetstuw (klepstuw)	dag / uur	1998 - 2006
Halkenbroek	meetstuw (klepstuw)	uur	2007 - 2009
Zeegserloopje	velocity-area	uur	2007 - 2009

Op meetlocatie Schipborg wordt het debiet gemeten met de stage-discharge methode. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat er een eenduidige relatie bestaat tussen waterstand en het debiet. Door de waterstand te meten kan daaruit het debiet worden herleid (zie bijlage 2A). De relatie tussen waterstand en debiet is hierbij vastgesteld met behulp van de velocity-area methode. Bij de velocity-area methode wordt de oppervlakte van het dwarsprofiel van de waterloop nauwkeurig bepaald en verdeeld in een aantal vakken. Vervolgens wordt in elk vak de gemiddelde stroomsnelheid bepaald. Door het product van stroomsnelheid en oppervlakte van alle vakken te sommeren, wordt het debiet bepaald (zie bijlage 1A).

Op meetlocatie Zeegserloopje worden debietmetingen verricht aan de hand van een akoestische methode. Bij de akoestische debietmeetmethode worden debieten berekend uit metingen van de stroomsnelheid en de waterstand. De oppervlakte van het dwarsprofiel van de waterloop is hierbij een functie van de waterstand (zie bijlage 5A).

Bij overige meetlocaties in het stroomgebied van de Drentse Aa worden debietmetingen uitgevoerd met meetstuwen. Bij meetstuwen is er in de meeste gevallen een vaste relatie tussen de waterstand bovenstrooms van de meetopstelling en het debiet (zie bijlage 3A).

De frequentie van de aangeleverde debietmeetgegevens variëren in de tijd. Afgezien van de meetlocatie Schipborg zijn er voor de overige locaties tot het jaar 2000 geaggregeerde daggegevens aangeleverd. Vanaf 2000 zijn er urengegevens door het waterschap aangeleverd. Voor de meetlocatie Schipborg zijn er naast geaggregeerde daggegevens ook urengegevens aangeleverd vanaf 1995 (Tabel 2-1).

Inventarisatie gedetailleerde informatie

Een overzicht van de resultaten van de inventarisatie met betrekking tot de onzekerheid van debietmetingen staan weergegeven in Tabel 2-2. In de tabel wordt met een plus of een min aangegeven of een meetlocatie een ISO gestandaardiseerde meetlocatie betreft, of de meetlocatie geïkt wordt en een indicatie van de betrouwbaarheid van de afvoermetingen.

Tabel 2-2: Globaal overzicht met betrekking tot gegevens over onzekerheid debietmetingen voor de Drentse Aa

Locatie	ISO standaard	Ijking	Indicatie Betrouwbaar
Schipborg	-	+-	-
Verdeelwerk Loon			
- Meander Loon	-	-	-
- Debiet Drentse Aa	-	-	+-
- Debiet afleidingskanaal	-	-	+-
*Rolderdiep	-	-	-
**Amerdiep (voor / na)	-	-	+- / -
**Anreperdiep (voor / na)	-	-	-
Halkenbroek	-	-	-
Zeegserloopje	-	-	+-

* vanaf 1999 geen debietmetingen aangeleverd door te grote onzekerheid.

** Door aanleg vistrappen (2006) geen volledige debietmetingen.

Geen van de meetlocaties in het stroomgebied van de de Drentse Aa zijn ISO gestandaardiseerd. Ijking van de meetlocaties heeft in het verleden alleen plaatsgevonden bij de meetlocatie Schipborg. De laatste jaren

wordt dit echter niet meer uitgevoerd. Wel wordt er door het waterbedrijf Groningen een aantal keer per jaar debietmetingen uitgevoerd met de velocity-area methode, hiervan zijn echter (ook bij het Waterschap) geen gegevens beschikbaar.

In Tabel 2-2 is ook de globale indruk van het Waterschap van de kwaliteit van de debietmetingen weergegeven. Wanneer de debietmeting slechts indicatief gebruikt mag worden wordt dit in de tabel met een min weergegeven, plus min geeft aan dat de debietmeting bij een gemiddelde afvoer redelijk betrouwbaar is.

Het waterschap heeft verder aangegeven dat de waterhoogte ter plaatse van de meetlocaties wordt vastgesteld met een onzekerheid van 0.5cm. Het nulpunt wordt vastgesteld met een onzekerheid van 1cm (pers. com. Harry de Jager, Waterschap Hunze en Aa's).

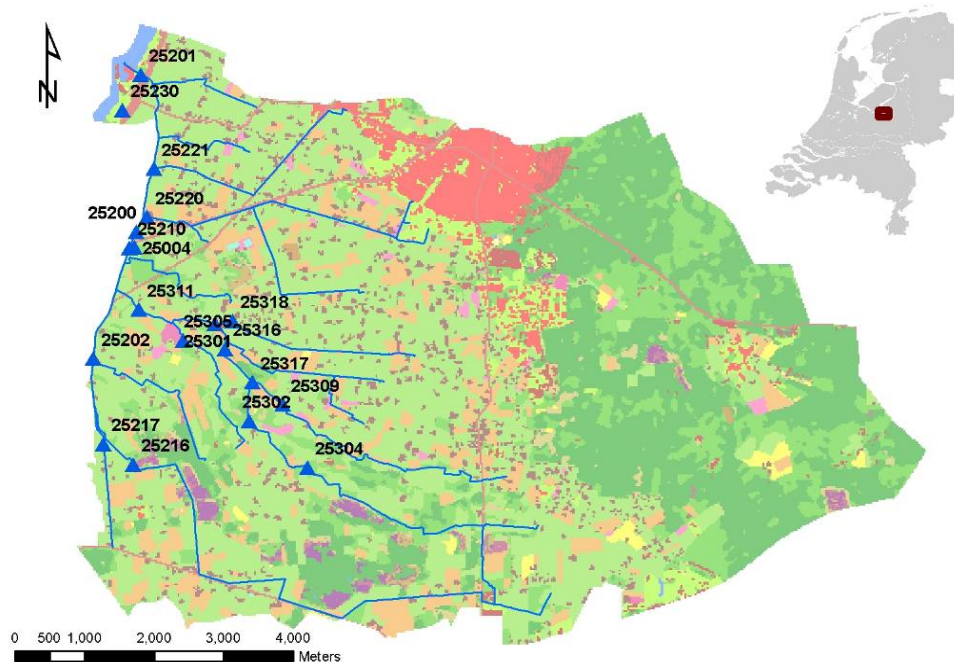
2.2 Schuitenbeek

Inventarisatie algemene kwantiteitgegevens

In het stroomgebied van Schuitenbeek worden op 19 verschillende locaties debietmetingen uitgevoerd, zie Figuur 2-2 (Löschner-Wolleswinkel et al., 2009).

Van de watergangen in het stroomgebied is een groot deel niet permanent watervoerend. Met name in het oostelijk deel van het stroomgebied staan de watergangen gedurende het grootste gedeelte van het jaar droog als gevolg van lage grondwaterstanden. Alleen het benedenstroomse deel van de Schuitenbeek, de Veldbeek (25311) en Groot Hell (25305) zijn het gehele jaar watervoerend. Hier zijn de grondwaterstanden relatief hoog. Het stroomgebied van Schuitenbeek is een relatief snel reagerend watersysteem: de reactietijd op de neerslag is kort (Jansen et al., 2008).

Het gemeten debiet ter plaatse van meetlocatie 25201 betreft de totale afvoer van het gehele stroomgebied van Schuitenbeek. In 2005 is de waterloop richting de randmeren en daarmee het uitstroompunt van het stroomgebied van Schuitenbeek verplaatst. Het debiet ter plaatse van het nieuwe uitstroompunt wordt gemeten op locatie 25230. Meetlocatie 25201 is bij de verplaatsing van de waterloop komen te vervallen.



Figuur 2-2: Ligging van debietmetingen in Schuitenbeek

In het stroomgebied van Schuitenbeek bevindt zich één meetlocatie (25210) waarbij het debiet continu gemeten wordt, zie Tabel 2-3. Het waterschap heeft zowel kwartiercijfers als geaggregeerde dagcijfers van de ter plaatse gemeten waterhoogten overgedragen. Bij de overige meetlocaties wordt het debiet tweewekelijks gemeten met behulp van de velocity-area methode

Tabel 2-3: Kwantiteitgegevens debietmetingen Schuitenbeek

Locatie	Meetmethodiek	Frequentie	Periode
25210	meetstuw (V-vormige lange overlaat)	kwartier / dag	1988 - 2009
25004	velocity-area	tweewekelijks	2004 - 2007
25200	velocity-area	tweewekelijks	1988 - 2009
25201	velocity-area	tweewekelijks	1976 - 2005
25202	velocity-area	tweewekelijks	2004 - 2009
25216	velocity-area	tweewekelijks	2004 - 2009
25217	velocity-area	tweewekelijks	2004 - 2009
25220	velocity-area	tweewekelijks	1989 - 1992
25221	velocity-area	tweewekelijks	1988 - 1992
25230	velocity-area	tweewekelijks	2005 - 2009
25301	velocity-area	tweewekelijks	1996 - 1998
25302	velocity-area	tweewekelijks	2004 - 2009
25304	velocity-area	tweewekelijks	2004 - 2009
25305	velocity-area	tweewekelijks	2004 - 2009
25309	velocity-area	tweewekelijks	2004 - 2009
25311	velocity-area	tweewekelijks	1992 - 2009
25316	velocity-area	tweewekelijks	1996 - 2009
25317	velocity-area	tweewekelijks	1996 - 1996
25318	velocity-area	tweewekelijks	2004 - 2009

Inventarisatie gedetailleerde informatie

In Tabel 2-4 is een globaal overzicht weergegeven van de betrouwbaarheid van de debietmeetgegevens. De debietmeetmethode op meetlocatie 25210 betreft een V-vormige brede overlaat (ISO 8333:1985). Het waterschap heeft aangegeven dat de meetlocatie in het verleden is geijkt. Debietmetingen met een V-vormige brede overlaat hebben als voordeel dat grote en kleine afvoeren kunnen worden gemeten met een relatief grote nauwkeurigheid. Tevens is een dergelijke meetopstelling geschikt voor waterlopen met een gering verval (Clemmens et al., 2001).

Tabel 2-4: Globaal overzicht met betrekking tot gegevens over onzekerheid debietmetingen voor Schuitenbeek

Locatie	ISO standaard	Ijking	Indicatie betrouwbaar
25210	+	+/-	+
overige meetlocaties	+	+/-	+

De velocity-area methode die voor de overige meetlocaties wordt gehanteerd is een relatief betrouwbare debietmeetmethode (ISO 748:2007). De stroomsnelheid wordt door het waterschap bepaald met een elektromagnetische sensor. Het waterschap heeft aangegeven dat het niet duidelijk is hoe vaak deze sensor tegenwoordig wordt geijkt.

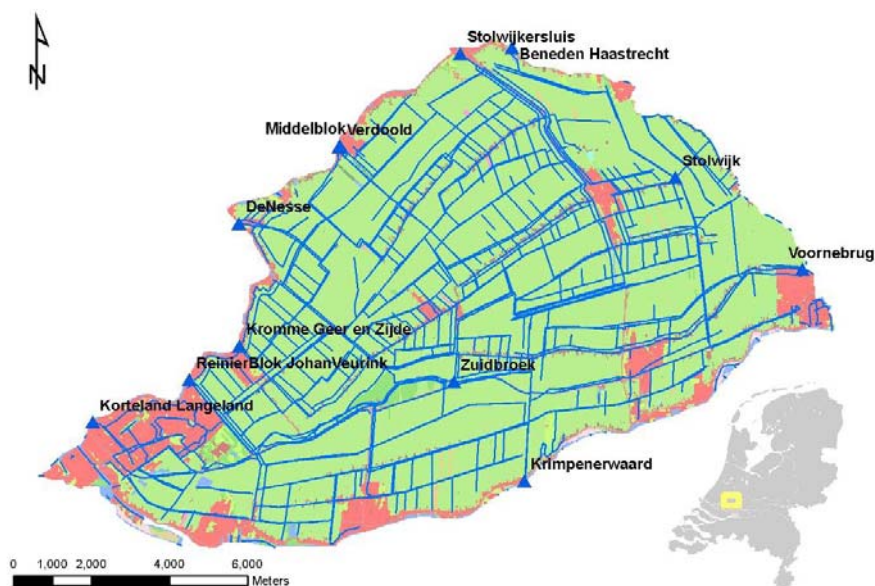
Voor het continue meetpunt is gedetailleerde informatie aangeleverd van de afmetingen van de V-vormige brede overlaat. Verder heeft het waterschap aangegeven dat de waterstand met een onzekerheid van 0.5cm worden vastgesteld (pers. com. Wim de Boer, Waterschap Veluwe). Op basis van deze informatie is een uitgebreide analyse van de onzekerheid in de debietmetingen uitvoerbaar. Voor de overige locaties is met behulp van de ISO standaard, een redelijk nauwkeurige inschatting te maken van de onzekerheid die meespeelt bij een debietsbepaling.

2.3 Krimpenerwaard

Inventarisatie algemene kwantiteitgegevens

Het te hanteren waterpeil in de polder van de Krimpenerwaard wordt bereikt door het samenspel van inlaten, stuwen en gemalen. Het overtollige water wordt direct vanuit de polder naar de rivier gepompt via gemalen (zie bijlage 4A voor uitgebreide omschrijving van gemalen). Vanuit de Hollandse IJssel en de Lek vindt wateraanvoer plaats. Wateraanvoer vanuit de Hollandse IJssel is eind 2004 vervangen door de wateraanvoer vanuit de Lek. Daarvoor is het gemaal Hoekse Sluis vervangen door het nieuwe gemaal Krimpenerwaard (Kroes et al., 2008).

In de polder Krimpenerwaard worden op de grootste in- en uitlaten debietmetingen verricht (Kroes et al., 2006). Dit zijn in totaal 11 locaties (zie Figuur 2-3). De gemalen Krimpenerwaard, Verdoold en Johan Veurink zijn de drie hoofdgemalen in het gebied Krimpenerwaard. Ter plaatse van het gemaal Krimpenerwaard wordt ook veel water ingelaten. Bij het gemaal Verdoold gebeurt dit ook, maar in mindere mate. Het gemaal Johan Veurink (sinds 2003 in werking) wordt alleen gebruikt voor het uitmalen van water. Voorheen was hier het gemaal Reinierblok gevestigd waar ook water werd ingelaten. Overige meetlocaties betreffen kleinere gemalen waarbij ook sprake kan zijn van (relatief geringe) waterinlaat.



Figuur 2-3: Ligging van debietmetingen in Krimpenerwaard

Ter plaatse van het gemaal Verdoold zijn gedurende de periode 2004 tot en met 2007 ook metingen verricht met behulp van akoestische debietmeetmethode. Hiermee is een vergelijking mogelijk met inschattingen van het maandelijks debiet aan de hand van draaiuren en de pompcapaciteit. Tegenwoordig zijn de akoestische meters geïnstalleerd ter plaatse van het gemaal Krimpenerwaard. Hiervan zijn echter nog geen betrouwbare gegevens bekend (pers. com. Michel van Cappellen, Hoogheemraadschap Schieland en Krimpenerwaard).

Voor het project Monitoring Stroomgebieden zijn door het Hoogheemraadschap voornamelijk geaggregeerde maandgegevens aangeleverd. Voor het gemaal Krimpenerwaard (voor de periode 2007

tot en met 2008) en de akoestische metingen zijn dagelijkse debietgegevens aangeleverd (zie Tabel 2-5).

Tabel 2-5: Gegevens debietmetingen in Krimpenerwaard

Locatie	Meetmethodiek	Frequentie	Periode
Hoekse Sluis / Krimpenerwaard			
- uitslaan	gemaal (pomp)	maand/dag	1996 - 2008
- inlaat	meetstuw (afsluiter)	maand/dag	1996 - 2008
Verdoold			
- uitslaan	gemaal (pomp)	maand	1996 - 2006
- uitslaan	akoestisch	dag	2004 - 2007
- inlaat	meetstuw (afsluiter)	maand	1996 - 2006
- inlaat	akoestisch	dag	2004 - 2007
Kromme Geer en Zijde			
- uitslaan	gemaal (pomp)	maand	1996 - 2006
- inlaat	meetstuw (afsluiter)	maand	1996 - 2004
Reinierblok / Johan Veurink			
- uitslaan	gemaal (pomp)	maand	1996 - 2006
- inlaat	meetstuw (afsluiter)	maand	1996 - 2004
Beneden Haastrecht			
- uitslaan	gemaal (vijzel)	maand	1996 - 2006
- inlaat	meetstuw (afsluiter)	maand	1996 - 2004
De Nesse			
- uitslaan	gemaal (pomp)	maand	1996 - 2004
- inlaat	meetstuw (afsluiter)	maand	1996 - 2004
Langeland Kortland			
- uitslaan	gemaal (pomp)	maand	1996 - 2004
- inlaat	meetstuw (afsluiter)	maand	1996 - 2005
Stolwijkersluis	gemaal (pomp)	maand	1996 - 2004
Vlist (kern)	meetstuw (afsluiter)	maand	1996 - 2004
Voornebrug	meetstuw (afsluiter)	maand	1996 - 2004
Bergstoep	meetstuw (afsluiter)	maand	1996 - 2004

Inventarisatie gedetailleerde informatie

In Tabel 2-6 is een overzicht weergegeven van de gedetailleerde informatie van de debietmeetgegevens. Van de meetlocaties Krimpenerwaard is alleen het gemaal Krimpenerwaard ISO-gestandaardiseerd.

Bij de meetlocaties gemaal Reinierblok Johan Veurink en gemaal Krimpenerwaard wordt de uitslaande capaciteit van het gemaal gemeten. Voor de periode 2004 tot en met 2007 werd het debiet ook gemeten bij het gemaal Verdoold aan de hand van een akoestische debietmeetmethode. Bij overige gemalen is het gemiddelde dagelijks debiet bepaald met behulp van (oude) Q(h)-kromme's. In sommige gevallen is op basis van waterbalansen en expert-kennis het gemiddelde debiet nog wat naar beneden bijgesteld. Het debiet van de inlaten is in de meeste gevallen geschat op basis van waterbalansen, duikerberekeningen en expert-kennis (pers. com. Michel van Cappellen, Hoogheemraadschap Schieland en Krimpenerwaard).

Tabel 2-6: Globaal overzicht met betrekking tot gegevens over onzekerheid debietmetingen voor Krimpenerwaard

Locatie	ISO standaard	Ijking	Indicatie betrouwbaar
Hoekse Sluis / Krimpenerwaard			
- uitslaan	- / +	- / +	+ - / +
- inlaat	- / +	- / +	- / +
Verdoold			
- uitslaan (gemaal)	-	+	+ -
- uitslaan (akoestisch)	-	+	+
- inlaat (meetstuw)	-	+	+ -
- inlaat (akoestisch)	-	+	+
Kromme Geer en Zijde			
- uitslaan	-	-	+ -
- inlaat	-	-	-
Reinierblok / Johan Veurink			
- uitslaan	- / -	- / +	+ - / +
- inlaat	-	-	-
Beneden Haastrecht			
- uitslaan	-	-	+ -
- inlaat	-	-	-
De Nesse			
- uitslaan	-	-	+ -
- inlaat	-	-	+ -
Langeland Kortland			
- uitslaan	-	-	+ -
- inlaat	-	-	+ -
Stolwijkersluis	-	-	+ -
Vlist (kern)	-	-	-
Voornebrug	-	-	-
Bergstoep	-	-	-

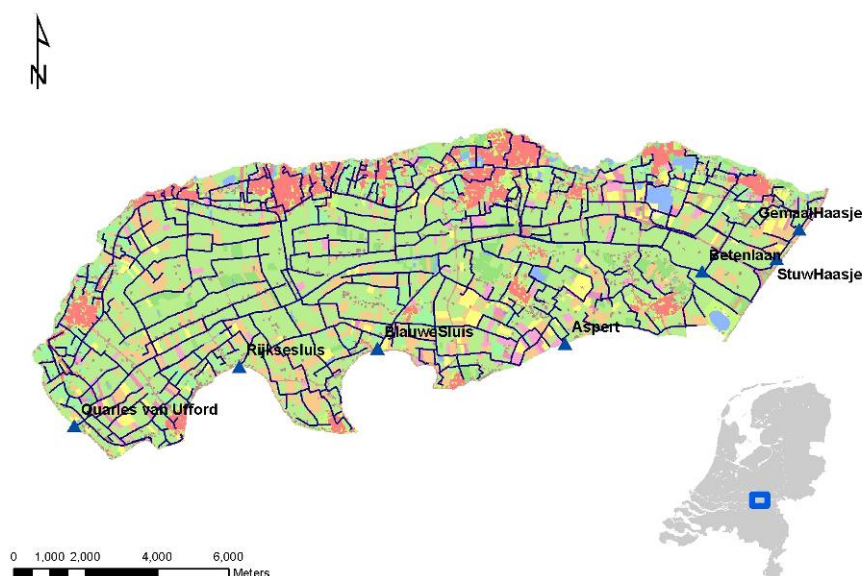
De analyse van de onzekerheid in debietmetingen verricht met behulp van een gemaal is zeer complex door allerlei energieverliezen die plaatsvinden in het leidingsysteem. Een uitgebreide analyse van de onzekerheid in debietmetingen bij gemalen is in deze studie niet uitgevoerd.

2.4 Quarles van Ufford

Inventarisatie algemene kwantiteitgegevens

In het bemalingsgebied Quarles van Ufford worden op 6 locaties metingen gedaan van wateraanvoer en op een enkele locatie metingen van waterafvoer, zie Figuur 2-4 (Siderius et al., 2009). De afvoer van water verloopt via een centrale oost-west as van het beheersgebied, met waterstroming in de westelijke richting. Het bemalingsgebied Quarles van Ufford watert af op de Maas via het gelijknamige gemaal bij Alphen. Het grootste gedeelte van het jaar kan onder vrij verval op de Maas

worden afgewaterd. Een klein deel van het jaar wordt bij hoge waterstanden in de Maas bemaling toegepast (Roozen et al., 2003).



Figuur 2-4: Ligging van debietmetingen in Quarles van Ufford

Het debiet voor uitlaten met vrij verval wordt berekend met behulp van de bovenstroomse en benedenstroomse waterstand en de stand van de schuiven. Het debiet voor uitlaten via gemalen wordt berekend met gebruik van de pompcurve, de binnen- en buitenwaterstand, de capaciteit en de draaiuren van het gemaal (pers. com. Waterschap Rivierenland, 2003).

De wateraanvoer kan vanuit de Maas onder vrij verval plaatsvinden bij de inlaatpunten Blauwe Sluis en Rijkse sluis. Tevens treedt er wateraanvoer op vanuit het aangrenzende bemalingsgebied Bloemers via het gemaal Aspert en twee duikers onder de A50 (Siderius et al., 2008). De hoeveelheid water dat door de duiker ten noorden van knooppunt Ewijk wordt ingelaten kan geschat worden met stuw 't Haasje, gemaal 't Haasje en de stand van de inlaatschuif bij de duiker onder de A50. Ten zuiden van het knooppunt Ewijk wordt het debiet geschat door debietsbepalingen ten westen van de snelweg A50. Het betreft hier stuw Betenlaan en de stuw net voor stuw Betenlaan waarmee water naar Bergharen wordt geleid (stuw Betenlaan A).

Voor het bemalingsgebied Quarles van Ufford zijn voor alle locaties (op één na) voor de periode 2004 tot en met 2007 urengegevens aangeleverd, zie Tabel 2-7. Voor de periode vóór 2004 zijn geen debietgegevens bij het waterschap beschikbaar.

Tabel 2-7: Gegevens debietmetingen in Quarles van Ufford

Locatie	Meetmethodiek	Frequentie	Periode
Quarles van Ufford			
- QvU gemaal	gemaal (pomp)	uur	2004 - 2007
- QvU stuw	meetstuw (klepstuw)	uur	2004 - 2007
Rijksesluis	meetstuw (afsluiter)	uur	2004 - 2007
Blauwe sluis	meetstuw (afsluiter)	uur	2004 - 2007
Aspert	gemaal (pomp)	uur	2004 - 2007
Betenlaan			
- betenlaan	meetstuw (klepstuw)	uur	2004 - 2007
- betenlaan A	meetstuw (klepstuw)	uur	2006
Gemaal 't Haasje	gemaal (pomp)	uur	2004 - 2007
Stuw 't Haasje	meetstuw (klepstuw)	uur	2004 - 2007

Inventarisatie gedetailleerde informatie

De meetlocaties in het bemalingsgebied van Quarles van Ufford zijn niet ISO gestandaardiseerd, daarentegen vindt op elke meetlocatie ijking plaats, zie Tabel 2-8. De geautomatiseerde metingen worden maandelijks aan de hand van de peilschalen op de locaties geijkt. De peilschalen worden om de twee maand opnieuw ingemeten. Eventuele afwijkingen worden direct verwerkt in de geautomatiseerde metingen. Ijking van de stuwstanden vindt alleen plaats wanneer daar aanleiding toe is (pers. com. Hella Pomarius, Waterschap Rivierenland).

Voor debietsbepalingen bij gemalen wordt gebruik gemaakt van Q(h)-kromme's.

Tabel 2-8: Globaal overzicht met betrekking tot gegevens over onzekerheid debietmetingen voor de Quarles van Ufford

Locatie	ISO standaard	Ijking	Indicatie betrouwbaar
Quarles van Ufford			
- QvU gemaal	-	+	+-
- QvU stuw	-	+	+-
Rijksesluis	-	+	+-
Blauwe sluis	-	+	+-
Aspert	-	+	+-
Betenlaan			
- betenlaan	-	+	+-
- betenlaan A	-	+	+-
Gemaal 't Haasje	-	+	+-
Stuw 't Haasje	-	+	+-

Voor de meetstuwen is er door het waterschap gedetailleerde informatie aangeleverd van afmetingen en de bijbehorende afvoerrelaties. Hierdoor

is het mogelijk om een uitgebreide analyse te doen naar de onzekerheid in debietmetingen bij meetstuwen binnen het waterschap.

2.5 Bevindingen van de inventarisatie

In de eerste fase van dit onderzoek is geïnventariseerd welke kwantitatieve meetgegevens beschikbaar zijn voor de vier gebieden uit het project Monitoring Stroomgebieden. Daarnaast zijn de betreffende waterbeheerders benaderd om informatie omtrent de debietgegevens aan te leveren voor de analyse naar de onzekerheid in debietmetingen. Aan de hand van de debietmeetmethode is een eerste indruk te verkrijgen van de bijbehorende onzekerheid in de debietmeting (Bos, 1989; Boiten et al., 1995; Hartong et al., 2009; ISO-standaard). In het project Monitoring Stroomgebieden worden verschillende debietmeetmethoden gehanteerd, te weten:

- Velocity-area methode;
- Stage-discharge methode;
- Meetstuwen;
- Gemalen;
- Akoestische methode.

Een uitgebreide omschrijving van de gehanteerde debietmeetmethode is weergegeven in onderdeel A van bijlagen 1 tot en met 5.

In deze studie is (daar waar mogelijk) een uitgebreide analyse gedaan naar de onzekerheid in de debietmetingen. Voor deze uitgebreide analyse is gedetailleerde informatie nodig om zo de nauwkeurigheid van de verschillende componenten waaruit de debietbepaling bestaat te kunnen analyseren. Tijdens de inventarisatiefase van de studie is gebleken dat veel gedetailleerde informatie met betrekking tot de onzekerheid van de debietmetingen niet beschikbaar waren of zelfs helemaal niet bekend zijn bij de waterbeheerders. Dit heeft wellicht te maken met de manier waarop het waterbeheer in Nederland plaatsvindt. Het waterbeheer in Nederland is met name gericht op het handhaven van bepaalde waterpeilen. Hierbij is het meten van het debiet qua prioriteit ondergeschikt. De constatering dat slechts enkele meetlocaties behoren tot de ISO-standaards en enkele meetlocaties (beperkt) geijkt worden is hier een voorbeeld van.

Voor een aantal meetlocaties binnen de vier gebieden van het project Monitoring Stroomgebieden is echter wel voldoende informatie beschikbaar voor een uitgebreide analyse van de onzekerheid in de debietbepaling. In het vervolg van deze rapportage is hier verder op ingegaan. Voor locaties waar niet voldoende gedetailleerde informatie voorhanden is voor de uitgebreide analyse, is aan de hand van literatuurgegevens en aannames aan de hand van expert-kennis een schatting gemaakt van de onzekerheid.

3 Onzekerheid in afzonderlijke debietmetingen

De analyse van de onzekerheid bij een afzonderlijke debietmeting is vrij complex. Daarom zal eerst een toelichting worden gegeven op de belangrijkste termen bij onzekerheden in debietmetingen.

3.1 Onzekerheidstermen

Een debietbepaling geeft een schatting weer van het werkelijke debiet dat heeft plaatsgevonden op een bepaalde locatie en tijd. Zoals gezegd zijn schattingen niet vrij van fouten, wat tot gevolg heeft dat het debiet niet foutloos wordt berekend. De totale meetfout die gemaakt wordt bij een afzonderlijke debietmeting is het verschil tussen de schatting en het werkelijke debiet. De meetfout, per definitie onbekend, veroorzaakt een bepaalde onzekerheid over de juistheid van een meting. De meetfout bestaat uit drie soorten fouten die plaats kunnen vinden bij een debietmeting (Bos, 1989):

- Toevallige fouten;
- Systematische fouten;
- Uitbijters.

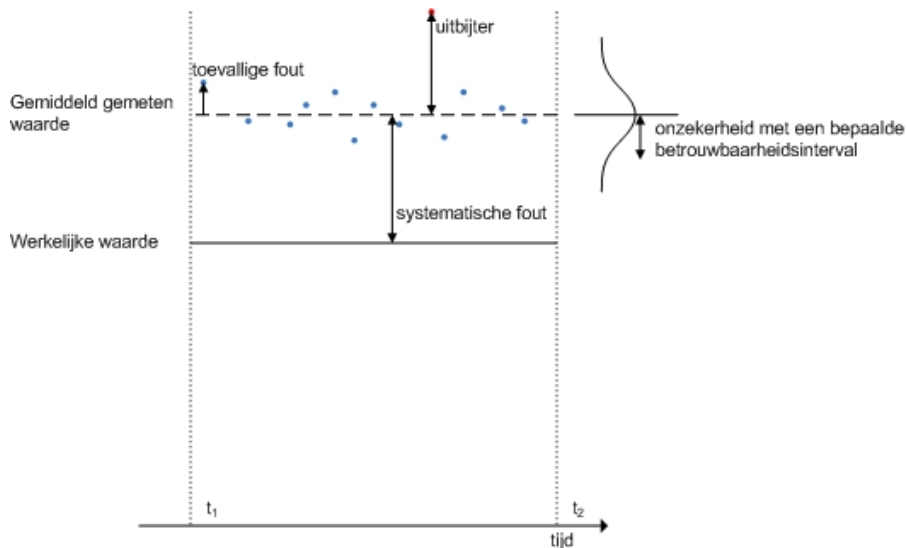
Toevallige fouten zijn fouten die iets zeggen over de reproduceerbaarheid van de meting. Een toevallige fout is altijd aanwezig. Bij herhaling van het experiment is de fout over het algemeen anders van grootte en/of van richting. Die verandering wordt geheel door het toeval bepaald. Een toevallige fout kan veroorzaakt worden door bijvoorbeeld ongevoeligheden van meetapparatuur als gevolg van slijtage bij het bepalen van de stroomsnelheid of bij het bepalen van de waterhoogte.

Bij een meting kan het voorkomen dat er een fout gemaakt wordt, die bij herhaling van de meting weer aanwezig is (met dezelfde grootte en werkend in dezelfde richting), wanneer aan de meetmethode van de meting niets veranderd wordt. Bij herhaling van de meting met dezelfde meetmethode zal dezelfde afwijking geconstateerd worden. Aangezien deze fout bij de gebruikte meetmethode systematisch optreedt wordt zo'n fout een systematische fout genoemd. Voorbeelden van systematische fouten zijn: een niet gecorrigeerd nulpunt van een meter, een verkeerde ijklijn, vervuiling van de sensor, slibafzetting of het gebruik van een verkeerde formule bij de uitwerking van de meetresultaten.

Uitbijters zijn meetwaarden die ver buiten de ijkreeks van de meetlocatie liggen. Deze extreme meetwaarden kunnen veroorzaakt worden door menselijke handelingen of door het niet goed functioneren van de

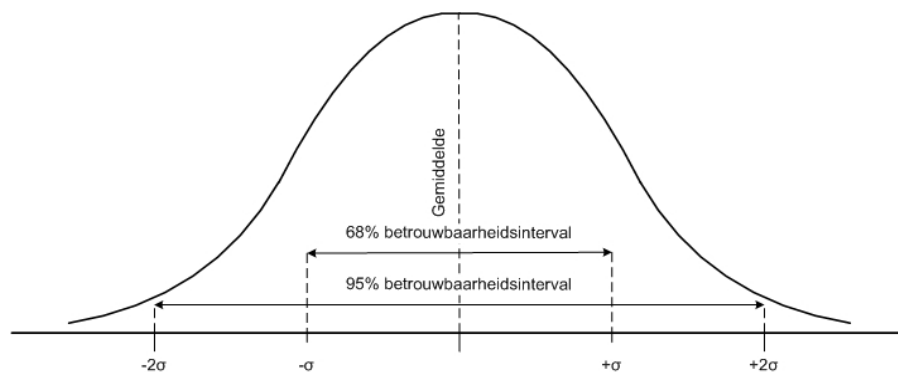
meetapparatuur. Extreme meetwaarden zullen uit de meetreeks gefilterd moeten worden. Aan de hand van het meetbereik van een bepaalde meetopstelling is het bijvoorbeeld mogelijk onwerkelijke of onmogelijk meetwaarden uit de meetreeks te filteren.

In Figuur 3-1 is een illustratie van de verschillende termen weergegeven.



Figuur 3-1: Illustratie van termen (Bos, 1989)

Bij een debietbepaling is het niet bekend welke waarde de toevallige fout heeft. Met behulp van een statistische analyse kan echter wel worden berekend welke waarden deze toevallige fout kan aannemen en met welke kans deze waarden kunnen voorkomen (Bierkens, 1996). Dit kan met een kansdichtheidsfunctie worden beschreven, zie Figuur 3-2.



Figuur 3-2: Grafische weergave van kansdichtheidsfunctie met normale verdeling

Doordat de kansdichtheidsfunctie van een toevallige fout vaak normaal verdeeld is, is het berekenen van het gemiddelde en de variatie (σ^2) voldoende om te berekenen wat de kans is dat het werkelijke debiet tussen bepaalde grenzen ligt. Zo geldt dan dat werkelijke debiet met een

kans van 95% ligt tussen de grenzen -2σ en $+2\sigma$ t.o.v. de meting. Dit wordt ook wel het 95% betrouwbaarheidsinterval genoemd (zie Figuur 3-2).

Voor systematische fouten ligt een statistische analyse naar de bijdrage in de onzekerheid van de debietbepaling minder voor de hand. Immers indien de grootte en de richting van de systematische fout bekend is, kan de meting hiervoor gecorrigeerd worden waardoor de onzekerheid in de debietmeting kleiner wordt (Clemmens et al., 1989). Om toch een beeld te krijgen van de bijdrage van een systematische fout in een debietbepaling kan de debietmeetmethode vergeleken worden met een onafhankelijke debietmeetmethode die betrouwbaarder is.

3.2 Bronnen van onzekerheden

Over het algemeen kunnen bronnen van onzekerheden geïdentificeerd worden door naar de vorm van de afvoerrelatie te kijken. De totale meetfout die wordt gemaakt bij een debietmeting is de combinatie van de fouten die optreden in de verschillende componenten van de afvoerrelatie. Indien een van de componenten van de afvoerrelatie is samengesteld uit meerdere kwantitatieve componenten, dan is de totale meetfout die gemaakt wordt een combinatie van die fouten in de verschillende kwantitatieve componenten. Om een goede inschatting te kunnen maken van de onzekerheid die speelt bij een debietmeting zullen alle mogelijke foutenbronnen geïdentificeerd en gekwantificeerd moeten worden (Bos, 1989). Hieronder is een voorbeeld uitgewerkt waarbij het debiet wordt bepaald met behulp van een meetstuw. In vergelijking 3-1 is de generieke vorm van een afvoerrelatie voor een meetstuw weergegeven. Voor toelichting van de verschillende termen in de afvoerrelatie wordt doorverwezen naar bijlage 3A.

$$Q = w \cdot g^{\frac{1}{2}} \cdot b \cdot C_d \cdot C_v \cdot h_1^u \cdot f \quad (3-1)$$

Waarbij:

Q	: debiet	(m ³ /s)
g	: versnelling van de zwaartekracht	(m/s ²)
b	: breedte van de overstort	(m)
C_d	: coëfficiënt van de afvoer	(-)
C_v	: coëfficiënt van de aankomende snelheid	(-)
h_1	: bovenstrooms waterpeil	(m)
f	: reductiefactor bij onvolkomen afvoer	(-)
w en u	: constanten	(-)

De onzekerheid in numerieke waarden w en u en de zwaartekracht wordt tijdens deze studie buiten beschouwing gelaten. De fout die ontstaat bij het bepalen van de breedte van de stuw hangt af van de nauwkeurigheid waarmee de breedte van de stuw is vastgelegd. Het betreft een fout die t.o.v. de andere bronnen van onzekerheden wellicht verwaarloosbaar is.

De overige bronnen van onzekerheden in de generieke afvoerformule kunnen wel aanzienlijke waarden aannemen.

De onzekerheid in de coëfficiënten C_d en C_v zijn ondermeer afhankelijk van de waterhoogte (h_1). Bij een goed geijkte meetopstelling zullen de fouten van de coëfficiënten C_d en C_v klein zijn. Waarden voor C_d en C_v kunnen echter wel verschillen tussen twee meetopstellingen met dezelfde debietmeetmethode, bijvoorbeeld door verschillen in aanstroomcondities.

Doordat de waterhoogte in veel afvoerrelaties tot een bepaalde macht (groter dan één) worden verheven telt de onzekerheid van in het bepalen van de waterhoogte zwaarder mee dan onzekerheden in de overige componenten. Onzekerheid in de waterhoogte (h_1) kan verschillende oorzaken hebben. Hierbij valt bijvoorbeeld te denken aan: interne wrijving van het meetsysteem, instrumentale fouten, instellen van het nulpunt, verstellen van het meetpunt in de tijd t.o.v. de constructie, onvoldoende onderhoud van de constructie, leesfouten etc..

Tenslotte kan er nog onzekerheid bestaan in de reductiefactor bij onvolkomen afvoer over de meetstuw. Bij onvolkomen afvoer speelt naast de overstorthoogte h_1 ook de benedenwaterstand (eveneens ten opzichte van de kruin) h_2 een rol. Er bestaat dan geen eenduidige relatie meer tussen de overstorthoogte en de afvoer. Hoe groot de onzekerheid in de reductiefactor bij een bepaalde afvoer is hangt af van de zorgvuldigheid die gehanteerd is bij de kalibratie. Bij volkomen afvoer is de reductiefactor per definitie gelijk aan 1.0.

3.3 Kwantificeren van onzekerheid

De totale onzekerheid (X_Q) van een afzonderlijke debietbepaling valt te kwantificeren aan de hand van vergelijking 3-2.

$$X_Q = \pm \sqrt{X_b^2 + X_c^2 + (u \cdot X_h)^2 + X_f^2} \quad (3-2)$$

Waarbij:

X_Q	: onzekerheid in debiet	(%)
X_b	: onzekerheid in breedte van de overstort	(%)
X_c	: onzekerheid in coëfficiënten	(%)
X_h	: onzekerheid in bovenstrooms waterpeil	(%)
X_f	: onzekerheid in reductiefactor	(%)
u	: constante	(-)

Hierbij wordt de onzekerheid van een bepaalde component die bestaat uit meerdere onzekerheden berekend met vergelijking 3-3. Bij het toepassen van de vergelijkingen 3-2 en 3-3 wordt aangenomen dat de schattingsfouten van de individuele termen onafhankelijk van elkaar zijn.

$$X_x = \pm \sqrt{{}_1X_x^2 + {}_2X_x^2 + \dots + {}_nX_x^2} \quad (3-3)$$

Rekenvoorbeeld

Stel dat er een debietmeting plaatsvindt waarbij een waterhoogte wordt gemeten van 0.25m. Bij deze meting kan de waterstand met een nauwkeurigheid van 2.5mm worden vastgesteld¹. Het instellen van het nulpunt kan met een nauwkeurigheid van 5mm worden vastgesteld¹. Verder is er nog een onzekerheid van 3% bij het bepalen van de coëfficiënten¹. De constante n heeft een waarde van 1.5.

De onzekerheid die meespeelt bij het bepalen van de waterhoogte (${}_1X_h$) en bij het van het instellen van het nulpunt (${}_2X_h$) is afhankelijk van de gemeten waterhoogte:

$${}_1X_h = \frac{0.0025}{0.25} \times 100 = 1.0\% \quad {}_2X_h = \frac{0.005}{0.25} \times 100 = 2.0\%$$

De totale onzekerheid bij het bepalen van de waterhoogte is vervolgens met vergelijking 3-3 te berekenen:

$$X_h = \pm \sqrt{(1.0)^2 + (2.0)^2} = \pm 2.2\%$$

De totale onzekerheid bij de debietbepaling is met vergelijking 3-2 te berekenen:

$$X_Q = \pm \sqrt{(0)^2 + (3.0)^2 + 2.25 \times (2.2)^2 + (0)^2} = \pm 4.5\%$$

De totale onzekerheid (X_Q) komt hiermee tot een waarde van $\pm 4.5\%$. Stel dat er een debiet gemeten is van $10.0 \text{ m}^3/\text{s}$, dan geldt dat het werkelijke debiet met een kans van 68% ligt tussen de grenzen $9.6 \text{ m}^3/\text{s}$ en $10.5 \text{ m}^3/\text{s}$.

¹Vermelde onzekerheden horen bij een betrouwbaarheidsinterval van 68%.

Het bepalen van de onzekerheid in een afzonderlijke debietbepaling voor overige debietmeetmethoden werkt op een vergelijkbare manier. In onderdeel B van bijlagen 1 tot en met 5 zijn de verschillende bronnen van onzekerheden benoemd per debietmeetmethode. Hierbij is gebruik gemaakt van het handboek debietmeten in open waterlopen (Boiten et al., 1995).

In de literatuur wordt de onzekerheid die speelt bij een debietmeting meestal alleen beperkt tot de onzekerheid als gevolg van de toevallige fout. In Tabel 3-1 is een overzicht weergegeven van de toevallige fout in

de debietbepaling van de hiervoor beschreven debietmeetmethoden. Deze waarden zijn overgenomen van het handboek debietmeten in open waterlopen (Boiten et al., 1995; Hartong et al., 2009).

Tabel 3-1: Toevallige fout in debietbepaling per methodiek (Boiten et al., 1995; Hartong et al., 2009)

Methodiek	± Toevallige fout (%)
Velocity-area	3 - 6
Stage-discharge	5-10
Gestandaardiseerde meetstuw	
- ongestuwd	< 5
- gestuwd	5 - 10
Ongestandaardiseerde meetstuwen	
- klepstuw en drempels	
o kalibratie hydraulisch model (ongestuwd)	< 5
o kalibratie hydraulisch model (gestuwd)	> 5
o kalibratie in het veld (ongestuwd)	5 - 10
o kalibratie in het veld (gestuwd)	> 10
o kalibratie m.b.v. literatuur (ongestuwd)	5 - 10
o kalibratie m.b.v. literatuur (gestuwd)	> 10
- afsluiter	> 10
Akoestisch	10-12
Gemalen	
- vijzelgemaal	3 - 6
- pomp gemaal	
o pompkarakteristiek	3 - 5
o gemaalkarakteristiek	4 - 10
o a.h.v. kalibratie (velocity-area)	4 - 8

Bij de vermeldde onzekerheden als gevolg van de toevallige fout in Tabel 3-1 is het lastig aan te geven om betrouwbaarheidsinterval het hierbij gaat. De vermeldde onzekerheden geven dan ook geen garantie dat een toevallige fout niet groter kan uitvallen dan in de tabel vermeldt. Het doel van deze tabel is dan ook meer een indicatie van de onzekerheid aan te geven die kan optreden als gevolg van de toevallige fout. Tevens is de tabel uitermate geschikt om onzekerheden van verschillende debietmeetmethoden met elkaar te vergelijken.

Naast de onzekerheden als gevolg van de toevallige fout kan er ook een aanzienlijke systematische fout zich voordoen. De vermeldde onzekerheden in Tabel 3-1 geven dus de ondergrens weer van de totale meetfout die zich voordoet bij een debietmeting.

4 Onzekerheden debietmetingen Monitoring Stroomgebieden

Bij de onzekerheden in debietmetingen, zoals vermeldt in Tabel 3-1, hoort een aantal randvoorwaarden. Zo moet de nodige zorgvuldigheid worden gehanteerd bij de totstandkoming van een nieuw afvoormeetstation of kalibratie van een bestaande kunstwerk. Ook dient regelmatig onderhoud en controle van referentieniveaus plaats te vinden. In de praktijk is het echter de vraag of deze zorgvuldigheid wordt gehanteerd en of het onderhoud en controle van de meetopstellingen ook daadwerkelijk plaatsvindt in het veld (Boiten, 2008). Ook in hoofdstuk 2 van deze studie wordt dit nogmaals bevestigd met de constatering dat slechts enkele meetlocaties tegenwoordig worden geijkt. In deze studie is daarom geprobeerd de meetfout in debietmetingen te kwantificeren aan de hand van gedetailleerde informatie van de waterbeheerders.

4.1 Kwantificeren van onzekerheid in debietmetingen Monitoring Stroomgebieden

Gedetailleerde informatie is nodig om zo de betrouwbaarheid van de verschillende componenten waaruit de debietbepaling bestaat te kunnen analyseren. In hoofdstuk 2 is al geconstateerd dat voor veel meetlocaties informatie ontbreekt dan wel niet bekend is. Voor locaties waar niet voldoende gedetailleerde informatie voorhanden is voor de analyse, is aan de hand van literatuurgegevens en aannames aan de hand van expert-kennis een schatting gemaakt van de onzekerheid.

Voor een uitgebreide beschrijving van de gevolgde werkwijze voor het kwantificeren wordt door verwezen naar onderdeel C van bijlagen 1 tot en met 5. De vermeldde onzekerheden geven hierbij een indicatie van de onzekerheden weer als gevolg van de toevallige fout. De resultaten van de uitgebreide analyse naar onzekerheden in afzonderlijke debietmetingen zijn weergegeven in Tabel 4-1. Met behulp van de asterisk is aangegeven of de betreffende onzekerheid is bepaald met behulp van gedetailleerde informatie, met behulp van literatuurgegevens of is ingeschat op basis van expert-kennis.

In Tabel 4-1 is de onzekerheid weergegeven voor de gemiddelde afvoer. Bij lage afvoeren zal de onzekerheid relatief groot zijn, echter is het effect op de absolute debietwaarde gering, andersom zal bij hoge afvoeren een relatief kleine onzekerheid gepaard gaan met een aanzienlijke absolute debietwaarde.

Tabel 4-1: Indicatie meetfout bij een 68% betrouwbaarheidsinterval in debietbepaling per stroomgebied bij een gemiddelde afvoer

Meetlocatie	Methodiek	± Meetfout (%)	
Drentse Aa			
Schipborg	stage-discharge	8	*/**
Verdeelwerk Loon	meetstuw (klepstuwen)	8 - 18	*/***
Amerdiep	meetstuw (lange overlaat)	12	*/***
Anreperdiep	meetstuw (klepstuw)	8 - 18	*/***
Halkenbroek	meetstuw (klepstuw)	15	*/***
Zeegeerloopje	akoestisch	10 - 12	***
Schuitenbeek			
25210	V lange overlaat	7 - 12	*/**/***
Overige locaties	velocity-area	4	*/**
Krimpenerwaard			
Afsluiters	meetstuw (afsluiter)	10 - 12	*/***
Gemalen	gemaal (pomp)	3 - 5	**
Gemalen	gemaal (vijzel)	3 - 6	**
Doppler	akoestisch	10 - 12	***
Quarles van Ufford			
Quarles van Ufford			
- QvU gemaal	gemaal (pomp)	3 - 5	**
- QvU stuw	meetstuw (klepstuw)	7	*/***
Rijkessluis	meetstuw (afsluiter)	10 - 12	**/***
Blauwe sluis	meetstuw (afsluiter)	10 - 12	**/***
Aspert	gemaal (pomp)	3 - 5	**
Betenlaan			
- betenlaan	meetstuw (klepstuw)	18	*/***
- betenlaan A	meetstuw (klepstuw)	48	*/***
Gemaal 't Haasje	gemaal (pomp)	3 - 5	**
Stuw 't Haasje	meetstuw (klepstuw)	15	*/***
* onzekerheid bepaald met behulp van gedetailleerde informatie			
** onzekerheid bepaald met behulp van literatuurgegevens			
*** onzekerheid bepaald op basis van expert-kennis			

De meetlocaties hebben een onzekerheid in debietmetingen variërend van ca. 3 tot 20% bij een gemiddelde afvoer. Uitzondering hierop is locatie betenlaan A, hier is sprake van een zeer kleine overstorthoogte waardoor de onzekerheid hoog uitvalt. Voor de meetlocaties waarbij de onzekerheid in debietmetingen is bepaald aan de hand van veldgegevens valt op dat deze onzekerheid in veel gevallen groter lijkt uit te vallen dan de toevallige fout beschreven in de literatuurgegevens (zoals vermeldt in Tabel 3-1). Hierbij kan het verschil echter ook voortkomen uit verschillende interpretatie van de onzekerheden.

De debietmetingen verricht met behulp van de velocity-area debietmeetmethode hebben een relatief kleine onzekerheid. Het zijn echter momentopnamen die vaak eens per week of tweewekelijks worden uitgevoerd waardoor deze gegevens minder geschikt zijn voor het toetsen van het modelsysteem. De velocity-area debietmeetmethode is wel geschikt voor het ijken van bestaande meetopstellingen. Debietmetingen verricht met afsluiters, gemalen en klepstuwen hebben een aanzienlijke onzekerheid van ca. 8 tot 18%. Bij deze

meetopstellingen ligt de prioriteit meer in het regelen van de waterstroming dan in het meten ervan (CTV, 1988).

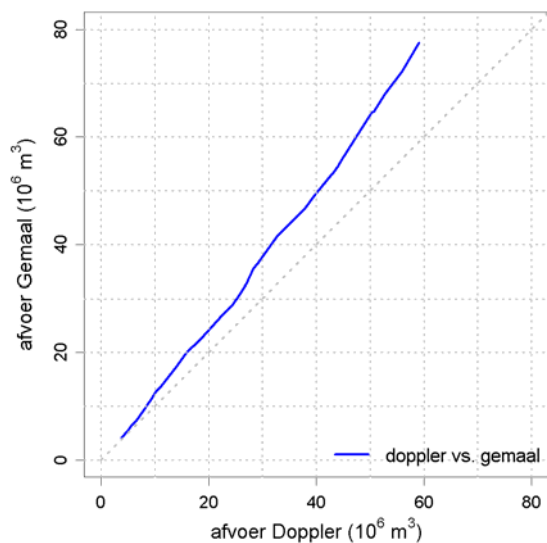
Fouten in debietmetingen kunnen aanzienlijk zijn, wat met name het geval is bij onvolkomen afvoer. Indien geen correctie plaatsvindt bij onvolkomen afvoer kan het voorkomen dat er een aanzienlijke overschatting van de afvoer wordt gemaakt. Toch wordt de benedenstroomse waterstand t.o.v. de meetopstelling niet altijd meegenomen in de berekening van het debiet.

In Tabel 4-1 is te zien dat veel onzekerheden gedeeltelijk of geheel zijn ingeschat op basis van expert-kennis. Zoals gezegd is veel gedetailleerde informatie die nodig is om de betrouwbaarheid van de verschillende componenten waaruit de debietsbepaling bestaat te kunnen analyseren niet bekend of beschikbaar. Voor een betere inschatting van de onzekerheid in debietmetingen zal deze gedetailleerde informatie boven water moeten komen. Het is belangrijk om inzicht te hebben in de onzekerheid die plaatsvindt bij debietmetingen om zo een beeld te krijgen in hoeverre onzekerheden in debietmetingen doorwerken in onderzoeken, beleidsanalyses, beoordelingen van de bedrijfsvoering en bij het afleiden van een geschikt monitoringssysteem.

Systematische fouten

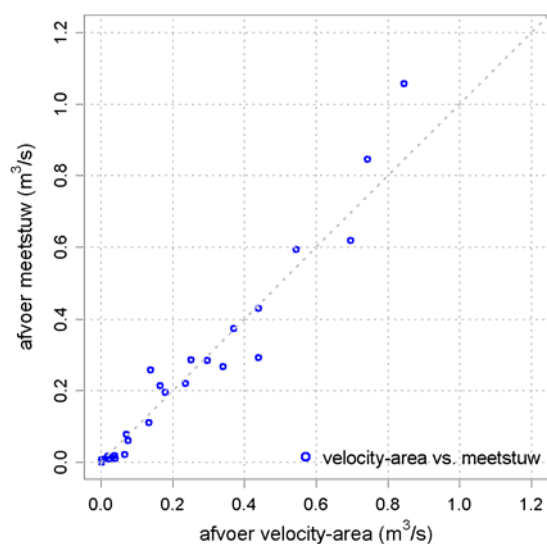
Aan de hand van Tabel 4-1 lijkt het erop dat debietmetingen verricht met vijzel- en pompgemalen relatief betrouwbaar zijn. Zoals gezegd kan er naast de toevallige fout ook een aanzienlijke systematische fout zich voordoen bij de debietbepaling aan de hand van gemalen. Om een beeld te krijgen van de bijdrage van een systematische fout in de debietbepaling kan de debietmeetmethode vergeleken worden met een onafhankelijke debietmeetmethode die betrouwbaarder is.

In Figuur 4-1 is zo'n vergelijking weergegeven voor meetlocatie Verdoold (polder Krimpenerwaard). Naast de debietbepalingen aan de hand van draaiuren en de pompcapaciteit wordt het debiet ook gemeten met een akoestische methode (Doppler-metingen). Wanneer de gemeten debieten tegen elkaar worden uitgezet is een systematische afwijking te zien. Indien ervan uitgegaan wordt dat de Doppler-metingen een relatief geringe systematische fout hebben betekent dit dat de afvoermetingen aan de hand van draaiuren en $Q(h)$ -kromme's een systematische fout hebben van ca. 25 tot 30%.



Figuur 4-1: Afvoeren op meetlocatie Verdoold gemeten met behulp van Doppler metingen en oude $Q(h)$ -kromme's tegen elkaar uitgezet.

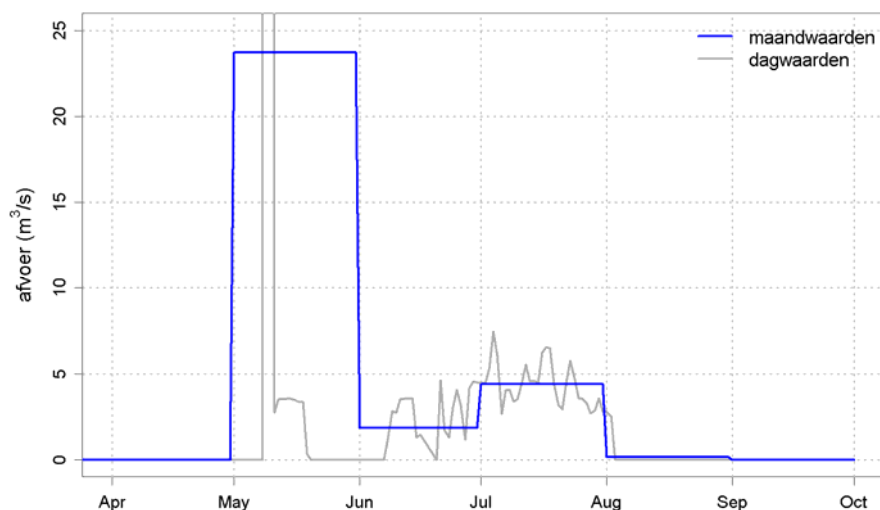
Systematische afwijkingen, zoals weergegeven in Figuur 4-1, kunnen gesignaleerd worden door bijvoorbeeld afvoermetingen te vergelijken met afvoermetingen aan de hand van de velocity-area methode die relatief makkelijk is uit te voeren. Dit wordt o.a. gedaan bij de meetstuw (meetlocatie 25210) in het stroomgebied van Schuitenbeek. In het verleden is de meetstuw geijkt, maar nog steeds worden twee-wekelijks metingen uitgevoerd met behulp van de velocity-area methode. Wanneer de gemeten afvoeren tegen elkaar worden uitgezet is er niet direct een aanwijzing op een systematische fout, zie Figuur 4-2.



Figuur 4-2: Afvoeren op meetlocatie 25210 gemeten met behulp van velocity-area en meetstuw tegen elkaar uitgezet.

Uitbijters

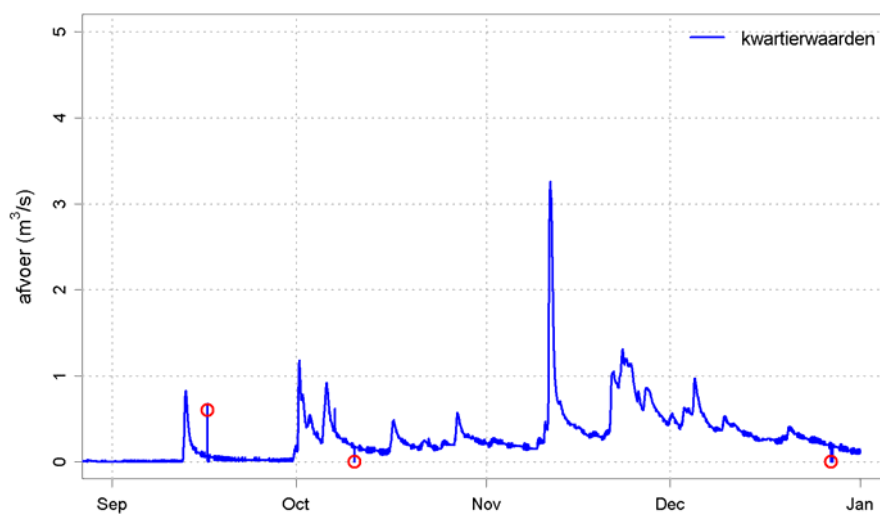
Naast toevallige en systematische fouten kunnen er ook nog uitbijters voorkomen in de afvoermetingen. Figuur 4.3 geeft een voorbeeld weer van een uitbijter die is gesignaleerd in de inlaatgegevens op meetlocatie Krimpenervaard. In eerste instantie waren alleen geaggregeerde maandafvoeren beschikbaar waardoor de uitbijter minder zichtbaar was. Toen ook dagwaarden beschikbaar kwamen werd de uitbijter pas goed zichtbaar, zie Figuur 4-3 waarin halverwege mei een inlaat wordt gemeten van ca. $350\text{m}^3/\text{s}$.



Figuur 4-3: uitbijter in inlaatgegevens op meetlocatie Krimpenervaard in 2006

Ook in de afvoergegevens van de meetstuw (meetlocatie 25210) in het stroomgebied van Schuitenbeek zijn duidelijk uitbijters te signaleren. Deze zijn weergegeven met een rode cirkel in Figuur 4-4. Ook hier worden de uitbijters pas goed zichtbaar indien de ruwe data (kwartierwaarden) grafisch wordt weergegeven.

Er zijn verschillende methoden om uitbijters (en in mindere mate systematische fouten) te detecteren in een bepaalde meetreeks. In 2008 is bijvoorbeeld in opdracht van STOWA een validatieplan ontwikkeld dat aan de hand van verschillende technieken, zoals de dubbele sommatiekromme, helpt uitbijters en systematische fouten te detecteren in de meetreeks (Graaff et al., 2009). Aan de hand van gebiedskennis is een betrouwbare controle op te stellen. Zo zijn er bijvoorbeeld bepaalde verwachtingen aan het bereik van het debiet voor een meetlocatie vast te stellen. Ook kan bijvoorbeeld analyse uitgevoerd worden naar het maximale verschil tussen twee opeenvolgende meetwaarden. Voor het signaleren van uitbijters in de meetwaarden is het dus aan te bevelen de ruwe data van de debietmeting op te slaan in een database (Walvoort & van Tol-Leenders, 2010).



Figuur 4-4: uitbijters in afvoergegevens op meetlocatie 25210 aangegeven met een rode cirkel

4.2 Aanvullende onzekerheden

Naast de onzekerheid in afzonderlijke debietmetingen is er ook nog onzekerheid in het ruimtelijke en temporele aspect van een debietmeting.

Ruimtelijke onzekerheid

Het kan voorkomen dat een bepaalde waterstroom niet gemeten wordt op de gewenste locatie. Het is dan mogelijk om via debietmetingen elders inschattingen te maken van het debiet dat heeft plaatsgevonden op de gewenste locatie. Dit komt ook voor bij verschillende meetlocaties die gebruikt worden in het project Monitoring Stroomgebieden. Hierbij valt bijvoorbeeld te denken aan het meten van de wateraanvoer in het gebied Quarles van Ufford. De wateraanvoer vindt plaats op de grens van het stroomgebied met behulp van duikers die niet bemeten worden. Benedenstrooms van de duiker bevinden zich wel meetopstellingen waarmee een inschatting kan worden gemaakt van de waterinlaat. Hierbij is echter het debiet wel beïnvloed door het tussengelegen gebied.

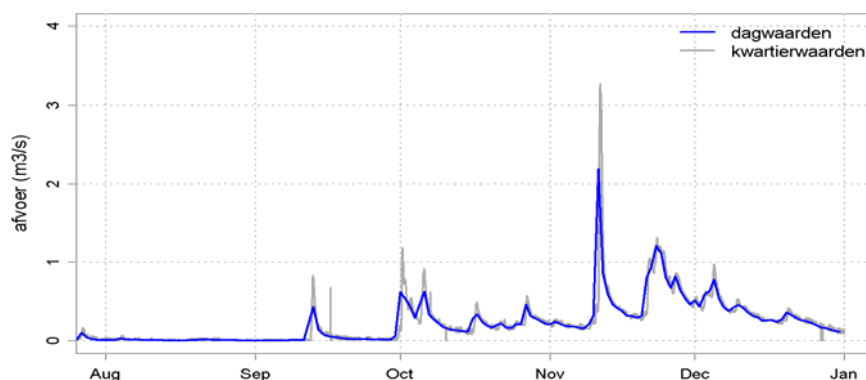
Ook bij het bepalen van nutriëntenvrachten speelt onzekerheid in het ruimtelijk aspect mee wanneer concentraties en debieten niet op dezelfde locatie worden gemeten. Hierdoor wordt bij vrachtberekeningen een additionele onzekerheid geïntroduceerd.

Het is lastig deze onzekerheid te kwantificeren. De onzekerheid in het ruimtelijk aspect van een debietmeting is afhankelijk van het watersysteem. Voor het kwantificeren van de onzekerheid in de ruimte is het noodzakelijk om een goed beeld te hebben van de accumulatie van de afvoer in het stroomgebied. In deze studie is hier verder niet naar

gekeken. Nader onderzoek zal uit moeten wijzen in hoeverre deze onzekerheid significant is.

Temporele onzekerheid

In het project Monitoring Stroomgebieden wordt veel gewerkt met geaggregeerde debieten over een bepaalde periode (meestal een dag). Hoewel het gebruik van geaggregeerde debietgegevens een veel grotere beleidsrelevantie heeft, brengt het ook een aantal nadelen met zich mee. Een van de nadelen is dat bepaalde processen plaatsvinden op een kleinere tijdschaal (binnen een dag), wat vooral het geval is voor snel reagerende watersystemen zoals de stroomgebieden Schuitenbeek en Drentse Aa. Aan de hand van geaggregeerde meetgegevens zijn snelle afvoerprocessen niet goed te toetsen. Als voorbeeld zijn in Figuur 4-5 de geaggregeerde dagcijfers uitgezet tegen de gemeten kwartiercijfers voor de meetlocatie 25210 (Schuitenbeek). Hoewel de gemiddelde afvoer onveranderd blijft, is in de figuur wel te zien dat het afvoerpatroon beschreven door de kwartiercijfers een piekeriger verloop heeft t.o.v. geaggregeerde dagcijfers. Het verschil in de top van de afvoerpiek halverwege november 2008 is ca. 30%.



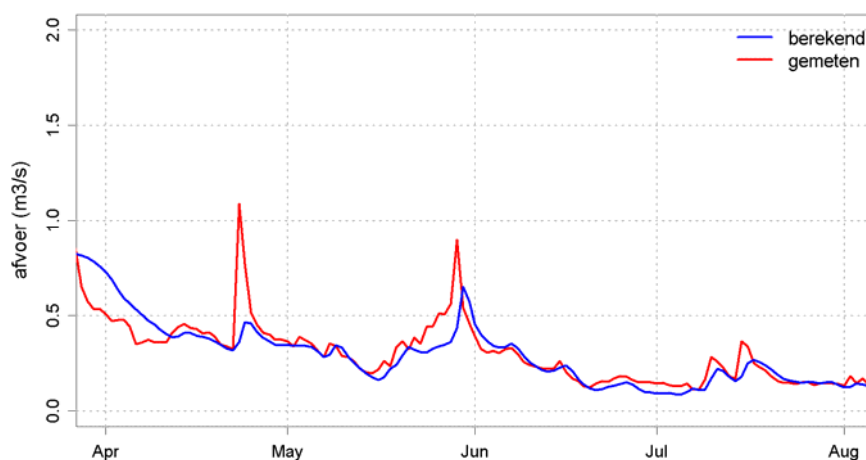
Figuur 4-5: Afvoergegevens in 2008 op locatie 25210 (Schuitenbeek), kwartierwaarden vs. geaggregeerde dagwaarden.

Het modelleren van het afvoerpatroon op een kleinere tijdschaal vergt de nodige computercapaciteit en dataopslag. Nader onderzoek zal uit moeten wijzen of er een aanzienlijk effect is op de nutriëntenuitspoeling indien gerekend wordt met een kleinere tijdschaal.

5 Consequenties en aanbevelingen voor Monitoring Stroomgebieden

In het project Monitoring Stroomgebieden wordt gestreefd naar een operationeel, geoptimaliseerd monitoringsysteem, waarmee de bijdrage van de landbouw aan de belasting van het oppervlaktewater door nutriënten kan worden gekwantificeerd en waarmee de effecten van het mestbeleid en veranderingen binnen het stroomgebied kunnen worden gevolgd en voorspeld. Het modelsysteem dat hierbij wordt ontwikkeld, wordt getoetst aan ondermeer debietmetingen. Onzekerheden in debietmetingen zorgen voor een onzekerheid in het kwantificeren van het aandeel van de landbouw in de belasting van het oppervlaktewater. Door onzekerheden in debietmetingen waaraan het modelsysteem getoetst wordt te kwantificeren, wordt het functioneren van het modelsysteem beter inzichtelijk gemaakt.

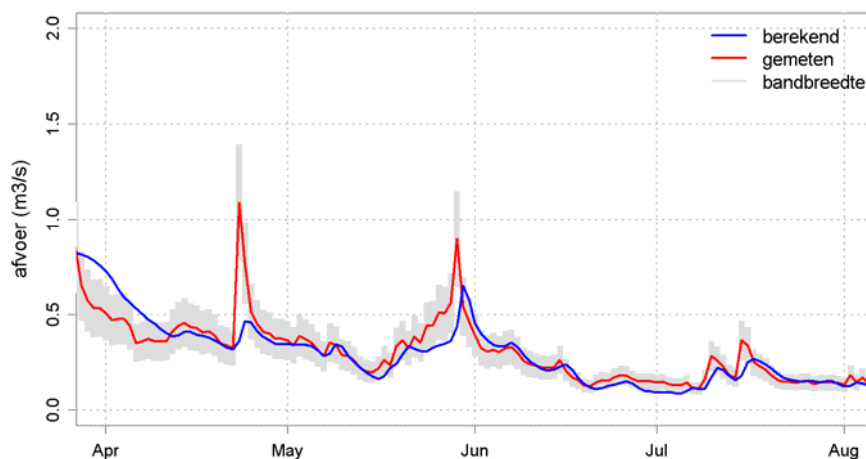
Als voorbeeld is in Figuur 5-1 een vergelijking tussen de gemeten en berekende waterafvoer weergegeven voor meetlocatie Anreperdiep in het stroomgebied van Drentse Aa.



Figuur 5-1: Gemeten vs. berekend waterafvoer voor meetlocatie Anreperdiep (2000), met in het blauw de berekende afvoer, in het rood de gemeten afvoer.

Op het eerste gezicht lijkt het modelinstrumentarium de gemeten afvoer niet goed te simuleren indien gekeken wordt naar de gemeten en berekende afvoerverloop. Wanneer de onzekerheid (zie Tabel 4-1) in de gemeten afvoer inzichtelijk wordt gemaakt aan de hand van een bandbreedte, dan is te zien dat de simulatie van het model redelijk binnen de bandbreedte ligt (zie Figuur 5-2). Voor het toetsen/valideren

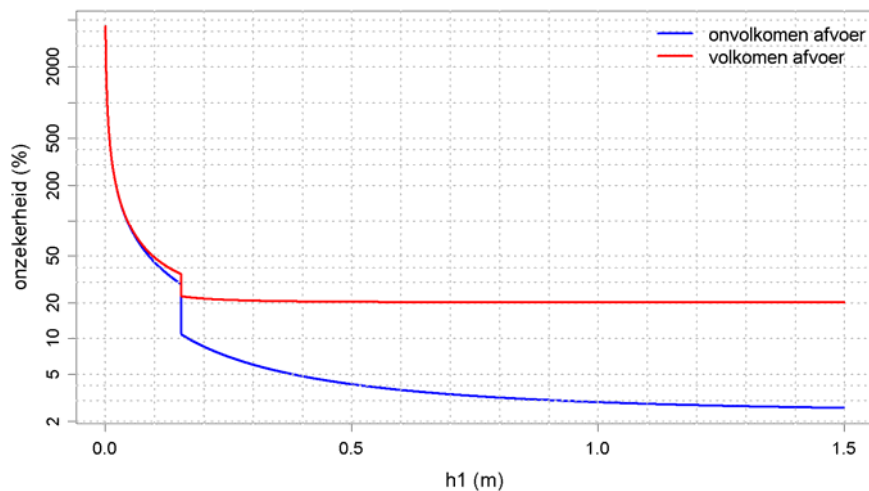
van het modelsysteem is beschikking over onzekerheid in debietgegevens dus van essentieel belang. Zo is het verschil tussen een gemeten en berekende waterafvoer soms alleen al te verklaren aan de hand van de onzekerheid in de meting (zie ook Walvoort et al., 2010abcd).



Figuur 5-2: Gemeten vs. berekend waterafvoer voor de meetlocatie Anreperdiep (2000), met in het blauw de berekende afvoer, in het rood de gemeten afvoer en in het grijs de 68% betrouwbaarheidsinterval bandbreedte.

Er kan ook gekeken worden naar de bijdrage van de onzekerheid in de afvoer van een meetlocatie over een heel jaar. Hieronder is een voorbeeld uitgewerkt voor de relatief betrouwbare meetlocatie 25210 (stroomgebied Schuitenbeek) waarbij het debiet wordt gemeten met een V-vormige lange overlaat. De onderstaande analyse heeft plaatsgevonden op een meetreeks met een meetresolutie van 15min voor het jaar 2008. In dit jaar wordt een jaarlijkse afvoer gemeten van $9.08 \times 10^6 \text{ m}^3$. Met de onzekerheidsanalyse kan er een bandbreedte worden aangehouden van $\pm 6\%$ op de jaarlijkse afvoer. Dit betekent dat de jaarlijkse afvoer ergens tussen $8.54 \times 10^6 \text{ m}^3$ tot $9.62 \times 10^6 \text{ m}^3$ ligt (uitgaande van een 68% betrouwbaarheidsinterval).

De onzekerheid in de jaarlijkse afvoer (voor meetlocatie 25210 in het jaar 2008) is aan de lage kant in vergelijking met de onzekerheid vermeldt in Tabel 4-1 (7 tot 12%). Bij lage afvoeren zal de onzekerheid relatief groot zijn ($> 100\%$), echter is het effect op de absolute debietwaarde gering. Andersom zal bij hoge afvoeren een relatief kleine onzekerheid ($< 3\%$) gepaard gaan met een aanzienlijke absolute debietwaarde. In Figuur 5-3 is de onzekerheid in de debietmeting weergegeven bij een willekeurige bovenstroomse waterpeil (h_1). Doordat er geen lineair verband is tussen het bovenstroomse waterpeil en de onzekerheid in de debietmeting, kan de onzekerheidspercentage zoals vermeldt in Tabel 4-1 niet één op één vertaald worden naar een onzekerheid in de jaarlijkse afvoer.



Figuur 5-3: Onzekerheid in debietmeting bij onvolkomen en volkomen afvoer voor meetlocatie 25210 (Schnuitenbeek) uitgaande van het 68 % betrouwbaarheidsinterval.

Door beperkte hoeveelheid beschikbare data is het nu nog niet mogelijk (voor geen van de stroomgebieden in het project Monitoring Stroomgebieden) om voor achtereenvolgende jaren een onzekerheidsanalyse toe te passen voor alle uitstroompunten van het stroomgebied. Daardoor is een vergelijking met resultaten van het modelsysteem en de onzekerheid in debietmetingen op de waterbalans van een stroomgebied niet mogelijk. Gezien de aanzienlijke onzekerheid die mee kan spelen in een debietmeting is het aan te bevelen dit in een vervolgstudie uit te voeren.

In het project Monitoring Stroomgebieden wordt veel gewerkt met nutriëntenvrachten. Deze worden verkregen door de waterafvoeren te vermenigvuldigen met de nutriëntenconcentraties. Doordat er veel met nutriëntenvrachten wordt gewerkt, speelt naast de onzekerheid in debietmetingen ook de onzekerheid in metingen van nutriëntenconcentraties een grote rol. Het is aan te bevelen in een nader onderzoek ook de onzekerheid van gemeten nutriëntenconcentraties te kwantificeren.

6 Conclusies

Met behulp van literatuurgegevens is, op basis van de debietmeetmethode die gehanteerd wordt, een algemeen beeld van de onzekerheid in de debietmetingen te verkrijgen. Bij deze onzekerheid hoort echter wel een aantal randvoorwaarden. Zo moet de nodige zorgvuldigheid worden gehanteerd bij de totstandkoming van een nieuw afvoermeststation of kalibratie van een bestaand kunstwerk. Ook dient regelmatig onderhoud en controle van referentieniveaus plaats te vinden. In de praktijk is het echter de vraag of deze zorgvuldigheid wordt gehanteerd en of het onderhoud en controle aan de meetopstellingen ook daadwerkelijk plaatsvindt in het veld.

In deze studie is daarom per meetlocatie een analyse verricht naar de onzekerheid die meespeelt bij een bepaalde debietsbepaling aan de hand van gegevens uit het veld. Voor deze uitgebreide analyse is het noodzakelijk om over gedetailleerde informatie te beschikken. Tijdens de inventarisatie van kwantitatieve debietgegevens in deze studie is echter gebleken dat veel gedetailleerde informatie slecht of zelfs helemaal niet beschikbaar/bekend waren bij de waterbeheerders. Dit heeft tot gevolg dat het bepalen van de onzekerheid die meespeelt in debietbepalingen niet alleen aan de hand van veldgegevens kan plaatsvinden, maar moet worden aangevuld met gegevens uit de literatuur of met schattingen op basis van expert-kennis.

Dat veel gedetailleerde informatie met betrekking tot de debietgegevens slecht of helemaal niet beschikbaar/bekend zijn bij de waterbeheerders heeft wellicht te maken met de manier waarop het waterbeheer in Nederland plaatsvindt. Het waterbeheer in Nederland is met name gericht op het handhaven van bepaalde waterpeilen. Hierbij is het meten van het debiet qua prioriteit ondergeschikt. De constatering dat slechts enkele meetlocaties behoren tot de ISO-standaards en enkele meetlocaties (beperkt) geijkt worden is hier een voorbeeld van.

Uit de analyse blijkt dat de onzekerheid als gevolg van de toevallige fout in de debietbepalingen voor de meetlocaties van Monitoring Stroomgebieden ca. 3 tot 20% kan bedragen. De bepaalde onzekerheden aan de hand van veldgegevens lijken hoger uit te vallen dan de onzekerheden beschreven in de literatuur. Daarnaast kunnen zich nog aanzienlijke systematische fouten voordoen en uitbijters voorkomen in afzonderlijke debietmetingen. Naast onzekerheden in de afzonderlijke debietmetingen kleven er ook nog temporele en ruimtelijke onzekerheden aan de debietmetingen vast.

Onzekerheden in debietmetingen hebben consequenties voor het project Monitoring Stroomgebieden. Voor het toetsen/valideren van het modelsysteem is beschikking over onzekerheid in debietgegevens van essentieel belang. Zo is het verschil tussen een gemeten en berekende waterafvoer soms alleen al te verklaren aan de hand van de onzekerheid in de meting.

Doordat er bij het project Monitoring Stroomgebieden veel met nutriëntenvrachten wordt gewerkt, speelt naast de onzekerheid in debietmetingen ook de onzekerheid in metingen van nutriëntenconcentraties een rol.

Literatuur

- Bierkens, M.F.P., 1996. *Foutenanalyse in waterbalansstudies*. Wageningen, DLO-Staring Centrum. Rapport 460. 54 blz.; 2 tab.; 19 ref.
- Boiten, W., A. Dommerholt, M. Soet, 1995. *Handboek debietmetingen in open water*. Vakgroep Waterhuishouding, Wageningen, ISBN 90-74476-13-9.
- Boiten, W., 2003. *Hydrometry: IHE Delft lecture note series*. CRC Press/Balkema, Leiden, The Netherlands, ISBN 90-5410-423-6.
- Boiten, W., 2008. *Water in beweging, het meten van afvoeren*. Leerstoelgroep Hydrologie en Kwantitatief Waterbeheer, Wageningen Universiteit, Wageningen.
- Bos, M.G., 1989. *Discharge measurement structures*. Wageningen, ILRI publication 20 third revised edition.
- Clemmens, A.J., T.L. Wahl, M.G. Bos, J.A. Replogle, 2001. *Water measurement with Fumes and Weirs*. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, The Netherlands, ISBN 90-70754-55-X.
- Cultuurtechnische Vereniging, 1988. *Cultuur technisch vademecum*, Utrecht.
- Graaff, B. de, R. de Crook, L. Thorbecke, R. van Ouwerkerk, 2009. *Validatieplan voor metingen op het gebied van waterkwantiteit*. H2O, 42(21) p.p. 26-27.
- Hartong, H., P. Termes, 2009. *Handboek debietmeten in open waterlopen*. Utrecht, STOWA, rapportnummer 2009-41.
- Jansen, H.C., R.J. Löschner-Wolleswinkel, M.E. Sicco Smit, F.J.E. van der Bolt, J. Roelsma, O.F. Schoumans, C. Siderius & T.P. van Tol-Leenders, 2008. *Systeemanalyse voor het stroomgebied van de Schuitenbeek Fase 3*. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 1765. 174 blz.; 91 fig.; 43 tab.; 11 ref.
- Kroes, J.G., W. Twisk, M. van Cappellen, 2006. *Meetplan 2006 Krimpenerwaard voor het project "Monitoring nutriënten in stroomgebieden en polders"*. Reeks Monitoring Stroomgebieden 7-III, Alterra, Wageningen.

Kroes, J.G., J.D. Schaap, F.J.E. van der Bolt, R.J. Löschner-Wolleswinkel, J. Roelsma, O.F. Schoumans, C. Siderius, T.P. van Tol-Leenders, 2008. *Systeemanalyse voor het stroomgebied van de Krimpenerwaard Fase 3*. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 1766. 124 blz.; 44 fig.; 28 tab.; 26 ref.

Löschner-Wolleswinkel R.J., M.E. Sicco Smit en H.M. Mulder, 2009. *Meetplan 2009 voor het stroomgebied van de Schuitenbeek ten behoeve van het project "Monitoring nutriënten in stroomgebieden en polders"*. Reeks Monitoring Stroomgebieden 14-I, Alterra, Wageningen.

Roelsma, J., T.P. Leenders, F.J.E. van der Bolt, R.J. Löschner-Wolleswinkel, J.D. Schaap, O.F. Schoumans, C. Siderius, H. van der Heide & K. van der Molen, 2008. *Systeemanalyse voor het stroomgebied van de Drentse Aa Fase 3*. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 1764. 132 blz. 50 fig.; 23 tab.; 19 ref.

Roelsma, J., H. van der Heide, H. de Kleine en H.M. Mulder, 2009. *Meetplan stroomgebied de Drentse Aa voor het project "Monitoring nutriënten in stroomgebieden en polders"*. Reeks Monitoring Stroomgebieden 14-I Alterra, Wageningen.

Roozen F., J. van de Braak, 2003. *Gebiedsbeschrijving Quarles van Ufford*. Waterschap Rivierenland, Afdeling Plannen, Cluster Kennis en Beleid.

Siderius, C., R.J. Wolleswinkel, F.J.E. van der Bolt, J. Roelsma, O.F. Schoumans, T.P. van Tol-Leenders, H. de Ruiter, 2008. *Systeemanalyse voor het stroomgebied Quarles van Ufford Fase 3*. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 1767. 130 blz.; 36 fig.; 18 tab.; 24 ref.

Siderius, C., H. de Ruiter, H.M. Mulder, 2009. *Meetplan bemalingsgebied Quarles van Ufford voor het project "Monitoring nutriënten in stroomgebieden en polders" voor het meetjaar 2009*. Reeks Monitoring Stroomgebieden 14-I, Alterra, Wageningen.

Walvoort, D.J.J., T.P. van Tol-Leenders, 2010. *Database "Monitoring Stroomgebieden": een slimme database voor het beheer van monitoringsgegevens*. Reeks Monitoring Stroomgebieden 18. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 1955.

Walvoort, D.J.J., R.J. Roelsma, D.J. Brus, T.P. van Tol Leenders, 2010a. *Validatie van modelsystemen voor het voorspellen van de oppervlaktewaterkwaliteit en kwantiteit in het stroomgebied 'de Drentse Aa'*. Reeks Monitoring Stroomgebieden 17-I. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 1951.

Walvoort, D.J.J., R.J. Roelsma, R.J. Löschner-Wolleswinkel, D.J. Brus, T.P. van Tol Leenders, 2010b. *Validatie van modelsystemen voor het voorspellen van de oppervlaktewaterkwaliteit en kwantiteit in het stroomgebied 'de Schuitenbeek'*. Reeks Monitoring Stroomgebieden 17-II. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 1952.

Walvoort, D.J.J., P.W. Bogaart, J. Kroes, D.J. Brus, T.P. van Tol Leenders, 2010c. *Validatie van modelsystemen voor het voorspellen van de oppervlaktewaterkwaliteit en kwantiteit in het stroomgebied 'de Krimpenervaard'*. Reeks Monitoring Stroomgebieden 17-III. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 1953.

Walvoort, D.J.J., C. Siderius, D.J. Brus, T.P. van Tol Leenders, 2010d. *Validatie van modelsystemen voor het voorspellen van de oppervlaktewaterkwaliteit en kwantiteit in het stroomgebied 'Quarles van Ufford'*. Reeks Monitoring Stroomgebieden 17-IV. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 1954.

Bijlage 1 Velocity-area methode

A) Beschrijving

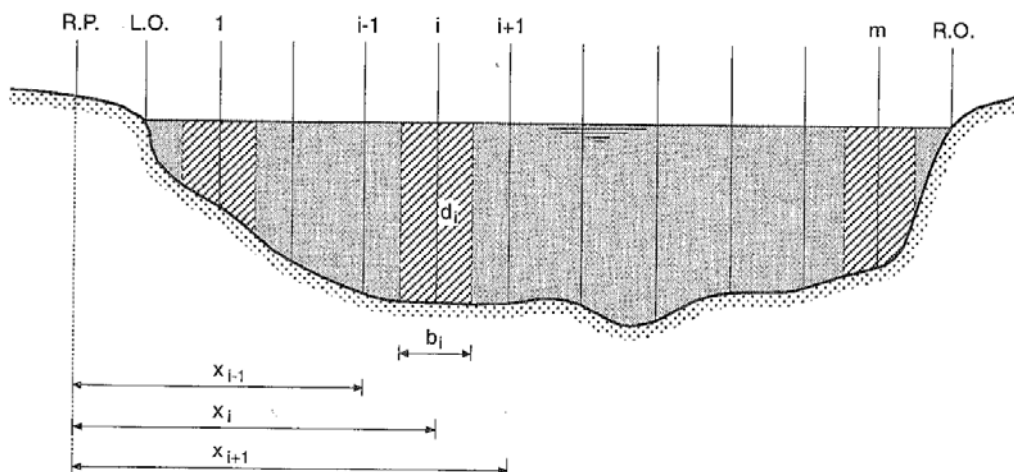
De velocity-area methode wordt beschreven zoals deze wordt gehanteerd door het waterschap Veluwe in het stroomgebied Schuitenbeek.

Het principe van de velocity-area methode berust op het meten van de stroomsnelheid in een aantal punten tussen de oevers van een waterloop en het berekenen van de oppervlakte van het dwarsprofiel. De afvoer van de waterloop kan dan worden berekend als het product van de gemiddelde stroomsnelheid en de oppervlakte van het stroomprofiel. Bij de standaard methode worden de stroomsnelheid en de diepte gemeten in een aantal verticalen tussen beide oevers. Per verticaal wordt de snelheid in één punt gemeten, ervan uitgaande dat dit ongeveer de gemiddelde snelheid is. Voor de snelheidsverdeling in de verticaal wordt meestal een parabolische verdeling aangenomen. De gemiddelde snelheid in de verticaal bevindt zich dan op een afstand van 0.4 maal de diepte van de bodem. De afvoer in het dwarsprofiel wordt bepaald als de som van het product van de gemiddelde snelheid, diepte en breedte per segment.

De oppervlakte van het dwarsprofiel wordt berekend uit de gemeten breedte van de waterloop en een aantal dieptepeilingen. De diepte wordt gemeten in een aantal verticalen, op onderling gelijke afstanden verdeeld over de breedte van de waterloop. Het aantal dieptemetingen moet zodanig zijn dat de vorm van het dwarsprofiel voldoende nauwkeurig beschreven wordt.

Bij de standaard velocity-area methode wordt uitgegaan van stationaire stroming, hetgeen betekent dat het debiet niet verandert in de tijd. Daarnaast wordt aangenomen dat de stroming turbulent is, wat in de praktijk vaak het geval is. Tengevolge van wrijving is de stroomsnelheid langs de bodem en de oevers van een waterloop lager dan de gemiddelde snelheid. De snelheidsverdeling in het dwarsprofiel is bovendien afhankelijk van de vorm van het dwarsprofiel en de aanwezigheid van obstakels en bochten bovenstrooms van de meetraai.

Nadat in het dwarsprofiel van de meetraai in de diepte van de verticalen is gemeten en de gemiddelde snelheid is bepaald, wordt de mid-section methode gehanteerd om het totale debiet te bepalen. Bij de mid-section methode wordt ervan uitgegaan dat het dwarsprofiel opgebouwd is uit een aantal segmenten, waarbij het segment aan weerszijden van het meetverticaal ligt. De breedte van het segment is gelijk aan de som van de halve breedtes tot de naastgelegen verticalen, zie figuur B1.1.



Figuur B1.1: Mid-section methode (Boiten et al., 1995)

De totale afvoer wordt berekend als de som van de afvoeren van de afzonderlijke segmenten. Voor de halve segmenten bij de oevers wordt aangenomen dat er geen afvoer is. Als het dwarsprofiel rechthoekig van vorm is, wordt voor de snelheid in de halve segmenten langs de wand een percentage aangehouden van de snelheid gemeten in de eerste en laatste verticaal.

Voor het meten van de stroomsnelheid wordt een elektromagnetische sensor gebruikt. Het principe van deze sensoren berust op de wet van Faraday: De spanning die wordt opgewekt door een geleider die loodrecht door een homogeen magnetisch veld beweegt, is evenredig met de snelheid waarmee deze geleider door het magnetisch veld beweegt. Het benodigde magnetische veld wordt opgewekt door een pulserende stroom, die een spoel passeert in de sensor. Elektrodes in de sensor meten het voltage, veroorzaakt door het water dat langs de sensor stroomt.

De grenslaag rondom de sensor speelt een belangrijke rol bij de gevoeligheid van de meter. Dat betekent dat elektromagnetische stroomsnelheidsmeters erg gevoelig zijn voor aangroei en vervuiling en goed schoon moeten worden gehouden. Kalibratie van de elektromagnetische snelheidsmeters dient regelmatig te gebeuren. Bij kalibratie wordt een verband gelegd tussen de stroomsnelheid en de gemeten spanning.

B) Betrouwbaarheid

Debietmetingen bepaald aan de hand van de velocity-area methode betreffen incidentele metingen. Voor deze methode kan een aantal mogelijke foutenbronnen worden aangegeven, uitgaande van de vergelijking B1.1.

$$Q = \sum_{i=1}^m v_i \cdot d_i \cdot b_i \quad (\text{B1.1})$$

Waarin:

Q	: debiet	(m ³ /s)
b_i	: breedte van het segment	(m)
d_i	: diepte in verticaal i	(m)
v_i	: gemiddelde snelheid in verticaal i	(m/s)

De onnauwkeurigheid in de te bepalen afvoer is opgebouwd uit onnauwkeurigheden in de afzonderlijke instrumentele componenten: breedte, diepte, gemiddelde snelheid en een aantal verwerkingscomponenten.

De nauwkeurigheid van de gebruikte meetapparatuur is afhankelijk van type en onderhoud van de instrumenten. De systematische fout van een instrument is gerelateerd aan de karakteristieke eigenschappen hiervan. De grootte van de systematische fout is moeilijk in te schatten als deze niet bekend is, zodra deze wel bekend is kan hiervoor gecorrigeerd worden.

Toevallige instrumentele meetfouten komen voor bij de meting van de breedte, meting van de diepte en bij de bepaling van de gemiddelde stroomsnelheid. Naast de instrumentele fouten bestaan er fouten in de bepaling van de gemiddelde stroomsnelheid uit drie onafhankelijke verwerkingscomponenten:

- Fout ten gevolge van beperkte meetduur van de stroomsnelheid in een punt van de verticaal. Bij een meetduur van 30sec voor hoge snelheden en 60sec voor lage snelheden bereikt deze fout een acceptabele waarde;
- Fout veroorzaakt door het meten van een beperkt aantal punten in een verticaal, zie tabel B1.1;
- Fout ten gevolge van het meten van een beperkt aantal verticalen in een dwarsprofiel, zie tabel B1.2.

Tabel B1.1: Fout t.g.v. een beperkt aantal punten in verticaal (ISO)

Methode	Standaard afwijking σ_n (%)
één-punts	8.2
twee-punts	4.9
drie-punts	3.8
vijf-punts	2.7

Tabel B1.2: Fout t.g.v. beperkt aantal verticalen in het dwarsprofiel (ISO)

Aantal verticalen	Standaard afwijking σ_m (%)
5	4.2
6	3.7
10	2.6
15	2.0

De toevallige fout in de afvoerbepaling wordt bepaald met vergelijking B1.2.

$$X_Q = \pm \sqrt{X_m^2 + \frac{1}{m}(X_{vi}^2 + X_n^2 + X_{di}^2 + X_{bi}^2)} \quad (\text{B1.2})$$

Waarin:

X_Q	: onzekerheid in debiet	(%)
X_m	: onzekerheid t.g.v. beperkt aantal verticalen	(%)
X_v	: onzekerheid bij bepaling gemiddelde stroomsnelheid	(%)
X_n	: onzekerheid t.g.v. beperkt aantal punten in verticaal	(%)
X_d	: onzekerheid t.g.v. schatting diepte in verticaal	(%)
X_b	: onzekerheid t.g.v. schatting breedte van segment	(%)
m	: aantal verticalen	(-)

C) Meetlocaties Monitoring Stroomgebieden

Velocity-area metingen (Schuitenbeek)

In het proefgebied van Schuitenbeek worden op verscheidene locaties debietmetingen uitgevoerd met de velocity-area methode. Door het waterschap wordt de één-punts methode gebruikt met een standaardafwijking van ca. 8%, zie tabel B1.2. In deze studie wordt de toevallige fout als gevolg van een beperkt aantal verticalen ingeschat op ca. 3% (uitgaande van 8 verticalen in het dwarsprofiel). Voor kleinere waterlopen, zoals het geval is bij de meetlocaties van Waterschap Veluwe, kan de breedte worden vastgesteld met een onzekerheid van maximaal 0.5% (ISO). De onzekerheid in het vaststellen van de diepte is sterk afhankelijk van de samenstelling van de bedding, een onzekerheid van 1% lijkt hierbij een redelijke benadering (ISO).

De onzekerheid in het bepalen van de stroomsnelheid is sterk afhankelijk van de stroomsnelheid. Bij relatief lage stroomsnelheden zal de gevoeligheid van het meetapparaat toenemen. Volgens de specificaties van het meetapparaat zal de stroomsnelheid met een onzekerheid van 1% worden vastgesteld.

Met de bovenstaande onzekerheden bedraagt de toevallige fout in een debietbepaling ca 4%.

Bijlage 2 Stage-discharge

A) Beschrijving

In de praktijk is het niet mogelijk om de afvoer continu te meten. Om (zo goed als) continue afvoergegevens te krijgen, wordt daarom de waterstand op een relatief fijne tijdschaal geregistreerd waaruit aan de hand van een afvoerrelatie de bijbehorende afvoeren worden bepaald. De relatie van afvoer versus waterstand wordt in het algemeen opgesteld voor een bepaalde dwarsdoorsnede van een waterloop. De ideale locatie van een dwarsdoorsnede is daar waar verstoringen benedenstrooms, zoals variërende begroeiing van de waterloop, een minimaal effect hebben op de afvoerrelatie in de dwarsdoorsnede.

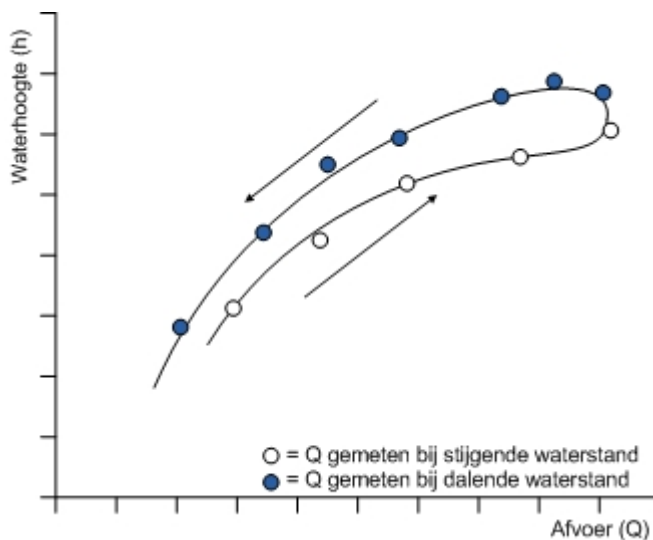
De meest geschikte locatie voor een debietmeetstation langs een waterloop is gelegen op geringe afstand bovenstrooms van zo'n dwarsdoorsnede. De afvoerrelatie zal dan over een groot meetbereik eenduidig zijn: de relatie tussen de waterstand en het debiet wordt niet of nauwelijks beïnvloed door verstoringen benedenstrooms.

De afvoerrelatie van een meetstation moet empirisch worden vastgesteld aan de hand van voldoende metingen van afvoeren (bijvoorbeeld verricht met de velocity-area methode) en bijbehorende waterstanden. De afvoermetingen en bijbehorende waterstanden kunnen uitgezet worden in een $Q(h)$ diagram. In het algemeen zullen de metingen min of meer op een gebogen lijn liggen waardoor een regressielijn kan worden getrokken die zo goed mogelijk de metingen benadert. Hiervoor is een voldoende aantal metingen nodig, verdeeld over het volledige bereik van mogelijk optredende waterstanden, teneinde een zo nauwkeurig mogelijke curve te krijgen. Na het vaststellen van de afvoerrelatie moeten de metingen worden gecontinueerd om controle mogelijk te maken en eventueel de afvoerrelatie aan te passen.

Afwijkingen tussen gemeten en volgens de afvoerrelatie berekende afvoeren kunnen optreden door:

- Morfologische veranderingen van de rivierbedding (erosie/sedimentatie). Sedimentatie of erosie over een grote lengte van de waterloop resulteert in een tijdelijke stijging of daling van het niveau van de bodem van de beek. Dit leidt dan tot een stijging of daling van de waterspiegel bij eenzelfde afvoer.
- Veranderingen in ruwheid (bijvoorbeeld door de groei van vegetatie). In het algemeen veroorzaakt een groei van de vegetatie een afname van het oppervlak van het dwarsprofiel en een hogere ruwheid van bedding en oevers. Het ruwheidseffect wordt weergegeven door de Manning-coëfficiënt.
- Hoogwatergolven die een verandering in het verhang van de waterspiegel veroorzaken en daardoor een lus (hysteresis) in de

afvoerrelatie te zien geven. Een verandering van het waterspiegelverhang betekent ook een verandering in de afvoer. In het algemeen wordt het verhang steiler bij het naderen van een hoogwatergolf omdat een grotere (permanente) afvoer een grotere waterdiepte impliceert. Het omgekeerde treedt op als de top van de hoogwatergolf is gepasseerd. Dit betekent, dat het passeren van een vloedgolf, resulterend in het stijgen en dalen van de waterstand, leidt tot verschillende afvoeren bij een zelfde waterstand. De afvoer zal bij eenzelfde waterstand hoger zijn in het stijgende gedeelte en lager in het dalende gedeelte. Dit veroorzaakt een lus in de afvoerrelatie (zie figuur B2.1).



Figuur B2.1: Lus in de afvoerrelatie (Boiten et al., 1995)

- Verandering in opstuwingeffecten. Opstuwingeffecten treden op door invloed van benedenstroomse verdeling van de waterstroom bij splitsingen, door samenkomst met een andere waterloop of door de aanwezigheid van stuwen benedenstrooms. Als deze effecten variabel zijn in de tijd zal de afvoer niet een eenduidige functie zijn van de waterstand.

B) Betrouwbaarheid

Debietmetingen die verricht worden met de stage-discharge methode zijn in het algemeen empirisch vastgesteld aan de hand van voldoende metingen van afvoeren (bijvoorbeeld verricht met de velocity-area methode) en bijbehorende waterstanden. Over het algemeen ziet een afvoerrelatie er als volgt uit:

$$Q = a \cdot (h - h_0)^b \quad (\text{B2.1})$$

Waarin:

Q	: debiet	(m ³ /s)
h	: waterhoogte	(m)
h_0	: waterhoogte waarbij juist geen afvoer meer plaatsvindt	(m)
a en b	: constanten, specifiek voor een bepaald meetstation	(-)

Hierin zijn a , h_0 en b parameters die bekend zijn geworden uit een groot aantal veldmetingen van Q en h . Hoewel elk van de parameters onnauwkeurigheden herbergen, worden deze gemakshalve in de praktijk gecombineerd in de fout X_a . De toevallige fout in het bepalen van het debiet wordt beschreven met vergelijking B2.2.

$$X_Q = \pm \sqrt{X_a^2 + b \times X_h^2} \quad (\text{B2.2})$$

Waarin:

X_Q	: toevallige fout in debietmeting	(%)
X_a	: toevallige fout van parameters a , h_0 en b	(%)
X_h	: toevallige fout bij inschatten van waterstand	(%)

Naast deze toevallige fout kan er een aanzienlijke systematische fout optreden als er zich een tijdelijke of blijvende verandering voordoet in de afmetingen van het dwarsprofiel of in de ruwheid van de bodem en wanden als gevolg van vegetatiegroei. Bij blijvende verandering in het dwarsprofiel zal een nieuwe $Q(h)$ relatie moeten worden opgesteld uit een serie veldmetingen.

C) Meetlocaties Monitoring Stroomgebieden

Schipborg (Drentse Aa)

Ter plaatse van de locatie Schipborg wordt elk uur de waterhoogte gemeten. De waterhoogte wordt gemeten met een drukopnemer welke zich bovenstrooms van de brug bevindt. De drukopnemer bevindt in een peilbuis waardoor korte golven worden uitgedempt. De waterhoogte wordt bepaald met een onzekerheid van 0.5cm. De nulpuntsbepaling gebeurt met een onzekerheid van 1cm en vindt tweemaal per jaar plaats (pers. com. H. de Jager, Waterschap Hunze en Aa's). Aan de hand van de gemeten waterhoogte wordt een inschatting gemaakt van het debiet wat er op dat moment plaatsvindt.



Afbeelding B2.1: Meetlocatie Schipborg (Waterschap Hunze en Aa's)

Het debiet is hierbij afhankelijk van het doorstromend oppervlak in het dwarsprofiel welke tweemaal per jaar wordt opgemeten. Aan een zijde van het profiel is een damwand geslagen, het overige gedeelte van het profiel zal onderhevig zijn aan veranderingen door erosie dan wel sedimentatie. Door verschillende metingen van de profielen te vergelijken kan een inschatting gemaakt worden in hoeverre het profiel aan veranderingen onderhevig is. Helaas is deze gedetailleerde informatie voor deze studie niet voorhanden. Verder is het debiet afhankelijk van de begroeiingstoestand in de beek. Ook tijdens een hoogwatergolf kan er een onderschatting of overschatting van het debiet plaatsvinden. In deze studie is ervan uitgegaan dat de situatie benedenstrooms vanaf het opstellen van de afvoerrelatie onveranderd is gebleven.

De afvoerrelatie die gebruikt wordt voor de meetlocatie Schipborg is vastgesteld met metingen verricht met de velocity-area methode. Door het gebruik van deze referentiemethode wordt voor de onzekerheid in het vaststellen van de parameters a , b_0 en b gezamenlijk een waarde aangenomen van 8% (Boiten et al., 1995). De onzekerheid die meespeelt bij het bepalen van de waterhoogte en bij het van het instellen van het nulpunt is afhankelijk van de gemeten waterhoogte. De totale onzekerheid bij het bepalen van de gemiddelde waterhoogte is ca. 2%. De machtcoefficiënt b heeft in de afvoerrelatie van meetlocatie Schipborg een waarde van 2.016. De meetfout bij een gemiddelde debietbepaling komt hiermee op ca. 8%.

Bijlage 3 Meetstuwen

A) Beschrijving

De meest gangbare methode om afvoeren in open waterlopen (zo goed als) continu te meten is die met behulp van meetstuwen. Bij het ontwerp van meetstuwen wordt het dwarsprofiel van de waterloop plaatselijk versmald (in breedte en/of diepte). Het grootste gedeelte van de energiehogte H_1 op korte afstand voor de stuw wordt omgezet in kinetische energie ter verkrijging van kritische stroming boven de kruin. Het restant aan energiehogte is opgegaan aan wrijvingsverliezen en aanstromingsverliezen.

De heersende stromingstoestand wordt gekarakteriseerd door het getal van Froude (Fr), zie vergelijking B3.1.

$$Fr = \sqrt{\frac{Q^2 \cdot B}{g \cdot A^3}} \quad (B3.1)$$

Waarin:

Q	: debiet	(m ³ /s)
B	: breedte op de waterspiegel	(m)
A	: natte oppervlak dwarsdoorsnede	(m ²)
g	: versnelling van de zwaartekracht	(m/s ²)

Hierbij is het volgende onderscheid te maken:

- $Fr = 0$: stilstaand water;
- $Fr < 1$: stromend water (relatief langzaam stromend water);
- $Fr = 1$: kritische stroming (grenstoestand);
- $Fr > 1$: schietend water (relatief snelstromend water).

Een belangrijke, controleerbare eigenschap van schietend water is dat zich een verstoring in schietend water alleen stroomafwaarts kan manifesteren en nooit in stroomopwaartse richting, in tegenstelling tot stromend water.

In de praktijk wordt niet de energiehogte (H_1) maar de overstorthoogte (h_1) gemeten. Bij zeer lage stroomsnelheden zullen deze waarden nagenoeg gelijk zijn. Is de stroomsnelheid op de plaats waar de waterhoogte wordt gemeten echter groter dan ca. 0.20m/s, dan dient de snelheidshoogte in rekening te worden gebracht. Als in de afvoerformule h_1 wordt gebruikt in plaats van H_1 , dan vindt correctie plaats door een coëfficiënt voor de aanstroomsnelheid, zie vergelijking B3.2.

$$C_v = \left(\frac{H_1}{h_1} \right)^u \quad (\text{B3.2})$$

Met:

$$H_1 = h_1 + \left(\frac{v_1^2}{2g} \right)$$

Waarin:

C_v	: coëfficiënt voor de aanstroomsnelheid	(-)
H_1	: energiehogte in de h_1 (korte afstand voor de stuw)	(m)
h_1	: overstorthoogte	(m)
u	: machtscoëfficiënt	(-)
v_1	: gemiddelde stroomsnelheid (korte afstand voor de stuw)	(m/s)
g	: versnelling van de zwaartekracht	(m/s ²)

Meetstuwen kunnen worden geclassificeerd naar de vorm van de kruin in de stroomrichting en worden onderverdeeld naar verschillende vormen van doorstromingsprofiel. Meetlocaties in het project Monitoring Stroomgebieden kennen de volgende vormen:

- Lange overlaten: de lengte van de kruin (L) in de stroomrichting is voldoende om min of meer rechte en evenwijdige stroomlijnen te verkrijgen boven de kruin. Dit is het geval als h_1/L kleiner is dan ongeveer 0.6. Wanneer h_1/L groter is dan ongeveer 0.6, spreken we van een korte overlaat. De hoogte van de kruin ten opzichte van de bodem van het bovenstrooms kanaalpand moet aan een minimumwaarde voldoen.
- Onderwateropeningen: de doorstroomopening bevindt zich op enige afstand onder de bovenstroomse waterspiegel. In tegenstelling tot de voorafgaande typen meetstuwen waarbij steeds sprake was van een overstortende straal, is bij de openingen onder water sprake van een onderstroom.

Bij onvolkomen afvoer speelt naast de overstorthoogte h_1 ook de benedenwaterstand (eveneens ten opzichte van de kruin) h_2 een rol. Er bestaat dan geen eenduidige relatie meer tussen de overstorthoogte en de afvoer. De invloed van de benedenwaterstand wordt aangeduid met de verdrinkingsgraad, zie vergelijking B3.3.

$$S = 100 \cdot H_2 / H_1 \quad (\text{B3.3})$$

Waarbij:

S	: verdrinkingsgraad	(%)
H_2	: energiehogte benedenstrooms	(m)
H_1	: energiehogte bovenstrooms	(m)

In de praktijk wordt de verdrinkingsgraad vaak aangeduid met vergelijking B3.4. Gebruik van deze vergelijking zal weinig afwijken van vergelijking B3.3, maar vergelijking B3.4 is principieel gezien onjuist.

$$S = 100 \cdot h_2 / h_1 \quad (\text{B3.4})$$

Waarbij:

S	: verdrinkingsgraad	(%)
h_2	: waterhoogte benedenstrooms	(m)
h_1	: waterhoogte bovenstrooms	(m)

De grens tussen onvolkomen en volkomen afvoer wordt aangegeven door de zogenaamde kritische verdrinkingsgraad of modulaire limiet S_1 . De volgende soorten afvoer zijn dan mogelijk:

- Volkomen afvoer: de benedenwaterstand h_2 heeft geen invloed op de eenduidige $Q(h_1)$ relatie. De verdrinkingsgraad is groter dan de kritische verdrinkingsgraad en de reductiefactor is gelijk aan één.
- Overgang van volkomen naar onvolkomen afvoer: begin van invloed van de benedenwaterstand op de $Q(h_1)$ relatie (modulaire limiet). De overstorthoogte h_1 is nog maar zo weinig opgestuwd dat het debiet, afgeleid uit de $Q(h_1)$ relatie, minder dan 1% hoger is dan het werkelijke debiet. De verdrinkingsgraad is hierbij gelijk aan het modulaire limiet en de reductiefactor is groter of gelijk aan 0.99.
- Onvolkomen afvoer: de benedenwaterstand stuwt de bovenwaterstand op. De eenduidige $Q(h_1)$ relatie dient gecorrigeerd te worden. Hierbij is de verdrinkingsgraad groter dan het modulaire limiet en de reductiefactor groter dan 0.99.

Het modulaire limiet verschilt per type overlaat. Voor stuwen met overstort is het modulaire limiet aangegeven in tabel B3.1.

Tabel B3.1: Het modulaire limiet S_1 voor verschillende typen overlaten (Boiten et al., 1995)

Type overlaat	Grenswaarde S_1
Lange overlaten	50 à 80 %
Scherpe overlaten	0 %
Korte overlaten	30 à 50 %
Meetgoren (Flumes)	70 à 90 %

Zodra er sprake is van onvolkomen afvoer wordt het meten van bovenwaterstand en benedenwaterstand noodzakelijk. Het verband tussen de reductiefactor en de verdrinkingsgraad kan verschillen voor de verschillende typen overlaten en is sterk afhankelijk van de vormgeving van het kunstwerk. Het verdient aanbeveling gestuwde afvoer te voorkomen. De berekening van het debiet is tamelijk bewerkelijk en de nauwkeurigheid neemt af bij het groter worden van de verdrinkingsgraad.

Door de grote verscheidenheid in het aantal soorten meetstuwen is een uitgebreide beschrijving van verschillende soorten meetstuwen verder uitgewerkt in onderdeel C van deze bijlage.

B) Betrouwbaarheid

Bronnen van onzekerheden bij debietmetingen bepaald met een meetstuw kunnen geïdentificeerd worden door naar de vorm van de afvoerformule te kijken. In vergelijking B3.5 is de generieke vorm van een afvoerformule voor een meetstuw weergegeven.

$$Q = w \cdot g^{\frac{1}{2}} \cdot b \cdot C_d \cdot C_v \cdot h_1^u \cdot f \quad (\text{B3.5})$$

Waarbij:

Q	: debiet	(m ³ /s)
g	: versnelling van de zwaartekracht	(m/s ²)
b	: breedte van de overstort	(m)
C_d	: coëfficiënt van de afvoer	(-)
C_v	: coëfficiënt van de aankomende snelheid	(-)
h_1	: bovenstrooms waterpeil	(m)
f	: reductiefactor bij onvolkomen afvoer	(-)
w en u	: constanten	(-)

De onzekerheid als gevolg van de toevallige fout wordt berekend met vergelijking B3.6.

$$X_Q = \pm \sqrt{X_b^2 + X_c^2 + (u \cdot X_h)^2 + X_f^2} \quad (\text{B3.6})$$

Waarin:

X_Q	: onzekerheid in debiet	(%)
X_b	: onzekerheid in breedte van de overstort	(%)
X_c	: onzekerheid coëfficiënten	(%)
X_h	: onzekerheid in bovenstrooms waterpeil	(%)
X_f	: onzekerheid in reductiefactor	(%)
u	: constante	(-)

C) Meetlocaties Monitoring Stroomgebieden

25210 V-vormige lange overlaat (Schuitenbeek)

De hoogte van de kruin ten opzichte van de bodem van het bovenstrooms kanaalpand is ca. 20cm. Het betreft hier een vaste kruin. De V-vormige lange overlaat heeft in vooraanzicht een V-vormige dwarsdoorsnede waarvan de lijn door het diepste punt horizontaal loopt. De hoek α in de kruin voor V-vormige lange overlagen varieert normaal van ca 90 tot 150°. De meetstuw in de Schuitenbeek heeft een kruinhoek die iets groter is, ca. 172.52°. De schuine platen zijn aan de bovenstroomse zijde van de kruin afgerond met een straal van 150mm.

Afhankelijk van de waterstand h_1 zijn twee typen waterstroming mogelijk over een V-vormige lange overlaat. Onder normale omstandigheden treedt stroming alleen op door het V-vormige gedeelte van het profiel. Dit stromingstype, waarvoor geldt $h_1 \leq 1.25 H_B$, wordt “gedeeltelijk gevuld” genoemd. Hierbij wordt H_B beschreven met vergelijking B3.7. Wanneer de breedte van de V-vormige kruin door verticale zijwanden wordt begrensd, treedt bij $h_1 > 1.25 H_B$ het stromingstype “meer dan vol” op.

$$H_B = \frac{0.5 \cdot B}{\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (\text{B3.7})$$

Waarin:

H_B	: hoogteverschil tussen onderzijde en bovenzijde driehoek van het doorstromend oppervlak	(m)
B	: breedte van de overstort	(m)
α	: hoek van de V-vormige overlaat	(-)

De afvoerrelatie in het geval van een “gedeeltelijk gevuld” stromingsprofiel, met $h_1 \leq 1.25 H_B$ wordt beschreven met vergelijking B3.8:

$$Q = \left(\frac{4}{5}\right)^{5/2} \cdot \left(\frac{g}{2}\right)^{1/2} \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot C_d \cdot C_v \cdot C_{dr} \cdot h^{5/2} \quad (\text{B3.8})$$

Met:

$$C_v = \left(\frac{H_1}{h_1}\right)^{5/2}$$

De afvoerrelatie voor de situatie waarin het stromingsprofiel “meer dan vol” is, wordt beschreven met de vergelijking B3.9.

$$Q = \left(\frac{2}{3}\right)^{5/2} \cdot g^{1/2} \cdot B \cdot C_d \cdot C_v \cdot C_{dr} \cdot (h_1 - 0.5 \cdot H_B)^{3/2} \quad (\text{B3.9})$$

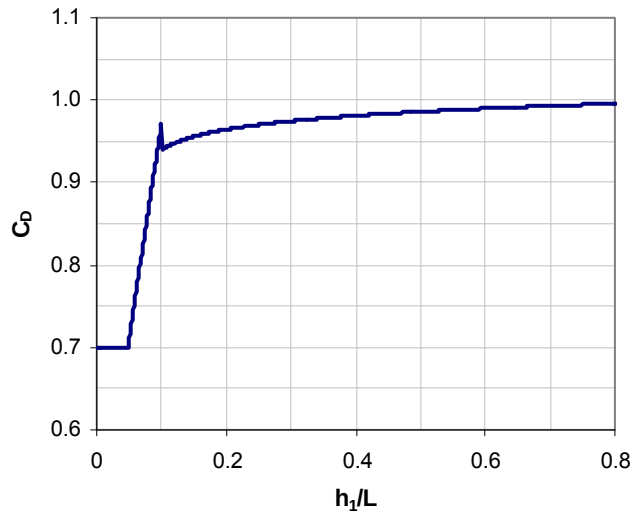
Met:

$$C_v = \left(\frac{H_1 - 0.5H_B}{h_1 - 0.5H_B}\right)^{3/2}$$

Waarin:

Q	: debiet	(m ³ /s)
g	: versnelling van de zwaartekracht	(m/s ²)
α	: kruinhoek	(°)
C_d	: afvoercoëfficiënt	(-)
C_v	: coëfficiënt van de aanstroomsnelheid	(-)
C_{dr}	: reductiefactor voor gestuwde afvoer	(-)
h_1	: overstorthoogte	(m)
H_1	: energiehogte in de h_1 meetraai voor de stuw	(m)
H_B	: hoogte driehoek in de V-vormige overlaat	(m)

De waarde van de afvoercoëfficiënt C_d is een functie van h_1/L en a in geval van een “gedeeltelijk gevuld” stromingsprofiel. Voor het stromingsprofiel “meer dan vol” is de waarde van de afvoercoëfficiënt C_d een functie van h_1/L , a en B . In figuur B3.1 is de afvoercoëfficiënt weergegeven als functie van h_1/L zoals deze bij Schuitenbeek gebruikt is. Het verloop van de afvoercoëfficiënt lijkt goed overeen te komen met de in de ISO standaard beschreven verloop van de afvoercoëfficiënt



Figuur B3.1: Verloop van waarde van de afvoercoëfficiënt t.o.v. h_1/L

Met dit type meetstuw kunnen grote en kleine afvoeren met een relatief grote nauwkeurigheid gemeten worden. Tevens is dit type overlaet bijzonder geschikt voor waterlopen met een gering verval doordat gestuwde afvoer pas bij een hoge verdrinkingsgraad (80%) gaat optreden. Indien gestuwde afvoer optreedt met een verdrinkingsgraad groter dan 80%, dan wordt de afvoer vermenigvuldigd met een reductiefactor. De waarde van de reductiefactor is lastig te bepalen en gaat gepaard met een relatief grote onzekerheid.

Bij het bepalen van de breedte van de meetstuw en de kruinhoek wordt in deze studie een onzekerheid van 1% aangehouden. De waterstand bovenstrooms en benedenstrooms van de meetstuw worden vastgesteld met een nauwkeurigheid van 0.5cm (pers. com. Wim de Boer, Waterschap Veluwe). Aangenomen wordt dat het vaststellen van het nulpunt eveneens met een nauwkeurigheid van 0.5cm plaatsvindt. De toevallige fout bij de inschatting van de afvoercoëfficiënt wordt in deze studie geschat op 1%. De systematische fout die gemaakt wordt bij de berekening van de afvoercoëfficiënt wordt voor V-vormige lange overlaeten met vergelijking B3.10 beschreven (ISO 8333):

$$X_C = \pm \left(2.0 + 0.15 \frac{L}{h_1} \right) \quad (\text{B3.10})$$

De onzekerheid in het bepalen van het debiet is sterk afhankelijk van de overstorthoogte. Doordat er een absolute onzekerheid is opgegeven zal de onzekerheid bij lage waterstanden hoger zijn dan bij hoge waterstanden. Hieronder volgt een voorbeeldberekening voor het berekenen van de onzekerheid bij een debietbepaling met een gemiddelde overstorthoogte (0.15m gemeten over de jaren 2004 tot 2007).

Voorbeeldberekening

Onzekerheid waterhoogte

De onzekerheid die meespeelt bij het bepalen van de waterhoogte ($_1X_h$) en bij het van het instellen van het nulpunt ($_2X_h$) is afhankelijk van de gemeten waterhoogte:

$$_1X_h = \frac{0.005}{0.15} \times 100 = 3.3\% \qquad _2X_h = \frac{0.005}{0.15} \times 100 = 3.3\%$$

De totale onzekerheid bij het bepalen van de waterhoogte is:

$$X_h = \pm \sqrt{(3.3)^2 + (3.3)^2} = \pm 4.7\%$$

Onzekerheid afvoercoëfficiënten

De systematische fout bij het bepalen van de afvoercoëfficiënt wordt berekend aan de hand van vergelijking B3.10 (overstortlengte is 1.25m) en is gelijk aan 3.2%. Zoals gezegd werd de toevallige fout in het bepalen van de afvoercoëfficiënt geschat op 1%. De totale fout in het bepalen van de afvoercoëfficiënt komt hiermee op:

$$X_C = \pm \sqrt{(3.2)^2 + (1.0)^2} = \pm 3.3\%$$

Onzekerheid totaal

De totale onzekerheid bij een debietbepaling met een betrouwbaarheidsinterval van 95% bij een gemiddelde waterhoogte is (zie vergelijking B3.6):

$$X_Q = \pm \sqrt{(0)^2 + (3.3)^2 + 6.25 \times (4.7)^2 + (0)^2} = \pm 12.3\%$$

Wanneer echter een waterhoogte van 0.16m wordt gemeten neemt de onzekerheid af naar 7.4%. Dit komt door het gebruik van de afvoerrelatie met het stromingsprofiel “meer dan vol”, waarin het gewicht van de waterhoogte minder zwaar meetelt ten opzichte van het stromingsprofiel “gedeeltelijk gevuld” (hetgeen gebruikt wordt bij een waterhoogte van 0.15m).

Amerdiep (Drentse Aa)



Afbeelding B3.3: Meetlocatie Amerdiep (Waterschap Hunze en Aa's)

De meetlocatie Amerdiep betreft een betondrempel met een lange overlaat. Zoals gezegd: het principe van een lange overlaat is dat de lengte van de kruin in de stroomrichting voldoende is om min of meer evenwijdige stroomlijnen te krijgen boven de kruin. Dit is het geval als h_1/L kleiner is dan ongeveer 0.6. Wanneer h_1/L groter is dan ongeveer 0.6 spreken we van een korte overlaat. De betondrempel heeft een rechthoekig profiel met een verlaagd middengedeelte. Hierdoor kunnen lage afvoeren met relatief kleinere onzekerheid worden vastgesteld. De afvoerformule voor ongestuwde afvoer is weergegeven met vergelijking B3.11. Hierbij worden coëfficiënten C_d en C_v vervangen door de coëfficiënt m , welke afhankelijk is van de vorm van het stuwlichaam, aanstroomsituatie, constructie van de stuw en (eventueel de klepstand van de stuw). In het geval van meetlocatie Amerdiep moet ook nog rekening gehouden worden met de verhoogde zijdelen.

$$Q = \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} \cdot g^{1/2} \cdot B \cdot C_m \cdot (h_1)^{3/2} \quad (\text{B3.11})$$

Hieronder volgt een voorbeeldberekening voor het berekenen van de onzekerheid bij een debietbepaling met een gemiddelde overstorthoogte (0.19m gemeten over de jaren 2000 tot 2008).

Voorbeeldberekening

Onzekerheid waterhoogte

Verlaagd gedeelte

De onzekerheid die meespeelt bij het bepalen van de waterhoogte (${}_1X_h$) en bij het van het instellen van het nulpunt (${}_2X_h$) is afhankelijk van de gemeten waterhoogte:

$${}_1X_h = \frac{0.005}{0.19} \times 100 = 2.6\% \qquad {}_2X_h = \frac{0.01}{0.19} \times 100 = 5.3\%$$

De totale onzekerheid bij het bepalen van de waterhoogte is:

$$X_h = \pm\sqrt{(2.6)^2 + (5.3)^2} = \pm 5.9\%$$

Verhoogd gedeelte

$${}_1X_h = \frac{0.005}{0.01} \times 100 = 50.0\% \qquad {}_2X_h = \frac{0.01}{0.01} \times 100 = 100.0\%$$

De totale onzekerheid bij het bepalen van de waterhoogte is:

$$X_h = \pm\sqrt{(50.0)^2 + (100.0)^2} = \pm 111.8\%$$

Onzekerheid afvoercoëfficiënten

Geschat op 5%.

Onzekerheid totaal

De totale onzekerheid bij een debietbepaling met een betrouwbaarheidsinterval van 95% bij een gemiddelde waterhoogte is voor het verlaagde middengedeelte:

$$X_Q = \pm\sqrt{(0)^2 + (5)^2 + 2.25 \times (5.9)^2 + (0)^2} = \pm 10.1\%$$

En voor de verhoogde zijdelen:

$$X_Q = \pm\sqrt{(0)^2 + (5)^2 + 2.25 \times (111.8)^2 + (0)^2} = \pm 167.8\%$$

De onzekerheid in de debietbepaling van de verhoogde zijdelen spelen minder zwaar mee dan de onzekerheid in het verlaagde middengedeelte. De totale onzekerheid over zowel het middengedeelte als de verhoogde zijdelen kan bepaald worden door te kijken naar het totale debiet. Bij een gemiddelde waterhoogte wordt bij het verlaagde middengedeelte een debiet berekend van $0.78\text{m}^3/\text{s}$ en bij de verhoogde zijdelen een debiet van $0.01\text{m}^3/\text{s}$. Het totale debiet komt hiermee op $0.79\text{m}^3/\text{s}$. Indien rekening gehouden wordt met de onzekerheden bij de twee debietbepalingen kan worden vastgesteld dat het werkelijke debiet met een kans van 95% tussen de grenzen 0.70 en $0.88\text{m}^3/\text{s}$ zal liggen. Hetgeen een onzekerheid betreft van 11 tot 12%.

Klepstuwen (Quarles van Ufford en Drentse Aa)

Voor het opstellen dan $Q(h)$ relaties voor klepstuwen wordt doorgaans de afvoerformule voor horizontale lange overlaten gebruikt, zie vergelijking B3.11.

Aan de meetfunctie van klepstuwen kleven de volgende nadelen:

- Door de enorme variëteit (verschillen in ophanging en in kruinvorm) en het wisselend bereik in klepstanden moet voor elke klepstuw een aantal krommen worden opgesteld. Alleen identieke stuwen hebben identieke afvoerrelaties;
- De vervuiling van klepstuwen. Vooral bij ophangpunten verzamelt zich snel drijvend vuil. In perioden tussen twee opeenvolgende bezoeken aan de niveaurecorder bij de stuw heeft drijvend vuil ongestoord de gelegenheid zich op te hopen;
- Bepaling van de kruinhoogte. Het is niet eenvoudig de kruinhoogte nauwkeurig te bepalen, nog afgezien van kruinen die aan verzakking lijden of kleppen die scheef hangen. De eis dat dit op 3 à 5 mm nauwkeurigheid moet gebeuren is niet overdreven, maar het is zeer de vraag of deze nauwkeurigheid gehaald wordt (Boiten et al., 1995). De nauwkeurigheid in de bepaling van de kruinhoogte hangt vooral af van de kwaliteit van de nulpuntsbepaling en het regelmatig herhalen hiervan;
- Het regime in de open waterlopen wordt met name in het groeiseizoen voor een belangrijk deel bepaald door de grondwaterberging. De afvoer is dan vaak maanden erg laag. Daardoor wordt de meetfout, die hoofdzakelijk gegenereerd wordt door de overstorthoogte h_1 , relatief groot ($X_Q > 15\%$ bij $h_1 \leq 0.05\text{m}$);
- Tijdens zeer hoge afvoeren zal onvolkomen afvoer over de klepstuw kunnen optreden.

Hieronder volgt een voorbeeldberekening voor het berekenen van de onzekerheid bij een debietbepaling met een gemiddelde overstorthoogte van 0.15m.

Voorbeeldberekening

Onzekerheid waterhoogte

De onzekerheid die meespeelt bij het bepalen van de waterhoogte (${}_1X_h$) en bij het van het instellen van het nulpunt (${}_2X_h$) is afhankelijk van de gemeten waterhoogte:

$${}_1X_h = \frac{0.005}{0.15} \times 100 = 3.3\% \quad {}_2X_h = \frac{0.01}{0.15} \times 100 = 6.7\%$$

De totale onzekerheid bij het bepalen van de waterhoogte is:

$$X_h = \pm \sqrt{(3.3)^2 + (6.7)^2} = \pm 7.5\%$$

Onzekerheid afvoercoëfficiënten

Geschat op 5%.

Onzekerheid totaal

De totale onzekerheid bij een debietbepaling met een betrouwbaarheidsinterval van 95% bij een waterhoogte is:

$$X_Q = \pm \sqrt{(0)^2 + (5)^2 + 2.25 \times (7.5)^2 + (0)^2} = \pm 12.3\%$$

De totale onzekerheid is sterk afhankelijk van de waterhoogte. Bij een waterhoogte van 0.10m is de onzekerheid bij de debietbepaling 17.5% en bij een waterhoogte van 0.25m is de onzekerheid 8.4%.

Afsluiters (Krimpenervwaard en Quarles van Ufford)

Afsluiters worden veel toegepast in het regionaal waterbeheer voor het aanvoeren en afvoeren van waterhoeveelheden tussen waterlopen. De afsluiter maakt vrijwel altijd deel uit van een duikersysteem. Voorwaarde voor een goede aan- en afvoerbepaling is, dat een relatief kort stuk gesloten leiding bovenstrooms van de duiker geheel gevuld is. Bij afstroming via afsluiters kan zowel volkomen als onvolkomen afvoer voorkomen.

De afvoer door het systeem waarvan de afsluiter deel uit maakt, kan worden berekend als alle deelverliezen voldoende nauwkeurig bekend zijn. Daarbij speelt het deelverlies veroorzaakt door de afsluiter vaak een overheersende rol. De afvoer door een volledig gevulde duiker (onvolkomen afvoer) wordt beschreven met de vergelijking B3.13:

$$Q = m \cdot A \cdot \sqrt{2g \cdot \Delta h_{\text{totaal}}} \quad (\text{B3.13})$$

Met:

$$m = \frac{1}{\sqrt{\xi_{\text{tot}}}} \quad \text{en} \quad \xi_{\text{tot}} = \xi_i + \xi_{wr} + \xi_a + \xi_r + \xi_u$$

Waarin:

Q	: debiet	(m ³ /s)
m	: afvoercoëfficiënt duiker	(-)
A	: oppervlakte dwarsprofiel duiker	(m ²)
Δh_{tot}	: verval over de duiker	(m)
ξ_{tot}	: som van alle verliescoëfficiënten	(-)
ξ_i	: coëfficiënt voor het intreeverlies	(-)
ξ_{wr}	: coëfficiënt voor het wrijvingsverlies	(-)
ξ_a	: verliescoëfficiënt afsluiter	(-)
ξ_r	: coëfficiënt voor resterende extraverliezen	(-)
ξ_u	: coëfficiënt voor het uittreeverlies	(-)

De coëfficiënten ξ_i , ξ_{wr} en ξ_u spelen in ieder duikersysteem een rol en zijn goed te berekenen. In de praktijk treedt echter vrijwel altijd een gedeeltelijke overlap van de oorzaken van verschillende verliezen op. De som van de verliescoëfficiënten ξ_{tot} zal daardoor enigszins worden overschat. Door het uitvoeren van enkele controlemetingen wordt een indruk verkregen van de eventuele afwijking, waarvoor dan kan worden gecorrigeerd.

De betrouwbaarheid van het meten van afvoeren door duikers waarin een afsluiter is opgenomen, is samengesteld uit de volgende componenten:

- De nauwkeurigheid waarmee de waterstanden bovenstrooms en benedenstrooms van het duikersysteem worden gemeten;
- De nauwkeurigheid van de verliescoëfficiënten/afvoercoëfficiënten van de afsluiter/duiker. Globaal geldt een onnauwkeurigheid van ca 5 tot 10% in geval van onvolkomen afvoer en meer dan 10% in geval van volkomen afvoer;
- De betrouwbaarheid waarmee de overige deelverliezen van het duikersysteem kunnen worden vastgesteld.

Hieronder volgt een voorbeeldberekening voor het berekenen van de onzekerheid bij een debietbepaling met een verschil in waterhoogte van 0.25m.

Voorbeeldberekening

Onzekerheid waterhoogte

De onzekerheid die meespeelt bij het bepalen van de waterhoogte (X_h) en bij het van het instellen van het nulpunt (X_n) is afhankelijk van de gemeten waterhoogte:

$${}_1X_h = \frac{0.005}{0.25} \times 100 = 2.0\% \qquad {}_2X_h = \frac{0.01}{0.25} \times 100 = 4.0\%$$

De totale onzekerheid bij het bepalen van het verschil in waterhoogten:

$$X_h = \pm \sqrt{2 \times ((2.0)^2 + (4.0)^2)} = \pm 6.3\%$$

Onzekerheid doorstromend oppervlakte

Geschat op 5%

Onzekerheid afvoercoëfficiënten

Geschat op 10%.

Onzekerheid totaal

De totale onzekerheid bij een debietbepaling met een betrouwbaarheidsinterval van 95% bij een waterhoogte is:

$$X_Q = \pm \sqrt{(10)^2 + (5)^2 + 0.25 \times (6.3)^2} = \pm 11.6\%$$

Bijlage 4 Gemalen

A) Beschrijving

Gemalen (vijzelgemalen en pompgemalen) zijn te beschouwen als regelorganen tussen twee watersystemen. Er kan sprake zijn van bemaling (waterafvoer) of van opmaling (wateraanvoer).

- Bemaling: bij een te hoge waterstand in het laaggelegen watersysteem wordt het gemaal in werking gesteld waardoor dit systeem zo ver wordt leeggepompt tot het gewenste peil weer is bereikt;
- Opmaling: bij een waterbehoefte in het hooggelegen watersysteem wordt via het gemaal water aangevoerd vanuit het laaggelegen watersysteem.

Gemalen zijn geen debietinrichtingen. Toch zijn veel waterbeheerders geïnteresseerd in de uitgeslagen of aangevoerde hoeveelheden. Bij het bepalen van de waterhoeveelheden die een gemaal passeren, dient het aantal draaiuren te worden geregistreerd en de bijbehorende waterstanden benedenstrooms en bovenstrooms van het gemaal.

Een vijzel is een opvoerwerktuig waarin een vaste hoeveelheid water, opgesloten in de waterkrul tussen twee opeenvolgende vijzelbladen, omhoog wordt getransporteerd met een constante snelheid, die wordt bepaald door het toerental.

Het debiet van een vijzel wordt beschreven met vergelijking B4.1.

$$Q = f \cdot q \cdot n \cdot D^3 \quad (\text{B4.1})$$

Waarin:

Q	: debiet	(m ³ /s)
f	: efficiëntiefactor	(-)
q	: vijzelcoëfficiënt	(-)
n	: toerental	(omw/s)
D	: buitendiameter	(m)

Van de vele pomptypen bij pompgemalen worden de waaertypen in de praktijk het meest toegepast. Tot het waaertype behoren axiaalpompen, de half-axiaalpompen en de centrifugaalpompen, waarvan de laatste categorie de meest toegepaste pomp is bij grotere opvoerhoogten. In tegenstelling tot de vijzels maken pompen meestal deel uit van een leidingsysteem, namelijk de zuigerleiding en de persleiding, waardoor een deel van de energie wordt verbruikt door de leidingverliezen. Dit geldt niet voor schroefpompen, die vaak open worden uitgevoerd. Voor de meeste pompen is de debietbepaling dan ook meer gecompliceerd.

Het debiet bij een pompgemaal kan berekend worden gebruikmakende van de pompkarakteristiek, waarbij het drukverschil op korte afstand voor en achter de pomp op dezelfde wijze wordt gemeten als in de testopstelling. Om praktische redenen wordt ook wel het verschil in buiten- en binnenpeil aan weerszijden van het gemaal gemeten. Het debiet bij een pompgemaal kan ook berekend worden gebruikmakende van de gemaalkarakteristiek, waarbij het totaal aan energieverliezen wordt berekend. Tenslotte kan het debiet worden berekend door het vaststellen van de gemaalkarakteristiek, door bijvoorbeeld de velocity-area methode.

B) Betrouwbaarheid

Om het debiet bij een vijzelgemaal nauwkeurig vast te stellen zal de waterstand (zowel benedenstrooms als bovenstrooms van de constructie), het vijzeltoerental en de bedrijfstijden gemeten moeten worden. Aangezien de waterstanden doorgaans geheel bovenstrooms en benedenstrooms van het gemaal worden gemeten, zullen de vervallen over het krooshek benedenstrooms en de terugslagklep bovenstrooms beperkt moeten worden tot ten hoogste enkele centimeters.

Toevallige fouten in de debietmeting worden veroorzaakt door de efficiency-factor, onnauwkeurigheid van de vijzelcoëfficiënt, onnauwkeurigheid in meting van het toerental en de onnauwkeurigheid in bepalen van de buitendiameter. De toevallige fout bij een debietmeting van vijzelgemaal is weergegeven met vergelijking B4.2.

$$X_Q = \pm \sqrt{X_f^2 + X_q^2 + X_n^2 + (3 \cdot X_D)^2} \quad (\text{B4.2})$$

Waarin:

X_Q	: toevallige fout in debietmeting	(%)
X_f	: onnauwkeurigheid in de efficiency-factor	(%)
X_q	: fout in vaststellen van de vijzelcoëfficiënt door de fabrikant	(%)
X_n	: fout in de meting van het toerental	(%)
X_D	: Onnauwkeurigheid in D als gevolg van afwijkingen in de maatvoering en de slijtage	(%)

Hiernaast zal zich een systematische fout voordoen, als de benedenwaterstand beneden het vulpunt, of de bovenwaterstand boven het tegenmaalpunt staat.

Bij pompgemalen is de totale meetfout afhankelijk van de wijze waarop het debiet wordt bepaald. De volgende bronnen van onzekerheden komen voor bij pompgemalen:

- Onzekerheid in meting van de opvoerhoogte;
- Onzekerheid in meting van toerental (t.g.v. toerenwisseling);
- Onzekerheid in berekening van energieverliezen.

Ook hier kunnen systematische fouten zich voordoen.

C) Meetlocaties Monitoring Stroomgebieden

Zowel voor vijzel- als voor pompgemalen is er geen gedetailleerde informatie bekend betreffende de onzekerheid bij de debietmetingen. Deze studie zal daarom terugvallen op literatuurgegevens.

Vijzelgemalen (Krimpenerwaard)

In het handboek worden de volgende inschattingen gedaan betreffende onzekerheden in debietsbepaling met een vijzelgemaal. De efficiency-factor heeft een onzekerheid van 2 tot 5%, onnauwkeurigheid vijzelcoëfficiënt 2%, onnauwkeurigheid in meting toerental 1 à 2% en onnauwkeurigheid in bepalen van D 0.5%. De combinatie van deelfouten levert een totale toevallige fout op van 3 tot 6%.

Pompgemalen (Krimpenerwaard en Quarles van Ufford)

Bij het bepalen van de toevallige fout bij pompgemalen dient onderscheid te worden gemaakt van de methodiek waarmee de afvoerrelatie is vastgesteld. Indien de afvoerrelatie is vastgesteld met een pompkarakteristiek of gemaalkarakteristiek (waarbij het verschil in buiten- en binnenpeil is gemeten), dan is de toevallige fout als gevolg van onzekerheden in de opgestelde pompcurve, onzekerheden in de opvoerhoogte en onzekerheden in het vaststellen van het toerental ingeschat op 3 tot 5%. Indien de afvoerrelatie is vastgesteld met een gemaalkarakteristiek waarbij de energieverliezen worden berekend dan wordt de toevallige fout ingeschat op 4 tot 10%. De toevallige fout wordt ingeschat op 4 tot 8% als de gemaalkarakteristiek is vastgesteld met behulp van kalibratie (velocity-area).

Bijlage 5 Akoestisch debietmeetmethode

A) Beschrijving

Het principe van akoestische debietmeting berust op het meten van de stroomsnelheid met behulp van geluidsgolven en het registreren van het doorstromend oppervlak. Een flowmeter bestaat uit twee delen: een zender en een ontvanger. De zender zendt een ultrasoon geluid met een bepaalde frequentie. Deeltjes en luchtbelletjes die zich in de vloeistof bevinden reflecteren het geluid. Bewegende deeltjes reflecteren het geluid waarbij de frequentie van het geluid zich wijzigt (Doppler effect), hetgeen geregistreerd wordt door de ontvanger. Hieruit wordt de stroomsnelheid bepaald.

Het debiet wordt vastgesteld door de vermenigvuldiging van de gemiddelde stroomsnelheid maal het doorstromend oppervlak. Eventueel kan er gebruik worden gemaakt van een correctiefactor.

B) Betrouwbaarheid

Deze meettechniek is dus afhankelijk van de reflectie van geluid. Voor een nauwkeurige debietsbepaling zijn er dus deeltjes of gasbelletjes in de vloeistof nodig. Heldere vloeistoffen zonder deeltjes en/of gasbelletjes zijn met deze meettechniek niet of nauwelijks te meten.

Bij debietbepalingen aan de hand van dopplermetingen wordt aangenomen dat de reflecterende deeltjes en/of gasbelletjes zich met dezelfde snelheid zich voortbewegen als de vloeistof, hetgeen in de praktijk nooit gehaald wordt. Deeltjes zullen doorgaans de neiging hebben uit te zakken, en gasbelletjes willen omhoog.

Wanneer er veel deeltjes en/of gasbelletjes zal de hoeveelheid secundaire en méérvoudige reflecties toenemen. Dit zal weer effect hebben op de nauwkeurigheid bij het bepalen van de stroomsnelheid.

C) Meetlocaties Monitoring Stroomgebieden

Zeegserloopje (Drentse Aa)

De kwantiteitsmetingen ter plaatse van het Zeegserloopje worden uitgevoerd met ultrasone sensor (Stingray level-velocity logger van Greyline instruments) die in het midden van het Zeegserloopje is bevestigd op een betonplaat. Deze sensor meet zowel de waterhoogte als de stroomsnelheid in een duiker onder een weg.



Afbeelding B5.1: Meetlocatie Zeegserloopje (waterschap Hunze en Aa's)

Het doorstromend oppervlak is aan beide zijden begrensd door een muur en aan de onderzijde van het doorstromend oppervlak is een betonnen plaat neergelegd. Door sedimentatie zal het doorstromend oppervlak echter nog wel aan kleine veranderingen onderhevig zijn. Tijdens veldbezoek is geconstateerd dat de betonnen plaat scheef in het dwarsprofiel ligt. Dit zal leiden tot een scheve verdeling van de stroomsnelheid in het dwarsprofiel, hetgeen tot een systematische fout zal leiden in de debietbepaling.

In de praktijk zal een debietsbepaling met behulp van een akoestische methode een onzekerheid hebben van ca. 10 à 12% (Boiten et al., 1995, ISO).

Dopplermetingen (Krimpenervaard)

In de praktijk zal een debietbepaling met behulp van dopplermetingen een onzekerheid hebben van ca. 10 à 12% (Boiten et al., 1995, ISO).