stowa

HANDBOEK
DEBIETMETEN IN OPEN WATERLOPEN

RAPPORT 2009 41

stowa

HANDBOEK DEBIETMETEN IN OPEN WATERLOPEN

STOWA 2009 41

ISBN 978.90.5773.450.2

Publicaties van de STOWA kunt u bestellen op www.stowa.nl

stowa@stowa.nl www.stowa.nl
TEL 030 232 11 99 FAX 030 231 79 80
Arthur van Schendelstraat 816
POSTBUS 8090 3503 RB UTRECHT

COLOFON

Utrecht, oktober 2009

BEGELEIDINGSCOMMISSIE

Gert van den Houten (voorzitter, Waterschap Rijn en IJssel)
Pieter Filius (Waterschap Velt en Vecht)
Anton Bartelds (Waterschap Hunze en Aa's)
Wubbo Boiten (mede-auteur vorige handboek)
Michelle Talsma (STOWA).

AUTEURS Hans Hartong (HKV lijn in water)
Paul Termes (HKV lijn in water)

WIJ DANKEN DE VOLGENDE PERSONEN VOOR HUN BIJDRAGE AAN HET HANDBOEK

Rutger van Ouwerkerk (Waterschap Brabantse Delta)
Dirk Fleerakkers (Waterschap de Dommel)
René van der Zwan (Hoogheemraadschap van Rijnland)
Ans Elffrink (Waterschap Veluwe)
Allian Mulder (Waterschap Noorderzijlvest)
Gerrit Velten (Waterschap Regge en Dinkel)
Toon Basten (Waterschap Peel en Maasvallei)
Marijke Visser (Waterschap Zuiderzeeland)
Peter Hulst (Waterschap Roer en Overmaas)
Rolf van der Veen (Rijkswaterstaat)
Jan Tekstra (Rijkswaterstaat)
Herman Peters (Rijkswaterstaat)
Bart Spelt (Rijkswaterstaat)
Piet Lievense (Rijkswaterstaat)
Peter Beuse (Rijkswaterstaat)
Arjen Ponger (Rijkswaterstaat)
Bert Go (Rijkswaterstaat)
Peter Heinen (Rijkswaterstaat)
Anton Dommerholt (Wageningen Universiteit)
Hans ten Kate (Ten Kate-Kool)
Peter Meijer (Aquavision)
Sicco Kamminga (Nortek)
Bas Blok (Deltares)
Kobus van der Mooren (Elster-Instromet)

DRUK Kruyt Grafisch Adviesbureau

STOWA rapportnummer 2009-41
ISBN 978.90.5773.450.2

TEN GELEIDE

In 1994 is het “Handboek Debietmeten in open waterlopen” verschenen bij de STOWA. Het Platform Monitoring Waterkwantiteit heeft namens de waterschappen de wens geuit om het handboek te herzien en van het handboek een actuele, praktische en laagdrempelige kennisbron te maken voor alle ontwerpers en beheerders van debietmeetstations in ons land. Hierdoor kunnen debietmeetstations uniformer en kwalitatief beter worden ontworpen en gebouwd.

Het Platform Monitoring Waterkwantiteit is een gezamenlijk initiatief van de waterschappen met als doel de informatie-uitwisseling rond de monitoring van waterkwantitatieve meetgegevens te bevorderen. Rijkswaterstaat heeft zich bij dit initiatief aangesloten.

Het thans voorliggende handboek behandelt alle voor ons land gangbare incidentele en continue debietmeetmethoden, zowel in theorie als in de praktijk. Speciale aandacht wordt gegeven aan criteria waarmee voor specifieke situaties de meest geschikte debietmeetmethode kan worden gekozen. Daarnaast geeft het handboek de randvoorwaarden die horen bij een succesvolle inrichting en beheer van debietmetingen en gaat in het bijzonder in op de organisatorische aspecten van het proces van inwinning en beheer.

Wij hopen dat dit handboek voorziet in de behoefte om te komen tot kwalitatief goede debietmetingen die bijdragen aan een goed functioneren van onze watersystemen.

oktober 2009

De directeur van de STOWA
Ir J.M.J. Leenen

DE STOWA IN HET KORT

De Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer, kortweg STOWA, is het onderzoeksplatform van Nederlandse waterbeheerders. Deelnemers zijn alle beheerders van grondwater en oppervlaktewater in landelijk en stedelijk gebied, beheerders van installaties voor de zuivering van huishoudelijk afvalwater en beheerders van waterkeringen. Dat zijn alle waterschappen, hoogheemraadschappen en zuiveringsschappen en de provincies.

De waterbeheerders gebruiken de STOWA voor het realiseren van toegepast technisch, natuurwetenschappelijk, bestuurlijk juridisch en sociaal-wetenschappelijk onderzoek dat voor hen van gemeenschappelijk belang is. Onderzoeksprogramma's komen tot stand op basis van inventarisaties van de behoefte bij de deelnemers. Onderzoekssuggesties van derden, zoals kennisinstituten en adviesbureaus, zijn van harte welkom. Deze suggesties toetst de STOWA aan de behoeften van de deelnemers.

De STOWA verricht zelf geen onderzoek, maar laat dit uitvoeren door gespecialiseerde instanties. De onderzoeken worden begeleid door begeleidingscommissies. Deze zijn samengesteld uit medewerkers van de deelnemers, zonodig aangevuld met andere deskundigen.

Het geld voor onderzoek, ontwikkeling, informatie en diensten brengen de deelnemers samen bijeen. Momenteel bedraagt het jaarlijkse budget zo'n 6,5 miljoen euro.

U kunt de STOWA bereiken op telefoonnummer: 030 -2321199.
Ons adres luidt: STOWA, Postbus 8090, 3503 RB Utrecht.
Email: stowa@stowa.nl.

Website: www.stowa.nl

HANDBOEK DEBIETMETEN IN OPEN WATERLOPEN

INHOUD

		TEN GELEIDE	
		STOWA IN HET KORT	
		DEEL A: ALGEMEEN	1
1		INLEIDING	3
	1.1	Weten alvorens te meten	3
	1.2	Doel en scope van het handboek	4
	1.3	Ten geleide	5
2		BEGRIPPEN	6
	2.1	Basisbegrippen	6
	2.2	Onnauwkeurigheid	8
	2.3	Betrouwbaarheid	9
	2.4	Beschikbaarheid	10
	2.5	ISO-standaarden	11
	2.6	Referentiemethoden	11
3		ONTWIKKELING VAN HET DEBIETMETEN	14
	3.1	Historie tot nu toe	14
	3.2	De meetmethoden op een rij	17

DEEL B: THEORIE DEBIETMETEN 21

4 MEETLOCATIE IN OPEN WATERLOPEN 23
4.1 Randvoorwaarden meetopstelling 25
4.2 Verstorende effecten 27

5 INCIDENTELE DEBIETMEETMETHODEN 28
5.1 Standaard velocity-area methode 29
5.1.1 Doorstroomoppervlak in meetraai 29
5.1.2 Snelheidsverdeling in verticaal 29
5.1.3 Snelheidsverdeling in meetraai 31
5.1.4 Bepalen debiet door meetraai 33
5.1.5 Onnauwkeurigheid debiet 35
5.1.6 Geschikte meetinstrumenten 36
5.1.7 Mogelijkheden en beperkingen 37
5.1.8 Voorbeelden 38
5.1.9 ISO-standaarden 38
5.2 Aangepaste velocity-area methoden 39
5.2.1 Moving-boat methode 39
5.2.2 Deflectie methode 41
5.2.3 Drijvermetingen 41
5.2.4 Onnauwkeurigheid debiet 43
5.2.5 Geschikte meetinstrumenten 43
5.2.6 Mogelijkheden en beperkingen 43
5.2.7 Voorbeelden 43
5.2.8 ISO-standaarden 44
5.3 Verhangmethode 45
5.3.1 Meetprincipe 45
5.3.2 Bepaling debiet 47
5.3.3 Geschikte meetinstrumenten 47
5.3.4 Onnauwkeurigheid debiet 48
5.3.5 Mogelijkheden en beperkingen 48
5.3.6 Voorbeelden 48
5.3.7 ISO-standaarden 48
5.4 Verdunningsmethode 49
5.4.1 Principe verdunningsmethode en bepaling debiet 49
5.4.2 Toepassen verdunningsmethode 51
5.4.3 Geschikte tracers 53
5.4.4 Geschikt meettraject 53
5.4.5 Onnauwkeurigheid debiet 54
5.4.6 Mogelijkheden en beperkingen 55
5.4.7 Voorbeelden 55
5.4.8 ISO-standaarden 55
5.5 Veldcalibratie van afvoerkunstwerken 56
5.5.1 Geschikte meetinstrumenten 57
5.5.2 Onnauwkeurigheid 57
5.5.3 Mogelijkheden en beperkingen 57
5.5.4 Voorbeelden 58
5.5.5 ISO-standaarden 58

6		CONTINUE DEBIETMEETMETHODEN	59
	6.1	Meetstuwen	60
		6.1.1 Indeling van stuwen	61
		6.1.2 Classificatie van meetstuwen	62
		6.1.3 Afvoer en waterstand	63
		6.1.4 Typen meetstuwen	65
		6.1.5 Nulpuntsbepaling meetstuwen	66
		6.1.6 Klepstuwen	66
		6.1.7 Onnauwkeurigheid	71
		6.1.8 Geschikte meetinstrumenten	71
		6.1.9 Mogelijkheden en beperkingen	71
		6.1.10 Voorbeelden	71
		6.1.11 ISO-standaarden	74
	6.2	Meetgoten	75
		6.2.1 Inleiding	75
		6.2.2 Typen meetgoten	75
		6.2.3 Onnauwkeurigheid	76
		6.2.4 Geschikte meetinstrumenten	77
		6.2.5 Mogelijkheden en beperkingen	77
		6.2.6 Voorbeelden	77
		6.2.7 ISO-standaarden	78
	6.3	Looptijdverschilmeting	79
		6.3.1 Inleiding	79
		6.3.2 Bepalen stroomsnelheid en debiet	80
		6.3.3 Onnauwkeurigheid	81
		6.3.4 Geschikte meetinstrumenten	82
		6.3.5 Mogelijkheden en beperkingen	82
		6.3.6 Voorbeelden	84
		6.3.7 ISO-standaarden	87
	6.4	Snelheidsmeting/Dopplermeting	88
		6.4.1 Inleiding	88
		6.4.2 Bepalen stroomsnelheid en debiet	88
		6.4.3 Onnauwkeurigheid	89
		6.4.4 Geschikte meetinstrumenten	89
		6.4.5 Mogelijkheden en beperkingen	89
		6.4.6 Voorbeelden	92
		6.4.7 ISO-standaarden	93
		6.5.8 Dopplerradarsnelheidsmeting	94
	6.5	Relatie debiet en waterstand	95
		6.5.1 Inleiding	95
		6.5.2 Principe en locatie	95
		6.5.3 Eenduidige Qh-relatie	97
		6.5.4 Extrapolatie van afvoerrelaties	99
		6.5.5 Niet-éénduidige afvoerrelaties	100
		6.5.6 Grote rivieren: Qf-relaties	101
		6.5.7 Onnauwkeurigheid	102
		6.5.8 Geschikte meetinstrumenten	103
		6.5.9 Mogelijkheden en beperkingen	103
		6.5.10 Voorbeelden grote rivieren	104

		6.5.11 Voorbeelden kleinere waterlopen	106
		6.5.12 ISO-standaarden	108
	6.6	Relatie debiet en verval	109
		6.6.1 Inleiding	109
		6.6.2 Pompgemalen	110
		6.6.3 Vijzels	113
		6.6.4 Inlaat- en spuiconstructies: verticale schuiven met onderstort	117
		6.6.5 Duikers	124
		6.6.6 Afsluiters	127
		6.6.7 Hevels en sifons	130
7		MEETINSTRUMENTEN	131
	7.1	Vervalmetingen meetstuwen	131
		7.1.1 Meetprincipe	131
		7.1.2 Ongestuwde en gestuwd afvoer	132
		7.1.3 De horizontale lange overlaat	133
		7.1.4 De V-vormige lange overlaat	135
		7.1.5 De Rehbock overlaat en Thomson overlaat	136
		7.1.6 Klepstuwen	137
		7.1.7 Betondrempels met vellingkant	140
		7.1.8 De Rossum-stuw	143
	7.2	Meetgoten/venturi's	146
		7.2.1 Meetgoten	146
		7.2.2 Khafagi venturi's	148
	7.3	Stroomsnelheidsmeters	150
		7.3.1 Meetprincipe	150
		7.3.2 Akoestische snelheidsmeters (looptijdverschilprincipe)	150
		7.3.3 Akoestische snelheidsmeters (Dopplerverschuiving)	154
		7.3.4 Radar snelheidsmeters	160
		7.3.5 Elektromagnetische snelheidsmeters	161
		7.3.6 Mechanische snelheidsmeters	162
	7.4	Waterstandsmetingen	163
		7.4.1 Peilbuis (Stilling well)	164
		7.4.2 Overzicht waterstandsmeters	165
		7.4.3 ISO-standaarden	168
	7.5	Diepte- en positiemetingen	169
		7.5.1 Echoloding (single-beam)	169
		7.5.2 DGPS	170
		7.5.3 Bottom-track	171
		7.5.4 ISO-standaarden	171
8		MEETONNAUWKEURIGHEID	172
	8.1	Soorten onnauwkeurigheid	172
	8.2	Onnauwkeurigheid meetinstrumenten	174
	8.3	Onnauwkeurigheid meetmethode	175
	8.4	Onnauwkeurigheid verwerkingsmethode	176
	8.5	Bepalen onnauwkeurigheid debiet	177
	8.6	Onnauwkeurigheid bij gebruik K-factormethode	180
	8.7	Meetopzet bij gewenste onnauwkeurigheid debiet	182

DEEL C: PRAKTIJK 185

9 KEUZE 186
9.1 Selectieproces 187
9.2 Meetdoel en meetonnauwkeurigheid 189
9.3 Keuze meetmethode in relatie tot meetlocatie 190
9.4 Toepassingsoverzicht per meetmethode 191
9.5 Toetsing en uitwerking meetopstelling 192

10 PRAKTIJKASPECTEN 204
10.1 Incidentele meting 205
10.1.1 Ontwerpaspecten tijdelijke meetopstelling 205
10.1.2 Voorbereiding meten in een tijdelijke meetopstelling 207
10.1.3 Het meten in een tijdelijke meetopstelling 209
10.1.4 Uitvoering van een tijdelijke meting 212
10.1.5 Onderhoud tijdens de tijdelijke meting 214
10.1.6 Verwerking meetgegevens 214
10.2 Continue meting 215
10.2.1 Ontwerpaspecten vaste meetopstelling 215
10.2.2 Voorbereiding en realisatie van een vaste meetopstelling 218
10.2.3 Het meten met een vaste meetopstelling 220
10.2.4 Onderhoud van een vaste meetopstelling 222
10.3 Vispasseerbaarheid 223
10.3.1 FishCounter 225

11 KOSTENSOORTEN 227
11.1 Inrichtingskosten continu debietmeetstation 227
11.1.1 Bijzondere bijkomende kosten 229
11.2 Exploitatiekosten continu debietmeetstation 229
11.3 Kosten van incidentele metingen 229
11.3.1 In-situ metingen 229
11.3.2 Capaciteitsmeting grotere kunstwerken 230

12 ORGANISATIE 231
12.1 Werkprocessen 231
12.2 Organisatorische aspecten 231
12.2.1 Planning en realisatie 231
12.2.2 Onderhoud en beheer 233
12.2.3 Personele aspecten 234
12.3 Veiligheid 234

LITERATUUR 235
SYMBOLENLIJST 237
VERKLARENDE WOORDENLIJST 240

BIJLAGEN 243
A NEN/ISO STANDAARDEN 244
B WEERSTANDSCOËFFICIËNTEN WATERLOPEN 245
C VOORBEELDEN MEETMETHODEN 248

DEEL A: ALGEMEEN

1

INLEIDING

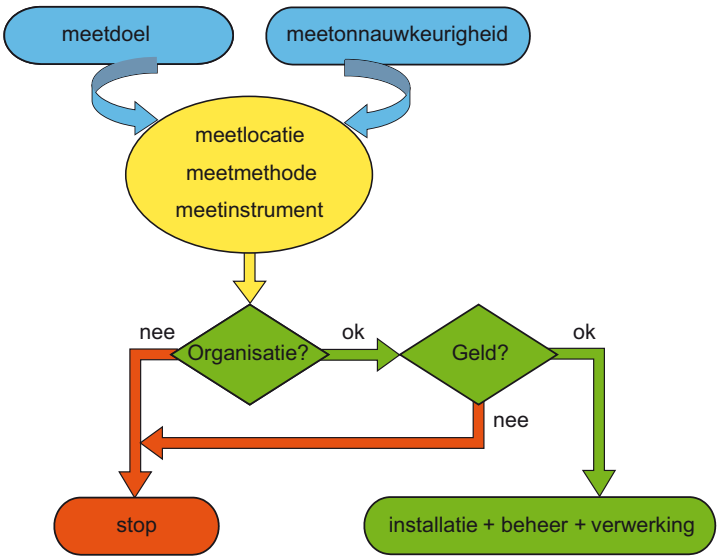
1.1 WETEN ALVORENS TE METEN

"Meten is weten" is een veelgebruikte zegswijze om het belang van het meten te onderstrepen. Maar wie werkelijk gaat meten moet de volgorde van de zegswijze omdraaien en zich eerst een paar vragen stellen: waarom wil ik "weten", wat wil ik "weten", hoe goed wil ik "weten" en tenslotte de praktische vraag: waar en hoe moet ik "meten"? De antwoorden op deze vragen vinden we doorgaans terug in het meetplan; het meetplan beschrijft onder andere de informatiebehoefte en de monitoring cyclus.

Als we het realiseren van een debietmeting zien als een proces, dan is het meetdoel de invoer daarvoor. Inzicht krijgen in het dagelijks waterbeheer, het opstellen en sluitend krijgen van een waterbalans, de implementatie van een waterakkoord, de calibratie van een waterbewegingsmodel of de Kaderrichtlijn Water zijn voorbeelden van zaken die het meetdoel bepalen. Daarnaast geldt als invoer de gewenste nauwkeurigheid van de meting, in het navolgende uitgedrukt als de maximaal toelaatbare meetonnauwkeurigheid. Meetdoel en meet-onnauwkeurigheid hangen met elkaar samen en het heeft geen enkele zin een debietmeting te realiseren als er geen duidelijk beeld is over de toelaatbare meetonnauwkeurigheid.

Meetdoel en meetonnauwkeurigheid leiden samen tot de opeenvolgende keuze van de meetlocatie, de meetmethode, het meetinstrument en de meetopzet. Voorwaarde voor de uiteindelijke realisatie van de meting is een goede organisatorische inbedding, niet alleen van de totstandkoming van het meetpunt, maar vooral ook van het onderhoud en beheer van het meetpunt. Zijn tenslotte de financiële middelen voor zowel de realisatie als het onderhoud en beheer beschikbaar, dan kan het meetpunt worden ingericht, de meting worden uitgevoerd en de inwinning en verwerking van meetgegevens tot de gewenste informatie plaatsvinden.

FIGUUR 1-1 KEUZEPROCES



1.2 DOEL EN SCOPE VAN HET HANDBOEK

Het handboek dient te worden gebruikt als praktische en laagdrempelige kennisbron voor alle ontwerpers en beheerders van debietmeetnetten in Nederland. De basis voor het handboek vormt het in 1994 door de STOWA uitgebrachte *"Handboek Debietmeten in open waterlopen"*. Dat handboek is met deze uitgave herzien, geactualiseerd en aangepast aan de gebruikswensen anno 2009.

De inhoud betreft het debietmeten in open waterlopen, inclusief alle bijkomende directe metingen van waterstanden, stuwstanden, schuifstanden en stroomsnelheden. Debietmetingen bij gemalen behoren ook tot de inhoud van dit handboek.

Uitgangspunt is de Nederlandse zoetwaterhydrologie, zowel die van het regionale watersysteem als het rivierensysteem. Het meten in estuariene of brakwatersystemen is geen onderdeel van dit handboek. De debietmeetmethoden en hun inrichting en installatie zijn gebaseerd op de in Nederland gangbare praktijk en gericht op de daarin voorkomende waterhuishoudkundige objecten.

Niet tot het handboek behoren debietmetingen in gesloten leidingen, het meten van grondwaterstanden en het meten van neerslaghoeveelheden. Waterstandsmetingen worden alleen behandeld voor zover deze onderdeel zijn van de meetinrichting.

FOTO 1-1 **MEETSTUW LEERINKBEEK/HUPSELSE BEEK (FOTO: WS RIJN EN IJSSEL)**

1.3 TEN GELEIDE

In dit handboek zijn achtergrond informatie en praktische informatie gescheiden. Het handboek bestaat daarom uit drie delen:

DEEL A: ALGEMEEN 1
DEEL B: THEORIE 21
DEEL C: PRAKTIJK 185

De waterbeheerder die precies weet wat hij of zij wil meten, maar die met allerlei praktische vragen wordt geconfronteerd, vindt zijn of haar weg vooral in het tweede deel van het handboek.
Daarnaast is er de waterbeheerder, voor wie een meetlocatie niet per sé een vaststaand punt is, maar meer een idee van “ik wil ergens meten”. Deze lezer zal beginnen in hoofdstuk 9 van deel C en vervolgens zijn kennis verzamelen in zowel het theoretische als het praktische deel.

Er is een samenhang tussen meetlocatie, meetmethode, instrumentkeuze en meet-onnauwkeurigheid. De lezer wordt deze samenhang aangeboden van grof naar fijn, dat wil zeggen van meetpunt als geheel inzoomend op uiteindelijk de methode, het instrument en de nauwkeurigheid. In de hoofdstukindeling staan deze hoofdstukken na elkaar. Als lezer mag je best een bladzijde terugslaan.

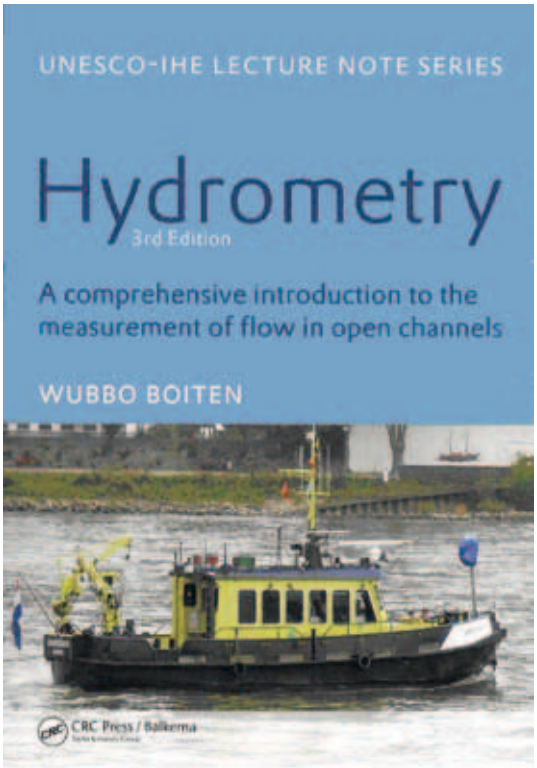
Voorbeelden en toelichtingen bij de tekst zijn weergegeven in een tekstbox:

Voorbeeld/toelichting

Achtergrondinformatie en theoretische basiskennis wordt alleen aangeboden voor zover dit noodzakelijk is voor een goed begrip. Voor wie het allemaal echt wil weten en/of zaken zoekt die in het onderhavige boek niet aan de orde komen, wordt verwezen naar [Lit. 24]:

Hydrometry
3rd edition
A comprehensive introduction
to the measurement
of flow in open channels
W. Boiten
WUR/UNESCO-IHE

Uitgegeven in 2008 door:
CRC Press/Balkema, Leiden
ISBN: 978-0-415-46763-6



2

BEGRIPPEN

Dit hoofdstuk geeft uitleg over een aantal basisbegrippen. Meetnet, meetpunt, meetlocatie, meetinrichting, meetopstelling, meting: met deze termen wordt soms hetzelfde bedoeld, maar meestal juist niet. Hieronder de definitie van deze begrippen, zoals deze in dit handboek worden gehanteerd.

Verder wordt ingegaan op het onderscheid tussen nauwkeurigheid, betrouwbaarheid en beschikbaarheid in relatie tot meten. Ook wordt de betekenis en het belang van referentiemethoden en ISO-standaarden aangegeven.

2.1 BASISBEGRIPPEN

Hieronder de uitleg over de belangrijkste basisbegrippen uit dit handboek. Achterin bevindt zich een verklarende woordenlijst van alle technische begrippen uit dit handboek.

METEN/METING

Het geheel van handelingen en processen om een fysisch verschijnsel of een aspect daarvan te bepalen in de vorm van een representatief getal en dit vast te leggen, teneinde kennis over het verschijnsel te verkrijgen.
Een debietmeting bestaat in die zin niet. Immers het debiet wordt niet gemeten, maar een fysisch verschijnsel dat met het debiet in verband kan worden gebracht, bijvoorbeeld de stroomsnelheid.

Het aflezen van een peilschaal en het opschrijven van de waarde.

MEETWAARDE

Het representatief getal van het gemeten fysisch verschijnsel.

De gemeten waterstand bedraagt NAP −0,93 m

MEETNET

Het geheel van meetpunten.

Het hydrologisch meetnet is een samenhangend geheel van meetpunten of meetstations voor de neerslag, waterstanden en debieten. In veel gevallen worden ook grondwaterstanden, bodemvocht en waterkwaliteitsparameters gemeten.

MEETPUNT

Strikt genomen: het punt waar de meting verricht wordt, maar dan tegenwoordig meestal in abstracte zin als onderdeel van een informatica-omgeving. Een meetpunt wordt beschreven met een meetpuntcode, RD-coördinaten, de meetgrootheid, de meetfrequentie enz.

Bijvoorbeeld volgens het Aquo-gegevensmodel, daarin is overigens een meetpunt synoniem met een monsterpunt.

Aquo gegevensmodel, entiteit meetpunt

- Afstandsaanduiding meetpunt
- Archiefnummer dossier meetpunt
- Datum einde geldigheid
- Datum ingebruikname meetpunt
- Identificatie meetpunt
- Indicatie aanwezige debietmeting
- Indicatie geautomatiseerd ja/nee
- Meetfrequentie
- Meetpunt soort
- Meetrelatie voor meetpunt
- Meetsysteem
- Naam meetpunt
- Omschrijving meetpunt
- Opmerking omtrent meetpunt
- Relatieve ligging meetpunt
- Soort registratie
- Status meetpunt
- X-coordinaat
- Y-coordinaat
- Z-coordinaat

MEETLOCATIE

Lijn, vlak of punt waar de meetwaarde wordt opgenomen. Voor een debietmeting is dat altijd de plaats van de meetopstelling eventueel in samenhang met een kunstwerk.

Meetlocatie = meetopstelling + kunstwerk + watergang + geografische ligging

MEETMETHODE

De wijze van meten en berekenen van de te bepalen grootheid. Voor het meten van debieten omvat de methode het geheel van het meten van de fysische grootheid (meestal waterstand en/of stroomsnelheid) en de verwerking van de metingen tot een debietwaarde.

In dit handboek wordt onderscheid gemaakt tussen incidentele en continue debietmeetmethoden.

Incidentele debietmeetmethoden

- gestandaardiseerde meetstuwen
- niet-gestandaardiseerde meetstuwen
- meetgoten
- de looptijdverschilmethode
- de Dopplermethode
- de methode op basis van de relatie debiet en waterstand
- de methode op basis van de relatie debiet en verval

Continue debietmeetmethoden

- Standaard velocity-area methode
- Aangepaste velocity-area methode, zoals de moving-boat methode
- Verhangmethode
- Verdunningsmethode

MEETOPSTELLING

Het geheel van de meetconstructie, de meetinstrumenten, de bevestigingsmiddelen en de bijbehorende energievoorziening. Meetopstellingen zijn er in vaste en in varende vorm.

Meetopstelling = meetconstructie + meetinstrumenten + energievoorziening

MEETINSTRUMENT

Instrument/apparaat dat het te meten fysische verschijnsel opneemt met een sensor en het waargenomen in een elektrisch of digitaal signaal omzet.

Meetinstrument = houder + sensor + signaalgever

DATA-ACQUISITIE

Onder data-acquisitie wordt in dit handboek verstaan het geheel van processen met als doel het kenbaar maken van de meting aan de directe gebruiker.

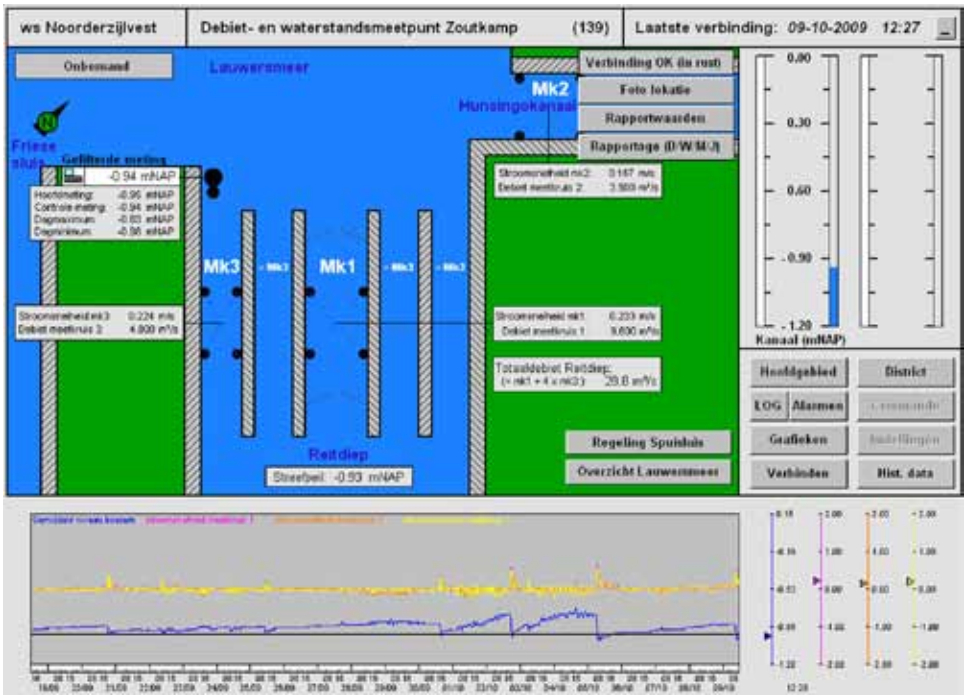
Data-acquisitie = meting + signalering +filtering + registratie + datacommunicatie + telemetrie + centrale opslag + presentatie

DATAVERWERKING

Dataverwerking is het geheel van processen en handelingen met als doel de ingewonnen en centraal opgeslagen gegevens te exporteren en vervolgens te controleren, te valideren en op te slaan in een centraal bestand van reeksen van meetdata.

Dataverwerking = export + controle + validatie + centrale opslag als meetreeks

FIGUUR 2-1 DEBIETMETING ZOUTKAMP OP WABIS- PRESENTATIESCHERM LAUWERSMEER (WS NOORDERZIJLVEST)



2.2 ONNAUWKEURIGHEID

Hoewel we gewend zijn te spreken van de “nauwkeurigheid” van een meting houden we in dit handboek toch liever het formeel correcte begrip “onnauwkeurigheid” aan. De onnauwkeurigheid hangt samen met de onzekerheidsmarge, waarmee de waarde van de grootheid is of kan worden bepaald. Daarnaast kennen we het begrip “onderscheidend vermogen” of resolutie: dat is de kleinste variatie van de te meten grootheid die nog wordt weergegeven. De onnauwkeurigheid kan als absolute waarden worden weergegeven (bijvoorbeeld 0,05 m/s) of als relatieve waarde (bijvoorbeeld 0,2% van de gemeten snelheid).

De niveaumeting heeft een onnauwkeurigheid van +/- 0,5% met een onderscheidend vermogen van 1 mm.

De onnauwkeurigheid van een meting wordt beïnvloed door systematische fouten en toevallige fouten. Bij systematische fouten is er sprake van een regelmatige afwijking van de werkelijke waarde. Dit soort fouten zijn typisch voor meetinstrumenten, meetopstellingen en de verwerking van meetresultaten. Toevallige fouten zijn onvoorspelbaar en hebben meestal een fysische oorzaak zoals; turbulente stroming, (lucht)drukvariaties, wind, enz.

De onnauwkeurigheid van een debietmeting, dat wil zeggen: de meetonnauwkeurigheid, is de verzameling van verschillende foutenbronnen:

Foutenbronnen meetonnauwkeurigheid debietmeting:
- Onnauwkeurigheid van meetinstrumenten, een eigenschap van het apparaat.
- Onnauwkeurigheid van de meetmethode, als gevolg van de uitvoering van de meetopstelling.
- Onnauwkeurigheid van de meetmethode, als gevolg van onvoldoende onderhoud aan de meetopstelling of instabiliteit van de meetsectie.
- Onnauwkeurigheid van de verwerkingsmethode, als gevolg van de wijze waarop gemeten grootheden worden verwerkt tot een debiet (o.a. getalconversies).

Als het om de debietmeting gaat dan zijn dit de belangrijkste foutenbronnen, maar als het om de volumina gaat, dan gaat ook het aspect tijd meespelen en komen er nog een paar bij:

Foutenbronnen onnauwkeurigheid hoeveelheidsbepaling uit debietmetingen:
- Onnauwkeurigheid als gevolg van de meetfrequentie van de debietmeting
- Onvolledige debietmeting (te laat beginnen/ te vroeg ophouden)
- Afwijkingen in de tijdsynchronisatie van verschillende dataverwerkende systemen
- Verlies van datanauwkeurigheid als gevolg van onvoldoende precisie bij de opslag en communicatie van grote getallen
- Onnauwkeurigheid als gevolg van filtering van meetwaarden.

Zoals al eerder gezegd: meetdoel en meetonnauwkeurigheid hangen met elkaar samen. Het heeft geen enkele zin een nauwkeurige debietmeting te realiseren als daarna de daarvan afgeleide hoeveelhettden met grote fouten tot stand komen. De volgende begrippen zijn gerelateerd aan onnauwkeurigheid: reproduceerbaarheid en betrouwbaarheid.

2.3 BETROUWBAARHEID

De betrouwbaarheid van een *meetinstrument* kan op verschillende wijzen worden aangegeven. Een definitie luidt: *betrouwbaarheid geeft de mate aan waarin meetresultaten een afspiegeling zijn van de te meten variabele*. Een andere definitie luidt: *betrouwbaarheid geeft de mate aan waarin metingen vrij zijn van de invloed van toevallige factoren*. Beide definities komen op hetzelfde neer.

In dit handboek gebruiken we de volgende begrippen:

REPRODUCEERBAARHEID

Dit begrip wordt gebruikt bij herhaalde metingen met dezelfde meetopstelling. Als met een meetmethode onder dezelfde stromingsomstandigheden in een later stadium een vergelijkbaar resultaat wordt verkregen, spreekt men van een goede reproduceerbaarheid. De grootte

van het toegestane verschil in uitkomst moet van tevoren worden gedefinieerd om te weten of het resultaat van een meting goed of niet goed wordt gereproduceerd.

> De duikers hadden de in de fabriek geijkte meters zorgvuldig uitgepakt. Na de lunchpauze, lekker buiten in het zonnige zomerse weer in de schaduwloze omgeving, werden ze nauwkeurig onder water aangebracht. Het heeft nog weken geduurd voordat de oorzaak van de geconstateerde meetafwijkingen konden worden opgespoord. De meters reproduceerden niet juist; de fabrieksinstellingen waren door de zon verlopen.

BETROUWBAARHEID

Dit begrip wordt gebruikt bij herhaalde metingen met verschillende meetopstellingen. Als met een andere meetmethode onder dezelfde stromingsomstandigheden in een later stadium een vergelijkbaar resultaat wordt verkregen, spreekt men van een goede betrouwbaarheid. De grootte van het toegestane verschil in uitkomst moet van tevoren worden gedefinieerd om te weten of het resultaat van een meting wel of niet betrouwbaar is.

Bovengenoemde begrippen “reproduceerbaarheid” en “betrouwbaarheid” worden ook wel samengebracht onder het begrip “statistische betrouwbaarheid”: dit betekent dat wanneer een meting meerdere malen gedaan wordt, er weinig verschil is tussen de gemeten waarden.

Daarnaast is er het begrip “technische betrouwbaarheid”. Technische betrouwbaarheid houdt in dat een product lange tijd blijft voldoen aan de gebruikseisen. Hiervoor gebruiken we liever de term “beschikbaarheid”.

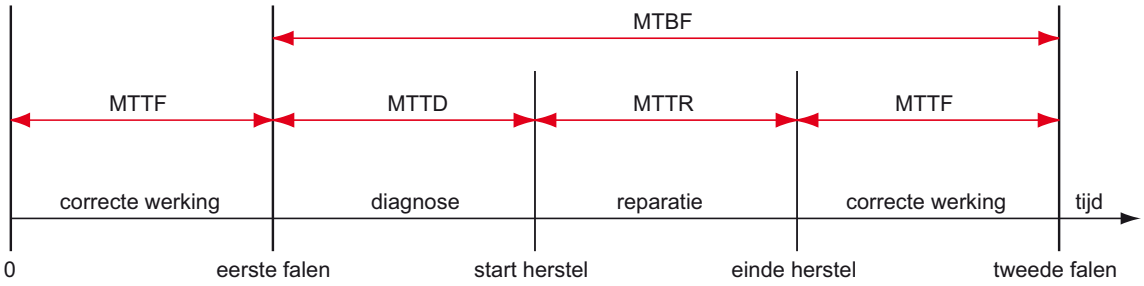
Een goede betrouwbaarheid is geen garantie voor de validiteit van de meting!

2.4 BESCHIKBAARHEID

De beschikbaarheid van een meting geeft aan hoelang deze gemiddeld voldoet aan de gebruikseisen, de MTBF (Mean Time Between Failure). Hiermee komen we op een aantal daaraan gerelateerde begrippen:

- MTTF (gemiddelde tijd tussen falen of Mean Time Till Failure)
- MTTR (gemiddelde reparatietijd of Mean Time Till Repair)
- MTTD(gemiddelde diagnosetijd of Mean Time Till Diagnose)

Waarbij geldt dat: MTBF = MTTF + MTTD + MTTR.



De gebruikseisen liggen op het niveau van de data-acquisitie, namelijk de beschikbaarheid van de meting in de centrale opslag van de telemetrie. Deze beschikbaarheid kan positief worden beïnvloed door:

De MTTD te verkleinen door:
- Ingebouwde kwaliteitscontrole van het meetinstrument
- Het meetinstrument zelfmeldend te doen zijn bij een storing
- De storing te doen volgen met een alarmmelding
- Op het niveau van de telemetrie te controleren en melden op de validiteit van de meting: geen waarde, waarde buiten bereik of te grote verandering

De MTTR te verkleinen door:
- Het beschikbaar hebben van reservecomponenten
- Een onderhoudscontract met adequate responstijd voor de diverse componenten van het gehele traject van de data-acquisitie

De MTTF te vergroten door:
- De aanschaf van in de fabriek op kwaliteit voorgeselecteerde meetinstrumenten
- Regelmatig preventief onderhoud

2.5 ISO-STANDAARDEN

Wanneer een bepaalde methode in meerdere landen gangbaar is, bestaat de mogelijkheid deze methode vast te leggen in een internationale standaard. Eén van de internationale organisaties die zich bezig houden met standaardisatie is de "International Organization for Standardization" (ISO), waarvan het hoofdkantoor in Genève is gevestigd. De ISO kent tal van "Technical Committees" (TC's). Het technisch comité ISO/TC 113 "Hydrometry" houdt zich bezig met de standaardisering van methoden en opstellingen voor het meten van afvoeren en sedimenttransport in open waterlopen. Bij de bespreking van de verschillende debietmeetmethoden zal, indien van toepassing, steeds naar de bestaande ISO-standaarden worden verwezen. Tal van ISO-standaarden zijn door de CEN (Comité Européen de Normalisation) overgenomen als CEN-standaard.

De ISO-standaarden worden in Nederland uitgegeven door de NEN. De NEN heeft een Commissie Hydrometrie, waarin ook het Platform Monitoring Waterkwantiteit is vertegenwoordigd. In Bijlage A zijn de belangrijkste NEN/ISO standaarden weergegeven voor het onderwerp debietmeten.

2.6 REFERENTIEMETHODEN

Als een meetopstelling voldoet aan de opstellingsvoorwaarden van de ISO-standaard, dan kunnen de onnauwkeurigheidspercentages voor het gewenste meetbereik worden berekend. Als er echter voor de gekozen meetmethode geen ISO-standaard is of de meetopstelling voldoet niet (volledig) aan de voorwaarden van de Standaard, dan zal de gebruiker wensen dat de opstelling wordt geijkt. Maar ook als de gekozen meetopstelling wel geheel voldoet, kunnen gebruiker en leverancier/installateur overeenkomen dat de meetopstelling wordt geijkt.

Als een meetopstelling wordt geijkt, dan wordt er geijkt aan een zogenaamde referentiemethode. Dat is een meetmethode, waarvan zeker is dat de onnauwkeurigheid laag is. Er is binnen de ISO/TC113 (Hydrometry) overeenstemming over het toepassen van de volgende twee referentiemethodes: laboratorium ijking en veldcalibratie met de velocity-area methode.

Referentiemethode = ijkmethode voor de gekozen meetmethode

LABORATORIUM IJKING

Voor het meten van debieten is dat het volumetrisch vaststellen van een debiet met behulp van een zogenaamde ijktank. Een goed geoutilleerd hydraulica laboratorium heeft zo'n voorziening. Meetstuwen worden doorgaans geijkt met behulp van een schaalmodel in een hydraulica laboratorium. Met het schaalmodel wordt het eenduidige verband tussen waterstand en debiet bepaald. De waterstand en de tijd laten zich nauwkeurig meten. Het debiet wordt bepaald door het water uit het model gedurende enkele minuten in de ijktank te laten stromen via een omslagmechanisme in de afvoergoot. De oppervlakte van de ijktank (doorsnede in het horizontale vlak) is zeer nauwkeurig bekend, de vulling en de tijdsduur worden eveneens met hoge nauwkeurigheid gemeten, waaruit dan het debiet wordt berekend. Op deze wijze is de onnauwkeurigheid in het bepalen van het debiet circa 0,5 %. Een mogelijk alternatief voor het bepalen van het gepasseerde watervolume is het meten van het gewicht.

Het kan zijn dat ijking in een schaalmodel minder voor de hand liggend, moeilijk uitvoerbaar (bijv. het ijken van een gemaal), of erg kostbaar is; in dat geval zal de calibratie in-situ plaats vinden. In die omstandigheden wordt als referentiemethode de velocity-area methode aanbevolen (hierover is eenstemmigheid in kringen van ISO/TC113, Hydrometry). Wel is het dan nodig het aantal meetpunten in de doorsnede, zowel het aantal verticalen, als het aantal punten in een verticaal, circa twee maal groter te nemen dan voorgeschreven bij normale toepassing van de methode. Als de velocity-area methode is gebruikt als referentiemethode, dan wordt de onnauwkeurigheid in het bepalen van het debiet circa 5 %.

FOTO 2-1 LABORATORIUM IJKING ONGESTUWDE EN GESTUWDE AFVOER VIA EEN ONDERSTORT (FOTO: WAGENINGEN UNIVERSITEIT)

Andere modernere methodes kunnen eveneens bruikbaar zijn als referentiemethode, mits deze duidelijk nauwkeuriger zijn dan de voor de praktijk gekozen meetmethode en de nauwkeurigheid van de referentiemethode goed bepaald is.

Met het beschikbaar komen van draagbare digitale akoestische en elektromagnetische stroomsnelheidsmeters is veldcalibratie van gewone peilregulerende kunstwerken, zoals stuwen, gemalen en inlaten, mogelijk. De gebruikte standaard afvoerformules worden dan vervangen door in het veld gemeten afvoerrelaties van het kunstwerk en kan in sommige gevallen de locatie de nevenfunctie van meetlocatie krijgen.

FOTO 2-2 **SNELHEIDSPROFIELMETING MET DE MOVING-BOAT METHODE (VARENDE DOPPLER METHODE) (FOTO: QMETRIX)**

3

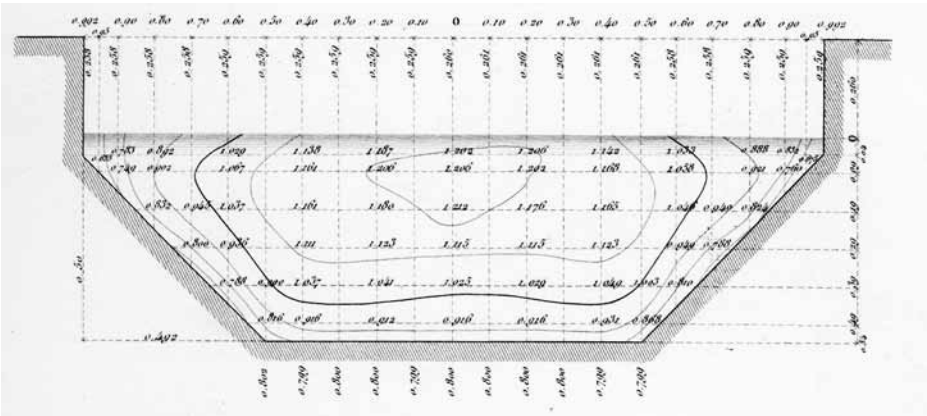
ONTWIKKELING VAN HET DEBIETMETEN

3.1 HISTORIE TOT NU TOE

Het meten van debieten, of eigenlijk stroomsnelheden, heeft zich lange tijd vooral geconcentreerd op de grotere rivieren van ons land. De vele overstromingen en de rivierwerken ter beteugeling daarvan vereisten inzicht in de verdeling van de afvoeren over riviertakken. Vanaf de 17e eeuw is er veel gemeten door waterstaatsingenieurs/landmeters als Melchior Bolstra, Goudriaan en Christiaan Brunings. Vanaf de start van de riviernormalisatie in het midden van de 19e eeuw zijn tot op de dag van vandaag zeer uitgebreid en veelvuldig afvoerbepalingen gedaan op de Nederlandse rivieren. De methode die daarbij steevast werd en wordt toegepast, is de velocity-area methode, waarbij er twee discussiepunten waren: de vorm van de snelheids-verdeling in de verticaal en het instrument om de stroomsnelheid te kunnen bepalen.

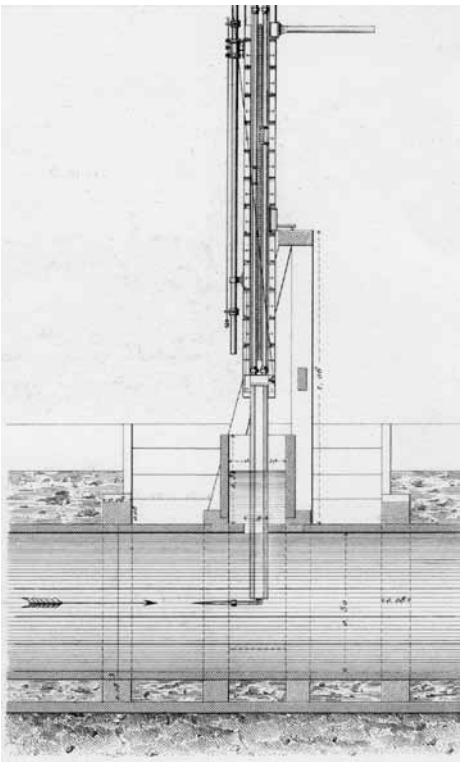
Toricelli leidde in 1643 af dat de snelheid van waterdeeltjes, die door een opening in een dunne wand vloeien, evenredig is met de wortel uit de drukhoogte. Waarnemingen gedaan door Pitot en later Chézy, Brunings en Woltmann gaven aan dat de snelheid aan het wateroppervlak groter was dan dieper in het water en zij gaven daar hun eigen snelheidsverdeling bij. In het begin verrichtte men onderzoek met instrumenten als de Nadische fles. Deze fles bestond uit een gesloten vat, dat, aan een stok bevestigd, onder water werd gebracht en door een klep kon worden geopend en gesloten. De tijd tussen de opening en de sluiting van de klep werd waargenomen; de ingestroomde hoeveelheid water werd gemeten en hieruit de snelheid van de waterdeeltjes bepaald. Later gebruikte men echte hydrometrische instrumenten, zoals de buis van Pitot en het molentje van Woltmann. Hij vond overigens in 1790 dat de snelheidsverdeling de vorm van een parabool had, maar de discussie hierover duurde tot in de 20e eeuw.

FIGUUR 3-1 ISO-SNELHEIDSLIJNEN OPGETEKEND DOOR DARCY EN BAZIN (BRON: LIT. 31)



Een van de grootste wetenschappers op het gebied van de praktijk van het debietmeten was Henry Darcy. Hij deed veel schaalmodel- en praktijkonderzoek naar de stroming van water. Voor de meting van de snelheid van het water maakte hij rond 1850 een verbeterde versie van de buis die Pitot in 1732 had uitgevonden: de "tube jaugeur Darcy-Pitot" (Figuur 3-2). De "tube jaugeur" meet met behulp van twee buizen de snelheidshoogte. Darcy construeerde hiervoor een ingenieuze inlaatopening. Tot op de dag van vandaag wordt deze methode gebruikt voor het meten van de stroomsnelheid van lucht. Darcy en zijn assistent en opvolger Bazin publiceerden de resultaten van hun hydraulische onderzoekingen in twee standaardwerken van het waterloopkundig onderzoek: de Recherches hydrauliques entreprises par M. Henry Darcy continuées par M. Henri Bazin uit 1865.

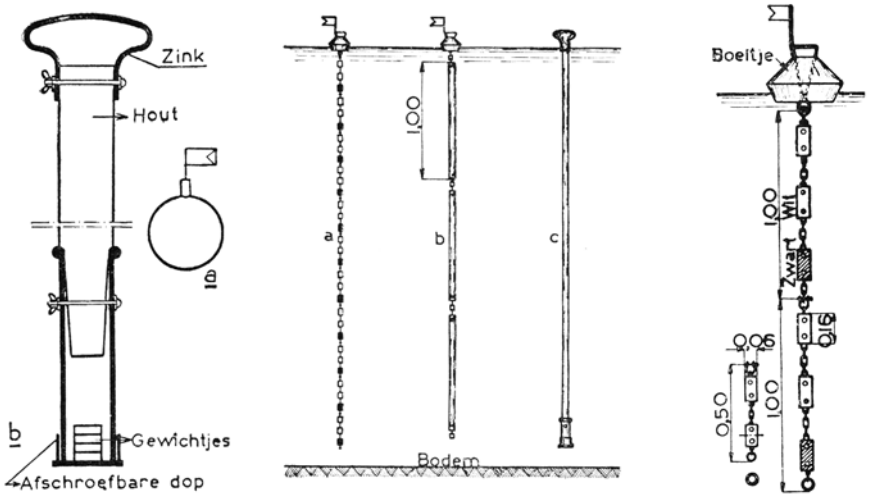
FIGUUR 3-2 METEN MET DE JAUGEUR DARCY-PITOT EN DWARSDOORSNEDE VAN EEN OPSTELLING IN EEN GESLOTEN LEIDING (BRON: LIT. 31)



Het meten van stroomsnelheden in rivieren gebeurde met drijvers of met hydrometrische instrumenten. Een bekende drijver is de boldrijver. De boldrijver is een houten bol voorzien van een hals, met daarin een vlaggetje. De bol is hol en van zoveel ballast voorzien, dat alleen de hals boven water uitsteekt, waardoor de windvang gering is. Met deze oppervlaktedrijver mat men de snelheid aan de oppervlakte, waarna de gemiddelde snelheid werd bepaald met de formule van Bazin.

Betere resultaten waren te verkrijgen met stokdrijvers, ook wel Cabeose staven of Krayenhoffse drijvers genoemd. Deze hadden een toepassing tot een waterdiepte van circa 3,50 m. Zo'n drijver is een ronde houten staaf van 5-10 cm diameter en van onderen verzwaard om de staaf zo goed mogelijk in de verticale stand te houden. Het ondereinde van de staaf bevindt zich circa 50 cm boven de rivierboden; het boveneinde steekt circa 15 cm boven water uit. Door het verschil in stroomsnelheid over de verticaal neemt de staaf een scheve stand in, hetgeen een maat is voor de stroomsnelheid. Bij metingen van de stroomsnelheid, uitgevoerd in 1939 op de Brielse Maas, werden stokdrijvers gebruikt, die konden worden verlengd. Dit heeft geleid tot de veel toegepast kettingdrijvers en koppelstokdrijvers, die een aanpasbare lengte hadden.

FIGUUR 3-3 **AFBEELDING BOLDRIJVER, STOKDRIJVERS, KETTINGDRIJVERS (BRON: LIT 33)**



Van de hydrometrische instrumenten is veruit het meest populair het molentje van Woltmann. De constructie van het molentje (1790) berust op het beginsel, dat een asje met wiekjes door de stroom in een ronddraaiende beweging wordt gebracht. Het aantal omwentelingen werd overgebracht naar een mechanisch telwerk. Moderne varianten hadden een pennetje met een elektrisch contact, waardoor boven in de boot een bel overging. Tussen twee belsignalen maakten de wiekjes telkens eenzelfde aantal omwentelingen. Om nu de stroomsnelheid te bepalen, moest het instrument eerst getareerd worden, d.w.z. met welke tijd tussen twee signalen een bekende snelheid overeenkomt. De positie van het molentje kon langs een stang worden gewijzigd.

FOTO 3-1 **HET MOLENTJE VAN WOLTMANN (LINKS FOTO: LIT 34) EN ZIJN MODERNE OPVOLGER (RECHTS FOTO: A.MULDER)**

Modernere versie van het molentje van Woltmann hebben een stevige as met schoepen. Dergelijke molentjes zijn ontwikkeld in het Mathematisch Institut Anton Ott in Kempten-Allgau (D), de eerste vanaf 1875.

Tussen de toepassing van het eerste Woltmann molentje en de vervanging van de propellermeting door een Dopplermeting zit 200 jaar. In deze 200 jaar zit de gehele ontwikkeling van de fijnmechanica, de fijninstrumentatie, het gebruik van elektrische stroom en magnetisme voor meetdoeleinden, de ontwikkelingen binnen de sensortechnologie en de overgang van analoog naar digitaal meten. Deze hele ontwikkeling is sterk gestimuleerd door enerzijds de invoering van het CGS-basiseenhedenstelsel (centimeter-gram-seconde) en anderzijds het (na de oorlog) ontstaan van gespecialiseerde bedrijven in Duitsland en de VS, die zich toeleg-

den op de ontwikkeling van de meettechniek. De eerste magnetisch-inductieve debietmeter verscheen in 1952, de eerste ultrageluid debietmeter in 1978. Met de looptijd verschilmeter (ADM) zijn de eerste continue debietmeetstations zonder obstructie van de waterloop met een hoge betrouwbaarheid gerealiseerd. Met de komst van de varende Dopplermeting eind jaren negentig is de basis gelegd voor een techniek die met inachtneming van de beperkingen mogelijk een grote toepassingspotentie heeft voor het Nederlandse waterbeheer.

3.2 DE MEETMETHODEN OP EEN RIJ

Debietmeetmethoden worden in dit handboek onderscheiden in:

- Incidentele metingen waaronder wordt verstaan het meten van het debiet op een locatie gedurende een beperkte periode en met een frequentie van enkele keren per maand of per jaar;
- Continue metingen waaronder wordt verstaan het meten van het debiet op een locatie gedurende een langere periode en waarbij de informatie over het debiet semi-continu, bijvoorbeeld met een frequentie van eenmaal per kwartier of per dag wordt ingewonnen.

NB: De aanduidingen ADM en ADCP worden in dit handboek gebruikt als een verzamelnaam voor technieken die gebruik maken van het akoestische looptijdverschilprincipe respectievelijk het principe van de meting van het akoestische Dopplereffect. Beide technieken worden in Nederland door diverse leveranciers en van verschillende fabrikanten aangeboden.

INCIDENTELE DEBIETMETINGEN

- de *standaard velocity-area methode (par. 5.1),* een methode die in vrijwel alle waterlopen kan worden uitgevoerd met een redelijke mate van nauwkeurigheid.

- de *aangepaste velocity-area methoden (par. 5.2),* waar de standaard methode niet kan worden toegepast in verband met de grote breedte van de rivier, drukke scheepvaart, rivier met een steil verhang en getijderivieren.

  Bekende aangepaste velocity-area methoden zijn:
  - moving-boat methode (varende Doppler methode/ varende ADCP)
  - deflectiemethode
  - drijvermethode

- de *verhangmethode (par. 5.3),* een methode gebaseerd op de snelheidsformules van Chézy of Manning die tamelijk onnauwkeurig is en gebruikt kan worden om redelijk snel en eenvoudig een indruk van het debiet te verkrijgen.

- de *verdunningsmethode (par. 5.4),* een methode die werkt met een merkstof en veelal toegepast wordt in snelstromende beken om een indruk van het debiet te verkrijgen.

- *veldcalibratie (par. 5.5)* van afvoerende kunstwerken zoals gemalen en stuwen, een methode die dient om in-situ een betere indruk te verkrijgen van de afvoercapaciteit van de kunstwerken dan met de standaard debietformules. Veldcalibratie dient veelal om de coëfficiënten in de debietformules te calibreren. Een veldcalibratie is strikt beschouwd geen afzonderlijke debietmeetmethode, maar is een toepassing van de velocity-area methoden.

CONTINUE DEBIETMETINGEN

- *meetstuwen (par. 6.1).* Bij meetstuwen is er in de meeste gevallen een vaste relatie tussen de bovenwaterstand of het verval en het debiet. Uit het continu meten van de waterstand volgt derhalve continue informatie over het debiet. Meetstuwen worden in dit handboek onderscheiden in gestandaardiseerde en niet-gestandaardiseerde meetstuwen. Voor *gestandaardiseerde meetstuwen (par. 6.1.1)* is de geometrie en de afvoerrelatie vastgelegd in een ISO-standaard.

  Gestandaardiseerde meetstuwen zijn: de Hobrad overlaat, de V-vormige lange overlaat, de horizontale en de V-vormige scherpe overlaat, verticale schuiven met onderstort

  Niet-gestandaardiseerde meetstuwen zijn: klepstuwen, betondrempels met vellingkant, de Rossum stuw, Khafagi venturi's, duikers en afsluiters

- Bij *niet-gestandaardiseerde stuwen (par. 6.1.2)* bestaat er eveneens informatie over de vormgeving en de afvoerrelatie die echter niet algemeen erkend is in een ISO-standaard.

  Meetgoten zijn: Khafagi venturi's, goten met een rechthoekig keelprofiel, goten met een trapeziumvormig keelprofiel

- *meetgoten (par. 6.2).* Ook bij meetgoten is er een vaste relatie tussen de bovenwaterstand of het verval en het debiet. Deze relatie wordt afgedwongen door de ISO-gestandaardiseerde inrichting van de constructie van de goot. Evenals bij meetstuwen zijn sommige meetgoten gestandaardiseerd en andere niet-gestandaardiseerd. Het continue meten van de waterstand levert het debiet.

  ADM (Akoestische DebietMeter) = looptijdverschilmethode

- *de looptijdverschilmethode (par. 6.3).* De debieten worden berekend uit metingen van de stroomsnelheid en de waterstand. De oppervlakte van het dwarsprofiel is een functie van de waterstand. De stroomsnelheid wordt berekend uit het verschil in looptijd van een geluidsgolf die onder water diagonaal op de stroomrichting in stroomopwaartse richting wordt uitgezonden, en langs dezelfde weg in stroomafwaartse richting wordt teruggezonden.

- *de Dopplermethode (par. 6.4).* De debieten worden berekend uit metingen van de stroomsnelheid en de waterstand. De oppervlakte van het dwarsprofiel is een functie van de waterstand. De stroomsnelheid wordt berekend door geluidsgolven uit te zenden en het - door de snelheid van in het water zwevende deeltjes ontstane - Dopplereffect te meten. De meetsensoren hebben een vaste opstelling: horizontaal langs de oevers of verticaal vanaf de bodem.

  ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) = Dopplermethode

- *de methode op basis van de relatie debiet en waterstand (par. 6.5).* In vrij afstromende waterlopen bestaat een min of meer eenduidige relatie tussen waterstand en debiet (Qh-relatie), die meestal is opgesteld met behulp van de velocity-area methode. Door de waterstand continu te meten, kan daaruit het debiet worden herleid.

- *de methode op basis van de relatie debiet en verval (par. 6.6).* Bij pompen, waarvan de gemaalkarakteristiek bekend is en vast ligt, kan de uitgeslagen hoeveelheid water worden bepaald uit het gemeten niveauverschil over het gemaal en de registratie van de bedrijfstijden. Is de gemaalkarakteristiek afhankelijk van het toerental van de pomp dan dient ook die grootheid te worden gemeten om het debiet te kunnen bepalen. Vijzels hebben een geheel eigen afvoerformule, die van Muysken.

DEEL B: THEORIE DEBIETMETEN

4

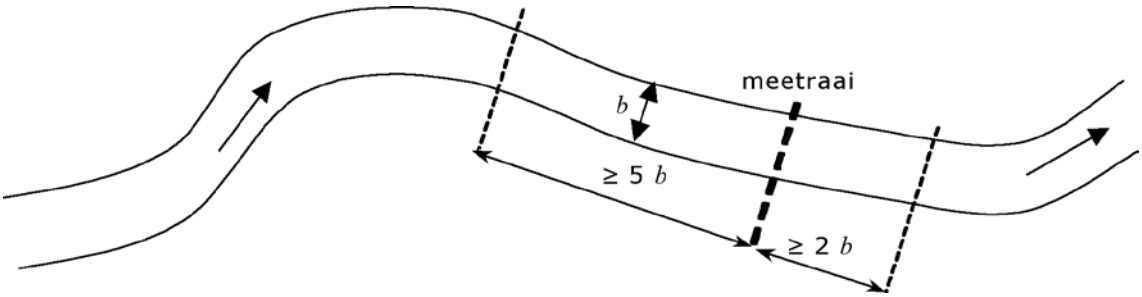
MEETLOCATIE IN OPEN WATERLOPEN

Bij de keuze van een meetlocatie in een open waterloop moet aan een aantal eisen worden voldaan gegeven de maximaal toelaatbare onnauwkeurigheid van het te meten debiet. In dit hoofdstuk zijn de eisen opgesomd voor:

- **Vaste** meetopstellingen waaronder worden verstaan meetopstellingen voor incidentele of continue debietmeting waarbij de meetopstelling gefixeerd is op één plaats. Bijvoorbeeld meetstuwen en vast opgestelde meetinstrumenten maar ook meetinstrumenten die boven water langs een gefixeerd traject worden verplaatst.
- **Varende** meetopstellingen waaronder worden verstaan meetopstellingen voor meestal incidentele debietmeting waarbij de meetinstrumenten opgesteld zijn op een drijvend platform (meetschip of meetvlot). Het drijvend platform wordt tijdens de meting op een locatie gefixeerd of langs een meetraai verplaatst.

De onnauwkeurigheid van de afvoermeting neemt af als de gekozen meetraai zoveel mogelijk voldoet aan de volgende voorwaarden:
- de stroomrichting is in alle punten hetzelfde en staat loodrecht op de meetraai,
- de snelheidsverdeling is regelmatig in het verticale en horizontale vlak,
- de meetraai ligt zo mogelijk in een recht traject van de waterloop met een uniform dwarsprofiel en uniforme helling. Dit geldt voor rechte trajecten tussen circa 5 maal de breedte bovenstrooms en circa 2 maal de breedte benedenstrooms van de meetraai, zie Figuur 4-1,
- de minimale waterdiepte bedraagt bij voorkeur 0,30 m,
- de minimale stroomsnelheid bedraagt 0,10 m/s,
- het meettraject is vrij van bomen en andere obstakels in het stroomprofiel.

FIGUUR 4-1 GESCHIKTE LOCATIE VAN EEN MEETRAAI IN EEN WATERLOOP



Daarnaast spelen de volgende overwegingen een rol bij de keuze van het meettraject:
- de meetraai moet goed bereikbaar zijn en de energievoorziening moet zijn gegarandeerd,
- de bodem en oevers van de waterloop in het meettraject moeten stabiel zijn,
- de meetraai dient voldoende ver verwijderd te zijn van samenvloeiingen met andere waterlopen en beweegbare stuwen benedenstrooms (ter voorkoming van opstuwing),
- ook in het geval van piekafvoeren moet het water binnen een bemeetbaar dwarsprofiel blijven.

Nadat de locatie van het meettraject is bepaald, wordt de positie van de meetraai (loodrecht op de stroomrichting) op beide oevers duidelijk gemarkeerd. Daarnaast wordt een peilschaal of waterstandsrecorder geïnstalleerd, zodat de waterstand tijdens de duur van de meting regelmatig kan worden gecontroleerd, gerelateerd aan een standaard vergelijkingsvlak, bijvoorbeeld N.A.P.

Voor vaste en varende meetopstellingen geldt dat in open waterlopen wordt gemeten en in turbulente stroming. Door het karakter van turbulente stroming moet de stroomsnelheid over enige tijd worden gemeten om een representatief tijdsgemiddelde te verkrijgen. Enkele kengetallen:
- hoge stroomsnelheden meetduur 30 tot 50 s.
- lage stroomsnelheden meetduur 60 tot 100 s.

De meetduur mag langer worden gekozen. In getijdegebieden verandert de stroomsnelheid in de tijd als gevolg van de getijdewerking. Binnen een periode van ongeveer zes uur kan de maximum stroomsnelheid van richting wisselen bij een dubbeldaagsgetij. In drie uur verandert de stroomsnelheid van nul naar een maximum. In een getijdegebied zou een debietmeting niet langer dan circa 15 minuten moge duren om een representatief debiet te meten.

De verdeling van de stroomsnelheid in het dwarsprofiel van een waterloop varieert zowel van oever tot oever als tussen bodem en wateroppervlak. Om de snelheidsverdeling in het dwarsprofiel goed te bepalen, zijn metingen nodig in meerdere verticalen en per verticaal in één of meerdere meetpunten. Om de onnauwkeurigheid te beperken bij het bepalen van de stroomsnelheidsverdeling in een verticaal zijn de volgende kengetallen nuttig,
- twee meetpunten in een verticaal resulteert in een relatieve fout van 5-10% in de gemiddelde stroomsnelheid,
- vijf meetpunten in een verticaal resulteert in een relatieve fout van circa 3% in de gemiddelde stroomsnelheid.

De onnauwkeurigheid in het debiet wordt verder beperkt door het aantal meetverticalen,
- tien meetverticalen in een meetraai resulteert in een relatieve fout van circa 5% in het debiet,
- vijftien meetverticalen in een meetraai resulteert in een relatieve fout van circa 3% in het debiet.

In Bijlage C wordt een voorbeeld gegeven van de velocity-area methode met inbegrip van de bepaling van de totale toevallige fout.

Achtergronden van de onnauwkeurigheid van gemeten stroomsnelheden en debieten zijn opgenomen in hoofdstuk 8. In Boiten [Lit. 24] zijn achtergronden opgenomen over stroomsnelheidsverdeling in een dwarsprofiel en de keuze van een meetlocatie.

4.1 RANDVOORWAARDEN MEETOPSTELLING

Bij de keuze van een goede meetlocatie zijn de volgende randvoorwaarden te noemen waaraan minstens voldaan zou moeten worden. De meeste randvoorwaarden gelden zowel voor een vaste als voor een varende meetopstelling. Daar waar specifieke randvoorwaarden gelden voor één van beide is dat aangegeven.

1 De stroomlijnen rond een meetlocatie moeten recht zijn. Dat houdt veelal in dat het traject waarin de meetlocatie ligt recht is over een voldoende afstand om effecten van bochtstroming zoveel mogelijk te voorkomen. Verder mogen er rond de meetlocatie geen stabiele neren of wervels aanwezig zijn (wel kortstondig) evenals zijtakken, meren en nabij de meetlocatie lozende gemalen of sluizen.

2 Het waterspiegelverhang in het traject rond de meetlocatie moet vrij zijn van stuwkrommeeffecten en lokale versnelling of vertraging van de stroming. Meetlocaties bij splitsingspunten of samenvloeiingen moeten buiten het invloedsgebied van de stuwkromme liggen (dit geldt niet voor een vast opgestelde snelheidsmeting met een ADM).

3 De oever- en bodemligging ter plaatse van de meetlocatie moeten stabiel zijn en bij voorkeur niet sterk in de tijd veranderen (veranderen van doorstroomoppervlak). Langzame veranderingen kunnen door geregelde profielmetingen worden gecorrigeerd.

4 Alle afvoer moet de meetraai passeren, dus geen ongemeten afvoer via de uiterwaard, zijtakken, geulen of een vistrap.

5 Op de meetlocatie moet voor het gehele afvoerbereik de totale afvoer kunnen worden gemeten. Eventueel met extra vaste meetinstrumenten of met een (tijdelijk) varende meetopstelling tijdens (extreem) hoge afvoeren.

6 Als een meting wordt herhaald, moet de meting in nagenoeg dezelfde meetpunten worden uitgevoerd. Als andere meetpunten worden gebruikt, moet de verwerking van de snelheidsmetingen tot debiet worden aangepast. Bij een varende meetopstelling kan hieraan moeilijker worden voldaan. Daarvoor geldt dat een nauwkeurige plaatsbepaling van het meetinstrument van belang is om bij de verwerking van de opvolgende metingen te kunnen corrigeren voor verschillen in de gevaren meetraai.

FOTO 4-1 VARENDE MEETOPSTELLING, MEETVAARTUIG BIJ LOBITH (FOTO: RIJKSWATERSTAAT)

7 Stabiele ophangconstructie voor een vaste opstelling: de meetinstrumenten mogen over het gehele stroomsnelheids- en waterstandsbereik niet hinderlijk trillen. Trillingen kunnen de meetresultaten ongewenst beïnvloeden.
Stabiele ophangconstructie voor een varende opstelling: de meetinstrumenten, gemonteerd aan of in een meetschip of meetvlot, mogen over het gehele stroomsnelheids- en waterstandsbereik niet hinderlijk trillen. Trillingen kunnen de meetresultaten ongewenst beïnvloeden.

8 Energievoorziening: de energievoorziening op de meetlocatie, meetschip of meetvlot moet verzekerd zijn en bedrijfszeker.

9 Het sedimenttransport op de meetlocatie moet laag zijn. Sedimentconcentraties in het water beïnvloeden de nauwkeurigheid en de beschikbaarheid van bepaalde meetinstrumenten nadelig.

10 Passerende schepen verstoren het snelheidsprofiel tijdelijk en veroorzaken bellenbanen of reflecteren uitgezonden geluidsgolven (via de romp) die de nauwkeurigheid van bepaalde typen meetinstrumenten nadelig beïnvloeden. Voor een varende meetopstelling geldt dat een meetschip of meetvlot de beroepsvaart kan hinderen tijdens de meting, en omgekeerd. Informeren van de vaarwegbeheerder van voorgenomen metingen is vereist.

11 Temperatuurs- of dichtheidsvariaties: variaties in de watertemperatuur of de dichtheid van het water beïnvloeden de nauwkeurigheid van bepaalde meetinstrumenten nadelig.

FOTO 4-2 **VASTE MEETOPSTELLING ADM LEBBENBRUGGE (FOTO: WS RIJN EN IJSSEL)**

12 Een vaste meetlocatie moet goed bereikbaar zijn voor een meetploeg. Maar een te eenvoudige bereikbaarheid en zichtbaarheid vanaf de openbare weg kan verstoring van de (onbemande) meting of vernieling van de meetopstelling tot gevolg hebben. Bij een varende meetopstelling moet de meetlocatie goed bereikbaar zijn voor het meetschip tussen de oevers. Als een onbemand meetvlot wordt gebruikt, vastgelegd of voortbewogen langs een kabel, moet de meetlocatie via de oever goed bereikbaar zijn voor de meetploeg.

13 Bij een vaste meetopstelling kan schade ontstaan aan het meetinstrument door schroeven (passerende schepen), aanvaring door schepen, ijsafzetting en oever- en bodemvegetatie. Bij een varende meetopstelling kan schade aan het meetinstrument of meetplatform ontstaan door schroeven (passerende schepen), oever- en bodemvegetatie, harde oever- en bodem verdediging, ondiepte, kabels en lijnen onder water.

14 De meetlocatie (meetraai of vaarweg) moet in het landelijke coördinatenstelsel bekend zijn.

4.2 VERSTORENDE EFFECTEN

Afwijking van een aantal van de genoemde eisen in de vorige paragrafen heeft invloed op het meetresultaat en/of de beschikbaarheid van een gebruikt meetinstrument. Voor de verschillende typen meetinstrumenten is in onderstaande tabel aangegeven welk effect invloed heeft op het resultaat.

TABEL 4-1 EFFECT VERSTORING OP RESULTAAT PER TYPE MEETINSTRUMENT

	type meetinstrument (x = effect, - = geen effect)			
effect	**mechanisch**	**elektro-magnetisch**	**akoestisch (looptijdprincipe)**	**akoestisch (Doppler)**
trillingen	x	x	x	x
slingeren	x	x	x	x
luchtbellen	-	x	x	x
temperatuur tijdvariaties	x	x	-	x
temperatuur gradiënten	x	x	x	x
dichtheid tijdvariaties	-	x	-	x
dichtheid gradiënten	-	x	x	x
sediment	-	-	x	x
kabels/leidingen	-	[1]x	-	-

[1] verstoring door elektromagnetische velden

5

INCIDENTELE DEBIETMEETMETHODEN

Debietmeetmethoden kunnen worden onderscheiden in:

- Incidentele metingen waaronder wordt verstaan het meten van het debiet op een locatie gedurende een beperkte periode en met een frequentie van enkele keren per maand of per jaar;

- Continue metingen waaronder wordt verstaan het meten van het debiet op een locatie gedurende een langere periode en waarbij de informatie over het debiet semi-continu, bijvoorbeeld met een frequentie van eenmaal per kwartier of per dag wordt ingewonnen.

Incidentele metingen zijn gericht op de behoefte aan éénmalige informatie over debieten (bijvoorbeeld capaciteitsmetingen) of slechts zo nu en dan. Incidentele metingen kunnen ook zijn gericht op de calibratie van een meetopstelling voor continue debietmetingen.
Continue metingen zijn gericht op de behoefte aan regelmatige en voortdurende informatie over debieten, bijvoorbeeld iedere 10 minuten, uur, 12 uur of dag.

Voor de incidentele debietmetingen kunnen de volgende meetmethoden worden gebruikt, die in dit hoofdstuk worden behandeld:

- De *standaard velocity-area methode (par. 5.1),* een methode die in vrijwel alle waterlopen kan worden uitgevoerd met een redelijke mate van nauwkeurigheid.

- De *aangepaste velocity-area methode (par. 5.2),* waar de standaard methode niet kan worden toegepast in verband met de grote breedte van de rivier, drukke scheepvaart, rivier met een steil verhang en getijderivieren. Tot deze methode behoren: de moving-boat methode (varende Doppler methode), de deflectiemethode en de drijvermethode.

- De *verhangmethode (par. 5.3),* een methode gebaseerd op de snelheidsformules van Chézy of Manning die tamelijk onnauwkeurig is en gebruikt kan worden om redelijk snel en eenvoudig een indruk van het debiet te verkrijgen.

- De *verdunningsmethode (par. 5.4),* een methode die werkt met een merkstof en veelal toegepast wordt in snelstromende beken om een indruk van het debiet te verkrijgen.

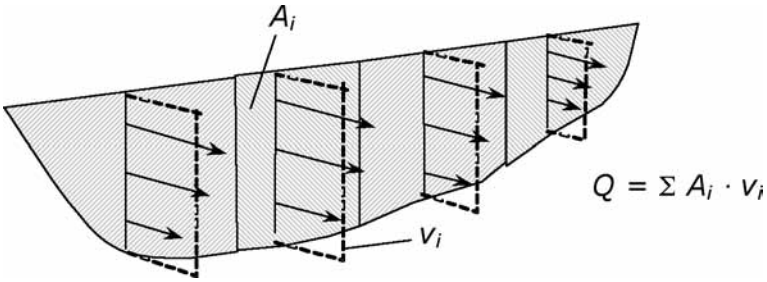
- *Veldcalibratie (par. 5.5)* van afvoerende kunstwerken zoals gemalen en stuwen, een methode die dient om in-situ een betere indruk te verkrijgen van de afvoercapaciteit van de kunstwerken dan met de standaard debietformules.

De verhangmethode en verdunningsmethode worden zelden toegepast in Nederland.

5.1 STANDAARD VELOCITY-AREA METHODE

Bij de standaard methode wordt de stroomsnelheid in één of meer punten in een verticaal gemeten alsmede de waterdiepte ter plaatse van de verticaal. De gemiddelde stroomsnelheid v_i per verticaal wordt vermenigvuldigd met het doorstroomoppervlak A_i behorend bij iedere verticaal. Gesommeerd geeft dit het totale debiet Q ter plaatse van de meetraai.

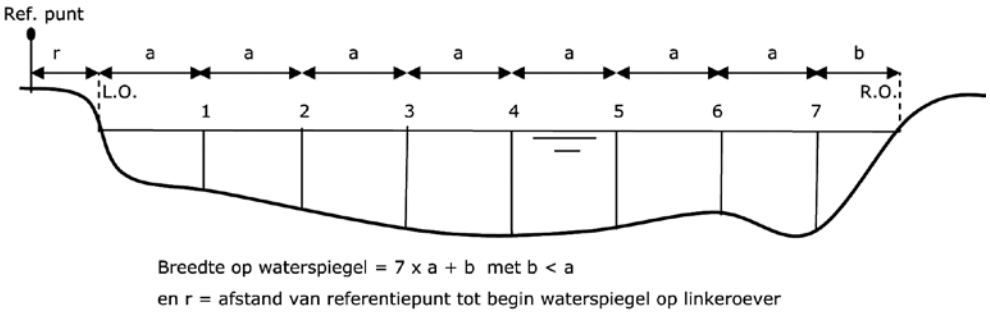
FIGUUR 5-1 PRINCIPE STANDAARD VELOCITY-AREA METHODE



5.1.1 DOORSTROOMOPPERVLAK IN MEETRAAI

De oppervlakte van het dwarsprofiel wordt berekend uit de gemeten breedte van de waterloop en een aantal dieptepeilingen. De breedte wordt gemeten met een meetlint of, bij bredere waterlopen, met behulp van optische of elektronische meetapparatuur. De diepte wordt gemeten in een aantal verticalen, bij voorkeur op onderling gelijke afstanden verdeeld over de breedte van de waterloop, zie Figuur 5-2. Het aantal dieptemetingen dient zodanig te zijn, dat de vorm van het dwarsprofiel voldoende nauwkeurig kan worden beschreven [ISO Standaard]. In het algemeen betekent dit, dat het interval tussen twee verticalen maximaal 1/5 van de breedte is voor regelmatige of smalle dwarsprofielen en maximaal 1/20 van de breedte voor onregelmatige of brede dwarsprofielen.

FIGUUR 5-2 VOORBEELD VAN DE VERDELING VAN EEN DWARSPROFIEL IN SEGMENTEN



Gebruikelijk is om, in de stroomrichting gezien, steeds vanuit de linkeroever naar de rechteroever te meten. Dit geldt voor de dieptepeilingen en daarna voor het meten van de stroomsnelheid. Op de linkeroever is dan een referentiepunt aangebracht ten opzichte waarvan alle afstanden in de meetraai worden vastgelegd [Lit. 3].

5.1.2 SNELHEIDSVERDELING IN VERTICAAL

Bij de standaard velocity-area methode wordt uitgegaan van stationaire stroming in de waterloop, hetgeen betekent dat het debiet niet verandert in de tijd. Daarnaast wordt aangenomen dat de stroming turbulent is, wat in de praktijk vrijwel altijd het geval is. Tengevolge van wrijving is de stroomsnelheid langs de bodem en de oevers van een waterloop lager dan de gemid-

delde 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, zie Figuur 5-3 [Lit. 3].

FIGUUR 5-3 VOORBEELDEN AFHANKELIJKHEID SNELHEIDSVERDELING VAN VORM DWARSPROFIEL

Er zijn twee veel gebruikte benaderingen voor het verticale stroomsnelheidsprofiel, namelijk het machtsprofiel en logaritmisch profiel.

De snelheidsverdeling in de verticaal volgens het machtsprofiel luidt:

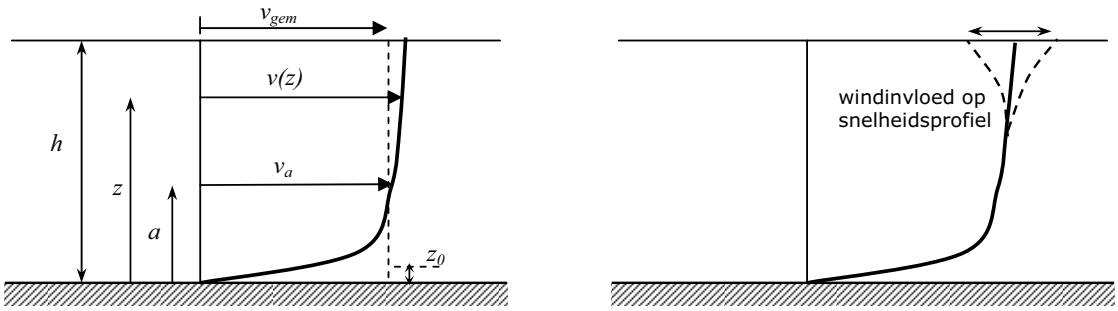
$$v_z = v_a \cdot \left(\frac{z}{a}\right)^{\frac{1}{n}}$$

met:

v_z	: stroomsnelheid op afstand z boven de bodem [m/s]
v_a	: referentiestroomsnelheid op $z = a$ boven de bodem [m/s]
a	: afstand boven de bodem behorend bij v_a [m]
z	: afstand boven de bodem behorende bij v_z [m]
h	: locale waterdiepte [m]
n	: macht afhankelijk van vorm en ruwheid van het profiel [-]

De waarde van n varieert van circa 7 voor waterlopen met een relatief glad en breed profiel, tot circa 5 voor waterlopen met een relatief ruw en smal profiel. De gemiddelde snelheid in de verticaal bevindt zich op een afstand van ongeveer 0,4h vanaf de bodem [Lit. 3]. De referentie- snelheid v_a kan vrij worden gekozen. Een praktische keuze is de dieptegemiddelde stroomsnelheid v_{gem} op een afstand van $a = 0{,}4h$ boven de bodem. Een andere praktische keuze is $v(h)$ de stroomsnelheid aan het oppervlak $z = h$. De keuze hangt af van de nauwkeurigheid van de 'fit' van de kromme door meetpunten.

FIGUUR 5-4 SNELHEIDSVERDELING IN EEN VERTICAAL



De snelheidsverdeling in de verticaal volgens het logaritmisch profiel, zie Figuur 5-4, luidt,

$$v(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$$

met

$v(z)$	: snelheid op een hoogte z boven de bodem [m],
u_*	: schuifspanningssnelheid ($\sqrt{ghi}$) [m/s],
κ	: Von Karman constante (0,4) [-].
z	: afstand boven de bodem of vanaf de wand [m],
z_0	: referentie-afstand boven de bodem of wand waar $u(z_0)=0$ [m],

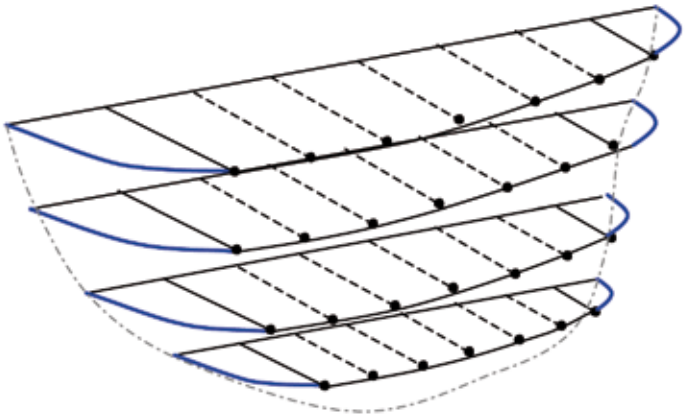
De diepte-gemiddelde stroomsnelheid in een verticaal voor beide snelheidsprofielen is:

machtsprofiel: $v_{gem} = v_a \cdot \frac{n}{n+1} \cdot \left(\frac{h}{a}\right)^{\frac{1}{n}}$ en log-profiel: $v_{gem} = \frac{u_* \cdot z_0}{\kappa \cdot h}\left(\ln\left\{\frac{h}{z_0}\right\} - 1\right)$

5.1.3 SNELHEIDSVERDELING IN MEETRAAI

In het algemeen is het verloop van de snelheidsverdeling in de meetraai nabij de oever in het horizontale vlak te benaderen met dezelfde typen snelheidsverdeling als in de verticaal, dus een machtsprofiel of logaritmisch profiel, zie paragraaf 5.1.2.

FIGUUR 5-5 PRINCIPE SNELHEIDSVERDELING IN HORIZONTALE VLAK IN MEETRAAI



Nadat het dwarsprofiel is gepeild, wordt vastgesteld in welke verticalen de gemiddelde snelheid zal worden gemeten. De gemiddelde snelheid in elke verticaal kan aan de hand van een aanname van het snelheidsprofiel worden bepaald, mede afhankelijk van de beschikbare tijd, de vereiste nauwkeurigheid, de waterstand, enzovoorts. Gebruikelijke methoden zijn:

- de n-puntsmethoden, waarbij het snelheidsprofiel wordt benaderd met één of meerdere meetpunten in de verticaal;
- de integratie methode, waarbij de snelheidsmeter over de volledige verticaal naar beneden en weer omhoog bewogen met een constante snelheid.

N-PUNTSMETHODE

Bij de n-puntsmethode wordt na elkaar in een beperkt aantal punten (n) in de verticaal de snelheid gemeten. Tabel 5-1 geeft een overzicht van het mogelijke aantal punten en de manier waarop de gemiddelde snelheid voor verschillende n-waarden moet worden berekend.

Voorwaarde voor toepassing van één der n-puntsmethoden is, dat de snelheidsverdeling in de verticaal volgens een gladde polynoom verloopt. Als de snelheidsverdeling in de verticaal onbekend is, kunnen een paar verticalen uitgebreid worden doorgemeten. Een uitgebreide meting omvat het meten van de snelheid in 7 à 10 punten in de verticaal: v_{opp}, $v_{0.2d}$, $v_{0.3d}$, ..., $v_{0.8d}$, $v_{0.9d}$ en v_{bodem}, waarbij de diepten ten opzichte van de waterspiegel zijn genomen. De snelheidsverdeling wordt in een grafiek uitgezet, waarna de gemiddelde snelheid grafisch kan worden bepaald. Uit de vorm van de grafiek blijkt of er een normale (gladde polynoom) snelheidsverdeling in de verticaal aanwezig is. In spreadsheet programma's kan dit eenvoudig worden gecontroleerd door het trekken van een trendlijn door de meetpunten. Een geschikte polynoom zal een hoge correlatiecoëfficiënt R^2 laten zien (hoger dan 0,8).

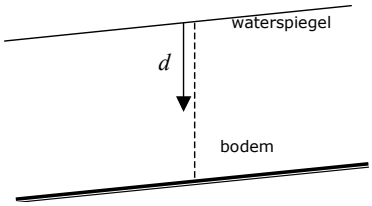
Afhankelijk van de resultaten van de controle en rekening houdend met de beschikbare tijd, wordt het aantal te meten punten n in de verticaal vastgesteld (per verticaal kan dit aantal verschillen). De driepuntsmethode verdient aanbeveling als een aanvaardbaar compromis tussen de benodigde meettijd en de te verwachten nauwkeurigheid. Als de waterdiepte d kleiner is dan 0,30 m, kan worden gekozen voor de twee- of éénpuntsmethode. Aangeraden wordt steeds alle snelheidsmetingen in een verticaal uit te voeren alvorens een volgende verticaal door te meten. Alleen in rechthoekige dwarsprofielen is het handiger in alle verticalen op een bepaalde (zelfde) diepte te meten en daarna de diepte te veranderen.

Bij de vijf- en zespuntsmethode kan de gemiddelde snelheid gemakkelijk in een spreadsheet programma worden bepaald. Het bepalen van de gemiddelde stroomsnelheid door sommatie van de snelheid maal de lokale doorstroomhoogte, gedeeld door de totale waterdiepte ter plaatse van de verticaal, kan eenvoudig worden geautomatiseerd.

TABEL 5-1 OVERZICHT BEREKENEN GEMIDDELDE STROOMSNELHEID VOOR N-PUNTSMETHODEN

methode	meetpunt op afstand onder wateroppervlak	berekening gemiddelde stroomsnelheid
éénpunts	0,6 *d*	$v_{0,6}$
tweepunts	0,2 *d* en 0,8 *d*	$(v_{0,2}+v_{0,8})/2$
driepunts	0,2 *d*, 0,6 *d* en 0,8 *d*	$(v_{0,2}+2v_{0,6}+v_{0,8})/4$
vijfpunts	0,2*d*, 0,6*d*, 0,8*d* en zo dicht mogelijk aan oppervlak en bij de bodem	$(v_{opp}+3v_{0,2}+3v_{0,6}+2v_{0,8}+v_{bodem})/10$
zespunts	0,2*d*, 0,4*d*, 0,6*d*, 0,8*d* en zo dicht mogelijk aan oppervlak en bij de bodem	$(v_{opp}+2v_{0,2}+2v_{0,4}+2v_{0,6}+2v_{0,8}+v_{bodem})/10$

d: diepte gemeten ten opzichte van de waterspiegel



De keuze van de methode hangt af van de gewenste nauwkeurigheid. In Tabel 8-1 is de bijbehorende onnauwkeurigheid weergegeven als variatiecoëfficiënt. Voor een gewenste onnauwkeurigheid kleiner dan 5% wordt de tweepunts of meerpunts methode aanbevolen.

Bijlage C geeft als voorbeeld een veldmeting waarbij met een snelheidsmeter van het propellertype volgens de driepunts methode is gemeten en vervolgens de gemiddelde snelheid in de verticalen is berekend.

INTEGRATIE METHODE

Bij deze methode wordt de snelheidsmeter over de volledige verticaal naar beneden en weer omhoog bewogen met een constante snelheid. Deze snelheid dient nooit groter te zijn dan 5% van de gemiddelde stroomsnelheid in het dwarsprofiel en bedraagt maximaal 0,04 m/s. De gemiddelde snelheid in de verticaal wordt berekend uit de som van stroomsnelheden per tijdsinterval (1/meetfrequentie) gedeeld door de duur van de snelheidsmeting tussen bodem en wateroppervlak. Deze methode wordt alleen gebruikt in waterlopen met een diepte groter dan 1 meter.

5.1.4 BEPALEN DEBIET DOOR MEETRAAI

Nadat in het dwarsprofiel van de meetraai in de verticalen de diepte is gemeten en de gemiddelde snelheid is bepaald met behulp van één van de eerder genoemde methodes, zijn er verschillende methoden om uit de meetresultaten de totale afvoer te bepalen. Vroeger ging dat grafisch met behulp van millimeterpapier, tegenwoordig is het gebruikelijk om daarvoor een spreadsheet programma te gebruiken. Gebruikelijke methoden zijn:

- mean-section methode (gemiddelde sectie)
- mid-section methode (midden van de sectie)

De mean-section methode beslaat het gehele dwarsprofiel van oever tot oever en kan gebruikt worden als de oevers duidelijk gedefinieerd zijn (vrij van begroeiing). De mid-section methode beslaat het gehele dwarsprofiel met uitzondering van een gedeelte nabij de oevers. Bij enigszins begroeide oevers kan deze methode gebruikt worden, mits aangenomen kan worden dat het aandeel van het debiet in de oevergedeelten nihil is (water staat nagenoeg stil).

MEAN-SECTION METHODE

Het dwarsprofiel wordt opgebouwd gedacht uit een aantal segmenten, elk begrensd door twee opeénvolgende verticalen, zie Figuur 5-6. Voor het segment tussen de verticalen i en i+1 (waarbij i = 1,2,3,...m) geldt:

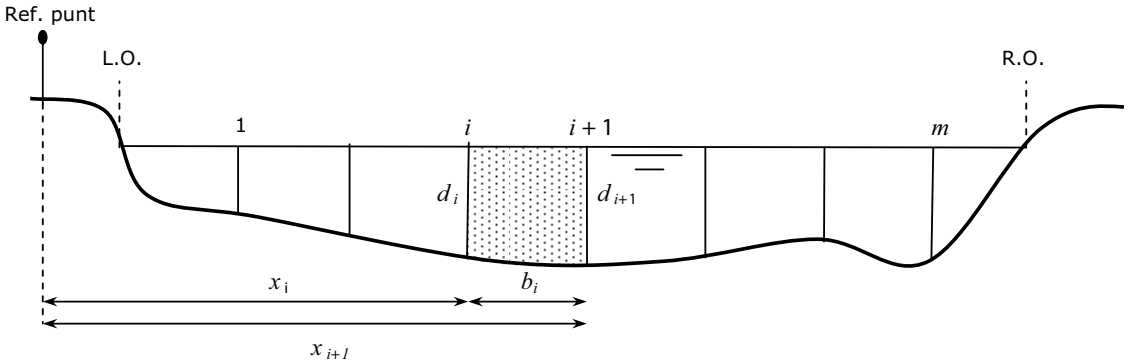
$$Q_{i \to i+1} = \left(\frac{v_i + v_{i+1}}{2} \right) \cdot \left(\frac{d_i + d_{i+1}}{2} \right) \cdot b_{i \to i+1}$$

met:

b	: breedte tussen twee verticalen (m)
x	: afstand tot referentiepunt (R.P.) op linker oever (L.O.) (m)
i	: aanduiding nummer verticaal
Q	: afvoer per segment (m^3/s)
v_i	: gemiddelde stroomsnelheid in verticaal i (m/s)
d	: waterdiepte in een verticaal (m)

De totale afvoer wordt berekend als de som van de afvoeren van de afzonderlijke segmenten. Voor de segmenten begrensd door de linker oever (L.O.) en verticaal 1 en door de laatste verticaal m en de rechter oever (R.O.), kan worden aangenomen, dat de snelheid gelijk is aan 2/3 van de snelheid in verticaal 1 respectievelijk m.

FIGUUR 5-6 MEAN-SECTION METHODE VOOR INTEGRATIE VAN DE STROOMSNELHEDEN TOT HET DEBIET



Een andere manier voor het bepalen van de afvoer in de oeversecties is het fitten van een horizontaal machtsprofiel (1) of logaritmisch (2) snelheidsprofiel. De afvoer in het eerste en laatste segment kan dan worden uitgerekend door integratie van het profiel tussen oever en meetraai. Voor een machtsprofiel is de afvoerbijdrage in de oeversecties,

$$Q_{LO} = \alpha_{LO} \cdot d_1 \cdot v_1 \cdot b_1 \cdot \frac{n}{n+1} \text{ [m}^2\text{/s] en } Q_{RO} = \alpha_{RO} \cdot d_m \cdot v_m \cdot b_m \cdot \frac{n}{n+1} \text{ [m}^2\text{/s]}$$

Hierin is een factor opgenomen α_{LO} en α_{RO} om te corrigeren voor de bodemligging in de oeversectie. De factor is 1 als het doorstroomoppervlak in de oeversectie rechthoekig is. Voor een parabolisch verloop is de factor 2/3 en voor een lineair verloop 1/2 (diepte d_1 in de eerste verticaal en nul op de oever). De totale afvoer door de meetraai bestaat dus uit een direct gemeten deel Q_m en twee onbemeten afvoeren, Q_{LO} en Q_{RO}, de afvoer in de linker- en rechteroeverzone,

$$Q_{tot} = Q_m + Q_{LO} + Q_{RO}$$

met:

α = correctiefactor horizontaal snelheidsprofiel [-]
b = breedte sectie [m]
d = lokale waterdiepte [m]
n = macht snelheidsprofiel [-]
Q = debiet [m³/s]
v = gemiddelde stroomsnelheid in verticaal [m/s]

De afvoer in de onbemeten zones nabij het wateroppervlak en nabij de bodem zijn opgenomen in de manier waarop Q_m wordt bepaald.

Bijlage C geeft een voorbeeld van een berekening van de totale afvoer volgens de mean-section methode.

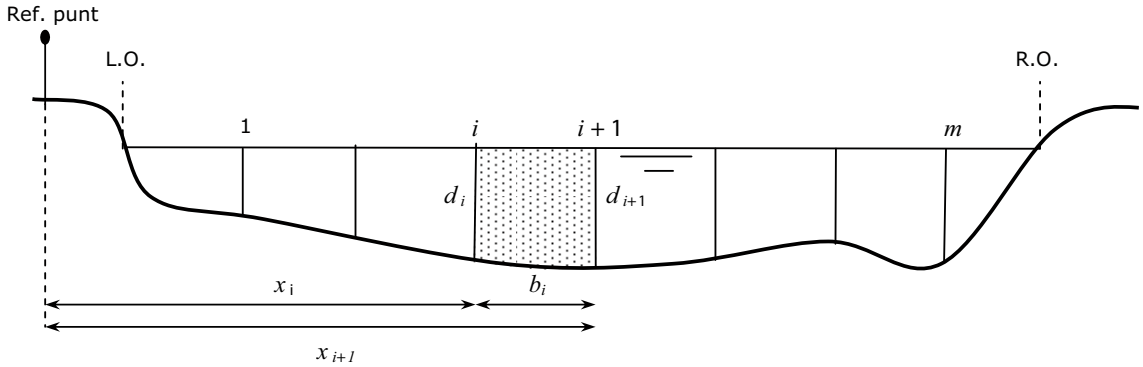
MID-SECTION METHODE

Ook bij deze methode wordt het dwarsprofiel opgebouwd gedacht uit een aantal segmenten. Het segment ligt nu aan weerszijden van de meetverticaal. De breedte van een segment is gelijk aan de som van de halve breedtes tot de naastgelegen verticalen, zie Figuur 5-7. Voor het segment met daarin verticaal i geldt:

$$b_i = \left(\frac{x_i - x_{i-1}}{2}\right) + \left(\frac{x_{i+1} - x_i}{2}\right) = \left(\frac{x_{i+1} - x_{i-1}}{2}\right)$$

De totale afvoer wordt, evenals bij de mean-section methode, 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 is, wordt voor de snelheid in de halve segmenten langs de wand een percentage (bijvoorbeeld 85%) aangehouden van de snelheid in de eerste respectievelijk laatste verticaal. Ook hier kan voor het halve segment nabij de oevers het debiet worden bepaald met de aanname van een machtsprofiel of logaritmisch snelheidsprofiel zoals beschreven bij de mean-section methode.

FIGUUR 5-7 **MID-SECTION METHODE VOOR INTEGRATIE VAN DE STROOMSNELHEDEN TOT HET DEBIET**



Bijlage C geeft een voorbeeld van de totale afvoer van een waterloop, berekend volgens de mid-section methode.

5.1.5 ONNAUWKEURIGHEID DEBIET

Het debiet bepaald met de 'velocity-area' methode in een meetraai wordt berekend als,

$$Q = \int_{l.o}^{r.o.} \int_{z_0(y)}^{h(y)} b(y) \cdot v(z) \cdot dy \cdot dz = A \cdot \bar{v} \quad \text{met} \quad A = b_{gem} \cdot d_{gem} \quad \text{en } \bar{v} = \text{gemiddelde snelheid}$$

met b_{gem} = gemiddelde breedte en d_{gem} = gemiddelde waterdiepte. De totale willekeurige fout r_Q van een 'velocity-area' debietmeting in een meetraai is,

$$r_Q = \sqrt{r_d^2 + r_b^2 + r_v^2 + r_i^2}$$

waarin, (stochastisch weggehaald)

r_Q = de totale meetfout in het debiet,
r_d = de fout in de waterdiepte,
r_b = de fout in de breedte,
r_v = de fout in het snelheidsprofiel,
r_i = de totale fout door beperkte meetduur en aantal punten (snelheid, breedte, diepte).

Uitgangspunt voor deze formule is dat de fouten onderling niet zijn gecorreleerd.

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 een systematische fout is moeilijk te schatten, als deze niet bekend is. Zodra deze wel bekend is, kan hiervoor worden gecorrigeerd. Voor de toevallige instrumentele fout zijn de volgende waarden te vinden in de ISO-standaard 1088. Belangrijk is het geregeld calibreren van de meetinstrumenten als systematische fouten worden vermoed:

- Meten van de breedte: De instrumentele fout bedraagt in het algemeen minder dan 1 % en voor lengten tot circa 250 m maximaal 0,5 %.
- Meten van de diepte: De instrumentele fout is sterk afhankelijk van de samenstelling van de rivierbedding. Een fout van 1 % lijkt een redelijke benadering.
- Meten van de stroomsnelheid: De standaardafwijking van calibratiefouten voor meters van het cuptype is minder dan 1 %. Voor het propellertype bleek uit onderzoek bij een stroomsnelheid van 0,2 m/s een standaardafwijking op te treden van 5 %, afnemend tot 0,5 % voor een stroomsnelheid van 2,5 m/s.

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 30 seconden voor hoge en 60 seconden voor lage stroomsnelheden bereikt deze fout een acceptabele waarde. Daarnaast is deze fout enigszins afhankelijk van het aantal punten in een verticaal;
- fout veroorzaakt door het meten van een beperkt aantal punten in een verticaal;
- fout ten gevolge van het meten van een beperkt aantal verticalen in een dwarsprofiel.

In ISO-standaard 1088 wordt een methode beschreven - opgesteld voor brede dwarsprofielen, breedte groter dan 30 meter - voor het bepalen van de relatieve standaardafwijking bij gebruik van diverse aantallen punten in een verticaal en een verschillend aantal verticalen in een dwarsprofiel. Een berekening van de gecombineerde toevallige fout is gegeven in Bijlage C.
Bij een zorgvuldig uitgevoerde meting zal de fout als volgt variëren:

- wading methode r_Q = 3 à 6 %
- vanaf een brug of boot r_Q = 3 à 8 %

5.1.6 GESCHIKTE MEETINSTRUMENTEN

Voor de standaard velocity-area methode hangt de keuze van het instrumenttype af van:

- de gewenste meetnauwkeurigheid,
- de beschikbaarheid van het meetinstrument,
- breedte en diepte van de waterloop op de meetlocatie (breed/smal, diep/doorwaadbaar)
- ervaring van de meetploeg,
- de verwachte duur van min of meer stationaire stromingsomstandigheden,
- de verwerkingsmethode van de meetgegevens (digitaal/analoog),

Geschikte stroomsnelheidsmeetinstrumenten zijn:
- akoestische stroomsnelheidsmeter (ADCP) (par. 7.3.3)
- elektromagnetische sensoren (EMS) (par. 7.3.5)
- propeller- of schroefstroomsnelheidsmeter, draait om een horizontale as (par. 7.3.6)
- cuptype stroomsnelheidsmeter, draait om een verticale as (par. 7.3.6)

Een belangrijk aspect van de methode is de positionering van de stroomsnelheidsmeter. Daartoe bestaan verschillende "klassieke" methoden: waden, vanaf een brug, met een kabelloop of vanaf een boot (zie par. 7.3.6). De keuze van het type instrument voor de meting van de stroomsnelheid en de wijze van positionering bepalen de behoefte aan extra meetinstrumenten, zoals:
- afstandmeters (meetlint/digitaal)
- positiebepaling (theodoliet/GPS)
- waterstandsmeters (peilschaal/digitaal)
- waterdieptemeters (meetstok/digitaal)
- watertemperatuurmeters (thermometer/digitaal)
- saliniteitsmeters (monsters/digitaal)

5.1.7 MOGELIJKHEDEN EN BEPERKINGEN

De standaard velocity-area methode wordt veel toegepast, waarbij het debiet door een doorstroomoppervlak wordt bepaald, variërend van het gebruik van een ADCP tot het gebruik van een propeller instrument. Indien de standaard velocity area methode niet toegepast kan worden wordt doorgaans gebruik gemaakt van de moving-boat methode (par. 5.2).

De velocity-area methode is in zijn algemeenheid minder geschikt bij niet-stationaire omstandigheden, snel veranderende afvoersituatie en bij meting ten behoeve een stuwkromme. Bij stationaire stroming is de methode wel geschikt.

Daarnaast is de wijze van positionering van de stroomsnelheidsmeter medebepalend voor de toepassingsmogelijkheden. Bij grotere waterlopen wordt de "klassieke" positioneringsmethode al gauw tijdrovend en kostbaar.

5.1.8 VOORBEELDEN

FOTO 5-1 METING DRENTSCHE STUW, COEVOERDEN (FOTO: TEN KATE-KOOL)

FOTO 5-2 WADEN EN METING VANAF EEN BRUG (FOTO'S: WS NOORDERZIJLVEST)

5.1.9 ISO-STANDAARDEN

De ISO-standaarden die betrekking hebben op de standaard velocity-area methode zijn de volgende:

- ISO 1088: Velocity-area methods, determination of errors
- ISO 9823: Velocity-area method using a restricted number of verticals

en voor de stroomsnelheidsmeetinstrumenten:

- ISO 748: Measurement of discharge using currentmeters or floats
- ISO 2537: Rotating element current meters
- ISO 4366: Echosounders for water depth measurements
- ISO 4373: Waterlevel measuring devices
- ISO 4375: Cableway systems for stream gauging
- ISO 24154: Measuring velocity and discharge with acoustic Doppler profilers
- ISO 24578: Application of acoustic Doppler current profilers

5.2 AANGEPASTE VELOCITY-AREA METHODEN

Er kunnen allerlei redenen zijn waarom het meetprogramma, beschreven voor de standaard velocity-area methode, moet worden aangepast. Voorbeelden hiervan zijn metingen onder niet-stationaire omstandigheden en metingen in grotere waterlopen, waar de standaard methode tijdrovend en kostbaar kan zijn. Bekende aangepaste velocity-area meetmethoden zijn:

- moving-boat methode
- deflectiemethode
- drijvermetingen

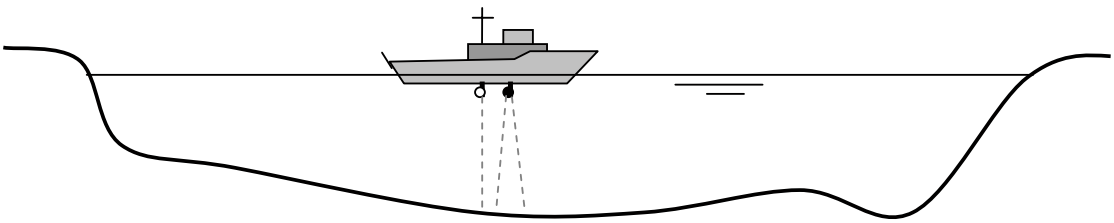
In Nederland wordt de moving-boat methode toegepast, bijvoorbeeld voor debietmetingen met een ADCP. De deflectiemethode en drijvermetingen worden tegenwoordig zelden toegepast in Nederland. Om een eerste indruk te verkrijgen van de grootte van het debiet kunnen deze methoden worden toegepast of als er geen moderne meetinstrumenten voor handen zijn.

5.2.1 MOVING-BOAT METHODE

Rivieren in het getijdegebied of bovenrivieren tijdens een passerende hoogwatergolf vertonen een niet-stationaire stroming, zodat ernaar wordt gestreefd de meettijd kort te houden. Onder dergelijke omstandigheden kan de “moving-boat” methode worden toegepast. Gezien de korte tijd waarin de metingen worden verricht, kan de moving-boat methode in de praktijk alleen worden uitgevoerd met ervaren waarnemers.

De klassieke moving-boat methode werkt als volgt. Een meetboot vaart met een constante snelheid van oever tot oever, langs een vooraf vastgestelde lijn (vaarlijn). Tijdens de oversteek wordt in een groot aantal punten de diepte gemeten met behulp van een “echosounder” bevestigd aan een frame op de meetboot. Tegelijkertijd worden de stroomsnelheden gemeten met een, eveneens aan dit frame bevestigde, stroomsnelheidsmeter die zich op een constante diepte bevindt, zie Figuur 5-8.

FIGUUR 5-8 PRINCIPE MOVING-BOAT METHODE



De gemeten snelheid v_r representeert de resultante van de vaarsnelheid van de boot v_b en de stroomsnelheid van het water v_w. Op de volgende manieren kan hieruit de stroomsnelheid v_w worden bepaald:

- Tijdens de periode dat de snelheid v_r wordt gemeten, worden de positie van de boot en de hoek α tussen de vaarlijn en de as van de snelheidsmeter waargenomen met behulp van een hoekindicator. De stroomsnelheid is nu: $v_w = v_r \times \sin \alpha$.
- de bootsnelheid v_b in elk “meetpunt” volgt uit opeenvolgende positiebepalingen. De boot volgt de voorgeschreven vaarlijn zo goed mogelijk, zodat de stroomrichting ongeveer loodrecht staat op de vaarrichting. De snelheid wordt nu berekend als $v_w = (v_r^2 - v_b^2)^{1/2}$.

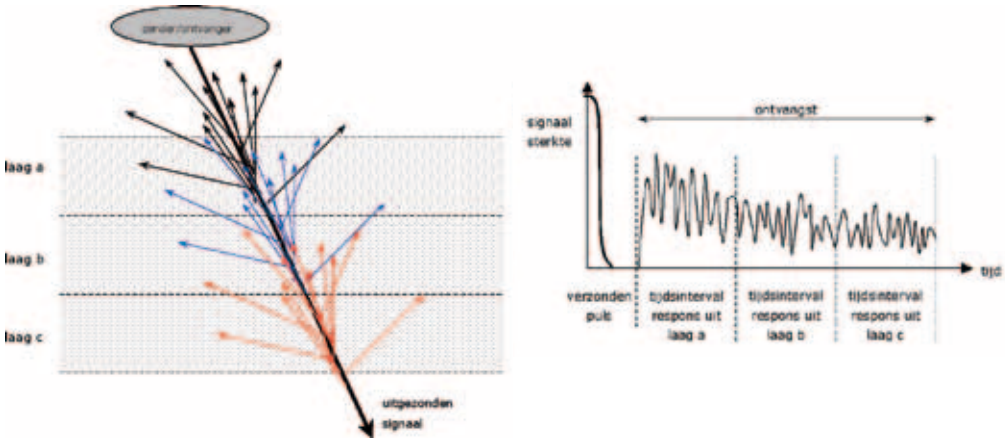
- De stroomsnelheid moet worden vermenigvuldigd met een factor K om de gemiddelde snelheid in de verticaal te berekenen. In veel gevallen is K = 0,9 een goede benadering. De totale afvoer kan dan worden bepaald aan de hand van de in par. 5.1.4 beschreven mid-section methode.

Tegenwoordig wordt veelal een ADCP gebruikt bij de moving-boat methode en noemt men de methode ook wel de *varende ADCP-meting*. Bij varende ADCP-metingen is feitelijk geen sprake van een velocity-area methode om het debiet te bepalen. In de bemeten zone wordt het debiet al varende geïntegreerd en het debiet in de onbemeten zones wordt berekend. Belangrijk is dat de absolute stroomsnelheid nauwkeurig bekend is. Daarbij kan bottom-track of een DGPS worden gebruikt. Er is nog onderscheid te maken in een varende ADCP die van oever tot oever vaart of een varende ADCP die van verticaal naar verticaal gaat.
In het laatste geval meet de ADCP 1-3 minuten in de verticaal en wordt het debiet met de velocity-area methode bepaald.

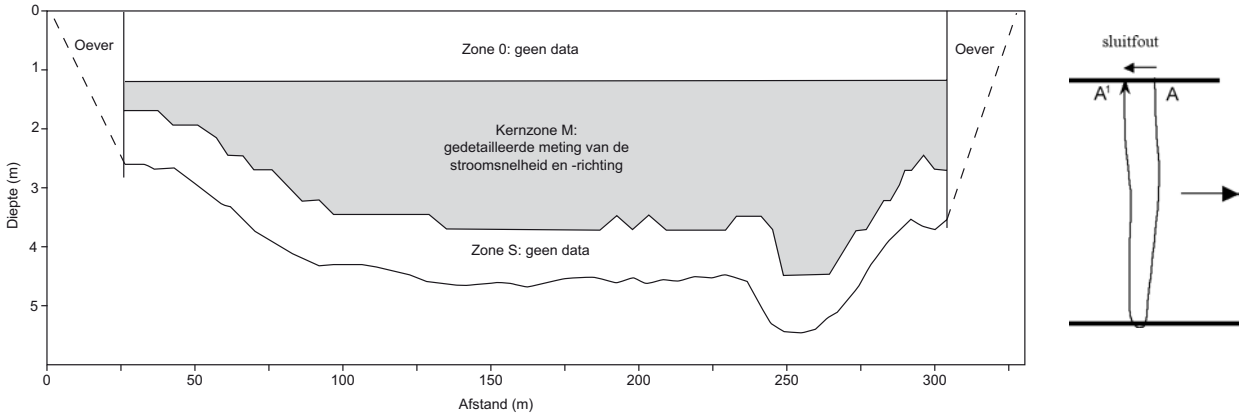
In het eerste geval vaart een meetboot met een constante snelheid van oever tot oever, langs een vooraf vastgestelde lijn (vaarlijn). Tijdens de oversteek wordt in een groot aantal punten de stroomsnelheid gemeten met de ADCP en tevens de lokale diepte. De ADCP is bevestigd aan een frame op de meetboot of ingebouwd in de kiel zoals bij veel meetvaartuigen van Rijkswaterstaat.

Een ADCP bepaalt in verticale secties het snelheidsprofiel over de verticaal, dat vervolgens moet worden omgerekend naar een debiet. De Meetdienst van Rijkswaterstaat Limburg streeft er naar om minstens circa 70% van het snelheidsprofiel in een meetraai te bemeten met een ADCP, zie Figuur 5-10, om een betrouwbare debietmeting te verkrijgen. De overige gebieden in de meetraai nabij het wateroppervlak, de bodem en de oevers (circa 30%) worden met de software van de ADCP berekend. De berekening wordt uitgevoerd met behulp van gefitte theoretische snelheidsprofielen en correctiefactoren. Voor de fit worden veelal machtsprofielen gebruikt. Het apparaat geeft aan het eind van de meting de totale afvoer.

FIGUUR 5-9 **PRINCIPE WERKING ADCP STROOMSNELHEIDSMETER**



FIGUUR 5-10 VOORBEELD, GEBIEDEN IN EEN MEETRAAI WAAR EEN ADCP WEL MEET EN DE ZONES ZONDER MEETINFORMATIE



Bij hogere rivierafvoeren zal bodemtransport optreden waardoor de gemeten stroomsnelheden door de ADCP niet meer absoluut gerelateerd kunnen worden aan een nulreferentie. Met een DGPS systeem aan boord van het meetschip kan de absolute nulreferentie wel worden bepaald, hoewel een DGPS ook een onnauwkeurigheid heeft (afhankelijk van het type tussen de 0,01 m en 1 m). Een veelgebruikte methode om de nulreferentie te bepalen, zonder aparte DGPS, is het varen tijdens de meting in een 'lus'. Het meetschip vaart het punt A op de ene oever naar punt B op de andere oever. Vervolgens vaart het meetschip terug van B naar A'. De coördinaten van punt A en A' moeten identiek zijn. Veelal geeft de ADCP na verwerking van de resultaten aan dat er een verschil is in locatie tussen punt A en punt A', de sluitfout. Het verschil in locatie dat de ADCP tussen vertrek van punt A en aankomst bij punt A', is een maat voor de beweging van de rivierbodem. De fout in de afvoer die gemaakt wordt als niet voldoende gecorrigeerd wordt voor de bottom-track kan enkele procenten zijn. Ook zonder bodemtransport, dus met een stilstaande bodem, kan de fout in de afvoer 1% bedragen [Lit. 29]. Rijkswaterstaat Oost-Nederland gebruikt een DGPS en Rijkswaterstaat Limburg past bottom-track toe varende in een lus.

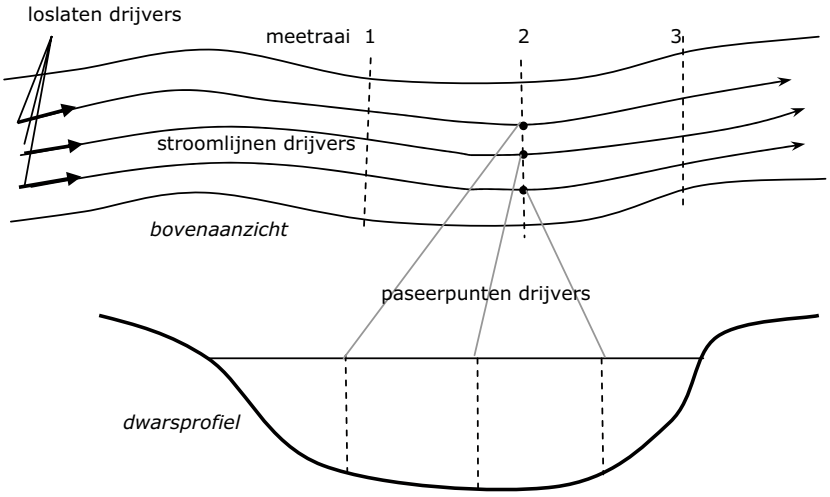
5.2.2 DEFLECTIE METHODE

Vanaf een meetboot of brug wordt een voorwerp van licht gewicht en speciale vorm via een dunne draad in het water neergelaten. Door de kracht van het stromende water vertoont de draad een geringe uitwijking ten opzichte van de verticaal. Deze hoek is een maat voor de snelheid. De deflectiemethode met behulp van de pendulummeter kan bijvoorbeeld worden toegepast in getijdegebieden als ook de stroomrichting moet worden bepaald [Lit. 3]. Deze methode wordt tegenwoordig zelden in Nederland gebruikt.

5.2.3 DRIJVERMETINGEN

Drijvers vormen de eenvoudigste gereedschappen om stroomsnelheden te meten. Aan het begin, halverwege en aan het eind van een meettraject worden drie meetraaien gekozen (loodrecht op de stroomrichting). In de meetraai halverwege het traject wordt de afvoer bepaald. De drijver moet voldoende ver stroomopwaarts worden losgelaten, om bij de eerste meetraai de stroomsnelheid van het water te hebben aangenomen. De tijdsduur, die verloopt tussen het passeren van de drijver van de eerste en de derde meetraai, wordt vervolgens waargenomen. Deze procedure wordt enkele malen herhaald waarbij de drijver zich op verschillende afstanden vanaf de oever bevindt. De afstand van de drijver tot de oever wordt bij het passeren van de middelste meetraai gemeten, bijvoorbeeld met een meetlint, rangefinder of theodoliet. Op de plaats van deze passeerpunten in de middelste raai wordt vervolgens de diepte gemeten, zie Figuur 5-11.

FIGUUR 5-11 PRINCIPE DRIJVERMETINGEN



De snelheid van de drijver wordt berekend als het quotiënt van de onderlinge afstand tussen de eerste en derde meetraai en de tijdsduur die verstreken is tussen het passeren van deze raaien. Deze drijversnelheid moet worden vermenigvuldigd met een correctiefactor k voor het berekenen van de gemiddelde snelheid in de verticaal. Er zijn verschillende typen drijvers waarmee snelheden kunnen worden bepaald (Figuur 5-10):

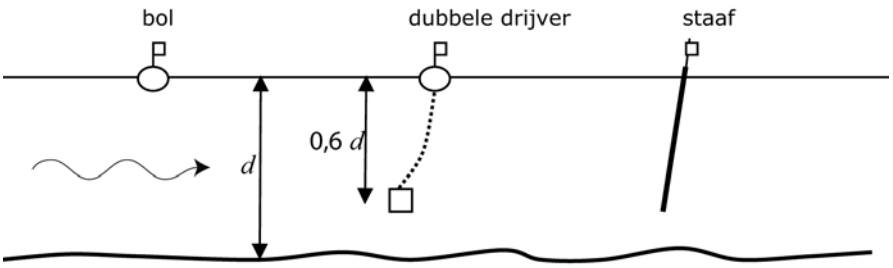
- Oppervlaktedrijvers

De snelheid direct onder de waterspiegel wordt gemeten met behulp van een verzwaarde plastic bal of ander voorwerp (waarvan niet meer dan 5 à 10% boven water uitsteekt ter voorkoming van windeffecten). De correctiefactor K hangt af van de bodemruwheid, aangegeven met de weerstandscoëfficiënt $n = 1/k_M$ van Manning (Tabel 5-2).

- Dieptedrijvers

Een plastic pijp of houten stok wordt zodanig verzwaard, dat slechts 5 à 10 cm boven water uitsteekt. Hoe dieper de drijver in het water steekt, des te beter wordt de gemiddelde snelheid benaderd. Er moet echter worden vermeden, dat de onderkant van de drijver in contact komt met de bodem. De correctiefactor K hangt nu af van de relatieve onderdompelingsdiepte y/d, met y = onderdompelingsdiepte en d = waterdiepte (Tabel 5-2).

FIGUUR 5-12 ENKELE TYPEN DRIJVERS



Voor het bepalen van de afvoer wordt het dwarsprofiel in de middelste meetraai getekend en verdeeld in een aantal segmenten, gemarkeerd door de passeerpunten van de drijvers in de middelste meetraai. In deze passeerpunten en aan beide oevers is ook de diepte van de waterloop gemeten (Figuur 5-11). Het debiet kan vervolgens worden bepaald met de mid- of mean-section methode.

TABEL 5-2 CORRECTIEFACTOR K VOOR DRIJVERS [LIT. 3]

oppervlaktedrijvers		dieptedrijvers	
n [s/m$^{1/3}$] *)	K	y/d	K
0,029 - 0,037	0,78	0,10	0,86
0,021 - 0,028	0,84	0,25	0,88
0,017 - 0,022	0,87	0,50	0,90
0,014 - 0,019	0,89	0,75	0,94
0,012 - 0,016	0,90	0,95	0,98

*) voor 0,50 m < hydraulische straal (R) < 2,50 m

5.2.4 ONNAUWKEURIGHEID DEBIET

Bij een zorgvuldig uitgevoerde meting kunnen de fouten als volgt variëren:

- moving-boat methode : r_Q = 5 à 10 %
- deflectie methode : r_Q = 10 à 15 %
- drijvermeting : r_Q = 5 à 10 %

De onnauwkeurigheid bij een varende meting wordt vooral bepaald door:

- de bepaling van de absolute referentie voor de gemeten snelheden (bottom-track),
- variatie in de vaarsnelheid.

5.2.5 GESCHIKTE MEETINSTRUMENTEN

Geschikte stroomsnelheidsmeetinstrumenten zijn:

- propeller- of schroefstroomsnelheidsmeter, draait om een horizontale as
- cuptype stroomsnelheidsmeter, draait om een verticale as
- elektromagnetische sensoren (EMS)
- akoestische stroomsnelheidsmeter (ADCP)

Aanvullende meetinstrumenten:

- afstandmeters (meetlint/digitaal)
- positiebepaling (theodoliet/GPS)
- waterstandsmeters (peilschaal/digitaal)
- waterdieptemeters (meetstok/digitaal)
- watertemperatuurmeters (thermometer/digitaal)
- saliniteitsmeters (monsters/digitaal)

5.2.6 MOGELIJKHEDEN EN BEPERKINGEN

De moving-boat methode wordt langs de rivieren voornamelijk toegepast daar waar de meer “klassieke” standaard velocity area methode op praktische en/of financiële bezwaren stuit (te brede watergang, hinder van scheepvaart, geen faciliteiten op de oever mogelijk of overstroomd) of waar niet-stationaire omstandigheden een snelle meting vereist [Lit. 24].

Als er niet kan worden gevaren kan men met een klein systeem (ADCP op een catamaran of trimaran) vanaf een brug worden gemeten of vanaf de oevers met kabels.

5.2.7 VOORBEELDEN

Langs de rivieren worden in de huidige meetpraktijk van Rijkswaterstaat afvoermetingen volgens de moving-boat methode verricht met:

- Propellerstroomsnelheidsmeters: met behulp van een meetvaartuig worden op gezette afstanden langs een van tevoren vastgestelde meetraai dwars op de rivierloop stroom-

metingen uitgevoerd langs de verticaal op onderlinge afstanden van 50 cm ter bepaling van het stroomsnelheidsprofiel. Het bodemprofiel – ter bepaling van het totale doorstroomde dwarsprofiel – wordt gemeten met een single-beam echolood, waarbij de bodemligging (c.q. –diepte) ter plaatse van elke verticaal wordt afgelezen voor de berekening van de afvoer. Met deze gegevens wordt de totale afvoer door het doorstroomde dwarsprofiel berekend met de zogenaamde semi-integratiemethode. Gewerkt wordt volgens de in de ISO-normen vastgelegde voorschriften. Een enkele afvoermeting neemt 2-4 uur in beslag, al naar gelang de locale (afvoer)omstandigheden [Lit. 23].

- ADCP's ter vervanging van de propellerstroommetingen: hierbij is er geen sprake meer van afzonderlijke verticalen, maar worden de stroomsnelheden gemeten in een groot aantal cellen door een verticaal metende ADCP. De integratie tot een totale afvoer komt tot stand aan de hand van de zogenaamde bottom-track, waarmee de bodemligging (c.q.-diepte) wordt gemeten. Een enkele afvoermeting neemt slechts enkele minuten in beslag, net zo lang als nodig is om de rivier in dwarsrichting over te varen. Vanwege de korte tijdsduur wordt standaard 5 maal heen en weer gevaren, zodat in feite 10 metingen worden verricht [Lit. 23].

FOTO 5-3 MEETVAARTUIGEN RIJKSWATERSTAAT BIJ LOBITH (LINKS) EN IN LIMBURG (FOTO'S: RIJKSWATERSTAAT)

5.2.8 ISO-STANDAARDEN

De ISO-standaard die betrekking heeft op de moving-boat methode is de volgende:

- ISO 4369: Moving-boat method

En voor de stroomsnelheidsmeetinstrumenten:

- ISO 748: Measurement of discharge using currentmeters or floats
- ISO 2537: Rotating element current meters
- ISO 14028: Propeller-type currentmeters and their calibration
- ISO 24154: Measuring velocity and discharge with acoustic Doppler profilers
- ISO 24578: Application of acoustic Doppler current profilers

5.3 VERHANGMETHODE

Deze afvoermethode is gebaseerd op het meten van het energieverhang en een gemiddeld dwarsprofiel. De ruwheid van de waterloop moet worden geschat, waarna de gemiddelde stroomsnelheid aan de hand van bekende empirische formules kan worden berekend [Lit. 4]. De verhangmethode wordt algemeen als een “ad hoc” methode gezien, vanwege de onbetrouwbaarheid in het meten van het verhang en het schatten van de ruwheid en wordt alleen gebruikt wanneer meer nauwkeurige methoden, zoals de velocity-area methode, niet toepasbaar zijn. Deze methode wordt in Nederland zelden toegepast.

5.3.1 MEETPRINCIPE

De waterstand wordt gemeten in twee meetraaien aan begin en eind van het meettraject. Het energieverhang (S) wordt nu bepaald uit de energiehoogtes (H1,H3) in beide meetraaien (Figuur 5-13):

$$S = (H_1 - H_3) / L \quad \text{waarbij} \quad H = h + \frac{v^2}{2g}$$

met:

S	:	energieverhang [-]
H	:	energiehoogte in de meetraai [m]
L	:	lengte meettraject [m]
h	:	waterstand in de meetraai [m]
v	:	gemiddelde stroomsnelheid in de meetraai [m/s]
g	:	versnelling van de zwaartekracht [= 9,81 m/s^2]

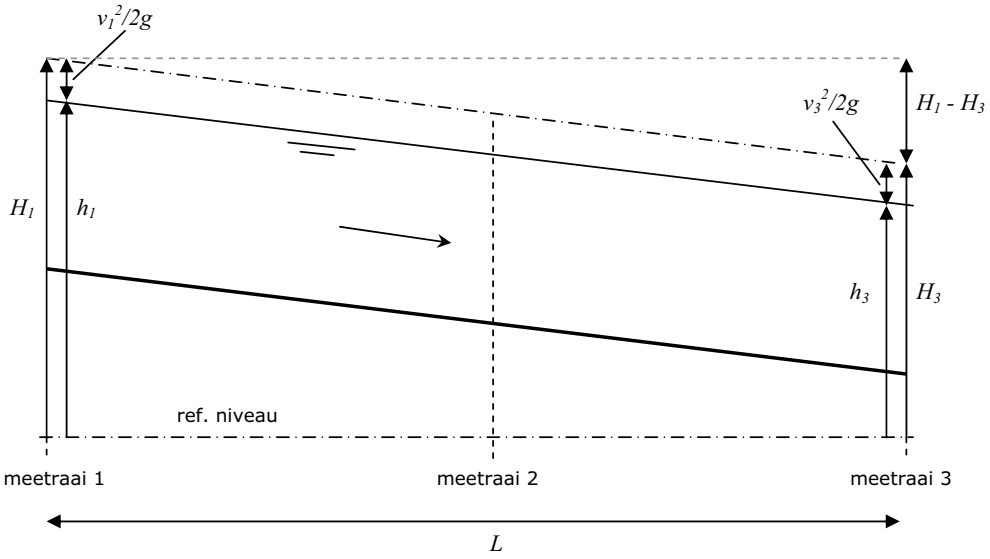
Als het traject redelijk uniform is en geen significante verschillen optreden tussen de gemeten dwarsprofielen, dan kan het verhang worden berekend uit de waterstand (h_1,h_3) in de meetraaien:

$$S = (h_1 - h_3) / L$$

De oppervlakte (A_1, A_2, A_3) en de lengte van de natte omtrek (P_1, P_2, P_3) van de dwarsprofielen worden bepaald uit de opgemeten dwarsprofielen, zie Figuur 5-14. De gemiddelde oppervlakte (A) en natte omtrek (P) over het meettraject worden berekend uit de waarden voor de meetraaien 1 en 3 aan begin en eind van het meettraject en een meetraai 2 halverwege, zie Figuur 5-13, volgens:

$$A = \frac{A_1 + 2A_2 + A_3}{4} \quad \text{en} \quad P = \frac{P_1 + 2P_2 + P_3}{4}$$

FIGUUR 5-13 LENGTEPROFIEL MEETTRAJECT VERHANGMETHODE



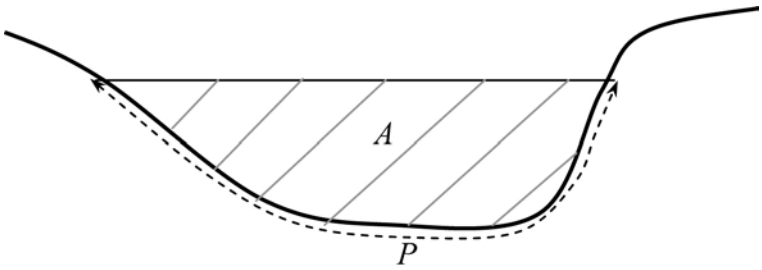
De gemiddelde snelheid kan worden berekend volgens de Manning formule [Lit. 3]:

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2} \quad \text{waarin} \quad \frac{1}{n} = k_M$$

met:

R = hydraulische straal A/P [m]

FIGUUR 5-14 DEFINITIE OPPERVLAK EN NATTE OMTREK DWARSPROFIEL



n = weerstandscoëfficiënt van Manning [s/m$^{1/3}$]

Een andere mogelijke formule is het gebruik van de Chézy-vergelijking [Lit. 4]:

$$v = C \sqrt{R \cdot S}$$

met C = Chézy-coëfficiënt [m$^{1/2}$/s], $C = 18 \log (12\, R/k_N)$, k_N = Nikuradse ruwheidshoogte [m].

In de praktijk wordt de Chézy-vergelijking hoofdzakelijk toegepast voor grote rivieren (breder dan circa 30 m) en de Manning-formule voor de kleinere waterlopen. In dit handboek zullen, gezien de doelgroep, verder alleen Manning-waarden worden vermeld. De relatie tussen de Manning n en de Nikuradse k_N is te bepalen met,

$C_{Manning} = \frac{1}{n} \cdot R^{1/6}$ en $C_{Chezy} = 18 \log \frac{12R}{k_N}$, voor $C_{Manning} = C_{Chezy}$ geldt dan,

$$n = \frac{R^{1/6}}{18 \log\left(\frac{12R}{k_N}\right)} \quad \text{of} \quad k_N = 12R \cdot 10^{-\left(\frac{R^{1/6}}{18 \cdot n}\right)}$$

Waarden voor Manning coëfficiënten, zoals die worden vermeld in de ISO-standaard 1070 [11], zijn gegeven in Bijlage B. Deze waarden vormen slechts een indicatie: als R klein is en het beddingmateriaal erg grof, kunnen aanzienlijke fouten optreden. Daarnaast is k_M ook afhankelijk van de diepte en de mate van begroeiing van een waterloop. In Bijlage B is eveneens een gecombineerd stromingsmodel beschreven, waarin de mate van begroeiing is opgenomen [Lit. 6]. Voor niet al te sterk begroeide waterlopen kan op deze wijze k_M redelijk goed worden benaderd met de formule: k_M = 0,3 x V_0, waarin V_0 het percentage openwater (niet begroeide deel) van het totale dwarsprofiel is.

De voorwaarde voor het gebruik van de Manningformule is dat de stroming volledig turbulent is en de grens voor toepassing (in de VS) luidt: $n^6 \sqrt{R\,S} \geq 1{,}9\ 10^{-13}$ [Lit. 28].

5.3.2 BEPALING DEBIET

Nadat de gemiddelde snelheid is berekend, kan uit de gemiddelde oppervlakte van het dwarsprofiel en de gemiddelde snelheid de afvoer Q worden berekend:

$$Q = v \cdot A$$

Of als de gemeten grootheden worden gebruikt,

$$(1) \quad Q = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2} \cdot A \quad \text{of} \quad (2) \quad Q = C \cdot R^{1/2} \cdot S^{1/2} \cdot A$$

De formule van Riggs geeft een vereenvoudiging van de verhangmethode voor steile beken, waarbij het niet nodig is de ruwheid van de waterloop te schatten. De afvoer wordt gerelateerd aan de oppervlakte van het dwarsprofiel en het verhang van de waterspiegel [Lit. 7]:

$$\log Q = 0{,}191 + 1{,}33 \log A + 0{,}05 \log S - 0{,}056 \left(\log S\right)^2$$

Berekeningen van de afvoer Q volgens deze vereenvoudigde verhangmethode blijken redelijk overeen te komen met waarden die worden gevonden als wel gebruik wordt gemaakt van een goed geschatte ruwheidscoëfficiënt.

5.3.3 GESCHIKTE MEETINSTRUMENTEN

Voor de verhangmethode geschikte meetinstrumenten zijn:

- afstandmeters (meetlint/digitaal)
- positiebepaling (theodoliet/DGPS)
- waterstandsmeters (peilschaal/digitaal)
- waterdieptemeters (meetstok/digitaal)

5.3.4 ONNAUWKEURIGHEID DEBIET

De nauwkeurigheid van de afvoerbepaling volgens de verhangmethode neemt toe, als de oevers en bedding in het meettraject stabiel zijn, het meettraject recht is met een uniform dwarsprofiel en vrij is van obstakels en andere verstoringen. De lengte van het traject moet aan de volgende voorwaarden voldoen [Lit. 3]:

- ≥ 75 maal de waterdiepte,
- ≥ 5 maal de breedte op de waterspiegel,
- ≥ 300 meter (bij voorkeur),
- het te meten verval moet minimaal 0,15 m bedragen.

Voor de bepaling van het debiet met de verhangmethode met de Manningformule (1) respectievelijk de Chézy formule (2) geldt:

$$(1)\quad Q = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2} \cdot A \quad \text{of} \quad (2)\quad Q = C \cdot R^{1/2} \cdot S^{1/2} \cdot A$$

De toevallige fout is dan als volgt gedefinieerd:

$$(1)\ r_Q = \sqrt{r_n^2 + \frac{2}{3} r_R^2 + \frac{1}{2} r_S^2 + r_A^2} \quad \text{of} \quad (2)\ r_Q = \sqrt{r_C^2 + \frac{1}{2} r_R^2 + \frac{1}{2} r_S^2 + r_A^2}$$

met:

r_Q = totale fout in het debiet (%)
r_n = fout in het schatten van de coëfficiënt van Manning (%)
r_R = fout in de bepaling van de gemiddelde hydraulische straal (%)
r_S = fout in het meten van het energieverhang (%)
r_A = fout in de bepaling van de gemiddelde natte doorsnede (%)

Hoewel ieder van de fouten r_R, r_S en r_A al gauw 5 à 7,5 % zullen bedragen, is de kans op het verkeerd inschatten van de Manning coëfficiënt (n) meestal veel groter. Bij een aangenomen fout r_n = 15 à 35 %, wordt de fout in de debietbepaling r_Q = 20 à 40 %.

5.3.5 MOGELIJKHEDEN EN BEPERKINGEN

De verhangmethode wordt algemeen als een “ad hoc” methode gezien, vanwege de onbetrouwbaarheid in het meten van het verhang en het schatten van de ruwheid en wordt alleen gebruikt wanneer meer nauwkeurige methoden, zoals de velocity-area methode, niet toepasbaar zijn. De methode kan worden gebruikt om zowel piekafvoeren als wat minder hogere afvoeren te bepalen voor uniforme en minder uniforme trajecten.

5.3.6 VOORBEELDEN

De verhangmethode wordt wereldwijd toegepast om piekafvoeren te berekenen na passage van een hoogwatergolf. De ideale toepassing is een situatie waarbij op beide oevers van een uniforme waterloop het profiel behorende bij de hoogwatergolf is vastgelegd met hoogwatermerken. Met de formule van Manning of Chézy is dan eenvoudig de afvoer te berekenen op basis van de helling, de dwarsdoorsnede en de hydraulische straal [Lit. 24].
In Nederland wordt de methode zelden toegepast.

5.3.7 ISO-STANDAARDEN

De ISO-standaard die betrekking heeft op de verhangmethode (slope-area-method) is de volgende:

- ISO 1070: Slope-area method

5.4 VERDUNNINGSMETHODE

In waterlopen waar het dwarsprofiel moeilijk meetbaar is, of waar de stroomsnelheden te hoog zijn om met normale snelheidsmeters te kunnen meten, kan de verdunningsmethode worden toegepast. Deze methode is gebaseerd op het principe van continuïteit: de hoeveelheid water en tracermateriaal die een sectie passeert, moet ook de volgende sectie passeren. De stroming wordt stationair verondersteld gedurende de meting. Er zijn verschillende verdunningsmethoden, waarvan de meest gangbare is behandeld in dit hoofdstuk. Overigens wordt de verdunningsmethode weinig toegepast in Nederland. De methode is zeer geschikt voor bergbeken en snelstromende ondiepe beken die moeilijk bereikbaar zijn en waterlopen die in de stroomrichting een sterk wisselend dwarsprofiel hebben.

5.4.1 PRINCIPE VERDUNNINGSMETHODE EN BEPALING DEBIET

CONTINUE TOEVOEGING TRACER

Voor de tracer geldt de volgende massabalans gedurende de meting:

$$Q \cdot C_0 + Q_t \cdot C_A = (Q + Q_t) \cdot C_B$$

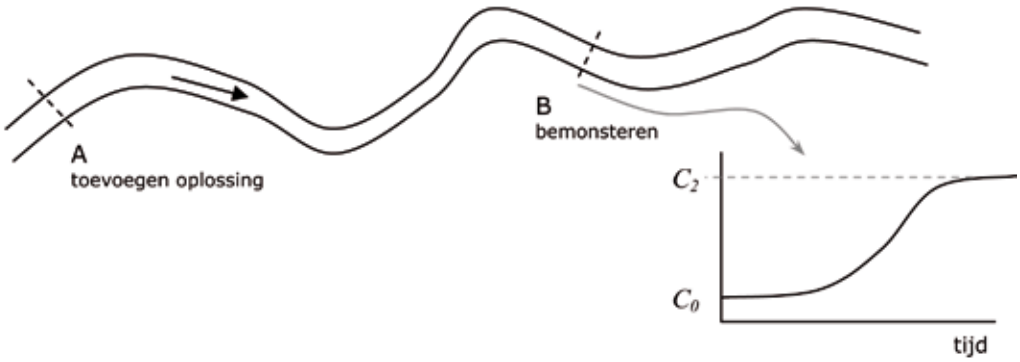
Hieruit kan de afvoer van de waterloop worden berekend, indien C_0, C_A, C_B en Q_t bekend zijn:

$$Q = Q_t \cdot \frac{C_A - C_B}{C_B - C_0}$$

met:

Q	: debiet waterloop (m3/s)
Q_t	: debiet toegevoegde traceroplossing [m³/s]
C_0	: natuurlijke concentratie rivierwater [mg/l]
C_A	: concentratie traceroplossing bij punt A [mg/l]
C_B	: concentratie rivierwater bij punt B na volledige menging [mg/l]

FIGUUR 5-15 PRINCIPE CONTINUE TOEVOEGING VERDUNNINGSMETHODE



Een voorwaarde voor de uitvoering van een betrouwbare meting volgens deze methode is, dat de natuurlijke zoutconcentratie van het rivierwater C_0 niet buitensporig hoog is en dat het debiet van de tracertoevoeging minstens 0,02% bedraagt van de geschatte afvoer.

VEREENVOUDIGDE CONTINUE TOEVOEGING

De afvoer van de waterloop wordt nu berekend volgens:

$$Q = Q_t \cdot \frac{V}{V_t}$$

met:

Q	: debiet waterloop (m^3/s)
Q_t	: debiet toegevoegde traceroplossing [m^3/s]
V	: volume rivierwater [m^3]
V_t	: volume tracer oplossing [m^3]

Lit. 24 beschrijft de praktische uitvoering van deze vereenvoudigde methode.

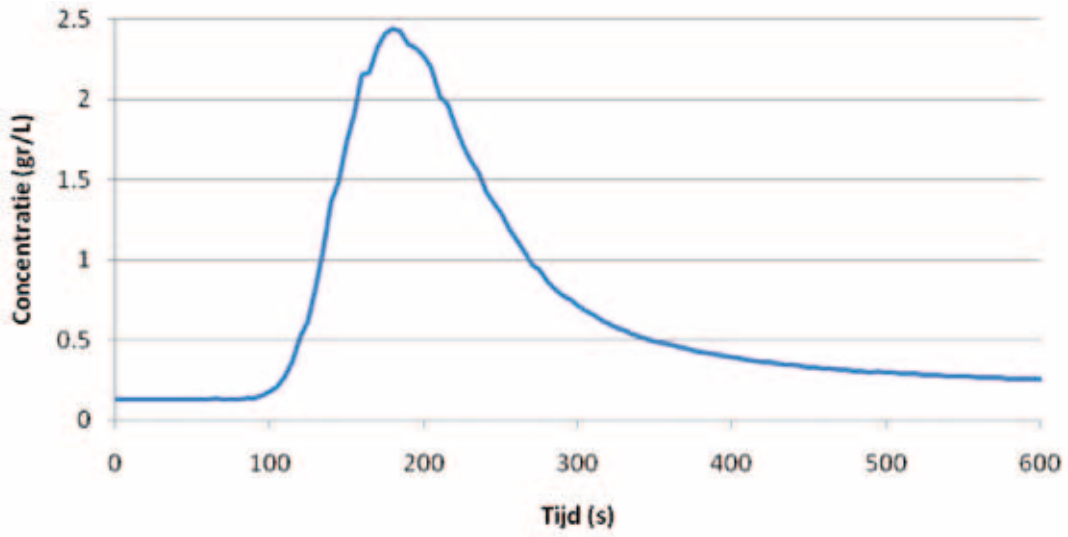
PUNTLOZING TRACER

De zoutverdunningsmethode is een methode waarbij een bekende massa van een substantie (normaalgesproken keukenzout) op één punt in het water wordt geloosd. Benedenstrooms, op de locatie waar de substantie over het gehele doorstroomoppervlak is verspreid, wordt het verloop van de concentratie van deze substantie over de meettijd T bepaald. Door de toegevoegde massa M te delen door de integraal van het concentratieverloop in de tijd $C(t)$ ten opzichte van de beginconcentratie C_0, kan het debiet worden bepaald:

$$Q = \frac{M}{\int_0^T [C(t) - C_0] \cdot dt}$$

Bij het toepassen van deze meetmethode is de voorwaarde dat de achtergrondconcentratie $C_0 << C(t_0)$, de beginconcentratie. Een voorbeeld van het concentratieverloop in de tijd is in onderstaand figuur gegeven.

FIGUUR 5-16 VOORBEELD VAN CONCENTRATIEVERLOOP IN DE TIJD BENEDENSTROOMS VAN EEN PUNTLOZING



De afstand van het punt waar de tracer wordt 'losgelaten' moet ver genoeg benedenstrooms liggen om zeker te zijn van volledige menging van de tracer in het water. Met de onderstaande formule van Rimmer kan de minimale afstand tussen lozingspunt en meetpunt worden bepaald:

$$L \geq \frac{0{,}13 \cdot B^2 \cdot C \cdot (0{,}7 \cdot C + 2\sqrt{g})}{g \cdot d} \quad \text{als } 4{,}8 < \frac{C}{\sqrt{g}} < 16$$

waarin B = waterloopbreedte, C = Chézy-coëffiënt, d = waterdiepte en g = zwaartekrachtsversnelling. De formule is gebaseerd op een lozing vanaf de oever, als de tracer middenin de waterloop wordt geloosd moet de halve waterloopbreedte ($1/2B$) worden gebruikt.

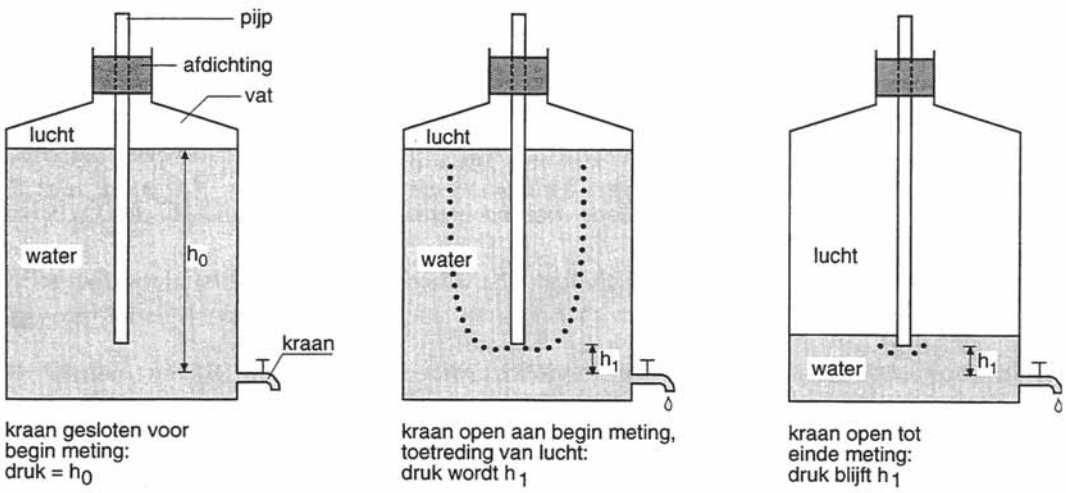
5.4.2 TOEPASSEN VERDUNNINGSMETHODE

CONTINUE TOEVOEGING TRACER

Bovenstrooms in het meettraject wordt bij punt A, gedurende een aantal minuten (afhankelijk van de snelheid van menging) vanaf tijdstip t = 0, een continue en constante hoeveelheid traceroplossing met concentratie C_A aan het stromende water toegevoegd (Figuur 5-15). In punt B, voldoende ver benedenstrooms van het injectiepunt waar volledige menging van rivierwater en traceroplossing kan worden verondersteld, worden met vaste tijdsintervallen monsters genomen. Na een bepaalde tijd bereikt de concentratie benedenstrooms een maximale, constante waarde C_B, hetgeen er op duidt, dat de menging in B volledig is en dat de meting kan worden beëindigd, zie Figuur 5-15.

De toediening van de traceroplossing vindt plaats door middel van een Mariotte fles, zie Figuur 5-17, waarmee een constant debiet van de oplossing kan worden ingesteld. De met traceroplossing gevulde Mariotte fles wordt in de gewenste positie geplaatst bij het injectiepunt (A). Daarna wordt het kraantje geopend en zal de oplossing onder een constante druk h_1 uit de fles stromen. Deze uitstroming Q_t wordt bij het starten van de meting bepaald (met maatcylinder en stopwatch) en zo mogelijk nogmaals aan het eind van de meting herhaald.

FIGUUR 5-17 WERKING MARIOTTE FLES



De duur van de toediening hangt af van de tijd die nodig is om in het bemonsteringspunt volledige menging te bereiken. De capaciteit van de Mariotte fles wordt bepaald door het volume van de fles (boven de opening van de luchtpijp) en het uitstromende debiet. Dit debiet wordt bepaald door de druk h_1 en de grootte van de uitstroomopening. De maximale afvoer van een waterloop die kan worden gemeten met een Mariotte fles, inhoud 25 liter, bedraagt circa 0,5 m^3/s. Grotere afvoeren kunnen worden gemeten met behulp van een tank, waarin een constant niveau wordt gehandhaafd, of met een pomp.

VEREENVOUDIGDE CONTINUE TOEVOEGING

In de waterloop zal de afvoer Q de uitstroming van de Mariotte fles Q_t, met concentratie C_A en geleidendheid E_{CA}, verdunnen tot een oplossing met geleidendheid E_{CA}. In een emmer wordt dit verdunningsproces nagebootst: een kleine hoeveelheid traceroplossing V_t (1 tot 10 ml) wordt nauwkeurig afgemeten met een pipet. Vervolgens wordt zoveel rivierwater V toegevoegd, totdat de geleidendheid van het mengsel gelijk is aan de gemeten E_{CB}. De verhouding V/V_t is de verdunningsratio.

BENODIGD MATERIAAL:

- 1 Mariotte fles + frame voor installatie boven de waterloop
- 1 trechter
- 2 tanks/emmers (10 tot 12 liter)
- 1 roerstok
- 2 maatcylinders (500 ml)
- 2 pipetten (2 ml en 5 ml)
- 1 stopwatch
- 1 geleidendheidsmeter (bereik 0 tot 5000 µS/cm)
- kleurstof (uranine)
- zout (ongeveer 8 kg per meting bij een Mariotte fles van 25 liter). In verband met de gewenste nauwkeurigheid streven naar maximale concentratie, d.w.z.: zo veel zout gebruiken dat net niet alles oplost. De maximale oplosbaarheid van zout is 350 kg/m^3 bij 15° C.

MEETPROCEDURE BIJ VEREENVOUDIGDE CONTINUE TOEVOEGING

1 Selecteer een locatie volgens de criteria genoemd in par. 5.4.4.
2 Voeg tracer toe in het injectiepunt, teneinde de plaats van het bemonsteringspunt te bepalen.
3 Maak de Mariotte fles, trechter, emmers, roerstok, maatcylinders en pipetten schoon.
4 Bereid de traceroplossing in één van de emmers door bijvoorbeeld circa 8 kg NaCl goed te mengen met circa 25 liter rivierwater en giet het in de Mariotte fles.
5 Giet rivierwater in een tweede emmer en meet de geleidendheid E_{C0} (normale waarde tussen 100 en 500 µS/cm).
6 Plaats de Mariotte fles in de goede positie waar de zoutoplossing aan het rivierwater wordt toegevoegd (injectiepunt).
7 Open het kraantje en meet de uitstroming met een maatcylinder en stopwatch. Herhaal deze meting, het gemiddelde is de waarde voor de uitstroming Q_t. Bewaar de cylinder met de zoutoplossing.
8 Meet in het bemonsteringspunt de geleidendheid met een tijdsinterval van 15 seconden (nodig: geleidendheidsmeter en stopwatch). Noteer de gemeten waarden.
9 Stop de meting (en de tracertoediening) als de geleidendheid een constante waarde heeft bereikt. Dit is de maximale waarde E_{CB}.
10 Pipetteer een exacte hoeveelheid V_t van de bij 7. bewaarde zoutoplossing in een schone emmer.

11 Meet met een maatcylinder bekende hoeveelheden origineel rivierwater af en meng deze met de afgemeten zoutoplossing, totdat de geleidendheid van dit mengsel gelijk is aan de bij 9. gemeten E_{CB}. Noteer de toegevoegde hoeveelheden, de totale hoeveelheid rivierwater V die uiteindelijk is toegevoegd.
12 Bereken de afvoer van de waterloop, zie paragraaf 5.4.1.

5.4.3 GESCHIKTE TRACERS

Het meten van de concentraties kan op verschillende manieren, afhankelijk van de gebruikte tracer:

- kleurstoffen, bijvoorbeeld uranine: concentraties worden gemeten met een fluorimeter,
- zouten, bijvoorbeeld keukenzout (NaCl): concentraties worden bepaald door middel van titratie of via meting van geleidendheid en temperatuur,
- radioactieve tracers: concentraties worden bepaald met een deeltjesteller.

Een tracer dient te voldoen aan de volgende voorwaarden:

- goed oplosbaar,
- geen adsorptie aan andere in het rivierwater aanwezige materialen, bodemsedimenten of vegetatie,
- niet milieu-verontreinigend (snel afbreekbaar),
- lage kosten.

In veel gevallen kan bijvoorbeeld landbouwzout worden gebruikt, waarbij de concentraties worden bepaald met behulp van een geleidendheidsmeter.

Een geschikte gemiddelde NaCl concentratie die met een geleidendheidsmeter wordt gemeten is ongeveer 0,1 gr/l. Voorafgaand aan een meting moet het debiet worden geschat om een indruk te verkrijgen van de hoeveelheid tracer die nodig is. Voor een eenmalige puntlozing duurt de concentratiegolf circa 5 à 10 minuten (300 tot 600 seconden) zodat een tracer massa nodig is van:

$$M[gr] = Q[l/s] \cdot 600[s] \cdot 0{,}1[gr/l]$$

Deze tracermassa wordt gemengd met water alvorens het te lozen in de waterloop.

5.4.4 GESCHIKT MEETTRAJECT

In het gekozen meettraject mag geen toe- of afvoer van water via bijvoorbeeld zijrivieren plaatsvinden en moet de stroming turbulent zijn. De lengte van het meettraject moet voldoende zijn voor een volledige menging van het rivierwater met de traceroplossing over het hele dwarsprofiel.

Voor een punttoediening in een smalle rivier (breedte kleiner dan 10 meter) kan een indicatie van de minimale menglengte Y_{min}, nodig voor volledige menging, worden berekend volgens de vergelijking van Rimmar, zie Tabel 5-3.

In het veld kan de benodigde menglengte worden bepaald door toediening van een kleurstof, bijvoorbeeld uranine. Op het oog kan worden bepaald op welke afstand vanaf het injectiepunt volledige menging over het dwarsprofiel is verkregen. In het algemeen kan de menglengte worden verkort, door de tracer over de volledige breedte van de waterloop verspreid toe te dienen.

TABEL 5-3 MINIMALE MENGLENGTEN BIJ GEBRUIK VERDUNNINGSMETHODE

breedte b [m]	n [s/m$^{1/3}$]	diepte d [m]	Y_{min} [m]	afvoerbereik Q [m^3/s]
0,50	0,07	0,15	9	circa 0,02 - 0,10
2,00	0,05	0,35	90	circa 0,5 - 1,5

Een praktische benadering is ook wel: Y_{min} = 25 × B bij grotere breedte

5.4.5 ONNAUWKEURIGHEID DEBIET

Voor een debietmeting met de oplossingmethode of tracermethode is het uitgangspunt voor de foutenberekening de formule,

$$Q = Q_t \cdot \frac{f(C_A)}{f(C_B)}$$

waarin Q_t = het toegevoegde debiet met tracer, C_A = tracerconcentratie op locatie A en C_B = tracerconcentratie op locatie B. De totale stochastische fout in het debiet is,

$$r_Q = \sqrt{r_{Q_t}^2 + r_{C_A}^2 + r_{C_B}^2 + r_i^2}$$

met:

r_Q = totale fout in het debiet (%)
r_{Qt} = fout in het toegevoegd debiet (%)
r_{CA} = fout in de tracerconcentratie op locatie A(%)
r_{CB} = fout in de gemeten tracerconcentratie op locatie B (%)
r_i = totale instrumentele fout (%)

De ISO-standaard 9555 doet geen duidelijke uitspraak over de toevallige fout r_Q in de afvoerbepaling met de verdunningsmethode. Uit simultaan uitgevoerde debietmetingen met deze en andere methoden (velocity-area methode en met meetstuwen) kan globaal worden geconcludeerd, dat de toevallige fout, mits de verdunningsmethode zorgvuldig wordt uitgevoerd, r_Q = 3 à 6 % bedraagt.

Voor een puntlozing is het uitgangspunt voor de foutenberekening de formule:

$$Q = \frac{M}{\int_0^T [C(t) - C_0] \cdot dt} = \frac{M}{C \cdot T}$$

waarin M = de toegevoegde massa van de tracer, C = de gesommeerde tracerconcentratie over de meettijd T. De totale stochastische fout in het debiet is,

$$r_Q = \sqrt{r_M^2 + r_C^2 + r_T^2 + r_i^2}$$

Uit ervaringen met deze methode wordt gemeld dat voor debieten tot 2000 m^3/s de relatieve fout beperkt kan worden tot 1%.

De geleidendheidsmeter moet vooraf worden gecalibreerd. Dat kan in het veld worden gedaan in een emmer met bekende tracerconcentratie, bijvoorbeeld 8 gram NaCl oplossen in 1 liter water. Na meten het watervolume halveren en bijvullen tot 1 l en weer meten; weer halveren en bijvullen en meten. Deze procedure zeven maal herhalen. De geleidendheid is afhankelijk

van de temperatuur, daarom is het aan te bevelen een geleidendheidsmeter te gebruiken met temperatuursensor zodat voor de temperatuur automatisch wordt gecorrigeerd.

Wel waarschuwt de ISO-standaard terecht voor de volgende bronnen van systematische fouten:

- Een deel van de tracer-oplossing kan reacties aangaan met andere in het water opgeloste stoffen, of concentreert zich rondom aanwezige vegetatie of aan sediment, resulterend in een overschatting van het debiet.
- Bij onregelmatige profielen zullen die profielgedeelten, waar de stroomsnelheid laag is, (korte verbreding/verdieping) een langere mengtijd vragen dan bij regelmatige profielen. Onderschatting hiervan leidt tot een te snel beëindigen van de meting, hetgeen eveneens resulteert in een overschatting van het debiet.

Aangezien deze systematische fouten in de Nederlandse situatie vrijwel niet te vermijden zijn, zal de fout in de debietbepaling in Nederland eerder in de orde van grootte van r_Q = 5 à 10 %.

5.4.6 MOGELIJKHEDEN EN BEPERKINGEN

De mogelijkheden voor toepassing liggen bij moeilijk toegankelijke rivier- of beektrajecten en waterlopen die een (sterk) turbulente stroming hebben. Voor grote waterlopen is de hoeveelheid tracer wellicht te groot om benedenstrooms te kunnen meten. Een belangrijke beperking is het verbod op gebruik van tracers. Niet alle tracers kunnen worden gebruikt en een vergunning van de beheerder is veelal nodig.

5.4.7 VOORBEELDEN

In Nederland wordt de methode zelden toegepast,

FOTO 5-4 CONTRASTSTOFMETING: MEETAPPARAAT (LINKS) EN TOEVOEGEN ZOUTOPLOSSING (RECHTS) (FOTO'S: FLOW-TRONIC)

5.4.8 ISO-STANDAARDEN

De ISO-standaarden die betrekking hebben op de tracermethode zijn de volgende:

- ISO 9555-1: Tracer dilution methods, part 1: general
- ISO 9555-4: Tracer dilution methods, part 4: fluorescent tracers
- ISO 11656: Mixing length of a tracer

5.5 VELDCALIBRATIE VAN AFVOERKUNSTWERKEN

Afvoerkunstwerken zoals gemalen en stuwen hebben een afvoerrelatie die doorgaans bij de bouw van het kunstwerk is vastgesteld met ijkmetingen of garantiemetingen. Soms wordt ook een theoretisch bepaalde afvoerrelatie aangehouden. In de praktijk blijkt echter dat de werkelijke afvoerrelatie afwijkt van de gebruikte:

- Voor stuwen en inlaten geldt meestal dat de gebruikte standaard afvoerformules niet geheel overeenkomen met de in het veld gemeten afvoerrelatie. Dit komt onder andere doordat de vorm van de stuwen of inlaten en de toestroom afwijken van de vorm waar de standaard formule voor geldt.
- Voor gemalen geldt dat de werkelijke bedrijfsomstandigheden kunnen afwijken van de omstandigheden van de garantiemeting of dat de ijkmeting heeft plaatsgevonden in de fabriek. Slijtage en dergelijke zorgen voor verdere afwijkingen.

FOTO 5-5 DEBIETMETING MARKNESSERSLUIS, WS ZUIDERZEELAND (FOTO: HKV LIJN IN WATER)

Met het beschikbaar komen van draagbare digitale akoestische en elektromagnetische stroomsnelheidsmeters is veldcalibratie van gewone peilregulerende kunstwerken, zoals stuwen, gemalen en inlaten, goed mogelijk. De gebruikte standaard afvoerformules worden dan vervangen door in het veld gemeten afvoerrelaties van het kunstwerk en in sommige gevallen kan de locatie de nevenfunctie van meetlocatie krijgen.

Belangrijk is dat een veldcalibratie onder alle mogelijke omstandigheden kan plaatsvinden, dus naast de normale afvoer ook bij hogere en extreme afvoer dan wel maximale en minimale maaldebieten en opvoerhoogten. Een bijkomend voordeel van de veldcalibratie van stuwen over een groot afvoerbereik is dat bij hoogwater de invloed van verdrinking van de stuwen direct meegenomen wordt in de nieuwe afvoerrelatie.
Bij de in-situ calibratie van kunstwerken wordt hoofdzakelijk gewerkt volgens de standaard ‘velocity-area’-methode, waarbij gebruikt gemaakt wordt van een eenvoudig handelbare akoestische stroomsnelheidsmeter (ADC) of een elektromagnetische stroomsnelheidsmeter (EMS) of de zogeheten varende ADCP-meting.

5.5.1 GESCHIKTE MEETINSTRUMENTEN

Voor het uitvoeren van in-situ calibratiemetingen is, afhankelijk van de afmeting van de waterloop, nodig: een stromingsmeter, een stabiele boot of constructie (brug), een PDA, een radioverbinding en bijbehorende software.

- Propeller- of schroefstroomsnelheidsmeter
- elektromagnetische sensor (EMS)
- akoestische stroomsnelheidsmeter (ADC)
- akoestische Dopplermeter (ADCP)

Kleinere ondiepe waterlopen zijn het beste te meten met een elektromagnetische snelheidsmeter (EMS). Akoestische instrumenten werken slecht benedenstrooms van stuwen, vanwege de vele luchtinsluitingen.
ADCP's vragen ook om ruimte om te meten; een combinatie van meetinstrumenten tijdens een in-situ calibratie kan dan gewenst zijn. Horizontale ADCP's zijn minder geschikt voor in-situ calibratie i.v.m. de onnauwkeurigheid van een dergelijke meting voor dat doel.

5.5.2 ONNAUWKEURIGHEID

Zie over de onnauwkeurigheid wat hierover geschreven is bij de betreffende methode par. 5.1 (velocity area methode) of par. 5.2 (moving-boat methode) of bij het betreffende instrument par. 7.3.3 (ADCP) of par. 7.3.5 (EMS).

5.5.3 MOGELIJKHEDEN EN BEPERKINGEN

VOORDELEN VAN IN-SITU CALIBRATIE [LIT. 18]

- Het kunstwerk wordt bemeten zoals het in de praktijk functioneert. Alle plaatsspecifieke eigenaardigheden worden meegenomen, bijvoorbeeld bij de onjuiste plaatsing van een waterstandsmeting (staan vaak te dicht op het kunstwerk) of bij afwijkingen in de gebruikte constanten voor de aan- en afvoerleiding, alsook het door lokale omstandigheden anders functioneren van het kunstwerk;
- Het geschikt maken van een bestaande stuw door veldcalibratie is veel goedkoper dan het inrichten van een nieuw permanent meetpunt. Investeringen zijn niet nodig en extra beheer en onderhoud evenmin;
- Grote afwijkingen in het functioneren van kunstwerken worden opgemerkt. Er zijn kunstwerken die anders gedimensioneerd zijn dan in eerste instantie is aangegeven;
- Bij automatisering van de kunstwerken wordt in de telemetrie vaak een standaard formule ingevoerd. Deze komt niet altijd overeen met de wijze waarop het kunstwerk functioneert;
- Voordeel van de veldijking met een ADCP of een elektromagnetische stroomsnelheidsmeter is dat ze redelijk snel uitgevoerd kunnen worden.

NADEEL VAN IN-SITU CALIBRATIE [LIT. 18]

- In eerste instantie wordt alleen het onderste deel van de afvoer-waterstandsrelatie (Qh-relatie), dat onder normale omstandigheden water afvoert, gemeten. Voor de afvoer onder extreme omstandigheden moeten zich de juiste omstandigheden voordoen. Extrapolatie van de gegevens is niet altijd even betrouwbaar; extra metingen onder extreme omstandigheden waarborgen een goede Qh-relatie;
- Met hoogwatergolven en verandering van het profiel door sedimentatie of begroeiing rond het kunstwerk wordt geen rekening gehouden.

5.5.4 VOORBEELDEN

FOTO 5-6 IN-SITU CALIBRATIE MET EEN ADCP (FOTO'S: A. MULDER)

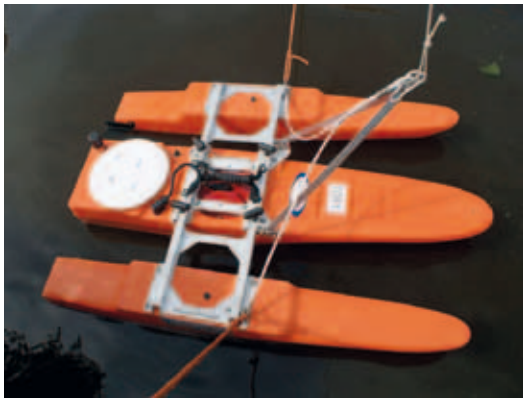


FOTO 5-7 METING IN EEN RAAI MET KABELLIJN EN ADCP T.B.V. CAPACITEITSMETING OPVOERGEMAAL LEEK (FOTO: WS NOORDERZIJLVEST)

5.5.5 ISO-STANDAARDEN

De ISO-standaarden die betrekking hebben op de handelingen rond een veldcalibratie voor wat betreft de methode zijn:

- ISO 1088: Velocity-area methods, determination of errors
- ISO 9823: Velocity-area method using a restricted number of verticals

en voor de stroomsnelheidsmeetinstrumenten:

- ISO 24154: Measuring velocity and discharge with acoustic Doppler profilers
- ISO 24578: Application of acoustic Doppler current profilers
- ISO 15768 Degisn, selection and use of electromagnetic current meters
- ISO 11974 Electromagnetic current meters

6

CONTINUE DEBIETMEETMETHODEN

Debietmeetmethoden kunnen worden onderscheiden in:

- Incidentele metingen waaronder wordt verstaan het meten van het debiet op een locatie gedurende een beperkte periode en met een frequentie van enkele keren per maand of per jaar;
- Continue metingen waaronder wordt verstaan het meten van het debiet op een locatie gedurende een langere periode en waarbij de informatie over het debiet semi-continu, bijvoorbeeld met een frequentie van eenmaal per kwartier of per dag wordt ingewonnen.

Continue metingen zijn gericht op de behoefte aan regelmatige en voortdurende informatie over debieten, bijvoorbeeld iedere 10 minuten, uur, 12 uur of dag. Voor continue debietmetingen kunnen de volgende meetmethoden worden gebruikt, die in dit hoofdstuk staan beschreven:

- *meetstuwen (par. 6.1).* Bij meetstuwen is er in de meeste gevallen een vaste relatie tussen de bovenwaterstand en het debiet. Uit het continu meten van de waterstand volgt derhalve continue informatie over het debiet. Meetstuwen worden in dit hoofdstuk onderscheiden in gestandaardiseerde en niet-gestandaardiseerde meetstuwen.
  Voor *gestandaardiseerde meetstuwen (par. 6.1.1)* is de geometrie en de afvoerrelatie vastgelegd in een ISO-standaard.
  Bij *niet-gestandaardiseerde stuwen (par. 6.1.2)* bestaat er eveneens informatie over de vormgeving en de afvoerrelatie die echter niet algemeen erkend is in een ISO-standaard.

- *meetgoten (par. 6.2).* Ook bij meetgoten is er een vaste relatie tussen de bovenwaterstand en het debiet. Deze relatie wordt afgedwongen door de inrichting van de constructie van de goot. Uit het continu meten van de waterstand volgt de continue informatie over het debiet.

- *de looptijdverschilmethode (par. 6.3).* De debieten worden berekend uit metingen van de stroomsnelheid en de waterstand. De oppervlakte van het dwarsprofiel is een functie van de waterstand. De stroomsnelheid wordt berekend uit het verschil in looptijd van een geluidsgolf die onder water diagonaal op de stroomrichting in stroomopwaartse richting wordt uitgezonden, en langs dezelfde weg in stroomafwaartse richting wordt teruggezonden.

- *de snelheidsmethode (par. 6.4).* De debieten worden berekend uit metingen van de stroomsnelheid en de waterstand. De oppervlakte van het dwarsprofiel is een functie van de waterstand. De stroomsnelheid wordt berekend door geluids- of radargolven uit te zenden en het door de snelheid van het water ontstane Dopplereffect te meten, dan wel door een geleider in een magnetische veld te bewegen en het daaruit ontstane potentiaalverschil te meten.

- *de methode op basis van de relatie debiet en waterstand (par. 6.5).* In vrij afstromende waterlopen bestaat een min of meer eenduidige relatie tussen waterstand en debiet, die meestal is opgesteld met behulp van de velocity-area methode. Door de waterstand continu te meten, kan daaruit het debiet worden herleid.

- *de methode op basis van de relatie debiet en verval (par. 6.6).* Bij vijzels en pompen, waarvan de gemaal-karakteristiek bekend is, kan de uitgeslagen hoeveelheid water worden bepaald uit het gemeten niveauverschil over het gemaal en de registratie van de bedrijfstijden.

6.1 MEETSTUWEN

Stuwen en ook schuiven worden in het waterbeheer toegepast om een waterpeilverschil te bewerkstelligen, het bovenstroomse waterpeil te regelen, de afvoer te regelen en soms om, in combinatie met de andere functies, de afvoer te meten. In het laatste geval spreken we van meetstuwen.

Bij een meetstuw wordt het dwarsprofiel van de waterloop plaatselijk versmald en wordt een specifieke waterhoogte (bijvoorbeeld de overstorthoogte) gemeten voor de bepaling van het debiet. De relatie tussen de gemeten waterhoogte en het debiet wordt bepaald door de vorm en inrichting van de stuw. Zijn vorm en inrichting conform de voorschriften van de ISO dan spreken we van een gestandaardiseerde meetstuw. Daarnaast zijn er vele niet-gestandaardiseerde meetstuwen.

Stuwen of schuiven of andere gelijksoortige waterbouwkundige objecten die niet ontworpen zijn als meetinrichting kunnen wel een afvoerwaarde leveren. Hiervoor wordt doorgaans een theoretische afvoerformule aangehouden met een “natte vinger” inschatting van de bijbehorende afvoercoëfficiënt. De afvoerrelatie van dergelijke objecten kan met een veldcalibratie nauwkeuriger worden bepaald (zie par. 5.5) of nog nauwkeuriger in een hydraulisch laboratorium.

Meetgoten hebben hydraulische karakteristieken die overeenkomen met die van meetstuwen, maar worden in een apart hoofdstuk behandeld (par. 6.2).

Het gebruik van meetstuwen is de afgelopen jaren sterk achteruitgegaan. Meetstuwen verdwijnen langzamerhand; er komen geen nieuwe bij. De belangrijkste oorzaak hiervan is het feit dat meetstuwen vispassage onmogelijk maakt. Dit is wel gewenst naar de huidige ecologische inzichten en beleid. Anderzijds neemt de vraag naar debieten en met name hoeveelheden afvoer sterk toe voor het uitvoeren van vrachtonderzoeken/stoffenbalansen en wordt de voorkeur gegeven aan alternatieve meetprincipes.
Van de toepassing van meetstuwen wordt derhalve in de navolgende hoofdstukken een meer overzichtsmatige beschrijving gegeven. Hoofdstuk 7.1 beschrijft de meetprincipes en afvoerformules. Voor wie meer gedetailleerde informatie wil kan terecht in Lit. 24.

FOTO 6-1 MEETSTUW DE MATJES (FOTO: WS BRABANTSE DELTA)

6.1.1 INDELING VAN STUWEN

Stuwen zijn al naar gelang de functie in de volgende hoofdgroepen te onderscheiden:

STUWEN MET VASTE KRUIN

Voorbeelden : Allerlei soorten bodemvallen, vaste drempels en cascades.
Functie : Het waarborgen van een minimumpeil bovenstrooms en het afzwakken van afvoergolven benedenstrooms.
Toepassing : In waterlopen met betrekkelijk veel verval.

REGELSTUWEN MET BEWEEGBARE KRUIN

Voorbeelden : Schuiven die in verticale sponningen bewegen en klepstuwen.
Functie : Peilregeling tussen een minimale en een maximale waterstand (winterpeil en zomerpeil) en het regelen van het debiet.
Toepassing : In waterlopen met betrekkelijk weinig verval in een gebied met nu eens een waterbehoefte, dan weer een overschot. Verlangen om bij te kunnen sturen als de omstandigheden dit vragen (sturing van grondwater).
Opmerking : Voor regelstuwen geldt dat tijdens het ontwerp van deze kunstwerken het aspect van debietmeting geen rol speelt bij de vormgeving van de stuw.

MEETSTUWEN MET VASTE KRUIN

Voorbeelden : Het Thomson-meetschot, Venturi-meetgoten (zie par. 6.2) en tal van lange en korte overlaten zoals de Rossum-stuw.
Functie : Het meten van debieten.
Toepassing : Bij waterbalansstudies, gecombineerde kwaliteits- en kwantiteitsmeetpunten, waar geen behoefte is om bij te kunnen sturen in de afvoer.

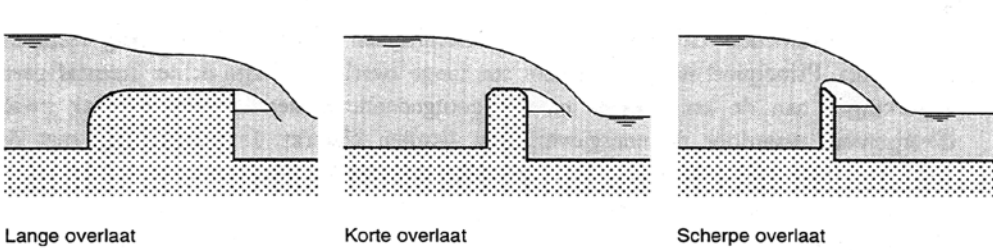
MEETSTUWEN MET BEWEEGBARE KRUIN

Voorbeelden : De horizontale en de V-vormige lange overlaten, beweegbaar in verticale sponningen.
Functie : Het meten en regelen van debieten.
Toepassing : Bij dagelijks waterbeheer, de sturing van aan- en afvoer van waterhoeveelheden van peilgebied naar peilgebied, waterbalansstudies en gecombineerde kwaliteits- en kwantiteitsmetingen. Een combinatie van parallel geschakelde meetstuwen (met beweegbare kruin) levert een verdeelwerk op.
Opmerking : Voor meetstuwen geldt dat tijdens het ontwerp van deze kunstwerken het aspect van debietmeten een primaire rol speelt bij de vormgeving van de stuw.

6.1.2 CLASSIFICATIE VAN MEETSTUWEN

Meetstuwen worden geclassificeerd naar de vorm van de kruin in de stroomrichting en onderverdeeld naar de verschillende vormen van doorstromingsprofiel.

FIGUUR 6-1 DRIE TYPEN MEETSTUWEN



LANGE OVERLATEN

De lengte van de kruin in de stroomrichting is voldoende om min of meer rechte en evenwijdige stroomlijnen te verkrijgen boven de kruin. Dit is het geval als de verhouding overstorthoogte /kruinlengte is < 0,6. Wanneer deze verhouding is > 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. Tot de meest bekende lange overlaten behoren:

- de horizontale lange overlaat met vaste kruin,
- de Hobrad overlaat (Hobrad: horizontal broad-crested adjustable)
- de V-vormige lange overlaat.

SCHERPE OVERLATEN

De lengte van de kruin (in de stroomrichting) is 1 à 2 mm. De stroomlijnen boven de kruin zijn sterk gekromd. De onderkant van de straal laat los op de kruin. De ruimte onder de overstortende straal moet worden belucht (atmosferische druk) om te voorkomen dat door onderdruk onder de straal de afvoerrelatie wordt beïnvloed. Bekende scherpe overlaten zijn:

- de horizontale scherpe overlaat (Rehbock-meetschot),
- de V-vormige scherpe overlaat (Thomson-meetschot),
- de trapeziumvormige scherpe overlaat (Cipoletti-meetschot).

De vorm van de overlaat is zo ontworpen dat de stroomlijnen de overlaatvorm volgen zonder los te laten. Scherpe overlaten zijn zeer gevoelig voor vervuiling door drijvend vuil.

KORTE OVERLATEN

Deze overlaten liggen in het overgangsgebied tussen de lange en de scherpe overlaten. De kruin is te kort om rechte en evenwijdige stroomlijnen te verzekeren, maar ook niet scherp. Bij zeer kleine overstorthoogten kan een korte overlaat de eigenschappen van een lange overlaat benaderen en bij zeer grote overstorthoogten die van een scherpe overlaat. Een aantal korte overlaten moet worden belucht. Bekende korte overlaten zijn:

- ‘triangular profile weirs’, waaronder de Crump-overlaat,
- horizontale stuwen met een ronde kruin,
- V-vormige stuwen met een halfcirkelvormige kruin (Rossum-stuw).

Afhankelijk van de kruinvorm van de korte overlaat kan de overstortende straal bij een bepaalde overstortende hoogte “opeens” loskomen van de kruin. Dit heeft tot gevolg dat de weerstandswaarde plotseling toeneemt Lit. 27.

ONDERSTORTEN: ONDERWATEROPENINGEN/SCHUIVEN

De doorstroomopening bevindt zich op enige afstand onder de bovenstroomse waterspiegel. In tegenstelling tot de voorgaande typen meetstuwen, waarbij steeds sprake was van een overstortende straal, is bij de openingen onder water sprake van een onderstroom (in het Engels: underflow). Enkele voorbeelden van onderstorten:

- verticale schuiven, zoals de hef-sluisdeur,
- segment-schuiven.

TABEL 6-1 CLASSIFICATIE VAN MEETSTUWEN

Hoofdindeling	Onderverdeling naar de vorm van de opening (vooraanzicht)		
	rechthoekig	V-vormig	trapeziumvormig
lange overlaten	x	x	x
korte overlaten	x	x	x
scherpe overlaten	x	x	x
onderwateropeningen	x	-	-

FOTO 6-2 SEGMENTSTUW GROENE KANAAL (FOTO: WS RIJN EN IJSSEL)

6.1.3 AFVOER EN WATERSTAND

De afvoer over een meetstuw wordt bepaald door de vorm en het oppervlak van het doorstroomprofiel en de snelheidshoogte ter plaatste van de opening. Deze snelheidshoogte is gerelateerd aan de overstorthoogte en kan worden afgeleid uit het meten van de waterstand op een bepaalde afstand[1] van de stuw. Zodoende is er een afvoerrelatie tussen de waterstand en het debiet over de stuw.

GRENS TUSSEN GESTUWDE EN ONGESTUWDE AFVOER

De afvoer over een meetstuw is in principe onder te verdelen in drie typen naar de mate waarin de afvoer onbelemmerd plaatsvindt:

- ongestuwde afvoer of volkomen overlaat; de benedenwaterstand heeft geen invloed op de afvoer; er is een eenduidige relatie tussen bovenwaterstand en debiet;

1 Deze afstand is ten minste gelijk aan viermaal de maximale energiehoogteverandering *(ΔH)* over het kunstwerk

- gestuwde afvoer of onvolkomen overlaat of verdronken overlaat; de benedenwaterstand stuwt de bovenwaterstand op en de afvoer moet worden gecorrigeerd met de waarde van de benedenwaterstand; er is een eenduidige relatie tussen het verval over de meetstuw en het debiet;
- overgang van ongestuwde afvoer naar gestuwde afvoer; beperkte invloed van de benedenwaterstand op de afvoerrelatie; de opstuwing van de bovenwaterstand is zodanig gering, dat de meetfout acceptabel is.

In zijn algemeenheid verdient het aanbeveling gestuwde afvoer te voorkomen om twee redenen:

- boven- en onderwaterstand zijn nodig om het debiet te berekenen voor gestuwde afvoersituaties;
- de nauwkeurigheid van het debiet neemt af bij het groter worden van de invloed van de benedenwaterstand, verschillende soorten energieverliezen spelen een rol hierin.

Bij het ontwerp kan men hiermee rekening houden.

FOTO 6-3 MEETSTUW WIELHOEF (FOTO: WS BRABANTSE DELTA)

6.1.4 TYPEN MEETSTUWEN

In onderstaande tabel is een overzicht gegeven van de in Nederland meest gangbare meetstuwen en hun toepassingsgebied:

TABEL 6-2 **GANGBARE TOEPASSING VAN MEETSTUWEN**

Type	Toepassingsgebied/eigenschappen	ISO
Gestandaardiseerde meetstuwen		
Hobrad overlaat	Alleen als volkomen overlaat Beweegbare kruin	4374
V-vormige lange overlaat	Grote en kleine afvoeren gemeten met relatief grote nauwkeurigheid Bijzonder geschikt voor waterlopen met gering verval	8333
Rehbock overlaat	Alleen als volkomen overlaat Alleen schoon water, niet bij drijvend materiaal	1438
Thomson overlaat	Alleen als volkomen overlaat Alleen schoon water, niet bij drijvend materiaal	1438
Niet-gestandaardiseerde meetstuwen		
Klep/schuifstuwen	Alleen als volkomen overlaat Beweegbare kruin Gevoelig voor drijvend materiaal Fouten in de meting van kruinhoogte en overstorthoogte, waardoor tweemaal zo onnauwkeurig als een vaste meetstuw	
Betondrempels met vellingkant	Minimum peilhandhaving met toegevoegde meetfunctie	
Rossum-stuw	Bijzonder geschikt voor lage afvoeren, maar ook piekafvoeren Groot bereik met goede nauwkeurigheid Geen drijvend vuilprobleem Gering gewicht, robuust	

FOTO 6-4 **MEETSTUW MET DRIJVEND VUIL (FOTO: WAGENINGEN UNIVERSITEIT)**

6.1.5 NULPUNTSBEPALING MEETSTUWEN

De nauwkeurigheid van afvoermetingen met meetstuwen wordt ondermeer bepaald door de nauwkeurigheid waarmee de kruinhoogte van de stuw is vastgesteld. Het debiet wordt immers afgeleid uit de overstorthoogte, dat is het verschil in hoogte tussen de bovenstrooms gemeten waterstand en de kruin van de stuw. De fout in de bepaling van de overstorthoogte mag in de regel niet meer bedragen dan enkele millimeters of minder dan bijvoorbeeld 1% van de overstorthoogte.

In principe is voor het bepalen van de overstorthoogte het nauwkeurig meten van zowel de waterstand als het kruinniveau, beide ten opzichte van N.A.P., voldoende. De overstorthoogte is het verschil tussen waterstand en kruinniveau. De metingen van de waterstand en de kruinhoogte zijn door middel van een referentiehoogtemerk beide aan hetzelfde vergelijkingsvlak, het N.A.P., gekoppeld. Daarbij wordt het kruinniveau bepaald door een nauwkeurige waterpassing tussen het referentiehoogtemerk en de kruin van de stuw. Aangezien een stuwkruin zelden zuiver horizontaal is, verdient het aanbeveling de kruin op een aantal punten, gelijk verdeeld over de breedte, te waterpassen.

De nauwkeurigheid kan worden verbeterd door de zogenaamde nulpuntsbepaling. Daarbij worden de waterstand en de kruinhoogte niet eerst elk ten opzichte van het N.A.P. gemeten, maar wordt de instrumentaflezing/uitlezing van de waterstand (analoge, digitale of elektronisch signaal) direct gerelateerd aan het kruinniveau. De nulpuntsbepaling houdt dan in, dat wordt vastgesteld, welke aflezing of welk uitgangssignaal hoort hij een waterstand die exact even hoog is als het kruinniveau. Voor zo'n nauwkeurige nulpuntsbepaling is een verplaatsbare peilnaald of digitale niveaumeter nodig.

De uitvoering van deze nulpuntsbepaling is beschreven in de ISO-standaarden ISO 1438 voor horizontale scherpe overlaten en ISO 8333 voor V-vormige overlaten.

6.1.6 KLEPSTUWEN

Een klepstuw draait om een laaggelegen horizontale as (onder water), haaks op de stroomrichting in de waterloop. De scharnierpunten zijn aangebracht op een betondrempel. De klep is aangebracht tussen twee verticale betonwanden (landhoofden). Bij meerdere kleppen naast elkaar zijn deze gescheiden door tussenpijlers, zie Foto 6-6.

FOTO 6-5 KLEPSTAND AANWIJZING OP DE BETONRAND (FOTO: WAGENINGEN UNIVERSITEIT)

De klep is meestal aan beide zijkanten middels kleparmen opgehangen aan een hydraulische arm, een heugelstang, staaldraad of ketting, waarmee de klepstand kan worden bijgesteld. Bij grotere breedten kan de bediening hydraulisch of mechanisch zijn, maar zowel bij kleine als grote klepstuwen kan de hydraulisch of mechanische bediening worden geautomatiseerd, waarbij zo ongeveer alles mogelijk is: regeling op een constante bovenwaterstand, op een constante benedenwaterstand, òf op een constante overstorthoogte.

FOTO 6-6 HYDRAULISCHE KLEPSTUW BIJ MARIËNBERG IN DE OVERIJSSELSCHE VECHT (FOTO: HKV LIJN IN WATER)

De variatie in klepstuwen is groot. In de vormgeving kunnen de volgende verschillen worden onderscheiden:

- in breedte en hoogte. Ze volgen - net als voor elke andere stuw - uit de maximale afvoer en de beschikbare breedte;
- in ophanging van de klep, zowel in plaats en aantal, als wat betreft de vorm van de ophangarm aangezien de klep mag niet te veel mag doorbuigen onder de belasting;
- in kruinvorm. Deze leiden onder meer tot uiteenlopende afvoercoëfficiënten (voor eenzelfde overstorthoogte zijn de debieten per kruinvorm niet dezelfde).

Op de twee laatste verschillen - ophanging en kruinvorm - wordt hierna iets dieper ingegaan, omdat ze bepalend zijn voor de afvoerrelatie.

VERSCHILLEN IN OPHANGING VAN DE KLEP

De meeste kleppen zijn aan twee zijden opgehangen aan ophangarmen, in het verlengde van de zijstijl. De armlengte van de verschillende kleppen varieert van 0,25 tot 0,75 m. Aan het einde van de arm is een hydraulische arm, heugelstang, kabel of ketting bevestigd die wordt bediend door het bewegingsmechanisme. De volgende (arm)vormen zijn in omloop:

- rechthoekig profiel, komt veel voor bij brede kleppen,
- afgerond profiel, minder vaak toegepast,
- dunne metalen strip òf een haak/oog, bij smalle kleppen.

De laatste vorm is het meest gevoelig voor opeenhoping van drijvend vuil. Bij een balkprofiel is de speling tussen arm en betonwand (enkele centimeters) meestal afgedicht door een rubberstrip. De effectieve afvoerende breedte b is de dagmaat B verminderd met slechts een gedeelte b' van de dikte van de ophangarmen: $b = B - b'$.

$$b' = A \cdot n \cdot a$$

met

A : contractiefactor, afhankelijk van de parameters h_1/B, de klephoek α en de vorm van het profiel (rechthoekig of afgerond: 0,1 < A < 1,0). Voor waarden van A zie [Cultuurtechnisch Vademecum]

n : het aantal ophangarmen

a : de breedte van een ophangarm, inclusief de speling tussen arm en betonwand.

Bij ophanging aan een dunne metalen strip òf een haak/oog constructie is het verlies b' theoretisch bijna verwaarloosbaar. In de praktijk bepaalt de hoeveelheid vuil de waarde en de betrouwbaarheid van b'. Hetzelfde geldt voor de zogenaamde straalbrekers, die sommige kleppen sieren. Het doel hiervan is: het reduceren van de kans op een trillend watergordijn en daarmee het beperken van het lawaai en de schade die trillende stralen vooral bij de lagere afvoeren kunnen veroorzaken.

FOTO 6-7 **KLEPSTANDAANWIJZING (FOTO: WAGENINGEN UNIVERSITEIT)**

VERSCHILLEN IN KRUINVORM

Met de kruin wordt bedoeld de bovenkant van de klep, de vorm zoals die wordt gevoeld door de onderste stroomlijn van het overstortende water. De kruin wordt ook overstortrand genoemd. De volgende vormen zijn in omloop:

- Een paraboolvormige afronding. Het water volgt de gestroomlijnde kruin tot het einde ervan (geen loslaten van stroomlijnen ergens op de kruin).
- Een cilindrische afronding, waarbij de stijfheidsligger en de overstortrand in één element zijn verenigd. De diameter van de buis volgt uit de klepbreedte en de belasting. Het overstortende water laat ergens op de kruin los. Hoe groter de afvoer, des te eerder laat de straal los.

Bij een onvoldoende beluchting ontstaat zelfs een fluctuerend loslaten bij één en dezelfde afvoer. Dit is één van de mogelijke oorzaken van een klapperende straal:

- Balkvormige overstortrand. Bij kleine kleppen is de kruin vaak een houten balk, meestal azobé. De vormvastheid van de houtsoort is heel betrekkelijk en daarmee ook de grootte van de afvoercoëfficiënt.
- Plaatvormige metalen overstortrand. Deze wordt af en toe toegepast bij grotere kleppen. Sommige waterbeheerders gaan ervan uit dat de afvoercoëfficiënt door de globaal scherpe rand dezelfde is als die voor de horizontale scherpe overlaat. Dit is echter niet het geval.

Voor elk van de genoemde kruinvormen is de afvoercoëfficiënt een functie van de overstorthoogte, van de kruinvorm en van de klephoek met de verticaal.

NADELEN

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 de ophangpunten verzamelt zich graag drijvend vuil. In de perioden tussen twee opeenvolgende bezoeken aan de niveaurecorder bij de stuw, heeft drijvend vuil ongestoord de gelegenheid zich op te hopen;
- de ophanging van de klep. Het kan soms voorkomen dat de klep eenzijdig is opgehangen. Dit geeft een afwijking in de kruinhoogte tussen de ophanging en het andere einde van 2-3 cm.
- bepaling van de kruinhoogte/klepstand. Het is niet eenvoudig de kruinhoogte nauwkeurig te bepalen, nog afgezien van kruinen die aan verzakking lijden of kleppen die scheefhangen.

De eis dat dit op 3 à 5 mm nauwkeurig moet gebeuren is niet overdreven: ze geldt voor alle meetstuwen en is in overeenstemming met de geïnvesteerde kosten. De kruinhoogte kan worden vastgesteld door een:

- klepstandaanwijzer op de betonwand
- teller op de as van het windwiel
- peilstok met schuifmaat
- hoekverdraaiing, gemeten onder de klep

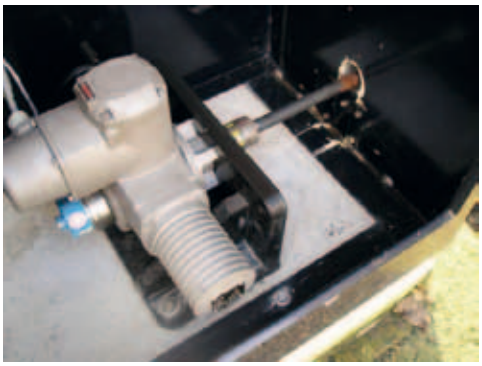
Het is zeer de vraag of de gewenste nauwkeurigheid van 3 à 5 mm door één van deze methoden wordt gehaald (met inachtneming van onderlinge hoogteverschillen op de kruin). De nauwkeurigheid in de bepaling van de kruinhoogte hangt vooral af van de kwaliteit

van de nulpuntsbepaling en het regelmatig herhalen hiervan (scheefhangen en doorbuigen van de klep). De onnauwkeurigheid als gevolg van scheefhanging kan worden gereduceerd, door de hoekverdraaiing in het midden van de klep te meten.

Een bijkomend probleem bij de bepaling van de kruinhoogte is, dat er geen lineair verband bestaat tussen het niveau van de kruin en de hoekverdraaiing van de klep of een asverdraaiing en dus een tellerstand of potentiometerwaarde. Bij een parabolische kruinvorm is dit zelfs nog gecompliceerder omdat het hoogste punt van de kruin niet steeds hetzelfde punt van die parabool is. Door voor een voldoende aantal klephoeken de relatie tussen de hoogte van de kruin en de waarde van de klephoekopnemer op te meten, is het mogelijk door regressie met behulp van bijvoorbeeld een 3e-graads polynoom ($y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3$), waarbij x de waarde van de klephoekopnemer is en y de berekende hoogte van de kruin), voor iedere tussenliggende klephoek dit verband nauwkeurig te bepalen (Tabel 6-3).

Veel standaard klepstandmeters in bijvoorbeeld een aandrijvingsmotor zijn onnauwkeurig. Controleer de nauwkeurigheid van de klepstandmeting en vervang desnoods de meting of verbeter de meting met een digitale absolute standmelder met een hoog oplossend vermogen voor het meten van de hoekverdraaiing (Foto 6-8).

FOTO 6-8 **DIGITALE ABSOLUTE KLEPSTANDMELDER MET EEN OPLOSSEND VERMOGEN VAN 4095 OMWENTELINGEN (FOTO: WS REGGE EN DINKEL)**



TABEL 6-3 **SCHEMA POLYNOOMBEREKENING STUW BAKHUIS (WS REGGE EN DINKEL)**

Pagina 1
Inmeetgegevens en polynoomberekening van "Stuw Bakhuis" do 13 nov 2008

Algemene gegevens

Naam van het object:	Stuw Bakhuis
Nadere omschrijving:	2 Kleppen
Opgenomen door:	J.Kib, G.K, H.F.
Opnamedatum:	wo 16 september 2037

Referentiegegevens

Referentie-/bouthoogte:	5.210 mNAP	Vaarlijn:			6.835 mNAP
Baakaflezing:	625 mm	Bovenste aflezing:	2299 mm		5.535 mNAP
Lengte baakverlenging:	0 mm	Onderste aflezing:	4221 mm		4.614 mNAP

Polynoom

Y = aX^4 + bX^3 + cX^2 + dX + e

a = 0.00000000000001
b = 0.000000000002054
c = -0.000009152561 86
d = 0.0011384635 8810
e = 5.6822998901 5219

Coördinaten

nr	aadring	baakaflezing (mm)	verlenging (mm)	hoogte (mNAP)	via polynoom (mNAP)	afwijking (mNAP)	afwijking (%)
1	625.11	2299	0	5.535	5.535	+0.002	+0.1 %
2	663.33	2329	0	5.513	5.513	-0.002	-0.1 %
3	777.6	2344	0	5.451	5.450	-0.001	-0.1 %
4	753.28	2369	0	5.408	5.404	-0.003	-0.1 %
5	726.7	2389	0	5.437	5.440	+0.003	+0.1 %
6	701.73	2420	0	5.415	5.415	+0.001	+0.0 %
7	675.14	2443	0	5.390	5.391	+0.001	+0.0 %
8	646.23	2473	0	5.364	5.364	+0.000	+0.0 %
9	623.1	2490	0	5.337	5.339	+0.002	+0.1 %
10	595.57	2520	0	5.313	5.313	+0.000	+0.0 %
11	568.73	2550	0	5.290	5.290	+0.000	+0.0 %
12	542.3	2579	0	5.257	5.258	+0.000	+0.1 %
13	514.61	2600	0	5.232	5.234	+0.001	+0.1 %
14	493.98	2625	0	5.210	5.211	+0.001	+0.0 %
15	468.84	2652	0	5.183	5.185	+0.002	+0.1 %
16	443.81	2677	0	5.158	5.159	+0.001	+0.0 %
17	419.58	2701	0	5.134	5.131	-0.003	-0.2 %
18	399.27	2725	0	5.108	5.104	-0.001	-0.1 %
19	384.43	2750	0	5.080	5.079	-0.002	-0.1 %
20	364.49	2762	0	5.053	5.052	-0.001	+0.0 %
21	343.84	2808	0	5.025	5.024	-0.001	-0.0 %

6.1.7 ONNAUWKEURIGHEID

De gangbare onnauwkeurigheid van een debietmeting met een meetstuw is 5%. Deze waarde geldt voor een goed onderhouden en niet-vervuilde overlaat.

De onnauwkeurigheid van een debietmeting over een meetstuw is afhankelijk van:

- de gebruikte formule voor de debietberekening (par. 7.1);
- de onnauwkeurigheid van de bepaling van de kruinhoogte (par. 6.1.5) of bij klepstuwen de klepstand (par. 6.1.6);
- de onnauwkeurigheid van de waterstandsmeting (overstorthoogtemeting) (par. 7.4);
- de plaats van de waterstandsmeting.

De waterstand bij de meetstuw moet op een locatie gemeten worden die ver genoeg bovenstrooms van de stuw ligt om effecten van locale wervelingen en stuwkromme-effecten te voorkomen. Anderzijds moet de meetlocatie voldoende nabij de stuw staan opgesteld om geen te grote energieverliezen te hebben tussen de meetlocatie en de overlaat. Als vuistregel geldt een afstand gelijk aan drie tot vier maal de maximale energiehoogte boven de overlaat.

Voor een goede debietberekening is het nodig dat de fout in de waterstandsmeting (overstorthoogtemeting) beperkt wordt tot 5 mm voor gestandaardiseerde meetstuwen en 5 mm in het bijzonder voor de klepstandmeting.

6.1.8 GESCHIKTE MEETINSTRUMENTEN

Waterstandsmeetopstellingen met een hoge nauwkeurigheid als:

- Stilling wells (vlottersysteem)
- Stilling wells (drukdozen)

6.1.9 MOGELIJKHEDEN EN BEPERKINGEN

Waterpeilregelende en afvoerregelende objecten als schuiven en stuwen zijn aanwezig op een voor de hand liggende locatie om ook het debiet te willen meten. We spreken dan al gauw over een meetstuw. Maar een meetstuw is het object eigenlijk alleen als vorm en inrichting conform de standaarden van de ISO zijn. In alle andere gevallen, wanneer we van het object toch het debiet willen weten, moet er nogal wat moeite worden gedaan om met enige nauwkeurigheid tot een debietmeting te komen. Dat geldt vooral voor de klepstuwen, maar ook voor alle andere niet gestandaardiseerde objecten. In-situ calibratie is een andere manier om een stuwend object tot een meetstation te verklaren.
Maar meetstuwen verdwijnen langzamerhand uit het veld; er komen geen nieuwe bij. De belangrijkste oorzaak hiervan is het feit dat meetstuwen vispassage onmogelijk maakt. Dit is wel gewenst naar de huidige ecologische inzichten en beleid.
Anderzijds neemt de vraag naar debieten en met name hoeveelheden afvoer sterk toe voor het uitvoeren van vrachtonderzoeken/stoffenbalansen, maar wordt de voorkeur gegeven aan alternatieve meetprincipes.

6.1.10 VOORBEELDEN

In onderstaand schema is een overzicht gegeven van een aantal voorbeeld toepassingen van meetstuwen bij waterbeheerders in Nederland. Rossum stuwen en betondrempels met vellingkant komen veel voor bij de hellende zand-waterschappen.

TABEL 6-4 OVERZICHT VOORBEELD MEETSTUWEN

Type	Watergang	Locatie	Waterbeheerder
Gestandaardiseerde meetstuwen			
Lange overlaat	Valleikanaal	Grebbesluis	WS Vallei en Eem
V-vormige lange overlaat	Mussel Aa-kanaal	Jipsingboermussel	WS Hunze en Aa's
Hobrad-overlaat	Groote Lije	Rijen	WS Brabantse Delta
Hobrad overlaat	Aftak Bijloop	Het Laag, Rijsbergen	WS Brabantse Delta
Niet-gestandaardiseerde meetstuwen			
Klepstuwen	Veel voorkomend		
Betondrempels met vellingkant	Boven-Slinge	Overlaat Berenschotbrug	WS Rijn en IJssel
Rossum-stuw	Molsbeek	Vasse	WS Regge en Dinkel
Rossum-stuw	Stortellersbeek	Overlaat Stortellersbeek	WS Rijn en IJssel
Rossum-stuw	Oude Lije	Alphen	WS Brabantse Delta

FOTO 6-9 ROSSUMSTUW IN DE MOLSBEEK (FOTO: WS REGGE EN DINKEL)

FOTO 6-10 **ROSSUMSTUW (FOTO: WAGENINGEN UNIVERSITEIT)**

FOTO 6-11 **V-VORMIGE OVERLAAT IN DE BOVEN-REGGE BIJ DIEPENHEIM (FOTO: WS REGGE EN DINKEL)**

FOTO 6-12 LANGE OVERLAAT MET VASTE KRUIN IN HET VALLEIKANAAL BIJ DE GREBBESLUIS, WS VALLEI EN EEM (FOTO: WAGENINGEN UNIVERSITEIT)

FOTO 6-13 V-VORMIGE OVERLAAT STUW ROTTEVALLE, WS FRYSLÂN (FOTO: TEN KATE-KOOL)

6.1.11 ISO-STANDAARDEN

De ISO-standaarden die betrekking hebben op meetstuwen zijn de volgende:

- ISO 8333 Liquid flow measurements in open channels by weirs and flumes – V-shaped broad-crested weirs
- ISO 4374 Liquid flow measurements in open channels – Round-nose horizontal broad-crested weirs
- ISO 1438 Open channel flow measurement using thin-plate weirs

Voor de wat minder gebruikelijke typen meetstuwen zijn de ISO-standaarden:

- ISO 4360 Triangular profile weirs (Crump overlaten)
- ISO 4377 Liquid flow measurement in open channels - Flat V-weirs (V-vormige Crump overlaten)

6.2 MEETGOTEN

6.2.1 INLEIDING

Een meetgoot werkt volgens hetzelfde principe als de meetstuw: een vernauwing van het doorstroomprofiel brengt een verhoging van de bovenwaterstand teweeg. Bij een vrije afvoer is het debiet uitsluitend een functie van de bovenwaterstand.

In principe is een meetgoot een lange overlaat echter met een aanloop- en een uitloopsectie. Een meetgoot wordt zo ontworpen dat bij voldoende kruinlengte de stroomlijnen in de keel nagenoeg recht en evenwijdig zijn. Er zijn echter meestal geen beperkingen aan de kruinhoogte en het gootgedeelte achter de keel is vaak zwak divergerend, waardoor de energieverliezen worden beperkt. In vergelijking met de lange overlaten zijn ze daardoor beter geschikt in gebieden met weinig verval èn als er sediment moet worden afgevoerd.

FOTO 6-14 TRAPEZIUMVORMIGE MEETGOOT IN DE GELEENBEEK BIJ MUNSTERGELEEN (FOTO: WS ROER EN OVERMAAS)

6.2.2 TYPEN MEETGOTEN

Veel toegepaste meetgoten zijn:

- Venturi-meetgoten (waaronder de Khafagi-venturi),
- trapeziumvormige meetgoten
- rechthoekige meetgoten

De ISO standaard 4359 beschrijft de eisen en eigenschappen voor ongestuwde afvoer door meetgoten met een rechthoekig, trapeziumvormig of U-vormig profiel. Dit laatste type vindt met name toepassing in zuiveringsinstallaties en is hier verder niet beschreven.
Meetgoten met een rechthoekig keelprofiel zijn het meest voorkomende type. Ze zijn relatief eenvoudig te construeren. Er zijn verschillende uitvoeringen mogelijk (i) alleen een vernauwing van de wanden of (ii) een vernauwing van de wanden gecombineerd met een bodemverhoging. De keuze voor een bepaalde uitvoering hangt af van het beschikbare verval en het sedimenttransport van de waterloop.

Khafagi venturi's vinden vooral toepassing in effluentgoten van zuiveringsinstallaties. Een Khafagi venturi is een meetgoot met een rechthoekige doorsnede en een zijdelingse contractie en wordt geplaatst in een rechthoekig kanaal.

Een bijzondere toepassing van een venturi is de venturi-meetdoorlaat (Foto 6-15). De werking ervan berust op het creëren van een vernauwing tussen een drijver en een drempel, waardoor de snelheid van het water hoger wordt. De stijghoogte van het water onder de drijver is daardoor wat lager dan de waterstand voor de meetdoorlaat. Uit dit verschil in snelheidshoogte kan de gemiddelde stroomsnelheid in de vernauwing worden berekend. Vermenigvuldiging met het oppervlak van de doorlaat geeft het debiet. Uit een proefopstelling is gebleken dat een aanwezigheid van de vuilgevoelige drijver voor een goede werking niet noodzakelijk is.

FOTO 6-15 VENTURI-MEETDOORLAAT IN DE STRIJBEEKSE BEEK (FOTO: WS BRABANTSE DELTA)

6.2.3 ONNAUWKEURIGHEID

De onnauwkeurigheid van een meetgoot bedraagt bij benadering 2 tot 5%.

De onnauwkeurigheid van een debietmeting door een meetgoot is afhankelijk van:

- de gebruikte formule voor de debietberekening (par.7.2);
- de onnauwkeurigheid van de inmeting van het profiel van de goot (voor nulpuntsbepaling zie par. 6.1.5);
- de onnauwkeurigheid van de waterstandsmeting (par. 7.4);
- de plaats van de waterstandsmeting.

De waterstand bij de meetgoot moet op een locatie gemeten worden die ver genoeg bovenstrooms van de keel van de goot ligt om effecten van locale wervelingen en dergelijke te voorkomen. Anderzijds moet de meetlocatie voldoende nabij de goot staan opgesteld om geen te grote energieverliezen te hebben tussen de meetlocatie en de keel. Als vuistregel geldt een afstand gelijk aan vier maal de maximale energiehoogteverandering over de keel.

De ISO-standaard 4359 geeft nadere informatie over de eisen met betrekking tot de installatie, het meettraject, de nulpuntsbepaling en de waarden voor de verschillende coëfficiënten van de debietformule en het bepalen van de onnauwkeurigheid van de afvoerbepaling.

6.2.4 GESCHIKTE MEETINSTRUMENTEN

Waterstandsmeetopstellingen met een hoge nauwkeurigheid zoals:

- Stilling wells (vlottersysteem, drukdoos)

6.2.5 MOGELIJKHEDEN EN BEPERKINGEN

Meetgoten kunnen worden toegepast in waterlopen van iedere vorm mits de stroming in het aanloopgedeelte redelijk uniform is.

Meetgoten zijn met name geschikt voor het meten in gebieden met weinig verval èn als er sediment moet worden afgevoerd. Drijvend vuil vormt doorgaans geen hinder voor de meting.

Het voordeel van open meetgoten kan zijn (afhankelijk van de stroomsnelheid en de vormgeving):

- Goede vispasseerbaarheid
- Goede kano passeerbaarheid

Voor kleinere waterlopen zijn ook standaard vormgegeven meetgoten beschikbaar in diverse afvoercategoriëen (bijvoorbeeld de RBC-meetgoot).

6.2.6 VOORBEELDEN

In onderstaand schema is een overzicht gegeven van een aantal voorbeeld toepassingen van meetgoten bij waterbeheerders in Nederland:

TABEL 6-5 OVERZICHT MEETGOTEN

Type	Watergang	Locatie	Waterbeheerder
Trapeziumvormige meetgoot	Geul	Cottessen	WS Roer en Overmaas
Trapeziumvormige meetgoot	Geleenbeek	Munstergeleen	WS Roer en Overmaas
Venturi meetdoorlaat	Strijbeekse Beek	Strijbeek	WS Brabantse Delta
RBC-meetgoot	Groote Meer	Ossendrecht	WS Brabantse Delta
Khafagi-venturi	effluentleiding	Op zuiveringen	diversen

FOTO 6-16 VOORBEELDEN VAN MEETGOTEN IN DE PRAKTIJK

MEETGOOT IN DE GEUL BIJ COTTESSEN, WS ROER EN OVERMAAS (FOTO: WAGENINGEN UNIVERSITEIT)

RBC-MEETGOOT VOOR GEBRUIK IN KLEINE WATERLOPEN (FOTO: WS BRABANTSE DELTA)

6.2.7 ISO-STANDAARDEN

De ISO-standaard die betrekking hebben op meetgoten ("flumes") is de volgende:

- ISO 4359 Rectangular, trapezoidal and U-shaped flumes

Voor wat minder gebruikelijke typen meetgoten zijn de ISO-standaarden:

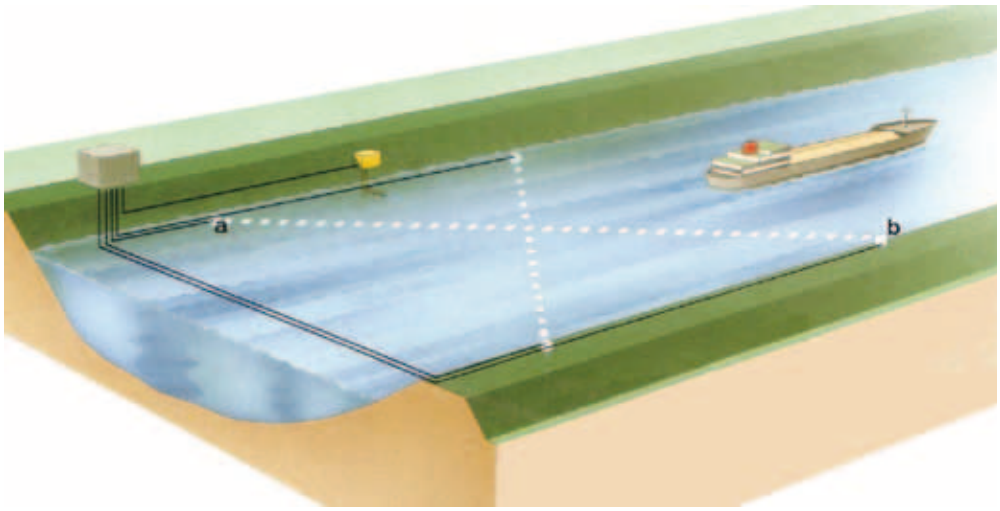
- ISO 4360 Triangular profile weirs (Crump overlaten)
- ISO 9826 Measurement of liquid flow in open channels – Parshall and SANIIRI flumes
- ISO 9827 Measurement of liquid flow in open channels by weirs and flumes – Streamlined triangular profile weirs

6.3 LOOPTIJDVERSCHILMETING

6.3.1 INLEIDING

Het principe van de looptijdverschilmeting berust op het meten van de looptijd van akoestische pulsen, die onder water worden uitgezonden in een richting diagonaal ten opzichte van de as van de watergang. Er bestaan verschillende methoden om uit de gemeten looptijd de stroomsnelheid te bepalen, waarvan de looptijdverschilmethode de belangrijkste is. Het verschil tussen de looptijd van de geluidsgolf van a naar b en van b naar a is een maat voor de stroomsnelheid van het water (Figuur 6-2). Het principe wordt toegepast bij de akoestische debietmeting (ADM): het meten van de stroomsnelheid met behulp van geluidsgolven en het vastleggen van de bijbehorende waterstand.

FIGUUR 6-2 PRINCIPE LOOPTIJDVERSCHILMETING (BRON:RIJKSWATERSTAAT)



De voortplantingssnelheid van geluid in water is afhankelijk van vele factoren. Doordat bij de looptijdverschilmeting de meting met akoestische pulsen in opwaartse en afwaartse richting gelijktijdig wordt uitgevoerd, valt de invloed van de voortplantingssnelheid van het akoestisch signaal in water weg. Variaties in de voortplantingssnelheid werken dan ook niet door in de gemeten stroomsnelheid bij de looptijdverschilmeting (voor verdere uitleg zie par. 7.3.2). Door in een kruis te meten bestaande uit twee diagonale meetlijnen, kan ook de stromingsrichting in het meetvlak bepaald worden. Hierdoor wordt een zeer nauwkeurige meting van de stroomsnelheid verkregen. Reden waarom ADM's, ondanks de relatief hoge kosten, veel worden toegepast, in het bijzonder voor situaties waarbij de meting onderdeel is van een financiële verrekening vastgelegd in een waterakkoord.

De akoestische debietmeetmethode is een methode, die zeer geschikt is voor het meten van de afvoer in één dominante richting of een afvoer die kan omkeren, zoals in getijdegebieden. Als de stroomrichting (tijdelijk) tegengesteld is aan de gebruikelijke richting, worden ook deze negatieve afvoeren geregistreerd. ADM's worden daardoor ook toegepast in getijde (beïnvloede) rivieren en voor kenterpuntdetectie bij uitlaatwerken op een getijde rivier.

In gestuwde panden en bij langdurig lage stroomsnelheden worden in uitzonderlijke situaties soms twee diagonale meetkruizen toegepast om meer informatie over het stromingsprofiel te verkrijgen. Hierbij zitten de sensoren van één meetkruis aan de ene oever hoog en aan de andere oever lager en van het tweede meetkruis juist andersom. Hierdoor wordt ook informatie over

het verticale stromingsprofiel verkregen. Dit wordt onder andere door Rijkswaterstaat toegepast in de Twenthekanalen, die zich kenmerken als gestuwd pand met heel lage stroomsnelheden.

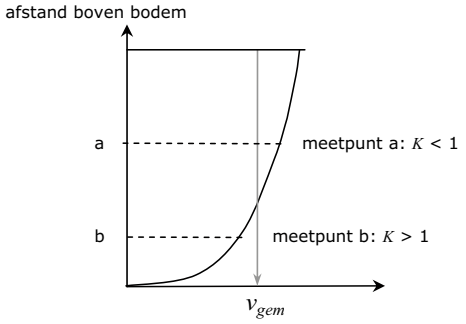
Belangrijk voordeel van de akoestische meetmethode is, dat de informatie continu en nauwkeurig is over een groot bereik van stroomsnelheden, mits de snelheidsverdeling in het verticale vlak logaritmisch is voor het gehele meetbereik. Daardoor is de methode breed toepasbaar.

6.3.2 BEPALEN STROOMSNELHEID EN DEBIET

Het meetprincipe van de akoestische debietmeting staat beschreven in par. 7.3.2. Door de ADM wordt de gemiddelde stroomsnelheid op één diepte in de waterloop gemeten. Deze gemeten snelheid wordt door middel van een waterstandsafhankelijke factor omgerekend naar de gemiddelde snelheid over het hele doorstroomde oppervlak van de waterloop.

Het debiet wordt bepaald als $Q = v_{gem} \times A$. Op het niveau van het meetkruis is de gemiddelde snelheid v_{gem} over de breedte van de waterloop gemeten. Voor de bepaling van de gemiddelde snelheid over het volledige dwarsprofiel, moet de gemeten snelheid worden vermenigvuldigd met een correctiefactor K omdat de gemeten snelheid vrijwel nooit de gemiddelde is ($v_{gem} = K \times v$). De waarde van K wordt voornamelijk bepaald door de meetkruishoogte, de geometrie van de waterloop en de bodemruwheid en dient door de leverancier van het meetsysteem te worden vastgesteld. De meetkruishoogte moet zodanig worden gekozen, dat de waarde van K tussen 0,9 en 1,1 ligt. Buiten dit traject is de gevoeligheid van k voor de bodemruwheid te groot. De K-factor wordt ook beïnvloed door de waterhoogte h. Bij grote variaties in waterstanden wordt daarom eventueel in meetkruizen op meerdere hoogten gemeten. De oppervlakte wordt bepaald door in de meetsectie een aantal dwarsprofielen op te meten en daaruit een gemiddeld dwarsprofiel te bepalen. De doorstroomde oppervlakte A wordt vanuit het gemiddelde dwarsprofiel afgeleid uit de gemeten waterstand ter plaatse van het meetkruis. Als de K-factor en juiste oppervlakte tabel ingegeven zijn is de ADM operationeel en levert direct betrouwbare meetwaarden.

FIGUUR 6-3 PRINCIPE K-FACTOR BIJ METEN IN EEN PUNT VAN DE VERTICAAL



Ook indien het verticale stroomprofiel afwijkt van een logaritmische verloop (zoals bij langdurige lage snelheden of windinvloed) is het nodig om een ADM niet met één meetkruis (één stel meetlijnen), maar met twee tot vier meetkruizen uit te rusten op verschillende hoogtes in de waterkolom. Hiermee kan een afhankelijkheid van de onzekerheid van de K-factor beperkt worden.

VERSTORING DOOR SCHEEPVAART

Een ADM keurt zijn gegevens af als niet voldoende signaal de overzijde bereikt. Bij passage van een schip wordt het signaal van de ADM geblokkeerd en dus afgekeurd, maar ook vlak na een passage wordt het signaal dusdanig geblokkeerd en verstrooid door de bellenbaan achter het schip dat het wordt afgekeurd. Scheepspassages zijn, als ze lang duren in de waarnemingen, eenvoudig terug te zien als een tijdelijke onderbreking van de meetwaarden en soms door een kortstondige verhoging van de dwarsstroming.

FOTO 6-17 ADM GENEMUIDEN, RIJKSWATERSTAAT (FOTO: ELSTER-INSTROMET)

6.3.3 ONNAUWKEURIGHEID

In de praktijk leveren de K-factor en het doorstroomoppervlak A de grootste bijdrage aan de onnauwkeurigheid van het debiet. De onnauwkeurigheid van het debiet bepaald met een ADM kan in geval van een gevalideerde meetopstelling over een groot meetbereik (van lage tot hoge afvoeren) binnen de 5% liggen. Met name het feit dat er langs één lijn wordt gemeten betekent dat de onnauwkeurigheid van de snelheidsmeting vergelijkbaar is met die van een puntmeting. De onnauwkeurigheid ligt dan tussen 6,5% en 8,2%, zie Tabel 8-1. Verder is de K-factor vrij ongevoelig voor meetfouten, zoals behandeld in paragraaf 8.6, maar resulteert wel in een extra fout tijdens de omrekening van de gemeten snelheid naar het debiet. In de praktijk zijn de grenzen van de onnauwkeurigheid van een looptijdverschilmeting 5% tot 10%.

Periodiek moet de meetsectie worden schoongemaakt (obstakels, begroeiing e.d.), de niveaumeter worden gecontroleerd en indien van toepassing de peilbuis worden doorgespoeld. Wanneer in het telemetriesysteem een alarmering is ingebouwd, kan worden gewaarschuwd voor een slechte conditie van de meetlijn, die bijvoorbeeld wordt veroorzaakt door maaiafval of andere belemmeringen in de meetlijn. Als een bepaald percentage slechte metingen voor langere tijd wordt overschreden, vindt alarmering plaats.
Daarnaast moet jaarlijks de hoogte -instelling van de niveaumeter worden gecontroleerd en, afhankelijk van de locatie, de transducenten schoongemaakt. Afhankelijk van de locatie moet op gezette tijden (ervaringswaarde) worden nagegaan of de ingevoerde profielen nog overeenstemmen met de werkelijke situatie. Is dit niet het geval dan dienen zonodig ook de correc-

tiefactoren te worden aangepast. Normaalgesproken gebeurd dit om de 3 jaar bij de locaties van regionale waterbeheerders. Rijkswaterstaat streeft naar een jaarlijkse controle van de profielen.

6.3.4 GESCHIKTE MEETINSTRUMENTEN

Een akoestische debietmeetmethode vraagt om een waterstandsmeting en een ADM:

- Vlottermeter voor de waterstand ter plaatste
- Stilling well met drukdoos
- Rijkswaterstaat Digitale Nivometer DNM (vlottermeters)
- ADM

Het doorstroomoppervlak wordt vastgesteld door het uitvoeren van lodingen in het gebied van de ADM of door het meten van het dwarsprofiel met een peilstok.

6.3.5 MOGELIJKHEDEN EN BEPERKINGEN

Zoals gezegd is de akoestische debietmeetmethode een methode, die geschikt is voor het meten van afvoeren in twee richtingen. Als de stroomrichting tijdelijk tegengesteld is aan de gebruikelijke richting, worden ook deze negatieve afvoeren geregistreerd; ook dan dient de snelheidsverdeling wel bij benadering logaritmisch te zijn.

Bij de keuze van de meetsectie zijn allereerst de plaatselijke omstandigheden van belang. Deze moeten zodanig zijn, dat de factoren die van invloed zijn op de nauwkeurigheid, goed te bepalen zijn en niet variëren. Hierbij de volgende aandachtspunten:

- aanwezigheid van bochten en/of stilliggende schepen: dit veroorzaakt een verstoring van het homogene stromingsprofiel;
- een dichtheidsgradiënt in temperatuur en/of zoutgehalte: de meetsignalen lopen dan niet recht uit maar met een boog naar de overzijde waardoor de meting op een andere hoogte in de waterkolom plaats vindt dan op de hoogte waarop de transducenten zijn gemonteerd. Hierdoor kan de correctiefactor K enigszins verlopen. Dit kan door de leverancier verder gekwantificeerd worden. Normaal gesproken blijft de gevonden afwijking binnen de nauwkeurigheidsgrenzen waarmee de K-factor kan worden bepaald. Een locatie met beperkte gradiënten hoeft dan niet te worden gemeden;
- windinvloed op de vorm van het verticale stromingsprofiel. Een locatie met windinvloed hoeft niet te worden vermeden. Wel moet de meetconfiguratie aangepast worden om de wind invloed op het meetresultaat te minimaliseren. In deze gevallen zijn dan twee meetkruizen nodig. Windinvloed treedt slechts op bij lange strijklengtes (1000 m waterloop in dezelfde richting als de wind);
- instabiel bodemprofiel;
- kans op aanvaring door schepen en maaiboten of machinaal onderhoud van de oever.

Daarnaast is het van belang, dat de uitgezonden akoestische pulsen niet teveel verzwakt en/of vervormd de overkant van de waterloop bereiken. Verzwakking en/of vervorming kan worden veroorzaakt door:

- lange meetlijnen;
- hoog sedimentgehalte van het water bijvoorbeeld tijdens piekafvoeren in zandige beken. Overigens: de sedimentconcentratie neemt met de waterdiepte sterk toe en passerende beddingvormen kunnen het signaal tijdelijk blokkeren;
- temperatuur- en/of zoutgradiënten: signalen kunnen zover worden afgebogen, dat ze naast de transducent aan de overkant terecht komen;
- ijsvorming; bij een vastliggende ijslaag op het wateroppervlak verandert het stromingsprofiel sterk door de afremming aan de bovenzijde. Hierdoor moet voor deze situatie de K-factor worden aangepast;
- luchtbellen (riet) en/of sediment: veroorzaken demping of verstrooiing van de pulsen;
- plantengroei: in water ondieper dan 1 m kan makkelijk verstorende plantengroei (planten met ingesloten lucht) optreden. Plaats de ADM dus bij voorkeur in de schaduw om plantengroei te voorkomen (onder een brug of langs bomen op het zuiden);
- stilliggende schepen of andere obstakels in de meetlijn: houden de signalen tegen;
- interferentie tussen rechtstreekse signalen en signalen gereflecteerd via het wateroppervlak, de bodem of een grenslaag tussen twee lagen met verschillende dichtheid. Voor een bepaalde meetlijnlengte (L) is dus een minimale afstand (a) tot de bodem c.q. waterspiegel nodig. Deze verhouding is afhankelijk van de frequentie van de gebruikte transducent. Voor transducenten met een frequentie van 200 kHz (geschikt voor meetlijnlengten tot circa 250 m) bedraagt deze bijvoorbeeld: $a \approx L^{1/2}/8{,}8$. De waarde van a neemt af bij een hogere frequentie. Voor kleinere meetlijnlengten (tot circa 80 m) kan daarom het gebruik van een transducent met een frequentie van 400 kHz eventueel een oplossing bieden, waarbij $a \approx L^{1/2}/12{,}2$.

Bij de installatie van de meetopstelling en de keuze van de meetsectie is altijd deskundig advies nodig om een voor de akoestische meting geschikte locatie met stabiel stromingsprofiel te selecteren. Het uitvoeren van stroomsnelheidsmetingen is normaal gesproken niet nodig. De meetlocaties worden op basis van profiel, waterstand- en debietgegevens zodanig gekozen dat er een stabiel en bekend (te moduleren) stromingsprofiel aanwezig is. De K-factor wordt bij de ADM bepaald uit een model dat o.a. rekening houdt met de geometrie van de waterloop, bodem- en wandruwheden. Onderhoud t.a.v. de nauwkeurigheid van de meetresultaten betreft dan ook slechts het controleren of het profiel en ruwheid niet gewijzigd is.

De reden dat Rijkswaterstaat niet standaard met ADM's meet is:

- Grote eenmalige investering
- Vrij intensief onderhoud in de vorm van regelmatige terugkerende bodemprofielmetingen
- Meten slechts de afvoer dat door het zomerbed stroomt en missen dus de afvoer die bij hoogwater door het winterbed gaat
- Gevoelig voor grote hoeveelheden sediment dat vrijkomt tijdens een hoogwater

De initiële kosten van apparatuur en meetopstelling zijn relatief hoog, maar het systeem is onderhoudsvriendelijk en de exploitatiekosten zijn laag.

6.3.6 VOORBEELDEN

Onderstaand een overzicht van in Nederlandse watergangen in gebruik zijnde ADM's:

TABEL 6-6 OVERZICHT ADM'S GEPLAATST TOT 2010

watergang	locatie	waterbeheerder	in gebruik vanaf
Reitdiep (2x)	Provinciale sluis Zoutkamp (2 meetkruizen)	WS Noorderzijlvest	1991
Hunsingokanaal	Hunsingosluis, Zoutkamp (meetkruis)	WS Noorderzijlvest	1999
Winschoterdiep	Zuidbroek	WS Hunze en Aa's	1991
Westerwoldse Aa	Spuisluis Nieuwe Statenzijl	WS Hunze en Aa's	2003
Eemskanaal	Oude Zeesluis, Delfzijl	WS Hunze en Aa's	2006
De Linde	Wolvega	WS Friesland	2003
Overijsselse Vecht	Hesselmullerbrug, Ommen	WS Velt en Vecht	Nov. 2001
Ommerkanaal	Ommen	WS Velt en Vecht	Nov. 2001
Regge	Archem	WS Regge en Dinkel	1990
Linderbeek	Archem	WS Regge en Dinkel	1990
Oude Rijn (Gld)	Kandia	WS Rijn en IJssel	2002
Ettenlangsch Kanaal	Vollenhove, A.F. Stroinkgemaal (2 meetkruizen)	WS Reest en Wieden	1996
Vledder Aa en Wapserveense Aa	Wapserveen (in elke waterloop 1 meetkruis)	WS Reest en Wieden	2003
Valleikanaal	Amersfoort bij stuw Balladelaan (meetkruis)	WS Vallei en Eem	1985
De Eem	Eemdijk	WS Vallei en Eem	1990
Kromme Rijn	Inlaat Wijk bij Duurstede	HH De Stichtse Rijnlanden	1994
Kromme Rijn	Amelisweerd	HH De Stichtse Rijnlanden	1994
Utrechtse Vecht	Utrecht	Waternet	
Oude Rijn (ZH)	Bodegraven Sluis	HH van Rijnland	1992
Gouwe	Gouda	HH van Rijnland	1998
De Linge	Gorinchem, Spuisluis Kanaal van Steenenhoek	WS Rivierenland	1987
Kanaal van Steenenhoek	Hardinxveld Giessendam, Kolffgemaal (2 meetkr.)	WS Rivierenland	1991
Overwaard	Spuisluis, Kinderdijk (meetkruis, kenterpunt)	WS Rivierenland	1986
Dintel	Dintelsas	WS Brabantse Delta	1988
Roosendaalse en Steenbergse Vliet	Bovensas	WS Brabantse Delta	1988
Aa of Weerijs	Oranjeboombrug, Breda	WS Brabantse Delta	2006
Het Merkske	Castelre (B)	WS Brabantse Delta	2003
Molenleij	Breda	WS Brabantse Delta	2001
Dieze	Engelen	WS Aa en Maas	1983
Drongelens Kanaal	Waalwijk	WS Aa en Maas	1988
Aa	Den Bosch, Oosterplas	WS Aa en Maas	2003
De Dommel	Eindhoven, Geneperparken	WS De Dommel	2008
De Dommel	St. Oedenrode	WS De Dommel	2009
De Dommel	Borkel en Schaft	WS De Dommel	2009
De Dommel	Den Bosch, Bossche Broek	WS De Dommel	1990
Nieuwe Leij	Goirle, Vloeder Zuid	WS De Dommel	2005
Groote Beerze	Westelbeers Scheperburg	WS De Dommel	2005
Keersop	Dommelen, Keersoppermolen	WS De Dommel	2007
Tongelreep	Achel, Kluizerbrug	WS De Dommel	1997
Tongelreep	Eindhoven	WS De Dommel	2008
Voorste Stroom	Oisterwijk	WS De Dommel	2009
Verbindingskanaal Beekse Bergen	Hilvarenbeek	WS De Dommel	2009
Noordervaart	Nederweert	WS Peel en Maasvallei	1999

watergang	locatie	waterbeheerder	in gebruik vanaf
Groote Molenbeek	Mierlo	WS Peel en Maasvallei	1996
Hambeek	Hambeek, Roermond	WS Roer en Overmaas	1993
Amsterdam-Rijnkanaal	Weesp	Rijkswaterstaat	1978
Amsterdam Rijnkanaal	Maarssen	Rijkswaterstaat	1991
Amsterdam-Rijnkanaal	Wijk bij Duurstede	Rijkswaterstaat	1995
Oude Rijn	Doorslag, Uitlaat Amsterdam Rijn kanaal	Rijkswaterstaat	1993
Julianakanaal	Bunde	Rijkswaterstaat	1978
Neder Rijn	Driel	Rijkswaterstaat	1978
Lekkanaal	Nieuwegein	Rijkswaterstaat	1988
Lek	Hagenstein	Rijkswaterstaat	1978
Zuid-Willemsvaart	Loozen	Rijkswaterstaat	1979
Zuid-Willemsvaart	Maastricht / Smeermaas	Rijkswaterstaat	1979
Maas	Megen	Rijkswaterstaat	1989
Maas	Maastricht St. Pieter 2 meetkruizen	Rijkswaterstaat	1991
Maas	Venlo 2 meetkruizen	Rijkswaterstaat	1996
Hollandsdiep	Spuisluizen, Volkerak 2x 2 meetkruizen	Rijkswaterstaat	1990
Bathse Spuikanaal	Bath	Rijkswaterstaat	1988
Zuid-Willemsvaart	Someren, Sluis13	Rijkswaterstaat	2003
De Noord	Alblasserdam	Rijkswaterstaat	1990
Dordsche Kil	Wieldrecht, Dordrecht	Rijkswaterstaat	1990
Oude Maas	Spijkenisse brug	Rijkswaterstaat	1990
Meppelerdiep	Zwartsluis	Rijkswaterstaat	2000
Zwarte Water	Genemuiden	Rijkswaterstaat	2008
Twente Kanalen	Almen (dubbel meetkruis)	Rijkswaterstaat	1995
Twente Kanalen	Markelo (dubbel meetkruis)	Rijkswaterstaat	1995

FOTO 6-18 **ADM VECHT BIJ OMMEN (FOTO: ELSTER-INSTROMET)**

FOTO 6-19 **ADM KEERSOPPERMOLEN, WS DE DOMMEL (FOTO: ELSTER-INSTROMET)**

FOTO 6-20 ADM PROVINCIALE SLUIS ZOUTKAMP (FOTO: WS NOORDERZIJLVEST)

FOTO 6-21 ADM DE LINDE, WS FRYSLÂN (FOTO: ELSTER-INSTROMET)

6.3.7 ISO-STANDAARDEN

De ISO-standaard die betrekking heeft op de looptijdverschilmethode is de volgende:

- ISO 6416: Measurement of discharge by the ultrasonic (acoustic) method

6.4 SNELHEIDSMETING/DOPPLERMETING

6.4.1 INLEIDING

Het bepalen van de stroomsnelheid in een waterloop kan door geluidsgolven uit te zenden en het door de snelheid van in het water zwevende deeltjes ontstane Dopplereffect te meten, dan wel door een geleider (water) in een magnetische veld te bewegen en het daaruit ontstane potentiaalverschil te meten. De eerste methode staat bekent als de Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP)-methode en de tweede als de elektromagnetische methode. Daarnaast bestaat er ook een variant met radar (radiogolven): de Doppler radar snelheidsmeting.

Elektromagnetische meetmethoden als continue debietmeetmethode voor open waterlopen worden in Nederland nog niet toegepast. De methode wordt in de permanente opstelling in Engeland toegepast in waterlopen met hardnekkige groei van bodemvegetatie, hoge sedimentgehaltes en/of instabiele bodemligging. De methode is bijzonder geschikt voor toepassing in ondiepe wateren en/of zeer lage stroomsnelheden. De toepassing van de elektromagnetische methode als onderdeel van veldcalibraties staat beschreven in par. 5.5.

In een permanente opstelling kan een ADCP op drie manieren worden opgesteld:
- horizontaal dwars op de waterloop (niet toegepast in Nederland)
- horizontaal aan één zijde van de waterloop (H-ADCP)
- verticaal gericht vanaf de bodem (bodem-ADCP)

Dit hoofdstuk beschrijft de toepassing van de H-ADCP en de bodem-ADCP. De toepassing van benedenwaarts gerichte ADCP's voor incidentele metingen is beschreven in par. 5.1 respectievelijk par. 5.2 en voor het gebruik bij veldcalibraties in par. 5.5. Het meetprincipe staat beschreven in par. 7.3.3.
De toepassing van de Dopplersnelheidsmeting met behulp van radar staat beschreven aan het eind van deze sectie in par. 6.4.8.

6.4.2 BEPALEN STROOMSNELHEID EN DEBIET

Het meetprincipe van de ADCP berust op het meten van de Dopplerverschuiving. Het instrument zendt een puls uit met een vaste frequentie, die gereflecteerd worden door de deeltjes in het water. Door de beweging van de deeltjes ten opzichte van de ADCP ontstaat er een frequentieverandering (Dopplerverschuiving). Deze frequentieverandering is een maat voor de snelheid van het water. Met vier bundels is het instrument in staat om stroomsnelheid en –richting te bepalen. Drie bundels zijn nodig om de drie vector componenten van de waterbeweging te bepalen. De vierde levert een tweede verticale vectorcomponent die het apparaat gebruikt voor controle van de data-integriteit.

Een bodem-ADCP meet vanaf de bodem van de waterloop tot het wateroppervlak en bepaalt in verticale secties het snelheidsprofiel over de verticaal, dat vervolgens moet worden omgerekend naar een debiet. De meting is vergelijkbaar met de verticale ADCP meting bij de moving-boat methode (zie par. 5.2.1). Niet het gehele doorstroomprofiel wordt gemeten, met name aan de bodem niet.

Een horizontale opstelling meet vanaf één zijde over dat deel van de waterloop dat zich in de straalkegel bevindt, voordat de straal de overkant bereikt. De straalkegel dient dus gericht te zijn op dat deel van de doorsnede waar gemiddelde stroomsnelheidcondities heersen. Bij variatie van de waterdiepte kan de diepte waarop de gemiddelde snelheid heerst, variëren.

Het kan dan nodig zijn de omzetting van gemeten snelheid naar gemiddelde snelheid in het dwarsprofiel te bepalen met een afgeregelde K-factor, zie paragraaf 6.3.2.

Een ADCP meet tevens de waterstand en zet deze waarde om naar een oppervlaktewaarde volgens een voorgeprogrammeerde waterstands-doorstroomoppervlakte relatie. De uit de meting berekende gemiddelde stroomsnelheid en de oppervlaktewaarde leveren het debiet.

6.4.3 ONNAUWKEURIGHEID

De onnauwkeurigheid van een meting met een H-ADCP of een bodem ADCP wordt vooral bepaald door:

- de omrekening van gemeten snelheid naar gemiddelde snelheid. Bij grotere waterstandsvariaties wordt de indexering methode minder bruikbaar;
- de omrekening van waterstand naar oppervlakte.

Bij inbedrijfstelling is een controlemeting nodig (meerdere controle metingen kunnen nodig zijn als er zich verschillende afvoersituaties voordoen). Met het resultaat van deze meting kunnen de parameters voor het bepalen van het debiet in de software van de ADCP worden aangepast. Aan het Dopplerverschil bepaald door het instrument zelf valt niets te calibreren. Bij een goed voorbereide calibratie meting kan het debiet binnen 5% nauwkeurig worden gemeten. Tijdens operationeel bedrijf ligt de nauwkeurigheid tussen de 5% en 10% gezien de gevoeligheid van de meting voor omgevingsparameters (zie ISO 15769 en paragraaf 6.4.5).

Als gevolg van wijzigingen in het verticale en/of horizontale zwevende stofprofiel na de controlemeting ontstaan gewijzigde meetwaarden. Hierdoor zijn frequent controle metingen nodig onder diverse omstandigheden.

Tweejaarlijks moet de ADCP opnieuw worden gecontroleerd en gecalibreerd en moet de meetsectie worden schoongemaakt (obstakels, begroeiing e.d.).

6.4.4 GESCHIKTE MEETINSTRUMENTEN

De geschikte instrumenten zijn:

- een H-ADCP voor horizontale plaatsing
- een ADCP speciaal geschikt voor bodem plaatsing
- ingebouwde druksensor, naar boven of beneden gerichte ultrageluidsensor +/- 0,5 %

Het doorstroomoppervlak wordt vastgesteld door het uitvoeren van lodingen in het profiel waarin de ADCP meet.

6.4.5 MOGELIJKHEDEN EN BEPERKINGEN

Voor alle ADCP's geldt dat deze reflectie nodig hebben om goed te kunnen functioneren. Het water moet dus deeltjes en/of luchtbellen bevatten. In heel schoon/helder water functioneren ADCP's niet of minder goed. Bij veel luchtbellen overigens ook niet, bijvoorbeeld achter een stuw. Verder heeft een ADCP-meting ook hinder van plantengroei.
Snelheid van geluid in water varieert met de dichtheid, die een functie is van de temperatuur en het zoutgehalte. Bij sterke variatie van temperatuur en zoutgehalte (in tijd en/of in waarde) kan het nodig zijn deze apart te meten en te correleren met de gemeten data van de ADCP.
Voor continue ADCP's geldt in het algemeen:

- De straalbreedte is de spreiding van de straalkegel rond de as van de kegel en wordt beïnvloed door de geluidsfrequentie en diameter van de transmitter. Een nauwe kegel heeft

een lagere hoekfout met minder bereik, maar wel met een verdere reikwijdte. Een brede straalkegel is meer geschikt bij een niet uniforme snelheidsverdeling.

- Een lagere geluidsfrequentie komt doorgaans verder, maar vereist een grotere transducent bij een gegeven breedte van de straalkegel.
- Meting dient plaats te vinden in regelmatig stromingspatroon, dus in een lange regelmatige sectie met een uniform dwarsprofiel. Bij voorkeur plaatsing in een hard profiel.
- In versnellende stroming kan de snelheid van deeltjes in het water afwijken van de watersnelheid. Bij de H-ADCP wordt aangenomen dat deeltjes zich met dezelfde snelheid en richting voortbewegen als de waterdeeltjes. Dit is echter alleen geldig bij stationaire stroming. Bij turbulentie en golven etc. gaat de virtuele massa meespelen van een deeltje waardoor het betreffende deeltje zich sneller of langzamer beweegt t.o.v. de waterdeeltjes in zijn omgeving. Deeltjes met een ander soortelijk gewicht dan water zoals zand en luchtbellen (b.v. door scheepvaart, cavitatie van brugpijlers) zullen zich altijd met een andere snelheid voortbewegen.
- De snelheidsbepaling van de ADCP is direct afhankelijk van de heersende geluidssnelheid in water (zie par. 7.3.3) Hiertoe is de H-ADCP uitgerust met een temperatuursensor die de temperatuur ter plaatse meet en uit een tabel de geluidssnelheid bepaald. De nauwkeurigheid van de toegepaste temperatuursensoren is ±0,1 tot ±0,4 °C. Dit levert bij een watertemperatuur van 10°C een fout in de snelheidsmeting op van resp. ±0,03 tot ±0,1%. Verder is er het verschil in temperatuur tussen de plaats van de H-ADCP en de meetcel. Een verschil van 2 graden tussen de positie waar de H-ADCP is opgesteld en de positie van de meetcel geeft een fout van 0,56%. Verschil in saliniteit wordt niet gecompenseerd. Een saliniteitswijziging van 5‰ geeft een fout van 0,4% bij een watertemperatuur van 10°C (zie Tabel 6-7).

TABEL 6-7 GELUIDSSNELHEID IN WATER IN M/S ALS FUNCTIE VAN TEMPERATUUR EN SALINITEIT BIJ EEN LUCHTDRUK VAN 100 KPA (BRON: LIT.35)

Temperatuur	Saliniteit ‰							
° C	0	5	10	15	20	25	30	35
0.0	1402.4	1409.0	1415.7	1422.4	1429.0	1435.7	1442.4	1449.1
5.0	1426.1	1432.4	1438.8	1445.2	1451.5	1457.9	1464.3	1470.6
10.0	1447.2	1453.3	1459.3	1465.4	1471.5	1477.6	1483.7	1489.8
15.0	1465.9	1471.7	1477.5	1483.3	1489.2	1495.0	1500.8	1506.7
20.0	1482.3	1487.9	1493.5	1499.1	1504.7	1510.2	1515.8	1521.5
25.0	1496.7	1502.1	1507.4	1512.8	1518.2	1523.5	1528.9	1534.3
30.0	1509.1	1514.3	1519.5	1524.6	1529.8	1535.0	1540.2	1545.4
35.0	1519.8	1524.8	1529.8	1534.8	1539.9	1544.9	1549.9	1555.0
40.0	1528.9	1533.7	1538.6	1543.5	1548.4	1553.3	1558.2	1563.1

- De meting is hierdoor slechts beperkt gecompenseerd voor veranderingen in de geluidssnelheid. Een verschil in temperatuur tussen de opstelplaats van de continue ADCP en b.v. het midden van de waterloop levert een afwijking in de snelheidswaarde op.
- Bij de aanwezigheid van dichtheidsgradiënten treedt er afbuiging van het akoestische signaal op waardoor niet bekend is vanwaar uit de waterloop het signaal (dat de Dopplerverschuiving bevat) terugkomt bij de ADCP. Dit levert een extra onzekerheid op t.a.v. de ingestelde / bepaalde calibratie factor.
- Dwarsprofiel van de meetraai dient schoon te zijn; evenzo direct bovenstrooms van de meetraai. Bij dichte begroeiing zoals riet werkt de meting niet.

- Gangbaar meetbereik: 0,05 – 5 m/s. Bij lage stroomsnelheden is er geen relatie tussen de gereflecteerde signalen uit de cellen van de verschillende bundels. Een combinatie van deze reflectie informatie tot een gemiddelde snelheid levert dan grote afwijkingen op.
- Geschikt voor stroming in beide richtingen.
- Verstoring door scheepvaart. De meetwaarden van een H-ADCP of een bodem-ADCP worden beïnvloed door de passage van schepen daar deze, zelf en met de bellenbaan en het opgewervelde sediment, voor extra reflectiesignaal zorgen. Scheepspassages zijn in de waarnemingen eenvoudig terug te vinden als een tijdelijke verhoging in de reflectiesterkte. De verhoging in de reflectiesterkte blijft nog minuten lang aanwezig na passage van een schip door turbulentie en sediment in het water. Als er veel scheepvaartverkeer is en de data gefilterd zou worden op reflectiesterkte zou te veel bruikbare data kunnen verloren gaan. Scheepspassages gaan ook gepaard met een verhoging van de dwarsstroming in de watergang. Mogelijke remedie is om de scheepspassages uit te filteren op basis van de verhoging van deze dwarscomponent.
- De snelheidswaarde wordt beïnvloed door de hogere reflectie sterkte uit het onderste deel van het snelheidsprofiel als er bij hogere snelheden een verhoogde concentratie opgelost sediment aanwezig is in het onderste deel van de waterloop of als er door passerende schepen sediment wordt opgewoeld.

Voor bodem ADCP's geldt daarnaast:
- Geschikt voor smalle waterlopen tot 5 m breed, waterdiepte < 2 m, minimum waterdiepte 0,20 m.
- Alleen toepassen bij hoge stroomsnelheden.
- Plaatsing in de bodem onder de waterlaag, doorgaans in het midden van de waterloop, waarbij de straalkegel de uiteinden bereikt.
- Geen signalering nabij de bodem. Als de waterdiepte relatief laag is kan de hoek tussen de straalkegel en de bodem worden verkleind.
- Obstructie van de stroming door de bodemsensor; verzanding kan echt probleem worden.
- Reflectie door oeverranden vermijden.

Voor H-ADCP's geldt:
- Minimale waterdiepte: 0,5 m boven en 0,5 m onder het instrument; bij iedere 20 m meetafstand 1 m waterdiepte vereist.
- Meting over de gehele breedte is technisch niet mogelijk vanwege zijwand reflecties. Hiervoor moet een locatie-afhankelijke correctie worden uitgevoerd.
- Er moet gecontroleerd worden of zijlobben geen extra reflecties geven die het meetresultaat beïnvloeden.
- Alert zijn op situaties dat het waterpeil stijgt tot buiten het bereik van de straal van de transducent, eventueel ADCP mee laten stijgen met de waterstand.
- Minder geschikt in nauwe watergangen met een asymmetrische bodem.
- Plaatsing van de sensor geschiedt in de oeverwand.

6.4.6 VOORBEELDEN

Onderstaand een overzicht van in Nederlandse watergangen vast opgestelde H-ADCP's en bodem ADCP's:

TABEL 6-8 OVERZICHT OPGESTELDE ADCP'S VOOR CONTINUE METING TOT 2010

watergang	type	locatie	waterbeheerder	in gebruik vanaf
Uitstroom spui- en maalcomplex De Drie Delfzijlen	H-ADCP beweegbaar	Delfzijl	WS Noorderzijlvest	2009
Oostermoerse Vaart	H-ADCP	De Groeve	WS Hunze en Aa's	2007
Gasterense Diep	H-ADCP	Gasteren	WS Hunze en Aa's	2007
Afwateringskanaal	H-ADCP	Ane (Gramsbergen)	WS Velt en Vecht	2005
Overijsselse Vecht	H-ADCP	De Haandrik	WS Velt en Vecht	2007
Kanaal Coevorden-Alte Picardie	H-ADCP	Coevorden	WS Velt en Vecht	2007
Hoogeveense Vaart	H-ADCP	Veenoord	WS Velt en Vecht	2007
Kanaal Almelo-de Haandrik	H-ADCP	Mariënberg	WS Velt en Vecht	2007
Dinkel	H-ADCP beweegbaar	2 locaties ter hoogte van De Lutte	WS Regge en Dinkel	2001
Bornsebeek	H-ADCP		WS Regge en Dinkel	2007
Flereingermolenbeek	H-ADCP		WS Regge en Dinkel	2007
Broekhuizerwater	H-ADCP	Bevermeer	WS Rijn en IJssel	2005
diverse	H-ADCP	7 locaties	WS Rijn en IJssel	2009

FOTO 6-22 BEWEEGBARE H-ADCP IN DE DINKEL (FOTO'S: WS REGGE EN DINKEL)

FOTO 6-23 H-ADCP IN ONDERHOUDSPOSITIE OPGESTELD OP EEN VERSCHUIFBAAR FRAME, INSTELBAAR OP TWEE MEETHOOGTEN. LOCATIE ANE, WS VELT EN VECHT (FOTO: JOS SNEEK)

FOTO 6-24 ZELFDE OPSTELLING BIJ HOOGWATER (FOTO: JOS SNEEK)

6.4.7 ISO-STANDAARDEN

De ISO-standaard die betrekking heeft op horizontale (H-ADCP) en verticale ("bed mounted") Doppler stroomsnelheidsmeters, is de volgende:

- ISO 15769 Guidelines for the application of acoustic velocity meters using Doppler and echo correlation methods

6.5.8 DOPPLERRADARSNELHEIDSMETING

De Dopplerradarmeting van de stroomsnelheid berust op de meting van de dopplerverschuiving van de echo van radiogolven die optreedt als gevolg van de beweging van het wateroppervlak. De radarzender stuurt radiogolven naar het wateroppervlak die als gevolg van de waterbeweging terugkomen met een andere frequentie. Door de frequentie van het uitgezonden signaal te vergelijken met de frequentie van het ontvangen signaal, ontstaat er een maat voor de beweging van het wateroppervlak.
Omdat alleen de stroomsnelheid van het wateroppervlak wordt gemeten is deze methode alleen geschikt voor meting in een rechthoekig of cirkelvormig profiel met uniforme stroming. De sensor wordt boven het wateroppervlak opgesteld tot een hoogte van maximaal 1,5 m. Voor de bepaling van het doorstroomoppervlak is de meting van de waterhoogte noodzakelijk. Deze kan met dezelfde opstelling worden gemeten in de vorm van een akoestische niveaumeting.

De onnauwkeurigheid van de radar snelheidsmeting bedraagt circa 0,5 % met een meetbereik van 0,23 tot 6,1 m/s. De onnauwkeurigheid van de debietmeting bedraagt circa 5% voor meting in een profiel met uniforme stroming. De onnauwkeurigheid van de akoestische niveaumeting is circa 1%.

De meting is toepasbaar in ondiepe kanalen met een zeer laag waterniveau en is mogelijk tot hoge snelheden. De montage is relatief eenvoudig en er is weinig onderhoud vereist. Een zichtbare ophanging is gevoelig voor vandalisme.

De Dopplerradarmeting werkt pas bij hoge snelheden stroomsnelheden en wordt in Nederland weinig toegepast. Bij snelstromende wateren is het een methode om contactloos debieten te meten. De methode is minder geschikt voor incidenteel traag stromend en stilstaand water.

FOTO 6-25 DOPPLERRADAR SNELHEIDSMETING BIJ DE LINGE-INLAAT TE DOORNENBURG (FOTO'S: FLOW-TRONIC)

6.5 RELATIE DEBIET EN WATERSTAND

6.5.1 INLEIDING

In de praktijk is het vaak niet mogelijk de afvoer van een waterloop continu te meten. Om continue afvoergegevens te krijgen, wordt daarom de waterstand continu geregistreerd, waaruit aan de hand van een afvoerrelatie de bijbehorende afvoeren kunnen worden bepaald. De relatie van afvoer Q versus waterstand h wordt in het algemeen opgesteld voor een bepaalde meetlocatie van een waterloop. De karakteristieken van de meetlocatie worden bepaald door de geometrie van de dwarsdoorsnede en gewoonlijk door de eigenschappen van de rivier benedenstrooms van de meetlocatie. Dit hoofdstuk gaat speciaal over afvoerrelaties van beken en rivieren en dus niet over afvoerrelaties van meetstuwen of meetgoten.

Kwalitatief goede en onderling goed afgestemde Qh-relaties vormen de basis voor het gebruik van afvoerreeksen in waterbewegingsmodellen (SOBEK, Mike 11 en WAQUA) en bij hoogwatervoorspelling. Ook worden modellen gebruikt om op basis van goed bepaalde Qh-relaties, voor andere locaties Qh-relaties op te stellen.
Zo worden onze grote rivieren waterstand-afvoerrelaties toegepast voor de Maas en de Rijn uitgaande van onder andere meetlocaties als Borgharen Dorp (Maas) en Lobith (Rijn). Bij een bepaalde waarde voor de afvoer behoort een bepaalde waterstand te Borgharen respectievelijk Lobith. Dit verband, de afvoerkromme of Qh-relatie, wordt periodiek herzien aan de hand van resultaten van afvoermetingen. Verbanden tussen de waterstanden van deze meetlocaties met waterstanden op benedenstrooms gelegen locaties staan bekend als betrekkingslijnen (h-h relaties). Deze verbanden worden voor de grote rivieren iedere tien jaar herzien.
Bij de bepaling van zeer hoge waarden (nog nooit waargenomen) voor zowel de afvoerkrommen als de betrekkingslijnen wordt gebruik gemaakt van numerieke modellen.

6.5.2 PRINCIPE EN LOCATIE

Een Qh-relatie – de relatie tussen het debiet Q en de waterstand h – is geen meetmethoden, maar een relatie tussen het gemeten debiet en gemeten waterstand. Meestal wordt de waterstand op een locatie continu gemeten en het debiet periodiek. Het debiet wordt over het bereik van de afvoer gemeten, zodat voor het gehele bereik van de afvoer en waterstanden een relatie tussen beide kan worden gelegd. In beginsel zijn Qh-relaties de gemeten versie van de Chézy-vergelijking toegepast voor het totale debiet door een dwarsprofiel,

$$Q = C \cdot A \cdot \sqrt{d \cdot i}$$

met C = Chézy-coëfficiënt, A = doorstroomoppervlak ($d \times B$), B = breedte, d = waterdiepte en i = verhang, die een relatie legt tussen het debiet en de waterdiepte. De waterdiepte kan worden uitgedrukt als waterstand min bodemhoogte, $d = h - z_b$, zodat de relatie tussen debiet en waterstand luidt,

$$Q \sim h^{3/2}$$

Alle variatie in C, A, de bodemligging z_b en i, komt terug in het verloop van de relatie evenals alle effecten van versnellende of vertragende stroming en variërend debiet. In het algemeen zal niet in het gehele afvoer en waterstandsbereik zijn gemeten (eens in de 100 of 200 jaar gebeurtenissen komen zelden voor). De afvoerrelatie op een meetlocatie moet empirisch worden vastgesteld aan de hand van voldoende metingen van afvoeren en bijbehorende waterstanden volgens methoden beschreven in hfst. 5. De Qh-relatie wordt echter veelal gebruikt om de waterstand te schatten bij een extreem hoog debiet. De extreme waterstand wordt dan

door extrapolatie van de Qh-relatie verkregen, zoals beschreven in paragraaf 6.5.4. Buiten het bemeten bereik van de gemeten Q en h is de nauwkeurigheid van geëxtrapoleerde waterstanden (zeer) beperkt.

Van belang is een eenduidige relatie tussen de afvoer en de bijbehorende waterstand. Bepalend daarvoor is de keuze van de locatie waar de waterstand voor de Qh-relatie gemeten gaat worden. Op die locatie moet bij dezelfde afvoer de waterstand zo min mogelijk verstoord zijn: de zogenaamde "control". Meestal is die verstoring er wel door de stuwkromme van de rivier. Het kan dan soms nuttig zijn te kijken naar locaties waar de afvoer in zekere zin gecontroleerd is, maar dat komt in Nederland heel weinig voor. Een voorbeeld zijn oude molendrempels in de Limburgse beken. Een andere optie is om ter plaatse schietend water te forceren, dan wordt de locatie een control.

Op de ideale meetlocatie is er een minimaal effect van benedenstroomse verstoringen zoals variërende begroeiing van de waterloop en variërende bodem- en oeverligging ten gevolge van morfologische processen (sedimentatie/erosie). De stromingstoestand wordt gekarakteriseerd door het getal van Froude (Fr),

$$Fr = \sqrt{\frac{Q^2 \cdot B}{g \cdot A^3}}$$

met:

Q	: debiet (m^3/s)
B	: breedte op de waterspiegel (m)
A	: natte oppervlak dwarsprofiel (m^2)
g	: versnelling van de zwaartekracht (=9,81 m/s^2)

We kunnen daarbij het volgende onderscheid maken:

$Fr = 0$	: stilstaand water
$Fr < 1$	: stromend water (relatief langzaam stromend water)
$Fr = 1$	: kritische stroming (grenstoestand)
$Fr > 1$	: schietend water (relatief snel stromend water)

Een belangrijke, controleerbare eigenschap van schietend water ($Fr > 1$) is, dat zich een verstoring in schietend water alleen stroomafwaarts kan manifesteren en nooit in stroomopwaartse richting, in tegenstelling tot stromend water ($Fr < 1$).

Dus zoek langs de waterloop naar plekken waar invloed van benedenstrooms minimaal is, bijvoorbeeld als gevolg van een drempel (let wel: de drempel mag niet verdrinken!). Als er een plek is waar schietend water bestaat of gemakkelijk is te realiseren, dan kan je daar een control van maken (dat gaat dan wel gepaard met waterstandstoename bovenstrooms). Maar meestal kan dat niet.

In het algemeen geldt, dat het effect van benedenstroomse verstoringen afneemt naarmate de stroomsnelheid op de (h-)meetlocatie hoger is. Op het moment dat een meetlocatie wordt gebruikt voor het meten van afvoeren, spreken we van een afvoermeetstation. De meest geschikte locatie voor een afvoermeetstation langs een waterloop is gelegen op geringe afstand bovenstrooms van zo'n (h-)meetlocatie. De afvoerrelatie zal dan over een groot meetbereik éénduidig zijn: de relatie tussen de waterstand en het debiet wordt niet of nauwelijks

beïnvloed door verstoringen benedenstrooms. In een niet-éénduidige afvoerrelatie komen merkbare effecten voor waarvan de sterkte afhangt van de hoogte van de waterstand, de grootte van het debiet, de vorm van de afvoergolf, de seizoensvegetatie, de inzet van stuwen, sedimentatie en erosie van bodem en oevers, enzovoorts. Niet éénduidige afvoerrelatie zijn behandeld in paragraaf 6.5.5.

De afvoerrelatie van een meetstation moet empirisch worden vastgesteld aan de hand van voldoende metingen van afvoeren en bijbehorende waterstanden. Na het vaststellen van de afvoerrelatie moeten de metingen worden gecontinueerd om verificatie 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), veranderingen in ruwheid, bijvoorbeeld door groei van vegetatie, door bodemdaling (bijvoorbeeld gaswinning of tektonische processen) en door hoogwatergolven die een verandering in het verhang van de waterspiegel veroorzaken en daardoor een lus (hysteresis) in de afvoerrelatie te zien geven.

6.5.3 EENDUIDIGE QH-RELATIE

Als in een bepaalde dwarsdoorsnede een aantal afvoeren is gemeten, bijvoorbeeld volgens de velocity-area methode, kan de relatie tussen de afvoer in de meetsectie en de bijbehorende waterstand worden bepaald. De resultaten van afvoermetingen en bijbehorende waterstanden worden gewoonlijk uitgezet als punten in een Q-h diagram, met de afvoer (Q) op de x-as en de waterstand (h) op de y-as. In theorie zullen deze metingen op een kromme liggen ($Q \sim h^{3/2}$). Hierdoor kan een regressielijn worden bepaald 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.

Een nauwkeuriger methode is het analytisch bepalen van de afvoerrelatie met behulp van de Chézy-vergelijking. Deze relatie kan in het algemeen worden geschreven als:

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

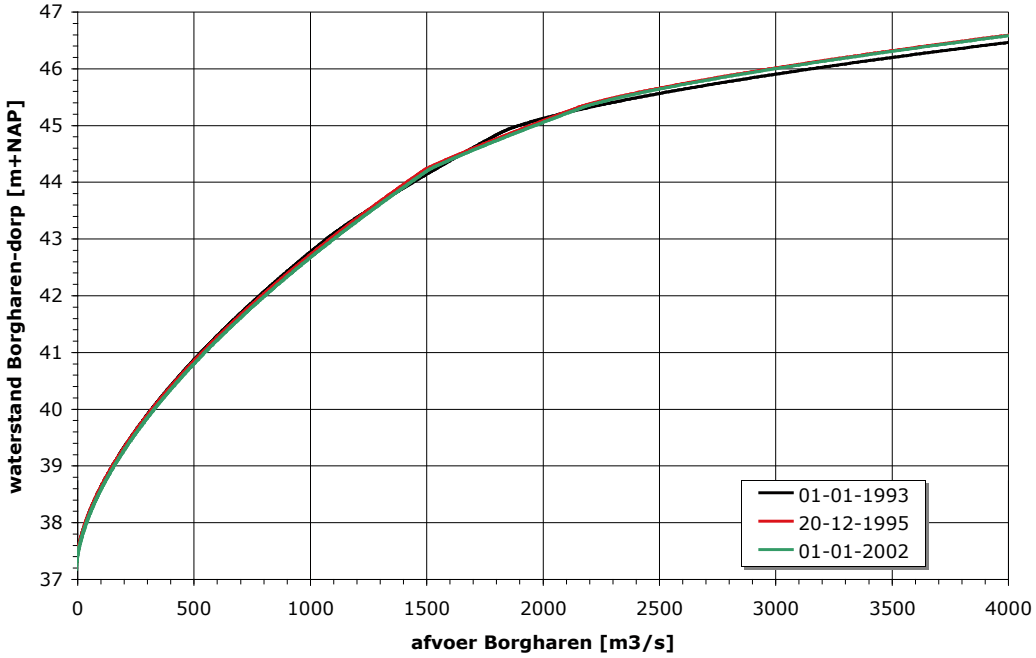
met:

Q	: debiet (m^3/s)
h	: waterstand (m+NAP)
h_0	: waterstand waarbij juist geen afvoer meer plaatsvindt (m+NAP)
a,b	: constanten, specifiek voor een bepaald meetstation.

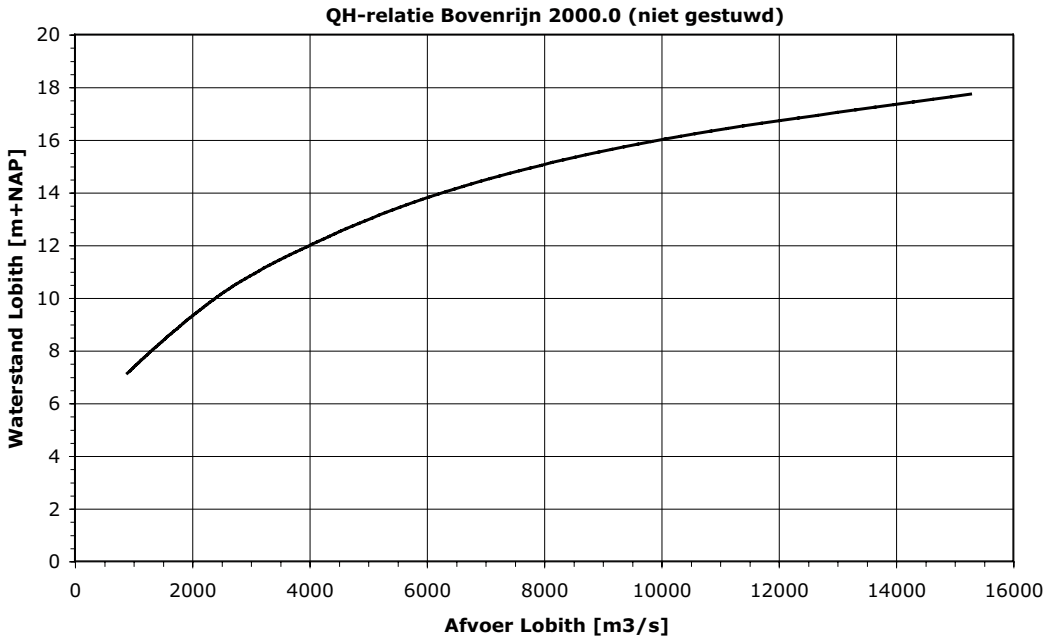
De verwachting is dat de relatie tussen Q en h een gladde polynoom is waarvan de constanten h_0, a en b kunnen worden bepaald met:

- een lineaire kleinste kwadraten methode,
- een niet-lineaire kleinste kwadraten methode,
- logaritmische transformatie van relatie zodat de meetpunten min of meer op een rechte liggen waardoor een lineair verband kan worden gelegd tussen Q en h, waaruit de constanten volgen.

FIGUUR 6-4 QH-RELATIE MAAS BIJ BORGHAREN-DORP 1993, 1995, 2002 (BRON: RIJKSWATERSTAAT)



FIGUUR 6-5 QH-RELATIE BOVENRIJN BIJ LOBITH ONGESTUWD (BRON: RIJKSWATERSTAAT)



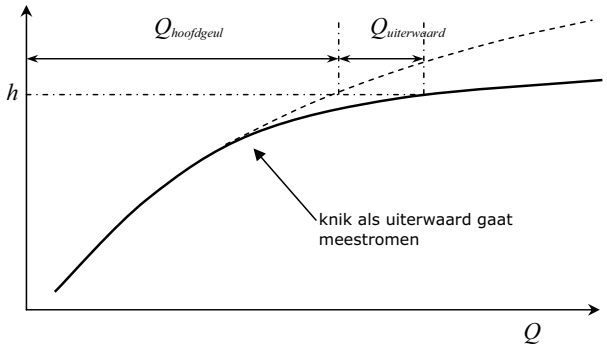
KEUZE VAN HET MEETTRAJECT

Bij de keuze van de meetlocatie gelden de algemene voorwaarden die zijn besproken in hoofdstuk 4 (recht en uniform traject, voldoende diepte). Daarnaast moet de meetlocatie in een stabiel gedeelte van de beek of rivier liggen (als de bodem ter plaatse van de meetlocatie of een gedeelte benedenstrooms instabiel is, zal de afvoerrelatie minder éénduidig worden) en voldoende ver zijn verwijderd van samenvloeiingen met andere takken.

HOOFDGEUL MET UITERWAARD/PLASBERMEN

De constanten van de Qh-relatie hangen ook af van het doorstroomoppervlak. Voor een situatie in een waterloop waarin de afvoer in de hoofdgeul is geconcentreerd zijn de constanten anders dan voor een situatie waarbij de uiterwaard of plasberm ook meestroomt. Dit effect uit zich in de Qh-relatie als een 'knik', zie Figuur 6-6. Bij het bepalen van een afvoerrelatie die verandert als gevolg van het al of niet meestromen van de uiterwaarden of plasbermen, kunnen afzonderlijke afvoerrelaties op worden gesteld voor de hoofdgeul (zomerbed) én voor de hoofdgeul en uiterwaard.

FIGUUR 6-6 INVLOED VAN UITERWAARDEN/PLASBERMEN OP DE AFVOERRELATIE



6.5.4 EXTRAPOLATIE VAN AFVOERRELATIES

Extreem hoge afvoeren komen zelden voor en dan nog vaak slechts gedurende korte tijd en zijn daarom moeilijk te meten. Het ontbreken van gegevens bij piekafvoeren is vaak een probleem. Er zijn verschillende mogelijkheden om de afvoerrelatie naar deze extreme waarden te extrapoleren.

DE LOG-LOG EXTRAPOLATIE

De afvoerrelatie wordt beschreven volgens $Q = a \times (h - h_0)^b$. Na het berekenen van h_0 wordt de Qh-relatie uitgezet op dubbel-logaritmisch papier. Hieruit worden eventuele discontinuïteiten zichtbaar en wordt duidelijk welke gedeelten van de afvoerrelatie afzonderlijk moeten worden beschreven. Het gedeelte dat de hoogste gemeten afvoeren weergeeft, wordt geëxtrapoleerd.

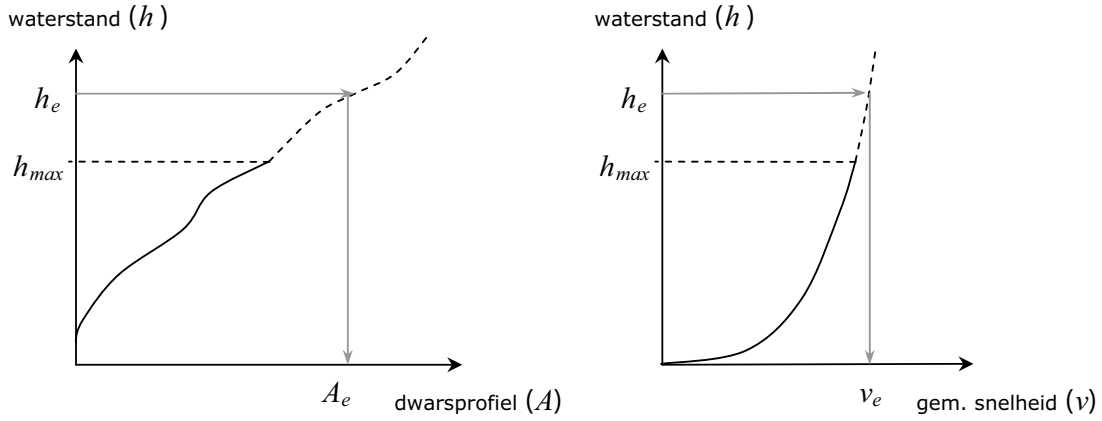
EXTRAPOLATIE OP BASIS VAN DE FYSICA

Gebaseerd op de gemeten waterstanden h en de relatie $Q = v_{gem} \times A$, kunnen de gemiddelde snelheid v_{gem} en de oppervlakte van het dwarsprofiel A worden uitgezet tegen de waterstand h, zie Figuur 6-7. De curve h-A wordt gefit door de meetpunten en geëxtrapoleerd buiten het gemeten bereik, rekening houdend met onregelmatigheden zoals uiterwaarden en plasbermen. De extrapolatie van de curve h-v wordt getrokken en geëxtrapoleerd volgens de formule van Manning, waarbij voor n (Manning 'n') en i (verhang) een constante waarde wordt aangenomen, gebaseerd op beschikbare meetgegevens:

$$v = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot i^{1/2}$$

De afvoer voor een geëxtrapoleerde waterstand h_e is dan $Q_e = v_e \times A_e$. Dit wordt gedaan voor verschillende waterstanden om vervolgens de Qh-relatie buiten het gemeten afvoerbereik aan te vullen.

FIGUUR 6-7 RELATIES TUSSEN H EN A EN TUSSEN H EN V



6.5.5 NIET-ÉÉNDUIDIGE AFVOERRELATIES

Niet éénduidige Qh-relaties worden veroorzaakt door:

- stijgende of dalende waterstanden (hoogwatergolf),
- veranderingen in doorstroomoppervlak van het dwarsprofiel (sedimentatie/erosie),
- veranderingen in vegetatie,
- opstuwingseffecten vanuit het pand benedenstrooms van het meetstation,
- voortgaande bodemdaling.

Is de meetlocatie onder invloed van een of meerdere van genoemde factoren dan kunnen de uit de Qh-relatie bepaalde afvoeren op basis van de gemeten waterstanden zowel onderschat als overschat worden. Waren deze factoren aanwezig tijdens het meten ten behoeve van het opstellen van de Qh-relatie, dan is de relatie alleen geldig voor die situatie.

HOOGWATERGOLVEN

In niet-stationaire stromingsomstandigheden betekent een verandering in de tijd van het waterspiegelverhang 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 veroorzaakt. 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 eenzelfde waterstand, zie voorbeeld Figuur 6-9. De afvoer zal bij eenzelfde waterstand hoger zijn in het stijgende gedeelte en lager in het dalende gedeelte. Dit veroorzaakt een hysterese lus in de afvoerrelatie.

Hysterese kan in rekening worden gebracht met de vergelijking van Jones waarin het lokale waterspiegelverhang dh/dx (of de lokale waterspiegelverandering in de tijd) is opgenomen,

$$Q = A \cdot C \cdot \sqrt{R \cdot \left(i_b - \frac{dh}{dx} \right)} \quad \text{of} \quad Q = A \cdot C \cdot \sqrt{R \cdot \left(i_b + \frac{1}{c} \cdot \frac{dh}{dt} \right)}$$

met c = voortplantingssnelheid van de hoogwatergolf [m/s], waarvoor geldt $c \approx 1{,}5\ v$ (v =, gemiddelde stroomsnelheid).

VERANDERINGEN IN HET DOORSTROOMOPPERVLAK VAN HET DWARSPROFIEL

Sedimentatie en/of erosie van de bodem en oevers, over een grote lengte van de waterloop, resulteert in een stijging of daling van de waterspiegel bij eenzelfde afvoer. Het effect van de verandering van het dwarsprofiel werkt door in het doorstroomoppervlak A en de hydraulische straal R en dus ook in de Chézy-coëfficiënt $C(R)$, C is een functie van R. Aangezien een Qh-relatie is gebaseerd op de Chézy-vergelijking is in onderstaande relatie aangegeven hoe deze effecten doorwerken in de Qh-relatie.

$$Q = A \cdot C(R) \cdot \sqrt{R \cdot i} \quad \text{met} \quad C(R) = 18 \log \frac{12R}{k} \quad \text{of} \quad C(R) = \frac{R^{1/6}}{n}$$

De veranderingen werken als volgt door in de relatie, gegeven dat de afvoer Q en het verhang i niet veranderen,

$$Q = (A + \Delta A) \cdot (C + \Delta C) \cdot \sqrt{(R + \Delta R) \cdot i} \quad \text{en dus} \quad Q = (a + \Delta a) \cdot (h - h_0)^{b + \Delta b}$$

De profielveranderingen werken dus door in de constanten a en b.

VERANDERINGEN IN DE 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 effect van de verandering van het dwarsprofiel werkt door in het doorstroomoppervlak A en de hydraulische straal R en het ruwheidseffect in de Chézy-coëfficiënt C. Aangezien een Qh-relatie is gebaseerd op de Chézy—vergelijking is in onderstaande relatie aangegeven hoe deze effecten doorwerken in de Qh-relatie. Door de ruwere waterloop zal het verhang ook wijzigen (steiler worden). De veranderingen werken als volgt door in de relatie, gegeven dat de afvoer Q niet verandert,

$$Q = (A + \Delta A) \cdot (C + \Delta C) \cdot \sqrt{(R + \Delta R) \cdot (i + \Delta i)} \quad \text{en dus} \quad Q = (a + \Delta a) \cdot (h - h_0)^{b + \Delta b}$$

De profielveranderingen werken dus door in de constanten a en b.

OPSTUWINGSEFFECTEN

Opstuwingseffecten treden op bij getijdebewegingen in het benedenstroomse deel van een rivier, door invloed van een benedenstroomse afvoerverdeling bij splitsingen, door samenkomsten met een andere waterloop of door de aanwezigheid van stuwen benedenstrooms. Als deze effecten variabel zijn in de tijd, zal de afvoer niet een éénduidige functie zijn van de waterstand.

BODEMDALING

Er kan een systematische onderschatting van de afvoer optreden op als gevolg van het onvoldoende in rekening brengen van de opgetreden bodemdaling in de tijd.

6.5.6 GROTE RIVIEREN: QF-RELATIES

De afvoeren (Q) voor een aantal meetpunten langs de Rijntakken en de Maas worden met behulp van een Qh-relatie berekend uit gemeten waterstanden (h). In de huidige monitoringpraktijk is deze Qh-relatie een eenduidige relatie tussen de waterstand en de afvoer. De relatie wordt actueel gehouden door de waterafvoeren periodiek daadwerkelijk te meten waarna eventueel een bijstelling plaatsvindt. Bij geconstateerde veranderingen in de Qh-relatie worden de afvoeren achteraf in het algemeen niet herberekend.

Voor het dagelijkse rivierbeheer is deze praktijk voldoende nauwkeurig. Bij meer specialistische studies die gebruik maken van de berekende afvoeren blijken echter bezwaren aan deze methodiek te kleven.

Een eerste probleem bij de huidige Qh-relatie voor de grote rivieren is dat de afvoer bij stijgend water hoger, en bij dalend water lager (hysterese), is dan berekend wordt uit de opgestelde Qh-relatie. Daarnaast treedt er een systematische onderschatting van de afvoer op als gevolg van het onvoldoende in rekening brengen van de optredende bodemdaling. Een heranalyse van de waterstands- en afvoermetingen uit de periode 1956-heden heeft voor elk station een relatie opgeleverd tussen de afvoer aan de ene kant en de waterstand, de hysterese en de bodemverandering aan de andere kant, de zogenaamde *Qf-relaties* (f staat voor functie). Hierdoor is de overall-onnauwkeurigheid van de berekende afvoeren afgenomen van 6-8% naar 2,5-4% van de gemeten afvoer. De verbeterde afvoerreeksen zijn gebruikt bij de afregeling van het hydraulische model WAQUA waarmee onder andere de maatgevende hoogwaterstanden langs de Rijntakken en de Maas worden berekend.
Het is de bedoeling om de nieuwe methodiek ook in te zetten voor de routinematige berekening van de afvoeren en het aanpassen van de historische afvoerreeksen op de Rijntakken.

6.5.7 ONNAUWKEURIGHEID

VOOR DE GROTE RIVIEREN

De Qh-relatie wordt bepaald door de parameters: waterstand, stroomsnelheid, bodemprofiel en ruwheid. De waterstand wordt bepaald met een DNM, een radarniveaumeter of een peilschaal. De voor de vastlegging van de Qh-relatie bij verschillende waterstanden benodigde stroming moet gemeten worden in het gehele doorstroomprofiel. Over de gehele breedte van het water worden verticale stroomprofielen gemeten met een afstand van 50 cm. Hiervoor worden propellermetingen gebruikt of ADCP-metingen. De afwijking tussen de geschatte stroomsnelheid en de werkelijk optredende stroomsnelheid is kleiner dan 10%.

Voor de berekening van de optredende stroomsnelheid voor het gedeelte van de waterloop dat de uiterwaard en het winterbed betreft, moet een schatting worden gemaakt op basis van hoogteprofielmetingen en ruwheidsmetingen. Voor de bepaling van het bodemprofiel van het zomerbed worden multi-beam echolodingen gebruikt met een nauwkeurigheid van 20 cm, die worden aangevuld met het uit luchtfoto's afgeleide profiel van het winterbed. Digitale fotogrammetrie van luchtfoto's geeft digitale hoogtemodellen met een nauwkeurigheid van 17 cm. Met laseraltimetrie gemaakt digitale hoogtemodellen hebben een nauwkeurigheid van 7 cm.

De nauwkeurigheidseis met betrekking tot de waterstand is dat 95% van de gemeten waterstanden minder dan 2,5% afwijkt van de "ware" waterstand.
Verder is belangrijk is een goede nulpuntstabiliteit van het meetinstrument. Vanwege het verloop dient de nulpuntcontrole van druksensors zeer regelmatig plaats te vinden.
Registratiefrequentie van de waterstanden: 10-minuten gemiddelde waarden.

Geldigheidsduur van een Qh-relatie: 3-5 jaar.

Afhankelijk van de steilheid van de hoogwatergolf, kunnen als gevolg van hysterese, afwijkingen optreden in de afvoer uit de Qh-relatie tot circa 8% van de werkelijk opgetreden afvoer.

BIJ KLEINERE WATERLOPEN

De meeste voorbeelden van de toepassing van Qh-relaties voor kleinere waterlopen vinden we bij de Limburgse rivieren en beken. Sommige meetlocaties zijn gevoelig voor aanzanding en/of begroeiing. Gemeten waterstand en berekend debiet passen dan niet meer bij elkaar: de grootste onnauwkeurigheid wordt immers geïntroduceerd bij de omrekening van waterstand naar debiet. Om blijvend over dezelfde kwaliteit van de afvoerrelatie te kunnen beschikken is daarom regelmatige onderhoud en controle nodig:

- 1 x per maand controle of de waterstandsmetingen nog kloppen en controle van de afvoerrelatie met een elektromagnetische afvoerbepaling volgens ISO-voorschrift en controle van het dwarsprofiel.
- de afvoerrelatie moet worden aangepast als het verschil tussen de incidentele afvoermeting en de uitkomst van de afvoerrelatie te groot wordt. Te groot wil zeggen: meer dan 2 of 3 keer een verschil meer dan 10%. Dan moet worden nagegaan of aanpassen van de relatie nodig is. Uiteraard moet bij geconstateerde verschillen ook de onderhoudstoestand geïnspecteerd worden.
- 2 x per jaar controle van de vaste hoogte van het waterstandsmeetpunt.
- 1 x per jaar nauwkeurige opneming van het dwarsprofiel.

Om de afvoerrelatie te verbeteren is het van belang het gemeten traject zo vaak als mogelijk uit te breiden met metingen van lage afvoeren en metingen van hoge afvoeren. Bij hoogwaters is het zaak snel met een meetploeg en instrumenten ter plaatse te zijn.

Gangbaar is een meetfout in het verwachte eindresultaat van de afvoerrelatie van 10%. Dit geldt dan tot de hoogste afvoer waarvoor nog is geijkt.

6.5.8 GESCHIKTE MEETINSTRUMENTEN

Voor toepassing bij kleinere waterlopen:

- Stilling well met vlotter
- Stilling well met drukopnemer
- Radarniveaumeter

Voor gebruik in de grote rivieren

- Radarniveaumeter
- Stappenbaak
- Rijkswaterstaat digitale niveaumeter DNM

6.5.9 MOGELIJKHEDEN EN BEPERKINGEN

Nadeel van de methode is dat een definitieve waterstand-afvoerrelatie pas kan worden vastgesteld als over het hele meetbereik ijkmetingen beschikbaar zijn.

Een ander nadeel van de Qh-relatie is de hoge procentuele onnauwkeurigheid bij lage afvoeren. Op de Maas en Rijn komt dit voor in gestuwde situaties bij lage afvoeren.

Wanneer Qh-relaties, die bepaald zijn op basis van afvoermetingen uit een voorafgaande periode, worden toegepast met actuele metingen, wordt de invloed van met name tussentijdse bodemveranderingen niet in rekening gebracht, hetgeen aanleiding kan zijn tot ongewenste fouten in de afvoer.

De eenduidige Qh-relaties vertegenwoordigen feitelijk de gemiddelde relatie tussen de waterstand en de afvoer en houden dus geen rekening met de hysterese die in werkelijkheid optreedt. Deze houdt in dat er bij gelijkblijvende waterstand in de wassende fase van een hoogwatergolf meer afvoer optreedt dan in een permanente stromingstoestand, terwijl er in de vallende fase juist een kleinere afvoer optreedt dan in de permanente situatie.

6.5.10 VOORBEELDEN GROTE RIVIEREN

Voor de grote rivieren zijn voor de volgende locaties Qh-relaties opgesteld:

TABEL 6-9 OVERZICHT QH-RELATIES GROTE RIVIEREN

Waterloop	locatie	Km raai
Rijn	Lobith	862,18
Rijn	Pannerdensche kop Waal	868,4
Rijn	Pannerdensche kop Pan. Kanaal	870,4
Rijn	IJsselkop Nederrijn	880,1
Rijn	IJsselkop IJssel	879,5
Rijn	Waal Tiel	915
Rijn	Lek Hagestein	945
Rijn	IJssel Olst	956
Maas	Eijsden-grens	2,56
Maas	St. Pieter	10,8
Maas	Borgharen-Dorp	16
Maas	Venlo	107,47
Maas	Megen	190,75

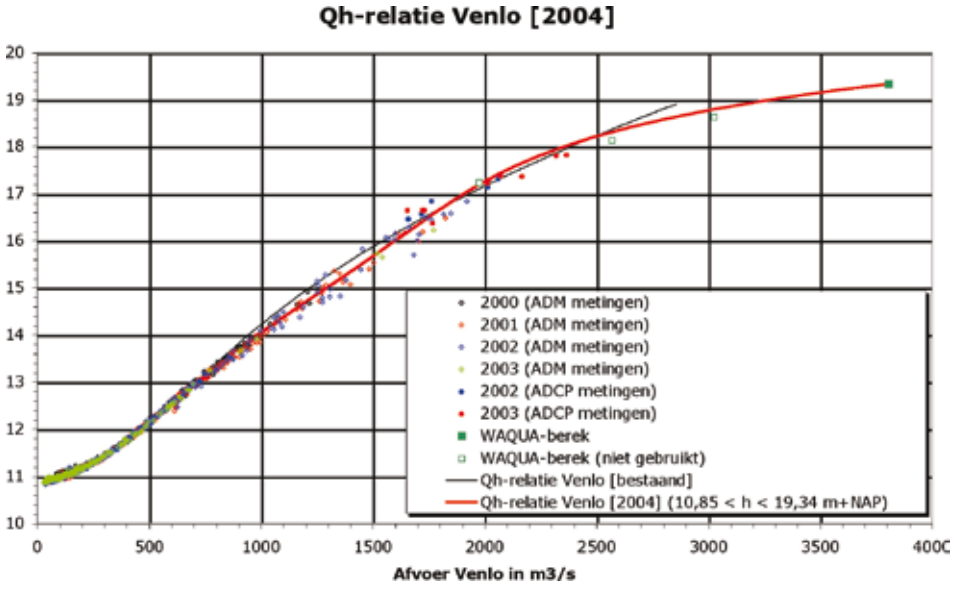
VOORBEELD: QH-RELATIES VENLO EN MEGEN

De vernieuwde Qh-relaties van Venlo en Megen zijn opgesteld op basis van de beschikbare meetgegevens in het hoge afvoerbereik in de jaren 2000 t/m 2003. Aanvullend zijn resultaten van WAQUA-berekeningen bij een afvoertop van 3.800 m^3/s bij Borgharen gebruikt. De bestaande Qh-relaties bij Venlo en Megen behoefden vervanging in 2004 door de nieuw afgeleide Qh-relaties. De vernieuwde Qh-relatie bij Venlo luidt:

$$Q = 0{,}7191\,h^5 - 52{,}1918\,h^4 + 1507{,}2460\,h^3 - 21639{,}4047\,h^2 - 154671\,h - 440721 \quad [\mathrm{m^3/s}].$$

Deze relatie geldt boven het niveau van 10,85 m+NAP en tot het niveau van 19,34 m+NAP. In Figuur 6-8 is de vernieuwde Qh-relatie voor Venlo weergegeven.

FIGUUR 6-8 VERNIEUWDE QH-RELATIE VENLO 2004 (NIET IN GEBRUIK)

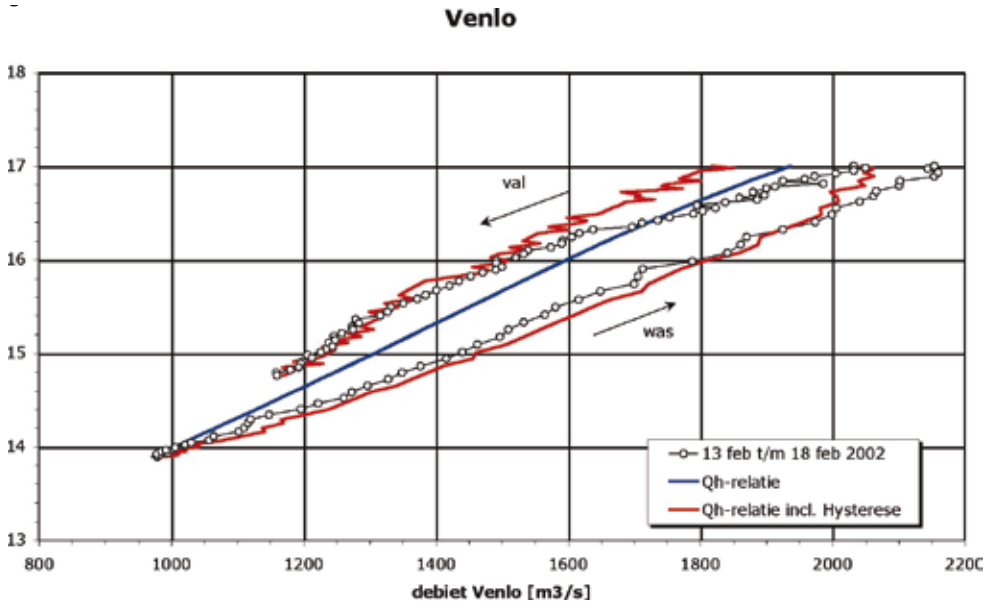


Over de nauwkeurigheid van de nieuwe Qh-relatie het volgende. De standaardafwijking van het verschil tussen de metingen en de nieuwe Qh-relatie van Venlo in het afvoerbereik lager dan 1.000 m^3/s is 72 m^3/s. Voor het afvoerbereik bij Venlo hoger dan 1.000 m^3/s is de standaardafwijking voor dit verschil 54 m^3/s. Deze waarden kunnen als maat dienen voor de onnauwkeurigheid van de afvoer bij een gemeten waterstand bij gebruik van de Qh-relatie Venlo.

VOORBEELD: HYSTERESE-EFFECT

Het hysterese-effect is onderzocht voor de meetgegevens van Venlo. Uit het onderzoek blijkt dat het hysterese-effect redelijk kan worden berekend met de formule van Jones. Verder onderzoek wordt aanbevolen, maar met de formule kan het hysterese-effect bij de Qh-relatie worden geteld zodat het werkelijke afvoerverloop tijdens een afvoergolf beter kan worden gesimuleerd.

FIGUUR 6-9 HYSTERESE-EFFECT BIJ VENLO BEPAALD MET GEMETEN AFVOER EN WATERSPIEGELVERHANG 13 T/M 18 FEBRUARI 2002



In Figuur 6-9 is het resultaat van een korte periode tijdens 2002 weergegeven. Uit de figuur blijkt dat de voorspelling met de formule van Jones redelijk goed in de buurt ligt bij het gemeten verloop in de tijd.

6.5.11 VOORBEELDEN KLEINERE WATERLOPEN

Voor de volgende kleinere waterlopen zijn Qh-relaties opgesteld:

TABEL 6-10 OVERZICHT QH-RELATIES KLEINERE WATERLOPEN

Waterloop	locatie	Waterbeheerder
Overijsselse Vecht	Emlichheim (D)	NLWKN, Meppen (D)
Berkel	Stadlohn (D)	Lanuv (D)
Berkel	Ammeloe (D)	Lanuv (D)
Issel/Oude IJssel	Isselburg (D)	Lanuv (D)
Bocholter Aa/Aastrang	Rhedebrugge (D)	Lanuv (D)
Niers	Gennep	WS Peel en Maasvallei
Swalm	Swalmen	WS Peel en Maasvallei
Roer	Stah (D)	Lanuv (D)
Roer	Jülich (D)	Lanuv (D)
Vlootbeek	Vlootbekermolen	WS Roer en Overmaas
Vloedgraaf	Nieuwstadt	WS Roer en Overmaas
Geleenbeek	Oud-Roosteren	WS Roer en Overmaas
Geul	Hommerich	WS Roer en Overmaas
Geul	Meerssen	WS Roer en Overmaas
Gulp	Azijnfabriek	WS Roer en Overmaas
Jeker	Nekum	WS Roer en Overmaas
Anselderbeek	Eygelshoven	WS Roer en Overmaas
Worm	Rimburg	WS Roer en Overmaas

De meeste voorbeelden van de toepassing van Qh-relaties vinden we voor de Limburgse rivieren en beken.

Het meetstation van het Waterschap Roer en Overmaas in de Roer, Drie Bogen, is niet meer in gebruik. Tegenwoordig wordt gebruik gemaakt van het Duitse meetstation Stah. Door de dynamiek van de Roer en het missen van afvoer bij hoge afvoeren was Drie Bogen onbetrouwbaar. Bij het Duitse meetstation Stah is de watergang vastgelegd en dus stabiel. Tevens moet al het water daar door de meetsectie.

FOTO 6-26 **STAH (D) IN DE ROER, AFVOERMEETSTATION MET KABELBAAN**

TABEL 6-11 **QH-RELATIE AFVOERMEETSTATION STAH (D) IN DE ROER**

2.C.4	Stah			Roer	
Begindatum	**Einddatum**	**Waterstand Laag N.A.P. + m**	**Waterstand Hoog N.A.P. + m**	**Q = f(H) Q in m³/s H in N.A.P. + m**	**Fout %**
01-01-1994	14-11-1999	0,33	0,58	10,050 * (H + 0,350)^1,756	
		0,53	2,30	27,010 * (H + 0,350)^1,481	
		2,27	2,00	8,660 * (H + 0,350)^2,806	
15-11-1999		0,77	1,99	16,79 * (H + 0,350)^1,756	
		1,33	2,00	4,855 * (H + 0,350)^2,806	

FOTO 6-27 **AFVOERMEETSTATION HOMMERICH IN DE GEUL**

TABEL 6-12 **QH-RELATIE MEETSTATION HOMMERICH IN DE GEUL**

10.Q.30	Hommerich			Geul	
Begindatum	Einddatum	Waterstand Laag N.A.P.+ m	Waterstand Hoog N.A.P.+ m	Q = f(H) Q in m³/s H in N.A.P.+ m	Fout %
01-09-1939	31-12-1977	91,35 92,77	92,71 94,26	10,52 * (H - 91,05)^1,040 26,28 * (H - 92,11)^1,151 (Hommerich oud)	
06-09-1978	31-12-1980	91,270	91,950	13 * (H – 91,335)^1,9	
		91,350 93,300	92,600 93,700	6,948 * (H – 91,834)^1,721 1,1015 * (H – 93,260)^3,173 Zeer grote onnauwkeurigheden zitten vooral in het bereik onder de 2 m³/s en boven ca 15 m³/s (Part.)	
01-01-1981	10-02-1984	91,220	91,850	10,887 * (H – 91,161)^1,169	
		91,350	92,600	6,948 * (H – 91,834)^1,721	
		93,300	93,700	1,1015 * (H – 93,260)^3,173	
				Zeer grote onnauwkeurigheden zitten vooral in het bereik onder de 2 m³/s en boven ca 15 m³/s.	
				(Part.)	
16-02-1984	31-12-1993	93,150	92,450	26,2114 * (H-92,345)^2,694	
		92,450	93,450	16,5075 * (H-92,365)^1,506	
		93,450	94,600	13,9047 * (H-92,240)^1,636	
01-01-1994	31-01-1997	92,150 93,130 93,310	93,430 93,010 94,600	0,4198E-11 * (H-89,77)^25,511 16,13 * (H - 92,376)^1,323 14,74 * (H - 92,300)^1,614	
01-02-1997	30-04-1998	92,150	92,630	16,22 * (H - 92,256)^1,776	
		92,930	93,140	13,07 * (H - 92,230)^1,307	
		93,140	94,000	16,55 * (H - 92,300)^1,434	
01-05-1998	13-12-2000	92,150	92,750	17,63 * (H - 92,170)^2,469	
		92,750	93,400	16,09 * (H - 92,340)^1,400	
		93,400	94,600	14,00 * (H - 92,240)^1,536	
14-12-2000	31-12-2001	92,400	92,840	10,98 * (H – 92,377)^1,234	
		93,310 93,750	93,750 94,600	13,75 * (H – 92,306)^1,571 14,47 * (H – 92,240)^1,535	
01-01-2002	31-03-2002	92,150	92,750	17,63 * (H - 92,170)^2,469	
		92,750	93,400	16,00 * (H - 92,340)^1,400	
		93,400	94,000	14,00 * (H - 92,240)^1,536	
01-04-2003	31-12-2003	93,130 93,310 94,270	93,200 94,200 94,600	16,93 * (H – 92,362)^1,377 15,61 * (H – 92,200)^1,573 14,47 * (H – 92,241)^1,535	

6.5.12 ISO-STANDAARDEN

De ISO-standaarden die betrekking hebben op de “stage-discharge” methode zijn de volgende:

- ISO 1100-2 Determination of the stage-discharge relation
- ISO 1100-1 Establishment and operation of a gauging station

Verder is zeer informatief over de Duitse methode voor het bepalen en gebruiken van waterstands- afvoerrelaties:

- Vom Wasserstand zum Durchfluss; Arbeitsanleitung Pegel- und Datendienst Baden-Württemberg, februari 2002

6.6 RELATIE DEBIET EN VERVAL

6.6.1 INLEIDING

Voor pompgemalen geldt dat er een relatie is tussen de opbrengst van de pomp enerzijds en de opvoerhoogte (negatief verval) anderzijds. Deze relatie wordt bepaald door de zogenaamde pompkarakteristiek. Voor vijzelgemalen geldt dat de capaciteit afhankelijk is van het toerental van de vijzel en de coëfficiënten uit de debietformule van Muysken.
Nu zijn gemalen geen debietmeetinrichtingen, maar waterbeheerders zijn geïnteresseerd in de uitgeslagen of opgemalen hoeveelheden. Daarvoor moeten debieten kunnen worden bepaald.
Hetzelfde geldt voor schuiven, duikers, afsluiters en andersoortige kunstwerken die deel uitmaken van het watersysteem. Voor al deze kunstwerken geldt dat er een relatie tussen het verval over het kunstwerk en het debiet kan worden bepaald. Deze relatie kan vervolgens worden gebruikt als debietformule in de afvoerbepaling.

In dit hoofdstuk worden behandeld:
- Pompgemalen (par. 6.6.2);
- Vijzelgemalen (par. 6.6.3);
- Inlaat- en spuiconstructies: verticale schuiven met onderstort (par. 6.6.4);
- Open duikers (par. 6.6.5);
- Afsluiters (par. 6.6.6);
- Hevels en sifons (par. 6.6.7).

In onderstaande hoofdstukken worden de theoretische formules voor de relatie verval en debiet gegeven. In-situ calibratie is doorgaans nodig om deze formules zodanige kwaliteit te geven dat ze kunnen worden ingezet als debietformule (zie par. 5.5).

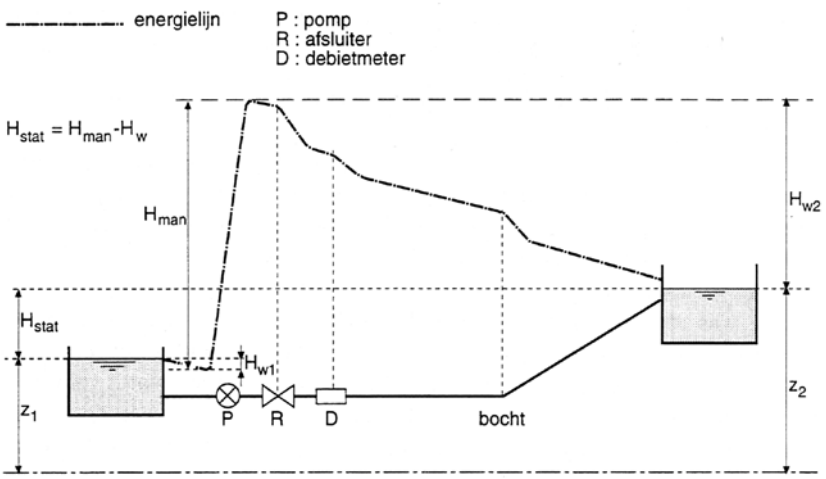
FOTO 6-28 SPUISLUIS DELFZIJL, WS HUNZE EN AA'S (FOTO: HKV LIJN IN WATER)

6.6.2 POMPGEMALEN

Van de vele pomptypen worden de waaiertypen in de praktijk het meest toegepast. Tot het waaiertype behoren de axiaalpompen, de half-axiaalpompen en de centrifugaalpompen, waarvan de laatste categorie de meest toegepaste pomp is bij grotere opvoerhoogten. In tegenstelling tot vijzels maken pompen meestal deel uit van een leidingsysteem: de zuigleiding en de persleiding, waardoor een deel van de energie wordt verbruikt door de leidingverliezen. Dit geldt niet voor schroefpompen, die vaak open worden uitgevoerd, dat wil zeggen zonder zuig - en/of persleiding.

Steeds meer pompen worden bovendien uitgevoerd met een regeling van het toerental middel een frequentie-omvormer.

FIGUUR 6-10 DE ENERGIELIJN VOOR EEN ENKELVOUDIG LEIDINGSYSTEEM WAARIN ÉÉN POMP IS OPGESTELD



Bij pompen worden de volgende hoogteverschillen en begrippen gedefinieerd:

- H_{man} : drukverschil, op korte afstand vóór en achter de pomp, bepaald met manometers;
- H_{pomp} : energiehoogteverschil, op korte afstand vóór en achter de pomp.
  $H_{pomp} = H_{man} + z + v_{P2}^2/2g - v_{P1}^2/2g$
  z : plaatshoogteverschil tussen de beide manometers,
  v_{P1} : stroomsnelheid in de zuigleiding,
  v_{P2} : stroomsnelheid in de persleiding,
- H_{stat} : verschil tussen buitenpeil en binnenpeil ter weerszijden van het gemaal (eigenlijk is Hstat het verschil in energiehoogte tussen beide panden. Er wordt hier echter aangenomen dat de stroomsnelheden in de panden verwaarloosbaar klein zijn),
- H_w : het totaal aan energieverliezen vóór (H_{w1}) en achter (H_{w2}) de pomp: $H_w = H_{w1} + H_{w2}$ (zie Figuur 6-10). Dit zijn naast de wrijvingsverliezen en de intree- en uittreeverliezen van het leidingsysteem ook de verliezen door roosters, bochten, profielveranderingen, afsluiters en terugslagkleppen.

Op de proefstand in de fabriek wordt H_{pomp} bepaald. In die gevallen waarbij de manometers op dezelfde hoogte zijn opgesteld en de diameters van zuig- en persleiding dezelfde zijn, wordt $H_{pomp} = H_{man}$. Aangenomen dat dit het geval is, dan: $H_{man} = H_{stat} + H_w$,

- pompkarakteristiek: de Q-H_{man} relatie, zoals die is vastgesteld voor de grotere pompen in een testopstelling in de fabriek, waarbij verschillende nauwkeurigheidsklassen worden onderscheiden;
- gemaalkarakteristiek: de Q-H_{stat}-relatie opgesteld door berekening van H_w of door een calibratie na het voltooien van de bouw van het gemaal.

Voor het bepalen van het debiet dat een pompgemaal opbrengt, zijn er de volgende mogelijkheden:

- gebruikmaken van de capaciteit Q en de daarbij behorende opvoerhoogte zoals vermeld op het typeplaatje van de pomp, of van catalogusgegevens van de pompleverancier. De betrouwbaarheid van deze informatie kan laag zijn, waardoor deze methode wordt ontraden. Dit is vooral het geval als de capaciteit wordt vermeld zonder een bijbehorende opvoerhoogte en de waterstanden in de praktijk nogal wisselen. Door slijtage neemt de capaciteit in de tijd af;

- gebruikmaken van de pompkarakteristiek: de Q-H_{man}-relatie, waarbij H_{man} wordt gemeten op exact dezelfde posities als waarop dat in de testopstelling is gebeurd. Deze methode is zeer betrouwbaar, mits aan de volgende twee voorwaarden wordt voldaan:
  - voldoende lengte rechte leiding (meestal uitgedrukt in een aantal malen de leidingdiameter) vóór de manometer in de zuigleiding en achter de manometer in de persleiding,
  - de pomp moet in goede conditie zijn.

De ISO-standaard 2548 wordt als norm gehanteerd voor het testen van waaierpompen. Als gevolg van vermeende problemen met de praktische uitvoerbaarheid wordt deze methode in slechts weinig gevallen toegepast. Het meten van het opgenomen motorvermogen kan een goed alternatief zijn, mits de curve niet te vlak loopt, zoals vaak bij half-axiaalpompen het geval is.

- gebruikmaken van de pompkarakteristiek: de Q-H_{man}-relatie, waarbij echter niet H_{man} wordt gemeten, maar om praktische redenen Hstat wordt gemeten en ingevoerd in de Q-H_{man}-relatie. Omdat bij deze methode Hw wordt genegeerd, is ze principieel onjuist: ze leidt tot een systematische overschatting van het debiet. Deze fout is groter naarmate de waarde van het quotiënt H_w/H_{man} toeneemt. Bovendien geldt als voorwaarde, dat elke pomp zijn eigen zuig- en persleiding heeft: bij meerdere pompen op één leiding mogen de capaciteiten niet worden opgeteld;

- vaststellen van de gemaalkarakteristiek: de Q-H_{stat}-relatie, door berekening van het geheel aan verliezen H_w, waarbij de verliescoëfficiënten worden ontleend aan handboeken voor gesloten leidingen. De nauwkeurigheid hiervan kan om de volgende redenen tegenvallen:
  - onnauwkeurigheid in de grootte van de verliescoëfficiënten voor elk der weerstanden,
  - onzekerheid over de onderlinge beïnvloeding van de afzonderlijke weerstanden,
  - voor waarden H_w / H_{man} kleiner dan 0,2 kan deze methode tot een redelijk betrouwbare gemaalkarakteristiek leiden, mits de pomp(en) nog in goede conditie is (zijn);
- vaststellen van de gemaalkarakteristiek: de Q-H_{stat}-relatie, door calibratie in situ, met behulp van één der incidentele debietmeetmethoden (de velocity-area methode of de mobiele akoestische methode, zie par. 5.5). De nauwkeurigheid van de op deze wijze vastgestelde gemaalkarakteristiek wordt direct bepaald door de nauwkeurigheid van de ijking, die zeer zorgvuldig moet worden uitgevoerd. Belangrijke aandachtspunten hierbij

zijn de keuze van de meetraai en het constant zijn van de beide waterstanden gedurende de ijking, en de (registratie van de) toerentallen van de pompen. Als de Q-H_{stat}-relatie eenmaal is bepaald, verdient het aanbeveling deze bijvoorbeeld éénmaal per vijf jaar te herijken, om de gevolgen van slijtage, breuk, aangroei en vervuiling bij te houden. Het negeren van ouderdomsverschijnselen van gemalen leidt eveneens tot een systematische overschatting van het debiet;

- het continu meten van het debiet in de persleiding(en) met één van de vele debietmeetmethoden voor gesloten leidingen, waarvan de volgende twee veel toepassing vinden:
  - elektromagnetische doorstroommeters op de persleiding,
  - ultrasonore doorstroommeters, mits ingesloten luchtbellen en zwevend sediment de signalen niet verstoren. Het principe, de looptijdverschilmethode is identiek aan dat van de akoestische methode, zie par. 7.3.2. Als er wel veel deeltjes of luchtbellen in het water aanwezig zijn, kan een meting volgens het Doppler-principe een goede oplossing bieden, zie par. 7.3.3.

Bij beide methoden is een voldoend lange rechte aanstroming nodig. Deze methoden zijn vooral aantrekkelijk als meerdere pompen op één gezamenlijke persleiding zijn aangesloten;

- het continu meten van het debiet in één van de aangrenzende (kanaal)panden. De meest in aanmerking komende methoden zijn:
  - een meetstuw of een meetgoot (par. 7.1 en 7.2),
  - een akoestisch debietmeetstation (par. 7.3).

Deze laatste methode verdient vooral aanbeveling, als het uitslaan van water behalve met pompen ook via spuikokers onder vrij verval plaatsvindt (getijdegebied), of wanneer via het gemaal nu eens wordt uitgeslagen en dan weer wordt ingelaten. Zowel voor meetstuwen als ook voor een akoestisch debietmeetstation zal het ontwerp aan alle - soms nauw luisterende - randvoorwaarden moeten voldoen.

De keuze van de meest geëigende methode komt tot stand na een zorgvuldige afweging van de randvoorwaarden uit het veld, de opbouw van het gemaal en de nauwkeurigheidseisen. Voor de gangbare poldergemalen heeft een in-situ calibratie de voorkeur.

GARANTIEMETINGEN

Garantiemetingen worden uitgevoerd in het kader van de controle van de pompgarantie-gegevens na afronding van de nieuwbouw van een gemaal. De meetresultaten worden dus vergeleken met de door de pompleverancier afgegeven pompgarantie. Doorgaans worden hierbij propellermolens gebruikt opgesteld volgens een matrix over het dwarsprofiel (velocity-area methode). Toerental en opvoerhoogte kunnen worden gevarieerd, maar moeten tijdens de meting wel constant gehouden worden. Belangrijk voor de meting is:

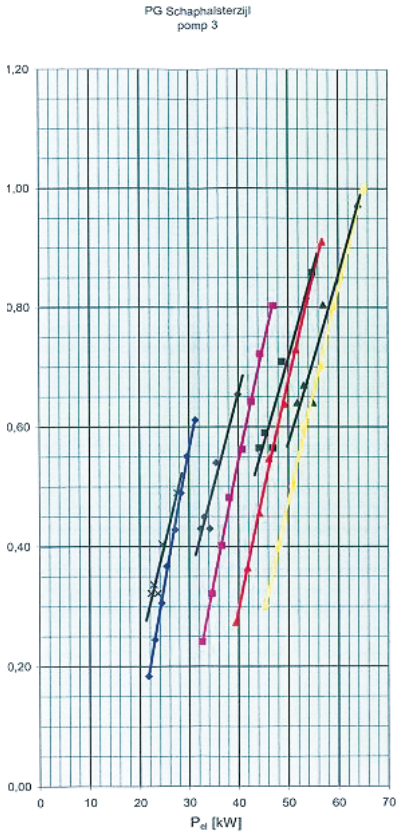
- Voldoende rechte aanstroomlengte voor de meetlocatie
- Voldoende hoge stroomsnelheid
- Schone wanden en bodem (geen rommel meer van de nieuwbouw)

Meestal worden bij een garantiemeting schotten geplaatst om de gewenste opvoerhoogte te verkrijgen. Het onhandig kunstmatig verhogen van bijvoorbeeld het peil aan de uitstroomzijde van het gemaal kan de meting beïnvloeden; er kan namelijk terugstuwing optreden.

De garantiemeting is meestal gericht op de maximale ontwerpsituatie waarvoor het gemaal ontworpen is. Voor die situatie geeft de fabrikant immers nog zijn garantie af. Dit kan tevens het nadeel zijn van de meting omdat een dergelijke capaciteitsbepaling nog niets hoeft te zeggen over de dagelijkse bemalingsomstandigheden.
De garantiemeting geeft in feite aan dat de fabrieksgegevens correct zijn voor de ontwerpsituatie.

In de praktijk kan de opbrengstformule van een gemaal nog behoorlijk afwijken van de fabriekswaarde, zeker als de dagelijkse bemalingsomstandigheden sterk afwijken van de ontwerpsituatie. In dat geval is een in-situ calibratie nodig voor de dagelijkse bemalingsomstandigheden.

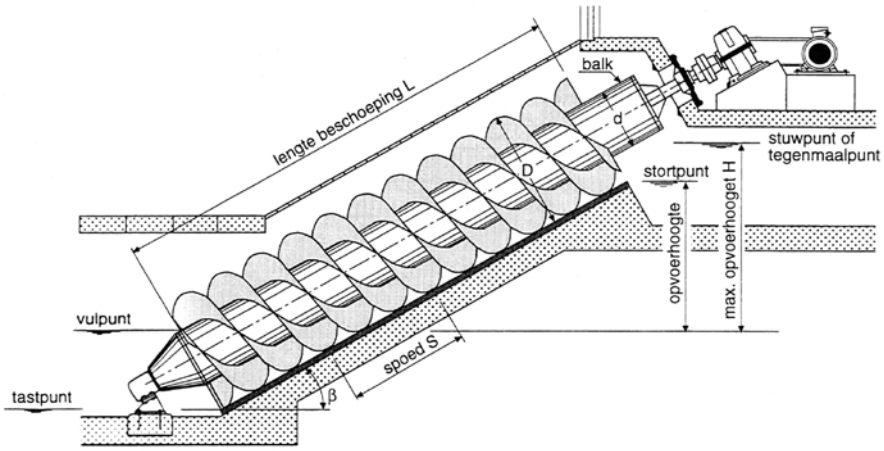
FOTO 6-29 **GEMAAL SCHAPHALSTERZIJL (BOVEN) EN STAD EN LANDE (ONDER) EN FIGUUR 6-11 GARANTIEMETING SCHAPHALSTERZIJL (FOTO EN FIGUUR: WS NOORDERZIJLVEST)**



6.6.3 VIJZELS

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, zie Figuur 6-12. De moderne vijzel is gebaseerd op de schroef van Archimedes uit de oudheid.

FIGUUR 6-12 PRINCIPESCHETS VAN DE VIJZEL (BRON: LANDUSTRIE)



Voor een vijzel worden de volgende symbolen en begrippen gedefinieerd:

d	: balkdiameter
D	: buitendiameter vijzel
β	: opstellingshoek, die kan variëren van 26° tot 40°. De meest voorkomende hoeken zijn 30°, 35° en 38°
a	: het aantal gangen van de beschoeping. Bijna altijd drie vanwege het hoge rendement
S	: spoed, de afstand tussen twee golftoppen van eenzelfde gang;
L	: totale lengte van de beschoeping
opleider	: halfcirkelvormige goot waardoor het water naar boven wordt geschroefd;
tastpunt	: laagste punt opleider en beschoeping
vulpunt	: benedenstrooms peil waarbij de vijzel zijn maximale vulling bereikt;
stortpunt	: bovenste punt opleider en beschoeping
tegenmaalpunt	: bovenstroomse peil, waarbij de vijzel zijn maximale rendement bereikt. Dit peil, ook wel stuwpunt genoemd, ligt 0,15 à 0,33D boven het stortpunt, afhankelijk van de opstellingshoek β, de parameters d/D en S/D, en het aantal gangen.

De maximale capaciteit treedt op bij een benedenwaterstand gelijk aan of boven het vulpunt en een bovenwaterstand gelijk aan of beneden het tegenmaalpunt. Het maximale rendement treedt op bij een benedenwaterstand gelijk aan het vulpunt en een bovenwaterstand gelijk aan het tegenmaalpunt. Het debiet van een vijzel wordt met de formule van Muysken bepaald:

$$Q = f \cdot q \cdot n \cdot D^3$$ *(formule van Muysken)*

met:

Q	: debiet (m^3/minuut)
q	: vijzelcoëfficiënt, theoretische inhoudsfactor (-), $q = f(\beta, d/D, S/D)$
f	: efficiëntiefactor, die aangeeft dat de werkelijke opbrengst onder gunstige omstandigheden groter is dan de theoretische (-)
n	: toerental (omw./minuut)
D	: buitendiameter vijzel (m)

De vijzelcoëfficiënt wordt vermeld in de literatuur voor hoeken $22° < \beta < 30°$ en moet worden opgevraagd bij leveranciers voor hoeken $\beta > 30°$. Ter illustratie: voor $\beta = 30°$, $d/D = 0{,}5$ en $S/D = 1{,}0$ wordt $q = 0{,}250$. Deze vijzelcoëffficiënt neemt toe bij een afnemende hoek β en bij een toename van S/D, terwijl het optimum van d/D 0,4 à 0,5 bedraagt.

De efficiëntiefactor varieert als volgt: $1{,}10 < f < 1{,}20$.

$f = 1{,}10$: geldt voor oudere of wat minder nauwkeurig gebouwde vijzels,
$f = 1{,}15$: is een algemeen aanvaarde gemiddelde waarde,
$f = 1{,}20$: wordt aangehouden voor de huidige vijzels, die maatvast/nauwkeurig zijn uitgevoerd.

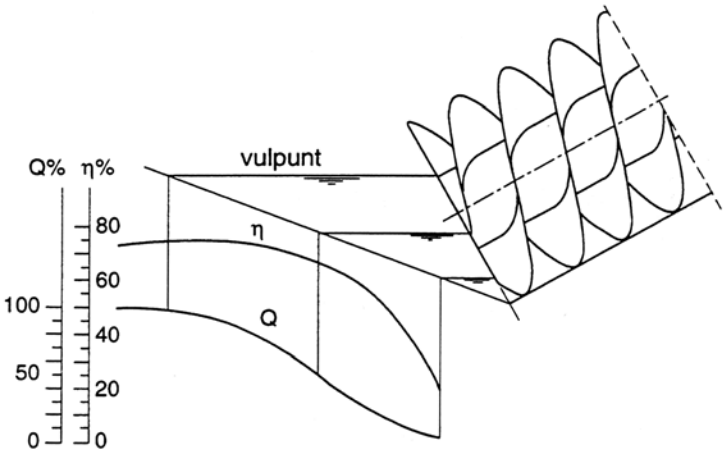
Daarnaast is deze factor in lichte mate afhankelijk van enerzijds slijtage en anderzijds aangroeiing.

Het toerental varieert globaal als volgt: $20 < n < 100$ (voordeel: weinig slijtage, geen cavitatie). Ontwerpers houden vaak aan: $n = 50/D^{2/3}$ waarbij D in meters wordt uitgedrukt.

De peilen ter weerszijden van een vijzel mogen niet te veel variëren:

- het benedenstroomse peil (zuigniveau) vlak vóór de vijzel (voorbij het krooshek) dient bij voorkeur overeen te komen met het vulpunt. Een te laag zuigniveau leidt tot een afname van het debiet, een te hoog zuigniveau is niet van invloed op het debiet maar wel in geringe mate op het rendement (η), zie Figuur 6-13,
- het bovenstroomse peil (persniveau) dient bij voorkeur overeen te komen met het tegenmaalpunt. Een lager persniveau is niet van invloed op het debiet maar leidt wel tot enig rendementsverlies. Een te hoog persniveau zal retourstroom tot gevolg hebben, waardoor zowel het rendement als het debiet afnemen.
- De maximale opvoerhoogte H is gedefinieerd als het hoogteverschil tussen het tegenmaalpunt en het vulpunt.

FIGUUR 6-13 **DEBIET VIJZEL EN RENDEMENT ALS FUNCTIE VAN HET ZUIGNIVEAU**



Om zeker te zijn van een nauwkeurige debietbepaling, worden de volgende aanbevelingen gedaan:

- meting van de waterstanden:
  - Benedenstrooms om geïnformeerd te zijn over een eventuele onderschrijding van het vulpunt.
  - Bovenstrooms ter informatie van een eventuele overschrijding van het tegenmaalpunt.
- meting en constant houden van het vijzeltoerental,
- registratie van de bedrijfstijden,
- 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. Waar dit mogelijk is, verdient het de voorkeur, om de benedenstroomse waterstand na het krooshek te meten. Overigens dienen de verliezen over een (schoon) krooshek en de terugslagklep bekend te zijn.

Ondanks de redelijke mate van betrouwbaarheid van de vijzelformule, is het uitvoeren van een controle-debietmeting na oplevering van een nieuwbouw vijzelgemaal wel noodzakelijk. (velocity-area methode of incidenteel een akoestische meetmethode). Zie ook het onderwerp “garantiemetingen” bij pompgemalen.

FOTO 6-30 VIJZELGEMAAL ABELSTOK IN AANBOUW (FOTO: WS NOORDERZIJLVEST) EN VIJZEL HALFWEG IN BEDRIJF (FOTO: WAGENINGEN UNIVERSITEIT)

6.6.4 INLAAT- EN SPUICONSTRUCTIES: VERTICALE SCHUIVEN MET ONDERSTORT

Inlaatwerken en spuisluizen - voorzien van verticale schuiven - worden in Nederland toegepast voor het oppervlaktewaterbeheer. Aantrekkelijke aspecten van verticale schuiven met onderstort zijn:

- de dubbele functie als regel- én meetkunstwerk;
- de geringe gevoeligheid voor variaties in de bovenstroomse waterstand op het debiet.

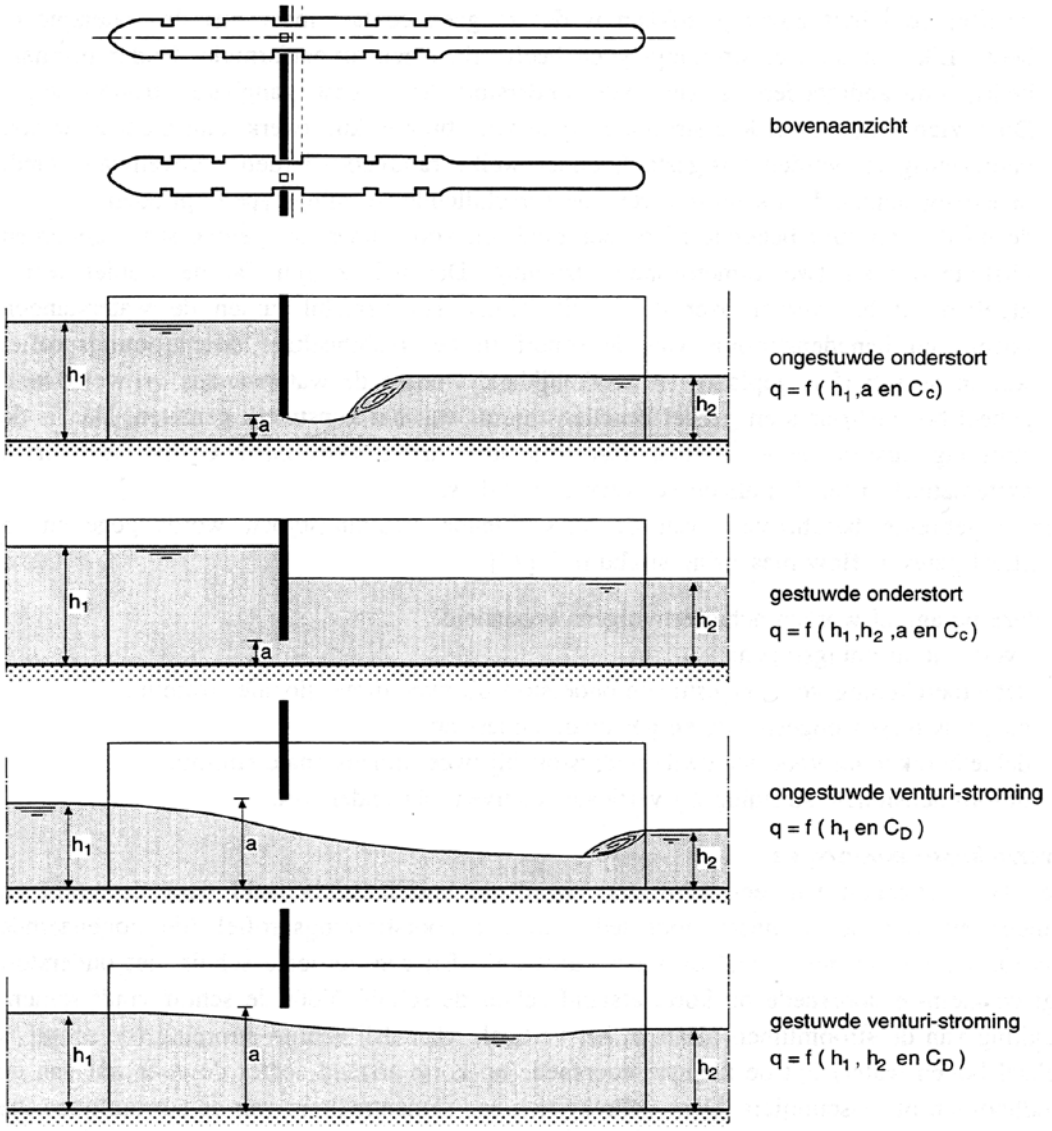
Het is in veel situaties niet eenvoudig om betrouwbare afvoerrelaties voor deze kunstwerken op te stellen om de volgende redenen:

- Er kunnen zich maximaal vier verschillende stromingstypen voordoen: ongestuwde en gestuwde onderstort via de schuif, en ongestuwde en gestuwde venturi-stroming, waarbij de schuif zover getrokken is dat ze geen contact meer met de waterspiegel heeft. Elk van de vier stromingstypen heeft zijn eigen afvoerformule. Onder normale bedrijfsomstandigheden is gestuwde onderstort het meest gangbare stromingstype. Doen zich echter meerdere stromingstypen voor bij één kunstwerk, dan dient allereerst nauwkeurig te worden vastgesteld, onder welke randvoorwaarden - bovenwaterstand, benedenwaterstand en schuifhoogte - de verschillende stromingstypen optreden.
- De uit de literatuur bekende afvoercoëfficiënten voor onderstort gelden strikt genomen uitsluitend voor tweedimensionale stroming. Dat wil zeggen dat het debiet wordt afgeleid uit het verval over de schuif, zijnde het verschil tussen de waterstanden boven- en benedenstrooms van de schuif in het rechthoekige doorstromingsprofiel waarin de schuif is geplaatst. In werkelijkheid worden de waterstanden vrijwel overal geheel bovenstrooms en geheel benedenstrooms van het kunstwerk gemeten. Dan is de stroming tussen beide waterstandsmeetpunten driedimensionaal en is het verval systematisch groter dan alleen het verval over de schuif.

In dit hoofdstuk worden achtereenvolgens behandeld:

- overzicht stromingstypen;
- debietberekening voor ongestuwde onderstort bij tweedimensionale stroming;
- de grens tussen ongestuwde en gestuwde onderstort;
- debietberekening voor gestuwde onderstort bij twee-dimensionale stroming;
- driedimensionale stroming bij verticale schuiven met onderstort.

FIGUUR 6-14 VERSCHILLENDE STROMINGSTYPEN BIJ VERTICALE SCHUIFCONSTRUCTIES



OVERZICHT STROMINGSTYPEN

De afvoercapaciteit van een kunstwerk wordt in hoofdzaak bepaald door de vorm en afmetingen van de kleinste doorsnede in het doorstromingsprofiel (de zogenaamde control section) en het verval over het kunstwerk. Bij een verticale schuif met onderstort ligt de kleinste doorsnede op korte afstand achter de schuif. Vóór de schuif vindt samentrekking van de stroomlijnen plaats in het verticale vlak. Bij venturi-stroming (de schuif is geheel boven water) ligt de kleinste doorsnede op korte afstand achter de voorkant van de landhoofden of tussenpijlers. Daar voltrekt zich een samentrekking van de stroomlijnen die overheersend is in het horizontale vlak.

Afhankelijk van de relatie tussen de drie reeds genoemde parameters - de waterdiepte bovenstrooms (h_1), de waterdiepte benedenstrooms (h_2) en de schuifhoogte (a) - kunnen zich nu de vier stromingstypen voordoen zoals aangegeven in Figuur 6-14.

Hierin zijn:
q : het debiet per strekkende meter breedten (m^2/s),
C_C : contractiecoëfficiënt van de schuif (-)
C_D : afvoercoëfficiënt van een venturi-kanaal (-)
h_1, h_2 en a worden gemeten ten opzichte van de aanslag van de schuif op de bodem. In veel gevallen is dit de bodem zelf, maar in enkele gevallen is een drempel van meestal niet meer dan enkele cm's op de bodem aangebracht. In die gevallen worden de genoemde parameters gemeten ten opzichte van de bovenkant van de drempel.

DEBIETBEREKENING VOOR ONGESTUWDE ONDERSTORT BIJ TWEE-DIMENSIONALE STROMING

De afvoerformule luidt:

$$Q = a \cdot b \cdot C_D \cdot \sqrt{2g \cdot h_1}$$

met:

Q	: afvoer (m^3/s)
a	: schuifhoogte ten opzichte van de aanslag (m)
b	: breedte tussen de pijlers (m)
C_D	: afvoercoëfficiënt (-)
g	: versnelling van de zwaartekracht (=9,81 m/s^2)
h_1	: waterdiepte bovenstrooms ten opzichte van de aanslag (m)

De afvoercoëfficiënt is als volgt gedefinieerd:

$$C_D = C_C / \sqrt{1 + C_C \cdot (a/h_1)}$$

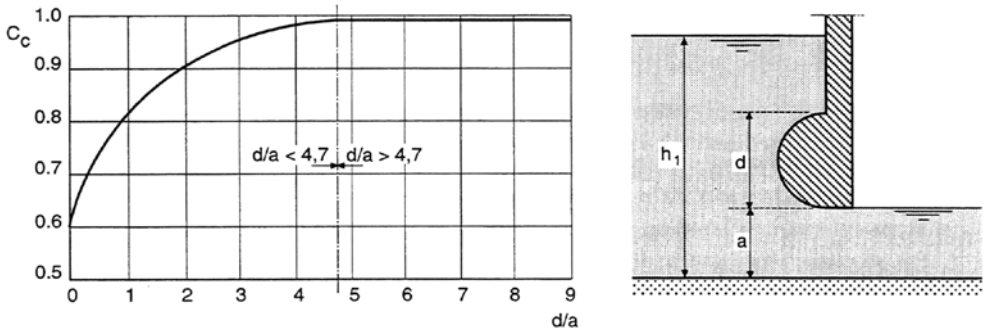
met C_C = contractiecoëfficiënt voor de stroming onder de schuif. De grootte hiervan wordt primair bepaald door de vorm van de onderkant van de schuif (de mate van afronding). Uit onderzoek, uitgevoerd in het hydraulica laboratorium van de Landbouwuniversiteit te Wageningen is de volgende betrekking gevonden:

$$C_C = 0{,}510 + 0{,}1 \cdot \sqrt{(23{,}04 - (d/a - 4{,}69)^2)} \quad \text{voor } d/a < 4{,}7$$

$$C_C = 0{,}990 \quad \text{voor } d/a \geq 4{,}7$$

met d = diameter van de afronding aan de voor-/onderkant van de schuif. Figuur 6-15 geeft deze betrekking, waarin voor een geheel scherpe onderkant (d/a=0), C_C = 0,611 wordt.

FIGUUR 6-15 **DE CONTRACTIECOËFFICIËNT CC ALS FUNCTIE VAN D/A**



DE GRENS TUSSEN ONGESTUWDE EN GESTUWDE ONDERSTORT

Ongestuwde afvoer gaat over in gestuwde afvoer (en omgekeerd) bij de vrij scherpe éénduidige zogenaamde modulaire grens, die door de volgende formule wordt aangegeven:

$$h_2/a = 0{,}5 \cdot C_C \left\{ \sqrt{1 + 16\ \left(H_1/(a \cdot C_C) - 1\right)} - 1 \right\}$$

met:

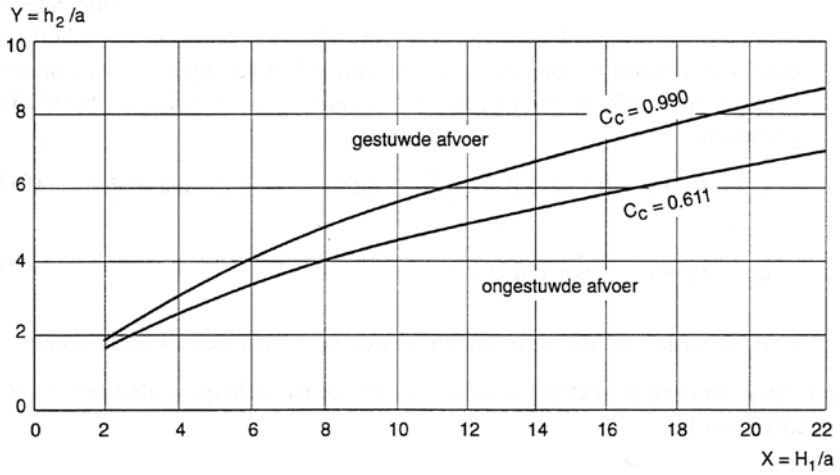
H_1 : energiehoogte bovenstrooms ($H_1 = h_1 + v_1^2/2g$) (m)
Bij niet al te hoge stroomsnelheden v_1 neemt men vaak $H_1 = h_1$.

Figuur 6-16 geeft de modulaire grens voor een scherpe rand (C_C = 0,611) en een zeer ruim afgeronde rand (C_C = 0,990). Uit de figuur blijkt, dat afgeronde randen een hogere benedenwaterstand toestaan dan scherpe randen, alvorens ongestuwde afvoer overgaat in gestuwde afvoer.

In de praktijk zijn verticale schuiven meestal slechts matig afgerond (0,01 < d < 0,10 m).
Voor het vaststellen van de modulaire grens in een praktijksituatie is het allereerst nodig de diameter d van de afronding vast te stellen. Dit kan op de volgende manieren:

- het opmeten van de afronding, als deze min of meer cirkelvormig is,
- het schatten van een d-waarde, als de afronding niet cirkelvormig is,
- het vaststellen van een C_C-waarde middels ijking in een (schaal)model.

FIGUUR 6-16 DE GRENS TUSSEN ONGESTUWDE EN GESTUWDE AFVOER BIJ TWEE-DIMENSIONALE ONDERSTORT STROMING



DEBIETBEREKENING VOOR GESTUWDE ONDERSTORT BIJ TWEE-DIMENSIONALE STROMING

In de literatuur worden diverse formules voor gestuwde afvoer gegeven, waarvan er hier slechts twee worden vermeld:

$$Q = C_1 \cdot a \cdot b \cdot \sqrt{2g \cdot (h_1 - h_2)}$$

Deze formule wordt veel toegepast als een kunstwerk is geijkt middels modelonderzoek of aan de hand van veldmetingen. De coëfficiënt C_1 is zuiver empirisch van aard en uitsluitend geldig voor de geijkte constructie, waarbij C_1 = f (h_1/a, h_2/a en C_C). De coëfficiënt C_1 herbergt bij een ijking tevens de verliezen ten gevolge van drie-dimensionale stroming.

Voor de zuiver twee-dimensionale stroming kan de volgende formule worden gebruikt:

$$Q = a \cdot b \cdot C_D \cdot C_{dr} \sqrt{2g \cdot h_1}$$

met:

C_D : afvoercoëfficiënt (-), dezelfde als in formule voor ongestuwde onderstort bij twee-dimensionale stroming

C_{dr} : coëfficiënt voor gestuwde afvoer (-).C_{dr} = f (h_1/a, h_2/a en C_C)

De coëfficiënt C_{dr} kan worden berekend met de volgende formule:

$$C_{dr} = \sqrt{\frac{1 - \frac{2\alpha}{(1-\alpha^2)} \cdot (1-\beta) - \sqrt{\left(\frac{2\alpha}{(1-\alpha^2)} \cdot (1-\beta) - 1\right)^2 - 1 + \frac{\alpha^2}{\beta^2}}}{1-\alpha}}$$

met:

$\alpha = (a \times C_C)/h_1$

$\beta = (a \times C_C)/h_2$

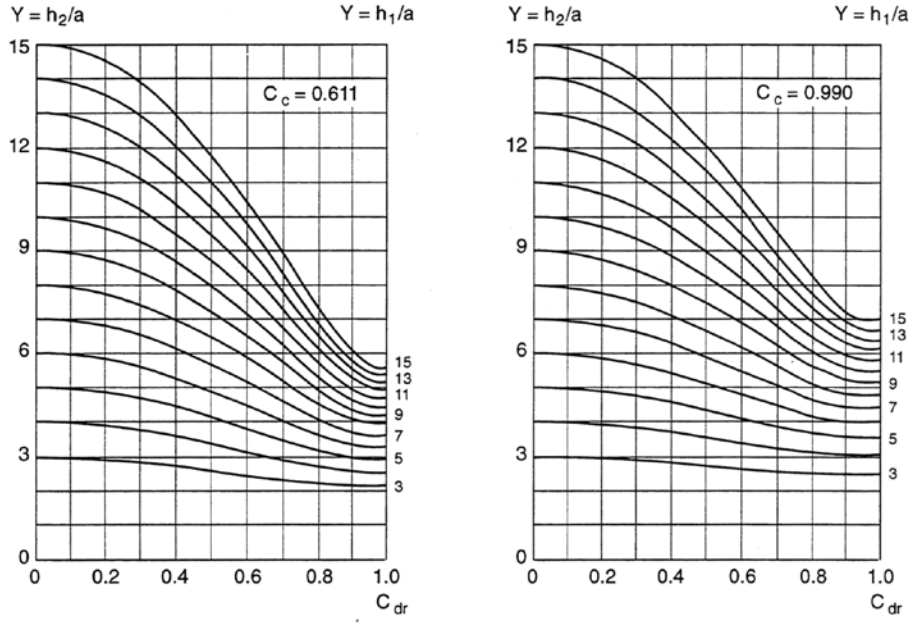
Figuur 6-17 toont C_{dr} -waarden voor schuiven met een scherpe rand (C_C = 0,611) en die met een ruim afgeronde rand (C_C = 0,990).

Vooralsnog is de betrouwbaarheid van de formule slechts redelijk goed voor relatief kleine hefhoogten a (h_1/a > 5). Daarnaast is toepassing ervan niet goed mogelijk als de vorm van de onderkant van de schuif niet duidelijk is beschreven.

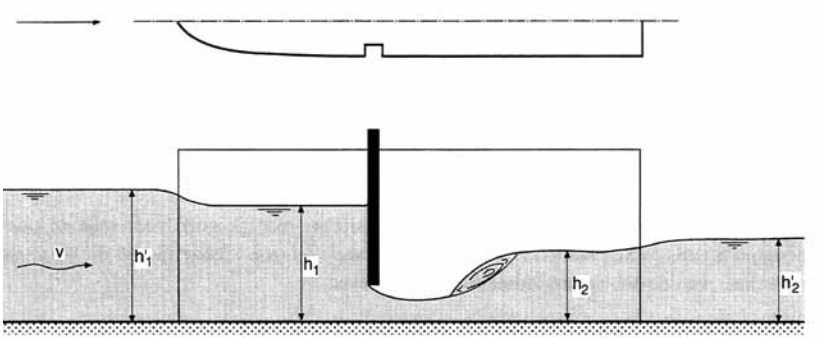
DRIE-DIMENSIONALE STROMING BIJ VERTICALE SCHUIVEN MET ONDERSTORT

Verticale schuiven bevinden zich doorgaans in rechthoekige doorstromingsprofielen, die - als er meerdere zijn - van elkaar worden gescheiden door tussenpijlers. Meestal is de totale lengte van de rechthoekige profielen te gering om zowel boven- als benedenstrooms van de schuiven twee-dimensionale stroming te mogen verwachten. Als gevolg hiervan worden de beide waterstanden dan gemeten op locaties geheel bovenstrooms en benedenstrooms van het kunstwerk. Figuur 6-18 geeft een beeld van de samenstelling van het totaal verval h_1'- h_2' over het kunstwerk.

FIGUUR 6-17 DE COËFFICIËNT CDR VOOR GESTUWDE AFVOER BIJ ONDERSTORT STROMING



FIGUUR 6-18 VERVAL OVER EEN INLAATCONSTRUCTIE VOOR DRIE-DIMENSIONALE STROMING



Het totale verval over de inlaatconstructie kan als volgt worden uitgedrukt:

$$h_1' - h_2' = (h_1' - h_1) + (h_1 - h_2) + (h_2 - h_2')$$

De deelverliezen zijn als volgt:

- de intreeverliezen:

$$h_1' - h_1 = (1 + \xi_i) \cdot \frac{v_1^2}{2g} - \frac{v_1'^2}{2g}$$ ξ_i is de intreeverliescoëfficiënt.

- de verliezen over de schuif: h_1 - h_2 voor twee-dimensionale stroming
- de uittreeverliezen:

$$h_2 - h_2' = \frac{v_2'^2}{2g} + (\xi_u - 1) \cdot \frac{v_2^2}{2g}$$ ξ_u is de uittreeverliescoëfficiënt

De coëfficiënten ξ_i en ξ_u kunnen worden ontleend aan de literatuur.
In de formule zijn geen wrijvingsverliezen opgenomen, ervan uitgaande dat de rechthoekige profielsecties voor en achter de schuif relatief kort en glad zijn.

Theoretisch kan langs deze weg de afvoerrelatie voor de gehele inlaat/spuisluis worden berekend. Niettemin zal de berekende relatie vanwege de volgende onzekerheden kunnen afwijken van de werkelijke relatie:

- fouten in de geschatte waarden van ξ_i en ξ_u
- overlap tussen de diverse deelverliezen: intree-, schuif en uittreeverliezen.

De totale fout in de debietbepaling wordt geschat op maximaal 10 à 20 % voor spuisluizen waarin de intree- en uittreeverliezen een duidelijke rol spelen. In veel gevallen zijn deze verliezen slechts marginaal en wordt de fout geschat op 5 à 10 %. IJking van de constructie in het veld of met behulp van een modelonderzoek leidt tot een lagere totale fout (respectievelijk circa 10 % en 5 %).

Ter wille van een betrouwbare debietmeting bij verticale schuiven met onderstort verdient het aanbeveling de volgende regels in acht te nemen:
- de schuiven dienen niet verder te worden getrokken dan a = 0,5 h_1 ter voorkoming van wervels voor de schuif die de doorstroom beïnvloeden,
- bij meerdere parallel gesitueerde schuiven zullen de schuiven bij voorkeur even ver worden getrokken (gelijkmatige snelheidsverdeling over de volle breedte en een eenvoudige afvoerberekening).

FOTO 6-31 **CONEYSCHUIF OOSTERDIJKSHORNERVERLAAT (FOTO: WS NOORDERZIJLVEST)**

6.6.5 DUIKERS

Duikers zijn ronde, rechthoekige of ovaalvormige gesloten leidingen, waarmee water onder een weg of een dam door wordt getransporteerd van de ene waterloop naar de andere, bij voorkeur onder minimaal verval. In dit hoofdstuk worden duikers behandeld, waarin geen afsluiters en terugslagkleppen zijn aangebracht, zie paragraaf 6.6.6. Meestal worden duikers zo ontworpen, dat het verval over de constructie bij maximale afvoer beperkt blijft tot één of enkele centimeters. Dit houdt tevens in, dat het verval over de duiker bij lage afvoeren slechts enkele millimeters of centimeters zal bedragen. Het meten van een debiet door duikers zonder obstructies is daarom slechts - en dan nog steeds globaal - mogelijk voor uitzonderlijke topafvoeren.

In dit hoofdstuk wordt het meten van debieten in geheel gevulde duikers behandeld, waarbij het verval Δh over de duiker een maat is voor het debiet. De helling van de duiker is dan niet van belang. Aan het eind van dit hoofdstuk worden nog een aantal alternatieve technieken genoemd, die in sommige gevallen ook bruikbaar zijn voor niet geheel gevulde leidingen.

Bij stroming door duikers is er een verschil in waterstand tussen de panden bovenstrooms en benedenstrooms. Het niveauverschil Δh is een maat voor het passerende debiet Q. Het niveauverschil is opgebouwd uit een aantal deelverliezen, die dikwijls worden uitgedrukt in termen van $v^2/2g$, waarbij v de gemiddelde snelheid is in de volledig gevulde duiker. De volgende verliezen kunnen zich voordoen:

- intreeverliezen (vernauwing gevolgd door verwijding),
- wrijvingsverliezen (ten gevolge van de wandruwheid),
- uittreeverliezen (plotselinge verwijding).

Deze drie verliezen spelen in elke duiker een rol en zijn goed te berekenen.

INTREEVERLIEZEN

$$\Delta h_i = \xi_i \cdot \frac{\bar{v}^2}{2g} \quad \text{met} \quad \xi_i = \left(\frac{1}{\mu} - 1\right)^2$$

Zowel de contractiecoëfficiënt μ_i als de verliescoëfficiënt ξ_i zijn voor diverse vormen van intree uit de literatuur bekend. Zo gelden bijvoorbeeld voor een ronde duiker - niet vooruitstekend, maar vlak met de wand - de volgende waarden: μ_i = 0,59 of ξ_i = 0,48.

WRIJVINGSVERLIEZEN

Ervan uitgaande dat de stroming turbulent is, geldt de zogenaamde buizenformule van Darcy-Weisbach:

$$\Delta h_{wr} = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\bar{v}^2}{2g}$$

met:

λ	: wrijvingscoëfficiënt, afhankelijk van R/k en Re (-)
L	: lengte van een ronde leiding (m)
D	: diameter van een ronde leiding (m)
R	: hydraulische straal (voor ronde buizen is $R = D/4$)
k	: wandruwheid van de leiding (m), deze is afhankelijk van het leidingmateriaal en de geaardheid daarvan. Waarden van k worden in tal van publicaties en handboeken gegeven.
Re	: getal van Reynolds: $Re = v \times R/\nu$ (-)
ν	: kinematische viscositeit (voor t = 10 °C wordt $\nu = 1{,}3\times10^{-6}$ m²/s)

De wrijvingscoëfficiënt λ als functie van Re en R/k wordt eveneens in veel handboeken gepresenteerd. Men schrijft ook wel:

$$\xi_{wr} = \lambda \cdot \frac{L}{D} \quad \text{en dus} \quad \Delta h_{wr} = \xi_{wr} \cdot \frac{\bar{v}^2}{2g}$$

UITTREEVERLIEZEN

De uittreezijde van een duiker is een bijzonder geval van plotselinge verwijding. In de meeste gevallen is de stroomsnelheid in het ontvangende pand verwaarloosbaar klein. Dan geldt:

$$\Delta h_u = \xi_u \cdot \frac{\bar{v}^2}{2g} \quad \text{waarbij} \quad \xi_u = 1$$

Algemeen geldt $\xi_u = (\alpha - 1)^2$ met $\alpha = A_c / A_b$,
A_c = doorstroomoppervlak in constructie (m^2)
A_b = doorstroomoppervlak benedenstrooms (m^2)

BEREKENING VAN DE AFVOERRELATIE DOOR DUIKERS

De afvoer door een geheel gevulde duiker kan worden bepaald uit het niveauverschil tussen het bovenstroomse en het benedenstroomse peil:

$$Q = m \cdot A \cdot \sqrt{2g \cdot \Delta h_{tot}}$$

met:

Q	: debiet (m^3/s)
m	: afvoercoëfficiënt van de duiker (-)
A	: oppervlakte dwarsprofiel van de duiker (m^2)
g	: versnelling van de zwaartekracht (= 9,81 m/s^2)
Δh_{tot}	: verval over de duiker (m)

De afvoercoëfficiënt m wordt gedefinieerd als:

$$m = \frac{1}{\sqrt{\xi_{tot}}}$$

waarin ξ_{tot} de som is van alle verliescoëfficiënten van de duiker:

$$\xi_{tot} = \xi_i + \xi_{wr} + \xi_u$$

Als de oorzaken van verschillende verliezen elkaar deels overlappen - hetgeen bij korte duikers vrijwel altijd het geval is - zal ξ_{tot} enigszins worden overschat. Zo worden wrijvingsverliezen - vaak ten onrechte - doorgeteld ter plaatse van plotselinge vernauwingen/verwijdingen. Als twee of meer verliezen met een substantiële bijdrage in ξ_{tot} elkaar duidelijk overlappen, kan het aanbeveling verdienen, zo'n duiker voor een aantal debieten te ijken.

Gezien de doorgaans royale dimensionering van duikers zijn deze met betrekking tot het meten van debieten uitsluitend geschikt voor het bepalen van topafvoeren.

Alternatieve technieken voor het meten van debieten door duikers zijn de volgende, zie Tabel 6-13:

- installatie van een meetgoot in de duiker;
- installatie van een ADM, ADCP of EMS in een duiker;
- installatie van een meetstuw aan het begin of het eind van de duiker, uitsluitend geschikt voor het meten van lage afvoeren;
- de einddiepte methode, waarbij het debiet wordt bepaald uit de waterdiepte exact aan het einde van de duiker;
- snelheidsmeting met een propeller of een elektromagnetische snelheidsmeter, uitsluitend geschikt voor kortdurende meetcampagnes;
- calibratie van de duiker in het veld of met behulp van een hydraulisch model.

TABEL 6-13 OVERZICHT ALTERNATIEVE TECHNIEKEN VOOR DEBIETMETINGEN IN DUIKERS

techniek	horizontale ligging	mate van vulling	afvoertype
Palmer Bowlus flume	ja	gedeeltelijk	vrij
meetstuw	ja	gedeeltelijk	vrij
einddiepte methode	ja	gedeeltelijk	vrij
snelheidsmeting	-	geheel	gestuwd
calibratie	-	beide	beide

FOTO 6-32 DEBIETMETING DUIKER BEVERMEER (FOTO:WS RIJN EN IJSSEL)

6.6.6 AFSLUITERS

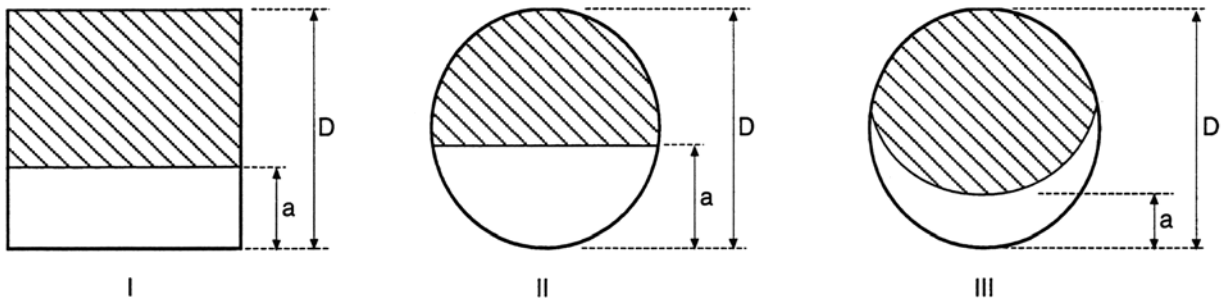
Afsluiters worden veel toegepast in het regionale waterbeheer voor het aanvoeren en afvoeren van waterhoeveelheden van de ene waterloop naar de andere. In een aantal gevallen heeft de afsluiter daarbij niet alleen een regelfunctie, maar wordt aan de afsluiter ook een meetfunctie toegekend. De afsluiter maakt vrijwel altijd deel uit van een duikersysteem. Voorwaarde voor een goede aan- en afvoerbepaling is, dat een relatief kort stuk gesloten leiding (10 à 15 maal de diameter) bovenstrooms van de afsluiter, geheel gevuld is. Bij stroming via afsluiters kan zowel ongestuwde als gestuwde afvoer voorkomen.

VERLIEZEN OVER DE AFZONDERLIJKE AFSLUITER

Een gedeeltelijk geopende afsluiter veroorzaakt een plotselinge vernauwing onmiddellijk gevolgd door een verwijding. Een afsluiter kan worden geplaatst aan het begin van een duiker, ergens halverwege of aan het eind ervan.
Naar de vorm van de duiker en de onderkant van de afsluiter kunnen de volgende, in Nederland meest voorkomende, combinaties worden onderscheiden, zie Figuur 6-19:

- rechthoekige leiding met rechthoekige afsluiter (I),
- ronde leiding met rechthoekige afsluiter (II),
- ronde leiding met bolle afsluiter (III).

FIGUUR 6-19 VORM DUIKER EN ONDERKANT AFSLUITER



Het verlies over een afsluiter in een geheel gevulde leiding wordt uitgedrukt als:

$$\Delta h_a = \xi_1 \cdot \frac{v_1^2}{2g}$$

met:

ξ_1 : verliescoëfficiënt (-), primair afhankelijk van de hefhoogte van de afsluiter in relatie tot de doorsnede van de duiker (a/D x 100%) en secondair van de vorm/het type

v_1 : gemiddelde stroomsnelheid in de leiding bovenstrooms van de afsluiter (m/s)

g : versnelling van de zwaartekracht (= 9,81 m/s^2)

In de literatuur zijn gegevens bekend van een aantal schuifafsluiters, die echter steeds in de doorgaande pijpleiding zijn geplaatst. Voor afsluiters aan het begin of het eind van een leiding zullen de verliescoëfficiënten daarvan afwijken. Een alternatieve uitdrukking voor het verlies over een afsluiter is:

$$\Delta h_a = \xi_2 \cdot \frac{v_2^2}{2g}$$

met:

v_2 : gemiddelde stroomsnelheid in opening onder de afsluiter (m/s)

$$\xi_2 = \xi_1 \cdot \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2$$

met:

A_1 : oppervlakte leidingprofiel (m²)

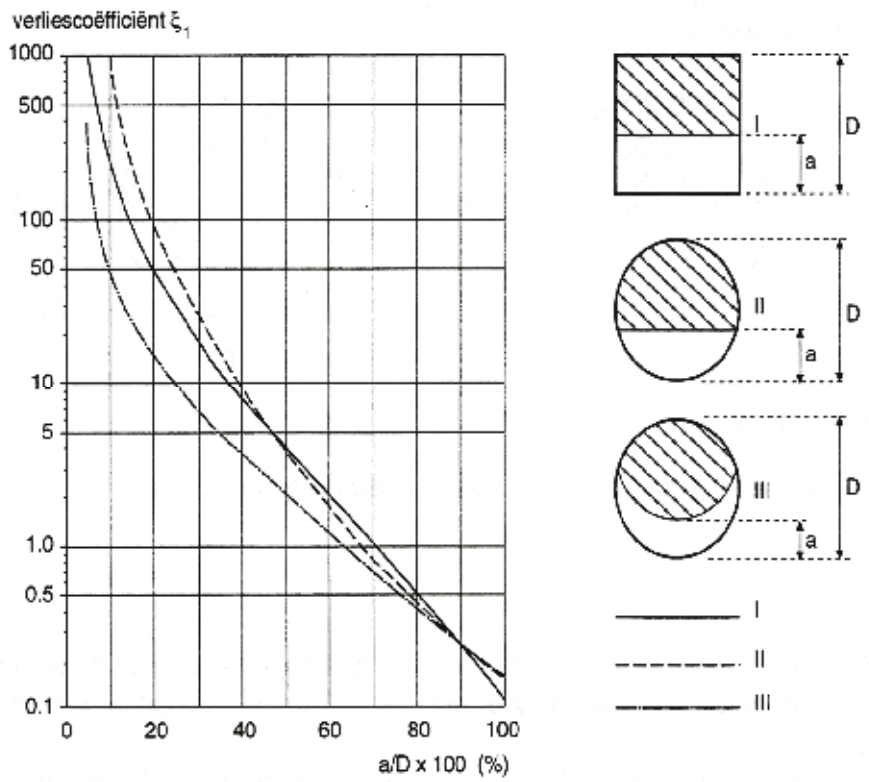
A_2 : oppervlakte opening onder afsluiter (m²)

De verliescoëfficiënt ξ_1 wordt in Figuur 6-20 voor drie typen schuifafsluiters gegeven als functie van de relatieve hefhoogte (a/D x 100%) [50]. De verliescoëfficiënten ξ_1 en ξ_2 voor afsluiters met een vlakke onderkant in een ronde leiding zijn vermeld in Tabel 6-14.

TABEL 6-14 VERLIESCOËFFICIËNTEN ξ1 EN ξ2 VOOR EEN AFSLUITER MET VLAKKE ONDERKANT IN EEN RONDE LEIDING

a/D (x 100 %)	ξ_1 (-)	A_2/A_1 (-)	ξ_2 (-)
10	794	0,0520	2,146
20	94,3	0,1424	1,912
30	25,8	0,2523	1,642
40	9,59	0,3735	1,339
50	4,00	0,5000	1,000
60	1,75	0,6265	0,688
70	0,842	0,7477	0,471
80	0,416	0,8576	0,306
90	0,238	0,9480	0,214
100	0,171	1,0000	0,171

FIGUUR 6-20 VERLIESCOËFFICIËNT ξ1 ALS FUNCTIE VAN HET OPENINGSPERCENTAGE



VERLIEZEN OVER HET DUIKERSYSTEEM WAARIN DE AFSLUITER IS GEPLAATST

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. Voor de afvoer door een volledig gevulde duiker (gestuwde afvoer) geldt:

$$Q = m \cdot A_1 \cdot \sqrt{2g \cdot \Delta h_{totaal}}$$

waarbij:

$$m = \frac{1}{\sqrt{\xi_{tot}}} \quad \text{en} \quad \xi_{\text{tot}} = \xi_{\text{i}} + \xi_{\text{wr}} + \xi_{\text{a}} + \xi_{\text{r}} + \xi_{\text{u}}$$

met:

Q	: afvoer (m^3/s)	
m	:	afvoercoëfficiënt duiker (-)
A_1	:	oppervlakte dwarsprofiel duiker (m^2)
g	:	versnelling van de zwaartekracht (= 9,81 m/s^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 extra verliezen (-)
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, waarop dan kan worden gecorrigeerd.

Met betrekking tot het dagelijks beheer van duikersystemen met afsluiters worden de volgende aanbevelingen gedaan:

- relatieve hefhoogten kleiner dan 20% en groter dan 80% moeten zoveel mogelijk worden vermeden: de kleinere vanwege hun foutgevoeligheid op de afsluiterverliezen en de grotere vanwege hun foutgevoeligheid op de andere deelverliezen. Bovendien zijn wijzigingen in het openingspercentage rondom 50% regeltechnisch het meest effectief;
- de afsluiters dienen te worden voorzien van een hulpapparaat, waarmee de hefhoogte nauwkeurig kan worden ingesteld/afgelezen. (Het tellen van de slagen van het spindelwiel is een aantoonbare foutenbron);
- voor afsluiters, die aan het begin of aan het einde van een leiding zijn geplaatst, en voor afsluiters met een afwijkende vormgeving gelden andere verliescoëfficiënten dan vermeld in Figuur 6-20. In dergelijke gevallen wordt calibratie aanbevolen.

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

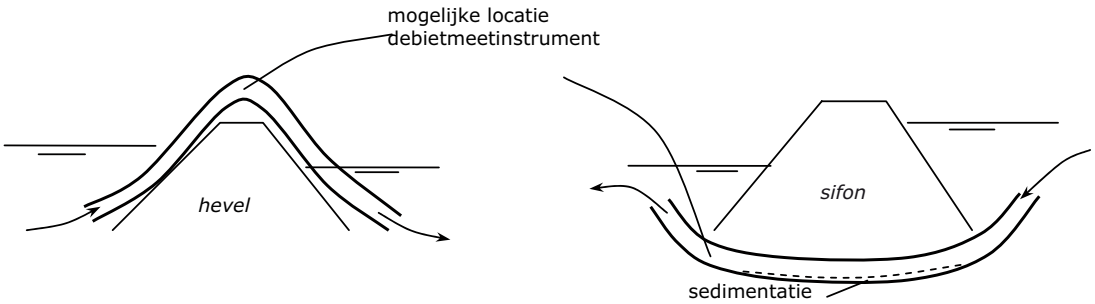
- de nauwkeurigheid waarmee de waterstanden bovenstrooms en benedenstrooms van het duikersysteem worden gemeten;
- de nauwkeurigheid van de verliescoëfficiënt/afvoercoëfficiënt van de afsluiter/duiker. Globaal geldt: r_m-gestuwd = 10 %, r_m-ongestuwd = 5 à 10 %;
- de betrouwbaarheid waarmee de overige deelverliezen van het duikersysteem kunnen worden vastgesteld.

6.6.7 HEVELS EN SIFONS

Een hevel is een gesloten leiding, die 'bovenover' water afvoert van een waterloop met hoge waterstand naar een waterloop met lage waterstand. De afvoer moet opgang gebracht worden. In de leiding ontstaat tijdens het stromen een onderdruk (potentiële energie wordt omgezet in kinetische energie) die het mogelijk maakt water van hoog naar laag af te voeren. Als de hevel eenmaal werkt, blijft het water stromen zonder toevoeging van (mechanische) energie totdat het verval nul is. In de hevel treedt wrijvingsverlies op en er zijn in- en uitstroomverliezen.

Een sifon is een gesloten leiding die 'onderdoor' water afvoert van een waterloop met hoge waterstand naar een waterloop met lage waterstand. De afvoer komt op gang als er een waterstandsverschil is tussen beide waterlopen, het water stroomt dan van hoog naar laag. Er kan ook een pomp in een sifon zijn geplaatst. In het laagste punt van de sifon kan zich sediment neerzetten (uitzakken sediment na gebruik) na hetgeen de doorstroming van kan water belemmeren.

FIGUUR 6-21 SCHETS VAN EEN HEVEL EN EEN SIFON



In de hevel en de sifon treedt wrijvingsverlies op en er zijn in- en uitstroomverliezen en verliezen rond afsluiters in de leiding. In principe is de afvoer via de hevel of sifon te berekenen met een afvoerformule voor een gesloten leiding en rekening houdend met de intree- en uittreeverliezen, zie paragraaf 6.6.5. De waterstanden aan beide zijden van de hevel of sifon moeten worden geregistreerd en de afvoerrelatie moet worden geijkt. De afvoer door de leiding kan worden gemeten met een elektromagnetische doorstroommeter of een ultrasonore doorstroommeter. Opgepast moet worden voor lucht die zich kan ophopen bovenin de hevel, ontluchten van de hevel op het hoogste punt wordt aanbevolen.

Hevels en sifons zijn niet zondermeer geschikt voor het nauwkeurig afleiden van het debiet, maar kunnen wel worden gebruikt om een indruk van de afvoer te verkrijgen. Met het plaatsen van doorstroommeters kan de afvoer via hevel of sifon uiteraard wel nauwkeurig worden bepaald. In hydraulica handboeken kunnen de betreffende afvoerformules worden gevonden.

7

MEETINSTRUMENTEN

Het afleiden van het debiet uit gemeten grootheden gebeurt met meetinstrumenten waarmee de stroomsnelheid of het verval in een waterloop wordt gemeten. In dit hoofdstuk zijn meetinstrumenten beschreven die in Nederland worden gebruikt. De meetinstrumenten zijn onder te verdelen in:

- Meetstuwen (par. 7.1)
- Meetgoten (par. 7.2)
- Stroomsnelheidsmeters (par. 7.3)
- Waterstandsmeters (par. 7.4)
- Diepte- en positiemeters (par. 7.5).

Dit hoofdstuk dient als achtergrondinformatie. Beschreven wordt het meetprincipe en de debietformules. Voor de toepassing van de meetinstrumenten zie par. 5 en 6.

7.1 VERVALMETINGEN MEETSTUWEN

7.1.1 MEETPRINCIPE

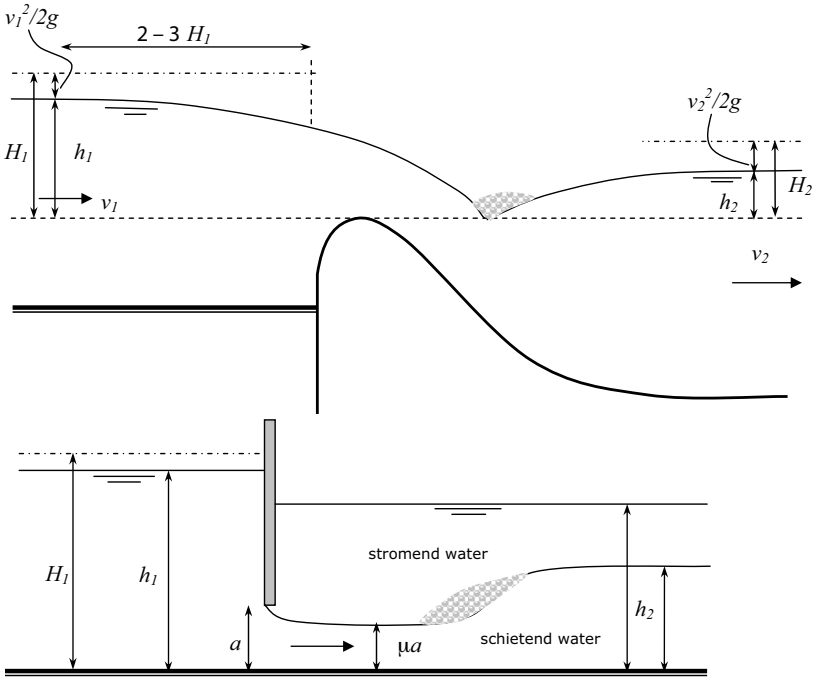
Bij het ontwerp van een meetstuw wordt het dwarsprofiel van de waterloop plaatselijk versmald in de breedte en/of de diepte. De afmetingen van het dwarsprofiel zijn nauwkeurig bekend. De afvoer die via een stuw of schuif passeert, is te berekenen met de vergelijking van de totale energiehoogte van het water (plaatshoogte, drukhoogte en snelheidshoogte). Het grootste gedeelte van de energiehoogte H_1 op korte afstand vóór de stuw wordt omgezet in kinetische energie ter verkrijging van kritische stroming boven de kruin, zie Figuur 7-1. Het restant aan energiehoogte is opgegaan aan wrijvingsverliezen en aanstromingsverliezen. Voor meetstuwen kan een afvoerrelatie worden opgesteld met de algemene vorm:

$$Q = C \cdot H_1^n \quad \text{of} \quad Q = C \cdot \left(h_1 + \frac{v_1^2}{2g} \right)^n$$

met:

Q	: debiet [m³/s]
C	: afvoercoëfficiënt [m^{3-n}/s]
H_1	: energiehoogte in de h_1-meetraai op korte afstand voor de stuw [m] H_1 is h_1 vermeerderd met de snelheidshoogte $v_1^2 / 2g$
h_1	: overstorthoogte [m]
v_1	: gemiddelde stroomsnelheid in de h_1-meetraai [m/s]
g	: versnelling van de zwaartekracht [(9,81 m/s²]
n	: macht [-], in de praktijk $0{,}5 < n < 2{,}5$.

FIGUUR 7-1 PRINCIPE STROMING OVER EEN OVERLAAT OF ONDER EEN SCHUIF



In de praktijk wordt niet de energiehoogte H_1, maar de overstorthoogte h_1 gemeten, zie Figuur 7-1. Bij zeer lage stroomsnelheden zijn deze waarden nagenoeg gelijk. Is de stroomsnelheid op de plaats waar de waterhoogte wordt gemeten echter groter dan circa 0,20 m/s (snelheidshoogte 0,002 m) dan dient de snelheidshoogte in rekening te worden gebracht in de formule. Als in de afvoerformule h_1 wordt gebruikt in plaats van H_1, dan vindt correctie plaats via een coëfficiënt $C_V = (H_1/h_1)^n$ voor de aanstroomsnelheid.

De overstorthoogte h_1 is gedefinieerd als het verschil in hoogte tussen de bovenwaterstand en de kruin van de stuw. Stroomt het water óver een stuw of door een meetgoot, dan is er sprake van overstort ('overflow'). Stroomt het water via een opening onder water, dan is er sprake van onderspuier of onderstort ('underflow').

7.1.2 ONGESTUWDE EN GESTUWD AFVOER

Het debiet door een kunstwerk wordt bepaald met een formule waarvan de algemene vorm, voor een enkelvoudig profiel van de doorstroomopening, luidt:

$$Q = C \cdot C_{dr} \cdot H_1^n$$

met:

- Q : debiet [m³/s]
- C : coëfficiënt [m^{3-n}/s] is samengesteld uit een numerieke constante, een maat voor de oppervlakte van het doorstromingsprofiel en een aantal coëfficiënten die variëren met de overstorthoogte h_1 [m]. Een van deze coëfficiënten is de karakteristieke afvoercoëfficiënt C_D.
- C_{dr} : correctiefactor bij gestuwde afvoer (-)
- H_1 : energiehoogte bovenstrooms (m)
  H_1 is h_1 vermeerderd met de snelheidshoogte $v_1^2/2g$ in de meetraai op korte afstand voor de stuw.
- n : machtscoëfficiënt [-], die een functie is van de vorm van de natte doorsnede van het doorstromingsprofiel.

TABEL 7-1 N-MACHT ALS FUNCTIE VAN HET DOORSTROMINGSPROFIEL

Vorm doorstroomopening overlaat	n-macht
rechthoekig	1,5
paraboolvormtig (ook cirkelvormig)	2,0
V-vormig	2,5
trapeziumvormig en samengesteld profiel	1,5 < n < 2,5
onderwateropeningen	0,5

Bij gestuwde afvoer speelt naast de overstorthoogte h_1 ook de benedenwaterstand h_2 (eveneens ten opzichte van de kruin) een rol. Er bestaat dan geen éénduidige relatie meer tussen de overstorthoogte en de afvoer. De invloed van de benedenwaterstand wordt aangeduid met de verdrinkingsgraad: $S = 100 \times H_2/H_1$ (%).
Hierin is H_2 de energiehoogte benedenstrooms: H_2 is h_2 vermeerderd met de snelheidshoogte $v_2^2/2g$ in een h_2-meetraai achter het sterk turbulente gebied. In de praktijk wordt de verdrinkingsgraad vaak aangeduid als $S = 100 \times h_2/h_1$, hetgeen in veel gevallen weinig zal afwijken van $S = 100 \times H_2/H_1$, maar toch in principe onjuist is.
De grens tussen ongestuwde en gestuwde afvoer wordt aangegeven door de zogenaamde kritische verdrinkingsgraad of modulaire limiet S_l. De volgende soorten afvoer zijn dan mogelijk:

- Ongestuwde afvoer (volkomen overlaat, Engels: free flow). De benedenwaterstand h_2 heeft geen invloed op de éénduidige Q-h_1 relatie. $S < S_l$ en $C_{dr} = 1$.
- Overgang van ongestuwde naar gestuwde 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. $S = S_l$ en $0{,}99 < C_{dr} < 1{,}00$.
- Gestuwde afvoer (onvolkomen overlaat of verdronken afvoer, Engels: submerged flow). De benedenwaterstand stuwt de bovenwaterstand op. De afvoerrelatie moet worden gecorrigeerd. $S > S_l$ en $C_{dr} < 0{,}99$.

De kritische verdrinkingsgraad S_l (waarvoor $C_{dr} = 0{,}99$) verschilt per type overlaat. Voor stuwen met overstort is deze aangegeven in Tabel 7-2.

TABEL 7-2 DE KRITISCHE VERDRINKINGSGRAAD S1 ALS FUNCTIE VAN HET TYPE OVERLAAT

Type overlaat	Grenswaarde
lange overlaten	S_l = 50 à 80%
scherpe overlaten	S_l = 0
korte overlaten	S_l = 30 à 50%
meetgoten (flumes)	S_l = 70 à 90%

Zodra er sprake is van gestuwde afvoer, wordt meten van bovenwaterstand èn benedenwaterstand noodzakelijk. De correctiefactor C_{dr} is een functie van de verdrinkingsgraad S:

- $S_l < S < 100\%$;
- $0{,}99 > C_{dr} > 0$

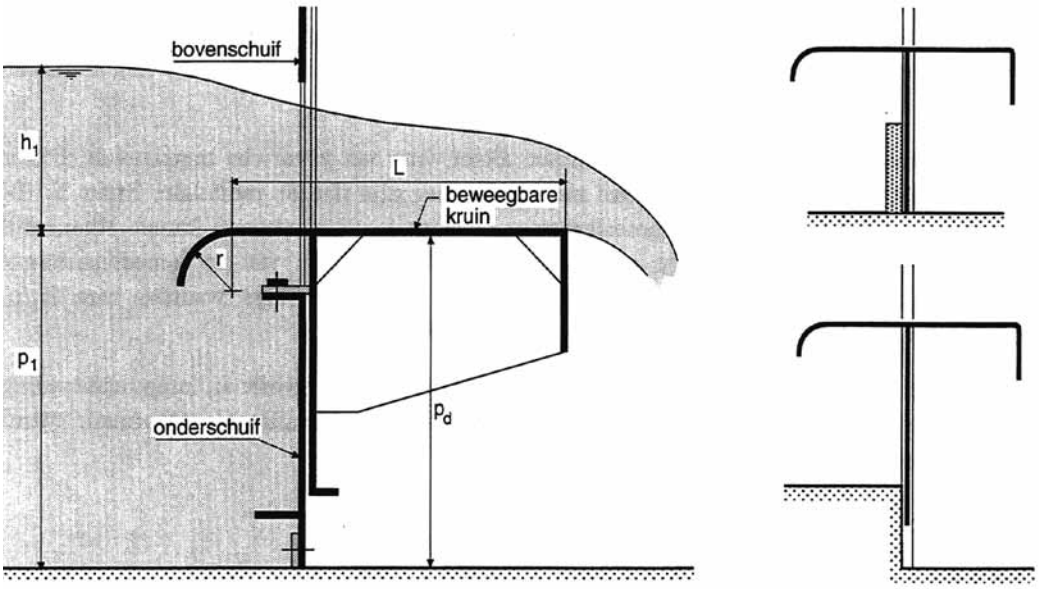
Het verband tussen C_{dr} en S kan verschillen voor de verschillende typen overlaten en is sterk afhankelijk van de vormgeving van het kunstwerk.

7.1.3 DE HORIZONTALE LANGE OVERLAAT

De horizontale lange overlaat is een standaard overlaat met een vlakke horizontale kruin geplaatst tussen verticale wanden. De kruin kan zowel vast als beweegbaar worden uitgevoerd. De beweegbare uitvoering is in Nederland vooral bekend onder de naam Hobrad-over-

laat (horizontal broad crested adjustable weir). De bovenstroomse kant van de kruin is zodanig afgerond dat de stroming niet loslaat van de kruin. Daarnaast heeft het horizontale deel van de kruin (L) een minimale lengte van 1,75 H_{max}.

FIGUUR 7-2 HOBRAD-OVERLAAT, UITVOERINGEN MET ENKELE EN DUBBELE SCHUIF



De afvoerrelatie voor dit type overlaat is:

$$Q = \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} \cdot g^{1/2} \cdot C_D \cdot C_V \cdot C_{dr} \cdot b \cdot h_1^{3/2}$$

met:

Q	: afvoer (m³/s)
g	: versnelling van de zwaartekracht (= 9,81 m/s²)
C_D	: afvoercoëfficiënt (-)
C_V	: coëfficiënt voor de aanstroomsnelheid (= $(H_1/h_1)^{3/2}$) (-)
C_{dr}	: reductiefactor voor gestuwde afvoer (-) (bij ongestuwde afvoer: C_{dr} = 1)
b	: breedte van de kruin (m)
H_1	: bovenstroomse energiehoogte (m)
h_1	: overstorthoogte (m)

De waarde van de coëfficiënt C_V kan worden bepaald aan de hand van tabellen en grafieken uit de ISO-standaard. De waarde van de afvoercoëfficiënt C_D hangt af van de overstorthoogte h_1, de kruinlengte in de stroomrichting L, de ruwheid van de kruin en de verhouding h_1/b. Voor overlaten met een glad afgewerkt oppervlak kan C_D worden berekend volgens:

$$C_D = \left[1 - \left(0{,}006\ \frac{L}{b}\right)\right] \cdot \left[1 - \left(0{,}003\ \frac{L}{h_1}\right)\right]^{3/2}$$

Deze C_D-waarden zijn zowel geldig voor overlaten met een vaste kruin als voor overlaten met een beweegbare kruin.

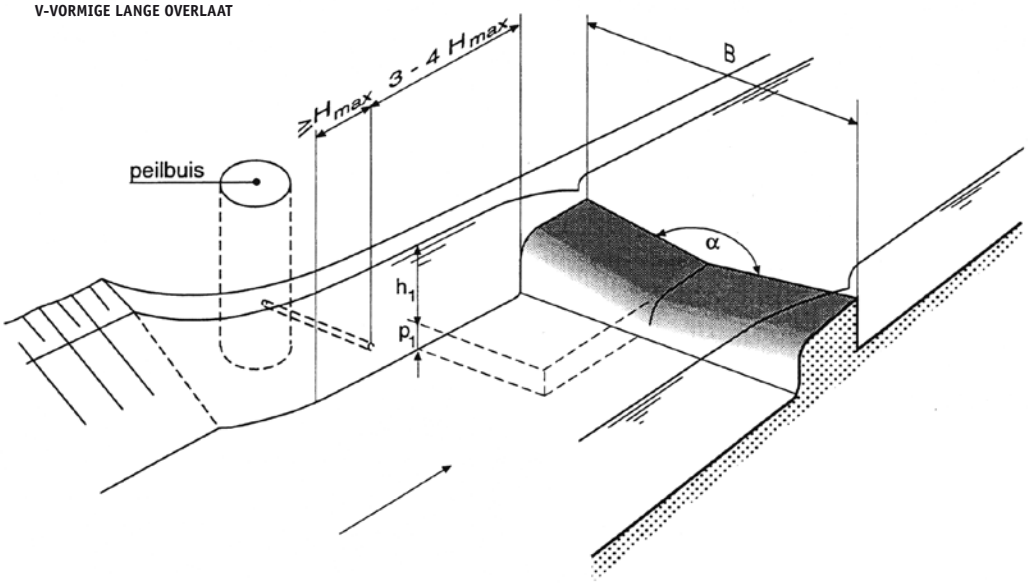
De ISO-standaard beschrijft dit type overlaat alleen voor het geval van ongestuwde afvoer. Dit betekent, dat de verdrinkingsgraad niet groter mag zijn dan de modulaire limiet S_l. Bij een overlaat met een verticale benedenstroomse kant is de modulaire limiet afhankelijk van H_l/p_d, waarbij p_d de hoogte van de kruin is ten opzichte van de benedenstroomse bedding. De modulaire limiet is 63% voor lage waarden van H_l/p_d, oplopend tot 75% voor H_l/p_d = 0,5 en tot 80% voor H_l/p_d 1.

7.1.4 DE V-VORMIGE LANGE OVERLAAT

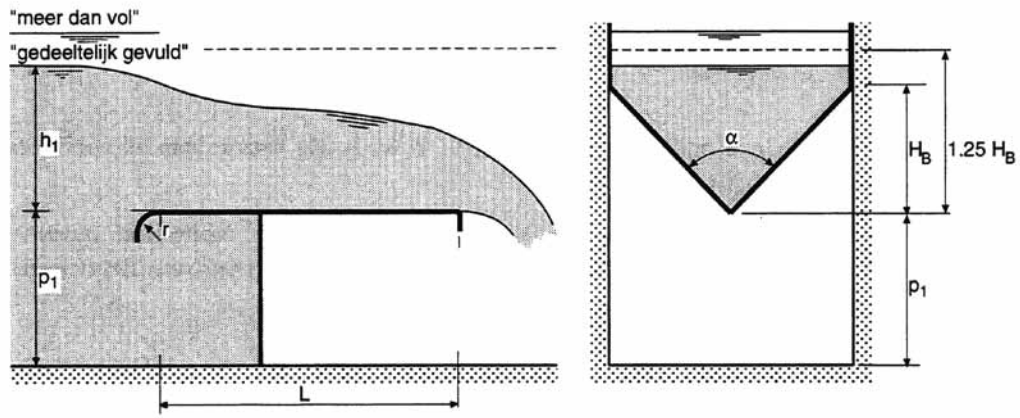
De V-vormige lange overlaat heeft in vooraanzicht een V-vormige dwarsdoorsnede, waarvan de lijn door het diepste punt horizontaal loopt. De hoek α in de kruin kan variëren van 90° tot 150°. De schuine platen zijn aan de bovenstroomse zijde van de kruin afgerond; de aanbevolen straal van deze ronding is 0,2 H_{max} tot 0,4 H_{max} . De overlaat kan zowel met een vaste als met een beweegbare kruin worden uitgevoerd.

Afhankelijk van de waterstand h_1 zijn twee typen stroming 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. 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, zie Figuur 7-4.

FIGUUR 7-3 V-VORMIGE LANGE OVERLAAT



FIGUUR 7-4 STROMINGSTYPEN 'MEER DAN VOL' EN 'GEDEELTELIJK GEVULD'



De afvoerrelatie in het geval van een 'gedeeltelijk gevuld' stromingsprofiel, met $h_1 > 1{,}25\ H_B$ is:

$$Q = \left(\frac{4}{5}\right)^{5/2} \cdot \left(\frac{g}{2}\right)^{1/2} \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot C_D \cdot C_V \cdot C_{dr} \cdot h_1^{5/2}$$

met:

Q	: afvoer (m^3/s)
g	: versnelling van de zwaartekracht (=9,81 m/s^2)
α	: kruinhoek (°)
C_D	:afvoercoëfficiënt (-)
C_V	: coëfficiënt voor de aanstroomsnelheid (= $(H_1/h_1)^{5/2}$) (-)
C_{dr}	: reductiefactor voor gestuwde afvoer (-) (bij ongestuwde afvoer: C_{dr} = 1)
h_1	: overstorthoogte (m)
H_1	: bovenstroomse energiehoogte (m)
H_B	: hoogte driehoek in de V-overlaat (m)

Bij het ontwerpen van een V-vormige overlaat kan een gemiddelde C_D-waarde van 0,95 worden gebruikt voor het bereik $0{,}1 < h_1/L < 0{,}45$, waarbij L de kruinlengte in de stroomrichting is. Voor het nauwkeurig bepalen van de afvoer geeft de ISO-standaard de afvoercoëfficiënt als functie van h_1/L en α. De afvoerrelatie voor de situatie waarin het stromingsprofiel 'meer dan vol' (met $h_1 > 1{,}25\ H_B$) is:

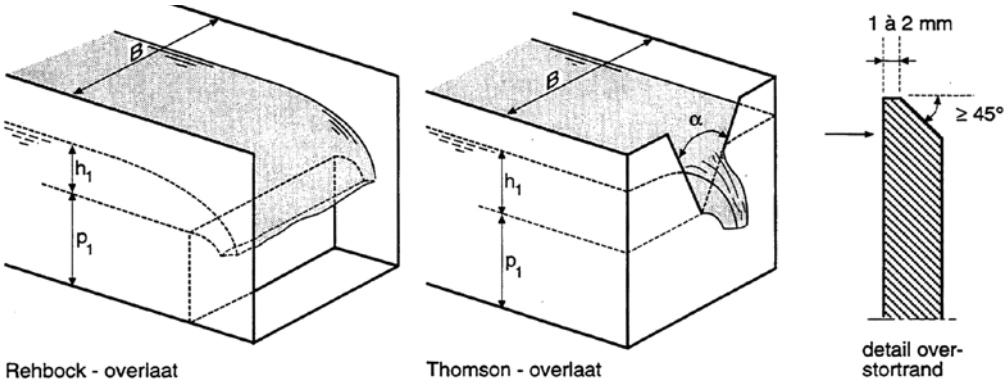
$$Q = \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} \cdot g^{1/2} \cdot B \cdot C_D \cdot C_V \cdot C_{dr} \cdot (h_1 - 0{,}5 \cdot H_B)^{3/2}$$

De afvoercoëfficiënt C_D is nu een functie van h_1/L, α en B (bovenbreedte van de stuw). De waarde van de coëfficiënt C_V is gelijk aan: $\{(H_1-0{,}5H_B)/(h_1-0{,}5H_B)\}^{3/2}$.

7.1.5 DE REHBOCK OVERLAAT EN THOMSON OVERLAAT

Scherpe overlaten kunnen alleen worden toegepast voor het meten van schoon water. Wanneer drijvend of zwevend (grof) materiaal wordt meegevoerd, zal dit dikwijls op de scherpe rand van de overlaat blijven hangen, waardoor zeer grote fouten worden gemaakt in de meting van de overstorthoogte en dus ook in de bepaling van het debiet. De ISO-standaard beschrijft dit type overlaten alleen voor het geval van ongestuwde afvoer. Aangezien de kritische verdrinkingsgraad voor scherpe overlaten S_l = 0 bedraagt, betekent dit, dat de benedenstroomse waterstand nooit hoger mag zijn dan de kruin van de overlaat.

FIGUUR 7-5 REHBOCK-OVERLAAT, THOMSON-OVERLAAT EN DOORSNEDE OVERSTORTRAND



DE HORIZONTALE SCHERPE OVERLAAT (REHBOCK-OVERLAAT)

Deze overlaat bestaat uit een verticale plaat met een horizontale overstortrand over de volle breedte van het (rechthoekige) aanvoerkanaal. De rand van de plaat is aan de benedenstroomse zijde afgeschuind, terwijl de lengte van de kruin 1 à 2 mm bedraagt. De afvoerrelatie voor dit type overlaat wordt beschreven door de Rehbock-formule:

$$Q = C_e \cdot \frac{2}{3} \cdot (2g)^{1/2} \cdot b \cdot h_e^{3/2}$$

waarbij: $C_e = 0{,}602 + 0{,}083 \cdot h_1 / p_1$ en $h_e = h_1 + 0{,}0012$

met:

Q	: afvoer (m^3/s)
C_e	: afvoercoëfficiënt (-)
g	: versnelling van de zwaartekracht (=9,81 m/s^2)
b	: breedte aanvoerkanaal (m)
h_e	: effectieve overstorthoogte (m)
h_1	: overstorthoogte (m)
p_1	: apexhoogte (hoogte overstortrand boven bovenstroomse bodem) (m)

DE V-VORMIGE SCHERPE OVERLAAT (THOMSON OVERLAAT)

Dit type overlaat bestaat uit een verticale plaat met daarin in vooraanzicht een V-vormige opening met een hoek α (die meestal 90° bedraagt). De rand van de plaat is aan de benedenstroomse zijde afgeschuind, terwijl de lengte van de kruin 1 à 2 mm bedraagt. De afvoerrelatie voor dit type overlaat wordt beschreven door de Kindsvater-Shen formule:

$$Q = C_e \cdot \frac{8}{15} \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot (2g)^{1/2} \cdot h_e^{5/2} \quad \text{met} \quad h_e = h_1 + k_h$$

met:

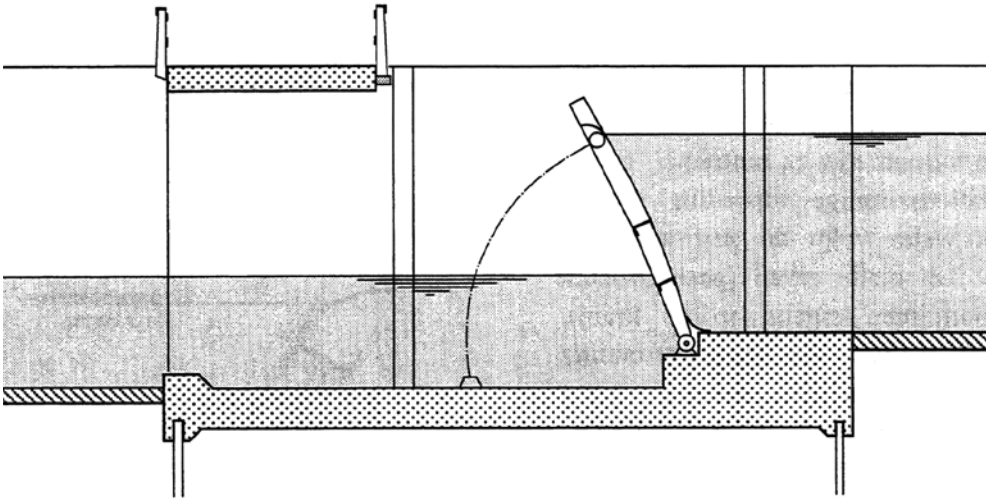
Q	: afvoer (m^3/s)
C_e	: afvoercoëfficiënt (-)
α	: hoek van de meetopening (°)
g	: versnelling van de zwaartekracht (=9,81 m/s^2)
h_e	: effectieve overstorthoogte (m)
h_1	: overstorthoogte (m)
k_h	: experimenteel bepaalde grootheid (correctie voor viscositeit en oppervlaktespanning) (m)

De waarde van de coëfficiënt C_e is afhankelijk van de verhouding tussen de overstorthoogte en de hoogte van de kruin boven de bovenstroomse bodem (h_1/p_1), de verhouding tussen p_1 en de breedte van het aanvoerkanaal (p_1/B) en de hoek van de meetopening (α), waarbij onderscheid wordt gemaakt tussen 'volledige contractie' van de straal over de overlaat en "niet-volledige contractie' van de straal. De waarden van C_e en k_e kunnen worden bepaald aan de hand van grafieken en tabellen uit de ISO-standaard.

7.1.6 KLEPSTUWEN

Een klepstuw draait om een laaggelegen horizontale as (onder water), haaks op de stroomrichting in de waterloop, zie Figuur 7-6. De scharnierpunten zijn aangebracht op een betondrempel. en de klep is aangebracht tussen twee verticale wanden (landhoofden). Bij meerdere kleppen naast elkaar zijn deze gescheiden door tussenpijlers.

FIGUUR 7-6 PRINCIPESCHETS KLEPSTUW



De klep is meestal aan beide zijkanten middels kleparmen opgehangen aan een hydraulische stang, heugelstang, staaldraad of ketting waarmee de klepstand kan worden bijgesteld. Bij grotere breedten kan de bediening mechanisch zijn, maar zowel bij kleine als grote klepstuwen kan de mechanische bediening worden geautomatiseerd, waarbij zo ongeveer alles mogelijk is: regeling op een constante bovenwaterstand, op een constante benedenwaterstand, òf op een constante overstorthoogte.

DE AFVOERKROMME

De relatie tussen het debiet Q en de overstorthoogte h_1 levert de afvoerkromme. Voor het opstellen van de Q-h_1 relatie(s) van een niet-gestandaardiseerde stuw zijn er de volgende mogelijkheden:

- een prototype ijking;
- de ijking in een hydraulisch model;
- in-situ calibratie;
- gebruikmaking van literatuurgegevens.

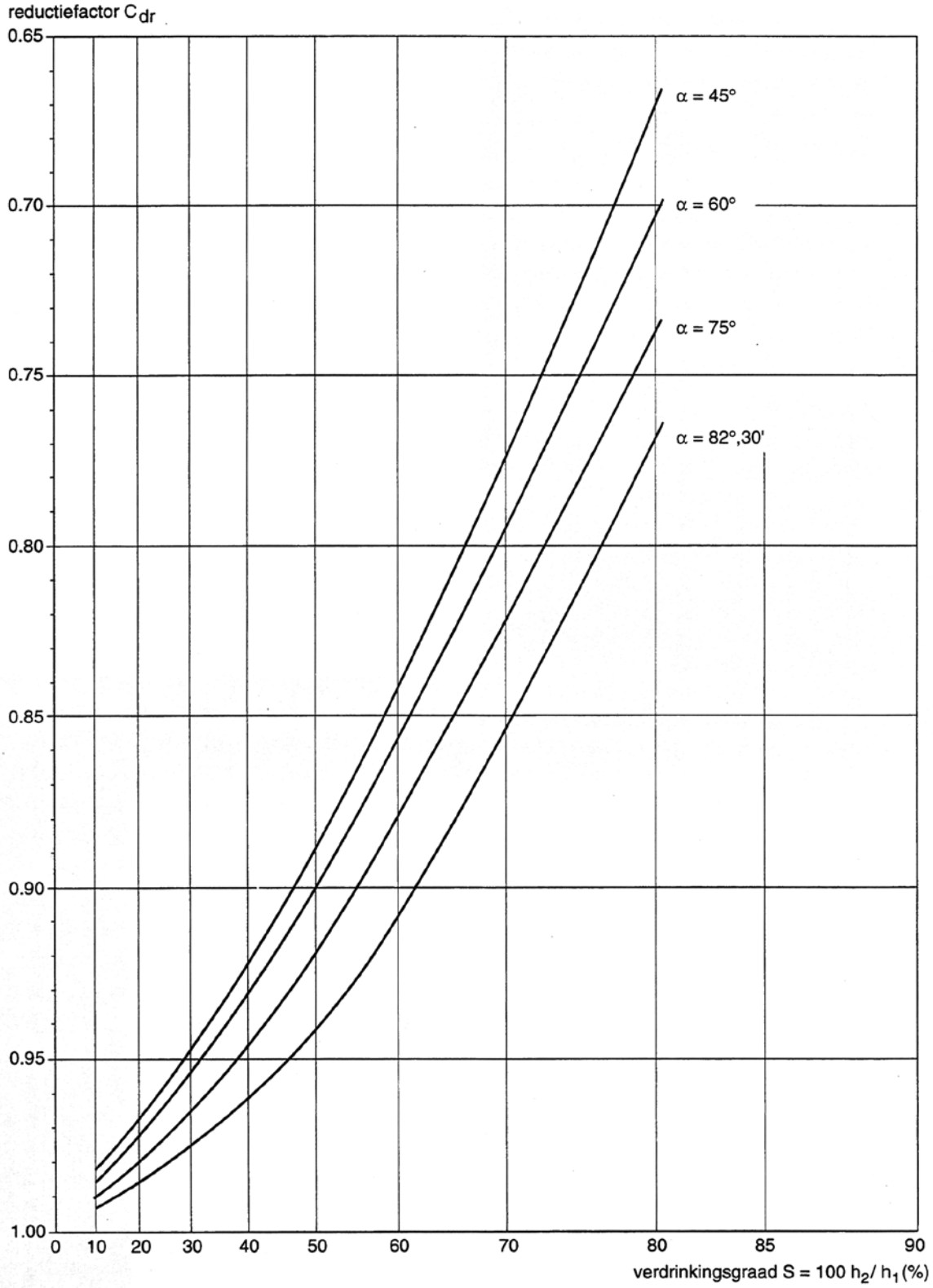
Voor 80 à 90% van de klepstuwen in Nederland kunnen de afvoerrelaties worden berekend met behulp van literatuurgegevens [o.a. Lit. 21]. Voor het opstellen van Q-h relaties voor klepstuwen wordt doorgaans de afvoerformule voor horizontale lange overlaten gebruikt bij ongestuwde afvoer:

$$Q = \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} \cdot g^{1/2} \cdot b \cdot C \cdot h_1^{3/2}$$

met:

Q	: debiet (m^3/s)
g	: versnelling van de zwaartekracht (=9,81 m/s^2)
b	: breedte tussen de betonwanden (m)
C	: afvoercoëfficiënt (-)
h_1	: de overstorthoogte (m). Dit is de waterstand, gemeten bovenstrooms van de klep ten opzichte van de kruinhoogte.

FIGUUR 7-7 **REDUCTIEFACTOR C_{DR} VOOR KLEPSTUWEN ALS FUNCTIE VAN DE VERDRINKINGSGRAAD S EN DE KLEPHOEK α**



De afvoercoëfficiënt C is samengesteld uit drie componenten:

$$C = C_D \cdot C_C \cdot C_V$$

met:

C_D : de karakteristieke afvoercoëfficiënt, die wordt bepaald door de kruinvorm, de klephoek α en de overstorthoogte h_1 [Lit. 21].

C_C : een contractiecoëfficiënt, die wordt bepaald door de breedte van de ophangarmen, de klephoek α en de overstorthoogte h_1:

$$C_C = \frac{b - b'}{b} = \frac{b - (A \cdot n \cdot a)}{b}$$

C_V : de coëfficiënt voor de aanstroomsnelheid in het bovenstroomse pand.

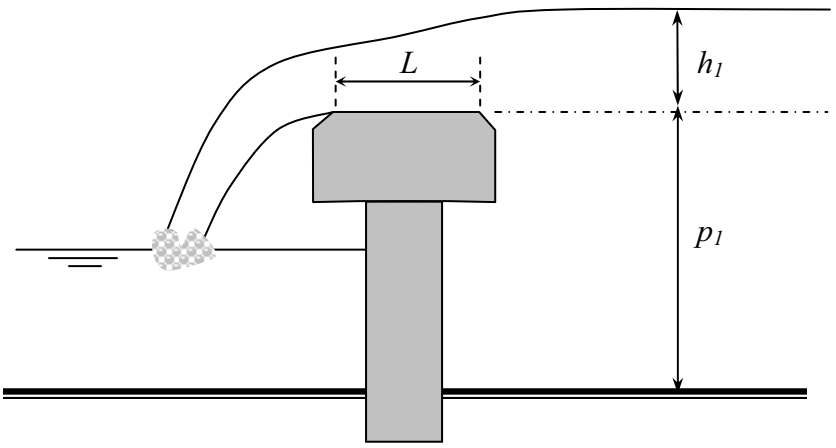
De coëfficiënten C_C en C_D zijn vastgesteld met behulp van een systematisch onderzoek. De karakteristieke afvoercoëfficiënt C_D is een functie van de kruinvorm, de klephoek en de overstorthoogte, hetgeen leidt tot enkele tientallen verschillende krommen, waarbij C_D varieert van 0,90 tot 1,35. Door de enorme variëteit in kruinvormen en klephoeken is het niet mogelijk hier C_D-waarden te vermelden. Zie hiervoor in het bijzonder Lit. 21. Voor ontwerpdoeleinden wordt aanbevolen C=1,1 te gebruiken.

Tijdens zeer hoge afvoeren zal gestuwde afvoer over een klepstuw kunnen optreden. Ook hiernaar is onderzoek gedaan, waarbij de reductiefactor C_{dr} voor gestuwde afvoer is vastgesteld voor verdrinkingsgraden tot $S \leq 80\%$. Voor gestuwde afvoer geldt de formule: $Q_{gestuwd} = C_{dr} \times Q_{ongestuwd}$, waarbij C_{dr} een functie is van de verdrinkingsgraad $S = 100\ H_2/H_1$, Figuur 7-7.

7.1.7 BETONDREMPELS MET VELLINGKANT

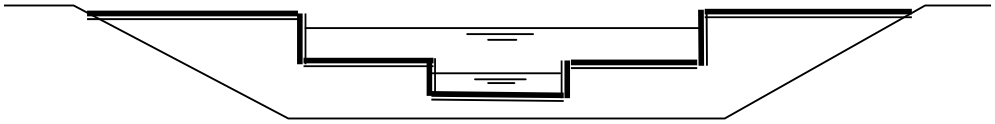
Betondrempels met vellingkant zijn vaste stuwen, waarbij een betondrempel is gebouwd op een damwand. De drempel meet een aantal decimeters in de stroomrichting, om een voldoend stijve constructie te hebben. Aan de bovenstroomse en de benedenstroomse kant zijn vellingkanten op de drempel aangebracht.

FIGUUR 7-8 DWARSDOORSNEDE BETONDREMPEL MET VELLINGKANTEN



Het doorstromingsprofiel wordt bepaald door de vorm van de doorstroomopening in vooraanzicht. De volgende vormen komen voor bij drempels met vellingkant:
- rechthoekig profiel (verticale zijwanden en een vlakke bodem);
- trapeziumvormig profiel (hellende zijwanden en een vlakke bodem);
- één van beide hiervoor genoemde profielen , maar met een verlaagd middengedeelte in de vlakke bodem.

FIGUUR 7-9 RECHTHOEKIG PROFIEL MET VERLAAGD MIDDENGEDEELTE



Veel betondrempels hebben uitsluitend ten doel een minimum peil te handhaven in de waterloop. Voor een aantal waterbeheerders heeft de drempel tevens een meetfunctie. De afvoerformules voor ongestuwde afvoer zijn de volgende:

- drempels met een rechthoekig doorstromingsprofiel (geen verlaagd middengedeelte):

$$Q = \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} \cdot g^{1/2} \cdot b \cdot C \cdot h_1^{3/2}$$

- drempels met een trapeziumvormig doorstromingsprofiel:

$$Q = \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} \cdot g^{1/2} \cdot \left(b + \frac{4}{5} h_1 \cdot \tan\alpha \right) \cdot C \cdot h_1^{3/2}$$

met:

Q	: debiet (m^3/s)
g	: versnelling van de zwaartekracht (=9,81 m/s^2)
b	: breedte horizontale kruin (m)
C	: afvoercoëfficiënt (-)
h_1	: overstorthoogte (m)
α	: hoek hellende zijkant met de verticaal (°)

De afvoercoëfficiënt is samengesteld uit twee componenten: $C = C_D \times C_V$

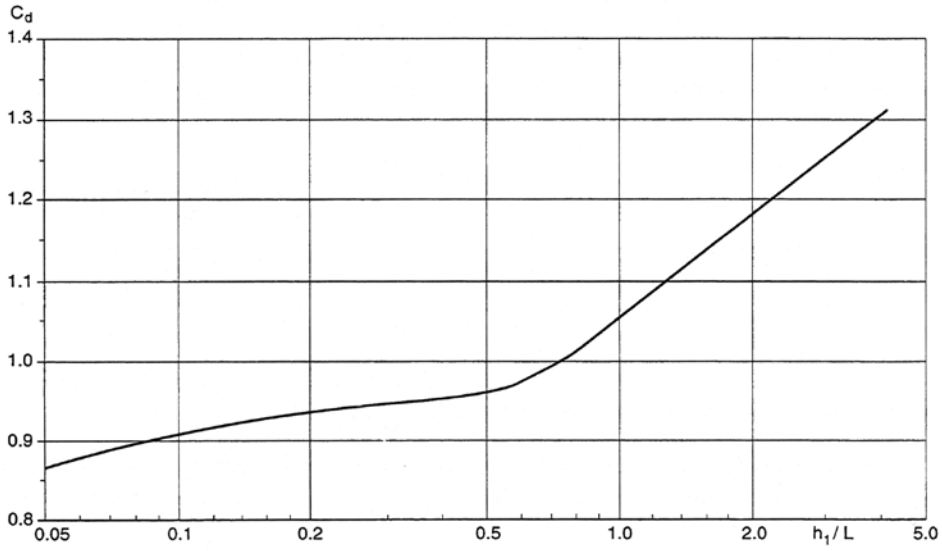
met:

C_D	: de karakteristieke afvoercoëfficiënt (-)
C_V	: coëfficiënt voor de aanstroomsnelheid (-)

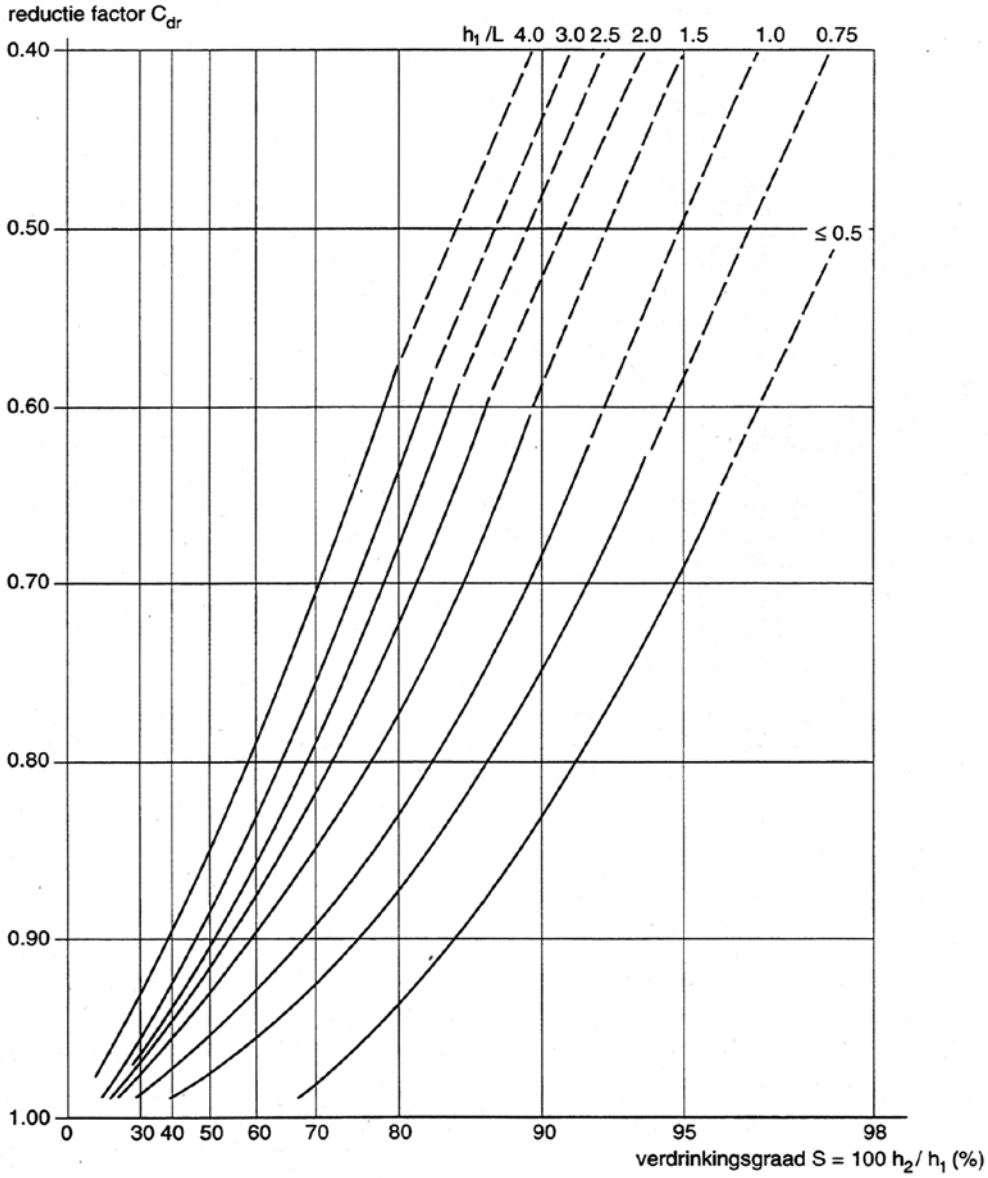
De karakteristieke afvoercoëfficiënt C_D is een functie van h_1/L, waarbij L de kruinlengte is in de stroomrichting.

Voor betondrempels met een verlaagd middengedeelte (ter wille van de meting van zeer lage debieten) kan de afvoerrelatie worden opgesteld door het doorstromingsprofiel op te splitsen in een sectie voor het middengedeelte en een sectie voor de rest van het profiel. Tijdens zeer hoge afvoeren kan gestuwde afvoer over de drempel optreden. Dan dient een reductiefactor C_{dr} te worden geïntroduceerd. Voor gestuwde afvoer geldt: $Q_{gestuwd} = C_{dr} \times Q_{ongestuwd}$. De reductiefactor C_{dr} is een functie van de verdrinkingsgraad S en de parameter h_1/L.

FIGUUR 7-10 **C_D ALS FUNCTIE VAN H1/L**



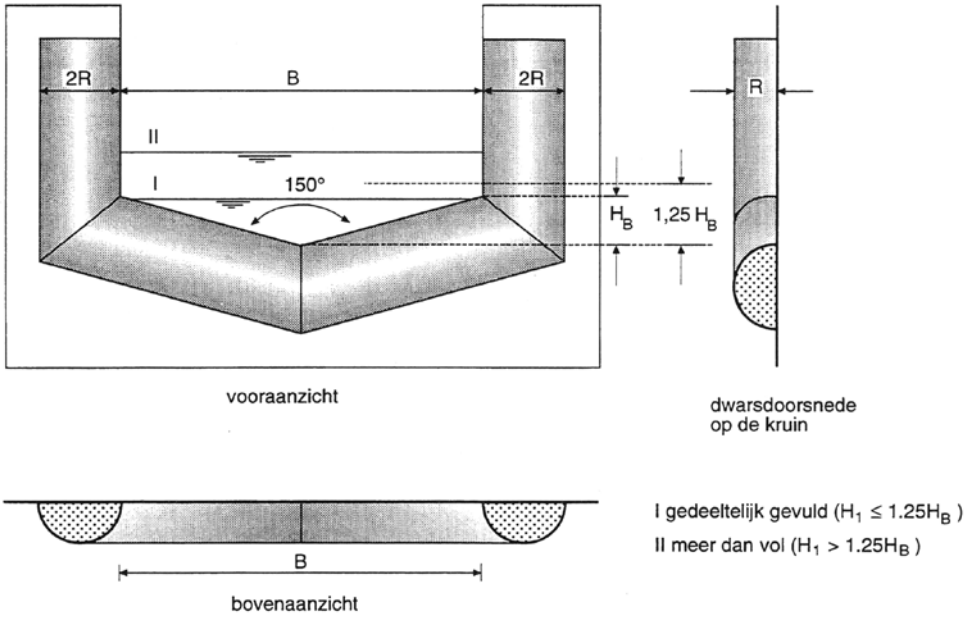
FIGUUR 7-11 **REDUCTIEFACTOR C_{dr} VOOR GESTUWDE AFVOER OVER EEN DREMPEL**



7.1.8 DE ROSSUM-STUW

De Rossum-stuw is een V-vormige korte overlaat met halfcirkelvormige dwarsdoorsnede, zie Figuur 7-12. De Rossum-stuw kan bijvoorbeeld tegen een bestaande waterkering worden bevestigd, teneinde deze geschikt te maken als afvoermeetpunt. Met name in de hoger gelegen delen van Nederland, waar zowel langdurige lage afvoeren als kort durende piekafvoeren nauwkeurig moeten worden gemeten, is de Rossum-stuw goed bruikbaar.

FIGUUR 7-12 ROSSUM-STUW



Bij een korte overlaat zijn de stroomlijnen boven de kruin niet recht en evenwijdig, zoals dat wel het geval is bij een lange overlaat. De afvoerformules van een lange overlaat worden echter ook gebruikt voor een korte overlaat. Hierbij worden relatief hoge afvoercoëfficiënten gevonden door de sterkere kromming van de stroomlijnen. Evenals bij de V-vormige lange overlaat zijn ook hier twee typen van stroming over de overlaat te onderscheiden. Welk stromingstype optreedt, is afhankelijk van de overstorthoogte h_1. Het stromingstype waarbij alleen afvoer plaatsvindt door het V-vormige deel van het profiel en waarvoor geldt h_1 1,25H_B, heet 'gedeeltelijk gevuld'. Voor hogere afvoeren waarbij ook stroming plaatsvindt tussen het rechthoekige gedeelte van het profiel en h_1 > 1,25H_B, geldt het stromingstype 'meer dan vol'. Voor de twee stromingstypen gelden de volgende afvoerformules:

'gedeeltelijk gevuld':

$$Q = \left(\frac{4}{5}\right)^{5/2} \cdot \left(\frac{g}{2}\right)^{1/2} \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot C_D \cdot C_V \cdot C_{dr} \cdot h_1^{5/2}$$

'meer dan vol':

$$Q = \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} \cdot g^{1/2} \cdot B \cdot C_D \cdot C_V \cdot C_{dr} \cdot \left(h_1 - 0{,}5 \cdot H_B\right)^{3/2}$$

met:

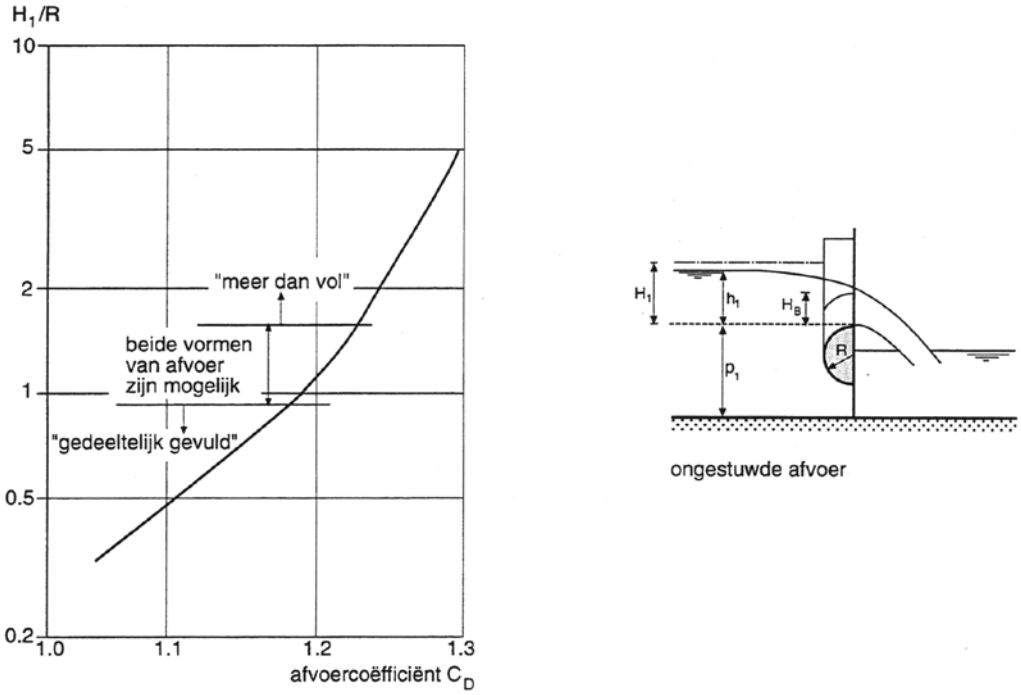
Q	: afvoer (m³/s)
g	: versnelling van de zwaartekracht (=9,81 m/s²)
B	: breedte op waterspiegel (m)
α	: kruinhoek (°)

C_D : afvoercoëfficiënt (-)
C_V : coëfficiënt voor de aanstroomsnelheid = $(H_1/h_1)^{5/2}$ (-)
C_{dr} : reductiefactor voor gestuwde afvoer (-) (bij ongestuwde afvoer: C_{dr} = 1)
h_1 : overstorthoogte (m)
H_1 : bovenstroomse energiehoogte (m)
H_B : hoogte driehoek in de V-overlaat (m)

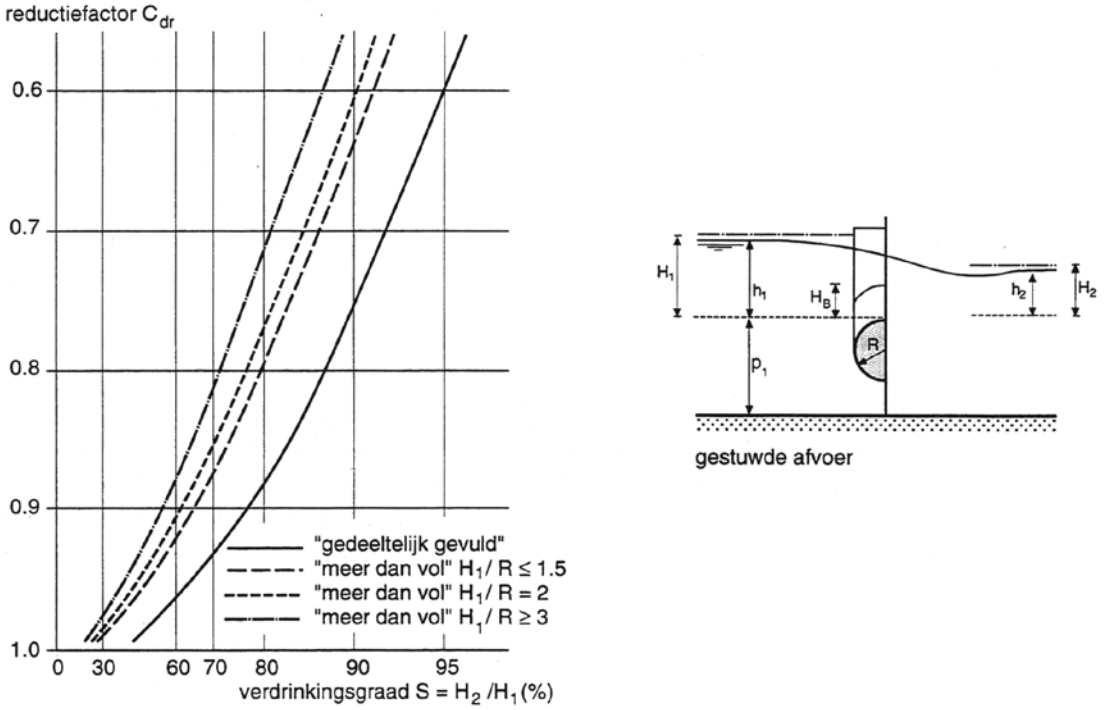
De afvoercoëfficiënt C_D kan worden afgelezen uit Figuur 7-13. Gestuwde afvoer treedt op vanaf een verdrinkingsgraad S_1 = 25% voor het stromingstype 'meer dan vol' en vanaf S_1 = 45% voor het stromingstype 'gedeeltelijk gevuld'. De reductiefactor C_{dr} is een functie van de verdrinkingsgraad. Aan de hand van Figuur 7-14 kan de waarde van de reductiefactor worden bepaald. Alle gegeven waarden zijn alleen geldig voor het aangegeven traject én indien de stuw op de juiste manier wordt geïnstalleerd.

De V-vormige korte overlaat zal als meetstuw worden gekozen, wanneer een groot bereik van afvoeren moet worden gemeten met een hoge nauwkeurigheid. De meetstuw kan met een vaste kruin worden uitgevoerd of, indien naast het meten ook het regelen van het debiet nodig is, als verticaal beweegbare stuw. In het laatste geval wordt de stuw geplaatst tussen twee landhoofden van metselwerk of beton, waarin een verticale glijsponning is aangebracht. De stuw kan hierin door middel van een heugelstang op en neer worden bewogen. De Rossum-stuw kan ook als dubbele schuifstuw worden ontworpen. Deze wordt vooral toegepast als het nodig is regelmatig zand- en slibafzettingen weg te spoelen.

FIGUUR 7-13 **AFVOERCOËFFICIËNT C_D, VAN DE ROSSUM-STUW**



FIGUUR 7-14 REDUCTIEFACTOR C_{dr} VOOR GESTUWDE AFVOER OVER DE ROSSUM-STUW



Het hydraulisch ontwerp van de Rossum-stuw kan aan de hand van een ontwerpdiagram [Lit. 30] worden opgezet voor elk gewenst maximaal debiet tussen 0,25 en 1,5 m^3/s.

De eisen, waaraan een verantwoord ontwerp moet voldoen, zijn:

- $\alpha = 150°$
- 0,075 m < R < 0,160 m (R is de afrondingsstraal van de overlaat);
- $5{,}5R < B < 9{,}2R$
- apexhoogte (= hoogte van de kruin boven de bovenstroomse bedding) $p \geq 2R$; bij een verticaal beweegbare stuw moet naast de waterstand ook de kruinhoogte worden geregistreerd
- minimale energiehoogte H_1 = 0,05 m of $H_1 = 0{,}35R$ (de grootste waarde is maatgevend)
- maximale energiehoogte H_1 = 0,80 m of $H_1 = 5R$ (de kleinste waarde is maatgevend)
- de relatie C_D - H_1/R is geldig voor 'gedeeltelijke gevuld' als $H_1/R \leq 1{,}54$ en voor 'meer dan vol' als $H_1/R \geq 0{,}92$
- de peilbuis, waarin de overstorthoogte h_1 wordt gemeten, moet zich op een afstand van tenminste $3H_{max}$ bovenstrooms van de stuw bevinden
- de raai, waarin eventueel de benedenwaterstand wordt gemeten, moet op voldoende afstand van de stuw worden gekozen, zodat geen hinder wordt ondervonden van een turbulente waterspiegel.

7.2 MEETGOTEN/VENTURI'S

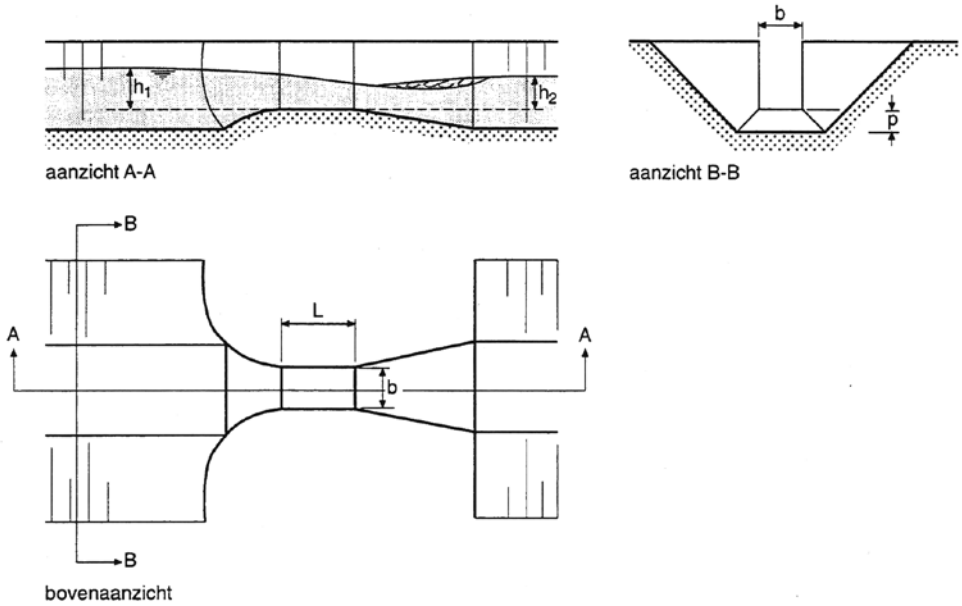
7.2.1 MEETGOTEN

Meetgoten met een rechthoekig keelprofiel zijn het meest voorkomende type. Ze zijn relatief eenvoudig te construeren, zie Figuur 7-15. Er zijn verschillende uitvoeringen mogelijk (i) alleen een vernauwing van de wanden of (ii) een vernauwing van de wanden gecombineerd met een bodemverhoging. De keuze voor een bepaalde uitvoering hangt af van het beschikbare verval en het sedimenttransport van de waterloop. De afvoer door een rechthoekige meetgoot wordt berekend als:

$$Q = \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} \cdot g^{1/2} \cdot C_D \cdot C_V \cdot C_{dr} \cdot b \cdot h_1^{3/2}$$

De waarde van de coëfficiënt C_V is, voor praktische toepassingen, afhankelijk van de keelbreedte b, de overstorthoogte h_1 en de natte oppervlakte A. Waarden kunnen worden berekend of afgelezen uit een in de ISO-standaard gegeven tabel en grafiek.

FIGUUR 7-15 RECHTHOEKIGE MEETGOOT



De waarde van de afvoercoëfficiënt C_D is afhankelijk van de ruwheid van bodem en wanden van de meetgoot. Voor glad afgewerkte meetgoten geldt:

$$C_D = \left[1 - \left(0{,}006 \cdot \frac{L}{b}\right)\right] \cdot \left[1 - \left(0{,}003 \cdot \frac{L}{h_1}\right)\right]^{3/2}$$

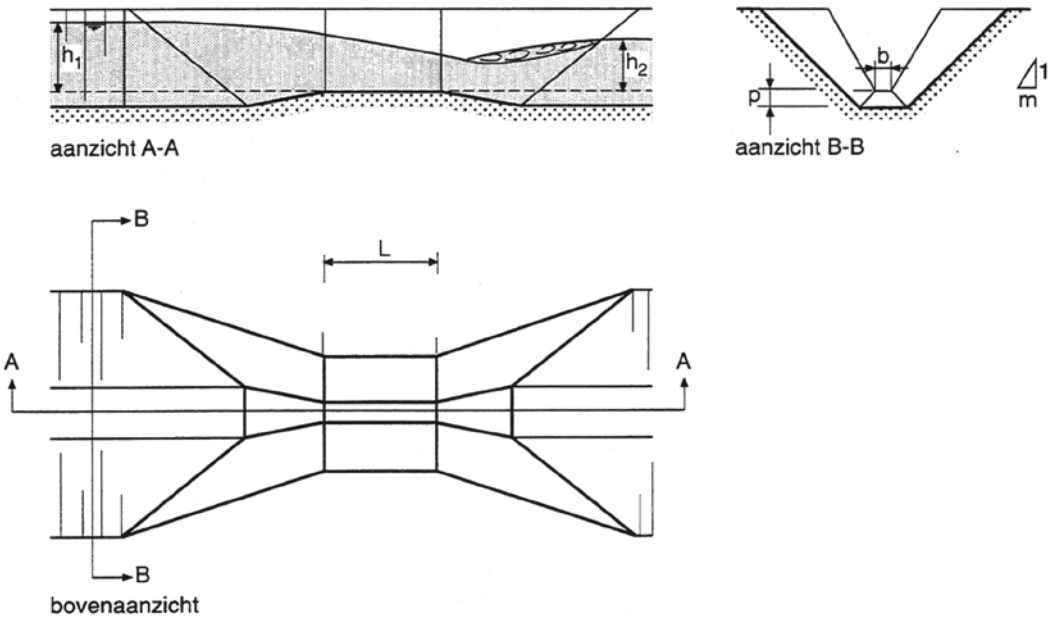
met:

Q	: afvoer (m^3/s)
g	: versnelling van de zwaartekracht (= 9,81 m/s^2)
C_D	: afvoercoëfficiënt (-)
C_V	: coëfficiënt voor de aanstroomsnelheid = $(H_1/h_1)^{3/2}$ (-)
C_{dr}	: reductiefactor voor gestuwde afvoer (-) (bij ongestuwde afvoer: C_{dr} = 1)
b	: breedte van de kruin (m)
h_1	: overstorthoogte (m)
L	: lengte van de keel (m)

De afvoerrelatie voor een meetgoot met rechthoekig profiel kan worden verkregen, door voor een serie gemeten overstorthoogten h_1 de afvoer Q te berekenen. De overstorthoogten en bijbehorende afvoeren kunnen dan in een grafiek worden uitgezet en vormen de afvoerrelatie van een specifieke meetgoot.

Trapeziumvormige meetgoten kunnen worden gebruikt als ook lage afvoeren moeten worden gemeten. De keuze van de keelbreedte b en de helling van de wanden m volgt uit het opgegeven meetbereik. Figuur 7-16 toont het algemene ontwerp van een trapeziumvormige meetgoot. In gevallen waar de waterloop veel sediment meevoert, is de bodem van de meetgoot niet verhoogd ten opzichte van de bovenstroomse bedding.

FIGUUR 7-16 **TRAPEZIUMVORMIGE MEETGOOT**



De afvoerrelatie voor een trapeziumvormige meetgoot is:

$$Q = \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} \cdot g^{1/2} \cdot C_D \cdot C_V \cdot C_S \cdot C_{dr} \cdot b \cdot h_1^{3/2}$$

met:

Q	: afvoer (m^3/s)
g	: versnelling van de zwaartekracht (= 9,81 m/s^2)
C_D	: afvoercoëfficiënt (-)
C_V	: coëfficiënt voor de aanstroomsnelheid = $(H_1/h_1)^{3/2}$ (-)
C_S	: vormcoëfficiënt (-)
C_{dr}	: reductiefactor voor gestuwde afvoer (-) (bij ongestuwde afvoer: C_{dr} = 1)
b	: breedte van de kruin (m)
h_1	: overstorthoogte (m)

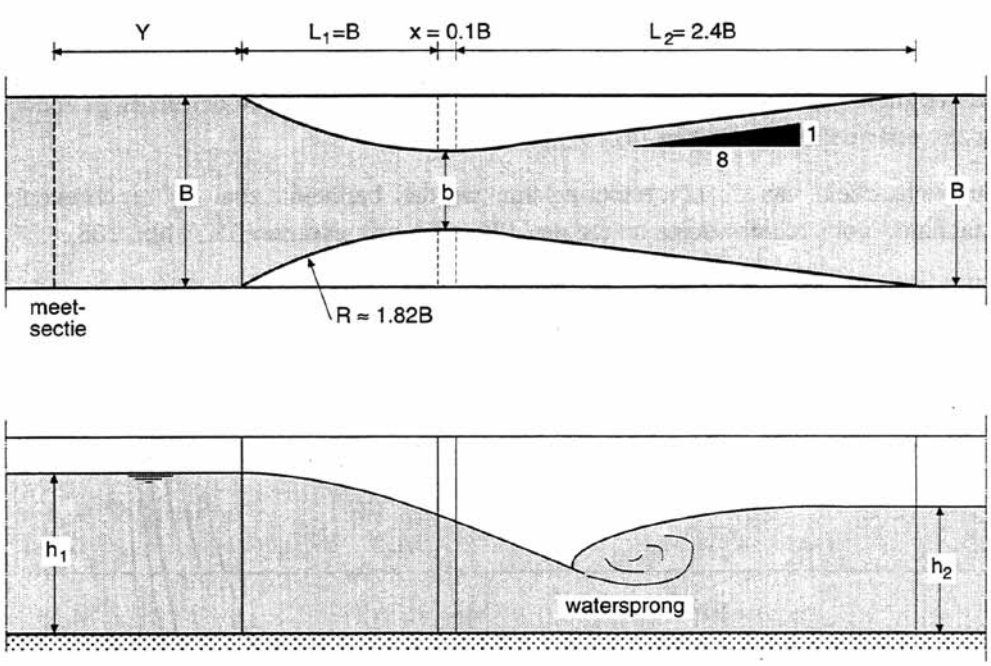
Door invoering van de vormcoëfficiënt C_S wordt het verloop van de machtsfactor in de afvoerrelatie verdisconteerd. Deze machtsfactor varieert van 3/2 voor lage afvoeren tot 5/2 voor hoge afvoeren. Evenals bij de rechthoekige meetgoot is ook nu de afvoercoëfficiënt C_D afhankelijk van de ruwheid van de meetgoot.

7.2.2 KHAFAGI VENTURI'S

Khafagi venturi's vinden vooral toepassing in effluentgoten van zuiveringsinstallaties. Een Khafagi venturi is een meetgoot met een rechthoekige doorsnede en een zijdelingse contractie en wordt geplaatst in een rechthoekig kanaal. De breedte van de keel b bedraagt 40% van de breedte B van het rechthoekige kanaal, dat wil zeggen dat de contractieverhouding $s = b/B$ = 0,4. De instroomzijde van de meetgoot is afgerond met een straal R = 1,82B en een lengte L_1 = B. De keelsectie is kort, de lengte van de keel bedraagt x = 0,1B. Aan de uitstroomzijde divergeren de wanden met een factor 1:8 over een lengte L_2 van 2,4B (Figuur 7-17). De totale lengte van een Khafagi venturi bedraagt L = 3,5B mits de breedte van het kanaal benedenstrooms ook gelijk is aan B. Het kanaal bovenstrooms van de meetgoot moet over een lengte Y = 10B uniform en recht zijn. Khafagi venturi's zijn zodanig geijkt, dat de overstorthoogte moet worden gemeten op een afstand Y = B bovenstrooms van het instroomgedeelte (in tegenstelling tot de algemene regel Y = 3h_1).

De algemene afvoerformule voor meetgoten met een rechthoekig keelprofiel is gegeven in paragraaf 7.2. De hierin voorkomende afvoercoëfficiënt C_D en coëfficiënt voor de aanstroomsnelheid C_V kunnen worden gecombineerd tot één coëfficiënt m (= C_D x C_V).

FIGUUR 7-17 KHAFAGI VENTURI

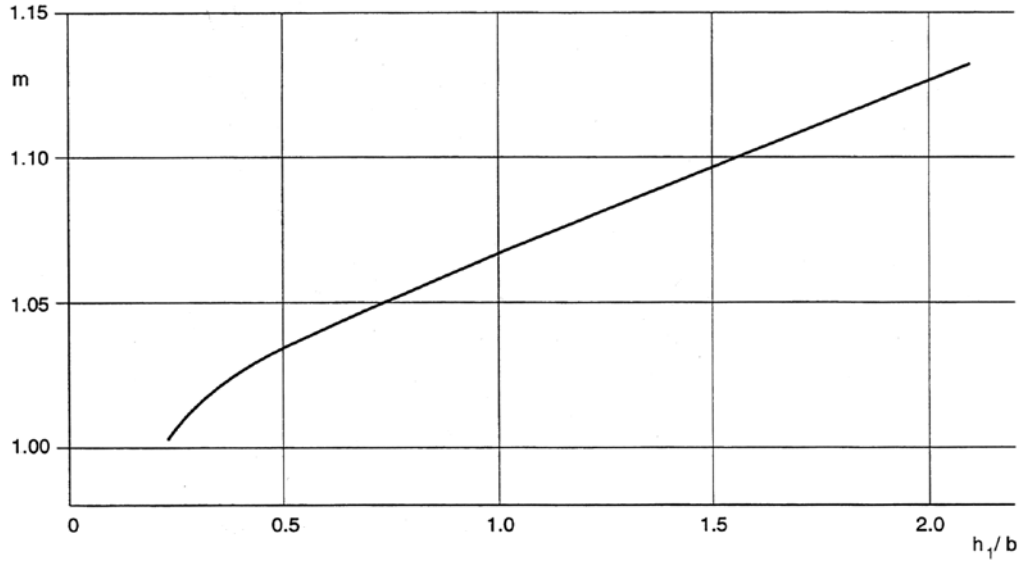


De waarde van de gecombineerde coëfficiënt m voor Khafagi venturi's is weergegeven in Figuur 7-18.

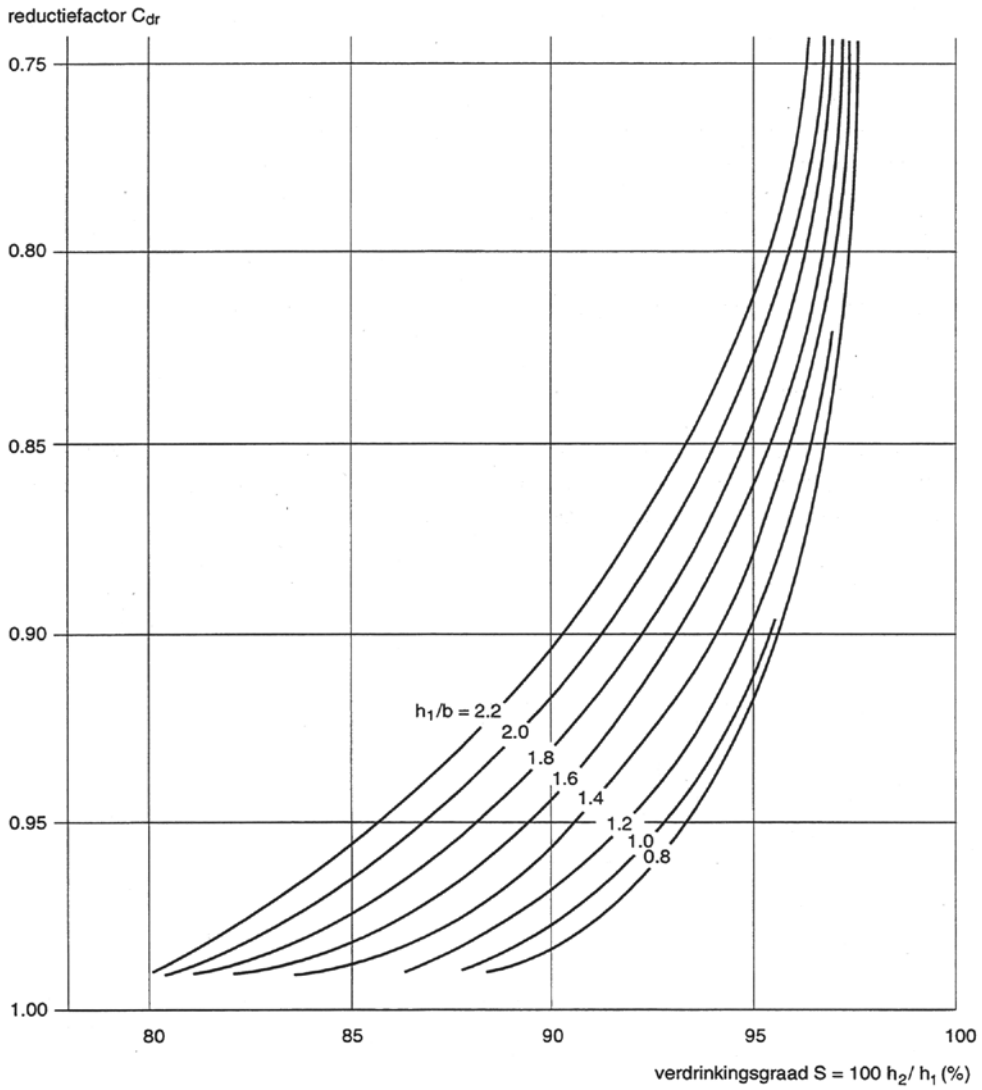
Voor één type is onderzoek gedaan naar gestuwde afvoer. Hiervoor is een modulaire limiet S_1 gevonden van 80%. De waarde van de reductiefactor C_{dr} is afhankelijk van de verdrinkingsgraad, zie Figuur 7-19. Aangenomen mag worden, dat de reductiefactor die is gevonden, ook geldig is voor de overige typen.

De onbetrouwbaarheid van de afvoermeting kan worden berekend zoals is beschreven in de ISO-standaard voor rechthoekige meetgoten.

FIGUUR 7-18 GECOMBINEERDE COËFFICIËNT M VOOR KHAFAGI VENTURI'S



FIGUUR 7-19 REDUCTIEFACTOR C_{dr} VOOR KHAFAGI VENTURI'S



7.3 STROOMSNELHEIDSMETERS

7.3.1 MEETPRINCIPE

Met een stroomsnelheidsmeter wordt de stroomsnelheid in een klein gebied of een punt in een dwarsprofiel gemeten. Door verschuiven van het meetinstrument of het gebruik van meerdere meetinstrumenten gelijktijdig wordt de snelheidsverdeling in een verticaal of in horizontale richting gemeten. De gemeten stroomsnelheden worden met een karakteristiek doorstroomoppervlak vermenigvuldigd en gesommeerd tot het debiet. Er bestaan verschillende typen stroomsnelheidsmeetinstrumenten:

- akoestische snelheidsmeters die werken met een akoestisch signaal waarvan de looptijd door het water een maat is voor de stroomsnelheid,
- akoestische snelheidsmeters die een akoestisch signaal uitzenden waarvan de Dopplerverschuiving na ontvangst een maat is voor de stroomsnelheid,
- radarsnelheidsmeters die een radio signaal uitzenden waarvan de Dopplerverschuiving na ontvangst een maat is voor de stroomsnelheid,
- elektromagnetische snelheidsmeters die werken met elektromagnetische velden en waarvan de variatie in veldsterkte een maat is voor de stroomsnelheid,
- mechanische snelheidsmeters die uitgerust zijn met een propeller waarvan het aantal omwentelingen een maat is voor de stroomsnelheid,
- buisvormige snelheidsmeters (Pitotbuis) waarvan de opstuwing in de buis een maat is voor de stroomsnelheid.

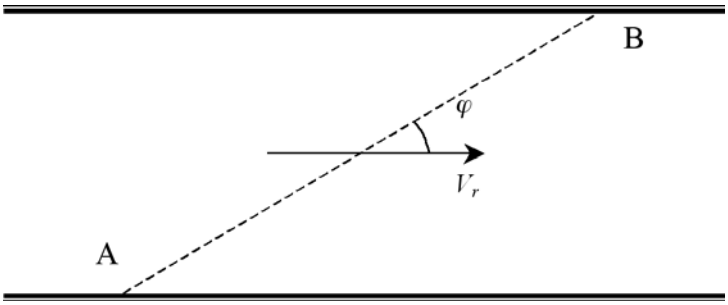
Van de eerste vijf meetinstrumenten is in de onderstaande paragrafen het meetprincipe uitgelegd alsmede de karakteristieke eigenschappen. Het vijfde instrument (Pitotbuis) is een systeem dat tegenwoordig niet meer wordt gebruikt in open waterlopen en wordt in deze handleiding niet behandeld.

7.3.2 AKOESTISCHE SNELHEIDSMETERS (LOOPTIJDVERSCHILPRINCIPE)

PRINCIPE BEPALING VAN DE STROOMSNELHEID

Een akoestisch meetsysteem volgens het looptijdverschilprincipe werkt als volgt. Een akoestische puls wordt aan de ene oever van een rivier uitgezonden en aan de andere oever opgevangen. De tijd die de puls nodig heeft om van transmitter naar ontvanger te gaan is de looptijd, zie Figuur 7-20.

FIGUUR 7-20 PRINCIPE VAN EEN LOOPTIJD METING



De looptijd is gerelateerd aan de voortplantingssnelheid van de akoestische puls door het medium en de stroomsnelheid van het medium. In de praktijk is water het medium. Als het water stilstaat is de looptijd van A naar B gelijk aan die van B naar A,

$$t_{ab} = t_{ba} = \frac{L}{c} \tag{7-1}$$

waarin L = de afstand tussen de transmitter A en de ontvanger B [m] en c = de voortplantingssnelheid van geluid in water [m/s]. In het geval dat het water stroomt met een snelheid V_r is de looptijd van A naar B verschillend aan die van B naar A,

$$t_{ab} = \frac{L}{c + V_r \cdot \cos\varphi} \quad \text{en} \quad t_{ba} = \frac{L}{c - V_r \cdot \cos\varphi} \tag{7-2}$$

Onder de aanname dat de C en $V_r\ Cos\varphi$ in beide richtingen gelijk is, volgt de stroomsnelheid van het water uit vergelijking (7-2),

$$V_r = \frac{L}{2\cos\varphi} \cdot \left(\frac{1}{t_{ab}} - \frac{1}{t_{ba}} \right) \tag{7-3}$$

De stroomsnelheid is een 'gemiddelde' van de opgetreden stroomsnelheden langs het akoestisch pad dat de puls heeft afgelegd tussen de punten A en B.

Omdat de signalen van A naar B en B naar A gelijktig verstuurd worden wordt er in hetzelfde water gemeten en mag men stellen dat c en $V_r cos\varphi$ gelijk zijn. De looptijdmeting van de ADM is hierdoor onafhankelijk van de geluidssnelheid.
Tevens is het mogelijk om de geluidssnelheid door de looptijdmeting te laten berekenen en te presenteren: $c = L/2\ (1/t_{ab} + 1/t_{ba})$. Hiermee kan eventueel de temperatuur van de waterloop weergegeven worden (integrale temperatuurmeting) en de ingevoerde padlengte gecontroleerd worden.

GELUIDSSNELHEID

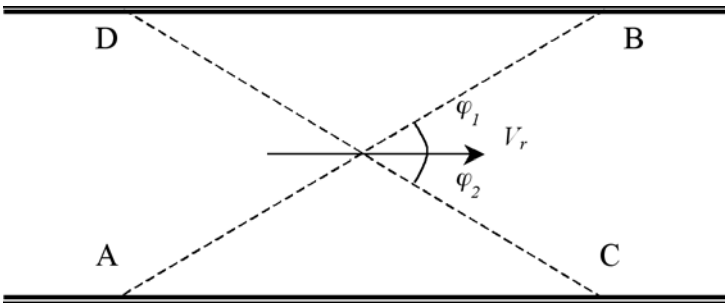
De voortplantingssnelheid c van geluid in water hangt af van:

- de watertemperatuur,
- de druk,
- de saliniteit,
- de sedimentconcentratie,
- de aanwezigheid van luchtbellen.

In de vakliteratuur zijn de achtergronden hierover te vinden voor dit type meetinstrument (zie ook tabel 6-7).

Door gebruik van de looptijdverschilmethode valt de voortplantingssnelheid van het akoestisch signaal in water uit de vergelijking voor de stroomsnelheid (formule 7-3). Alle fouten die met de voortplantingssnelheid samenhangen werken dan niet meer door in de gemeten stroomsnelheid. Dit geldt al voor één meetlijn. Bij toepassing van twee meetlijnen in de vorm van een kruis werkt de fout door dwarsstroming ook niet door. Een ADM met een meetkruis geeft dan ook de stroomsnelheid loodrecht op het doorstroomde oppervlak en de schakelt rekenkundig de invloed van de dwarsstroming uit.

FIGUUR 7-21 PRINCIPE MEETKRUIS VAN EEN AKOESTISCH LOOPTIJDPRINCIPE MEETSYSTEEM



VERWERKING METINGEN TOT EEN DEBIET

De gemeten stroomsnelheid wordt omgezet naar een debiet door het gehele doorstroomoppervlak. Het debiet is te bepalen als,

$$Q = V \cdot A \tag{7-10}$$

waarin Q = debiet [m³/s], V = gemiddelde stroomsnelheid in het doorstroomoppervlak [m/s] en A = het doorstroomoppervlak [m²]. De gemeten stroomsnelheid ter hoogte van het meetkruis is veelal niet gelijk aan de gemiddelde stroomsnelheid in het doorstroomoppervlak. De relatie tussen beide stroomsnelheden is,

$$V = V_r \cdot K \tag{7-11}$$

waarin de factor K afhangt van de bodemruwheid, de vorm van het doorstroomprofiel, de waterdiepte en de vorm van de snelheidsverdeling in het doorstroomoppervlak. Voor brede rivieren met homogene stationaire stroming kan het snelheidsprofiel in het midden worden benaderd met een logaritmisch snelheidsprofiel,

$$V(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} \tag{7-12}$$

waarin $V(z)$ de stroomsnelheid op een afstand z van de bodem is [m/s], u_* = schuifspanningssnelheid ($\sqrt{g \cdot h \cdot i}$, met i = bodemverhang) [m/s], κ = Von Karman constante (0,4) en z_0 = referentie-afstand boven de bodem [m]. Intergratie van vergelijking (7-12) over de waterdiepte h, levert het specifiek debiet in de verticaal op,

$$q = \int_{z_0}^{h} V(z)dz = \frac{u_*}{\kappa} z_0 \int_{z_0}^{h} \ln \frac{z}{z_0} \cdot d\frac{z}{z_0} = \frac{u_*}{\kappa} \cdot \left(\frac{z}{z_0} \ln \frac{z}{z_0} - \frac{z}{z_0} \right)\Bigg|_{z_0}^{h} \approx \frac{u_* \cdot h}{\kappa} \left(\ln \frac{h}{z_0} - 1 \right) \tag{7-13}$$

De gemiddelde stroomsnelheid in de verticaal is dan,

$$V = \frac{q}{h} = \frac{u_*}{\kappa} \left(\ln \frac{h}{z_0} - 1 \right)$$, deze snelheid ligt op $z = 0{,}37h$ boven de bodem. (7-14)

De K-factor wordt, als vergelijking in (7-12), voor de gemeten stroomsnelheid gebruikt,

$$K = \frac{V}{V_r(z)} = \frac{\ln \frac{h}{z_0} - 1}{\ln \frac{z}{z_0}} \tag{7-15}$$

In de praktijk ligt de K-factor tussen 0,9 en 1,1. Uitgegaan is van een homogene snelheidsverdeling hetgeen betekent dat het snelheidsprofiel volgens vergelijking (7-12) van oever tot oever geldt. In werkelijkheid varieert de waterdiepte van oever tot oever. De gemiddelde stroomsnelheid, uitgaande van een logaritmisch snelheidsprofiel, verloopt van de ene oever ($y = 0$) naar de andere oever ($y = B$) als,

$$V = \frac{u_*}{\kappa \cdot B} \int_0^B \frac{1}{h(y)} \int_{z_0}^{h(y)} \ln \frac{z(y)}{z_0} dz \cdot dy = \frac{u_*}{\kappa \cdot B} \int_0^B \left(\ln \frac{h(y)}{z_0} - 1 \right) dy \tag{7-16}$$

De integraal kan worden opgelost als het verloop van $h(y)$ bekend is. Voor het snelheidsprofiel op de locatie waar de stroomsnelheid wordt gemeten, kan weer een logaritmisch verloop worden aangenomen volgens vergelijking (7-12).

Het debiet is tenslotte te berekenen als,

$$Q = V_r \cdot K \cdot A = \frac{L}{4\cos\varphi} \left(\frac{1}{t_{ab}} - \frac{1}{t_{ba}} + \frac{1}{t_{cd}} - \frac{1}{t_{dc}} \right) \cdot K(h) \cdot A(h) \tag{7-17}$$

In de praktijk wordt voor de looptijdverschilmeting de K-factor bepaald uit numeriek modelonderzoek of veldmetingen, waarbij rekening wordt gehouden met het verloop van de geometrie van de waterloop, het verloop van de waterstand, de bodem- en wandruwheden en de positie van de transducenten van de looptijdverschilmethode in de meetsectie. De transducenten kunnen in of tegen de wand of op een constructie in de knik van het talud opgesteld worden, waarbij er ook water achter de transducenten langsstroomt. Hierdoor is de meetinstallatie direct na ingebruikname operationeel.

MEETONNAUWKEURIGHEID

Er zijn twee soorten fouten te onderscheiden (zie par. 8.1):

- systematische fouten bij het meten met meetinstrumenten,
- toevallige fouten bij meten met de meetinstrumenten.

Systematische fouten kunnen worden voorkomen na calibratie van de meetinstrumenten.
De toevallige fout van het meetsysteem wordt bepaald door de geometrie van de opstelling en de fout in de looptijd,

$$\Delta V = \frac{c^2 \cdot \Delta t}{2L \cdot \cos\varphi} \tag{7-18}$$

waarin ΔV = de fout in de gemeten stroomsnelheid [m/s] en Δt = de fout in de bepaling van de looptijd tussen de transmitter en ontvanger. Voor bepaalde typen meetsysteem is de fout in de looptijden (t_{ab}, t_{ba}, t_{cd} en t_{dc}) groot $\Delta t \leq 15$ ns (voor 200 kHz transmitters). De fout in de gemeten stroomsnelheid ΔV voor een afstand L = 50 tot 500 m is 0,5 tot 0,05 mm/s.

Verder treden toevallige fouten op bij de bepaling van het doorstroomoppervlak (A), de hoek tussen de akoestische paden (φ), de afstand (L) tussen de transducenten en de K-factor. Dit levert de volgende relatieve onnauwkeurigheid ($\Delta L/L$, ...) op voor het debiet,

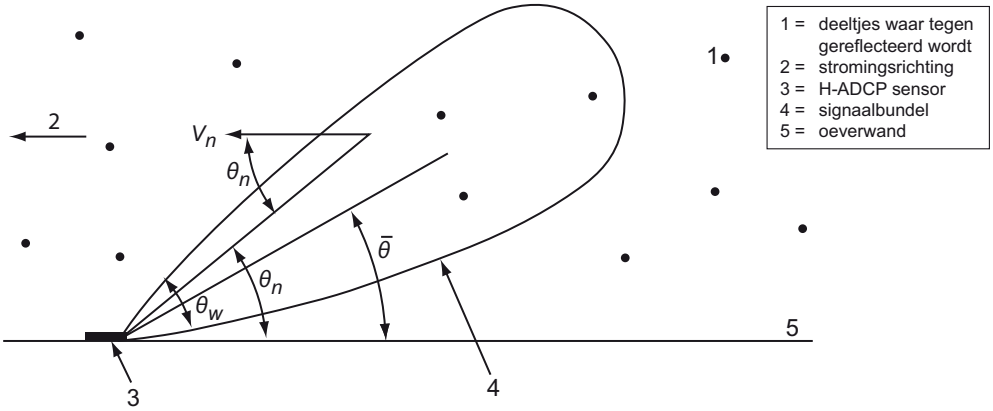
$$r_Q = \sqrt{r_L^2 + r_\varphi^2 + r_t^2 + r_K^2 + r_A^2} \tag{7-19}$$

In de praktijk leveren de K-factor en het doorstroomoppervlak A de grootste bijdrage aan de onnauwkeurigheid van het debiet. De onnauwkeurigheid van het debiet bepaald met een ADM ligt in de praktijk tussen de 5 en 10%. Veelal wordt een ADM gevalideerd met een varende ADCP-meting.

7.3.3 AKOESTISCHE SNELHEIDSMETERS (DOPPLERVERSCHUIVING)

Akoestische snelheidsmeters waarvan de werking is gebaseerd op de dopplerverschuiving van het uitgezonden signaal worden tegenwoordig ook toegepast voor afvoermetingen. Het principe van deze meetmethode is de Dopplerverschuiving die in het water zwevende deeltjes veroorzaken en waarbij gesteld wordt dat de deeltjes met dezelfde snelheid bewegen als de stroomsnelheid van het water waarin wordt gemeten.

FIGUUR 7-22 MEETPRINCIPE H-ADCP (BRON: ISO 15769)



$$V_{deeltje\ n} = \frac{fd_n \,.\, C}{2 \,.\, f \,.\, \cos\theta_n}$$

fd_n = Doppler shift door *deeltje n*
f = basis frequentie
C = geluidssnelheid
$V_{deeltje\ n}$ = snelheid van *deeltje n*
θ_n = hoek tussen bewegingsrichting deeltje en de akoestische straal

De frequentieverschuiving F_d van het uitgezonden signaal F_s, voor water met snelheid v , is,

$F_d = 2F_s \cdot (1 + v/c) \cdot \cos\alpha$ voor stilstaande ADCP en

$F_d = 2F_s \cdot (1 - v/c) \cdot \cos\alpha$ voor bewegende bron.

met c = voortplantingssnelheid van het uitgezonden signaal in water en α = de hoek tussen uitgezonden signaal en de stroomrichting van het water. De frequentie van het uitgezonden signaal verandert door het bewegende water en wordt opgevangen door het meetinstrument. De frequentie van het ontvangen signaal wordt vergeleken met het oorspronkelijk uitgezonden signaal en levert de frequentieverschuiving op. De geluidssnelheid van een akoestisch signaal in water is ongeveer 1500 m/s (zie ook Tabel 6-7). De frequentie van het uitgezonden signaal is in het ultrasone gebied en ligt tussen 300 kHz en 3000 kHz. De frequentieverschuiving is ongeveer 1/1000 van de signaalfrequentie, dus ongeveer 300 Hz tot 3000 Hz. Uit de bovenstaande formules volgt dat de snelheidsmeting van de ADCP afhankelijk is van de voorplantingssnelheid van het geluid (c). Deze moet bekend moet zijn. Elke afwijking van de aangenomen geluidssnelheid werkt door in een afwijking van de gepresenteerde water snelheid.

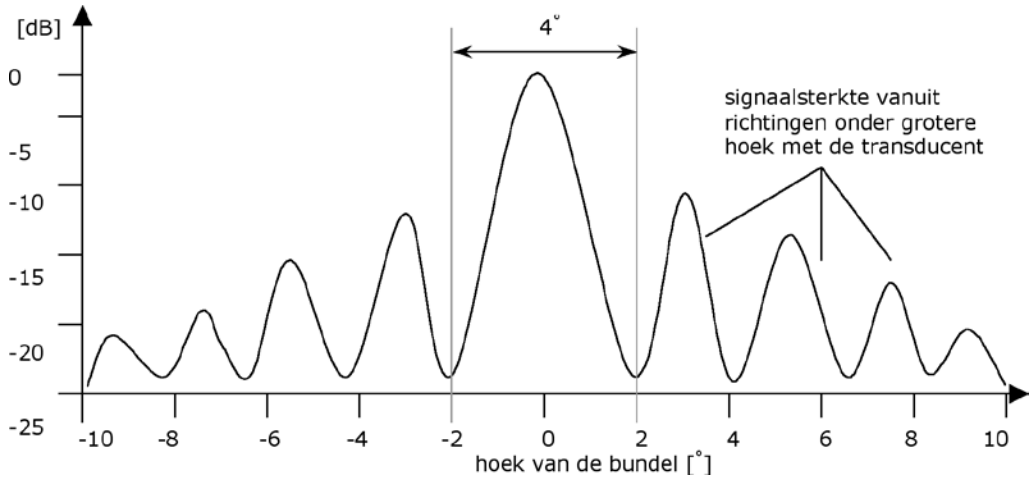
Een ADCP gebruikt twee tot vier signaalbundels die een eigen richting hebben. Met drie bundels wordt de snelheidsvector is de ruimte gemeten, de vierde bundel dient ter controle van het ontvangen signaal. Met twee bundels kan de snelheidsvector in een vlak worden gemeten.

FOTO 7-1 ADCP'S MET TWEE EN VIER AKOESTISCHE BUNDELS (FOTO: TELEDYNE RD INSTRUMENTS)

Het principe van de werking van een ADCP is dat een signaal wordt uitgezonden dat op verschillende afstanden door aanwezige deeltjes in het water wordt teruggekaatst. De tijd van aankomst van het teruggekaatste signaal is een maat voor de afstand waar het signaal vandaan komt (cel) en de frequentieverschuiving is een maat voor de stroomsnelheid in die cel. Daarmee kan een ADCP in een gewenst aantal cellen meten waardoor een goed beeld van de momentane snelheidsverdeling kan worden verkregen. De gebruikte signaalfrequentie bepaald het aantal cellen ('bins') waarin de snelheid wordt gemeten. Naarmate de afstand tot de sensor toeneemt worden de cellen groter.

De ADCP zendt een akoestische signaal uit dat zich in het water als een bundel verwijdt. Het uitgezonden hoogfrequente signaal wordt door de ontvangers op de ADCP na enige tijd weer ontvangen vanuit alle richtingen. De reflectiesterkte van de scatter wordt gemeten door het instrument en geeft informatie hoe de signaalsterkte afhangt van de richting. Het sterkste signaal komt vanuit de hoofdrichting van de bundel (loodrecht op de ontvanger) en bevat de informatie over de stroomsnelheid in het interessegebied. De hoofdbundel heeft een openingshoek van circa 4°, zie Figuur 7-23.

FIGUUR 7-23 PRINCIPE HOOFDBUNDEL EN ZIJBUNDELS ONTVANGEN SIGNAAL ADCP

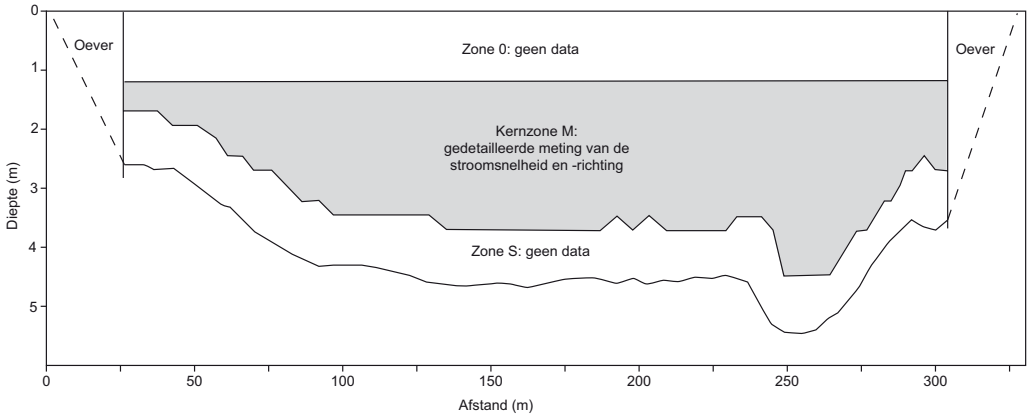


Alleen de snelheid uit de hoofdbundel is gebruikt, de signaalsterkte van de zijbundels is 10 tot 20 dB zwakker (ruis) dan van de hoofdbundel. Bij een ADCP met meerdere transducenten (twee tot vier) maken de transducenten een hoek van 10° tot 30° (merk afhankelijk) met elkaar, zie Figuur 7-25.

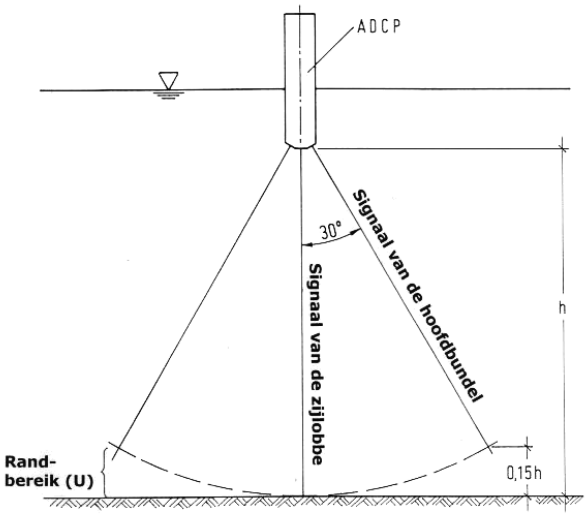
De stroomsnelheid wordt in lagen met een hoogte Δh gemeten en als dwars over de rivier wordt gemeten, is er dus snelheidsinformatie in een laag met een bepaalde breedte, spreekt men van cellen, zie Figuur 7-25. De stroomsnelheid wordt per cel gemeten gedurende een tijdsinterval van bijvoorbeeld 2 tot 10 seconden. Het instrument sommeert de gemeten snelheden over de cellen (gewogen met het celoppervlak) tot een debiet, zie Figuur 7-25. Dat levert het debiet op in het bemeten deel van de dwarsdoorsnede. De onbemeten zones in de dwarsdoorsnede worden berekend.

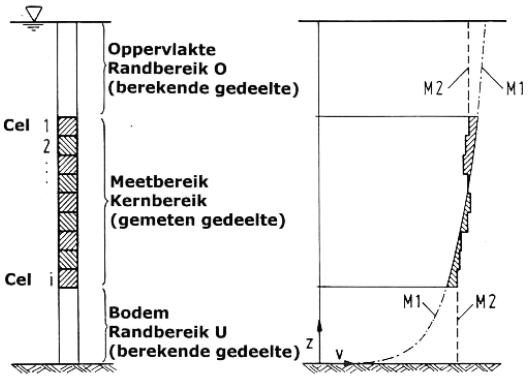
Nabij de bodem en het wateroppervlak, kan een ADCP de stroomsnelheid niet meten. Nabij het oppervlak niet omdat het instrument onderwater hangt, bijvoorbeeld onder een meetschip en in de eerste laag (zone O) zijn de meetresultaten onbetrouwbaar (instrument eigenschap). Ook de laag bij de bodem (zone S) levert onbetrouwbare meetresultaten op aangezien de zijlobben de bodem raken, zie Figuur 7-25. Op de vaste bodem kan een sliblaag liggen of bij hogere stroomsnelheden beweegt de bodem als gevolg van sedimenttransport. Rijkswaterstaat Limburg streeft naar een betrouwbare meting, waarbij minstens circa 70% van de kernzone wordt bemeten en 30% van het profiel wordt berekend (zie Figuur 7-24 en zoals aangegeven in Figuur 7-25). Nabij de oever kan een meetschip meestal niet meten als gevolg van ondiepten of kades.

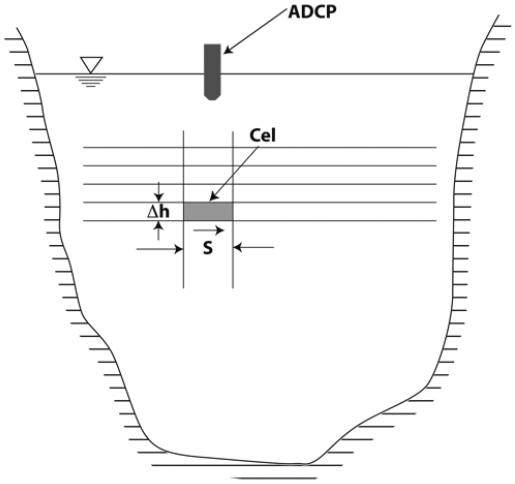
FIGUUR 7-24 **VOORBEELD BETROUWBARE EN ONBETROUWBARE ZONES IN HET DWARSPROFIEL BIJ ADCP METINGEN (FIGUUR RIJKSWATERSTAAT)**



FIGUUR 7-25 PRINCIPE ADCP, SNELHEID METEN EN VERWERKEN TOT DEBIET







Extrapolatiemethode M1:

$v = a \cdot z^b$

b = gekozen

a = berekend uit de snelheden van het kernbereik

Extrapolatiemethode M2:

v = v (cel 1)
in berekende gedeelte van de oppervlakte
(= randbereik O)

v = v (cel i)
in berekende gedeelte van de bodem
(= randbereik U)

$\vec{v}$: Stroomsnelheid in een cel

$\vec{s}$: Afgelegde weg van de boot

ΔQ : Debiet van een cel

$\Delta Q = |\vec{v} \times \vec{s}| \cdot \Delta h$

Δh : Hoogte van de cellen

Er zijn verschillende opstellingen van de ADCP mogelijk:
- verticaal naar beneden opgestelde ADCP, bijvoorbeeld onder een meetschip;
- horizontaal opgestelde ADCP, meestal een vaste opstelling waarmee de totale afvoer of een deel van de afvoer (bij brede waterlopen) kan worden bepaald;
- verticaal omhoog opgestelde ADCP, op de bodem gemonteerd instrument om gedurende enige tijd continu stroomsnelheden te registreren.

Er zijn enkele specifieke verschillen tussen verticaal en horizontaal opgestelde ADCP's:
- Voor de horizontaal opgesteld ADCP's zijn, gezien de veel langere meetlengtes dan bij een verticale opgestelde ADCP, de gevolgen voor de gevoeligheid van variaties in de geluidssnelheid veel groter. De onnauwkeurigheid van een horizontaal opgestelde ADCP is om die reden alleen al wat groter dan van een verticaal opgestelde ADCP.
- Horizontaal opgestelde ADCP's worden gebruikt om langdurig de afvoer in een waterloop te meten. De H-ADCP kan vanwege de bodem en oever-reflecties niet het gehele doorstroomprofiel bemeten. Ook de openingshoek van de bundels en de hoek tussen de afzonderlijke bundels is van belang. Met een kleine openingshoek kan er verder in de breedte worden gemeten. Met de gemeten stroomsnelheden kan met de K-factor methode de afvoer worden afgeleid. De K-factormethode is besproken in par. 7.3.2. Omdat het bereik /aantal bruikbare cellen afhankelijk is van de locatie zal niet dezelfde K-factor als voor een looptijdmeting kunnen worden gebruikt.
- Vooral bij langdurig optredende lage snelheden van het water zal er geen correlatie bestaan tussen de beweging van de deeltjes in de watermassa die door de ene bundel wordt bemonsterd en de beweging van de deeltjes in de watermassa die door de andere bundel wordt bemonsterd. De nauwkeurigheid bij lage snelheden neemt dan ook sterk af.
- Voor verticale ADCP's geldt dat, om de stroomsnelheid in drie richtingen te meten, er 3 à 4 bundels zijn die onder een bepaalde hoek uit elkaar lopen. De metingen per bundel worden dus niet in de dezelfde watermassa verricht. Dit stelt zeer hoge eisen aan de correlatie van de beweging van de deeltjes in deze verschillende watermassa's om een betrouwbaar gemeten de drie-dimensionale snelheidsvector te verkrijgen.
- In rivieren met loskorrelig bodemmateriaal is het sediment bij hoge afvoeren in beweging. Door het bodemtransport lijkt het alsof de bodem hoger ligt dan in werkelijkheid het geval is. Daarnaast zorgt het transport van bodemmateriaal voor een onjuiste nulreferentie van het schip trimaran. De ADCP gaat uit van een stilstaande bodem en bepaalt de snelheid in de cellen ten opzichte van de bodem (bottom-track). Als de bodem 'beweegt' ten gevolge van bodemtransport, moet de nulreferentie op een andere wijze worden bepaald (varen in een lus of DGPS). Met een bewegende bodem worden stroomsnelheden onderschat, de nulreferentie beweegt dan namelijk mee.
- Verticaal op de bodem opgestelde ADCP's meten de stroomsnelheidsverdeling in een verticaal, maar met de vaste opstelling kan langdurig worden gemeten in tegenstelling tot bijvoorbeeld een ADCP onder een meetschip. Dezelfde beperkingen van de ADCP gelden als genoemd bij de moving-boat methode.

Voor grote waterlopen wordt de moving-boat methode in Nederland vaak toegepast. Het meetschip is dan uitgerust met een dieptemeter, hoewel de ADCP de diepte onder het schip ook kan meten en een GPS heeft om de ruimtelijke positie te bepalen.

In kleinere waterlopen kunnen akoestische (hand-)instrumenten worden gebruikt die op een stang zijn gemonteerd of op een catamaran/trimaran, zie Foto 7-2 en Foto 7-3. De instrumenten die op een stang zijn gemonteerd zijn geschikt voor puntmetingen of metingen in een

verticaal en werken anders dan een ADCP. Het instrument zendt een geluidsgolf uit, meet de echo en herhaalt na een korte tussenpoos een tweede geluidsgolf met echometing. Het verschil tussen de echo's is een maat voor de afstand. Uit deling door de tijd volgt de stroomsnelheid. Tevens wordt de waterdiepte gemeten door het instrument.

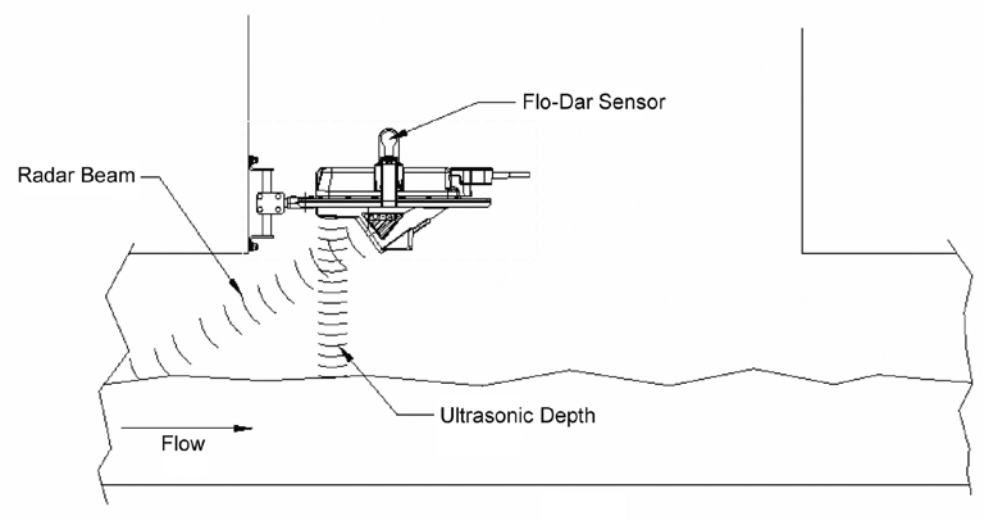
FOTO 7-2 **VOORBEELDEN VAN VARENDE ADCP'S (FOTO'S: RIJKSWATERSTAAT, TELEDYNE RD INSTRUMENTS, WS NOORDERZIJLVEST)**

FOTO 7-3 **VOORBEELDEN AKOESTISCHE MEETINSTRUMENTEN (STANG EN CATAMARAN) (FOTO'S: OTT)**

7.3.4 RADAR SNELHEIDSMETERS

Dopplerradar is radar die gebruik maakt van het Dopplereffect om informatie te verkrijgen over de snelheid van een object op afstand. De radar doet dit door een signaal uit te zenden naar het object en de reflectie van het signaal op te vangen en de frequentie van het gereflecteerde signaal te vergelijken met de frequentie van het primair uitgezonden signaal. Het verschil in frequentie, het Dopplerverschil, is een maat voor de snelheid van het object relatief aan de radarbron en de richting van het signaal.

FIGUUR 7-26 PRINCIPE VAN DE DOPPLER RADAR SNELHEIDSMETING (BRON: MARSH-MCBIRNEY)



In formulevorm:

$$F_d = F_r - F_t = 2v\frac{F_t}{c - v} \tag{7-20}$$

Waarin,

F_t = frequentie van het uitgezonden signaal [Hz]
F_r = frequentie van het gereflecteerde signaal [Hz]
F_d = Dopplerverschil [Hz]
v = snelheid van het object [m/s]
c = snelheid van het uitgezonden signaal [m/s]

Het uitgezonden signaal is een microgolf met een frequentie van bijvoorbeeld 24 GHz en een voortplantingssnelheid gelijk aan de lichtsnelheid. Omdat $v << c$ geldt:

$$F_d \approx 2v\frac{F_t}{c} \tag{7-21}$$

In combinatie met een akoestische niveaumeter kan de gemeten snelheid tot een debiet worden omgerekend. Stromingscondities en profiel moeten wel uniform zijn.

De onnauwkeurigheid van de radar snelheidsmeting bedraagt circa 0,5 % met een meetbereik van 0,23 tot 6,1 m/s. De onnauwkeurigheid van de debietmeting bedraagt circa 5% voor meting in een profiel met uniforme stroming. De onnauwkeurigheid van de akoestische niveaumeting is circa 1%.

FOTO 7-4 VOORBEELDEN VAN DOPPLER-RADAR MEETINSTRUMENTEN (FOTO'S: FLOW-TRONIC)

7.3.5 ELEKTROMAGNETISCHE SNELHEIDSMETERS

Elektromagnetische sensoren kunnen worden gebruikt voor het meten van de stroomsnelheid van een geleidende vloeistof. De meest bekende sensor is die, welke op dezelfde wijze als een propeller aan een verticale stang wordt bevestigd. Er zijn echter ook uitvoeringen die vanaf een meetboot of een brug aan een kabel worden toegepast. Doordat het instrument geen bewegende delen bevat, is het ook zeer geschikt om stroomsnelheden tussen waterplanten te meten, bijvoorbeeld voor hydro-biologisch onderzoek.

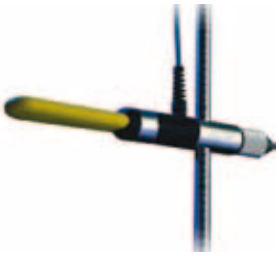
Het principe van deze sensoren berust op de wet van Faraday: "De spanning die wordt opgewekt door een geleider die loodrecht door een homogeen magnetisch veld beweegt, is evenredig met de snelheid waarmee deze geleider door het magnetisch veld beweegt".
Het benodigde magnetische veld wordt opgewekt door 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. Hieruit is de stroomsnelheid van het water te berekenen:

$$E = K \cdot v \cdot B \cdot D$$

met:

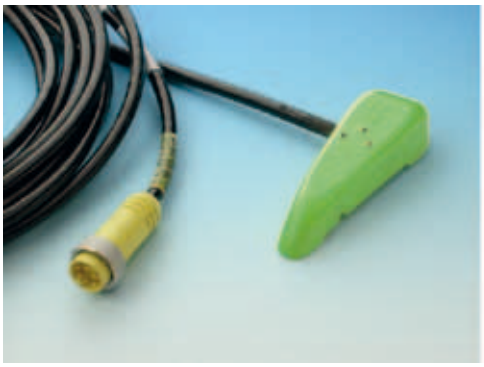
E	= potentiaalverschil (spanning) tussen de elektrodes [V]
K	= constante [-]
v	= stroomsnelheid van het water [m/s]
B	= kracht van het magnetisch veld [Vs/m^2]
D	= afstand tussen de elektroden [m]

ELEKTRO-MAGNETISCHE SENSOR



Deze formule is opgenomen in de uitlees-unit, zodat op het display direct de gemiddelde stroomsnelheid over de gekozen meettijd kan worden afgelezen. Voor de gekozen meettijd gelden dezelfde opmerkingen als vermeld bij de snelheidsmeters van de propeller en cup-type. Deze minimum meettijd van 30 seconden is nodig, omdat de snelheid in een bepaald punt van de stroming fluctueert rond een gemiddelde waarde door het turbulente karakter van de stroming. Bij lage stroomsnelheden verdient het daarom aanbeveling een langere meettijd van 60 à 100 seconden te hanteren ter wille van de gewenste nauwkeurigheid.

FOTO 7-5 VOORBEELDEN VAN ELEKTROMAGNETISCHE MEETINSTRUMENTEN (FOTO'S FLOW-TRONIC)



De grenslaag rondom de sensor speelt een belangrijke rol bij de gevoeligheid van de meter. Dat betekent, dat elektro-magnetische stroomsnelheidsmeters erg gevoelig zijn voor aangroei en vervuiling en goed schoon moeten worden gehouden.
Evenals meters van het propeller- en cup-type hebben elektromagnetische snelheidsmeters altijd een calibratie nodig, die in dit geval het verband legt tussen stroomsnelheid en gemeten spanning. Deze calibratie dient in principe regelmatig te worden herhaald.
Volgens fabrieksopgave bedraagt de nauwkeurigheid 1% van de gemeten waarde. Een instabiliteit van de nul-waarde kan echter vooral bij lage stroomsnelheden aanleiding geven tot grotere afwijkingen (circa 10 % bij 2 cm/s, circa 3 % bij 10 cm/s).

7.3.6 MECHANISCHE SNELHEIDSMETERS

Bij de propeller en het cup-type stroomsnelheidsmeters wordt het aantal omwentelingen gedurende een bepaalde tijd geteld en meestal digitaal uitgelezen. Er bestaat een vrijwel rechtlijnig verband tussen de omwentelingssnelheid van de as en de stroomsnelheid van het water.

PROPELLER MEETINSTRUMENT

De meters kunnen worden onderscheiden in meters met een watergesmeerde as (relatief goedkoop) en meters met een oliegesmeerde as (geen vervuiling). De meeste fabrikanten leveren verschillende propellers met een dusdanige uiteenlopende vormgeving, dat ze voor verschillende snelheidsbereiken en in verschillende situaties geschikt zijn. De kleinste propellers voor veldwerk hebben een diameter van 2 tot 5 cm en worden gebruikt aan een dunne stang, waarbij de meetassistent meestal in de waterloop staat (de zogenaamde “wading” methode. Voor het meten aan een stang vanaf een brug worden meestal dikkere en langere stangen toegepast en kunnen ook propellers met een grotere diameter tot circa 12,5 cm worden toegepast. Bij het meten aan een stang wordt voor het eenvoudig positioneren van de propeller in verticale richting vaak gebruikt gemaakt van buizensets, die om de stang schuiven. De stang blijft op de bodem staan en de buis waaraan de propeller nu is bevestigd, schuift om de stang op en neer en kan op de gewenste hoogte worden gefixeerd.

Bij de methoden waarbij de propeller aan een kabel is bevestigd, moeten de propeller en de behuizing van de as samen zodanig zwaar zijn, dat deze bij de te meten stroomsnelheden op hun plaats blijven. Vaak wordt dit geheel nog voorzien van een “staartvin” om de propeller parallel aan de stroomrichting te houden. De gebruikte diameters propeller variëren van circa 8 tot 12,5 cm. Alle snelheidsmeters worden geijkt in de fabriek.

Goed schoonhouden van de propellers en regelmatig verversen van de olie waarin de as beweegt, voorkomt afwijkingen van deze calibratie. Vooral de as waarop de propeller wordt gemonteerd is kwetsbaar. Wanneer deze niet meer zuiver recht is, kunnen afwijkingen optreden. Het is dan raadzaam deze te vervangen door een nieuwe. De aanloopsnelheid van de meeste propellers bedraagt circa 0,03 à 0,05 m/s. Voor betrouwbare metingen wordt echter circa 0,10 m/s als ondergrens gehanteerd.

Voor de stroomsnelheidsmeters van het propeller of cup-type wordt na het in positie brengen van de snelheidsmeter en een korte aanloopperiode (circa 30 seconden), het aantal omwentelingen gedurende 30 à 60 seconden geregistreerd. Deze minimum meettijd van 30 seconden is nodig, omdat de snelheid in een bepaald punt van de stroming fluctueert rond een gemiddelde waarde door het turbulente karakter van de stroming. Bij lage stroomsnelheden verdient het daarom aanbeveling een langere meettijd van 60 à 100 seconden te hanteren ter wille van de gewenste nauwkeurigheid. Op veel telkastjes is een voorziening aangebracht die in plaats van het aantal omwentelingen de tijd meet die nodig is voor een ingesteld aantal omwentelingen. Dit kan echter aanleiding geven tot vrij korte meettijden, hetgeen om bovenstaande reden niet aan te bevelen is.

7.4 WATERSTANDSMETINGEN

De afvoer van een watergang op een bepaald tijdstip is altijd gekoppeld aan de waterstand(en) van dat moment. Het meten van waterstanden is dan ook een onmisbaar onderdeel van de afvoermeting. Bij de beschrijving van de meetmethoden voor het debiet (hfst. 5 en 6) is aangegeven welke betekenis de waterstandsmeting voor de bepaling van het debiet heeft.
Par. 7.4.2 geeft een overzicht van de meest gangbare meetmethoden voor de bepaling van de waterstand en de eigenschappen van deze meetmethoden. Voor meer uitgebreide informatie wordt verwezen naar [Lit. 24], de ISO standaarden (par. 7.4.3) en de informatie van leveranciers van de instrumenten.

Over de plaatsing van de waterstandsmeter in relatie tot de debietbepaling is een en ander aangegeven in de hoofdstukken 5 en 6. Algemene opstellingseisen zijn vermeld in hfst. 10.

Voor een aantal instrumenten voor waterstandsmeting is het wenselijk of vereist voor een nauwkeurige meting om een peilbuis (stilling well) te gebruiken. De eigenschappen van de peilbuis voor een oppervlaktewaterstandsmeting zijn beschreven in par. 7.4.1.

Voor de plaatsingseisen van de waterstandsmeting in relatie tot de debietmeetmethode wordt verwezen naar de betreffende hoofdstukken over de meetmethoden en de meetprincipes.

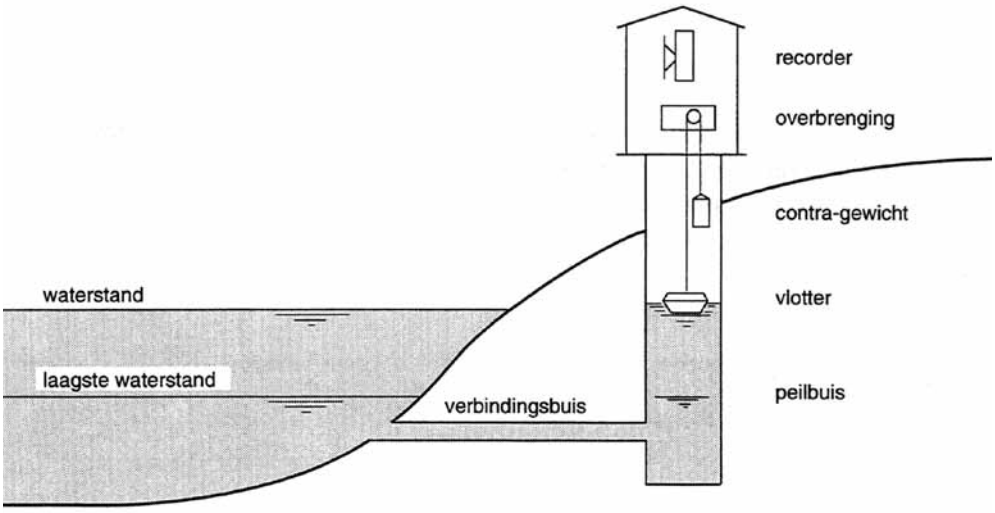
7.4.1 PEILBUIS (STILLING WELL)

Een peilbuis (stilling well) geeft de mogelijkheid de waterstand niet direct in de waterloop te meten, maar in een aparte buis. De peilbuis is geperforeerd of staat, bij plaatsing in het talud, in verbinding met de waterloop via een verbindingsbuis met een kleinere diameter. Het meten in een peilbuis heeft de volgende voordelen:

- de buis biedt bescherming aan de apparatuur (als de buis in het talud is geplaatst ook tegen vorst);
- in een correct gedimensioneerde en correct opgestelde peilbuis worden waterstandsfluctuaties door bijvoorbeeld wind en scheepvaart (korte golven) vrijwel helemaal uitgedempt.

Eén van de functies van de peilbuis is het uitdempen van korte golven. De diameter van de verbindingsbuis mag daarom niet te groot zijn, maar tegelijkertijd moet de weerstand in de verbindingsbuis bij een verandering van de waterstand zo klein mogelijk zijn. Het hierdoor veroorzaakte verval veroorzaakt een systematische fout: een stijgende waterstand wordt altijd te laag, een dalende waterstand te hoog geregistreerd. Een vuistregel voor de diameter van een verbindingsbuis is, dat de diameter van de verbindingsbuis minimaal 10 procent bedraagt van de diameter van de peilbuis. Bij toepassing van een grote diameter, is het mogelijk dat deze verstopt raakt doordat deze toegankelijk wordt voor bepaalde diersoorten (kikkers, ratten). Ook in een te kleine buis kan verstopping optreden als gevolg van slakjes, sediment e.d. In beide gevallen kan een korf(je) verstopping voorkomen.

FIGUUR 7-27 PEILBUIS (STILLING WELL)



De verbindingsbuis moet bij voorkeur niet uitsteken uit het talud ("*flush*"), waarbij het talud over een zekere lengte stabiel moet zijn en vlak afgewerkt. Als de verbindingsbuis wel uitsteekt uit het talud, moet dit haaks op de stroomrichting zijn. Bij hoge stroomsnelheden kunnen dan echter aanzienlijke verschillen tussen de in de vlotterbuis gemeten waterstand en de werkelijke waterstand in de waterloop optreden als gevolg van onderdruk (schoorsteeneffect). De in de peilbuis gemeten waterstand zal te laag zijn. De grootte van de afwijking van de werkelijke waterstand hangt af van de stroomsnelheid bij de uitmonding van de verbindingsbuis, de horizontale afstand van de uitmonding tot het talud en de diameter van de verbindingsbuis [Lit. 1].

De voorkeursopstelling van een peilbuis is die plaatsing in het talud met een niet uitstekende verbindingsbuis naar de waterloop.
In die situaties waarbij veel sedimenttransport in de waterloop optreedt, kan de opening naar de peilbuis dichtslibben. Een zo hoog mogelijke plaatsing hiervan, maar nog wel beneden de laagste te verwachten waterstand, is daarom raadzaam.

7.4.2 OVERZICHT WATERSTANDSMETERS

Onderstaand is een kort overzicht gegeven van de meest gangbare meetmethoden voor de bepaling van de waterstand en de eigenschappen van deze meetmethoden. Voor meer uitgebreide informatie wordt verwezen naar [Lit. 24], de ISO standaarden (par. 7.4.3) en de informatie van leveranciers van de instrumenten.

TABEL 7-3 EIGENSCHAPPEN WATERSTANDSMEETMETHODEN

Waterstands-meetmethode	Peilbuis opstelling	Meet-bereik	Onnauwkeurigheid	Opmerkingen
peilschaal	nvt		1-3 cm	
vlotter/DNM	vereist	0-10 m	0,2-0,4 cm	Diameter vlotter niet kleiner dan 8 cm
drukdoos	gewenst	0-40 m	1-5 cm (eenvoudig) 0,1-0,2% ingesteld bereik (geavanceerd)	Diameter 10-45 mm
borrelbuis	niet	0-8 m	0,5-1,5 cm	Toegepast als vlotter of drukopnemer niet mogelijk is
ultrageluid	ongewenst	0-10 m	0,2-1 cm	Vrijhangende opstelling
radar/DNR	mogelijk	0,01-1,5 m speciale uitvoering tot 6 m	1 cm	Vrijhangende opstelling

PEILSCHAAL

Een peilschaal verschaft globale en directe informatie over de waterstand. Als onderdeel van de debietmeting geeft een peilschaal te onnauwkeurige informatie. Wel is het aan te bevelen om in de nabijheid van een debietmeetstation een of meerdere peilschalen te beschikken voor een snelle controle.

VLOTTER/DNM

Een vlotter bestaat uit een drijvend lichaam die, geplaatst in een peilbuis, meebeweegt met de veranderingen van de waterstand. Het drijvend lichaam is verbonden aan een kabel die strak wordt gehouden door een contragewicht. De kabel of tape waaraan de vlotter is bevestigd loopt over een vlotterwiel en wordt strak gehouden door een contragewicht. Het vlotterwiel en de wielas zorgen voor de transmissie van de vlotterbeweging naar een recorder. Bij voorkeur is een metalen lint met ponsgaten te gebruiken, die aangrijpen op passende pinnen aangebracht op het vlotterwiel. Hierdoor wordt slippen en verschuiven voorkomen.

Voordat het vlotterwiel in beweging komt als gevolg van een waterstandsverandering moet een (kleine) weerstand op de wielas worden overwonnen. Deze weerstand veroorzaakt een naijling van de vlotterbeweging ten opzichte van een stijging of daling van de waterstand. Dit veroorzaakt een geringe systematische fout: een stijgende waterstand wordt altijd te laag, een dalende waterstand altijd te hoog geregistreerd. Deze fout kan worden beperkt door de vlotterdiameter of de straal van het vlotterwiel voldoende groot te kiezen. Daarom wordt aangeraden de diameter van een vlotter niet kleiner te kiezen dan 8 cm.

Functionele eisen die aan een vlottersysteem worden gesteld zijn:
- de hoogte van de peilbuis en de kabellengte moeten zo worden ontworpen, dat het gehele bereik aan waterstanden royaal kan worden bemeten;
- de dimensies van de vlotter en het contragewicht en de kwaliteit van de onderdelen van het mechanische gedeelte moeten voldoende nauwkeurig en betrouwbaar zijn;
- het materiaal waarvan de vlotter is gemaakt moet duurzaam en corrosie-bestendig zijn.

Daarnaast moet aangroei (dus een geleidelijke toename van het gewicht) worden voorkomen. De toepassing van roestvast staal of kunststof wordt daarom afgeraden, een goed materiaal is bijvoorbeeld koper. De vlotter moet lekvrij zijn; de vlotter moet vrij van de wand op en neer kunnen bewegen en de tape of het vlotterlint mag niet gedraaid of geknikt zijn.

Teneinde aan deze functionele eisen te voldoen, moet er bij het ontwerp voor worden gezorgd, dat bij een stijging van de vlotter het dalende contragewicht de vlotter niet kan raken maar altijd boven het niveau van de vlotter blijft of deze vrij kan passeren. Ook moet het contragewicht niet gedeeltelijk onder water terecht komen bij een bepaalde waterstand, omdat daardoor een fout optreedt in de meting van de waterstand. Deze systematische meetfout kan worden voorkomen door de peilbuis zo lang te maken, dat het contragewicht nooit het vlotterwiel (bij lage waterstand) of de vlotter (bij hoge waterstand) kan raken, óf door het contragewicht in een aparte waterdichte buis te hangen.

Een beschrijving van de principes van de vlottermeting en de dimensionering daarvan is weergegeven in [Lit. 24].

De Rijkswaterstaat Digitale Niveaumeter (DNM) is doorgaans gebaseerd op een vlottersysteem.

Vlottersystemen hebben als nadeel: blijven steken, vastvriezen en verzanding (zie ook de beschrijving van de peilbuis par. 7.4.1). Dit is gedeeltelijk te voorkomen met onderhoud.

DRUKDOOS

Bij drukopnemers wordt de waterstand, gemeten als de waterdruk, omgezet naar een elektrisch signaal. Over het algemeen wordt ernaar gestreefd dat de grootte van dit signaal recht evenredig is met de waterstand. Voor het omzetten van de druk kan gebruik worden gemaakt van een condensator (capacitieve sensor) of een piëzoresistief element.
Bij gebruik van een condensator als *meetwaarde-omvormer* is één plaat van de condensator vast in de behuizing gemonteerd. De tweede plaat is door middel van een staaf verbonden met een membraan. Als dit membraan wordt vervormd onder invloed van een drukverandering, beweegt ook de condensatorplaat, waardoor de capaciteit van de condensator verandert. Deze verandering van de capaciteit veroorzaakt, als op de condensator een constante wisselspanning staat, ook een verandering van de stroom door de condensator. De vorm van de condensator is zodanig, dat deze stroomverandering recht evenredig is met de verplaatsing van het membraan (en dus met de waterstand).

Bij piëzoresistieve elementen wordt de waterdruk via een dun scheidingsmembraan overgebracht op een speciale olie. De olie brengt de druk over op een meetelement, dat meestal bestaat uit een silicium chip met daarin vier ingediffundeerde weerstanden. Onder invloed van de druk veranderen de weerstanden, die zijn geplaatst in een brugschakeling. Als over de brugschakeling een constante spanning wordt aangelegd, verandert de stroom door de brug wanneer de weerstanden veranderen. Deze verandering van de stroomsterkte is weer een maat voor de waterstandsverandering.

Drukopnemers worden veelal geplaatst in een peilbuis die, indien mogelijk, het beste aan een kunstwerk direct in het water kan worden bevestigd (niet zo bij meetstuwen/goten). De onderkant van de buis kan open zijn, van boven wordt de buis afgesloten met een deksel. Deze afsluiting mag echter niet volledig zijn, zodat in de buis wel de atmosferische druk blijft gehandhaafd. Een druksensor wordt ook vaak aan het landhoofd van een kunstwerk bevestigd (niet zo bij meetstuwen/goten) in plaats van in een peilbuis. Nadeel is dat golfslag invloed heeft, maar dit wordt weer vereffend door het gemiddelde te nemen van een groot aantal waterstandssamples.

Drukopnemers bestaan altijd uit een mechanisch en een elektronisch gedeelte, die gevoelig kunnen zijn voor temperatuurveranderingen, het in de tijd verslappen van de mechanische componenten; verstopt raken van de ontluchtingscapillair bijvoorbeeld door vocht en blootstelling aan drukken hoger of lager dan het opgegeven meetbereik. Voor het bereiken van een zo groot mogelijke nauwkeurigheid is het daarom aan te raden, om het meetbereik van de drukopnemer zo goed mogelijk in overeenstemming met de te meten waterhoogten te kiezen.

BORRELBUIS

De borrelbuis is gebaseerd op de meting van de druk die nodig is om een belletje door een opening van een meetbuis te persen tegen de waterdruk. De belletjes worden geproduceerd met een kleine compressor die stikstof of lucht samenperst en dat met een constant debiet door de opening stroomt. De druk die de gasbelletjes ondervindt, komt overeen met de hydrostatische druk boven de uitstroomopening en wordt overgebracht op een manometer.

Voorkomen moet worden dat windgolven de meting beïnvloeden. Daartoe kan een demper worden geïnstalleerd aan het eind van de meetbuis.

Borrelbuizen worden daar toegepast waar de opstelling van een vlotter of een drukdoos moeilijk en/of duur is. Bij de spuisluis IJmuiden zijn borrelbuizen opgesteld in de spuikokers.

ULTRAGELUID

Ultrasonore opnemers worden gebruikt voor continue metingen van de waterstand in open waterlopen. De sensor, die wordt geplaatst boven het wateroppervlak (zonder contact te maken), zendt ultrasone pulsen uit. Deze pulsen worden gereflecteerd door het wateroppervlak en opgevangen door de sensor. De looptijd, dat wil zeggen de tijd tussen het uitzenden en weer ontvangen van de gereflecteerde puls, wordt elektronisch gemeten. Deze looptijd wordt omgevormd tot een uitgangssignaal, dat recht evenredig is met de afstand tot het wateroppervlak, en dus ook met de waterstand. Door schuimvorming op het wateroppervlak en golven kunnen problemen optreden, die kunnen worden ondervangen door de opnemer in een peilbuis te plaatsen. Er zijn ook sensoren die onder de waterspiegel worden opgesteld. Het meetprincipe is hetzelfde, alleen is de voortplantingssnelheid van de puls in water aanzienlijk hoger (1450-1480 m/s) dan van die in lucht (330-340 m/s).

Ultrasonore opnemers zijn gevoelig voor variaties in luchttemperatuur en vochtigheid en, voor de onder water opgestelde typen, voor variaties in temperatuur, druk, zoutgehalte en de aanwezigheid van luchtbellen. Deze factoren beïnvloeden de looptijd van de puls tussen de sensor en de waterspiegel. De sensoren zijn goed bruikbaar, mits de afstand van de waterspiegel tot de sensor niet te groot is en er voor temperatuurveranderingen wordt gecorrigeerd. De afstand van de sensor tot de waterspiegel in relatie tot het meetbereik dient te worden opgegeven door de leverancier. De meetnauwkeurigheid van een sensor is onder andere een functie van deze factor.

Regelmatig schoonhouden van de meetbuis is noodzakelijk in verband met spinnen en spinrag die de meting ongunstig kunnen beïnvloeden.

RADAR/DNR

Radar kan worden toegepast voor hoogtemeting. Het principe komt overeen met de ultrasone hoogtemeting. Er worden korte pulsen uitgezonden, die teruggekaatst worden door het wateroppervlak. De tijd tussen het verzenden en het terugontvangen van de puls is de looptijd. Deze tijd is bepalend voor de hoogte van de waterstand. De relatie tussen de gemeten tijd t en de afstand L van de sensor tot het waterniveau is als volgt:

$$t = \frac{2L}{c} \tag{7-22}$$

Daarin is c de lichtsnelheid.

Het belangrijkste verschil met conventionele radar, is de afstand waarover gemeten wordt. De te meten afstand is kort, waardoor er een andere (kortere) pulsbreedte nodig is. Dit om te voorkomen dat het front van de puls alweer bij de ontvanger teruggekeerd is, terwijl het eind van de puls nog niet uitgezonden is. Bij niveaumetingen wordt meestal een pulsbreedte van 1 ns (nanoseconde) gebruikt. Een ander belangrijk verschil is dat bij niveaumetingen alleen een afstandsmeting wordt gedaan, terwijl bij conventionele radar ook de richting en soms de snelheid wordt gemeten. Voor de draaggolf is wettelijk vastgelegd dat bij niveaumetingen een frequentie van 5,8 GHz gebruikt dient te worden.

Een bijzonder voordeel van meting met radar, is dat elektromagnetische golven geen medium nodig hebben om zich voort te planten, en geluid wel. Daardoor kan de sensor opgesteld worden buiten het te meten water, bijvoorbeeld achter glas of een andere stof die elektromagnetische golven doorlaat. Daardoor is dit type niveaumeter geschikt voor toepassing in de industrie.

De Rijkswaterstaat Digitale Radarmeter (DNR) is gebaseerd op dit principe en wordt vrijhangend of in een peilbuis toegepast.

7.4.3 ISO-STANDAARDEN

De ISO-standaarden die betrekking hebben op waterstandsmetingen zijn de volgende:

- ISO 1100-1 Establisment and operation of a gauging station
- ISO 4373 Water level measuring devices

7.5 DIEPTE- EN POSITIEMETINGEN

Een goede kennis van het doorstroomprofiel is essentieel voor bepaling van het debiet. Inmeten van het dwarsprofiel kan met traditionele methoden of met behulp van echoloding (par. 7.5.1). De traditionele methoden die gebruik maken van staven, kabels en gewichten is beschreven in de ISO 3454. Voor verdere uitleg wordt naar deze publicatie verwezen. Het gebruik van diverse toepassingen van GPS is beschreven in par. 7.5.2.

Voor een aantal meetmethoden is het nodig de positie te kennen van het meetinstrument en de snelheid van het meetinstrument ten opzichte van de bodem (par. 7.5.2 en 7.5.3). Dit geldt voor de velocity-area methode en de Doppler methode. In apparatuur die voor deze meetmethoden wordt gebruikt kan ook een dieptemeting zijn ingebouwd, doorgaans op basis van echoloding.

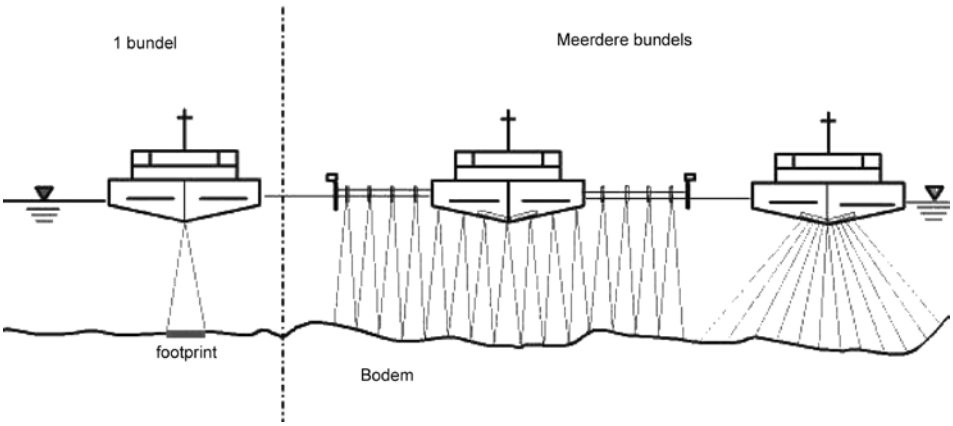
7.5.1 ECHOLODING (SINGLE-BEAM)

Echoloding is de gangbare methode om de bodem van een rivier op te nemen. Met een geluidssignaal (bundel) vanaf de zijkant van een vaartuig wordt de diepte bepaald op basis van de tijd die verstrijkt tussen het zenden en ontvangen van het signaal. Gezien de snelle transmissietijd van het akoestisch signaal wordt een praktisch continue meting van de waterbodem verricht.
De meting moet worden aangevuld met de diepte die de zender in het water steekt. Het nulpunt van de echoloder dient aan het begin van de loding te worden opgemeten en gecalibreerd.

Wanneer gebruik gemaakt wordt van één bundel spreekt men van single-beam echoloding. Deze methode volstaat voor het opnemen van het profiel ten behoeve van de praktijk van het debietmeten voor rivieren. Om de bodemligging te peilen wordt tegenwoordig gebruik gemaakt van multi-beamsystemen die in een keer een brede stroom van de bodem meten.

FIGUUR 7-28 SINGLE-BEAM ECHOLODING

Verschillende echosounder systemen: (L) singlebeam echolood, (M) akoestisch vegen en (R) multibeam echosounder



Zoals bij alle akoestische metingen varieert de snelheid van geluid in water met de watertemperatuur en de dichtheid.
Echoloders werken met een frequentie van 30 en/of 210 kHz. De hoge frequentie levert de bovenlaag van de bodem, ongeacht de samenstelling. Bij een zachte sliblaag dringt de lage frequentie verder door in de sliblaag en kan de ligging van de harde bodem worden bepaald.

Voor de positiebepaling van het vaartuig en conversie van de gemeten waarden naar de NAP-referentie wordt kinematische DGPS (zie par. 7.5.2) toegepast.

7.5.2 DGPS

Het GPS (Global Positioning System) is gebaseerd op een wereldwijd driedimensionaal referentiesysteem en de constellatie van 24 satellieten die op een afstand van 20.000 km boven de aarde een positie hebben. De satellieten fungeren als referentiepunten voor ontvangers op de grond die met behulp van triangulatie hun positie bepalen.

FOTO 7-6 LANDMETEN MET GPS (FOTO: AQUAVISION)

GPS wordt bij het debietmeten voor verschillende doeleinden gebruikt:

- Het meten van de dwarsdoorsnede en lengteverloop van een rivier/waterloop;
- Voor positievastlegging bij een aantal meetmethoden zoals de velocity-area methode en de Doppler methode.

De nauwkeurigheid loopt van 100 m met één ontvanger tot 1 cm met twee ontvangers op basis van Differential GPS (DGPS). Onderscheid is te maken in het x,y-vlak en de hoogte (h). De nauwkeurigheid van een gewone GPS voor de hoogte is in de praktijk onvoldoende (1-5 cm) voor nauwkeurige hoogtebepalingen voor bijvoorbeeld het inmeten van peilschalen.

De basis van GPS is de triangulatie met de satellieten. Hiertoe meet een GPS ontvanger de afstand gebruikmakend van de reistijd van radiosignalen. Om deze tijd te meten is een zeer nauwkeurige timing nodig voor de GPS, waarbij exact bekend moet zijn waar de satelliet in de ruimte gepositioneerd staat. Er moet gecorrigeerd worden voor vertraging die het radiosignaal oploopt als het zich voortplant door de atmosfeer.
DGPS maakt gebruik van twee ontvangers, één op een vaste positie en één die gebruikt wordt voor de feitelijke positiemeting met een communicatieverbinding met de vaste ontvanger. De mobiele ontvanger moet verbonden zijn met tenminste vier satellieten om de hoge nauwkeurigheid van 1 cm het te bereiken. In een omgeving met hoge gebouwen of veel bomen kan dit een probleem zijn.
Kinematische DGPS metingen maken gebruik van het real-time kinematic (RTK) positioneringssysteem en leveren zeer hoge nauwkeurigheid (10 tot 100 maal nauwkeuriger dan conventionele DGPS). Hierbij levert de referentieontvanger real time een correctiesignaal op het

GPS-signaal, waardoor de mobiele ontvanger zijn positie direct nauwkeurig kan bepalen, binnen een straal van 20 tot 30 km van de referentieontvanger.

De conversie van DGPS data naar locale x,y,h waarden (NAP en Rijksdriehoeksnet) loopt via het NETPOS positioneringssysteem. De NETherlands POsitioning Service (NETPOS) is een GPS-referentienetwerk van het Kadaster voor RTK-metingen van het Kadaster. Met het ministerie van Verkeer en Waterstaat (V&W) is een licentieovereenkomst gesloten; V&W wordt hierin vertegenwoordigd door de Adviesdienst Geo-informatie en ICT (AGI):

- Het gebruik van NETPOS is voorbehouden aan Kadaster en V&W.
- NETPOS is gepositioneerd binnen de Rijksdriehoeksmeting van het Kadaster.
- Het levert een correctiesignaal op het GPS-signaal voor landmeters.
- Dit signaal is continu beschikbaar, maar support is alleen beschikbaar tijdens kantooruren (zie Contact in Main Menu voor de tijden).
- NETPOS maakt gebruik van een netwerkoplossing (in plaats van een enkel referentiestation).
- Dit geeft een precisie van enkele centimeters: 1 cm in horizontale richting en 3 cm in de hoogte (maximale standaardafwijking in ETRS89).
- Naast GPS wordt ook het Russische GLONASS ondersteund en in de toekomst het Europese Galileo.

Meer informatie over positionering, ook over de meer traditionele methoden, is te vinden in [Lit. 24] en verder bij de aanbieders van de betreffende instrumenten.

7.5.3 BOTTOM-TRACK

Een ADCP is uitgerust met bottom-track om een nulreferentie te bepalen waaraan de gemeten stroomsnelheden in de cellen worden gerelateerd. Uitgegaan wordt van een stilstaande bodem. In dat geval is de gemeten snelheid per cel de ‘werkelijke’ stroomsnelheid. Als een rivier- of beekbodem bestaat uit los-korrelig materiaal en de stroomsnelheden zijn dusdanig hoog dat sedimenttransport optreedt, dan wordt met de bottom-track gemeten ten opzichte van een bewegende bodem. De gemeten stroomsnelheden worden dan onderschat. Of de bodem beweegt kan worden geconstateerd door het varen in een lus van oever naar oever of met behulp van een DGPS (par. 7.5.2) op het meetvaartuig. Daarmee kan de snelheid van de bodemlaag worden bepaald. Op beide wijzen kan voor de bewegende bodemlaag worden gecorrigeerd. In de vakliteratuur is veel te vinden over bottom-track (J. of Hydr. Engineering, ASCE, December 2007).

7.5.4 ISO-STANDAARDEN

De ISO-standaarden die betrekking hebben op diepte- en positiemetingen zijn de volgende:

- ISO 3454 Direct depth sounding and suspension equipment (rods, cables and weights)
- ISO 4366 Echosounders for water depth measurements
- ISO 6420 Position fixing equipment for hydrometric boats (description and selection of instruments)

8

MEETONNAUWKEURIGHEID

Een belangrijke vraag die gesteld moet worden voorafgaand aan de opzet van een meetplan of meetopstelling is: “Wat is de nauwkeurigheid van het debiet dat we gaan bepalen?”

In dit hoofdstuk staat het begrip *onnauwkeurigheid* centraal. Men spreekt vaak over de nauwkeurigheid van een meetresultaat waar het in feite de onnauwkeurigheid of betrouwbaarheidsband van een gemeten grootheid betreft. Een voorbeeld: De gemeten stroomsnelheid is 1 m/s ± 0,05 m/s. De toevoeging ± 0,05 m/s is de onzekerheid rond de gevonden meetwaarde van 1 m/s door verschillende oorzaken waarop in dit hoofdstuk uitgebreid wordt ingegaan. We vermoeden dat de gemeten snelheid ligt tussen 0,95 m/s en 1,05 m/s met een verwachtingswaarde van 1 m/s en een onnauwkeurigheid van 0,05 m/s rond deze waarde.

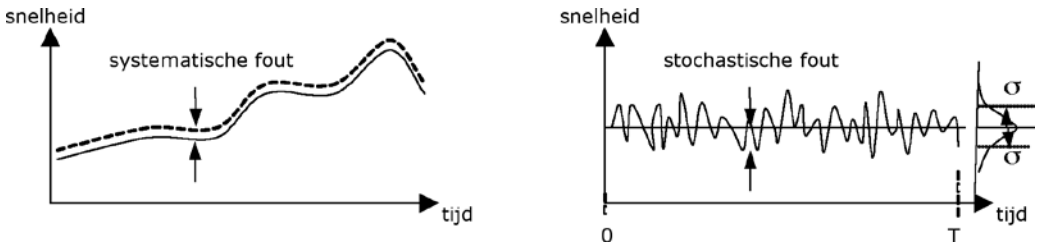
In dit hoofdstuk zijn de volgende onderwerpen behandeld:
- Soorten onnauwkeurigheid als gevolg van systematische fouten en toevallige fouten.
- Onnauwkeurigheid van meetinstrumenten.
- Onnauwkeurigheid van de meetmethode.
- Onnauwkeurigheid van de verwerkingsmethode.
- Methode om vanuit een gewenste onnauwkeurigheid een meetopstelling te ontwerpen.

8.1 SOORTEN ONNAUWKEURIGHEID

Bij de bepaling van een debiet is naast de grootte van het debiet de totale fout van het debiet van belang. De gemeten grootheden waarmee het debiet is bepaald hebben ieder een meetfout. Daarnaast worden fouten geïntroduceerd bij de sommatiemethode waarmee het debiet uit de stroomsnelheidsmetingen is bepaald. De gemeten grootheden en stappen van de sommatiemethode die een grote meetfout hebben, dragen uiteraard het sterkst bij aan de totale fout. Het zal duidelijk zijn dat een foutenanalyse vooraf, inzicht oplevert in de grootste bijdragen aan de totale fout. Daarmee is het meetplan, de meetopstelling, de instrumentkeuze of de sommatiemethode te optimaliseren teneinde de fouten, en daarmee de totale fout, te minimaliseren. Onderscheid is te maken in:
- Systematische fouten: Bij dit soort fouten is er sprake van een op een of andere wijze regelmatige afwijking van de werkelijke waarde. Dit type fouten komt aan het licht bij herijken van een meetinstrument, meten met een ander instrument in een meetopstelling en bij het vergelijken van resultaten van verschillende meetmethoden onderling. Deze fouten zijn typisch voor meetinstrumenten, meetopstellingen en de verwerking van meetresultaten. Deze fout is over de gehele meetduur absoluut of procentueel even groot of hangt af van de meetwaarde (bijvoorbeeld groot bij lage snelheid en klein bij hoge snelheid).
- Toevallige fouten: Dit type fouten heeft een stochastisch karakter en is dus onvoorspelbaar. Veelal is er een fysische oorzaak aan te wijzen zoals turbulente stroming, (lucht)drukvariaties, wind, enzovoorts. Deze fouten zijn wel te schatten als er voldoende metingen voorhanden zijn zodat mogelijk voor de fout kan worden gecorrigeerd. Deze fouten zijn

typisch voor de uitkomst van een meetinstrument voor stroomsnelheid of waterstand. Deze fout wordt uitgedrukt als de standaardafwijking σ of variantie σ^2 van het signaal over de gehele meetduur T.

FIGUUR 8-1 PRINCIPE SYSTEMATISCHE FOUT EN TOEVALLIGE FOUT



Naar oorsprong zijn de volgende fouten te onderscheiden:

- Fouten ten gevolge van het meetinstrument. Een meetinstrument is bedoeld om zuiver te meten binnen een bepaald meetbereik waarvoor een bepaalde nauwkeurig wordt gegarandeerd door de fabrikant. Uiteraard ontstaat er altijd een toevallige fout aangezien de meting van het instrument door mechanische, elektromagnetische of akoestische verstoringen wordt beïnvloed. Een fout door bijvoorbeeld opstuwing of stroomafbuiging rond een meetinstrument is een systematische fout, maar fabrikanten hebben het instrument daarvoor meestal bij de referentiemetingen gecorrigeerd.
- Fouten ten gevolge van de meetmethode: Dit soort fouten valt onder de systematische fouten. De keuze van de meetraaien en de meetpunten waar wordt gemeten, bepaalt hoe nauwkeurig een snelheidsverloop in een dwarsdoorsnede wordt gemeten. Duidelijk is dat twee meetpunten in een verticaal minder informatie bevatten over het snelheidsprofiel dan drie of meer meetpunten in een verticaal. Hetzelfde geldt voor waterstandsmetingen en bodempeilingen.
- Fouten ten gevolge van de verwerkingsmethode: Het sommeren van afzonderlijke snelheidsmetingen kan op verschillende wijze gebeuren. Een gebruikelijke manier is het trekken van een polynoom door de meetpunten. Deze polynoom benadert het werkelijk opgetreden snelheidsverloop zo goed mogelijk, maar de fout die optreedt bij deze verwerkingsmethode is in principe een systematische fout. Het is lastig deze fout te bepalen aangezien het kiezen van een andere polynoom ook een systematische fout oplevert. Alleen met het op een andere wijze of bij gebruik van een meetmethode met meerdere meetpunten is het mogelijk de systematische van de eerste methode te schatten. Een meer verfijnde meetmethode of verwerkingsmethode heeft uiteraard ook een systematische fout. Hetzelfde geldt voor meetmethodes waarbij het verloop van de waterspiegel wordt gemeten of waarbij de bodemligging wordt gepeild. Ook daarbij wordt het wateroppervlak en het bodemverloop in de meetraai veelal benaderd door een polynoom of rechte lijnstukken.

8.2 ONNAUWKEURIGHEID MEETINSTRUMENTEN

De onnauwkeurigheid van meetinstrumenten wordt door de fabrikant opgegeven samen met het meetbereik en de omstandigheden waaronder een meetinstrument optimaal functioneert en reproduceerbare resultaten oplevert.

Een indruk van de werkbare onnauwkeurigheid van verschillende soorten meetinstrumenten is hieronder gegeven:

- In ISO 748 is aangegeven dat bij het mechanisch meten van de afstand een relatieve fout van 0,3% is toegestaan voor afstanden van 0 tot 100 m en 0,5% voor een afstand van 250 m. Afstanden gemeten met een elektronisch instrument hebben een karakteristieke relatieve fout van 0,5% tot 1% waarbij een vaste fout van 0,5 m tot 2 m moet worden geteld. Dus voor afstanden van 100 m tot 200 m is de (relatieve) vaste fout 0,5% tot 1% en is vergelijkbaar met de relatieve fout.
- Het onnauwkeurigheid bij het meten van de waterdiepte met een meetlat, akoestische puls of echolood hangt sterk af van de samenstelling en opbouw van de bodem. Een lat of signaal dringt over enige afstand in de bodem. Als maat wordt een relatieve fout van 1% geaccepteerd.
- Mechanische snelheidsmeetinstrumenten hebben een gemiddelde variatiecoëfficiënt (standaardafwijking gedeeld door gemiddelde) van 1%. Bij lage stroomsnelheden van 0,2 m/s loopt de relatieve fout op tot 5% en bij hoge stroomsnelheden van 2,5 m/s neemt de fout af tot 0,5%.
- Elektro-magnetische snelheidsmeetinstrumenten hebben een relatieve fout van minstens 1%. Bij lage stroomsnelheden van 0,02 m/s loopt de relatieve fout op tot 10% en bij 0,1 m/s is de fout 3%.
- Akoestische snelheidsmeetinstrumenten (ADM's) bepalen de snelheid met een onnauwkeurigheid van 0,2% (instrumentfout). De debietwaarden hebben een minimum relatieve fout van circa 5% bij een goed gecalibreerde opstelling. Bij lage stroomsnelheden is de fout groter dan bij hoge stroomsnelheden. Bij langdurige lage stroomsnelheden wordt soms een dubbel meetkruis ingezet. Het debiet wordt berekend door de gemeten stroomsnelheid te vermenigvuldigen met de K-factor en het doorstroomoppervlak. De K-factor moet voor het gehele waterstandsbereik bepaald worden. De meetlocatie dient zo gekozen te zijn dat de K-factor voor het gehele afvoerbereik geldig is.
- Varende akoestische Doppler-meetinstrumenten kunnen de stroomsnelheid lokaal met hoge nauwkeurigheid meten, mits de stroomsnelheid hoger is dan 0,05 m/s. Het debiet afgeleid uit een meting langs een meetraai met dit instrument heeft een minimum haalbare onnauwkeurigheid van 5%. Met name de onbemeten zones in het dwarsprofiel nabij de bodem, wateroppervlak en oevers dragen bij aan deze onnauwkeurigheid evenals het vaststellen van de absolute snelheidsreferentie (bottom-track).
- Horizontaal geplaatste akoestische Dopplermeetinstrumenten kunnen de stroomsnelheid lokaal nauwkeurig meten. Het debiet afgeleid uit een meting met een horizontale akoestische Doppler-meetinstrument heeft een maximaal haalbare onnauwkeurigheid van ongeveer 10%. De gemeten stroomsnelheid in een of meerdere lagen wordt met een K-factor en het doorstroomoppervlak omgerekend naar een debiet. Met name de gevoeligheid voor de condities in de waterloop (afhankelijkheid van geluidssnelheid, gevoelig voor gradiënten in temperatuur, dichtheid en sediment) dragen bij aan deze onnauwkeurigheid evenals het vaststellen van de K-factor.
- Waterstandsmetingen kunnen met de gebruikelijke meetinstrumenten binnen 1 mm of minder nauwkeurig worden gemeten. Meestal draagt de onnauwkeurigheid in de water-

stand veel minder bij aan de totale onnauwkeurigheid van een debietmeting. De bodemligging, niet bemeten zones en de stroomsnelheidsmetingen dragen meer bij aan de onnauwkeurigheid.

- Klepstandsmetingen kunnen binnen 1 mm of minder nauwkeurig worden gemeten. Bij kleppen kan doorbuiging of scheefstand van de klep ten gevolge van de belasting van het overstortende water bijdragen aan de fout in het debiet. In de formule wordt uitgegaan van een horizontale klep terwijl dat in werkelijkheid niet zo is. Verder kan vervuiling door drijfvuil de klepstandmeting beïnvloeden.

8.3 ONNAUWKEURIGHEID MEETMETHODE

Bij het uitvoeren van stroomsnelheidsmetingen treden naast de meetfout ten gevolge van het meetinstrument drie andere typen fouten op:

- Fouten ten gevolge van een te beperkte meetduur. De redelijke meetduur op een meetpunt is 30 s voor hoge stroomsnelheden en 60 s voor lage stroomsnelheden. Daarmee bereikt de meetfout een acceptabele waarde zoals blijkt uit ervaring.
- Fouten ten gevolge van een te beperkt aantal meetpunten in een verticaal. Afhankelijk van de verwerkingsmethode. De manier waarop een snelheidsprofiel door de gemeten punten wordt getrokken, bepaalt in sterke mate de fout. Afhankelijk van het aantal meetpunten is de variatiecoëfficiënt 3% tot 8%.
- Fouten ten gevolge van de benadering van het bodemverloop in een meetraai en het horizontale verloop van de stroomsnelheden in de meetraai. In de praktijk treden beide fouten simultaan op. De keuze van het aantal verticalen in een meetraai hangt af van de beoordeling van het dwarsprofiel en het riviertraject waarin wordt gemeten. De volgende criteria kunnen bij de keuze van het aantal verticalen worden gehanteerd:
  - Verticalen met een vaste gelijke tussenafstand. Het aantal verticalen ligt vast. Deze aanpak is geschikt voor een gelijkmatig verlopende bodemligging in de meetraai waarbij het debiet door iedere verticaal gelijk wordt verondersteld.
  - Verticalen met variërende afstand waarbij de tussenafstand afhangt van het verloop van de bodem in de meetraai. Het debiet per verticaal mag onderling niet te veel variëren.

  De variatiecoëfficiënt is 1,5% tot 8% afhankelijk van het aantal verticalen.

Fouten in gemeten stroomsnelheden treden ook op als een gevolg van:

- Passerende schepen. Voor de meeste meetlocaties wordt de eis gesteld dat de scheepvaart nauwelijks invloed mag hebben op de meetresultaten. Passerende motorschepen laten een bellenspoor achter dat met name het signaal van akoestische en elektromagnetische instrumenten beïnvloedt. De enige remedie is een langere meetduur, langer dan de passeertijd van een schip zodat een effectieve minimum meetduur van bijvoorbeeld 60 s resteert.
- Sedimenttransport beïnvloedt het signaal van akoestische en elektromagnetische instrumenten en kan het signaal belemmeren of verstoren.
- Temperatuurs- en dichtheidsverschillen beïnvloeden het signaal van akoestische en elektromagnetische instrumenten. Sommige meetinstrumenten compenseren automatisch of na calibratie (testmeting) voor dit effect. Bij de verwerking van de stroomsnelheden in een verticaal of meetraai moet rekening worden gehouden met (een sterk) verloop van de dichtheid van het water aangezien het debiet in principe een massa flux is.

8.4 ONNAUWKEURIGHEID VERWERKINGSMETHODE

De verwerkingsmethode van gemeten stroomsnelheden volgens de standaard velocity-area methode tot een debiet, levert ook een fout op. Deze fout bestaat uit de volgende bijdragen:

- De benadering van het stroomsnelheidsprofiel in een verticaal door een polynoom. Deze fout is moeilijk te bepalen aangezien het werkelijk opgetreden snelheidsprofiel in de verticaal onbekend is. Veelal wordt een logaritmisch snelheidsprofiel aangenomen of een machtsprofiel, maar beide profielen worden met coëfficiënten afgeregeld om zo goed mogelijk door de beschikbare meetpunten te gaan.
- Het aantal meetpunten in een verticaal. Dit bepaalt in sterke mate de nauwkeurigheid van de gemiddelde stroomsnelheid over de verticaal. In Tabel 8-1 zijn de fouten samengevat.

TABEL 8-1 VARIATIECOËFFICIËNT ALS FUNCTIE VAN HET AANTAL MEETPUNTEN IN EEN VERTICAAL

aantal punten in verticaal	formule gemiddelde snelheid	variatiecoëfficiënt $r = \sigma/\mu$ [%]
1	$v_{gem} = v_{0,6}$	8,2
1	$v_{gem} = 0,96\ v_{0,5}$	6,5
2	$v_{gem} = 0,5(\ v_{0,2} + v_{0,8})$	4,9
3	$v_{gem} = 0,25\ v_{0,2} + 0,5\ v_{0,6} + v_{0,8}$	4,8
4	$v_{gem} = 0,25(\ v_{0,2} + v_{0,7} + v_{0,7} + v_{0,9}\ )$	3,0
5	$v_{gem} = 0,1\ v_{opp} + 0,3\ v_{0,2} + 0,2\ v_{0,6} + 0,3\ v_{0,8} + 0,1\ v_{bod}$	2,7

opmerkingen:
$v_{0,6}$ is de stroomsnelheid 0,6 maal de locale waterdiepte onder de waterspiegel
3 meetpunten in een verticaal wordt veelal gezien als een praktische en betrouwbare methode, als het snelheidsprofiel met een machtsprofiel kan worden benaderd

Voor het aantal verticalen in een meetraai is het lastiger een algemene uitspraak te doen. Afhankelijk van de dwarsdoorsnede en het verloop van de stroomsnelheid in horizontale richting zijn meer of minder verticalen benodigd. In de praktijk is het minimum vereiste aantal verticalen in een meetraai 5 à 7. Rijkswaterstaat stelt 15 verticalen als minimum op de Rijn en Maas. Leidend is dat het snelheidsprofiel in dwars op de as van de waterloop goed kan worden bemeten. Nabij de oevers loopt de stroomsnelheid terug zodat daar meer verticalen nodig zijn dan nabij de as. Voor een ideale meetlocatie en equi-distante meetverticalen is de relatieve fout in het debiet weergegeven in Tabel 8-2 samengevat.

TABEL 8-2 VARIATIECOËFFICIËNT ALS FUNCTIE VAN HET AANTAL EQUIDISTANTE MEETVERTICALEN IN EEN MEETRAAI

aantal meetverticalen	variatiecoëfficiënt $r = \sigma/\mu$ [%]
5	4,2
6	3,7
10	2,6
15	2,0
20	1,7
25	1,5

8.5 BEPALEN ONNAUWKEURIGHEID DEBIET

Voor het bepalen van de onnauwkeurigheid van het debiet, zoals dat uit snelheidsmetingen is afgeleid, wordt de standaardafwijking van de gemeten grootheden gebruikt. De standaardafwijking s is gedefinieerd als de wortel uit de variantie,

$$s^2 = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}\left(x_i - \bar{x}\right)^2} \tag{8-1}$$

waarin N = het aantal meetwaarden, x_i = meetwaarde, i = teller en de gemiddelde waarde, ook wel de verwachtingswaarde genoemd,

$$\bar{x} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i \tag{8-2}$$

Bij het samenstellen van de totale onnauwkeurigheid wordt de relatieve standaardafwijking gebruikt, ook wel de variatiecoëfficiënt genoemd,

$$r = \frac{s}{\bar{x}} \tag{8-3}$$

Deze definities gelden voor alle soorten stochastische verdelingen van een gemeten grootheid. Veelal wordt uitgegaan van een normale verdeling (Gauss-verdeling) van de meetreeks en géén correlatie tussen de verschillende grootheden. In de Bijlage zijn de achtergronden van de foutenanalyse behandeld.

De stochastische fout r_i die met de meetinstrumenten wordt gemaakt, is de instrumentele fout in de gemeten stroomsnelheid, of waterdiepte en breedte als een afstandsmeter wordt gebruikt.

Onderstaand wordt **per meetmethode** aangegeven hoe de onnauwkeurigheid van het debiet kan worden berekend.

- Het debiet bepaald met de **'velocity area' methode** in een meetraai wordt berekend als,

$$Q = A \cdot v_{gem} \quad \text{met} \quad A = b \cdot d \tag{8-4}$$

met b = breedte en d = waterdiepte. De totale stochastische fout in het debiet r_Q van een 'velocity area' debietmeting in een meetraai is,

$$r_Q = \sqrt{r_d^2 + r_b^2 + r_v^2 + r_i^2} \tag{8-5}$$

waarin:
r_Q = de stochastische totale meetfout in het debiet,
r_d = de stochastische fout in de waterdiepte,
r_b = de stochastische fout in de breedte,
r_v = de stochastische fout in het snelheidsprofiel,
r_i = de stochastische totale instrumentenfout.

Uitgangspunt voor deze formule is dat de fouten onderling niet zijn gecorreleerd.

- Voor metingen in constructies zoals een **spuikoker, een duiker, drempel of (meet)stuw** is het uitgangspunt voor de foutenberekening de afvoerformule,

$$Q = \alpha \cdot A \cdot \sqrt{2g \cdot \Delta h} \quad \text{of} \quad Q = \sum_{k=1}^{K} \alpha_k \cdot A_k \cdot \sqrt{2g \cdot \Delta h_k} \tag{8-6}$$

waarin α = afvoercoëfficiënt, A = het doorstroomoppervlak, g = zwaartekrachtsversnelling, Δh = het verval over de constructie en k = aantal kokers, drempels of kleppen van de constructie. De totale stochastische fout voor een constructie met K kokers, drempels of kleppen is,

$$r_Q = \sqrt{\frac{1}{K} \cdot \left(\sum_{k=1}^{K} r_\alpha^2 + \sum_{k=1}^{K} r_A^2 + \tfrac{1}{4} \sum_{k=1}^{K} r_{\Delta h}^2 \right) + r_i^2} \tag{8-7}$$

De factor 1/4 is een gevolg van de wortel uit het verval. Verder is verondersteld dat alle gemeten grootheden per koker en van de kokers onderling niet zijn gecorreleerd.

- Voor een debietmeting met de **waterstands-debietrelatie** is het uitgangspunt voor de foutenberekening de polynoom,

$$Q = a_1 (h_w - h_0)^n + a_2 (h_w - h_0)^{n-1} + a_3 (h_w - h_0)^{n-2} + \cdots + a_n (h_w - h_0) + a_{n+1}$$

waarmee het debiet wordt bepaald. De coëfficiënten a_1, a_2, enzovoorts worden verkregen door 'fitten' van de polynoom door de meetpunten, n is de macht, h_w is de gemeten waterstand en h_0 is de referentiewaterstand voor Q = 0. De totale stochastische fout in het debiet is,

$$r_Q = \sqrt{\frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^{n} r_{a_i}^2 + \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{i} r_{h_w - h_0}^2 \right) + r_i^2} \tag{8-8}$$

- Voor een debietmeting met de **waterstand-verhang-debietrelatie** is het uitgangspunt voor de foutenberekening de Chézy formule,

$$\text{of} \quad Q = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2} \cdot A \quad \text{of} \quad Q = C \cdot R^{1/2} \cdot S^{1/2} \cdot A$$

waarin n = Manning ruwheidswaarde, R = hydraulische straal, S = waterspiegel verhang, A = doorstroomoppervlak en C = Chézy coëfficiënt. De totale stochastische fout in het debiet is,

$$r_Q = \sqrt{r_n^2 + \tfrac{4}{9} r_R^2 + \tfrac{1}{4} r_S^2 + r_A^2 + r_i^2} \quad \text{of} \quad r_Q = \sqrt{r_C^2 + \tfrac{1}{4} r_R^2 + \tfrac{1}{4} r_S^2 + r_A^2 + r_i^2} \tag{8-9}$$

- Voor een debietmeting met de **oplossingmethode of tracermethode** is het uitgangspunt voor de foutenberekening de formule,

$$Q = q \cdot \frac{f(C_1)}{f(C_2)}$$

waarin q = het toegevoegde debiet met tracer, C_1 = tracerconcentratie op locatie 1 en C_2 = tracerconcentratie op locatie 2. De totale stochastische fout in het debiet is,

$$r_Q = \sqrt{r_q^2 + r_{C_1}^2 + r_{C_2}^2 + r_i^2} \tag{8-10}$$

- Voor een debietmeting volgens het **looptijdverschilprincipe** is het uitgangspunt voor de foutenberekening de formule,

$$Q = K \cdot A \cdot v_{gem} \quad \text{met} \quad v_{gem} = \frac{L}{2\cos\alpha} f(t)$$

waarin $K = v_{gem} / v_m$, v_{gem} = gemiddelde stroomsnelheid in meetraai, v_m = gemeten stroomsnelheid, A = doorstroomoppervlak in meetraai, L = padlengte akoestisch signaal, α = hoek tussen snelheidsvector en akoestisch pad, t = tijdverschil uitgezonden signaal. De totale stochastische fout in het debiet is,

$$r_Q = \sqrt{r_K^2 + r_A^2 + r_L^2 + r_\alpha^2 + r_t^2 + r_i^2} \tag{8-11}$$

- Voor een debietmeting volgens het varende **Doppler-principe** is het uitgangspunt voor de foutenberekening de formule,

$$Q = Q_m + Q_b + Q_w + Q_o$$

waarin Q_m = het gemeten debiet in de direct bemeten zone van het dwarsprofiel, Q_b = het berekende debiet in de bodemlaag (op basis van een aangenomen snelheidsverdeling), Q_w = het berekende debiet in de laag bij het wateroppervlak (op basis van een aangenomen snelheidsverdeling), Q_o =. het berekende of geschatte debiet in de oeverzones (op basis van een aangenomen snelheidsverdeling). De totale stochastische fout in het debiet is,

$$r_Q = \sqrt{r_{Qm}^2 + r_{Qb}^2 + r_{Qw}^2 + r_{Qo}^2 + r_i^2} \tag{8-12}$$

- Voor een horizontale debietmeting volgens het **Doppler-principe** is het uitgangspunt voor de foutenberekening de formule,

$$Q = K \cdot A \cdot v_{gem} \tag{8-13}$$

waarin $K = v_{gem} / v_m$, v_{gem} = gemiddelde stroomsnelheid in meetraai, v_m = gemeten stroomsnelheid, A = doorstroomoppervlak in meetraai. De totale stochastische fout in het debiet is,

$$r_Q = \sqrt{r_K^2 + r_A^2 + r_v^2 + r_i^2} \tag{8-14}$$

- Voor een debietmeting volgens de **elektromagnetische methode** is de relatie tussen het debiet en de gemeten elektromagnetische grootheden,

$$Q = K\left(\frac{E \cdot R_w}{I \cdot R_b} - C\right)^n$$

waarin K en C = constante, E = elektrodynamische kracht, I = stroom in de spoel, R_w = weerstand water, R_b = weerstand bodem, n = macht. Als de fout in de constanten en de macht worden ondergebracht bij de instrumentfout, is de totale stochastische fout in het debiet,

$$r_Q = \sqrt{r_K^2 + n \cdot \left(r_E^2 + r_I^2 + r_{R_w}^2 + r_{R_b}^2\right) + r_i^2} \tag{8-15}$$

8.6 ONNAUWKEURIGHEID BIJ GEBRUIK K-FACTORMETHODE

Het debiet Q kan worden bepaald uit het gemeten doorstroomoppervlak A en de gemiddelde stroomsnelheid v_{gem} volgens Chézy:

$$Q = A \cdot v_{gem} \quad \text{met} \quad v_{gem} = C \cdot \sqrt{R \cdot i} \tag{8-16}$$

waarbij: i = verhang [-], R = hydraulische straal [m], C =Chézy-coëfficiënt [$m^{1/2}/s$].

In de praktijk wordt de gemeten snelheid v_m op een locatie of in een gebied in het dwarsprofiel omgezet naar een gemiddelde stroomsnelheid U voor het dwarsprofiel. Dat gaat via de K-factor die is gedefinieerd als,

$$K = \frac{v_{gem}}{v_m} \tag{8-17}$$

Daarmee wordt het debiet berekend als,

$$Q = K \cdot A \cdot v_m$$

De fout in het debiet wordt bepaald door de fouten in K, A en v_m. Fouten in de K-factor lijken beperkt te zijn, maar dat is slechts schijn.

FOUTENDOORWERKING IN DE AFVOER

De volgende fouten worden aangenomen voor de verschillende parameters; in het debiet ΔQ, in de Chézy-coëfficiënt ΔC, in het verhang Δi, in het doorstroomoppervlak ΔA en in de K-factor ΔK. Vergelijking (7-1) inclusief de fouten luidt dan,

$$Q \pm \Delta Q = (C \pm \Delta C) \cdot (A \pm \Delta A) \cdot \sqrt{(R \pm \Delta R) \cdot (i \pm \Delta i)} = (K \pm \Delta K) \cdot (A \pm \Delta A) \cdot (v_{gem} \pm \Delta v_{gem})$$

Uitwerken van deze vergelijking en verwaarlozen van de tweede orde foutenbronnen (Δi^2 , $\Delta C \Delta i$, ΔC^2, enz.) resulteert in de fout in het debiet,

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \pm \frac{\Delta C}{C} \pm \frac{\Delta A}{A} \pm \left(\frac{1}{2}\frac{\Delta R}{R}\right) \pm \left(\frac{1}{2}\frac{\Delta i}{i}\right) \quad \text{of} \quad \frac{\Delta Q}{Q} = \pm \frac{\Delta A}{A} \pm \frac{\Delta v_{gem}}{v_{gem}} \tag{8-18}$$

De fout in de Chézy-coëfficiënt ΔC is samengesteld uit de fout ΔR in de hydraulische straal en de fout Δk_s in de ruwheidshoogte, bijvoorbeeld volgens Strickler $C=25[R/k_s]^{1/6}$. De fout in de Chézy-coëfficiënt kan verder worden uitgewerkt met de fouten ΔR en Δk_s, hetgeen hier niet is gedaan.

FOUTENDOORWERKING IN DE K-FACTOR

Met vergelijking (8-15) is de doorwerking van de verschillende foutenbijdragen in de K-factor te bepalen. De fout in de gemiddelde stroomsnelheid ΔU en in de gemeten locale stroomsnelheid ΔV_m werken als volgt door in de K-factor,

$$K \pm \Delta K = \frac{v_{gem} \pm \Delta v_{gem}}{v_m \pm \Delta v_m}$$

Beide fouten zijn volledig gecorreleerd omdat de gemiddelde snelheid wordt berekend uit de lokale snelheden, bijvoorbeeld uit ADCP-metingen of 3D-berekeningen (SIMK-methode). Uitwerken van de vergelijking levert de relatieve fout in de K-factor op,

$$\frac{\Delta K}{K} = \pm \frac{\Delta v_{gem}}{v_{gem}} \mp \frac{\Delta v_m}{v_m} \tag{8-19}$$

Uit deze vergelijking volgt dat de fouten elkaar tegenwerken zodat er *schijnbaar* een kleine fout in de K-factor resteert. De fout in de lokale snelheid Δv_m en in de gemiddelde snelheid Δv zijn van dezelfde orde grootte, aangezien de gemiddelde snelheid het gemiddelde is van alle lokale snelheden. De relatieve fout $\Delta v_m/v_m$ en $\Delta v/v$ kunnen daardoor ook van dezelfde orde grootte zijn (als gemeten wordt in een gebied waar de snelheden niet te veel verschillen van de gemiddelde snelheid). Het speelt nauwelijks een rol of beide relatieve fouten groot of klein zijn, alleen het verschil in beide fouten bepaalt de relatieve fout in de K-factor. De fout in het debiet berekend op basis van vergelijking (8-17) is,

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \pm\frac{\Delta K}{K} \pm \frac{\Delta A}{A} \pm \frac{\Delta v_m}{v_m} \tag{8-20}$$

VOORBEELDEN

Een gelijke relatieve fout in $\Delta v_m/v_m$ en $\Delta v/v$ leidt tot $\Delta K = 0$. Een Fout van 3% in een gemiddelde stroomsnelheid v en een fout van 5% in de locale stroomsnelheid v_m levert een fout op van 2% in de K-factor. Een fout van 15% in een gemiddelde stroomsnelheid v en een fout van 20% in de locale stroomsnelheid v_m levert een fout op van 5% in de K-factor.

Opmerking: De fouten Δv en Δv_m kunnen nog verder worden uitgewerkt. Voor de gemiddelde snelheid v kan bijvoorbeeld de Chézy-vergelijking worden gebruikt ($v=C\sqrt{R \cdot i}$). Voor de lokale snelheid v_m kan de uitdrukking voor de snelheid worden genomen op de meetlocatie in een logaritmisch profiel of machtsprofiel voor de verticale snelheidsverdeling. In deze analyse zijn beide fouten niet verder uitgewerkt. Met het onderstaande voorbeeld is duidelijk hoe grote fouten in v_m en v leiden tot een relatief kleine fout in de K-factor.

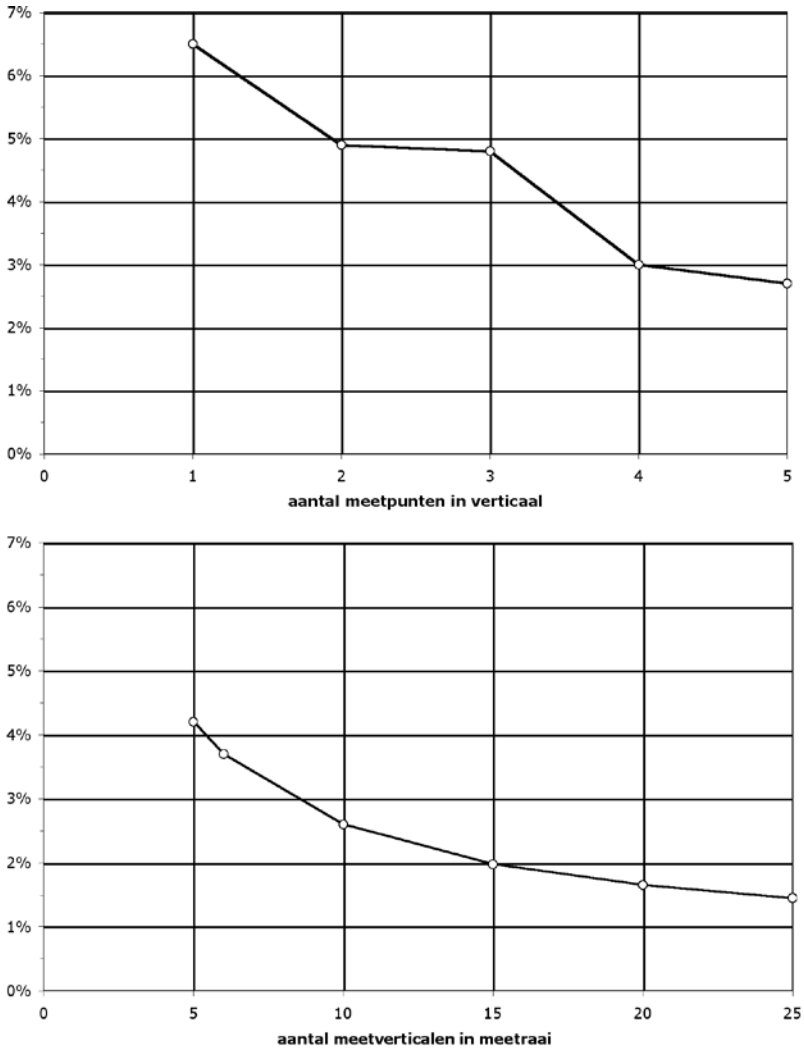
SLOTOPMERKINGEN

- Een fout in de hydraulische ruwheid, het doorstroomoppervlak of het waterspiegelverhang werkt direct door in de bepaling van de afvoer, zie vergelijking (8-17). Deze fouten werken veel minder sterk door in de K-factor, zoals met vergelijking (8-18) aangetoond. Daarom is het van belang de afzonderlijke fouten in de gemeten stroomsnelheid, het doorstroomoppervlak, het verhang en de hydraulische ruwheid te beperken om een enigszins betrouwbare waarde voor de K-factor af te leiden.
- De fout in het debiet wordt berekend met vergelijking (8-19) waarin de foutbijdragen van A en v_m is opgenomen. De fout in de K-factor is veelal bepaald op basis van een gemeten snelheid tijdens een calibratiemeting of met een 2D- of 3D-berekening. De fout in A en v_m wordt bepaald op basis van de actuele situatie tijdens een meting. Aangenomen is dat de relatieve fout $\Delta K/K$ tijdens de meting hetzelfde is als tijdens de calibratiemetingen of calibratieberekeningen ten behoeve van het afleiden van de K-factor. Het verdient aanbeveling deze aanname te toetsen. Dit geldt voor iedere meetmethode waarbij gebruik wordt gemaakt van de K-factor.
- Om een betrouwbare K-factor af te leiden is het van belang deze factor te valideren met andersoortige metingen over een groot afvoerbereik. De methode om het debiet te bepalen met de K-factor kan voor verschillende meetsystemen worden toegepast zoals voor een horizontaal opgestelde ADCP, een looptijdverschilmethode, een puntmeting met een akoestisch, elektro-magnetisch of mechanisch meetinstrument. In alle gevallen moet de onnauwkeurigheid van de K-factor bepaald worden en uiteraard zo klein mogelijk zijn.

8.7 MEETOPZET BIJ GEWENSTE ONNAUWKEURIGHEID DEBIET

Onderstaande methode is een handreiking bij het ontwerpen van een meetopstelling in relatie tot de gewenste onnauwkeurigheid van het debiet bij gebruik van de velocity area methode. De relatieve fout in de gemiddelde stroomsnelheid in een verticaal is weergegeven in Figuur 8-2 als functie van het aantal meetpunten in de verticaal, gebaseerd op de fouten opgesomd in Tabel 8-1 en Tabel 8-2. Het betreft hier de onnauwkeurigheid ten gevolge van het beperkte aantal meetpunten waarmee het snelheidsprofiel wordt benaderd. De meetinstrumentfout moet daarbij nog worden opgeteld.

FIGUUR 8-2 FOUT AFHANKELIJK VAN HET AANTAL MEETPUNTEN (BOVEN) EN HET AANTAL MEETVERTICALEN (ONDER)



De relatieve fout in het debiet is onder andere afhankelijk van het aantal meetraaien in een dwarsprofiel. In Figuur 8-2 is de fout weergegeven als functie van het aantal meetraaien.

Als eerste schatting voor een ontwerp van een meetopstelling is Figuur 8-2 te gebruiken. In de praktijk is de vraag veelal: “Hoeveel meetpunten in een verticaal en meetverticalen zijn nodig om het debiet te bepalen met een gewenste onnauwkeurigheid binnen een bepaald betrouwbaarheidsinterval.” Het betrouwbaarheidsinterval hangt af van het aantal herhalingen van de debietmetingen. De doorwerking van stochastische fouten is gerelateerd aan het

debiet, de fout in het debiet, het betrouwbaarheidsinterval van die fout, het aantal meetpunten in de meetverticaal, het aantal meetverticalen, het aantal herhalingen van de meting en de relatieve fouten in de breedte van de waterloop, stroomsnelheid en instrumentfout. Deze relatie is:

$$\frac{\Delta Q}{\overline{Q}} > \frac{2 \cdot u_{1/2\alpha}}{\sqrt{N \cdot R}} \cdot \sqrt{r_B^2 + r_v^2 + r_i^2} \qquad (8\text{-}21)$$

waarin,

$\frac{\Delta Q}{\overline{Q}}$	= fout in het debiet (m^3/s)
$\overline{Q}$	= gemiddelde debiet van N metingen (m^3/s)
r_B	= relatieve fout in de breedte van de waterloop (-)
r_v	= relatieve fout in de gemiddelde snelheid in de verticalen (-)
r_i	= relatieve instrumentfout (-)
N	= aantal malen dat het debiet wordt gemeten (-)
R	= aantal meetverticalen (-)
$u_{1/2\alpha}$	= stochastische correctiewaarde voor beperkt aantal metingen (-)

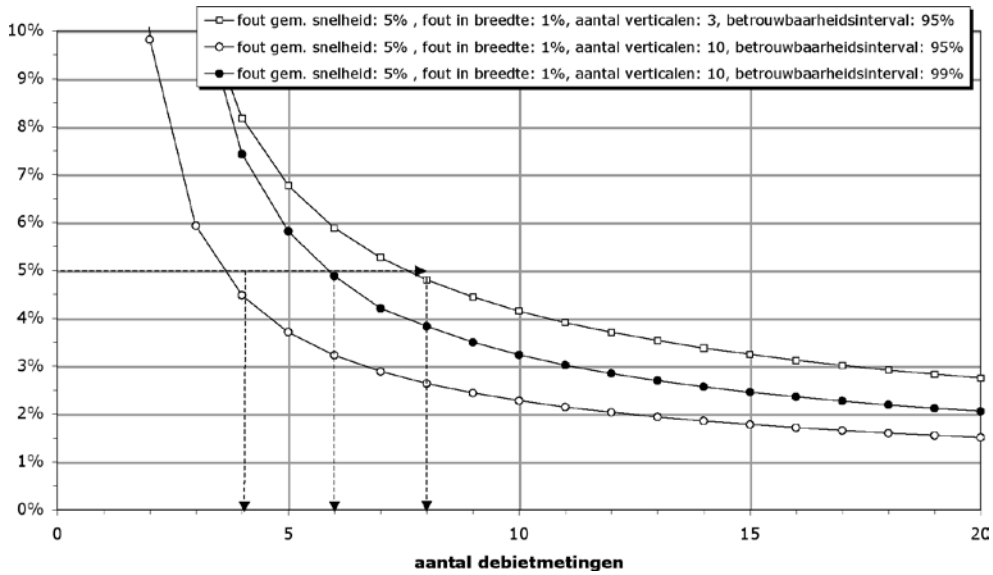
Opmerking: Deze formule geldt voor ongecorreleerde variabelen Q, v en B. Als er een positieve correlatie bestaat tussen deze variabelen, dan neemt de fout van het debiet af. Bij een negatieve correlatie neemt de fout in het debiet toe.

Voor een aantal combinaties van ongecorreleerde variabelen is de fout in het debiet weergegeven in Figuur 8-3 en Figuur 8-4.

Voorbeeld 1: een gewenste debietonnauwkeurigheid van 5% kan gegeven de meetfouten (instrumentfout < 0,5%) en aantal meetverticalen worden gehaald met,

- 4 debietmetingen in 10 verticalen met een betrouwbaarheidsinterval van 95%,
- 6 debietmetingen in 10 verticalen met een betrouwbaarheidsinterval van 99%,
- 8 debietmetingen in 3 verticalen met een betrouwbaarheidsinterval van 95%.

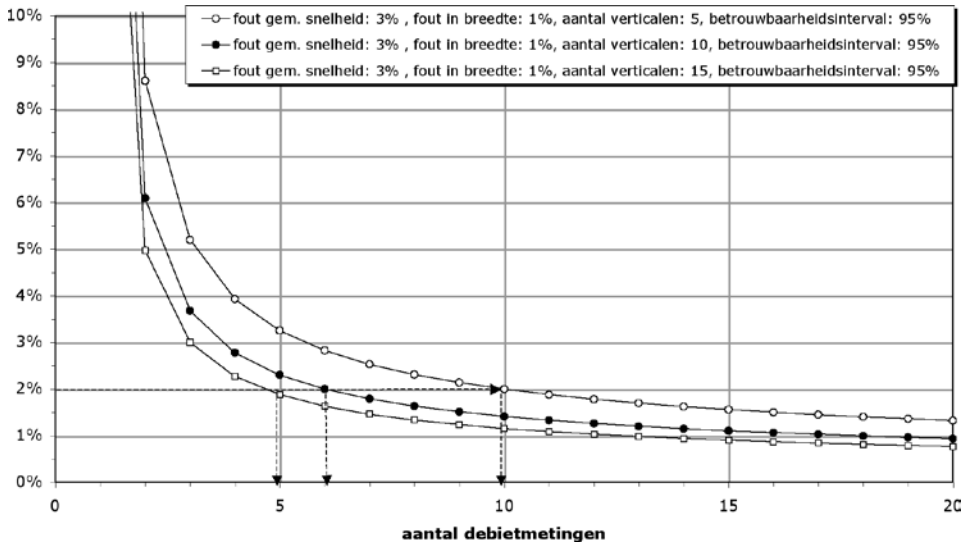
FIGUUR 8-3 FOUT IN HET DEBIET VOOR 3 EN 10 MEETVERTICALEN, 95% EN 99% BETROUWBAARHEIDSINTERVAL



Voorbeeld 2: een gewenste debietonnauwkeurigheid van 2% kan gegeven de meetfouten (instrumentfout < 0,5%) en aantal meetverticalen worden gehaald met,

- 5 debietmetingen in 15 verticalen met een betrouwbaarheidsinterval van 95%,
- 6 debietmetingen in 10 verticalen met een betrouwbaarheidsinterval van 95%,
- 10 debietmetingen in 5 verticalen met een betrouwbaarheidsinterval van 95%.

FIGUUR 8-4 FOUT IN HET DEBIET BIJ 5, 10 EN 15 MEETVERTICALEN



Iedere andere combinatie van gewenste maximale fout, betrouwbaarheidsinterval en aantal meetverticalen is met de formule (8-21) te bepalen. In Tabel 8-3 zijn de waarden voor de stochastische correctiewaarde $u_{1/2\alpha}$ gegeven.

TABEL 8-3 STOCHASTISCHE CORRECTIEWAARDE U½α ALS FUNCTIE VAN AANTAL MEETWAARDEN N

aantal meetwaarden N	$u_{1/2\alpha}$ voor tweezijdig betrouwbaarheidsinterval		
	90%	*95%*	*99%*
1	6,314	12,706	63,657
2	2,920	4,303	9,925
3	2,353	3,182	5,841
4	2,132	2,776	4,604
5	2,015	2,571	4,032
6	1,943	2,447	3,707
7	1,895	2,365	3,449
8	1,860	2,306	3,355
9	1,833	2,262	3,250
10	1,812	2,228	3,169
11	1,796	2,201	3,106
12	1,782	2,179	3,055
13	1,771	2,160	3,012
14	1,761	2,145	2,977
15	1,753	2,131	2,947
16	1,746	2,120	2,921
17	1,740	2,110	2,898
18	1,734	2,101	2,878
19	1,729	2,093	2,861
20	1,725	2,086	2,845
25	1,708	2,060	2,787
30	1,697	2,042	2,750
40	1,684	2,021	2,704
60	1,671	2,000	2,660
120	1,658	1,980	2,617
∞	1,645	1,960	2,576

DEEL C: PRAKTIJK

9

KEUZE

Alvorens wordt gemeten zal een analyse van de gegevensbehoefte hebben plaatsgevonden. Uit deze gegevensbehoefte volgt de aanleiding van het meten (het WAAROM) en de grootheden die moeten worden gemeten met de gewenste nauwkeurigheid (het WAT). Hieruit volgt meestal ook op welke mogelijke locaties zou kunnen worden gemeten (het WAAR). Vervolgens worden de lokale mogelijkheden van de beoogde meetlocaties onderzocht in het licht van de vereiste randvoorwaarden om aan de gewenste nauwkeurigheid te kunnen voldoen (het HOE). Hierbij zal een afweging gemaakt moeten worden tussen de gewenste nauwkeurigheid die richting geeft aan de keuze voor een meetmethode en de mogelijkheden die de meetlocatie biedt om het gewenste resultaat met de beoogde meetmethode te behalen.
Indien de locatie niet geheel voldoet, zal gezocht moeten worden naar een andere (nabij gelegen) locatie die beter voldoet aan de gestelde randvoorwaarden. Indien deze locatie niet voorhanden blijkt zal een concessie gedaan moeten worden: ofwel er wordt een andere meetmethode gekozen ofwel de eis gesteld aan de te behalen meetnauwkeurigheid wordt bijgesteld (hogere of lagere nauwkeurigheid). Tot slot volgt de toetsing aan de beschikbare (financiële) middelen en mogelijkheden van het beheer van de meetlocaties of het uitbesteden aan derden. Mocht aan één of meerdere toetscriteria niet wordt voldaan, dan zal het proces wederom doorlopen moeten worden.

De onderstaande beschrijving van het selectieproces biedt de waterbeheerder het inzicht, om uit het ruime aanbod aan methoden de meest geschikte te kiezen, afgestemd op de randvoorwaarden uit het veld en de eisen die de beheerder stelt aan het meetstation. In de praktijk kan de waterbeheerder het selectieproces op twee manieren hanteren:

- bij een nieuw in te richten meetnet of een enkel nieuw in te richten meetstation leidt het selectieproces direct tot de meest geschikte meetmethode, waarop een ontwerp voor nieuwbouw kan worden gebaseerd;
- in een bestaand meetnet of voor een bestaand meetpunt kan het selectieproces worden gebruikt voor een evaluatie, waarna - indien nodig - een aanpassing van de tot dan toegepaste methode kan worden overwogen.

FIGUUR 9-1 SCHEMA SAMENHANG RANDVOORWAARDEN EN GEBRUIKERSEISEN MEETMETHODE

Alvorens de waterbeheerder tot de keuze van de meest geschikte meetmethode komt, dienen de randvoorwaarden uit het veld en de gebruikerseisen te worden geïnventariseerd, zoals aangegeven in het volgende schema.

Opmerkingen:
- De bereiken van waterstanden en debieten zijn doorgaans redelijk goed in te schatten. Het is van veel belang aan te geven of inderdaad het gehele bereik moet worden bemeten. Voor sommige doeleinden zijn vooral topafvoeren interessant; in andere situaties gaat het soms uitsluitend om de minimale afvoeren.
- De aard van en de hoeveelheid aan sedimenttransport en het voorkomen van beddingvormen moet bij benadering bekend zijn, omdat ze van veel belang zijn voor het goed functioneren van de meetinstrumenten of de meetstuwen.
- Het beschikbare verval (hoeveel mag er worden opgestuwd) is van belang om vast te stellen of het ontwerp van een meetstuw of een meetgoot een haalbare optie is.
- Voor een aantal situaties kan de meetfunctie ondergeschikt zijn aan andere belangrijkere functies (peilregeling, wateraanvoer, scheepvaart). Ook kan het ontwerp van een meetstuw ondergeschikt zijn aan de wensen ten aanzien van vismigratie.
- De gewenste meetnauwkeurigheid wordt afgeleid uit de doelstelling van het meten: wettelijke verplichtingen en waterbalansstudies vereisen vaak een grotere nauwkeurigheid dan bijvoorbeeld voor het dagelijks beheer noodzakelijk is.
- Uniformering van hydrologische meetnetten en van de daarin te gebruiken meetmethoden verhoogt de overzichtelijkheid en is kostenbesparend. Hetzelfde geldt voor de inpassing van het meetstation binnen het telemetriesysteem.

Als algemene randvoorwaarde geldt verder dat de organisatie rond de totstandkoming en met name het onderhoud en beheer goed is geregeld. Als aan deze randvoorwaarde niet kan worden voldaan, kan de waterbeheerder al vooraf besluiten deze taken geheel of gedeeltelijk uit te besteden, dan wel af te zien van de realisatie van het meetpunt.

De internationale ISO-standaarden die betrekking hebben op de keuze van de meetmethode en de meetopstelling zijn:
- ISO 8363 - General guidelines for the selection of flow measurement methode
- ISO 8368 - General guidelines for the selection of flow measurement structure

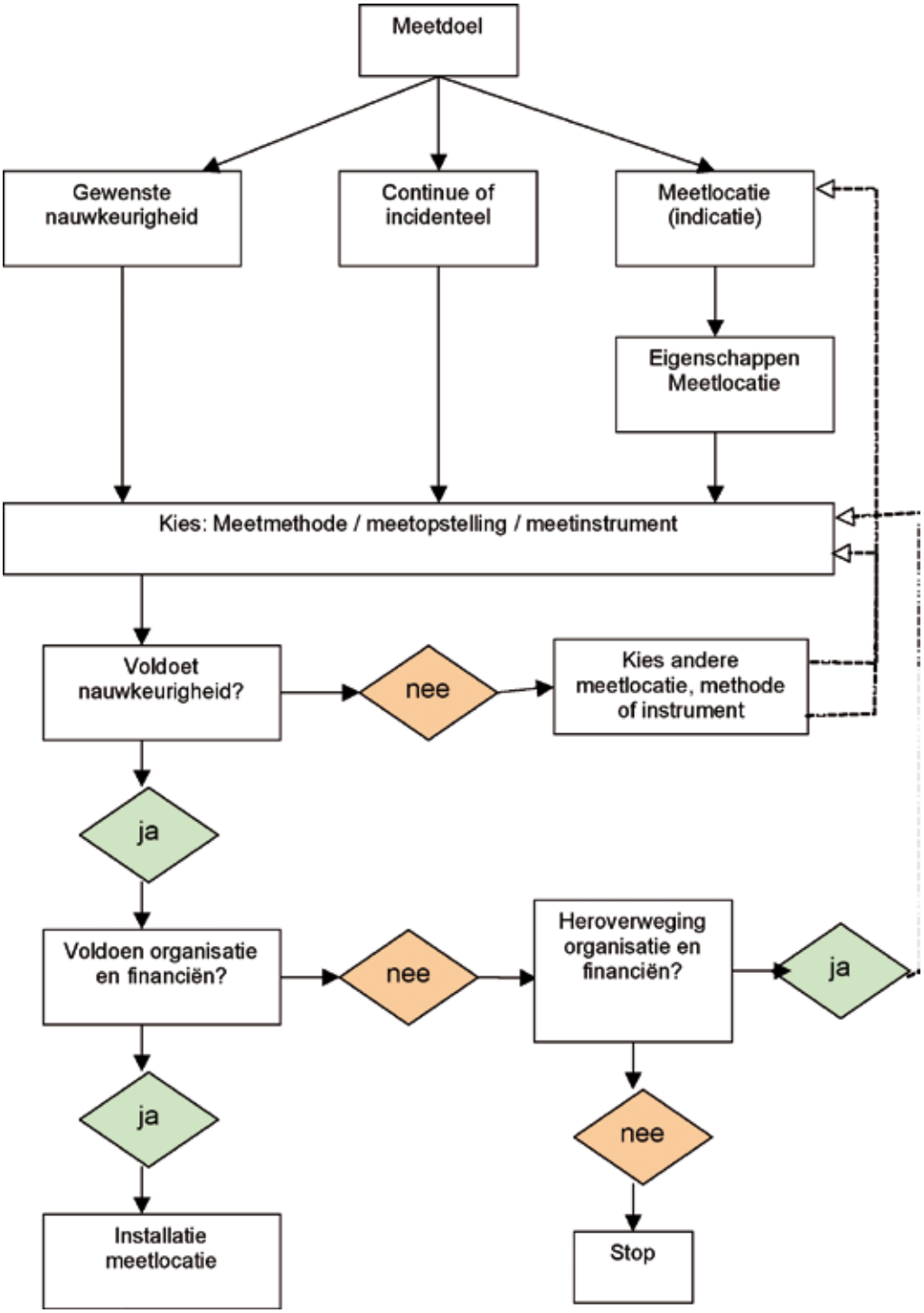
9.1 SELECTIEPROCES

Zoals aan het begin van dit handboek is aangegeven, hangen meetdoel en meet-onnauwkeurigheid nauw met elkaar samen. Uit beide volgt de keuze van de meetlocatie, de meetmethode en het meetinstrument. De keuze van de combinatie meetlocatie, meetmethode en meetinstrument is niet altijd strikt opeenvolgend te nemen. De drie aspecten hangen met elkaar samen. Niet iedere meetmethode is voor iedere locatie geschikt en niet ieder instrument kan voor iedere meetmethode en/of meetlocatie worden toegepast.

Als het selectieproces leidt tot een keuze van meetlocatie, -methode en -instrument, zal een toetsing plaatsvinden aan het beschikbare budget en de organisatorische randvoorwaarden. Indien deze toetsing niet succesvol verloopt kan het selectieproces opnieuw worden doorlopen door kostenbepalende en/of onderhoudsbepalende aspecten te herzien. In de hoofdstukken 11 en 12 zijn de kostenbepalende respectievelijk de organisatorische aspecten omschreven.

In het onderstaande schema is het proces globaal geschetst om vanuit het meetdoel te komen tot de inrichting van een meetlocatie. In de volgende hoofdstukken is het proces stapsgewijs verder uitgewerkt ter ondersteuning van de keuzes.

FIGUUR 9-2 SCHEMA TE DOORLOPEN KEUZES VAN MEETDOEL TOT INRICHTING MEETLOCATIE



9.2 MEETDOEL EN MEETONNAUWKEURIGHEID

Inzicht in het dagelijkse waterbeheer, het opstellen en sluitend krijgen van een waterbalans, de implementatie van een waterakkoord, de calibratie van een waterbewegingsmodel of de uitvoering van de Europese Kaderrichtlijn Water zijn voorbeelden van zaken die in het meetplan zijn beschreven en die het meetdoel bepalen. In onderstaande tabel is het gangbare bereik aangegeven van de toegestane onnauwkeurigheid in relatie tot het meetdoel.

TABEL 9-1 VOORBEELD VAN MEETDOELEN GERELATEERD AAN DE TOEGESTANE ONNAUWKEURIGHEID

Toegestane onnauwkeurigheid van de debietmeting	Voorbeeld van een meetdoel
zeer nauwkeurig 5 %	modelinvoer, waterbalans en watersysteemkennis
nauwkeurig 5 % - 10 %	waterakkoord, vrachtbepaling en waterkwaliteit
minder nauwkeurig 10 %	dagelijks waterbeheer en kleinschalig locatie-onderzoek

Met onnauwkeurigheid van de debietmeting wordt bedoeld de onnauwkeurigheid van de meetwaarde die uit het geheel van de meting(en) voortkomt en beschikbaar is voor registratie onder de noemer “debiet”. Dit “debiet” is de grootheid die als basis dient voor het meetdoel en als zodanig als getalswaarde wordt gebruikt. De gewenste onnauwkeurigheid van de getalswaarde van het debiet moet worden terugvertaald naar de meetinrichting, waarbij rekening is te houden met:

- de onnauwkeurigheid van het meetinstrument,
- de onnauwkeurigheid van de meetmethode, doorwerkend in de meetopstelling,
- de onnauwkeurigheid van de verwerkingsmethode; namelijk de wijze waarop de gemeten grootheden worden verwerkt tot een getalswaarde van het debiet.

Is het feitelijke gebruiksdoel van de getalswaarde van het debiet niet het debiet zelf, maar de hoeveelheidsbepaling, dan dient de gewenste onnauwkeurigheid van de debietmeting ook daaruit te worden afgeleid. In par. 2.2 zijn de bijbehorende foutenbronnen aangegeven. Het heeft bijvoorbeeld geen zin een nauwkeurige debietmeting te realiseren om volumina te berekenen als meetmoment en meetfrequentie niet zijn aangepast aan de veranderingen die kunnen optreden in het werkelijke stromingspatroon.

Onderstaande tabel geeft voor de verschillende meetmethoden aan welke meet-onnauwkeurigheid kan worden gerealiseerd.

TABEL 9-2 KEUZESCHEMA MEETMETHODE IN RELATIE TOT TOEGESTANE ONNAUWKEURIGHEID

	Keuze schema meetmethode	
toegestane onnauwkeurigheid debietmeting	incidentele meting	continue meting
≤ 5%	- moving-boat methode[1] - velocity-area methode[2]	- akoestische looptijd methode - meetgoot[4] - meetstuw[4]
5 - 10%	- velocity-area methode[3] - drijvermetingen - verdunningsmethode	- akoestische Doppler methode - elektromagnetische methode - radar Doppler methode - afvoer-waterstand relatie[4] - kunstwerk gecalibreerd in het veld[4]
≥ 10%	- verhangmethode - deflectiemethode	- kunstwerk met Qh-relatie op basis van literatuur)[5]

[1] met akoestische Doppler snelheidsmeter
[2] voldoende aantal meetverticalen en meetpunten in een verticaal, zie hoofdstuk 8
[3] minstens 5 meetverticalen, zie hoofdstuk 8
[4] recent gecalibreerde afvoerrelatie
[5] niet gecalibreerde theoretische afvoerrelatie

9.3 KEUZE MEETMETHODE IN RELATIE TOT MEETLOCATIE

Er zijn voor de verschillende meetmethoden en meetinstrumenten criteria aan te geven die sterk onderscheidend zijn wat betreft de toepassingsmogelijkheden. Deze criteria hebben enerzijds te maken met de locatie waar gemeten moet worden en anderzijds met de gebruikerseisen zoals de gewenste onnauwkeurigheid (zie Figuur 9-1). Onderstaande tabellen geven voor respectievelijk continue metingen en incidentele metingen aan welke combinatie van locatie-eigenschappen en meetmethode niet leiden tot een goede debietmeting (rood).

TABEL 9-3 KNOCKOUT CRITERIA CONTINUE METING

Continue meting	Meetstuw	Meetgoot	Akoestische looptijd (methode)	Dopplermeting (horizontaal)	Dopplermeting (verticaal)	Elektromagnetische meetmethode	Qh-relatie
De debietmeter moet vispasseerbaar zijn	■						
Er is veel sedimenttransport (in suspensie)			■				
Er is veel bodemtransport			■		■	■	
Er is 's zomers veel waterplantengroei			■	■	■		■
Aanwezigheid van luchtbellen			■	■	■		
De stroomsnelheid is lange tijd laag (<0,05 m/s)				■	■		
Grotere waterloop (> 2 m^2 nat oppervlak)						■	
Geen bestaande stuw beschikbaar	■						
Er is nauwelijks verval	■	■					
Er is geen natuurlijk en/of ongestuurd peilregime							■

FOTO 9-1 DRIJFVUIL TIJDENS METING (FOTO: WS NOORDERZIJLVEST)

TABEL 9-4 KNOCKOUT CRITERIA INCIDENTELE METING

Incidentele meting	Velocity-area-methode (propeller / Doppler-meting / EMS)	Varende Dopplermeting	Verdunningsmethode	Verhangmethode
Waterloop is doorwaadbaar		■		
Stroomsnelheid in het profiel is turbulent/ongelijkmatig	■	■		■
Waterloop heeft zeer veel plantengroei	■	■		■
Hoge nauwkeurigheid vereist (<10%)				■

9.4 TOEPASSINGSOVERZICHT PER MEETMETHODE

Ten behoeve van het keuzetraject zijn voor de gangbare meetmethoden in de navolgende tabellen de eigenschappen samengevat met betrekking tot de methode, apparatuur, opstelling, onnauwkeurigheid, toepassingsgebied, kosten en meetrisico's. De volgende methoden zijn in het overzicht opgenomen:

- Looptijdverschilmeting (Tabel 9-5)
- Dopplermeting in vaste opstelling (Tabel 9-6)
- Dopplermeting in varende opstelling (boot) (Tabel 9-7)
- Dopplermeting in varende opstelling (catamaran/trimaran) (Tabel 9-8)
- Elektromagnetische stroomsnelheidsmeting (Tabel 9-9)
- Mechanische stroomsnelheidsmeter (Tabel 9-10)
- Akoestische puntmeter (Tabel 9-11)
- Gestandaardiseerde meetstuw of meetgoot (Tabel 9-12)
- Niet-gestandaardiseerde meetstuw (Tabel 9-13)
- Qh-relatie waterlopen (Tabel 9-14)
- Debietmeting bij gemalen (Tabel 9-15)

De in de tabellen vermelde "vanaf"-kosten zijn de minimale kosten, waarop gerekend moet worden. De "vanaf"-kosten kunnen variëren afhankelijk van het gewenste basis kwaliteitsniveau; er zijn dan twee "vanaf-kosten" vermeld (bijvoorbeeld: 5.000/15.000), waarbij het lagere bedrag een ander basis kwaliteitsniveau representeert dan het hogere bedrag. Voor een nadere specificatie van de kosten zie hfst. 11.

De in de tabellen vermelde prijzen zijn prijspeil 2009 en exclusief BTW.

9.5 TOETSING EN UITWERKING MEETOPSTELLING

Indien de oorspronkelijke keuzes niet haalbaar blijken te zijn, op basis van organisatorische en/of financiële gronden, dan is het vervolgtraject:

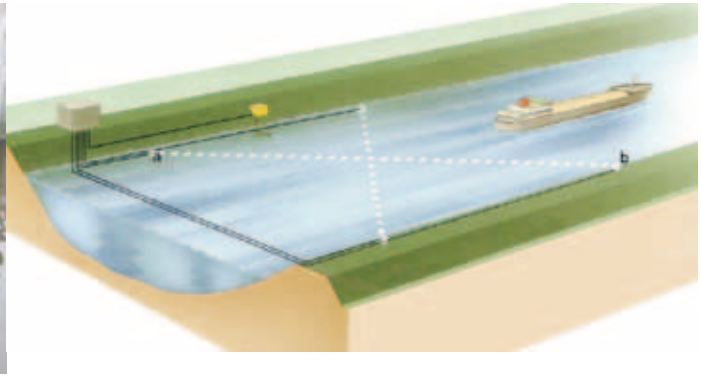
- de tweede of eventueel derde keus uitwerken;
- een andere meetmethode en/of meetinstrument kiezen;
- afzien van de gekozen meetlocatie en een andere locatie zoeken;
- indien toelaatbaar, de eisen aan de meetonnauwkeurigheid versoepelen (een lagere nauwkeurigheid zal over het algemeen minder kosten met zich meebrengen), om vervolgens de procedure opnieuw te doorlopen.

Nadat de keuze van de meetlocatie, de meetmethode en het meetinstrument is gemaakt, kan het voorontwerp van de meetopstelling worden uitgewerkt. In dit voorontwerp zijn aangegeven:

- de benodigde meetinstrumenten en de plaatsing daarvan;
- de bouwkundige voorzieningen;
- hoe de meetgegevens worden doorgegeven en opgeslagen;
- hoe de verwerking tot het debiet plaatsvindt;
- hoe de resultaten worden gecontroleerd of gevalideerd,
- de kosten van de totale meetopstelling;
- de kosten voor gegevensinwinning;
- de wijze van beheer en onderhoud van de opstelling;
- de kosten van het onderhoud van de opstelling.

TABEL 9-5 EIGENSCHAPPEN LOOPTIJDVERSCHILMEETMETHODE

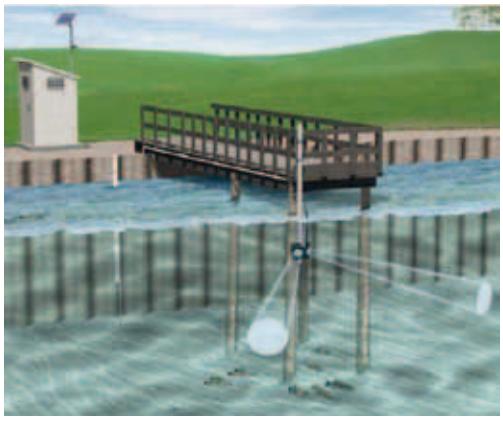
Looptijdverschilmeting



Meetmethode	Looptijdverschilmethode (par. 6.3)
Meting	Stroomsnelheidsmeting (par. 7.3) Bij de looptijdverschilmethode wordt een geluidspuls van de ene naar de andere oever gezonden. De 'meetlijn' staat diagonaal op de stromingsrichting. Met de stroming mee is de geluidspuls sneller aan de overkant en tegen de stroming in langzamer. Het looptijdverschil kan in combinatie met de dimensies van de meetopstelling worden omgerekend in een stroomsnelheid. Om voor eventuele dwarsstroming te corrigeren worden twee meetlijnen geïnstalleerd in een kruisvorm. De gemeten gemiddelde snelheid ter hoogte van de sensoren wordt middels een factor omgerekend naar een profielgemiddelde stroomsnelheid. Deze factor is waterhoogte-afhankelijk en wordt bepaald met een gecalibreerd 2- of 3-dimensionaal rekenmodel en aan de hand van (ADCP) veldmetingen. De relatie tussen het natte oppervlak en de waterhoogte wordt bepaald door het profiel in te meten. Het debiet is het natte oppervlak maal de profielgemiddelde stroomsnelheid
Meetapparatuur	Deze meetmethode gebruikt twee transducenten (akoestische zender en ontvanger) per meetlijn.
Meetopstelling	Eén of twee vaste meetkruizen om de stroomsnelheid te meten en één waterstandsmeter. De transducenten kunnen worden bevestigd aan een paal of aan een landhoofd of in de oever.
Nauwkeurigheid	De gangbare onnauwkeurigheid van deze meetmethode is 5 % tot 10% Doordat 'heen en terug' wordt gemeten (het looptijdverschil) valt de 'geluidssnelheid in water' uit de vergelijkingen, wat deze meetmethode een relatief hoge nauwkeurigheid geeft. Belangrijke foutenbronnen zijn: het ingemeten profiel, een afwijkende stroomsnelheidsverdeling in het profiel dan aangenomen, de ingemeten afstand tussen de akoestische sensoren en de gemeten waterhoogte.
Toepassingsgebied	De looptijdverschilmethode wordt toegepast door Rijkswaterstaat en waterschappen. De grote meetopstellingen staan in rivieren tot 250 m breed en de kleine systemen staan in waterlopen van zo'n 5 meter breed en 1 meter diep.
Kosten (all-in vaste opstelling)	Vanaf 15.000/50.000 tot 75.000 euro of meer (sterk afhankelijk van de situatie, tot 250.000 mogelijk).
Meetrisico's	Het akoestische signaal wordt verstrooid door luchtbellen die ontstaan door passerende schepen, overstort, na een gemaal of waterplanten.Het akoestische signaal wordt verstrooid/geblokkeerd door hoge sedimentconcentraties en hoge beddingvormen. Dit treedt met name op bij grote afvoeren, vlak boven de bodem. Het doorstroomprofiel moet periodiek worden gecontroleerd. Het meetsysteem gaat namelijk uit van een constant profiel.

TABEL 9-6 EIGENSCHAPPEN DOPPLER-METING IN VASTE OPSTELLING

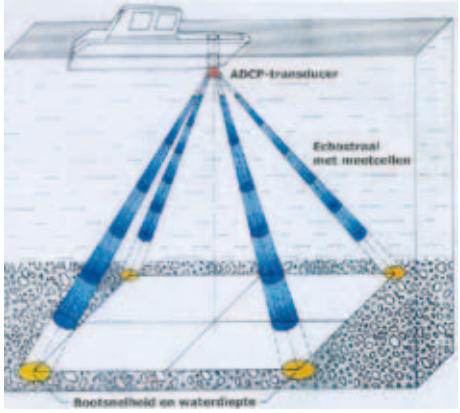
Dopplermeting in vaste opstelling



Meetmethode	Dopplermethode (par. 6.4)
Meting	Stroomsnelheidsmeting (par. 7.3) Bij de Doppler-methode wordt de stroomsnelheid gemeten door de dopplerverschuiving van het teruggekaatste signaal in het water te meten. Dit gebeurt voor verschillende waterdiepten. Met behulp van de theoretische stroomsnelheidsverdeling over de waterdiepte wordt de gemiddelde stroomsnelheid en diepte bepaald.
Meetapparatuur	De Acoustic Current Doppler Profiler (ADCP) meet met verschillende stralen (beams) de stroomsnelheid op verschillende hoogtes in het profiel. De ADCP middelt de metingen over een bepaalde meettijd. De ADCP is vaak uitgerust met een waterstandmeter (drukopnemer).
Meetopstelling	De ADCP kan zowel horizontaal als verticaal (naar boven kijkend) worden gemonteerd. Nadeel van verticaal is de eventuele aanslibbing op de sensoren. Aanbevolen wordt om in een duiker of onder een brug te meten omdat het profiel hier hard is, de stroomsnelheid maximaal en er weinig plantengroei is.
Nauwkeurigheid	De gangbare onnauwkeurigheid van deze meetmethode is 5% tot 10% De ADCP heeft moeite om lage stroomsnelheden (<0,05 m/s) te meten. Belangrijke foutenbronnen zijn: de stroomsnelheidsmeting bij lage afvoeren, afwijking van de aangenomen geluidssnelheid in water, het ingemeten profiel, een afwijkende stroomsnelheidsverdeling in het profiel en de gemeten waterhoogte.
Toepassingsgebied	De Dopplermethode in vaste opstelling wordt veel toegepast door waterschappen in kleinere waterlopen.
Kosten (all-in vaste opstelling)	15.000 – 25.000 euro (sterk afhankelijk van de situatie)
Meetrisico's	Het akoestische signaal wordt verstrooid door luchtbellen die ontstaan door passerende schepen, overstort, opgepompt water of waterplanten. Het akoestische signaal wordt verstrooid/geblokkeerd door hoge sedimentconcentraties. Dit treedt met name op bij grote afvoeren, vlak boven de bodem. Het doorstroomprofiel moet periodiek worden gecontroleerd. Het meetsysteem gaat namelijk uit van een constant profiel. Verticale opstelling kan snel hinder ondervinden van aanslibbing Dopplermethode kan lage stroomsnelheden (0,05 m/s) niet goed meten

TABEL 9-7 EIGENSCHAPPEN DOPPLER-METING IN VARENDE OPSTELLING (BOOT)

Dopplermeting in varende opstelling (boot)



Meetmethode	Moving-boat methode (par. 5.2.1)
Meting	Stroomsnelheidsmeting (par. 7.3) Bij de Doppler-methode wordt de stroomsnelheid gemeten door de dopplerverschuiving van het teruggekaatste signaal in het water te meten. Dit gebeurt voor verschillende waterdiepten. Al varend wordt het debiet in het bemeten oppervlak van de doorsnede bepaald. Het debiet in de onbemeten zones bij het wateroppervlak, de bodem en de oevers wordt berekend met behulp van een aangenomen theoretische stroomsnelheidsverdeling over de waterdiepte wordt de gemiddelde stroomsnelheid en diepte bepaald. Het debiet wordt berekend met de velocity-area methode.
Meetapparatuur	De Acoustic Current Doppler Profiler (ADCP) meet met verschillende stralen (beams) de stroomsnelheid op verschillende hoogtes in het profiel. De ADCP middelt de metingen over een bepaalde tijdsduur om tot een betere meting te komen. De ADCP heeft vaak ook een waterstandmeter (drukopnemer). Bottom-track is nodig om de gemeten stroomsnelheden ten opzichte van de vaste bodem te kennen. De nulreferentie kan worden gecontroleerd (hersteld) door in een lus tussen de oevers te varen of met een DGPS op het meetschip.
Meetopstelling	De ADCP is voor, naast of onder het meetschip bevestigd.
Nauwkeurigheid	De gangbare onnauwkeurigheid van deze meetmethode is 3% tot 5% Belangrijke foutenbronnen zijn: niet nauwkeurige bepaling van de bottom-track (nulreferentie gemeten stroomsnelheden), variaties in de vaarsnelheid, het ingemeten profiel, een andere dan aangenomen stroomsnelheidsverdeling in het profiel.
Toepassingsgebied	Afvoerenmetingen op rivieren en bevaarbare beken. Op de grote rivieren gebruikt om Qh-relaties en de ADM's op Rijn en Maas te valideren.
Kosten	Instrument: 15.000 – 25.000 euro (afgezien van de inbouw van de ADCP); meetsessie: vanaf 5.000/15.000 euro
Meetrisico's	Fouten in de nulreferentie voor de gemeten stroomsnelheden. Variaties in de vaarsnelheid, bijvoorbeeld op drukke vaarwegen of bij het naderen van de oevers. Fouten in de aanname van het snelheidsprofiel nabij bodem, wateroppervlak en oevers. Aannames zitten in de verwerkingssoftware van de ADCP.

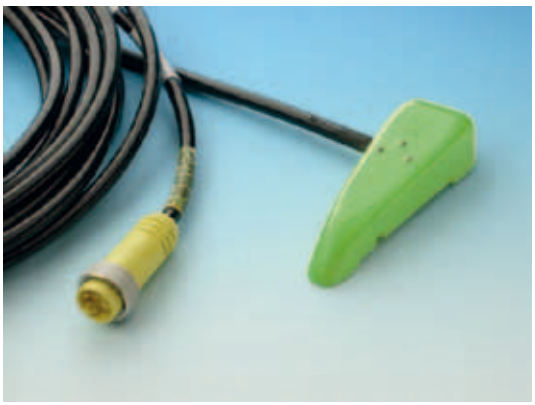
TABEL 9-8 EIGENSCHAPPEN DOPPLER-METING IN VARENDE OPSTELLING (CATAMARAN)

Dopplermeting in varende opstelling (catamaran/trimaran)

Meetmethode	Moving-boat methode (par. 5.2.1); veldcalibratie (par. 5.5)
Meting	Stroomsnelheidsmeting (par. 7.3) Bij de Doppler-methode wordt de stroomsnelheid gemeten door de dopplerverschuiving van deeltjes in het water te meten. Er zijn twee soorten varende opstellingen: • de trimaran die volgens de varende Doppler-methode meet, overeenkomstig de varende ADCP-meting • de catamaran die volgens de velocity-area methode meet, meten in verschillende verticalen Bij beide methoden wordt voor de onbemeten zones het debiet berekend met behulp van een aangenomen theoretische stroomsnelheidsverdeling.
Meetapparatuur	De Acoustic Current Doppler Profiler (ADCP) meet met verschillende stralen (beams) de stroomsnelheid op verschillende hoogtes in het profiel. De ADCP middelt de metingen over een bepaalde meettijd.
Meetopstelling	De ADCP is gemonteerd onder een draagbare catamaran/ trimaran en wordt met een kabel over de meetraai getrokken (trimaran) of in een meetverticaal stilgelegd (catamaran). Een compleet systeem bestaat uit een ADCP, een polyester catamaran of trimaran, een Bluetooth zender / ontvanger, een waterdichte Pocket PC en de benodigde software.
Nauwkeurigheid	De gangbare onnauwkeurigheid van deze meetmethode met een trimaran is 3% tot 5% en met een catamaran 5% tot 10% Belangrijke foutenbronnen zijn: niet nauwkeurige bepaling van het profiel, een andere dan aangenomen stroomsnelheidsverdeling in het profiel.
Toepassingsgebied	Calibratie van permanente debietmeetpunten en voor capaciteitsmeting bij gemalen.
Kosten	Catamaran/trimaran: 15.000-25.000 euro; meetsessie in eigen beheer: 6 metingen per dag met 2 personen à 50 euro/uur + 4 uur verwerkingstijd; meetsessie door derden: vanaf 1.500/2.000 euro
Meetrisico's	Fouten in de nulreferentie voor de gemeten stroomsnelheden. Fouten in de aanname van het snelheidsprofiel nabij bodem, wateroppervlak en oevers. Aannames zitten in de verwerkingssoftware van de meetapparatuur.

TABEL 9-9 EIGENSCHAPPEN ELEKTROMAGNETISCHE METHODE

Elektromagnetische stroomsnelheidsmeting



Meetmethode	Velocity area methode (par. 5.1); veldcalibratie (par. 5.5)
Meetapparatuur	Stroomsnelheidsmeting (par. 7.3) Bij de elektromagnetische snelheidsmeter wordt de stroomsnelheid gemeten door de spanning die wordt opgewekt door een geleider (water) die loodrecht door een homogeen magnetisch veld beweegt. De spanning is evenredig met de snelheid waarmee het water door het magnetisch veld beweegt (wet van Faraday). De elektromagnetische snelheidsmeter meet de momentane stroomsnelheid in een klein gebied onder het wateroppervlak (meetpunt). Het signaal wordt over enige tijd (één of enkele minuten) gemiddeld. De waterdiepte en positie van het meetinstrument in de verticaal moeten apart worden gemeten.
Meetopstelling	Een elektromagnetische snelheidsmeter kan wadend worden gebruikt in kleine waterlopen. De vaste opstelling wordt in Nederland weinig toegepast.
Nauwkeurigheid	De nauwkeurigheid van deze meetmethode is 5% bij hoge stroomsnelheden tot 10% bij lage stroomsnelheden. Belangrijke foutenbronnen zijn: niet nauwkeurige positiebepaling en hoge sedimentconcentraties in de waterloop.
Toepassingsgebied	Afvoerenmetingen in kleine waterlopen (wadend). Veel toegepast voor debietmetingen in gesloten leidingen. Toepassing bij kleine bergbeken (lus) om het debiet te meten tijdens of na regenbuien. Alleen geschikt tot 2 m^2 doorstroomprofiel.
Kosten	Instrument (vaste opstelling): vanaf 10.000 euro; in-situ meting vanaf 1.500/2.000 euro.
Meetrisico's	Verloop van de nulreferentie door temperatuurseffecten . Geregeld calibreren tijdens een meetsessie is nodig. Fouten in de aanname van het snelheidsprofiel nabij bodem, wateroppervlak en oevers. Aannames zitten in de verwerkingssoftware van het instrument.

TABEL 9-10 EIGENSCHAPPEN PROPELLERSNELHEIDSMETER

Mechanische stroomsnelheidsmeter

Meetmethode	Velocity area methode (par. 5.1); veldcalibratie (par. 5.5);
Meting	Stroomsnelheidsmeting (par. 7.3) Bij de propellersnelheidsmeter wordt het aantal omwentelingen per tijdseenheid van de propeller gekoppeld aan de stroomsnelheid. Eén omwenteling vertegenwoordigt een afgelegde lengte van de waterdeeltjes binnen een zekere tijd. Deze relatie wordt in geconditioneerde omstandigheden (laboratoriumgoot) gecalibreerd. De mechanische snelheidsmeter meet de momentane stroomsnelheid in een klein gebied onder het wateroppervlak (meetpunt). Het aantal pulsen wordt gedurende enige tijd (één of enkele minuten) geteld en met de calibratieformule omgezet naar een stroomsnelheid. De waterdiepte en positie van het meetinstrument in de verticaal moeten apart worden gemeten.
Meetopstelling	Een mechanische snelheidsmeter kan wadend of vanaf een brug worden gebruikt of bevestigd aan een kabel naast een meetschip. Tegenwoordig wordt dit meetinstrument alleen nog in kleine waterlopen gebruikt.
Nauwkeurigheid	De nauwkeurigheid van deze meetmethode is 5% bij hoge stroomsnelheden tot 10% bij lage stroomsnelheden. Belangrijke foutenbronnen zijn: niet nauwkeurige positiebepaling en vegetatie.
Toepassingsgebied	Afvoerenmetingen in kleine waterlopen (wadend) of op bevaarbare rivieren en beken vanuit een meetboot.
Kosten	Instrument: vanaf 2.000 euro voor een klein molentje; meetsessie: vanaf 1.500/2.000 euro
Meetrisico's	Verloop van de calibratieformule door vuil, vegetatie en slijtage. Geregeld calibreren voor of na een meetsessie is nodig. Fouten in de aanname van het snelheidsprofiel nabij bodem, wateroppervlak en oevers. Aannames zitten in de verwerkingssoftware van het instrument.

TABEL 9-11 EIGENSCHAPPEN VAN DE AKOESTISCHE PUNTMETER

Akoestische meting in puntopstelling

Meetmethode	Velocity area methode (par. 5.1); veldcalibratie (par. 5.5)
Meting	Stroomsnelheidsmeting (par. 7.3) Het instrument zendt een geluidsgolf uit, meet de echo en herhaalt na een korte tussenpoos een tweede geluidsgolf met echometing. Het verschil tussen de echo's is een maat voor de afstand. Uit deling door de tijd volgt de stroomsnelheid. Tevens wordt de waterdiepte gemeten.
Meetapparatuur	Stang met sensor en uitleeseenheid.
Meetopstelling	Handmatig op verschillende punten in het doorstroomprofiel om ter plaatse de stroomsnelheid te meten. De gegevens worden direct opgeslagen en verwerkt in de uitleeseenheid.
Nauwkeurigheid	Is afhankelijk van het aantal transducenten in het apparaat. De gangbare onnauwkeurigheid van deze meetmethode is 5% tot 10%.
Toepassingsgebied	Calibratiemeting van permanente debietmeetpunten en capaciteitsmeting van kleinere gemalen
Kosten	Instrument: vanaf 9.000 euro; meetsessie:vanaf 1.500/2.000 euro
Meetrisico's	Fouten in de aanname van het snelheidsprofiel nabij bodem, wateroppervlak en oevers. Aannames zitten in de verwerkingssoftware van het instrument.

TABEL 9-12 EIGENSCHAPPEN GESTANDAARDISEERDE MEETSTUW/MEETGOOT

Gestandaardiseerde meetstuw of meetgoot

Meetmethode	Meetstuw (par. 6.1) of meetgoot (par. 6.2)
Meting	Vervalmeting meetstuwen (par. 7.1) of meetgoten (par. 7.2) Bij een meetstuw of meetgoot wordt het water door een vernauwing geperst, waarbij een verval ontstaat. Dit geeft een situatie waarbij de waterstand direct gerelateerd kan worden aan het debiet. Deze relatie wordt weergegeven met een stuwformule. Van enkele gestandaardiseerde meetstuwen en meetgoten is deze relatie exact bekend. Wanneer de benedenstroomse waterstand hoger komt dan de modulaire limiet (verdronken) moet ook de benedenstroomse waterstand worden meegenomen in de stuwformule om de extra opstuwing te corrigeren. Benodigd: waterstandsmeters en meetstuw of –goot
Meetopstelling	Vaste constructie, vaste kruin en voorgeschreven aanstroming die voldoen aan de ISO-normen
Nauwkeurigheid	De gangbare onnauwkeurigheid van deze meetmethode is 5% Belangrijke foutenbronnen zijn: nauwkeurigheid van de waterstandsmeting en de klep-/schuifhoogtemeting en vervuiling van de meetstuw of –goot
Toepassingsgebied	Gestandaardiseerde meetstuwen worden met name toegepast door waterschappen. Gestandaardiseerde meetgoten worden weinig toegepast. Met name de scherpe en korte overlaten zijn gevoelig voor verdrinking en zijn niet vispasseerbaar.
Kosten (all-in meetopstelling)	De kosten betreffen het inrichten van een locatie tot een debietmeetpunt met een standaardiseerde meetstuw of meetgoot: vanaf 20.000/25.000 euro, maar kan veel hoger zijn afhankelijk van de lokale situatie tot 70.000
Meetrisico's	Gevoeligheid voor vervuiling van de stuwkruin. Dit geeft een overschatting van het debiet. Een verkeerd geïnstalleerde waterstandsmeter (uitstekende pijp of te dicht bij stuwkruin) geeft systematische meetafwijkingen.

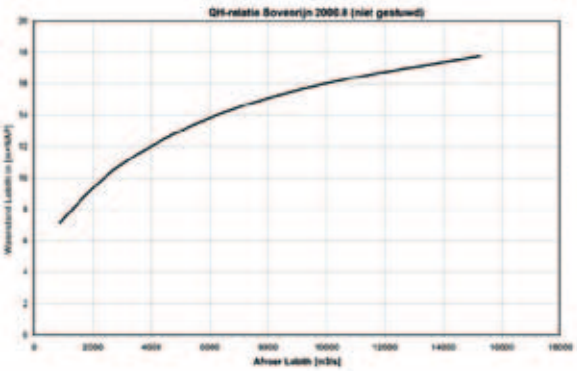
TABEL 9-13 EIGENSCHAPPEN NIET GESTANDAARDISEERDE MEETSTUW

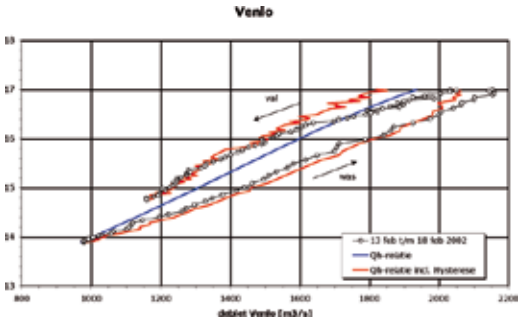
Niet gestandaardiseerde meetstuw

Meetmethode	Veldcalibratie (par. 5.5); meetstuwen (par. 6.1)
Meting	Vervalmeting meetstuwen (par. 7.1); stroomsnelheidsmeting (par. 7.3) Een bestaande regelbare of vaste stuw kan gebruikt worden om debieten te meten. Het debiet kan met een stuwformule worden afgeleid van de dikte van de overstortende straal. Bij regelbare stuwen en schuiven moet hiervoor de bovenstroomse waterstand en de klep-/schuifhoogte worden gemeten. De stuwformule kan uit literatuur worden afgeleid op basis van de afmetingen en eigenschappen van de stuw. Maar beter is het om de stuw in een hydraulica laboratorium of in het veld te calibreren.
Meetapparatuur	Waterstandsmeter
Meetopstelling	Vaste constructie met een vaste kruin of klep. De aanstroming ontwerpen volgens de ISO-normen.
Nauwkeurigheid	De gangbare onnauwkeurigheid van deze meetmethode is 5 - 20 % Veldcalibratie geeft de nauwkeurigste resultaten, de standaard stuwformule geeft de onnauwkeurigste resultaten.
Toepassingsgebied	Operationeel waterbeheer en waterbalansstudies.
Kosten (all-in)	De all-in kosten betreffen het geschikt maken van een bestaande stuw als debietmeetpunt: plaatsen meetopstelling en de veldcalibratie van de stuw: vanaf 10.000/15.000 euro.
Meetrisico's	Stuwfomules op basis van de literatuur zijn niet erg nauwkeurig (10-30%), tenzij goed toegepast, maar de werkelijkheid is altijd anders. Gevoeligheid voor vervuiling van de stuwkruin. Dit geeft een overschatting van het debiet Een verkeerd geïnstalleerde waterstandsmeter (uitstekende pijp of te dicht bij stuwkruin) geeft systematische meetafwijkingen.

TABEL 9-14 EIGENSCHAPPEN QH-RELATIE IN WATERLOPEN

Qh-relatie waterlopen

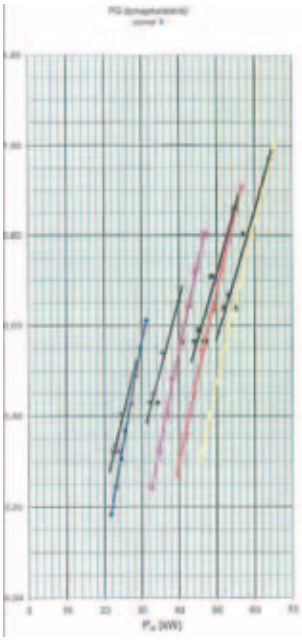




Meetmethode	Veldcalibratie (par. 5.5); relatie debiet en verval (par. 6.6)
Meting	Stroomsnelheidsmeting (par. 7.3) Bij deze meetmethode wordt een relatie opgesteld tussen de waterstand en het debiet. De waterstand wordt hierbij continue gemeten en het debiet incidenteel. Belangrijk is om de debietmeting over het hele meetbereik te meten en veranderingen in de tijd ook te volgen.
Meetapparatuur	Een waterstandsmeter en apparatuur voor incidentele debietmetingen
Meetopstelling	Waterstandsmeter
Nauwkeurigheid	Deze methode heeft een gangbare onnauwkeurigheid van 5 tot 10 %. Met name de lage afvoeren zijn bij deze methode vaak onnauwkeuriger te meten, omdat de afvoer verhoudingsgewijs snel verandert bij een kleine waterstandsverandering. Daarnaast kan hysterese voor afwijking zorgen. Hysterese kan middels aanvullende vergelijkingen worden gecompenseerd (Qf-relatie)
Toepassingsgebied	Deze methode wordt toegepast bij alle ongestuwde waterlopen, met name aan de oost- en zuidkant van Nederland. Rijkswaterstaat gebruikt bijvoorbeeld een Qh-relatie bij de debietmeting bij Lobith.
Kosten (all-in)	De all-in kosten betreffen de meetopstelling en de bepaling van de Qh-relatie: vanaf 10.000 euro, afhankelijk van de grootte van de waterloop tot 100.000 euro of meer.
Meetrisico's	Een Qh -relatie kan in de tijd verlopen door bodemdaling of stijging Een Qh -relatie kan in het seizoen veranderen door de groei van oever- en waterplanten (leidingweerstand). Dit speelt met name bij de kleinere waterlopen. Met name de extreem hoge afvoeren worden vaak niet direct gemeten, maar geëxtrapoleerd. Dit kan een extra afwijking geven

TABEL 9-15 EIGENSCHAPPEN DEBIETMETEN BIJ GEMALEN

Debietmeten bij gemalen



Meetmethode	Veldcalibratie (par. 5.5); relatie debiet en verval (par. 6.6)
Meting	Gemalen kunnen ook worden gebruikt om debieten af te leiden. Vaak is het toerental in combinatie met de opvoerhoogte een goede maat voor het debiet. Met name vijzelgemalen zijn hiervoor geschikt. Calibratie in het veld is met name voor pompgemalen noodzakelijk, omdat de fabriekscalibratie niet geldt voor de opstelling in het veld.
Meetapparatuur	Waterstandsmeter en toerentalmeter; propellerstroommeter of varende ADCP
Meetopstelling	Incidenteel: In-situ
Nauwkeurigheid	Afhankelijk van de leeftijd van de pomp of vijzel 5% tot > 10%
Toepassingsgebied	Operationeel waterbeheer en waterbalansstudies
Kosten	In-situ meetsessie vanaf 1.500/2.000 euro
Meetrisico's	De Qh -relatie van een gemaal is door slijtage aan verandering onderhevig. Hercalibratie (eens per 5 jaar) is daarom aan te raden. Veel gemalen hebben meerdere stortkokers en meerdere vrije uitstroomopeningen, waardoor het soms handiger is om bovenstrooms in de toevoerende watergang de debieten te gaan meten.

10

PRAKTIJKASPECTEN

In dit hoofdstuk is een aantal aspecten van het debietmeten behandeld die in de vorige hoofdstukken niet aan de orde zijn geweest. Het gaat hierbij om aspecten die verband houden met het opzetten en realiseren van een incidentele of een continue debietmeting. Par. 10.1 behandelt de praktijk van de incidentele debietmeting, par. 10.2 bespreekt het ontwerp en de realisatie van continue debietmeetstations aan de hand van een checklist en toelichting op een aantal onderwerpen daaruit.

Debietmeetinrichtingen als meetstuwen of meetgoten worden soms gezien als obstakel voor de vismigratie. In par. 10.3 is nader ingegaan op de vispasseerbaarheid van debietmeet-inrichtingen.

FOTO 10-1 METEN MET TWEE MATEN IS LEUKER (FOTO: WAGENINGEN UNIVERSITEIT)

10.1 INCIDENTELE METING

In dit hoofdstuk zijn praktische informatie en ervaringen opgenomen met als doel de gebruiker een houvast te geven bij het opzetten, voorbereiden, uitvoeren en naverwerken van een incidentele debietmeting. De volgende onderwerpen omvatten alle aspecten die liggen tussen het eerste idee en het eindresultaat van de meting:

- ontwerpaspecten (par. 10.1.1);
- de voorbereiding (par. 10.1.2);
- het meten (par. 10.1.3);
- de uitvoering (par. 10.1.4);
- onderhoud (par. 10.1.5);
- verwerking van de gegevens (par. 10.1.6).

10.1.1 ONTWERPASPECTEN TIJDELIJKE MEETOPSTELLING

De verschillende aspecten van een tijdelijke of varende meetopstelling zijn in deze paragraaf opgenomen. Tijdelijk betekent in tegenstelling tot continue debietmetingen dat de meting, en meestal ook de meetopstelling, gedurende een afgebakende periode operationeel zijn.

KEUZE MEETLOCATIE

De keuze van een geschikte meetlocatie is behandeld in hfst. 4.

KEUZE MEETMETHODE

De keuze van een geschikte meetmethode is behandeld in hfst. 9 en de achtergronden van de meetmethode en de meetinstrumenten zijn behandeld in hfst. 5 respectievelijk hfst. 7.

ONTWERP MEETRASTER

Het ontwerp van het meetraster, het aantal meetpunten in het meetvlak ter plaatse van de meetraai wordt gestuurd door:

- de gewenste nauwkeurigheid van het debiet;
- de gebruikte meetinstrumenten;
- de bereikbaarheid van de meetraai dan wel de bevaarbaarheid van de meetraai.

In par. 8.7 is een methode beschreven om een meetraster in een meetraai te ontwerpen uitgaande van een gewenste onnauwkeurigheid van het debiet. De onnauwkeurigheid van de meetinstrumenten is behandeld bij de betreffende instrumenten in hfst. 7 en par. 8.2.

De mogelijkheid om een bepaald meetinstrument te gebruiken hangt onder andere af van de ruimte rond de meetraai in het bijzonder de ruimte rond het meetvaartuig.
Bij varende debietmetingen worden doorgaans akoestische stroomsnelheidsmeters gebruikt. Een akoestische stroomsnelheidsmeter wordt onderwater opgesteld langszij van het meetschip of onder het meetschip. Bij de Rijkswaterstaat meetschepen hangt de akoestische stroomsnelheidsmeter (ADCP) in een bun in de kiel van het schip (ruimte in de kiel waarin de sensors van de ADCP net onder de kiellijn uitkomen). In de meetraai wordt van oever tot oever gemeten terwijl het schip heen en weer vaart. Passerende vaartuigen (ver)hinderen de baan die het meetschip vaart en de schroefstraal van passerende schepen kan het ontvangen akoestisch signaal nadelig beïnvloeden.
Alleen op sommige takken van de Rijn (Bovenrijn en Waal) is de intensiteit van passerende schepen zo groot (gemiddeld één per minuut) dat een debietmeting soms gehinderd wordt. Op alle andere waterlopen is het aantal passerende schepen beperkt zodat er voldoende tijd is voor een debietmeting.

STABILITEIT VAN DE CONSTRUCTIE EN TRILLINGEN

De optredende stroomsnelheden rond het meetinstrument bepalen de sterkte van de ophangconstructie. Een vaste meetbrug over een waterloop kan bij lage waterstanden tot gevolg hebben dat de meetstang waaraan het instrument hangt te lang is (doorbuiging, trillingen) en bij hoge waterstanden in het water hangt. Verder oefenen hoge stroomsnelheden grote krachten uit op het instrument waardoor het kan verschuiven, losraken of in trilling kan geraken.

De stabiliteit van een vast opgesteld meetinstrument of een meetinstrument bevestigd aan een stang of constructie kan in gevaar komen door de kracht van het stromende water, passerende schepen en oever- of bodemerosie. De hydraulische krachten op een constructie zijn evenredig met de stroomsnelheid in het kwadraat (v^2), dus een toename van 50% van de stroomsnelheid levert een 125% grotere kracht. De mate van stroomlijning van het meetinstrument speelt ook een rol, aangezien een stomp voorwerp meer weerstand ondervindt dan een gestroomlijnd voorwerp.

Langsstromend water kan een meetopstelling in trilling brengen. Bijvoorbeeld een stroomsnelheidsmeter aan een stang die in eigenfrequentie raakt. Opstellingen nabij de oever, waar de stroomsnelheid meestal lager is, hebben daar minder last van, maar een flexibele bevestiging kan ook bij lage stroomsnelheden in trilling geraken. Wervels van passerende schepen of achter een pijler kunnen met een bepaalde frequentie loslaten en daarmee de meetopstelling in trilling brengen.

Een andere bron van trillingen is bijvoorbeeld een viaduct waarover auto's of treinen rijden. Een meetinstrument van een viaduct kan daardoor bij iedere passage kort mee gaan trillen. Ook heien in de buurt van een meetlocatie kan het meetinstrument kort en hevig laten trillen.

ENERGIEVOORZIENING EN BEDRIJFSZEKERHEID

De energievoorziening van een meetinstrument moet gegarandeerd zijn. Energie betrekken van het energienet in het gebied is betrouwbaar. Voor varende opstellingen geldt dat de energievoorziening op het meetschip betrouwbaar moet zijn. Instrumenten met batterijen hebben als nadeel dat de batterijen op tijd moeten worden vervangen. Beschadigen van aangelegde energiekabels kan worden veroorzaakt door graven, ankers van schepen of vandalisme.

VOORKOMEN BESCHADIGING INSTRUMENTEN

Beschadigen van meetinstrumenten of van de gehele meetopstelling moet worden voorkomen. Langsvarende vaartuigen kunnen meetopstellingen beschadigen (zuigende werking, aanvaring). Ook recreanten die zich op de meetopstelling begeven kunnen schade veroorzaken evenals vandalen. Voor varende meetopstellingen geldt dat het dicht langs de oever of pijler varen schade kan veroorzaken
Het onbeheerd achterlaten van meetinstrumenten wordt afgeraden. De meetopstelling moet zoveel mogelijk worden ontdaan van kwetsbare onderdelen als deze 's avonds of in het weekeinde wordt achtergelaten.

BESCHIKBAARHEID VAN PERSONEEL

Als de meetperiode en meetdagen zijn vastgesteld, moet worden nagegaan of er voldoende ervaren personeel en eventueel vervangers beschikbaar zijn gedurende die periode. Ook als meetgegevens van andere meetopstellingen in de omgeving nodig zijn (bijvoorbeeld een

waterstand bij een sluis), moet worden nagegaan of de informatie beschikbaar is gedurende de meetperiode.

VEILIGHEID VOOR PERSONEEL

Het werken bij water en met name bij stromend water is gevaarlijk. De regelgeving volgens de Arbo moeten in acht worden genomen. Zo moeten er altijd minimaal twee mensen veldwerk doen als iemand het water in moet. Verder kan gedacht kan worden aan het dragen van fluoriserende hesjes, een helm, veiligheidsschoenen en een zwemvest en het gebruiken van lijflijnen, hekken, reddingsboeien, en het beschikbaar hebben van een (opblaas)boot, ehbo-koffer en telefoonnummers in geval van nood.

10.1.2 VOORBEREIDING METEN IN EEN TIJDELIJKE MEETOPSTELLING

MEETPLAN

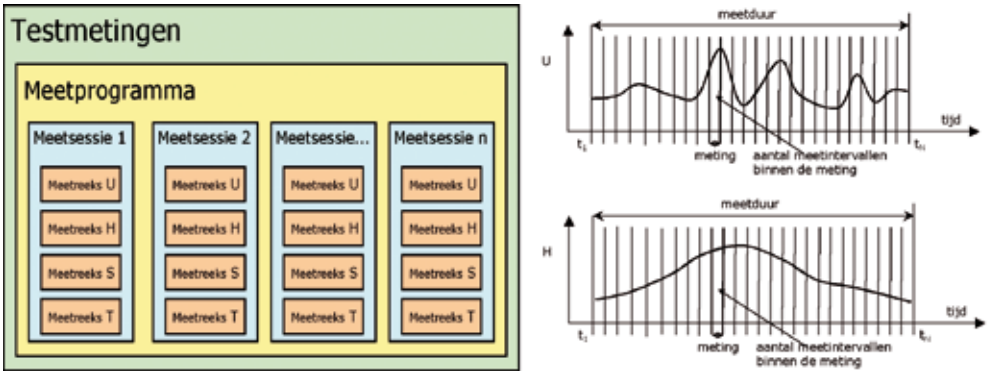
Een meetplan omvat alle definities, instructies en afspraken van de meting. In het meetplan zijn opgenomen:

- het meetdoel;
- de samenstelling van de meetploeg en verantwoordelijkheden;
- de voorbereidingen die getroffen moeten worden;
- de te gebruiken meetinstrumenten;
- de meetopstelling waaraan de instrumenten worden bevestigd;
- aanvullende constructies nodig voor het meten en de veiligheid;
- de periode waarbinnen wordt gemeten;
- op welke locaties en wanneer daar precies wordt gemeten;
- wat wordt gemeten op de verschillende meetlocaties;
- de opslag van de meetgegevens;
- de manier van verwerken van de meetgegevens;
- de wijze van controleren van de meetgegevens;
- de energievoorziening;
- de benodigde veiligheidsmaatregelen.

De volgende definities kunnen worden gehanteerd:

- De afvoermetingen: alle metingen die binnen het meetprogramma worden uitgevoerd.
- Meetprogramma: overzicht van alle meetsessies binnen de afvoermetingen.
- Meetsessie: serie metingen uitgevoerd gedurende een aaneengesloten periode (bijvoorbeeld een afvoergolf, één spuivenster, een getijdeperiode).
- Meetreeks: de geregistreerde reeks van momentane waarden van stroomsnelheid (U), waterstand (H), watertemperatuur (T), saliniteit (S).
- Meetduur: duur van de registratie van stroomsnelheden (U), waterstanden (H), saliniteit (S) en watertemperatuur (T) gedurende een meetsessie.
- Meting: periode waarbinnen een deel van de meetreeks is verkregen voor een min of meer stationaire stromingssituatie. Tijdens het passeren van een afvoergolf bijvoorbeeld 30 minuten of tijdens een getijdecyclus bijvoorbeeld 3 minuten.
- Meetinterval: tijdsduur waarbinnen één momentane meetwaarde wordt verkregen binnen een meting. Voor een akoestische stroomsnelheidsmeter en waterstandsmeters bijvoorbeeld 10 seconden.
- Meetfrequentie: reciproque van het meetinterval, frequentie waarmee de meetwaarden worden vastgelegd. Voor een meetinterval van 10 seconden is de meetfrequentie 0,1 Hz.

FIGUUR 10-1 VOORBEELD VAN DEFINITIES VAN DE TESTMETINGEN ROND DE SPUISLUIS IJMUIDEN (BRON: HKV)



MEETFREQUENTIE

De meetfrequentie wordt opgevat als:

- de frequentie van het meetsignaal dat een meetinstrument afgeeft;
- de frequentie van opeenvolgende meetsessies.

De meetfrequentie van een meetinstrument is hoog, bijvoorbeeld 0,1 Hz tot 300 Hz. Met deze frequentie wordt één meetwaarde afgegeven. Vaak worden in het instrument gedurende enkele seconden of minuten deze meetwaarden gemiddeld zodat 'de meetwaarde' met een lagere frequentie beschikbaar is, bijvoorbeeld een meetwaarde per 10 seconden of per minuut. Daarmee worden fouten in de hoogfrequente meetwaarden uitgefilterd en is de uiteindelijke meetwaarde nauwkeuriger.

De meetfrequentie van een meetsessie wordt bepaald door de variabiliteit van de afvoer en waterstanden in de tijd en door de vraag welke bewerkingen de verkregen basisgegevens zullen ondergaan. Een veel gehanteerd meetinterval bedraagt 15 minuten voor waterlopen waarin de afvoer niet veel in de tijd fluctueert. Bij voorkeur is de meetfrequentie constant, vast tijdsinterval, hetgeen voordelen heeft voor de eenvoud en zekerheid bij de gegevensverwerking. Daarnaast kan het tijdsinterval afhankelijk worden ingesteld van de mate waarin de te meten parameter verandert, bijvoorbeeld gemaal aan/uit of spuisluis open/dicht.

TIJDSSYNCHRONISATIE EN PLAATSBEPALING MEETINSTRUMENTEN

Tijdsynchronisatie is van belang om bij de verwerking van de meetgegevens alle meetreeksen te kunnen vergelijken of specifieke gebeurtenissen (sluis open, translatiegolf) terug te vinden in de verschillende meetreeksen. Alle meetinstrumenten moeten hun meetreeksen geven in een van te voren gedefinieerde tijdbasis. De lokale tijd kan worden gebruikt, de M.E.T. of een eigen tijdbasis, als de verschillende tijdreeksen later maar tot één tijdbasis zijn te herleiden.

De plaatsbepaling van de meetinstrumenten is van belang om bij de verwerking van de meetreeksen de juiste looptijden en afstanden te kunnen gebruiken. Inmeten van vast opgestelde stroomsnelheids- en waterstandsmeters kan, afhankelijk van de nauwkeurigheid, éénmalig met een DGPS of met een waterpassing. Bij een varende meetopstelling is een plaatsbepalingssysteem vanaf de oever mogelijk of een DGPS op het vaartuig. De positie van het meetpunt (horizontaal en verticaal) ten opzichte van het plaatsbepalingssysteem aan boord moet bekend zijn, zodat de precieze locatie van het meetinstrument bij de verwerking van de meetreeksen bekend is.

MEETDUUR

De meetduur is in geval van een incidentele meting de tijd die nodig is om alle meetwaarden binnen een meetsessie te vergaren. In een meetsessie worden verschillende grootheden aaneengesloten gemeten. De meetduur hangt af van het verschijnsel dat wordt gemeten, bijvoorbeeld het debiet tijdens een spuiperiode, een hoogwatergolf, een getijdecyclus of een dag.

TESTMETING

Voorafgaand aan de tijdelijke afvoermeting is het aan te bevelen te testen of alles werkt en of wat wordt gemeten betrouwbaar is. Daartoe kan een testmeting worden gedaan, gedurende een korte periode, waarbinnen alles wordt gemeten en de meetgegevens vervolgens worden verwerkt. Het doel van de testmeting is:

- nagaan of alle instrumenten werken;
- nagaan of de meetopstelling werkt zoals bedoeld, worden alle gewenste gegevens ook daadwerkelijk goed gemeten;
- kan de meetopstelling worden geoptimaliseerd;
- levert de verwerking van de meetgegevens het gevraagde debiet op;
- is de nauwkeurigheid van het afgeleide debiet voldoende, voldoet de nauwkeurigheid aan de gestelde eis.

De testmeting kan deel uitmaken van het gehele meetprogramma en als de resultaten goed zijn, is de testmeting een geslaagde meetsessie. Zijn de resultaten onvoldoende, dan kan de meetopstelling worden verbeterd zodat de volgende meetsessies goede resultaten opleveren. Met een testmeting kan worden voorkomen dat achteraf, als alle metingen zijn uitgevoerd, de metingen geen goede resultaten hebben opgeleverd.

Een testmeting kan bijvoorbeeld een uur duren als het totale meetprogramma 1 á 2 dagen beslaat, of bijvoorbeeld één dag als het totale meetprogramma 1 week of een langere periode beslaat.

METEN VAN ANDERE GROOTHEDEN (TEMPERATUUR, DICHTHEID)

Voor sommige meetinstrumenten is het van belang de watertemperatuur of de saliniteit van het water te kennen. Als het voor de verwerking van de meetgegevens van belang is, zijn de instrumenten veelal uitgerust met een temperatuur- en/of saliniteitsensor. Mochten die grootheden wel afzonderlijk gemeten moeten worden, dan wordt op een geschikte locatie een sensor opgehangen. Inmeten van de precieze locatie, testen en desgewenst calibreren behoort tot de voorbereidingen van het meetprogramma.

Een andere grootheid die het meetresultaat van sommige meetinstrumenten beïnvloedt, is het sedimentgehalte in het water. Het sedimentgehalte kan met een apart instrument worden gemeten. Tijdens de metingen of achteraf kan worden beoordeeld of de sedimentconcentratie gevolgen heeft gehad op de meetresultaten. Als er invloed is, kan met de geregistreerde sedimentgehaltes in de tijd getracht worden de andere meetresultaten te corrigeren.

10.1.3 HET METEN IN EEN TIJDELIJKE MEETOPSTELLING

Er zijn verschillende manieren om een stroomsnelheidspuntmeter in de gewenste positie in het dwarsprofiel te houden, afhankelijk van de aard van de waterloop. De puntmeter kan daarbij aan een stang zijn bevestigd of aan een kabel. Bij puntmeters aan een stang wordt de diepte meestal ingesteld ten opzichte van de bodem, bij puntmeters aan een kabel wordt de diepte doorgaans ten opzichte van de waterspiegel ingesteld.

- wading methode (waterloop relatief smal en ondiep). De meetassistent bevindt zich hierbij in de waterloop (Foto 10-2). Nadat de sensor op de gewenste diepte aan de stang is bevestigd en in de gewenste verticaal in de meetraai is geplaatst, gaat de meetassistent schuin achter de snelheidsmeter staan, op minstens 0,40 meter afstand. Hij ziet erop toe dat de stang verticaal staat, met de snelheidsmeter in de stroomrichting.

FOTO 10-2 WADING METHODE (FOTO: WAGENINGEN UNIVERSITEIT)

- vanaf een brug (waterloop minder smal en ondiep). Metingen van stroomsnelheden vanaf een brug zijn vaak minder ideaal dan het lijkt: eventueel aanwezige pijlers en landhoofden veroorzaken lokaal afwijkende stroomrichtingen en een turbulent stromingsbeeld. Er is in die gevallen een lichte voorkeur voor het meten aan de benedenstroomse zijde. Voor geringe diepten (vanaf de brug) wordt de puntmeter aan de stang bevestigd. Voor grotere diepten worden meter en verzwaringselement aan de kabel opgehangen. Met behulp van een windtrommel kan de snelheidsmeter op de gewenste diepte worden gebracht.
- kabelmethode (waterloop minder smal). Bij deze methode zijn van de ene naar de andere oever kabels over de waterloop gespannen (Foto 10-3). Vanaf één van beide oevers kan de snelheidspuntmeter met behulp van een windwerk op de gewenste plaats boven het dwarsprofiel worden gebracht. Met behulp van een andere kabel en het windwerk wordt deze vervolgens op de gewenste diepte gebracht. Het systeem is vrij kostbaar en wordt vooral toegepast als het dwarsprofiel bij hoge afvoeren niet doorwaadbaar en niet bevaarbaar is.

FOTO 10-3 **DEBIETMEETPUNT STAH (D) IN DE ROER MET KABELBAAN (FOTO: WS ROER EN OVERMAAS)**

- vanaf een boot (waterloop relatief breed en diep). Deze methode komt pas in aanmerking als de voorgaande methoden niet uitvoerbaar zijn. Via een op de boot geïnstalleerde *davit* en een windwerk wordt de puntmeter op de gewenste diepte gebracht. Er zijn twee manieren om de positie van de boot met daaraan de puntmeter te bepalen:
  - van oever tot oever wordt een kabel gespannen en zodanig op spanning gebracht, dat deze in het midden van de waterloop minstens 0,50 m boven het wateroppervlak hangt. Vlaggetjes aan de kabel (plastic tapes) geven de afstand aan ten opzichte van het referentiepunt. De boot vaart langs de kabel en meet de diepte en de stroomsnelheid ter plaatse van de vlaggetjes;
  - bij zeer brede rivieren wordt het gebruik van een kabel onmogelijk. Dan wordt de positie van de boot (voor anker) ingemeten vanaf de oever (bijvoorbeeld met een *theodoliet*) of vanaf de boot zelf (met bijvoorbeeld een *sextant* of *rangefinder*, GPS).

Voor toepassing van een ADCP met een boot of catamaran/trimaran gelden grotendeels dezelfde hierboven genoemde overwegingen. De positionering van een ADCP-meting met een catamaran/trimaran gebeurt door deze met een touw of kabel gekoppeld aan een meetlint (voor afstandsbepaling en positionering), van twee zijden in de juiste positie in de meetraai te houden (Foto 10-4). Is dit praktisch niet meer mogelijk, bijvoorbeeld omdat de waterloop daarvoor te breed is, dan is een ADCP-meting met een boot noodzakelijk.

FOTO 10-4 ADCP-METING MET CATAMARAN IN UTRECHT (FOTO: WATERNET)

10.1.4 UITVOERING VAN EEN TIJDELIJKE METING

MEETVENSTER

Er is geen algemeen geldende periode voor de duur van een meetvenster te noemen. Afhankelijk van wat er gemeten moet worden, is het meetvenster kort of lang. Het meetvenster waarbinnen alle metingen van het meetprogramma vallen hangt dus af van het meetdoel. Enkele voorbeelden:

- Als het afvoerverloop gedurende een afvoergolf moet worden gemeten, beslaat het meetvenster enkele dagen (kleine rivieren) tot enkele weken (grote rivieren).
- Als het afvoerverloop gedurende één getij wordt gemeten, is een meetduur van circa 12 uur per dag voldoende. Is meten gedurende een volledige getijdecyclus (doodtij-springtij-doodtij) gewenst, dan is het meetvenster ongeveer een maand lang.
- Meten gedurende een spuiperiode kan enkele uren tot een halve dag duren.

CONTROLE VAN DE METINGEN

Zoals in par. 10.1.2 aangegeven, is het aan te bevelen om te beginnen met een testmeting. Met die meting kan de meetopstelling, de meetinstrumenten en de verwerking van de meetresultaten worden getest. Na een testmeting is voor het eerst bekend hoe nauwkeurig het debiet is gemeten. Maar ook tijdens het meetprogramma is het aan te bevelen geregeld te controleren of de verkregen meetresultaten betrouwbaar zijn en of de gewenste nauwkeurigheid van het debiet wordt gehaald.

Als enkele dagen wordt gemeten, is verwerken van de meetresultaten per dag aan te bevelen om fouten tijdig op te sporen. De meetopstelling kan dan voor de volgende meetsessie worden gecorrigeerd.

Het meten of afleiden van het debiet met een andere methode en vergelijken van het resultaat met de afvoermeting, geeft inzicht in de betrouwbaarheid van de metingen. Rare uitschieters in de meetresultaten of verloop van de instrumentinstellingen kunnen dan tijdig worden gesignaleerd.

WEERSOMSTANDIGHEDEN

Weersomstandigheden kunnen de metingen verstoren. Te denken valt aan storm, regen, onweer, hoge en lage temperaturen en ijsgang.

Bij storm kan de waterstand door opwaaiing of afwaaiing sterk veranderen. Het stroombeeld (snelheid en richting) nabij het wateroppervlak wordt dan sterk beïnvloedt door de wind.

Bij regen kan randapparatuur (intern) nat worden. Na een hevige regenbui kan door oppervlakkige afstroming veel sediment in de waterloop terecht komen. Dit veroorzaakt tijdelijk hogere sedimentconcentraties, die de meetsignalen kunnen beïnvloeden.

Onweer in een open veld of nabij bomen of bebouwing is gevaarlijk. Zo snel mogelijk stoppen met meten of als het onweer in aantocht is vroegtijdig stoppen is gewenst.

Bij hoog oplopende watertemperaturen in de zomer kan het resultaat van een meetinstrument worden beïnvloed door de watertemperatuur. Maar ook het in de zon leggen van de sensoren alvorens ze te plaatsen in de tijdelijke meetopstelling is niet verstandig.

Bij lage temperaturen in de winter kan het resultaat van een meetinstrument worden beïnvloed door de watertemperatuur. Een ijsdek beïnvloed het snelheidsprofiel sterk (deksel op in plaats van een vrije waterspiegel). IJsgang beïnvloedt de oppervlaktesnelheid en kan tijdelijk ijsdammen veroorzaken, het water stuwt op en schiet er onderdoor.

ONDERBREKEN VAN METINGEN

Het onderbreken van metingen kan door weersomstandigheden nodig zijn, zoals hierboven aangegeven. Ook kunnen er andere redenen zijn om de metingen vroegtijdig te stoppen. Als besloten wordt te stoppen, moet dat duidelijk beschreven worden in het logboek en indien mogelijk ook in de meetresultaten. Uitschakelen van de meetinstrumenten en het eventueel verwijderen van de instrumenten, bijvoorbeeld bij vorst, moet zo gebeuren dat de meetopstelling later weer snel kan worden opgebouwd.

Aan het einde van een meetdag worden de meetinstrumenten verwijderd en meegenomen of veilig opgeborgen.

10.1.5 ONDERHOUD TIJDENS DE TIJDELIJKE METING

Onderhoud van de meetopstelling is ook voor incidentele metingen noodzakelijk. Als het meetprogramma enkele dagen tot weken omvat, moeten de volgende zaken geregeld worden gecontroleerd:

- De meetopstelling: de meetbruggen, ophanging, hekken, kabels, bevestigingen, enzovoorts moeten worden gecontroleerd op stabiliteit en functioneren.
- Als morfologische activiteit van de bodem en oever is te verwachten (bijvoorbeeld tijdens het passeren van een hoogwatergolf) moet de oever- en bodemligging worden gecontroleerd. Bijvoorbeeld aan het begin van het meetprogramma en aan het einde ervan.
- De meetraai moet dagelijks worden gecontroleerd en schoongehouden worden van drijvend vuil (gras, takken, afval).
- Dagelijks moeten de meetinstrumenten worden gecontroleerd op functioneren en indien nodig worden schoongemaakt.
- Na enige tijd, afhankelijk van het type meetinstrument, moet het instrument worden gevalideerd. Akoestische stroomsnelheidsmeters behoeven nauwelijks validatie aangezien de snelheid uit de Dopplerverschuiving wordt bepaald (een ongecalibreerd fysisch verschijnsel). Elektromagnetische en mechanische stroomsnelheidsmeters behoeven een meer frequente validatie. De fabrikant geeft dat aan in de beschrijving van het instrument.

10.1.6 VERWERKING MEETGEGEVENS

CONTROLE VAN METINGEN

De (dagelijkse) controle van de metingen is aan te bevelen om fouten in de metingen tijdig te erkennen en te herstellen. Zie ook par. 10.1.4.

BEPALEN DEBIET

De wijze van bepaling van het debiet in een meetraai kan voor de velocity-area methode met:

- de mean-section methode of
- de mid-section methode.

In par. 5.1.4 zijn beide methoden uitgelegd. Deze methoden kunnen worden gebruikt bij een vaste meetopstelling en bij een varende meetopstelling. In beide gevallen moet de vorm van het dwarsprofiel bekend zijn waarin is gemeten. Met het debiet kan bijvoorbeeld een Qh-relatie worden afgeleid of een afvoerformule van een meetstuw of spuisluis worden gecalibreerd.

BEPALEN ONNAUWKEURIGHEID DEBIET

Waar het uiteindelijk om gaat bij debietmetingen is de onnauwkeurigheid van het debiet. Of beter gezegd de betrouwbaarheid van het debiet binnen het meetbereik. In hfst. 8 is uitgebreid ingegaan op de methode om de onnauwkeurigheid van het gemeten debiet te bepalen. In hfst. 7 is per meetinstrument of meetmethode daarvoor nadere informatie opgenomen.

10.2 CONTINUE METING

Dit hoofdstuk bespreekt het ontwerp en de realisatie van een continu debietmeetstation aan de hand van een checklist per onderwerp en toelichting op een aantal aandachtspunten daaruit. De volgende onderwerpen komen aan de orde:

- ontwerpaspecten vaste meetopstelling (par. 10.2.1);
- voorbereiding en realisatie van een vaste meetopstelling (par. 10.2.2);
- het meten met een vaste meetopstelling (par. 10.2.3);
- onderhoud van de vaste meetopstelling (par. 10.2.4).

10.2.1 ONTWERPASPECTEN VASTE MEETOPSTELLING

KEUZE MEETLOCATIE

De keuze van een geschikte meetlocatie is behandeld in hfst. 4.

KEUZE MEETMETHODE

De keuze van een geschikte meetmethode is behandeld in hfst. 9 en de achtergronden van de meetmethode en de meetinstrumenten zijn behandeld in hfst. 6 respectievelijk hfst. 7.

CHECKLIST BIJ HET ONTWERP/INRICHTING VAN EEN VAST DEBIETMEETPUNT

Debietmeetstations zullen - een enkele uitzondering daargelaten - vrijwel steeds deel uitmaken van een hydrologisch meetnet. Nadat de meest geschikte debietmeetmethode is vastgesteld op basis van de selectiecriteria, volgen het ontwerp, de realisatie en daarna het beheer van de meetstations.

Onderstaande checklist geeft de aandachtspunten bij het ontwerp en de inrichting van een vast debietmeetpunt. Het zijn over het algemeen ook de aandachtspunten die deel uitmaken van de afspraken met de aannemer van de realisatie van het debietmeetpunt en dus terug te vinden zijn in het bestek:

- ☐ Positie van de debietmeter en/of waterstandsmeter;
- ☐ Aanwezigheid van een referentiepeil (vaste peilbout of DGPS positiebepaling);
- ☐ Stabiliteit van de constructie(s);
- ☐ Trillingsinvloeden op de constructie en de metingen;
- ☐ Energievoorziening;
- ☐ Datacommunicatie (vaste lijn of GPRS);
- ☐ Koppeling met het telemetriesysteem;
- ☐ Toegang tot de locatie;
- ☐ Veiligheidsvoorzieningen/hekwerk;
- ☐ Bescherming tegen aanvaren;
- ☐ Bescherming tegen ijs;
- ☐ Bescherming tegen vandalisme;
- ☐ Wijze van onderhoud van de sensoren;
- ☐ Boven water halen van onderwatersensoren;
- ☐ Standaardisatie van ontwerp en keuze van sensoren;
- ☐ Beschikbaarheid van de meting;
- ☐ Beschikbaarheidsgarantie;
- ☐ Reserve-onderdelen;
- ☐ Onderhoudscontract;
- ☐ Scholing van personeel.

FOTO 10-5 HOE HET NIET MOET (PLAATSING PEILBUIZEN EN STUW VERKEERD OM GEMONTEERD)

POSITIE EN "PEIL" VAN DE METER

De positionering van het instrument (debietmeter en/of waterstandsmeter) volgt uit de ISO-standaard en de installatievoorschriften van de leverancier. De waterstandsmeting kan een relatief peil aangeven of een waarde ten opzichte van N.A.P. Het "peil" dient te worden ontleend aan een vast punt (peilbout) in de nabijheid van de opstelling of worden gecreëerd met een DGPS-meting (zie par. 7.5.2).

STABILITEIT VAN DE CONSTRUCTIE EN TRILLINGEN

De optredende stroomsnelheden rond het meetinstrument bepalen de sterkte van de ophangconstructie. Een vaste brug over een waterloop kan bij lage waterstanden tot gevolg hebben dat de meetstang waaraan het instrument hangt te lang is (doorbuiging, trillingen) en bij hoge waterstanden in het water hangt. Hoge stroomsnelheden oefenen grote krachten uit op het instrument waardoor het kan verschuiven, losraken of in trilling kan geraken.

De stabiliteit van een vast opgesteld meetinstrument of een meetinstrument bevestigd aan een stang of constructie kan in gevaar komen door de kracht van het stromende water, passerende schepen en oever- of bodemerosie. De hydraulische krachten op een constructie zijn evenredig met de stroomsnelheid in het kwadraat (v^2), dus een toename van 50% van de stroomsnelheid levert een 125% grotere kracht. De mate van stroomlijning van het meetinstrument speelt ook een rol, aangezien een stomp voorwerp meer weerstand ondervindt dan een gestroomlijnd voorwerp.
Langsstromend water kan een meetopstelling in trilling brengen. Bijvoorbeeld een stroomsnelheidsmeter aan een stang die in eigenfrequentie raakt. Opstellingen nabij de oever, waar de stroomsnelheid meestal lager is, hebben daar minder last van, maar een flexibele bevestiging kan ook bij lage stroomsnelheden in trilling geraken. Wervels van passerende schepen of wervels achter een pijler kunnen met een bepaalde frequentie loslaten en daarmee de meetopstelling in trilling brengen.

Een andere bron van trillingen is bijvoorbeeld een viaduct waarover auto's of treinen rijden. Een meetinstrument van een viaduct kan daardoor bij iedere passage kort mee gaan trillen. Ook heien in de buurt van een meetlocatie kan het meetinstrument kort en hevig laten trillen.

ENERGIEVOORZIENING

De energievoorziening van een meetinstrument moet gegarandeerd zijn. Energie betrekken van het energienet in het gebied is betrouwbaar. Instrumenten met batterijen hebben als nadeel dat de batterijen op tijd moeten worden vervangen. Beschadigen van aangelegde energiekabels kan worden veroorzaakt door graven, schepen of vandalisme.

De energievoorzieningen kan ook op basis van zonne-energie. Meetapparaten verbruiken niet erg veel stroom en een combinatie van een accu of een windmolen met een zonnepaneel (met anti-vogelpinnen) biedt een betrouwbare energiebron.

DATA-COMMUNICATIE EN KOPPELING MET HET TELEMETRIESYSTEEM

Koppeling van het meetsignaal aan het telemetrienetwerk kan met een apart telemetrie-onderstation of via het besturingssysteem (PLC) van het object. Het laatste geldt doorgaans voor gemalen en grotere waterbeheersobjecten. Is het debietmeetpunt op zichzelf staand, dan is een aparte koppeling met het centrale telemetriesysteem vereist. Afhankelijk van de frequentie van gegevensoverdracht kan worden gekozen uit verschillende vormen van datacommunicatie: vaste lijn, mobiel (ADSL/GPRS) of varianten daartussen. Bij mobiele datacommunicatie dient de signaalsterkte van de verbinding door de telecom-aanbieder ter plaatse te worden gecontroleerd voordat de wijze van datacommunicatie in het ontwerp wordt vastgelegd.

VEILIGHEID VOOR PERSONEEL EN TOEGANG

Het werken bij water en in het bijzonder bij stromend water is gevaarlijk. De regelgeving volgens de Arbo moet in acht worden genomen. Waar nodig kan gedacht worden aan permanente voorzieningen, die voor het personeel dat de locatie bezoekt, extra veiligheid bieden, zoals hekwerken, railings e.d.
De toegang tot de locatie moet zijn geregeld, zowel wat betreft het gangpad als formeel indien toestemming van derden is vereist om bij de locatie te komen.

VOORKOMEN BESCHADIGING INSTRUMENTEN

Beschadigen van meetinstrumenten of van de gehele meetopstelling moet worden voorkomen. Langsvarende vaartuigen kunnen meetopstellingen beschadigen (zuigende werking, aanvaring). Ook recreanten die zich op de meetopstelling begeven kunnen schade veroorzaken evenals vandalen.
Maaien, korven of baggeren kan een meetopstelling makkelijk beschadigen. Zorg voor een duidelijke markering van de meetinstrumenten.

STANDAARDISATIE

Het standaardiseren/uniformeren van meetsystemen wordt sterk aanbevolen om de volgende redenen:

- hoe geringer het aantal in gebruik zijnde methoden, des te groter de vertrouwdheid van het personeel dat er mee werkt;
- uniformering bevordert de uitwisselbaarheid van instrumenten, methoden en de verkregen informatie met andere waterbeheerders;
- uniformering is op termijn kostenbesparend.

BESCHIKBAARHEID VAN DE METING

De beschikbaarheid van een meting geeft aan hoelang deze gemiddeld voldoet aan de gebruikseisen. In par. 2.4 is aangegeven welke factoren de beschikbaarheid beïnvloeden en hoe de beschikbaarheid kan worden vergroot. Het is van belang deze aspecten in de ontwerpfase al te onderkennen.

SCHOLING

Bij invoering van een meetsysteem, maar ook bij wijziging in het systeem (registratie of verwerking), is het noodzakelijk het betrokken personeel te scholen. Het verdient aanbeveling om bij aanschaf van (andere) systemen en/of software, instructiedagen voor het betrokken personeel aan de aanschaf te koppelen.

10.2.2 VOORBEREIDING EN REALISATIE VAN EEN VASTE MEETOPSTELLING

Onderstaande checklist geeft de aandachtspunten bij de voorbereiding en realisatie van een vast debietmeetpunt. Het gaat hier enerzijds om organisatorisch en administratieve aspecten en anderzijds om het inmeten, calibreren en inbedrijfstellen van het meetpunt.

CHECKLIST BIJ DE VOORBEREIDING EN REALISATIE VAN EEN VAST DEBIETMEETPUNT

- ☐ Voorbereiding en planning
- ☐ Administratieve inrichting
- ☐ Waterpassingen en profielmeting
- ☐ Calibratie
- ☐ Testmeting, inbedrijfstelling

VOORBEREIDING EN PLANNING

De voorbereiding betreft de inspectie van de locatie, het opstellen van werkplannen, het aanmelden van het meetpunt in GIS en KLIC en de organisatorische werkzaamheden die hiermee verband houden. In par. 12.2.1 is een en ander nader omschreven.

ADMINISTRATIEVE INRICHTING

Er dient ook een administratieve inrichting plaats te vinden van het meetpunt, namelijk het aanmaken van het meetpunt in het gegevensverwerkende systeem. Hiervoor is nodig informatie zoals omschreven in het Aquo-gegevensmodel (zie par. 12.2.1).

WATERPASSINGEN EN PROFIELMETING

De uit te voeren waterpassingen hebben betrekking op de opstelling van de waterstandsmeting, eventuele peilschalen en eventueel aan te brengen peilbouten, merken en niveauplaatjes.
De waarden van de profielmeting moeten bekend gemaakt worden aan de leverancier van het meetinstrument.

Voor klepstuwen kan een aparte klepstandbepaling worden uitgevoerd.

FOTO 10-6 MARKERING OP KLEPSTUW (FOTO: WAGENINGEN UNIVERSITEIT)

CALIBRATIE

Calibratie van de debietmeetinrichting kan plaatsvinden in-situ of met een opstelling in een hydraulisch laboratorium (zie par. 2.6). Het laatste is doorgaans het geval bij bijzondere constructies, nieuwe vindingen en bij meetgoten. Bij een in-situ calibratie wordt het kunstwerk bemeten zoals het in de praktijk functioneert (zie par. 5.5). Wel is het daarbij van belang zoveel mogelijk verschillende afvoeromstandigheden bij de calibratie te betrekken. De calibratie zal daarom veelal over een langere tijd zijn uitgesmeerd en het is zaak met de leverancier afspraken te maken over de beschikbaarheid en responsetijd ingeval van een hoogwatersituatie. Verder is het zaak de calibratieresultaten en -omstandigheden zo goed mogelijk te documenteren.

Een (vast) debietmeetpunt wordt altijd gecalibreerd of gecontroleerd met een andere methode, die minstens even nauwkeurig of nauwkeuriger is. Zo wordt een ADM doorgaans gecontroleerd met een ADCP op basis van de velocity-area methode. De volgende calibratiemethoden zijn gangbaar:

TABEL 10-1 GANGBARE CALIBRATIEMETHODEN VOOR DE DEBIETMEETMETHODE

meetmethode	calibratiemethode
gestandaardiseerde meetstuwen	Geen, conform ISO-standaard
klepstuwen	In-situ calibratie met V-ADCP of EMS of propellerstroomsnelheidsmeter of volgens [Lit. 21]
overige niet-gestandaardiseerde meetstuwen	In-situ calibratie met V-ADCP of EMS of propellerstroomsnelheidsmeter
meetgoot	Geen, conform ISO-standaard
akoestische looptijdmethode (ADM)	In-situ controlemeting met V-ADCP
akoestische Dopplermeting (H-ADCP/V-ADCP)	Voor een V-ADCP is geen calibratie vereist. Calibratie van een H-ADCP vindt plaats met V-ADCP.
radar Dopplermeting	Calibratie met V-ADCP of propellerstroom-snelheidsmeter
elektromagnetische meetmethode	Calibratie met V-ADCP of propellerstroom-snelheidsmeter
Qh-relatie	Capaciteitsmeting bij oplevering In-situ calibratie met V-ADCP of EMS of propellerstroomsnelheidsmeter

TESTMETING, INBEDRIJFSTELLING

Voorafgaand aan de inbedrijfstelling van het vaste meetpunt moet worden getest of alles werkt en of wat wordt gemeten betrouwbaar is. Het verdient aanbeveling deze test en de verdere inbedrijfstelling te laten uitvoeren door de installateur.

10.2.3 HET METEN MET EEN VASTE MEETOPSTELLING

Onderstaande checklist geeft de aandachtspunten bij het meten met een vast debietmeetpunt. Het moment en de wijze waarop het gemeten signaal wordt vastgelegd is bepaald door de verdere verwerking van het gemeten signaal tot een “debiet-gegeven” of een “hoeveelheid-gegeven”. Dit is in het meetplan uitgewerkt of anderszins gedefinieerd.
Checklist bij het meten met een vast debietmeetpunt.

CHECKLIST:

- ☐ Meetfrequentie;
- ☐ Demping/filtering van het meetsignaal (golfslag, scheepvaart, bemaling);
- ☐ Beschikbaarheid van het meetsignaal;
- ☐ Lokale gegevensopslag en lokale presentatie;
- ☐ Gegevensvalidatie en -opslag;
- ☐ Hoeveelheidsbepaling;
- ☐ Tijdsynchronisatie.

MEETFREQUENTIE

Een veel gehanteerd meetinterval bedraagt 10 of 15 minuten. De meetfrequentie wordt bepaald door de variabiliteit in de tijd en door de vraag welke bewerkingen de verkregen basisgegevens zullen ondergaan. “Equi-distant” (met vast tijdsinterval) opnemen heeft voordelen uit het oogpunt van eenvoud en zekerheid in de gegevensverwerking. Daarnaast kan het meetinterval afhankelijk worden ingesteld van de mate waarin de te meten parameter verandert. De meetgegevens zijn dan non-equidistant bepaald en vastgelegd.

DEMPING/FILTERING VAN HET MEETSIGNAAL

Metingen van de stroomsnelheid worden met hoge frequentie genomen en door de software van het meetinstrument verwerkt tot een debietwaarde. Hierbij worden allerlei correcties en filteringen uitgevoerd om een signaal met de gewenste nauwkeurigheid te verkrijgen.
Voor waterstandsmetingen geldt in principe hetzelfde, maar voor bepaalde invloeden dient extra te worden gecorrigeerd:

- Golfslag. Correctie door filter op het signaal of door het gebruik van een peilbuis.
- Passerende schepen. Schepen die langs het waterstandsmeetpunt varen veroorzaken een tijdelijke daling van de waterspiegel gedurende enkele minuten. Deze plotselinge veranderingen zijn met een filter uit te schakelen.
- Bemaling. Het inslaan van pompen in een gemaal veroorzaakt bovenstrooms van het object een translatiegolf en er stelt zich een verhang in. Waterstandsmetingen kunnen voor dit verhang worden gecorrigeerd.
- Niveaumeters op basis van druk dienen ertoe variaties in de atmosferische druk te corrigeren.

BESCHIKBAARHEID VAN HET MEETSIGNAAL

De beschikbaarheid van het meetsignaal kan worden vergroot door (par. 2.4):

- Ingebouwde kwaliteitscontrole van het meetinstrument
- Het meetinstrument zelfmeldend te doen zijn bij een storing
- De storing te doen volgen met een alarmmelding

De beschikbaarheid van het meetsignaal verbetert door aansluiting van het meetsignaal op de telemetrie en vervolgens regelmatig te controleren of meetdata beschikbaar zijn.

LOKALE GEGEVENSOPSLAG EN LOKALE PRESENTATIE

Transmissie van het debietgegeven naar het centrale telemetriesysteem kan in dezelfde frequentie als de meetfrequentie. Er kan ook voor worden gekozen de gemeten debietwaarden éénmaal per dag te versturen. Lokale opslag van de debietwaarden is dan noodzakelijk.
In alle gevallen is het gewenst om over een langere tijd de gegevens op het onderstation beschikbaar te hebben ter voorkoming van dataverlies als gevolg van uitval van het centrale systeem of de communicatieverbinding. Doorgaans wordt hiervoor 72 uur aangehouden (periode van een weekend).

Voor de lokale presentatie van de gegevens is een display noodzakelijk voor het tonen van actuele en historische (opgeslagen) meetwaarden ten behoeve van het uitvoeren van controles.

GEGEVENSVALIDATIE EN -OPSLAG

Bij binnenkomst van de debiet- en/of waterstandsgegevens op het centrale systeem is het gewenst een eerste (automatische) validatie toe te passen om het gegeven een kwaliteitskenmerk mee te geven. Automatische validatie is mogelijk op: “geen waarde”, “waarde buiten bereik” of “te grote verandering van de waarde”. Verdere validatie vindt plaats bij overdracht van de telemetriegegevens naar een vorm van centrale gegevensopslag zoals Hymos, Wiski of Fews. Het verdient aanbeveling in die omgeving ook informatie over de calibratie vast te leggen zoals: dag en tijd van de calibratie, het bijbehorende verslag en informatie over de gebruikte debietformules.

HOEVEELHEIDSBEPALING

Voor het afleiden van hoeveelheden uit debietgegevens is ook de duur van de periode waarover de debietmeting geldig is van belang. De volgende fouten kunnen daarbij optreden (par. 2.2):

- Onnauwkeurigheid als gevolg van de meetfrequentie van de debietmeting;
- Onvolledige debietmeting (te laat beginnen/ te vroeg ophouden);
- Afwijkingen in de tijdsynchronisatie van verschillende dataverwerkende systemen;
- Verlies van datanauwkeurigheid als gevolg van onvoldoende precisie bij de opslag en communicatie van grote getallen (bijvoorbeeld: miljoenen of miljarden m^3).

Wanneer bij gemalen zowel het debiet als het in/uitslaan van de pompen equi-distant wordt vastgelegd ontstaat er een afwijking van de duur van de periode waarover het debiet geldig is. Bij pompen die frequent in/uitslaan kan dit tot een aanzienlijke afwijking van de verpompte hoeveelheden leiden.

Bij objecten die een afvoer leveren na opening van een schuif (bijvoorbeeld bij spuisluizen) wordt vaak de debietmeting pas gestart na het bereiken van de eindschakelaar van de schuif. Hetzelfde geldt voor het weer sluiten van de schuif. In de tijd van het volledig open/dicht gaan wordt dan geen debiet geregistreerd. Dit geeft een afwijking in de hoeveelheidsbepaling van 2% tot 10% afhankelijk van de duur van het spuien.

TIJDSSYNCHRONISATIE

Het is belangrijk dat alle waarnemingen eenzelfde tijdbasis hebben. De verschillende meetsystemen en de instrumenten dienen daarom te zijn gesynchroniseerd. Synchronisatie van de instrumenten zal doorgaans worden opgelegd vanuit de tijdklok van het meetsysteem. De meetsystemen zullen op hun beurt worden gesynchroniseerd vanuit het telemetrie-onderstation. Alle telemetrie-onderstations worden gesynchroniseerd vanuit de centrale eenheid van het telemetriesysteem. Dit kan via de atoomklok te Frankfurt of bijvoorbeeld via xs4all.

10.2.4 ONDERHOUD VAN EEN VASTE MEETOPSTELLING

Het onderhoud van meetstations is van eminent belang voor de duurzaamheid van apparatuur en constructies, maar eveneens voor de kwaliteit van de basisgegevens. Het verdient daarom sterke aanbeveling de meetstations regelmatig te bezoeken, met het doel ongewenste situaties tijdig het hoofd te bieden. Dit geldt met name voor de volgende perioden: het groeiseizoen (met toenemende begroeiing), het maaiseizoen (drijvend vuil), na elke hoogwater periode (sedimentatie of beschadigingen) en tijdens en na afloop van een vorstperiode.

Onderstaande checklist geeft de aandachtspunten bij het onderhoud van een vast debietmeetpunt. Het zijn over het algemeen ook de aandachtspunten die deel uitmaken van de afspraken met de aannemer in het onderhoudscontract en de inbreng van de eigen organisatie op dit vlak:

CHECKLIST BIJ HET ONDERHOUD VAN EEN VAST DEBIETMEETPUNT

- ☐ Waterstandscontrole;
- ☐ Controle waterstandsmeting;
- ☐ Profielcontrole;
- ☐ Schoonhouden;
- ☐ Hercalibraties en validatie;
- ☐ Algemeen technisch onderhoud;
- ☐ Storingsonderhoud;
- ☐ Beschikbaarheidsgarantie en vervanging
- ☐ Reserve-onderdelen;
- ☐ Reparatie in Nederland;
- ☐ Onderhoudscontract;
- ☐ Evaluatie.

CONTROLES

Par. 12.2.2 geeft een overzicht van de in de praktijk gangbare kentallen van onderhouds- en beheeractiviteiten voor vaste debietmeetinrichtingen.

HERCALIBRATIE EN VALIDATIE

Het is aan te bevelen de calibratie van een debietmeetpunt na 1 jaar te valideren.

Hercalibratie van de debietmeting kan nodig zijn als het gevolg van een nieuwe inmeting van het profiel, het passeren van een grote afvoergolf of een renovatie van het object (bijvoorbeeld na een gemaalrenovatie). Pompslijtage kan ook een aanleiding zijn tot het uitvoeren van een hercalibratie.

EVALUATIE

Na een aantal jaren ervaring met het debietmeetstation verdient het aanbeveling na te gaan of het meetstation aan de verwachtingen voldoet, en of de kosten zich verhouden tot de doelmatigheid. Waar dit niet in voldoende mate het geval is, verdient het aanbeveling gepaste maatregelen te nemen.

10.3 VISPASSEERBAARHEID

In een groot aantal open waterlopen bevinden zich fysieke, meestal lokale belemmeringen voor migrerende organismen, waaronder vooral veel vissoorten. Tot deze barrières behoren stuwen, sluizen, watermolens en gemalen. Vispassages worden gedefinieerd als waterbouwkundige constructies die, meestal aangelegd in een omleiding van de waterloop, de migratie van bepaalde categorieën vis weer mogelijk maken. In Nederland is de bekkenvistrap met V-vormige overlaten een veel toegepaste vispassage in vrij afstromende waterlopen. Zie ook de ISO 26906 (Hydrometry – Fishpasses at flow measurement structures).

Meetstuwen en soms ook meetgoten worden gezien als obstakel voor de vismigratie. De uitgangspunten voor het functioneren van een meetstuw of meetgoot zijn namelijk moeilijk verenigbaar met die van een vispassage:

- een meetstuw of meetgoot vereist schietend water in de kleinste doorsnede boven de kruin van de stuw of in de keel van de meetgoot, om zeker te zijn van ongestuwde afvoer. In deze doorsnede komt de kritische snelheid tot ontwikkeling. De kritische snelheid is een relatief hoge snelheid. Bovendien komt ze pas tot ontwikkeling bij enig verval over de stuw;
- een vispassage vraagt een relatief lage stroomsnelheid en een zo gering mogelijk verval.

De randvoorwaarden voor het hydraulisch ontwerp van een vispassage worden vanuit de volgende disciplines aangeleverd:

- hydrologie: peilen en afvoeren uit het stroomgebied als functie van de tijd (afvoer-hydrograaf) en de frequentie waarmee de afvoeren voorkomen (afvoer-duurlijn),
- waterbeheer: de wens om peilen en afvoeren te reguleren en de wens of noodzaak om debieten te meten,
- visbiologie: om welke organismen gaat het en wat zijn hun capaciteiten (zwemsnelheden en spronghoogten, grondelende vissoorten).

FOTO 10-7 VISPASSEERBARE V-VORMIGE OVERLAAT (FOTO: WS REGGE EN DINKEL)

Vanuit de visbiologie worden de randvoorwaarden vaak in de volgende twee kengetallen samengevat:

- een maximale stroomsnelheid (voor de wat tragere vissoorten bijvoorbeeld v = 0,60 m/s) in combinatie met:
- een bovengrens Q_{vis}, dat wil zeggen dat voor alle debieten $Q \leq Q_{vis}$ passage mogelijk moet zijn.
- Het eerste kengetal berust op een duidelijke keuze voor een bepaalde categorie organismen. Het tweede kengetal dient te zijn afgeleid uit de frequentie waarmee het debiet Q_{vis} voorkomt in de periode waarin de trek plaatsvindt.

In de praktijk blijkt, dat de randvoorwaarden voor vispassages en die voor ongestuwde afvoer via een meetstuw of meetgoot strijdiger met elkaar zijn, dan menig waterbeheerder zou wensen. Vanuit het belang van een goed functionerend en betrouwbaar hydrologisch meetnet moet er voor worden gepleit, de bovengrens Q_{vis} zo laag mogelijk te houden.

De praktijk geeft de volgende opties:

- De functie bestaande debietmeting en gewenste vispassage zijn wel met elkaar verenigbaar eventueel met wat aanpassing van de meetstuw en/of aanpassing van de visbiologische randvoorwaarden (Foto 10-7);
- De functie bestaande debietmeting en gewenste vispassage zijn niet met elkaar verenigbaar in één waterbouwkundige constructie (dat wil zeggen een meetstuw):
  - de meet-/regelstuw behoudt zijn locatie en de passeerbaarheid van vis wordt gerealiseerd in een bypass, waarbij o.a. de volgende oplossingen mogelijk zijn:
    - een korte omleiding waarin een vistrap wordt ontworpen;
    - een hevelvistrap of “vertical slot” als er geen ruimte is voor een korte omleiding;
    - een langere omleiding zonder vistrap, ook wel nevengeul genoemd.

- De debieten door de bypass kunnen globaal worden berekend. De calibratie van de V-vormige bekken-vistrap is beschreven in [Lit. 17], de hevelvistrap in [lit. 32].
  - de passage van vis wordt mogelijk gemaakt in de hoofdwaterloop door het opruimen van de meetstuw/meetgoot. Voor het meten van het debiet wordt een keuze gedaan uit één van de andere continue debietmeetmethoden onder inlevering van enige procenten meetnauwkeurigheid.
- Bij nieuwbouw van een debietmeetstation op een locatie waar vispassage een hoge prioriteit heeft, zal voor een debietmeetmethode worden gekozen, die niet leidt tot verhoging van de bestaande stroomsnelheden.
- De functies debietmeting en "vissen tellen" zijn met elkaar verenigbaar door gebruik te maken van een visteller in de vorm van een meetstuw (FishCounter).

FOTO 10-8 VISPASSAGE OM DE STUW VAN DE HOOIDONKSE MOLEN, WS DE DOMMEL (FOTO: VISADVIES)

10.3.1 FISHCOUNTER

De visteller (FishCounter) bestaat uit een meetstuw (Crump weir) in combinatie met een set elektroden die de stroomopwaartse en -afwaartse migratie van vis kan waarnemen. De stuw heeft aan de stroomopwaartse zijde een bodemverval van 1:2 en aan de stroomafwaartse zijde een bodemverval van 1:5. De elektroden bestaan uit drie parallel geplaatste roestvrijstalen strippen. Als een vis passeert wordt er een reductie in de weerstand tussen de elektroden geregistreerd. Door de verandering in het spanningsbeeld tussen de elektroden worden de volgende zaken geregistreerd:

- Stroomopwaarts zwemmende vis;
- Stroomafwaarts zwemmende vis;
- Een indicatie van de lengte van de vis.

De FishCounter-stuw is onder meer toegepast in de Bovenmark bij de vispassage Bieberg (WS Brabantse Delta). Zie hiervoor [lit. 32].

FOTO 10-9 **FISHCOUNTER-STUW (BRON: VISADVIES)**

11

KOSTENSOORTEN

De kosten van een debietmeetstation worden onderscheiden in de inrichtingskosten (éénmalige kosten van investeringen) en de exploitatiekosten (periodiek terugkerende kosten). De deelposten zijn hier zoveel mogelijk geïnventariseerd. Voor zover kosten zijn vermeld, zijn deze steeds globaal. Het geven van een totaal bedrag aan inrichtingskosten en exploitatiekosten per meetmethode is om de volgende redenen dan ook alleen maar mogelijk in een brede band tussen minimale en maximale kosten:

- prijzen en bouwkosten variëren in de tijd en van leverancier tot leverancier;
- de mate waarin de waterbeheerder ontwerp en uitvoering in eigen beheer uitvoert;
- de mate waarin het hydrologisch meetnet - waarvan het debietmeetstation deel uitmaakt - reeds is gestructureerd;
- de mate van 'luxe' van de bouwkundige voorzieningen (bijvoorbeeld een prefab kast voor de apparatuur of een gemetseld meethuisje);
- de bijzondere kosten die verband houden met de bereikbaarheid en de ligging van de locatie.

Inrichtingskosten zijn onder te verdelen in:

- bouwkundige kosten (o.a. meetstuw, onderbouw meetinstrumenten)
- kosten meetapparatuur + specifieke hardware
- kosten algemene elektrotechnische installatie (o.a. schakelkast, zonnepaneel)
- telemetriekosten
- overige kosten (o.a. calibratie, speciale training)

De exploitatiekosten hebben betrekking op:

- algemene kosten beheer en onderhoud
- incidentele kosten beheer en onderhoud
- energiekosten en communicatiekosten
- huurkosten

Ingeval van een incidentele debietmeting is er onderscheid te maken in de kosten van een relatief eenvoudige in-situ calibratie enerzijds en de kosten van de capaciteitsijking van een groot kunstwerk anderzijds.

Opmerking: alle kosten zijn **exclusief** BTW en prijspeil 2009.

11.1 INRICHTINGSKOSTEN CONTINU DEBIETMEETSTATION

Onderstaande tabel geeft een overzicht van de deelkosten en de all-in kosten van de inrichting van een continue debietmeetstation. De kosten zijn een schatting op basis van gangbare plaatsing en zonder bijzondere bijkomende kosten (zie par. 11.1.1).

De all-in kosten betreffen de kant en klare oplevering van een goed functionerend debietmeetstation, inclusief plaatsing, controlemeting en software voor de verwerking van de meetgegevens. De "vanaf"-kosten zijn de minimale kosten in het geval een dergelijke voorziening nodig is. De "vanaf"-kosten kunnen variëren afhankelijk van het gewenste basis kwaliteitsniveau; er zijn dan twee "vanaf-kosten" vermeld (bijvoorbeeld: 2.000/5.000), waarbij het lagere bedrag een ander basis kwaliteitsniveau representeert dan het hogere bedrag.

TABEL 11-1 **OVERZICHT INRICHTINGSKOSTEN DEBIETMEETSTATION IN EURO EXCLUSIEF BTW PRIJSPEIL 2009**

meetmethode	Deelkosten ex. BTW prijspeil 2009					All-in kosten (€)
	Bouwkundig (1)	Meetapparaat (2)	E-installatie (3)	Telemetrie-station (4)	Overig	
ADM	Vanaf 1.000 of vanaf 10.000 als profiel-aanpassing nodig is	10.000-25.000	Vanaf 7.000 Met inzet duikers	Vanaf 2.000/5.000	calibratiefactor 2.000 training vanaf 1.000 ontwerpkosten vanaf 2.500	Vanaf 15.000/50.000 tot 75.000 of meer (tot 250.000 mogelijk)
H-ADCP	Vanaf 1.000	10.000-15.000	Vanaf 5.000 Met ophanging	Vanaf 2.000/5.000	ijkmeting (5-10 metingen) 2.000	15.000-25.000
elektromagnetisch	Vanaf 1.000	10.000	Vanaf 3.000	Vanaf 2.000/5.000	ijkmeting (5-10 metingen) 2.000	15.000-20.000
Meetstuw (bestaand) (5)	0	2.000 drukopnemers	Vanaf 3.000	Vanaf 2.000/5.000	calibratiemeting (10-20) 4.000	10.000-15.000
Meetstuw (nieuw) (5)	5.000-50.000	2.000 drukopnemers	Vanaf 3.000	Vanaf 2.000/5.000	calibratiemeting (10-20) 4.000 ontwerpkosten vanaf 2.500	20.000-70.000
Meetgoot	10.000-50.000 vormgeving waterloop	2.000 drukopnemers	Vanaf 3.000	Vanaf 2.000/5.000	ijkmeting (5-10 metingen) 2.000 ontwerpkosten vanaf 2.500	25.000-70.000
Qh-meetstation	0-30.000 voor meethuisje + bekleding waterloop	2..000 drukopnemers	Vanaf 3.000	Vanaf 2.000/5.000	velocity area methode-metingen (10-20) vanaf 4.000	10.000-100.000

(1) de bouwkundige kosten betreffen de nodige bouwkundige en mechanische constructieve voorzieningen; beugels en ophangingen, inmetingen en profiel gereed maken
(2) de kosten voor het meetapparaat betreffen alleen het apparaat zelf.
(3) de E-installatie betreft de (veld)bekabeling, energievoorziening en schakelkast + montage/ophanging meetapparaat
(4) de telemetriekosten betreffen het onderstation werkend afgeleverd en aangesloten op de centrale data-acquisitie
(5) voor klepstuwen zijn extra nauwkeurige klepstandmeters beschikbaar, extra kosten circa 10.000

11.1.1 BIJZONDERE BIJKOMENDE KOSTEN

De bijzondere bijkomende kosten kunnen kostenbepalend zijn, zeker als er sprake is van relatief lage inrichtingskosten. Onder deze kosten vallen onder andere:

- het onder water afwerken van de constructie en de meetinrichting
- kosten van een duiker (totaal circa € 250/uur) (altijd drie duikers aanwezig i.v.m. de veiligheidseisen)
- slechte bereikbaarheid van de locatie
- kabellengte voor de locale kabels (ADM, ADCP)
- kabellengte voor de overige locale verbindingskabels (energie, signaalkabels)
- afstandsstroomkabel (circa € 10.000/km)
- afstandsveldkabel data-communicatie (circa € 4 per m gelegd)
- gebruik van een elektrisch vorst-wachtkacheltje (circa € 30)
- het aanbrengen van overspanningsbeveiliging tegen nabije blikseminslag
- aanbrengen van een afdamming (€ 4.000 - 5.000 voor een kleinere waterloop)
- bijzondere ophangconstructies
- toegangsconstructies
- voorzieningen tegen vandalisme
- aanvullend materieel (bijvoorbeeld t.b.v. veiligheid)

11.2 EXPLOITATIEKOSTEN CONTINU DEBIETMEETSTATION

De exploitatiekosten hebben betrekking op de uitgaven ten behoeve van een beheer en onderhoudscontract met derden en de kosten van stroom en datacommunicatie. Daarnaast is er sprake van een eigen personele inspanning eveneens op het gebied van beheer en onderhoud van het debietmeetnet en het incidenteel uitvoeren van controlemetingen. Voorts kan er apparatuur worden gehuurd, bijvoorbeeld voor tijdelijke meetopstellingen.

Als vuistregel wordt wel gehanteerd dat de kosten voor het beheer en onderhoud 5 tot 10% van de aanschafkosten van de apparatuur per jaar bedragen. Een onderhoudscontract met derden voor:

- een H-ADCP is circa € 800-1.000/jaar
- een ADM is circa € 2.500-3.000/jaar
- eenvoudige locatie inclusief herhaling ijkmeting in hard profiel: circa € 400-500/jaar.

Aanbevolen wordt de installateur enkele jaren onderhoud te laten uitvoeren en de prijsvorming hiervan onderdeel te laten zijn van de aanbesteding van het debietmeetstation.

Voor de eigen personele inspanning wordt wel gerekend op 8-16 manuur per locatie per jaar. Bij meetstuwen geldt een veel hoger aantal veldbezoeken: iedere 2 weken een bezoek van maximaal 1 uur per locatie.

11.3 KOSTEN VAN INCIDENTELE METINGEN

11.3.1 IN-SITU METINGEN

Voor veldcalibraties en kortdurende in-situ metingen gelden de volgende richtbedragen voor wat betreft tijd en kosten:

- Calibratiemeting van een kunstwerk kost € 1.500,- à € 2.000,-;
- Uitgebreide snelheidsmeting in groot profiel (velocity area methode) met varende ADCP (boot) kost € 5.000,- à € 15.000,-;

- Onderhoud Qh-relatie (waterstand meten en debiet) kost € 3.000 à € 5.000 (een paar metingen op verschillende tijdstippen)

De kosten voor het verwerken van de meetgegevens hangen sterk af van wat er wordt geanalyseerd. Meestal bestaat de verwerking uit het filteren van de meetgegevens en het leveren van de coëfficiënten van de afvoerformule. Als vuistregel geldt: één dag meten is één dag verwerken van de meetgegevens.

11.3.2 CAPACITEITSMETING GROTERE KUNSTWERKEN

Een capaciteitsmeting van een groot kunstwerk als een spuisluis of een groot gemaal, wordt doorgaans uitgevoerd volgens de velocity-area methode met verticale ADCP's en aparte waterstandsopnemers. De kosten worden hoofdzakelijk bepaald door de tijdsinspanning en de kosten van de huur van de meetinstrumenten. De kostenelementen zijn:

- Opstellen van een detail plan van aanpak voor de afvoermetingen;
- Voorbereiding en video-inspectie van het kunstwerk door duikers (bodem en wanden);
- Inspectie van de meetlocatie door het bedrijf dat de apparatuur levert;
- Huur van de meetinstrumenten;
- Uitvoeren van het meetprogramma. In geval van een getijde-afhankelijke lozing omvat deze periode een gehele getijdecyclus (1 maand), gedurende welke op vastgestelde tijdstippen wordt gemeten;
- Nabewerking en analyse van de meetresultaten;
- Honorarium ingehuurde specialist(en);
- Opstellen van een Arbo-advies;
- Veiligheidsmaatregelen na advies Arbo.

De kosten van een dergelijke capaciteitsmeting liggen doorgaans in de orde van € 40.000 - 50.000, maar kunnen oplopen tot € 100.000 of meer afhankelijk van de complexiteit van de omstandigheden en de benodigde meetduur.

12

ORGANISATIE

12.1 WERKPROCESSEN

Een essentiële voorwaarde voor de uiteindelijke realisatie van een debietmeting is een goede organisatorische inbedding van de bijbehorende werkprocessen. Dit geldt zowel voor het werkproces:

- totstandkoming van het meetpunt

als voor het:

- onderhoud en beheer van het meetpunt.

Daarnaast kennen we nog de werkprocessen:

- uitvoeren van een incidentele meting; dit proces is toegelicht in par. 10.1,
- data-acquisitie; dit betreft een grotendeels geautomatiseerd werkproces dat is toegelicht in par. 10.2,
- dataverwerking; dit proces is beschreven in het Stowa rapport “datavalidatie”.

Dit hoofdstuk behandelt de werkprocessen “planning en realisatie” (par. 12.2.1) en “onderhoud en beheer” (par. 12.2.2).

12.2 ORGANISATORISCHE ASPECTEN

De verschillende waterbeheerders in ons land werken met verschillen organisatiemodellen. Het gaat voor dit handboek te ver om voor al deze verschillende organisatiemodellen een uitwerking te geven, maar in principe vinden we overal wel de volgende organisatorische afdelingen:

- Een beleidsgerichte afdeling met taken als onderzoek, advies, monitoring (niet dagelijks) en gegevensverwerking; deze afdeling stelt het meetplan op en genereert de meetvraag;
- Een plangerichte afdeling met taken als uitvoering, planning en realisatie van nieuwe werken;
- Een instandhoudingsgerichte afdeling met buitendienst taken op het gebied van onderhoud en beheer van objecten, doorgaans gericht op een specifieke regio van het beheersgebied;
- Een afdeling gericht op de dagelijkse waterbeheersing met taken op het gebied van het peilbeheer en de dagelijkse monitoring.

Deze afdelingen worden hierna aangeduid als respectievelijk Onderzoek, Projecten, Regio, Peilbeheer.

12.2.1 PLANNING EN REALISATIE

Bij de voorbereiding en planning van de inrichting van een debietmeetpunt moet worden voldaan aan een aantal voorwaarden:

- Beleidsvoorwaarden. De realisatie van een in te richten meetpunt moet passen binnen het meetplan.
- Financiële voorwaarden. De kosten van het nieuwe in te richten meetpunt moet passen binnen de begroting.
- Organisatorische voorwaarden. De afdelingen Onderzoek, Projecten, Regio en Peilbeheer beschikken alle over voldoende personele capaciteit en kwalificaties om de taken voor de totstandkoming en de instandhouding van het meetpunt uit te voeren. De taakverdelingen zijn voor alle betrokkenen helder en alle betrokkenen zijn voor aanvang van de totstandkoming op de hoogte gebracht en akkoord.
- Voorwaarden met betrekking tot de apparatuur. Middels een specificatie wordt aangegeven aan welke nauwkeurigheid en betrouwbaarheid de apparatuur dient te voldoen. Verder worden eisen gesteld aan de robuustheid en de uniformiteit van de meetapparatuur ten behoeve van de onderlinge uitwisselbaarheid en de inzet van reserve-componenten. Daarom zal in principe slechts van een beperkt aantal leveranciers worden betrokken.
- Voorwaarden met betrekking tot de standaardisatie van de opstelling. De meetopstelling is afhankelijk van de locale situatie waarbij zoveel mogelijk zal moeten worden voldaan aan vastgelegde opstellingsvoorschriften.
- Arbo-voorschriften: het meetpunt moet ingericht worden en uitgerust zijn volgens Arbo-voorschriften.

Bij de voorbereiding en de planning zullen met name de afdeling Onderzoek en de afdeling Projecten nauw samen moeten werken en samen een plan van aanpak opstellen. Dit plan omvat alle aspecten die te maken hebben met de realisatie van het meetpunt:

- Bekijken en beoordelen van de locatie, samen met de betreffende Regio en afdeling Projecten.
- Met Projecten een werkplanning opstellen voor de mechanische en elektrische installatie;
- Overleg over en bestellen van meetapparatuur bij de leverancier.
- Aanmaken door Peilbeheer van een nieuwe meetlocatie op centrale post in geval van telemetrie.
- De nieuwe meetlocatie opnemen in de lijst van verzekerde objecten en doorgeven aan de betreffende afdeling.
- Meetpunt inclusief bekabeling aanmelden in het KLIC-systeem.
- De nieuwe meetlocatie laten invoeren in het GIS.
- De nieuwe meetlocatie inclusief bekabelingstraject met een situatieschets documenteren;
- Verwerkingsprogrammatuur aanpassen op het nieuwe meetpunt.
- Goedkeuring van de opstelling als meetpunt door Onderzoek.
- Overdracht na inrichting van het meetpunt van Projecten aan Regio, waarbij een veldbezoek plaatsvindt en gegevens worden gemeten.

Verder dient een administratieve inrichting plaats te vinden van het meetpunt, namelijk het aanmaken van het meetpunt in het gegevensverwerkende systeem. Hiervoor is nodig informatie met betrekking tot:

- Naam meetlocatie.
- Eventueel adres.
- Afkorting naam meetlocatie of een meetpuntcode.
- X- en y- coördinaten meetpunt.
- Q-h relatie of debietformule of pompcurves (voor verschillende toerentallen).
- Natte profielgegevens.

- Het hulpmeetpunt dat is ingemeten (gewaterpast) op maximaal enkele tientallen meters van de locatie + bijbehorende hoogte in meters t.o.v. N.A.P.
- Informatie over waterpassingen of opmetingen met datum en tijd.
- Informatie over uitgevoerde ijkingen, calibraties met datum en tijd en omstandig-heden/ geldigheidsbereik.

12.2.2 ONDERHOUD EN BEHEER

Het onderhoud en beheer betreft alle debietmeetpunten uit het meetplan. Daarbij gelden de volgende uitgangspunten:

- Om te voorkomen dat een nieuw meetpunt begint met problemen verdient het aanbeveling om er voor te zorgen dat bij overdracht aan de beheer en onderhoudsmensen er zo min mogelijk restgebreken zijn. Verder is het zinvol op dat moment een ijkmeting uit te voeren en die na een jaar nog eens te herhalen.
- In zijn algemeenheid kan worden gesteld dat de mensen die de meetdata verwerken ook de (afvoer)metingcontroles doen in het veld.
- Bij het inwinnen van de data kunnen al de eerste controles en validaties worden uitgevoerd, zowel handmatig als automatisch (zie par. 10.1 en par. 10.2).
- In het bijzonder voor meetstuwen geldt dat deze intensief onderhoud vragen met een goede organisatie daaromheen.

Onderstaande tabel geeft een overzicht van in de praktijk gangbare kentallen van onderhouds- en beheeractiviteiten voor debietmeetinrichtingen.

TABEL 12-1 OVERZICHT ONDERHOUDS- EN BEHEERTAKEN DEBIETMEETINRICHTINGEN

Onderhouds- en beheertaken debietmeetinrichtingen

activiteit	frequentie	afdeling
Monitoring attentie van telemetrielocaties	1 x per dag/week	Peilbeheer
Controle of waterstanden kloppen bij meetstuwen, klepstuwen en meetgoten	1-2 x per maand	Onderzoek of Regio
Profielverzanding controleren	1 x per maand	Onderzoek
Profiel schoonmaken en meetbuis schoonspuiten	Na indicatie	Regio
Controlemeting afvoerlocaties, vaststellen calibratie-indicatie	1 x per maand	Onderzoek
Onderhoud ADM's en ADCP's	2 x per jaar	Leverancier, duikers
Calibratie afvoermeting; hercalibratie als gevolg van inmeten doorstroomprofiel	Na indicatie of 1 x per jaar	Onderzoek, Regio
Calibreren drukopnemers	1 x per jaar	Regio
Controle waterstandsmeting aan vaste punt	2 x per jaar	Regio
Vastpunt controle en inmeten dwarsprofiel, inmeten peilbouten, vastleggen peilschalen	1 x per 3 jaar (1)	Landmeter, duikers
Algemeen Technisch Onderhoud meetlocatie: • controle kast; doormeten bekabeling • smeren, veegvuil verwijderen	2 x per jaar	Regio en/of leverancier
Storingsonderhoud meetlocatie	Naar behoefte	Regio en/of leverancier
Beschikbaarheidsgarantie en vervanging bij defect van ADM's en ADCP's	onderhoudscontract	Leverancier
Actualisatie meetplan	1 x per 4 jaar	Onderzoek

(1) Als er niets bekend is over de stabiliteit van het profiel is het beter om te beginnen met elk jaar profiel op te meten en daarna frequentie op te voeren naar 1 x per 3 jaar.

12.2.3 PERSONELE ASPECTEN

Als algemene voorwaarde voor de inzet van eigen personeel of personeel van derden ten behoeve van het onderhoud en beheer van debietmeetinrichtingen geldt dat deze mensen voldoende achtergrond hebben om te kunnen beoordelen wat er aan de hand is. Extra opleiding voor buitendienstmedewerkers van de Regio of van het Laboratorium kan daarom noodzakelijk zijn. Deze extra opleiding kan gegeven worden door eigen deskundigen in samenwerking met de leverancier.

12.3 VEILIGHEID

Het werken bij water en met name bij stromend water is gevaarlijk. In zijn algemeenheid geldt dat voor het inrichten en onderhouden van een meetpunt altijd de volgende veiligheidsvoorschriften in acht moeten worden genomen:

- De vigerende Arbo-voorschriften; Gedacht kan worden aan het dragen van een helm, zwemvest, veiligheidsschoenen en het gebruik van lijflijnen, hekken, reddingsboeien, en het beschikbaar hebben van een (opblaas)boot, ehbo-koffer, telefoonnummers in geval van nood.
- De werkinstructies en voorschriften van de waterbeheerder, zoals vastgelegd in een Handboek Instructie Veilig Werken of een gelijksoortig document;
- Bij gebruik van een boot kan het nodig zijn dat de gebruiker over een vaarbewijs beschikt;
- Bij gebruik van een boot zijn er tenminste twee personen aanwezig, waarbij er één de ander altijd in beeld houdt;
- Bij de inzet van een duikers is er altijd een tweede duiker die ander in de gaten houdt volgens de daartoe gelden voorschriften.

LITERATUUR

Lit. 1 Dommerholt, A., 1992. Afwijkingen in gemeten waterstanden; waterstandsmetingen met peilbuis en intake pipe. Rapport 29, vakgroep Waterhuishouding, Landbouwuniversiteit Wageningen.

Lit. 2 Herschy, R.W., 1993. The velocity area method. Flow measurement and instrumentation 4 (1) 1993: 7-10.

Lit. 3 Boiten, W., 1991. PHLO-cursus: Metingen in open waterlopen voor het kwantiteitsbeheer. Incidentele afvoermetingen. Stichting Post-Hoger Landbouwonderwijs, Wageningen.

Lit. 4 Boiten, W., 1993. PHLO-cursus: De rol van de waterbalans in het waterbeheer: kwantiteit en kwaliteit; Debietmeting in hoge en lage gebieden. Stichting Post-Hoger Landbouwonderwijs, Wageningen.

Lit. 5 Kraijenhoff van de Leur, D.A. en J.N.M. Stricker. Collegedictaat Hydraulica I. Vakgroep Waterhuishouding, Landbouwuniversiteit Wageningen.

Lit. 6 Pitlo, R.H. en C.J.H. Griffioen, 1991, Stromingsmodel voor begroeide waterlopen. Waterschapsbelangen 76 (10); p 345-348.

Lit. 7 Riggs, H.C., 1985. Streamflow characteristics. Elsevier Applied Science Publishers.

Lit. 8 Herschy, R.W., 2009. Streamflow measurement, 3e editie, Taylor & Francis.

Lit. 9 Muysken, J., 1932. Berekening van het nuttig effect van de vijzel. De Ingenieur, nr. 21, mei 1932.

Lit. 10 Cultuurtechnisch Vademecum. Cultuurtechnische Vereniging, Utrecht.

Lit. 11 Boiten, W., 1987. De Hobrad-stuw. Regelen en meten van debieten. Polytechnisch Tijdschrift, editie Civiele Techniek, (41) 1.

Lit. 12 Boiten, W., 1981. De V-vormige lange overlaat. Polytechnisch Tijdschrift, editie Bouwkunde/ wegen- en waterbouw, jaargang 36, no. 3: 154-161.

Lit. 13 Boiten, W., 1987. Debietmeting met klepstuwen. Cultuurtechnisch Tijdschrift, jaargang 27, no. 1: 11-24.

Lit. 14 Boiten, W., 1985. De Rossum-stuw. Polytechnisch tijdschrift, editie Civiele techniek, (40) 2.

Lit. 15 Bos, M.G. (editor), 1989. Discharge measurement structures (third revised edition). Publication no. 20, ILRI, Wageningen.

Lit. 16 Ackers, P. (et al.), 1980, Weirs and flumes for flow measurement. John Wiley and Sons, Londen.

Lit. 17 Boiten, W., 1990. Afvoerrelatie V-vormige vistrap. Rapport 6, vakgroep Waterhuishouding, Landbouwuniversiteit Wageningen.

Lit. 18 Filius, Pieter en Ten Kate, Hans. Veldcalibratie binnen handbereik?, H2O, 16, 2007.

Lit. 19 Rijkswaterstaat, Handboek goede meetpraktijken (GMP).

Lit. 20 A. Dommerholt, Rapport 29, Afwijkingen in gemeten waterstanden. WUR Wageningen. Oktober 1992.

Lit. 21 Boiten, W., 1995, rapport 52, Het opstellen van de afvoerkrommen van klepstuwen, Landbouw Universiteit/Vakgroep Waterhuishouding.

Lit. 22 Mueller D.S. en C.R. Wagner. Correcting acoustic doppler current profiler discharge measurements biased by sediment transport. *J. of Hydraulic Engineering*. Vol 133, Number 12. pg. 1329-1336. December 2007.

Lit. 23 RIKZ, 2003, Inventarisatie Informatiebronnen Fysisch Meetnet 2002, Werkdocument RIKZ/IT-2003.006.

Lit. 24 Boiten, W, 2008, Hydrometry, A comprehensive introduction to the measurement of flow in open channels, 3rd edition, W. Boiten, WUR/UNESCO-IHE, CRC Press/Balkema.

Lit. 25 Waterloopkundig Laboratorium, 1980, trillingsaspecten klepstuw Hardenberg, Verslag bureaustudie R1573.

Lit. 26 Waterloopkundig Laboratorium, 1991, literatuurstudie klepstuwen, onderzoek naar de reductiefactor voor gestuwde afvoer, bureauadvies Q1133 tbv Provincie Overijssel.

Lit. 27 Waterloopkundig Laboratorium, 1974, stuw de Pol Doetinchem, bepaling afvoer-coëficiënt, verslag modelonderzoek, M1248 tbv Provinciale Waterstaat Gelderland.

Lit. 28 Chow. Open-channel hydraulics. McGraw-Hill International editions. 1973.

Lit. 29 ASCE , december 2007, Themanummer over de ADCP, Journal of Hydraulic Engineering, Volume 133.

Lit. 30 Stowa, 1994, Handboek debietmeten in open waterlopen, Stowa publicatie 1994-13

Lit. 31 Henry Darcy, Henri Bazin, 1865, Recherches hydrauliques entreprises par M. Henry Darcy continuées par M. Henri Bazin. Première partie. Recherches expérimentales sur l'écoulement de l'eau dans les canaux découverts, Imprimerie impériale, Paris

Lit. 32 Erwin Winter, 2007, A fisheye view on fishways, Proefschrift Universiteit Wageningen.
ISBN 978-90-8504-867-1

Lit. 33 Boer H.E. en Kielman J.A., Rivieren, Studieboek Weg- en Waterbouwkunde, N.V. Uitgevers-Maatschappij Kosmos, Amsterdam, 1936.

Lit. 34 Historische Anemometer, Woltmannsche Flügel, www.geag.de / txt_128a_A_jpg.htm

Lit. 35 del Grosso et al., Journal of the Acoustical Society of America nr. 56, p 1084, 1974.

SYMBOLENLIJST

SYMBOOL	OMSCHRIJVING	EENHEID
a	afstand boven bodem	m
a	constante	-
a	breedte ophangarm klepstuw	m
a	aantal gangen (beschoeping vijzel)	-
a	schuifhoogte ten opzichte van de aanslag, hefhoogte afsluiter in duiker	m
A	contractiefactor (klepstuw)	-
A	natte oppervlak	m^2
b	afstand tussen meetverticalen, afstand tussen pijlers	m
b	constante	-
b	dagmaat	m
B	breedte op de waterspiegel	m
B	kracht magnetisch veld (EMS)	Vs/m^2
c	voortplantingssnelheid van verstoring/geluid/licht	m/s
C	coëfficiënt van Chézy	$m^{1/2}/s$
C	concentratie (verdunningsmethode)	mg/l
C	gecombineerde afvoercoëfficiënt	-
C_C	contractiecoëfficiënt (ophangarm klepstuw, schuif)	-
C_D	afvoercoëfficiënt	-
C_{dr}	correctiefactor voor gestuwde afvoer	-
C_e	afvoercoëfficiënt	-
C_S	vormcoëfficiënt	-
C_V	coëfficiënt voor de aanstroomsnelheid	-
d	waterdiepte	m
d	diepte onder oppervlak gemeten vanaf waterspiegel	m
d	onderdompelingsdiepte (drijvers)	m
d,D	diameter	m
D	afstand tussen elektrodes (EMS)	m
E	potentiaalverschil (EMS)	V
E_C	geleidendheid	µS/cm
f	efficiëntiefactor vijzel	-
F	wrijvingskracht	N
Fr	getal van Froude	-
g	versnelling van de zwaartekracht (= 9,81)	m/s^2
h	waterstand	m+NAP
Δh	verval	m
H	energiehoogte (=$h + v^2/2g$)	m
H_B	hoogte driehoekig gedeelte V-vormige overlaat	m
i	index nummer	-
i	verhang	-
k	ruwheidsmaat van een wand	m
k_h	correctie op de overstorthoogte	m
k_M	coëfficiënt van Manning (= $1/n$)	$m^{1/3}/s$
k_M	coëfficiënt van Nikuradse (ruwheidshoogte)	m

K	correctiefactor voor gemiddelde stroomsnelheid (v_{gem}/v_{meting}) in een verticaal (akoestisch, drijvers)	-
K	constante (EMS)	-
L	lengte, afstand	m
m	aantal (verticalen)	-
m	afvoercoëfficiënt van een duiker	-
M	toegevoegde massa tracer	kg
n	aantal (meetpunten in een verticaal)	-
n	machtscoëfficiënt	-
n	coëfficiënt van Manning (= $1/k_M$)	$m^{-1/3}.s$
n	aantal omwentelingen per seconde (propeller/cupmolen)	omw/s
n	toerental	omw/min
N	aantal omwentelingen (propeller/cupmolen)	omw
p	apexhoogte (hoogte van de stuwkruin boven bedding waterloop)	m
P	natte omtrek	m
q	afvoer per eenheid van breedte	m^2/s
q	vijzelcoëfficiënt	-
Q	debiet	m^3/s
r	procentuele fout (σ/μ = gemiddelde/standaardafwijking)	%
r,R	straal	m
R	hydraulische straal ($=A/P$)	m
Re	getal van Reynolds ($=v \times R/\nu$)	-
S	verhang	-
S	verdrinkingsgraad	-
S	spoed (vijzel)	m
$S1$	modulaire limiet (kritische verdrinkingsgraad)	-
t	looptijd geluidsgolf	ns
t	tijd	s
T	meettijd	s
T_f	weerstandskoppel	Nm
u_*	schuifspanningssnelheid, $(\sqrt{g \cdot h \cdot i})$	m/s
v	stroomsnelheid	m/s
v_{gem}	gemiddelde stroomsnelheid	m/s
V	volume	m^3
V_o	openwater percentage	%
W	weerstandsfactor (begroeide gedeelte leiding)	m/s
x	horizontale afstand (tot referentie punt)	m
y	verticale afstand, waterdiepte	m
Y	menglengte, lengte	m
z, z_0	afstand tot referentievlak	m
α	kruinhoek	°
β	hoek	°
β	opstelingshoek vijzel	°
γ	meetbereik	-
δ	hoek	°
Δ	afwijking/fout in een grootheid	-

η	rendement	%
λ	wrijvingscoëfficiënt	-
μ	contractiecoëfficiënt	-
μ	gemiddelde waarde	-
ν	kinematische viscositeit	m^2/s
ξ	verliescoëfficiënt	-
π	3,1416...	-
ρ	soortelijke massa	kg/m^3
σ	standaardafwijking	-
φ	hoek	°

VERKLARENDE WOORDENLIJST

Aanloopsnelheid - De laagste stroomsnelheid waarbij een propeller of cupmolen in beweging komt.

Afvoerrelatie - Verband tussen de afvoer en één of twee bijbehorende waterstanden.

Akoestisch - Door middel van geluidstrillingen.

Betrekkingslijn - Grafische voorstelling aangevende welke waterstanden bij verschillende meetstations langs een waterloop bij stationaire afvoertoestand met elkaar overeenkomen.

Calibratie - IJking. Het door metingen bepalen van het verband tussen twee of meer grootheden.

Capacitieve elektrode - Een elektrode, die gebruik maakt van het principe van een condensator, waarbij de capaciteit van de condensator verandert onder invloed van een verandering van een bepaald verschijnsel, bijvoorbeeld een verandering van een waterstand (zie ook elektrode, condensator, diëlektrische constante).

Cavitatie - Het ontstaan van gasbellen in snelstromende vloeistoffen, wat bij schoepen en schroeven corrosie veroorzaakt.

Continuïteit - Bij een stationaire stroming zal de hoeveelheid stof (water, tracer) die per tijdseenheid een zeker dwarsprofiel passeert, gelijk zijn aan de hoeveelheid, die een verder stroomafwaarts gelegen dwarsprofiel passeert.

Davit - Draaibare stang aan de verschansing van een vaartuig.

Debiet - Hoeveelheid water die per tijdseenheid op een bepaald punt passeert (ook: afvoer).

Deflectie methode - Een stromingslichaam met een bepaalde vorm en gewicht hangt aan een draad in het stromende water. Door de op het stromingslichaam uitgeoefende kracht zal de draad een hoek maken met de verticaal. Door deze hoek te meten (met bijvoorbeeld een pendulummeter), kan met behulp van ijktabellen de snelheid van het stromende water worden berekend.

Diëlektrische constante - Constante voor het materiaal tussen de elektrodes van een condensator. Deze is mede maatgevend voor de capaciteit van een condensator.

Discontinuïteit - Een onderbreking in de relatie tussen twee grootheden, in dit verband tussen de waterhoogte en het debiet.

Doppler-principe - Een uitgezonden geluidsgolf of radargolf wordt weerkaatst tegen in het water zwevende deeltjes. Het teruggekaatste signaal is in frequentie verschoven, evenredig met de snelheid van de deeltjes en de frequentie.

duurlijn afvoer - Grafische weergave waarin de afvoer is afgezet tegen het aantal dagen per jaar, dat de betreffende afvoer wordt bereikt of overschreden

duurlijn waterstand - Grafische weergave waarin de waterstand is afgezet tegen het aantal dagen per jaar, dat de betreffende waterstand wordt bereikt of overschreden.

Echosounder - Apparaat waarmee vanaf een vaartuig met behulp van door de bodem teruggekaatste geluidsgolven de diepte wordt bepaald.

Elektromagnetisch - Een meetmethode die is gebaseerd op het principe van inductiespanning, die wordt opgewekt door een elektromagneet in een langsstromende geleidende vloeistof (elektromagnetische debietmeter voor gesloten leidingen, elektromagnetische stroomsnelheidsmeter (EMS)).

Elektrode - Metalen toeleiding voor de elektrische stroom in een vloeistof of gas.

Empirisch - Op bevinding of ervaring gegrond. Bijvoorbeeld formules die niet theoretisch zijn afgeleid (of slechts gedeeltelijk) maar zijn gebaseerd op uitgevoerde metingen.

Energiehoogte - De waterhoogte verhoogd met de snelheidshoogte ($v^2/2g$) ter plaatse.

Energieverhang - Verschil in energiehoogte tussen twee punten in een waterloop gedeeld door de afstand tussen deze twee punten.

Extrapoleren - Uit bekende termen van een reeks daarbuiten gelegen termen berekenen.

Fluorimeter - Met fluor werkende colorimeter, een toestel waarmee men uit de kleur van een oplossing de concentratie ervan kan bepalen.

Flush - Vlak met de wand, niet uitstekend.

Geleidendheidsmeter - Instrument om het geleidendheidsvermogen te meten. In dit geval om bij de verdunningsmethode de concentratie van de tracer en het water in de waterloop te bepalen.

Hydraulische straal - Hydraulische grootheid die de vorm van een dwarsprofiel weergeeft. Het quotiënt van de oppervlakte van het dwarsprofiel van een waterloop en de natte omtrek daarvan.

Hydrologie - De leer van het voorkomen, het gedrag en de chemische en fysische eigenschappen van water in al zijn verschijningsvormen op en beneden het aardopppervlak, uitgezonderd het water in zeeën en oceanen.

Hydrometrie - Het vakgebied dat zich bezighoudt met het meten van afvoeren in open waterlopen, ondersteund en gecompleteerd door metingen van waterhoogten, bodemhoogten, sedimenttransport, neerslag en verdamping.

Hysteresis - In dit verband het achterblijven van de gemeten waterstand (bijvoorbeeld in een stilling well) ten opzichte van de werkelijk optredende waterstand in de waterloop.

In-situ - Ter plaatse (in het veld).

Interferentie - Gelijktijdige werking van twee bewegingen die elkaar belemmeren of versterken, met name van trillingen of golfbewegingen.

Mariotte fles - Een zodanig geconstrueerde fles of tank, dat de via een kraan uitstromende hoeveelheid vloeistof per tijdseenheid onafhankelijk is van de vullingsgraad van de fles/tank (constant debiet).

Meetduur – De tijd die nodig is om een enkele meting uit te voeren.

Meetinterval/frequentie – De tijd tussen twee opeenvolgende metingen.

Meetraai - Plaats in een waterloop, loodrecht op de as van de waterloop, waar hydrometrische metingen worden uitgevoerd.

Modulaire limiet - Ook: kritische verdrinkingsgraad. Bij een meetstuw/meetgoot die verdrinkingsgraad waarbij de bovenstroomse energiehoogte door beïnvloeding van de benedenstroomse energiehoogte meer dan 1 % gaat afwijken van de energiehoogte van die waarbij geen opstuwing optreedt.

Morfologie - Leer en beschrijving van de vormen der aardoppervlakte.

Natte omtrek - Lengte van de wanden en bodem in een dwarsprofiel van een waterloop die in contact staat met het water.

Peilbuis - Algemene term voor een buis of soortgelijke constructie die via een verbindingsbuis met een kleinere diameter in verbinding staat met een open waterloop om daarin de waterhoogte te meten. Ook wel “stilling well” genoemd.

Pendulummeter - Instrument waarop de hoek kan worden afgelezen, die een draad waaraan een in het water ondergedompeld lichaam hangt, maakt met de verticaal. Wordt gebruikt voor de deflectiemethode.

Piëzoresistief element - Een weerstandselement van silicium, waarvan de weerstand verandert door vervorming.

Referentievlak - Een standaard of willekeurig horizontaal vlak ten opzichte waarvan variabele hoogten (bijvoorbeeld waterstanden) worden vastgelegd.

Regressie - Het berekenen van een functie uit volgens toevallige fouten afwijkende gegevens.

Sedimentatie - Het bezinken van door het water meegevoerde deeltjes op plaatsen met een lage stroomsnelheid.

Sedimenttransport - Het meevoeren van deeltjes door stromend water. De grootte van de deeltjes en de stroomsnelheid van het water bepalen de mate van transport van deeltjes.

Sensor - Ook opnemer. Instrument dat een elektrisch signaal opwekt evenredig met een fysische grootheid.

- capacitieve - Een opnemer die gebruik maakt van het principe van een condensator, waarbij de capaciteit van de condensator verandert onder invloed van een verandering van een bepaald verschijnsel.
- elektromagnetische - Een opnemer die gebruikt maakt van een elektromagnetisch veld. De gemeten inductiespanning verandert onder invloed van de snelheid waarmee een geleider (bijvoorbeeld water) zich door het magnetisch veld beweegt.
- ultrasonore - Een opnemer die gebruik maakt van geluidsgolven
- radar – Een opnemer die gebruik maakt van radiogolven.

Standaardafwijking - Maat voor de (additieve) fout op een variabele. De grootte van de standaardafwijking is een maat voor de spreiding die in metingen kan optreden t.o.v. de gemiddelde waarde.

Stationair - Niet veranderend in de tijd.

Stilling well - Zie: peilbuis.

Tracer - Stof die gebruikt kan worden, om de loop van stoffen in allerlei processen nauwkeurig te kunnen volgen.

Transducent - Omzetter van een fysisch naar een elektrisch verschijnsel of omgekeerd. Bij een akoestisch apparaat de luidspreker en/of microfoon.

Ultrasonoor - Met behulp van geluidsgolven met een frequentie hoger dan die van het hoorbare geluid.

Uranine - Geelgroene kleurstof die wel wordt gebruikt bij de verdunningsmethode (ook om te constateren of een goede menging plaatsvindt).

Variabiliteit - Mate van veranderlijkheid.

Velling - Vlakke afschuining van een balk.

Verificatie - Het vaststellen van de waarheidswaarde van een beweringsinhoud.

Vismigratie - Het stroomopwaarts trekken van vissen (vooral salmoniden als de zalm en forel) om te paaien en kuit te schieten.

Waterbalans - De vergelijking van de hoeveelheden water betrokken bij aan- en afvoer, onttrekking en verandering in berging over een bepaalde periode en binnen een gegeven gebied.

Waterbeheer - Het geheel van onderzoekingen, plannen, technische werken en bestuurlijke maatregelen dat dient om te komen tot een zo doelmatig mogelijk beheer van het aanwezige grond- en oppervlaktewater.

BIJLAGEN

BIJLAGE A

NEN/ISO STANDAARDEN

De belangrijkste NEN/ISO standaarden voor debietmeten zijn hieronder weergegeven.

NEN-nummer	Titel
748	Debietbepaling bij gebruik van stroomsnelheidsmeters of drijvers
772	Terminologie, definities en symbolen in de hydrometrie
1088	Bepaling van de onnauwkeurigheden in het debiet bij de velocity-area methode
1100-1	Inrichting en gebruik van een meetstation
1100-2	Debiet bepaling uit de relatie tussen waterstand en debiet
1438	Meetstuwen: scherpe overlaten
2537	Propeller en rotor stroomsnelheidsmeters
3454	Apparatuur voor het meten van waterdieptes
3716	Sediment transport: het meten van suspensie transport
3846	Meetstuwen: rechthoekige lange overlaten
4360	Meetstuwen: De Crump overlaat
4362	Meetstuwen: trapeziumvormige lange overlaten
4365	Sediment transport: bepaling van concentratie, korrelverdeling en dichtheid
4366	Echoloden voor het meten van waterdieptes
4373	Apparatuur voor het meten van waterstanden
4375	Kabelbaan systeem voor het meten van debieten
4377	Meetstuwen: V-vormige Crump overlaten
8368	Meetstuwen: leidraad voor de keuze van het type meetstuw
9123	Debietmeting in een waterloop met variabele waterstanden
9212	Sediment transport: het meten van bodem transport
9824	Debietmeting in gedeeltelijk gevulde gesloten leidingen
9825	Debietmeting in grote rivieren en bij hoogwater
13550	Meetstuwen: verticale schuiven met onderstort
13798	Specificatie van een standaard referentie regenmeter
14028	Propeller stroomsnelheidsmeters en de ijking ervan
14139	Meetstuwen: stuwen met een samengesteld doorstromingsprofiel
14614	Waterkwaliteit: richtlijn voor de beoordeling van hydromorfologische kenmerken van rivieren
14685	Geofysische verkenning van boorgaten voor hydrogeologisch onderzoek
15768	Ontwerp, keuze en gebruik van electromagnetische stroomsnelheidsmeters
15769	Richtlijnen voor de toepassing van akoestische stroomsnelheidsmeters bij gebruik van Doppler - en echocorrelatie methoden
24154	ADCP sensoren en software voor het meten van debieten. IJking van propeller en rotor stroomsnelheidsmeters in een sleeptank
24155	Normen voor de transmissie van hydrometrie informatie
25377	Leidraad voor de bepaling van onnauwkeurigheden in de hydrometrie
26906	Meetstuwen: vispassages, geijkt als meetstuw

Belangrijke ISO-standaards voor de Nederlandse praktijk van het debietmeten zijn:

ISO-nummer	Titel
ISO 6416	Measurement of discharge by the ultrasonic method (Debietmeten met de akoestische looptijdmethode)
ISO 8333	V-shaped broad-crested weirs (Meetstuwen: V-vormige lange overlaten)
ISO/TR 8363	General guidelines for selection of method (Algemene richtlijnen voor selectie van een meetmethode)
ISO/TS 15768	Design, selection and use of electromagnetic current meters (Ontwerp, selectie en gebruik van electromagnetische stroommeters)
ISO 24578	Guide to the application of acoustic doppler current profilers for measurement of discharge in open channels (Richtlijnen voor de debietmeting met de akoestische dopplermethode)

Voor nadere informatie zie de website van de NEN: http://normen.nen.nl/nen/?ics=17.120.20

BIJLAGE B

WEERSTANDSCOËFFICIËNTEN WATERLOPEN

WAARDEN VAN MANNING-COËFFICIËNTEN

TABEL B-1 **WATERLOPEN MET RELATIEF GROF BEDDINGMATERIAAL, NIET GEKARAKTERISEERD DOOR FORMATIE VAN DE BEDDING [ISO 1070]**

beddingmateriaal	afmetingen beddingmateriaal (mm)	Manning's coëfficiënt $n = 1/k_M$ ($m^{-1/3}.s$)
grind	4 - 8	0,019 - 0,020
	8 - 20	0,020 - 0,022
	20 - 60	0,022 - 0,027
kiezelstenen	60 - 110	0,027 - 0,030
	110 - 250	0,030 - 0,035

TABEL B-2 **OVERIGE WATERLOPEN [ISO 1070]**

beschrijving waterloop	Manning's coëfficiënt $n = 1/k_M$ ($m^{-1/3}.s$)
A Gegraven of uitgebaggerd	
aarde, recht en uniform:	
1. schoon, recent aangelegd	0,016 - 0,020
2. schoon, na verwering	0,018 - 0,025
3. met kort gras, enig onkruid	0,022 - 0,033
stenen:	
1. vlak en uniform	0,025 - 0,040
2. uitstekende stenen en onregelmatig	0,035 - 0,050
B Natuurlijke waterlopen	
B1. relatief smalle waterlopen (breedte bij piekafvoeren < 30 meter)	
waterlopen in vlak terrein; schoon, recht, geen scheuren of poeltjes	0,025 - 0,033

GECOMBINEERD STROMINGSMODEL VOOR BEGROEIDE WATERLOPEN [LIT. 6]

Het verband tussen het debiet en het verhang voor een begroeide dan wel gedeeltelijk begroeide waterloop, waarbij het totale dwarsprofiel wordt op gedeeld in een begroeid en een onbegroeid gedeelte ziet er als volgt uit:

$$Q = kMo \cdot A_1 \cdot R_1^{2/3} \cdot S^{1/2} + W \cdot A_2 \cdot S$$

met:

- Q : totale debiet door het dwarsprofiel (m^3/s)
- A_1 : oppervlak van het niet begroeide gedeelte van het dwarsprofiel (m^2)
- R_1 : hydraulische straal van het niet begroeide gedeelte (m)
- A_2 : oppervlak van het begroeide gedeelte van het dwarsprofiel (m^2)
- S : het verhang (-)
- kMo : ruwheidsfactor voor het niet begroeide gedeelte ($m^{1/3}/s$)
- W : weerstandsfactor voor het begroeide gedeelte (m/s)

Het eerste gedeelte van formule 86 beschrijft de stroming door het onbegroeide gedeelte. Dit deel heeft de gedaante van de formule van Manning, met dit verschil dat A_1 en R_1 respectievelijk de natte oppervlakte en hydraulische straal zijn van het onbegroeide gedeelte. De ruwheidsfactor kMo is in dit geval een maat voor de weerstand op de overgang van het onbegroeide en begroeide gedeelte. Uit metingen in de praktijk is gebleken, dat deze waarde - onafhankelijk van de verhouding begroeid/onbegroeid gedeelte - steeds 34 bedraagt. Ook voor het geval dat de watergang vrijwel geheel schoon is, waarbij de bovenstaande formule overgaat in de formule van Manning, blijft kMo = 34. Pas wanneer het openwater gedeelte niet meer wordt begrensd door een relatief ruwe "wand", zoals begroeiing, stoppels of onregelmatige taluds, maar door een glad afgewerkte wand (nieuw gegraven watergang) of door een bekleding van beton, kan de waarde van kMo hoger worden.

Het tweede gedeelte van de formule beschrijft de stroming door het begroeide gedeelte van het dwarsprofiel. De weerstandswaarde W is afhankelijk van de soort planten. In Tabel B-3 is de waarde van W voor enkele soorten vegetatie gegeven.

TABEL B-3 **WEERSTANDSWAARDE W VOOR ENKELE SOORTEN VEGETATIE**

Type begroeiing	W-waarde
"grasachtigen" en ondergedoken soorten vegetatie	30
riet	100
drijvend fonteinkruid	200
gele plomp	250
waterlelie	500
watergentiaan	700

Door het openwaterpercentage (V_o) te definiëren als:

$$V_o = \frac{A_1}{A} \cdot 100\,\%$$

met:

A_1 : oppervlak niet begroeide gedeelte (openwater gedeelte) (m^2)
A : totale oppervlakte dwarsprofiel (m^2)

en voor kMo de waarde 34 in te vullen, is bovenstaande debietformule ook te schrijven als:

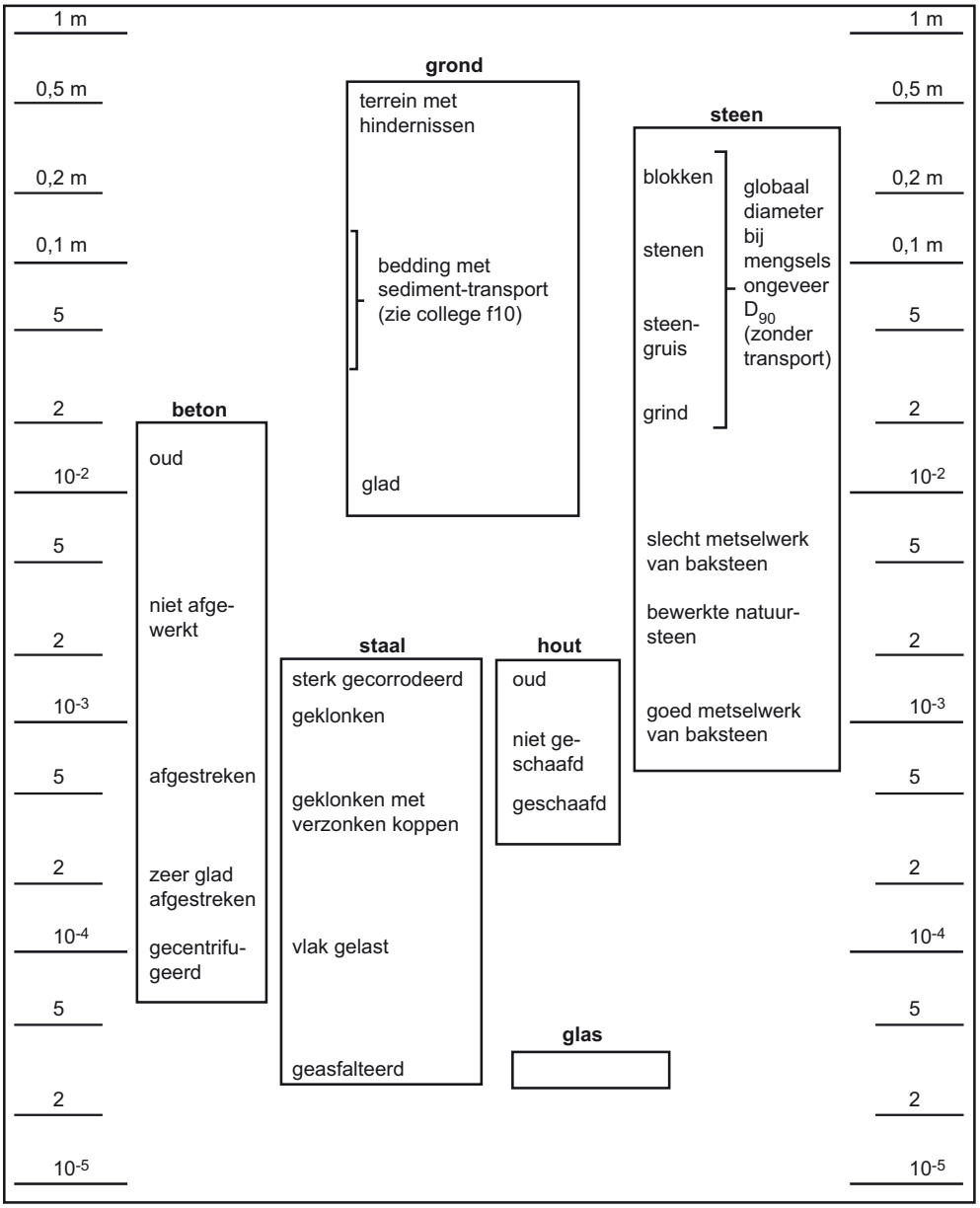
$$Q = 34 \cdot \frac{V_o}{100} \cdot A \cdot R_1^{2/3} \cdot S^{1/2} + W \cdot \left(1 - \frac{V_o}{100}\right) \cdot A \cdot S$$

De invloed van de soort planten (W-waarde) telt met name in sterk begroeide waterlopen (openwaterpercentages kleiner dan 50%). Bij minder begroeide waterlopen kan bij benadering worden gewerkt met de formule van Manning.

ENKELE NIKURADSE-WAARDEN

Onderstaande Tabel B-4 geeft de Nikuradse waarden voor verschillende bodemtypen en wandtypen.

TABEL B-4 **NIKURADSE WAARDEN VOOR VERSCHILLENDE BODEM- EN WANDTYPEN**



BIJLAGE C

VOORBEELDEN MEETMETHODEN

VOORBEELD STANDAARD VELOCITY-AREA METHODE

Voorbeeld van een meetformulier

MEETFORMULIER VELOCITY-AREA METHODE **PROPELLERMETINGEN**

Waterstanden :
Recorder : 6,743 m + N.A.P.
Peilschaal : 6,75 m + N.A.P.

Rivier : Nieuwe Kanaal
Locatie : Nieuwlanden
Datum : 1 februari 1994
Tijd : 10.30 - 12.15

Propeller nr. : 3 - 75988 Aantal omwentelingen per sec.:
n < 0,63 : v = 0,246 n + 0,017 (m/s)
n > 0,63 : v = 0,260 n + 0,008 (m/s)
n = N/t
meetduur t = 50 sec.

vert. nr.	afstand tot (m)		diepte (m)	0,2 d		0,6 d		0,8 d		$v_{gem.}$
	R.P.	L.O.		N	v	N	v	N	v	
L.O.	1,30	0	0,31							
1	3,55	2,25	0,88	126	0,663	113	0,596	109	0,575	0,61
2	5,80	4,50	1,46	147	0,772	133	0,700	120	0,632	0,70
3	8,05	6,75	1,39	155	0,814	140	0,736	128	0,674	0,74
4	10,30	9,00	1,54	160	0,840	143	0,752	131	0,689	0,76
5	12,55	11,25	1,71	159	0,835	145	0,762	130	0,684	0,76
6	14,80	13,50	1,35	151	0,793	136	0,715	124	0,653	0,72
7	17,05	15,75	0,91	138	0,726	125	0,658	114	0,601	0,66
R.O.	19,10	17,80	0							

d : gemeten vanaf de waterspiegel
L.O. : Linker Oever
R.O. : Rechter Oever
R.P. : Referentie Punt

éénpunts-methode v_{gem} : $v_{0,6d}$
tweepunts-methode v_{gem} : $(v_{0,2d}+v_{0,8d})/2$
driepunts-methode v_{gem} : $(v_{0,2d}+2v_{0,6d}+v_{0,8d})/4$

BEREKENING VAN DE TOTALE AFVOER VOLGENS DE MEAN-SECTION METHODE

verticaal nr.	afstand tot L.O. (m)	diepte (m)	v_{gem} (m/s)	$b_{segment}$ (m)	$d_{segment}$ (m)	$v_{gem,segment}$ (m/s)	$Q_{segment}$ (m^3/s)
L.O.	0	0,31					
				2,25	0,60	0,41	0,55
1	2,25	0,88	0,61				
				2,25	1,17	0,66	1,74
2	4,50	1,46	0,70				
				2,25	1,43	0,72	2,32
3	6,75	1,39	0,74				
				2,25	1,47	0,75	2,48
4	9,00	1,54	0,76				
				2,25	1,63	0,76	2,79
5	11,25	1,71	0,76				
				2,25	1,53	0,74	2,55
6	13,50	1,35	0,72				
				2,25	1,13	0,69	1,75
7	15,75	0,91	0,66				
				2,05	0,46	0,44	0,41
R.O.	17,80	0					
						Q_{totaal} =	14,59

L.O. = linkeroever R.O. = rechteroever

BEREKENING VAN DE TOTALE AFVOER VOLGENS DE MID-SECTION METHODE

verticaal nr.	afstand tot L.O. (m)	diepte (m)	v_{gem} (m/s)	$b_{midsection}$ (m)	$Q_{midsection}$ (m^3/s)
L.O.	0	0,31			
1	2,25	0,88	0,61	2,25	1,21
2	4,50	1,46	0,70	2,25	2,30
3	6,75	1,39	0,74	2,25	2,31
4	9,00	1,54	0,76	2,25	2,63
5	11,25	1,71	0,76	2,25	2,92
6	13,50	1,35	0,72	2,25	2,19
7	15,75	0,91	0,66	2,15	1,29
R.O.	17,80	0			Q_{totaal} = 14,85

BEREKENING VAN DE ONBETROUWBAARHEID

Gegeven:	breedte waterloop	: 17,8 m
	gemiddelde diepte	: 1,19 m
	afvoer	: 14,7 m^3/s

De afvoer wordt op twee manieren met behulp van de velocity-area methode gemeten:
I : aantal verticalen m = 15, vijf punten in de verticaal (vijf-punts methode)
II : aantal verticalen m = 5, één punt op 0,6*d* vanaf de waterspiegel (één-punts methode).

In beide gevallen zijn de verticalen op onderling gelijke afstanden verdeeld over het dwarsprofiel. De resulterende toevallige fouten worden gegeven in onderstaande tabel.

TABEL C-1 **SAMENSTELLING VAN DE TOEVALLIGE FOUT IN DE AFVOERBEPALING**

herkomst standaardafwijking α	bepaling	methode I	methode II
gemiddelde snelheid (v_i) in verticaal	geschat	1,0 %	1,0 %
aantal punten in de verticaal (n)	Tabel C-2 (ISO)	2,7 %	8,2 %
diepte in een verticaal/segment (d_i)	geschat	1,0 %	1,0 %
breedte van een segment (b_i)	geschat	0,4 %	0,4 %
aantal verticalen in een dwarsprofiel (m)	Tabel C-3 (ISO)	2,0 %	4,2 %

De totale fout is nu gelijk aan:

$$r_Q = \sqrt{r_i^2 + \frac{1}{m}\left(r_v^2 + r_n^2 + r_d^2 + r_b^2\right)}$$

Voor methode I geeft dit als resultaat: r_Q = 2,1%

Voor methode II geeft dit als resultaat: r_Q = 5,6%

TABEL C-2 **FOUT IN DEBIET TEN GEVOLGE VAN EEN BEPERKT AANTAL MEETPUNTEN IN DE VERTICAAL**

methode	standaardafwijking r_n
één-punts	8,2 %
twee-punts	4,9 %
drie-punts	4,8 %
vijf-punts	2,7 %
tien-punts	2,4 %

TABEL C-3 **FOUT IN DEBIET TEN GEVOLGE VAN EEN BEPERKT AANTAL VERTICALEN**

aantal verticalen	standaardafwijking r_m
5	4,2 %
6	3,7 %
10	2,6 %
15	2,0 %
20	1,7 %
30	1,3 %

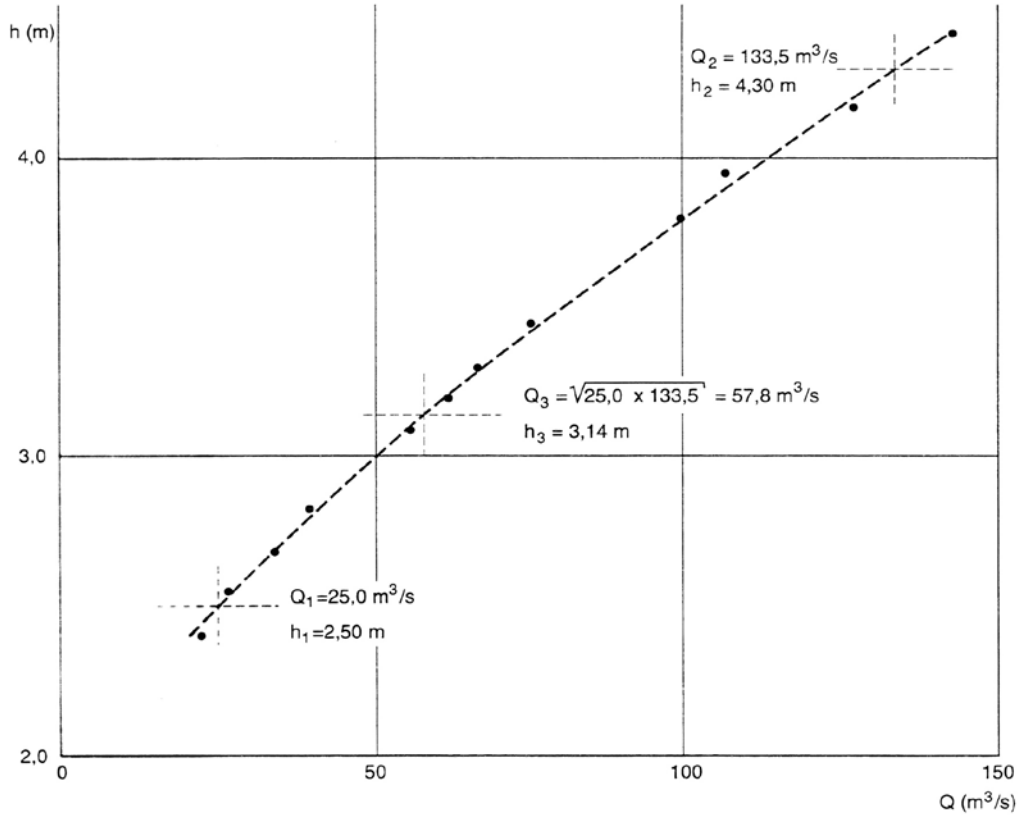
VOORBEELD AFVOER-WATERSTAND RELATIE METHODE

Voor een bepaalde meetlocatie beschikken we over de in Tabel C-4 vermelde incidentele afvoermetingen. In Figuur C-1 zijn de gemeten waterstanden (y-as) uitgezet tegen de gemeten afvoeren (x-as). Door deze punten is met de hand zo goed mogelijk een curve getrokken.

TABEL C-4 **GEMETEN AFVOEREN EN WATERSTANDEN**

datum	afvoer Q (m^3/s)	waterstand h (m+NAP)
21-02-92	22,4	2,41
15-03-93	26,8	2,55
28-04-92	34,1	2,68
16-05-93	39,9	2,83
30-06-93	55,7	3,09
01-08-92	62,0	3,20
10-08-92	66,7	3,30
12-08-93	75,3	3,45
29-09-92	99,7	3,80
15-11-93	106,5	3,95
10-12-92	126,6	4,17
22-01-93	142,3	4,41

FIGUUR C-1 **GEMETEN DEBIET UITGEZET TEGEN GEMETEN WATERHOOGTE**



BEPALING VAN h_0:

Op de getrokken curve lezen we bij twee willekeurig gekozen debieten (een laag en een hoog debiet) de bijbehorende waterstanden af.

- Q_1 = 25,0 m³/s → h_1 = 2,50 m+NAP
- Q_2 = 133,5 m³/s → h_2 = 4,30 m+NAP

Een derde waarde van Q wordt nu berekend als:

$$Q_3 = \sqrt{Q_1 \cdot Q_2}$$

Hieruit is dan de volgende formule voor h_0 af te leiden:

$$h_0 = \frac{h_1 \cdot h_2 - h_3^2}{h_1 + h_2 - 2\,h_3}$$

Dit levert in dit geval:

- Q_3 = 57,8 m³/s → h_3 = 3,14 m+NAP
- h_0 = 1,71 m+NAP

BEOORDELING MEETGEGEVENS:

Als het verband tussen Q en $(h\text{-}h_0)$ wordt uitgezet op dubbel-logaritmisch papier, zal dit een rechte lijn opleveren, als er geen discontinuïteiten in de afvoerrelatie aanwezig zijn. Dit is dus een goede controle op discontinuïteiten.

BEPALING VAN DE WAARDEN VAN A EN B:

De parameters van a en b uit de afvoerrelatie: $Q = a(h\text{-}h_0)^b$ kunnen nu worden bepaald volgens de kleinste kwadraten-methode. Deze berekening kan worden uitgevoerd op een computer (via enkelvoudige lineaire regressie) of handmatig. De handmatige berekening is weergegeven in Tabel C-5, waarbij de volgende formules en aannames worden gebruikt:

- $Q = a \times (h\text{-}1{,}71)^b$ → $\log Q = \log a + b \times \log (h\text{-}1{,}71)$

Aannames:

- $y = \log Q$
- $x = \log (h\text{-}1{,}71)$

Substitutie levert:

- $y = \log a + b \times x$
- $\Sigma y = N \times \log a + b \times \Sigma x$ (N is het aantal metingen = 12)
- $\Sigma xy = \Sigma x \times \log a + b \times \Sigma x^2$

TABEL C-5 **BEREKENING VOLGENS DE KLEINSTE KWADRATEN-METHODE**

Q (m^3/s)	h (m+NAP)	$h-h_0$ **(m)**	***y* =** log Q	***x* = *log (h-h₀)***	***x*× *y***	x^2
22,4	2,41	0,70	1,350	-0,155	-0,209	0,0240
26,8	2,55	0,84	1,428	-0,076	-0,108	0,0057
34,1	2,68	0,97	1,533	-0,013	-0,020	0,0002
39,9	2,83	1,12	1,601	0,049	0,079	0,0024
55,7	3,09	1,38	1,746	0,140	0,244	0,0196
62,0	3,20	1,49	1,792	0,173	0,310	0,0300
66,7	3,30	1,59	1,824	0,201	0,367	0,0406
75,3	3,45	1,74	1,877	0,241	0,451	0,0579
99,7	3,80	2,09	1,999	0,320	0,640	0,1025
106,5	3,95	2,24	2,027	0,350	0,710	0,1227
126,6	4,17	2,46	2,102	0,391	0,822	0,1528
142,3	4,41	2,70	2,153	0,431	0,929	0,1861
Σ			21,432	2,052	4,215	0,7445

Uit de aldus verkregen twee vergelijkingen met twee onbekenden zijn a en b op te lossen:

$$21{,}432 = 12\,(\log a) + 2{,}052\,b$$
$$4{,}215 = 2{,}052\,(\log a) + 0{,}7445\,b$$

Oplossing: $\log a = 1{,}5469 \rightarrow a = 35{,}23$ en $b = 1{,}398$

De afvoerrelatie kan dus worden weergegeven als:

$$Q = 35{,}23\,(h - 1{,}71)^{1{,}398} \quad [m^3/s]$$

KWALITEITSCONTROLE VAN DE GEVONDEN AFVOERRELATIE MET BEHULP VAN DE MEETGEGEVENS

In Tabel C-6 wordt het verschil tussen de gemeten afvoer en de met de afvoerformule berekende afvoer (Δ_Q) weergegeven als:

TABEL C-6 **PROCENTUELE AFWIJKING TUSSEN GEMETEN EN VIA REGRESSIE BEREKENDE DEBIET**

$Q_{gemeten}$ **(m^3/s)**	**h (m+NAP)**	$Q_{berekend}$ **(m^3/s)**	Δ_Q **(%)**
22,4	2,41	21,4	-4,4
26,8	2,55	27,6	3,0
34,1	2,68	33,8	-1,0
39,9	2,83	41,3	3,5
55,7	3,09	55,3	-0,8
62,0	3,20	61,5	-0,8
66,7	3,30	67,4	1,0
75,3	3,45	76,4	1,5
99,7	3,80	98,7	-1,0
106,5	3,95	108,8	2,1
126,6	4,17	124,0	-2,1
142,3	4,41	141,2	-0,7