

directie waterhuishouding
en waterbeweging
district zuidwest

DE MOVING-BOAT METHODE:

Debietmeting met een
varende boot

Deel I Hoofdrapport

Projekt nr 72.003.05

1984

Afstudeerstudie

ir. F.A. van Beek

bij

de Vakgroep Vloeistofmechanica

Afdeling Civiele Techniek

Technische Hogeschool Delft

Dordrecht, juli 1984

Direktie Waterhuishouding
en Waterbeweging

Distrikt Zuidwest

Nota 72.003.05 van distrikt Zuidwest
bestaat uit 3 delen:

- deel I Hoofdrapport
- deel II Appendices A t/m F
- deel III Appendices G t/m L

Deze nota is tevens verschenen als verslag R/1984/H/13
van de Vakgroep Vloeistofmechanica, Afdeling Civiele
Techniek van de Technische Hogeschool Delft.

De afstudeerstudie is begeleid door:

- prof.dr.ir. M. de Vries (TH-Delft, afd. Civiele Techniek)
- ir. C. Verspuy (TH-Delft, afd. Civiele Techniek)
- ir. M. Adriaanse (RWS - directie Wat. en Wat.,
distrikt Zuidwest)

SAMENVATTING

Het meten van debieten in rivieren, estuaria en dergelijke is van essentieel belang voor het ontwerpen van civiel-technische werken en ter ondersteuning van het beheer. Een van de methodes die in Nederland tot nu toe nauwelijks wordt toegepast, is de moving boat-methode:

een vaartuig vaart dwars over de rivier en verzamelt meetgegevens, waarmee het debiet wordt berekend.

Het doel van het onderzoek is weer te geven hoe en met welke nauwkeurigheid het debiet volgens deze methode bepaald kan worden. Daarbij spelen ook praktische aspecten van deze methode een belangrijke rol.

Het onderzoek valt in drie delen uiteen:

1. een systematische analyse van de moving boat-methode;
2. een statistische analyse van de praktisch haalbare nauwkeurigheid;
3. toepassing van de methode in de rivieren Lek, Noord en Nieuwe Maas, waarbij theoretische en praktische aspecten worden getoetst.

INHOUD

Inleiding	1
Hoofdstuk	blz.
1. Meten van debieten in open waterlopen	4
Debietmeten algemeen	4
Moving boat-methode	5
2. Onderzoek moving boat-methode	8
Aanleiding en doel	8
Opzet onderzoek	9
3. Principe moving boat-methode	10
Uitgangspunten	10
Rivierstroming	11
Bootbeweging	13
Debietbepaling	14
4. Metingen en verwerking	19
Metingen	19
Verwerking	21
Vereenvoudigde m.b.-methodes	22
5. Nauwkeurigheid	27
Opzet nauwkeurigheidsonderzoek	27
Foutenbronnen	28
Resultaten onderzoek	29
Nauwkeurigheid vereenvoudigde m.b.-methodes	32
Aanbevelingen voor de opzet van m.b.metingen	32
6. Experimenteel onderzoek	38
Metingen	38
Moving boat-metingen	39
Simulatie debieten	40
Praktische ervaringen	40
7. Conclusies en aanbevelingen	44

Appendix

- A. Rivierstroming
- B. Beweging meetvaartuig
- C. Debietbepaling
- D. Metingen en verwerking
- E. Vereenvoudigde moving boat-systemen
- F. Nauwkeurigheid meetgegevens
- G. Discretisatie in intervallen
- H. Nauwkeurigheid debietbepaling
- I. Het experimentele onderzoek
- J. Nauwkeurigheid vereenvoudigde systemen
- K. Wiskundige simulatie debieten
- L. Literatuur

FIGUREN

Figuur	blz.
1. uitgangspunten assenstelsel	3
2. verloop stroomsnelheid langs de raai	7
3. verloop stroomsnelheid in de verticaal	16
4. bootbeweging en stroomsnelheidsbepaling	17
5. bepaling debiet in drie stappen	18
6. meetinstrumenten	24
7. debietbepaling in intervallen	25
8. waarnemingen in een interval	25
9. vereenvoudigde m.b.-methodes	26
10. Monte Carlo-simulatie	35
11. schematisatie raaiprofiel	36
12. onnauwkeurigheid debietbepaling in de Lek	37
13. Lek, Noord en Nieuwe Maas	42
14. resultaat m.b.-metingen in de Lek, 17 maart 1983	43

TABELLEN

Tabel	blz.
1. meetparameters	20

SYMBOLLEN EN AFKORTINGEN

Symbool	Omschrijving	Dimensie
a	diepte	L
A _S	oppervlak stroomvoerend profiel	L ²
b	snelheid meetvaartuig t.o.v. omringende water	L/T
	- t.g.v. voortstuwing	
	- t.g.v. wind	
B	afstand tussen de oevers langs lijn, loodrecht op de stroomrichting	L
	of	
	bergende breedte	
B'	afstand tussen de oevers langs willekeurige lijn	L
c	constante	L
	c ₁	
	c ₂	
C _Q	factor in (G.56)	-
F	kombergingsoppervlak	L
g	versnelling zwaartekracht	L / T ²
g(a, z)	factor in (G.39)	L
h	waterstand t.o.v. N.A.P.	L
H _s	hefhoogte vizierschuiven stuw bij Hagestein	L
i	nummer meetinterval in een m.b.-meting	-
j	nummering waarnemingen van de hoek γ_w in een interval	-
J	wrijvingsterm in (K.7)	L ³ /T ²
k	nummering waarnemingen van de diepte z in een interval	-
k _N	equivalente zandruwheid volgens Nikuradse	L
K _u	correctiecoefficient ter verdiscontering van het verticale stroom-snelheidsverloop	-
L	gemeten afstand	L

Symbol	Omschrijving	Dimensie
m	aantal	-
	m_1 - intervallen per m.b.-meting	
	m_2 - waarnemingen van γ_w per interval	
	m_3 - waarnemingen van a per interval	
N	aantal omwentelingen propeller w-meter	-
P	onderschrijdingskans	-
q	berekend debiet per eenheid van breedte	L^2/T
Q	debiet	L^3/T
	Q - werkelijk	
	Q_i - gemeten in interval i	
	Q_{iw} - werkelijk in interval i	
	Q_m - berekend volgens m.b.-meth.	
	Q_g - gemeten volgens m.b.-meth.	
	Q_r - door niet-bemeten raaidelen	
	\bar{Q} - tijdsgemiddeld	
	$Q_{\textcircled{1}}$ - door raai ①	
s	vaarsnelheid	L/T
	s - meetvaartuig	
	s_x - component langs x-as	
	s_y - component langs y-as	
t	tijd	T
$t_{x'}, t_{y'}, t_{z'}$	translatiebewegingen langs x'-, y'- en z'-as	L
u	stroomsnelheid	L/T
	u_b - ter plaatse van meetvaartuig	
	u_m - ter plaatse van w-meter	
	u_{mx} - gemeten volgens m.b.-meth.	
	u_{mx_i} - gemeten in interval i	
	\bar{u} - tijdsgemiddeld	
	\bar{u}_s - tijdsgemiddeld in coherente structuur	
	u' - turbulente component	
w	gemeten watersnelheid op $z = z_m$	L/T
	w_{\perp} - loodrecht op \vec{w} staande component	
	$w_{//}$ - evenwijdig aan \vec{w} staande component	

Symbol	Omschrijving	Dimensie
x	coördinaat	L
	x'	- coördinaat
	x_m	- gemeten
y	coördinaat	L
	y'	- coördinaat
	y_m	- gemeten
z	coördinaat	L
	z'	- coördinaat
	z_b	- aangrijpingspunt vaartuig in stromend water
	z_m	- plaats w-meter
α	hoek	-
	α_s	- tussen \vec{S} en \vec{u}_b
	α_b	- tussen \vec{b} en \vec{u}_b
γ	hoek	-
	γ_s	- tussen \vec{S} en de x-as
	γ_b	- tussen \vec{b} en de x-as
	γ_{br}	- tussen bootas en de x-as
	γ_w	- tussen \vec{w} en de x-as
	γ_u	- tussen \vec{u} en de x-as
Δ	toe- of afname van	
η	coëfficiënt van laminaire viscositeit	-
ε	coëfficiënt van turbulente viscositeit	-
κ	constante van Von Karman	-
ρ	autocorrelatiecoëfficiënt	-
σ_{a_i}	standaardafwijking rekenkundig gemiddelde waarnemingen a	L
	$\sigma_{a_{in}}$	- onnauwk. echolood
	σ_{a_a}	- afleesonnauwk.
	$\sigma_{a_{\ddot{y}}}$	- instelling diepte ijkplaat
	$\sigma_{a_{gs}}$	- instelling geluidssnelheid
	σ_{a_e}	- a.g.v. eigenbewegingen
$\sigma_x, \sigma_y,$	standaardafwijking gemeten	L
$\sigma_{x'} \text{ en } \sigma_{y'}$	plaats	
$\sigma_{x_{in}}$ etc	- onnauwk. plaatsbepalings- systeem	
σ_{x_e} etc	- a.g.v. eigenbewegingen	
σ_{y_v}	- a.g.v. vaarbeweging	
σ_t	standaardafwijking gemeten tijd	T

Symbol	Omschrijving	Dimensie
τ	zekere tijdsperiode	T
τ	schuifspanning	$M * L / T^2$
	- laminair deel	
	- turbulent deel	
σ_{γ_w}	standaardafwijking gemeten hoek	-
	- onnauwk. gyrokompas	
	- a.g.v. turbulentie en eigenbewegingen	
φ_x, φ_y en φ_z	rotatiebewegingen langs x'-, y'- en z'-as	-
φ	tophoek geluidskegel echolood	-
ψ	hoek, gemeten door plaatsbepalingssysteem	-
μ	gemiddelde	-

Afkortingen

N.A.P.	Nieuw Amsterdams Peil
m.b.	moving boat
meth.	methode
g.c.v.	geïntegreerde continuïteitsvergelijking
ISO	International Organisation for Standardisation
per	periode
RWS	Rijkswaterstaat
T.H.-Delft	Technische Hogeschool Delft

INLEIDING

De bepaling van het debiet volgens de moving boat-methode (in het vervolg m.b.-methode genoemd) is onderzocht in het kader van het afstuderen bij de Vakgroep Vloeistofmechanica van de Afdeling der Civiele Techniek van de T.H.-Delft. Voor het onderwerp bestaat van de kant van Rijkswaterstaat grote belangstelling. De Directie Waterhuishouding en Waterbeweging van RWS was daarom zeer behulpzaam door onder andere meetvaartuigen en apparatuur voor de verwerking van de meetgegevens beschikbaar te stellen. Hierbij mag ir. M. Adriaanse niet onvermeld blijven, omdat hij op enthousiaste wijze de organisatie van de praktische zaken onder zijn hoede genomen heeft.

Een aantal medewerkers van de Afdeling der Civiele Techniek hebben mij in het onderzoek geadviseerd. De bijdrage van de begeleiders van het afstudeerwerk, prof. dr. ir. M. de Vries en ir. C. Verspuy, was hierin het grootst.

Ik bedank de genoemde personen en iedereen die mij gedurende het onderzoek hebben bijgestaan, voor hun medewerking.

Het rapport over het bepalen van het debiet volgens de moving boat-methode valt in twee onderdelen uiteen.

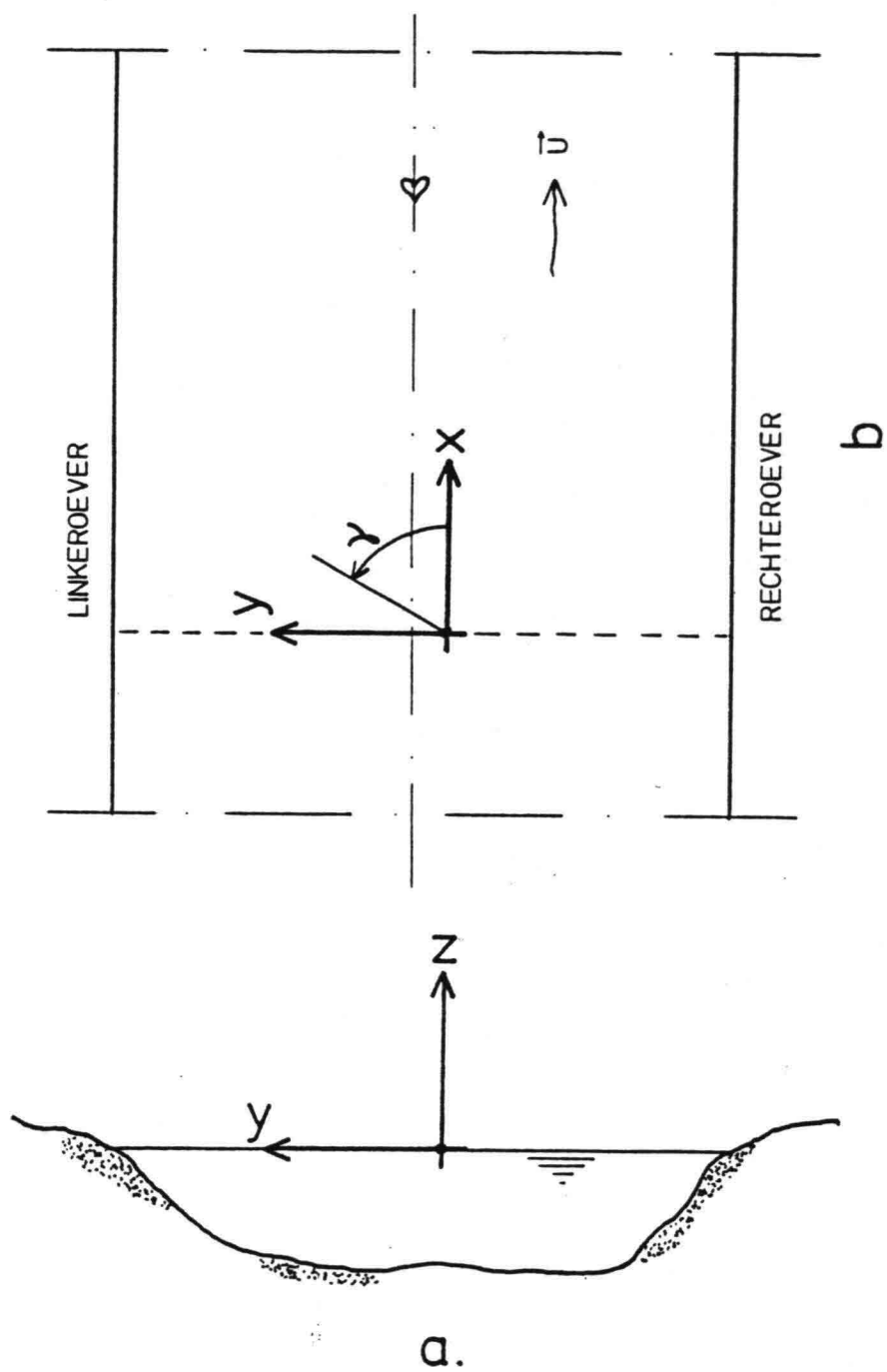
In het hoofdrapport staan de belangrijkste gegevens vermeld over de theorie van debietbepaling volgens de m.b.-methode, de nauwkeurigheid van het resultaat en enkele praktische aspecten.

De appendices bevatten de onderbouwing van het in het hoofdrapport gestelde. Elke appendix wordt afgesloten met een samenvatting. In het hoofdrapport wordt regelmatig naar de appendices verwezen.

Voordat met de eigenlijke verslaggeving begonnen wordt, worden de volgende twee uitgangspunten gepresenteerd:

1. Er wordt gebruik gemaakt van een rechtsdraaiend orthogonaal assenstelsel (fig. 1).
De oorsprong van het assenstelsel ligt op het wateroppervlak. De x- en de y-as liggen in het horizontale vlak, de z-as staat hier loodrecht op. Het y,z-vlak wordt in het rapport regelmatig met de naam "raai" aangeduid.
Van een assenstelsel dat niet met het x,y,z-assenstelsel samenvalt, worden de assen respectievelijk "x'-", "y'-" en "z'-as" genoemd.

2. De maten en afmetingen van de diverse parameters en factoren worden aangeduid volgens het SI-eenhedenstelsel.



Figuur 1: uitgangspunten assenstelsel

Hoofdstuk 1

METEN VAN DEBIETEN IN OPEN WATERLOPEN

1.1 DEBIETMETEN ALGEMEEN

Voordat over de bepaling van het debiet in een rivier gesproken wordt, wordt een definitie van het begrip gegeven.

Debiet:

De hoeveelheid water, die per tijdseenheid een bepaalde raai in een rivier passeert.
Het debiet wordt aangeduid met het symbool Q . De dimensie is: $[L^3/T]$.

De wiskundige beschrijving van het debiet ziet er in zijn meest algemene vorm als volgt uit:

$$Q = \iint u_x(y,z) * dy * dz \quad (1.1)$$

Hierin is

$u_x(y,z)$: de component van de stroomsnelheid langs de x-as als functie van de plaats in de raai (y en z).

Het debiet kan op zeer veel manieren worden bepaald, maar al deze manieren zijn afgeleid van de algemene vergelijking (1.1). Met name praktische en economische overwegingen brengen onderzoekers ertoe rationele methodes te ontwikkelen, waarmee het debiet met een voor hun aanvaardbare nauwkeurigheid wordt bepaald.

Een groep debietbepalingsmethodes is bekend onder de naam "Velocity Area Methods". Kenmerk van de velocity area methods is, dat de gemeten stroomsnelheid op een bepaald punt P (fig. 2) representatief gesteld wordt voor een gedeelte van het raaioppervlak om het betreffende punt heen. Door een dergelijke procedure met meerdere punten uit te voeren wordt een benadering verkregen van het stroomsnelheidsverloop langs de raai (fig. 2). Vervolgens wordt met een bewerking op basis van formule (1.1) het debiet berekend.

1.2 MOVING BOAT-METHODE

De m.b.-methode behoort tot de groep van de velocity area methods. Opvallende kenmerken, waarmee deze methode zich van andere velocity area methods onderscheidt, zijn de volgende:

1. Er wordt gebruik gemaakt van een varend meetvaartuig. Het vaartuig vaart op of evenwijdig aan de raai (in y-richting) van de ene naar de andere oever. Gedurende die overtocht worden een aantal parameters bemeten en met deze meetgegevens wordt het debiet berekend.
2. De component van de stroomsnelheid langs de x-as wordt op een ingestelde hoogte onder het wateroppervlak $z = z_m$ bepaald:

$$u_x(y, z_m) = u_{m_x}(y) \quad (2.2)$$

De meting geschiedt vanaf het varende meetvaartuig, zodat ook $u_{m_x}(y)$ al varende wordt bepaald. Dit betekent, dat u_{m_x} niet in bepaalde gefixeerde punten P, maar in feite in een oneindige hoeveelheid naast elkaar liggende punten wordt gemeten. Al deze punten vormen tesamen een rechte lijn in de raai (y,z-vlak) op een hoogte $z = z_m$ onder het wateroppervlak.

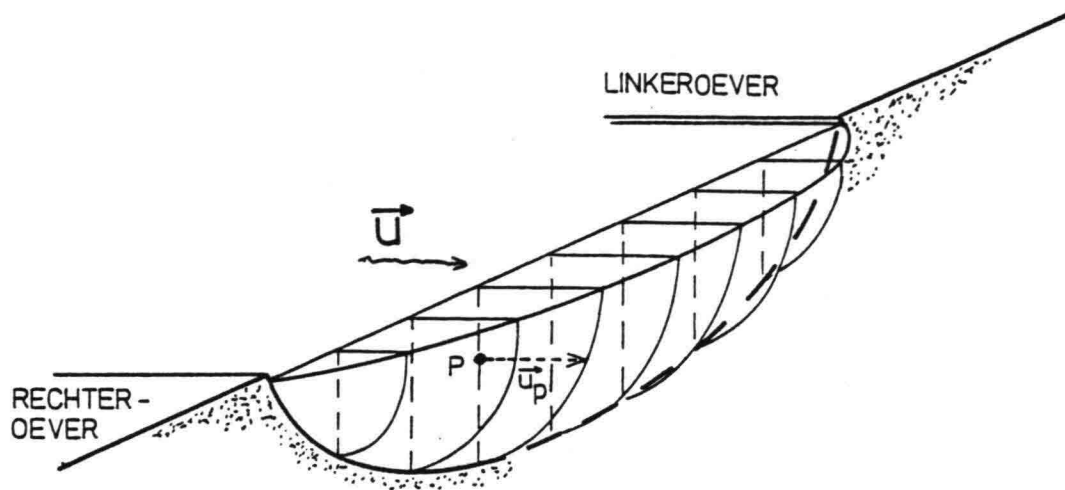
Het bepalen van het debiet volgens de m.b.-methode is al enkele tientallen jaren bekend. Toch is over de m.b.-methode in de loop van de tijd weinig gepubliceerd.

Van de publicaties valt het artikel van George F. Smoot en Charles E. Novak in het tijdschrift "Techniques of Water-Resources Investigations of the U.S. Geol. Survey" op. Het artikel met de titel "Measurement of Discharge by the Moving-Boat Method" werd in 1969 gepubliceerd. Het werk van Smoot en Novak vormt de basis voor vrijwel alle publicaties vanaf 1969 over de m.b.-methode.

De literatuur vanaf 1969 bestaat voornamelijk uit samenvattingen van het artikel van Smoot en Novak met incidenteel een vermelding van een mogelijke aanpassing. Er wordt vaak gewezen op de goede mogelijkheden van toepassing van de methode. Harp (1973) bijvoorbeeld is hiervan overtuigd en beveelt met klem een verdere ontwikkeling van de m.b.-methode aan.

In de jaren zeventig besloot de TC113-groep van de "International Organisation for Standardization" (ISO) het bepalen van het debiet volgens de m.b.-methode te normeren. In 1979 werd de ISO-norm 4369 (Lit.: ISO/TC113, 1977) gepubliceerd. In deze norm staat de tot op heden meest complete beschrijving van de m.b.-methode.

Het onderhavige onderzoek is daarom voor een belangrijk deel op de norm 4369 gebaseerd.



Figuur 2: verloop stroomsnelheid langs de raai

Hoofdstuk 2

ONDERZOEK MOVING BOAT-METHODE

2.1 AANLEIDING EN DOEL

De aanleiding voor het onderzoek aan de debietbepaling volgens de m.b.-methode bestond uit de volgende twee punten:

1. Een m.b.-meting geschiedt met slechts een meetvaartuig en na een overtocht met een tijdsduur van enkele minuten zijn er voldoende meetgegevens voorhanden voor de berekening van een debiet. Deze feiten maken de m.b.-methode in praktisch en economisch opzicht aantrekkelijk.
2. In Nederland is de methode tot nu toe niet of nauwelijks toegepast. De redenen hiervoor zijn niet duidelijk. Vermoedelijk worden andere debietbepalingmethoden naar tevredenheid gebruikt en heeft men daarom weinig belangstelling voor debietbepaling in Nederlandse rivieren volgens een nieuwe methode als de m.b.-methode.

Dit overwegende kwamen de Vakgroep Vloeistofmechanica van de Afdeling der Civiele Techniek (T.H.-Delft) en de Rijkswaterstaat, Directie Waterhuishouding en Waterbeweging district zuidwest, onafhankelijk van elkaar op het idee meer aandacht te schenken aan deze wijze van debietbepaling. Medio 1982 bespraken de Vakgroep en RWS de mogelijkheden voor een onderzoek aan de m.b.-methode. Met het onderzoek zelf werd daadwerkelijk in augustus 1982 begonnen.

Drie doelstellingen stonden voor ogen. Er moest inzicht komen in:

1. het principe van de m.b.-methode;
2. de nauwkeurigheid van het berekende debiet en welke factoren hiervoor belangrijk zijn;
3. de praktische aspecten, die verbonden zijn aan het gebruik van de m.b.-methode.

2.2 OPZET ONDERZOEK

Omdat zowel de Vakgroep als RWS zich met het onderzoek bezighielden, kon het onderzoek opgesplitst worden in een theoretisch en in een experimenteel deel.

Het theoretische en het experimentele deel werden voor een deel onafhankelijk van elkaar en voor een deel simultaan uitgevoerd. Hieronder zal dit nader worden verduidelijkt.

1. Principe m.b.-methode:
Allereerst werd de werking van debietbepaling volgens de m.b.-methode theoretisch geanalyseerd en de relevante parameters, waarmee de werking wiskundig kon worden beschreven, werden vastgesteld.
2. Nauwkeurigheid:
De nauwkeurigheid van het volgens de m.b.-methode berekende debiet werd statistisch geanalyseerd. In die analyse speelde echter een aantal factoren een rol, waarvan de invloed op de nauwkeurigheid uitsluitend op basis van ervaringen uit experimenteel onderzoek kon worden vastgelegd. Het nauwkeurigheidsonderzoek bestond derhalve uit een theoretisch deel en een experimenteel deel.
3. Praktische aspecten:
Over de gang van zaken bij de voorbereiding en de uitvoering van m.b.-metingen kon uitsluitend met behulp van experimenteel onderzoek een indruk worden verkregen.

Hoofdstuk 3

PRINCIPE MOVING BOAT-METHODE

Appendices: A, B, C.

In appendix A wordt de theorie van de wiskundige benadering van het stroomsnelheidsverloop beschreven, zoals deze in dit hoofdstuk gebruikt wordt.

De appendices B en C geven de achtergronden van het principe van de m.b.-methode.

3.1 UITGANGSPUNTEN

De theoretische behandeling van de debietbepaling volgens de m.b.-methode is gebaseerd op een aantal uitgangspunten:

1. Het rivierbed staat in de stroomrichting onder een zekere hoek I ten opzichte van het horizontale vlak.
2. De rivierstroming heeft de volgende kenmerken:
 - a. hydraulisch ruw en turbulent;
 - b. uniform;
 - c. stationair op een tijdschaal van enkele minuten;
 - d. stroomrichting langs de verticaal hetzelfde;
 - e. geen dichtheidsverschillen in het water ter plaatse van de meetraai.

Het eerste uitgangspunt is van belang voor de fysische beschrijving van de rivierstroming, die in de volgende paragraaf wordt gepresenteerd. In de rest van dit rapport komt dit uitgangspunt niet meer ter sprake.

Uit de uitgangspunten ten aanzien van de rivierstroming volgen een paar belangrijke beperkingen aan het gebruik van de m.b.-methode:

1. De stroomrichting is niet overal in de verticaal hetzelfde, als
 - a. de meetraai in een rivierbocht ligt en er sprake is van spiraalstroming;
 - b. er elementen aanwezig zijn die de stroomrichting en het stroomsnelheidsverloop in de verticaal verstoren. Voorbeelden van dergelijke obstakels zijn kribben en plaatselijke verondiepingen in de langsrichting van de rivier.
2. Op plaatsen waar een rivier in een andere rivier of in zee uitmondt kan sprake zijn van een dichtheidsverschil tussen het water in de ene rivier en het water in de andere rivier of in zee. Dichtheidsverschillen zijn de oorzaak van dichtheidsstromingen, die het resulterende stroombeeld sterk kunnen beïnvloeden. Bovendien hebben deze dichtheidsstromingen vaak een niet-stationair karakter. De werkelijk optredende rivierstroming is dan moeilijk met een wiskundig model, zoals in paragraaf 3.2, te benaderen.

Onder deze omstandigheden is de m.b.-methode, zoals deze in dit rapport wordt beschreven, niet voor toepassing geschikt.

3.2 RIVIERSTROMING

In figuur 2 wordt een ruimtelijk beeld gegeven van het stroomsnelheidsverloop langs de raai (y- en z-as). In deze figuur valt op dat er een duidelijk verband bestaat tussen de diepte a en de stroomsnelheid u.

In deze paragraaf wordt beschreven hoe de rivierstroming wiskundig benaderd kan worden en wordt meer uiteengezet over het turbulente karakter van rivierstroming.

Stroomsnelheid

In appendix A is het stroomsnelheidsverloop in de verticaal benaderd met behulp van een logaritme (fig. 3):

$$u(a,z) = \frac{\sqrt{g \cdot a \cdot I}}{\kappa} \ln \left\{ \frac{z + a}{k_N} \right\} \quad (3.1)$$

Uit (3.1) is de gemiddelde stroomsnelheid langs de verticaal afgeleid:

$$\bar{u}(a) = \frac{\sqrt{g \cdot a \cdot I}}{\kappa} \ln \left(\frac{12 \cdot a}{k_N} \right) \quad (3.2)$$

Hierin is

$u(a, z)$: stroomsnelheid als functie van a en z ;

$\bar{u}(a)$: gemiddelde stroomsnelheid langs de verticaal als functie van a ;

a : diepte;

z : coördinaat van de plaats;

g : versnelling zwaartekracht;

I : hoek tussen het rivierbed en het horizontale vlak in de stroomrichting;

κ : constante van Von Karman;

k_N : equivalente zandruwheid volgens Nikuradse.

De parameters g , I , κ en k_N zijn in de verdere beschouwingen constant.

Turbulentie

Reeds in de uitgangspunten is gewezen op het feit, dat de rivierstroming turbulent is. Er is tot nu toe erg veel onderzoek verricht aan dit verschijnsel. Toch staan er nog vele vragen open en zal er nog veel onderzoek uitgevoerd moeten worden om het verschijnsel beter te doorgronden.

In het kader van het onderhavige onderzoek is een onderverdeling in twee soorten turbulenties gemaakt:

1. Microturbulentie:

Variatie in de stroomsnelheid op een bepaalde plaats met uitsluitend kortfrequente (periode in de orde van enkele seconden) componenten.

2. Macroturbulentie:

Variatie in de stroomsnelheid op een bepaalde plaats als gevolg van de passage van coherente structuren (zie appendix A).

In de beschouwing van de nauwkeurigheid van het volgens de m.b.-methode berekende debiet worden deze twee soorten turbulentie als afzonderlijke fenomenen betrokken.

3.3 BOOTBEWEGING

Alvorens het principe van de debietbepaling volgens de m.b.-methode te beschrijven is het noodzakelijk inzicht te krijgen in de bewegingen, die het meetvaartuig tijdens een m.b.-meting maakt. Deze bewegingen worden gegroepeerd onder:

1. de vaarbeweging;
2. de eigenbewegingen.

Het varen

De resulterende vaarsnelheid ten opzichte van het x,y,z-assenstelsel wordt uitgedrukt in de vector \vec{s} . De vector \vec{s} is een resultante van de volgende twee snelheden (fig. 4):

1. Snelheid ten opzichte van het omringende water \vec{b} :
Deze snelheid ontstaat door
- het voortstuwingsmechanisme van het vaartuig;
- de wind.
2. Stroomsnelheid ter plaatse van het meetvaartuig \vec{u}_b :
De stroomsnelheid \vec{u}_b wordt gelijk gesteld aan de stroomsnelheid op $z = z_b = -0.75$ m.

In appendix B is het verband tussen deze snelheden als volgt vastgelegd:

$$s = \sqrt{b^2 + 2*u_b*b*\cos(\alpha_b) + u_b^2} \quad (3.3)$$

waarin

α_b : de hoek tussen de vectoren \vec{b} en \vec{u}_b .

Eigenbewegingen

Onder eigenbewegingen worden alle bewegingen van het vaartuig, uitgezonderd de vaarbeweging, verstaan. Het zijn voor een deel periodieke bewegingen die afhankelijk zijn van het ontwerp van het vaartuig, het heersende golfklimaat en de weersomstandigheden (wind).

3.4 DEBIETBEPALING

Het principe van de debietbepaling volgens de m.b.-methode bestaat uit drie stappen (fig. 5):

1. bepaling component van de stroomsnelheid langs de x-as $u_{m\alpha}(y)$;
2. berekening debiet per eenheid van breedte $q_m(y)$;
3. berekening van het totale debiet Q_m .

Bepaling stroomsnelheid

De stroomsnelheid wordt bepaald op een zeker niveau $z = z_m$ onder de waterspiegel (bv. $z = z_m = -2.00$ m). Dit niveau is lager dan het niveau van de stroomsnelheid ter plaatse van het meetvaartuig.

Voor de berekening van de component van de stroomsnelheid langs de x-as ($u_{m\alpha}$) zijn de volgende gegevens nodig (fig. 4):

1. de grootte en de richting van de vaarsnelheid: \vec{S} ;
2. de grootte en de richting van de watersnelheid ten opzichte van het meetvaartuig op $z = z_m$: \vec{W} .

In appendix C is de volgende betrekking voor de berekening van $u_{m\alpha}$ als functie van de plaats in de raai (y) afgeleid:

$$u_{m\alpha}(y) = s(y) * \cos(\gamma_s(y)) + w(y) * \cos(\gamma_w(y)) \quad (3.4)$$

Berekening debiet per eenheid van breedte

Het debiet per eenheid van breedte als functie van y wordt als volgt berekend:

$$q_m(y) = K_\alpha(y) * u_{m\alpha}(y) * a(y) \quad (3.5)$$

Hierin is

a : de diepte;

K_α : een correctiecoëfficiënt ter verdiscontering van het verticale stroomsnelheidsverloop.

Wat betreft de correctiecoëfficiënt K_α is het volgende op te merken:

Zoals in figuur 3 is te zien, is de stroomsnelheid in de bovenste waterlagen groter dan de gemiddelde stroomsnelheid (\bar{u}). Doorgaans zal bij een m.b.-meting de stroomsnelheid in die waterlagen worden bepaald. De factor K_u wordt gebruikt om de gemeten stroomsnelheid u_{mz} om te werken tot een benadering van de gemiddelde stroomsnelheid over de verticaal:

$$K_u = \frac{\bar{u}}{u_{mz}} \quad (3.6)$$

K_u is afhankelijk van de volgende factoren:

1. stroomsnelheidsverloop langs de verticaal (z-as);
2. diepte;
3. ophanghoogte van de w-meter (z_m).

De factor K_u kan op vele manieren worden bepaald. In dit onderzoek zijn de waarden van K_u afgeleid op basis van het stroomsnelheidsverloop, zoals dit in paragraaf 3.2 is gepresenteerd. Uit de analyse van de waarde van K_u (appendix C) volgde, dat deze ongeveer 0.91 groot is. K_u neemt deze waarde aan, als de stroomsnelheid u_{mz} op $z = z_m = -2.00$ m ten opzichte van de waterspiegel is bepaald en als de diepte a tussen 4.00 en 12.00 m ligt.

Voor de berekening van $q_m(y)$ volgens vergelijking (3.5) zijn de volgende gegevens nodig:

1. de diepte a;
2. de plaats van het vaartuig in de raai y.

Totale debiet

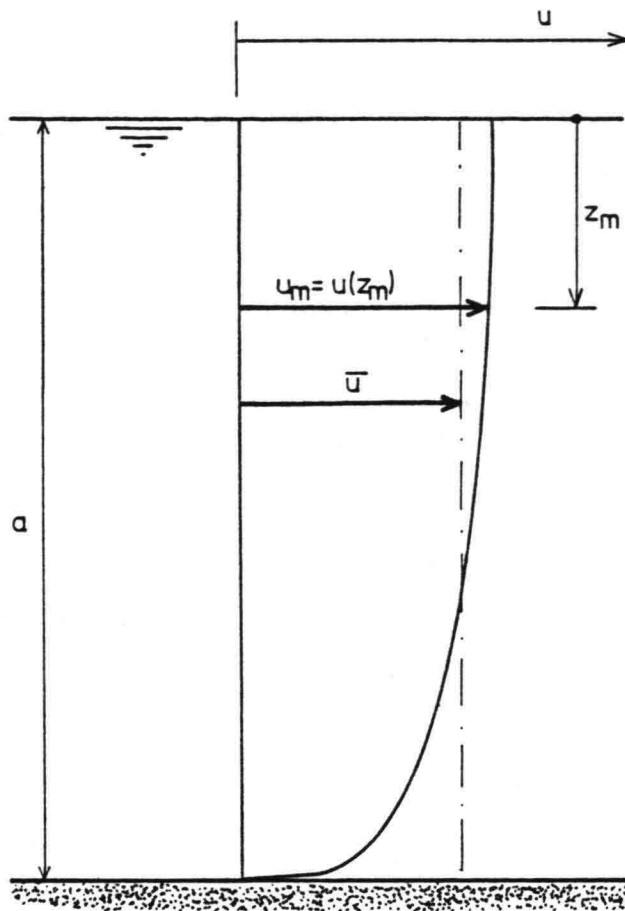
Als het verloop van het debiet per eenheid van breedte langs de raai (dat wil zeggen: als functie van y) bekend is ($q_m(y)$), dan is het totale debiet door de raai met de volgende integraal te berekenen:

$$Q_m = \int_{Y_r}^{Y_e} q_m(y) \cdot dy \quad (3.7)$$

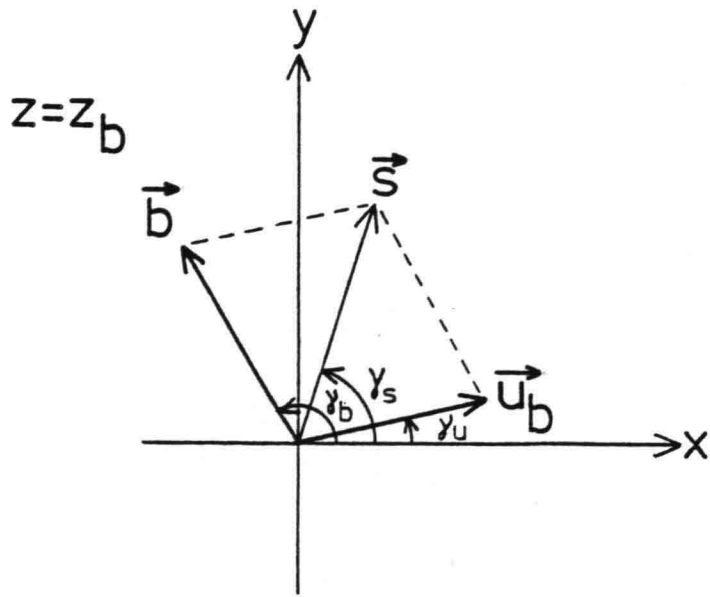
waarbij

Y_e : plaats op de y-as van de linker rivieroever;

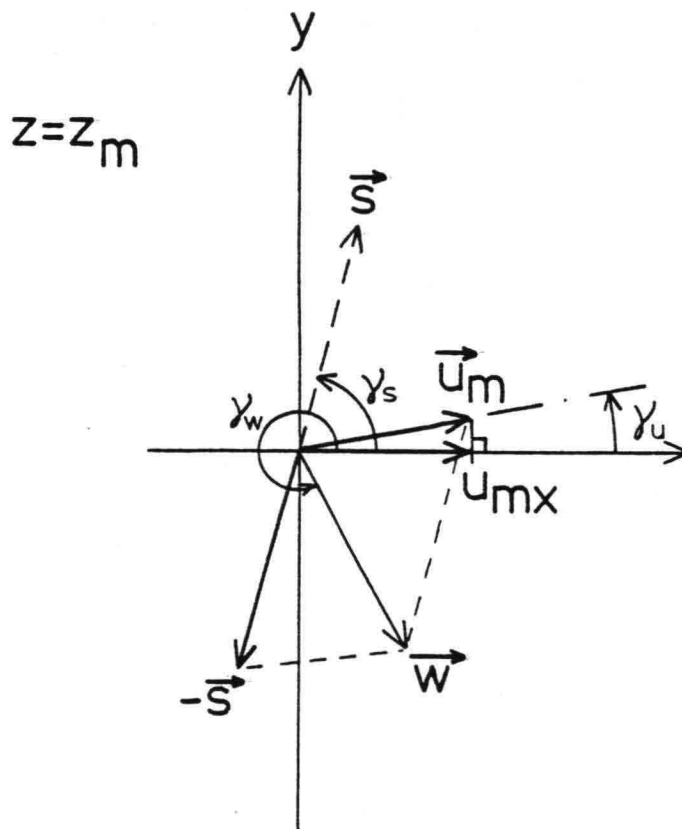
Y_r : plaats op de y-as van de rechter rivieroever.



Figuur 3: verloop stroomsnelheid in de verticaal

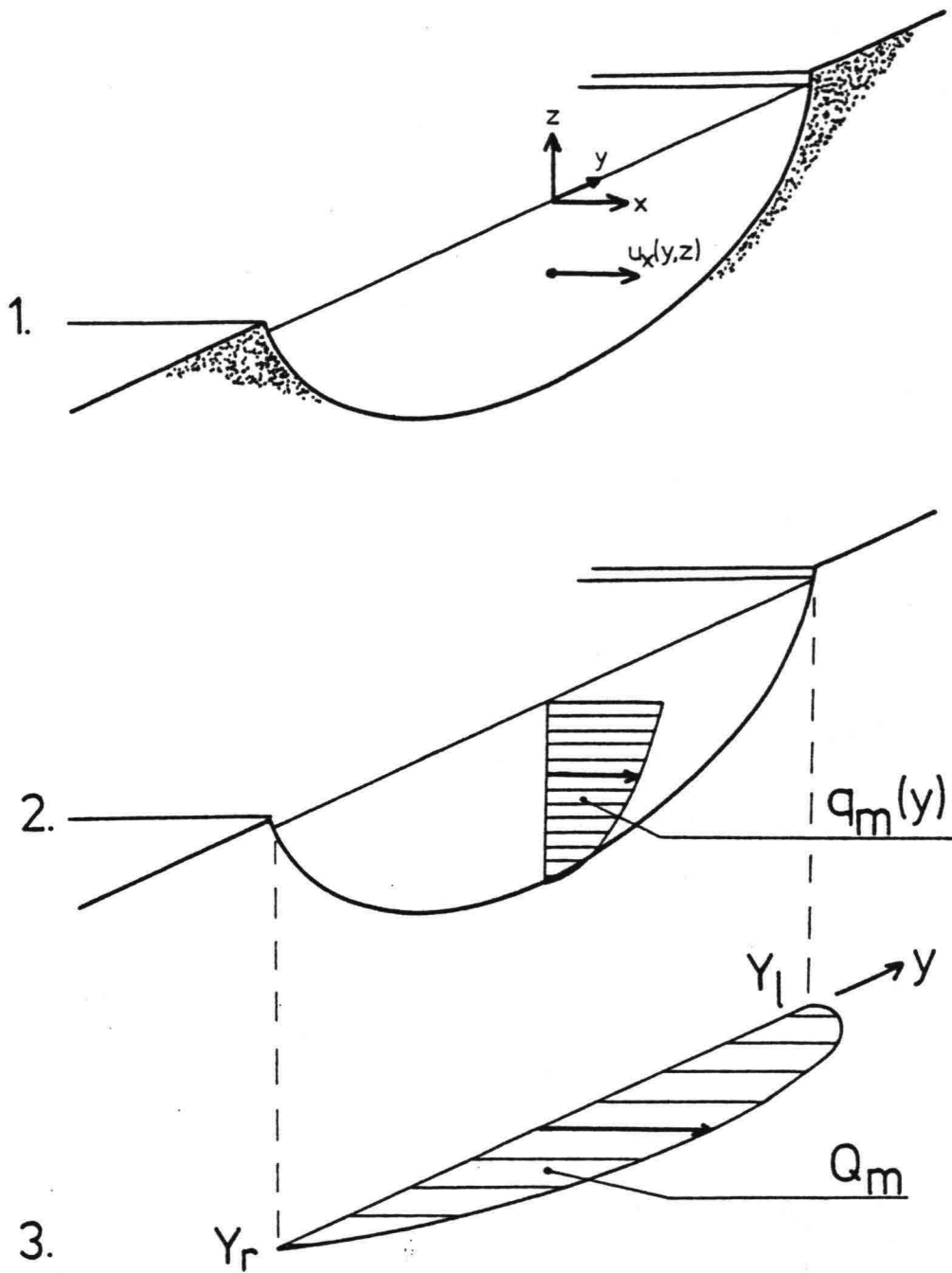


BOOTBEWEGING



STROOMSNELHEIDSBEPALING

Figuur 4: bootbeweging en stroomsnelheidsbepaling



Figuur 5: bepaling debiet in drie stappen

Hoofdstuk 4

METINGEN EN VERWERKING

Appendices D, E, H.

Appendix D geeft een nadere toelichting over de wijze waarop de formules in hoofdstuk 3 uitgewerkt kunnen worden tot formules voor de verwerking van de meetgegevens.

In appendix E worden de mogelijke vereenvoudigingen van deze verwerkingsformules uitgebreid toegelicht.

Van appendix H is in het kader van hoofdstuk 4 alleen de beschreven mogelijkheid van het bepalen van het debiet door de niet-bemeten raaidelen van belang.

4.1 METINGEN

De in het vorige hoofdstuk genoemde parameters worden in een m.b.-meting opgemeten. De manier waarop dit geschiedt, is sterk afhankelijk van de beschikbare meetapparatuur en de opzet van de meetprocedure. Hierin wordt gestreefd naar een zo groot mogelijke nauwkeurigheid van het berekende debiet Q_m .

Bij de voorbereiding van het experimentele onderzoek werd bekeken met welk meetvaartuig en met welke apparatuur de experimentele m.b.-metingen zouden worden uitgevoerd. Het vaartuig en de apparatuur die ter beschikking kwamen, vormden de randvoorwaarde voor de omwerking van de theoretische opzet van de m.b.-methode in hoofdstuk 3 tot een praktische uitwerking. De hier gepresenteerde uitwerking moet daarom beschouwd worden als een van de mogelijke uitwerkingen, die alle gebaseerd zijn op specifieke beschikbare apparatuur.

In tabel 1 staan de instrumenten weergegeven, die voor de experimentele m.b.-metingen gebruikt zijn. Over de plaats van de instrumenten op of bij het meetvaartuig biedt figuur 6 duidelijkheid.

In de tabel is bij de w-meter de meetparameter "N" genoemd. Als w-meter wordt een Ott-stroomsnelheidsmeetinstrument gebruikt, die voorzien is van een propeller van voorgeschreven afmetingen. Tussen het toerental van de propeller en de heersende watersnelheid ter plaatse van het instrument is een ijkrelatie bekend. De geïntroduceerde meetparameter N heeft nu de volgende betekenis:

N: het aantal omwentelingen van de propeller.

Tabel 1.
meetparameters

Meetparameter	Dimensie	Meetinstrument
N	[-]	w-meter
t	[T]	klok
x	[L]	plaatsbepalings- systeem
y	[L]	
γ_w	[-]	gyrokompas
a	[L]	echolood

Gezien de verwerkingsmogelijkheden van de meetgegevens van dit instrumentarium wordt de raai onderverdeeld in intervallen (fig. 7). De wijze waarop de metingen in een interval zijn gerangschikt, is in figuur 8 weergegeven. Het aantal metingen per interval van de hoek γ_w en de diepte a (respectievelijk m_2 en m_3) is afhankelijk van het resultaat van de nauwkeurigheidsbeschouwing. Dit wordt in hoofdstuk 5 nader uitgewerkt.

In appendix D is beredeneerd, dat de grens tussen twee intervallen op drie manieren kan worden vastgelegd:

1. tijdsinterval Δt ;
2. ingesteld aantal propelleromwentelingen per interval ΔN ;
3. plaatslengteinterval Δy .

Omdat de tijd een onmisbaar gegeven is in de m.b.-metingen (ook in de vereenvoudigde metingen van paragraaf 4.3) en omdat de nauwkeurigheid van het berekende debiet Q_m het beste te schatten is bij gebruik van een tijdsinterval, geniet de toepassing van Δt een duidelijke voorkeur.

4.2 VERWERKING

In figuur 7 is te zien, dat het berekende debiet Q uit twee onderdelen bestaat:

$$Q_m = Q_g + Q^+ \quad (4.1)$$

Hierin is

Q_g : gemeten debiet volgens de m.b.-methode;

Q^+ : debiet door de niet-bemeten raaidelen.

Beide onderdelen worden hieronder afzonderlijk behandeld.

Gemeten debiet Q_g

Het gemeten debiet is een sommatie van debieten door de diverse raaiintervallen:

$$Q_g = \sum_i Q_i \quad (4.2)$$

Elk intervaldebiet wordt berekend met behulp van:

$$Q_i = K_{u_i} * u_{max_i} * a_i * |\Delta y_i| \quad (4.3)$$

Als er sprake is van een bij benadering logaritmisch stroomsnelheidsprofiel, als de plaats van de stroomsnelheidsbepaling $z_m = -2.00$ m en als de diepte a_i tussen 4.00 en 12.00 m ligt, dan mag voor K_{u_i} worden ingevuld:

$$K_{u_i} \approx 0.91 \quad (4.4)$$

De component van de stroomsnelheid langs de x-as in interval i wordt berekend met:

$$u_{max_i} = \frac{\Delta x_i}{\Delta t_i} + f \left(\frac{\Delta N_i}{\Delta t_i} \right) * \cos(\gamma_w)_i \quad (4.5)$$

De diverse parameters in (4.3) en (4.5) zijn als volgt uitgewerkt (zie ook fig. 8):

$$\Delta N_i = N_{i+1} - N_i$$

$$\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$$

$$\Delta x_i = x_{i+1} - x_i$$

$$\Delta y_i = y_{i+1} - y_i$$

$\cos(\gamma_w)_i$: rekenkundig gemiddelde van de cosinus van de waarnemingen γ_{wij} in interval i;

a_i : rekenkundig gemiddelde van de waarnemingen van de diepte a_{ik} in interval i.

Debiet door niet-bemeten raaidelen Q^+

Dit deel van het debiet wordt bij een m.b.-meting niet gemeten. Het is belangrijk dit bij het toepassen van de m.b.-methode in het oog te houden. Om zekerheid te krijgen over de nauwkeurigheid van het berekende debiet Q_m is een schatting van Q^+ vooraf of na afloop van de m.b.-meting noodzakelijk.

In appendix H is een methode voor de schatting van Q^+ beschreven. Deze methode is bruikbaar voor rivieren met vrij steil oplopende oevers, zoals de Lek bij Krimpen aan de Lek.

4.3 VEREENVOUDIGDE M.B.-METHODES

De m.b.-methode die in de voorgaande paragrafen is gepresenteerd, kan worden vereenvoudigd. De wiskundige omwerking van deze "complete methode", in het vervolg "methode 0" genoemd, is gebaseerd op (een van) de volgende veronderstellingen:

1. de stroomrichting staat loodrecht op de raai;
2. het meetvaartuig vaart op of evenwijdig aan de raai.

In figuur 9 staan alle mogelijke vereenvoudigde methodes genoemd. In deze figuur zijn drie hoofdstromen te onderscheiden:

1. meten zonder w-meter;
2. meten zonder gyrokompas;
3. meten zonder plaatsbepalingssysteem.

In deze drie stromen staan ook methodes uitgewerkt, waarbij gebruik wordt gemaakt van een eendimensionaal plaatsbepalingssysteem.

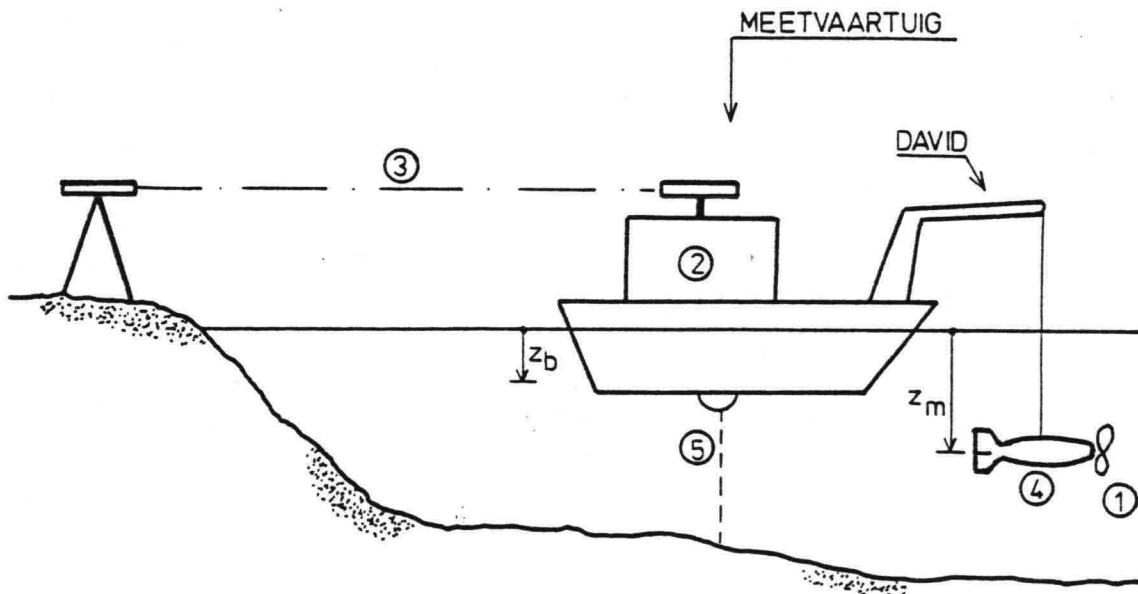
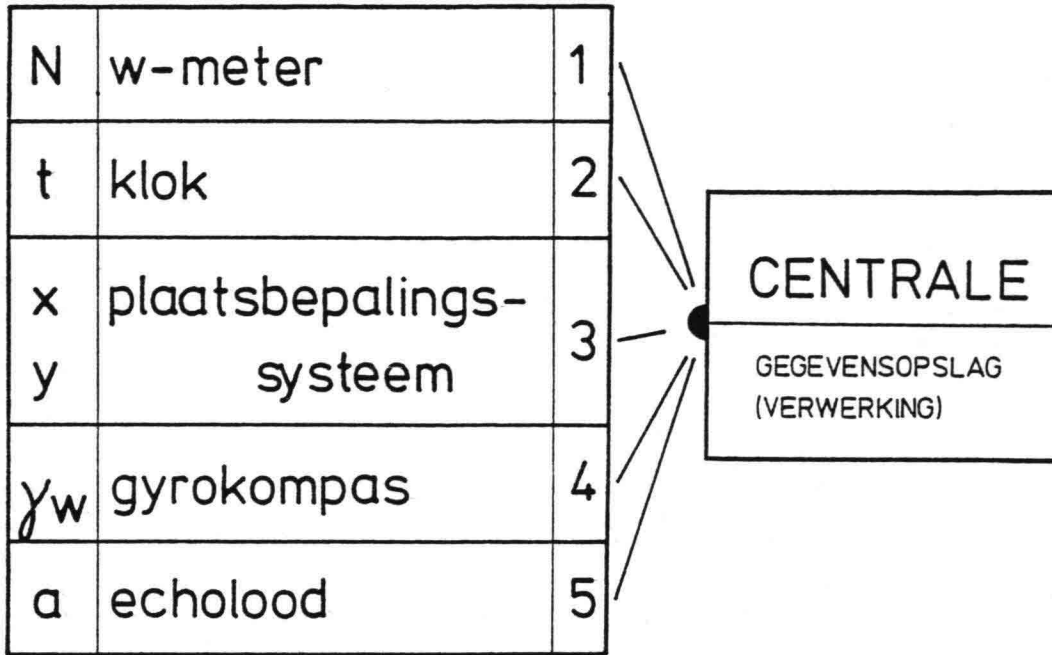
Methode 4 is de wiskundige aanpassing van alle andere methodes, als het niet mogelijk blijkt te zijn de hoek γ_w rechtstreeks op te meten, maar het gyrokompas daarentegen aan boord is geïnstalleerd.

Het gebruik van vereenvoudigde methodes is aantrekkelijk in economisch opzicht en uit het oogpunt van de eenvoud van verwerking.

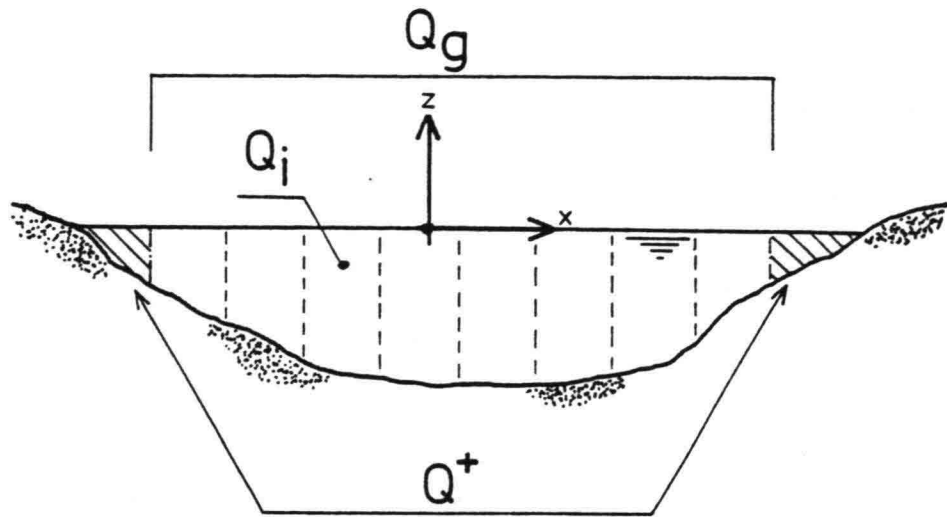
Nadelen zijn er ook aan verbonden. Zo is het bij gebruik van methode 0 nog mogelijk de meetgegevens tot een berekend debiet uit te werken, als men om een of andere reden de gegevens van de w-meter, het gyrokompas of het plaats-

bepalingssysteem niet vertrouwt. Bij gebruik van een vereenvoudigde methode is een dergelijke aanpassing niet mogelijk. Bovendien is, als een eendimensionaal plaatsbepalingssysteem of helemaal geen plaatsbepalingssysteem gebruikt wordt, controle van het verloop van de meting achteraf moeilijk.

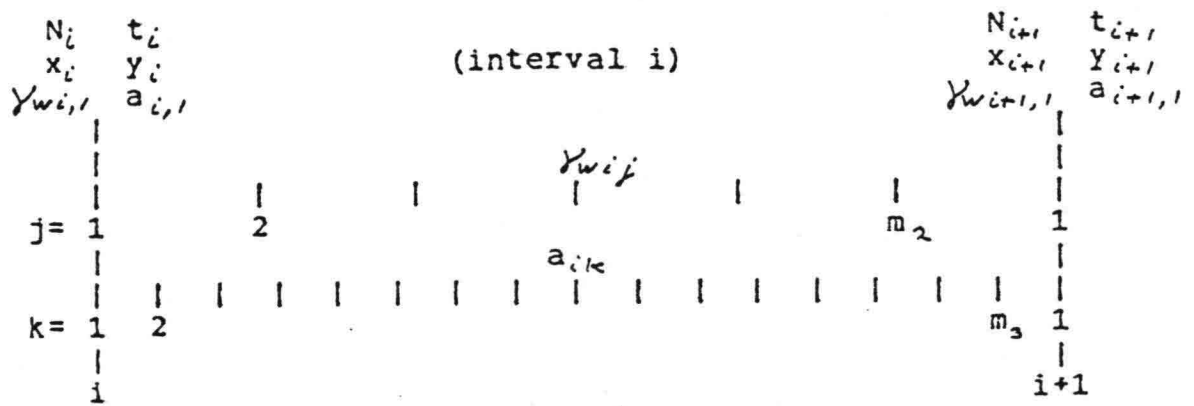
In de ISO-norm 4369 over de m.b.-methode (Lit.: ISO/TC113, 1977) staan alleen de methodes 2b en 3b (fig. 9) uitgewerkt.



Figuur 6: meetinstrumenten



Figuur 7: debietbepaling in intervallen



Figuur 8: waarnemingen in een interval

meetparameters
veronderstelling(en)
verwerking

t x y γ_w a
$\gamma_u = 0^\circ$ of 180°
$u_{mxi} = \frac{\Delta x_i}{\Delta t_i} - \frac{\Delta y_i}{\Delta t_i} \times \cotan(\gamma_w)_i$
$Q_i = K_{ui} \times u_{mxi} \times a_i \times \Delta y_i $

t . y γ_w a
$\gamma_u = 0^\circ$ of 180°
$\gamma_s = 90^\circ$ of 270°
$u_{mxi} = - \frac{\Delta y_i}{\Delta t_i} \times \cotan(\gamma_w)_i$
$Q_i = K_{ui} \times u_{mxi} \times a_i \times \Delta y_i $

N t x y γ_w a
$u_{mxi} = \frac{\Delta x_i}{\Delta t_i} + f \left(\frac{\Delta N_i}{\Delta t_i} \right) \times \cos(\gamma_w)_i$
$Q_i = K_{ui} \times u_{mxi} \times a_i \times \Delta y_i $

N t x y a
$\gamma_u = 0^\circ$ of 180°
$u_{mxi} = \frac{\Delta x_i}{\Delta t_i} + \sqrt{f^2 \left(\frac{\Delta N_i}{\Delta t_i} \right) - \left(\frac{\Delta y_i}{\Delta t_i} \right)^2} \quad \gamma_u = 0^\circ$
$u_{mxi} = \frac{\Delta x_i}{\Delta t_i} - \sqrt{f^2 \left(\frac{\Delta N_i}{\Delta t_i} \right) - \left(\frac{\Delta y_i}{\Delta t_i} \right)^2} \quad \gamma_u = 180^\circ$
$Q_i = K_{ui} \times u_{mxi} \times a_i \times \Delta y_i $

N . t y a
$\gamma_u = 0^\circ$ of 180°
$\gamma_s = 90^\circ$ of 270°
$u_{mxi} = + \sqrt{f^2 \left(\frac{\Delta N_i}{\Delta t_i} \right) - \left(\frac{\Delta y_i}{\Delta t_i} \right)^2} \quad \gamma_u = 0^\circ$
$u_{mxi} = - \sqrt{f^2 \left(\frac{\Delta N_i}{\Delta t_i} \right) - \left(\frac{\Delta y_i}{\Delta t_i} \right)^2} \quad \gamma_u = 180^\circ$
$Q_i = K_{ui} \times u_{mxi} \times a_i \times \Delta y_i $

$\vec{b} = \vec{b}_v$
$\vec{u}_b = \vec{u}_m$
vervang γ_w door:
$\gamma_{bv} + 180^\circ$

N t y γ_w a
$\gamma_s = 90^\circ$ of 270°
$u_{mxi} = f \left(\frac{\Delta N_i}{\Delta t_i} \right) \times \cos(\gamma_w)_i$
$Q_i = K_{ui} \times u_{mxi} \times a_i \times \Delta y_i $

N t γ_w a
$\gamma_u = 0^\circ$ of 180°
$\gamma_s = 90^\circ$ of 270°
$u_{mxi} = f \left(\frac{\Delta N_i}{\Delta t_i} \right) \times \cos(\gamma_w)_i$
$Q_i = K_{ui} \times u_{mxi} \times a_i \times \Delta t_i \times f \left(\frac{\Delta N_i}{\Delta t_i} \right) \times \sin(\gamma_w)_i $

Figuur 9:
vereenvoudigde m.b.-methodes

Hoofdstuk 5

NAUWKEURIGHEID

Appendices: F, G, H, J.

Het nauwkeurigheidsonderzoek is omvangrijk. Voor een goed inzicht in de details (relevante factoren en dergelijke) wordt aanbevolen de appendices F, G en H achter elkaar te lezen.

De nauwkeurigheid van de vereenvoudigde m.b.-methodes is zowel theoretisch als met experimenteel onderzoek vastgesteld. Appendix J geeft inzicht in de wijze, waarop bepaalde factoren in de nauwkeurigheid van vereenvoudigde methodes een rol spelen.

5.1 OPZET NAUWKEURIGHEIDSONDERZOEK

Het theoretische onderzoek aan de nauwkeurigheid van het volgens de m.b.-methode bepaalde debiet Q_m is als volgt opgezet:

1. Statistische analyse:

De nauwkeurigheid is systematisch geanalyseerd met behulp van de elementaire statistische vergelijkingen.

2. Numerieke simulatie:

Ter controle van de statistische analyse zijn belangrijke berekeningen in deze analyse met behulp van een computermodel gesimuleerd. De numerieke simulatie is uitgevoerd volgens de Monte Carlo-methode (fig. 10):

Uit kansverdelingen rond bepaalde waarden van diverse parameters (a en b) worden "waarnemingen" gegenereerd en verwerkt tot een waarde van c. Door deze procedure een groot aantal keren te herhalen worden evenzovele "waarnemingen" c gegenereerd, die tesamen een kansverdeling om de gemiddelde waarde van c heen vormen.

De belangrijkste reden voor deze aanpak is de volgende: De statistische analyse is een omvangrijk karwei, waarbij grote aandacht besteed moet worden aan het voorkomen van rekenfouten. Met deze analyse wordt echter wel een goed

inzicht verkregen in de grootte van de bijdragen van diverse factoren aan de onnauwkeurigheid van het berekende debiet. De numerieke simulatie is eenvoudiger en sneller uit te voeren, maar het inzicht in de bijdragen van diverse factoren is kleiner.

Door de beschouwing van de onnauwkeurigheid langs analytische weg uit te voeren en belangrijke onderdelen van de analyse met behulp van numerieke simulatie te controleren, worden de voordelen van de analyse en de simulatie gecombineerd en de nadelen verkleind: het optreden van rekenfouten wordt geminimaliseerd en er wordt een goed inzicht verkregen in de invloed van de diverse factoren op de nauwkeurigheid van het uiteindelijke resultaat.

De nauwkeurighedsanalyse is in drie stappen uitgevoerd:

1. onderzoek aan de onnauwkeurigheid van de diverse meetgegevens (appendix F);
2. onderzoek aan de onnauwkeurigheid van het debiet in een interval Q_i (appendix G);
3. onderzoek aan de onnauwkeurigheid van het berekende debiet Q_m (appendix H).

5.2 FOUTENBRONNEN

De foutenbronnen zijn in drie groepen gerangschikt:

1. Onnauwkeurigheid meetinstrumenten:

Hieronder worden onnauwkeurigheden van de meetgegevens verstaan, indien de instrumenten deze metingen onder ideale omstandigheden hebben verricht.

Relevante factoren zijn:

- ijkfout (systematisch);
- meetfout (random);
- meetinterval.

2. Opzet moving boat-methode:

- a. veronderstelling, dat de stroomsnelheid u constant is in de tijd.

Relevante factoren zijn:

- stroomsnelheidsverloop in de tijd;
- turbulentie (micro- en macro-).

- b. discretisatie in intervallen.

Relevante factoren:

- diepteverloop in interval;

- stroomsnelheidsverloop in interval (zowel in x- als in y-richting).
 - c. vereenvoudiging van de methodiek.
Relevante factor:
 - het hanteren van bepaalde veronderstellingen als uitgangspunt.
3. Uitvoering van de m.b.-meting:
- a. afwijking van de ideale baan (uitwijking uit de raai, niet-bemeten raaidelen).
Relevante factoren:
 - diepteverloop langs de raai;
 - interactie stroomsnelheid-bootbeweging;
 - stroomsnelheidsverloop langs de raai (in x- en in y-richting);
 - vaartechniek van de schipper;
 - weercondities (wind).
 - b. snelheid meetvaartuig.
Relevante factoren:
 - ontwerp meetvaartuig;
 - vaartechniek van de schipper.
 - c. eigenbewegingen van het meetvaartuig.
Relevante factoren:
 - ontwerp meetvaartuig;
 - vaartechniek van de schipper.

In elke stap van de nauwkeurighedsanalyse zijn de invloeden van de diverse foutenbronnen onderzocht. Hieruit volgden concrete aanwijzingen over welke foutenbronnen relevant zijn en welke niet. Op basis hiervan zijn de resultaten en conclusies van de volgende paragrafen samengesteld.

5.3 RESULTATEN ONDERZOEK

Uit de analyse van de nauwkeurigheid van het volgens de m.b.-methode berekende debiet Q_m volgde, dat de standaardafwijking van Q_m uit drie onderdelen bestaat:

$$\sigma_{Q_m} = \sqrt{\sigma^2_{Q_g} + \sigma^2_{Q^+} + \sigma^2_{\bar{Q}}} \quad (5.1)$$

De analyse van de drie standaardafwijkingen in het rechterlid van (5.1) heeft het volgende opgeleverd:

1. σ_{Q_g} :

Uitgaande van het beschikbare instrumentarium is voor σ_{Q_g} de volgende betrekking afgeleid (fig. 11):

$$\sigma Q_g = 0.30 * b * \sqrt{B * a_B} \quad (5.2)$$

waarin

B : breedte van de rivier;

a_B : gemiddelde diepte in de raai;

b : snelheid van het meetvaartuig ten opzichte van het omringende water.

Vergelijking (5.2) is gebaseerd op uitgebreid onderzoek. In appendix H wordt deze vergelijking nader beschouwd.

2. σQ^+ :

De standaardafwijking van het geschatte debiet door de niet-bemeten raaidelen is verwaarloosbaar ten opzichte van die van het gemeten debiet, als het debiet door de niet-bemeten raaidelen Q^+ veel kleiner is dan het gemeten debiet Q_g .

3. $\sigma \bar{Q}$:

Omdat de duur van een m.b.-meting in de orde van minuten is, is het resultaat van de meting Q_m hoogstens een benadering van het tijdsgemiddelde debiet \bar{Q} . De invloed van de variatie van het debiet op de nauwkeurigheid van Q_m gedurende die meettijd is in $\sigma \bar{Q}$ ondergebracht.

Over de variatie van het debiet gedurende enkele minuten is weinig bekend. Tijdens het onderzoek is gesuggereerd, dat het verschijnsel van de coherente structuren (macroturbulenties) belangrijk zijn voor deze variatie (appendix H). Er is getracht de standaardafwijking in het berekende debiet als gevolg van de variatie van het werkelijke debiet zo goed mogelijk te schatten:

$$\sigma \bar{Q} = 0.07 * \bar{Q} \quad (5.3)$$

De resultaten van het experimentele onderzoek geven aanleiding om te stellen, dat de standaardafwijking in (5.3) te hoog is geschat. Voor een betere schatting van $\sigma \bar{Q}$ wordt extra onderzoek aanbevolen.

Uit de resultaten is het volgende geconcludeerd:

1. De nauwkeurigheid van het resultaat is sterk afhankelijk van de gebruikte meetapparatuur en het gebruikte vaartuig. Zo staan de nauwkeurigheden van de meetgegevens aan de basis van de

nauwkeurigheid van het gemeten debiet Q_g , zoals deze in (5.2) is uitgedrukt.

2. Maatgevende factoren voor de nauwkeurigheid van het resultaat zijn:
 - de bepaling van u_{mzi} ;
 - de gemeten intervallengte Δy_i ;
 - de afmetingen van de raai B en a_B (formule (5.2));
 - de snelheid van het meetvaartuig ten opzichte van het omringende water b (formule (5.2));
 - de grootte van het debiet door de niet-bemeten raaidelen.

3. Uit de nauwkeurighedsanalyse volgde geen harde eis ten aanzien van de grootte van het meetinterval Δt_i . Echter, op uitvoeringstechnische gronden, die in appendix G beschreven en in appendix I geïllustreerd worden, wordt aanbevolen een zo kort mogelijk meetinterval toe te passen. Aan de andere kant bestaat er een benedengrens voor de lengte van het meetinterval. Dit wordt in appendix G nader verduidelijkt.

Voorbeeld

Rivier: Lek (bij Krimpen aan de Lek)

Afmetingen raai: breedte B = 275 m
gemiddelde diepte a_B = 6 m

Meetvaartuig: b = 1.50 m/s

De standaardafwijking van het gemeten debiet:

$$\sigma Q_g = 45 \text{ m}^3/\text{s} \quad (5.4)$$

In figuur 12 is de relatieve onnauwkeurigheid van het berekende debiet Q_m tegen het berekende debiet zelf uitgezet.

In figuur 12 blijkt, dat de relatieve onnauwkeurigheid $\sigma Q_m / Q_m$ ongeveer 10 % is. Bovendien moet in acht worden genomen, dat de asymptoot ter hoogte van 7 % ($= \sigma \bar{Q} / \bar{Q}$) hoogstwaarschijnlijk omlaag bijgesteld mag worden.

5.4 NAUWKEURIGHEID VEREENVOUDIGDE M.B.-METHODES

In figuur 9 zijn de mogelijke vereenvoudigingen van de m.b.-methode uitgewerkt. Met behulp van theoretisch en experimenteel onderzoek aan de vereenvoudigde methodes (appendix J) is duidelijkheid verkregen ten aanzien van de mogelijkheden van gebruik van deze methodes.

Van de methodes in figuur 9 zijn alleen 0, 1a en 1b, 3a en 3b praktisch bruikbaar.

Het gebruik van 2a of 2b levert resultaten op, die reeds bij een kleine verdraaiing van de stroomrichting ten opzichte van de normaal op de raai aanzienlijk systematisch afwijken van het werkelijke debiet. Het meten van de richting van de as van het meetvaartuig (methode 4) is slechts verantwoord, indien de asrichting ongevoelig is voor andere factoren zoals de wind.

De methode 2b wordt in de ISO-norm 4369 (Lit.: ISO/TC113, 1977) onder de naam "method 2" vermeld. Uit de bevindingen van dit onderzoek volgt de aanbeveling de ISO-norm ten aanzien van dit aspect aan te passen.

Met 1a, 1b, 3a of 3b worden resultaten verkregen, die een iets grotere spreiding vertonen ten opzichte van de resultaten van methode 0. Voor een indruk van deze spreiding wordt verwezen naar de resultaten van het experimentele onderzoek, die in appendix J zijn te vinden.

Het is aan de instantie, die de m.b.-methode in het onderzoek toepast, om te beoordelen of een grotere spreiding aanvaardbaar is of niet.

5.5 AANBEVELINGEN VOOR DE OPZET VAN M.B.METINGEN

In het nauwkeurigheidsonderzoek kwam een aantal aspecten van het gebruik van de m.b.-methode aan de orde, die zeer belangrijk zijn bij de opzet van m.b.-metingen. Deze worden hier behandeld.

Rivier

Naast de uitgangspunten, die in hoofdstuk 3 zijn opgesteld, zijn de volgende factoren van belang:

1. De manoeuvreerbaarheid en de bevaarbaarheid van de rivier moeten zodanig zijn, dat het debiet door de niet-bemeten raaidelen (Q^+) zeer klein is ten opzichte van het gemeten debiet (Q_g).

2. De toepassing van de m.b.-methode in brede rivieren is mogelijk. De onnauwkeurigheid van het resultaat is in absolute zin weliswaar groter dan bij een smallere rivier, maar relatief gezien is de onnauwkeurigheid kleiner.

Uitvoering m.b.-meting

Op basis van het gebruikte meetinstrumentarium, dat in hoofdstuk 4 is gepresenteerd, zijn de volgende aanbevelingen opgesteld:

1. Meetparameters:

(N) : aantal propelleromwentelingen van de w-meter;

t : tijd;

(x), (y) : plaats van het meetvaartuig;

γ_w : hoek van de richting van de gemeten watersnelheid ten opzichte van de x-as (niet de richting van de as van het vaartuig!);

a : diepte

De meetparameters die tussen haakjes staan, zijn niet onontbeerlijk voor een goede m.b.-meting (zie fig. 9, methode 0, 1a, 1b, 3a en 3b).

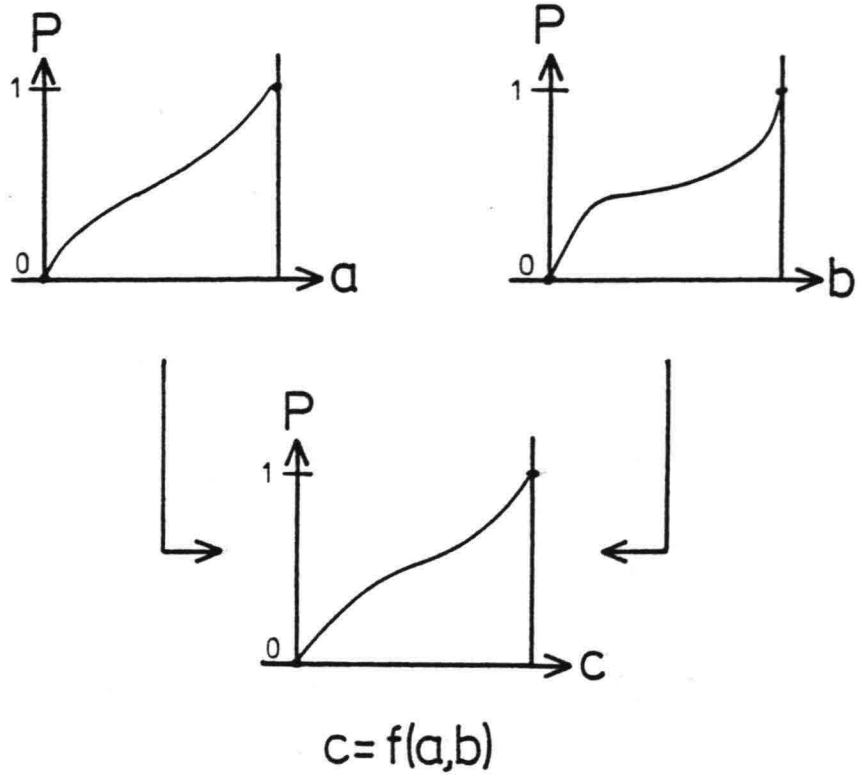
2. In appendix F staat het instrumentarium beschreven, waarmee de experimentele m.b.-metingen (hoofdstuk 6) zijn uitgevoerd. Uit de nauwkeurigheidsanalyse volgde een aantal richtlijnen, waaraan de metingen met behulp van dit instrumentarium moet voldoen. Hierbij wordt uitgegaan van een geautomatiseerde registratie. Meetinterval $\Delta t_i = 20$ s. De hoek γ_w wordt iedere 2.5 s gemeten. De diepte a wordt iedere 2.0 s gemeten. Als de registratie met de hand wordt uitgevoerd, moet met een visuele schatting van de parameters γ_w en a worden volstaan.

3. De schipper van het meetvaartuig moet trachten gedurende een m.b.-meting zo langzaam als voor de manoeuvreerbaarheid mogelijk is te varen. De afgelegde baan moet zoveel mogelijk op of evenwijdig aan de raai liggen: er moet naar gestreefd worden een sinusachtige vorm van de baan te vermijden of de "golflengte" van die sinusachtige baan zo groot mogelijk te maken. Voor voorbeelden van de afgelegde baan wordt verwezen naar appendix B.

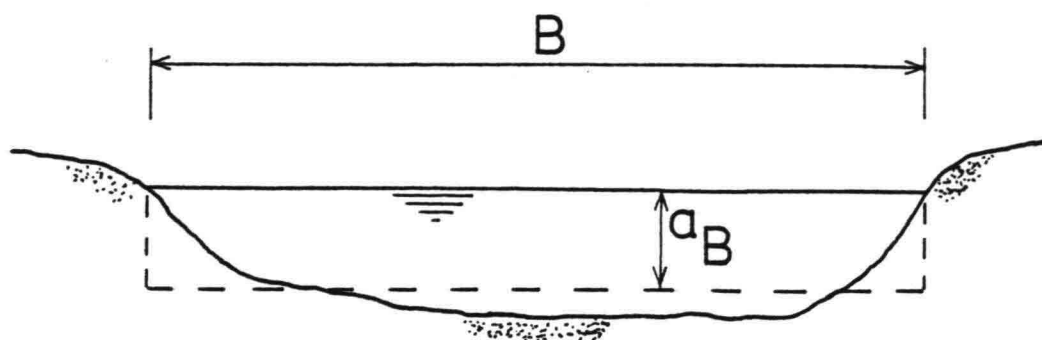
Verbetering nauwkeurigheid

Afgezien van de invloeden van uitvoeringstechnische aard zijn de stroomsnelheidsbepaling ($u_{m\alpha}$) en de bepaling van de intervallengte (Δy_i) maatgevend voor de nauwkeurigheid van het resultaat. Als ernaar gestreefd wordt de nauwkeurigheid van het berekende debiet te verhogen, moeten de nauwkeurigheden van $u_{m\alpha}$ en Δy_i in gelijke mate worden verbeterd.

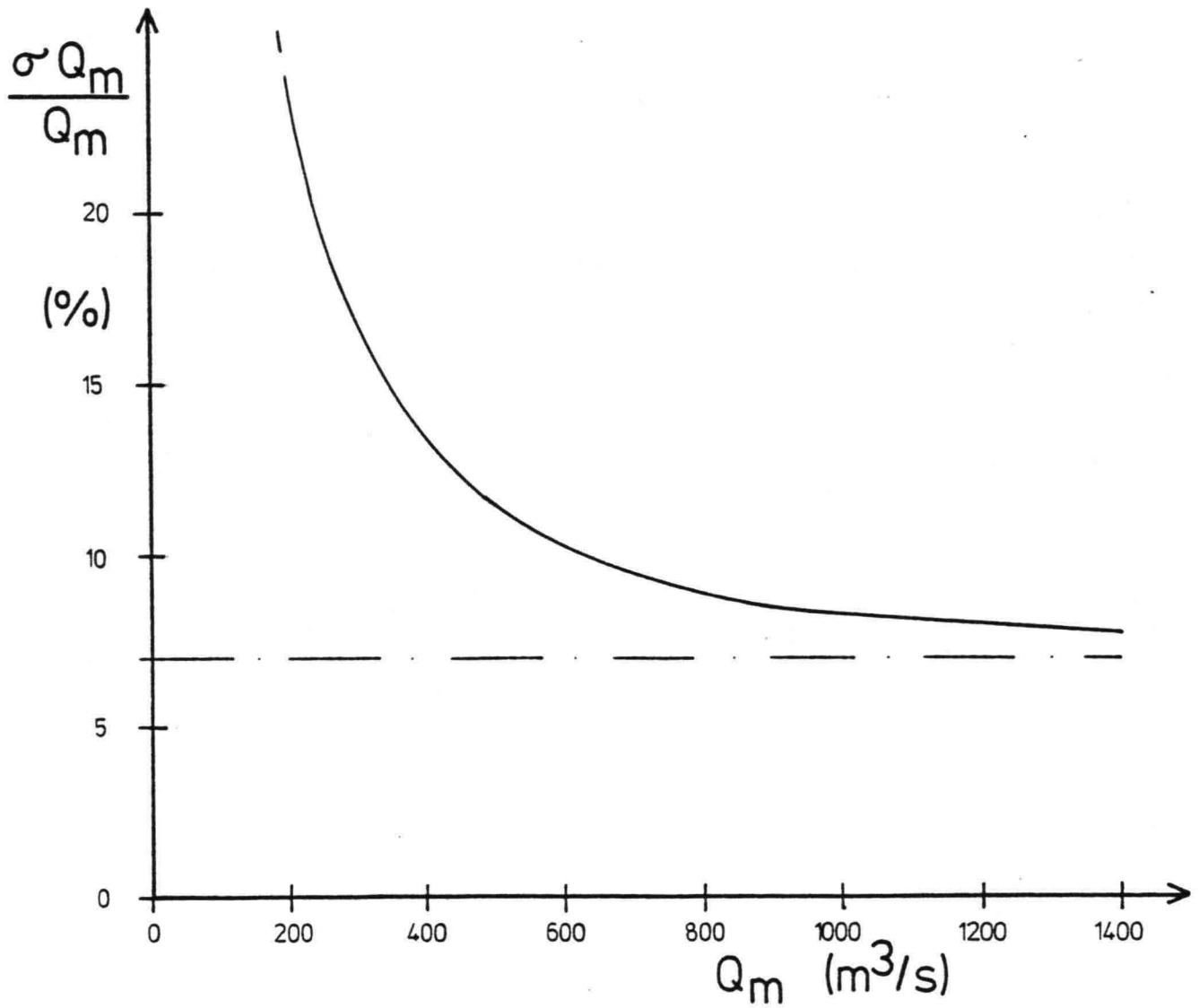
In de nauwkeurighedsbeschouwing wordt aanbevolen het gebruikte meetinterval zo kort mogelijk in te stellen. Uit de optimalisering van de nauwkeurigheid bij gebruik van het instrumentarium, waarmee de experimentele m.b.-metingen zijn uitgevoerd, volgde een meetinterval $\Delta t_i = 20$ s. De grootte van dit interval is met name van de nauwkeurigheid van de stroomsnelheidsbepaling ($u_{m\alpha}$) en de bepaling van de plaatslengte van het interval (Δy_i) afhankelijk. Indien de nauwkeurigheid van $u_{m\alpha}$ en Δy_i verbeterd kunnen worden, moet ook onderzocht worden of en hoeveel het meetinterval Δt_i verkleind mag worden.



Figuur 10: Monte Carlo-simulatie



Figuur 11: schematisatie raaprofiel



Figuur 12: onnauwkeurigheid debietbepaling in de Lek

Hoofdstuk 6

EXPERIMENTEEL ONDERZOEK

Appendices I, J, K.

De appendices I en J geven een volledig verslag van het verloop en de resultaten van de m.b.-metingen.

In appendix K wordt een uiteenzetting gegeven over de wiskundige modellen, die voor de berekening van het debiet zijn gebruikt.

6.1 METINGEN

Uit de opzet van het onderzoek aan de m.b.-methode (hoofdstuk 2) volgt, dat het doel van het experimentele onderzoek tweeledig was:

1. een toetsing in de praktijk van de theorie die over de m.b.-methode is opgesteld, waarbij met name aan de bereikbare nauwkeurigheid van het resultaat moet worden gedacht;
2. het verkrijgen van inzicht in de praktische aspecten van de voorbereiding en de uitvoering van m.b.-metingen.

De resultaten van het eerste deel van de doelstellingen (nauwkeurigheid) zijn in het vorige hoofdstuk verwerkt. De praktische aspecten, die niet direct met de nauwkeurigheid te maken hebben (en die dus ook niet in hoofdstuk 5 behandeld zijn) komen verderop in dit hoofdstuk ter sprake.

Het experimentele onderzoek bestond uit twee onderdelen:

1. debietbepaling volgens de m.b.-methode;
2. simulatie van debieten met behulp van twee verschillende wiskundige modellen.

Op deze manier werden van hetzelfde debiet op drie verschillende manieren waarnemingen verkregen. Zo werd de mogelijkheid geschapen de diverse waarnemingen onderling en de betrouwbaarheid van de methodes te toetsen.

De metingen werden rond het splitsingspunt van de Lek, de Noord en de Nieuwe Maas (fig. 13) gedurende twee werkweken verricht. Er waren vijf werkelijke meetdagen, waarvan de resultaten in de beschouwingen zijn betrokken.

6.2 MOVING BOAT-METINGEN

Voor de m.b.-metingen is een meetvaartuig van Rijkswaterstaat, Directie Waterhuishouding en Waterbeweging district zuid-oost, gebruikt. Dit vaartuig heeft apparatuur aan boord, waarmee de gegevens automatisch gemeten en geregistreerd kunnen worden.

De automatische registratie van de m.b.-metingen was zodanig opgezet, dat de verwerking van de meetgegevens op allerlei manieren kon geschieden en een optimalisatie van de verwerkingsmethode kon worden uitgevoerd.

De belangrijkste eigenschappen van het gebruikte meetvaartuig zijn:

naam: Speurder
massa (volbeladen): $47 \cdot 10^3$ kg
afmetingen (exclusief opbouw):
 lengte = 14.90 m
 breedte = 4.43 m
 hoogte = 2.11 m
diepgang = 1.40 m

De m.b.-metingen zijn op twee manieren uitgevoerd:

1. metingen uitsluitend op de Lek;
2. metingen op de Lek, de Noord en de Nieuwe Maas, waarbij de drie raaien om de beurt werden bemeten.

Op de eerste manier werd een grote dichtheid van waargenomen debieten verkregen, zodat een goed beeld ontstond van het verloop van het debiet in de tijd.

De tweede manier maakte controle van de drie waargenomen debieten op basis van het continuïteitsbeginsel rond het splitsingspunt mogelijk.

In appendix I en J staat een uitgebreide beschouwing over de resultaten van de m.b.-metingen. Een voorbeeld van deze resultaten staat in figuur 14.

Het consistente verloop van het volgens de m.b.-methode verkregen debiet bevestigt het resultaat van het nauwkeurigheidsonderzoek. De onnauwkeurigheid van de berekende debieten is hoogstwaarschijnlijk ± 5 %. Dit is ook de reden voor de aanbeveling in paragraaf 5.4 meer onderzoek aan de onnauwkeurigheid ten gevolge van de variatie van het debiet zelf te verrichten.

6.3 SIMULATIE DEBIETEN

Voor de simulatie van de debieten zijn twee wiskundige modellen toegepast, die in appendix K verder worden toegelicht.:

1. Geïntegreerde continuïteitsvergelijking:
Het wiskundige model bestond uit het deel van de Lek tussen de stuw bij Hagestein en Krimpen aan de Lek en is in een viertal vakken gediscretiseerd (fig. 13).
2. IMPLIC:
Rijkswaterstaat heeft de beschikking over een wiskundig model van het Nederlandse beneden-rivierengebied, dat gebaseerd is op de bewegingsvergelijking en de continuïteitsvergelijking. Ook hier zijn de rivieren, die onderdeel zijn van het model, in vakken gediscretiseerd.

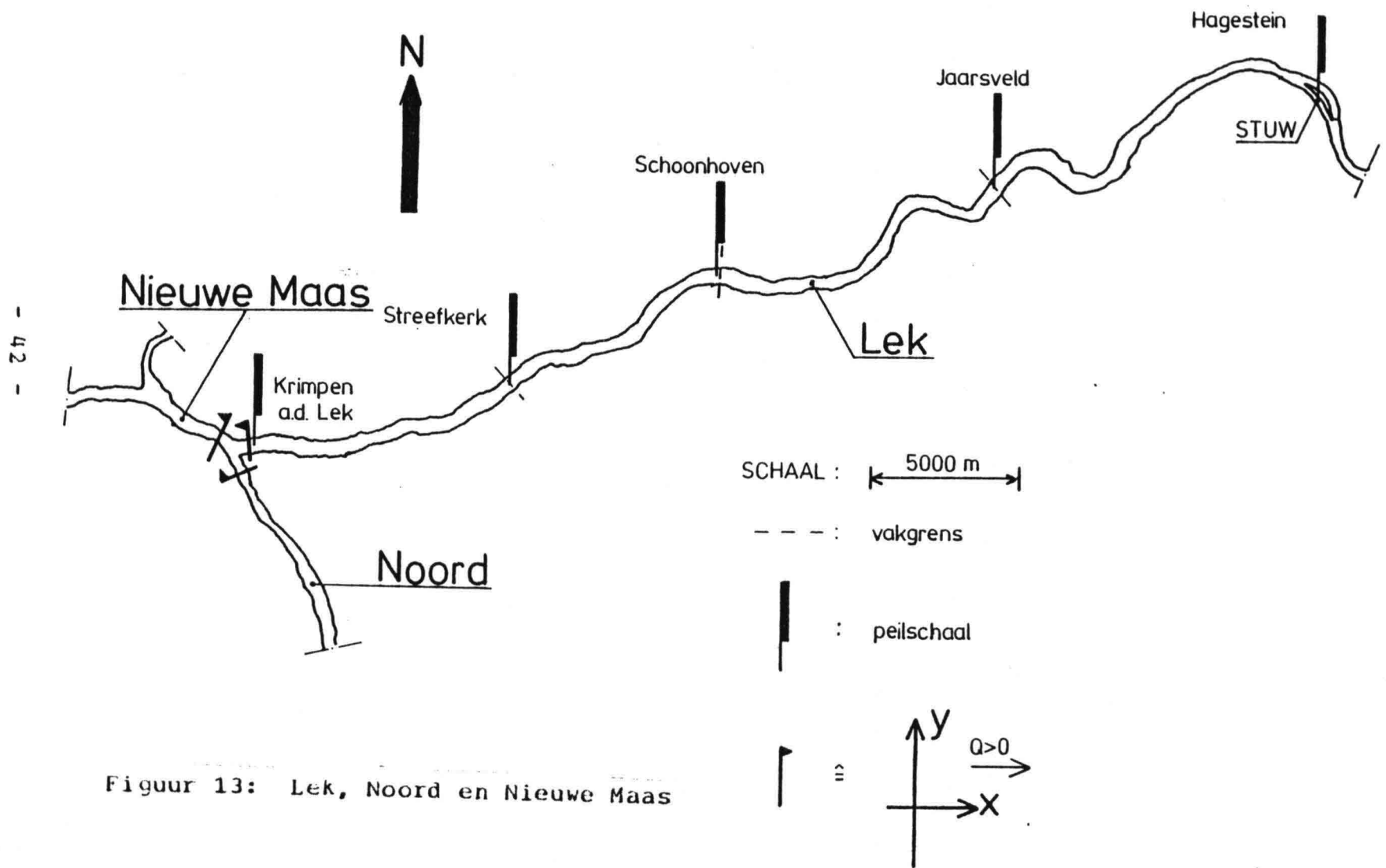
Voor de resultaten van de berekeningen met deze wiskundige modellen wordt verwezen naar figuur 14 en naar de figuren in appendix I.

6.4 PRAKTISCHE ERVARINGEN

Bij de uitvoering van de m.b.-metingen werden een aantal praktische ervaringen opgedaan. Hieronder staan ervaringen, die niet direct betrekking hebben op de nauwkeurigheid van het resultaat en dus ook niet verwerkt zijn in hoofdstuk 5:

1. Schipper:
Voor het goed bevaren van de meetraai moet de schipper geconcentreerd en met inzet te werk gaan. Er moet daarom bij de voorbereiding van de m.b.-metingen rekening gehouden worden met de menselijke eigenschap, dat de inzet en de concentratie in de loop van de tijd afnemen.
2. Gegevensregistratie:
Het registreren van meetgegevens met de hand is mogelijk, maar ook hiervoor is inzet en concentratie van de meetploeg vereist. Er wordt dan ook aanbevolen de gegevens automatisch te meten en te registreren.
3. Scheepvaart:
De passerende scheepvaart heeft in principe weinig invloed op het verloop van een m.b.-meting en de nauwkeurigheid van het resultaat. Er moet echter rekening gehouden worden met het feit, dat het

aantal m.b.-metingen in een zekere periode beperkt
is als er sprake is van drukke scheepvaart.



Figuur 13: Lek, Noord en Nieuwe Maas

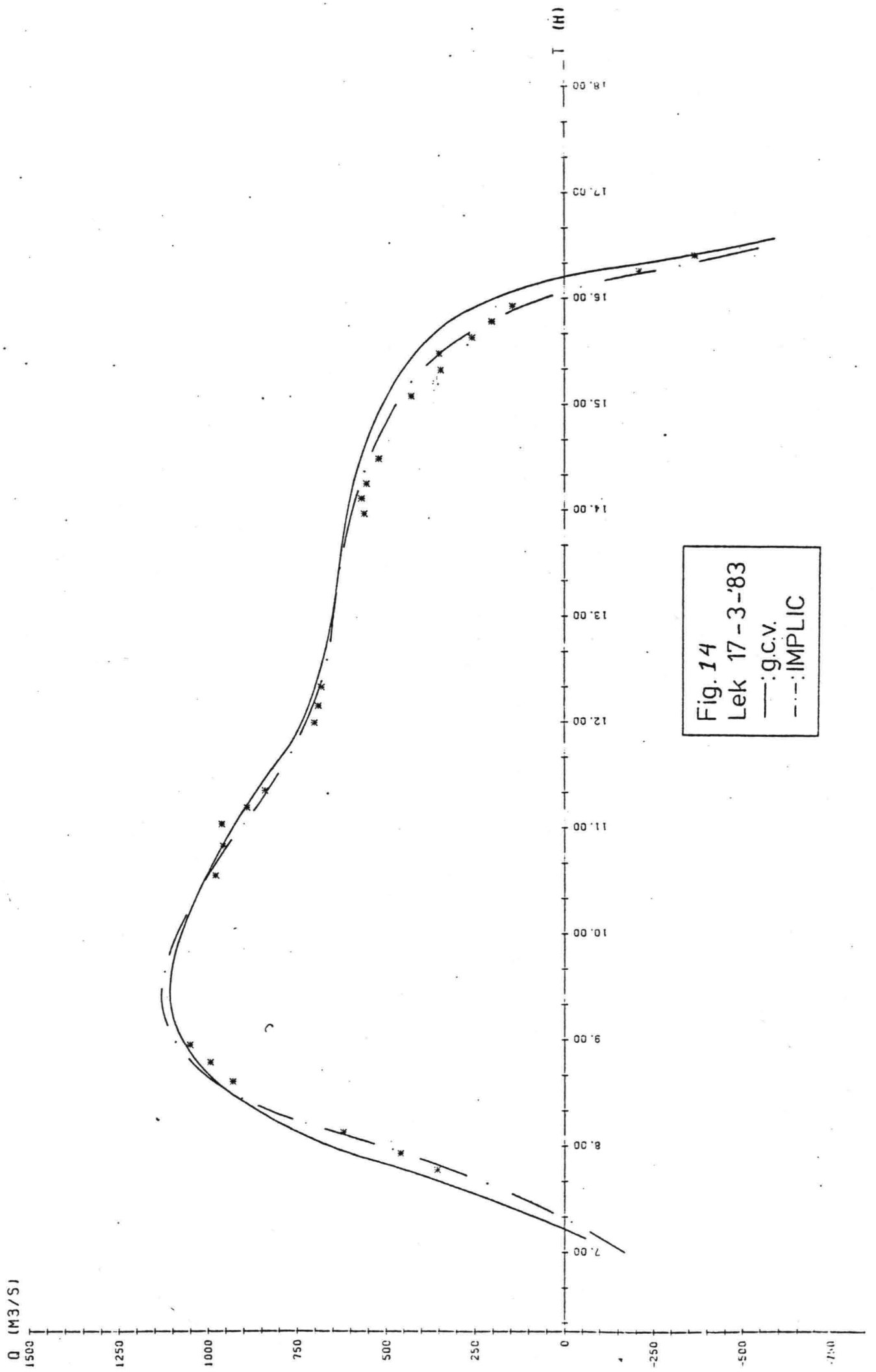


Fig. 14
 Lek 17-3-83
 —: g.c.v.
 - - -: IMPLIC

Hoofdstuk 7

CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

A. Toepassing moving boat-methode

1. Rivier:

- a. Er moet voldoende zekerheid bestaan over het verloop van de stroomsnelheid in de verticaal (z-richting).
- b. Variatie van de stroomrichting in y-richting heeft geen wezenlijke invloed op het resultaat van m.b.-metingen.
- c. De stroomrichting mag in z-richting niet sterk variëren (denk bijvoorbeeld aan bochtstroming).
- d. De raai moet goed bevaarbaar zijn, opdat het debiet door de niet-bemeten raaidelen zo klein mogelijk is.
- e. Toepassing van de m.b.-methode in brede rivieren is onder de gegeven voorwaarden goed mogelijk.

2. Metingen en verwerking:

- a. In principe worden bij een m.b.-meting de volgende parameters gemeten:
 - \vec{S} : grootte en richting van de vaarsnelheid;
 - \vec{W} : grootte en richting van de gemeten watersnelheid;
 - a: diepte;
 - y: plaats van het meetvaartuig in de raai.Hiervan zijn de bepaling van de diepte (a) en van de richting van \vec{W} (γ_w) essentieel.
- b. De factor K_w kan op allerlei manieren worden bepaald, zelfs als functie van de diepte a (dit speelt vooral in brede estuaria met ondiepten een rol).

- c. Vereenvoudiging van de meet- en verwerkingsmethodiek is onder bepaalde voorwaarden mogelijk (zie figuur 9, methodes 1a, 1b, 3a en 3b).

B. Nauwkeurigheid

1. Het is mogelijk bij het toepassen van de m.b.-methode in Nederlandse rivieren resultaten met een onrelatieve nauwkeurigheid kleiner dan $\pm 10\%$ te bereiken.
Op basis van het experimentele onderzoek lijkt de conclusie gerechtvaardigd, dat de waarschijnlijke fout kleiner is dan $\pm 5\%$. Dit vermoeden is gebaseerd op de consistentie van afzonderlijke opeenvolgende meetresultaten;
2. Maatgevend voor de relatieve onnauwkeurigheid zijn:
 - bepaling van de component van de stroomsnelheid langs de x-as (u_{mx});
 - bepaling van de plaatslengte van het interval Δy_i ;
 - grootte van de vaarsnelheid (b);
 - grootte van het debiet door de niet-bemeten raaidelen.
3. Er wordt aanbevolen een zo kort mogelijk meetinterval Δt_i toe te passen. Voor de lengte van het meetinterval bestaat een benedengrens, die met behulp van een nauwkeurighedsanalyse moet worden vastgesteld.

C. Praktische aspecten

1. De opzet van de m.b.-methode (gebruik van een meetvaartuig, korte meettijd voor een debietbepaling) maakt de methode praktisch en economisch aantrekkelijk.
2. De vaartechniek en de inzet van de schipper zijn belangrijk voor het slagen van een m.b.-meting. Met de menselijke eigenschap dat de concentratie na verloop van tijd afneemt, moet bij de voorbereidingen en de uitvoering van m.b.-metingen rekening gehouden worden.

De meetgegevens kunnen met de hand weggeschreven worden, maar er wordt aanbevolen een automatische registratie toe te passen.

D. Aanbevelingen

1. Over de variatie van het debiet gedurende enkele minuten is nog weinig bekend. Voor een beter inzicht in de nauwkeurigheid van het volgens de m.b.-methode berekende debiet is onderzoek aan dit verschijnsel gewenst.
Er wordt gesuggereerd, dat de variatie onder andere het gevolg is van passerende coherente structuren, die in de turbulente stroming aanwezig zijn (zie daarover appendix A).
2. In het experimentele onderzoek was het meten van de richting van de gemeten watersnelheid (hoek γ_w) ter plaatse van het meetinstrument niet mogelijk. In de plaats daarvan is de richting van de bootas gemeten (hoek $\gamma_{b,w}$).
In het rapport zijn criteria opgesteld, waaraan de meting van de hoek γ_w moet voldoen. Er wordt aanbevolen deze criteria door middel van experimentele metingen te toetsen.

