



waterloopkundig laboratorium
delft hydraulics laboratory

5-80.092

invloed van ijsvorming op de frekwentie van
waterstanden langs de Rijn en zijn takken in
Nederland

verslag vooronderzoek

R 1104

juli 1976

invloed van ijsvorming op de frekwentie van
waterstanden langs de Rijn en zijn takken in
Nederland

verslag vooronderzoek

R 1104

juli 1976

INHOUD

	blz.
<u>1 Inleiding</u>	1
1.1 Opdracht	1
1.2 Probleemstelling	1
1.3 Samenvatting	3
<u>2 Vorming van ijs en begeleidende verschijnselen in het verleden</u>	7
2.1 Inleiding	7
2.2 Ontstaan van drijfijis en vast ijsdek	8
2.3 Verdwijnen van drijfijis en vast ijsdek.....	14
2.4 Optreden van ijsdammen	16
2.5 Verhoging van waterstanden	18
2.6 Ruwheden bij aanwezigheid van vast ijsdek	21
2.7 Afvoerverloop en afvoerverdeling	23
<u>3 Veranderingen van verschijnselen in vergelijking met vroeger</u>	26
3.1 Inleiding	26
3.2 IJsbezetting in de periode 1854-1972	26
3.3 Kunstmatige ijsopruiming.....	28
3.4 Klimaatsveranderingen	33
3.5 Lozing van koelwater	34
3.6 Deltaplan en andere rivierwerken	39
<u>4 Invloed ijsvorming op waterstanden</u>	41
4.1 Inleiding	41
4.2 Huidige methode ter bepaling van extreem hoge waterstanden	42
4.3 Formele statistische beschouwingen	46
4.4 Benaderingsmethode	50
<u>5 Konklusies en aanbevelingen</u>	57
5.1 Konklusies	57
5.2 Aanbevelingen tot nader onderzoek	59

LITERATUUR

TABELLEN

FIGUREN

INHOUD (vervolg)

- Aanhangsel A: Invloed van winterbed op verhoging van waterstand door een vast ijsdek
- Aanhangsel B: Opruimen van ijs door explosieven
- Aanhangsel C: Beschouwingen rond de problemen betreffende de te volgen ijsbreektaktiek na uitvoering van het Deltaplan

TABELLEN

- 1 Begin en einde vorstperiode in de verschillende ijswinters
- 2 Begin en einde van voorkomen van drijfijis en vast ijs op de drie Rijntakken in Nederland
- 3 Aantal dagen gelegen tussen einde vorstperiode en afwezigheid van vast ijsdek en drijfijis
- 4 Aantal dagen tussen begin vorstperiode en optreden drijfijis op IJssel en gemiddelde luchttemperatuur
- 5 Aantal dagen tussen einde vorstperiode en verdwijnen drijfijis op IJssel en gemiddelde luchttemperatuur
- 6 Overzicht van verschillende stappen van benaderingsmethode
- 7 Maximale afvoeren te Lobith tijdens perioden met vast ijs op de benedenloop van de IJssel
- 8 Bepaling koëfficiënten kansverdelingsfunctie afvoeren te Lobith tijdens perioden met vast ijs op de benedenloop van de IJssel
- 9 Verzamelingen van 9 willekeurig gekozen maximale afvoeren te Lobith in de maand februari
- 10 Maximale afvoeren te Lobith gedurende de maanden februari in de periode 1901-1971
- 11 Waterstanden en gemiddelde waterdiepten bij peilschaal Kampen voor verschillende afvoeren te Lobith
- 12 Frekwenties van waterstanden te Kampen ten gevolge van hoge afvoeren alleen en ten gevolge van vast ijsdek alleen

FIGUREN

- 1 Korrelatie tussen het temperatuursverschil lucht/water en de daggradiënt van de watertemperatuur (Wemelsfelder [25])
- 2 Toename van de hoeveelheid drijfijs op de Waal en de Nederrijn en Lek (ontleend aan Oudshoorn [15])
- 3 Aantal dagen tussen begin vorstperiode en tijdstip waarop drijfijs wordt waargenomen
- 4 Aantal dagen tussen begin vorstperiode en datum waarop vast ijs wordt waargenomen
- 5 Aantal dagen tussen invallen dooi en verdwijnen vast ijs
- 6 Aantal dagen tussen einde vorstperiode en verdwijnen drijfijs
- 7 Korrelatie tussen tijdsverschil tussen einde vorstperiode en afwezigheid van vast ijsdek (a) op IJssel en Benedenrijn/Lek, (b) op Nederrijn/Lek en Waal/Merweden
- 8 Waargenomen routes van een aantal ijsschotsen (ontleend aan Oudshoorn [15])
- 9 Grootte van Froude-getal bij vorming van ijsdam (ontleend aan Oudshoorn [15])
- 10 Verhoging waterstand door optreden van vast ijsdek
- 11 Verhanglijnen op de IJssel tijdens vorming van vast ijsdek gedurende ijswinter 1940-41
- 12 Verloop van C_2/C_1 voor de drie Rijntakken over de periode 15 januari tot 15 februari 1963 (naar Oudshoorn [15])
- 13 Verhoging van waterstanden door aanwezigheid ijs over de periode 15 januari tot 15 februari 1963 (naar Oudshoorn [15])
- 14 Afvoer van Rijn, Waal, Nederrijn en IJssel over de periode 15 januari tot 15 februari 1963 (naar Oudshoorn [15])
- 15 Topstandslijn op de IJssel gedurende de periode van 30 januari tot 2 februari 1941
- 16 Voortschrijdend gemiddelde over 5 winters van het aantal ijsdagen op de IJssel over de periode 1854-1972
- 17 Voortschrijdend vijfjarig gemiddelde van de wintertemperatuur
- 18 $(T_w - T_e)$ over de periode 1912-1972 (ontleend aan Wessels [26])
- 19 $(T_w - T_e)$ als functie van afvoer te Lobith (ontleend aan Wessels [26])
- 20 Aantal dagen tussen begin vorstperiode en tijdstip waarop drijfijs is waargenomen op de IJssel
- 21 Aantal dagen tussen invallen dooi en verdwijnen drijfijs op de IJssel
- 22 Verband tussen aantal dagen tussen begin vorstperiode en verschijnen drijfijs op de IJssel en \bar{T}_1

FIGUREN (vervolg)

- 23 Verband tussen aantal dagen tussen einde vorstperiode en verdwijnen drijf-
ijs op de IJssel en \bar{T}_1
- 24a...24i Verloop afvoer te Lobith tijdens en na vorstperioden winter
a) 1916-1917, b) 1928-1929, c) 1939-1940, d) 1940-1941, e) 1941-1942,
f) 1946-1947, g) 1953-1954, h) 1955-1956, i) 1962-1963
- 25 Verdeling van afvoeren te Lobith tijdens ijsperioden met vast ijs op IJssel
en van jaarmaxima
- 26 Verdeling van afvoeren te Lobith tijdens ijsperioden met vast ijs op IJssel,
van jaarmaxima en van maandmaxima
- 27 Frekwentieverdelingen waterstanden te Kampen rekening houdend met optreden
vast ijs
- 28 Frekwentieverdeling waterstanden te Kampen t.g.v. vast ijs ($Q_2/Q_2 = 1,00$,
 $C_2/C_1 = 1,00$) met 95% betrouwbaarheidsinterval

SYMBOLLEN

Symbolen	Omschrijving	Dimensie
A	koëfficiënt	-
B	breedte rivier	L
C	verhouding tussen ijsafvoer en waterafvoer per 100 km	L^{-2}
C	Chézy-koëfficiënt	$L^{\frac{1}{2}} \cdot T^{-1}$
C_z	Chézy-koëfficiënt van het zomerbed	$L^{\frac{1}{2}} \cdot T^{-1}$
C_1	Chézy-koëfficiënt rivier zonder vast ijsdek	$L^{\frac{1}{2}} \cdot T^{-1}$
C_2	Chézy-koëfficiënt rivier met vast ijsdek	$L^{\frac{1}{2}} \cdot T^{-1}$
d	dikte ijsdek	L
D	diameter gesprongen gat	L
e	grondtal natuurlijke logarithme	-
e	verzadigingsdampspanning	$M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}$
g	versnelling zwaartekracht	$L \cdot T^{-2}$
h	waterdiepte	L
h_e	optimale diepte lading	L
h_w	waterdiepte winterbed	L
h_z	waterdiepte zomerbed	L
h_1	waterdiepte rivier zonder vast ijsdek	L
h_2	waterdiepte rivier met vast ijsdek	L
H^*	globale straling	-
H_w	hoogte winterbed	L
i	verhang	-
i_w	verhang winterbed	-
i_z	verhang zomerbed	-
i	getal, dat rangorde aangeeft	-
k_w	ruwheid winterbed	L
k_{ij}	ruwheid onderzijde ijsdek	L
L	verdampingswarmte van water	
L	grootte lading	M
n	brekingsindex	-
N	aantal waarnemingen	-
p	kans	-
Q	afvoer	$L^3 \cdot T^{-1}$
Q_L	afvoer te Lobith	$L^3 \cdot T^{-1}$
Q_L^*	afvoer te Lobith waarbij op plaats p de waterstand ws_p^* wordt bereikt	$L^3 \cdot T^{-1}$

SYMBOLLEN (vervolg)

Symbolen	Omschrijving	Dimensie
Q_p	afvoer op plaats P	$L^3.T^{-1}$
Q_t	totale afvoer	$L^3.T^{-1}$
Q_w	afvoer over winterbed	$L.T^{-1}$
Q_z	afvoer door zomerbed	$L.T^{-1}$
R	hydraulische straal	L
R_w	hydraulische straal betrokken op bodemwinterbed	L
R_{wij}	hydraulische straal betrokken op ijsdek in winterbed	L
R_z	hydraulische straal betrokken op bodem zomerbed	L
R_{zij}	hydraulische straal betrokken op ijsdek in zomerbed	L
R_1	hydraulische straal zonder vast ijsdek	L
R_2	hydraulische straal met vast ijsdek	L
s	standaardafwijking	-
t	straal gesprongen gat	L
T_e	evenwichtstemperatuur	K
T_l	temperatuur van lucht	K
T_n	natte bol temperatuur	K
T_w	temperatuur van water	K
w	windsnelheid	$L.T^{-1}$
ws	waterstand	L
ws_L	waterstand te Lobith	L
ws_p	waterstand op plaats P	L
ws_p^*	karacteristieke waarde van waterstand op plaats P	L
x	grootte van afvoer in Gumbel-verdeling	$L^3.T^{-1}$
y	koëfficiënt in Gumbel-verdeling, gedefiniëerd via $\phi = e^{-e^{-y}}$	-
α	koëfficiënt in Gumbel-verdeling	$L^{-3}.T$
β	koëfficiënt in Gumbel-verdeling	$L^3.T^{-1}$
γ	psychrometerkonstante	
ϕ	onderschrijdingspercentage, gedefiniëerd via $\phi = i/N + 1$	-
σ	Stefan-Boltzmann-konstante	

Invloed van ijsvorming op de frekventie van waterstanden langs de Rijn en zijn takken in Nederland

1 Inleiding

1.1 Opdracht

In mei 1975 is door het hoofd van het Centrum voor Onderzoek Waterkeringen, ir. P.W. Roest, contact gezocht met het Waterloopkundig Laboratorium met de vraag of het Laboratorium bereid was na te gaan of en in hoeverre ijsvorming op de Nederlandse Rijntakken bij het optreden van uitzonderlijk hoge waterstanden een rol speelt. Bij zijn brief van 10 november 1975, kenmerk 1483, bevestigde het voornoemde hoofd van het Centrum voor Onderzoek Waterkeringen de inmiddels al op een mondelinge bespreking op 1 juli 1975 gegeven opdracht tot het uitvoeren van een vooronderzoek naar bovengenoemd verschijnsel.

Van de kant van de opdrachtgever is het vooronderzoek, waarvan in dit verslag rapport wordt uitgebracht, begeleid door ir. J.M. Goppel van het Centrum voor Onderzoek Waterkeringen. Ook het hoofd van het distrikt Zuid-Oost van de directie Waterhuishouding en Waterbeweging van de Rijkswaterstaat, ir. A. Zanen, is actief bij de begeleiding betrokken geweest. Van de kant van het Waterloopkundig Laboratorium is het vooronderzoek uitgevoerd door ir. G.J. Klaassen, die tevens dit verslag samenstelde. Ir. C. Flokstra was behulpzaam bij het onderkennen van "valkuilen" bij de statistische verwerking van de geringe hoeveelheid voorhanden zijnd waarnemingsmateriaal.

1.2 Probleemstelling

De verhoging en verzwaring van rivierdijken is tot nu toe gebaseerd op een door de Minister van Verkeer en Waterstaat voorgestelde maatgevende afvoer. Deze afvoer, die voor de Rijn 18.000 m³/s te Lobith bedraagt, volgens de tot dusver gehanteerde methode overeenkomend met een overschrijdingsfrequentie van 1/3000 per jaar, dient zonder gevaar voor dijkdoorbraken gekeerd te worden. De door de Rijkswaterstaat berekende waterstanden, behorend bij deze maatgevende afvoer, worden als uitgangspunt voor de dijkverbeteringen gehanteerd.

Bij de berekening van deze maatgevende waterstanden is echter geen rekening gehouden met mogelijke ijsvorming op de rivieren. De aanwezigheid van een vast

ijsdek al of niet met ijsdammen kan tot aanzienlijke stijging van de waterstanden in de rivier leiden. Het is mogelijk, dat door de combinatie van ijsvorming met hoge rivierafvoeren de overschrijdingsfrequentie van deze maatgevende standen een grotere is dan de eerder genoemde 1/3000. Teneinde de grootte van dit extra risico te onderzoeken werd een studie naar de invloed van ijsvorming op de overschrijdingsfrequentie van waterstanden op de Rijn en zijn takken nodig geacht. Aan de hand van de resultaten van deze studie zou overwogen kunnen worden welke maatregelen en voorzieningen getroffen dienden te worden om een voldoende grote veiligheid te kunnen waarborgen.

Ter aanvulling zij vermeld, dat inmiddels door de Minister van Verkeer en Waterstaat de "Commissie Rivierdijken" is ingesteld, die onder meer tot taak heeft om na te gaan "... of er aanleiding is de tot op heden gehanteerde maatstaf voor het ontwerp van maatregelen ter verbetering van de bescherming tegen hoge rivierstanden - een waterstand behorend bij een afvoer van de Rijn te Lobith van 18.000 m³ per seconde - te herzien;" en "... indien de vorige vraag bevestigend wordt beantwoord, welke maatstaf of welke maatstaven dan (....) moeten worden aangelegd;". Binnen deze Commissie wordt onder meer nagegaan, wat de konsekventies zijn van een verhoging van de maatgevende overschrijdingsfrequentie van 1/3000 tot bijvoorbeeld 1/500, overeenkomend met een verlaging van de maatgevende afvoer. Voor het onderzoek naar de invloed van ijsvorming op de frequenties van hoge waterstanden houdt dit in, dat ook omstandigheden met een grotere frequentie dan 1/3000 in beschouwing genomen dienen te worden.

Een onderzoek als hierboven bedoeld, kan in verschillende stappen worden verricht. Als eerste stap wordt het vooronderzoek gezien, waarvan hier verslag wordt gedaan, en dat omvat een literatuurstudie, waarbij de volgende punten aandacht hebben gekregen:

- ontstaan en vóórkomen van drijfijis, ijsdammen en een vast ijsdek,
- mogelijkheden tot opruiming van vast ijsdek en ijsdammen,
- effect van opgetreden ijsvorming op rivierstanden,
- trend van vóórkomen van ijs (klimatologische veranderingen en invloed lozing koelwater),
- te verwachten invloed van ijsvorming op rivierstanden.

Ten dele om budgetaire redenen, maar vooral om het vooronderzoek niet al te

zeer te doen uitlopen in de tijd, is besloten om de aandacht vooral te concentreren op de specifiek Nederlandse omstandigheden en de gegevens, die daarover bekend zijn. Dit houdt in, dat in dit stadium van het onderzoek slechts gedeeltelijk gewerkt is met de resultaten van buitenlandse onderzoekingen. Overigens mag worden verwacht, dat de konklusies en aanbevelingen, die in hoofdstuk 5 zijn vermeld, niet essentiëel zouden zijn gewijzigd als genoemde buitenlandse resultaten wel uitputtend zouden zijn bestudeerd.

1.3 Samenvatting

Het uitgevoerde vooronderzoek kan in grote lijnen in een drietal onderdelen worden onderscheiden. In het eerste deel zijn de gegevens, die ten aanzien van het optreden van ijs op de Rijn en zijn takken in Nederland en de gevolgen daarvan op de waterstanden, verzameld en enigszins geanalyseerd (hoofdstuk 2). Vervolgens is een aantal factoren, dat mogelijkveroorzaakt kan hebben, dat de huidige toestand afwijkt van de omstandigheden, die in het verleden zijn opgetreden, aan een nader onderzoek onderworpen (hoofdstuk 3). In het laatste deel (hoofdstuk 4) is daarop nagegaan in hoeverre het mogelijk is de invloed van ijs op het voorkomen van extreem hoge waterstanden te kwantificeren. Naar aanleiding van de resultaten van de genoemde drie onderdelen worden in het laatste hoofdstuk (hoofdstuk 5) enkele aanbevelingen tot nader onderzoek gedaan. Hieronder zal meer in detail op de inhoud van de verschillende hoofdstukken worden ingegaan.

Wat betreft de vorming van ijs kan worden gesteld (paragraaf 2.2), dat enige dagen nadat een vorstperiode is ingevallen op de rivieren drijfijs wordt waargenomen. Bij aanhoudende vorst zal dit drijfijs zich gaan vastzetten. In het meer recente verleden gebeurde dat voor zover het de Nederrijn/Lek en Waal/Merweden betrof vooral in het kenteringsgebied. Bij de IJssel werd het vaste ijsdek opgebouwd vanaf de uitmonding in het Ketelmeer, omdat aldaar al in een vroeg stadium van de vorstperiode zwaar drijfijs en later een vast ijsdek aanwezig blijkt te zijn. Gedurende de laatste ijswinters is intensief gebroken in het benedenriviereengebied om het vastzetten van het drijfijs zo lang mogelijk tegen te gaan. Op de IJssel is ijsbreken niet zinvol, omdat, in tegenstelling tot de situatie bij de andere takken, het gebroken ijs niet in benedenstroomse richting kan worden afgevoerd onder meer door het ontbreken van getijbeweging. Ook wat betreft het verdwijnen van het ijs (paragraaf 2.3) bestaat een duidelijke

lijk verschil tussen de IJssel en de beide andere Rijntakken. Bij de IJssel moet dit voornamelijk door afsmelting gebeuren, terwijl in het verleden de afsmeltende restanten van het vaste ijsdek op de Waal en de Nederrijn door de getijbeweging naar zee werden afgevoerd. IJsdammen (paragraaf 2.4) blijken zowel tijdens de vorming van een vast ijsdek als bij het verzwakken en losraken ervan te kunnen optreden. IJsdammen blijken zeer aanzienlijke afmetingen te kunnen hebben. Verhoging van waterstanden (paragraaf 2.5) treedt niet op als gevolg van het optreden van drijfijis. Bij een vast ijsdek zal evenwel de hydraulische straal afnemen, terwijl verder de onderzijde van het pasgevormde ijsdek erg onregelmatig en dus ruw is (paragraaf 2.6). Ten gevolge hiervan zullen de waterstanden in de rivier aanzienlijk kunnen toenemen wanneer zich een vast ijsdek vormt. De afvoer van de Rijn neemt tijdens een vorstperiode enigszins af (paragraaf 2.7). Wanneer de dooi inzet, kan door het loskomen van tijdelijk geborgen water en door de met de dooi veelal gepaard gaande neerslag de afvoer in de rivier plotseling vrij aanzienlijk toenemen. Essentiëel hierbij is, dat het niet onmogelijk is, dat het einde van de vorstperiode in meer bovenstrooms gelegen riviergedeelten eerder kan beginnen, met als gevolg een verhoging van de rivierafvoer op meer benedenstroomse gedeelten waar nog een vast ijsdek aanwezig is. Een dergelijke situatie kan op deze benedenstroomse gedeelten tot zeer hoge waterstanden leiden. Een bijkomend aspekt is, dat door een vast ijsdek op één of meerdere takken (Waal, Nederrijn, IJssel) de normale afvoerverdeling bij de splitsingspunten (Pannerden, Westervoort) wordt gewijzigd, waardoor één der takken relatief veel water te verwerken kan krijgen (paragraaf 2.7).

Door een aantal omstandigheden is de huidige toestand niet helemaal vergelijkbaar met de situatie in het verleden. Dit is ondermeer af te leiden uit het verloop in de tijd van het aantal dagen met drijfijis of vast ijs op de IJssel (paragraaf 3.2). Een duidelijke afname van dit aantal is te onderkennen. Deze afname is niet veroorzaakt door kunstmatige ijsopruiming via het inzetten van ijsbrekers of het gebruik van explosieven (paragraaf 3.3), omdat de ijsbestrijding op de IJssel nooit op deze wijze is aangevat. Verhoging van waterstanden kan bepaald niet worden voorkomen door kunstmatige ijsopruiming. Twee factoren blijken de afname van het aantal ijsdagen te kunnen verklaren. Ten eerste is aantoonbaar, dat sinds circa 1800 door klimaatsverandering de winters milder zijn geworden (paragraaf 3.4). Deze tendens lijkt zich doorgezet te hebben tot circa 1920, daarna is de wintertemperatuur gemiddeld genomen min of meer gelijk gebleven. De afname van het aantal ijsdagen na 1920, welke vooral na 1950 erg

snel is verlopen, kan worden verklaard uit een toename van de temperatuur van het Rijnwater door de lozing van koelwater (paragraaf 3.5). Door lozingen in Duitsland blijkt de watertemperatuur te Lobith een aantal graden verhoogd te zijn. Deze verhoging wordt tijdens het stromen door Nederland maar zeer gedeeltelijk teniet gedaan door afkoeling. Voorts wordt ook in Nederland nog afvalwarmte op de rivier afgevoerd. Als gevolg van een en ander zal de bezetting met ijs van de rivieren korter duren en minder vaak voorkomen. Als er zich toch een ijsdek vormt, dan zal ter plaatse van lozingspunten op Nederlands gebied over vele kilometers de rivier gedeeltelijk open blijven. Door de uitvoering van rivierwerken als de Rijnkanalisatie, maar vooral door de wijzigingen in het benedenrivierengebied door de uitvoering van het Deltaplan, is de situatie ook gewijzigd (paragraaf 3.6). Omdat de afvoerweg van het ijs naar het Volkerak is afgesneden en voorts de ebstroom op het Haringvliet is verminderd, is het niet meer mogelijk om een voldoende hoeveelheid ijsschotsen via deze estuaria af te voeren. Of de alternatieve afvoerweg via Beneden Merwede en Oude Maas zal voldoende is bepaald niet zeker. Doordat sinds 1962-63 geen echte ijswinter meer is opgetreden, was het namelijk tot nu toe niet mogelijk om het functioneren van deze afvoerweg in de natuur te beproeven.

Wat betreft het kwantificeren van de invloed van ijsvorming op de frekwentie van waterstanden is in eerste instantie gepoogd aan te sluiten bij de door Rijkswaterstaat gebruikte methode om de frekwentie van waterstanden bij hoge afvoeren vast te stellen. Van deze methode is een summiere beschrijving gegeven (paragraaf 4.2). Gebaseerd op een min of meer formele statistische beschouwing is vervolgens geprobeerd om een methode te vinden om door sommatie van de frekwentie van hoge waterstanden veroorzaakt door hoge afvoeren alleen (zoals door Rijkswaterstaat bepaald) en de frekwentie van hoge waterstanden door een vast ijsdek de "overall" overschrijdingskans van een bepaalde waterstand vast te stellen (paragraaf 4.3). Het blijkt niet mogelijk dit te doen, tenzij de methode ter bepaling van de frekwentie van hoge waterstanden, als gevolg van hoge afvoeren alleen, aanzienlijk wordt gewijzigd. Vervolgens is gebruik gemaakt van een benaderingsmethode (paragraaf 4.4) voor het bepalen van de invloed van een vast ijsdek op de frekwentie van waterstanden. Daar de methode gebaseerd is op waarnemingen verricht gedurende de verschillende ijsperiodes in het verleden, kon met eventuele wijzigingen in de toestand (zoals in hoofdstuk 3 besproken) maar zeer ten dele rekening worden gehouden. Als voorbeeld is de frekwentie van waterstanden door een vast ijsdek voor de rivier de IJssel bij de peilschaal te

Kampen bepaald. Het blijkt, dat waterstanden worden gevonden, die aanzienlijk hoger zijn dan de standen, die zijn bepaald voor het geval, dat wordt uitgegaan van waterstanden gerelateerd aan hoge afvoeren. Hierbij moet wel bedacht worden, dat op de Beneden-IJssel de invloed van ijsvorming op de waterstanden wel zeer geprononceerd naar voren komt. Voor andere plaatsen langs de Rijn en zijn takken in Nederland zal de invloed geringer zijn, o.m. omdat het vaste ijsdek daar minder lang aanwezig is. Voor het bepalen van de invloed van ijsdammen op de frekwentie van hoge waterstanden kon geen methode worden aangegeven. Dit is enerzijds het gevolg van het feit, dat uit het verleden niet of nauwelijks kwantitatieve gegevens over ijsdammen bekend zijn en anderzijds het gevolg van het niet kunnen voorspellen van de plaats waar deze dammen zullen optreden.

2 Vorming van ijs en begeleidende verschijnselen in het verleden

2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk zal een beschouwing worden gegeven over en naar aanleiding van de verschijnselen, die zijn waargenomen bij de in het verleden opgetreden ijswinters. Bij het samenstellen van deze analyse is veelvuldig gebruik gemaakt van een tweetal publikaties, waarin veel informatie over verschijnselen tijdens ijswinters is verzameld en verwerkt. Het betreft hier een prae-advies voor het 14de Binnenscheepvaartkongres in 1948 (Wemelsfelder [23]) en nota 60.2 van de afdeling Studiedienst van de Directie Bovenrivieren (van Wijngaarden [27]). In een aantal opzichten is dit hoofdstuk slechts een voortzetting van het in beide rapporten beschreven onderzoek. Daarnaast is in hoofdstuk 3 gepoogd om door een wat andere ordening van het waarnemingsmateriaal en door het gebruik maken van meer recente informatie het inzicht in de verschijnselen te verdiepen.

De indeling van hoofdstuk 2 is de volgende. Achtereenvolgens zullen de optredende verschijnselen in het kort worden beschreven, waarbij aandacht zal worden besteed aan:

- 1 het ontstaan van drijfijis en een vast ijsdek (paragraaf 2.2),
- 2 het verdwijnen van drijfijis en een vast ijsdek (paragraaf 2.3),
- 3 het optreden van ijssdammen (paragraaf 2.4),
- 4 de verhoging van de waterstanden (paragraaf 2.5),
- 5 de hydraulische ruwheid van een riviertak bij aanwezigheid van een ijsdek (paragraaf 2.6), en
- 6 de verdeling van de Rijnafvoer over de verschillende takken bij aanwezigheid van ijs (paragraaf 2.7).

Daar zal blijken, dat in de loop van de afgelopen eeuw het verschijnsel ijsvorming vrij aanzienlijk is veranderd, zal vervolgens in hoofdstuk 3 wat meer in detail op deze verandering worden ingegaan. Daarbij zullen o.m. ter sprake komen eventuele klimaatsveranderingen en de lozing van koelwater. Ook de invloed van het kunstmatig opruimen van ijs zal worden besproken. Tenslotte zal dan een poging gedaan worden om aan te geven, welke veranderingen in de ijstoestand op de Rijn en de Rijntakken te verwachten zijn als gevolg van de uitvoering van rivierwerken en het Deltaplan.

2.2 Ontstaan van drijfijs en van vast ijsdek

In het volgende zal eerst worden ingegaan op de afgifte van warmte van water aan de lucht. Daarna wordt wat meer in concreto de vorming van drijfijs en van een vast ijsdek op de Rijn en de Rijntakken in Nederland beschreven.

Als de temperatuur van de lucht enkele °C lager is dan de temperatuur van het water, dan zal door het water warmte aan de lucht worden afgestaan. Door Wemelsfelder [25] worden enige beschouwingen aan dit verschijnsel gewijd. Voor watertemperaturen boven de 0°C blijkt te gelden, dat er een korrelatie bestaat tussen het verschil in temperatuur van water en lucht en de daggradiënt van de watertemperatuur. Onder de daggradiënt wordt verstaan de toe- of afname van de watertemperatuur per etmaal. In figuur 1 is voor een tweetal punten langs de Rijn in Nederland (namelijk te Lobith en nabij Gorinchem) dit verband weergegeven. Een aantal zaken valt op bij bestudering van figuur 1:

- 1 de spreiding van de punten is vrij aanzienlijk, hetgeen ongetwijfeld veroorzaakt wordt door het feit, dat ook andere meteorologische verschijnselen (bijvoorbeeld de windsnelheid) de warmteafgifte zullen beïnvloeden; in dit verband kan worden gewezen op het werk van Paily et al [16], waaruit blijkt, dat de warmteoverdracht van water naar lucht ook duidelijk afhangt van de absolute waarde van de luchttemperatuur, de windsnelheid, en de relatieve vochtigheidsgraad van de lucht;
- 2 het verband tussen de toename van de watertemperatuur en het verschil tussen lucht- en watertemperatuur is vrijwel lineair, waarbij de grootte van de evenredigheidsconstante respektievelijk $7,5 \cdot 10^{-6}$ en $11,3 \cdot 10^{-6}$ Mcal/(m .s.°C) bedraagt, of gemiddeld en afgerond 10^{-5} Mcal/(m².s.°C);
- 3 daar in één etmaal slechts circa 10% van het verschil in temperatuur wordt ingehaald, zal de watertemperatuur de luchttemperatuur slechts vertraagd en afgevlakt volgen;
- 4 de ingetekende regressielijn gaat niet door het nulpunt van de grafiek, hetgeen impliceert, dat de luchttemperatuur 1 à 2,5°C lager moet zijn dan de watertemperatuur, wil er afkoeling van het water optreden.

Het laatste punt houdt tevens in, dat de watertemperatuur gemiddeld over een aantal decennia ook altijd 1 à 2,5°C hoger zal zijn dan de luchttemperatuur. Wemelsfelder [25] noemt als belangrijkste oorzaak het overschot aan instraling van zomerwarmte, hoewel volgens Wemelsfelder [24] ook factoren als de omzetting van potentiële energie in warmte en de restwarmte van meer bovenstrooms geloosd

koelwater een rol spelen. Als de instraling de meest belangrijke faktor is en als bedacht wordt, dat de mate van instraling afhankelijk is van de zonnestand, dan zou het verschil in temperatuur van water en lucht gedurende het jaar moeten variëren. Volgens Wemelsfelder [25] is dit echter niet zo.

Tijdens de vorstperiode is er nog een komplicerende faktor. Als de gemiddelde luchttemperatuur gedurende langere tijd meer dan $1 \text{ à } 2,5^{\circ}\text{C}$ onder nul blijft, dan zal de temperatuur van het water na enige tijd ook circa 0°C zijn geworden. Bij voortgaande afgifte van warmte van het water aan de lucht zal dan ijs worden gevormd, daar de temperatuur van het water onder deze omstandigheden niet verder kan dalen.

Is de watertemperatuur tot circa 0°C gedaald en vindt nog verdere afkoeling plaats, dan zal in de rivier ijs worden gevormd. Het eerst zal dit plaatsvinden tussen de kribben, omdat de daar aanwezige lage stroomsnelheden geen intensieve verticale menging veroorzaken, zodat de bovenlaag van het water vrij snel kan bevriezen. In de hoofdstroom is dit anders, omdat daar door de verticale diffusie eerst het gehele volume water tot 0°C moet dalen, wil ijsvorming gaan plaatsvinden. In principe zullen in de gehele doorsnede ijskristallen worden gevormd en deze zullen rond deeltjes en voorwerpen, die als condensatiekern functioneren, gaan aangroeien. In rivieren gebeurt dit vaak aan de bodem rond zandkorrels e.d. Dit soort ijs wordt grondijs genoemd. Als de ijsdeeltjes door aangroeiing of samenklontering voldoende groot zijn geworden, dan zullen ze aan het oppervlak komen drijven in de vorm van drijfijs. De afgifte van warmte wordt nu gereduceerd, omdat het drijfijs plaatselijk als isolator gaat werken. Zoals al gesteld, kan warmteafgifte van het water aan de lucht alleen maar resulteren in toename van de hoeveelheid drijfijs. Dit is in overeenstemming met enkele waarnemingen weergegeven in figuur 2, oorspronkelijk opgesteld door Santema en Valken [19]. De gebruikte koëfficiënt C is gedefiniëerd als de verhouding tussen de ijsafvoer in m^2/s (oppervlak/tijdseenheid) en de waterafvoer in m^3/s per 100 km. Hoewel deze uiteraard veel moeilijker te bepalen is, zou de verhouding van de ijsafvoer in m^3/s (inhoud/tijdseenheid) en de waterafvoer veel interessanter zijn geweest, omdat deze zich leent voor berekeningen naar het warmteverlies per lengteenheid. Teneinde enig inzicht te geven in de snelheid waarmee drijfijs wordt gevormd, kunnen de resultaten van de berekeningen van Wemelsfelder [24] worden vermeld. De afname van het warmtetransport door de aanwezigheid van drijfijs verwaarlozend, toont hij aan, dat bij strenge vorst

(- 12°C) de ijsproduktie zodanig is, dat in één nacht een ijsdek met een dikte van 0,05 m kan ontstaan. Dit wordt bevestigd door waarnemingen in de natuur, waar in een korte periode veel drijfijis over een lang riviertrajekt blijkt te kunnen ontstaan.

Op een rivier kan het drijfijis op verschillende manieren overgaan in een vast ijsdek:

- 1 Is gedurende een aantal uren de stroomsnelheid van het water gering en vriest het hard genoeg, dan kunnen de verschillende stukken drijfijis aan elkaar vastvriezen en zo een vast ijsdek gaan vormen. Dit verschijnsel treedt vooral in kenteringsgebieden op en dan voornamelijk nog op de ondiepere plaatsen.
- 2 Is in het kenteringsgebied of op het Ketelmeer een vast ijsdek gevormd, dan zal de afvoer van door het water aangevoerd drijfijis hierdoor belemmerd worden. Als gevolg hiervan zal het vaste ijsdek in bovenstroomse richting aangroeien doordat een gedeelte van het drijfijis er tegenaan wordt geschoven. Onder de normaal op een rivier optredende stromingsomstandigheden zal het drijfijis ook gedeeltelijk onder het zich vormende vaste ijsdek worden gezogen en zich daar vastzetten. Het vaste ijsdek is dan ook dikker dan de individuele stukken drijfijis.
- 3 Op sommige plaatsen langs de rivier zijn de lokale omstandigheden gunstig voor de vorming van een vast ijsdek. Met name scherpe bochten en plaatselijke versmallingen (bijvoorbeeld door de aanwezigheid van pijlers in het zomerbed) geven aanleiding tot het zich vastzetten van ijs aan de oever. Na enige tijd kan op deze plaatsen een vast ijsdek over de gehele breedte van de rivier aanwezig zijn en ook dit zal in bovenstroomse richting gaan aangroeien. In de vorige eeuw raakte het ijs ook regelmatig vast bij de samenvloeiing van Maas en Waal; maar dit euvel is verholpen door verlegging van de mond van de Maas in het begin van deze eeuw.

Het zal duidelijk zijn, dat de kans op vastzetten van het drijfijis en de snelheid van aangroeien van een vast ijsdek onder meer afhankelijk zullen zijn van de bezetting van de rivier met drijfijis (een bezetting van 5% is aanwezig als 5% van het rivieroppervlak bedekt is met drijfijis). Is de bezetting groot, dan zal een vast ijsdek zich sneller vormen dan wanneer de bezetting gering is.

In het volgende zal nu iets dieper op de vorming van drijfijis en vast ijs op de Rijn en de Rijntakken worden ingegaan. Een vorstperiode wordt geacht te beginnen op de dag, dat de gemiddelde etmaaltemperatuur te De Bilt minder dan 0°C is.

Evenzo wordt het einde van een vorstperiode bepaald door de eerste dag, waarop de gemiddelde etmaaltemperatuur hoger dan 0°C is. In tabel 1 is aangegeven het begin en het einde van de belangrijkste vorstperioden in de volgende ijswinters: 1890-91, 1892-93, 1916-17, 1928-29, 1939-40, 1940-41, 1941-42, 1946-47 (zowel de 1e als de 3e vorstperiode), 1953-54, 1955-56 en 1962-63. Gedurende elk van deze vorstperioden zijn één of meerdere Rijntakken met vast ijs bedekt geweest.

Zoals al eerder gesteld, zal de watertemperatuur de luchttemperatuur vertraagd volgen. Pas enige dagen nadat de vorst is ingevallen zal drijfijs op de rivieren worden waargenomen. In figuur 3 is voor de hiervóór aangegeven vorstperioden per periode aangegeven hoeveel dagen zijn verlopen vanaf het begin van de vorstperiode tot het moment, dat drijfijs werd waargenomen. Het aantal blijkt te variëren tussen 1 en 10, terwijl er tussen de riviertakken onderling nauwelijks verschil is aan te wijzen. De grote spreiding is te verklaren uit het feit, dat de benodigde tijd voor de vorming van drijfijs van verschillende factoren zal afhangen, zoals de watertemperatuur aan het begin van de vorstperiode, de gemiddelde temperatuur van de lucht na het invallen van de vorst en andere meteorologische omstandigheden. In paragraaf 3.4 zal hier nog op worden teruggekomen. Opgemerkt kan worden, dat uit figuur 3 niet kan worden afgeleid, dat de tijd, die verloopt tussen begin van de vorstperiode en het optreden van drijfijs, in de afgelopen decennia systematisch is veranderd.

Als de vorstperiode voortduurt, dan zal weer enige tijd later het drijfijs zich gaan vastzetten. In figuur 4 is het tijdsverloop tussen begin van de vorstperiode en de vorming van een vast ijsdek op de drie Rijntakken weergegeven voor de beschouwde vorstperioden. Uit deze figuur is af te leiden, dat het ijs in het algemeen het eerst vastraakt op de IJssel, vervolgens op de Nederrijn/Lek en daarna op de Waal. De benodigde tijd variëert van 3 tot 31 dagen, terwijl gedurende een tweetal vorstperioden (1940-41 en 1946-47 (I)) zich helemaal geen vast ijs op de Waal heeft gevormd. Door van Wijngaarden [27] wordt een aantal redenen opgesomd voor de hiervóór aangegeven volgorde van vastzetten van het ijs op de Rijntakken:

- 1 Vrij spoedig na het begin van een vorstperiode vormt zich op het IJsselmeer o.m. nabij de uitmonding van de IJssel zwaar drijfijs en later een vast ijsdek. Dit was ook al zo vóór de afsluiting van de Zuiderzee. Daardoor zal het drijfijs zich ook vrij spoedig in de monding van de IJssel gaan vastzetten. Een bijkomende faktor is, dat nabij de monding van de IJssel slechts een ge-

ringe getijwerking was en dat na de afsluiting van de Zuiderzee deze getijwerking geheel is verdwenen. Daardoor kan het gevormde ijs niet naar zee worden afgevoerd, zoals dat in het Deltagebied wel kon gebeuren bij de benedenlopen van Waal en Nederrijn/Lek.

- 2 De verhouding tussen normaalbreedte, straal en lengte van de bochten en de afmetingen van de ijsschotsen is bij de IJssel en in mindere mate bij de Nederrijn/Lek gunstiger voor het vastzetten in bochten dan bij de Waal. Opgemerkt moet worden, dat na de afsluiting van de Zuiderzee werken zijn uitgevoerd in de benedenmond van de IJssel om de afvoer van ijs te vergemakkelijken. In de vorstperiode van 1939-40 waren deze werken gereed.
- 3 Op de Waal en na het gereedkomen van het Amsterdam-Rijnkanaal ook op de Nederrijn/Lek benedenstrooms van Vreeswijk zijn op uitgebreide schaal ijsbrekers ingezet. Dit zal ongetwijfeld ertoe geleid hebben, dat het ijs zich aldaar later vastzette dan op de IJssel. Op deze laatste riviertak is ijsbreken niet zinvol, omdat het gebroken ijs niet in benedenstroomse richting kan worden afgevoerd.

Wanneer zich eenmaal op een bepaalde plaats een vast ijsdek heeft gevormd, dan zal dit snel in bovenstroomse richting aangroeien, omdat al in de rivier aanwezig drijfijis tegen het vast ijsdek aan zal drijven, gedeeltelijk wordt opgestuwd en er ten dele onder zal worden gezogen. Enig inzicht geeft de volgende redenering, afkomstig van Wemelsfelder [22]. Uitgaande van de redelijke veronderstelling, dat de bovenrivieren het drijfijis aanvoeren met een snelheid van 5 km/uur en dat de bezettingsgraad met drijfijis 80% is, en voorts uitgaande van een aangroeisnelheid van het vaste ijsdek van 1 km/uur (een reëel gemiddelde), volgt hieruit, dat door het ineenschuiven der schotsen het drijfijis $(5+1) \times 0,8 = 5$ maal dikker wordt dan het drijfijis tevoren is. Het is waarschijnlijk, dat door het ineenschuiven der schotsen de onderzijde van het vaste ijsdek tamelijk onregelmatig zal zijn. De faktor 5 is uiteraard een gemiddelde. Plaatselijk zullen aanzienlijk grotere waarden kunnen optreden.

Ten aanzien van de plaats waar het ijs zich vastzet op de Nederrijn en Lek kan nog het volgende worden gezegd. In ieder geval te beginnen met de ijswinter 1939-40 heeft het ijs zich steeds vastgezet in het benedengedeelte van de rivier, meestal nabij Schoonhoven. Door het inzetten van ijsbrekers kon meestentijds vrij snel het ijsdek worden verbroken, zodat in het algemeen benedenstrooms van Vreeswijk niet gedurende langere tijd een vast ijsdek aanwezig is

geweest. In het verslag van de ijswinter 1962-63 [5] wordt vermeld, dat tot twee keer toe het ijs zich het eerst vastzette boven stuw Hagestein. Het moet niet uitgesloten worden geacht, dat door de plaatsing van de middenpijler in de rivier de lokale omstandigheden zodanig zijn gewijzigd, dat het vastzetten van het ijs aldaar in een eerder stadium dan in de vroegere situatie kan gebeuren. Ook van Wijngaarden [27] houdt voor stuw Driel rekening met dit verschijnsel.

Aangeven waar het ijs zich vastzet op de Waal en de Merwede is erg moeilijk. Nog voordat vastzetten kan optreden, worden namelijk al ijsbrekers ingezet om het ijs drijvende te houden. De plaats waar een vast ijsdek ontstaat zal dan ook afhangen van het tijdstip waarop met breken is begonnen, de bezetting van de rivier met drijfijis en nog andere factoren.

Een punt van belang is de situatie bij de splitsingspunten. In deze paragraaf zal dit alleen worden beschouwd voor zover de vorming van ijs wordt beïnvloed, in volgende paragrafen zal blijken, dat de aanwezigheid van splitsingspunten ook nog andere konsekwenties heeft. Als de Bovenrijn een aanzienlijke hoeveelheid drijfijis afvoert, dan zal een gedeelte daarvan via de Waal worden verder getransporteerd en het restant via het Pannerdens Kanaal. Een aantal factoren zal de verdeling van het drijfijis over deze twee takken bepalen, waarbij onder meer valt te denken aan:

- 1 de heersende windrichting (tijdens een vorstperiode is die veelal hoofdzakelijk Noordoostelijk, waardoor het meeste drijfijis aan de tegenover gestelde oever aanwezig zal zijn);
- 2 de waterbeweging bij het splitsingspunt, die tengevolge van spiraalstroming zodanig kan zijn, dat de ene tak relatief meer drijfijis te verwerken krijgt dan de andere;
- 3 lokale omstandigheden als de aanwezigheid van kribben, die behalve indirect via de waterbeweging ook direkt de beweging van het drijfijis zullen beïnvloeden.

Het is niet à priori te zeggen, wat het resultaat zal zijn van dit samenspel tussen elkaar soms tegenwerkende factoren. Hetzelfde geldt uiteraard voor het splitsingspunt Westervoort.

2.3 Verdwijnen van drijfijis en vast ijsdek

Tussen het einde van de vorstperiode (bereikt op het moment, dat de gemiddelde etmaaltemperatuur van de lucht hoger dan 0°C is) en de tijdstippen, dat respectievelijk een vast ijsdek en al het ijs verdwenen is, zal een aantal dagen verlopen. Uit de tabellen 1 en 2 is dit aantal te bepalen. In de figuren 5 en 6 is het resultaat weergegeven als het aantal dagen, dat per ijsperiode verlopen is tussen het einde van de vorstperiode en het verdwijnen van respectievelijk het vaste ijsdek en het drijfijis op de drie Rijntakken in Nederland.

Uit een beschouwing van de figuren 5 en 6 kan het volgende worden gekonkludeerd:

- 1 Blijkens het verloop van de lijnen is het niet onmogelijk, dat het benodigde aantal dagen voor het vaste ijsdek en het drijfijis is verdwenen in het tijdsinterval tussen 1890-91 en 1962-63 is afgenomen. De meest extreme situatie is opgetreden gedurende de ijsperiode 1962-63, daar toen het vaste ijsdek 9 tot 19 dagen (afhankelijk van de beschouwde riviertak) eerder verdwenen was dan het moment waarop de vorstperiode was beëindigd. Hetzelfde verschijnsel doet zich voor bij het verdwijnen van het drijfijis, terwijl het beeld van de IJssel wat dit betreft niet afwijkt van dat van de andere Rijntakken. Dit laatste houdt in, dat de gesignaleerde afname van het benodigde aantal dagen niet wordt veroorzaakt door de inzet van ijsbrekers, daar deze niet op de IJssel zijn gebruikt. Dat in de ijswinter 1940-41 de Nederrijn/Lek een afwijkend verloop vertoonde, wordt veroorzaakt door het specifieke verloop van deze vorstperiode.
- 2 Wat betreft de volgorde van het verdwijnen van het vaste ijs en het drijfijis kan worden gesteld, dat, behoudens enige uitzonderingen, het vaste ijs het eerst verdwenen is op de Waal en de Merwede, vervolgens op de Nederrijn en Lek en tenslotte op de IJssel. De tijdstippen, waarop ook geen drijfijis meer wordt waargenomen (zie figuur 6), wijken minder van elkaar af.

De korrelatie tussen het aantal dagen, dat verloopt voordat het vaste ijsdek is verdwenen op de verschillen takken voor de IJssel en Nederrijn/Lek en voor de Nederrijn/Lek en Waal/Merwede is af te leiden uit de figuren 7a en 7b. Deze figuren geven niet meer informatie dan figuur 5, maar maken het wel mogelijk een duidelijker indruk te verkrijgen. Alleen in de ijswinter 1890-91 was het vaste ijsdek op de IJssel eerder verdwenen dan op de Nederrijn/Lek, in alle andere ijsperiodes was het tegendeel het geval (figuur 7a). Tussen het aantal dagen

verstreken voor een vast ijsdek was verdwenen is geen duidelijk verschil aanwijsbaar tussen de Waal en de Nederrijn/Lek (figuur 7b).

Dat het vaste ijsdek op Waal en Nederrijn/Lek eerder verdwijnt dan dat op de IJssel, wordt door van Wijngaarden [27] aan de volgende factoren geweten:

- de getijbeweging in de benedenlopen van beide eerstgenoemde takken,
- het in zeewaartse richting toenemende zoutgehalte in beide eerstgenoemde takken, hetgeen de afsmelting en daarmee de afvoer van ijs bevordert,
- de mogelijkheid om, gezien de vorige twee punten, het ijsdek met ijsbrekers te lijf te gaan en dit in een vroeg stadium te laten beginnen (nog tijdens de vorstperiode),

- de verschillen in grootte van normaalbreedte, diepte en straal der bochten. Dezerzijds wordt vooral de derde faktor als de meest belangrijke gezien. Van Wijngaarden [27] maakt aannemelijk, dat, afhankelijk van de zwaarte van de dooi, het verdwijnen van het ijsdek op Nederrijn/Lek en Waal/Merwede met een halve tot een hele week wordt bespoedigd door het ijsbreken. Worden de tijdstippen, waarop de Waal/Merwede en de Nederrijn/Lek het vaste ijsdek was verdwenen, gekorrigeerd voor de invloed van het ijsbreken, dan blijkt er geen significant verschil meer te bestaan tussen het verdwijnen van het vaste ijsdek op de drie Rijntakken. Dit is in overeenstemming met de waarnemingen van de periode, die verloopt totdat ook het drijfijis is verdwenen. Dit zal in mindere mate worden beïnvloed door het breken van het ijs. Er is dan ook geen duidelijk verschil aanwijsbaar tussen de drie Rijntakken.

Overigens is er wel een duidelijk verschil in de wijze, waarop in het verleden het vaste ijsdek en het drijfijis is verdwenen. Bij de IJssel is de omstandigheid aanwezig, dat tot lang na het einde van de vorstperiode een min of meer vast ijsdek op het IJsselmeer en het Ketelmeer aanwezig blijft. Het ijs van de IJssel wordt dan ook niet afgevoerd, maar verdwijnt in de meeste gevallen door smelting. In het Deltagebied was de toestand anders. Door de getijwerking werd het ijs in de benedenlopen van Waal en Nederrijn in zeewaartse richting afgevoerd. Deze hoeveelheid ijs werd nog vergroot door het inzetten van ijsbrekers. Het verdwijnen van het ijs wordt dan ook veroorzaakt door eensdeels de afsmelting, maar anderdeels door het afvoeren naar zee.

Daar de situatie in het Deltagebied zich zal wijzigen als gevolg van de uitvoering van de Deltawerken, is onderzoek verricht naar de afvoer van ijsschotsen voordat de Deltawerken waren uitgevoerd. Onder ijsschotsen worden verstaan restanten van een vast ijsdek. Enkele resultaten van de onderzoekingen zijn weer-

gegeven in figuur 8. Onderscheid is gemaakt tussen de toestand bij Noordoostelijke wind en de toestand bij Zuidwestelijke wind. Bij Noordoostelijke wind bleek, dat een groot deel van de ijsschotsen afgevoerd werd via het Volkerak, terwijl slechts een gedeelte de route door het Haringvliet volgde. Bij Zuidwestelijke wind wordt het ijs vooral via het Haringvliet afgevoerd. Op een en ander wordt later nog teruggekomen als de invloed van de Deltawerken wordt besproken.

Om nog in paragraaf 2.4 te noemen redenen is het in het verleden vaak gebeurd, dat het vaste ijsdek op meer bovenstrooms gelegen riviergedeelten eerder los kwam dan meer benedenstrooms. Hierdoor werden ijsvelden met een aanzienlijke omvang tegen een nog vast liggend ijsdek aangedreven. Tengevolge daarvan, in combinatie met de toename van de afvoer na een vorstperiode (zie paragraaf 2.7), kunnen zich door opstuwning grote ijsheuvels en ijsdammen vormen, die in het winterbed geschoven worden en in ongunstige gevallen zelfs de stabiliteit van dijken kunnen bedreigen. Men noemt dit verschijnsel het zogenaamde kruien van het ijs. Daar het onderhavige vooronderzoek gericht is op de verhoging van waterstanden door ijsvorming, is het aspect van aantasting van de dijken buiten beschouwing gelaten. Opgemerkt wordt slechts, dat dit verschijnsel tot en met de vorige eeuw nog tamelijk regelmatig voorkwam, maar dat het daarna nog maar sporadisch is gekonstateerd. Mogelijk wordt dit veroorzaakt door de normalisatie van de Rijntakken die sindsdien is uitgevoerd en, in mindere mate, door het vroegtijdig inzetten van ijsbrekers.

2.4 Optreden van ijsdammen

Ijsdammen kunnen ontstaan zowel aan het begin van een vorstperiode wanneer het drijfijis zich vastzet, als bij de aanvang van de dooi als het vaste ijsdek in beweging komt. Ten aanzien van het eerste soort heeft van Wijngaarden [27] de ijsverslagen over de eerder genoemde ijsperioden (afgezien van 1955-56 en 1962-63) doorgenomen en hij konkludeert, dat vooral ijsdammen aanwezig zijn geweest in de benedenlopen van Nederrijn en Waal.

Opgemerkt moet worden, dat ijsdammen vaak optreden als plaatselijke verdikkingen van het vaste ijsdek. Zij worden in een aantal gevallen dan ook pas onderkend als zij tijdens het opruimen van ijs door ijsbrekers worden ontdekt. Dat er geen melding is gemaakt van ijsdammen in de benedenloop van de IJssel kan

daarom veroorzaakt worden doordat zij, hetzij er niet zijn geweest, hetzij niet zijn opgemerkt. In een aantal andere gevallen is de aanwezigheid van een ijsdam ook op andere wijze te onderkennen en dat des te eerder naarmate de opstuwings-tengevolge van de ijsdam groter is. Blijkens de verschillende ijsverslagen zijn opstuwings tot 2 à 3 m voorgekomen en tengevolge daarvan wordt plaatselijk een groter verhang in de rivier gekonstateerd. De grote opstuwings behoeft geen verwondering te wekken, als iets over de afmetingen van ijsdammen wordt medegedeeld. De aangetroffen ijsdammen besloegen vaak een groot gedeelte of de gehele breedte van de rivier, terwijl de lengte enkele honderden meters kon bedragen. Wat betreft de hoogte van de ijsdammen worden getallen tot circa 8 m genoemd. Soms steken de ijsdammen enkele meters boven de plaatselijke waterstand uit en op sommige plaatsen reikten ze tot op de rivierbodem.

Het zal duidelijk zijn, dat het water vaak met zeer aanzienlijke snelheid onder de ijsdammen doorstroomt en dientengevolge veel bodemmateriaal zal opnemen en zal transporteren in benedenstroomse richting. Dit bodemmateriaal zal weer afgezet worden benedenstrooms van de ijsdammen en aldaar een zandrug vormen. Deze zandruggen zijn vele malen in de natuur aangetroffen en blijken bij het ijsbreken zeer bezwaarlijk te zijn, omdat er boven slechts een betrekkelijk geringe waterdiepte aanwezig is. Tengevolge van de ontgronding onder de ijsdam zal in de loop van de tijd de doorstroomopening onder de dam toenemen, eventueel in combinatie met een van onderen enigszins "afslijten" van de ijsdam. Daardoor zal de aanvankelijke opstuwings van het water bovenstrooms afnemen.

Volgens Kivisild [7] is de grootte van het Froude-getal een goed criterium voor het optreden van ijsdammen. Het Froude-getal is gedefiniëerd als

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}} \quad (2.1)$$

waarbij v = plaatselijke watersnelheid [m/s]
 g = versnelling zwaartekracht [m/s²]
 h = plaatselijke waterdiepte [m]

Volgens Kivisild [7] worden ijsdammen gevormd bij Froude-getallen van circa 0,08. Dit wordt min of meer bevestigd door figuur 9, die ontleend is aan Oudshoorn [15] en waarin voor een aantal ijsdammen, die in het verleden in het be-

nedenrivierengebied zijn aangetroffen, aangegeven is bij welke Froude-getallen deze dammen zijn gevormd. De waarden variëren tussen 0,05 en 0,10 en komen goed overeen met de voorspelde waarde van Kivisild. Terzijde wordt nog opgemerkt, dat Michel [12] aannemelijk heeft gemaakt, dat het kritieke Froude-getal varieert tussen 0,05 en 0,15, afhankelijk van de grootte van de verhouding tussen de ijsdikte en de waterdiepte.

Het bovenstaande betreft ijsdammen, die ontstaan zijn bij de vorming van een vast ijsdek. Ook nadat de dooi was ingevallen, zijn ijsdammen opgetreden. Deze werden meestal veroorzaakt doordat het ijs op een riviergedeelte bovenstrooms eerder los raakte en tegen een nog benedenstrooms vastzittend ijsdek aan werd gedreven. Dat het ijs bovenstrooms eerder los komt wordt veroorzaakt door de volgende factoren:

- de toename van de afvoer, die na een vorstperiode meestal optreedt, doet zich het eerst bovenstrooms gevoelen;
- het meer bovenstrooms gevormde ijs is later gevormd en is daardoor in het algemeen minder zwaar.

De plaatsen waar dit tweede soort ijsdammen kan optreden zijn niet van te voren aan te geven. Wel kan worden opgemerkt, dat deze ijsdammen in het algemeen slechts een korte tijd (minder dan een dag) standhouden en dan bezwijken door de toename van de waterdruk (Oudshoorn [15]). Aan de gevolgen van het kruien, als het ijs ook in het winterbed wordt geschoven, voor de stabiliteit van de dijken wordt overeenkomstig het gestelde in paragraaf 2.3 voorbij gegaan.

2.5 Verhoging van waterstanden

Door het optreden van drijfijis zullen de waterstanden in de rivier in te verwaarlozen kleine mate worden beïnvloed. Door een vast ijsdek, al of niet in combinatie met ijsdammen, zal wel een aanzienlijke verhoging van de waterstand veroorzaakt kunnen worden. Dit wordt veroorzaakt door een toename van de weerstand doordat 1) de hydraulische straal afneemt en 2) de onderzijde van het ijsdek, zeker kort na de vorming van het ijsdek, erg ruw blijkt te zijn.

Het effect van de afname van de hydraulische straal is nagegaan door Wemelsfelder [22], onder aanname, dat de ruwheid van het ijsdek (uitgedrukt in de C-waarde van Strickler) gelijk is aan de bodemruwheid. Op analoge wijze zal dat hierna gebeuren gebruik makend van de Chézy-vergelijking. Geeft de index 1 de situ-

atie aan vóór het optreden van het vaste ijsdek en index 2 de situatie mét vast ijsdek, dan geldt, indien wordt aangenomen, dat voor beide gevallen het verhang gelijk is:

$$Q_1 = B_1 C_1 h_1 \sqrt{R_1 i} \quad (2.2)$$

$$Q_2 = B_2 C_2 h_2 \sqrt{R_2 i} \quad (2.3)$$

waarbij Q = afvoer	[m ³ /s]
B = breedte rivier	[m]
C = Chézy-koëfficiënt	[m ^{1/2} /s]
R = hydraulische straal	[m]
i = verhang	[-]

Bij benadering mag voor een brede rivier worden gesteld:

$$R_1 = h_1 \quad (2.4)$$

$$R_2 = \frac{1}{2} h_2 \quad (2.5)$$

Wordt voorts verondersteld, dat de afvoer vóór de vorming van het vaste ijsdek gelijk is aan de afvoer met een vast ijsdek, terwijl ook de breedte nauwelijks zal variëren, dan wordt door combinatie van de vergelijkinge (2.1)...(2.4) gevonden:

$$B C_1 h_1 \sqrt{h_1 i} = B C_2 h_2 \sqrt{\frac{1}{2} h_2 i} \quad (2.6)$$

ofwel:

$$h_2 = 1,26 \left(\frac{C_1}{C_2}\right)^{2/3} h_1 \quad (2.7)$$

Wordt aangenomen, dat de waarde van de Chézy-koëfficiënt gelijk blijft, dan gaat vergelijking (2.6) over in:

$$h_2 = 1,26 h_1 \quad (2.8)$$

Wemelsfelder [22] wijst er terecht op, "dat de dikte van het vaste ijsdek niet meetelt voor de afvoer doch voor 0,9 wel meetelt voor de hoogte der waterstanden, afgelezen aan een peilschaal". De aan een peilschaal gemeten waterstand h'_2 is dus:

$$h'_2 = 1,26 h_1 + 0,9 d \quad (2.9)$$

Uitgaande van $h_1 = 4,00$ m en $d = 0,25$ m, levert vergelijking (2.8) voor h'_2 een waarde op van 5,26 m, overeenkomend met een verhoging van circa 1,25 m. Uit het volgende zal verder blijken, dat C_2 soms aanzienlijk kleiner kan zijn dan C_1 (soms tot 50%), hetgeen nogmaals een verhogend effect heeft. Uitgaande van vergelijking (2.6) en rekening houdend met de verhoging van de waterstand door de dikte van het ijsdek, wordt de uitdrukking:

$$h'_2 = 1,26 \left(\frac{C_1}{C_2}\right)^{2/3} h_1 + 0,9 d \quad (2.10)$$

Weer uitgaande van $h_1 = 4,00$ m en $d = 0,25$ m, en voorts veronderstellend, dat $C_2 = 0,75 C_1$, wordt voor h'_2 gevonden 6,33 m, overeenkomend met een waterstandsverhoging van 2,33 m.

Door alle termen door de oorspronkelijke waterdiepte h_1 te delen, gaat vergelijking (2.10) over in:

$$\frac{h'_2}{h_1} = 1,26 \left(\frac{C_1}{C_2}\right)^{2/3} + 0,9 \frac{d}{h_1} \quad (2.11)$$

De relatieve verhoging van de waterstand in brede rivieren is dus blijkbaar afhankelijk van de verhouding van de totale ruwheid van de rivier vóór en na de vorming van het ijsdek en verder van de relatieve dikte van het ijsdek. In figuur 10 is het verband tussen h'_2/h_1 en C_2/C_1 volgens vergelijking (2.11) aangegeven voor een viertal waarden van d/h_1 . De invloed van de laatste term in de vergelijking blijkt klein te zijn. Als C_2 afneemt tot 50% van C_1 , dan wordt de waterdiepte tweemaal zo groot. Gekonkludeerd kan worden, dat de aanwezigheid van een ijsdek tot aanzienlijke waterstandsverhogingen kan leiden.

Een drietal opmerkingen dient gemaakt te worden:

- 1 Bij de voorgaande berekeningen is er van uitgegaan, dat alle verschijnselen zich alleen in het zomerbed van de rivier afspelen. Voor lage afvoeren zal dit zeker het geval zijn. Bij wat hogere afvoeren in combinatie met een vast ijsdek zal de waterstand zodanig stijgen, dat ook het winterbed wordt overstroomd, waardoor de waterstanden lager zullen worden dan berekend met behulp van de hiervoor aangegeven methode. Juist deze situatie is voor het vooronderzoek van wezenlijk belang. De reductie door het deelnemen van het winterbed aan de afvoer dient dan ook mede in beschouwing genomen te worden, ermee rekening houdend, dat ook in het winterbed een vast ijsdek aanwezig zal zijn. In aanhangsel A is een poging gedaan om de invloed van het winterbed op de waterstandsverhoging door een vast ijsdek te bepalen.
- 2 Niet alleen het vaste ijsdek, maar ook kleinere en grotere ijssdammen zullen de waterstandsverhoging veroorzaken. Veelal is de invloed van ijssdammen niet te bepalen, omdat bij de bepaling van het verhang over een traject en van de waterdiepte gebruik is gemaakt van peilschaalwaarnemingen, die, juist wat betreft het aandeel van ijssdammen, nauwelijks informatie opleveren. Gedetailleerde informatie over de verhoging van waterstanden door ijssdammen is dan ook niet beschikbaar.
- 3 Niet alleen ter plaatse van het vaste ijsdek zal de waterstand toenemen. Ook bovenstrooms van het vaste ijsdek zullen de waterstanden stijgen. Dit is bijvoorbeeld te zien in figuur 11, waar voor een aantal dagen in januari 1941 de waargenomen verhanglijnen, in een situatie waarbij over een gedeelte van de rivier een vast ijsdek aanwezig is, zijn aangegeven. De opstuwung is in dit geval merkbaar over circa 20 km, maar uiteraard is deze maat afhankelijk van de grootte van $h_2' - h_1$. In bovenstroomse richting zal de waterstandsverhoging tengevolge van de opstuwung vrij snel afnemen.

2.6 Ruwheden bij aanwezigheid van vast ijsdek

De totale ruwheid van een rivier waarbij aan het oppervlak een vast ijsdek aanwezig is, kan worden gedacht te zijn opgebouwd uit een tweetal bijdragen, namelijk de ruwheid die al aanwezig was vóórdat het ijsdek aanwezig was en de additionele ruwheid veroorzaakt door het ijsdek. Deze additionele ruwheid zal grotendeels worden veroorzaakt door de onregelmatige onderzijde van het ijsdek (als gevolg van het in elkaar schuiven en onder het vaste ijsdek zuigen van stukken drijfijis). Daarnaast is het niet uitgesloten, dat de aanwezigheid van een vast

ijsdek aan het oppervlak van de waterloop ook de oorspronkelijke ruwheid kan wijzigen, bijvoorbeeld doordat de beddingvormen zich gaan aanpassen aan de veranderende randvoorwaarden.

In het volgende zal bij de bespreking van de ruwheid van de rivier met vast ijsdek geen onderscheid worden gemaakt tussen de ruwheid van het ijsdek en de aanpassing van de oorspronkelijke ruwheid, omdat dit voorlopig nog niet goed mogelijk is. Het verloop van de grootte van de verhouding C_2/C_1 zal worden nagegaan, zoals dat aan de hand van waarnemingen is bepaald voor de ijsperiode 1962-63. Tijdens deze periode waren de drie Rijntakken geheel met vast ijs bedekt. Ook was er een vast ijsdek op de Bovenrijn. Het is mogelijk gebleken (zie Oudshoorn [15]) om de verdeling van de Bovenrijnafvoer over de drie takken, die afweek van de normale verdeling, redelijk nauwkeurig te bepalen. Daar per tak behalve de afvoer (Q) ook de andere termen (B , h_2' en i) bekend waren, was het mogelijk om de waarde van C_2 te bepalen. De waarde van C_1 is bepaald als de Chézy-koëfficiënt van het riviergedeelte bij dezelfde (plaatselijke) afvoer in de desbetreffende tak.

In figuur 12 is het verloop van de verhouding C_2/C_1 voor enige riviergedeelten weergegeven. Uit deze figuur kan het volgende worden afgeleid (Oudshoorn [15]):

- 1 de C_2 -waarden zijn aanzienlijk lager dan de waarden van C_1 ;
 - 2 de verhouding C_2/C_1 is het kleinst direct na de vorming van het vaste ijsdek;
 - 3 tijdens de ijsperiode neemt de waarde van de verhouding C_2/C_1 langzaam toe.
- Uit een meer gedetailleerde analyse bleek voorts, dat:
- 4 de waarde van C_2/C_1 een tendens tot stijging vertoont tijdens een korte dooi-periode met relatief hoge watertemperaturen (enkele °C boven nul); als na zulk een periode van dooi de temperatuur weer daalde, dan nam de waarde van C_2/C_1 niet weer af (Oudshoorn [15]);
 - 5 nadat een ijsdek met een relatief hoge waarde van C_2/C_1 in beweging was gekomen en in kleine stukken was uiteengevallen, vervolgens bij het weer vastzetten meer benedenstrooms weer een lagere waarde van C_2/C_1 werd geconstateerd (van Houte [6]).

Het lijkt erop, dat alsof bij wat hogere watertemperaturen ijs van de onderzijde van het dek afsmelt, maar dan op een zodanige wijze, dat de ruwheid van de onderzijde afneemt. Zet het ijs zich weer vast nadat het enige tijd in beweging is geweest, dan neemt de ruwheid weer toe, waarschijnlijk doordat het ijs opnieuw in elkaar wordt geschoven.

Figuur 13 geeft de verhoging van de waterstand, die op de beschouwde rivierge-
deelten is waargenomen over dezelfde periode. Vergelijking van figuur 12 in
kombinatie met figuur 10 en figuur 13 leidt tot de konklusie, dat met de figu-
ren 12 en 10 te hoge waterstanden worden voorspeld. Dit wordt veroorzaakt door-
dat bij het samenstellen van figuur 12 waarschijnlijk geen rekening is gehouden
met de dikte van het ijsdek.

Gewezen dient te worden op de invloed van de lozing van koelwater door centrales
in Nederland. Deze invloed is plaatselijk duidelijk merkbaar, maar uiteraard
ook over langere afstand. Doordat bij het punt van lozing de menging niet on-
middellijk volledig zal zijn, zal bij de centrale slechts over een bepaalde
breedte van de rivier een wak ontstaan. Een dergelijk wak kan een lengte van ve-
le kilometers hebben. Meer benedenstrooms zal de menging zijn toegenomen en af-
hankelijk van o.m. de relatieve verhouding van het koeldebiet en het rivierde-
biet zal aldaar het wak over de gehele breedte van de rivier aanwezig zijn, dan
wel de rivier weer zijn dichtgevroren. Over het gedeelte waar het wak aanwezig
is, zal de wrijving geringer zijn, zodat de opstuwing zal afnemen. Een derge-
lijke lozing resulteert dus o.m. in minder hoge waterstanden bij dezelfde af-
voer.

2.7 Afvoerverloop en afvoerverdeling

Blijkens vele waarnemingen neemt tijdens een ijsperiode de afvoer van de Boven-
rijn af. Dit wordt ondermeer veroorzaakt doordat 1) minder grondwater afvloeit
naar de zijrivieren van de Rijn, 2) eventuele neerslag in de vorm van sneeuw
zal zijn en niet of nauwelijks tot een toename van de afvoer zal bijdragen, en
3) berging bovenstrooms (tengevolge van verhoging van waterstand door een vast
ijsdek) tot debietverlaging leidt.

Wordt op de Nederlandse Rijntakken en de Bovenrijn eveneens een vast ijsdek ge-
vormd, dan zal ook hier berging van afstromend water optreden. Dit resulteert
in (tijdelijk) lagere afvoeren meer benedenstrooms. Een globale rekensom kan
dit illustreren. Wordt de totale lengte van de Rijn en de Rijntakken gesteld op
300 km en de breedte op 200 m en wordt voorts verondersteld, dat in 5 dagen een
gemiddelde waterstandsverhoging ($h_2' - h_1$) optreedt van 1 m, dan houdt dit in een
(tijdelijke) vermindering van de afvoer van de drie takken met circa $140 \text{ m}^3/\text{s}$.
Tijdens een ijsperiode kan dit overeenkomen met circa 15% van de totale afvoer.

Behalve de afvoer zelf, zal ook de afvoerverdeling bij de splitsingspunten worden gewijzigd. Dit wordt veroorzaakt doordat de ruwheid (en de hydraulische straal) van de beide takken zich zal wijzigen, konform het gestelde in 2.5. De wijziging zal met name belangrijk zijn als op één van de twee takken al een vast ijsdek is en op de andere nog niet. De tak zonder ijsdek zal dan onevenredig veel water te verwerken krijgen. Een en ander wordt wederom geïllustreerd aan de hand van de situatie tijdens de ijsperiode 1962-63. Daar het Nederlandse gedeelte van de Bovenrijn ook bedekt was met vast ijs, was het noodzakelijk om uit te gaan van de waarneming aan de niet beïnvloede peilschaal te Ruhrort in Duitsland. De afvoer te Ruhrort is vervolgens gecorrigeerd voor berging door opstuwung om aldus de afvoer van de Bovenrijn bij Lobith te verkrijgen. Tijdens de vorming van het vaste ijsdek in de 2de helft van januari nam de afvoer in de benedenloop van de Rijntakken door berging af met $150 \text{ à } 200 \text{ m}^3/\text{s}$. Hierdoor werd een ernstige zoutwaterindringing in de Rotterdamse Waterweg veroorzaakt (zie het ijsverslag van 1962-63 [18]). In figuur 14 is het verloop van de Bovenrijn-afvoer weergegeven als funktie van de tijd. Tevens is ingetekend de waargenomen afvoeren van de Waal, de Nederrijn en de IJssel. Ter vergelijking is aangegeven de afvoer van elk van deze takken, die opgetreden zou zijn als er geen vast ijsdek was geweest. Ten aanzien van de afvoerverdeling kan worden gekonkludeerd, dat de Waal maximaal circa $200 \text{ m}^3/\text{s}$ minder dan in de toestand zonder ijs heeft afgevoerd en dat deze hoeveelheid, min of meer gelijkelijk verdeeld, extra werd afgevoerd over de beide andere Rijntakken (zie figuur 14). In plaats van een verdeling volgens de verhouding 6:2:1, was de verdeling tijdens de aanwezigheid van vast ijs dus circa 4:2:1.

Een faktor van belang is nog niet genoemd. Tijdens de laatste ijswinters zijn op bepaalde plaatsen langs de rivier plaatselijk steeds open plekken aanwezig geweest, als gevolg van de lozing van koelwater. Een van die plaatsen is op de IJssel direkt benedenstrooms van het splitsingspunt Westervoort, veroorzaakt door de lozing van koelwater van de Enka te Arnhem. Een dergelijke open plek heeft uiteraard invloed op de afvoerverdeling, daar over de lengte van het wak de opstuwung af zal nemen. Als gevolg hiervan zal de afvoer op de IJssel relatief groter zijn geweest dan het geval zou zijn geweest als op beide takken een vast ijsdek aanwezig was geweest.

Als de vorstperiode voorbij is en de dooi invalt, dan zal dit gepaard gaan met een toename van de afvoer. De toename treedt op om een aantal redenen:

- 1 het door opstuwung geborgen water komt tot afstroming,

- 2 de toestroming van grondwater zal weer toenemen,
- 3 de neerslag, die in het stroomgebied als sneeuw is gevallen, zal smelten en gedeeltelijk min of meer direkt naar de rivier afstromen,
- 4 de dooi gaat meestal gepaard met neerslag, vaak in de vorm van regen.

Komt de hoogwatergolf langs terwijl op bepaalde riviergedeelten nog ijs aanwezig is, dan kan dit aanleiding geven tot zeer hoge waterstanden. In de overigens weinig imposante ijswinter 1940-41 is dit voorgekomen. De afvoer te Lobith nam toen nog tijdens de vorstperiode (die eindigde op 7 februari 1941) vrij snel toe. Op 20 januari werd in Lobith de hoogste waterstand van dat jaar waargenomen, bij een afvoer van circa 8000 m³/s. De afvoer op de IJssel steeg maximaal tot circa 1250 m³/s. Doordat op de benedenloop van de IJssel nog een vast ijsdek aanwezig was, werden zeer hoge waterstanden bereikt (zie figuur 15). Te Kampen werd de waterstand van 1926 (N.A.P. +2,27 m) nog met 0,02 m overschreden.

Opgemerkt moet worden, dat in de ijswinter 1940-41 de toestand nog vrij gunstig was, omdat noch de Waal, noch de Nederrijn met vast ijs bedekt waren. Van Wijngaarden [27] heeft een aantal voorwaarden opgesomd, waarbij een nog ongunstiger situatie kan optreden. Met name een snel invallende en hevige dooi kan tot hoge waterstanden leiden, omdat dan de mogelijkheid aanwezig is, dat de vaste ijsdekken op Waal en Nederrijn nog aanwezig zijn.

3 Verandering van verschijnselen in vergelijking met vroeger

3.1 Inleiding

Blijkens Wemelsfelder [23] is sinds 1854 het aantal ijsdagen per jaar afgenomen. Hij baseerde zijn uitspraak op gegevens over de ijsbezetting op de IJssel tot en met de winter 1947-48. In de paragraaf 3.2 is nagegaan of deze ontwikkeling zich ook in de periode van 1948-49 tot en met 1971-72 (het laatste jaar waarover een ijsverslag is verschenen) heeft voortgezet. Omdat dit het geval blijkt te zijn, is vervolgens getracht om na te gaan waardoor deze verandering is veroorzaakt. In de paragrafen 3.4 en 3.5 wordt achtereenvolgens de eventuele klimatologische veranderingen en de lozing van koelwater besproken. Daar het er naar uitziet, dat vooral de lozing van koelwater de laatste decennia het aantal ijsdagen heeft doen verminderen, is voorts in paragraaf 3.5 gepoogd om door een bepaalde ordening van de gegevens over vorming van en verdwijnen van drijfijis en vast ijs deze invloed ook aan te tonen. De invloed van kunstmatige ijsoprui- ming wordt in paragraaf 3.3 besproken, terwijl tenslotte in de laatste para- graaf van dit hoofdstuk op de invloed van de Deltawerken en enkele andere ri- vierwerken wordt ingegaan.

3.2 IJsbezetting in de periode 1854-1972

Wemelsfelder [23] heeft een diepgaande analyse van de ijsbezetting van de grote rivieren in Nederland gemaakt. Om na te gaan of de gemiddelde ijsbezetting in de periode 1854-1948 is toegenomen dan wel is afgenomen, heeft hij het voort- schrijdend gemiddelde van het aantal ijsdagen in vijf opeenvolgende winters uit- gezet als functie van de tijd. Hij beschouwt daarbij alleen de gegevens, die over de IJssel zijn verzameld om de volgende redenen:

- de IJssel is een goede index voor de hinder, die de scheepvaart ondervindt, "omdat het voorkomen van drijfijis op deze rivier vrijwel steeds overeenkomt met algemene stremming van de scheepvaart op de grote kanalen",
- op de IJssel zijn geen ingrijpende rivierwerken uitgevoerd,
- ijsbreken, dat eventueel tot vervroegde ijsafvoer kan leiden, heeft op de IJssel nimmer plaats gevonden.

Als bijkomend argument kan nog worden genoemd, dat, blijkens het gestelde in paragraaf 2.7, de waterstanden op de IJssel zeer aanzienlijk kunnen stijgen door de aanwezigheid van vast ijs.

Daar inmiddels ook gegevens ter beschikking staan over de periode 1948-1972 (het meest recente ijsverslag dat voor dit vooronderzoek is doorgenomen betreft de winter 1971-72), was het mogelijk de grafiek van Wemelsfelder [23] nog enigszins uit te breiden. Figuur 16 geeft het resultaat, zijnde het verloop van het voortschrijdende gemiddelde over 5 winters van het aantal ijsdagen per winter over de periode 1854-1972. Uit deze grafiek blijkt duidelijk, dat de afname van de ijsbezetting, waartoe door Wemelsfelder [23] werd gekonkludeerd, zich heeft voortgezet in de periode 1948-1972.

Om na te gaan wat de vermindering van de ijsbezetting veroorzaakt kan hebben, onderzoekt Wemelsfelder een aantal mogelijke oorzaken:

- de invloed van de scheepvaart,
- de uitvoering van rivierwerken,
- invloed van verontreiniging,
- klimaatwijziging.

Ten aanzien van de eerste drie punten merkt Wemelsfelder op dat, doordat als criterium gebruikt is het optreden van vast ijs dan wel drijfijis op de IJssel, deze aspecten geen rol kunnen spelen. Scheepvaart zal wel de vorming van een vast ijsdek kunnen vertragen, maar heeft een te verwaarlozen invloed op de vorming van drijfijis. Ijsbrekers zijn nooit gebruikt op de IJssel, terwijl rivierwerken, die overigens op de IJssel maar van beperkte omvang zijn geweest, het optreden van drijfijis niet kunnen voorkomen. Bij het nagaan van de invloed van de verontreiniging beperkt Wemelsfelder zich tot de verlaging van het vriespunt door opgeloste stoffen. De verlaging van het vriespunt blijkt circa $0,05^{\circ}\text{C}$ te zijn. Daar 1°C gemiddelde wintertemperatuur overeenkomt met 15 ijsdagen per winter, kan de verlaging van het vriespunt slechts verantwoordelijk zijn voor een vermindering van circa 1 ijsdag per jaar. De voornaamste oorzaak voor de vermindering van het aantal ijsdagen per jaar is dan ook volgens Wemelsfelder [23] een verandering in het klimaat. Dit zal in paragraaf 3.4, mede in het licht van meer recente informatie, nader worden gezien. In paragraaf 3.5 zal voorts worden nagegaan wat de invloed is van de verontreiniging van de rivier met afvalwarmte.

3.3 Kunstmatige ijsopruiming

Kunstmatige ijsopruiming kan worden beschouwd als een tijdelijke maatregel ter verbetering van de ijsafvoer (of voor het mogelijk maken van scheepvaart). Dit in tegenstelling tot permanente verbeteringen in de toestand, die vooral kunnen worden bereikt door rivierverbeteringen. Dit soort verbeteringswerken, vooral gericht op verbetering van de ijsafvoer, zijn in Nederland al in de 19de en in het begin van de 20ste eeuw uitgevoerd. Genoemd kunnen worden de eerste normalisatie van de Waal en de verlegging van de mond van de Maas in 1908.

Verschillende vormen van kunstmatige ijsopruiming kunnen worden onderscheiden:

- 1 inzet van ijsbrekers,
- 2 gebruik van explosieven,
- 3 bevordering van de warmteopname van het ijs.

De derde maatregel is bedoeld om een sneller afsmelten te veroorzaken door het ijsdek of de ijsschotsen te bestrooien met donker poeder. Het effect van deze maatregel is sterk afhankelijk van de meteorologische toestand, met name de hoeveelheid zonneschijn. Toepassing in Nederland zou waarschijnlijk weinig succesvol blijken [28].

Het breken van ijs door ijsbrekers of door het gebruik van explosieven heeft tot doel om van een vast ijsdek kleinere stukken los te maken, die gemakkelijker door de rivier kunnen worden afgevoerd. IJsdammen worden geëlimineerd door hun structuur te verbreken.

Williams [28] formuleert een aantal eisen waaraan moet worden voldaan als tot kunstmatige ijsopruiming wordt overgegaan:

- 1 goede voorbereiding en organisatie vóórdat aan het nemen van maatregelen moet worden begonnen,
- 2 een relatief klein riviergedeelte waarover het ijs moet worden gebroken,
- 3 mogelijkheid om het gebroken ijs in benedenstroomse richting af te voeren.

Wordt dit bezien tegen de achtergrond van de Nederlandse omstandigheden, dan kan het volgende worden opgemerkt:

- ad 1) In landen als Hongarije en Polen, waar jaarlijks grote problemen met ijs op rivieren worden ervaren, is een uitgebreide organisatie aanwezig, ([1] en [10]). Goed opgeleid en ervaren personeel is beschikbaar voor het werken met ijsbrekers en het toepassen van explosieven. Daar de

laatste strenge winter die van 1962-63 was, is in Nederland in ieder geval de ervaring enigszins teruggelopen.

- ad 2) Reeds in een vroeg stadium werden in Nederland ijsbrekers ingezet om te voorkomen, dat het ijs zich in het benedengebied vastzet. Gebeurt dit toch, dan breidt het ijsdek zich snel uit. Breken van ijs kost relatief veel tijd. In één werkdag slagen drie ijsbrekers er in om circa 5 km rivier van 250 m breed te breken. In Hongarije is de snelheid van ijsbrekers op de Donau ongeveer even groot [10]. Gezien de snelheid van aangroei van een vast ijsdek (circa 1 km/uur) zal, zo gauw het ijsdek zich enigszins heeft vastgezet, het niet meer mogelijk zijn de rivier open te houden. Opruimen met explosieven van grote oppervlakken ijs is erg duur ten opzichte van opruimen met ijsbrekers (van der Kley [5]). Het gebruik van explosieven dient daarom altijd beperkt te blijven tot het opruimen van knelpunten als ijssdammen.
- ad 3) Breken van ijs heeft nauwelijks zin als de schotsen niet in benedenstroomse richting kunnen worden afgevoerd. Is benedenstrooms nog een vast ijsdek aanwezig, dan zullen de losgemaakte schotsen daar tegenaan worden geschoven en aldus weer bijdragen aan de verdere toename van het vaste ijsdek. Dit houdt in, dat ijsbreken op de IJssel niet zinvol is. In noodgevallen is het opruimen van ijssdammen, vooral met behulp van explosieven, te overwegen nog voordat het benedenstrooms gelegen ijs in beweging is. Dit is vooral van belang als de ijssdam vrijwel de gehele doorstroomopening blokkeert en aldus grote waterstandsverhogingen veroorzaakt.

In de rest van deze paragraaf zal nader worden ingegaan op de beide nog niet in detail besproken methoden van kunstmatige ijsopruiming, te weten het inzetten van ijsbrekers en het gebruik van explosieven.

Het inzetten van ijsbrekers is onder meer besproken door van Wijngaarden [27]. Aan de hand van de verschillende ijsverslagen van de ijswinters vanaf 1890-91 maakt hij duidelijk, dat aanvankelijk weinig succes werd geboekt. Pas vanaf 1928-29, toen begonnen werd met vroegtijdig breken op de Nieuwe Merwede en de Waal, zijn aantoonbaar duidelijke resultaten geboekt. Werd vroeger pas aangevangen met breken als er enige tijd dooi was geweest, nu is de tactiek om vanaf het begin van de ijsperiode via breken te proberen het ijs zo lang mogelijk in beweging te houden. Elk etmaal, dat ijs zich later vastzet, betekent, dat het

vaste ijsdek zich uiteindelijk circa 25 km minder ver stroomopwaarts zal uitstrekken (uitgaande van een aangroeisnelheid van het vaste ijsdek van circa 1 km/uur). Door als het ijs zich vastzet onmiddellijk te gaan breken, wordt tevens bereikt, dat op het moment van het invallen van de dooi en bij de daaropvolgende dooi het nog aanwezige ijsdek minder ver benedenstrooms aanwezig zal zijn. Door van Wijngaarden [27] wordt aannemelijk gemaakt, dat in het verleden door gericht ijsbreken het vaste ijsdek van 1 dag tot circa 1 week eerder verdwenen was dan het geval zou zijn geweest als géén ijsbrekers werkzaam waren geweest.

Het opruimen van ijsdammen met behulp van ijsbrekers is vaak een tijdrovende en gevaarlijke taak. Het wordt veelal bemoeilijkt door de aanwezigheid van de al in paragraaf 2.4 genoemde zandruggen, die direkt benedenstrooms van de ijsdammen worden afgezet. Deze afzettingen noodzaken de ijsbrekers om zeer behoedzaam te manoeuvreren en soms is zelfs niet voldoende vaardiepte beschikbaar. Het opruimen van een enkele ijsdam heeft in het verleden vaak meerdere dagen in beslag genomen.

Explosieven zijn met wisselend succes toegepast op de Rijntakken vanaf het einde van de 19de eeuw (zie van der Kley voor een historisch overzicht [9]). Pas in de zestiger jaren zijn in Nederland wat meer systematische proeven gedaan naar het effect van een explosie op een ijsdek (van der Kley [9]). Het betreft hier overigens proeven met een ijsdek in dikte variërend tussen globaal 0,10 en 0,65 m. Meer recent zijn door Frankenstein en Smith [3] richtlijnen gepubliceerd, waaruit de optimale plaats van de springstof (enige afstand onder het ijsdek) en de afmeting van het gesprongen gat kan worden bepaald. In aanhangsel B is een vergelijking gemaakt tussen het werk van van der Kley [9] en dat van Frankenstein en Smith [3]. Uit deze vergelijking blijkt, dat:

- 1 de resultaten van van der Kley niet in tegenspraak zijn met de richtlijnen van Frankenstein en Smith ten aanzien van de optimale diepte van plaatsing van de lading,
- 2 de straal van de gaten, die ontstaan zijn bij de proeven van van der Kley, aanzienlijk groter is dan zou worden gevonden uitgaande van de door Frankenstein en Smith gegeven formule.

Terzijde zij nog opgemerkt, dat van der Kley [9] ook proeven heeft gedaan met ladingen, die bovenop de ijslaag waren geplaatst. Hoewel deze methode het voor-

deel heeft, dat van te voren geen gat in het ijs gemaakt hoeft te worden (door zagen of met een kleine explosie), blijkt zij aanzienlijk minder effectief. Opgemerkt wordt nog, dat in een Hongaars handboek [1] ladingen die op het ijs zijn geplaatst zijn beschreven, die zodanig zijn gekonstrueerd, dat de kracht van de explosie vooral naar beneden is gericht. Hetzelfde geldt overigens voor de aldaar beschreven ladingen voor onder water, waarvan de kracht naar boven wordt gericht. Een mogelijke oorzaak van het feit, dat door van der Kley [9] grotere kraters werden gekonstateerd dan volgt uit de richtlijnen van Frankenstein en Smith [3] kan gelegen zijn in het gebruikte springmiddel. Door van der Kley [8,9] zijn bij de proeven op het IJsselmeer zowel niet-brisante (buskruit) als brisante springstoffen (dynamiet, schietkatoen en TNT (of trotyl)) gebruikt. De resultaten van de brisante springstoffen waren aanzienlijk beter (zie figuur 3 van aanhangsel B). Frankenstein en Smith [3] melden, dat vergelijkende proeven tussen TNT, dynamiet en ANFO (een mengsel van 6 gewichts % dieselolie met ammoniumnitraat en ontstoken met een krachtig middel als TNT of dynamiet) hebben aangetoond, dat ongeveer gelijke kraters werden verkregen onder gelijkblijvende omstandigheden. ANFO wordt aanbevolen voor het opruimen van ijs, onder meer omdat het goedkoop en veilig in het gebruik is. In het Hongaarse handboek [1] worden eveneens springstoffen beschreven. Zij bestaan eveneens grotendeels uit ammoniumnitraat (77 tot 84%), gemengd met TNT, nitroglicerine en andere stoffen. Blijkbaar zijn de in Nederland gebruikte springstoffen niet krachtiger dan die in de Verenigde Staten worden toegepast. Het daar gebruikte ANFO is wel goedkoper en blijkbaar veiliger. Overwogen dient te worden dit explosiemiddel ook in Nederland te gebruiken.

De proeven van van der Kley [9] en van Frankenstein en Smith [3] zijn uitgevoerd met een vast ijsdek, met dikten van circa 0,10 tot circa 1,00 m en een tamelijk regelmatige verschijning. De grootste problemen op de rivieren worden echter ervaren bij het opruimen van ijssdammen, welke gemakkelijk een dikte van 4 à 6 m kunnen bereiken. De resultaten van de proeven van van der Kley [9] en ook latere van Frankenstein en Smith [3] zijn dus bepaald niet zonder meer te vertalen naar de omstandigheden optredend bij ijssdammen.

De ervaringen verkregen bij het opruimen van ijssdammen met behulp van explosieven lopen nogal uiteen. Van der Kley [9] noemt de volgende gedeeltelijk door hem zelf ervaren nadelen:

- 1 Voor het opruimen van zware ijssdammen zijn grote hoeveelheden springstof nodig, terwijl i.v.m. de schade aan gebouwen, dijken en konstrukties in de om-

geving slechts een beperkte hoeveelheid tegelijk kan worden gesprongen; een en ander noodzaakt het betreden van de ijsdam na een explosie om een nieuwe lading aan te brengen, hetgeen gevaarlijk is.

- 2 Explosieven zijn het meest effectief wanneer de lading onder het ijs wordt aangebracht. IJsdammen zijn meerdere meters dik en het aanbrengen van gaten erin door zagen of door explosies is erg moeilijk.
- 3 De explosies maken ronde kraters in het ijs met erg weinig scheuren in het ijs er omheen. Het gevolg hiervan is, dat het werk van ijsbrekers nauwelijks wordt verlicht.
- 4 Beschietsen of bombarderen van ijsdammen lijkt aantrekkelijk, omdat het gevaarlijke werk van personeel op ijsdammen wordt vermeden. De ervaringen met het bombarderen van ijs door Duitsers in de winter van 1941-1942 zijn echter een waarschuwing: zes bommen explodeerden niet. Deze blindgangers zullen een gevaar voor de scheepvaart opleveren.

Van der Kley konkludeert dan ook, dat het gebruik van ijsbrekers bij het opruimen van ijsdammen altijd de voorkeur verdient.

Frankenstein en Smith [3] konkluderen uit hun ervaringen met het opruimen van ijsdammen met explosieven, dat deze methode effectief is. Over de karakteristieken van de ijsdammen, die door hen zijn behandeld, wordt evenwel geen informatie verstrekt, maar de indruk bestaat uit foto's en tekst (met name over de wijze van aanbrengen van ladingen), dat het geen al te zware ijsdammen betreft. Volgens Kontur [10] heeft beschietsen en bombarderen weinig effect en wordt het gebruik van explosieven in Hongarije alleen voor de bescherming van objekten in kleinere rivieren gebruikt. IJsbreken is daar de algemeen gebruikelijke praktijk op de Donau en de Tisza, terwijl op sommige kritieke plaatsen gesprongen wordt.

Resumerend kan worden gesteld, dat kunstmatige ijsopruiming, en dan vooral ijsbreken, tengevolge heeft gehad, dat het vaste ijs op de Waal en de Nederrijn een aantal dagen eerder is losgeraakt. Als tijdig wordt aangevangen met het breken zal dit waarschijnlijk ook in de toekomst zo zijn. De kans op het samenvallen van een hoge afvoer en een vast ijsdek op de Waal en Nederrijn is daardoor verkleind. Op de IJssel is ijsbreken niet zinvol. Het opruimen van ijsdammen kan mogelijk bespoedigd worden door het gebruik van explosieven, maar de tijdwinst, die hierdoor wordt verkregen, lijkt niet groot te zijn. Toepassing van alleen explosieven om dreigende kalamiteiten te voorkomen tengevolge van

zware ijsdammen kan soms noodzakelijk zijn als ijsbrekers niet of niet snel genoeg de ijsdam kunnen bereiken.

3.3 Klimaatsveranderingen

Wemelsfelder [23] citeert een beschouwing van Labrijn [11], waarin vermeld staat, dat sinds 1800 een vrij regelmatige stijging van de wintertemperatuur plaatsvindt (gepaard gaande met een overeenkomstige verlaging van de zomertemperatuur). Vervolgens stelt Wemelsfelder uit het door Labrijn in tabelvorm gegeven waarnemingsmateriaal een overzicht samen van het voortschrijdend gemiddelde over 5 winters van de temperaturen over de maanden december, januari en februari en hij zet dit uit als functie van de tijd voor de periode vanaf 1735. Dezerzijds zijn de korresponderende gemiddelde temperaturen tot en met de winter 1974-75 opgevraagd bij het KNMI en met behulp van deze cijfers is de grafiek van Wemelsfelder uitgebreid (zie figuur 17). Een soortgelijk beeld wordt verkregen als het voortschrijdend gemiddelde van het aantal vorstdagen wordt uitgezet als functie van de tijd.

Uit figuur 17 kan het volgende worden afgeleid:

- 1 tot circa 1800 is de gemiddelde wintertemperatuur (de gemiddelde temperatuur over de maanden december, januari en februari) afgenomen;
- 2 na 1800 is weer een stijging van de wintertemperatuur waar te nemen, globaal tot aan 1920;
- 3 na 1920 is de gemiddelde wintertemperatuur min of meer gelijk gebleven.

Uitgaande van een stijging van de gemiddelde wintertemperatuur tussen 1854 en 1922 van circa $0,7^{\circ}\text{C}$ en aannemende, dat 1°C stijging overeenkomt met 15 ijsdagen per jaar minder, komt Wemelsfelder [23] op een (berekende) vermindering van het aantal ijsdagen van circa 10. Om de in die periode gekonstateerde afname van 17 dagen (dus 7 dagen meer) te verklaren, voert Wemelsfelder aan, dat nog andere meteorologische factoren dan de luchttemperatuur van invloed zijn (zie ook paragraaf 2.2).

Hoewel na 1920 de gemiddelde wintertemperatuur min of meer gelijk gebleven is, is het aantal ijsdagen sindsdien met nog eens circa 10 gedaald. Dit kan blijkbaar niet aan een klimaatswijziging worden geweten.

3.4 Lozing van koelwater

Onlangs zijn de resultaten gepubliceerd van een globaal onderzoek naar de mate waarin de temperatuur van het Rijnwater bij Lobith is toegenomen vanaf 1912 tot 1972. Hier zal een korte samenvatting worden gegeven. Voor meer informatie raadplege men het originele artikel (Wessels [26]).

Een vergelijking is gemaakt tussen de gemeten watertemperatuur te Lobith (T_w) en de temperatuur, die het water aan zou nemen door middel van "energieuitwisseling met de atmosfeer". Deze natuurlijke evenwichtstemperatuur (T_e) is berekend volgens:

$$T_e = T_n + \frac{H^*}{L \cdot f(w) \cdot \left(\frac{de}{dT} + \gamma\right) + 4 \sigma \cdot T_n^3} \quad (3.1)$$

- waarin T_n = natte bol temperatuur
 H^* = globale straling
 L = verdampingswarmte water
 $f(w)$ = functie van windsnelheid w op 2 m hoogte
 e = verzadigingsdampspanning
 γ = 0.486 mm Hg/ $^{\circ}$ C = psychrometerkonstante
 σ = Stefan-Boltzmann konstante

Zowel T_w als T_e zijn berekend als driemaandelijkse gemiddelden. Hoewel Wessels [26] bij zijn beschouwingen zowel de zomer- als de wintermaanden betreft, zal hier alleen op de situatie in de wintermaanden worden ingegaan.

In figuur 18, overgenomen uit Wessels [26], is voor de periode van 1912-1972 de grootte van het driemaandelijkse gemiddelde van $T_w - T_e$ (het verschil tussen de werkelijke watertemperatuur en de temperatuur, die het water aan zou nemen na oneindig lange tijd) uitgezet als functie van de tijd. Bij bestudering van figuur 18 valt een aantal zaken op:

- 1 Uitschieters met hoge waarden van $T_w - T_e$ blijken voor te komen; bij een nadere analyse is gebleken, dat deze uitschieters optraden tijdens ijswinters (de waarde van T_w kan niet dalen beneden 0° C); de cijfers bij de uitschieters geven aan het aantal ijsdagen op de IJssel.

2 Sinds 1940 is de watertemperatuur in de winter door niet-meteorologische oorzaken duidelijk gestegen.

Wessels [26] heeft vervolgens nagegaan of de relatieve verhoging van de watertemperatuur inderdaad door koelwater kan zijn veroorzaakt. Daartoe heeft hij een grafiek samengesteld (zie figuur 19), waarin de waarde van $T_w - T_e$ (per 3 maanden) is uitgezet tegen de grootte van de gemiddelde afvoer over de beschouwde drie maanden. Tevens is in deze grafiek ingetekend het verband tussen $T_w - T_e$ en de rivierafvoer voor de periode 1912-1940, zoals dat is afgeleid door het aannemen van een lineaire regressie.

De ingetekende waarden van $T_w - T_e$ voor de jaren 1961 tot en met 1972 liggen, zoals ook al uit figuur 18 bleek, aanzienlijk boven de lijn voor de jaren 1912-40. Tevens blijkt, dat de grootte van het temperatuursverschil toeneemt bij afnemende afvoer. Berekend kan worden hoeveel de temperatuursverhoging zal zijn als aan een rivier met een bepaalde afvoer een hoeveelheid warmte wordt toegevoerd. Bij een afvoer van $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ en een belasting van 10.000 MW blijkt dit circa $2,4^\circ\text{C}$ te zijn. Door ook voor andere afvoeren de waarde van de temperatuursverhoging uit te rekenen, is in figuur 19 een lijn in te tekenen, die de verhoging aangeeft van de temperatuur (t.o.v. de jaren 1912-40) tengevolge van de lozing van 10.000 MW . In figuur 19 is dit ook gebeurd voor een lozing van 20.000 MW .

Uit figuur 19 kan worden gekonkludeerd, dat de watertemperatuur van de Rijn bij Lobith sinds 1940 aanzienlijk is toegenomen en dat de belasting met afvalwarmte aldaar circa 15.000 MW bedraagt. Bij een afvoer van $1000 \text{ m}^3/\text{s}$, zoals die regelmatig optreedt in vorstperioden, bedraagt de temperatuursverhoging dan circa $3,5^\circ\text{C}$. Door Wemelsfelder [25] is aangetoond, dat de Rijn en de Rijntakken voor de afgifte van warmte aan de lucht zogenaamd "snelle rivieren" zijn, hetgeen inhoudt, dat slechts een klein gedeelte van de in Lobith aanwezige extra warmte aan de atmosfeer wordt afgestaan. Bij de uitmonding van de niet-gestuwde Rijntakken zal de temperatuur bij $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ nog circa $2,5^\circ\text{C}$ hoger zijn dan in de periode 1912-1940. De afname in Nederland komt overeen met circa 20% van de in Lobith gekonstateerde temperatuursverhoging van het water.

Uitgaande van de vuistregel, dat elke $^\circ\text{C}$ overeenkomt met circa 15 ijsdagen, moet gekonkludeerd worden, dat de lozing van koelwater in het duitse gedeelte

van het stroomgebied verantwoordelijk is voor een afname van het aantal ijsdagen per jaar met ongeveer 35. Gezien het verloop van het aantal ijsdagen per jaar (zie figuur 16) zou dit betekenen, dat het 5-jarig voortschrijdend gemiddelde van het aantal ijsdagen per jaar negatief zou worden. Dit kan uiteraard niet. Wel kan gesteld worden, dat de afname van het aantal ijsdagen vanaf 1940, voor zover niet aan een klimaatswijziging toe te schrijven, veroorzaakt wordt door de lozing van afvalwarmte. Dit houdt in, dat in de toekomst het aantal ijsdagen per jaar gering zal zijn, zolang:

- 1 geen zodanige klimaatswijziging optreedt, dat de gemiddelde wintertemperatuur weer lager wordt,
- 2 de lozing van afvalwarmte niet minder wordt dan ze was in de periode 1960-1972.

Toename van de lozing van afvalwarmte of een nog verder gaande verhoging van de gemiddelde wintertemperatuur zal leiden tot een nog verder gaande afname van het aantal ijsdagen.

Als inderdaad de watertemperatuur in de afgelopen decennia duidelijk is gestegen, dan zou dit merkbaar moeten zijn aan de snelheid, waarmee zich drijfijis vormt en aan de snelheid, waarmee het ijsdek of het drijfijis weer verdwijnt. Helaas zijn maar weinig waarnemingen ter beschikking om dit te controleren.

Alvorens dit toch te pogen zal eerst kwalitatief de verwachte invloed van verhoging van de gemiddelde wintertemperatuur enerzijds en van verhoging van de watertemperatuur anderzijds worden aangegeven. Als de gemiddelde temperatuur van de lucht in de winter stijgt, dan zal naar verwacht mag worden het aantal en de lengte van de vorstperioden afnemen. Dit houdt in, dat ook het aantal ijswinters en de lengte ervan zal afnemen. Verhoging van de temperatuur zal echter een te verwaarlozen invloed hebben op de snelheid van respectievelijk het optreden van ijs en het verdwijnen ervan. Geheel anders ligt dat met de toename van de watertemperatuur door de lozing van afvalwarmte. Door deze toename zal de lengte van de vorstperiode niet worden beïnvloed. Als het verloop van de luchttemperatuur hetzelfde is gebleven, zal het langer duren voordat drijfijis op zal treden. Omdat het vaste ijsdek en het drijfijis ook eerder weer verdwenen zullen zijn, zal de lengte van de ijswinters afnemen.

Om het bovenstaande te toetsen aan het voorhanden zijnde waarnemingsmateriaal, is een aantal figuren samengesteld. Allereerst is nagegaan hoe de snelheid van

het optreden van drijfijis op de IJssel afhankelijk is van de gemiddelde luchttemperatuur tijdens de periode, die verloopt tussen het begin van de vorstperiode en het moment, dat drijfijis op de IJssel wordt waargenomen. Het resultaat is weergegeven in het bovenste gedeelte van figuur 22. Hoewel een zekere spreiding aanwezig is, zijn de waarnemingen over de periode van 1890-91 tot 1946-47 goed met elkaar in overeenstemming. Naarmate het kouder is wordt sneller ijs gevormd. De waarnemingen in de ijswinters 1953-54, 1955-56 en 1962-63 blijken buiten de puntenwolk voor de eerdere periode te vallen. Bij dezelfde gemiddelde luchttemperatuur duurt het langer voor drijfijis wordt gevormd. Dit is in overeenstemming met de voorspelde invloed van de lozing van afvalwarmte.

Voor het begin van de vorstperiode is in de bovenste figuur als criterium gehanteerd, dat de over een etmaal gemiddelde luchttemperatuur lager moet zijn dan 0°C . Gezien het gestelde in paragraaf 2.2 zou het juister zijn om als gemiddelde luchttemperatuur voor het begin van een vorstperiode, voor zover deze gerelateerd moet worden aan het optreden van ijs, aan te houden -2°C .

Als dit criterium wordt gebruikt, dan blijkt uit het onderste gedeelte van figuur 22, dat dit nauwelijks invloed heeft op het algemene beeld bij het optreden van drijfijis. Alleen het punt, dat korrespondeert met de winter van 1916-17 verschuift aanzienlijk, maar blijft binnen de puntenwolk voor de winters 1890-91 tot 1946-47.

Vervolgens is nagegaan of de invloed van de temperatuursverhoging van het water in de laatste decennia ook tot uitdrukking komt in de snelheid van verdwijnen van het ijs. Figuur 23a is min of meer analoog aan figuur 22, zij het dat hier de lengte van de periode, die gelegen is tussen het einde van de vorstperiode (criterium $T_1 > 0^{\circ}\text{C}$) en het moment, dat het ijs op de IJssel is verdwenen, is uitgezet tegen de gemiddelde luchttemperatuur tijdens die periode. Ook hier is een verband tussen beide parameters aanwezig voor de periode van 1890-91 tot 1946-47, hoewel deze grafiek duidelijk meer spreiding vertoont. De waarnemingen in de ijswinters 1953-54 en 1955-56 blijken nu geheel binnen de puntenwolk van 1890-91 tot 1946-47 te vallen. Alleen de waarneming van de ijswinter 1962-63 wijkt aanzienlijk af. Vermeld moet worden, dat voor de genoemde ijswinter 1962-63 de gemiddelde luchttemperatuur is aangehouden in de periode tussen het verdwijnen van het ijs en het einde van de vorstperiode. Tijdens het werkelijke afsmelten van het ijs was de luchttemperatuur nog lager. Gekonkludeerd kan worden, dat ook hier de winter van 1962-63 een duidelijk ander beeld

wat betreft de ijsvorming heeft opgeleverd. Aanhouden van het criterium $T_1 > - 2^{\circ}\text{C}$ wijzigt het beeld niet (zie figuur 23b).

Voorts is nog nagegaan of de snelheid van vorming van drijfijis en het verdwijnen ervan afhankelijk is van de datum, waarop het verschijnsel optreedt. Dit zou namelijk verwacht kunnen worden als de instraling en dus de stand van de zon een grote invloed heeft. In de figuren 20 en 21 is het resultaat weergegeven. Enig verband lijkt wel aanwezig, maar er is een grote spreiding, die, gezien het vorenstaande, vooral aan de luchttemperatuur is te wijten.

Resumerend kan gesteld worden, dat met name in de ijswinter 1962-63 geconstateerd is, dat het langer duurt voordat drijfijis ontstaat en dat het drijfijis eerder verdwenen is. Daar verwacht mag worden, dat dit ook voor het verdwijnen van het vaste ijsdek zal gelden, wordt een herhaling van het gebeurde in 1940-41 minder waarschijnlijk onder deze omstandigheden. De kans is namelijk groter, dat, wanneer de afvoer weer gaat stijgen door het invallen van de dooi, het vaste ijsdek al verdwenen is.

Tenslotte zal nog zeer in het kort worden besproken op het meer plaatselijke effect van de lozing van koelwater. In de paragrafen 2.6 en 2.7 is al ingegaan op het gevolg van gedeeltelijk open riviergedeelten op enerzijds de opstuwning van de waterstanden door het vaste ijsdek en anderzijds de afvoerverdeling bij de splitsingspunten. Daar het aantal grote centrales toeneemt, dan wel de capaciteit (en dus de lozing van afvalwarmte) van de centrales wordt opgevoerd, zal dit punt in de toekomst de verschijnselen nog meer gaan beïnvloeden. In dit verband dient te worden gewezen op de voorgenomen bouw van een centrale aan het Ketelmeer. Hierdoor is het mogelijk, dat het Ketelmeer aanzienlijk langer ijsvrij zal blijven dan vroeger het geval was. Dit kan betekenen, dat in de toekomst ook ijsbreken op de IJssel kan worden overwogen.

3.6 Deltaplan en andere rivierwerken

Zoals reeds hiervoor al naar voren is gebracht, zijn in het verleden vele rivierwerken uitgevoerd om de ijsafvoer van de Rijn en zijn takken te bevorderen. Ten eerste kan genoemd worden de normalisatie, die in de 19de en het begin van de 20ste eeuw is doorgevoerd. Ten tweede moet gedacht worden aan de scheiding van Maas en Waal, die in 1908 is voltrokken door de Maas om te leiden via een nieuwe uitmonding naar de Amer. Daarnaast blijken andere rivierverbeteringen ook gunstig op het ijsregiem uitgewerkt te hebben. Als voorbeeld kan worden gegeven het wegbaggeren van ondiepten in de Nieuwe Merwede omstreeks de dertiger jaren (van Wijngaarden [27]), hetgeen een zeer positieve invloed heeft gehad op de vlotte afvoer van het ijs aldaar en daardoor er mede oorzaak van is geweest, dat sinds die tijd gunstige ervaringen met het ijsbreken op de Waal/Merweden zijn behaald.

De uitvoering van het Deltaplan heeft de situatie in het benedenrivierengebied aanzienlijk gewijzigd. Doordat de verbinding tussen het Hollandsch Diep en het Volkerak verbroken is, zullen de door de Waal aangevoerde stukken drijfijis en de ijsschotsen, die bij het breken van het vaste dek ontstaan, niet meer via het Volkerak kunnen worden afgevoerd. In het verleden bedroeg de ijsafvoer via het Volkerak 70% van het totaal. Verder zal de verzoeting van het Haringvliet en het wegvallen van de invloed van het warmere zeewater ertoe leiden, dat het ijsbezwaar op het Haringvliet toeneemt. In aanhangsel C: "Beschouwingen rond de problemen betreffende de te volgen ijsbreektaktiek na uitvoering van het Deltaplan" wordt uitvoerig ingegaan op de nieuwe situatie in vergelijking met de oude. Deze beschouwingen zijn verkregen van de directie Benedenrivieren van de Rijkswaterstaat en benadrukt dient te worden, dat vooral de konklusies een voorlopig karakter hebben, omdat nog geen ervaring met de nieuwe situatie is opgedaan gedurende een strenge winter.

In aanhangsel C worden de volgende aanbevelingen gedaan voor de nieuwe toestand:

- 1 vanaf het begin van de vorstperiode proberen om zich vast ijs te laten vormen op het Haringvliet-bekken tot aan Werkendam, om een isolerende laag te verkrijgen, die de ijsproduktie aldaar vertraagt;
- 2 vanaf het moment, dat het vaste ijsdek Werkendam heeft bereikt, systematisch te gaan breken op het traject Oude Maas - Beneden Merwede - Waal, waarbij de ijsschotsen via de Nieuwe Waterweg dienen te worden afgevoerd;

3 bij het invallen van de dooi het Haringvliet gaan breken vanaf de uitwateringssluisen tot aan Werkendam, in combinatie met een binnen de mogelijkheden van het spuiprogramma van de Haringvlietsluizen zo groot mogelijke driftstroom op het Haringvliet, om aldus het vaste ijsdek op het Haringvliet zo snel mogelijk te elimineren.

Ten aanzien van deze nieuwe ijsbreektaktiek kan een aantal vraagpunten worden geformuleerd, dat in aanhangsel C ook naar voren wordt gebracht. Hierbij moet worden benadrukt, dat pas tijdens een strenge ijswinter zal blijken of de aangegeven taktiek in vergelijking met de oude dezelfde of een ongunstiger invloed heeft op het waterstandsverloop op de Rijntakken en in het benedenrivierengebied.

Ook de Rijnkanalisatie heeft waarschijnlijk enige invloed op het ijsregiem op de Rijntakken. De stuwen te Driel, Amerongen en Hagestein hebben alle drie een middenpijler, waardoor plaatselijk de totale breedte van het zomerbed weliswaar gelijk is gebleven, maar de verhouding tussen de plaatselijk beschikbare breedte en de afmeting van de stukken drijfijis is aldaar, in vergelijking met andere riviergedeelten, tot de helft gereduceerd. Als gevolg hiervan zal het ijs zich sneller vastzetten dan op andere plaatsen langs de rivier. In de winter 1962-63 is bovenstrooms van stuw Hagestein tot twee keer toe een vast ijsdek ontstaan. Als gevolg hiervan zal de Nederrijn eerder tot aan het splitsingspunt Westervoort bedekt zijn met vast ijs dan vroeger het geval was. Dit verschijnsel zal nog in versterkte mate optreden als zich een vast ijsdek vormt bij stuw Driel, welke slechts een aantal kilometers benedenstrooms van Westervoort gelegen is. Is op de IJssel het vaste ijsdek nog niet tot aan het splitsingspunt gevorderd, dan zal de IJssel tijdelijk aanzienlijk meer water afvoeren dan in het geval van een ongestoorde afvoerverdeling.

4 Invloed ijsvorming op waterstanden

4.1 Inleiding

Uit het vorenstaande is duidelijk geworden, dat de aanwezigheid van een vast ijsdek in combinatie met een niet te hoge afvoer toch reeds aanleiding kan geven tot hoge waterstanden. Uit het gegeven voorbeeld van de waterstanden op de beneden-IJssel tijdens de winter 1940-41 blijkt, dat plaatselijk de waterstanden zelfs zodanig hoog kunnen worden, dat de maximale waterstanden tengevolge van een zeer hoge afvoer zonder ijs, zoals die in 1926 is opgetreden, worden overschreden. Dit houdt in, dat bij de vaststelling van de waterstand, die slechts met een bepaalde frekwentie wordt overschreden, ook de invloed van ijs op de waterstanden in rekening dient te worden gebracht.

In het hierna volgende zal nagegaan worden of het mogelijk is om een methode aan te geven om deze invloed te kwantificeren. De volgende punten zijn daarbij van belang:

- 1 Hoge waterstanden zullen optreden als er een vast ijsdek aanwezig is, terwijl de afvoer niet te gering moet zijn. Bekeken zal dan ook moeten worden de kansverdeling van de afvoeren (of plaatselijke waterstanden), als vast ijs aanwezig is. Daar het niet onwaarschijnlijk is, dat dezelfde meteorologische omstandigheden, die de vorming van een vast ijsdek bevorderen, ook het afvoerverloop zullen beïnvloeden, mag er niet à priori van worden uitgegaan, dat gegevens over de afvoerverdeling in perioden zonder vast ijs ook van toepassing zullen zijn op de situatie met een vast ijsdek.
- 2 Uit de beschrijving van de wijze van ontstaan van een vast ijsdek op de Nederlandse Rijntakken kan worden gekonkludeerd, dat de toestand vrij aanzienlijk kan variëren, afhankelijk van de plaats langs de rivier. Is in alle 9 beschouwde ijswinters na 1911 op de beneden-IJssel een vast ijsdek aanwezig geweest, enigszins anders ligt dat voor de Waal. Tijdens een tweetal ijsperiodes (namelijk de ijswinter 1940-41 en de eerste vorstperiode van 1946-47) is op de Waal te Lobith in het geheel geen vast ijsdek opgetreden, terwijl in het algemeen de ijsbezetting op de Waal/Merweden en op de Nederrijn/Lek korter was. Bij het opstellen van een methode om de invloed van ijs op de waterstanden in rivieren te bepalen, dient met deze plaatselijke verschillen rekening te worden gehouden.
- 3 Zo mogelijk dient de te ontwikkelen methode aan te sluiten op de wijze waar-

op voor de Nederlandse Rijntakken de extreem hoge waterstanden zijn bepaald als gevolg van het optreden van hoge afvoeren zonder ijs. Teneinde de uit deze eis volgende voorwaarden te kunnen onderkennen, zal in de volgende paragraaf de methode waarop tot nu toe extreem hoge waterstanden zijn bepaald worden beschreven.

- 4 In het kader van dit vooronderzoek is vooral gezocht naar een methode, die, door gebruik te maken van gegevens uit in het verleden opgetreden ijswinters, op statistische wijze de invloed van ijs op de waterstanden bepaalt. Dit impliceert echter, dat eventuele veranderingen door o.m. de lozing van koelwater en de Deltawerken niet apart in rekening konden worden gebracht. Voor zover de invloed ervan in het verleden merkbaar is geweest, werkt deze uiteraard wel door in de verkregen resultaten.

Na een beschrijving van de door de Rijkswaterstaat gehanteerde wijze van vaststellen van extreem hoge waterstanden door hoge afvoeren alleen (paragraaf 4.2), zal in de daarop volgende paragraaf 4.3 nagegaan worden, welke methoden in principe aanwezig zijn om de invloed van ijs te bepalen. Daar zal blijken, dat aan al deze methoden zodanige nadelen kleven, dat niet verwacht mag worden, dat toepassing tot enigszins betrouwbare resultaten zal leiden, is daarna gepoogd met een grove schatting van de mogelijke invloed enig inzicht te verkrijgen (paragraaf 4.4).

4.2 Huidige methode ter bepaling van extreem hoge waterstanden

In principe kunnen op een tweetal manieren de extreem hoge waterstanden langs een rivier worden geschat en wel enerzijds door uit te gaan van de plaatselijk opgetreden waterstanden en deze te extrapoleren, en anderzijds door uit te gaan van voorgekomen afvoeren, deze te extrapoleren en vervolgens bij de aldus gevonden extreem hoge afvoeren de waterstanden vast te stellen. Hoewel de tweede manier omslachtiger is, wordt er toch de voorkeur aan gegeven, onder meer om de volgende redenen:

- door (systematische) wijzigingen in de bodemligging in de nabijheid van de desbetreffende plaats kan in de waarnemingsreeks van de waterstanden een trend aanwezig zijn;
- tijdens hoge afvoeren op de Rijn zal de afvoerverdeling over de verschillende Rijntakken anders zijn dan bij lagere afvoeren; door extrapolatie van waargenomen waterstanden wordt de invloed hiervan mogelijk niet voldoende in

rekening gebracht;

- met name de zeer hoge waterstanden langs de rivier zullen zijn beïnvloed door dijkdoorbraken bovenstrooms; dit geldt met name voor de zeer hoge afvoer, die in 1926 is voorgekomen; door de tijdelijke berging van het water zal een grotere topvervlakking zijn opgetreden dan wanneer geen doorbraken zouden zijn veroorzaakt; extrapolatie van opgetreden waterstanden geeft voor dit geval dus een te gunstig beeld;
- het verband tussen afvoer en waterstand vertoont in het algemeen een knik, die optreedt als ook het winterbed aan de afvoer gaat deelnemen; met de aanwezigheid van een dergelijke knik, waarvan de ligging echter niet bij voorbaat is aan te geven, dient bij de extrapolatie van waterstanden rekening te worden gehouden; dit geldt in mindere mate wanneer afvoeren worden geëxtrapoleerd.

Extrapolatie van opgetreden afvoeren heeft uiteraard ook nadelen. Indien in het bovenstrooms gelegen gedeelte van het stroomgebied werken zijn uitgevoerd, die hetzij de afvoer van het hoge opperwater versnellen (o.m. bochtafsnijdingen) hetzij de toppen door berging beïnvloeden (reservoirs) dan zal de verkregen waarnemingsreeks niet meer homogeen zijn. Dit verschijnsel werkt echter ook door in de lokaal optredende waterstanden.

Een goed overzicht van de verschillende methoden om een ontwerp-afvoer met een bepaalde herhalingsfrequentie vast te stellen wordt gegeven in het zogenaamde Flood Studies Report, volume I [14]. Nog afgezien van de verschillende methoden tot extrapolatie, kan uitgegaan worden van drie verschillende soorten basisgegevens, te weten:

- 1 een tijdsreeks van afvoeren, zoals de totale serie dag-, week- of maandafvoeren;
- 2 niet-gekorreleerde toppen, waarvan er meerdere per (hydrologisch) jaar zullen kunnen optreden (gebruikt bij de zogenaamde peak-over-treshold methode);
- 3 jaarlijkse maximale afvoeren.

Ten aanzien van het afleiden van een ontwerpafvoer uit een tijdsreeks kan worden gesteld, dat dit gebeurt door de tijdsreeks als een stochastisch proces te beschouwen. In het algemeen wordt via een Monte-Carlo-procedure en uitgaande van de korrelatie tussen de afvoeren in twee achtereenvolgende perioden een langere reeks waarnemingen gegenereerd en aan de hand daarvan wordt het vóórkomen van extreme situaties onderzocht. Bij de peak-over-treshold methode worden alle toppen, waarbij de afvoer een bepaalde grenswaarde overschrijdt, verzameld

en van deze toppen wordt een frekwentieverdeling opgesteld. Een bijzonder geval van de tijdsreeks is de verzameling van maximale jaarlijkse afvoeren. Hierbij wordt per (hydrologisch) jaar de maximale afvoer bepaald en deze verzameling van afvoeren wordt statistisch verwerkt. Deze laatste methode, dus gebaseerd op maximale jaarlijkse afvoeren, is in Nederland gehanteerd voor het vaststellen van de overschrijdingsfrekwentie van afvoeren van de Bovenrijn te Lobith.

Voor extrapolatie naar het gebied met zeer lage overschrijdingsfrekwenties moet een aanname worden gedaan voor de statistische verdeling van het verschijnsel. Bij verwerking van afvoergegevens wordt een aantal verdelingen regelmatig gebruikt. Hierbij wordt onder meer gedacht aan:

- Gumbel-verdeling
- Pearson 3-verdeling
- log Pearson 3-verdeling
- general extreme value distribution

De Gumbel-verdeling is in Nederland gebruikt voor de bepaling van de afvoer van de Bovenrijn met een overschrijdingsfrekwentie van $3 \cdot 10^{-4}$ (zie nota 66.5 van de Directie Bovenrivieren [20]). In de Verenigde Staten van Amerika wordt vooral het gebruik van de log Pearson 3-methode ter bepaling van de overschrijdingsfrekwentie van hoge afvoeren aanbevolen (Benson [2]), terwijl in Groot-Brittannië en Ierland het gebruik van de "general extreme value" verdeling, waarvan de Gumbel-verdeling een bijzonder geval is, wordt aangeprezen [14].

In dit verband moet worden gewezen op memorandum 74.5 van de Afdeling Rivierkunde van de Directie Limburg [4], waarin voor de afvoergegevens van de Maas bij Borgharen (voor de periode 1911-1972) is nagegaan de grootte van de afvoer met een overschrijdingsfrekwentie van $3 \cdot 10^{-4}$ bij gebruik van verschillende verdelingen. Een gedeelte van het resultaat is hieronder weergegeven:

verdeling	afvoer met overschrijdings- frekwentie van $3 \cdot 10^{-4}$ [m ³ /s]
normale verdeling	3100
log normale verdeling	4400
gamma verdeling	3300
Pearson 3 verdeling	3400
Gumbel verdeling	4100

Eenzelfde type onderzoek is gedaan door Mosonyi [13], gebruik makend van afvoergegevens van de Nederrijn in Duitsland ter plaatse van de peilschaal Rees (km. 837,4). Gebruikt zijn de jaarlijkse maxima over een 70-jarige periode (1901-1970). Een vijftal verdelingen zijn getoetst aan het waarnemingsmateriaal: de normale verdeling, de log normale-verdeling, de Pearson 3-verdeling, de log Pearson 3-verdeling en de Gumbel-verdeling. Mosonyi konkludeert, dat:

- 1 volgens een aantal criteria de Gumbelverdeling het beste voldoet aan de gegeven waarnemingsreeks;
- 2 niet volledig van de Pearson 3 verdeling afgezien dient te worden, daar met name de Kolmogoroff-test de toepasbaarheid van deze verdelingsfunctie niet uitsluit.

De afvoer, die 1x per 3000 jaar voorkomt, is volgens de Gumbel-verdeling 17550 m³/s, terwijl gebruik makend van de Pearson 3-verdeling een afvoer van 14520 m³/s wordt gevonden. Blijkbaar is de grootte van de gevonden afvoer tamelijk sterk afhankelijk van het type verdeling, dat geacht wordt de verzameling te beschrijven. Tot eenzelfde konklusie wordt trouwens gekomen in het Flood Studies Report [14] bij toepassing van verschillende frekwentieverdelingen op afvoergegevens van enige Engelse en Ierse rivieren.

Hierbij moet voorts nog worden aangetekend, dat in het Flood Studies Report [14] aanbevolen wordt om voor verschijnselen met een herhalingstijd van meer dan 500 jaar niet uit te gaan van een extrapolatie van een van voornoemde verdelingen, maar een iets gewijzigde methode te gebruiken. De als alternatief aangegeven methode is echter waarschijnlijk niet zonder meer in Nederland bruikbaar, omdat afvoergegevens van Groot-Britannië en Ierland als basis hebben gediend.

Resumerend kan worden gesteld, dat uit de vele methoden, die voorhanden zijn om de grootte van de afvoer, die met een bepaalde frekwentie zal worden overschreden, te bepalen, door Rijkswaterstaat voor de Bovenrijn te Lobith een keus is gedaan voor een extrapolatie van de maximale jaarlijkse afvoeren, uitgaande van een Gumbelverdeling. Deze Gumbelverdeling kan in vergelijking tot andere verdelingen tot relatief hoge berekende waterstanden leiden.

Met behulp van de zogenaamde stroombaanberekeningen wordt door Rijkswaterstaat voor verschillende afvoeren het verloop van de waterstand langs de rivier berekend. Daar de frekwentie van elk van deze afvoeren bekend is, is ook per plaats langs de rivier de frekwentie van de waterstanden aldaar, onder invloed van alleen hoge afvoeren, af te leiden.

4.3 Formele statistische beschouwingen

In het volgende zal worden getracht op statistisch verantwoorde wijze te komen tot een frekwentieverdeling van de waterstanden langs de rivier, rekening houdend met zowel hoge afvoeren als verhoging van de waterstanden door ijs. De beschouwingen zullen worden opgezet voor een willekeurige plaats P langs een der riviertakken, zodat de index P refereert aan de lokale omstandigheden aldaar. De lokale waterstand en de lokale afvoer worden dus aangeduid met ws_P en Q_P . De afvoer en de waterstand te Lobith worden in het volgende aangegeven met ws_L en Q_L .

Een recht-door-zee methode voor de bepaling van de gewenste frekwentieverdeling van de waterstanden te P is de maximale waterstand, die per jaar is opgetreden te verzamelen en van deze verzameling de frekwentieverdeling op te stellen. Daar in theorie hoge waterstanden zowel door hoge afvoeren als door lagere afvoeren in combinatie met de aanwezigheid van een vast ijsdek kunnen ontstaan, zal in deze frekwentieverdeling zowel de ene invloed als de andere automatisch zijn verdiskonteerd.

Aan deze methode kleeft echter een aantal bezwaren, die hierna kort zullen worden gegeven:

- 1 In de natuur is het verband tussen afvoer en plaatselijke waterstand niet konstant in de tijd. Dit wordt o.m. veroorzaakt door veranderingen in de bodemligging van de rivier, rivierwerken en lokale werken in het winterbed, en veranderingen in de waterstand in het meest benedenstrooms gelegen riviergedeelte ("base level"). Het waarnemingsmateriaal dient op deze effecten te worden gecorrigeerd.
- 2 Alleen op die plaatsen langs de rivier waar in één of meerdere jaren de maximale waterstand tengevolge van een vast ijsdek met een bepaalde afvoer hoger is geweest dan de hoogste waterstanden tijdens een hoogwater in dat jaar, zal de invloed van ijs merkbaar zijn; in het tegenovergestelde geval zal de frekwentielijn van de waterstanden geen verandering ondergaan.
- 3 Impliciet wordt aangenomen, dat de frekwentielijn van de verzameling van alle maximale waterstanden (zowel door hoge afvoeren als door ijs) op soortgelijke wijze geëxtrapoleerd mag worden als de frekwentieverdeling van de hoogste waterstanden tengevolge van alleen hoogwaters; dit hoeft niet à priori op te gaan.

- 4 Het is zeer de vraag of bij een extrapolatie van waargenomen maximale waterstanden dezelfde frekwentieverdeling van de waterstanden wordt gevonden als nu is verkregen door uit te gaan van de frekwentieverdeling van de afvoeren te Lobith en de relatie tussen Q_L en ws_p .

Het eerste bezwaar is te ondervangen door rekening te houden met de veranderingen van de $Q_p - ws_p$ -relatie in de tijd. In het algemeen wordt deze relatie steeds na een aantal jaren gecorrigeerd aan de hand van nieuwe metingen. Met behulp van het verloop van de $Q - ws$ -relaties is het mogelijk ook de waargenomen waterstanden zodanig te corrigeren, dat ze vergelijkbaar worden.

Ook ten aanzien van het vierde bezwaar is wel een oplossing te bedenken. In paragraaf 4.2 is gesteld, dat er verschillende frekwentieverdelingen in de hydrologie worden gebruikt. Het is niet *a priori* noodzakelijk om voor de waterstanden eveneens van een Gumbel-verdeling uit te gaan. Mogelijk is proberenderwijs een andere frekwentieverdeling te vinden, die bij toepassing op de waargenomen waterstanden een frekwentieverdeling oplevert min of meer gelijk aan die verkregen met de in paragraaf 4.2 geschetste methode. Zonodig zouden de waargenomen waterstanden eerst getransformeerd kunnen worden.

Het opheffen van het tweede en derde bezwaar is echter het moeilijkst. Het is in principe mogelijk om tot aparte extrapolatie over te gaan, maar dan is het noodzakelijk om de beide kansverdelingen (die van hoge waterstanden t.g.v. hoogwaters en die van hoge waterstanden t.g.v. de combinatie van ijs met bepaalde afvoeren) te splitsen. De kans, dat de waterstand te P een bepaalde waarde ws_p^* zal overschrijden, wordt dan gegeven door:

$$\begin{aligned} p(ws_p > ws_p^*) &= p(ws_p > ws_p^*/^1A) p(^1A) + \\ &+ p(ws_p > ws_p^*/(A \cap B)) p(B/A) p(A) + \\ &+ p(ws_p > ws_p^*/(A \cap ^1B)) p(^1B/A) p(A) \end{aligned} \quad (4.1)$$

waarin A = gebeurtenis, dat in een jaar een ijsperiode optreedt

B = gebeurtenis, dat de maximale waterstand gedurende de ijsperiode wordt bereikt

1 = de betreffende gebeurtenis treedt niet op

/ = onder konditie

\cap = zowel de ene als de andere gebeurtenis treedt op

In deze vergelijking heeft de eerste term van het rechterlid betrekking op de frekwentieverdeling van de waterstanden als geen ijs optreedt. Voor een plaats langs de rivier waar nimmer in enig jaar de hoogste waterstand is bereikt tijdens een ijsperiode, dus waar $p(A) = 0$, gaat vergelijking (4.1) over in:

$$p(ws_P > ws_P^*) = p(Q_L > Q_L^*) \quad (4.2)$$

waarbij Q_L^* = afvoer te Lobith waarbij op plaats P de waterstand ws_P^* wordt bereikt.

Vergelijking (4.2) geeft aan, dat de frekwentieverdeling van de waterstanden te P af te leiden is uit de frekwentieverdeling van de afvoeren te Lobith en komt dus overeen met de tot nu toe gebruikelijke procedure.

Terzijde zij opgemerkt, dat bij het samenstellen van de frekwentiekromme van de afvoeren ook gebruik gemaakt is van de top van circa 8000 m³/s, die in de vorstperiode 1940-41 is opgetreden. Tijdens deze topafvoer was op de IJssel een vast ijsdek aanwezig. Formeel mag vergelijking (4.2) dan ook niet worden gebruikt voor dit gedeelte van de rivier. Het zal echter duidelijk zijn, dat de invloed van dit ene punt op de frekwentieverdeling van de jaarlijkse maximale afvoeren zeer gering is.

De tweede term van vergelijking (4.1) geeft de invloed van het ijs op de waterstanden aan. Slechts gedurende één vorstperiode is over een beperkt gedeelte van de rivier de IJssel de maximale jaarlijkse waterstand opgetreden tengevolge van een vast ijsdek in combinatie met een behoorlijke afvoer, dus de frekwentieverdeling $p(B/A)$ zou uit dit ene punt afgeleid moeten worden, hetgeen uiteraard niet mogelijk is. Ook op theoretische gronden is over deze kansverdeling geen voorspelling te maken.

Overigens heeft deze methode nog als nadeel, dat ook hierbij alleen een wijziging van de oorspronkelijke frekwentiële lijn wordt verkregen als daadwerkelijk een hoogste jaarlijkse waterstand door ijs is veroorzaakt. Ook deze methode zal dus slechts voor een gedeelte van de IJssel tot verandering van de frekwentiële lijn leiden. Met een eventuele konklusie, dat de invloed van ijs op de waterstanden bij andere plaatsen te verwaarlozen is, wordt dezerzijds niet in-

gestemd, omdat daarvoor de periode waarover waarnemingen ter beschikking staan (60 jaar) zeer kort is in vergelijking met de lengte van de herhalingsperiode waarvoor een uitspraak gedaan moet worden (3000 jaar).

Aan bovenstaand nadeel kan worden ontkomen door niet de frekwentieverdeling van de maximale waterstanden, die per jaar zijn opgetreden te beschouwen, maar om de frekwentieverdeling van de waterstanden te baseren op de dagelijkse waterstanden. Ook hierin komt per plaats langs de rivier de invloed van ijs automatisch naar voren, maar ook deze methode heeft enkele belangrijke bezwaren. Afgezien van de eventuele onnauwkeurigheden geïntroduceerd door de gezamenlijke extrapolatie van twee ongelijksoortige deelverzamelingen, kan genoemd worden:

- 1 De kans op overschrijding zal zijn uitgedrukt in het aantal dagen per jaar. De belangstelling gaat echter vooral uit naar het aantal malen per jaar, dat een bepaalde waterstand wordt overschreden. Weliswaar is een verband aanwezig tussen het aantal malen per jaar (uitgaande van jaarmaxima) en het aantal dagen per jaar, dat een bepaalde waterstand wordt overschreden, maar hierbij wordt geen rekening gehouden met het feit, dat per jaar verschillende toppen kunnen optreden.
- 2 Als de afvoer in een rivier voldoende hoog is geworden, zal ook het winterbed gaan deelnemen aan afvoer en berging. In de lokale $Q - ws$ - relatie wordt dit teruggevonden in de vorm van een knik in de lijn, die het verband aangeeft. Bij de extrapolatie van waargenomen waterstanden dient hiermede rekening te worden gehouden, hetgeen de extrapolatie extra moeilijk maakt. Tevens blijft het gestelde t.a.v. de keuze van verdelingsfunctie om aan te sluiten bij de eerder gehanteerde methode van toepassing.
- 3 De dagelijkse waterstanden zijn niet onafhankelijk.

Mogelijk ten overvloede wordt hier nog opgemerkt, dat de te verwachten knik in de frekwentieverdeling van de waterstanden niet of nauwelijks een rol speelt bij de extrapolatie van de maximale waterstanden per jaar, omdat de bijbehorende afvoeren in het algemeen groter dan "bankfull discharge" zijn.

Het voorgaande samenvattend kan dus worden gesteld, dat uitgaande van maximale waterstanden per jaar veel te weinig gegevens beschikbaar blijken te zijn voor een verantwoorde aanpassing van de frekwentiële lijn, terwijl ook het bewerken van dagelijkse waterstanden geen soulaas biedt. Een alternatief is denkbaar waarbij uitgegaan wordt van ongekorreleerde toppen. Dit heeft als voordeel, dat wat meer gegevens ter beschikking staan, maar het geringe aantal ijswinters in beschouwing nemend en voorts beseffende, dat bepaald niet in elke vorstperiode een top in de afvoer of de waterstand is opgetreden, moet worden gekonkludeerd,

dat ook deze methode geen betrouwbare resultaten zal opleveren.

Tot nu toe is steeds gepoogd om uit te gaan van plaatselijke waterstanden en aldus te komen tot een aanpassing van de frekwentieverdeling. Het is ook denkbaar om uit te gaan van de afvoeren en daarbij de plaatselijke waterstanden te bepalen. Daar over de plaatselijke afvoeren niets bekend is, zal moeten worden teruggevallen op de afvoeren te Lobith. Op voorhand zijn dus al twee problemen te onderkennen:

- de overgang van de afvoer te Lobith naar de plaatselijke afvoer,
- de overgang van de plaatselijke afvoer naar de plaatselijke waterstand.

Zoals in het voorgaande al duidelijk is geworden, zal de min of meer eenduidige relatie, die bij afwezigheid van ijs bestaat tussen Q_L enerzijds en Q_p en ws_p anderzijds, niet meer opgaan voor het geval, dat ijs aanwezig is. Zowel de afvoerverdeling bij de splitsingspunten als de plaatselijke $Q - ws$ -kromme kunnen zich immers wijzigen.

Wederom kan worden uitgegaan van vergelijking (4.1), die de kans op overschrijding, uitgaande van jaarlijkse maxima, van een bepaalde waterstand ws_p^* weergeeft. Wordt overgegaan op de afvoer te Lobith, dan kan worden gesteld, dat de kans $p(ws_p > ws_p^*/A)$ gelijk is aan de kans $p(Q_L > Q_L^*/A)$ vanwege de deterministische relatie tussen ws_p en ws_L , en ws_L en Q_L . De kans, dat $p(ws_p > ws_p^*/(A \cap B))$ is gelijk aan de kans $p(Q_L > Q_L^*/A \cap B)$ bij gebruikmaking van dezelfde relaties. Voor de kans $p(ws_p > ws_p^*/A \cap B)$ is deze terugvertaling echter niet zonder meer mogelijk. Zelfs als hiervoor een methode gevonden zou worden, dan nog zou het werken volgens deze lijn geen vruchten afwerpen, omdat het probleem blijft liggen in de geringe informatie over de kansen $p(B/A)$, $p(A/B)$ en in mindere mate de kans $p(A)$.

4.4 Benaderingsmethode

Uit de voorgaande paragraaf kan worden gekonkludeerd, dat er geen statistisch verantwoorde methode is, die zowel aansluit bij de tot nu toe gebruikte wijze om de frekwentieverdeling van de waterstanden te bepalen, als niet mank gaat aan het gebrek aan waarnemingsmateriaal. Toch is het gewenst om enig inzicht te krijgen in de invloed van ijs op de frekwentie van waterstanden in rivieren. Daarom zal in het volgende worden aangegeven hoe via enkele benaderingen toch tot een grove kwantificering kan worden gekomen. Essentiëel is, dat bij de be-

naderingsmethode de eis wordt losgelaten, dat het sommeren van beide kansen (de kans op overschrijding van een bepaalde hoge waterstand door een hoge afvoer en de kans op overschrijding van dezelfde hoge waterstand als gevolg van ijsvorming) mogelijk moet zijn. Dit is niet mogelijk, omdat de ene kansverdeling geheel anders tot stand komt dan de andere. Met behulp van de benaderingsmethode kan dus niet bepaald worden hoe groot de kans is, dat een bepaalde waterstand wordt overschreden als gevolg van zowel hoge afvoeren als van ijsvorming.

De te beschrijven benaderingsmethode, die bepaald niet noodzakelijkerwijs de best denkbare behoeft te zijn, is in Tabel 6 aangegeven. In deze tabel zijn vier stappen onderscheiden, die in het onderstaande zullen worden besproken. Daarbij zal meteen ter illustratie de toepassing van de methode voor de situatie bij Kampen langs de beneden-IJssel worden behandeld. De volgende stappen zijn te onderscheiden:

- stap 1: Per plaats wordt voor de verschillende ijswinters nagegaan gedurende welke periode vast ijs aanwezig is geweest en vervolgens wordt de totaal beschouwde tijdspanne verdeeld in periodes, waarbij geen ijs aanwezig is geweest en stukken met een vast ijsdek.
- stap 2: Voor de verdeling van de afvoeren te Lobith tijdens de ijsperiodes moet een aanname worden gedaan. Dit kan op twee manieren:
- a uitgaan van de waargenomen maximale afvoeren tijdens de verschillende ijsperiodes en van deze afvoeren een frekwentieverdeling opstellen;
 - b aannemen, dat de frekwentieverdeling van de maximale jaarafvoeren ook opgaat voor de ijsperiodes.

De voorkeur gaat uit naar methode a), omdat hiermede rekening kan worden gehouden met de vermindering van de Bovenrijnafvoer te Lobith, welke tijdens een vorstperiode wordt gekonstateerd. De frekwentieverdeling van de maximale jaarlijkse afvoeren zal in het volgende als referentiekader worden gebruikt, teneinde na te gaan of uitgaan van de waargenomen afvoeren tijdens een ijsperiode niet een te ongunstig beeld geeft.

In de figuren 24a tot en met 24i is het verloop van de afvoer te Lobith tijdens de verschillende vorstperiodes aangegeven. Als ook te Lobith vast ijs aanwezig was, dan is weliswaar de waterstand waargenomen en is daaruit de afvoer afgeleid, maar hierbij dient nog rekening te worden gehouden met de verhoging van de waterstand door het vaste ijs.

In de figuren 24a tot en met 24i is een gekorrigeerd afvoerverloop ingetekend, maar deze berust slechts op een schatting. Per periode is nu een maximale afvoer te bepalen en van deze maximale afvoeren is een frekwentieverdeling te maken. Als voorbeeld is in de figuren 24a tot en met 24i aangegeven, wanneer vast ijs op het benedengedeelte van de IJssel aanwezig is geweest. Per periode is de maximale afvoer te Lobith bepaald (rekening houdend met een looptijd van 2 dagen). In Tabel 7 zijn de aldus verzamelde afvoeren weergegeven. Naar analogie met de procedure, die voor de maximale jaarafvoeren is gebruikt, is verondersteld, dat ook de frekwentieverdeling van de maximale afvoeren tijdens een ijsperiode voldoen aan een Gumbel-verdeling. De Gumbel-verdeling kan worden geschreven als

$$y = \alpha (x - \beta) \tag{4.3}$$

waarbij y is gedefiniëerd via:

$$\phi = e^{-e^{-y}} \tag{4.4}$$

met

$$\phi = \frac{i}{N+1} \tag{4.5}$$

waarin i = rangorde van de waarneming,

N = aantal waarnemingen,

terwijl de waarnemingen x_i ($i=1, \dots, N$) de afvoeren tijdens de ijsperiodes voorstellen, zodanig gerangschikt, dat:

$$x_1 < x_2 < \dots < x_{N-1} < x_N$$

De waarde van de parameters α en β is niet bekend, maar schatters α en β kunnen worden afgeleid uit het waarnemingsmateriaal. In Tabel 8 is dit gebeurd voor de verzameling afvoeren in de perioden met vast ijs op de beneden-IJssel, zoals die zijn vermeld in Tabel 7. Voor meer details wordt verwezen naar nota 66.5 van de Afdeling Studiedienst [20].

In figuur 25 is de aldus gevonden frekwentieverdeling ingetekend, tezamen met de in nota 66.5 [20] gevonden frekwentieverdeling van de jaarmaxima. Blijkbaar leidt de frekwentieverdeling van de afvoeren in de ijsperioden in het linkerdeel van de figuur bij relatief hoge frequenties tot lagere afvoeren dan de frekwentieverdeling van de jaarmaxima. Bij zeer lage frequenties naderen de beide kansverdelingen elkaar.

Het volgende dient hierbij opgemerkt te worden;

- 1 De frekwentieverdeling gebaseerd op de afvoeren tijdens de verschillende ijsperioden, is gebaseerd op slechts 9 waarnemingen en is dientengevolge tamelijk onbetrouwbaar. Ook de waarnemingspunten sluiten maar ten dele aan bij de berekende kansverdeling. Een en ander is uit te drukken in een betrouwbaarheidsinterval rond de berekende lijn. Het 95% - betrouwbaarheidsinterval wordt gegeven door een bovengrens $x_T + 2 s(x_T)$ en een ondergrens $x_T - 2 s(x_T)$, waarbij x_T = puntwaarde van x bij bepaalde T , $T = 1/(1-\phi)$ = herhalings-tijd, en $s(x_T)$ = standaardafwijking. Volgens nota 66.5 [20] geldt:

$$s^2(x_T) = \frac{s_x^2}{N} (1 + 1,140 K + 1,100 K^2) \quad (4.6)$$

met:

$$K = (y_T - \bar{y})/s_y \quad (4.7)$$

In figuur 25 is ingetekend het betrouwbaarheidsinterval, dat te bepalen is met de vergelijkingen (4.6) en (4.7).

- 2 De steilere helling van de kansverdeling van de afvoeren tijdens ijsperioden is vooral veroorzaakt door het feit, dat behalve hogere afvoeren ook lage afvoeren de helling van de lijn bepalen. Daarnaast is het aantal jaren, dat waarnemingen beschikbaar zijn ook van belang. Om dit aan te tonen zijn eveneens frekwentieverdelingen berekend volgens de door Gumbel aangegeven methode voor de maximale afvoeren in de maand februari en wel voor:
 - alle maandmaxima in de periode 1901-1971,
 - twee series van 9 maandmaxima, die willekeurig uit de maandmaxima in de periode 1901-1971 zijn gekozen.

In de Tabellen 9(a) en 9(b) en 10 zijn de gebruikte verzamelingen

weergegeven. De berekende frekwentieverdelingen zijn in figuur 26 ingetekend, wederom tezamen met de frekwentieverdeling van de jaar-maxima volgens nota 66.5. Gekonkludeerd kan worden, dat 1) het gebruik van maxima van de afvoeren in een bepaalde periode, en 2) een gering aantal waarnemingen kan resulteren in steilere frekwentieverdelingen. Waarschijnlijk kunnen ook te flauwe verdelingen worden gevonden. Een en ander dient nog getoetst te worden.

Stap 3: De aanwezigheid van een vast ijsdek werkt verhogend op de waterstanden. In paragraaf 2.5 is hiernaar gerekend, hetgeen is uitgemond in figuur 10. De verhoging van de waterstand is vooral afhankelijk van de verhouding van de waarde van de Chézy-koëfficiënt met en zonder ijsdek. Bedacht moet worden, dat figuur 10 is gebaseerd op een tot een rechthoekige bak geschematiseerd zomerbed. Bij hoge waterstanden zal echter ook het winterbed onder water geraken. Het kan dus voorkomen, dat bij afvoeren waarbij anders alleen het zomerbed aan de afvoer deelneemt, bij de aanwezigheid van een vast ijsdek ook een deel van de afvoer over het winterbed plaatsvindt. Dit zal resulteren in lagere waterstanden dan aangegeven in figuur 10. Het aanhouden van het in figuur 10 weergegeven verband is dus eveneens een veilige benadering. Vervolgens moet een keus worden gedaan voor de verhouding C_2/C_1 . Uitgaande van de in figuur 12 weergegeven waarnemingen blijkt, dat de waarde van C_2/C_1 voor de IJssel varieert tussen 0,5 en 1,0 en duidelijk in de tijd toeneemt. Daar uit de figuren 24a tot en met 24i kan worden afgeleid, dat de maximale afvoeren tijdens een ijsperiode niet meteen aan het begin van een ijsperiode vallen, lijkt het aannemen van een hoge waarde redelijk. Bij de hierna volgende toepassing is van twee waarden van C_2/C_1 uitgegaan, namelijk 0,80 en 1,00. Een andere oorzaak van de verhoging van waterstanden op de IJssel is de wijziging in de afvoerverdeling bij de splitsingspunten. Als gevolg hiervan zal de afvoer van de IJssel hetzij afnemen (als op de IJssel wèl vast ijs en op de Nederrijn/Lek en Waal geen vast ijs aanwezig is), hetzij toenemen (onder andere omstandigheden). Daar verhoging van de afvoer ongunstig is, is in het volgende voor de verhouding van Q_2/Q_1 (verhouding van afvoeren op de IJssel met en zonder ijs bij gelijke afvoer te Lobith) een tweetal waarden aangehouden, te weten 1,00 en 1,50.

stap 4: In Tabel 12 zijn de onder de verschillende aannamen berekende waterstanden te Kampen voor verschillende afvoeren te Lobith aangegeven. De frekwentie van voorkomen van deze waterstanden, welke dus zijn veroorzaakt door vast ijs, is eveneens in deze tabel, en wel in kolom (5), vermeld. De vermelde waarde is bepaald door de frekwentie van voorkomen van een bepaalde afvoer te Lobith tijdens een ijsperiode (uit figuur 25) te vermenigvuldigen met 0,15 (zijnde de frekwentie van het voorkomen van de beschouwde ijsperioden op de benedenloop van de IJssel: 9 ijsperioden in de periode 1911-1970)*.

Het resultaat van de hiervoor aangegeven benaderingsmethode voor de frekwentieverdeling van de waterstanden te Kampen als gevolg van het optreden van ijs op de beneden-IJssel is weergegeven in figuur 27, waar afhankelijk van de gekozen waarde van C_2/C_1 en Q_2/Q_1 de invloed van ijs op de frekwentie van waterstanden is aangegeven. Ter vergelijking is tevens ingetekend de frekwentieverdelingen van de waterstanden tengevolge van hoge afvoeren alleen. Gekonkludeerd moet worden, dat bij eenzelfde (lage) frekwentie de waterstanden door ijsvorming, zelfs bij zeer voorzichtige aannamen van Q_2/Q_1 en C_2/C_1 , aanzienlijk hoger zijn dan tengevolge van alleen hoge afvoeren. Naar aanleiding van dit resultaat dienen de volgende opmerkingen gemaakt te worden:

- 1 Ten aanzien van de aanwezigheid van een vast ijsdek is de situatie bij Kampen, of in ruimer verband op de beneden-IJssel, wel zeer ongunstig in vergelijking met de toestand op andere riviergedeelten. Op de beneden-IJssel blijft tengevolge van de onmogelijkheid om ijs in benedenstroomse richting af te voeren, zeer lang een vast ijsdek aanwezig. Dientengevolge is de kans op het samenvallen van de aanwezigheid van een vast ijsdek en een relatief hoge afvoer groter dan voor andere riviergedeelten. Door toepassing van de benaderingsmethode op de andere gedeelten zou dit overigens nog moeten wor-

* In een zeer laat stadium van dit vooronderzoek is pas onderkend, dat in de periode 1911-1970 nog meer winters met vast ijs op de IJssel zijn voorgekomen. Het werd niet verantwoord geacht hiervoor alsnog te corrigeren. Het gevolg is, dat voor het gegeven voorbeeld een iets ander beeld wordt verkregen als ook de gegevens over de andere winters worden medegenomen. De essentie van de methode evenals de konklusies, die aan de hand van de resultaten worden getrokken, zouden echter niet essentiëel gewijzigd worden.

den aangetoond.

2 De benaderingsmethode is gebaseerd op een aantal aannamen, die gedeeltelijk wel en gedeeltelijk niet nader onderzocht kunnen worden. Het volgende kan worden gesteld:

- of de verzameling van de maximale afvoeren tijdens ijsperioden aan een Gumbel-verdeling voldoet is niet te verifiëren;
- de onbetrouwbaarheid in de schatting van de parameters van de Gumbel-verdeling is te vertalen in een betrouwbaarheidsinterval rond de berekende lijn (zie figuur 25); dit interval is weer om te zetten in een 95% betrouwbaarheidsinterval voor de frekwentieverdeling van de waterstanden als gevolg van ijsvorming; in figuur 28 is dat gebeurd, veronderstellend dat $Q_2/Q_1 = 1,00$ en $C_2/C_1 = 1,00$; hoewel het betrouwbaarheidsinterval vrij groot is, zijn zelfs bij aanhouden van de onderste grens de waterstanden nog hoger dan bij de frekwentieverdeling van de waterstanden tengevolge van hoge afvoeren alleen;
- enig inzicht in de gevolgen van een andere keus voor de waarde van Q_2/Q_1 en van C_2/C_1 wordt verschaft door figuur 27; ongunstiger aannamen resulteren in aanzienlijk hogere waterstanden;
- de invloed van de verwaarlozing van de afvoer van het winterbed bij hoge waterstanden is onderzocht in aanhangsel A; het mede in beschouwing nemen van deze invloed resulteert inderdaad in lagere waterstanden; de grootte van de afname is niet recht evenredig met de verhouding tussen de breedte van het winterbed en zomerbed (zie figuur A-5 van aanhangsel A).

5 Konklusies en aanbevelingen

5.1 Konklusies

Uit het voorgaande kunnen de volgende konklusies worden getrokken:

- 1 Een vast ijsdek op de Rijn en één of meer van zijn takken in Nederland, al of niet in combinatie met ijsdammen, veroorzaakt een aanzienlijke verhoging van de waterstand t.o.v. een situatie zonder ijsdek bij overigens gelijke afvoer. Tevens wordt de afvoerverdeling over de drie Rijntakken (Waal, Nederrijn en IJssel) beïnvloed. Drijfijis heeft een te verwaarlozen invloed op de waterstanden.
- 2 Zeer hoge waterstanden kunnen optreden als aan het einde van een vorstperiode de afvoer van de Rijn weer toeneemt, terwijl op één of meerdere takken nog een vast ijsdek, al of niet met ijsdammen, aanwezig is. Dit geldt met name voor de IJssel, omdat daar het ijs niet door de getijbeweging kan worden afgevoerd.
- 3 Hoewel het inzetten van ijsbrekers het losraken van het vaste ijsdek met een aantal dagen vervroegt, kan kunstmatige ijsopruiming bepaald niet waarborgen, dat het vaste ijsdek is verdwenen als de afvoer tijdens of kort na een vorstperiode weer toeneemt. Op de IJssel is kunstmatige opruiming van het vaste ijsdek trouwens helemaal niet mogelijk, omdat de ontstane ijsschotsen niet kunnen worden afgevoerd. Plaatselijk kan het kunstmatig opruimen van ijsdammen, zonder dat het ijs ver in benedenstroomse richting kan worden afgevoerd, in bepaalde gevallen zinvol zijn.
- 4 Door de in het kader van het Deltaplan uitgevoerde werken is de situatie zodanig gewijzigd, dat in het geval van optreden van ijs op de Waal/Merweden en Nederrijn/Lek en in het benedenrivierengebied een nieuwe taktiek t.a.v. het ijsbreken zal moeten worden gevolgd. Of deze nieuwe taktiek, in vergelijking met de oude, dezelfde of een ongunstiger invloed heeft op het waterstandsverloop is nog onzeker.
- 5 Door een toename van de gemiddelde wintertemperatuur is tot circa 1920 het aantal dagen, dat gemiddeld per jaar op de IJssel drijfijis of vast ijs aan-

wezig is geweest, gedaald. Ook daarna is dit aantal nog verder afgenomen als gevolg van de opwarming van het water van de Rijn door de lozing van koelwater. Als gevolg hiervan zal de frekwentie van het voorkomen van ijs geringer zijn geworden en de duur van de ijsperiode korter.

- 6 Met verwijzing naar de konklusies 1...5 moet worden gesteld dat het niet uitgesloten is dat ten gevolge van het optreden van een vast ijsdek, al of niet in combinatie met ijssdammen, zeer hoge waterstanden langs de Rijn en zijn takken in Nederland zullen kunnen optreden.
- 7 Een betrouwbare bepaling van de grootte van de kans waarmee ten gevolge van ijsvorming zeer hoge waterstanden worden bereikt is, door de geringe hoeveelheid in het verleden verzamelde gegevens en de beperkte kennis van de optredende verschijnselen, niet mogelijk gebleken.
- 8 Toepassing van de in dit verslag ontwikkelde benaderingsmethode op de situatie bij Kampen langs de benedenloop van de IJssel resulteert voor omstandigheden met een vast ijsdek, zelfs bij tamelijk voorzichtige veronderstellingen met betrekking tot weerstand en afvoerverdeling, in waterstanden, die aanzienlijk hoger zijn dan de waterstanden, die zijn gerelateerd aan hoge afvoeren zonder ijs met eenzelfde frekwentie.

Ten aanzien van de in punt 8 genoemde benaderingsmethode wordt nog het volgende opgemerkt:

- Het is niet mogelijk gebleken om een methode te ontwikkelen, die in principe de mogelijkheid in zich bergt om voor elke plaats langs de rivier de gesommeerde overschrijdingskans van bepaalde waterstanden tengevolge van zowel hoge afvoeren als ijsvorming vast te stellen.
- De ontwikkelde benaderingsmethode is tamelijk onnauwkeurig, omdat:
 - er slechts een zeer beperkt aantal waarnemingen aan ten grondslag ligt,
 - er onzekerheid bestaat over de wijze van extrapolatie van de gegevens,
 - weinig informatie beschikbaar is ten aanzien van veranderingen van ruwheid van de rivier en wijzigingen in de afvoerverdeling bij de splitsingspunten.
- De benaderingsmethode is gebaseerd op in het verleden opgetreden verschijnselen en houdt dan ook alleen rekening met de invloed van een klimaatsverandering en de lozing van afvalwarmte voorzover die in het verleden in de waarnemingen naar voren zijn gekomen.

5.2 Aanbevelingen tot nader onderzoek

Uit het vooronderzoek is naar voren gekomen, dat weinig gegevens beschikbaar zijn over een aantal essentiële zaken, die betrekking hebben op de invloed van ijsvorming op waterstanden langs de Rijn en zijn takken in Nederland. Dit wordt veroorzaakt eensdeels doordat een redelijke ijsperiode maar een relatief zeldzaam gebeuren is, en anderdeels doordat het uitvoeren van prototypemetingen onder die omstandigheden moeilijk is. Als gevolg hiervan manifesteren zich leemten in de kennis van het verschijnsel, vooral ten aanzien van de volgende aspecten:

- het verloop van de afvoer tijdens een ijsperiode;
- wijzigingen in de afvoerverdeling bij de splitsingspunten;
- het verband tussen de plaatselijke afvoer en de plaatselijke waterstand, bij aanwezigheid van een vast ijsdek, met of zonder ijssdammen en rekening houdend met 1) de invloed van het winterbed op dit verband, en 2) het verloop van de ruwheid in de tijd;
- de invloed van de opwarming van het rivierwater (door de lozing van afvalwarmte op de rivier) op het verloop van de ijsperiode.

In verband met het bovenstaande worden de volgende aanbevelingen voor verder onderzoek gedaan:

- 1 Tijdens toekomstige ijsperiodes het uitvoeren van uitgebreide en frekwente prototypemetingen, waarbij alle van belang zijnde parameters worden bemonsterd. Van te voren dient een weloverwogen meetschema te worden opgesteld.
- 2 Het toepassen van de in dit verslag ontwikkelde benaderingsmethode op de situatie bij andere plaatsen langs de Rijn en zijn takken in Nederland, om na te gaan in hoeverre het ten aanzien van Kampen gevondene ook voor andere plaatsen tot een aanzienlijke verhoging van waterstanden bij dezelfde overschrijdingsfrequentie leidt.
- 3 Het nagaan of het opstellen van een (hydrologisch) simulatiemodel zinvol en mogelijk is. Een dergelijk rekenmodel kan dienen om de waarnemingsreeks van het afvoerverloop te Lobith, vooral tijdens perioden met ijs, uit te breiden. Dit kan in principe gebeuren via één van de twee hierna aangegeven methoden:
1) door voor de jaren van vóór 1911 te proberen de afvoeren te bepalen ge-

bruik makend van gegevens van duitse peilschaalaflezingen (die tot 1770 teruggaan), of 2) door uit te gaan van neerslagcijfers en een verband te leggen tussen neerslag en afvoer. De tijdelijke berging van neerslag in de vorm van sneeuw dient bij dit laatste in rekening te worden gebracht als dit van belang is. De uitvoer van het model dient te bestaan uit een afvoerverloop te Lobith, in combinatie met buitenluchttemperatuur en watertemperatuur.

- 4 Het nagaan of het zinvol is over te gaan tot het opstellen van een min of meer deterministisch rekenmodel, dat, gegeven de onder punt 3 beschreven uitvoer (die voor de periode vanaf 1911 al bekend is via waarnemingen), de afvoerverdeling over de Rijntakken en de plaatselijke waterstanden voorspelt. Dit model heeft een tweeledig doel:

- a door gebruik te maken van de gegevens van het onder punt 3 bedoelde model over de periode vóór 1911 het inzicht in de frekwentie en grootte van plaatselijke waterstandsverhogingen te vergroten;
- b de invloed van de verhoging van de watertemperatuur na te gaan door voor vorstperioden in het verleden de plaatselijke waterstanden te bepalen als de watertemperatuur een bepaald aantal graden hoger zou zijn geweest en deze te vergelijken met de werkelijk opgetreden waterstanden.

Het opstellen van een dergelijk deterministisch model is alleen mogelijk als de voorspellingstechniek ten aanzien van de afvoerverdeling tijdens een ijsperiode wordt verbeterd. Hetzelfde geldt ten aanzien van de verhoging van de plaatselijke waterstanden door een vast ijsdek, al of niet met ijsdammen.

Daarom wordt in dit kader aanbevolen:

- Het nagaan of bij bedekking met vast ijs van een of meerdere van de Rijntakken op theoretische gronden de afvoerverdeling bij de splitsingspunten met een redelijke nauwkeurigheid kan worden voorspeld.
- Het uitvoeren van een onderzoek naar de verhouding (C_2/C_1) van de ruwheid van de rivier met vast ijsdek met of zonder dammen (C_2) en de ruwheid van de rivier zonder vast ijsdek (C_1). Hierbij dient rekening te worden gehouden met de invloed van het winterbed en met het verloop van die verhouding C_2/C_1 in de tijd. Het bedoelde onderzoek zou in eerste instantie een inventarisatie van literatuurgegevens moeten omvatten.

Het zal duidelijk zijn, dat de in dit punt aangegeven ontwikkeling van een deterministisch model in zijn totaliteit moet gebeuren. Het is weinig zinvol om een van de genoemde onderdelen wel uit te voeren en de andere niet. Overigens is een fasering in de tijd wel mogelijk en zelfs gewenst.

LITERATUUR

- 1 ANONIEM,
A jégvédelem kézikönyve (Handbook of ice control),
Budapest, 1973 (in het Hongaars met Engels uittreksel), 239 pp.;
- 2 BENSON, M.A.,
Uniform flood-frequency estimation for Federal agencies,
Water Resources Research, Vol. 4, 1968, no. 5, pp. 891-908;
- 3 FRANKENSTEIN, G.E. and SMITH, N.,
The use of explosives in removing ice jams,
Proc. IAHR Symposium "Ice and its action on hydraulic structures", Reykjavik,
1970, paper 3.13;
- 4 GERRETSEN, J.H.,
Bepaling van extreem hoge afvoeren te Borgharen uit de extrapolatie van
jaarmaxima,
Rijkswaterstaat, directie Limburg, afdeling Rivierkunde, memorandum 74.5,
1974, augustus;
- 5 GERRITSEN, F.,
Ice problems in the Dutch rivers and estuaries,
Proc. "Port and Ocean Engng. under Arctic conditions", Techn. Univ. Norway,
1972, pp. 582-608;
- 6 HOUTE, J. van,
Verslag van de ijswinter 1962-63,
Rijkswaterstaat, Directie Bovenrivieren, Afdeling Studiedienst, nota 64.2,
1964, januari;
- 7 KIVISILD, H.R.,
Hanging ice dams,
Proc. 8th IAHR congress, Montreal, 1959, Vol III, Seminar I: "Ice problems
in hydraulic structures";
- 8 KLEY, J. van der,
IJsopruiming door middel van springstoffen (1),
Weg- en waterbouw, Vol. 25, 1965, no. 1, Jan., pp. 7-14;

LITERATUUR (vervolg)

- 9 KLEY, J. van der,
The use of explosives for clearing ice,
Rijkswaterstaat Communications Nr. 7, 1965, 55 pp.;
- 10 KONTUR, G.,
Die Eisverhältnisse der Donau, Erfahrungen mit Eisbrecher-Schiffen,
Mitteilungen des Franzius Inst., Hannover, Vol. 33, 1969, pp. 215-242;
- 11 LABRIJN, A.,
Het klimaat van Nederland gedurende de laatste twee en een halve eeuw,
Mededelingen en verhandelingen K.N.M.I., no. 49, 1945;
- 12 MICHEL, B.,
Critère de stabilité hydrodynamique du bord frontal d'un champ de glace,
Proc. 11th IAHR Congr., Leningrad, 1965, Vol. V, Seminar paper 1-11;
- 13 MOSONYI, E.,
Wahrscheinlichkeit der Hochwasserabflüsse im Niederrhein,
Karlsruhe, 1972, Jan., 44 pp. + tab. + fig.;
- 14 NATURAL ENVIRONMENT RESEARCH COUNCIL,
Flood Studies Report, Volume I: Hydrological studies,
Natural Environment Research Council, 1975;
- 15 OUDSHOORN, H.M.,
Ice formation and associated hydrodynamic effects in the lower part of
the River Rhine,
Proc. IAHR, Symposium "Ice and its action on hydraulic structures", Reykjavik
(Iceland), 1970, September;
- 16 PAILEY, P.P., MACAGNO, E.O., and KENNEDY, J.F.,
Winter-regime thermal response of heated streams,
Proc. Am. Soc. Civ. Engrs., Vol. 100, 1974, no. HY4, April, pp. 531-551;
- 17 RIJKSWATERSTAAT,
IJsverslag winter 1940-1941,
Overdruk van bijlage 5 van het verslag Openbare Werken 1940, 's Gravenhage,
Staatsdrukkerij;

LITERATUUR (vervolg)

- 18 RIJKSWATERSTAAT,
IJsverslag winter 1962-1963,
's Gravenhage, Staatsdrukkerij, 1966;
- 19 SANTEMA, P. en VALKEN, K.F.,
Formation and movement of floating ice in Dutch rivers with special
reference to tidal region,
UGGI Assemblée General, Comptes Rendues, Tome IV, pp. 175-181;
- 20 SIJBESMA, R.P.,
Toepassing theorie der extreme waarden op de maxima der jaarafvoeren van
de Bovenrijn,
Rijkswaterstaat, direktie Bovenrivieren, afdeling Studiedienst, nota 66.5,
1966;
- 21 TOPS, J.W., WEMELSFELDER, P.J. et VOLKER, A.,
Le charriage des glaces sur le Rhin hollandais,
Bull. Mens. du Cebedeau, no. 121, 1961, Jan., pp. 12-13;
- 22 WEMELSFELDER, P.J.,
De invloed van ijs op de waterstanden der groote rivieren,
De Ingenieur, Vol. 55, 1940, no. 7, 16 Feb., pp. A57-A59;
- 23 WEMELSFELDER, P.J.,
Gegevens ijsbezetting in Nederland,
Prae-advies 14e Binnenscheepvaartcongres, 1948, pp. 93-140 (met 1 kaart);
- 24 WEMELSFELDER, P.J.,
Een onderzoek naar de warmtebalans in een rivier gedurende vorst,
De Ingenieur, Vol. 68, 1956, no. 8, 24 Febr., pp. B29-B35;
- 25 WEMELSFELDER, P.J.,
Wordt warmtelozing door centrales in de toekomst een probleem?,
De Ingenieur, Vol. 80, 1968, no. 51, 20 dec., pp. B179-B198;
- 26 WESSELS, H.R.A.,
Verandering van de Rijntemperatuur: een meteorologische analyse,
De Ingenieur, Vol. 85, 1973, no. 5, 1 feb., pp. 88-90;

LITERATUUR (vervolg)

- 27 WIJNGAARDEN, H. van,
IJsbezwaar op de bovenrivieren,
Rijkswaterstaat, Directie Bovenrivieren, Afdeling Studiedienst, nota 60.2,
1960, januari;
- 28 WILLIAMS, G.P.,
Break-up and control of river ice,
Proc. IAHR Symposium "Ice and its action on hydraulic structures", Reykjavik,
1970, paper 3.12, 15 pp.

ijswinter	begin vorst *)		einde vorst **)	
	$\bar{T}_1 < 0^{\circ}\text{C}$	$\bar{T}_1 < -2^{\circ}\text{C}$	$\bar{T}_1 > 0^{\circ}\text{C}$	$\bar{T}_1 > -2^{\circ}\text{C}$
1890-91	7-12	7-12	24-1	24-1
1892-93	23-12	23-12	20-1	19-1
1916-17	15-1	20-1	11-2	10-2
1928-29	25-1	25-1	3-3	3-3
1939-40	27-12	28-12	21-2	19-2
1940-41	1-1	1-1	8-2	7-2
1941-42	10-1	10-1	8-3	7-3
1946-47 (I)	14-12	14-12	25-12	25-12
1946-47 (III)	21-1	22-1	13-3	9-3
1953-54	24-1	24-1	11-2	8-2
1955-56	30-1	30-1	27-2	27-2
1962-63	22-12	22-12	4-3	27-2

*) op aangegeven datum was voor het eerst \bar{T}_1 lager dan de aangegeven waarde

**) op aangegeven datum was voor het eerst \bar{T}_1 hoger dan de aangegeven waarde

Tabel 1 Begin en einde vorstperiode in de verschillende ijswinters

ijswinter	eerste dag met drijfijis			eerste dag met vast ijs			laatste dag met vast ijs			laatste dag met drijfijis		
	IJssel	Nederrijn	Waal	IJssel	Nederrijn	Waal	IJssel	Nederrijn	Waal	IJssel	Nederrijn	Waal
1890-91	9-12	9-12	11-12	14-12	15-12	22-12	4-2	5-2	9-2	10-2	10-2	10-2
1892-93	25-12	26-12	27-12	31-12	1-1	3-1	9-2	31-1	3-2	9-2	9-2	8-2
1916-17	22-1	23-1	25-1	2-2	1-2	2-2	27-2	26-2	26-2	28-2	27-2	26-2
1928-29	2-2	2-2	3-2	3-2	11-2	11-2	12-3	8-3	12-3	14-3	12-3	14-3
1939-40	3-1	3-1	4-1	5-1	11-1	20-1	28-2	26-2	23-2	29-2	28-2	26-2
1940-41	2-1	2-1	1-1	5-1	13-1	-	11-2	21-1	-	11-2	26-1	22-1
1941-42	12-1	12-1	12-1	14-1	15-1	16-1	14-3	10-3	6-3	16-3	12-3	12-3
1946-47 (I)	17-12	17-12	19-12	18-12	21-12	-	-	2-1	-	-	-	29-12
1946-47 (III)	26-1	27-1	26-1	27-1	29-1	30-1	16-3	8-3	8-3	16-3	12-3	11-3
1953-54	28-1	27-1	28-1	29-1	30-1	1-2	24-2	22-2	16-2	24-2	22-2	22-2
1955-56	2-2	1-2	1-2	11-2	14-2	24-2	3-3	2-3	28-2	4-3	4-3	5-3
1962-63	26-12	28-12	30-12	1-1	1-1	18-1	22-2	13-2	12-2	22-2	17-2	3-3

Tabel 2 Begin en einde van voorkomen van drijfijis en vast ijs op de drie Rijntakken in Nederland

ijswinter	aantal dagen tussen einde vorstperiode en einde vast ijsdek			aantal dagen tussen einde vorstperiode en einde drijfijis		
	IJssel	Nederrijn	Waal	IJssel	Nederrijn	Waal
1890-91	12	13	17	18	18	18
1892-93	20	11	14	20	20	19
1916-17	17	16	16	18	17	16
1928-29	10	6	10	12	10	12
1939-40	8	6	3	9	8	6
1940-41	4	-17	-	4	-12	-16
1941-42	7	3	- 2	9	5	5
1946-47 (I)	-	-	-	-	-	-
1946-47 (III)	4	- 4	- 4	4	0	- 1
1953-54	14	12	6	14	12	12
1955-56	6	5	2	7	7	8
1962-63	-9	-18	-19	-9	-14	0

Tabel 3 Aantal dagen gelegen tussen einde vorstperiode en afwezigheid van
vast ijsdek en drijfijis

ijswinter	$\bar{T}_1 < 0^{\circ}\text{C}$		$\bar{T}_1 < -2^{\circ}\text{C}$	
	aantal dagen	\bar{T}_e ($^{\circ}\text{C}$)	aantal dagen	\bar{T}_1 ($^{\circ}\text{C}$)
1890-91	2	- 5,4	2	- 5,4
1992-93	2	- 5,0	2	- 5,0
1916-17	7	- 1,2	2	- 5,0
1928-29	8	- 1,3	8	- 1,3
1939-40	7	- 1,4	6	- 1,5
1940-41	1	- 5,0	1	- 5,0
1941-42	2	- 5,2	2	- 5,2
1946-47 (I)	3	- 5,8	3	- 5,8
1946-47 (III)	5	- 3,9	4	- 5,1
1953-54	4	- 5,9	4	- 5,9
1955-56	3	- 8,8	3	- 8,8
1962-63	4	- 6,3	4	- 6,3

Tabel 4 Aantal dagen tussen begin vorstperiode en optreden drijfijis op IJssel en gemiddelde luchttemperatuur

ijswinter	$\bar{T}_1 > 0^\circ\text{C}$		$\bar{T}_1 > -2^\circ\text{C}$	
	aantal dagen	\bar{T}_1 ($^\circ\text{C}$)	aantal dagen	\bar{T}_1 ($^\circ\text{C}$)
1890-91	18	+ 2,1	18	+ 2,1
1892-93	21	+ 2,6	22	+ 2,5
1916-17	18	+ 1,7	19	+ 1,6
1928-29	12	+ 1,5	12	+ 1,5
1939-40	9	+ 4,4	11	+ 3,3
1940-41	4	+ 5,3	5	+ 4,2
1941-42	9	+ 2,2	10	+ 1,8
1946-47 (I)	-	-	-	-
1946-47 (III)	4	+ 2,3	8	+ 0,8
1953-54	14	+ 1,8	17	+ 1,4
1955-56	7	+ 4,3	7	+ 4,3
1962-63	-9	- 3,1	-4	- 5,5

Tabel 5 Aantal dagen tussen einde vorstperiode en ver-
dwijnen drijfijs op IJssel en gemiddelde lucht-
temperatuur

stap- nummer	omschrijving stap
1	vaststelling per plaats langs de rivier frekwentie van voorkomen van perioden met een vast ijsdek
2	aanname van frekwentie van optreden (hoge) afvoeren tijdens periode met vast ijsdek per plaats langs de rivier
3	per plaats langs de rivier bepalen van invloed van vast ijsdek op waterstanden bij verschillende afvoeren
4	per plaats langs de rivier opstellen frekwentieverdeling van (hoge) waterstanden tengevolge van aanwezigheid van vast ijsdek

Tabel 6 Overzicht van verschillende stappen van benaderingsmethode

ijswinter	maximale afvoer [m ³ /s]	rangorde
1916-1917	2000 *)	3
1928-1929	2150	4
1939-1940	5000 *)	8
1940-1941	8000	9
1941-1942	2400 *)	6
1946-1947 (III)	5000 *)	7
1953-1954	2000	2
1955-1956	2200	5
1962-1963	1300	1

*) Afgeleid uit voor vast ijsdek gekorrigeerde waterstand te Lobith

Tabel 7 Maximale afvoeren te Lobith tijdens perioden met vast ijs op de benedenloop van de IJssel

i	$\phi_i = \frac{i}{N+1}$	y_i	$(y_i - \bar{y})^2$	x_i	$(x_i - \bar{x})^2$
1	0,10	- 0,835	1,756	1300	4157521
2	0,20	- 0,477	0,935	2000	1792921
3	0,30	- 0,187	0,458	2000	1792921
4	0,40	+ 0,089	0,161	2150	1413721
5	0,50	+ 0,368	0,015	2200	1297321
6	0,60	+ 0,672	0,033	2400	881721
7	0,70	+ 1,031	0,293	5000	2758921
8	0,80	+ 1,500	1,002	5000	2758921
9	0,90	+ 2,250	3,098	8000	21724920
Σ		+ 4,901	7,750	30050	38578888
		$\bar{y} = 0,4901$	$s_y = 0,984$	$\bar{x} = 3339$	$s_x = 2196$

$$y = \hat{\alpha} (x - \hat{\beta})$$

$$\hat{\alpha} = \frac{s_y}{s_x} = 4,481 \cdot 10^{-4}$$

$$\hat{\beta} = \bar{x} - \frac{\bar{y}}{s_y} \cdot s_x = 2245$$

$$y = 4,481 \cdot 10^{-4} (x - 2245)$$

Tabel 8 Bepaling koëfficiënten kansverdelingsfunctie afvoeren te Lobith tijdens perioden met vast ijs op de benedenloop van de IJssel

jaar	afvoer (m ³ /s)	rangorde
1936	5250	7
1938	4450	6
1963	950	1
1928	6100	8
1915	3150	3
1951	3450	4
1970	9450	9
1924	3100	2
1914	4050	5

(a)

jaar	afvoer (m ³ /s)	rangorde
1945	8350	9
1919	3450	4
1920	3950	5
1957	5350	8
1921	1750	2
1964	1850	3
1908	4050	6
1932	1700	1
1955	5250	7

(b)

Tabel 9(a) en (b) Verzamelingen van 9 willekeurig gekozen maximale afvoeren te Lobith in de maanden februari

jaar	afvoer (m ³ /s)	rangorde	jaar	afvoer (m ³ /s)	rangorde
1901	3100	18	1937	7700	62
1902	4600	43	1938	4450	39
1903	1600	4	1939	3450	26
1904	5550	51	1940	-	-
1905	2350	10	1941	6750	60
1906	2250	9	1942	-	-
1907	4150	37	1943	2850	17
1908	4050	35	1944	3750	30
1909	5500	50	1945	8350	64
1910	6050	55	1946	9350	65
1911	3350	24	1947	-	-
1912	2850	16	1948	6900	61
1913	4800	45	1949	1300	2
1914	4050	34	1950	4450	40
1915	3150	20	1951	3450	25
1916	6600	57	1952	3200	22
1917	-	-	1953	4200	38
1918	3200	21	1954	1550	3
1919	3450	27	1955	5250	47
1920	3950	33	1956	3650	29
1921	2750	13	1957	5350	49
1922	3850	32	1958	8200	64
1923	5850	54	1959	4450	41
1924	3100	19	1960	2500	12
1925	2800	15	1961	5550	52
1926	6700	59	1962	5400	48
1927	2500	11	1963	900	1
1928	6100	56	1964	1850	8
1929	-	-	1965	3800	31
1930	1750	6	1966	6600	58
1931	4800	44	1967	4450	42
1932	1700	6	1968	4150	36
1933	2800	14	1969	3250	23
1934	1750	7	1970	9450	66
1935	5700	53	1971	3450	28
1936	5250	46			

Tabel 10 Maximale afvoeren te Lobith gedurende de maanden februari
in de periode 1901-1971

afvoer Lobith (m ³ /s)	Kampen waterstand (m + NAP)	waterdiepte (m)
1000	- 0,30	3,73
2000	- 0,13	3,90
3000	+ 0,11	4,14
4000	+ 0,29	4,32
5000	+ 0,50	4,53
6000	+ 0,76	4,79
7000	+ 0,97	5,00
8000	+ 1,18	5,21
9000	+ 1,40	5,43
10000	+ 1,60	5,63
11000	+ 1,78	5,81
12000	+ 1,93	6,96
13000	+ 2,10	6,13
14000	+ 2,24	6,27
15000	+ 2,39	6,42
16000	+ 2,55	6,58
17000	+ 2,71	6,74
18000	+ 2,87	6,90

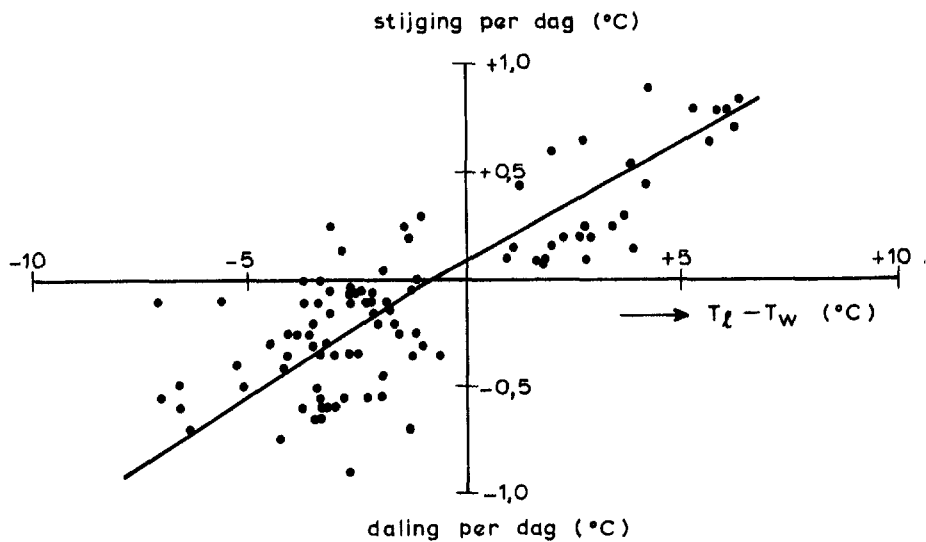
N.B. Gemiddelde bodemligging over traject
995.000 - 996.000 volgens peilingen
1975 4,03 m - NAP

Tabel 11 Waterstanden en gemiddelde waterdiepten bij peilschaal
Kampen voor verschillende afvoeren te Lobith

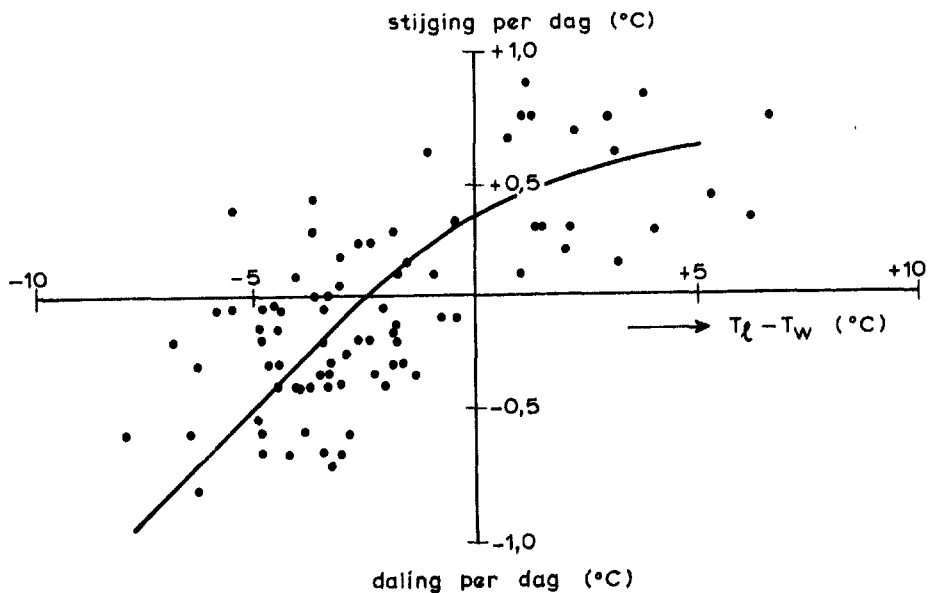
Tabel 12 Frequenties van waterstanden te Kampen tengevolge van hoge afvoeren alleen en tengevolge van vast ijsdek alleen

Q_{Lobith} (m / s)	zonder vast ijs			met vast ijs					
	frekw. (-)	h_1 (m)	frekw. ijsperiode (-)	frekw. afvoer tijdens ijs- periode (-)	frekw. waterst. tijdens ijs- periode (-)	h_2 (m) [*] = waterstand (m + NAP) + 4,03			
						Q_2/Q_1			
						1,00		1,50	
						C_2/C_1		C_2/C_1	
0,80	1,00	0,80	1,00						
1000		3,73	0,15	0,826	0,1239				
2000		3,90	0,15	0,672	0,1008				
3000		4,14	0,15	0,490	0,0735				
4000		4,32	0,15	0,365	0,0549				
5000	0,7143	4,53	0,15	0,2525	0,0379	6,81	5,93	7,68	6,69
6000	0,5000	4,79	0,15	0,1696	0,0254	7,21	6,27	8,17	7,11
7000	0,3333	5,00	0,15	0,1120	0,0168	7,52	6,55	8,61	7,48
8000	0,1667	5,21	0,15	0,0731	0,0110	7,84	6,83	8,97	7,81
9000	0,0909	5,43	0,15	0,0473	0,0071	8,17	7,11	9,33	8,12
10000	0,0526	5,63	0,15	0,0305	0,0046	8,47	7,36	9,66	8,41
11000	0,0277	5,81	0,15	0,0196	0,0029	8,74	7,61	10,02	8,72
12000	0,0149	5,96	0,15	0,0126	0,0019	8,97	7,81	10,38	9,04
13000	0,0090	6,13	0,15	0,0080	0,0012	9,22	8,03		
14000	0,0043	6,27	0,15	0,0051	0,0008	9,44	8,31		
15000	0,0023	6,42	0,15	0,0033	0,0005	9,66	8,41		
16000	0,0012	6,58	0,15						
17000	0,0006	6,74	0,15						
18000	0,0003	6,90	0,15						

^{}) aangenomen $d/h_2 = 0,05$

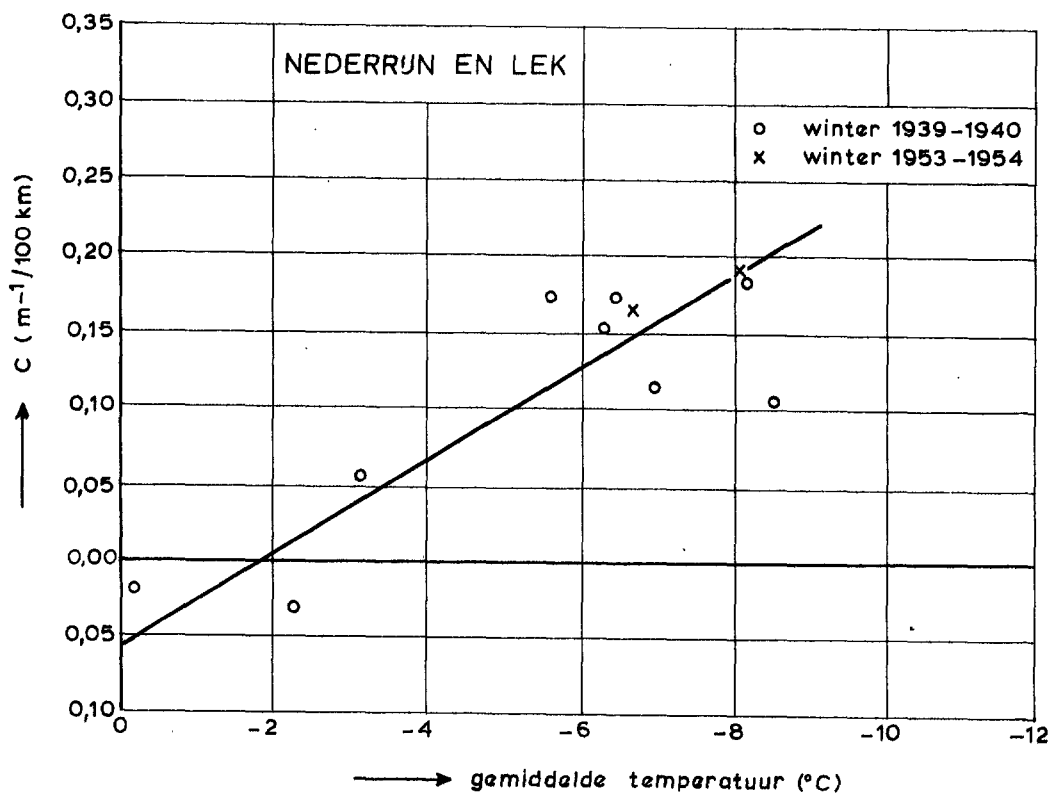
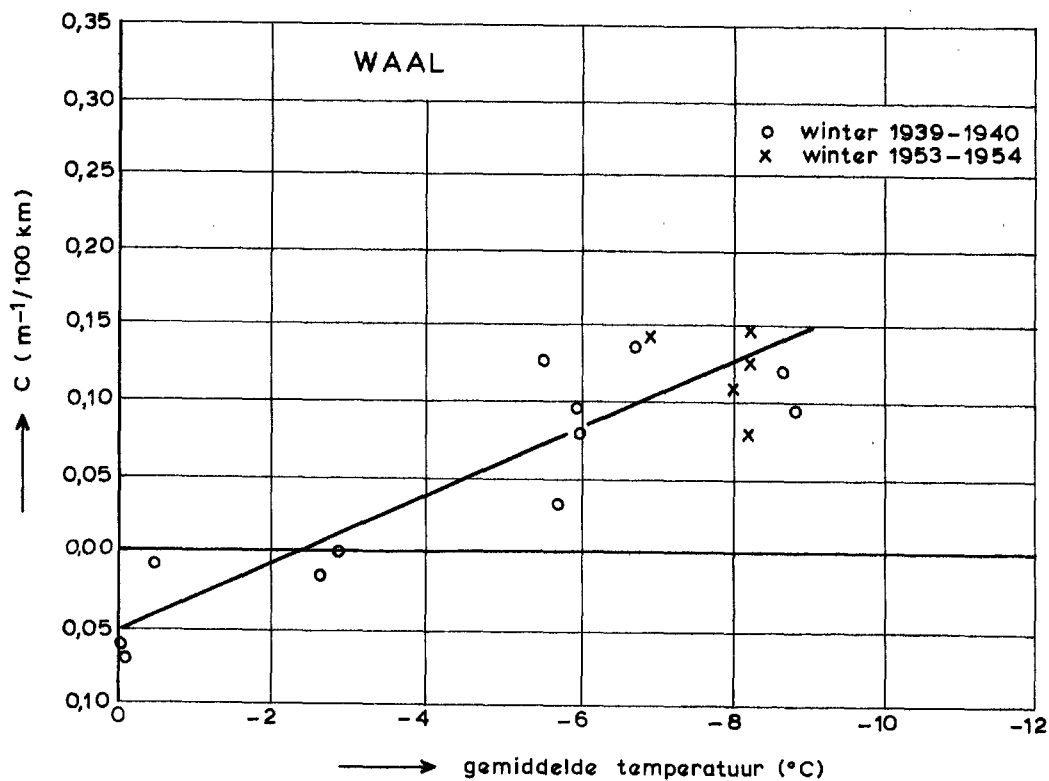


(a) Rijn bij Lobith,
1959, april ... september

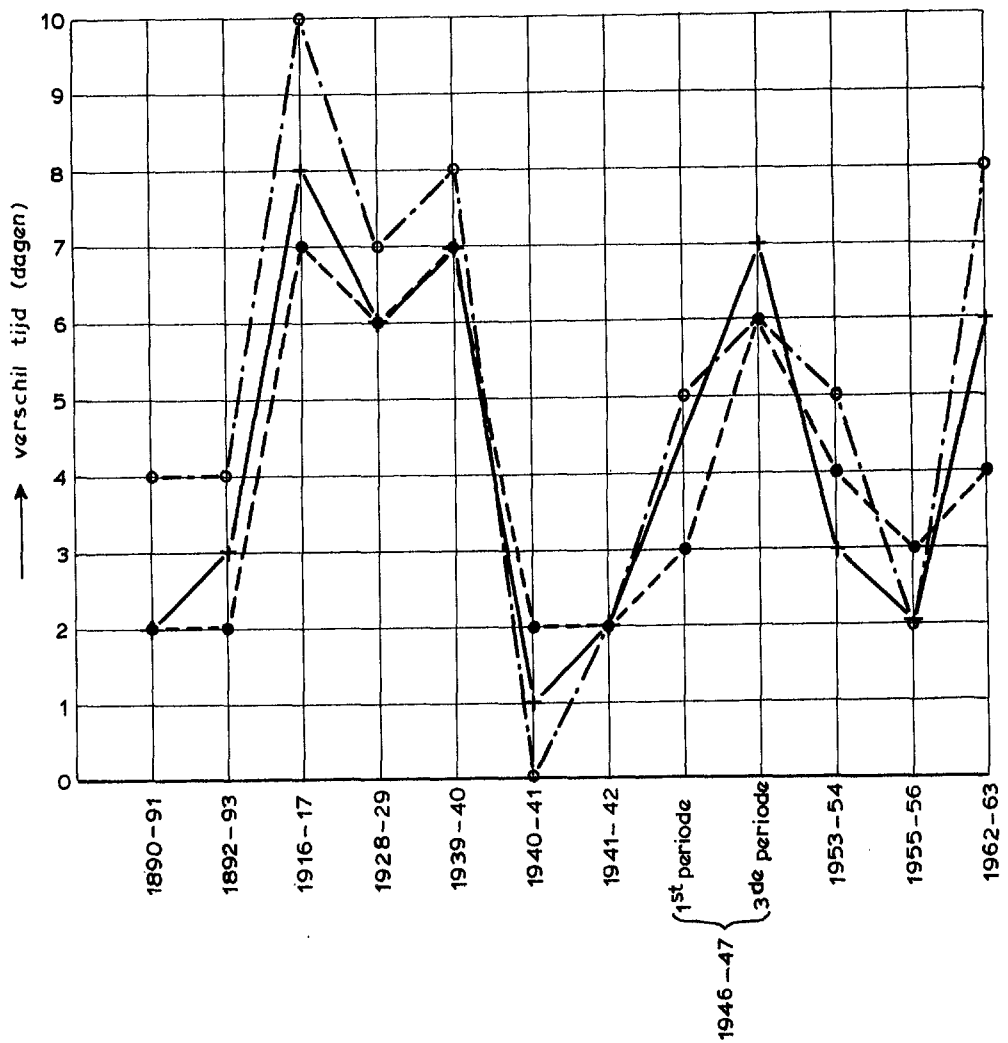


(b) Merwede bij Gorinchem,
1964, april ... september

KORRELATIE TUSSEN HET TEMPERATUURVERSCHIL
 LUCHT / WATER EN DE DAGGRADIËNT VAN DE
 WATERTEMPERATUUR (WEMELSFELDER [25])

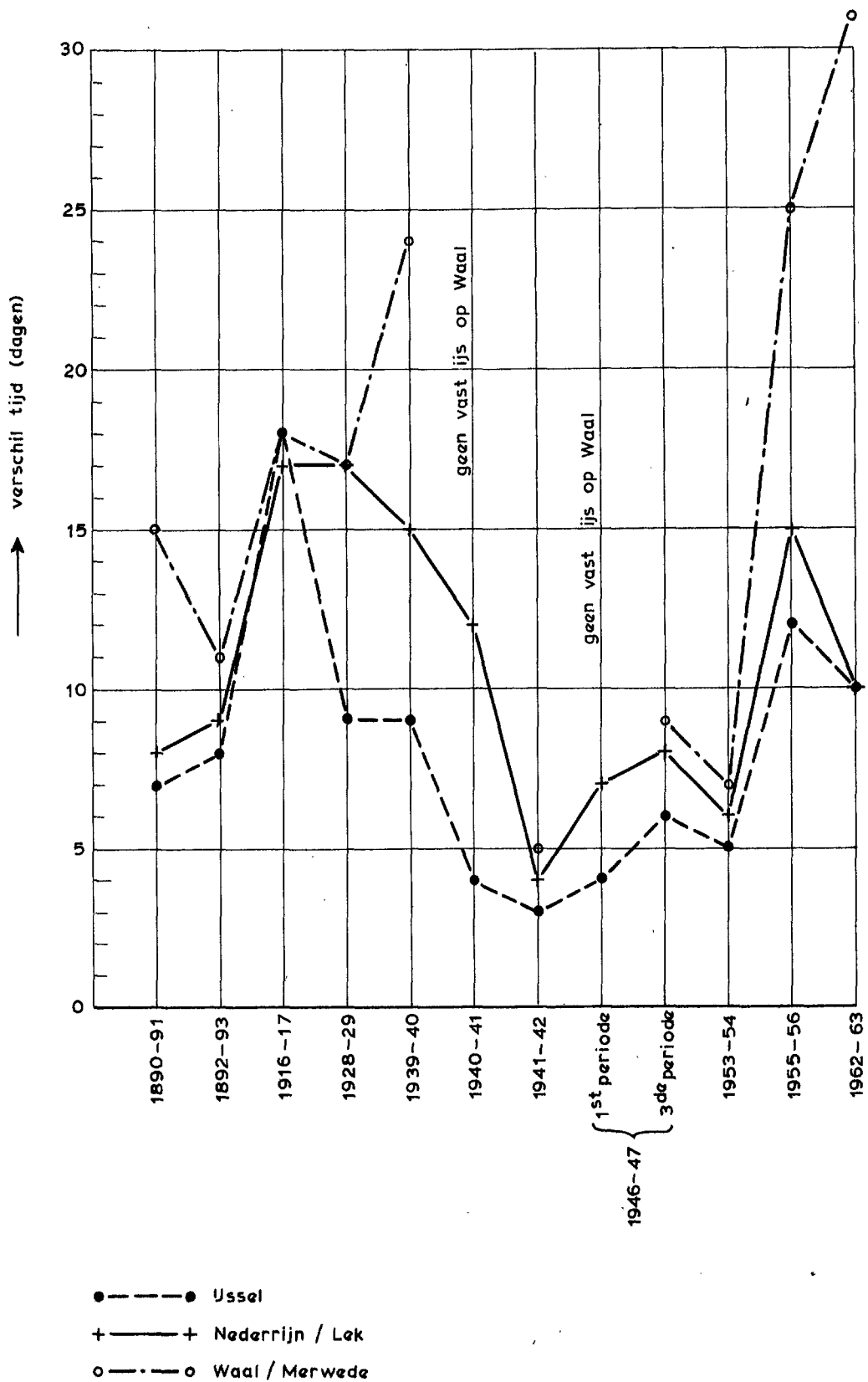


TOENAME VAN DE HOEVEELHEID DRUIFJS OP
 DE WAAL EN DE NEDERRIJN EN LEK
 (ONTLEEND AAN OUDSHOORN [15])

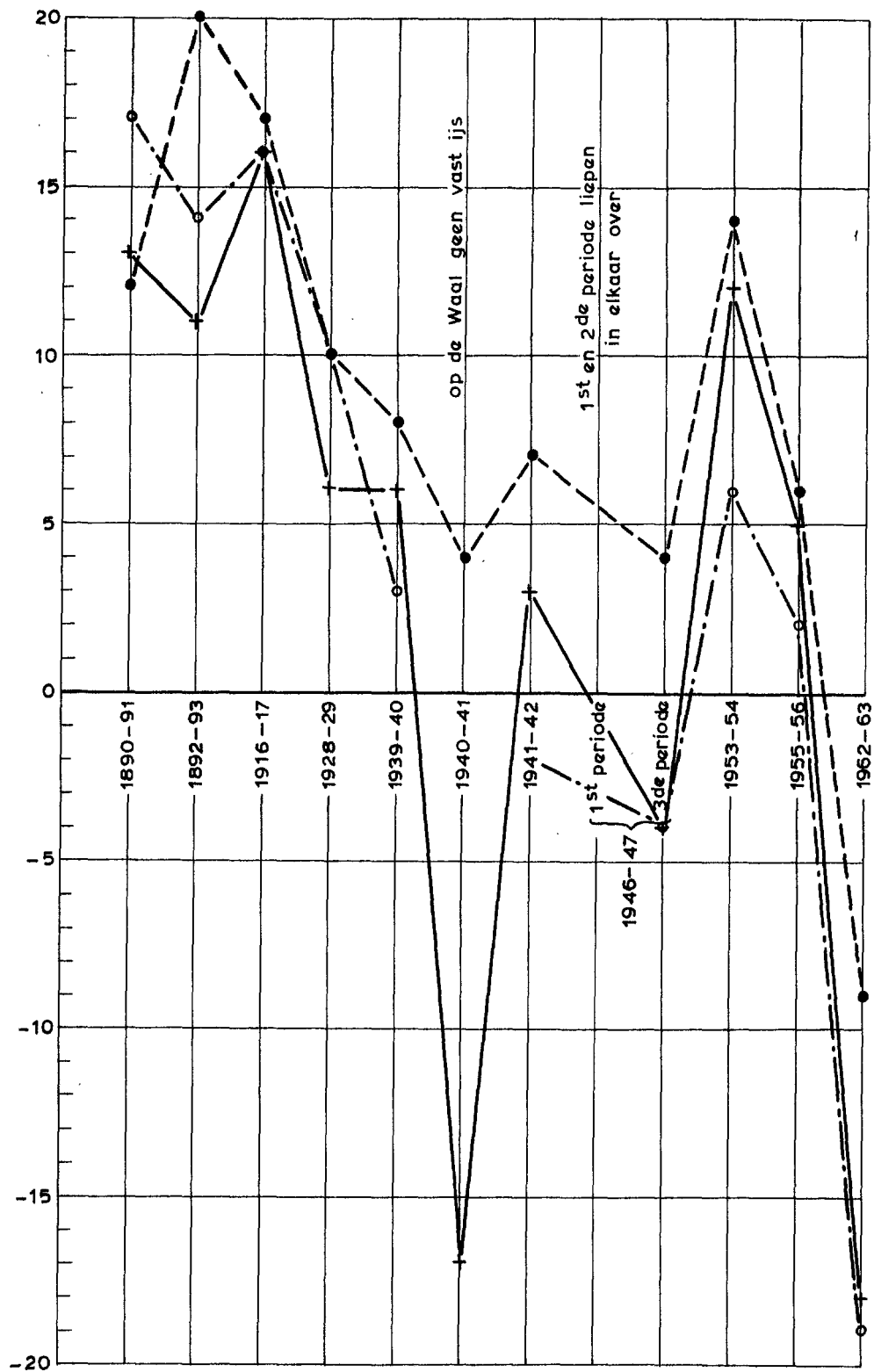


● - - - ● Ussel
 + ——— + Nederrijn / Lek
 ○ - - - ○ Waal / Merwade

AANTAL DAGEN TUSSEN BEGIN VORSTPERIODE EN
TUDSTIP WAAROP DRUIFJUS WORDT WAARGENOMEN

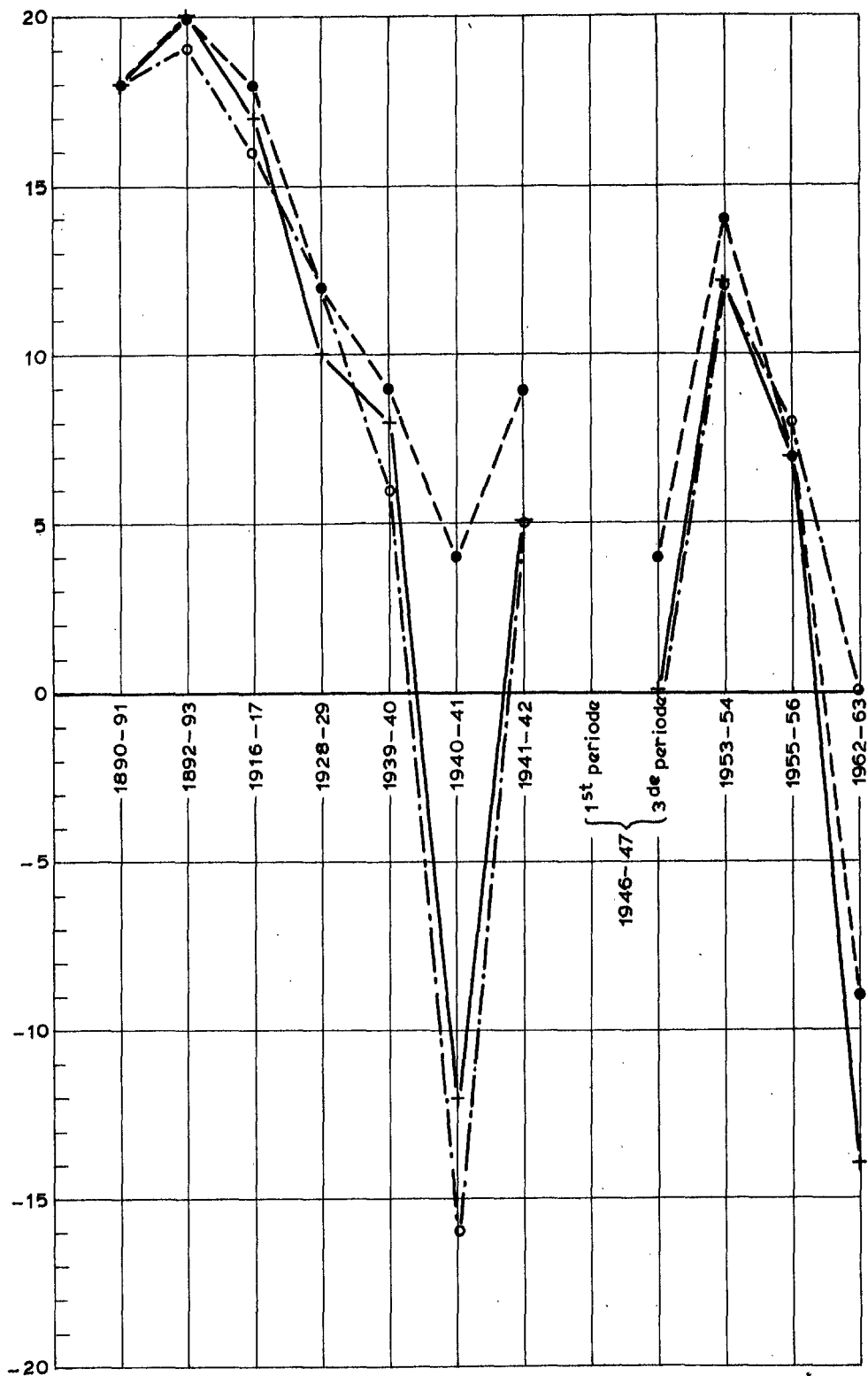


AANTAL DAGEN TUSSEN BEGIN VORSTPERIODE EN
 DATUM WAAROP VAST IJS WORDT WAARGENOMEN



● --- ● IJssel
 + --- + Nederrijn / Lek
 ○ --- ○ Waal / Merwede

AANTAL DAGEN TUSSEN INVALLEN DOOI EN
 VERDWIJNEN VAST IJS



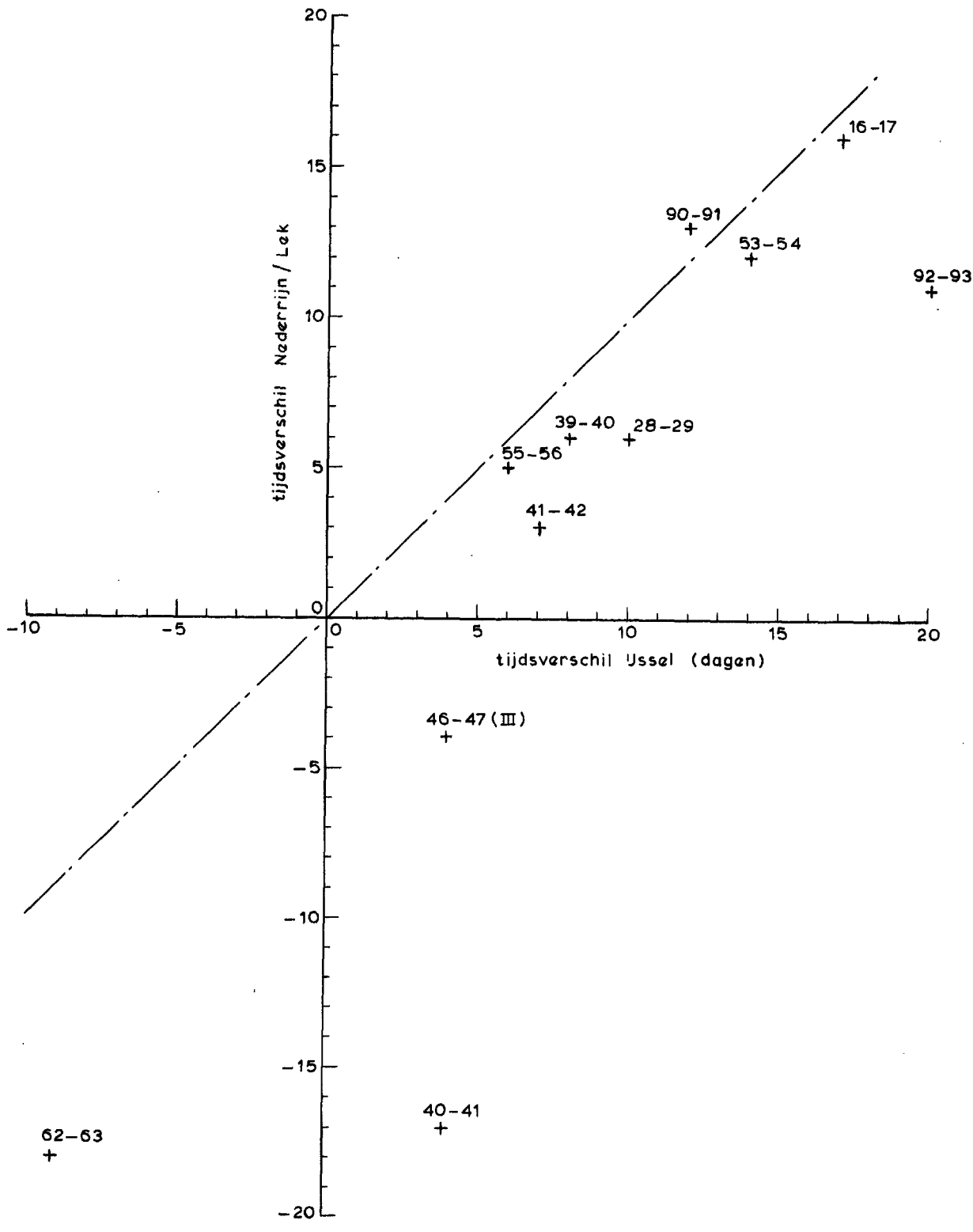
● - - - ● Ussel
 + - - - + Nederrijn / Lek
 ○ - - - ○ Waal / Merwede

AANTAL DAGEN TUSSEN EINDE VORSTPERIODE
EN VERDWIJNEN DRUFJUS

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1104

FIG. 6

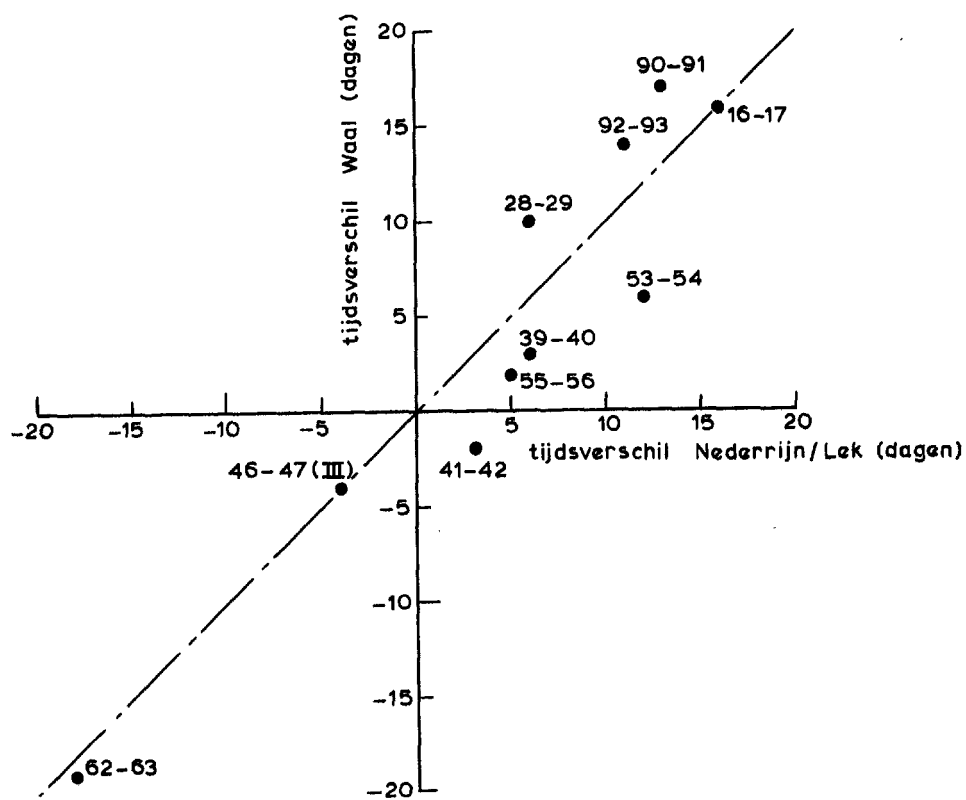


KORRELATIE TUSSEN TIJDSVERSCHIL TUSSEN
 EINDE VORSTPERIODE EN AFWEZIGHEID VAN
 VAST USDEK OP USSEL EN NEDERRIJN/LEK

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1104

FIG. 7 a

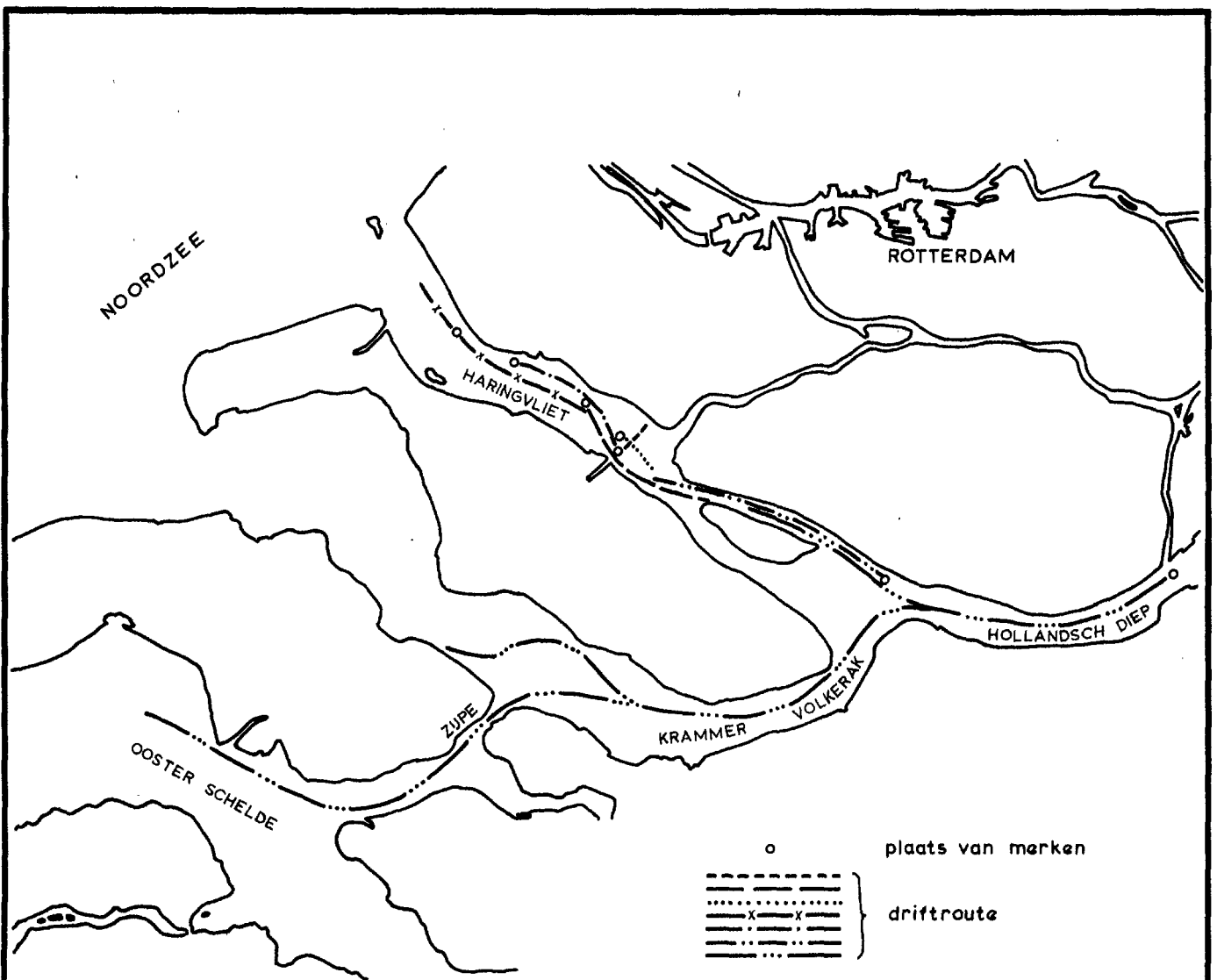


KORRELATIE TUSSEN TIJDSVERSCHIL TUSSEN EINDE VORSTPERIODE EN AFWEZIGHEID VAN VAST USDEK OP NEDERRIJN/LEK EN WAAL/MERWEDEN

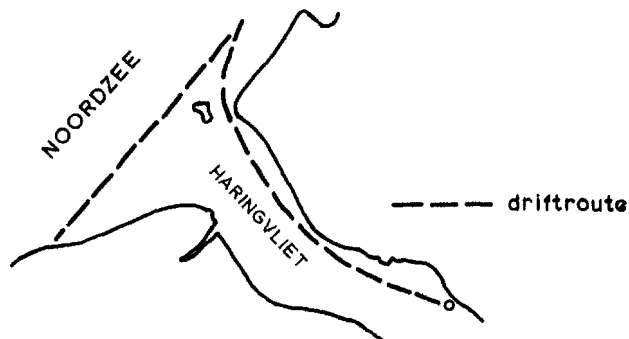
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1104

FIG. 7 b

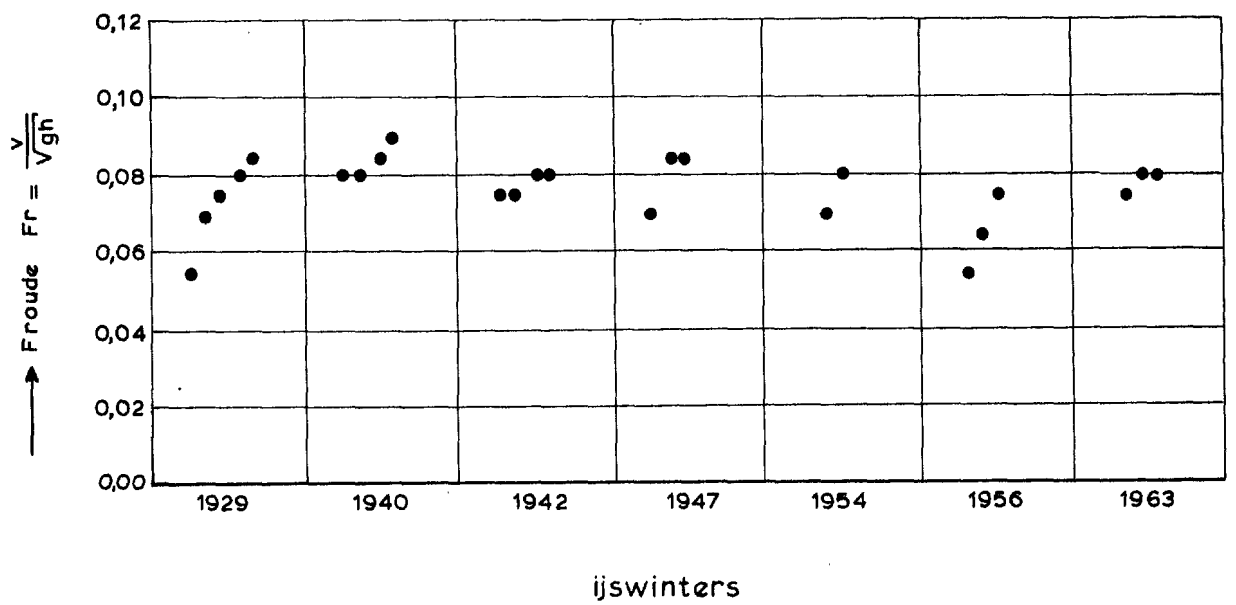


(a) NOORDOOSTELUKE WIND

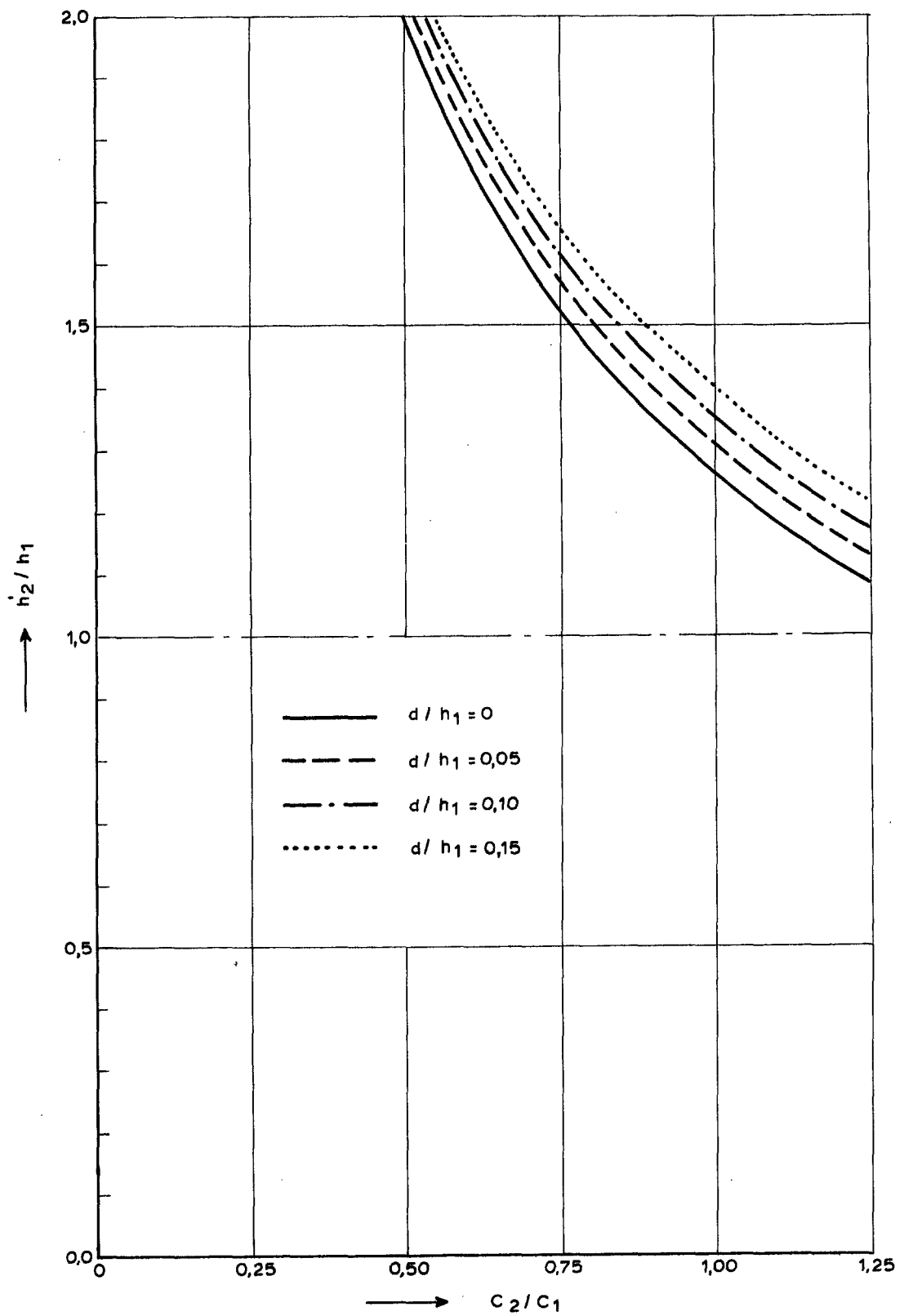


(b) ZUIDWESTELUKE WIND

WAARGENOMEN ROUTES VAN EEN AANTAL
USSCHOTSSEN (ONTLEEND AAN OUDSHOORN [15])



GROOTTE VAN FROUDE-GETAL BIJ VORMING
VAN IJSDAM (ONTLEEND AAN OUDSHOORN [15])

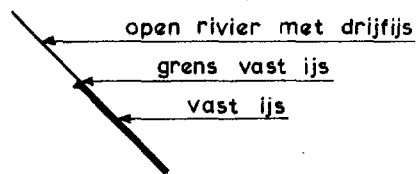
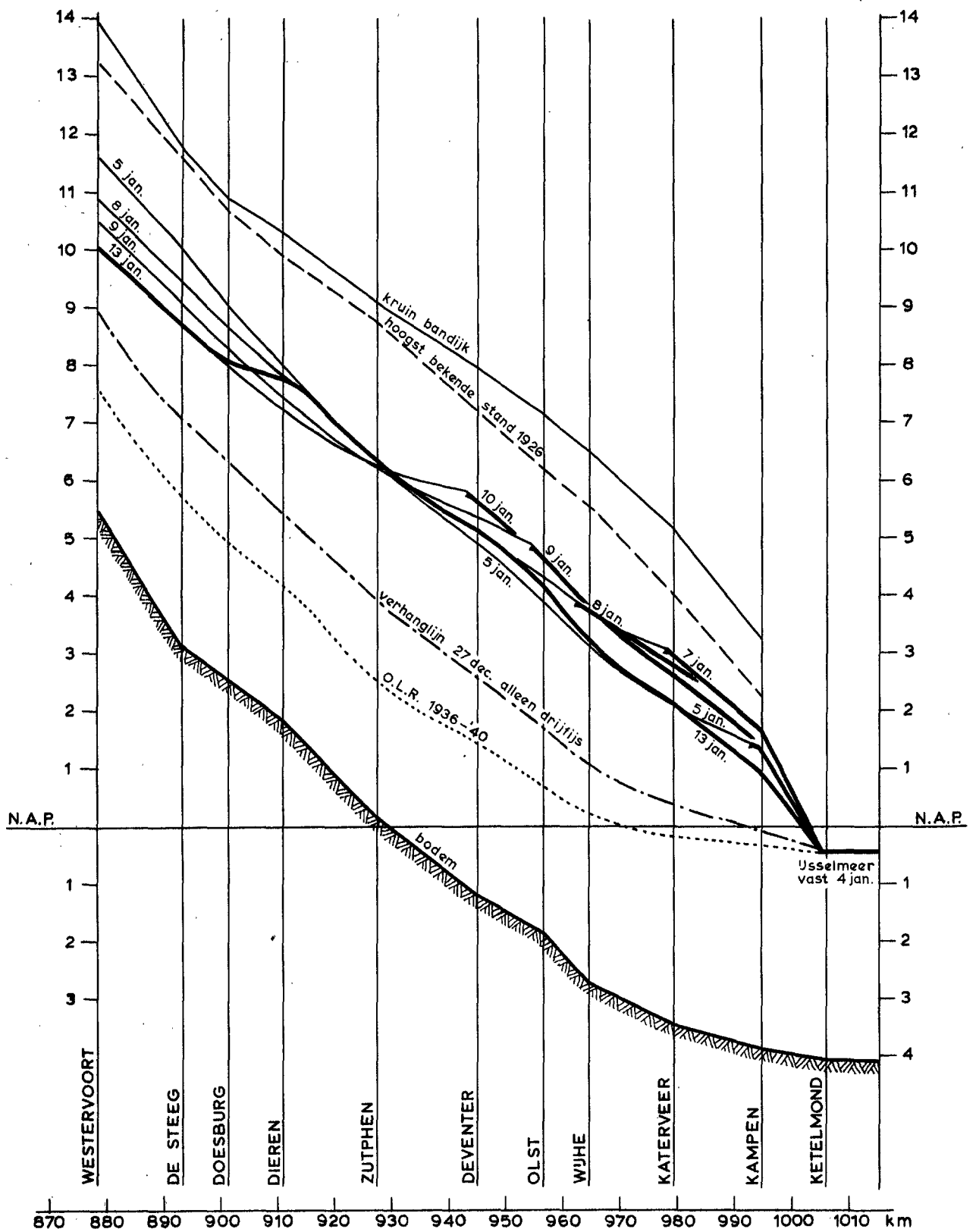


VERHOOGING WATERSTAND DOOR OPTREDEN
VAN VAST USDEK

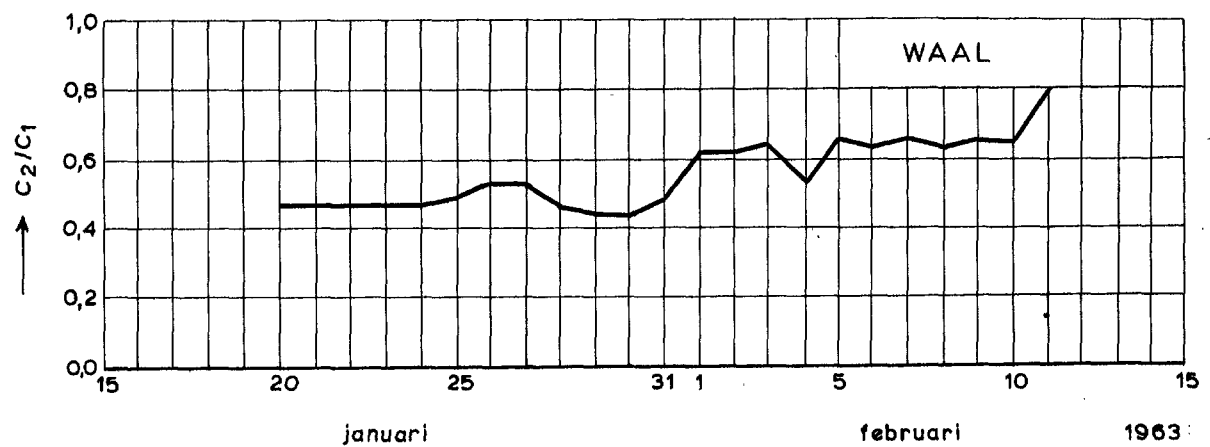
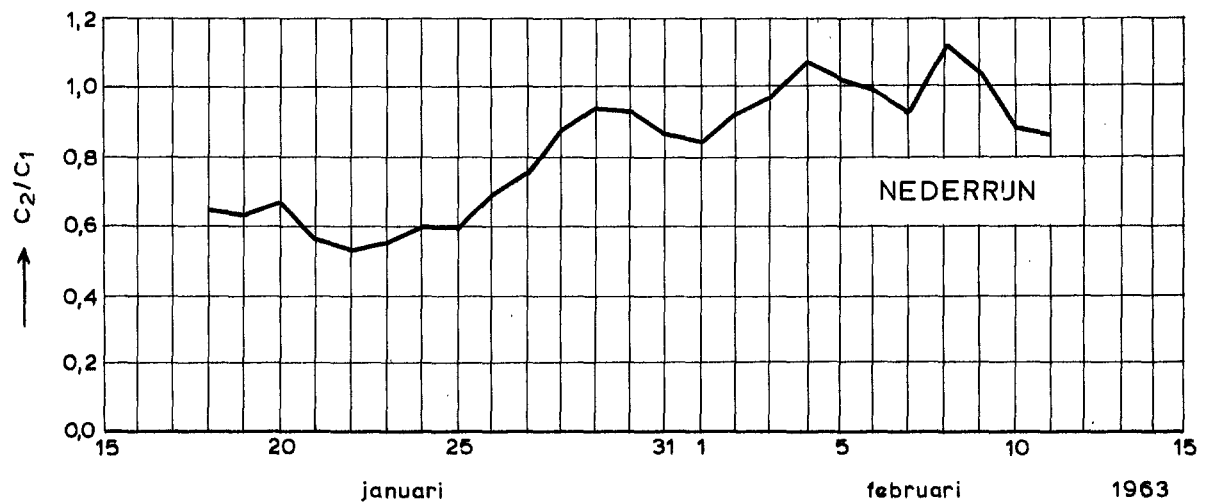
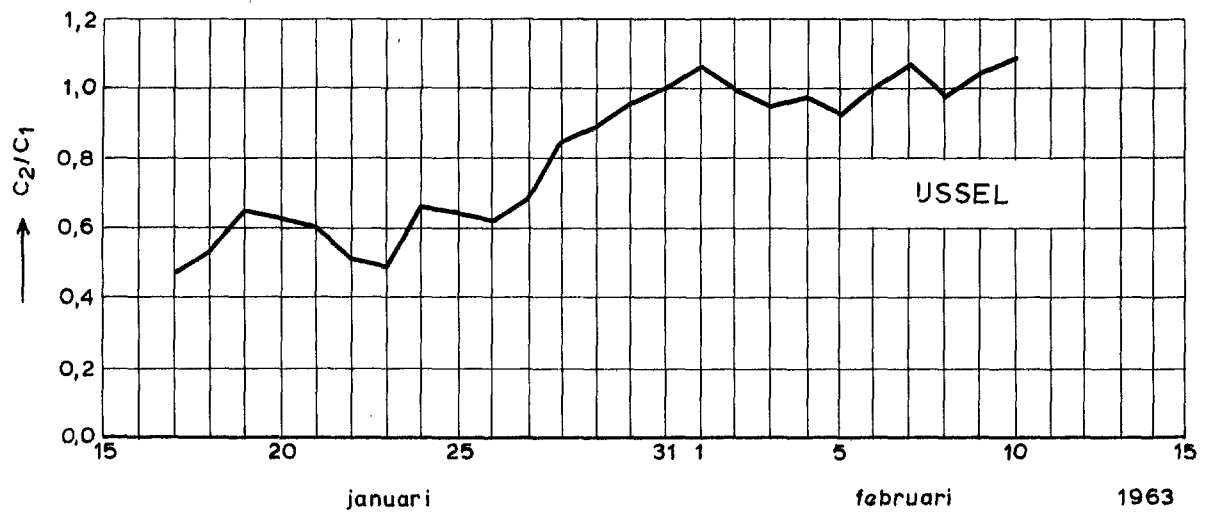
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1104

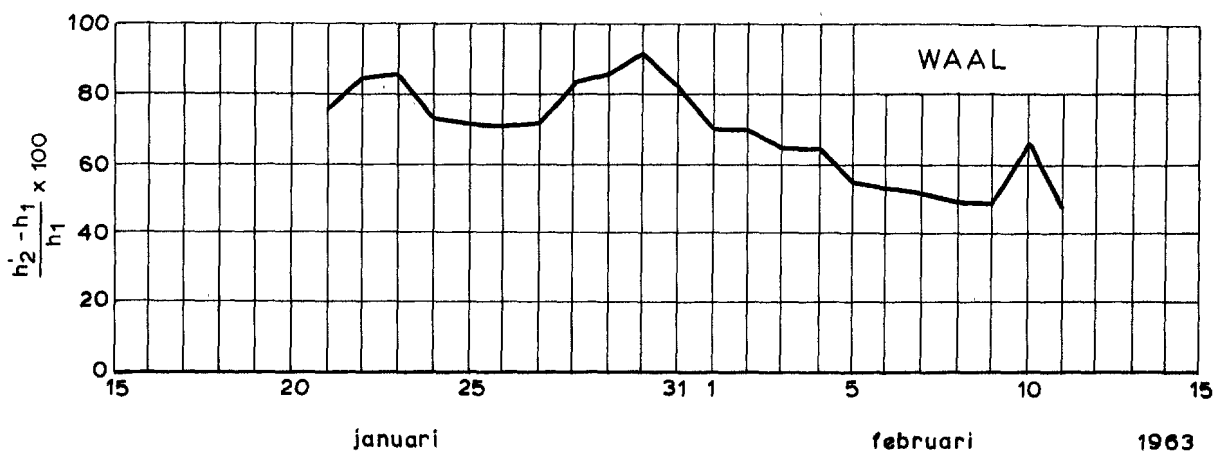
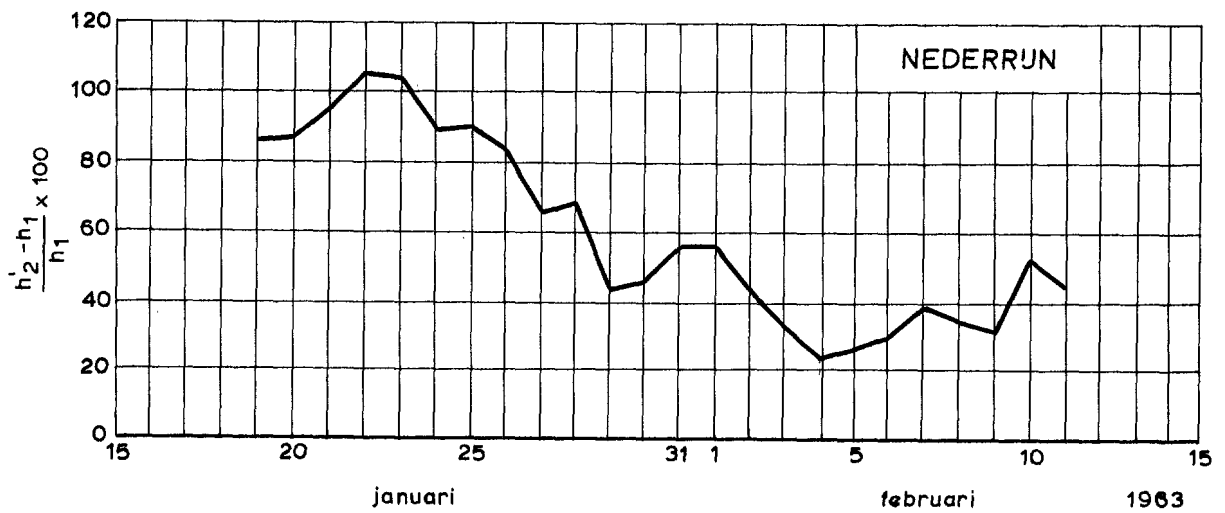
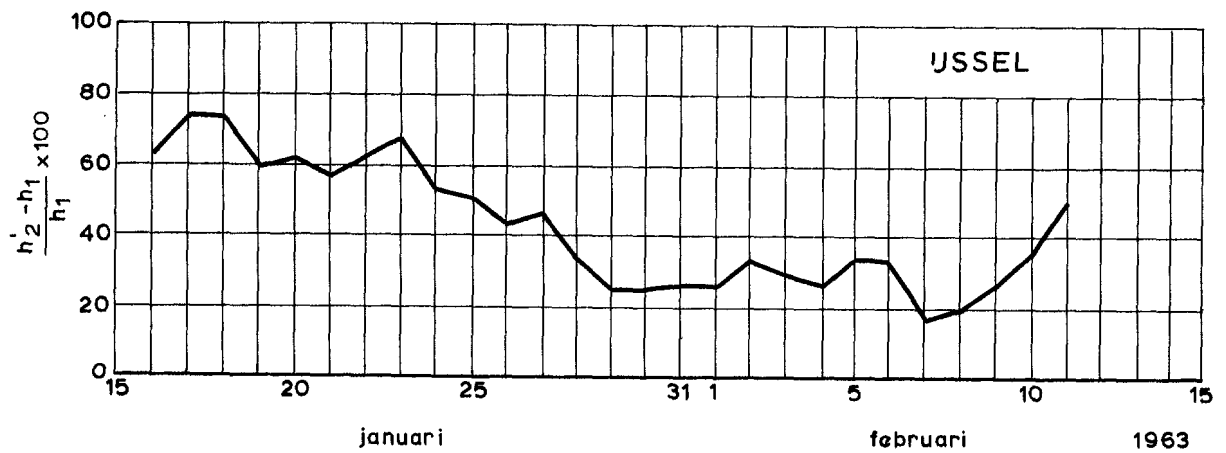
FIG. 10



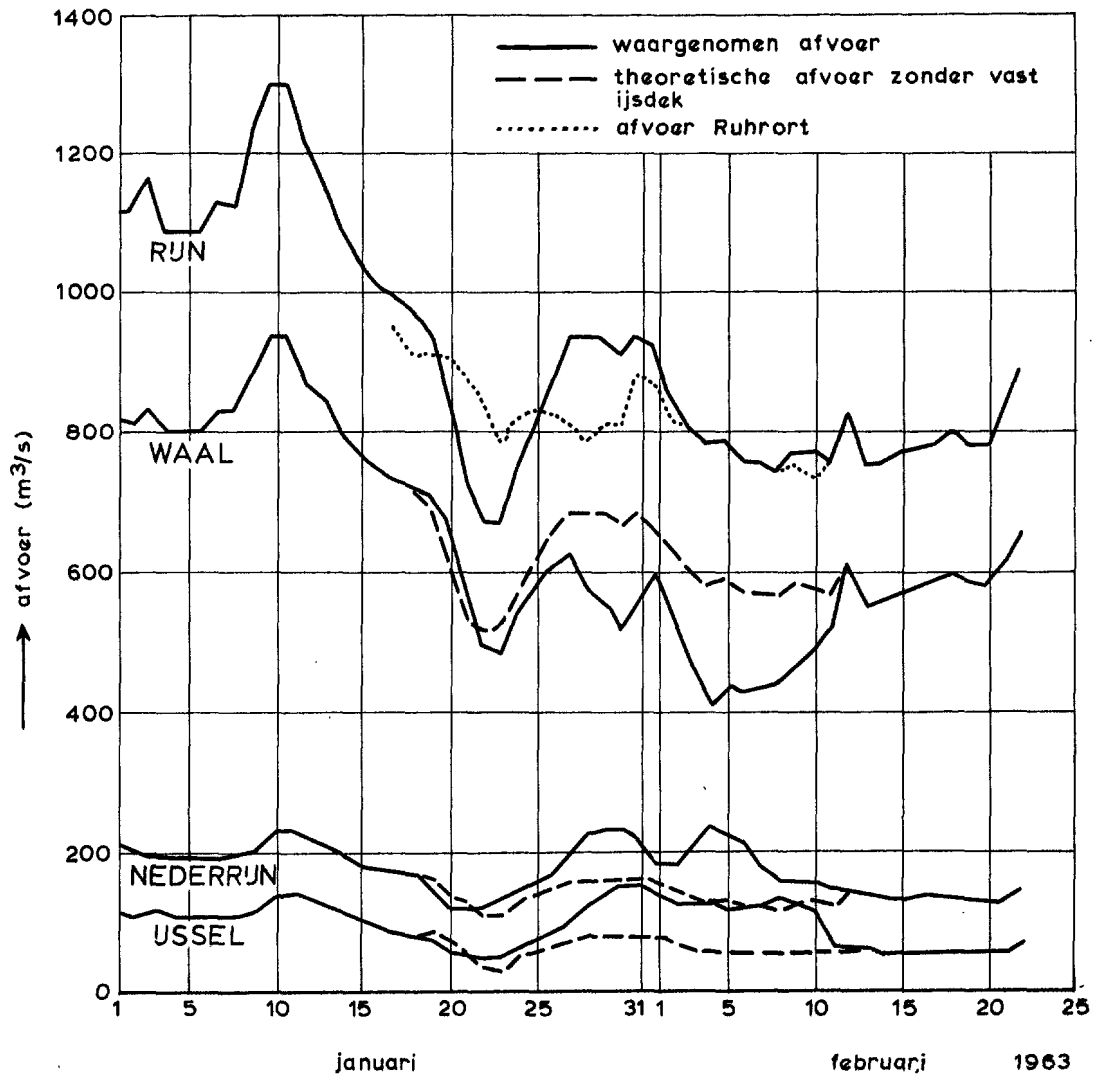
VERHANGLIJNEN OP DE USSEL TIJDENS VORMING VAN VAST USDEK GEDURENDE USWINTER 1940-41



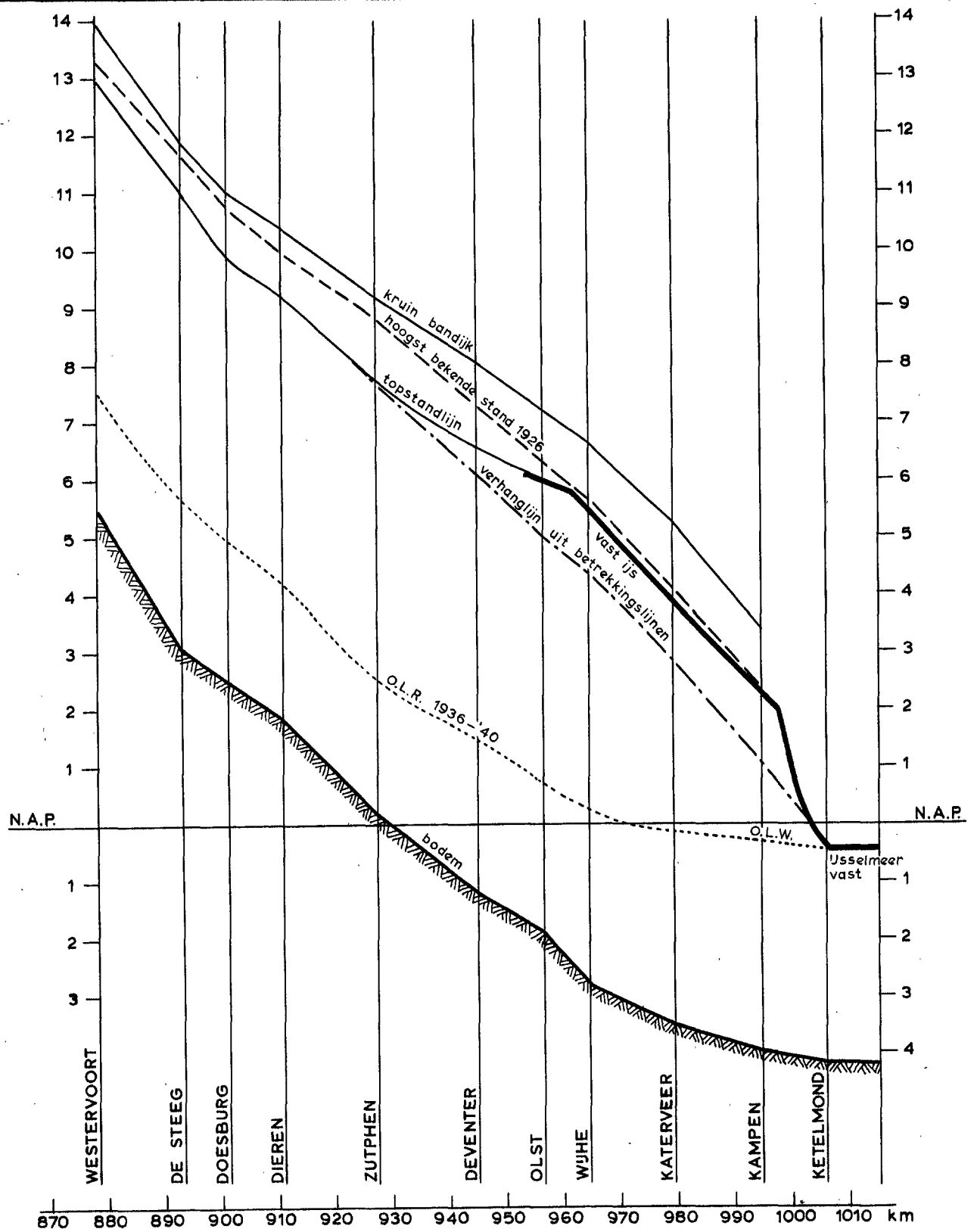
VERLOOP VAN C_2/C_1 VOOR DE DRIE RIJNTAKKEN OVER DE PERIODE 15 JANUARI TOT 15 FEBRUARI 1963 (NAAR OUDSHOORN [15])



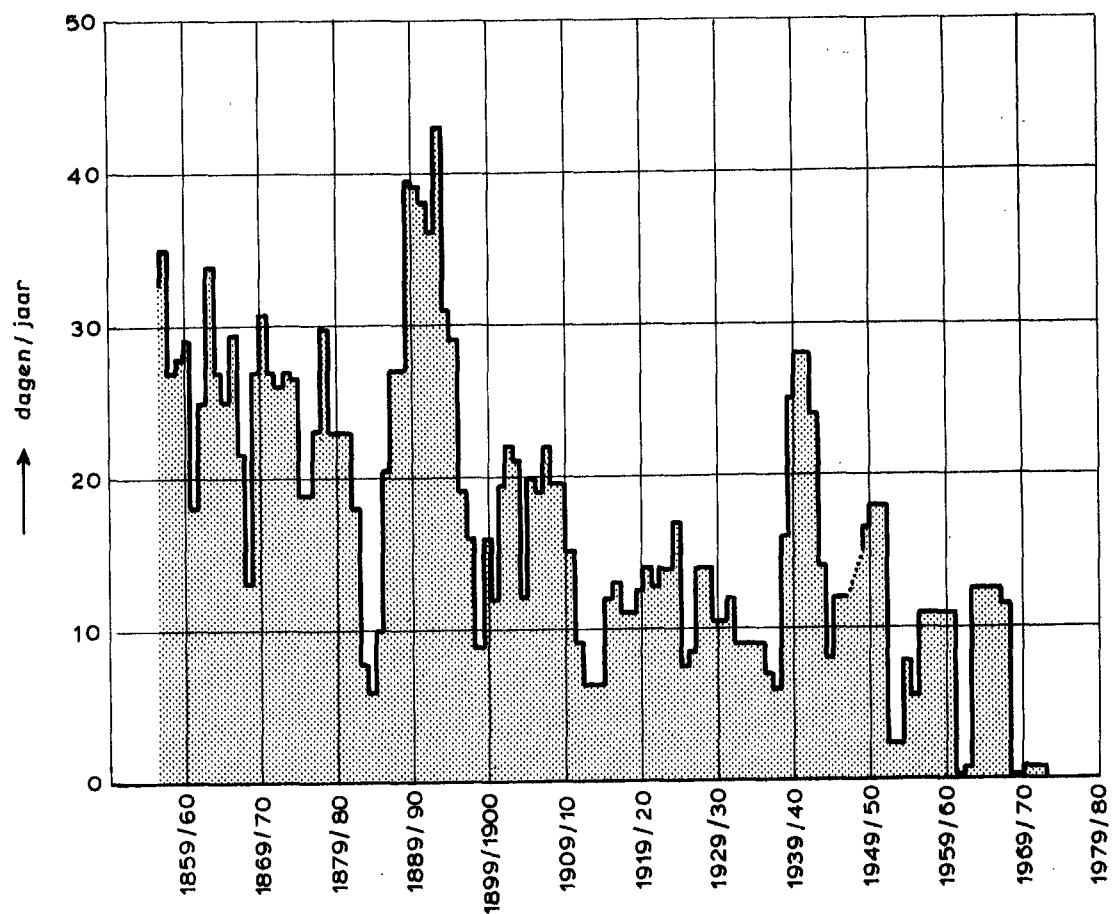
VERHOOGING VAN WATERSTANDEN DOOR AANWEZIGHEID US OVER DE PERIODE 15 JANUARI TOT 15 FEBRUARI 1963 (NAAR OUDSHOORN [15])



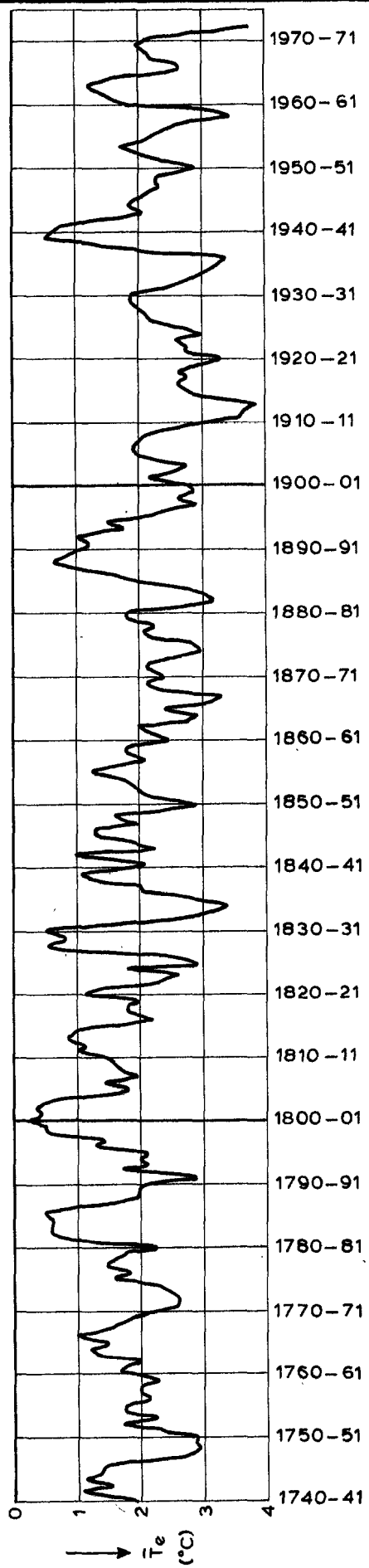
AFVOER VAN RJN, WAAL, NEDERRJN EN USSEL
 OVER PERIODE 15 JANUARI TOT 15 FEBRUARI
 1963 (NAAR OUDSHOORN [15])



TOPSTANDSLIJN OP DE USSEL GEDURENDE DE PERIODE VAN 30 JANUARI TOT 2 FEBRUARI 1941



VOORTSCHRJDEND GEMIDDELDE OVER 5 WINTERS
 VAN HET AANTAL IJSDAGEN OP DE IJSEL
 OVER DE PERIODE 1854-1972

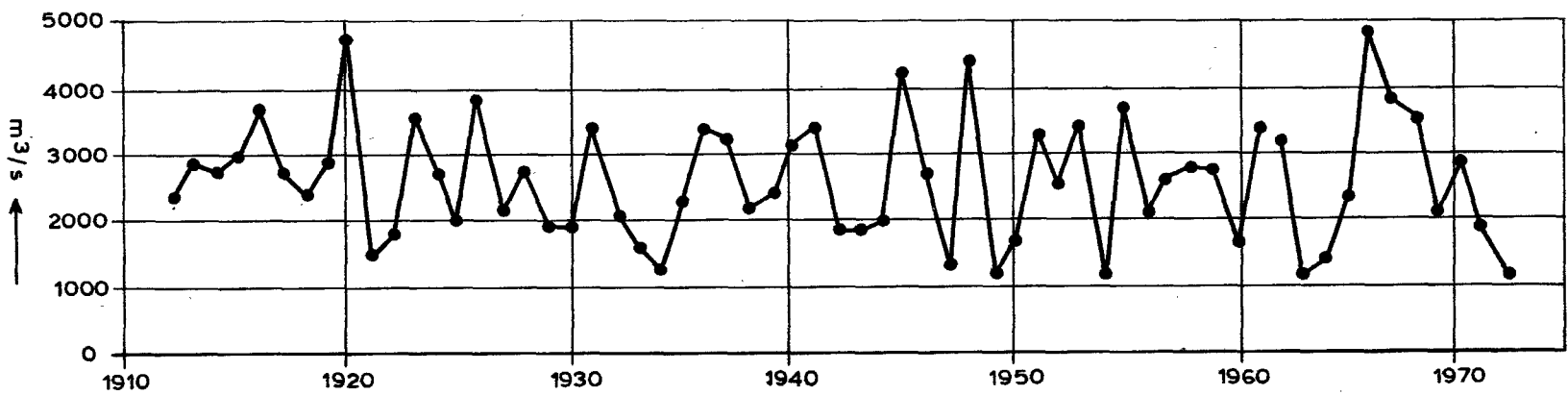
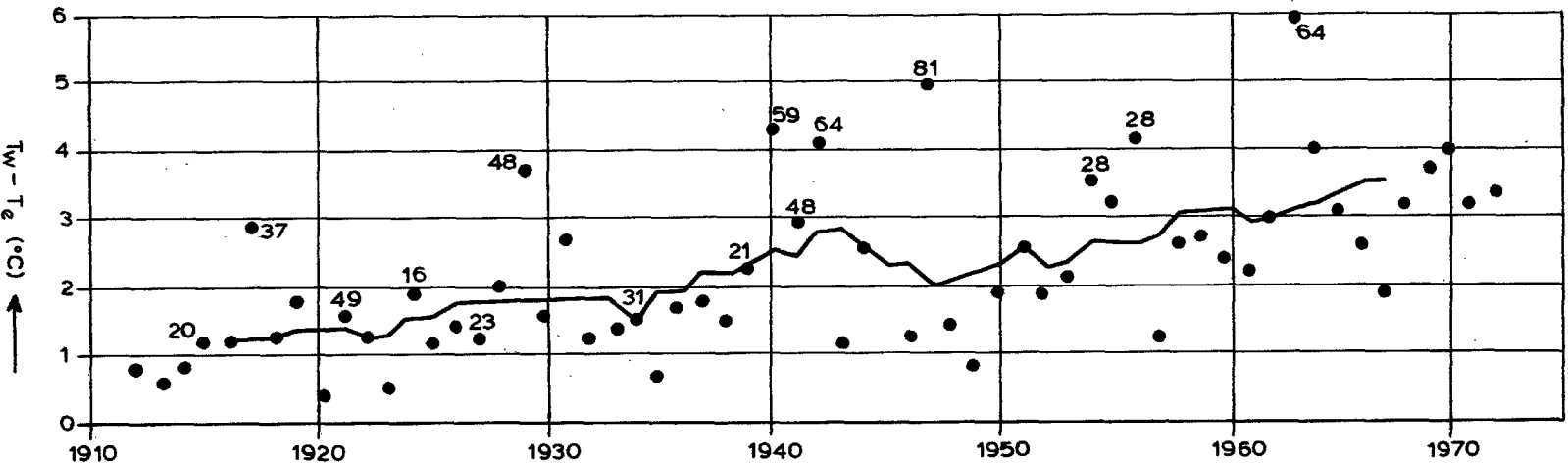


VOORTSCHRUIJDEND VIJFJARIG GEMIDDELDE
VAN DE WINTERTEMPERatuur

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1104

FIG. 17

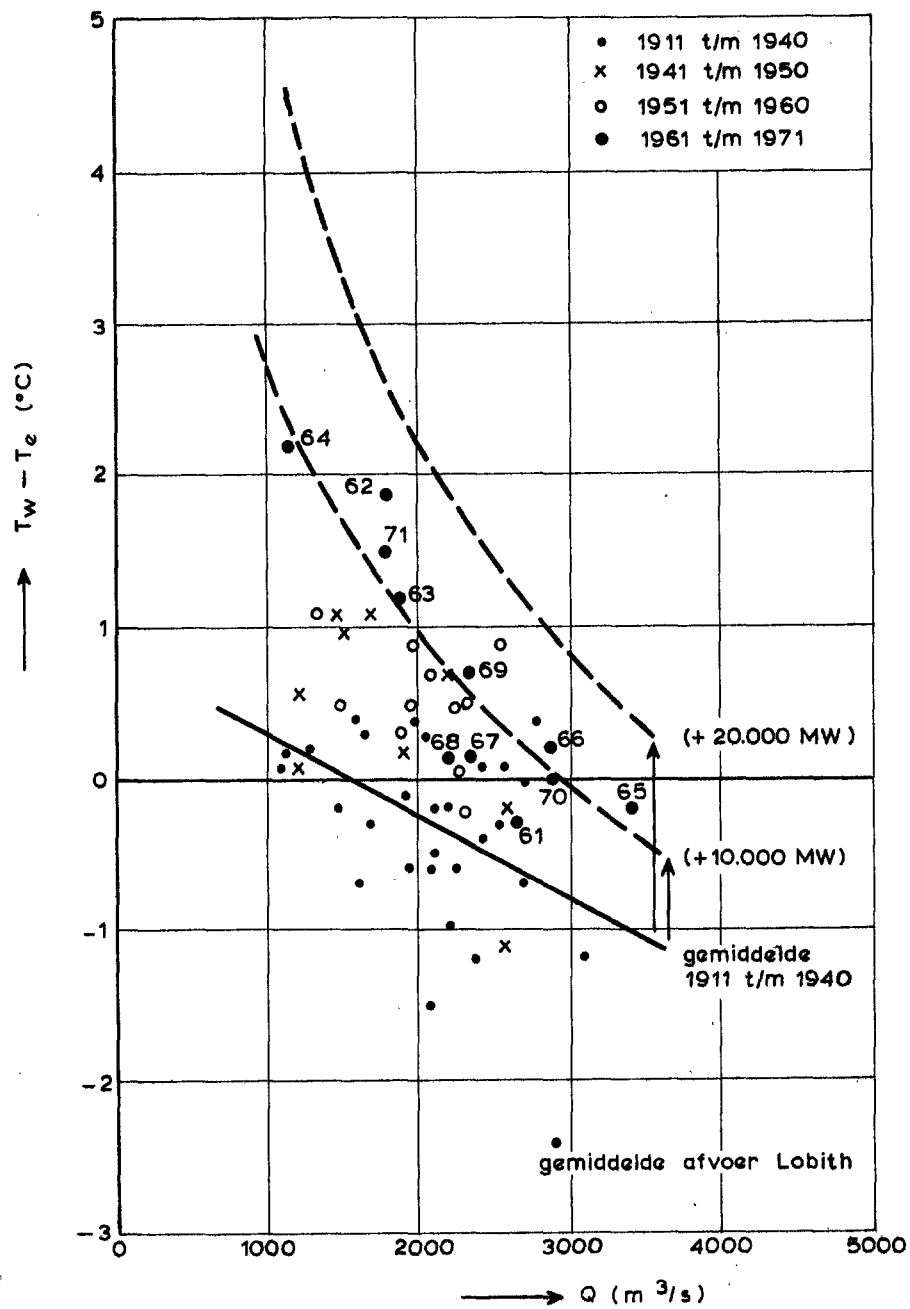


($T_w - T_g$) OVER DE PERIODE 1912-1972
 (ONTLEEND AAN WESSELS [26])

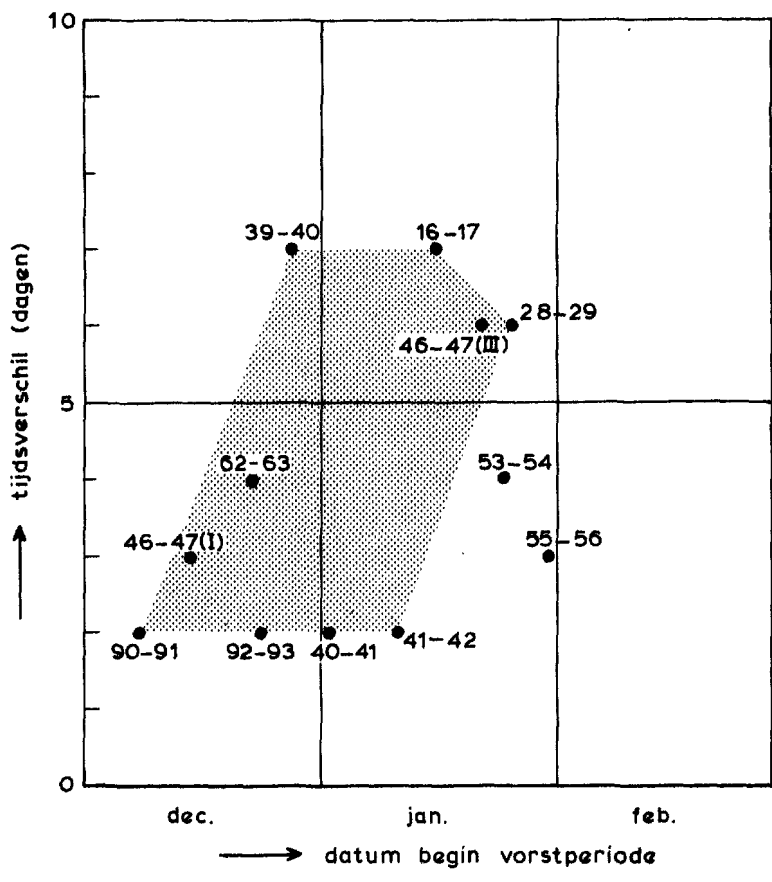
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1104

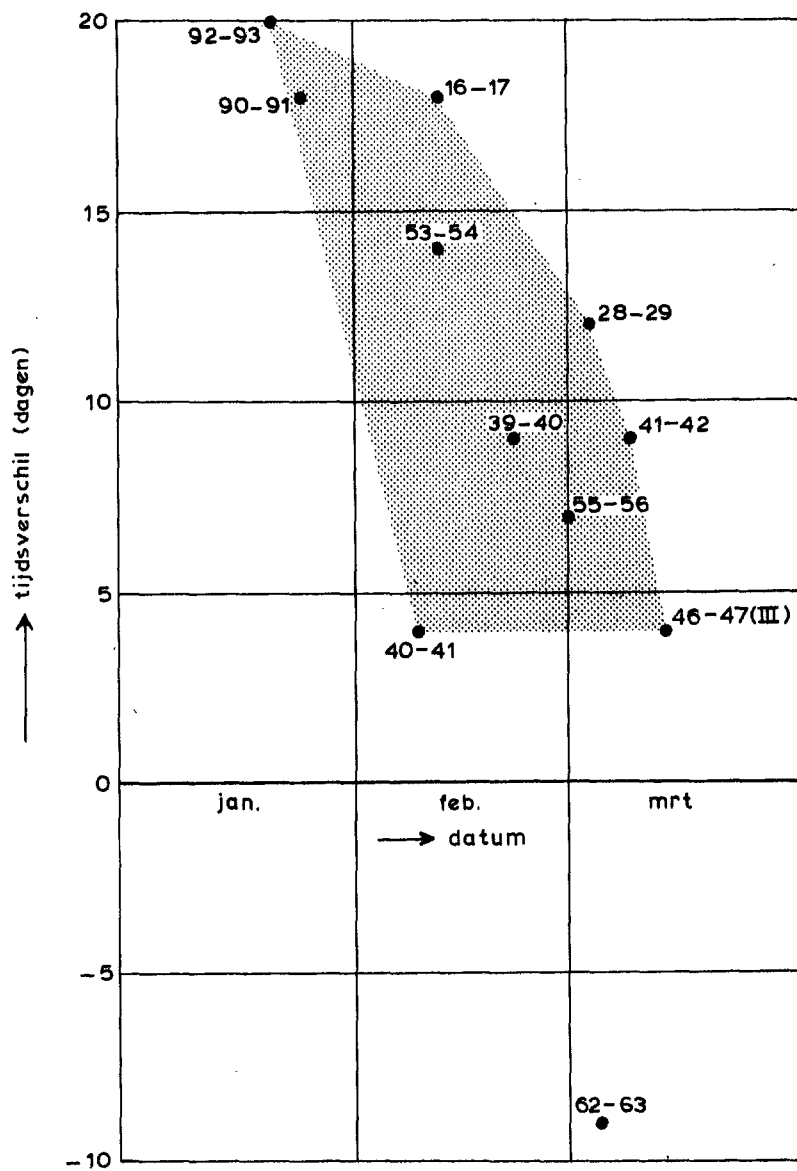
FIG. 18



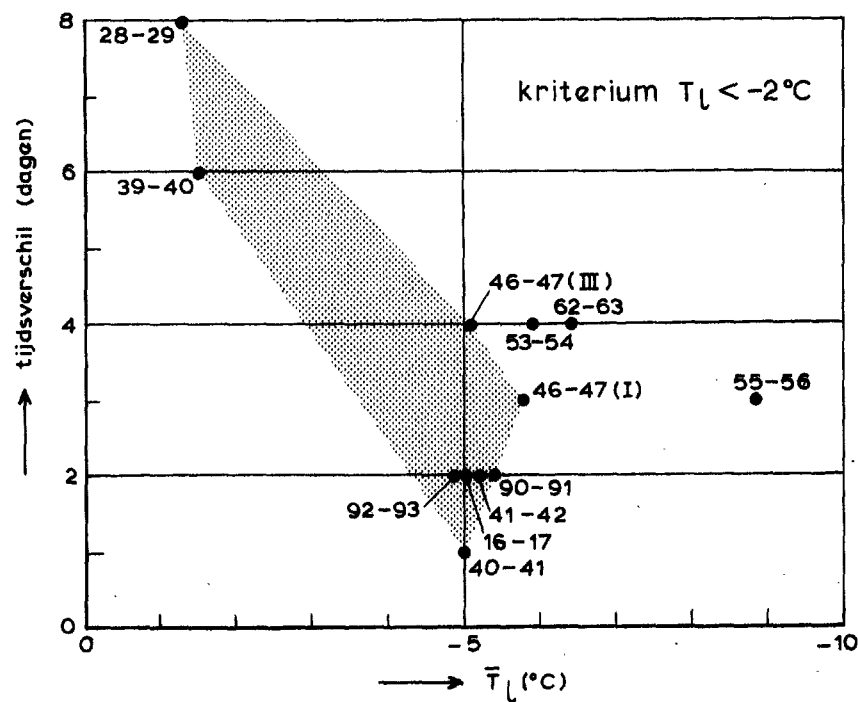
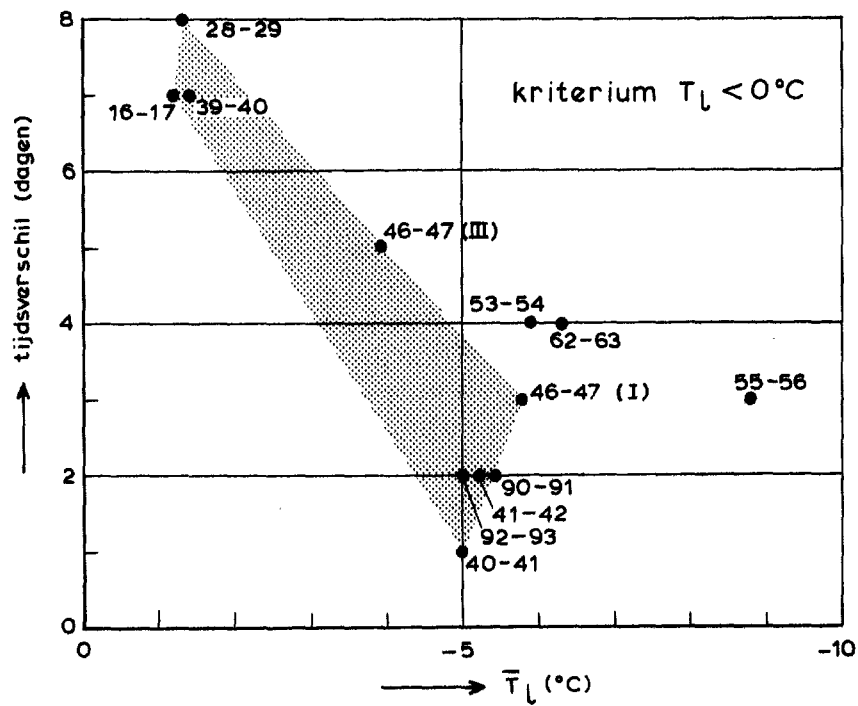
($T_w - T_e$) ALS FUNKTIE VAN AFVOER TE LOBITH
 (ONTLEEND AAN WESSELS [26])



AANTAL DAGEN TUSSEN BEGIN VORSTPERIODE
 EN TIJDSTIP WAAROP DRUFJUS IS WAARGENO-
 MEN OP DE IJSSEL



AANTAL DAGEN TUSSEN INVALLEN DOOI
EN VERDWIJNEN DRUFIJS OP DE IJSSEL

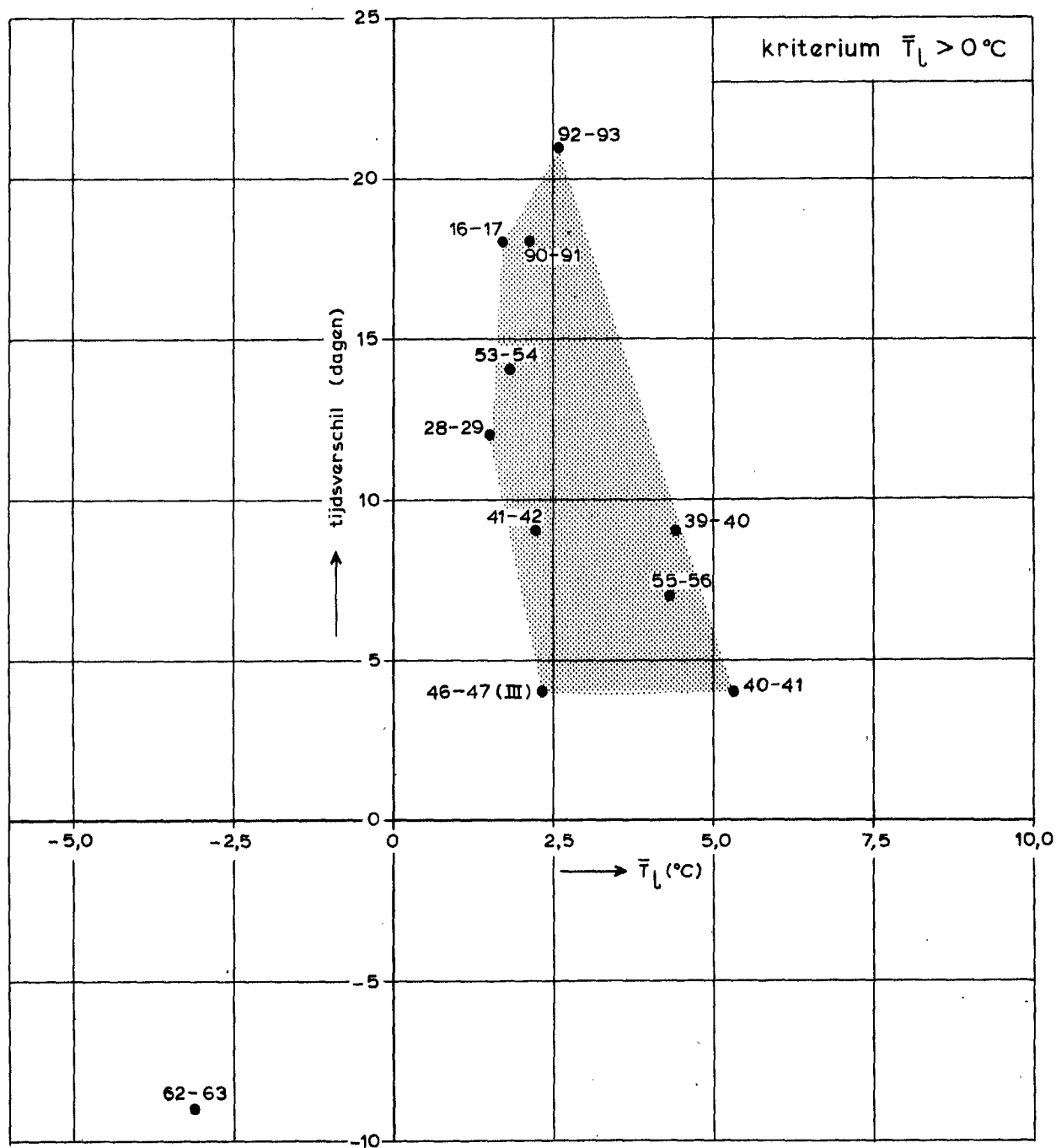


VERBAND TUSSEN AANTAL DAGEN TUSSEN
 BEGIN VORSTPERIODE EN VERSCHIJNEN
 DRIJFUS OP DE USSEL EN \bar{T}_L

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1104

FIG. 22

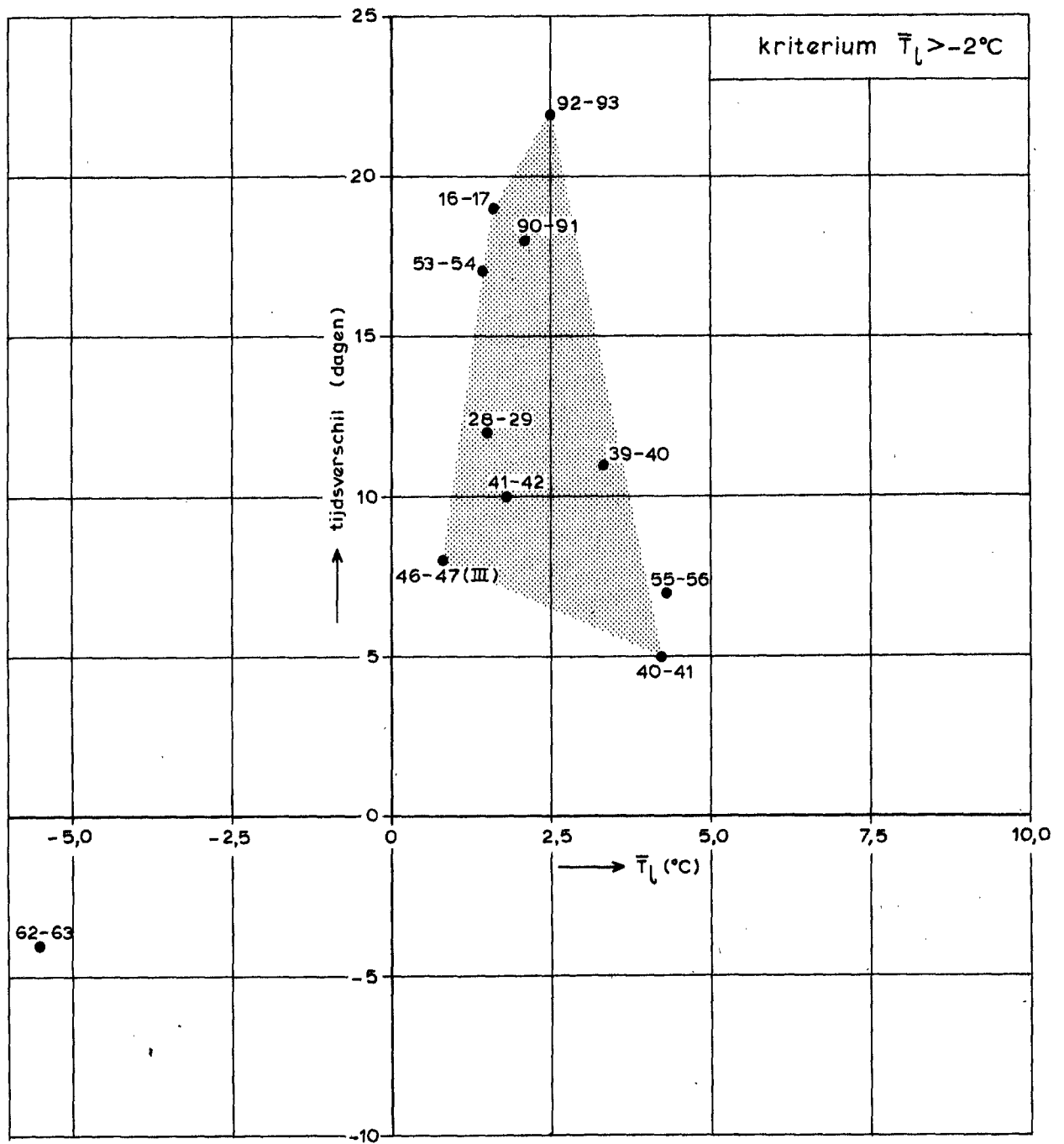


VERBAND TUSSEN AANTAL DAGEN TUSSEN
EINDE VORSTPERIODE EN VERDWIJNEN
DRUFJUS OP DE USSEL EN \bar{T}_L

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1104

FIG. 23 a

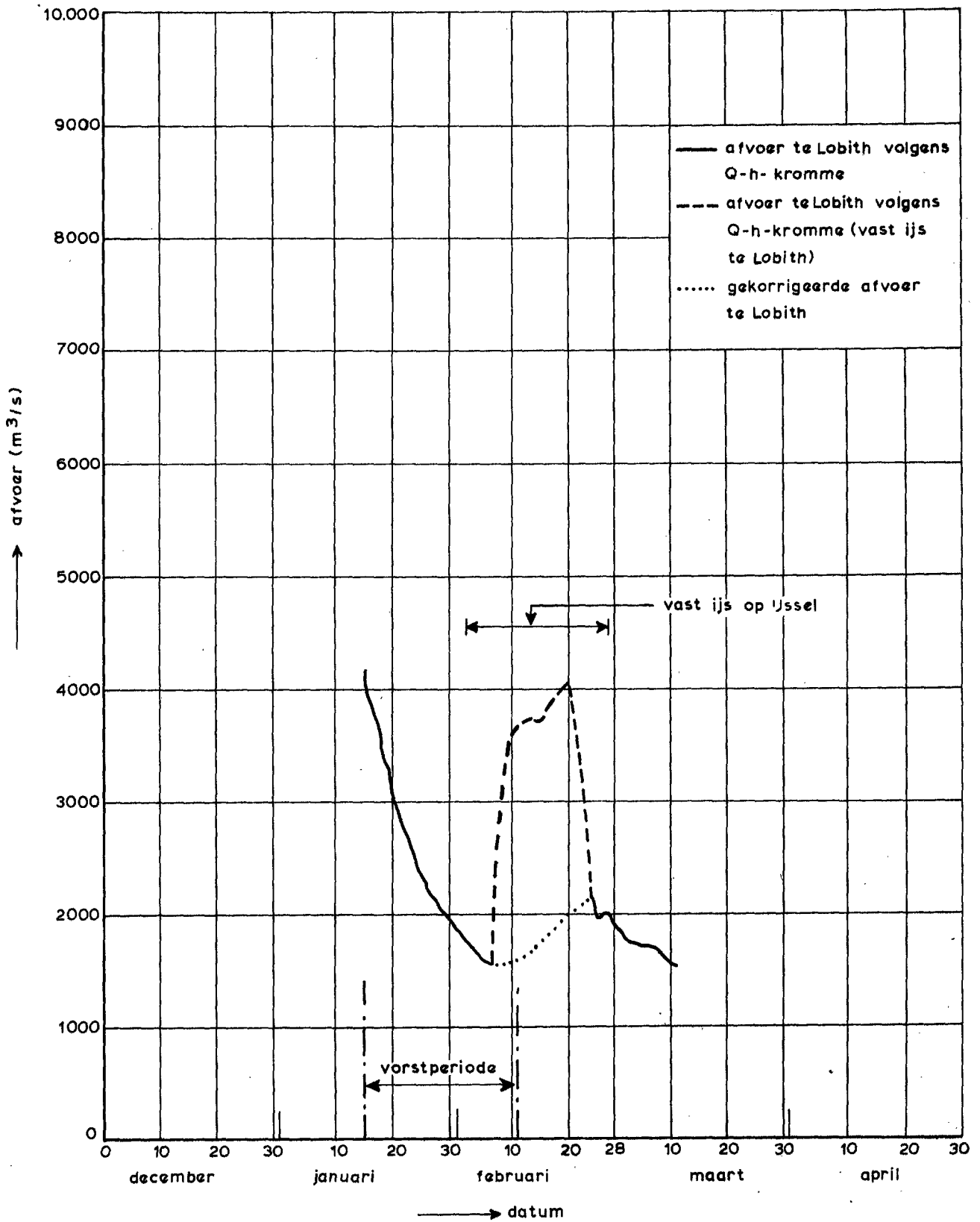


VERBAND TUSSEN AANTAL DAGEN TUSSEN
EINDE VORSTPERIODE EN VERDWIJNEN
DRUFUS OP DE USSEL EN \bar{T}_l

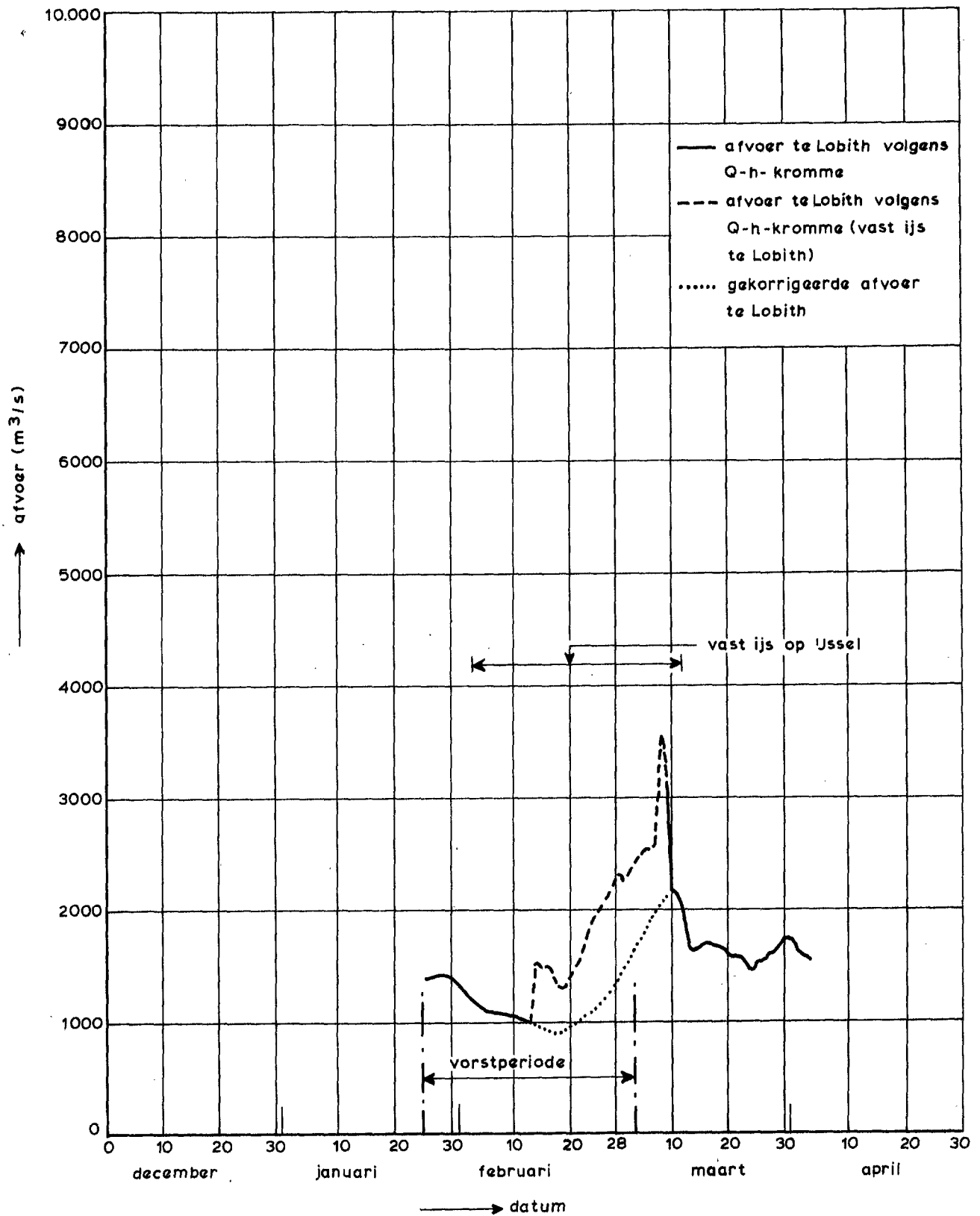
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1104

FIG. 23 b



VERLOOP AFVOER TE LOBITH TIJDENS EN
NA VORSTPERIODE WINTER 1916 -1917

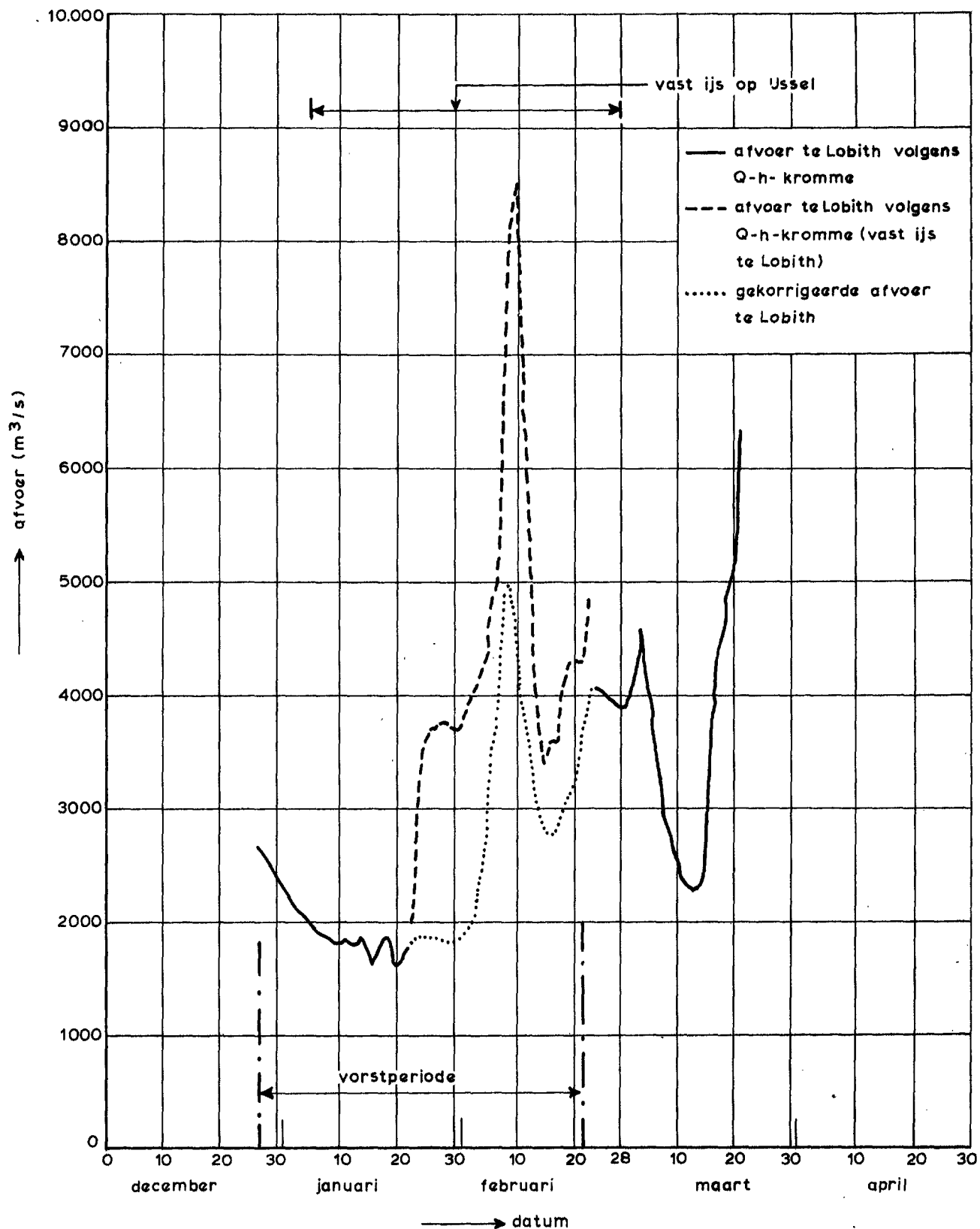


VERLOOP AFVOER TE LOBITH TIJDENS EN
 NA VORSTPERIODE WINTER 1928-1929

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1104

FIG. 24 b

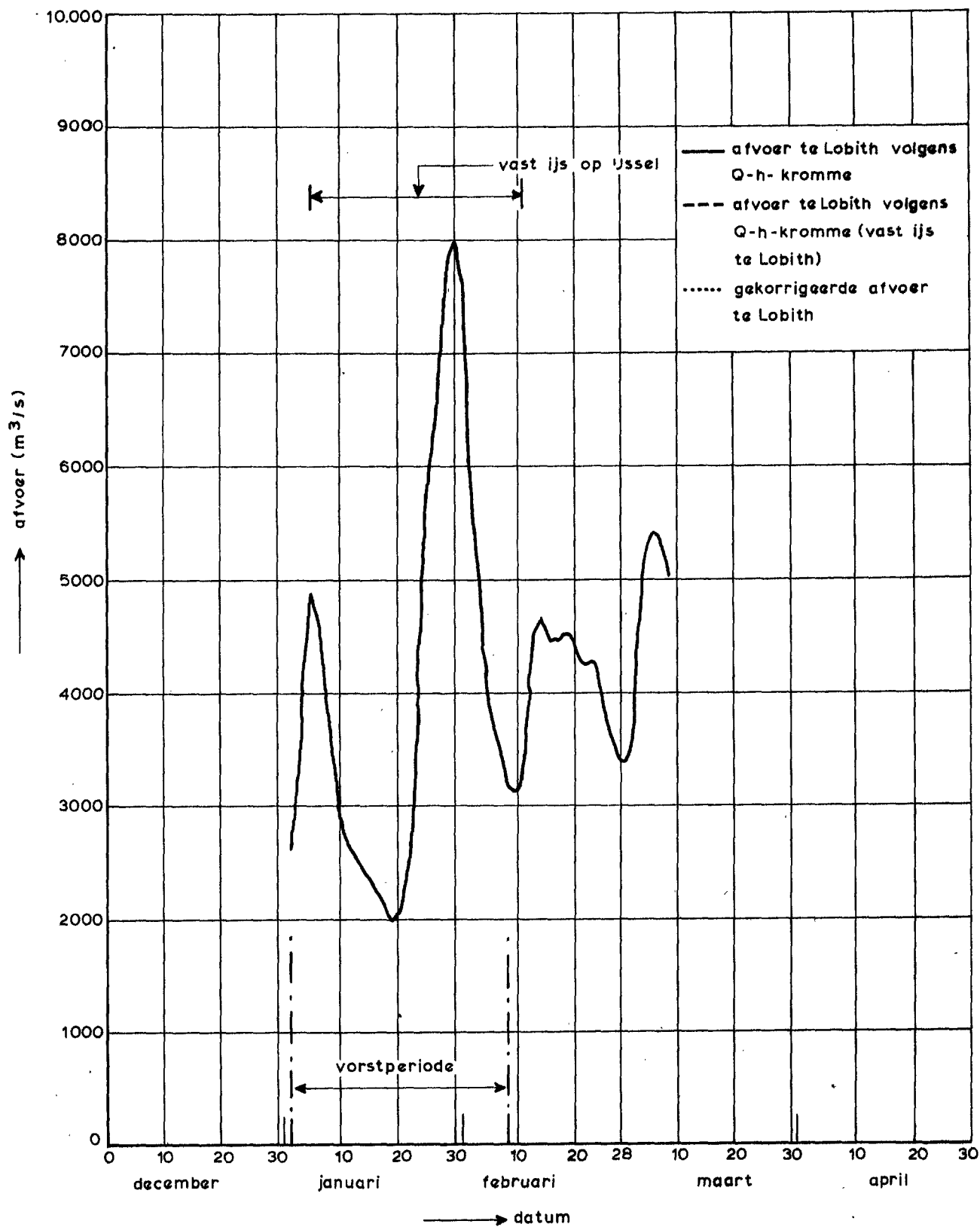


VERLOOP AFVOER TE LOBITH TIJDENS EN
 NA VORSTPERIODE WINTER 1939-1940

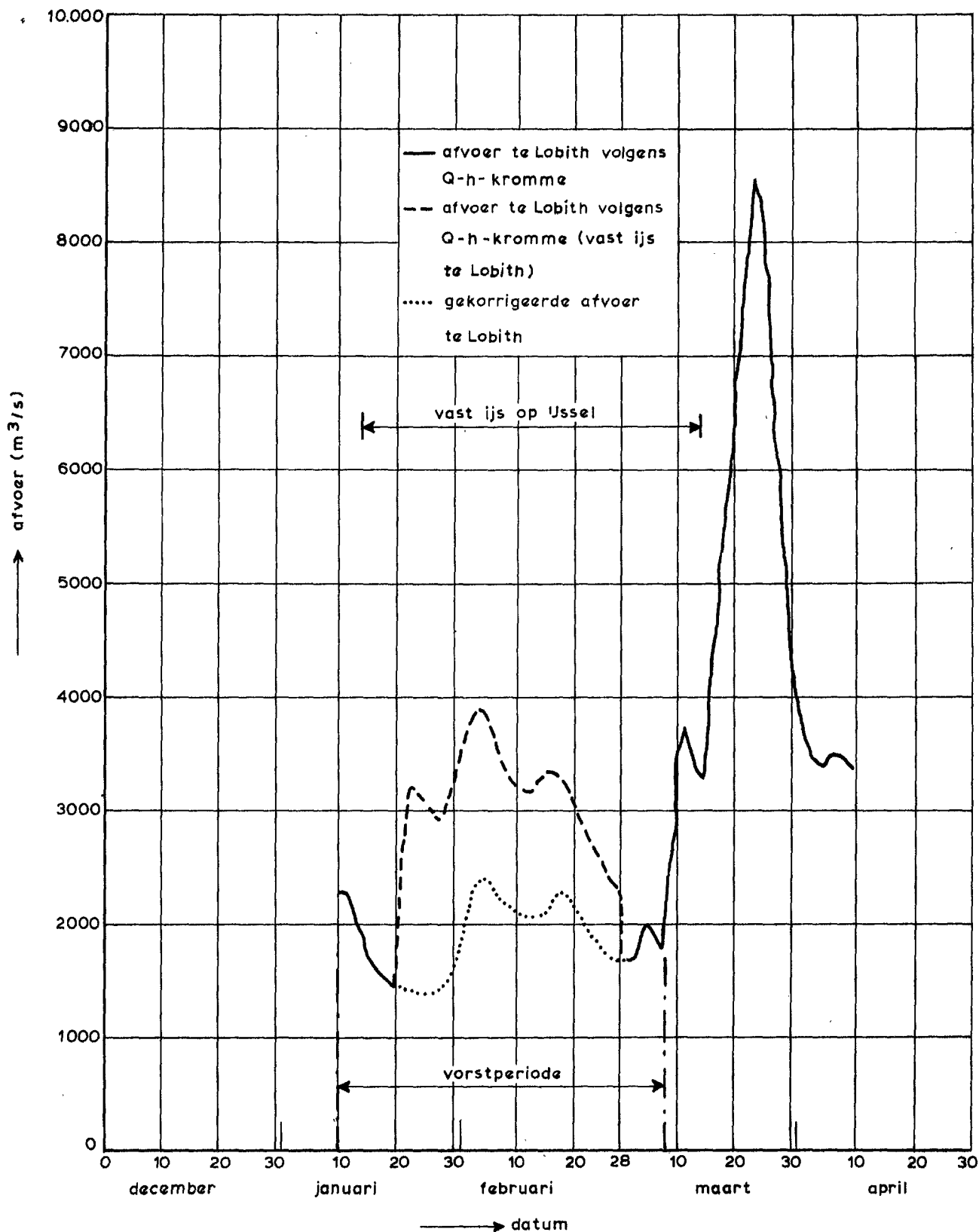
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1104

FIG. 24c



VERLOOP AFVOER TE LOBITH TIJDENS EN
NA VORSTPERIODE WINTER 1940-1941

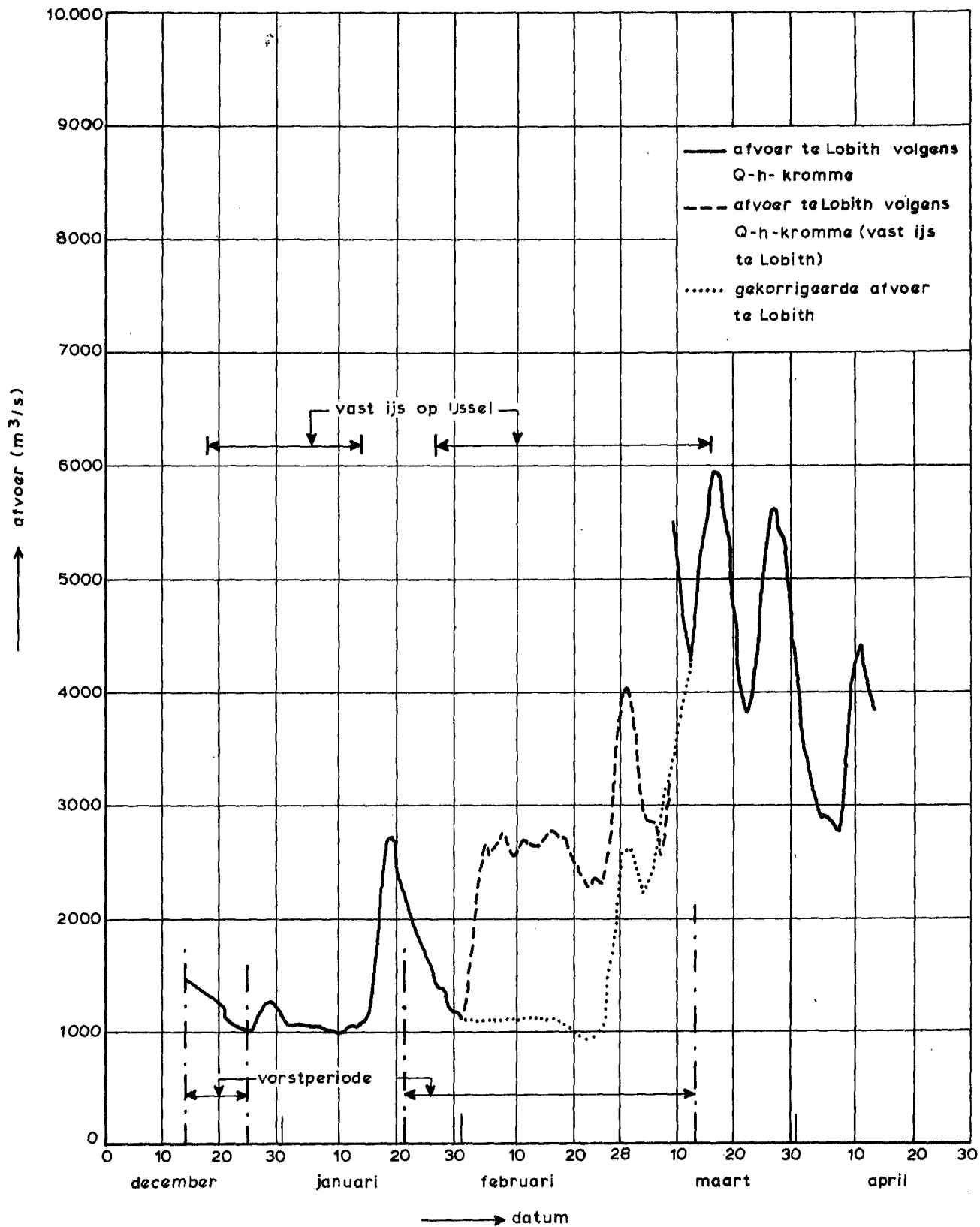


VERLOOP AFVOER TE LOBITH TIJDENS EN
NA VORSTPERIODE WINTER 1941-1942

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1104

FIG. 24e

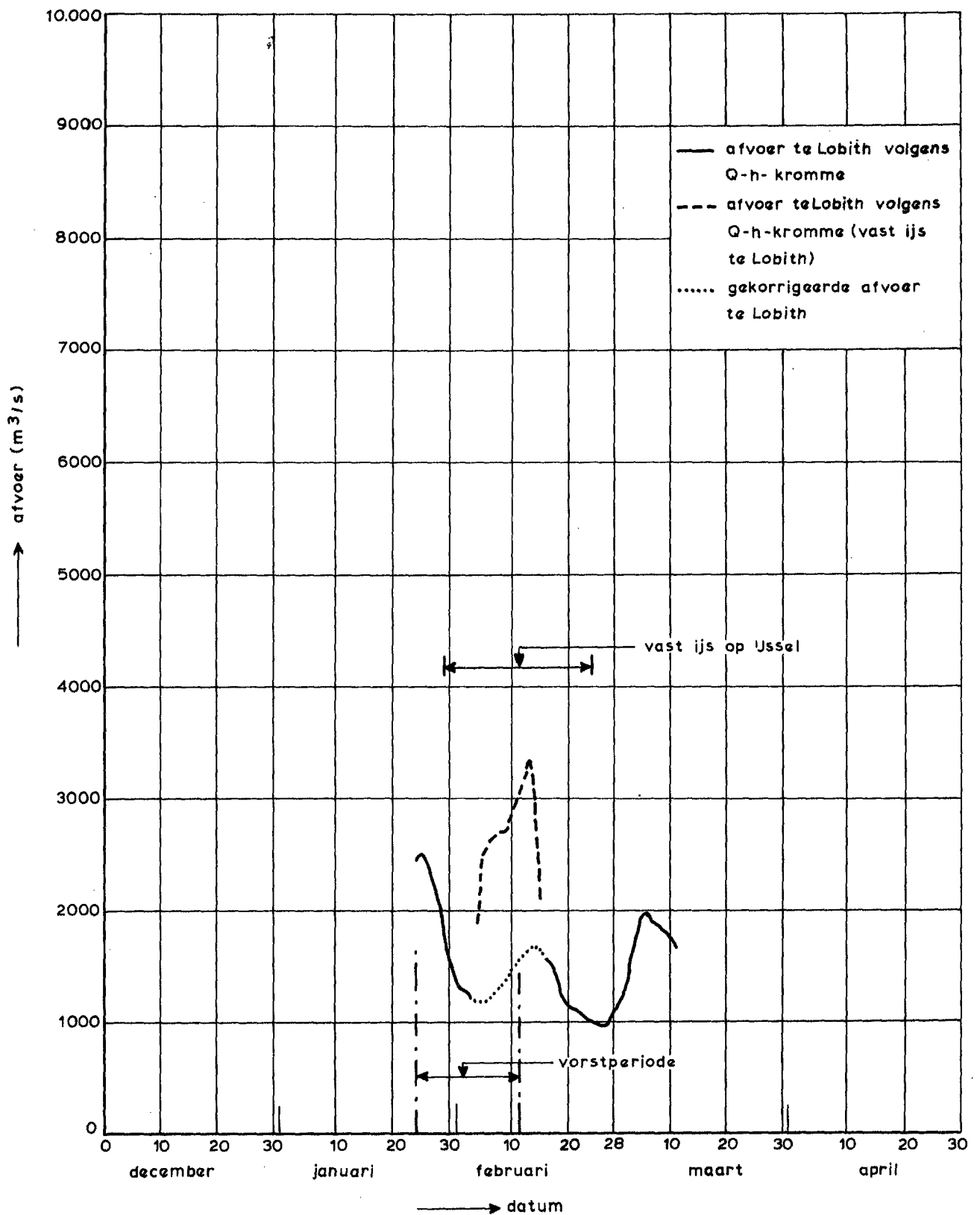


VERLOOP AFVOER TE LOBITH TIJDENS EN
NA VORSTPERIODE WINTER 1946 - 1947

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1104

FIG. 24 f

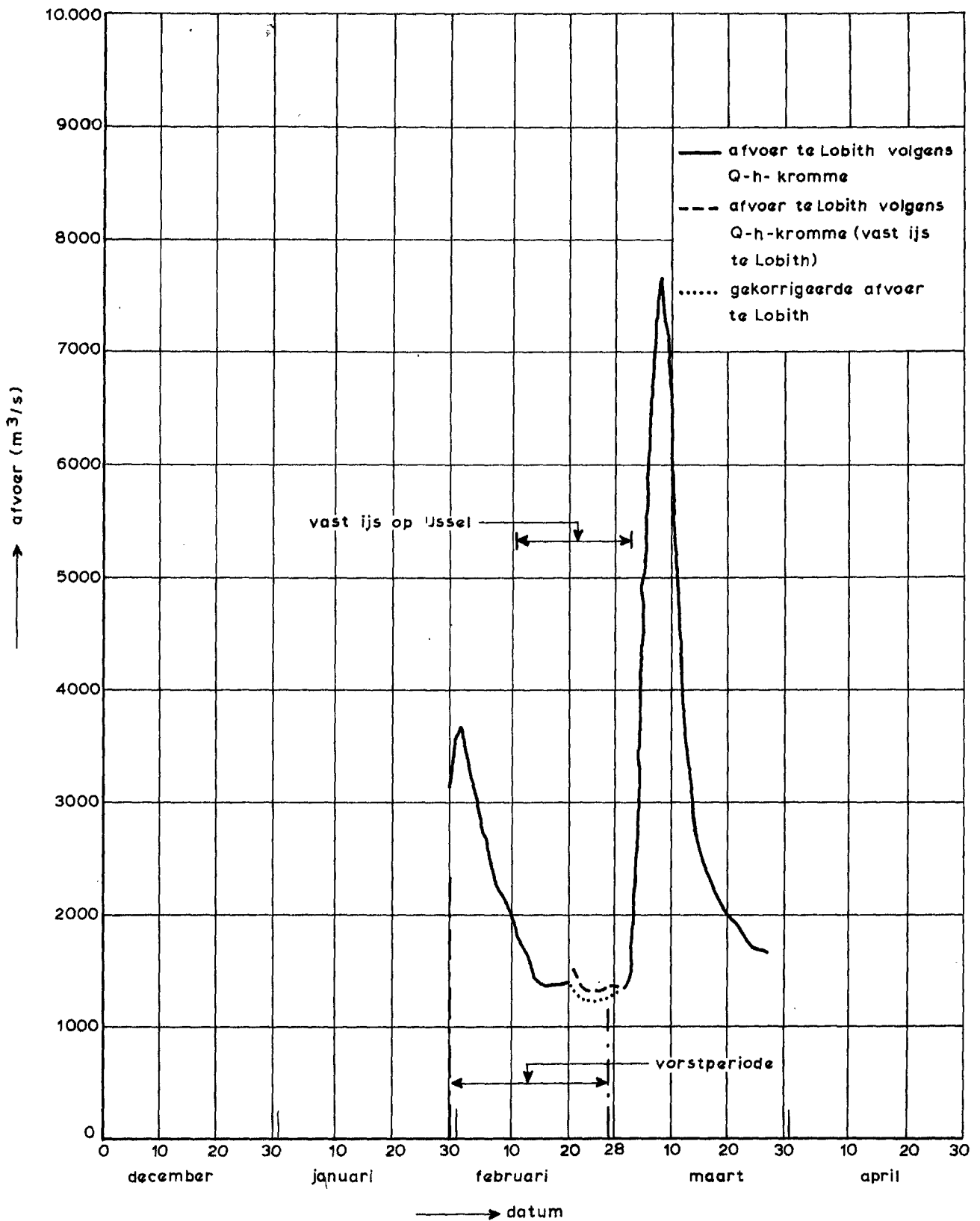


VERLOOP AFVOER TE LOBITH TIJDENS EN
NA VORSTPERIODE WINTER 1953-1954

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1104

FIG. 24g

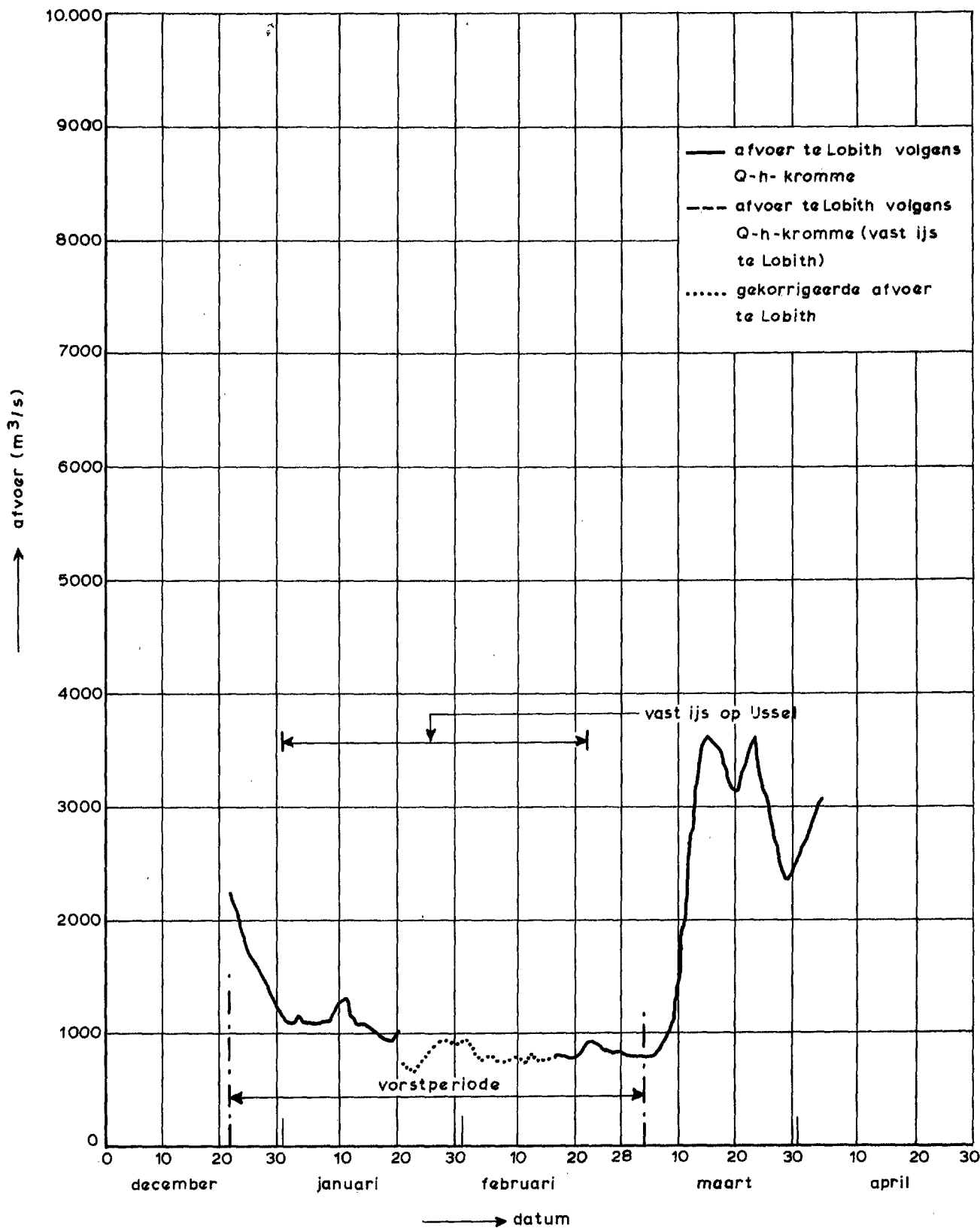


VERLOOP AFVOER TE LOBITH TIJDENS EN
NA VORSTPERIODE WINTER 1955-1956

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1104

FIG. 24 h

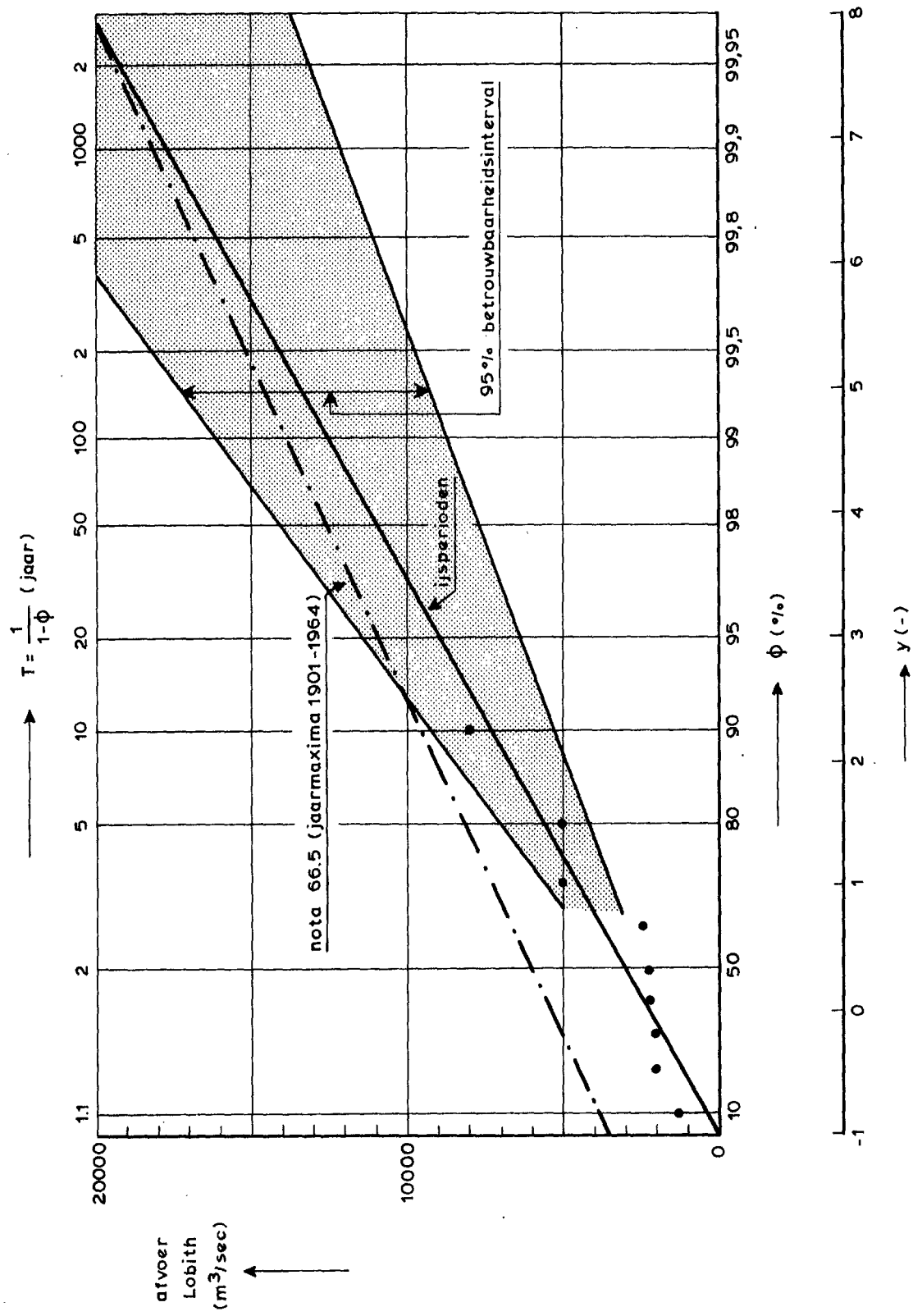


VERLOOP AFVOER TE LOBITH TIJDENS EN
NA VORSTPERIODE WINTER 1962-1963

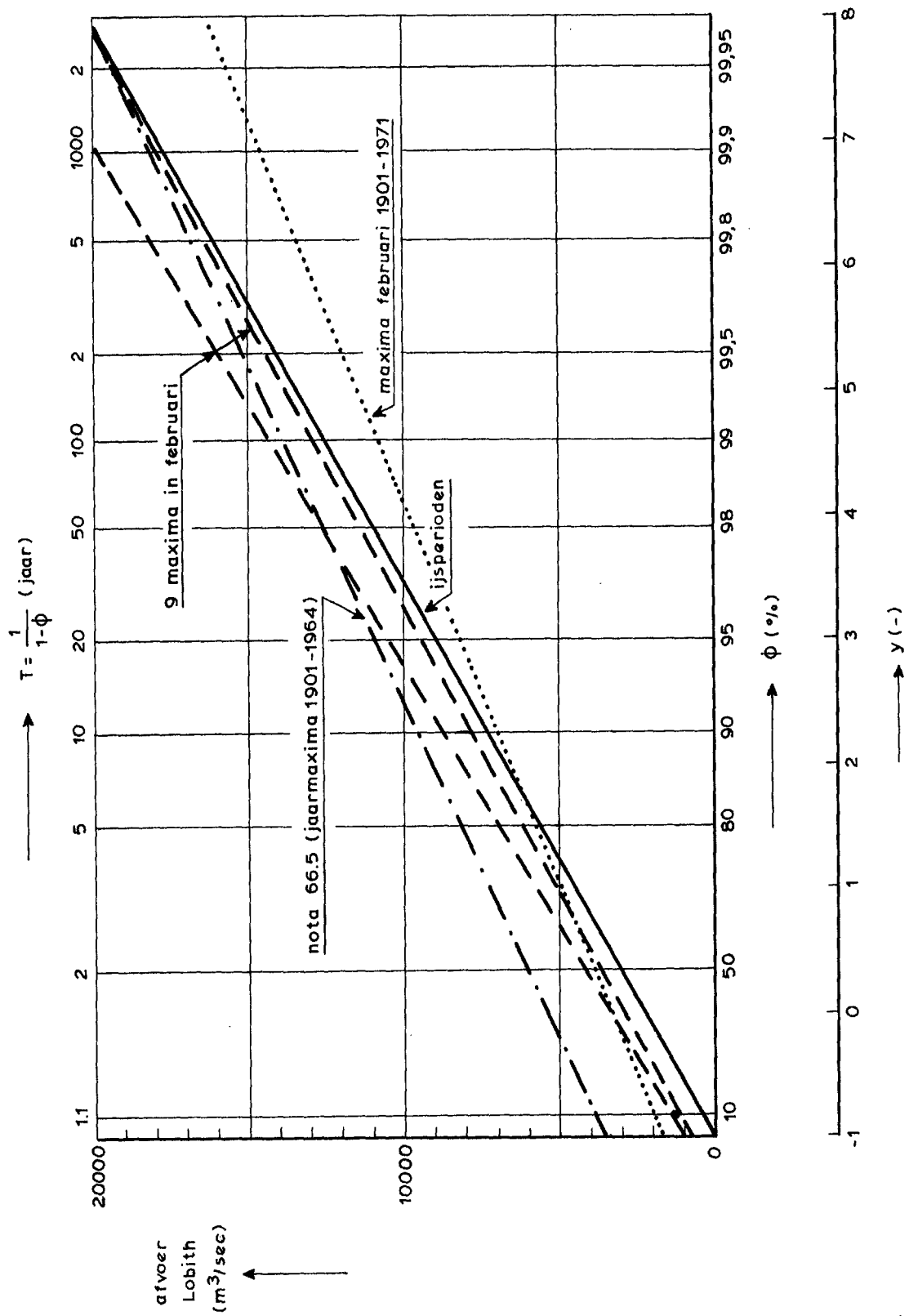
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1104

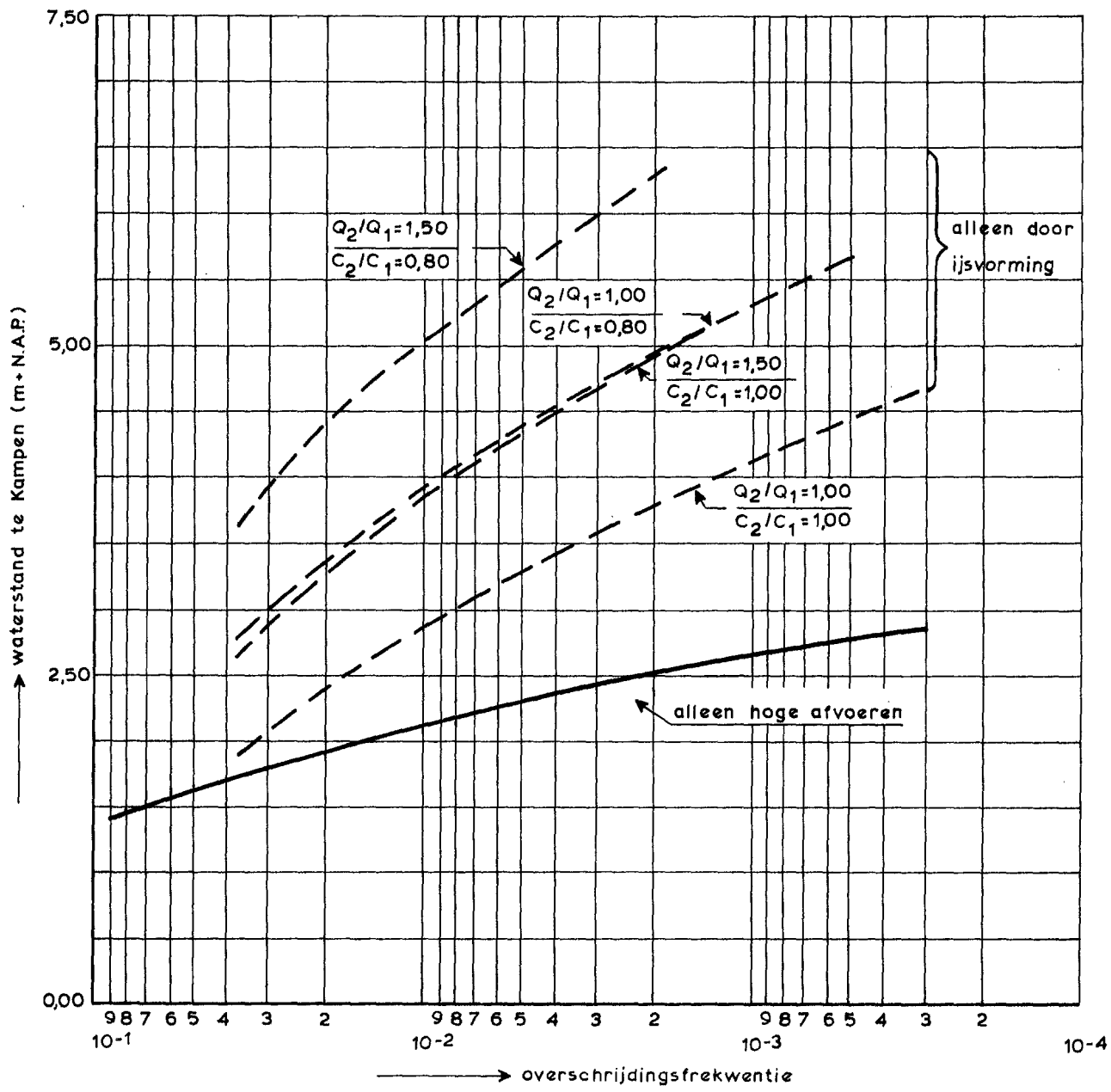
FIG. 24 i



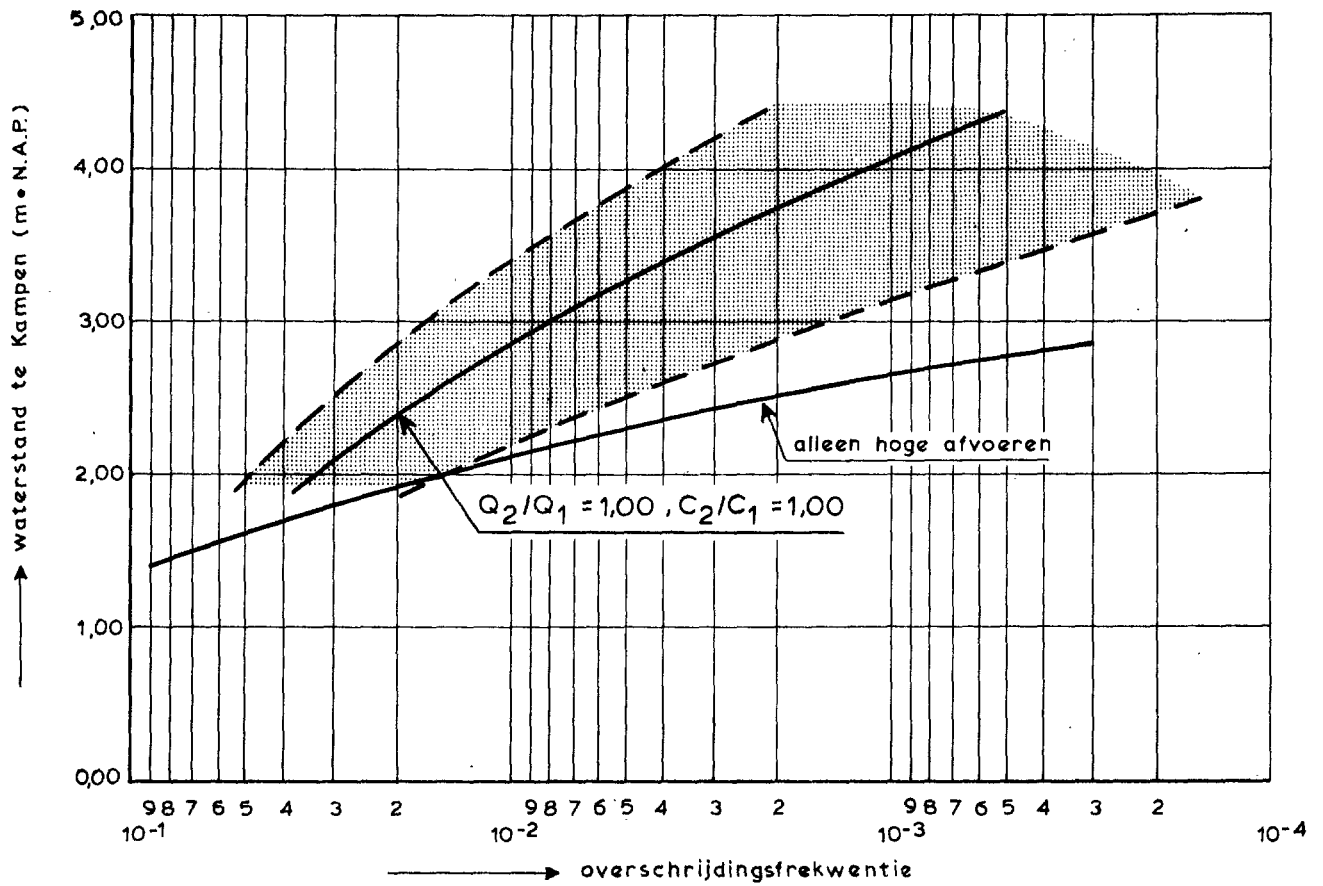
VERDELING VAN AFVOEREN TE LOBITH TIJDENS IJSPERIODEN MET VAST IJS OP IJSSEL EN VAN JAARMAXIMA



VERDELING VAN AFVOEREN TE LOBITH TIJDENS
 IJSPERIODEN MET VAST IJS OP USSEL, VAN
 JAARMAXIMA EN VAN MAANDMAXIMA



FREKWENTIEVERDELINGEN WATERSTANDEN
 TE KAMPEN REKENING HOUDEND MET
 OPTREDEN VAST IJS



FREKVENTIEVERDELING WATERSTANDEN TE
 KAMPEN t.g.v. VAST IJS ($Q_2/Q_1=1,00, C_2/C_1=1,00$)
 MET 95% BETROUWBAARHEIDSINTERVAL

aanhangsel A

Aanhangsel A:

Invloed van winterbed op verhoging van waterstand door een vast ijsdek

A-1 Inleiding

In paragraaf 4.4 is gepoogd, na te gaan wat de invloed van ijs op de frekwentie van waterstanden is en dan wel in meer kwantitatieve zin dan in paragraaf 2.5 was gedaan. Het was echter nodig een groot aantal aannamen te doen om de invloed van het ijs op de waterstanden kwantitatief tot uitdrukking te brengen. In dit aanhangsel is nader ingegaan op één van deze aannamen, namelijk de veronderstelling, dat het voor een eerste benadering niet noodzakelijk was om de invloed van het winterbed op de verhoging van de waterstanden mede in beschouwing te nemen. Een toetsing is uitgevoerd via een aantal simpele berekeningen. Het resultaat van deze berekeningen wordt hierna gepresenteerd en voorts zullen de uitkomsten worden toegepast op de situatie op de beneden-IJssel bij Kampen (paragraaf A-3). Daarnaast zullen de uitkomsten en de gevolge procedure van commentaar worden voorzien (paragraaf A-4).

A-2 Gevolgde procedure

Bij de gevolgde procedure is uitgegaan van het geschematiseerde dwarsprofiel van een rivier, zoals dat in de figuren A-1a en A-1b is weergegeven. De breedte van het zomerbed en het winterbed is gegeven en wordt aangeduid door respectievelijk B_z en B_w . Voorts is gegeven de karakteristieke ruwheid van de uiterwaard, die gelijk is gehouden aan de waarde $k_w = 0,07$ m zoals die door Rijkswaterstaat bij de stroombaanberekeningen wordt gehanteerd. Een vergelijking is gemaakt tussen twee omstandigheden, te weten een situatie, dat de rivier met ijs is bedekt en een situatie, waarbij geen ijs op de rivier aanwezig is. Ten aanzien van de ruwheid van het ijsdek wordt een aantal veronderstellingen gedaan:

- 1 de ruwheid van de onderzijde is te karakteriseren door een karakteristieke ruwheid k_{ij} ,
- 2 in deze ruwheidsparameter zitten besloten niet alleen de energieverliezen tengevolge van de eigenlijke onregelmatigheid van het ijsdek, maar ook de energieverliezen tengevolge van plaatselijke verdikkingen van de ijslaag,
- 3 de karakteristieke ruwheid van de onderzijde van de ijslaag heeft een gelijke waarde voor zowel zomerbed als winterbed.

De ruwheid van het zomerbed zal voornamelijk bepaald worden door de grootte van de schuifspanning, die op het bed wordt uitgeoefend. Bij de uiteindelijke toe-

passing van de hier beschreven procedure zal voor de waarde van de Chézy-koëfficiënt van het bed steeds dezelfde waarde worden aangehouden onafhankelijk van de waterdiepte. Hiervoor zullen redenen worden aangevoerd.

Bij het bepalen van de waterstanden h_1 en h_2 , zijnde de waterstanden bij een bepaalde afvoer bij afwezigheid van ijs op de rivier en in aanwezigheid ervan, zal in essentie gebruik worden gemaakt van de door Einstein [A-1] aangegeven manier om de schuifspanning op de bodem te bepalen als de ruwheid van bodem en wanden van elkaar verschillen. Alleen zijn de vlakken met verschillende ruwheid in het geval met een vast ijsdek de bodem en het oppervlak. Einstein [A-1] veronderstelt 1) dat de gehele doorsnede verdeeld kan worden in een aantal onderdelen, waarbij elk onderdeel korrespondeert met een gedeelte van bodem of wand en 2) dat alle wervels e.d. als gevolg van de stroming opgewekt langs dat gedeelte van wand of bodem ook gedissipeerd worden in het korresponderende gedeelte van de totale doorsnede. In concreto houdt dit in, dat voor elk van de aldus onderscheiden stroombuizen het verhang gelijk is. Voorts veronderstelt Einstein [A-1], dat de gemiddelde snelheden in de verschillende doorsneden aan elkaar gelijk zijn. In het hierna volgende is deze veronderstelling gedaan voor zomerbed en winterbed afzonderlijk. De snelheden in zomer- en winterbed mogen en zullen dus van elkaar afwijken bij overigens gelijk verhang.

Wordt nu eerst de situatie met ijs onderzocht, dan zullen de doorsneden van zomer- en winterbed worden gescheiden in een gedeelte, dat op de bodem betrokken is en een gedeelte, dat wordt beïnvloed door het vaste ijsdek. De rivier wordt zodanig breed verondersteld, dat de invloed van de wanden op de grootte van de hydraulische straal verwaarloosbaar klein is. Voor elk van de vier gedeelten afzonderlijk kan de vergelijking van Chézy worden opgesteld, hetgeen resulteert in:

$$u_{zij} = 18 \log \frac{12 R_{zij}}{k_{ij}} \sqrt{R_{zij} i_z} \quad (A-2.1a)$$

$$u_z = C_z \sqrt{R_z i_z} \quad (A-2.1b)$$

$$u_{wij} = 18 \log \frac{12 R_{wij}}{k_{ij}} \sqrt{R_{wij} i_w} \quad (A-2.1c)$$

$$u_w = 18 \log \frac{12 R_w}{k_w} \sqrt{R_w i_w} \quad (\text{A-2.1d})$$

Voorts geldt, gezien het hiervoor gestelde:

$$u_{zij} = u_z \quad (\text{A-2.2a})$$

$$u_{wij} = u_w \quad (\text{A-2.2b})$$

en

$$i_z = i_w = i \quad (\text{A-2.3})$$

Uit figuur 1a blijkt verder:

$$h_z = R_{zij} + R_z = h_2 \quad (\text{A-2.4a})$$

$$h_w = R_{wij} + R_w = h_z - H_w \quad (\text{A-2.4b})$$

Bij gegeven i , k_{ij} , k_w , C_z , H_w is bij gegeven h_z de grootte van u_z en u_w te bepalen met bovenstaande vergelijkingen, en vervolgens kan de grootte van de totale afvoer Q_t worden berekend via:

$$\begin{aligned} Q_t &= Q_z + Q_w = B_z \cdot h_z \cdot u_z + B_w \cdot h_w \cdot u_w = \\ &= B_z \cdot h_z \cdot u_z + B_w \cdot (h_z - H_w) \cdot u_w \end{aligned} \quad (\text{A-2.5})$$

De situatie zonder ijs kan eveneens worden beschreven door een aantal vergelijkingen, die gedeeltelijk analoog zijn aan de voorgaande:

$$u_z = C_z \sqrt{h_z \cdot i_z} \quad (\text{A-2.6a})$$

$$u_w = 18 \log \frac{12 h_w}{k_w} \sqrt{h_w \cdot i_w} \quad (\text{A-2.6b})$$

$$i_z = i_w \quad (\text{A-2.7})$$

$$h_w = h_z - H_w = h_1 - H_w \quad (\text{A-2.8})$$

Als de totale afvoer ook hier wordt gegeven door Q_t , dan geldt:

$$\begin{aligned} Q_t &= B_z \cdot h_z \cdot u_z + B_w \cdot h_w \cdot u_w = \\ &= B_z \cdot h_1 \cdot u_z + B_w \cdot (h_1 - H_w) \cdot u_w \end{aligned} \quad (\text{A-2.9})$$

Dit houdt in, dat bij gegeven Q_t de grootte van h_1 kan worden bepaald, dus ook de grootte van h_2/h_1 . Dit wil tevens zeggen, dat bij gegeven i , K_{ij} , K_w , C_2 en H_w voor verschillende waarden van h_z de grootte van h_2/h_1 kan worden berekend indien tevens de grootte van B_z en B_w bekend zijn. Voorts kan worden aangetoond, dat:

- 1 alleen de verhouding van B_w/B_z , en niet de grootte van B_w en B_z afzonderlijk, de waarde van h_2/h_1 beïnvloedt;
- 2 variatie in de grootte van i geen invloed heeft op de berekende grootte van h_2/h_1 , mits het verhang in de situatie met ijs gelijk is aan de situatie zonder ijs.

Voorts dient benadrukt te worden, dat het bovenstaande in feit alleen van toepassing is voor riviergedeelten waar de evenwichtsdiepte is bereikt en dus niet voor riviertrajekten waar afzuiging of opstuwning nog duidelijk merkbaar is. Op die trajekten zullen afwijkingen kunnen optreden.

A-3 Uitkomsten

Gebruik makend van de in paragraaf A-2 gegeven formules is voor een aantal gevallen de waarde van h_2/h_1 , de relatieve waterstand na het ontstaan van een vast ijsdek, berekend. Daarbij is min of meer uitgegaan van de omstandigheden, die op de benedenloop van de IJssel aanwezig zijn, te weten $h_z - h_w = H_w \cong 4,00$ m, terwijl h_z (blijkens figuur 27 en rekening houdend met een gemiddelde bodemligging van het zomerbed van circa 4,00 m - N.A.P.) mogelijkerwijs tot 8,00 à 10,00 m kan oplopen, afhankelijk van de keus van Q_2/Q_1 en C_2/C_1 . De verhouding van de breedten van winter- en zomerbed (B_w/B_z) is aldaar maximaal circa 4.

Voor de Chézy-koëfficiënt van het zomerbed is een konstante waarde van $35 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ aangehouden. De ruwheid van het zomerbed wordt voornamelijk bepaald door de

grootte van de schuifspanning op het bed, daar deze de vorm en de afmetingen van de beddingvormen induceert. Bij een rivier zonder vast ijsdek wordt deze schuifspanning τ bij benadering gegeven door:

$$\tau = \rho g h i \quad (A-3.1)$$

Als wel een vast ijsdek aanwezig is, dan zal de grootte van de schuifspanning worden gegeven door:

$$\tau = \rho g R_2 i \quad (A-3.2)$$

De bij de hierna te beschrijven berekeningen gevonden waarden van R_2 variëerden tussen 1,57 en 4,06 m. In figuur A-2 is het verband tussen de Chézy-koëfficiënt van het zomerbed te Kampen en respektievelijk de waterstand en de waterdiepte weergegeven. Voor zeer lage waterdiepten is dit verband niet ingetekend, daar deze niet voorkomen in verband met de terugstuwning vanuit het IJsselmeer. Dit houdt wel in, dat dan de helling van de waterspiegel ook kleiner zal zijn dan de plaatselijke bodemhelling, dus de schuifspanning op de bodem zal dan een geringe waarde hebben. Voor het interessante gebied van de lage waterstanden variëert de C-waarde tussen 33,5 en 36,5 m^{1/2}/s. Gemakshalve is een konstante C-waarde aangehouden, maar in principe is het zeer wel mogelijk om de C-waarde te laten variëren. Dit zou echter slechts geringe verschillen in de uiteindelijke uitkomsten hebben opgeleverd.

Voor de ruwheid van de onderzijde van het vaste ijsdek dient eveneens een waarde te worden aangenomen. Zoals in hoofdstuk 2 duidelijk is gemaakt, kan de onderzijde van een dergelijk dek erg onregelmatig zijn, daar het is opgebouwd uit in elkaar geschoven ijsschotsen. Berekeningen zijn uitgevoerd voor een drietal waarden van k_{ij} , te weten 0,50, 1,00 en 2,00 m. Hoewel vooral de laatste waarde erg groot lijkt, zal in het hierna volgende blijken, dat mogelijkwijs nog grotere waarden moeten zijn opgetreden. Ter vergelijking is ook nog opgenomen figuur A-3, die is ontleend aan Hensen (1948). Weergegeven is de snelheidsverdeling onder een vast ijsdek onder de Elbe te Gelsthacht. Gezien de getekende snelheidsverdeling en de plaats waar de snelheid in een raai maximaal is, blijkt de onderzijde van het ijsdek aanzienlijk ruwer te zijn dan de bodem van de rivier.

Om rekentechnische redenen is steeds een bepaalde waarde van h_2 gekozen ($h_2 = 5,00, 6,00, 7,00$ en $8,00$ m) en bij die waarde is de grootte van h_2/h_1 voor verschillende waarden van B_w/B_z bepaald. De resultaten van de berekeningen zijn weergegeven in Tabel A-1. Per waarde voor k_{ij} blijkt bij toename van de verhouding B_w/B_z de waarde van h_2/h_1 af te nemen. Opgemerkt moet worden, dat de afname echter tamelijk langzaam gaat en wel des te langzamer naarmate h_2 groter is. Dit is nog duidelijker te zien aan Tabel A-2, waaraan dezelfde gegevens ten grondslag liggen, maar waarin de afname van $(h_2-h_1)/h_1$, in procenten uitgedrukt, bij toenemende waarde van B_w/B_z is weergegeven.

Het doel van de voorafgaande berekeningen is na te gaan in hoeverre waterstandsverhogingen tengevolge van een vast ijsdek worden gereduceerd als rekening wordt gehouden met de aanwezigheid van het winterbed. In konkreto is de vraag of aan te geven is hoe de ligging van de in figuur 27 getekende frekwentielijnen van waterstanden hierdoor verandert. Omdat in dit aanhangsel een iets andere wijze gevolgd is bij de bepaling van h_2/h_1 , is dit echter niet mogelijk. De resultaten van hetgeen hierna is beschreven zijn dan ook niet geheel met de lijnen in figuur 27 te vergelijken.

Aangesloten wordt bij Tabel 12 van het verslag. Hierin zijn o.m. vermeld de afvoer te Lobith, de waarde van h_1 te Kampen en de frekwentie waarin deze afvoer wordt overschreden tijdens een periode met een vast ijsdek. Dezelfde gegevens zijn overgenomen in Tabel A-3 van dit aanhangsel. Vervolgens is uit Tabel A-1 figuur A-4 samengesteld, die voor de drie waarden van k_{ij} en voor de drie waarden van B_w/B_z de grootte van h_2/h_1 als functie van h_1 weergeeft. Voorts is voor de negen onderscheiden gevallen in Tabel A-3 de grootte van h_2 berekend. Uit deze tabel kan nu de invloed van de aanwezigheid van het winterbed worden afgeleid. Om enig inzicht hierin te verkrijgen, zijn de figuren A-5 en A-6 samengesteld. In figuur A-5 is voor $k_{ij} = 1,00$ m voor de drie waarden van B_w/B_z (te weten 0, 2 en 4) de overschrijdingsfrekwentie van waterstanden tengevolge van een vast ijsdek te Kampen aangegeven. Hieruit is direkt de invloed van het winterbed af te leiden. De waarde van B_w/B_z benedenstrooms van Kampen is blijkens rivierkaarten circa 2, terwijl in de stad zelf de verhouding B_w/B_z nog geringer is. Het rekening houden met het winterbed leidt naar verwachting tot lagere waterstanden bij eenzelfde frekwentie, voor $B_w/B_z = 2$ resulterend in verlagingen van circa 0,50 m. Als B_w/B_z toeneemt tot 4, neemt de verlaging slechts in geringe mate toe. In figuur A-6 is aangegeven in welke mate de keuze van een be-

paalde waarde van k_{ij} doorwerkt in de frekwentielijne van de waterstanden, in dit geval voor $B_w/B_z = 2$. De in figuur 27 gepresenteerde lijn voor $Q_2/Q_1 = 1,00$ en $C_2/C_1 = 1,00$ komt ongeveer overeen met de lijn voor $k_{ij} = 0,50$ m.

A-4 Bespreking van gevolgde procedure en uitkomsten

Om tot een kwantificering van het verschijnsel te komen, was het ook hier weer nodig vele veronderstellingen te doen. De belangrijkste twee zullen hierna kort worden besproken:

1 Karakteristieke ruwheid

In Tabel A-4 is berekend de grootte van C_2/C_1 zoals die volgt uit de aan Tabel A-1 ten grondslag liggende berekeningen, via:

$$\frac{C_2}{C_1} = \frac{C_2}{C_z} = \sqrt{\frac{R_z}{\frac{1}{2} h_2}} \quad (\text{A-4.1})$$

welke vergelijking volgt uit een combinatie van vergelijking (A-2.1b) en:

$$u_z = C_2 \sqrt{\frac{1}{2} h_2 \cdot i_z} \quad (\text{A-4.2})$$

zijnde de vergelijking Chézy voor de gehele doorsnede, zoals die in paragraaf 2.5 is gebruikt. De waarde van C_2/C_1 blijkt te variëren tussen 1,00 en 0,79 voor waarden van k_{ij} tussen 0,50 en 2,00 m, hetgeen gezien de waarden, die in figuur 12 zijn weergegeven, geen extreme schattingen voor k_{ij} blijken te zijn. Het feit, dat zelfs waarden van $C_2/C_1 = 0,50$ zijn geconstateerd, wijst erop, dat tijdelijk zelfs nog hogere waarden van k_{ij} kunnen optreden. Hierbij moet nog worden opgemerkt, dat zowel C_2 als k_{ij} een soort "overall" parameters zijn, waarin behalve wrijvingsverliezen t.g.v. de ruwheid van de onderzijde van het ijsdek ook energieverliezen door plaatselijke verdikkingen van het ijsdek zijn opgenomen.

2 Gelijke k_{ij} -waarde voor zomer- en winterbed

Aangenomen is gelijke karakteristieke ruwheid voor de onderkant van het ijsdek van zowel het zomer- als het winterbed. Deze aanname is mogelijk niet reëel. Zou de ruwheid van het ijsdek in het winterbed lager zijn dan dat in het zomerbed, dan zou dit resulteren in verdere verlaging van de waterstanden bij dezelfde frekwentie. Over de verschillende ruwheden zijn géén gege-

vens bekend. Wel moet bedacht worden, dat in het winterbed ook kleine dijkes, etc. aanwezig zijn, die bij aanwezigheid van een vast ijsdek nog eens extra energieverliezen zullen veroorzaken.

Ten aanzien van de uitkomsten van de berekeningen moet opgemerkt worden, dat weliswaar het rekening houden met de invloed van het winterbed te Kampen in waterstanden resulteert, die circa 0,50 m lager zijn, maar dat de waterstanden t.g.v. een vast ijsdek nog altijd aanzienlijk hoger zijn dan de waterstanden tengevolge van alleen een hoge afvoer met dezelfde overschrijdingsfrequentie (zie figuur A-5).

LITERATUUR

- A-1 EINSTEIN, H.A.,
Formulas for the transportation of bed load,
Trans. Am. Soc. Civ. Engrs., Vol. 107, 1942, pp. 561-573;
- A-2 HENSEN, W.,
Der Einfluss einer Eisdecke auf den Abfluss und die Bettrauhigkeit in
einem Flusse,
Die Bautechnik, Vol. 25, 1948, H. 6, Jun., pp. 133-138.

SYMBOLLEN

Symbol	Omschrijving	Dimensie
C_z	Chézy-koefficiënt van het zomerbed	$L^{\frac{1}{2}} \cdot T^{-1}$
C_1	Chézy-koefficiënt rivier zonder vast ijsdek	$L^{\frac{1}{2}} \cdot T^{-1}$
C_2	Chézy-koefficiënt rivier met vast ijsdek	$L^{\frac{1}{2}} \cdot T^{-1}$
g	versnelling zwaartekracht	$L \cdot T^{-2}$
h	waterdiepte	L
h_w	waterdiepte winterbed	L
h_z	waterdiepte zomerbed	L
H_w	hoogte winterbed	L
h_1	waterdiepte zomerbed zonder vast ijsdek	L
h_2	waterdiepte zomerbed met vast ijsdek	L
i	verhang	-
i_w	verhang winterbed	-
i_z	verhang zomerbed	-
k_w	ruwheid winterbed	L
k_{ij}	ruwheid onderzijde ijsdek	L
Q_t	totale afvoer	$L^3 \cdot T^{-1}$
Q_w	afvoer over winterbed	$L^3 \cdot T^{-1}$
Q_z	afvoer door zomerbed	$L^3 \cdot T^{-1}$
Q_1	afvoer rivier zonder vast ijsdek	$L^3 \cdot T^{-1}$
Q_2	afvoer rivier met vast ijsdek	$L^3 \cdot T^{-1}$
R_w	hydraulische straal betrokken op bodem winterbed	L
R_{wij}	hydraulische straal betrokken op ijsdek in winterbed	L
R_z	hydraulische straal betrokken op bodem zomerbed	L
R_{zij}	hydraulische straal betrokken op ijsdek in zomerbed	L

h_2 (m)	k_{ij} (m)								
	0,50			1,00			2,00		
	B_w/B_z			B_w/B_z			B_w/B_z		
	0	2	4	0	2	4	0	2	4
5,00	1,294	1,199	1,157	1,366	1,267	1,202	1,472	1,379	1,299
6,00	1,276	1,192	1,170	1,345	1,235	1,205	1,440	1,296	1,282
7,00	1,264	1,205	1,193	1,327	1,248	1,226	1,416	1,304	1,279
8,00	1,252	1,222	1,216	1,313	1,262	1,250	1,396	1,320	1,303

Tabel A-1 De waarde van h_2/h_1 voor verschillende waarden van k_{ij} , B_w/B_z en h_2 bij $C_z = 35 \text{ m}^2/\text{s}$ en $H_w = 4,00 \text{ m}$

h_2 (m)	k_{ij} (m)								
	0,50			1,00			2,00		
	B_w/B_z			B_w/B_z			B_w/B_z		
	0	2	4	0	2	4	0	2	4
5,00	100	68	53	100	73	55	100	80	63
6,00	100	70	62	100	68	59	100	67	64
7,00	100	78	73	100	76	69	100	73	67
8,00	100	88	86	100	84	80	100	81	77

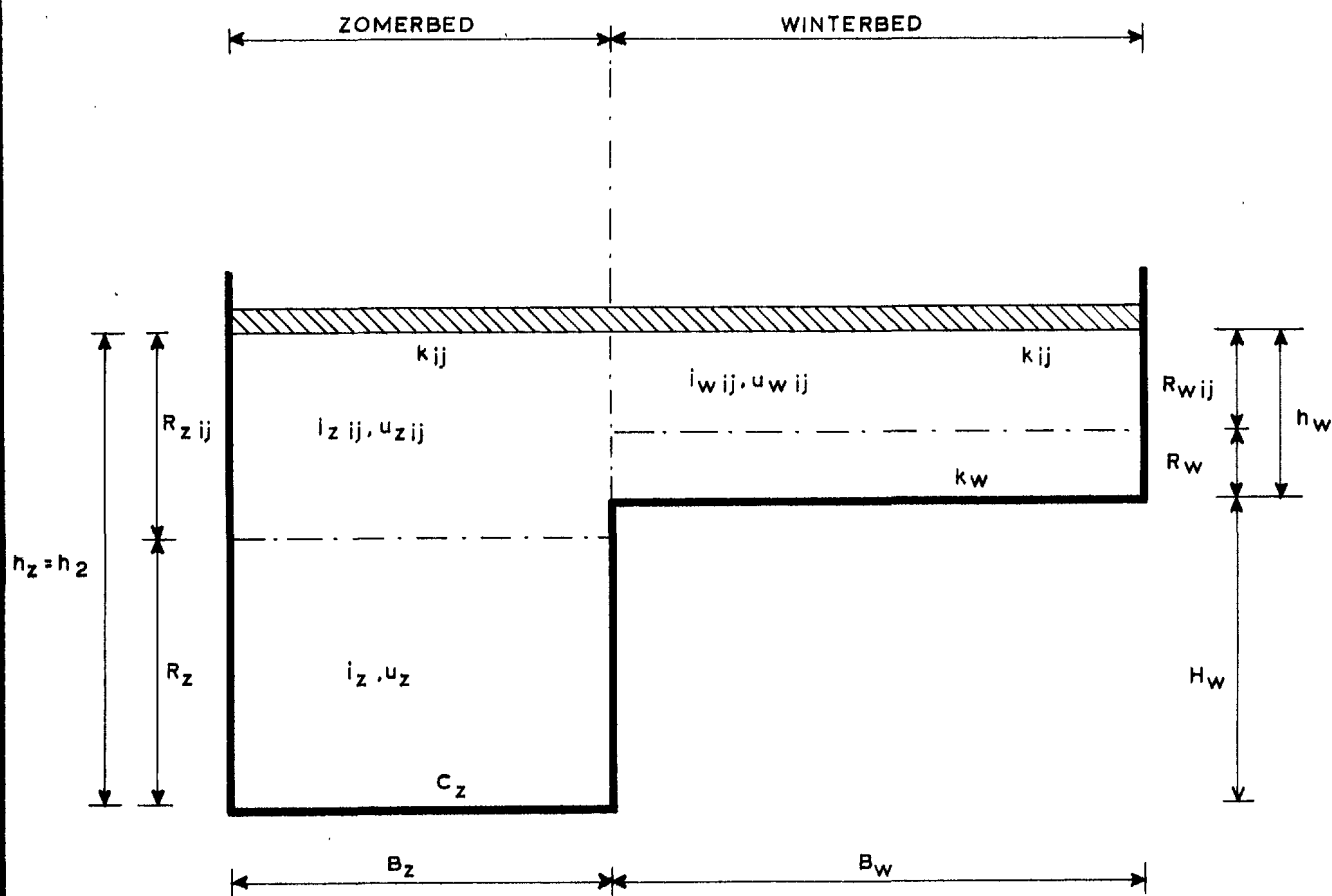
Tabel A-2 Grootte van $(h_2-h_1)/h_1$ in % van waarde bij $B_w/B_z = 0$ voor verschillende waarden van B_w/B_z en k_{ij} (bij $C_z = 35 \text{ m}^2/\text{s}$ en $H_w = 4,00 \text{ m}$)

afvoer Lobith (m /s)	h_1 (m)	over- schrij- dings- frekw.	h_2 gekorrigeerd (m) = waterstand (m + N.A.P.) + 4,03								
			k_{ij} (m)								
			0,50			1,00			2,00		
			B_w/B_z			B_w/B_z			B_w/B_z		
			0	2	4	0	2	4	0	2	4
5000	4,53	0,0379	5,80	5,40	5,25	6,07	5,62	5,45	6,46	6,05	5,83
6000	4,79	0,0254	6,08	5,71	5,57	6,40	5,93	5,76	6,79	6,33	6,13
7000	5,00	0,0168	6,35	5,97	5,83	6,65	6,18	6,04	7,06	6,58	6,40
8000	5,21	0,0110	6,62	6,23	6,10	6,92	6,45	6,30	7,34	6,83	6,67
9000	5,43	0,0071	6,87	6,51	6,41	7,17	6,74	6,61	7,62	7,09	6,94
10000	5,63	0,0046	7,10	6,77	6,67	7,42	7,03	6,87	7,87	7,35	7,22
11000	5,81	0,0029	7,32	6,99	6,91	7,66	7,26	7,13	8,09	7,61	7,49
12000	5,96	0,0019	7,49	7,19	7,11	7,85	7,48	7,33	8,28	7,84	7,70
13000	6,13	0,0012	7,70	7,42	7,33	8,04	7,72	7,60	8,48	8,15	7,98
14000	6,27	0,0008	7,86	7,60	7,54	8,21	7,90	7,79			
15000	6,42	0,0005	8,03	7,83	7,77	8,41	8,15	8,03			

Tabel A-3 Invloed van winterbed voor verschillende waarden van k_{ij} op de waterstanden tengevolge van vast ijsdek te Kampen

h_z (m)	k_{ij} (m)		
	0,50	1,00	2,00
5,00	0,961	0,886	0,792
6,00	0,981	0,907	0,818
7,00	0,995	0,925	0,839
8,00	1,010	0,940	0,857

Tabel A-4 De waarde van C_2/C_1 voor verschillende waarden van k_{ij} en h_2 ($B_w/B_z = 0$, $C_z = 35 \text{ m}^2/\text{s}$, $H_w = 4,00 \text{ m}$)



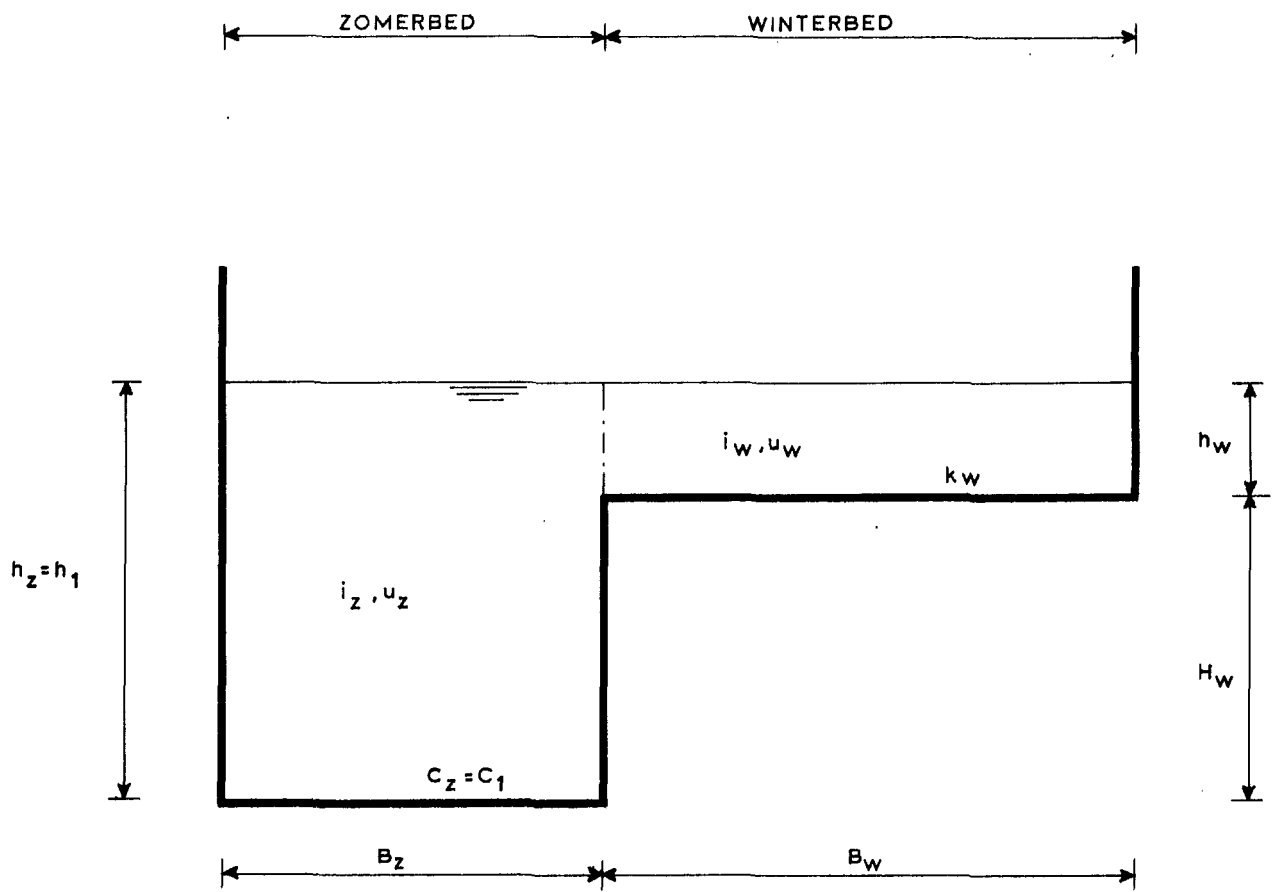
SCHEMATISCHE DOORSNEDE VAN RIVIER
 MET VAST IJSEK

AANHANGSEL A

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1104

FIG. A-1a



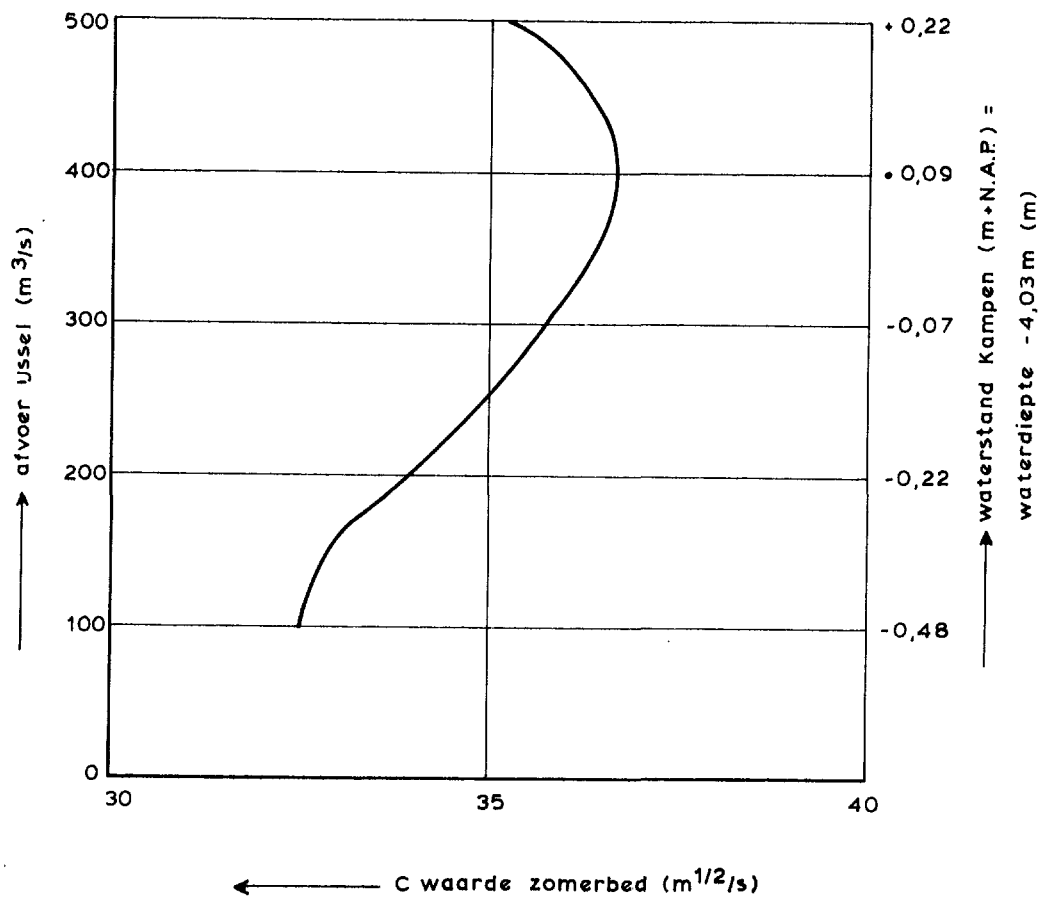
SCHEMATISCHE DOORSNEDE VAN RIVIER
 ZONDER VAST USDEK -

AANHANGSEL A

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1104

FIG. A-1b



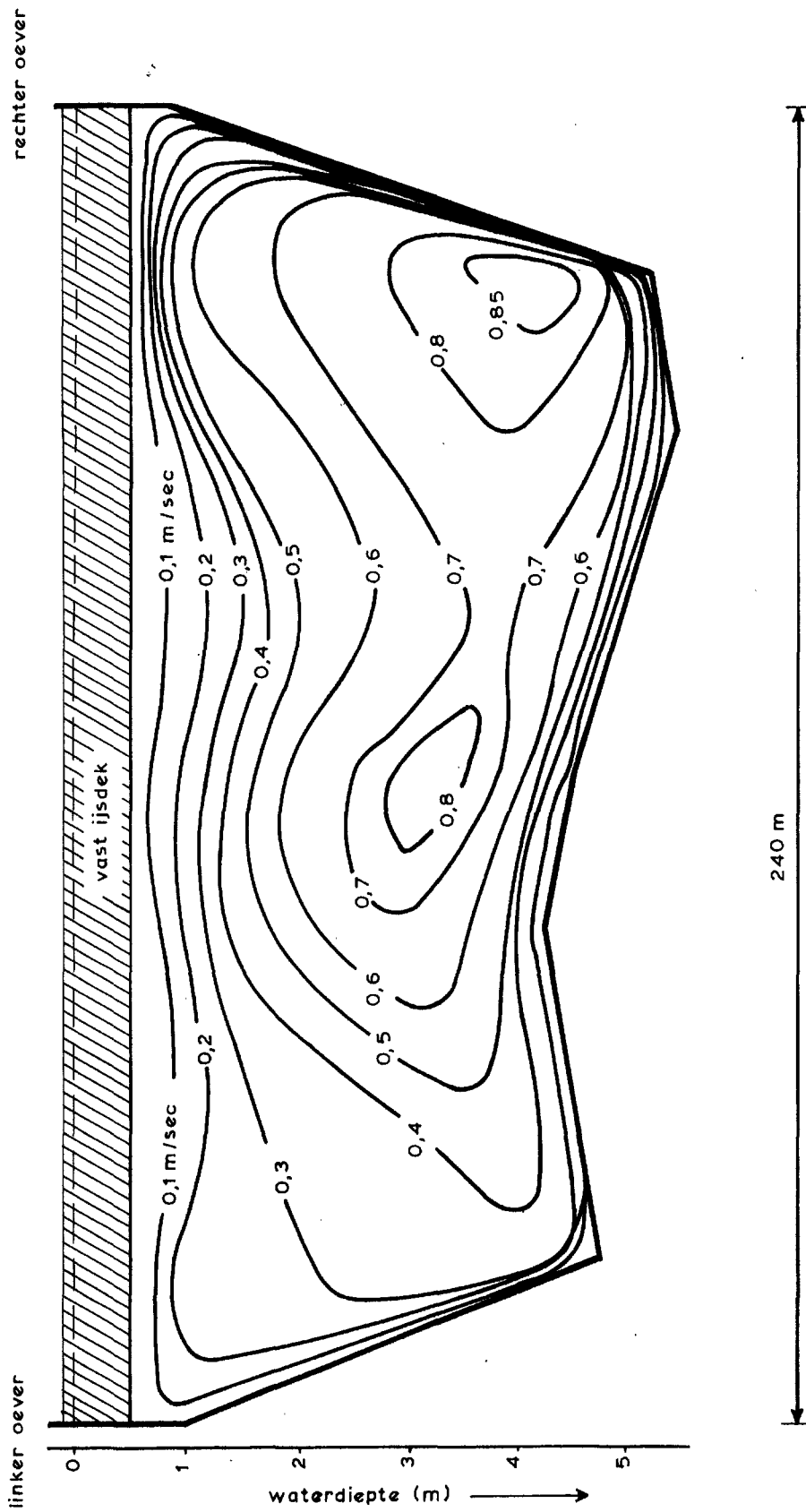
VERLOOP VAN C- WAARDE ZOMERBED TE
TE KAMPEN ZONDER VAST USDEK

AANHANGSEL A

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1104

FIG. A-2



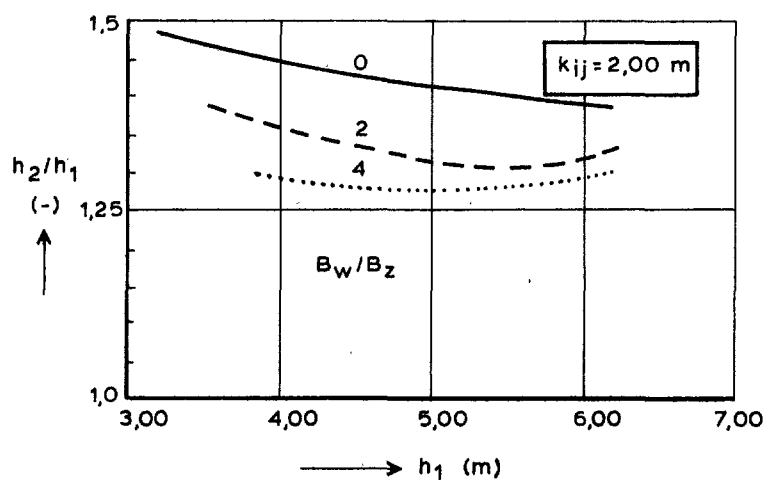
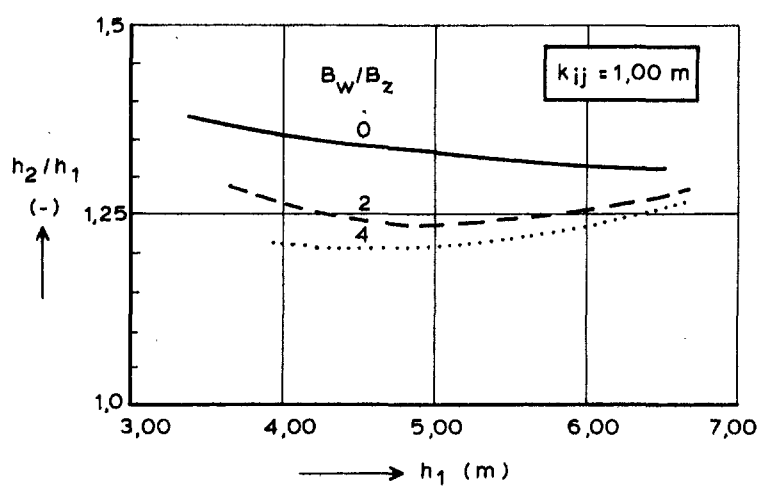
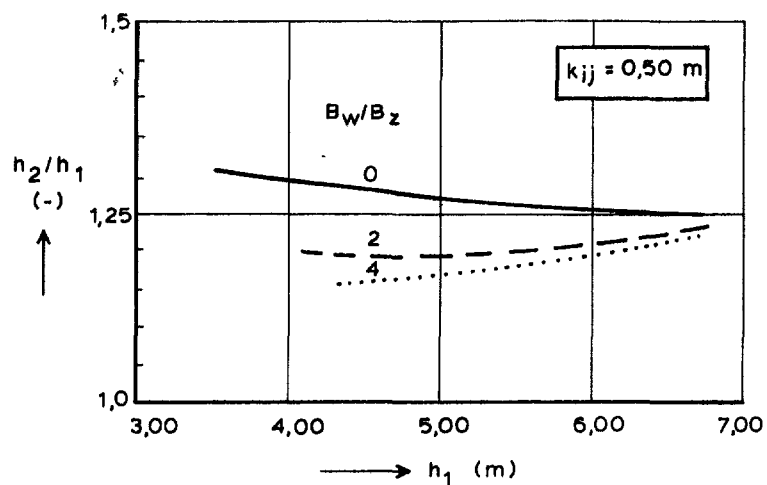
SNELHEIDSPROFIEL ONDER IJSEK IN DE ELBE
 BIJ GEESTHACHT (KM 593.550) OP 1942-02-06
 (NAAR HENSEN [A-2]) *

AANHANGSEL A

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1104

FIG. A-3



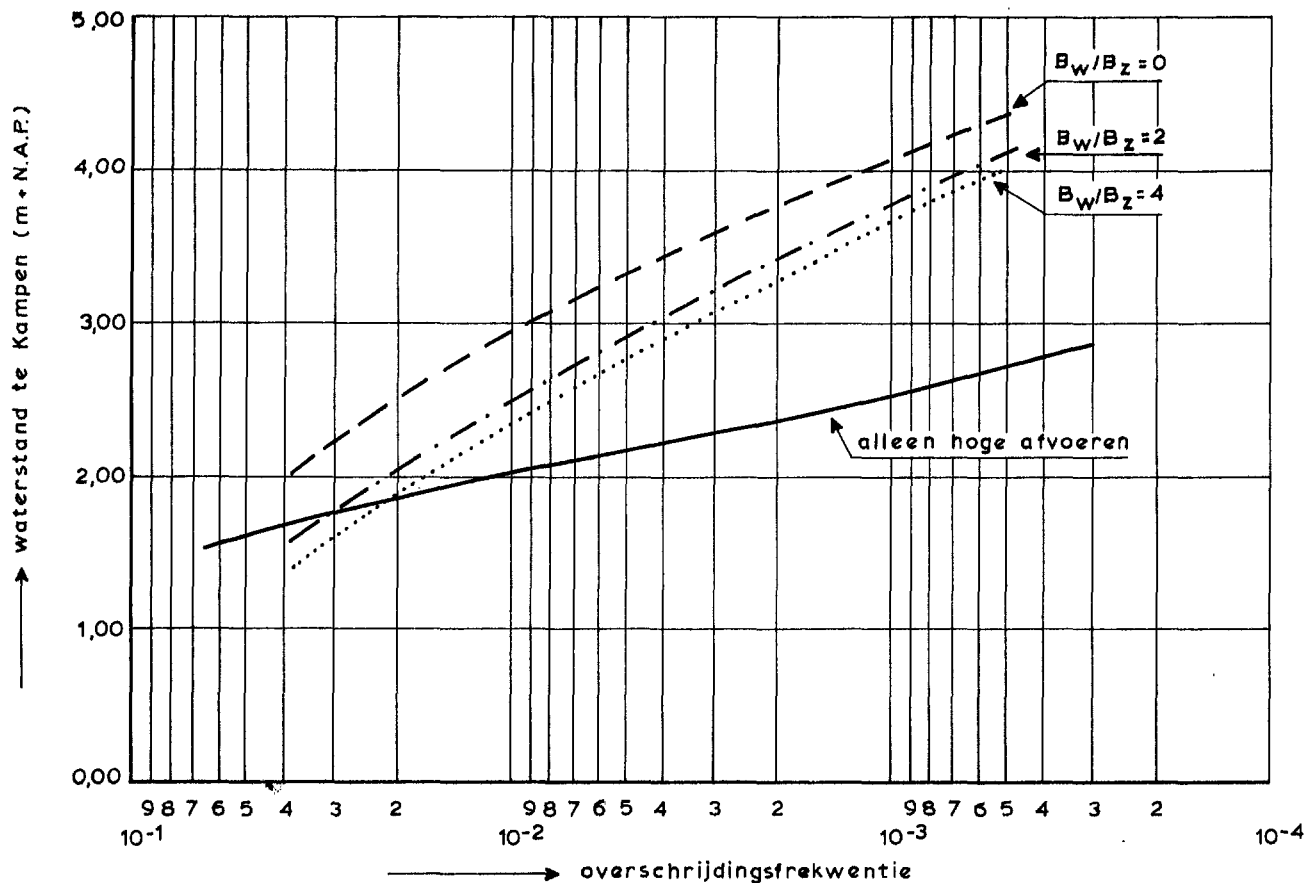
DE WAARDE VAN h_2/h_1 ALS FUNKTIE VAN h_1
VOOR VERSCHILLENDE WAARDEN VAN k_{ij} EN B_w/B_z

AANHANGSEL A

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1104

FIG. A-4



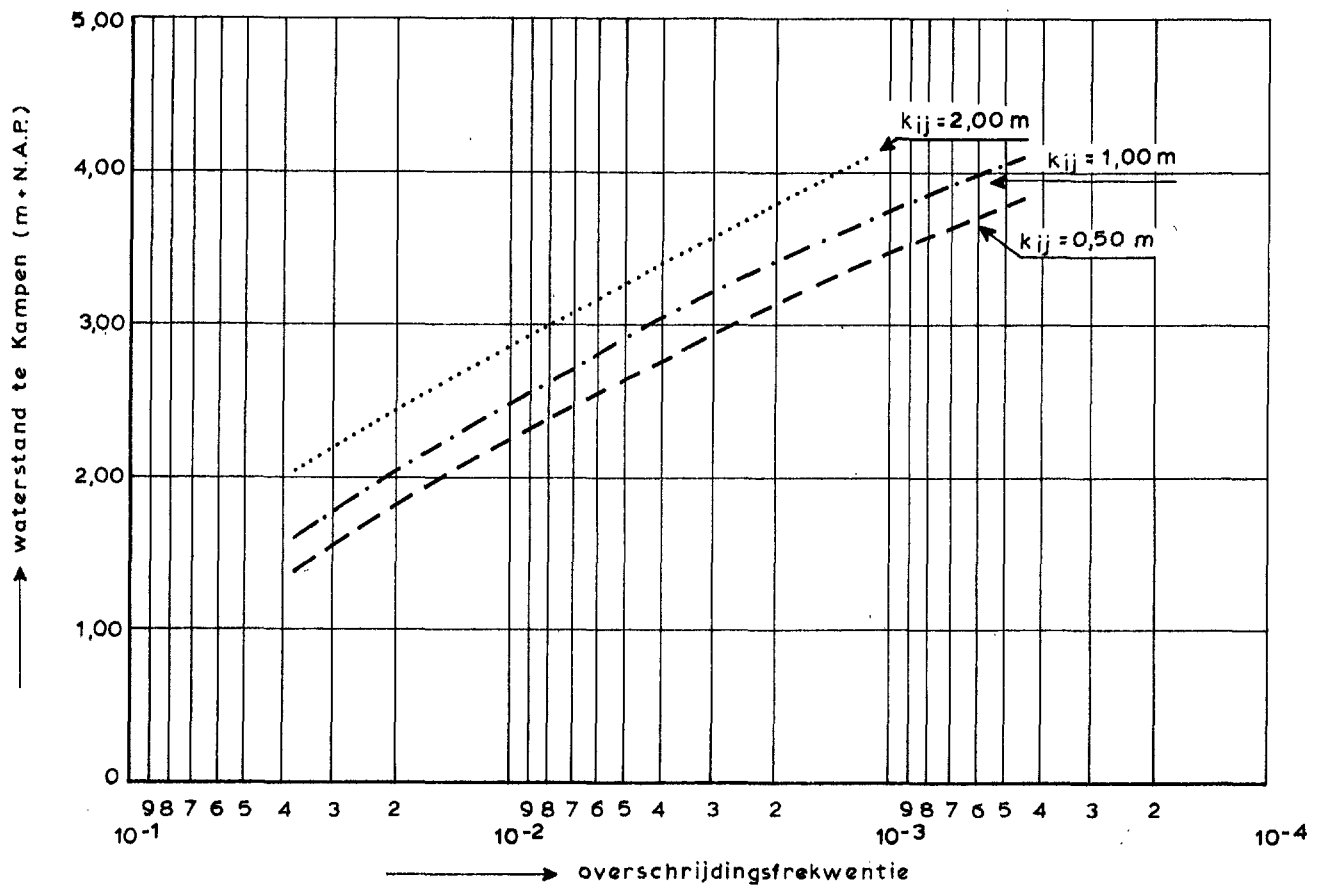
INVLOED VAN WINTERBED (BIJ $k_{ij} = 1,00$ m)
 OP FREKWENTIELEIJN WATERSTANDEN BIJ
 KAMPEN t.g.v. VAST USDEK

AANHANGSEL A

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1104

FIG. A-5



INVLOED VAN WAARDE VAN k_{ij} (BIJ $B_w/B_z = 2$)
 OP FREKWENTIELIJN WATERSTANDEN TE
 KAMPEN t.g.v. VAST USDEK

AANHANGSEL A

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1104

FIG. A-6

aanhangsel B

Aanhangsel B:

Opruimen van ijs door explosieven

Het effect van explosies op ijs is onderzocht bij proeven op het IJsselmeer door van der Kley [B-2] en [B-3] en bij proeven in Alaska, waarvan Frankenstein en Smith [B-1] een samenvatting geven. Door van der Kley wordt geadviseerd om de explosieven direkt onder de ijslaag aan te brengen, terwijl bij de proeven in Alaska is gebleken, dat het meeste effect werd verkregen als de afstanden tussen onderkant van de ijslaag en de plaats van de explosieven werd bepaald met de formule

$$h_e = 1,98 L^{1/3} \quad (B-1a)$$

waarbij L de grootte van de lading in pounds is en h_e wordt uitgedrukt in feet. In S.I.-eenheden komt dit overeen met:

$$h_e = 0,786 L^{1/3} \quad (B-1b)$$

met h in m en L in kg.

Voorts stellen Frankenstein en Smith, dat de dikte van de ijslaag geen invloed heeft op de diameter van het gat, dat door springen ontstaat. Als de lading op de diepte berekend via vergelijking (B-1) wordt geplaatst, dan kan de diameter D van het gesprongen gat worden bepaald uit:

$$D = 20,2 L^{1/3} - 31,3 \quad (B-2a)$$

met D in feet en L in pounds. Herschreven in S.I.-eenheden:

$$D = 8,02 L^{1/3} - 9,55 \quad (B-2b)$$

met D in m en L in kg.

De diskrepantie tussen van der Kley enerzijds en Frankenstein en Smith anderzijds is echter slechts schijn, zoals hierna zal worden aangetoond. Bij de verwerking van zijn resultaten bouwt van der Kley een theoretisch model op, dat als uitkomst oplevert:

$$t^2 = n^2 \left(\frac{A}{L}\right)^{2/3} - \left[d + \sqrt{\left(\frac{A}{L}\right)^{2/3} (n^2 - 1) + h^2} \right]^2 \quad (\text{B-3})$$

In deze formule zijn A en n (de brekingsindex van ijs voor schokgolven) koëfficiënten, die door van der Kley als konstant worden aangenomen, terwijl de andere symbolen worden verklaard in figuur B-1. Uit vergelijking (B-3) blijkt, dat bij deze aannamen de straal van het gesprongen gat maximaal is als $h = 0$ en voorts dat ook de dikte van de ijslaag van belang is. Door van der Kley wordt bij de verdere verwerking een waarde voor n aangenomen ($n = 1,1$ in [B-3] en $n = 2,0$ in [B-2]) en vervolgens wordt uit de resultaten van de proeven de grootte van A bepaald. De koëfficiënt A blijkt aanzienlijk te variëren, afhankelijk van o.m. de soort springstof, die is gebruikt. Per springstof worden vervolgens gemiddelde waarden van A bepaald en die worden in vergelijking (B-3) ingevuld om de benodigde lading uit te rekenen, afhankelijk van de dikte van het ijs, de gewenste diameter van het te springen gat en het soort springstof.

Het is echter ook mogelijk om, met terzijdeschuiving van het theoretisch model, rechtstreeks de grootte van het gesprongen gat uit te zetten tegen de diepte waarop de lading is aangebracht. Dit is gebeurd in de figuren B-2a tot en met B-2c, waarbij nog een onderscheid is gemaakt naar soort springstof en grootte van de lading, terwijl de dikte van de betreffende ijslaag per punt is bijgeschreven. Ter vergelijking is tevens aangegeven de door Frankenstein en Smith [B-1] aanbevolen diepte volgens vergelijking (B-1). Uit de figuren B-2a...B-2c is een tweetal zaken af te leiden:

- 1 de stelling van Frankenstein en Smith [B-1] ten aanzien van de meest effectieve diepte voor het plaatsen van de lading kan, gezien de ligging van de waarnemingen van van der Kley, op z'n minst niet worden verworpen, terwijl in een aantal gevallen de stelling zelfs bevestigd lijkt te worden,
- 2 inderdaad lijkt de straal van het gesprongen gat niet af te hangen van de dikte van de ijslaag, althans niet binnen de grenzen waartussen het onderzoek zich heeft bewogen.

Gekonkludeerd moet worden, dat van der Kley, door het gebruik van een blijkbaar onjuist theoretisch model en door voorbij te gaan aan de resultaten van zijn waarnemingen, tot konklusies is gekomen, die bij nadere beschouwing niet kunnen worden gehandhaafd.

Tevens is het mogelijk om een vergelijking te maken met formule (B-2). Daartoe is in figuur 3 van de proeven op het IJsselmeer per bepaalde combinatie van soort springstof en ladinggrootte de straal van het maximale gat, dat is gevonden (vaak optredend als de lading nabij de meest effectieve hoogte was opgehangen), uitgezet tegen de grootte van de lading. Verder is het verband tussen de ladinggrootte en de afmeting van het gesprongen gat volgens vergelijking (B-2) ingetekend, rekening houdend met het feit, dat met deze vergelijking de diameter van het gat wordt gevonden, terwijl in figuur 3 de straal is uitgezet. De gaten, die op het IJsselmeer zijn ontstaan, zijn met name voor de brisante springstoffen (dynamiet, schietkatoen en trotyl of TNT) aanzienlijk groter dan door Frankenstein en Smith is voorspeld. Mogelijke redenen hiervoor zijn:

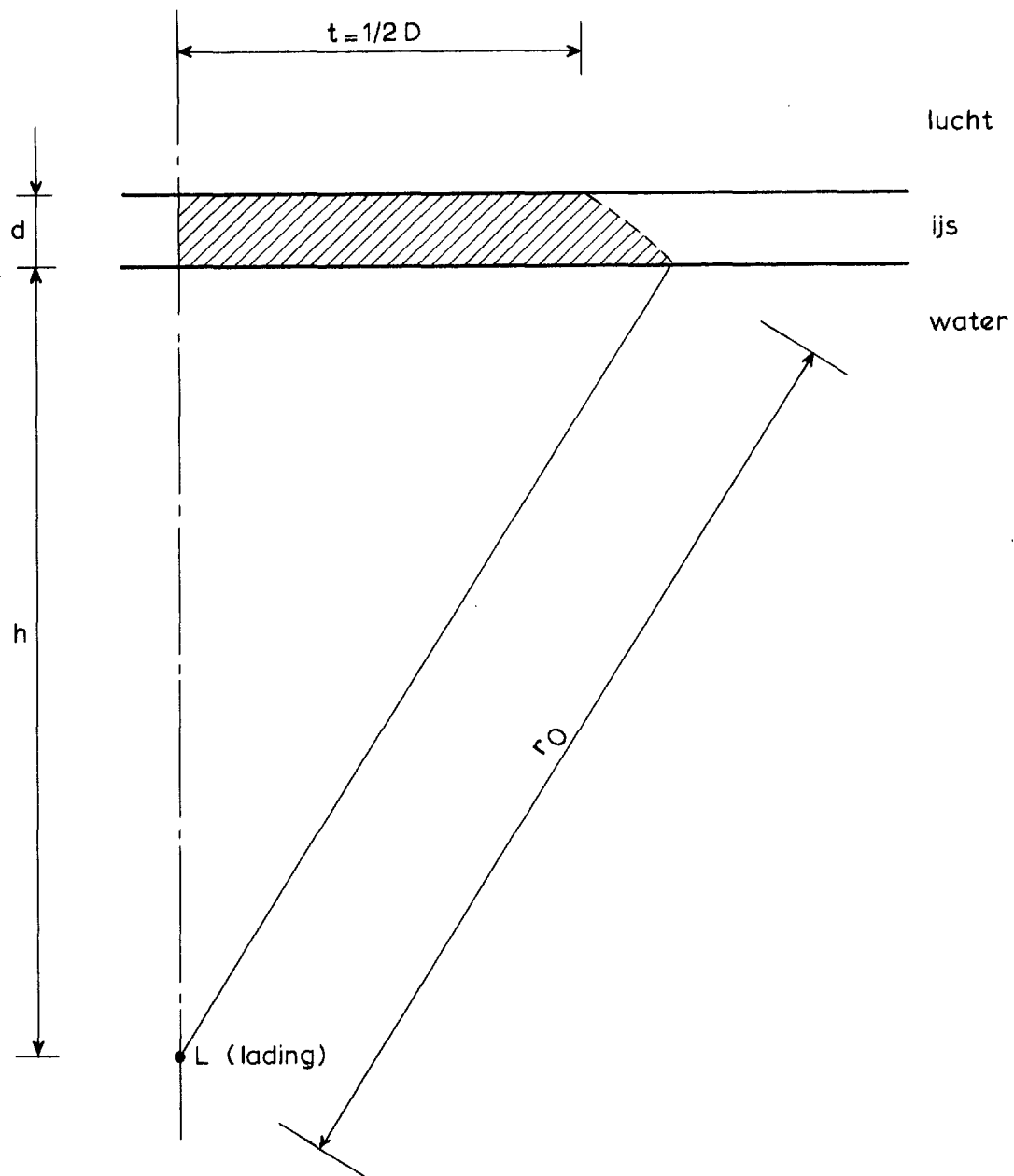
- 1 De proeven in Alaska werden uitgevoerd in fjorden, met een "semi-infinite depth", terwijl de waterdiepten op het IJsselmeer waarschijnlijk niet groter dan 3 à 4 m zijn geweest. Bij de proeven op het IJsselmeer kan de op de bodem terugkaatsende drukgolf het effect van de explosie hebben versterkt.
- 2 Bij proeven op het IJsselmeer zijn proeven gedaan bij dikten van de ijslaag variërend van 0,09 m tot 0,65 m met enkele proeven met een nog grotere ijsdikte. Hoewel Frankenstein en Smith geen compleet overzicht van de in Alaska verkregen resultaten geven, noemen zij ergens een waarde van 36 in., overeenkomend met circa 0,90 m. Mogelijk speelt de dikte van de ijslaag toch een rol, maar gegevens ontbreken om dit te controleren.
- 3 De in Nederland gebruikte springstoffen zijn krachtiger geweest (hier is in paragraaf 3.3 op ingegaan).
- 4 Het ijs van het IJsselmeer verschilde in kwaliteit aanzienlijk van dat in de fjorden van Alaska.

LITERATUUR

- B-1 FRANKENSTEIN, G.E. en SMITH, N.,
The use of explosives in removing ice jams,
Proc. IAHR Symposium "Ice and its action on hydraulic structures",
Reykjavik, 1970, paper 3.13;
- B-2 KLEY, J. van der,
IJsopruiming door middel van sprinstoffen (1),
Weg- en Waterbouw, Vol. 25, 1965, no. 1, Jan., pp. 7-14;
- B-3 KLEY, J. van der,
The use of explosives for clearing ice,
Rijkswaterstaat Communications Nr. 7, 1965, 55 pp.

SYMBOLLEN

Symbool	verklaring	dimensie
A	koëfficiënt	-
d	dikte ijsdek	L
D	diameter gesprongen gat	L
h_e	optimale diepte lading	L
L	grootte lading	M
n	brekingsindex	-
t	straal gesprongen gat	L



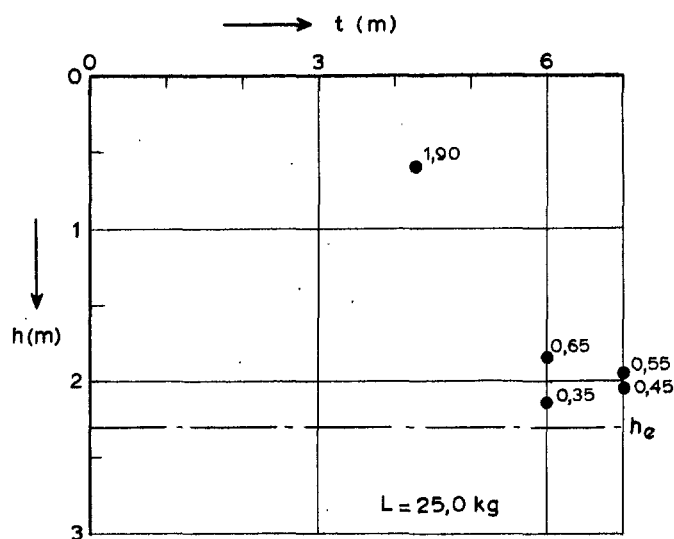
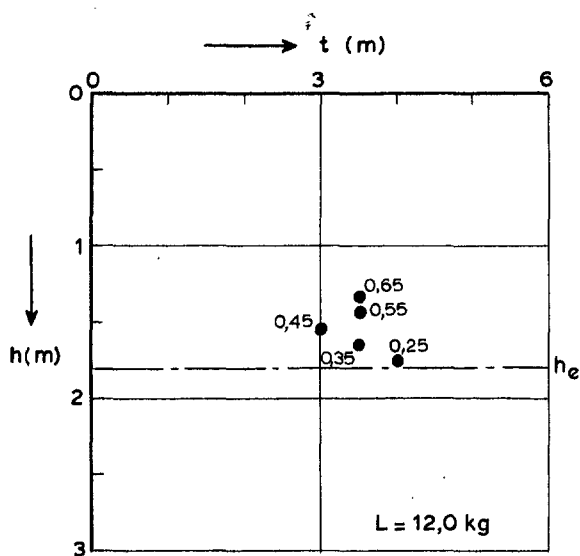
DEFINITIE VAN SYMBOLEN- IN VERGELUKING (B-3)

AANHANGSEL B

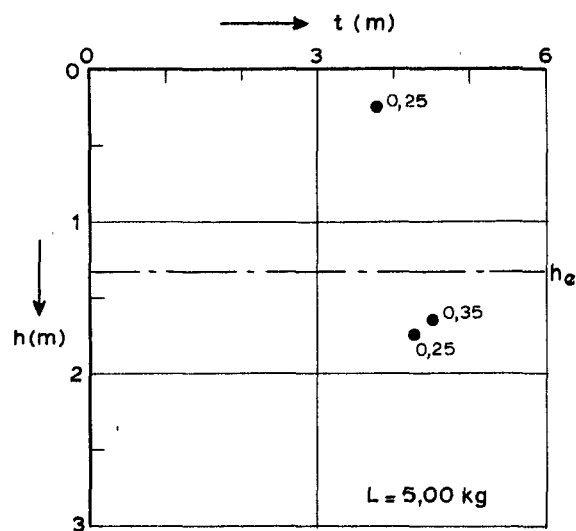
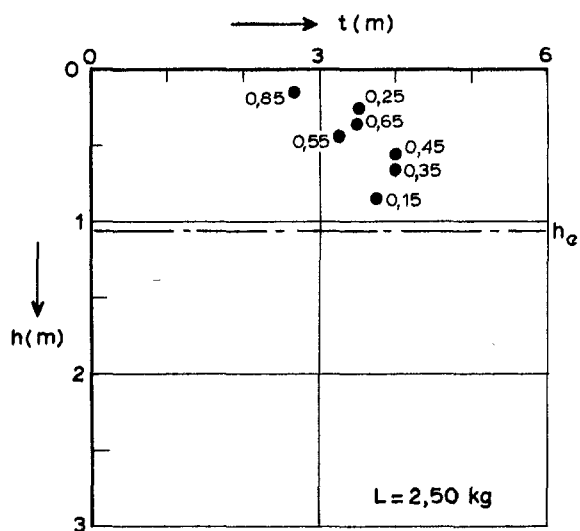
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1104

FIG.B-1



PROEVEN MET BUSKRUIT



PROEVEN MET DYNAMIET

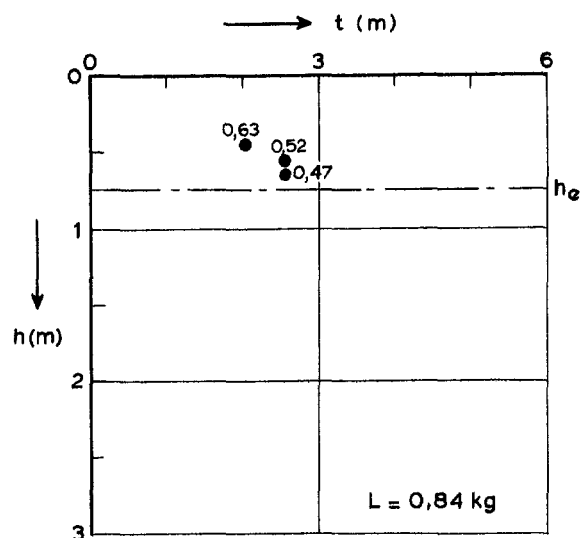
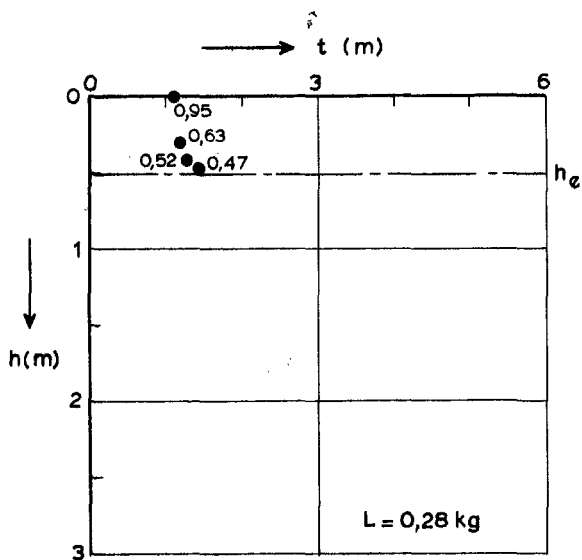
EXPERIMENTEEL DOOR VAN DER KLEY [B-3]
 BEPAALD VERBAND TUSSEN h EN t BIJ
 VERSCHILLENDE WAARDEN VAN d EN L

AANHANGSEL B

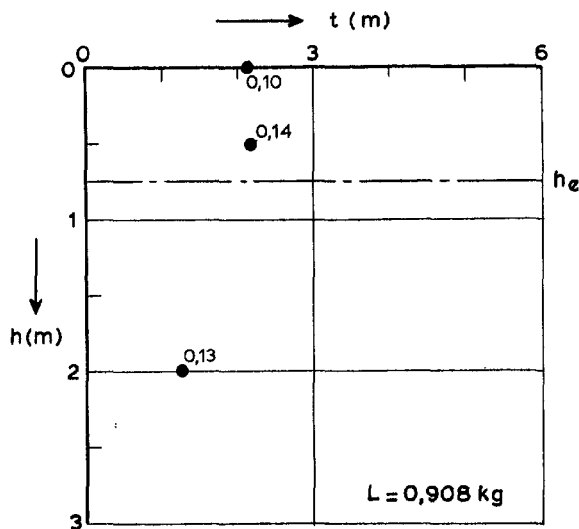
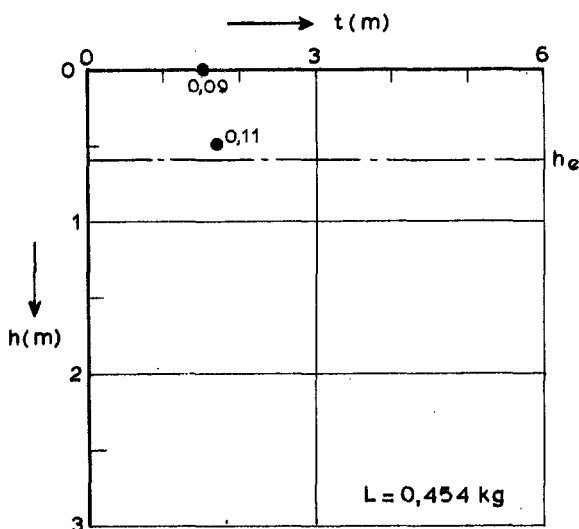
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1104

FIG.B-2a



PROEVEN MET SCHIETKATOEN



PROEVEN MET AMERIKAANS TNT

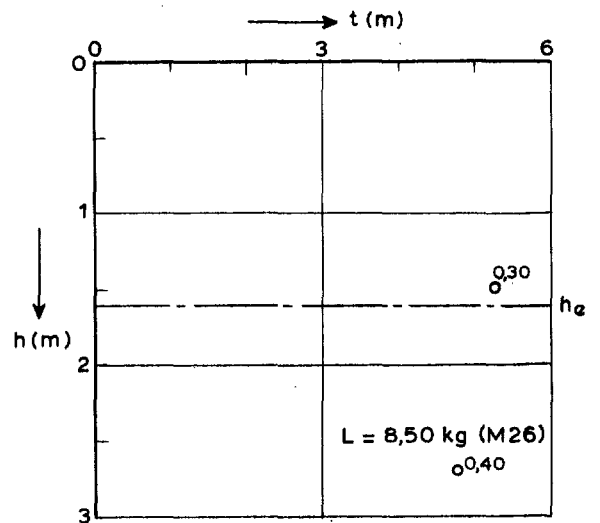
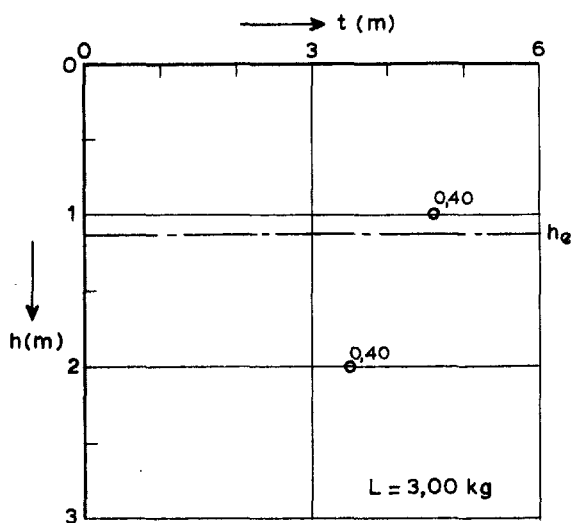
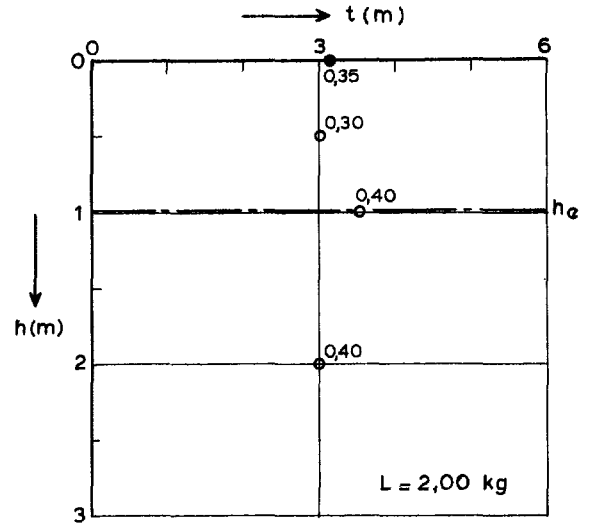
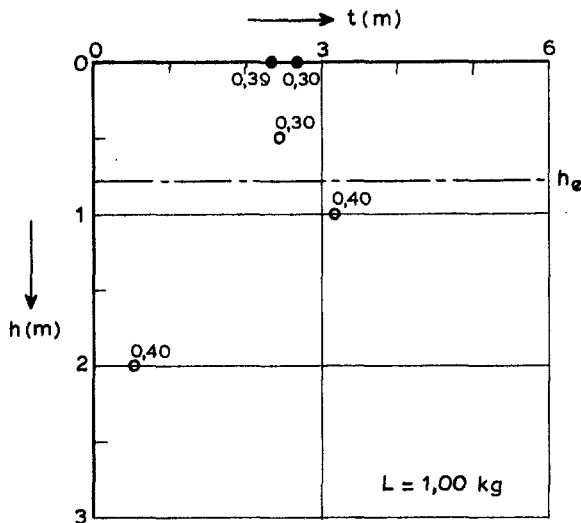
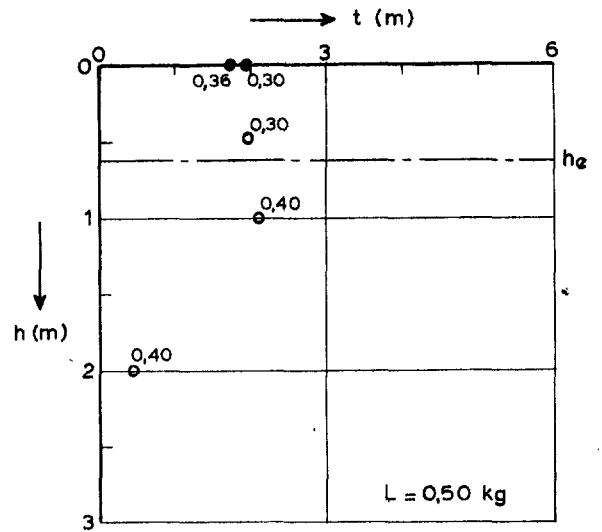
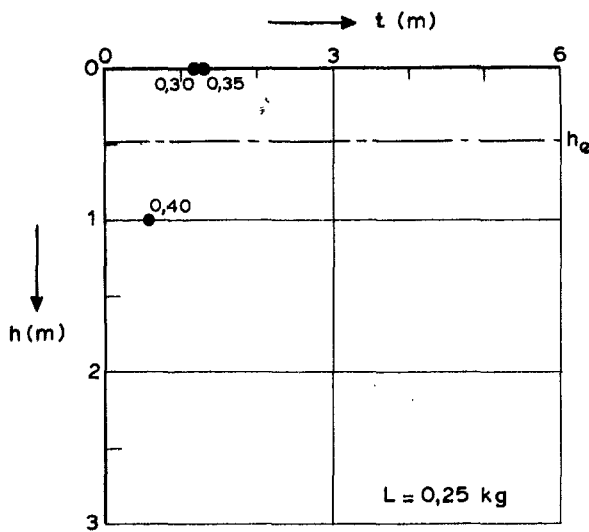
EXPERIMENTEEL DOOR VAN DER KLEY [B-3]
 BEPAALD VERBAND TUSSEN h EN t BIJ
 VERSCHILLENDE WAARDEN VAN d EN L

AANHANGSEL B

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1104

FIG.B-2b



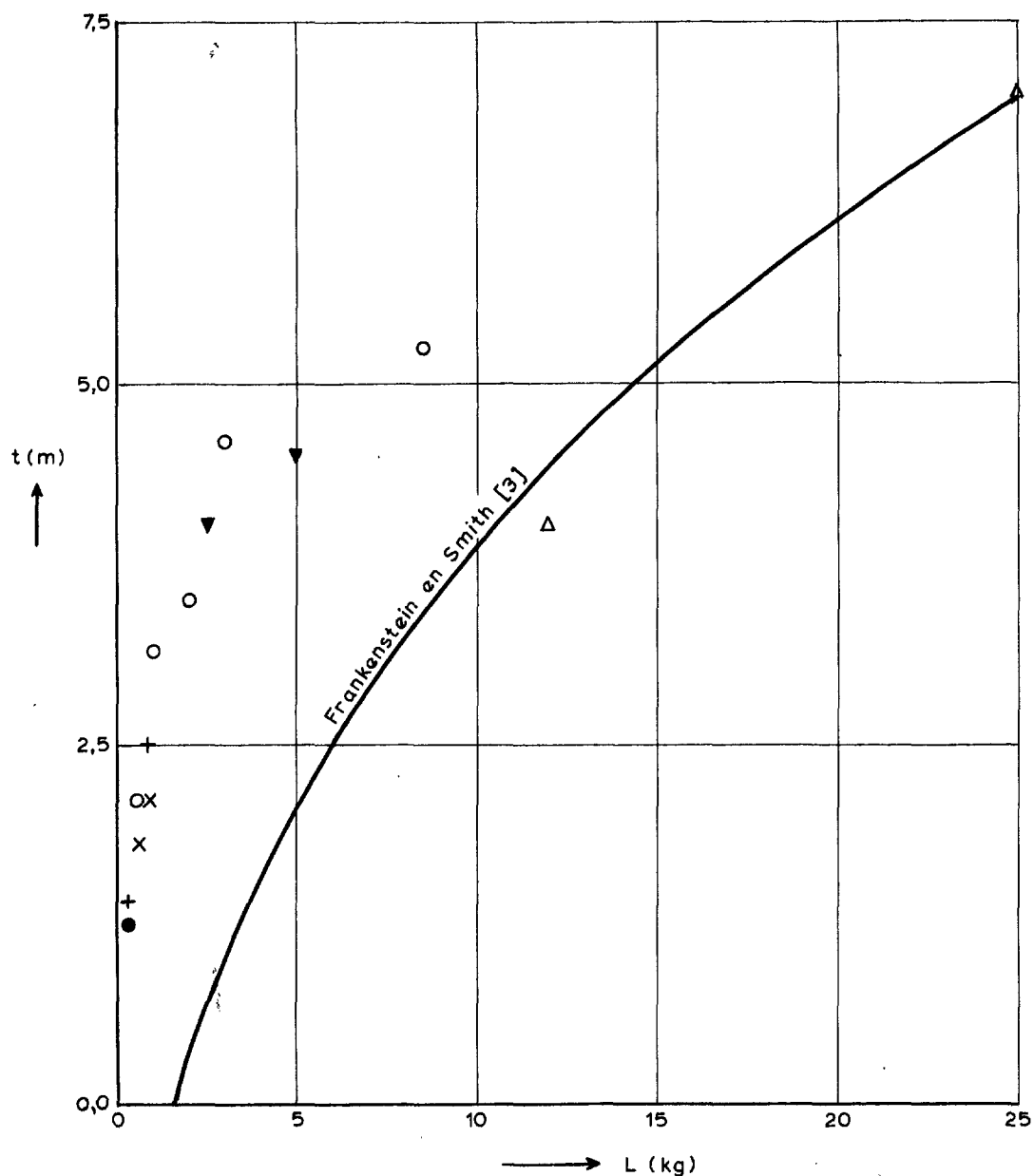
EXPERIMENTEEL DOOR VAN DER KLEY [B-3] BEPAALD
 VERBAND TUSSEN h EN t BIJ VERSCHILLENDE
 WAARDEN VAN d EN L VOOR NEDERLANDS TNT

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

AANHANGSEL B

R 1104

FIG.B-2c



- Δ buskruit
- ▼ dynamiet
- + schietkatoen
- X Amerikaans TNT
- Nederlands TNT
- O idem (gat gesprongen)

VERGELIJKING VAN PROEVEN VAN DER KLEY
[B-3] MET FORMULE VAN FRANKENSTEIN
EN SMITH [B-1]

AANHANGSEL B

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1104

FIG. B-3

aanhangsel C

Aanhangsel C:

Beschouwingen rond de problemen betreffende de te volgen ijsbreektaktiek na uitvoering van het Deltaplan *)

Tegenwoordige ijstoestand en ijsbeweging in het Noordelijk Deltagebied

Van de bovenrivieren voert de Waal het grootste gedeelte van het ijs van de Rijn af, in bepaalde perioden van strenge winters zelfs al het ijs, daar dan het Pannerdens Kanaal, de Rijn en de IJssel vaak eerder met een vast ijsdek zijn bedekt. Indien de ijsbezetting op de Waal belangrijk gaat worden, begint zich op de Beneden Merwede ook spoedig een gesloten ijsdek te vormen, dat met het getij op en neer beweegt. Dit werd in het verleden ook zoveel mogelijk bevorderd om het ijsbezwaar bij Dordrecht en Rotterdam zoveel mogelijk te beperken.

Indien de Beneden Merwede gesloten is voor de ijsafvoer, brengt de Nieuwe Merwede al het ijs van de Waal op het Hollands Diep. Onder meer als gevolg van het feit, dat het water op deze brede wateren betrekkelijk zoet is, vertonen de Nieuwe Merwede, Hollands Diep en Haringvliet in strenge winters een grote ijsproduktie. Vaak is het zo, dat op de genoemde rivieren al ijsbezetting wordt waargenomen voordat op de bovenrivieren nog sprake is van ijsgang, soms is dit zelfs al een zware ijsbezetting. Van invloed hierbij is het feit, dat de stroomsnelheden in het algemeen klein en de kenteringen langdurig zijn (vooral in het meer stroomopwaarts gelegen gedeelte zoals de Merweden), terwijl op de uitgestrekte ondiepe gebieden en platen het water sterk wordt afgekoeld. Er ontstaan dan grote ijsvelden en bij de stroomkentering na HW (einde vloed, de vloed is zwakker dan de eb) kan de ijsbezetting zeer dicht worden. Door de lange duur van de kentering kan het ijs dan gaan samenvriezen en vastraken. In de tegenwoordige omstandigheden is het traject Werkendam-Gorinchem de plaats waar het ijs meestal het eerst vastraakt, vermoedelijk gedurende rijzend getij. Wanneer dit eenmaal is gebeurd, groeit het vast ijsdek zeer snel aan in stroomopwaartse richting met een snelheid van 15-25 km per dag.

Dit vastraken van het ijs gaat gepaard met een stijging van de waterstanden in de rivieren van circa 2-2,5 m. Deze was wordt veroorzaakt door de plotselinge weerstandstoename van deze riviergedeelten door het ontstaan van het vaste ijs-

*) In 1964 opgesteld door de Waterloopkundige Afdeling van de Deltadienst.

dek waardoor de stroomsnelheden afnemen. Op zichzelf is dit geen zorgwekkend verschijnsel, mits het losraken van het ijs in dezelfde volgorde plaatsvindt als het vastraken, namelijk van beneden naar boven. Is dit niet het geval en laat het ijs in het bovenstroomse gebied eerst los, dan wordt de extra wrijving plotseling weggenomen en nemen de stroomsnelheden en de debieten plaatselijk toe, terwijl benedenstrooms de weerstand nog steeds groot is. Hierdoor kunnen de waterstanden hoog oplopen en wel tot extreem hoge waarden als er in het benedenstroomse gebied barrières als bijvoorbeeld ijssdammen voorkomen.

Om dit gevaar te voorkomen wordt, zodra het ijs is gaan vastzitten op de Waal, begonnen het ijs kunstmatig van beneden af te breken en af te voeren naar zee en de aanwezige ijssdammen op te ruimen. Beginnend bij Moerdijk wordt in stroomopwaartse richting gebroken op het Hollands Diep, Nieuwe- en Boven Merwede en Waal, om een zo hoog mogelijk gelegen punt te bereiken bij het invallen van de dooi, opdat indien het losbreken van het ijs bovenstrooms mocht beginnen het benedengedeelte van de rivieren reeds zoveel mogelijk ijsvrij te hebben.

De afvoer van het gebroken ijs levert thans, indien het de Moerdijkbruggen gepasseerd is, geen buitengewone moeilijkheden op. Uit de waarnemingen van de ijsbeweging met behulp van gekleurde ijsschotsen is vast komen te staan, dat onder invloed van de bij vorst heersende Noord-Oosten wind meer dan 70% van het door het Hollands Diep aangevoerde ijs (lokaal gevormd en van de bovenrivieren) door het Volkerak wordt afgevoerd, waarna het zich verspreidt over de brede wateren van het Zuidelijk Deltagebied, die een relatief hoog zoutgehalte hebben. Ondanks het feit, dat bij lage rivierafvoeren, hetgeen doorgaans bij ijsgang het geval is, het Volkerak een vloedoverschot heeft, dat het eboverschot van het Haringvliet nog versterkt, wordt door het Haringvliet vrijwel geen ijs naar zee afgevoerd. Uit bepalingen van het zoutgehalte van het in het Haringvliet aangetroffen ijs is afgeleid, dat slechts minder dan 15% van dit ijs op het traject Hollands Diep-Bovenrivieren gevormd kan zijn. Slechts bij Zuidwestelijke winden aan het einde van de vorstperiode en begin van de dooi verdwijnen grotere hoeveelheden ijs uit het Haringvliet naar zee.

Tijdens de winter van 1962/63 is mede door de bouw van de pijlers van de brug bij Numansdorp een tijd lang het Haringvliet ten oosten van Tiengemetten geheel voor de ijsafvoer versperd geweest, zodat toen al het ijs door het Volkerak is afgevoerd.

De uitvoering van de werken voor de Noordelijke Voorhaven van de Volkeraksluizen heeft een verplaatsing van de geulas en aanzandingen tot gevolg gehad, waardoor de ingang van het Hellegat ongunstiger is komen te liggen voor de ijsafvoer. In verband hiermede en door de voltooiing van de brug bij Numansdorp is het niet onmogelijk, dat reedsthans stagnaties in de ijsafvoer ook op het traject Willemstad-Moerdijk op kunnen gaan treden.

Naast het hierboven geschetste ijsbreken ten behoeve van de waterafvoer, hetgeen zich uitstrekt over de gehele normaalbreedte van de rivier, wordt onder auspiciën van de plaatselijke ijsbreekcomités (i.c. comité Rotterdam) ijs gebroken in verband met het in stand houden van de scheepvaartverbindingen. Dit breken beperkt zich tot het open houden van een vaargeul. Tot nu toe is de meeste urgentie verleend aan de verbindingen van Rotterdam met Utrecht - Amsterdam via Lek - Amsterdam Rijnkanaal en van Rotterdam met 's-Hertogenbosch via Noord, Kil, Hollands Diep, Amer, etc. Gedurende de winter van 1962-63 is dit ijsbreken met succes uitgevoerd. Door de toename van de zeescheepvaart naar Dordrecht komt echter steeds meer aandrang om ook de zeevaartweg naar Dordrecht open te houden door het breken van de Oude Maas. In de winter van 1962-63 is dit breken in verband met het streven de kwaliteit van het Rotterdamse Drinkwater op een zo hoog mogelijk peil te houden slechts toegestaan aan het einde van de vorstperiode nadat ook de Beneden Merwede open was gebroken. Anderzijds komt van de zijde van de binnenvaart het streven naar voren met de thans zo intensieve vaart met krachtige zelfvaarders op de Beneden Merwede en Waal zo lang mogelijk de scheepvaart doorgang te laten vinden. In de aanvang van de vorstperiode 1962-63 is dit geruime tijd gelukt zonder dat er van een gekoördineerde breekcampagne sprake was. Het breken op de Beneden Merwede past echter niet in het kader van de hierboven beschreven tactiek van ijsbreken.

IJstoestand en ijsbeweging na voltooiing van het Noordelijk Bekken

De afneming van de verticale getijbeweging, de stroomsnelheden en de waterdrift (vooral bij lage opperwaterafvoeren) doen het Haringvlietbekken het karakter van een getijrivier grotendeels verliezen wanneer de afsluitingswerken in het Haringvliet en Volkerak zullen zijn voltooid. Zoals in het voorgaande is vermeld, staat thans de drift op het Haringvliet sterk onder invloed van het vloedoverschot in het Volkerak, vooral bij kleine opperwaterafvoer is deze invloed sterk. Na de uitvoering van het Deltaplan verdwijnt dit effect evenals de

ijsafvoer door het Volkerak, die zoals gezegd ca. 70% van het totaal bedraagt. Dit zal mede met de verzoeting en het wegvallen van de invloed van het warmere zeewater ertoe leiden, dat het ijsbezwaar op het Haringvlietbekken zal toenemen, vooral wat betreft de ijsvorming, die thans reeds groot is.

Zou men tijdens een winterperiode het normale spuiprogramma van de Haringvliet-sluizen volgen (bij kleine opperwaterafvoeren zijn de sluizen het gehele getij dicht en bij grote afvoeren gedurende de eb geheel of gedeeltelijk open), dan kan men verwachten, dat reeds in relatief zwakke winters, wanneer de bovenrivieren nog geen of slechts weinig drijfijis afvoeren, op het Haringvlietbekken belangrijke ijsvorming op zal treden. Afhankelijk van de opperwaterafvoer zal dit ijs zich verder bovenstrooms uitstrekken. Bij lage afvoeren is het waarschijnlijk, dat dit tot op de Nieuwe Merwede het geval zal zijn. In dit gebied zal de ijstoestand dan grote overeenkomst vertonen met de situatie ten zuiden van de Volkerakdam. Het lijkt voorsnog niet uitgesloten, dat het breken van vaargeulen mogelijk zal zijn.

In strenge winters, wanneer de bovenrivieren ook grote hoeveelheden ijs afvoeren, gaan de hierboven genoemde factoren, die de ijsbeweging op het Haringvlietbekken bemoeilijken, een grotere rol spelen. In vergelijking tot de huidige toestand zal bij een vrijwel gelijkblijvende aanvoer van de bovenrivieren de ijsproduktie in het benedenrivierengedeelte toenemen, terwijl de hoofdafvoerweg door het Volkerak is afgesloten.

Ijsbestrijdingsmogelijkheden na uitvoering Deltaplan

Als maatregel tegen het optreden van overlast door ijsgang kan dan in de eerste plaats overwogen worden bijzondere manipulaties met de Haringvlietsluizen uit te voeren om het ijs via deze sluizen af te voeren. Men kan hierbij overwegen de sluizen gedurende het gehele getij open te zetten en aldus de produktie van ijs weer terug te brengen op een niveau, dat vrijwel met het huidige overeenkomt. Wat betreft de afvoermogelijkheden van het ijs wordt echter de bestaande toestand in genen dele weer hersteld. Immers de afvoerweg van het ijs door het Volkerak blijft geblokkeerd en de drift op het Haringvliet, die bepaald werd door het Volkerak-vloedoverschot, is aanzienlijk kleiner dan thans. Het moet dan ook sterk betwijfeld worden of de afvoer via het Haringvliet en de sluizen evenwicht zal kunnen maken met de ijsproduktie en -aanvoer.

Versterking van de drift en dus ook van de afvoermogelijkheden is mogelijk door de sluizen alleen bij eb geheel te openen en bij vloed weer te sluiten. Dit heeft tot gevolg, dat bij lage afvoeren door het Haringvliet grotere hoeveelheden water worden geloosd dan door de bovenrivier wordt aangevoerd. Er ontstaat dan op de andere takken, die verbinding met zee hebben, zoals de Waterweg en de Oude Maas, een landwaarts gerichte drift. In onderstaande tabel wordt de grootte van deze drift aangegeven voor diverse spuiprogramma's bij een OLR afvoer van de bovenrivieren. Deze afvoer komt bij zware ijsgang frekvent voor.

opening Haringvliet sluizen	water drift in km per getij			
	Maassluis	Spijkenisse	Alblasserdam	Hellevoetsluis
iedere eb	- 8	- 16	- 16	+ 10
om de andere eb	- 5	- 6	- 7	+ 7
1 maal per 4 ebperioden	0	0	0	+ 5
iedere eb <u>en</u> vloed	+ 2	+ 0,5	+ 0,5	+ 5

Hieruit blijkt, dat het manipuleren bij lage afvoeren met de Haringvlietsluizen ter vergroting van de drift op het Haringvliet ongunstige konsekventies heeft voor de stromingstoestand op de andere takken. Als men op het Haringvliet enige winst wil hebben (vgl. toestand met geheel geopende sluizen), dan heeft dit direkt tot gevolg, dat het zeewater met een grote snelheid ca. 80 km per week landinwaarts dringt en dat dus de zoutgehalten bij Dordrecht reeds na enkele dagen en in het gehele benedenriviereengebied binnen een week tot zeer hoge waarden (10.000 mg/l of meer) op zullen zijn gelopen. Bovendien zal de ijsbezetting door het optreden van de landinwaartse driftstroom in de omgeving van Dordrecht zeer zwaar worden en de scheepvaart ernstig belemmerd.

Alhoewel het onderzoek naar de mogelijkheden van ijsafvoer door het Haringvliet nog niet is afgesloten blijkt wel al reeds, dat er een grote kans bestaat, dat langs deze weg niet voldoende afvoerkapaciteit aanwezig zal zijn om de aanvoer en lokale produktie te verwerken.

Uit het voorgaande in de vorige paragraaf is gebleken, dat de lokale ijsproduktie een grote bijdrage levert tot de te verwerken ijsstroom. Ter verbetering

van de ijsafvoermogelijkheden lijkt het derhalve verstandig te trachten om de lokale vorming van ijs zoveel mogelijk tegen te gaan. Een middel hiervoor kan worden gevonden in het zoveel mogelijk vermijden van het ontstaan van open watervlakten. Dit is een methode, die ook in het buitenland (Canada en Rusland) met succes wordt toegepast. In dit verband zijn de rivieren als Nieuwe Merwede, Amer, Hollands Diep en Haringvliet wel zeer ongunstig daar bij het ijsopruimen en ijsbreken grote wateroppervlakten ontstaan. Regularisering en vernauwing van deze wateren is slechts ten dele mogelijk, omdat de afmetingen van deze rivier-takken op de doorvoer van de extreme hoogwaterafvoeren naar de Haringvlietsluizen gedimensioneerd moeten worden. Voor het Hollands Diep moet bijvoorbeeld gedacht worden aan een normaalbreedte van de orde van 1000 m. Een bedijking van alle ondiepe gebieden buiten de afvoergeul over de volle lengte van het traject zal zeer kostbaar zijn en bovendien in verband met de noodzakelijke breedte van de geul slechts een beperkt resultaat hebben.

Betreffende de plaatselijke ijsvorming is het traject Beneden Merwede, Oude Maas, Waterweg gunstiger, daar hierop het karakter van de rivier (diepe geul met geringe zijdelingse ondiepten en kribvakken) vrijwel niet verandert tot bij zee. Bovendien treedt op dit traject ook bij lage afvoeren een zeewaartse waterdrift op doordat de Haringvlietsluizen dan geheel zijn gesloten. Het ijsbreken zou dan langs deze route kunnen geschieden, waarmede tevens de scheepvaartbelangen van Dordrecht en de binnenvaart naar de Rijn gediend zouden zijn. Daar de brede wateren geen functie meer hebben bij de ijsafvoer, zou het wenselijk zijn, dat deze zo snel mogelijk geheel dicht zouden vriezen, daar dan de ijsvorming minimaal is. Mogelijk kunnen dan ook hier evenals op het Zeeuwse Meer slechts nauwe vaargeulen voor de scheepvaart onderhouden worden. De te volgen procedure zou dan als volgt kunnen verlopen:

Reeds vroeg in de aanvang van een vorstperiode vormt zich ijs op het Haringvlietbekken, wat zich snel uitbreidt, vooral als de Waal licht drijfijs gaat aanvoeren, tot Werkendam. Gezien de ervaringen opgedaan in de winter 1962-63 is op het traject Beneden Merwede - Waal de scheepvaart met krachtige snellopende zelfvaarders in staat vrij lang het ijs in beweging te houden. Op het ogenblik, dat het vaste ijs van het Haringvlietbekken Werkendam heeft bereikt en de Waal een zware ijsbezetting heeft, zal op het traject Oude Maas - Beneden Merwede - Waal systematisch gebroken moeten gaan worden om een zo hoog mogelijk gelegen punt van de Waal te bereiken bij het invallen van de dooi. Op lastige punten,

zoals bijvoorbeeld Papendrecht, de bruggen van Dordrecht en Barendrecht zullen ijsbrekers ingezet moeten worden om de vlotte afvoer van ijs te verzekeren.

Bij de inval van de dooi kan het van de Bovenrivieren komende ijs en opperwater langs bovengenoemde weg afgevoerd worden, waarna bij het begin van de was op de bovenrivier vanaf de Haringvlietsluizen naar boven tot Werkendam gebroken zou kunnen worden, de ijsproductie is dan immers afgelopen. Door het opperwater, dat dan gewoonlijk af komt kan binnen de mogelijkheden van het spuiprogramma een driftstroom op het Haringvliet worden ingesteld om het ijs via de sluisen te lozen. Het te volgen programma zal sterk afhangen van het beschikbare opperwater. Een nader onderzoek zal nodig zijn o.m. om de gevolgen na te gaan van een hoge afvoer bij een nog met ijs bedekt Haringvliet. Voor dit spuien moeten wel maatregelen worden getroffen, opdat de schuiven beweegbaar zijn (dat wil zeggen de aanslagen ontdooid en luchtgaten in het ijs in de schuiven). Dit snel schoon spuien van het Haringvliet is wel van belang in verband met scheepvaartaspecten en het scheppen van de mogelijkheid tot het afvoeren van hoog opperwater.

Bij deze hierboven geschetste ijsbreektaktiek zal een groot deel van het succes afhangen van de mogelijkheden het ijs via Beneden Merwede en Oude Maas af te voeren. Het is nog niet bekend welke trajekten moeilijkheden kunnen geven bij de doorvoer van ijs en hoe deze trajekten eventueel verbeterd zouden moeten worden. In verband hiermee komt het wenselijk voor bij een komende ijswinter een proef te nemen, waarbij het ijsbreken wordt gekoncentreerd op het traject Oude Maas - Beneden Merwede om langs deze weg het van de bovenrivieren komende ijs af te voeren. De resultaten van deze proef zullen van groot belang zijn bij het beoordelen van deze methode in relatie tot de andere mogelijkheden, zoals bijvoorbeeld het spuien van ijs door de Haringvlietsluizen, waarvan wel reeds ervaringsgegevens bekend zijn, die een inzicht geven in de toekomstige toepassingmogelijkheden.

De stromingstoestand, zoals deze thans tijdens de proef op het traject op zal treden, zal ongunstiger zijn voor de ijsafvoer dan die welke in de toekomst te verwachten is. Thans komen grote verschillen voor tussen de drif op de Beneden Merwede, die hoger is dan in de Oude Maas. Dit zal later niet meer het geval zijn.

In verband hiermede en met het experimentele karakter van de voorgestelde breek-taktiek in een komende ijswinter lijkt het echter wel wenselijk ook ijsbrekers te stationeren te Moerdijk en de Kil bevaarbaar te houden opdat, indien de proefneming mislukt of andere problemen optreden, snel weer overgeschakeld kan worden op de traditionele ijsbreektaktiek.

delft hydraulics laboratory p.o. box 177 delft