rijkowsterstaat dion: Erstijdowsteren biblioarnak grenociersweg 31 -4338 PO Imidaelburg

# aantasting van dwarsprofielen in vaarwegen Schelde-Rijnverbinding

tekst en foto's

verslag modelonderzoek

M 1115 deel IA

december 1974

# KORTE INHOUDSOPGAVE

DEEL IA: TEKST EN FOTO'S

# SYMBOLEN

- 1 Inleiding en samenvatting
- 2 Bestaande en in de toekomst te verwachten binnenschepen, en keuze van de modelboten
- 3 Model
- 4 Theoretische grondslagen
- 5 Onderzoek naar de stabiliteit van de voorgestelde stortsteen
- 6 Watersnelheden en waterspiegelveranderingen boven het onverdedigde talud~ gedeelte
- 7 Watersnelheden en waterspiegelveranderingen boven de slikvelden
- 8 Nabeschouwing en enige resultaten van onderzoek uit de literatuur

# LITERATUUR

FOTO'S 1 t/m 14

DEEL IB: FIGUREN, TABELLEN en AANHANGSELS

Lijst van figuren Lijst van tabellen Lijst van aanhangsels Figuren 1...64 Tabellen 1...16 Aanhangsels 1...3

# INHOUD

		biz.
1	Inleiding en samenvatting	1
1.1	Inleiding	1
1.2	Samenvatting van het onderzoek	1
1.3	Beperkingen van het onderzoek	5
2	Bestaande en in de toekomst te verwachten binnenschepen, en keuze	
_	van de modelboten	6
2.1	Inleiding	6
2.2	Duwvaart	6
2.2.1	Duwbakken	6
2.2.2	Afmetingen van duweenheden	7
2.2.3	Duwboten	8
2.2.4	Lash-bakken	9
2.2.5	Duweenheden bij het modelonderzoek	10
2.3	Sleepschepen, opduwers en zeilschepen	10
2.4	Grote motorschepen	11
2.5	Containerschepen en passagiersschepen	13
2.6	Kustvaartuigen	13
2.7	Kleine motorschepen en motorboten	14
3	Model	15
3.1	Schalen	15
3.2	Inrichting en randvoorwaarden	17
3.3	De ziazaa-overlaatkleppen	19
3.4	De taludverdediging	22
3.5	De modelschenen	23
3.6		24
37	Weergeve van de schade aan de taludverdediging	25
5.7		
4	Theoretische grondslagen	26
4.1	Scheepvaart op onbeperkt water	26
4.2	Scheepvaart op water met beperkte diepte en onbeperkte breedte	27
4.3	Scheepvaart op water met beperkte breedte en diepte	<b>2</b> 8
4.4	Model van de Schelde-Rijnverbinding	29

		blz
5	Onderzoek naar de stabiliteit van de voorgestelde stortsteen	30
5.1	Proeven met kleine modelboten	30
5.1.1	Proef met de "Bart Christiaan"	30
5.1.2	Proeven met de "ir. F. Wassing"	30
5.1.3	Proeven met de "Rixt"	31
5.1.4	Slotopmerkingen en conclusies	32
5.2	Proeven met een Rijn-Hernekanaalschip en de duwboot "Vulcaan I"	33
5.2.1	Overzicht	33
5.2.2	Belasting van de taludverdediging door de schroefstraal	34
5.2.3	Geladen tegenover ongeladen schip	35
5.2.4	Invloed van het gedeeltelijk slepen van modelboten	36
5.2.5	Invloed van debieten door het kanaal	37
5.2.6	Invloed van de plaats in het dwarsprofiel	38
5.2.7	Invloed van de waterstand in het kanaal	38
5.2.8	Invloed van roer- en drifthoeken	39
5.2.9	Invloed van de breedte van de slikvelden	40
5.2.10	Samenvatting van de invloed van diverse factoren op de schade aan	
	de voorgestelde taludverdediging	40
5.2.11	Vergelijking tussen Rijn-Hernekanaalschip en duwboot "Vulcaan I" met	
	1 Europa-i bak	42
5.2.12	Samenvatting en enige conclusies	43
5.3	Proeven met de duwboot "Superbrousse"	45
5.4	Inhaal - en passeermanoeuvres	45
5.4.1	Tegemoetkomende duweenheden	45
5.4.2	Rijn-Hernekanaalschip haalt duweenheid in en omgekeerd	46
5.4.3	Inhalen van twee duweenheden	46
5.4.4	Slotopmerkingen	47
5.5	"Kribben" op de slikvelden	47
5.6	Invloed van de vorm en het stuksgewicht van de stortsteen	48
5.7	Verdeling van de schade over het talud en verplaatsingsrichtingen van	
	de stortsteen	49
6	Watersnelheden en waterspiegelveranderingen boven het onverdedigde	
	taludgedeelte	51
6.1	Inleiding	51
6.2	Watersnelheid in richting en grootte	52
6.3	Geladen of ongeladen schip	53
6.4	Zelfvarend en gesleept schip	54

ł

		blz.
6.5	Invloed van debieten door het kanaal	54
6.6	Invloed van de plaats in het dwarsprofiel	54
6.7	Invloed van de waterstand in het kanaal	55
6.8	Invloed van roer- en drifthoeken	55
6.9	Samenvatting van de verschillende invloeden	56
6.10	Belangrijkste resultaten en conclusies	58
7	Watersnelheden en waterspiegelveranderingen boven de slikvelden	60
8	Nabeschouwing en enige resultaten van onderzoek uit de literatuur	61
LITERATI	JUR	
FOTO'S	114	
TABELLE	N 116, zie deel IB	
FIGUREN 164, zie deel IB		

AANHANGSELS 1...3, zie deel | B

# FOTO'S

- 1 Overzicht model
- 2 Zigzag-overlaatkleppen
- 3 Overzicht onderzochte stortsteen
- 4 Overzicht kleine modelschepen
- 5 Rijn-Hernekanaalschip
- 6 Overzicht duweenheden
- 7 Aanval door de schroefstraal van de duwboot "Vulcaan I"
- 8...12 Aanval op het talud door de hekgolf
- 13 Oplopen van een Rijn-Hernekanaalschip door een duweenheid
- 14 Passeren van twee duweenheden

A <sub>m</sub>	grootspantoppervlak schip (m <sup>2</sup> )
B	kanaalbreedte op de waterspiegel (m)
В	werkzame breedte overlaat (m)
Ċ,	constante (algemeen)(dimensieloos)
c	overlaatconstante (dimensieloos)
c	voorplantingssnelheid golven (m/s)
F	natte doorsnede kanaal (m <sup>2</sup> )
g	versnelling van de zwaartekracht (m/s <sup>2</sup> )
Н	energiehoogte (m)
н,н	plaatsen van het schip in het dwarsprofiel (zie figuur 29)(dimensieloos)
h	waterdiepte (m)
h <b>'</b>	virtuele waterdiepte volgens Schijf (= F/B)(m)
h	waterdiepte boven kruin overlaat (m)
L	scheepslengte (m)
M,M'	plaatsen van het schip in het dwarsprofiel (zie figuur 29)(dimensieloos)
n <sub>K</sub>	schaalfactor van de krachtenschaal (dimensieloos)
n	schaalfactor van de lengteschaal (dimensieloos)
Q <sub>m</sub>	debiet door het model (m <sup>3</sup> /s)
Q <sub>max</sub>	maximaal af te voeren hoeveelheid water door het kanaal naast een
	schip (m <sup>3</sup> /s)
್ಧ	overstortdebiet korte overlaat (m <sup>3</sup> /s)
ReL	Reynoldsgetal, betrokken op de scheepslengte (dimensieloos)
S	schadégetal (zie paragraaf 3.7)
Т	plaats van het schip in het dwarsprofiel (zie figuur 29)(dimensieloos)
∨ <sub>s</sub>	scheepssnelheid (m/s)
v	watersnelheid in model (m/s)
z	waterspiegeldaling naast schip (m)
Δh <sub>m</sub>	extra waterdiepte in model door translatiegolf (m)
$\Delta h_{t}$	extra waterdiepte in model door teruggekaatste translatiegolf (m)
ΔQ <sub>m</sub>	extra debiet door model door translatiegolf (m <sup>3</sup> /s)
ΔQt	door overlaat teruggekaatst debiet door model (m <sup>3</sup> /s)
λ	golflengte (m)
V	kinematische viscositeit (m <sup>2</sup> /s)

.

# AANTASTING VAN DWARSPROFIELEN IN VAARWEGEN

# SCHELDE-RIJNVERBINDING

# 1 Inleiding en samenvatting

## 1.1 Inleiding

De beschermingsconstructies, die veelal zijn aangebracht langs de oevers en op de onderwatertaluds van de Nederlandse vaarwegen, worden onder meer belast door de waterbeweging onder invloed van scheepvaart. De eroderende werking van deze waterbeweging blijkt in de praktijk vaak groter te zijn dan werd verwacht.

In een brief aan de Rijkswaterstaat d.d. 3 april 1970 heeft het Waterloopkundig Laboratorium aangeboden een modelonderzoek uit te voeren naar de door de scheepvaart veroorzaakte waterbeweging en de invloed van deze waterbeweging op verschillende beschermingsconstructies.

Mede in verband met de aanleg van de oevervoorzieningen voor de Schelde-Rijnverbinding werd door de Waterloopkundige Afdeling van de Deltadienst besloten dit onderzoek te laten verrichten. Deze opdracht werd mondeling verleend tijdens de bespreking op 6 oktober 1970 in het Laboratorium De Voorst. Het eerste deel van het onderzoek moest hierbij gericht zijn op de stabiliteit van de stortsteen die zou worden toegepast op de taluds in het kanaalgedeelte door de Eendracht (zie figuren 1...4). Daarnaast diende aandacht te worden besteed aan het op de slikvelden aanwezige materiaal, dat ten gevolge van passerende schepen in suspensie zou kunnen worden gebracht en zich in de vaargeul zou kunnen afzetten.

Het eerste deel van het onderzoek, dat wordt verricht in het Laboratorium De Voorst, vond plaats van april 1971 (na het gereedkomen van het model) tot april 1972. Het onderzoek stond onder leiding van ir. E.J. van de Kaa, die tevens dit verslag samenstelde.

# 1.2 Samenvatting van het onderzoek

In het model, schaal 1:25, werd met verschillende scheepstypen (duweenheden, Rijn-Hernekanaalschepen en kleine vaartuigen) langs de op schaal nagebouwde taludverdediging (zinkstuk met stortsteen) gevaren. De schepen werden daarbij in zijdelingse richting vastgehouden en soms aangesleept. Naast de door de schepen opgewekte waterbeweging (golven, waterspiegeldaling, retourstroom) werden vooral de verplaatsingen van de stortstenen gemeten. Als randvoorwaarden zijn, naast de reeds genoemde scheepstypen, gevariëerd: de vaarsnelheid, het toerental van de schroeven, de diepgang, de afstand tot de kanaalas, de roer- en drifthoek, de verkeerssituatie (inhaal- en passeermanoeuvres), de waterstand, de grootte van de getijstroom, de vorm en het stuksgewicht van de stortsteen, en de breedte van de slikvelden (al dan niet met kribben). De belangrijkste conclusies voor de toe te passen taludverdediging in de Schelde-Rijnverbinding worden hieronder kort weergegeven.

Nadat de invloed van het getij in de Schelde-Rijnverbinding zal zijn verdwenen, valt directe schade aan de voorgestelde taludverdediging (400 kg/m<sup>2</sup> stortsteen 50/200 op 200 kg/m<sup>2</sup> stortsteen 10/80) slechts onder extreme omstandigheden te verwachten. Bij het onderzoekingsvaartuig de "Rixt" werd een begin van schade aan deze stortsteen geconstateerd wanneer het vaartuig bij een waterstand N.A.P., met een motorvermogen van meer dan 500 pk met zijn zijkant langs de teen van het talud voer. Pas bij een motorvermogen van ca. 1000 pk werd enige schade van betekenis gevonden (gemiddeld 1 verplaatste steen op 20 m taludverdediging geconstateerd na 1 scheepspassage). Onder dezelfde omstandigheden veroorzaakte een Rijn-Hernekanaalschip met een vermogen van 800 pk geen schade aan deze taludverdediging. Pas bij aanslepen tot een snelheid, die zelfvarend bij een circa tweemaal zo hoog motorvermogen zou worden bereikt, trad een begin van schade op aan de taludverdediging. Een duweenheid met 4 geladen Europa-II bakken kan onder deze omstandigheden wel schade aan de taludverdediging veroorzaken, wanneer het vermogen van de duwboot 3000 à 4000 pk is. Bij vermogens van 5000 a 6000 pk werd aanzienlijk hogere schade geconstateerd, terwijl zelfs in het midden van het kanaal varende duweenheden dan een begin van schade aan de taludverdediging veroorzaakten.

In de periode, waarin de Scheide-Rijnverbinding nog in open verbinding met de zee staat, is de kans op directe schade aan de bovenomschreven taludverdediging veel groter. De schade, die het onderzoekingsvaartuig de "Rixt" veroorzaakt aan stortsteen 50/200 is – onder overigens dezelfde omstandigheden als in de vorige alinea – bij een waterstand van N.A.P. – 2 m ongeveer tweemaal zo groot, terwijl reeds bij een motorvermogen kleiner dan 500 pk een begin van schade optreedt. Het Rijn-Hernekangalschip de "Adriaan" kon al een begin van schade aan de taludverdediging veroorzaken bij een motorvermogen van 800 pk, wanneer het met de zijkant langs de teen van het talud voer, bij een waterstand van N.A.P. - 2 m (vooral als het schip stroomaf voer). Hoewel onder deze omstandigheden niet met duweenheden met motorvermogens van de duwboten boven 2000 pk werd gevaren, kan uit de metingen met de duwboot "Vulcaan I" worden afgeleid dat ook deze grote duweenheden bij lagere waterstanden en stroomafwaarts varen meer en eerder schade zullen veroorzaken dan bij een waterstand van N.A.P. en zonder debieten door het kanaal. Bij waterstanden boven N.A.P. is de kans op schade aan de taludverdediging overigens zeer klein, terwijl de aanwezigheid van onder water staande slikvelden naast het kanaal een gunstige invloed op de schade lijkt te hebben.

Wordt in plaats van de voorgestelde stortsteen een veel minder zware taludverdediging toegepast, bijvoorbeeld van stortsteen 10/50, dan neemt de scheepssnelheid, respectievelijk het motorvermogen, waarbij schade aan de taludverdediging begint op te treden af. Bij gelijke motorvermogens is de geconstateerde schade aan stortsteen 10/50 uiteraard ook steeds groter dan aan stortsteen 50/200. Daardoor is de kans op schade aan stortsteen 10/50 veel groter dan bij gebruik van stortsteen 50/200. Tussen stortsteen 50/200 (porfier) en de onderzochte stortsteen 50/200 met wat meer afgeronde vormgeving (grind) werden geen verschillen van betekenis in de schade geconstateerd.

Modelproeven met inhaal- en passeermanoeuvres wekten niet de indruk, dat bij dergelijke manoeuvres meer schade aan de taludverdediging zou worden aangericht dan door alleen langsvarende schepen.

Aan de op de slikvelden liggende "kribben" van 400 kg/m<sup>2</sup> stortsteen 50/200 op een onderlaag van 200 kg/m<sup>2</sup> stortsteen 10/80 (breedte kribben 10 m, hoogte ca. 0,6 m, zie figuur 2) werd ondanks herhaalde proeven geen schade geconstateerd.

Wanneer schade aan de stortsteen werd geconstateerd, bleek in alle gevallen – onafhankelijk van de vraag of stroomop, stroomaf of zonder stroom werd gevaren – dat de meeste optredende verplaatsingen evenwijdig aan de kanaalas en in de vaar– richting van het schip optraden. Daarnaast werd een deel van de stenen in de richting van de kanaalas verplaatst, min of meer schuin langs het talud naar be– neden. In de overige richtingen traden slechts weinig verplaatsingen cp. De schade trad voornamelijk in een zone rond en direct onder de waterspiegel op. Geen schade van betekenis werd geconstateerd in vakken, die in hun geheel meer dan 0,5 m boven of meer dan 2 a 2,5 m onder de (ongestoorde) waterspiegel lagen. Duweenheden, met name met diepgeladen duwbakken, veroorzaakten een groter deel van de totale schade op een diepte van meer dan 1 m onder de (ongestoorde) waterspiegel dan de kleinere schepen.

Wanneer eenmaal schade werd geconstateerd, kon het aantal verplaatste stenen reeds bij een geringe verhoging van de scheepssnelheid sterk toenemen. Daar in die gevallen de scheepssnelheid meestal niet ver van de grenssnelheid aflag, is voor een verhoging daarvan wel een sterke verhoging van het motorvermogen nodig. Een verhoging van de snelheid met b.v. 0,5 km/h kan weliswaar een verdubbeling of verdrievoudiging van de schade veroorzaken, maar vaak zal daarvoor ook ongeveer een verdubbeling van het motorvermogen nodig zijn.

De voorgestelde taludverdediging van stortsteen werd in het model aangebracht tot een diepte van N.A.P. - 4,50 m. Daaronder zou van N.A.P. - 4,50 m tot N.A.P. - 6 m het talud onverdedigd blijven. Op 0,4 m boven dit talud en 5 m uit de teen van het talud zijn watersnelheden gemeten. Alleen al de getijstroom gaf daarbij watersnelheden tot 1 m/s (waterstand N.A.P., kanaaldebiet 1090 m<sup>3</sup>/s) en 1,2 m/s (waterstand N.A.P. – 2 m, kanaaldebiet 815 m<sup>3</sup>/s). Tesamen met scheepvaart (normale vaarpositie, motorschepen en duweenheden met vermogens van de duwboten tot ca. 2000 pk) werden snelheden van 1,5 tot 2,0 m/s gemeten. Onder ongunstige omstandigheden (lage waterstand en schepen dicht langs het talud) werden snelheden tot 2,5 m/s gemeten. Duweenheden, waarvan de duwboot een zeer groot vermogen heeft (ca. 7000 pk) konden, zelfs bij een waterstand van N.A.P., varend in een normale vaarpositie en geen debieten door het kanaal, watersnelheden tot 2 m/s veroorzaken. Motorschepen met vermogens van ca. 1000 pk kunnen onder die omstandigheden (die optreden nadat de verbinding met de zee is verbroken) snelheden tot 0,8 à 1,0 m/s vercorzaken. Varen de schepen met de zijkant langs de teen van het talud, dan zijn bij die schepen watersnelheden tot 1,5 m/s mogelijk.

Ook de watersnelheden boven de slikvelden zijn het ongunstigst in de periode, waarin de Oosterschelde nog niet gesloten is. In het model werden snelheden tot ca. 1,1 m/s gemeten bij het langsvaren van een duweenheid met 4 geladen Europa-II bakken (diepgang 3,30 m). Na de afsluiting van de Oosterschelde zullen deze snelheden waarschijnlijk tot ca. 0,8 m/s afnemen. Het betreft hier de hoogst gemeten snelheden boven vlakke bermen met constante breedte.

# 1.3 Beperkingen van het onderzoek

Het onderzoek naar de stabiliteit van de stortsteen vond plaats in een model met betonnen bodem en taluds, waarop de te onderzoeken constructie was aangebracht. Daardoor was het niet mogelijk de drukken in de ondergrond op de juiste wijze weer te geven. Ook erosie van bodemmateriaal onder de constructie of op het onbeschermde taludgedeelte nabij de teen van het talud kon in het model niet optreden. Deze verschijnselen kunnen echter wel een grote rol spelen bij het al dan niet ontstaan van schade aan de taludverdediging.

De afmetingen van de stortsteen op modelschaal waren zodanig ("diameters" van 1 à 2 cm) dat de aanval door stromend water in het diagram van Shields [19]door een punt op het horizontale deel van de kromme kan worden weergegeven. Dit wil zeggen, dat de aanval op de stortsteen door stromend water op correcte wijze wordt aangegeven. Voor de aanval door de (zeer turbulente) hekgolf kan niet met zekerheid gezegd worden, dat deze in het model juist wordt weergegeven (dit ondermeer voor wat de mate van turbulentie, de hoeveelheid ingesloten lucht en het punt van breken betreft).

De wrijvingsweerstand op het schip kon door de invloed van de schaalwetten volgens Reynolds niet op de juiste wijze worden weergegeven. Door de daarvoor gekozen oplossing – een verhoging van het schroeftoerental – is de schroefstraal sterker weergegeven dan hij in het prototype zal zijn. Ook de volgstroom achter het schip zal daardoor groter kunnen zijn dan overeenkomt met de werkelijkheid.

Herhaaldelijk kon worden geconstateerd, dat de schade aan de taludverdediging goed reproduceerbaar was. Afgezien van de hierboven genoemde schaalproblemen is de in de geconstateerde schade aan de stortsteen optredende marge inherent aan stabiliteitsonderzoek.

Rekening houdend met de in deze paragraaf opgesomde beperkingen geven de resultaten van het onderzoek een goede indruk, onder welke omstandigheden schade aan de taludverdediging in de Schelde-Rijnverbinding zal kunnen optreden.

# 2 Bestaande en in de toekomst te verwachten binnenschepen, en keuze van de modelboten

# 2.1 Inleiding

De laatste jaren heeft er op het gebied van de zeescheepvaart een grote ontwikkeling plaatsgevonden. Supertankers en snelle containerschepen zijn daar wel de meest spectaculaire voorbeelden van. Maar ook in de binnenscheepvaart heeft de ontwikkeling niet stil gestaan. Die nieuwe ontwikkelingen zijn van groot belang voor het onderhoud en de nieuwbouw van binnenscheepvaartwegen. In verband daarmee is een inventarisatie gemaakt van de bestaande binnenvaartschepen, die in Nederland geregistreerd staan [14, 23, 26] alsmede van de schepen die thans in aanbouw zijn in Nederland en West-Duitsland [1, 2, 11, 20, 21]. Daarnaast is de scheepvaartbeweging in een tweetal telpunten (Kanaal door Zuid-Beveland en de Rijn bij Lobith) geanalyseerd. Tenslotte is een aantal bij de binnenvaart betrokkenen (scheepsbouwers, reders, scheepsbouwkundige proefstations) geraadpleegd over hun toekomstverwachtingen voor de binnenvaart op de Rijn en de aansluitende kanaalsystemen in het begin van de jaren tachtig. [6, 8, 12, 15, 28].

#### 2.2 Duwvaart

# 2,2,1 Duwbakken

Sinds in 1956 de eerste duwboot op de Rijn verscheen, heeft de duwvaart al een hele ontwikkeling meegemaakt. Daarbij is vooral de standaardisatie van de duwbakken goed van de grond gekomen. Er bestaan momenteel 2 standaardafmetingen voor wat betreft lengte x breedte van de bakken: de Europa-I bak  $(70 \times 9,5 \text{ m}^2)$  en de Europa-II bak  $(76,5 \times 11,4 \text{ m}^2)$ . Zoals uit figuur 5 blijkt, waren op 1 januari 1972 beide typen ongeveer in gelijke aantallen in Nederland geregistreerd, terwijl andere afmetingen gering in aantal waren. De meeste bakken hadden een diepgang van 3 à 4 m.

Bij de geraadpleegde deskundigen heerste algemeen de mening, dat de grote meerderheid van de duwbakken in de toekomst zal bestaan uit het type Europa-II, met een maximale diepgang van ongeveer 4 m. Een grotere diepgang wordt niet verwacht omdat het aantal dagen, dat zo'n diepgang (met het oog op de Rijnafvoeren) ten volle kan worden benut, te beperkt zou worden. In verband met de wens de snelheid zoveel mogelijk op te voeren wordt vooral het type met extra verhoogde boeg verwacht.

Van de duwbakken die amstreeks 1970 – 1972 in West-Duitsland en Nederland in aanbouw waren (bovenste helft figuur 6) bestond veruit het grootste deel uit het type Europa-II, waarbij de diepgang tussen 3 en 4 m was (de bakken in de diepgangklasse van 4,0 tot 4,49 m hadden alle een diepgang van 4,0 m). Slechts één duwbak met grotere afmetingen (85 x 11,2 x 3 m<sup>3</sup>) was in deze periode in aanbouw. De Nederlandse werf "De Biesbosch" heeft een complete bakkenfabriek, waar practisch uitsluitend Europa-II bakken (met verhoogde boeg) worden vervaardigd.

#### 2.2.2 Afmetingen van duweenheden

De samenstelling van duweenheden hangt sterk af van de afmetingen van de vaarweg [6, 12]. Vooral de sluisafmetingen hebben daarop invloed. De volgende combinaties zijn momenteel denkbaar:

- a) een kleine duwboot met één duwbak voor kleinere kanalen met korte sluizen (bijvoorbeeld het huidige Mittellandkanaal); de duwbak kan - afhankelijk van de kanaalafmetingen of van voorschriften - op kleinere kanalen nog wel een Europa-I bak zijn.
- b) een middelgrote duwboot met twee bakken voor de wat grotere vaarwegen als de Moezel of de Rijn-Main-Donauverbinding.
- c) een grote duwboot met vier diepgeladen bakken (tot 4 m diepgang) of zes bakken (3 x 2 of 2 x 3) met een diepgang van ca. 3 m, voor het vervoer op de Rijn en de Nederlands duwvaartkanalen.
- d) een zeer grote duwboot met zes of negen (3 × 2, 2 × 3 of 3 × 3) bakken met grote diepgang (tot 4 m) voor het vervoer op de Rijn tot bijvoorbeeld Koblenz.

Op de Rijn geldt momenteel voor duweenheden een maximale lengte x breedte van 185 x 22,8 m<sup>2</sup>. Dat beperkt de afmetingen van de eenheden tot 2 x 2 duwbakken. Wei worden al enige tijd proeven genomen met de grotere eenheden, met 3 x 2 en 2 x 3 bakken en zelfs al soms met 3 x 3 bakken. Van deze eenheden kunnen alleen die met 3 x 2 bakken door de verschillende Nederlandse duwvaartsluizen (mits de lengte van de duwboten niet te groot wordt). Eenheden met 2 x 3 en 3 x 3 duwbakken zuilen daarom voor de sluisdoorgangen moeten worden ontbonden.

# 2.2.3 Duwboten

De vermogens van de duwboten zijn afgestemd op de verschillende afmetingen van duweenheden, zoals in de vorige paragraaf beschreven. Van standaardisatie in de afmetingen is nauwelijks sprake. De afmetingen worden voornamelijk bepaald door de vaarwegen met de daarin liggende sluizen.

Voor de kleinere kanalen, waarin duweenheden met 1 duwbak kunnen worden verwacht, wordt een kleine, korte duwboot (lengte 10 à 12 m, breedte ca. 6 m, diepgang ca. 1,6 m) met een vermogen van 500 à 600 pk en 1 of 2 schroeven verwacht.

In verband met de sluizen in de Moezel is de maximale lengte van duwboten, die op deze rivier 2 bakken achter elkaar willen transporteren, 19 m. Voor andere vaarwegen van dezelfde grootte-klasse (bijvoorbeeld de Rijn-Main-Donauverbinding) is meestal een lengte tot ca. 25 m mogelijk. De breedte van deze middelgrote duwboten zal 9 à 11,4 m kunnen zijn, de diepgang 1,5 à 1,65 m en het motorvermogen 1000 à 2000 pk, meestal te verdelen over twee schroeven.

Voor de vaart op de Rijn en de daarmee in verbinding staande duwvaartkanalen in Nederland (Hartelkanaal, en in de toekomst Schelde-Rijnverbinding en Amsterdam-Rijnkanaal) is momenteel vooral de duweenheid met 2 x 2 Europa-II bakken van belang. De motorvermogens van de daarbij gebruikte duwboten zijn voor de nieuwere duwboten 3000 a 4000 pk, verdeeld over 2 of 3 schroeven. Daarnaast zijn enige duwboten in aanbouw of in de vaart met vermogens van 4500 tot 5000 pk en 3 schroeven. Deze laatste boten zijn veelal gebouwd met de opzet, vier duwbakken met een diepgang van 4 m of 6 duwbakken met een geringere diepgang te transporteren. Begin 1974 was de duwboot met het grootste geinstalleerde motorvermogen de "Wiking", bestemd voor de vaart van Rotterdam op Mannheim. Het geinstalleerde vermogen was 6600 pk, verdeeld over 3 schroeven. De motoren zijn overigens voorlopig afgesteld op 5400 pk.

Wordt de vaart met 6, of zelfs 9, diep afgeladen duwbakken vrijgegeven dan kunnen meer duwboten met zeer grote vermogens worden verwacht. Gedacht wordt door deskundigen aan vermogens van 6000 à 7500 pk. Volgens Schäle [15] is voor het transport van 6 diep afgeladen Europa-II bakken de Rijn op een vermogen van 5000 pk gewenst, met een reserve van 1000 pk voor plotselinge manoeuvres. Voor de vaart op kanalen zou ca. 2500 pk voor het transport voldoende zijn. Evenmin als de andere geraadpleegde deskundigen durfde hij te stellen dat de bemanning zich aan dergelijke regels zou houden. Er moet dan ook met de mogelijkheid rekening worden gehouden dat het volle vermogen van de duwbakken voor het transport zal worden gebruikt.

Wanneer met een duweenheid met  $3 \times 2$  Europa-II bakken de sluizen bij Tiel en Wijk bij Duurstede gepasseerd moeten worden, kan de lengte van de duwboot niet meer dan 38 m bedragen. Daarbij kan de eenheid nog juist met de boeg op de aanwezige stopstreep voor de aanvaarconstructie liggen en kan tegelijk tussen achterkant duwboot en sluisdeur een reserve van 5 m worden gehandhaafd. Duweenheden met  $2 \times 3$  of  $3 \times 3$  duwbakken moeten overigens zonder meer voor het passeren van alle Nederlandse duwvaartsluizen ontkoppeld worden, daar de sluisbreedte nergens meer dan 24 m bedraagt. Overigens verwachtte geen van de geraadpleegde deskundigen voor duwboten lengten van meer dan 40 m.

De grote duwboten zullen naar verwachting wel steeds minimaal 2 x 2 duwbakken transporteren. Daarom is men voor de breedte slechts gebonden aan een maximum van 22,8 m. De meeste van deze boten hebben momenteel een breedte van 10 tot 14 m. De diepgang van deze grote duwboten wordt beperkt door de wens, ook bij geringe Rijnafvoer nog zo veel mogelijk havens aan te kunnen doen met gedeeltelijk afgeladen bakken. Liefst gaan de rederijen niet verder dan tot een diepgang van 1,6 a 1,7 m. Voor de duwboten met zeer grote vermogens is deze diepgang niet voldoende om dat vermogen via de schroeven af te geven. Voor 6000 a 7500 pk moet namelijk gedacht worden aan 3 schroeven met diameters van ongeveer 2,25 m (uit economische overwegingen komen duwboten met 4 schroeven volgens de deskundigen waarschijnlijk niet in aanmerking). Door het toepassen van schroeftunnels kan dan met een diepgang van ongeveer 1,85 m worden volstaan.

De verschillende bovengenoemde typen duwboten – met uitzondering van die met zeer groot vermogen – zijn alle terug te vinden in de onderste helft van figuur 6, waar een groot aantal duwboten dat in het begin van de jaren '70 in aanbouw was staat gerangschikt naar lengte-, breedte-, diepgang- en vermogensklasse.

# 2.2.4 Lash-bakken

Deze bakken – een soort van drijvende containers, die in hun geheel aan boord van zeeschepen kunnen worden gehesen – kunnen zonder veel bezwaar tot duweenheden worden samengesteld. Wel lijkt dan het toepassen van een speciaal boegelement aan de kop van de duweenheid raadzaam. Een andere mogelijkheid is een duweenheid, bestaande uit een duwboot met een aantal lash-bakken en daarvoor een of meer normale duwbakken. Voor het overige is er geen wezenlijk verschil met normale duweenheden met vergelijkbare afmetingen.

#### 2.2.5 Duweenheden bij het modelonderzoek

Vrijwel alle proeven in het model zijn uitgevoerd met duweenheden met  $2 \times 2$ Europa-II bakken. De diepgang van deze bakken was bij de meeste proeven 3,3 m. Daarnaast zijn enige proeven gedaan met een diepgang van de bakken van 4 m en met ongeladen bakken (diepgang ca. 1 m). Tenslotte zijn enige proeven gedaan met een duweenheid, bestaande uit een duwboot met 1 Europa-I bak (diepgang 2,5 m). Daarmee zijn de belangrijkste momenteel in gebruik zijnde duweenheden onderzocht. De duwboot waarmee de meeste proeven zijn uitgevoerd, was de "Vulcaan I". Deze duwboot heeft de afmetingen van een grote duwboot (lengte x breedte x diepgang 38 x 10 x 1,8 m<sup>3</sup>). Het motorvermogen is echter beperkt : maximaal konden vermogens tot ca. 2000 pk worden gesimuleerd.

Tegen het einde van het onderzoek naar de stabiliteit van de stortsteen voor de Scheide-Rijnverbinding kwam een duwboot ter beschikking, waarmee zeer grote vermogens – tot bijna 10.000 pk – konden worden gesimuleerd. Dat vermogen overtrof zelfs de meest extreme verwachtingen van de deskundigen. Hierdoor ontstond ook enig inzicht in de schade, die de in de toekomst te verwachten duweenheden zouden kunnen veroorzaken.

# 2.3 Sleepschepen, opduwers en zeilschepen

Zeilschepen ten behoeve van het goederenvervoer zijn vrijwel geheel verdwenen. Voor opduwers en zijschroefschepen geldt hetzelfde. Voorzover ze nog bestaan, nemen ze vrijwel geen van alle meer actief aan het goederenvervoer deel.

Hetzelfde geldt – in mindere mate – voor de sleepschepen. Uit figuur 7 blijkt, dat het aantal geregistreerde Nederlandse sleepschepen sinds 1963 enigszins is afgenomen. Die afname is veel sterker, als we ons beperken tot de vloot van sleepschepen, die actief aan het vervoer hebben deelgenomen. Het aantal duwbakken is in die periode maar weinig toegenomen. De omloopsnelheid van de duwbakken is echter zoveel hoger, dat op enige belangrijke telpunten (zie figuur 8) het aantal gepasseerde duwbakken dat van de sleepschepen in 1971/1972 reeds verre overtrof. En dat, terwijl in 1966 de sleepschepen nog verre in de meerderheid waren. Verwacht kan dan ook worden dat, behalve de zeilschepen, opduwers en zijschroefschepen, ook de sleepschepen praktisch zullen verdwijnen. De snelheid van deze schepen is verder in het algemeen dermate laag, dat ook uit dien hoofde in de toekomst nauwelijks gevaar voor de stabiliteit van dwarsprofielen in vaarwegen te duchten valt. Daarom is afgezien van modelonderzoek naar de aantasting van stortsteen door sleepschepen.

#### 2.4 Grote motorschepen

Van de binnenschepen, die op 1 januari 1973 in Nederland waren geregistreerd, bestand de meerderheid uit motorschepen (zie figuur 7). Daarbij waren de kleinere schepen met laadvermogens onder de 600 ton veruit in de meerderheid. Het totale aantal van deze schepen neemt sinds 1965 voortdurend af, terwijl het aantal schepen met 600 – 1000 ton en met meer dan 1000 ton laadvermogen geleidelijk toeneemt. Dezelfde ontwikkelingen gelden in veel sterkere mate voor de schepen, die actief aan het vervoer hebben deelgenomen: van de schepen met meer dan 1000 ton laadvermogen nam in 1973 bijna 100 °/o actief aan het vervoer deel, terwijl van de schepen met 20 – 100 ton laadvermogen nog geen 5 °/o deelnam.

Uit figuur 9 blijkt, dat slechts ca. tweehonderd schepen van de actief aan het vervoer deelnemende vloot een lengte van 85 m en meer hebben. Breedten van meer dan 10 m en diepgangen boven de 3 m komen eveneens weinig voor. Ongeveer 1000 schepen (van de actieve vloot van ca. 9000 schepen) hebben een lengte van 70 - 80 m, ongeveer 1500 een breedte van 8 tot 10 m en ongeveer 2500 een diepgang van 2,5 tot 3 m. Slechts ca. 900 schepen hebben een motorvermogen van meer dan 500 pk, ongeveer 800 schepen hebben een laadvermogen van 1000 tot 1500 ton. Het gemiddelde motorvermogen van de grotere motorschepen van de Nederlandse vloot is volgens figuur 10 in het laatste decennium nauwelijks toegenomen. Het gemiddelde motorvermogen voor motorschepen met meer dan 1000 ton laadvermogen was in 1973 ca. 740 pk.

Het scheepverkeer langs een tweetal belangrijke telpunten (Lobith en Hansweert) is weergegeven op figuur 8. Duidelijk blijkt daaruit de sterke toename van het aantal passerende motorschepen met 1000 – 1500, respectievelijk meer dan 1500 ton laadvermogen, gecombineerd met een absolute daling van het aantal passerende motorschepen met laadvermogens van minder dan 400 ton. De geraadpleegde deskundigen verwachten allen, dat de afmetingen en motorvermogens van de grote schepen op de Rijn zullen toenemen.

Men denkt aan maximale afmetingen van  $110 \times 11,4 \times 4 \text{ m}^3$ , waarbij een laadvermogen van circa 3750 ton mogelijk is. Daarnaast wordt verwacht dat een beperkt aantal grotere schepen, bijvoorbeeld verbouwde grote bakken, de Rijn zal gaan bevaren. De vormgeving van de boeg van de nieuwe schepen zou hetzelfde zijn als bij de duwbakken. Alleen het achterschip zal - in verband met motoren en schroeven - een andere vorm krijgen. Het motorvermogen van deze schepen zal zeer hoog kunnen zijn (1600 à 2500 pk), om ze in staat te stellen tegen de stroom op tevens een duwbak over de Rijn te transporteren. Voor de vaart op kleinere vaarwegen worden schepen met kleinere afmetingen, maar met vergelijkbare vormgeving en motorvermogens, verwacht.

Interessant zijn in dit verband de door "Cebosine" voorgestelde standaardmotorschepen voor de Nederlandse vloot. In principe bestaan de voorgestelde schepen uit een aantal gestandaardiseerde onderdelen, en wel een boeg, een aantal tussenmoten en een achterschip met motoren en schroeven. Daarbij is de boeg gelijk aan die van de duwbak. Ook het achterschip is eenvoudig van vormgeving, alleen zijn wel tunnels voor schroeven nodig. De onderbouw voor de motoren en ook de motoren zelf zijn voor een bepaald type schip gelijk. Deze schepen kunnen ook nog een duwbak meenemen. Het grootste standaardscheepstype is geschikt voor de Rijnvaart tot Bazel en heeft een laadvermogen van 3725 ton. De afmetingen zijn: lengte x breedte x (maximale) diepgang  $108,5 \times 11,40 \times 4,00 \text{ m}^3$ . Het vermogen is 2 x 800 pk, verdeeld over 2 motoren. Het is dus een 2-schroefs schip. Deze grote schepen zullen, evenals de duwboten, practisch continu varen. Daarnaast is er een kleiner standaardtype met 2025 ton laadvermogen dat naast de Rijn ook de vaarwegen van klasse IV (bijvoorbeeld het Rijn-Hernekanaal) zal kunnen bevaren. De afmetingen van dit type zijn 85 x 9,50 x 3,50 m<sup>3</sup>, met 2 schroeven en 2 motoren van 500 pk elk. Hierbij zal het gedeelte tussen boegstuk en achterschip uit gelijke moten met een lengte van 9 m bestaan, zodat dit type schip ook geleverd zal kunnen worden met een lengte van bijvoorbeeld 67 m.

Van de motorschepen, die in de jaren 1970-1972 op Westduitse werven in aanbouw of besteld waren (figuur 11) hadden de meesten een lengte van 80 - 85 m, een breedte van 9 - 10 m en een diepgang van 2,5 - 3 m. Het laadvermogen lag grotendeels tussen 1300 en 1500 ton en het motorvermogen tussen 1000 en 1100 pk. Slechts een tiental schepen hadden motorvermogens van meer dan 1500 pk. Op grond van deze gegevens, de bestaande vloot (zie figuren 7...10) en de toekomstverwachtingen, kan worden gesteld, dat in de komende jaren de grote motorschepen (meer dan 600 ton laadvermogen) de kleinere motorschepen steeds verder van de grote Nederlandse vaarwegen zullen verdringen. Daarbij zullen de meeste schepen een lengte van 90 m, een breedte van 10 m, een diepgang van 3 m en een motorvermogen van 1200 pk niet overschrijden. Daarnaast wordt een beperkt aantal grotere schepen voor de vaart op de Rijn en grote zijkanalen verwacht, waarbij in incidentele gevallen vermogens tot 3000 pk niet uitgesloten zijn.

Voor het onderzoek ten behoeve van de taludverdediging voor de Schelde-Rijnverbinding is gebruik gemaakt van een bestaand modelschip van het Rijn-Hernekanaaltype (80 x 9,5 x 2,6 m<sup>3</sup>, motorvermogen tot ca. 750 pk). De afmetingen van dit modelschip geven een redelijke afspiegeling van de bestaande vloot. Voor de toekomst moet vooral het maximale motorvermogen als aan de lage kant worden beschouwd. De vormgeving van de boeg is klassiek (zie figuur 21), maar er is tevens een proef gedaan met een duwboot met één duwbak, waarvan de boeg wel de bekende rechthoekige vorm heeft.

# 2.5 Containerschepen en passagiersschepen

Behalve voor speciale, toeristisch aantrekkelijke trajecten worden op de vaarwegen ten behoeve van de binnenvaart geen specifieke passagiersschepen verwacht.

Slechts één geraadpleegde scheepsbouwer had een ontwerp voor een specifiek containerschip voor de binnenvaart. Het is een katamaran. Voor de schade aan de vaarwegen lijkt dit scheepstype niet interessant.

Op grond van het bovenstaande zijn in het kader van dit onderzoek geen proeven met modellen van bovenstaande categorieën binnenschepen uitgevoerd.

# 2.6 Kustvaartuigen

Op de grote binnenscheepvaartwegen komen vanouds ook kustvaartuigen (coasters). In het algemeen blijft het aantal van deze schepen ten opzichte van dat van de binnenschepen gering. Een uitzondering vormen natuurlijk de kanalen, geschikt voor zeescheepvaart, zoals het kanaal van Gent naar Terneuzen, de Rotterdamse Waterweg en het Noordzeekanaal. Daarnaast komt relatief veel verkeer van kustvaartuigen voor (gegevens over 1968) op het Eemskanaal: ca. 2500 vaarten van kustvaartuigen (ongeveer 15  $^{\circ}$ /o van het totale aantal vaarbewegingen); de vaarweg Amsterdam-Lemmer-Groningen: ca. 1700 vaarten (<u>+</u> 6  $^{\circ}$ /o van het totaal); en het Amsterdam-Rijnkanaal: ca. 1500 vaarten (1 à 2  $^{\circ}$ /o van het totaal). In 1972 was het aantal vaarten op al deze vaarwegen meer dan gehalveerd.

In het algemeen kan men stellen dat ten opzichte van een binnenvaartuig met een vergelijkbaar laadvermogen een coaster een grote diepgang, kleine lengtebreedteverhouding en groot motorvermogen heeft. Begin 1967 had van de grootste coasters meer dan de helft een motorvermogen tussen 900 en 1200 pk. Overigens had minder dan 10 °/o van deze schepen vermogens boven 1300 pk.

Verwacht kan worden, dat de verschijnselen die bij de vaart van een coaster door een kanaal zullen optreden wat zullen afwijken van die bij binnenschepen. Het aantal kanalen waarop en de frequentie waarmee deze verschijnselen voorkomen is echter beperkt, zodat van onderzoek met modellen van coasters is afgezien.

# 2.7 Kleine motorschepen en motorboten

Van de ongeveer 10.000 in 1967 geregistreerde motorschepen had ongeveer de helft een lengte van minder dan 35 m. De gemiddelde breedte van deze schepen was ca. 5 m, het motorvermogen ongeveer 100 pk; slechts enige honderden schepen van deze categorie bereikten motorvermogens van omstreeks 200 pk. Gezien de kleine afmetingen en het geringe motorvermogen wordt van deze schepen geen schade aan de toegepaste taludverdediging van de Schelde-Rijnverbinding verwacht.

Het aantal recreatievaartuigen neemt de laatste jaren sterk toe, welke ontwikkeling waarschijnlijk in de toekomst wel zal doorgaan. De grotere kruisers kunnen wel vermogens tot circa 200 pk halen. Van de kleine coasters met een lengte tot ca. 35 m is het motorvermogen in het algemeen ook niet hoger dan 100 a 200 pk. Ook van deze categorieën schepen valt in de Scheide-Rijnverbinding geen schade te verwachten.

Kleine vaartuigen (lengte 20 a 35 m) die wel zeer grote vermogens kunnen hebben, zijn onder meer:

- onderzoekingsvaartuigen (500 1000 pk niet uitgesloten);
- viskotters (halverwege de jaren '60 nog vermogens van 450 à 600 pk voor nieuwbouwkotters, omstreeks 1973 vermogens van 1200 - 1500 pk voor de nieuwgebouwde schepen);

- sleepboten die zonder sleep varen (op 1-1-1973 hadden bijna 150 Nederlandse sleepboten een vermogen van meer dan 500 pk, het gemiddelde voor deze boten was 800 pk);
- duwboten, die alleen varen (op 1-1-1973 hadden 9 Nederlandse duwboten een vermogen van meer dan 1500 pk; vermogens tot meer dan 6000 pk zijn zelfs niet uitgesloten).

Bij het onderzoek naar de stabiliteit van de stortsteen voor de Schelde-Rijnverbinding is gebruik gemaakt van een tweetal schepen (de "ir. F. Wassing" en de "Bart Christaan") die model zouden kunnen staan voor een klein vrachtschip, respectievelijk een pleziervaartuig of patrouilleboot. Deze modelboten beschikten echter niet over eigen voortstuwing, zodat ze bij de proeven moesten worden gesleept. Tegen het einde van het onderzoek kwam een model van een onderzoekingsvaartuig (de "Rixt") ter beschikking, dat wel over eigen voortstuwing beschikte, en waarmee vermogens tot 1500 a 2000 pk kunnen worden gesimuleerd.

#### 3 Model

# 3.1 Schalen

De schaalfactor voor de lengteschaal bij dit onderzoek was 25. Volgens de schaalwetten van Froude volgt hieruit voor snelheid en tijd een schaalfactor 5, en voor het schroeftoerental 0,2. Daar de dichtheid voor model en prototype gelijk is, is de krachtenschaal gelijk aan die voor volumina, en wel 25<sup>3</sup>.

Door uit te gaan van de schaalwetten volgens Froude wordt de zwaartekracht op de juiste schaal weergegeven. Hetzelfde geldt voor die componenten van de scheepsweerstand, die door de zwaartekracht worden bepaald. Met name is dat de zogenaamde golfvormende weerstand (wave-making resistance). Tesamen met enige weerstandscomponenten van ondergeschikt belang vormt deze weerstand de restweerstand (residual resistance) van het schip. Daarnaast speelt de wrijvingsweerstand (frictional resistance) een belangrijke rol.

Deze laatste weerstandscomponent is onder meer afhankelijk van het Reynoldsgetal, betrokken op de scheepslengte:

$$Re_{L} = V_{s} L/v$$

waarin: V<sub>s</sub> = scheepssnelheid (m/s) L = scheepslengte (m) V = kinematische viscositeit (m<sup>2</sup>/s)

Het Reynoldsgetal is, bij toepassing van de schaalwetten volgens Froude, voor prototype en model verschillend. Daardoor wordt de wrijvingsweerstand niet op de juiste krachtenschaal ( $n_{K} = 25^{3}$ ) weergegeven. Als gevolg daarvan is de wrijvingsweerstand – en daarmee de totale weerstand – bij een bepaalde scheepssnelheid groter, dan uit overeenkomende prototype-omstandigheden bij toepassing van de schaalwetten volgens Froude zou volgen.

De door de scheepsschroeven geleverde schroefkrachten zorgen ervoor, dat het schip ondanks de weerstand vooruitkomt. Ook de waterbeweging rond de schroefbladen wordt door wrijvingseffecten beïnvloed. Zodoende is ook de schroefkracht niet geheel op Froude-schaal weer te geven.

Beide afwijkingen van de schaalwetten volgens Froude worden in aanhangsel 1 behandeld. Door het verhogen van het schroeftoerental met een empirisch bepaalde factor kan ervoor worden gezorgd, dat de scheepssnelheid toch op de juiste Froudeschaal wordt weergegeven. De wijze waarop die factor wordt bepaald, wordt eveneens in aanhangsel 1 beschreven.

Een gevolg van de extra hoge wrijvingsweerstand in het model is dat de hoeveelheid water, die in de grenslaag direct naast het schip met het schip meebeweegt, groter is dan in het prototype. De invloed hiervan is beperkt tot de directe omgeving van het schip. Alleen bij heel kleine modelschepen valt een meetbare beinvloeding van de scheepsgolven te verwachten.

Behalve de krachten, die door wrijvingsverschijnselen worden bepaald, is ook de oppervlaktespanning onderhevig aan schaalinvloeden. In aanhangsel 2 wordt de invloed daarvan op het onderzoek M 1115 uitgebreid behandeld. De conclusie daarbij is dat schaaleffecten die met de oppervlaktespanning samenhangen (beschreven in de schaalwetten volgens Weber) geen invloed van enige betekenis hebben op de in het voorliggende verslag beschreven verschijnselen.

# 3.2 Inrichting en randvoorwaarden

Het model was ondergebracht in een van de onderzoekhallen op het terrein van het Laboratorium De Voorst. Daarbij is in plaats van het gebogen tracé van de Schelde-Rijnverbinding een rechtlijnig tracé voor het model toegepast. De in breedte en hoogteligging variërende slikken zijn geschematiseerd tot vlakke bermen aan weerskanten van het kanaal met dezelfde breedte en hoogteligging (zie figuur 12 en foto 1).

De lengte van het aldus geschematiseerde kanaalgedeelte is 1920 m (prototype). De bodembreedte is 120 m en ligt op N.A.P. – 6 m. De taludhellingen van het kanaal zijn 1:4, de daarop aansluitende slikvelden zijn beiden 100 m breed en liggen op N.A.P.. Deze slikvelden worden aan de landzijde begrensd door taluds 1:1. Het model is uitgevoerd in beton. Op beide kanaaltaluds is een taludverdediging aangebracht (zie hiervoor verder paragraaf 3.4).

De watertoevoer naar het model geschiedt vanuit een hooggelegen reservoir, waar het water tot een constant niveau wordt opgepompt. Vanuit dit reservoir lopen naar het ene modeleinde - verder de bovenstroomse rand te noemen - 3 buizen, naar het andere einde - de benedenstroomse rand - loopt 1 buis. Het debiet door de buizen wordt met afsluiters ingesteld en met meetflenzen gemeten. Deze buizen monden via een roosterwerk in het model uit, juist voor de aan beide uiteinden van het model aangebrachte zigzag-overlaatkleppen (zie figuur 13 en foto 2).

Door voortdurend een zeker debiet over deze kleppen te laten stromen, kan ervoor worden gezorgd dat in het model optredende translatiegolven niet tegen het modeleinde terugkaatsen, maar volledig worden gedempt (het principe van de werking van deze kleppen wordt behandeld in paragraaf 3.3). Nadat het water de overlaatkleppen is gepasseerd komt het in een tweetal afvoergoten. In één daarvan wordt met behulp van een Rehbock-meetoverlaat het debiet gemeten. Daar ook het debiet door de aanvoerleidingen bekend is, is het debiet door het kanaal bekend. Het maximale debiet, dat met dit systeem van wateraan- en afvoer door het kanaal kan stromen, bedraagt ca. 1250 m<sup>3</sup>/s (omgerekend naar prototypedebiet). Aan beide zijden van het model bevindt zich een peilnaald, waarop de waterstand in het kanaal kan worden afgelezen. De waterstand kan vrij worden gekozen tussen N.A.P. - 2 m en N.A.P. + 2 m. Dit komt overeen met een waterdiepte op de kanaalas van 4 m tot 8 m. Voor de in te stellen waterpeilen en debieten werd gebruik gemaakt van een aantal gegevens uit het modelverslag M 1106 van het Waterloopkundig Laboratorium [27]. Hieruit werden bij een gemiddeld getij (11 september 1968) de onderstaande gegevens gevonden (na voltooiing van het kanaal, maar voor de afsluiting van de Oosterschelde):

Peil t.o.v. NAP	Debiet	Maximale gemeten oppervlaktestroomsnelheid	Stroomrichting naar het
m	m <sup>3</sup> /s	m/s	
- 1,75	400	-	zuiden
~ 1,12	-	1,50	zuiden
- 0,18	-	1,08	noorden
+ 0,35	1400	-	zuiden
+ 0,68	1050	1,24	zuiden
+ 1,90	1350	1,24	noorden
+ 2,30	1000	-	noorden

Bovenstaande gegevens hebben betrekking op de toestand nabij de zuidelijke mond van het kanaalgedeelte door de Eendracht (dus in de omgeving van de Auvergnepolder).

Op basis van deze gegevens zijn de volgende combinaties van watersnelheden en debieten gekozen:

Peil t.o.v. NAP	Debiet	Maximale watersnelheid
m	m <sup>3</sup> /s	m/s
- 2,00	geen	geen
- 1,87	815	1,60
- 1,00	geen	geen
0,00	geen	geen
0,00	1090	1,50
+ 0,50	1200	1,40
+ 1,00	geen	geen
+ 1,00	1230	1,25
+ 2,00	geen	geen

Langs één kant van het model is over de gehele lengte een railbaan aangebracht, waarover een meetwagen kan rijden. Deze meetwagen is zodanig uitgerust, dat hij continu met een bepaalde in te stellen snelheid kan rijden. Hiermee is het mogelijk de snelheid van vrijvarende boten te meten. De hoofdfunctie van de wagen is het in dwarsrichting vasthouden van de modelboten. Verder kunnen de modelboten met deze wagen worden gesleept.

# 3.3 De zigzag-overlaatkleppen

De beide randen van het model zijn voorzien van zigzag-overlaatkleppen (zie figuur 13, foto 2). Het doel van deze kleppen is, om een in het model optredende translatiegolf zo goed mogelijk te dempen. Zonder deze voorziening zou na iedere vaart zeer lang moeten worden gewacht, voordat het water tot rust is gekomen. Zelfs dan zouden de metingen kunnen worden verstoord door de translatiegolf, die wordt opgewekt tijdens het op snelheid brengen van het schip. Voor een goede werking van het systeem is het nodig, dat een verandering van het debiet in het kanaal tengevolge van een translatiegolf leidt tot dezelfde verandering van het debiet over de overlaat.

# Afleiding van de theorie :

#### korte overlaat

Q<sub>o</sub> = overstortdebiet C<sub>o</sub> = overlaatconstante (= 1,93) B<sub>o</sub> = werkzame breedte overlaat h<sub>o</sub> = waterdiepte boven kruin overlaat

# translatiegolf

 $c = \sqrt{gh} + v$ 

 $\Delta Q_m = B \Delta h_m c$ 

Q<sub>m</sub> = debiet door mode!  $\Delta Q_m$  = extra modeldebiet door translatiegolf B = waterbreedte in model c = voertplantingssnelheid translatiegolf h = waterdiepte in model  $\Delta h_m$  = extra waterdiepte door translatiegolf v = watersnelheid in model

$$Q_o = C_o B_o h_o^{3/2}$$

 $\frac{dQ_o}{dh_o} = \frac{3}{2} C_o B_o h_o^{\frac{1}{2}}$ 

 $\frac{\Delta Q_o}{\Delta h_o} = \frac{3}{2} C_o B_o h_o^{\frac{1}{2}} \qquad \qquad \frac{\Delta Q_m}{\Delta h_m} = B (\sqrt{gh} + v)$ 

100 °/o demping treedt op indien  $\frac{\Delta Q_o}{\Delta h_o} = \frac{\Delta Q_m}{\Delta h_m}$  voor  $\Delta h_o = \Delta h_m$ 

$$\frac{3}{2} C_{o} B_{o} h_{o}^{\frac{1}{2}} = B \left( \sqrt{gh} \pm v \right)$$

$$h_{o} = \left\{ \frac{B \left( \sqrt{gh} \pm v \right)}{\frac{3}{2} C_{o} B_{o}} \right\}^{2}$$

$$Q_{o} = C_{o} B_{o} h_{o}^{\frac{3}{2}} = \frac{(2/3)^{3} B^{3} \left( \sqrt{gh} \pm v \right)^{3}}{C_{o}^{2} B_{o}^{2}}$$

Treedt geen 100 °/o demping op, dan geldt

$$\Delta Q_{t} = \Delta Q_{m} - \frac{dQ_{o}}{dh_{o}} \Delta h_{m}$$

Substitutie in de bovenstaande vergelijking van

$$\Delta Q_{t} = \Delta h_{t} (\sqrt{gh} \neq v) B$$
$$\Delta Q_{m} = \Delta h_{m} (\sqrt{gh} \neq v) B$$
$$\frac{dQ_{o}}{dh_{o}} = \frac{3}{2} C_{o} B_{o} h_{o}^{\frac{1}{2}}$$

geeft

$$\Delta h_{t} (\sqrt{gh'} + v) B = \Delta h_{m} (\sqrt{gh'} + v) B - \Delta h_{m} \frac{3}{2} C_{0} B_{0} h_{0}^{\frac{1}{2}}$$

$$\frac{\Delta h_{t}}{\Delta h_{m}} = \frac{(\sqrt{gh} \pm v) B - \frac{3}{2} C_{o} B_{o} h_{o}^{\frac{1}{2}}}{(\sqrt{gh} \mp v) B}$$

$$Q_{o} = C_{o} B_{o} h_{o}^{3/2}, \text{ dus } h_{o}^{\frac{1}{2}} = Q_{o}^{1/3} / (C_{o} B_{o})^{1/3}$$

$$\frac{\Delta h_{t}}{\Delta h_{m}} = \frac{(\sqrt{gh} \pm v) B - \frac{3}{2} (C_{o} B_{o})^{2/3} Q_{o}^{-1/3}}{(\sqrt{gh} \mp v) B}$$

$$Q_{o} = (\frac{2}{3})^{3} \frac{B^{3}}{C_{o}^{2} B_{o}^{2}} \left\{ \sqrt{gh} (1 - \frac{\Delta h_{t}}{\Delta h_{m}}) \pm v (1 + \frac{\Delta h_{t}}{\Delta h_{m}}) \right\}^{3}$$

Voor het model Schelde-Rijnverbinding geldt:

$$B = (4,8 + 8h) m$$
  

$$C_{0} = 1,93$$
  

$$B_{0} = 25 m$$

Daar B<sub>o</sub> veel groter is dan B, kan Q<sub>o</sub> betrekkelijk klein blijven.

Wanneer met het gewenste debiet over de overlaat kan worden gestroomd, is het dus mogelijk bij iedere waterstand in het model elke gewenste demping te bereiken. Controlemetingen in model M 1115 bevestigden deze theorie. Zie hiervoor figuren 14 en 15. In deze figuren is het verloop van de waterspiegel op twee plaatsen in het model weergegeven. Voor figuur 14A zijn geen overstortdebieten toegepast en de translatiegolf dempt zeer langzaam uit. Figuur 15 toont de bij instelling van de juiste debieten bereikbare demping aan voor de beide kleppen. Deze drie gevallen gelden voor een waterdiepte in het kanaal van 16 cm. Komt het water in het model boven de slikvelden, dan gaat de toegepaste berekening niet meer op. Het water dat over de slikvelden stroomt wordt wel teruggekaatst. Toch blijft de demping aanzienlijk (70 °/o in plaats van de berekende 113 °/o voor figuur 14B, waar de waterdiepte 32 cm is).

# 3.4 De taludverdediging

De taludverdediging is aangebracht over 750 m prototype, ter weerszijden van het midden van het model, en op beide taluds. Hiervan is op beide taluds 650 m aangebracht in gekleurde vakken van  $6,25 \times 6,25 \text{ m}^2$ . De verdediging is aangebracht tot N.A.P. – 4,50 m. De verschillende toegepaste steensoorten zijn gegeven op de figuren 16 en 17 en op foto 3.

In het prototype bestaat de taludverdediging over grote afstanden uit twee lagen stortsteen (respectievelijk 10/80 en 50/200) op een kraagstuk, en/of op een kunststofweefsel. Daarnaast komen kanaalgedeelten voor, waar minder zware stortsteen (60/120) in één laag is aangebracht op het kraagstuk en/of kunststofweefsel (zie figuren 3 en 4). In overleg met de opdrachtgever werd voor het modelonderzoek de hieronder beschreven constructie aangebracht.

Het kraagstuk is weergegeven door een netwerk van stalen staven met een diameter van 10 cm en een maaswijdte van globaal 85 cm (herleid tot prototypematen). De bovenste staven van het netwerk liggen evenwijdig aan de kanaalas. (De wiepen van het voorgestelde kraagstuk hebben in het prototype een diameter van ca. 11 cm en onderlinge afstanden van 90 cm.) Het kunststofweefsel is in het model niet toegepast: ter plaatse liggen de stenen direct op de betonnen ondergrond.

Op het stalen netwerk, respectievelijk op het beton, is eerst een laag van  $200 \text{ kg/m}^2$  stortsteen 10/80 aangebracht, en daar overheen 400 kg/m<sup>2</sup> stortsteen 50/200. Het gewicht van de toegepaste stortsteen is op schaal 1:25<sup>3</sup>. Uitgangspunten voor de gewichtsverdeling waren de in de "Algemene Voorschriften" vermelde richtlijnen voor stortsteen 10/80 en 80/200<sup>1)</sup>.

1) Algemene Voorschriften voor de uitvoering en het onderhoud van werken onder beheer van het Departement van Waterstaat, uitgave 1952:

"Art. 67, 313, 3. Lichte zink~ en stortsteen wordt geleverd in stukken van "10 tot 80 kg. Het gemiddelde gewicht van deze stukken moet gelegen zijn tus-"sen 40 en 45 kg, terwijl ten hoogste 2 <sup>o</sup>/o van het gewicht der partij mag be-"staan uit stukken lichter dan 10 kg."

"Art. 67, § 313, 4. Zware stortsteen wordt geleverd in stukken van 80 tot "200 kg. Het gemiddeld gewicht van deze stukken moet gelegen zijn tussen "140 en 150 kg, terwijl ten hoogste 2  $^{o}/o$  van het gewicht der partij mag "bestaan uit stukken lichter dan 80 kg." Hieruit is voor stortsteen 50/200 afgeleid: het gemiddelde gewicht van de stukken moet gelegen zijn tussen 120 en 130 kg, terwijl ten hoogste 2  $^{\circ}$ /o van het gewicht der partij mag bestaan uit stukken lichter dan 50 kg. Voor stortsteen 10/50 werd afgeleid: het gemiddeld gewicht van de stukken moet gelegen zijn tussen 25 en 30 kg, terwijl ten hoogste 2  $^{\circ}$ /o van het gewicht der

partij mag bestaan uit stukken lichter dan 10 kg.

Voor het <u>gemiddelde</u> gewicht van de stortsteen is aangehouden het stuksgewicht, dat door 50  $^{\circ}$ /o van het totaalgewicht aan stortsteen wordt onderschreden (dit naar analogie van zeefanalyses). Het soortelijk gewicht van de toegepaste stortsteen is globaal 2650 kgf/m<sup>3</sup>. De gewichtsverdeling is weergegeven op figuur 17.

Gedurende enige prosven werd over een lengte van 25 m prototype een afwijkende constructie toegepast. In plaats van 400 kg/m<sup>2</sup> stortsteen 50/200 op 200 kg/m<sup>2</sup> stortsteen 10/80 werd 600 kg/m<sup>2</sup> stortsteen 10/50 in één laag aangebracht.

Daar de in het model gebruikte stortsteen (porfier) veel platte, langwerpige stenen bevatte, zijn eveneens enige vergelijkende proeven gedaan met stenen met een minder platte vorm (grind). Deze steensoort had een soortelijk gewicht van 2500 kgf/m<sup>3</sup> en werd toegepast over 25 m. Uitgegaan is ook hier van 200 kg/m<sup>2</sup> stortsteen 10/80, waarop 400 kg/m<sup>2</sup> stortsteen 50/200. De voor dit laatste geval beschikbare stenen waren helaas iets te licht (zie figuur 17).

Over enige trajecten van het kanaal worden op de (ter plaatse smalle) slikvelden "kribben" uitgebouwd van dezelfde stortsteen als voor de taludverdediging wordt gebruikt (zie figuren 2 en 16). Deze kribben hebben een breedte van 10 m en zijn ook opgebouwd uit twee lagen, 200 kg/m<sup>2</sup> stortsteen 10/80 en 400 kg/m<sup>2</sup> stortsteen 50/200. In het kader van het onderzoek werden deze kribben bij een aantal proeven in het model aangebracht. Daarbij werd met houten schotten de breedte van de slikvelden tot 21 m verkleind.

# 3.5 De modelschepen

De meeste proeven tijdens dit onderzoek werden uitgevoerd met een Rijn-Hernekanaalschip van het "Johann Welker" type (de "Adriaan") en met een duwboot (de "Vulcaan I") met 4 Europa-II duwbakken. Een overzicht van de scheepsvormen en hoofdafmetingen van deze schepen wordt gegeven in figuren 18...21, foto's 5 en 6, en in tabel 1. De duwboot is uitgerust met 2 schroeven, die onafhankelijk van elkaar te bedienen zijn. De energievoorziening voor de voortstuwing van deze schepen vond plaats met accubatterijen, die in het schip zelf stonden. Alleen in ongeladen toestand werden de accu's op de meetwagen geplaatst en door een flexibele kabel met het schip verbonden. Omstreeks het einde van het onderzoek kwam een duwboot beschikbaar met een zeer groot vermogen, de "Superbrousse" genaamd. Met deze boot werden enige proeven uitgevoerd, in een duweenheid met eveneens 4 Europa-II bakken. De energievoorziening van deze boot geschiedde vanuit het lichtnet, waartoe deze boot door een flexibele kabel met de meetwagen was verbonden. Een overzicht van scheepsvormen en afmetingen wordt gegeven in figuur 22, foto 6 en tabel 1.

Behalve met deze schepen zijn nog een aantal proeven gedaan met schepen van kleinere afmetingen, namelijk met de "ir. F. Wassing", de "Bart Christiaan" en de "Rixt". Alleen het laatste schip – dat pas tegen het einde van het onderzoek ter beschikking kwam – was voorzien van eigen voortstuwing, waartoe het met een flexibele kabel met de meetwagen verbonden was. Voor een overzicht van de scheepsvormen en afmetingen wordt verwezen naar de figuren 23 en 24, foto 4 en tabel 1.

Uitgaande van het toerental van de schroeven en de scheepssnelheid is in aanhangsel 1 de orde van grootte van het motorvermogen van het corresponderende prototypeschip berekend. De gevolgde berekeningswijze draagt een zeer globaal karakter. Om geen te grote nauwkeurigheid te suggereren, zijn de berekende vermogens kleiner dan 1500 pk op veelvouden van 250 pk afgerond, tussen 1500 en 3000 pk op veelvouden van 500 pk en daarboven op veelvouden van 1000 pk.

## 3.6 Toegepaste\_meetapparatuur

Voor het meten van de snelheid van de modelschepen werd gebruik gemaakt van de meetwagen. De snelheid van de meetwagen was afleesbaar, en door daarmee de modelboten te volgen werd de snelheid daarvan bepaald.

Voor het meten van de watersnelheden is gebruik gemaakt van een micromolen. De waterspiegelveranderingen werden met een golfhoogtemeter opgenomen. Deze meetinstrumenten waren verbonden met electronische schrijvers, waarmee de verandering van deze grootheden in de tijd kon worden opgenomen. Deze apparatuur werd in- en uitgeschakeld door de meetwagen, via contacten op de rails. Voor het instellen van de juiste roer- en drifthoeken bij varen buiten de kanaalas werd een systeem ontwikkeld van tellertjes, die de tijd bepaalden dat het schip aan de ene of andere kant tegen de geleiding drukte. Ook deze tellers werden door de meetwagen via dezelfde contacten op de rails aan- en uitgeschakeld.

# 3.7 Weergave van de schade aan de taludverdediging

Zoals vermeld, is de stortsteen in het model aangebracht in vakjes met verschillende kleur en afmetingen van  $6,25 \times 6,25 \text{ m}^2$  op het talud (drie banen) en  $6,25 \times 5,00 \text{ m}^2$  op de slikvelden (één baan). Dit maakte het mogelijk om na een proef het aantal steentjes op te nemen, dat naar een ander vak werd verplaatst. Bij iedere proef werd driemaal op dezelfde afstand uit de oever en met dezelfde snelheid gevaren. Daarna werden op een plattegrond van het talud alle steentjes, die verplaatst waren, met pijltjes aangegeven.

Alle verplaatsingen uit vakjes, die dezelfde afstand tot de kanaalas hadden, werden gesommeerd en gedeeld door het betreffende aantal vakjes. Dat leverde vier schadegetallen op, waarvan er in de meeste gevallen één of twee de waarde nul hadden (bij een waterstand van N.A.P.-2 m vielen bijvoorbeeld de vakjes op de slikvelden droog, zodat daar dan geen schade werd geconstateerd). Daarnaast werd nog een verdeling naar verplaatsingsrichting bepaald. In figuur 25 is een voorbeeld gegeven van een plattegrond, waarop de verplaatste steentjes staan aangegeven (schadeformulier).

Om op eenvoudige wijze proeven bij verschillende waterstanden met elkaar te kunnen vergelijken, is tenslotte een schadegetal 5 gedefiniëerd. Dit schadegetal werd bepaald door de vier schadegetallen, die voor de banen van vakjes met gelijke afstand tot de kanaalas werden bepaald, op te tellen. De oorspronkelijk gevonden schadegetallen per vakje worden in paragraaf 5.7 gebruikt voor een analyse van de verdeling van de schade over het talud en de verplaatsingsrichting van de steentjes.

# 4 Theoretische grondslagen

# 4.1 Scheepvaart op onbeperkt water

Wanneer een schip op onbeperkt water vaart, moet water van voor de boeg van het schip naar achteren worden verplaatst. Daardoor ontwikkelt zich een potentiaalstroming rondom het schip (afgezien van wrijving en loslaatpunten langs de scheepshuid). Deze potentiaalstroming heeft rond het schip een spiegeldaling tengevolge. De aldus ontstane verstoring van de waterspiegel, die zich met de scheepssnelheid voortbeweegt, noemt men het primaire golfsysteem (de primaire scheepsgolf). Ten gevolge van de wrijving is langs de scheepshuid de watersnelheid nul. Verder van de scheepshuid af heerst de potentiaalstroming, daartussen is een aanzienlijke snelheidsgradiënt. Voor het instandhouden van die snelheidsgradiënt door de scheepshuid is een schuifspanning nodig, waardoor het schip wrijvingsweerstand ondervindt. Het laagje water vlak langs de scheepshuid noemt men de grenslaag.

Nabij het hek laat de grenslaag het schip los. Achter het schip bevindt zich een opeenhoping van water met een snelheid gelijk aan de scheepssnelheid. Door de potentiaalstroming wordt dat water in sterk turbulente beweging gebracht. Deze turbulente watermassa – het zog van het schip – is vaak tot ver achter het schip zichtbaar. Het verschil in waterdruk tussen voor- en achterkant van het schip, dat door dit verschijnsel ontstaat, wordt de drukweerstand van het schip genoemd.

Door de verstoring van het wateroppervlak door het primaire scheepsgolvensysteem wordt een tweede systeem van golven opgewekt: de secundaire scheepsgolven. Voor een groot deel wordt de vorm van dit golfsysteem bepaald door de drukpieken bij boeg en hek van het schip. Deze secundaire scheepsgolven voldoen aan de wetten van trochoïdale golven. Voor het instandhouden van een dergelijk golfsysteem moet voortdurend energie worden toegevoerd. Deze energie moet door het schip worden geleverd, wat resulteert in een golfweerstand van het schip.

De voortplantingssnelheid van deze golven is gelijk aan de scheepssnelheid. Verder geldt voor trochoïdale golven, dat  $c = \sqrt{g \lambda / 2\pi}$ . Volgens Lap [10] is de golfweerstand in de eerste plaats afhankelijk van de afmetingen van de golven (golfhoogte en golflengte). Daarom is van belang de mate, waarin boeg- en hekgolf van het schip elkaar versterken of juist tegenwerken. De golfweerstand wordt uitzonderlijk groot, wanneer de golflengte ongeveer dezelfde grootte heeft als de scheepslengte (dan versterken boeg- en hekgolf van het schip elkaar maximaal).

# 4.2 Scheepvaart op water met beperkte diepte en onbeperkte breedte

Analoog aan wat voor de vaart op onbeperkt water geldt, wordt door een schip op water met beperkte diepte en onbeperkte breedte een primair en een secundair golfsysteem opgewekt. Bij hetzelfde motorvermogen van een schip als op onbeperkt water leidt dat tot een verlaging van de scheepssnelheid (de golfweerstand bij gelijke scheepssnelheid neemt toe). De voortplantingssnelheid van het golfsysteem wordt nu c =  $\sqrt{(g \lambda/2\pi)}$  tgh  $(2\pi h/\lambda)$  waarin c gelijk is aan de scheepssnelheid.

De potentiaalstroming rond het schip verandert ook van karakter. Deze wordt meer twee-dimensionaal, waardoor de snelheden daarin toenemen. Als gevolg daarvan neemt ook de wrijvingsweerstand van het schip toe, en daardoor zal de snelheid bij gelijkblijvend motorvermogen nog verder afnemen.

Het effect van de beperking van de waterdiepte wordt, volgens onder anderen Schuster [16], waarneembaar zodra de scheepssnelheid in knopen groter wordt dan 4,3 maal de wortel uit de waterdiepte in m. Omgerekend in m/s wordt deze grens  $V_s \ge 0.7 \sqrt{gh}$ . Tenminste, zolang het twee-dimensionale karakter van de potentiaalstroming mag worden verwaarloosd. Voor kleine waarden van het quotiënt van waterdiepte en diepgang is dat niet het geval. Kempf (zie [31])publiceerde een kromme (zie figuur 26), waarin hij de scheepssnelheid, waarbij voor de berekening moet worden overgegaan van onbeperkt op beperkt water, uitzette tegen de waterdiepte-diepgang verhouding.

Zoals boven vermeld, geldt voor water met een beperkte diepte, dat de voortplantingssnelheid van de golven  $c = \sqrt{(g\lambda/2\pi)} tgh (2\pi h/\lambda)$  is. Wordt de waterdiepte h klein ten opzichte van de golflengte  $\lambda$ , dan gaat deze formule over in  $c = \sqrt{gh}$ . Nadert de scheepssnelheid deze waarde, dan neemt de scheepsweerstand zeer sterk toe: het schip bereikt een zogenaamde grenssnelheid of kritische snelheid. Volgens Krietemeijer [8] kan de grenssnelheid voor een schip op water met beperkte diepte gesteld worden op  $v = C_1 \sqrt{gh}$ . Voor de theoretische grenssnelheid stelt hij  $C_1 = 0,90$ . De economische topsnelheid van een schip zal echter volgens hem lager liggen, en wel voor geladen vrachtschepen op ongeveer  $0,7 \sqrt{gh}$ . De invloed van een beperkte waterbreedte mag volgens Schuster [16] niet meer verwaarloosd worden, zodra de verhouding tussen waterbreedte en scheepslengte kleiner dan twee wordt. Volgens Hay [4] gaan de berekeningen als uitgevoerd door Schijf (zie hieronder) minder goed op, wanneer de verhouding tussen groot-spantoppervlak schip en natte doorsnede vaarweg ( $A_m/F$ ) veel kleiner dan 0,08 wordt.

Door Krey [7] is een theorie opgesteld om de verschijnselen te verklaren, die optreden bij de vaart van schepen op kanalen met beperkte diepte en breedte. Daarbij gaat hij uit van een met het schip meebewegend assenkruis. Ten opzichte van dat assenkruis gedraagt het schip zich als een obstakel (bijvoorbeeld een pijler) in stromend water. Daarbij is de snelheid van het stromende water gelijk aan de snelheid van het schip ten opzichte van een vast assenstelsel. De grootte van de retourstroom en spiegeldaling in het kanaal ter plaatse van de door het schip gevormde vernauwing wordt dan bepaald met de vergelijking van Bernoulli en de continuiteitsvoorwaarde. De theorie gaat uit van een in het midden van de vaarweg varend schip. Deze theorie is verder uitgewerkt door Schijf [18,30]. In beide bovengenoemde vergelijkingen is een uniforme snelheid over het dwarsprofiel aangenomen. Voor minder gelijkmatige stroming voerde Schijf een factor a in. De waarde daarvan loopt bij de door hem onderzochte schepen bij hoge snelheden echter weer naar 1,0. Latere onderzoekingen in het Waterloopkundig Laboratorium hebben aangetoond, dat ook voor duweenheden bij hoge snelheden  $\alpha = 1,0$  is. Verder werkte Schijf met dimensieloze parameters. Enige resultaten van zijn berekening zijn weergegeven in de diagrammen op de figuren 27 en 28. Bovenstaande overwegingen zijn, evenzeer als die in de volgende alinea, niet zonder meer toepasbaar op buiten de kanaalas varende schepen.

Ook toonde Schijf het bestaan van een grenssnelheid aan voor een zelfvarend schip in een kanaal. Opnieuw ging hij uit van een met het schip meebewegend assenkruis. Tijdens de vaart moet langs een schip evenveel water worden afgevoerd, als het schip van voren nadert:  $Q = V_s \times F$ . Daartoe staat een verkleinde kanaaldoorsnede ter beschikking, namelijk  $F - A_m - B z$ . Hoe sneller het schip gaat varen, hoe groter de af te voeren hoeveelheid water wordt. Al dat water moet door het beperkte profiel worden afgevoerd. Door deze doorsnede kan echter geen onbeperkte hoeveelheid water stromen. De door de beperkte doorsnede maximaal af te voeren hoeveelheid water ( $Q_{max}$ ) is afhankelijk van de energiehoogte H, die weer afhangt van de snelheid van het schip (H = h +  $V_s^2/2g$ ), alsmede van de afmetingen van kanaal en schip. Bij een gegeven schip in een gegeven kanaalprofiel kan bij iedere scheepssnelheid  $Q_{max}$  worden bepaald. Die scheepssnelheid, waarbij  $Q_{max} = Q = V_s \times F$ , is de grenssnelheid van een schip in een kanaal. Ook de grenssnelheid wordt weergegeven op de figuren 27 en 28.

Tenslotte heeft Schijf de verschijnselen bij het inhalen van twee schepen bestudeerd [30]. Hij deelde de snelheid van de twee afzonderlijk naast elkaar varende schepen door de grenssnelheid van een schip met een doorsnede gelijk aan de som van de doorsneden van beide schepen. Uit modelproeven vond hij, dat die verhouding ongeveer het gemiddelde is van de verhoudingen van de oorspronkelijke snelheden van beide schepen tot hun respectieve grenssnelheden.

Op deze plaats mogen tenslotte de uitgebreide proefnemingen van SOGREAH [22] naar de inzinking van tankers in verschillende waterwegen niet onvermeld blijven. De resultaten van deze proeven zijn vooral van belang wanneer het gaat om de inzinking van schepen op relatief brede waterwegen, waarvoor de theorie van Schijf geen voldoende nauwkeurige resultaten geeft, terwijl toch niet van onbeperkte waterbreedte kan worden gesproken.

Een bijzonder geval is de situatie van een diepere geul in overigens ondiep water, bijvoorbeeld de toegangsgeul naar Europoort. Volgens Dickson [3] kan dan de theorie voor water met beperkte breedte en diepte worden gebruikt, waarbij voor de waterspiegelbreedte tien maal de grootste breedte van het schip wordt genomen. Voor de kanaalbegrenzing wordt dan naast de diepere geul de verbindingslijn tussen de bovenkant van het onderwatertalud van de geul en de virtuele begrenzing van de spiegelbreedte aangehouden.

# 4.4 Model van de Schelde-Rijnverbinding

In het model van de Schelde-Rijnverbinding treden bij de grotere modelboten veelal verschijnselen op, die met behulp van de theorie van Schijf benaderd kunnen worden. In een aantal gevallen zijn de gemeten snelheden vergeleken met de grenssnelheid van het betreffende schip. Daarom zijn voor de verschillende bij het onderzoek ingestelde waterstanden de grenssnelheden volgens Schijf en volgens Krietemeijer(0,9 $\sqrt{gh}$ ) berekend. Verder zijn de verhouding tussen waterspiegelbreedte en scheepslengte (volgens Schuster) en de verhouding tussen het grootspantoppervlak van het schip en natte dwarsprofiel van de vaarweg (A<sub>m</sub>/F)
berekend. Tenslotte is de scheepssnelheid berekend, waarboven volgens Kempf de invloed van een beperking in de waterdiepte merkbaar wordt. De resultaten van deze berekening zijn weergegeven in tabel 2. Voor de diepgang van de schepen is daarbij de gemiddelde diepgang genomen, behalve bij de ongeladen duweenheid, waar de gemiddelde diepgang van de beide achterste (diepst geladen) bakken is aangehouden. Voor waterstanden boven N.A.P. zijn de kanaalafmetingen aangehouden volgens de laatste alinea van de voorgaande paragraaf, behalve indien de virtuele waterspiegelbreedte volgens deze regel kleiner werd dan de bovenbreedte van het gegraven kanaal (168 m). Dan werden de taluds doorgetrokken gedacht tot aan de waterspiegel.

Voor de in de rest van het verslag te gebruiken grenssnelheden werd de laagste waarde van de grenssnelheden, berekend volgens Schijf en volgens Krietemeijer aangehouden. Volgens tabel 2 bleek dat voor alle gevallen de waarde volgens Schijf te zijn.

# 5 Onderzoek naar de stabiliteit van de voorgestelde stortsteen

#### 5.1 Proeven met kleine modelboten

# 5.1.1 Proef met de "Bart Christiaan"

De "Bart Christiaan" (figuur 23, foto 4) is een kleine modelboot, die niet over eigen voortstuwing beschikte. Deze boot werd gesleept langs de teen van het talud (T, zie figuur 29), bij een waterstand van N.A.P. Tot een snelheid van 25,2 km/h werd daarbij geen schade geconstateerd. Daarna werden de proeven met dit schip gestaakt. (De grenssnelheid volgens Schijf is 23,7 km/h).

#### 5.1.2 Proeven met de "ir. F. Wassing"

De "ir. F. Wassing" (figuur 23, foto 4) is een wat grotere modelboot, met een slankere vorm. Ook deze boot beschikte niet over eigen voortstuwing. Bij een diepgang van 1,00 m en een waterstand van N.A.P. – 2 m (waterdiepte 4 m) werd de boot langs de teen van het talud gesleept. Eerst bij een snelheid van ± 18 km/h werd enige schade aan de stortsteen geconstateerd (S = 0,15). Verder opvoeren van de snelheid gaf geen vergroting van de schade. Integendeel, bij een snelheid van ongeveer 27 km/h was het schadegetal afgenomen tot S  $\approx$  0,05. Een verklaring voor dit verschijnsel kan zijn, dat de boot bij deze hoge snelheden gaat planeren. De grenssnelheid volgens Schijf (geen rekening houdend met planeren) is voor dit geval 19,3 km/h. De richting waarin de meeste stenen verplaatsten was loodrecht op de kanaalas, naar het kanaalmidden toe.

Dezelfde proef werd herhaald bij een waterstand van N.A.P. Hierbij werd tot een vaarsnelheid van 36 km/h geen schade gevonden. (Genssnelheid volgens Schijf: 23,3 km/h).

Tenslotte werd deze proef nog eens herhaald bij dezelfde waterstand (N.A.P.) maar met een diepgang van 1,20 m. Daarbij werd tot 25 km/h geen schade geconstateerd. Bij 27 km/h werd een schadegetal S = 0,88 gevonden. Verder opvoeren van de snelheid gaf ook hier enige afname van de schade (bij 29 km/h: S = 0,66). De grenssnelheid volgens Schijf is hier 23,1 km/h. Ook bij deze proef verplaatsten de stenen hoofdzakelijk in een richting loodrecht op de kanaalas en naar het kanaalmidden.

#### 5.1.3 Proeven met de "Rixt"

De "Rixt" (figuur 24, foto 4) is een model van een onderzoekingsvaartuig, dat pas tegen het einde van het onderzoek ter beschikking kwam. Deze modelboot beschikte wel over eigen voortstuwing, waarmee vermogens tot circa 1500 pk gesimuleerd konden worden. Tijdens deze proeven waren naast de vakken met stortsteen 50/200 (porfier) ook enige vakken met stortsteen 10/50 (porfier) en 50/200 (grind) aanwezig.

Bij de uitgevoerde proeven werd - zowel bij een waterdiepte van 4 m (N.A.P.-2 m) als bij een waterdiepte van 6 m (N.A.P.) - schade aan alle drie soorten stortsteen geconstateerd, zonder dat aanslepen van de modelboot nodig was. Bij de laagste waterstand werd het toerental opgevoerd, totdat uit metingen van de waterspiegeldaling naast het schip de indruk ontstond, dat aan de grond lopen van de modelboot niet uitgesloten was. Om beschadiging van de modelboot te voorkomen, werd afgezien van metingen met nog hogere toerentallen.

De resultaten van deze metingen zijn gegeven in tabel 3 en figuren 30...32. Uit de figuren blijkt, dat een geringe verhoging van de scheepssnelheid een zeer sterke toename van de schade kan geven. Voor die geringe verhoging van de scheepssnelheid is echter een aanzienlijke verhoging van het vermogen nodig. Daarnaast blijkt dat bij gelijke motorvermogens een dicht langs het talud varend schip hogere schade kan geven, dan een schip dat dichter bij de kanaalas vaart.

De gegevens voor stortsteen 10/50 (porfier) en 50/200 (grind) zijn gebaseerd op veel kleinere taludoppervlakken dan die voor stortsteen 50/200 (porfier). Daardoor zijn de gegevens over de eerstgenoemde soorten stortsteen ook minder betrouwbaar dan die voor de laatste soort. Waarschijnlijk daardoor hebben de grafieken, die de schade voor de laatstgenoemde stortsteen aangeven een veel regelmatiger verloop. De gegevens bevestigen de verwachting, dat aan stortsteen 10/50 (porfier) bij lagere snelheden en vermogens schade optreedt dan aan stortsteen 50/200 (porfier). De gemeten schade aan stortsteen 50/200 (grind) was steeds zo klein en het verschil met stortsteen 50/200 (porfier) zo gering, dat op grond van de geconstateerde verplaatsingen niet de conclusie kan worden getrokken dat beide soorten zich verschillend gedragen.

Wat betreft het motorvermogen van de "Rixt" kan worden geconcludeerd, dat bij vermogens lager dan 250 pk geen schade van belang behoeft te worden verwacht. Afhankelijk van de waterdiepte treedt bij vermogens van 400 å 600 pk duidelijk schade op aan stortsteen 10/50 (porfier), wanneer het schip langs de onderkant van het talud vaart. Deze schade neemt bij stijgend motorvermogen verder toe. Aan stortsteen 50/200 treedt bij motorvermogens van 400 tot 1000 pk enige schade op, wanneer het schip zich op dezelfde plaats in het dwarsprofiel bevindt. Wanneer het schip zich meer dan 25 m van de teen van het talud bevindt, is de schade aan de stortsteen 50/200 zelfs voor vermogens van 1500 pk te verwaarlozen. Aan de stortsteen 10/50 treedt dan bij dergelijke vermogens wêl enige schade op.

# 5.1.4 Slotopmerkingen en conclusies

De proeven met de "Bart Christiaan" en de "ir. F. Wassing" wekken de indruk, dat de schade ten gevolge van het passeren van kleine schepen gering zal zijn. Hierbij dient wei in het oog te worden gehouden, dat deze modelschepen geen eigen voortstuwing hadden (zoals later zal blijken heeft dat een aanwijsbaar gevolg voor de waterbeweging en daarmee voor de schade). Het blijkt dat een modelboot met dezelfde hoofdafmetingen als de "ir. F. Wassing", maar met een grotere diepgang, minder slanke vormgeving en voorzien van eigen voortstuwing van groot vermogen, wel schade aan de stortsteen oplevert. Uit de uitgevoerde proeven blijkt, dat wanneer met zo'n schip (met name met de "Rixt") op een afstand van ongeveer 25 m uit de teen van het talud wordt gevaren, zelfs bij vermogens boven 1000 pk nog geen schade aan de stortsteen 50/200 werd geconstateerd. Wel werd bij deze vermogens enige schade aan stortsteen 10/50 gevonden.

Vaart het schip met de zijkant boven de teen van het talud, dan treedt al bij minder dan 500 pk motorvermogen enige schade aan stortsteen 50/200 op, terwijl aan stortsteen 10/50 bij nog lagere vermogens schade werd geconstateerd. Bij hogere motorvermogens neemt vooral de schade aan stortsteen 10/50 snel toe.

In paragraaf 2.7 is een overzicht gegeven van de kleinere boten en schepen, die op de Nederlandse binnenwateren verwacht kunnen worden. De vaartuigen die dikwijls met een motorvermogen van meer dan 500 pk zijn uitgerust, zijn hoofdzakelijk onderzoekingsvaartuigen, viskotters, sleepboten en duwboten. In het algemeen zullen deze vaartuigen wel op enige afstand van het talud varen.

Op meer dan 25 m uit teen talud zijn voor stortsteen10/50 in feite alleen nog de vaartuigen met meer dan 1000 à 1500 pk motorvermogen van belang. Hieraan voldoen meerdere duwboten en verder enige kotters en sleepboten. Alleen voor alleenvarende duwboten (met vermogens van meer dan 2000 pk) is voor deze vaarpositie in het kanaal in theorie schade aan stortsteen 50/200 niet uitgesloten. Wanneer kleine vaartuigen nog dichter langs het talud varen – wat bij bepaalde inhaalmanoeuvres niet uitgesloten lijkt – kan bij kleinere motorvermogens (250 à 500 pk) reeds enige schade aan stortsteen 50/200 en aanzienlijke schade aan stortsteen 10/50 optreden.

#### 5.2 Proeven met een Rijn-Hernekanaalschip en de duwboot "Vulcaan I"

#### 5.2.1 Overzicht

Met een Rijn-Hernekanaalschip en de duwboot "Vulcaan I" met 4 Europa-II bakken werd een groot aantal vaarproeven gedaan. Daarbij werd de scheepsas door de geleiding evenwijdig aan de kanaalas gehouden, en de roerhoek bleef 0<sup>°</sup>. Het bleek, dat bij schade aan de taludverdediging de stortsteen voornamelijk in de vaarrichting van het schip werd verplaatst. Daaruit is wel duidelijk, dat deze schade niet door de retourstroom wordt veroorzaakt, temeer daar de schade vooral over een smalle strook ter weerszijden van de ongestoorde waterspiegel optrad. Tijdens de proeven werd bij hoge vaarsnelheden achter het schip een brekende golf waargenomen, die zich met de scheepssnelheid over het talud voortbewoog. Achter deze brekende golf kwamen over enige afstand zeer hoge stroomsnelheden op het talud voor. Beide verschijnselen samen leken verplaatsingen van de stenen in de vaarrichting van het schip te veroorzaken.

Uit de proeven blijkt, dat in het algemeen pas schade optreedt bij scheepssnelheden die dichtbij of zelfs boven de grenssnelheid volgens Schijf liggen. Alleen wanneer de schepen zeer dicht langs het talud varen is de snelheid waarbij schade gaat optreden aanzienlijk lager dan de grenssnelheid. Naarmate de afstand tot het talud kleiner wordt blijkt ook de snelheid van de zelfvarende schepen af te nemen. Slechts in één geval (het RHK-schip langs de teen van het talud varend, bij lage waterstand (N.A.P. – 2 m) en met zijn maximale toerental) werd schade aan het talud geconstateerd door een op eigen kracht varend schip. In alle andere gevallen was het nodig de schepen met de meetwagen aan te slepen om schade te kunnen constateren, doordat het vermogen van de onderzochte modelschepen beperkt was.

Achtereenvolgens zullen in de volgende paragrafen een aantal factoren, die invloed op de schade aan de taludverdediging van stortsteen kunnen hebben, nader worden besproken.

#### 5.2.2 Belasting van de taludverdediging door de schroefstraal

In de loop van het onderzoek werden enige proeven gedaan naar de aantasting van de taludverdediging door de schroefstralen van het RHK-schip "Adriaan" en de duweenheid "Vulcaan I". Deze proeven werden uitgevoerd bij een waterstand van N.A.P. – 1,83 m. De boot werd op zijn plaats gehouden, en gedurende 75 s werd de schroef in werking gesteld.

Bij de eerste proef lag het schip evenwijdig aan de kanaalas, met zijn zijkant langs de teen van het stuurboordtalud. De roeruitslag was 40<sup>°</sup> stuurboord. Voor de "Adriaan" werd bij schroeftoerentallen van 280 en 380 omw/min <sup>1)</sup>

Voor de omrekening van het schroeftoerental in het model naar de hier vermelde prototypewaarden is in dit hoofdstuk de factor 1/5 toegepast (zie aanhangsel 1). Schaaleffecten in de weerstand van het schip spelen immers geen rol bij het verband tussen de omwentelingen van de schroef en de stroomsnelheid in de schroefstraal. Daar van de invloed van schaaleffecten tengevolge van wrijving langs de schroefbladen (zie aanhangsel 1) op de schroefstraal geen gegevens bekend zijn, is dit verschijnsel hier buiten beschouwing gelaten.

geen schade aan de taludverdediging geconstateerd; bij 470 omw/min verplaatsten enkele van de kleine steeentjes. Bij de Vulcaan I" werd, bij 305 omw/min van beide schroeven, slechts één verplaatste steen gevonden.

Bij de tweede proef lag de scheepsas onder 45° met de kanaalas. De roeruitslag was 0°, en de achterkant van het schip lag tot aan de teen van het talud. Voor de "Adriaan" werd bij 280 omw/min van de schroeven ook hier geen schade aan de taludverdediging geconstateerd, maar bij 380 omw/min verplaatsten 1 à 2 stenen, en bij 470 omw/min ongeveer 5. Bij de "Vulcaan I" werd, bij een toerental van 205 omw/min van de beide schroeven, slechts één enkele steen verplaatst. Bij 305 omw/min werd flinke schade aan de onderkant van het talud geconstateerd. Deze schade is weer sterk plaatselijk: tussen de schroefstralen van de beide schroeven zijn de stenen zelfs blijven liggen.

De laatste proef werd gedaan met de "Adriaan" loodrecht op de kanaalas. De roeruitslag was  $0^{\circ}$ , en de achterkant van het schip kwam tot aan de teen van het talud. Bij 280 omw/min van de schroef werd een schade van 1 steen geconstateerd, bij 380 omw/min 1 à 2 stenen en bij 470 omw/min 4 à 5 stenen.

Uit deze proeven blijkt wel, dat slechts onder zeer extreme omstandigheden (bijvoorbeeld met volle kracht wegvaren van de oever met een grote hoek tussen scheepsas en kanaalas) enige aantasting van het talud door de schroefstraal te verwachten valt. De optredende schade is dan nog sterk plaatselijk.

(Voor nadere informatie over de in de schroefstralen van het RHK-schip "Adriaan" en de duwboot "Vulcaan I" optredende watersnelheden kan verwezen worden naar het modelverslag M 782 van het Waterloopkundig Laboratorium [29]).

# 5.2.3 Geladen tegenover ongeladen schip

Er zijn enige vergelijkende metingen gedaan met geladen, respectievelijk ongeladen, modelschepen om te onderzoeken welke diepgang de meeste kans op beschadiging van de taludverdediging kan geven. Immers, het minder diep geladen schip zal bij hetzelfde toerental van de schroeven een hogere snelheid halen, wat kan leiden tot grotere secundaire scheepsgolven. Maar doordat de oppervlakte van het ondergedompelde grootspant afneemt, zal de primaire verstoring van de waterstroming kleiner kunnen worden. Om toch een inzicht te krijgen in de invloed, die beide factoren op de schade uitoefenen, wordt de snelheid waarbij een bepaald schadegetal optreedt, uitgedrukt in een percentage van de grenssnelheid volgens Schijf. De resultaten van deze vergelijking zijn weergegeven in de tabellen 4 en 5. Uit deze gegevens blijkt dat, om een bepaald schadegetal te bereiken, bij het geladen schip in het algemeen een lager percentage van zijn grenssnelheid nodig is dan bij het ongeladen schip. Het verschil is echter gering, vooral als rekening wordt gehouden met het feit, dat de ongeladen schepen op eigen kracht een hoger percentage van de grenssnelheid blijken te kunnen bereiken.

#### 5.2.4 Invloed van het gedeeltelijk slepen van modelboten

In bijna alle gevallen, waarbij schade aan het talud werd geconstateerd, was het nodig het schip gedeeltelijk aan te slepen. Er zijn daarom enige proeven gedaan, om te onderzoeken wat daarvan de gevolgen voor de schade zijn.

Allereerst is voor een aantal gevallen, waarbij schade werd geconstateerd wanneer het RHK-schip met draaiende schroef (2350 omw/min model) tot een zekere snelheid werd aangesleept, gevaren met dezelfde snelheid maar zonder draaiende schroef. In al die gevallen (zie tabel 6) bleek de schade (soms zelfs aanzienlijk) lager te zijn.

In één geval (bij N.A.P. - 2 m, varend met het RHK-schip langs de teen van het talud) werd duidelijk schade geconstateerd wanneer het schip op eigen kracht voer. In deze situatie werd een proef gedaan, waarbij de snelheid van het schip door aanslepen constant werd gehouden (gelijk aan de snelheid bij maximaal toerental), maar het toerental steeds lager werd ingesteld. Daarbij nam de schade duidelijk af (zie tabel 7).

Het is hieruit wel duidelijk, dat het eventueel gedeeltelijk slepen van een schip een wat te gunstig beeld van de schade geeft. Dit is vooral van belang, omdat sommige nieuwere schepen aanmerkelijk hogere vermogens geinstalleerd hebben dan de "Adrigan" en "Vulcaan I" waarmee in het model werd gevaren. Verwacht mag dan ook worden, dat een bepaalde schade bij een zelfvarend schip bij lagere snelheid optreedt dan bij een (gedeeltelijk) aangesleept schip.

# 5.2.5 Invloed van debieten door het kanaal

Tijdens het onderzoek werden de afstanden van het schip tot de oever, de waterstanden in het kanaal en het debiet door het kanaal gevariëerd, evenals de snelheid van de schepen. Uit deze proeven blijkt dat de snelheid van het schip ten opzichte van de oevers niet bepalend is voor de schade aan de stortsteen (zie tabellen 8.1...8.4 en figuren 33...37). Onder overigens ongewijzigde omstandigheden treedt een bepaalde schade bij stroomop varende schepen steeds bij een lagere snelheid op dan bij stroomaf varende schepen, terwijl het geval zonder mee- of tegenstroom een tussenpositie inneemt. Daar de scheepssnelheid ten opzichte van de oever bij stroomaf varende schepen uiteraard hoger zal zijn dan bij stroomop of op stil water varende schepen, die met hetzelfde motorvermogen varen, mag hieruit niet geconcludeerd worden dat stroomaf varen het minste gevaar oplevert voor de taludverdediging. Daarom is de schade ook gegeven als funktie van de relatieve scheepssnelheid ten opzichte van het ongestoorde water (tabellen 8.1...8.4 en figuren 33...37). Dan blijkt dat voor alle onderzochte situaties stroomaf varende schepen bij lagere relatieve scheepssnelheden schade veroorzaken dan stroomop varende schepen. Ook in dit geval nemen de op stil water varende schepen een tussenpositie in, zij het dat ze in veel gevallen dichter bij de stroomaf dan bij de stroomop varende schepen komen. Het gaat om verschillen in relatieve snelheid tussen stroomop en stroomaf varende schepen in de orde van 0,3 à 1,0 m/s (1 à 4 km/h).

Rekening moet nog worden gehouden met het effect, dat stroomaf varende schepen bij gelijke schroeftoerentallen een lagere relatieve snelheid blijken te hebben dan stroomop varende schepen (zie tabellen 8.1...8.4). Dat wil dus zeggen, dat om dezelfde relatieve snelheid te halen stroomop varende schepen een lager motorvermogen nodig hebben dan stroomaf varende schepen. Een mogelijke verklaring voor dit verschijnsel wordt in aanhangsel 3 gegeven. Het effect ligt in de orde van grootte van  $0,15 \ge 0,4 \text{ m/s}$  ( $0,5 \ge 1,5 \text{ km/h}$ ).

Concluderend kan worden gesteld dat stroomaf varende schepen bij lagere relatieve scheepssnelheden schade aan de stortsteen veroorzaken dan stroomop varende schepen. Omdat stroomop varende schepen bij hetzelfde motorvermogen als stroomaf varende schepen een wat hogere relatieve snelheid kunnen bereiken, wordt het feitelijke verschil in schade tussen stroomop en stroomaf varende schepen wat kleiner dan uit de figuren 33...37 zou blijken. De invloed van debieten door het kanaal op de schade is dus zeer beperkt voor zowel Rijn-Hernekanaalschepen als duweenheden. Stroomaf varende schepen geven de grootste kans op beschadiging van de stortsteen.

# 5.2.6 Invloed van de plaats in het dwarsprofiel

Uit de proeven blijkt duidelijk, dat de schade aan de taludverdediging bij lagere snelheden optreedt, naarmate het schip dichter langs de oever vaart (zie tabellen 8.1...8.4 en figuren 33...37). Daarnaast bestaat echter het effect, dat de snelheid van zelfvarende schepen dichtbij de oever lager ligt dan (met hetzelfde vermogen) op grotere afstand van de oever varend. Om de invloed van beide factoren te vergelijken is in tabel 9 voor verschillende plaatsen in het dwarsprofiel de snelheid, waarbij een bepaalde schade optreedt, weergegeven als percentage van de grenssnelheid en als percentage van de scheepssnelheid bij een bepaald toerental. Uit de tabel blijkt, dat in het algemeen beide percentages afnemen, naarmate het schip dichter langs de taluds vaart. Met andere woorden: de schade zal in het algemeen toenemen als het schip dichter bij de oever komt.

#### 5.2.7 Invloed van de waterstand in het kanaal

Wanneer de waterstand stijgt, neemt de snelheid van de schepen bij eenzelfde vermogen toe. Maar ook de grenssnelheid neemt toe bij stijgende waterstanden. Wordt het natte profiel van de vaarweg erg groot ten opzichte van de scheepsdoorsnede, dan neemt de in de praktijk door het motorschip bij gelijkblijvend motorvermogen behaalde snelheid nauwelijks verder toe. Deze snelheid wordt dan in hoofdzaak bepaald door het geïnstalleerde motorvermogen.

Uit tabel 9 blijkt, dat bij waterstanden van N.A.P. en hoger in het algemeen een hoger percentage van de grenssnelheid benodigd is om een bepaalde schade te bereiken, naarmate de waterstand hoger is. Uit de laatste 6 kolommen van deze tabel (waarin de snelheid waartoe het schip werd aangesleept, zodat een bepaalde schade optrad, gegeven is als percentage van de op eigen kracht behaalde scheepssnelheid) komt deze tendens in veel sterkere mate naar voren, ook voor waterstanden beneden N.A.P. Hierbij dient opgemerkt, dat het motorvermogen van de modelboten beperkt was, zodat deze waarden een wat geflatteerd beeld geven. Al met al zou kunnen worden gesteld, dat de laagste waterstand de meest ongunstige situatie weergeeft, terwijl bij een waterstand van N.A.P. de kans op schade slechts weinig minder is.

# 5.2.8 Invloed van roer- en drifthoeken

De vaarproeven uit de voorgaande paragrafen zijn alle uitgevoerd met de scheepsas evenwijdig aan de kanaalas en een roerhoek van 0°. Een schip, dat buiten de kanaalas vaart, kan echter slechts een weg evenwijdig aan de kanaalas afleggen, indien het vaart met een zekere roer- en drifthoek. Van een gesleept schip is het niet goed mogelijk de evenwichtsroer- en drifthoek te bepalen. En daar slechts in één geval schade aan de taludverdediging optrad bij een zelfvarend schip, kon alleen voor dat geval de invloed van roer- en drifthoek op de schade worden onderzocht, door de evenwichtsroeren drifthoek vrijvarend te bepalen.

Dat geval was - zoals eerder vermeld - de situatie, waarin de geladen "Adriaan" op volle kracht langs de teen van het talud voer, bij een waterstand van N.A.P. - 2 m. Daarnaast is een proef genomen met een nog lagere waterstand, en wel N.A.P. - 2,25 m. De resultaten van deze proeven zijn weergegeven in tabel 10 en figuur 38. Hieruit blijkt, dat bij toenemende roerhoeken de scheepssnelheid wat afneemt, waardoor de schade aan de stortsteen minder wordt. Bij de gevonden evenwichtsdrifthoek zijn de scheepssnelheden lager dan zonder drifthoek, maar de schade blijft ongeveer gelijk. Een verklaring voor dit verschijnsel zou kunnen zijn de sterkere spiegeldaling, die aan de walkant van het achterschip zal optreden, doordat de afstand tussen wal en schip daar extra klein is bij een negatieve drifthoek (bij een negatieve drifthoek bevindt het hek van het schip zich dichter bij de oever dan de boeg). De sprong in de waterspiegel nabij het hek van het schip zal daardoor groter zijn bij een negatieve drifthoek dan bij geen drifthoek. Deze sprong in de waterspiegel is een maat voor het golfverschijnsel, dat in sterke mate de schade aan de taludverdediging blijkt te bepalen. De resultaten van deze proeven geven de indruk, dat het effect op de schade door de vermindering van de snelheid door roer- en drifthoeken gedeeltelijk wordt gecompenseerd door de versterking van de waterspiegeldaling ten gevolge van de drifthoek. De in de vorige paragrafen gegeven meetresultaten geven dus een iets te

ongunstig beeld, wanneer de schepen dicht langs het talud varen.

# 5.2.9 Invloed van de breedte van de slikvelden

Bijna alle proeven, waarbij de schade aan de taluds werd bepaald, werden uitgevoerd bij een breedte van de slikvelden van 100 m ter weerszijden van het kanaal. Daarnaast werden enige proeven gedaan met een breedte van de slikvelden van 21 m ter weerszijden van het kanaal. De resultaten van proeven met de "Vulcaan I" met 4 geladen Europa-il bakken, bij een waterstand van 1 m boven N.A.P. varende met de zijkant van de bakken boven teen talud, zijn voor beide profielen van de slikvelden gegeven in figuur 37. Voor zowel stroomop als stroomaf varende schepen blijkt dan in het geval van de smalle slikvelden schade op te treden bij lagere snelheden (zowel ten opzichte van de oever als ten opzichte van het ongestoorde water) dan in het geval van de normale slikvelden. In de situatie zonder stroom is er nauwelijks verschil geconstateerd. De invloed van de aangebrachte beperking van de breedte van de slikvelden is bij deze waterstand, ook bij stroomop en stroomaf varen, beperkt: het verschil in scheepssnelheden (t.o.v. ongestoord water) is maximaal ca. 0,5 m/s (ca. 2 km/h).

# 5.2.10 Samenvatting van de invloed van diverse factoren op de schade aan de voorgestelde taludverdediging

Directe aanval van de taludverdediging door de <u>schroefstraal</u> van de schepen treedt praktisch niet op, als het schip in zijn normale vaarpositie is (ongeveer evenwijdig aan de taluds). Zelfs bij een hoek van 45<sup>o</sup> tussen scheepsen kanaalas is praktisch geen schade geconstateerd, wanneer <u>stilliggende</u> schepen voluit draaien. Dus bij <u>varende</u> schepen, <u>waarbij de watersnelheid in</u> <u>de schroefstraal – ten opzichte van de taludverdediging – kleiner is, mag</u> worden aangenomen dat de schroefstraal geen directe schade aan de taluds zal veroorzaken. Slechts in de situatie, waarin een schip onder een grote hoek met de oever weg wil varen kan plaatselijk enige schade worden verwacht.

Wat betreft het effect van de <u>diepgang</u> van het schip, bestaat de indruk dat bij eenzelfde motorvermogen de schade ten gevolge van het voorbijvaren van een geladen schip ongeveer even groot is, als ten gevolge van een ongeladen. Op praktische gronden werd gekozen voor een meetprogramma met geladen schepen. Er is duidelijk sprake van een invloed van <u>schroefwerking</u> op de schade aan de taluds. Uit dien hoofde is in het model sprake van een wat te gunstig beeld van de schade, omdat de schepen tengevolge van hun geringe vermogen vaak aangesleept moesten worden om schade aan de taluds te kunnen constateren.

Debieten door het kanaal hebben een geringe invloed op de schade aan de stortsteen. Daar slechts over een relatief korte periode (tussen de opening van het kanaal en de voltooiing van de Oosterscheldewerken) aanzienlijke debieten door het kanaal zullen optreden, lijkt deze invloed verder van weinig belang voor de stabiliteit van de onderhavige constructie. Stroomafwaarts varende schepen geven de ongunstigste belasting.

De <u>plaats van het schip in het dwarsprofiel</u> is zeer belangrijk voor de schade aan de taludverdediging. De ongunstigste plaats is een vaarlijn zeer dicht langs de taludverdediging. De gunstigste plaats is wanneer het schip in het midden van het kanaal vaart. Beide toestanden zullen veel minder vaak voorkomen, dan de situatie waarbij het schip in het midden van zijn eigen kanaalhelft vaart. Deze toestand komt ongeveer overeen met "zijkant schip 25 m uit teen talud" (figuur 29).

Ook de waterstand in het kanaal heeft, zoals te verwachten, invloed op de schade. Daarbij zijn de laagste waterstanden het ongunstigst. Komt het water boven de slikvelden (in het model bij waterstanden boven N.A.P.) dan neemt de schade af. Voor de interpretatie van de schadegegevens lijken dan ook vooral de gevonden uitkomsten bij N.A.P. van belang, en daarnaast, voor een indruk van de invloed van ongunstige (lage) waterstanden, de uitkomsten bij N.A.P. – 2 m.

De invloed van <u>roer- en drifthoeken</u> is naar verwachting het grootst, wanneer het schip dicht langs de oever vaart. De indruk bestaat, dat deze invloed practisch te verwaarlozen is, wanneer het schip met zijn zijkant 25 m of meer uit de teen van het talud vaart. De proeven waarbij het schip dicht langs en evenwijdig aan de oever vaart, geven waarschijnlijk een wat te ongunstig beeld van de werkelijkheid.

De <u>breedte van de slikvelden</u> is vooral bij betrekkelijk hoge waterstanden van belang. Bij een versmalling van deze velden van (totaal) 200 m naar 42 m (bij een waterstand van 1 m boven deze velden) neemt de scheepssnelheid, waarbij een bepaalde schade optreedt, af met maximaal 2 km/h. De aanwezigheid van slikvelden zal dus in het algemeen een matigende invloed op de schade hebben (doordat de kanaaldoorsnede toeneemt).

# 5.2.11 Vergelijking tussen Rijn-Hernekanaalschip en duwboot "Vulcaan I" met I Europa-I bak

Het Rijn-Hernekanaalschip heeft een breedte van 9,5 m en een diepgang van 2,58 m. Een Europa-I bak heeft dezelfde breedte en (bij de hier bedoelde proeven) ongeveer dezelfde diepgang van 2,5 m. De vormgeving van boeg en hek verschilt wel in sterke mate. Daarnaast kon in het model met de duwboot een hogere maximale snelheid van het vrijvarende schip worden gehaald dan met het Rijn-Hernekanaalschip (ofwel met de duwboot kon een hoger prototypemotorvermogen worden gesimuleerd).

Wanneer de geconstateerde schade voor beide schepen wordt uitgezet tegen de scheepssnelheid (al dan niet door gedeeltelijk aanslepen bereikt), dan blijkt bij gelijke schadegetallen de snelheid van de duweenheid 0,1 à 0,25 m/s (0,4 à 0,9 km/h) hoger te liggen dan die van het Rijn-Hernekanaalschip (zie figuur 39 en tabel 13.1).

Het vermogen van de schepen kan alleen voor de vrijvarende schepen globaal worden berekend. Behoudens een enkele uitzondering werd alleen bij de langs teen talud varende schepen schade aan de stortsteen bij varen op eigen kracht geconstateerd. Gezien het zeer globale karakter van de vermogensberekening kan in die situatie niet van significante verschillen tussen beide schepen worden gesproken. Het enige geval waarbij voor beide schepen schade optreedt in een vaarpositie met een afstand van 25 m tussen teen talud en zijkant schip wekt de indruk dat het Rijn-Hernekanaalschip meer problemen voor de taludverdediging zal opleveren dan de met één Europa-I bak en gelijk motorvermogen varende duwboot.

Uit figuur 39 blijkt, dat aanzienlijke schade aan stortsteen 10/50 voor beide schepen reeds optreedt bij motorvermogens tussen 700 en 1000 pk, althans wanneer de waterstand laag is en de afstand tot de taluds gering. Bij vermogens van 800 à 1000 pk treedt in dat geval zelfs duidelijke schade aan stortsteen 50/200 op. Incidenteel kan onder deze omstandigheden zelfs een schip, dat op 25 m uit teen talud blijft, enkele stenen van stortsteen 10/50 doen verplaatsen. Samenvattend kan worden gesteld dat een duwboot, varend met 1 Europa-1 duwbak en eenzelfde motorvermogen en diepgang als een Rijn-Hernekanaalschip, ongeveer gelijke of minder schade aan de taludverdediging in de Schelde-Rijnverbinding zal geven.

#### 5.2.12 Samenvatting en enige conclusies

Bij 'volledige afsluiting van de Oosterschelde kan men verwachten, dat de normale waterstand ongeveer N.A.P. zal zijn, met een afwijking naar beneden tot N.A.P. – 1 m onder ongunstige omstandigheden. Door het kanaal zullen dan veel kleinere debieten optreden dan voor de sluiting.

Gedurende het grootste deel van de tijd zal de taludverdediging dan blootstaan aan belastingen bij waterstanden van N.A.P. tot N.A.P. – 1 m. Daarbij zullen de schepen het meest in het midden van de eigen vaargeul varen, wat ongeveer overeenkomt met de onderzochte toestand "zijkant schip 25 m uit teen talud".

In tabel 11 is een samenvatting van de schade gegeven, waarbij vier toestanden zijn weergegeven:

- A De "normale" toestand: peil N.A.P.; plaats schepen met zijkant 25 m uit teen talud; frekwentie van voorkomen het hoogst.
- B Zelfde peil: N.A.P.; maar een ongunstige plaats in het dwarsprofiel: zijkant schip langs teen talud; frekwentie van voorkomen lager.
- C Laag peil: N.A.P. 2 m, en normale vaarpositie: zijkant schip 25 m uit teen talud; komt gedurende enige jaren regelmatig voor, met ongeveer eenzelfde frekwentie van voorkomen als de "normale" toestand.
- D Laag peil: N.A.P. 2 m, en een ongunstige plaats in het dwarsprofiel: zijkant schip langs teen talud; frekwentie van voorkomen gering.

Uit de tabel blijkt, dat bij de duweenheid alleen in de gevallen B en D schade werd gevonden bij snelheden, die onder de grenssnelheid liggen. De snelheid, die nodig is om een begin van schade te veroorzaken ligt echter dicht bij de grenssnelheid. De conclusie lijkt gerechtvaardigd, dat duweenheden met 4 bakken en vermogens van 1500 à 2000 pk geen schade van betekenis aan de stortsteen zullen veroorzaken. In de volgende paragraaf (5.3) wordt nader ingegaan op duweenheden, waarvan de duwboten hogere vermogens hebben. Het RHK-schip blijkt voor de vier genoemde toestanden schade aan de stortsteen te veroorzaken bij snelheden, die beneden de grenssnelheid liggen. Bij een waterstand van N.A.P. – 2 m blijkt zelfs schade op te treden bij snelheden, die met het onderzochte modelschip (vermogen ongeveer 750 pk) worden bereikt. In de toekomst worden (zie paragraaf 2.4) voor de motorschepen vermogens tot ca. 1200 pk verwacht, met daarnaast enkele zeer grote schepen met motorvermogens die misschien wel tot 3000 pk kunnen oplopen. In ieder geval moet met de mogelijkheid van het gebruik van vermogens van ongeveer 1200 pk rekening worden gehouden, zodat uit dien hoofde in de toekomst enstiger schade dan bij het onderzoek door het vrijvarende Rijn-Hernekanaalschip werd veroorzaakt niet uitgesloten is.

In dit verband is ook de proef interessant, die met de duwboot "Vulcaan I" met één Europa-I bak (afmetingen van de bak  $70 \times 9,50 \times 2,50$  m<sup>3</sup>, van de duwboot  $38 \times 10 \times 1,80$  m<sup>3</sup>) werd uitgevoerd (zie ook paragraaf 5.2.11). Uit deze proef bleek, dat bij motorvermogens van omstreeks 1000 pk duidelijk schade aan de taludverdediging van stortsteen 50/200 optrad, terwijl de schade aan de stortsteen 10/50 zelfs aanzienlijk was voor geval D. Voor geval C werd bij dit motorvermogen enige schade aan stortsteen 10/50 geconstateerd.

De vermogens van de grotere schepen die momenteel de Nederlandse vaarwegen bevaren, zijn nog in de orde van grootte van 700-800 pk (zie paragraaf 2.4). Voordat de te verwachten grotere vermogens van 1000-1200 pk zeer frequent. voorkomen, zullen nog wel wat jaren verstrijken. In de periode, waarin in de Schelde-Rijnverbinding waterstanden van N.A.P. – 2 m kunnen worden verwacht, valt daarom geen belangrijke toename van de gevonden schade door de toenemende motorvermogens te verwachten. Voor de gevallen A en B is op langere termijn de kans niet uitgesloten, dat inderdaad snelheden, waarbij schade optreedt, worden bereikt. Voor de gevallen B en D geven de weergegeven resultaten een wat te ongunstig beeld door het niet instellen van roer- en drifthoeken. Verder kan worden gesteld, dat de schade eerder zal optreden wanneer de schepen, in plaats van op stilstaand water, stroomafwaarts varen, zoals in de eerste jaren na de opening herhaaldelijk zal voorkomen.

# 5.3 Proeven met de duwboot "Superbrousse"

Tegen het einde van het onderzoek naar de stabiliteit van de stortsteen kwam de duwboot "Superbrousse" ter beschikking waarmee zeer grote motorvermogens konden worden gesimuleerd. De schade aan de stortsteen bij de proeven, die met deze duwboot zijn uitgevoerd, is in figuren 40 en 41 gegeven als functie van scheepssnelheid en toerental van de schroeven, respectievelijk het globaal berekende prototypevermogen. De proeven zijn uitgevoerd bij een waterstand van N.A.P. en diepgangen van de duwbakken van 3,3 en 4,0 m. Uit de bovengenoemde figuren blijkt, dat onder deze omstandigheden bij vermogens van 2000 tot 4000 pk duweenheden, die dicht langs het talud varen, enige schade aan stortsteen 50/200 en belangrijke schade aan stortsteen 10/50 kunnen veroorzaken, waarbij de schade bij toenemend motorvermogen toeneemt.

Bij motorvermogens boven 4000 à 5000 pk begint ook schade op te treden, wanneer de duweenheid op 25 m uit de teen van het talud of zelfs ter plaatse van de kanaalas vaart. Bij toenemende vermogens neemt ook dan de schade verder toe.

Vooral uit de figuren 40 en 41 - maar ook uit de figuren 30...32 en 39 blijkt, dat in feite de snelheid een erg slechte grootheid is om de schade aan de stortsteen tegen uit te zetten. Immers, de schade kan sterk toenemen terwijl de snelheid nauwelijks toeneemt of zelfs afneemt. Dit verschijnsel treedt vooral op bij het (nagenoeg) bereiken van de grenssnelheid van de modelschepen, waarbij een toename van het vermogen nauwelijks resulteert in een verhoging van de snelheid, maar alleen een heviger waterbeweging tengevolge heeft (zie figuur 42).

#### 5.4 Inhaal- en passeermanoeuvres

#### 5.4.1 Tegemoetkomende duweenheden

Deze proeven werden uitgevoerd met de duweenheid "Vulcaan I" met 4 geladen Europa-II bakken (diepgang bakken 3,30 m) en de duweenheid "Vulcaan III" met 4 geladen Europa-I bakken (diepgang bakken 3,00 m). De "Vulcaan III" beschikte daarbij niet over eigen motorvermogen en werd met de meetwagen aangesleept. De "Vulcaan I" voer op eigen kracht met maximaal toerental in tegengestelde richting. De proeven werden gedaan bij de waterstanden N.A.P. en N.A.P. - 1 m. De plaats van de duweenheden was met de zijkant van de duweenheid langs de teen van het talud, respectievelijk 25 m uit de teen van het talud (foto 14).

Bij alle proeven trad eerst schade op, wanneer de "Vulcaan III" tot hoge snelheden werd aangesleept. In dat geval trad de schade ook over de gehele lengte van het talud op, dus niet speciaal ter plaatse van het punt van passeren.

#### 5.4.2 Rijn-Hernekanaalschip haalt duweenheid in en omgekeerd

Deze situatie zal op de Schelde-Rijnverbinding vermoedelijk frequent voorkomen. Doordat de beschikbare modelschepen niet voorzien waren van automatische besturing, en evenmin van een voldoende groot motorvermogen ware voorzien om zonder aanslepen schade van betekenis aan de stortsteen toe te brengen, kon het echte inhalen voor de in deze en de volgende paragraaf beschreven proeven slechts gebrekkig worden gesimuleerd.

De toestand is geschematiseerd tot het naast elkaar varen van beide schepen, op verschillende plaatsen in het dwarsprofiel, waarbij het midden van beide schepen gelijk op vaart (zie foto 13). Het effect van beide schepen, gezamenlijk opvarend, op de schade is vergeleken met de invloed van de schepen afzonderlijk. Dat is gedaan door het quotiënt te bepalen van de snelheid, waarbij een bepaalde schade optreedt, en de grenssnelheid volgens Schijf. Daarnaast is het quotiënt van de snelheid, waarbij een bepaalde schade optreedt, en de snelheid van het schip, respectievelijk van beide schepen, bij het maximale toerental bepaald. In beide gevallen blijkt ôf de Adriaan ôf de Vulcaan de ongunstigste (laagste) waarde van beide quotiënten te leveren; in geen geval werd de ongunstigste waarde voor Vulcaan 1 en Adriaan gezamenlijk gevonden. De resultaten zijn gegeven in de tabellen 12.1 en 12.2.

#### 5.4.3 Inhalen van twee duweenheden

Deze situatie zal op dit deel van de Schelde-Rijnverbinding, gezien de afstand tussen de sluizen (35 km) niet erg vaak voorkomen. Voor de proeven in het model werd gebruik gemaakt van de duweenheid "Vulcaan I" met 4 geladen Europa-II bakken (diepgang 3,30 m) en de duweenheid "Vulcaan III" met 4 geladen Europa-I bakken (diepgang 3,00 m). De laatste duweenheid beschikte niet over eigen aandrijving. Ook hier werd het quotiënt bepaald van de snelheid waarbij een bepaalde schade optreedt en de grenssnelheid volgens Schijf. Dit quotiënt was voor de "Vulcaan !" alleen lager dan voor de beide duweenheden gezamenlijk. De resultaten zijn gegeven in de tabellen 12.1 en 12.2.

# 5.4.4 Slotopmerkingen

Bij de proeven met elkaar tegenkomende duweenheden werd geconstateerd, dat het passeren van deze schepen geen aantoonbare invloed had op de schade aan de taludverdediging. Dit is niet opmerkelijk, daar de retourstromen van beide schepen ook tegengesteld zullen zijn, waardoor de stroomsnelheid naast de passerende schepen en daarmee ook de waterspiegeldaling zal afnemen.

De uitgevoerde proeven met naast elkaar varende schepen wekken de indruk, dat inhalende schepen minder gevaar voor de taludverdediging opleveren dan schepen, die alleen varen. Dit is aannemelijk te maken, doordat de gezamenlijke grenssnelheid veel lager is dan de grenssnelheid voor ieder van de schepen afzonderlijk. Hierbij moet echter wel de opmerking worden gemaakt, dat bij de aanvang van de inhaalmanoeuvre beide schepen een snelheid, hoger dan de grenssnelheid volgens Schijf voor beide schepen gezamenlijk, kunnen hebben. Het zal dan enige tijd duren, voordat de snelheid van beide schepen is afgenomen tot bovengenoemde gezamenlijke grenssnelheid. Verder zouden tijdens de inhaalmanoeuvre de schepen erg grote drifthoeken kunnen krijgen, waardoor de sprong in de waterspiegel naast het hek van het schip zou kunnen worden versterkt. Met beide mogelijkheden kon bij de uitgevoerde proeven met de bestaande outillage geen rekening worden gehouden.

# 5.5 "Kribben" op de slikvelden

Zoals al in paragraaf 3.4 werd gesteld, zijn over enige trajecten van het kanaal op de slikvelden "kribben" (op figuur 16 met 1 aangeduid) uitgebouwd van dezelfde stortsteen als voor de taludverdediging wordt gebruikt. De breedte van de slikvelden werd daarbij teruggebracht tot 21 m. Tijdens het onderzoek werd zowel met het RHK-schip "Adriaan" als met de duweenheid "Vulcaan I" door het kanaal gevaren, terwijl het debiet door het kanaal 1200 m<sup>3</sup>/s, resp. 1230 m<sup>3</sup>/s bedroeg bij waterstanden van N.A.P. + 0,5 m, resp. N.A.P. + 1,00 m. Hoewel bij aanslepen van de schepen tot boven de grenssnelheid, zoals te verwachten, aanzienlijke schade aan de taludverdediging ontstond, werd aan deze "kribben" geen schade geconstateerd.

# 5.6 Invloed van de vorm en het stuksgewicht van de stortsteen

De in het model toegepaste stortsteen (porfier) bevatte relatief veel platte, langwerpige stenen. Ter vergelijking is in het model gedurende enige proeven een proefvak van 25 m lengte (op figuur 16 met 2 aangeduid) met stenen van een meer afgeronde vorm (grind, zie foto 3) onderzocht. Ook van deze stenen is aangebracht 200 kg/m<sup>2</sup> stortsteen 10/80, waarop 400 kg/m<sup>2</sup> stortsteen 50/200. Daarnaast is - eveneens over 25 m - een proefvak met porfier steen aangebracht (op figuur 16 met 2 aangeduid), waarbij een andere gewichtsverdeling werd toegepast, namelijk 600 kg/m<sup>2</sup> stortsteen 10/50 (zie foto 3). Dit laatste proefvak werd aangebracht om te onderzoeken wat de gevolgen zijn, indien over een gedeelte van het talud ook de bovenlaag uit een kleinere fractie van de aangevoerde stortsteen mocht bestaan.

In de tabellen 3, 13.1 en 13.2 en de figuren 30, 31, 40 en 41 werd reeds een indruk gegeven van de schade, die door eenzelfde scheepspassage aan de drie verschillende taludverdedigingen kan worden aangericht. Daar het aantal proefvakken per steensoort bij deze proeven beperkt was, zijn de schadegetallen in de tabellen op gehele getallen afgerond. Een weergave in een of meer decimalen zou een onjuiste indruk van de bereikte nauwkeurigheid geven. Duidelijk is, dat tussen de stortsteen van porfier (hoekig) en grind (rond) nauwelijks verschil in schade valt te constateren. Regelmatig is ôf de schade aan het grind, ôf aan het porfier groter.

Wel blijkt, dat de afmetingen van de stortsteen – zoals verwacht mocht worden – van belang zijn voor de schade. Immers, in alle gevallen treedt aan de stortsteen 10/50 bij lagere scheepssnelheden schade op dan aan de stortsteen 50/200. Daar het totale gewicht per m<sup>2</sup> van de stortsteen voor beide gevallen gelijk is (600 kg/m<sup>2</sup>), is het niet helemaal juist alleen het aantal verplaatste steentjes te vergelijken. Een beter inzicht in de schade geeft het totale gewicht van de verplaatste steen. Een indruk hiervan wordt verkregen door het aantal verplaatste steentjes te vermenigvuldigen met het gemiddelde stuksgewicht. Dat levert het totaalgewicht van de stortsteen, dat na 3 identieke scheepspassages uit een vak van 6,25 x 6,25  $\approx$ 39 m<sup>2</sup> verplaatst. Wanneer men dat doet met de aantallen steentjes volgens tabellen 13.1 en 13.2, dan vindt men dat, wanneer van een vak van 39 m<sup>2</sup> stortsteen 10/50 achtereenvolgens minder dan 90 kg, 150 tot 600 kg en 600 tot 900 kg stortsteen wordt verplaatst, uit een even groot vak stortsteen 50/200 respectievelijk 0 kg, 100 tot 375 kg en 300 tot 600 kg stortsteen wordt verplaatst.

Verder blijkt uit de tabellen, dat bij de onderzochte gevallen een begin van schade aan de stortsteen 10/50 optreedt bij een scheepssnelheid, die ongeveer 0,5 km/h lager ligt dan die, waarbij schade aan de stortsteen 50/200 begint op te treden. Dat lijkt niet erg veel, maar uit figuur 42 blijkt dat voor een vergroting van de snelheid nabij de grenssnelheid een steeds groter vermogen nodig is. Voor het geval van de "Adriaan" (langs de teen van het talud) blijkt, om aan de stortsteen 50/200 dezelfde schade toe te brengen als aan de stortsteen 10/50, een verhoging van de snelheid van ca. 13,0 km/h naar 13,6 km/h nodig te zijn, waarvoor een vergroting van het vermogen van ca. 750 pk naar ca. 1500 pk nodig is. Het eerste vermogen komt bij diverse schepen van de huidige Nederlandse vloot voor, het tweede vermogen zal in de toekomst slechts door een beperkt aantal schepen worden gehaald.

Samenvattend kan gesteld worden, dat de vorm van de stortsteen van weinig invloed is op de schade, maar dat de toepassing van kleinere stortsteen dan 50/200 een sterke toename van de (kans op) schade zal veroorzaken.

# 5.7 Verdeling van de schade over het talud en verplaatsingsrichtingen van de stortsteen

Voor de verschillende onderzochte typen stortsteen is het totaal aantal verplaatste stenen bepaald voor alle onderzochte plaatsen van het schip en alle vaarsnelheden samen, bij de verschillende waterstanden, scheepstypen en diepgangen van de schepen. Van het aldus gevonden aantal stenen is het aandeel uit verschillende vakken bepaald in  $^{\circ}$ / $_{\circ}$  van het totale aantal verplaatste stenen. Hetzelfde is gedaan voor de verplaatsingsrichtingen, waarbij onderscheiden zijn een horizontale verplaatsingsrichting, evenwijdig aan de kanaalas en in de vaarrichting van het schip (richting H) en een neerwaartse richting (richting N, zie figuur 43). In de andere richtingen verplaatsten – behoudens enkele uitzonderingen – zo weinig stenen, dat die niet verder onderverdeeld zijn. De resultaten van deze bewerkingen zijn gegeven in tabel 14. Uit deze tabel – en de schetsen van de taludverdediging op figuur 43 – volgt dadelijk dat de schade aan de taluds voornamelijk optreedt nabij de waterspiegel. Er werd geen schade van betekenis geconstateerd in vakken, die meer dan 0,5 m boven of meer dan 2 à 2,5 m onder de (niet door scheepvaart gestoorde) waterspiegel lagen. Uit de metingen bij een waterstand van N.A.P. kan worden opgemaakt, dat de duweenheden – en met name die met diepgeladen duwbakken – een groter deel van hun schade op een diepte van meer dan 1 m onder de waterspiegel veroorzaken, dan de kleinere schepen (RHK-schip en onderzoekingsvaartuig).

Bij een waterstand van N.A.P. + 1 m liggen de vakken met horizontaal liggende stortsteen op de slikvelden ca. 0,5 m onder water. Het aantal verplaatste stenen uit deze vakken is dan ten opzichte van het aangrenzende vak op het talud klein. Hieruit ontstaat de indruk, dan aan horizontaal liggende stortsteen wat minder schade zou kunnen optreden dan aan de stortsteen op de taluds. Erg groot lijkt de invloed van de zwaartekracht op de schade aan de taludverdediging niet te zijn.

Onderlinge vergelijking van de plaats waar de schade bij stortsteen 50/200 van grind (rond) en porfier (hoekig) en van stortsteen 10/50 van porfier optreedt, levert geen wezenlijke verschillen tussen deze drie soorten stortsteen.

Voor alle onderscheiden combinaties van waterstand, schip en diepgang is de belangrijkste verplaatsingsrichting van de stortsteen een verplaatsing evenwijdig aan de kanaalas en in de vaarrichting van het schip. Het percentage van alle verplaatste stenen, dat in deze richting gaat, loopt van 53 tot 99 °/o. Worden alle verplaatste stenen bij alle uitgevoerde proeven in beschouwing genomen, dan verplaatst 72 °/o in deze richting. Doordat de vakken betrekkelijk groot zijn, behoeven deze verplaatsingen niet zuiver evenwijdig aan de kanaalas te zijn, maar kan een belangrijk deel van deze "horizontaal" genoemde verplaatsingen wel degelijk een component in neerwaartse (of opwaartse) richting hebben.

Behalve in "horizontale" richting gaat een aantal verplaatste stenen naar vakken, die dichter bij de kanaalas liggen, loodrecht of schuin onder de vakken waaruit de stenen afkomstig zijn ("richting N" in figuur 43 en tabel 14). Het percentage van de stenen, dat in deze richtingen wordt verplaatst, variëert – afhankelijk van waterstand, scheepstype en – diepgang en soort stortsteen – van 0 tot 38 °/o. Van alle verplaatste stenen bij alle uitgevoerde proeven is het percentage verplaatsingen in deze richting 21 °/o. In alle overige richtingen tesamen loopt het percentage verplaatste stenen – afhankelijk van waterstand, scheepstype en –diepgang en soort stortsteen – van 0 tot 41  $^{\circ}$ /o, terwijl dit voor alle waterstanden, schepen en soorten stortsteen tesamen 7  $^{\circ}$ /o is.

Het onderscheid tussen de "horizontale verplaatsingsrichting" evenwijdig aan het kanaal en in de vaarrichting van het schip, en de "neerwaartse beweging" is betrekkelijk arbitrair en in feite gebaseerd op de gekozen vakindeling van de stortsteen. Nadere detaillering van de verplaatsingsrichting – bij voorbeeld voor verschillende afstanden van de schepen tot het talud – is dan ook nauwelijks zinvol. Wel dient hier nog te worden vermeld, dat tussen stroomopwaarts en stroomafwaarts varende schepen geen opvallende verschillen in verplaatsingsrichting en oorsprong van de verplaatste stenen werden geconstateerd.

Samenvattend kan worden gesteld, dat

- de schade practisch geheel optreedt in een zone tussen 0,5 m boven en 2 m onder de (niet door scheepvaart gestoorde) waterspiegel;
- meer dan de helft van de stortsteen verplaatst in een richting, min of meer evenwijdig aan de kanaalas en in de vaarrichting van de schepen;
- een belangrijk deel van de stenen min of meer in een richting naar de kanaalas toe verplaatst;
- in de overige richtingen (van de kanaalas af, en min of meer evenwijdig aan de kanaalas, tegengesteld aan de vaarrichting van de schepen) slechts een klein deel van de stenen verplaatst;
- voor incidentele gevallen in die overige richtingen wel een belangrijk deel van de stenen kan verplaatsen (b.v. bij ongeladen RHK-schip, waterstand N.A.P., waarbij veel verplaatsingen in richtingen, van de kanaalas af, optraden).

# 6 Watersnelheden en waterspiegelveranderingen boven het onverdedigde taludgedeelte

# 6.1 Inleiding

Voor de stabiliteit van de taluds is van belang, wat er gebeurt met het onverdedigde gedeelte van het talud nabij de kanaalbodem. Om een indruk te krijgen van de daar optredende watersnelheden zijn een aantal metingen met een micromolen gedaan. Daarnaast zijn enige metingen met een golfhoogtemeter uitgevoerd. Van de snelheden werd de ontbondene, evenwijdig aan de kanaalas, gemeten op 0,4 m boven het talud en 5,0 m uit de teenlijn. In de volgende paragraaf wordt eerst ingegaan op het verschil tussen de dan gemeten en de werkelijk optredende snelheid. De waterspiegelveranderingen (golfhoogten) werden eveneens gemeten boven het talud, 5,0 m uit de teenlijn.

De snelheden boven het talud zijn afhankelijk van de volgende factoren:

- geladen of ongeladen schip;
- gedeeltelijk slepen van modelboten;
- debieten door het kanaal;
- de plaats van het schip in het dwarsprofiel;
- de waterstand in het kanaal; en
- roer- en drifthoeken.

In de paragrafen 6.3...6.8 zal een indruk worden gegeven van de invloed van deze factoren, waarna enige resultaten zullen worden besproken.

#### 6.2 Watersnelheid in richting en grootte

Zoals in de vorige paragraaf gesteld, werd bij de metingen van de snelheden boven het onverdedigde talud de ontbondene van de snelheid evenwijdig aan de kanaalas gemeten. In werkelijkheid is de richting van de watersnelheid natuurlijk niet steeds evenwijdig aan deze as. Daar tijdens het onderzoek niet kon worden beschikt over een snelheidsmeter, die de verandering van de stroomrichting voldoende snel kon volgen, is tot deze wijze van meten overgegaan. Tevoren is echter voor één geval de snelheid in grootte en richting bepaald met behulp van een micromolen, waarvan de as bij een aantal opeenvolgende gelijke vaarten verschillende hoeken met de kanaalas maakte. Met behulp van deze gegevens kon voor dit geval de resulterende snelheid in grootte en richting worden bepaald. Het resultaat is in figuur 44 gegeven. Uit deze figuur blijkt, dat de hoek tussen de stroomvector en de kanaalas vóór en naast het schip nergens groter is dan ca. 15°. Alleen juist achter het schip treden op de plaats waar de meting plaatsvond grotere hoeken op (tot ca. 45°). Onder die omstandigheden kunnen de optredende maximale watersnelheden aldaar dan ook belangrijk (wel tot 30  $^{\circ}$ /o) groter zijn dan de (gemeten) ontbondene van de snelheid.

Op grond van deze meting is besloten, verder alleen de ontbondene van de watersnelheid evenwijdig aan de kanaalas te meten. Achter het schip, waar hogere snelheden kunnen worden verwacht dan de op deze wijze gemeten snelheden, is de snelheidsvector tegen de taludhelling op gericht – dus tegengesteld aan de zwaartekracht. Voor de stortsteen lijkt dat, mede gezien de in het vorige hoofdstuk gevonden verplaatsingsrichting, geen ongunstige situatie. Voor de stabiliteit van het onverdedigde taludgedeelte zijn de hogere snelheden wel van belang. Bij de in de volgende paragrafen beschreven snelheden achter het schip, de zogenaamde volgstroom, moet dus een ca. 30 °/o hogere waarde van de volgstroom niet worden uitgesloten.

# 6.3 Geladen of ongeladen schip

In paragraaf 5.2.3 werd geconstateerd, dat voor de schade aan de stortsteen de diepgang van het schip bijna geen rol speelde. In figuur 45 is de watersnelheid boven het talud voor enige gevallen weergegeven, in figuur 51 de variatie in de waterstand.

Zowel het RHK-schip als de duweenheid hadden daarbij in ongeladen toestand een van boeg naar hek toenemende diepgang. Dit is duidelijk terug te vinden in het verloop van de retourstroom en waterspiegeldaling boven het talud. De gemiddelde waarde van beide grootheden over de lengte van de schepen is bij de ongeladen schepen (bij dezelfde motorvermogens als van de geladen schepen) duidelijk geringer dan bij de geladen schepen. De maximale waarde van retourstroom en spiegeldaling is bij het RHK-schip echter duidelijk groter voor het ongeladen schip dan voor het geladen schip. Deze grotere waarde treedt over een klein gebied nabij het hek van het schip op. Bij de duweenheid blijkt bij het onderzochte geval de grootste watersnelheid op te treden bij het geladen schip.

De meeste proeven zijn uitgevoerd met geladen schepen. In het geval van het RHK-schip zouden ongeladen schepen tot ca. 30 <sup>o</sup>/o hogere maximale waarden van de retourstroom kunnen geven, maar het gemiddelde van de retourstroom over de scheepslengte is lager dan bij het geladen schip. Voor de duweenheid lijkt eenzelfde verschijnsel op te treden, zij het dat hier de grootste waarde van spiegeldaling en retourstroom optreedt in het geval van een geladen eenheid. Bij de interpretatie van de uitgevoerde metingen moet daarom rekening worden gehouden met hogere waarden voor retourstroom en spiegeldaling, dan bij de proeven met geladen RHK-schip zijn gemeten. Die snelheden treden slechts over korte tijd (tot ca. 3 seconden) op.

# 6.4 Zelfvarend en gesleept schip

Op de figuren 46 en 52 zijn de stroomsnelheden, respectievelijk de waterspiegelveranderingen, boven de taluds gegeven voor enige gevallen met zelfvarende en gesleepte schepen.

Bij het RHK-schip is alleen nabij het hek verschil te vinden tussen het zelfvarende en gesleepte schip; de volgstroom achter het schip is duidelijk groter bij het zelfvarende schip. Spiegeldaling en retourstroom nabij het hek zijn eveneens groter bij het zelfvarende dan bij het gesleepte schip, maar de maximale waarde van deze beide grootheden over de scheepslengte blijft gelijk voor zelfvarend en gesleept schip. Voor de duweenheid geldt in grote lijnen hetzelfde, alleen bestaat hier de indruk dat het zelfvarende schip bij gelijke vaarsnelheid wel een iets grotere retourstroom kan geven. Het grootste waargenomen verschil tussen de maxima is ca.  $10^{\circ}/\circ$ . Ook de waterspiegeldaling is groter.

Wordt een schip gedeeltelijk aangesleept dan lijkt in verband met het bovenstaande (waar volledig zelfvarend met volledig gesleept is vergeleken) de invloed op retourstroom en waterspiegeldaling door dat gedeeltelijk aanslepen practisch te verwaarlozen.

# 6.5 Invloed van debieten door het kanaal

Uit figuur 47 blijkt duidelijk, dat de maximale waarde van de retourstroom boven de taluds bij stroomopvarende schepen veel groter is dan – bij dezelfde *motorvermogens* – bij schepen op stil water of stroomafvarende schepen. Stroomopvarende schepen leveren de meest ongunstige belasting van het onbeschermde onderwatertalud. Bij een waterstand van N.A.P. en een kanaaldebiet van 1090 m<sup>3</sup>/s wordt bij het RHK-schip (motorvermogen 700 à 900 pk) zelfs een maximale waarde van de retourstroom van 1,75 m/s gevonden. De waterspiegeldaling (figuur 53) wordt nauwelijks beïnvloed door het stroomop of stroomaf varen van schepen.

# 6.6 Invloed van de plaats in het dwarsprofiel

Ook de plaats van de schepen in het dwarsprofiel heeft een duidelijk aanwijsbare invloed op de waterbeweging boven het talud. Uit de figuren 48 en 54 blijkt, dat retourstroom en waterspiegeldaling toenemen, wanneer een schip - met gelijkblijvend motorvermogen - in plaats van ergens nabij het midden van zijn eigen vaarstrook dicht langs het talud gaat varen. Zulks ondanks de hogere scheepssnelheden, waarmee op grotere afstanden van het talud kan worden gevaren.

#### 6.7 Invloed van de waterstand in het kanaal

De invloed van de waterstand op de stroomsnelheden en waterspiegelveranderingen is gegeven in de figuren 49 en 55. Bij het passeren van hetzelfde schip met hetzelfde motorvermogen zijn zowel de stroomsnelheden als de waterspiegelveranderingen bij een lage waterstand duidelijk groter dan bij een hogere waterstand.

# 6.8 Invloed van roer- en drifthoeken

Ook de invloed van het al dan niet instellen van roer- en drifthoeken is onderzocht. Resultaat daarvan zijn onder meer de figuren 50 (watersnelheden) en 56 (waterspiegelveranderingen). De aangegeven hoeken zijn de evenwichtsroer- en -drifthoeken die nodig zijn om een schip een baan evenwijdig aan de kanaalas te doen volgen. Een positieve drifthoek betekent, dat het schip met de boeg dichter langs de oever vaart dan met het hek.

Voor de duwboot "Vulcaan 1" met 4 geladen Europa-II bakken werd een negatieve drifthoek gevonden bij een waterstand van N.A.P. Voor dit geval bleek de situatie zonder roer- en drifthoeken over de hele linie hogere watersnelheden en spiegelveranderingen te geven. De maxima van de retourstroom zijn hier in het geval zonder roer- en drifthoeken ongeveer 10  $^{\circ}$ /o te hoog. Met dezelfde duweenheid werd bij een waterstand van N.A.P. - 2 m een positieve drifthoek gevonden. De toestand mét roer- en drifthoeken geeft hier nabij de plaats, waar de boeg van het schip passeert, duidelijk hogere stroomsnelheden boven de onverdedigde taluds dan een scheepspassage zonder roer- en drifthoeken. De maximale waarde van de retourstroom neemt toe van 1,3 m/s (zonder roeren drifthoek) tot 1,7 m/s (mét roer- en drifthoek).

Met dezelfde duweenheid werd bij een waterstand van N.A.P. gevaren met lege bakken (diepgang boeg voorste bakken 0,75 m en hek achterste bakken 1,30 m, dus nogal heklastig). Hier zijn de verschillen tussen de situatie met en zonder roer- en drifthoeken niet groot (figuren 50 en 56). De situatie zonder roer- en drifthoeken geeft wat grotere maxima voor retourstroom en spiegeldaling. Met het RHK-schip "Adriaan" werd bij een waterstand van N.A.P. – 2 m gevaren met en zonder roer- en drifthoeken. De verschillen in grootte zijn voor retourstroom en waterspiegeldaling te verwaarlozen klein. De volgstroom is duidelijk groter bij de situatie mét roer- en drifthoek, maar de volgstroom is in beide gevallen kleiner dan de retourstroom.

Tenslotte zijn met het RHK-schip voor één geval (het schip varend langs de teen van het talud, waterstand N.A.P. - 2 m) wat meer uitgebreide proeven gedaan. De resultaten daarvan zijn gegeven in tabel 15 en figuur 57. Uit de twee bovenste grafieken van figuur 57 blijkt, dat in het algemeen een verhoging van de scheepssnelheid een vergroting van de maxima van waterspiegeldaling en retourstroom tengevolge heeft. Uit de beide onderste figuren ontstaat de indruk, dat de scheepssnelheid bij toenemende roerhoeken afneemt, en dat bij gelijke roerhoeken er niet zo'n verband tussen scheepssnelheid en drifthoek lijkt te bestaan.

Verder blijkt uit de overige grafieken op figuur 57, dat een vergroting van de drifthoek een vergroting van de maximale waarden van retourstroom en spiegeldaling veroorzaakt, terwijl een vergroting van de roerhoek het omgekeerde gevolg heeft. Deze resultaten zijn in goede overeenstemming met die uit paragraaf 5.2.8, waar gesteld werd dat door een uitslag van het roer de scheepsweerstand toeneemt en daardoor de snelheid wat afneemt, waardoor ook waterspiegeldaling en retourstroomsnelheid kunnen afnemen. Door een toename van de drifthoek verandert plaatselijk het beschikbare doorstromingsprofiel sterk, waardoor over een deel van de scheepslengte een toename van retourstroom en waterspiegeldaling kan optreden. Beide invloeden kunnen elkaar tegenwerken, waardoor in veel gevallen de maximale stroomsnelheid en spiegeldaling door het varen met evenwichtsroer- en -drifthoek nauwelijks verschillen van die bij varen zonder roeren drifthoeken.

#### 6.9 Samenvatting van de verschillende invloeden

In paragraaf 6.3 werd geconstateerd, dat het geladen RHK-schipitot ca. 30 <sup>o</sup>/o lagere maximale waarden van de retourstroom gaf dan het ongeladen RHK-schip, terwijl voor de duweenheid de proeven met geladen schip geen resultaten opleverden die sterk van die met een ongeladen duweenheid verschilden.

Hoewel het gedeeltelijk gesleepte schip volgens paragraaf 6.4 waarschijnlijk wat te lage waarden voor retourstroom en spiegeldaling kan geven, is de afwijking zo gering dat deze invloed verder te verwaarlozen lijkt, wanneer het gaat om de grootte van retourstroom en spiegeldaling boven de taluds.

Voor het RHK-schip blijkt het varen met de evenwichtsroer- en -drifthoek geen grote verschillen op te leveren met het varen zonder deze hoeken. Alleen de grootte van de volgstroom boven de taluds is groter bij instelling van deze hoeken. Maar de grootte van deze volgstroom is boven het onverdedigde gedeelte van het talud duidelijk kleiner dan de retourstroom, zodat voor de stabiliteit van dit gedeelte de resultaten van de vaarproeven zonder roer- en drifthoeken goed bruikbaar lijken.

Voor de duwboot "Vulcaan 1" met 4 geladen bakken bleek bij een waterstand van N.A.P. - 2 m, waarbij een positieve drifthoek optrad, dat de watersnelheden en spiegeldalingen juist voorbij de boeg van de voorste bakken duidelijk groter waren dan wanneer geen drifthoek aanwezig was. Dezelfde duweenheid bleek bij N.A.P. een negatieve evenwichtsdrifthoek nodig te hebben. Daarbij bleef de spiegeldaling en retourstroom kleiner dan in de situatie zonder roeren drifthoek. Met ongeladen bakken, en eveneens bij N.A.P., werd een practisch gelijk maximum van de retourstroom gevonden bij varen met en zonder roer- en drifthoek.

Bij aanwezigheid van een doorgaande stroming door het kanaal treedt de ongunstigste situatie voor het onverdedigde talud op wanneer de schepen tegen de stroom op varen. Verder is de situatie het ongunstigst wanneer de schepen dicht langs de kant varen, en wanneer de waterstand in het kanaal laag is. Daar gedurende enige jaren bijna dagelijks grote debieten door het kanaal zullen optreden, al dan niet gecombineerd met lage waterstanden, is vooral in de beginperiode het gevaar van aantasting van de onverdedigde taludgedeelten groot.

Op enige resultaten van snelheidsmetingen en spiegeldalingen wordt in de volgende paragraaf nader ingegaan. Deze proeven zijn meest uitgevoerd met geladen RHK-schepen en duweenheden, met roer- en drifthoeken van 0 graden en in veel gevallen gedeeltelijk aangesleept. Daarmee wordt een redelijk beeld gegeven van de in de praktijk met deze schepen te verwachten watersnelheden (ontbonden in de richting evenwijdig aan de kanaalas) en waterspiegelveranderingen. Maar er dient wel rekening mee te worden houden, dat een ongeladen RHK-schip nabij het hek van het schip tot ongeveer 30 °/o hogere waarden van de retourstroom kan geven. Verder worden bij een geladen duweenheid, die dicht langs het talud vaart bij een waterstand van N.A.P. – 2 m, ongeveer 35 <sup>o</sup>/o hogere waarden van de retourstroom boven het talud niet uitgesloten geacht, indien wél met de evenwichtsroer- en -drifthoek wordt gevaren. De werkelijk optredende snelheden kunnen tenslotte groter zijn, dan geldt voor de hierboven bedoelde snelheden, ontbonden in de richting evenwijdig aan de kanaalas.

#### 6.10 Belangrijkste resultaten en conclusies

Uit de vorige paragrafen is duidelijk, dat de ongunstigste omstandigheden voor het onverdedigde taludgedeelte zullen optreden bij lage waterstanden en stroomop varende schepen. Voor het RHK-schip zijn de resultaten van snelheidsmetingen boven het talud bij N.A.P. en N.A.P. - 2 m gegeven voor de situatie waarin het schip ongeveer in het midden van de eigen kanaalhelft vaart en die, waarbij het schip met de zijkant langs de teen van het talud vaart (zie figuur 58 en 59). Uit deze resultaten ontstaat de indruk dat een grove benadering van de retourstroomsnelheden bij een stroomop varend schip mogelijk is, door de gemiddelde watersnelheid tengevolge van het getij en de retourstroom van dit schip op stil water, onder overigens ongewijzigde omstandigheden, op te tellen. Met de duweenheid "Vulcaan I" zijn dan ook alleen situaties zonder kanaaldebieten onderzocht. Het schip is verder niet aangesleept tot snelheden, die op eigen kracht niet konden worden gehaald. De met de geladen duweenheid gevonden watersnelheden lagen echter een weinig hoger dan die bij het RHK-schip. Aangenomen kan worden dat ook voor stroomop varende duweenheiden hetzelfde zal gelden.

Men kan voor het onverdedigde talud, zoals al eerder vermeld, twee perioden onderscheiden: die periode met getijden en waterstanden van N.A.P. + 2 m tot N.A.P. – 2 m, en de periode na voltooiing van de Oosterscheidewerken waarin geen getijstroom meer te verwachten is en de waterstand normaal niet onder N.A.P. – 1 m zal dalen.

In de periode met getijwerking moeten dagelijks watersnelheden in de orde van 1,5 m/s tot 2,0 m/s worden verwacht zowel veroorzaakt door RHK-schepen als duweenheden (bij vermogens van de duwboot tot ca. 2000 pk) (zie figuur 60). Bij een combinatie van een lage waterstand met een groot debiet en scheepvaart dicht langs het talud kunnen snelheden tot bijna 2,5 m/s worden verwacht. Daarbij is dan nog geen rekening gehouden met de invloed van roer- en drifthoeken (duweenheid) en eventueel ongeladen schepen (RHK-schip), waardoor de toestand zelfs ongunstiger kan worden. Bij duweenheden, waarvan de duwboten met een veel groter vermogen varen, kunnen nog grotere watersnelheden boven het onverdedigde taludgedeelte optreden. Een geladen duweenheid met 4 bakken en voortbewogen door een duwboot met een motorvermogen van ca. 7000 pk bleek bijvoorbeeld, varende in een "normale" vaarpositie (zijkant schip 25 m uit teen talud) op stil water watersnelheden tot ruim 2 m/s te veroorzaken (zie figuur 61). Vergeleken hierbij zijn de watersnelheden, die worden veroorzaakt door kleine schepen met een groot vermogen betrekkelijk gering. Alleen wanneer deze schepen met hun volle vermogen dicht langs het talud varen en tevens de waterstand laag (N.A.P. - 2 m) is, zijn bij vermogens van meer dan 500 pk snelheden boven de 1,0 a 1,5 m/s te verwachten (zie figuur 62). Deze snelheden treden daarbij slechts over een uitermate korte periode op (vergelijk bijvooorbeeld figuur 62 met figuur 61).

Na voltooiing van de Oosterscheldewerken zal de toestand veel gunstiger worden. Maar ook dan moet nog worden gerekend op snelheden van ca. 0,8 m/s boven het talud met de thans gangbare schepen, wanneer die ongeveer in het midden van de eigen vaarstrook varen. Motorschepen met een veel hoger vermogen zullen onder overigens gelijke omstandigheden maximale watersnelheden van 1,0 a 1,3 m/s kunnen veroorzaken.

Varen motorschepen zeer dicht langs de taluds (zijkant schip langs teen talud), dan worden voor de bovengenoemde gevallen waarden gevonden van respectievelijk 1,0 à 1,1 m/s (huidige vloot) en 1,3 à 1,5 m/s (verdubbeling motorvermogen). Zeer sterke duwboten (vermogens boven 6000 pk) met 4 duwbakken kunnen zelfs in een normale vaarpositie snelheden tot 2 m/s veroorzaken. De snelheden in de periode met getijbeweging zijn dermate hoog, dat welhaast zeker transport van bodemmateriaal zal plaatsvinden. Hoe het dwarsprofiel er na enige tijd uit zal zien, is echter in het model niet na te gaan. Maar de mogelijkheid van ernstige schade aan de taludverdediging door "ondergraving" van het kraagstuk lijkt bepaald niet uitgesloten.

Na voltooiing van de Oosterscheldewerken nemen de snelheden boven het onverdedigde talud af. Maar ook dan zijn watersnelheden groter dan 1 m/s te verwachten en snelheden tot 1,5 m/s en zelfs tot 2 m/s niet uitgesloten. Hoewel in mindere mate, gelden dezelfde conclusies als voor de periode waarin wel getijden optreden. Alleen is dan de kans op langstransport van het bodemmateriaal over grote afstanden veel kleiner. De slikvelden liggen in het model op N.A.P. In verband met de afmetingen van de micromolens en de te verwachten waterspiegeldalingen zijn de metingen uitgevoerd bij een waterstand van N.A.P. + 1 m. Gevaren is met het RHK-schip "Adriaan", diepgang 2,58 m, en met de duweenheid "Vulcaan I" met 4 Europa-II bakken, diepgang 3,30 m. Voor een vaart zijn in figuur 63 de gemeten watersnelheden op 40 cm boven het slikveld weergegeven in een aantal punten, verdeeld over de breedte van het slikveld. In figuur 64 zijn de waterspiegelveranderingen te zien. Verder zijn voor de onderzochte toestanden de grootste waarden van de boven de slikvelden gemeten watersnelheden en waterspiegelveranderingen opgenomen in tabel 16.

Wanneer geen debiet door het kanaal optreedt, blijken de snelheden bij een passage van de "Adriaan" beperkt te blijven tot ongeveer 0,5 m/s, ook als het schip tot snelheden wordt aangesleept, die ver liggen boven de snelheid, die op eigen kracht (ca. 750 pk) bereikt werd. Vaart het schip stroomop (kanaaldebiet 1230 m<sup>3</sup>/s), dan kan plaatselijk de stroomsnelheid tot 0,9 m/s oplopen. Hierbij gaf aanslepen van het schip tot boven de op eigen kracht bereikte snelheid geen verhoging van de watersnelheid. Zonder scheepvaart bedroeg de watersnelheid boven de slikvelden 0,5 m/s.

Bij de duweenheid "Vulcaan I" met 4 geladen Europa-II bakken (diepgang 3,30 m) blijken zowel bij stroomaf als stroomop varen hoge snelheden boven de slikvelden op te kunnen treden (bij een debiet van 1230 m<sup>3</sup>/s door het kanaal; op stil water werden geen metingen uitgevoerd). De grootte van deze snelheden is ongeveer 1,1 m/s (zie tabel 16). Wanneer de duweenheid wordt aangesleept tot een snelheid, die nabij de grenssnelheid volgens Schijf ligt, kan deze waarde zelfs tot 1,3 m/s oplopen.

Resumerend kan worden gesteld, dat in de periode waarin debieten door het kanaal onder invloed van het getij voorkomen boven de slikvelden snelheden tot ca. 1,1 m/s kunnen voorkomen en bij hoge uitzondering misschien snelheden tot ca. 1,3 m/s. Na uitvoering van det Oosterscheldewerken zullen de snelheden onder invloed van het passeren van RHK-schepen niet belangrijk boven 0,5 m/s komen. Een op volle kracht varende duweenheid (vermogen tot ca. 2000 pk) zou hogere watersnelheden kunnen geven, wellicht tot 0,8 of 0,9 m/s. 3

Op grond van deze resultaten kan worden gesteld, dat in de periode waarin in het kanaal nog getij optreedt, erosie van materiaal van de slikvelden zeker mogelijk is. Na voltooiing van de Oosterscheldewerken wordt de toestand veel gunstiger, maar ook dan lijkt plaatselijk beweging van materiaal van de slikvelden niet uitgesloten.

#### 8 Nabeschouwing en enige resultaten van onderzoek uit de literatuur

Uit het onderzoek van de taludverdediging, zoals voorgesteld voor de Schelde-Rijnverbinding, bleek dat de verdediging van stortsteen hoofdzakelijk werd aangetast door de waterbeweging boven het talud achter het schip.

Naast het schip is een gebied met spiegeldaling tengevolge van de retourstroom. Achter het schip is een (geringe) volgstroom in de voortbewegingsrichting van het schip, onder meer tengevolge van de schroefwerking. De overgang tussen het gebied met spiegeldaling naast het schip en dat zonder spiegeldaling achter het schip is tamelijk abrupt. Deze sprong in de waterspiegel beweegt zich voort met de scheepssnelheid. Een toename van de scheepssnelheid geeft een vergroting van de retourstroom en de waterspiegeldaling, en daardoor een grotere sprong in de waterspiegel. Bij hoge scheepssnelheden ontstaat daardoor een brekende golf boven de taluds. Het bestaan van deze "haalgolf" was uit de literatuur bekend, zie o.a. Schijf [17]. Ook bij recente Duitse proefnemingen in het Main-Donaukanaal werd dit verschijnsel geconstateerd [13]. Achter de brekende golf treden boven het talud hoge snelheden op in de richting waarin het schip vaart, Boven een deel van het talud is namelijk naast het schip geen water aanwezig, terwijl zich daar, achter het schip, wel water bevindt. Dat water kan niet door de retourstroom worden aangevoerd, maar moet van achteren komen. Dit verklaart die hoge snelheden (in de orde van grootte van de scheepssnelheid). De combinatie van de brekende golf (met daarin een sterke turbulentie en hoge watersnelheden) en de hoge watersnelheid boven het talud in de vaarrichting van het schip, kan de verplaatsing van de stenen "met het schip mee" verklaren.

Door Kuhn [9] werd in het Main-Donaukanaal onderzoek naar de stabiliteit van een zevental typen taludverdedigingen gedaan. De taludverdedigingen werden blootgesteld aan directe aanval door de schroefstraal van een motorschip (800 pk), dat van vlak bij de oever op volle kracht wegvoer. De onderzochte typen taludverdediging, die voor de Schelde-Rijnverbinding interessant zijn, waren steenmatrassen (breuksteen met afmetingen van 10 tot 12 cm, opgesloten tussen gaas) en breuksteen (met afmetingen van 20 tot 25 cm), dat zodanig met bitumen was bewerkt, dat enerzijds voldoende openingen overbleven om van een open constructie te kunnen spreken, anderzijds een goede samenhang van de stenen ontstond (zogenaamd "spikkelen"). Daarnaast werden onder andere betonzetsteen, betonplaten en open grindasfalt toegepast. Het bleek, dat de steenmatrassen niet tegen de belasting door de schroefstraal opgewassen waren, maar dat de oplossing met de "gespikkelde" breuksteen uitstekend voldeed. Van de andere materialen bleek vooral het open grindasfalt uitstekend weerstand te bieden aan de aanval van de schroefstraal.

Tenslotte nog een opmerking over de diepte onder de waterspiegel, tot waar de taludverdediging wordt voortgezet. De taludverdediging wordt in de eerste plaats nabij de waterspiegel aangevallen door scheeps- en windgolven. Maar door de hoge vermogens van de moderne, grote motorschepen en duwboten wordt de re-tourstroom steeds groter. In de Westduitse kanalen worden dan ook tegenwoordig alle taludverdedigingen tot voorbij de teen van het talud voortgezet (zie onder ander Westhaus [32]). In vele gevallen wordt daar zelfs de gehele bodem door een bekleding vastgelegd.

# LITERATUUR

- Bei deutschen Werften in Auftrag befindliche Schiffe.
   Nos. 4 (April) en 11 (November) van Schiff und Hafen, 22...24,1970...1972.
- 2 BERG, E. Une nouvelle génération des pousseurs sur le Rhin. Revue de la Navigation, 42, 1970, no. 7, Avril, pp. 236 - 242.
- 3 DICKSON, A.F. Passage de bateaux-citernes dans les chenaux. Bulletin de l'AIPCN, 34, 1960, Vol. 1, no. 51.
- 4 HAY, DUNCAN, Harbour entrances, channels and turning basins. The Dock and Harbour Authority, 1968, pp. 269 – 276.
- 5 HELM, K. Einfluss der verschiedenen Flachwasserprofile auf Widerstand und Vortrieb von Binnenschiffen, mit Rechnungsbeispiel f
  ür die Binnenwasserstrasse der Klasse IV. Hansa, 102, 1965, no. 11 pp. 1093 – 1105, no. 12 pp. 1178 – 1184.
- HEUSER, H. Technischer Wandel in der Binnenschiffahrt.
   Hansa, 107, 1970, Sondernummer "Das Schiff von Morgen", pp. 101 108.
- 7 KREY, H. Fahrt der Schiffe auf beschränktem Wasser. Berlin, Schiffbau, 1913, no. 12, 13, 16, 17.
- 8 KRIETEMEYER, J.H. Ontwikkelingen op technisch gebied bij de binnenscheepvaart. Delft, T.H., Onderafdeling Scheepsbouwkunde, 1970.
- 9 KUHN, R. Erprobung von Deckwerken durch Schiffahrtsversuche. Schiff und Hafen, 23, 1971, no. 3, März, pp. 194 – 198.
- LAP, A.J.W. Fundamentals of schip resistance and propulsion, part A, Resistance.
   Wageningen, N.S.P., 1958, Publication 129 a.
- Motortankschiff VTG 203, Schiff und Hafen, 23, 1971, no. 5, März, p. 369.

- 12 SCHÄLE, E. Der Schubverkehr auf dem Rhein und seinen Nebenwasserstrassen bis zur Donau. Schiff und Hafen, 23, 1971, no. 5, Mai, pp. 381 – 390.
- SCHÄLE, E. Wellen- und Strömungsbilder im Main-Donaukanal.
   Schiff und Hafen, 23, 1971, no. 9, September, pp. 684 687.
- 14 Scheepshoogten van vracht- en tankschepen met een laadvermogen van 250 ton en meer. 's-Gravenhage, R.W.S. dienst verkeerskunde, 1973.
- 15 Schepen van de toekomst; ontwikkeling binnenscheepvaart; mondelinge onderhouden met Dr. Ing. E. Schäle van de Versuchsanstalt für Binnenschiffbau te Duisburg, d.d. 8-9-1971; ir. J.J. Muntjewerf van het N.S.P. te Wageningen, d.d. 13-9-1971; G. van Beest ing. van N.V. "De Biesbosch" te Dordrecht, d.d. 21-9-1971; en M. Hoebée van de "Cebosine" te 's-Gravenhage en de fa. Hoebée te Dordrecht, d.d. 21-9-1971. Delft, W.L., interne bespreekrapporten M 1115, september 1971 (niet gepubliceerd).
- 16 SCHUSTER, S. Untersuchungen über Strömungs- und Widerstandsverhältnisse bei der Fahrt von Schiffen in beschränktem Wasser. Berlin, J.S.T.G., 1952, pp. 244 – 279.
- SCHIJF, J.B.
   Lisbon, XVII th International Navigation Congress, 1949, Section 1, Cummunication 2.
- 18 SCHIJF, J.B. en JANSEN, P.Ph. Rome, XVIII th International Navigation Congress, 1953, Section 1, Communication 1.
- 19 SHIELDS, A. Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. Berlin, Mitteilungen der Preuszischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, 1936, Heft 26.

- 20 Ships under construction or on order in Netherlands shipyards. Holland Shipbuilding, 20, 1972, Jan., no. 11, pp. 1 - VIII.
- 21 Slag om beperking van het motorvermogen verloren? Weekblad Schuttevaer, 84, 1973, 12 jan. no. 33, p. 5.
- 22 SOGREAH, Shell 57, Tanker transit through canals, squat tests; General report summary. Grenoble, Sogreah report R 4881, 1958.
- 23 Statistiek van de binnenvloot, 1 januari 1967...1973.
  's-Gravenhage, C.B.S., 1967...1973.
- 24 Statistiek van de internationale binnenvaart 1966, 1969 en 1971. 's-Gravenhage, C.B.S., 1968, 1971 en 1973.
- 25 Statistiek van de scheepvaartbeweging 1966, 1969 en 1972. 's-Gravenhage, C.B.S. 1967, 1970 en 1973.
- 26 Vaartuigen en scheepvaart op de Nederlandse binnenwateren. 's-Gravenhage, R.W.S., Dir. Alg. Dienst, 1970.
- 27 WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM en BOOGAARD, A. Schelde-Rijnverbinding, deel I, stroombeelden bij de Kreekraksluis, de zuidelijke en de noordelijke mond van het Eendrachtkanaal. Delft, W.L., 1972, M 1106.
- 28 WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM en KOOMAN, C., Duwvaartsluizen, Eindverslag. Delft, W.L., 1970, M 838.
- 29 WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM en KOSTER, J. Duwvaart in kanalen, deel 10, aantasting van het kanaal. Delft, W.L., 1970, M 782.
- 30 WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM en SCHIJF, J.B. Verschijnselen bij de vaart van een of twee schepen in een kanaal. Delft, W.L., 1953, M 415.
- 32 WESTHAUS, K.H., Der Strukturwandel in der Binnenschiffahrt und sein Einfluss auf den Ausbau der Binnenschiffahrtskanäle. Stuttgart, Universität Stuttgart, 1969, Dissertation.

• "



Peil: N.A.P. + 0,5 m

versmalde slikvelden







"Bart Christiaan" (geen eigen voortstuwing)



"ir. F. Wassing" (geen eigen voortstuwing)



"Rixt" (eigen voortstuwing)



"Adriaan" (eigen vaortstuwing)



Duwboat "Vulcaan I" met 4 Europa-II bakken (eigen voortstuwing)

Duwboot "Vulcaan III" met 4 Europa-t bakken (geen eigen voortstuwing)



Duwboot "Superbrousse" met 4 Europa-II bakken (eigen vaartstuwing)



Vőőr de proef



Na 75 s draaien van beide schræven met 305 anw/min, bij peil N.A.P. – 1,83 m; duwboat onder  $45^{\circ}$  met de kanaalas, achterschip tot aan teen talud

## 7. Aanval door de schroefstraal van de duwboot "Vulcaan l"





RHK-schip "Adriaan", zelfvarend, snelheid 11,2 km/h, langs teen talud, roer- en drifthoek 0°, waterstand N.A.P. - 2 m, geen debiet





RHK-schip "Adriaan", zelfvarend, snelheid 12,9 km/h, langs teen talud, roer- en drifthoek  $0^{\circ}$ , waterstand N.A.P. - 2 m, geen debiet





RHK-schip "Adriaan", extra sleepkracht, snelheid 14,0 km/h, langs teen talud, roer- en drifthoek  $0^{\circ}$ , waterstand N.A.P. - 2 m, geen debiet



Snelheid 11,2 km/h, roer- en drifthoek  $0^{\rm O}$ 



Snetheid 11,5 km/h, evenwichtsroer- en -drifthoek

RHK-schip "Adriaan", zelfvarend, langs teen talud, waterstand N.A.P. - 2 m, geen debiet

11. Aanval op het talud door de hekgolf (4)



Snelheid 12,9 km/h, roer- en drifthoek  $0^{\circ}$ 



Snelheid 12,6 km/h, evenwichtsroer- en -drifthoek

RHK-schip "Adriaan", zelfvarend, langs teen talud, waterstand N.A.P. - 2 m, geen debiet

12. Aanval op het talud door de hekgolf (5)









rijkswaterstaat

dienst getijdewateren nr. C. - 4632, 2 bibliotheok (7/0

# water lookskunnlig lakoorator hunn

aantasting van dwarsprofielen in vaarwegen Schelde - Rijnverbinding

figuren, tabellen en aanhangsels

veralag modelonderzoek

M 1115 deel IB

december 1974

Bijvoegsel bij W.L.-rapport : Aantasting van dwarsprofielen in vaarwegen Schelde-Rijnverbinding M 1115. deel IA : tekst en foto's

- deel IB : figuren, tabellen en aanhangsels.
- De aanleg van de oeververdedigingen langs de Schelde-Rijnverbinding heeft er in belangrijke mate toe bijgedragen dat in 1971 begonnen is met een modelonderzoek naar de door scheepvaart veroorzaakte waterbeweging en de invloed hiervan op taludverdedigingen.

llet onderzoek heeft zich uiteraard in eerste instantie gericht op de beantwoording van vragen die direct met de werken ten behoeve van de Schelde-Rijnverbinding samenhingen. De stabiliteit van de breuksteen op de taluds van het gedeelte van de Schelde-Rijnverbinding door de Eendracht vormde hierbij een van de belangrijkste punten van onderzoek.

Behalve de resultaten van het onderzoek wordt in het rapport ook ingegaan op de in de toekomst te verwachten ontwikkeling in de binnenscheepvaart. Deze ontwikkeling is een van de bepalen factoren bij het ontwerp van nieuwe binnenscheepvaartwegen en de dimensionering van de taludverdediging hiervan.

De in het rapport, in hoofdstuk 1.2, gegeven samenvatting van het onderzoek geeft dezerzijds geen aanleiding tot opmerkingen.

- 2. Bij de dimensionering van een taludverdediging langs een scheepvaartweg spelen een aantal factoren een rol. De belangrijkste daarvan zijn:
  a. De grootte van de natte doorsnede en de vorm van het kanaalprofiel.
  b. De meest frekwent voorkomende of in de toekomst te verwachten
  - scheepstypen qua afmetingen en vorm.
  - c. De waterdiepte in het kanaal t.o.v. de diepgang van de diverse scheepstypen.
  - d. De plaats van de schepen in het dwarsprofiel.
  - e. Het geïnstalleerde motorvermoger in de schepen en het percentage dat hiervan gebruikt wordt tijdens de vaart in het kanaal. De grenssnelheid (theorie van Schijf) van het schip in het desbetreffende kanaalprofiel speelt hierbij indirekt een zoer belangrijke rol.
  - f. De aanwezigheid van een eventueel debiet in het kanaal t.g.v. getijwerking, sluisbedrijf, etc.

Een aantal van deze factoren kunnen als onafhankelijke variabelen worden beschouwd. Andere factoren liggen reeds vast op grond van andere overwegingen dan een optimalisatie, van het ontwerp voor de taludverdediging. Net name de uit nautisch oogpunt voortvloeiende eisen m.b.t. het kanaalprofiel kunnen hiertoe gerekend worden.

Een nadere beschouwing toont aan dat uiteindelijk de plaats van het schip in het dwarsprofiel en het percentage van het geïnstalleerde motorvermogen dat gebruikt wordt als voornaamste variabelen overblijven. Uit het onderzoek blijkt dat de aanval op de taludverdediging sterk varieert bij variatie van juist deze twee grootheden.

Mede om het inzicht in deze problematiek te verdiepen zijn, in het kader van M 1115, de onderzoekingen naar de door scheepvaart veroorzaakte waterbeweging en de invloed hiervan op taludverdedigingen voortgezet. Een deel van de resultaten van deze onderzoekingen zijn reeds in voorlopige vorm, in informaties (M 1115: "Aantasting van dwarsprofielen in vaarwegen") vastgelegd en verspreid.

Met behulp van modelonderzoek is het dus mogelijk voor verschillende kombinaties van de hiervoor genoemde factoren de aanval op de taludverdediging te bepalen. De frekwentie van voorkomen van deze kombinaties, speciaal m.b.t. de plaats van het schip in het dwarsprofiel en het motorvermogen waarmee gevaren wordt, is ochter niet nauwkeurig bekend. Hierdoor is het nu niet mogelijk om door kombinatie van beide gegevens een taludverdediging qua aanlegkosten en gekapitaliseerde onderhoudskosten te optimaliseren.

Momenteel moet derhalve t.h.v. het ontwerp van een taludverdediging noodgedwongen een zo goed mogelijke keuze gedaan worden m.b.t. de range waarin de maatgevende omstandigheden zich kunnen bevinden, waarna m.b.v. modelonderzoek de aanval op de taludverdediging hierbij kan worden bepaald. Bij een dergelijk onderzoek kan tevens onderzocht worden wat de konsekwenties (c.q. onderhoudskosten) zijn bij overschrijding van de gekozen omstandigheden.

- 2 -

Voor het ontwerp van een taludverdediging is dus van groot belang met welk motorvermogen op verschillende plaatsen in het dwarsprofiel rekening moet worden gehouden. Inzicht hierin zal vooral vanuit kennis en waarnemingen m.b.t. de prototype-situatie verkregen moeten worden.

's-Gravenhage, 2 december 1975.

bFAlroederl

(ir. W.P.A. Broeders)

rijkswaterstaat dienst getijdewateren bibliotheek grenociersweg 31 -4338 PC middelburg

# aantasting van dwarsprofielen in vaarwegen Schelde-Rijnverbinding

figuren, tabellen en aanhangsels

verslag modelonderzoek

M 1115 deel IB

december 1974

#### KORTE INHOUDSOPGAVE

#### DEEL IA: TEKST EN FOTO'S

#### SYMBOLEN

- 1 Inleiding en samenvatting
- 2 Bestaande en in de toekomst te verwachten binnenschepen, en keuze van de modelboten
- 3 Model
- 4 Theoretische grondslagen
- 5 Onderzoek naar de stabiliteit van de voorgestelde stortsteen
- 6 Watersnelheden en waterspiegelveranderingen boven het onverdedigde taludgedeelte
- 7 Watersnelheden en waterspiegelveranderingen boven de slikvelden
- 8 Nabeschouwing en enige resultaten van onderzoek uit de literatuur

#### LITERATUUR

#### FOTO'S 1 t/m 14

DEEL IB: FIGUREN, TABELLEN en AANHANGSELS

Lijst van figuren Lijst van tabellen Lijst van aanhangsels Figuren 1...64 Tabellen 1...16 Aanhangsels 1...3

#### FIGUREN

- 1 Overzicht van de Schelde-Rijnverbinding, gedeelte door de Eendracht
- 2 Overzicht van de Schelde-Rijnverbinding, nabij Sint Philipsland
- 3 Schelde-Rijnverbinding. Dwarsprofielen in prototype
- 4 Schelde-Rijnverbinding. Dwarsprofielen in prototype en model
- 5 Afmetingen van Nederlandse duwbakken per 1–1–1972
- 6 Afmetingen van duwboten en duwbakken, die omstreeks 1971 op Westduitse en Nederlandse werven in aanbouw waren
- 7 Samenstelling van de Nederlandse binnenvloot volgens laadvermogen en wijze van voortbewegen
- 8 Scheepvaartverkeer langs Lobith en Hansweert, 1966 1972
- 9 Afmetingen van de Nederlandse binnenschepen per 1-1-1973
- 10 Het motorvermogen van schepen met eigen beweegkracht
- 11 Motorschepen, die tussen 1-4-1970 en 1-4-1972 op Westduitse werven in aanbouw waren
- 12 Overzicht model
- 13 Schema zigzag-overlaat
- 14 Translatiegolven in het model van de Schelde-Rijnverbinding; geringe demping
- 15 Translatiegolven in het model van de Schelde-Rijnverbinding; sterke demping
- 16 In model toegepaste taludverdedigingen
- 17 Gewichtsverdeling toegepaste stortsteen
- 18 Lijnenplan van de duwboot "Vulcaan I"
- 19 Lijnenplan Europa-II duwbak
- 20 Hoofdafmetingen van de duwboot "Vulcaan I" met 4 Europa-II bakken
- 21 Spantvormen en hoofdafmetingen van het Rijn-Hernekanaalschip "Adriaan"
- 22 Lijnenplan van de duwboot "Superbrousse"
- 23 Hoofdafmetingen van de schepen "ir. F. Wassing" en "Bart Christiaan"
- 24 Spantvormen en hoofdafmetingen van het onderzoekingsvaartuig "Rixt"
- 25 Voorbeeld van een schadeformulier
- 26 Overgang van onbeperkt water op water met beperkte diepte
- 27 Diagram vaarsnelheid volgens Schijf ( $\alpha = 1, 0$ )
- 28 Diagram vaarsnelheid volgens Schijf ( $\alpha = 1, 1$ )
- 29 Kanaalprofiel met onderzochte plaatsen in het dwarsprofiel
- 30 Schade aan de stortsteen bij de "Rixt" (waterstand N.A.P.)
- 31 Schade aan de stortsteen bij de "Rixt" (waterstand N.A.P. 2 m)
- 32 Invloed van de waterstand en de plaats van het schip in het kanaal op de schade aan de stortsteen bij de "Rixt"
- 33 Schade aan de stortsteen bij de "Adriaan" (waterstand N.A.P.)
- 34 Schade aan de stortsteen bij de "Adriaan" (waterstand N.A.P. 2 m)

- 35 Schade aan de stortsteen bij de duwboot "Vulcaan I" met 4 geladen Europa-II bakken (waterstand N.A.P.)
- 36 Schade aan de stortsteen bij de duwboot "Vulcaan I" met 4 geladen Europa-II bakken (waterstand N.A.P. - 2 m)
- 37 Schade aan de stortsteen bij de duwboot "Vulcaan I" met 4 geladen Europa-II bakken (waterstand N.A.P. + 1 m)
- 38 Schade aan de stortsteen bij verschillende roer- en drifthoeken
- 39 Rijn-Hernekanaalschip en duwboot "Vulcaan I" met 1 Europa-I bak
- 40 Duwboot "Superbrousse" met 4 Europa-II bakken (diepgang bakken 3,3 m)
- 41 Duwboot "Superbrousse" met 4 Europa-II bakken (diepgang bakken 4,0 m)
- 42 Relatie tussen scheepssnelheid en (globaal) motorvermogen
- 43 Verdeling van de schade over het talud en verplaatsingsrichtingen van de stortsteen
- 44 Grootte en richting van de gemeten watersnelheden
- 45 Invloed van de diepgang op de waterbeweging
- 46 Invloed van het slepen op de waterbeweging
- 47 Invloed van debieten door het kanaal op de waterbeweging
- 48 Invloed van de plaats in het dwarsprofiel op de waterbeweging
- 49 Invloed van de waterstand in het kanaal op de waterbeweging
- 50 Invloed van roer- en drifthoeken op de waterbeweging
- 51 Invloed van de diepgang op de waterspiegelveranderingen
- 52 Invloed van het slepen op de waterspiegelveranderingen
- 53 Invloed van debieten door het kanaal op de waterspiegelveranderingen
- 54 Invloed van de plaats in het dwarsprofiel op de waterspiegelveranderingen
- 55 Invloed van de waterstand in het kanaal op de waterspiegelveranderingen
- 56 Invloed van roer- en drifthoeken op de waterspiegelveranderingen
- 57 Invloed van roer- en drifthoeken op de waterspiegeldaling, retourstroom en scheepssnelheid
- 58 Rijn-Hernekanaalschip. Watersnelheden boven het onverdedigde taludgedeelte
- 59 Rijn-Hernekanaalschip. Watersnelheden boven het onverdedigde taludgedeelte
- 60 Duwboot "Vulcaan I" met 4 geladen Europa-II bakken. Watersnelheden boven het onverdedigde taludgedeelte
- 61 Duwboot "Superbrousse" met 4 geladen Europa-II bakken. Watersnelheden boven het onverdedigde taludgedeelte
- 62 Onderzoekingsvaartuig "Rixt". Watersnelheden boven het onverdedigde taludgedeelte
- 63 Watersnelheden boven slikvelden en taluds
- 64 Waterspiegelveranderingen boven slikvelden en taluds

### TABELLEN

1	Gegevens van de modelboten
2	Grenssnelheden van de onderzochte schepen in de Schelde-Rijn-
	verbinding bij Tholen
3	Schade aan de stortsteen bij passeren van de "Rixt"
4	Geladen tegenover ongeladen motorschip
5	Geladen tegenover ongeladen duweenheid
6	Slepen met al dan niet draaiende schroef
7	Invloed van het schroeftoerental op de schade bij gesleept schip
8.18.4	Invloed van debieten door het kanaal op de schade
9	Invloed van de plaats in het dwarsprofiel en de waterstand op
	de schade
10	Invloed van roer- en drifthoek op de schade
11	Samenvatting van de schade
12.1 en 12.2	Invloed van inhalende schepen op de schade
13.1 en 13.2	Schade aan verschillende taludverdedigingen door eenzelfde scheeps- passage
14	Verdeling van de schade over het talud en verplaatsingsrichtingen van de stortsteen
15	Invloed van roer- en drifthoeken op watersnelheden en water- spiegelveranderingen
16	Watersnelheden en waterspiegelveranderingen boven de slikvelden

### AANHANGSELS

- Toerental en vermogen bij modelboten (inhoudsopgave, lijst symbolen, 13 blz. tekst, literatuurlijst, 6 figuren)
- 2 Schaalinvloeden volgens Weber (4 blz. tekst, 3 figuren)
- 3 De wrijvingsweerstand van een schip in stromend water (5 blz. tekst, 3 figuren)

FIGUREN










































M 1115-1 FIC







VOORBEELD WATERLOOPKUNDIG ≶N Peil: N.A.P. \_2m Boot : "Adriaan" Debiet : \_ Afstand zijkant schip tot teen talud: Om SCHADEFORMULIER Datum: 7-6-1971 Diepgang: 2,58 m LABORATORIUM Schroef: 2000 omw/min (model) Snelheid: 13,7 km/h Schadegetal  $S = 0.65 \left(=\frac{21}{32}\right)$ 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 1 - 1 1 2 **-**<u></u><u></u><u></u><u></u><u></u> 1 \_ 1 1 . 1 1 fr. <u>1</u>1 -1 1 1 11 1 \_ 1 1 Ζ 1115 占 ମ ମ ତ NU







Duweenheid "Vulcaan" in het dwarsprotiel	-
NAP+2m M H T	
NA.P-2m	
	- - -
RHK-schip"Adriaan" en kleinere modelboten in het dwarsprofiel	
NAR+2m	
NAP NAP	-
× 25m	-
	· · · · · ·
Tegemoetkomende duweenheden	
Vulcaan I+4 Europa-II bakken Vulcaan III+4 Europa-I bakken	
	-
lobgelmennen met duwenheid. Vulenen Tinschartid dess het DUKeshi	A d_1
uurdefiidigendies met anweennend "Anjoddu't judenadig goot vet KUMscull	Adrigan
	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
Inhalen van het RHK-schip"Adriaan" door de duweenheid "Vulcaan I"	
NA.P-2m NA.P	
25 m	
₩ <u>, ~ ~ ~ </u> *)	
Inhalen van de duweenheid "Vulcaan I door de duweenheid "Vulcaan III	· · ·
M'M H T	
NAP-2m NAP	
3mth as kanaal to 25m	
In een dwarsprofiel geven schepen met gelijke arcering (22, 111 of 123) de plaats weer van beide bij dezelfde proef betrokken schepen.	
KANAALPROFIEL MET ONDERZOCHTE	
PLAATSEN IN HET DWARSPROFIEL	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM M 1115-T	FIG 29






































•

.











.

and the second second

27 11 11



· · · · ·

.





















# TABELLEN

, ,

.

.

omschrijving gegevens	symbool	eenheid	duwboot Vulcaan 1	duwboot Superbrousse	R.H.Kschip Adriaan	onderzoekingsv. Rixt	2 x 2 Europa-II bakken	2 x 2 Europa-I bakken
scheepsafmetingen - lengte over alles - lengte op waterlijn - breedte over alles - diepgang (max.) - grootspantoppervlak - waterverplaatsing (max.) - natte oppervlak	L <sub>OA</sub> L <sub>WL</sub> 8 T Am ♥ ∽	m m m 2 m 3 m 2 m	38,00 37 10,00 1,80 18,0 468	35,56 34 14,45 1,83 26,4 650 540	79,95 79 9,50 2,50 23,8 1600	31,75 29 7,50 3,00 18,4 325 255	153,00 152 22,80 3,30 <sup>6)</sup> 75,4 10,800	140,00 139 19,00 3,20 60,8 7,950
schroeven - N. S. P. schroeftr. - schroeftype - aantal bladen - diameter - spoed (op 0,7 R) - spoedverhouding - ontwikkeld gestrekt bladoppervlak - schroefcirkeloppervlak - ontw. gestr. bladopp, verh. - conus-diameterverh. - bladdikte-diameterverh.	- - P0,7 P0,7 P0,7 AE AO AE AO AE AO t/D	- - m - m <sup>2</sup> m <sup>2</sup> - -	2926 Ka~3 3 1,95 1,62 0,83 1,60 3,00 0,54	4529 Ka-4 4 2,28 2,28 1,00 3,67 4,08 0,90 0,22 0,05	3499 Ka-4 1,75 1,39 0,79 1,54 2,40 0,64	4550 Ka-3 3 1,60 1,52 0,95 1,32 2,01 0,65 0,28 0,06		
<u>straalbuis</u> - type - lengte - lengte-diameterverh.	-    /D	- m -	1,45 0,75	v. Manen 19A 1,72 0,75	0,88 0,50	0,80 0,50		
<u>aantal schroeven</u> <u>proefvaartgegevens</u> - vermogen - toerental schroeven - vaarsnelheid	- N ⊓ Vs	- pk min <sup>-1</sup> m⁄s	2 1500 275 3,6 <sup>2)</sup>	3 3900 1) 220 1) 5,8 1)3)	1 680 340 4,4 <sup>4)</sup>	670 375 5, 3 <sup>5</sup> )		

1) berekend uit proefvaartgegevens van de "Pierre Brousse" met 4 Europa-II bakken, diepgang 2,5 m: (N = 1600 pk, n = 260 omw/min en V = 21 km/h)

2) in duweenheid met 2 × 2 Europa-I bakken, diepgang bakken 3 m; waterbreedte onbeperkt, waterdiepte 5 m

3) in duweenheid met 2 x 2 Europa-II bakken, diepgang 2,5 m, onbeperkt water

4) waterbreedte onbeperkt, waterdiepte 5 m

5) onbeparkt water

6) indien van een speciaal verhoogde boeg voorzien is een diepgang van 4 m mogelijk

Tabel 1 Gegevens van de modelboten

schip	schip diepgang <sup>1)</sup>		A <sub>m</sub> /F <sup>3)</sup>	B/L 4)	grenssr	nelheid	Kempfs <sup>5</sup>	laagste be grenssr	erekende nelheid
			(HAY)	(Schuster)	(Schijf)	(Krietem)	snelheid	M1115-	·I 6)
	m	m	-	-	m∕s	m∕s	m/s	m/s	km∕h
Bart Christiaan	1,15	N. A. P.	0,004	12,2	6,6	6,9	3,0	6,6	23,7
ir, F. Wassing	1,00	N. A. P2	0,008	5,2	5,4	5,6	2,1	5,4	19,3
		N.A.P.	0,005	5,8	6,5	6,9	3,4	6,5	23,3
	1,20	N.A.P.	0,006	5,7	6,4	6,9	2,9	6,4	23,1
Rixt	3,00	N.A.P2	0,033	5,2	4,6	5,6	< 1,5	4,6	16,7
(onderzoekingsvaartuig)		N.A.P.	0,020	5,8	5,9	6,9	< 1,5	5,9	21,1
Adriaan	2,58	N.A.P2	0,045	1,9	4,4	5,6	< 1,5	4,4	15,9
(Rijn-Hernekanaalschip)		N.A.P,-1,87	0,044	1,9	4,5	5,7	< 1,5	4,5	16,2
		N. A. P 1	0,035	2,0	5,1	6,3	< 1,5	5,1	18,3
	l	N.A.P.	0,028	2,1	5,7	6,9	1,5	5,7	20,4
		N.A.P.+1	0,024	4,6	6,2	7,5	1,9	6,2	22,2
		N.A.P.+2	0,020	4,7	6,7	8,0	2,3	6,7	24,0
	1,05	N, A, P, -2	0,018	1,9	5,0	5,6	< 1,5	5,0	17,8
		N, A, P,-1,87	0,018	1,9	5,0	5,7	< 1,5	5,0	18,1
		N.A.P.	0,012	2,1	6,2	6,9	2,3	6,2	22,2
duwboot met 4 Europa-II	4,00	N. A. P.	0,106	0,9	4,4	6,9	< 1,5	4,4	15,7
bakken	3,30	N. A. P2	0,138	0,8	3,3	5,6	< 1,5	3,3	11,9
		N. A. P1,87	0,134	0,8	3,4	5,7	< 1,5	3,4	12,2
		N.A.P1	0,107	0,8	4,0	6,3	< 1,5	4,0	14,4
		N.A.P.	0,087	0,9	4,6	6,9	< 1,5	4,6	16,6
		N.A.P.+1	0,073	1,9	5,2	7,5	< 1,5	5,2	18,5
	1,85	N. A. P2	0,078	0,8	4,0	5,6	< 1,5	4,0	14,2
		N.A.P.	0,049	0,9	5,2	6,9	1,9	5,2	18,8
	1,05	N.A.P2	0,044	0,8	4,4	5,6	1,6	4,4	15,9
		N, A, P.	0,028	0,9	5,7	6,9	2,9	5,7	20,4

1) Betreft de gemiddelde diepgang ("Adriaan") respectievelijk de gemiddelde diepgang van de achterste duwbakken (duweenheid).

2) De kanaalbodem ligt op N.A.P. - 6,00 m.

3)  $A_m$  is het oppervlak van het ondergedompelde grootspant (diepgang als in tweede kolom), F de natte dwarsdoorsnede van het kanaal. Indien  $A_m/F < 0.08$  dan mag eventueel de grenssnelheid volgens Krietemeyer worden aangehouden.

4) B is de kanaalbreedte op de waterspiegel, L de scheepslengte. Indien B/L groter dan 2 wordt, dan mag eventueel de grønssnelheid volgens Krietemeyer worden aangehouden.

5) De laagste scheepssnelheid, waarbij de invloed van een beperkte waterdiepte waarneembaar is.

6) Voor alle gevallen blijkt de grenssnelheid volgens Schijf lager dan die volgens Krietemeyer ;

Tabel 2 Grenssnelheden van de onderzochte schepen in de Schelde-Rijnverbinding bij Tholen

waterstand	plaats schip	<b>s</b> chroeftoerental	globaal proto-	scheep	ssnelheid	sch	schadegetal S				
	(fig. 29)		typevermogen			\$tor 50∕:	tsteen 200	stortsteen 10/50			
1						grind	porfier	porfier			
		omw/min (model)	pk	m∕ s	km∕h						
N.A.P.	Н	1800	750	5,3	19,1	0	0	0			
		2000	1250	5,4	19,6	0	0	2			
		2350	2000	5,5	19,9	0	0,04	4			
N.A.P.	Т	1550	500	4,3	15,5	0	0	1			
		1800	750	4,6	16,4	1,5	0,7	6			
		2000	1250	4,7	17,0	2,0	1,5	16			
N.A.P2 m	н	1800	750	4,1	14,9	0	0	0			
N.A.P2 m	Т	1550	500	3,2	11,5	2,5	0,7	6			
		1800	750	3,3	12,0	2,3	1,5	7			
		2000	1250	3,5	12,7	2,3	2,0	9			

Tabel 3 - Schade aan de stortsteen bij passeren van de "Ki
------------------------------------------------------------

#### kanaalpeil: N.A.P.

schip : Rijn-Hernekanaalschip "Adriaan"

plaats schip (figuur 29)	schroeftoerental 1)	diepgang 2) schip		schee	pssnelheid	schadege tal S
-	omw/min (model)	m	m∕s	km/h	% grenssnelheid	
M	2350	2,58	4,8	17,3	84	0,0
		1,05	5,6	20,3	90	0,0
м	2350	2,58	6,1	21,8	107	0,5
	(deels gesleept)	1,05	6,9	24,8	111	0,4
M	0 (gesleept)	2,58	6,1	21,8	107	0,3
		1,05	6,9	24,8	111	0,3
H	2350	2,58	4,8	17,4	84	0,0
		1,05	5,2	18,8	84	0,0
Н	2350	2,58	5,4	19,6	96	3,3
	(deels gesleept)	1,05	6,2	22,2	100	2,6
Н	0 (gesleept)	2,58	5,3	18,9	93	0,1
		1,05	6,2	22,3	100	0,2
Т	2350	2,58	4,6	16,4	80	0,0
		1,05	5,1	18,3	82	0,1
Т	2350	2,58	5,0	18,0	88	1,8
	(deels gesleept)	1,05	5,2	18,8	84	0,7
T	0 (gesleept)	2,58	5,0	18,0	88	1,1
		1,05	5,4	19,6	87	1,2
grenssnelheid v	an het s <b>ch</b> īp	2,58	5,7	20,4		
		1,05	6,2	22,2		

1) Een schroeftoerental van 2350 omw/min (model) komt overeen met een prototypevermogen in de orde van grootte van 1000 a 1500 pk

2) Betreft de gemiddelde diepgang

Schip:	Duwboat	"Vulcaan	1"	met	4	Europa-H	bakken
--------	---------	----------	----	-----	---	----------	--------

plaats schip	schroeftoerental 1)	diepgang 2)		w	aterstand N.A	A. P.		watersta	and N.A.P	2 m
(figuur 29)				schee	ossnelheid	schade-	-	scheeps	snelheid	schade~
	omw/min (model)	m	m∕s	km/h	⁰∕o grens-	geta)	m∕s	km/h	⁰∕o grens-	getal
					snelheid	S			snelheid	S
м	1800	3,30	3,6	12,8	78	-	2,8	9,9	83	1
		1,85	4,3	15,4	83	-				
		1,05	4,6	16,6	81		3,9	14,1	89	-
м	1800	3,30	5,0	18,0	108	1,8	3,6	13,0	109	2,3
	(deels gesleept)	1,85	5,9	21,4	113	2,0				
		1,05	6,1	22,0	107	2,1	4,9	17,8	112	2,6
н	1800	3,30	3,6	12,8	78	-	2,8	10,2	86	-
		1,85	4,2	15,2	81	-				1
	[	1,05	4,5	16,1	79	-	4,0	14,4	91	-
н	1800	3,30	4,8	17,1	104	1,6	3,6	13,0	109	4,4
	(deels gesleept)	1,85	5,6	20,3	108	2,0				
		1,05	6,1	22,1	107	2,9	4,7	16,9	106	3,0
Т	1800	3,30	3,3	11,7	71	-	2,6	9,5	80	-
		1,85	4,1	14,8	80	-				
		1,05	4,4	15,7	77	-	3,8	13,6	86	-
T	1800	3,30	4,5	16,2	98	5,5	3,4	12,4	104	4,0
	(deels gesleept)	1,85	5,4	19,6	104	4,4				1
		, 1,05	5,7	20,5	100	4,0	4,4	16,0	101	3,4
grenssnelheid v	van de duweenheid	3,30	4,6	16,6			3,3	11,9		
		1,85	5,2	18,8						
		1,05	5,7	20,4			4,4	15,9		

1) Een schroeftoerental van 1800 omw/min (model) komt overeen met een prototypevermogen in de orde van grootte van 1500 a 2000 pk.

2) Betreft de gemiddelde diepgang van de twee diepst geladen bakken

Tabel 5 Geladen tegen ongeladen duweenheid

kanaalpeil: N.A.P. Rijn-Hernekanaalschip "Adriaan"

plaats schip (figuur 29)	diepgang 1)	schroeftoerental 2)		scheepssnelheid	schadegetal S
	m	omw/min (model)	m∕s	km∕h	
м	2,58	2350 (deels gesleept)	6,1	21,8	0,5
		0 (gesleept)	6,1	21,8	0,3
M	1,05	2350 (deels gesleept)	6,9	24,8	0,4
		0 (gesleept)	6,9	24,8	0,3
Н	2,58	2350 (deels gesleept)	5,3	18,9	0,0
		0 (gesleept)	5,3	18,9	0,1
Н	1,05	2350 (deels gesleept)	6,2	22,2	2,6
		0 (gesleept)	6,2	22,3	0,2
T	2,58	2350 (deels gesleept)	5,0	18,0	1,8
		0 (gesleept)	5,0	18,0	1,1
T	1,05	2350 (deels gesleept)	5,2	18,8	0,7
		0 (gesleept)	5,3	18,9	0,0

1) Betreft gemiddelde diepgang

2) Een schroeftoerental van 2350 omw/min (model) komt overeen met een prototypevermogen in de orde van grootte van 1000 & 1500 pk

Tabel 6 Slepen met al dan niet draaiende schroef

kanaalpeil: N.A.P. - 2 m

Rijn-Hernekanaalschip "Adriaan", diepgang 2,58 m

plaats schip (figuur 29)	schroeftoerental 1)	sne	lheid	schadegetal S
	omw/min (model)	m∕ s	km⁄h	
Т	2350 (zelfvarend)	3,9	14,0	0,27
Т	2000 (deels gesleept)	3,9	14,0	0,18
Т	1600 (deels gesleept)	3,9	14,0	0,15
Т	1200 (deels gesleept)	3,9	14,0	0,03
Т	800 (deels gesleept)	3,9	14,0	0,00

 Een schroeftoerental van 2350 omw/min (model) komt overeen met een prototypevermogen in de orde van grootte van 1000 à 1500 pk

plaats schip	schroeftoerental 1)	schadegetal		apso	ute sche	epssnelhe	id		water	snelheid		relatiev	a scheep	ssnelheid		
(figuur 29)	en voortbeweging	S	stroor	naf	stì	water	stroc	mop	voor	schip 2)	stroor	naf	stil v	/ater	stroor	пор
	omw/min (model)		m∕s	km/h	m∕s	km/h	m∕s	km∕h	m∕s	km,∕h	m∕s	km,∕h	m∕s	km∕h	m∕s	km∕h
м	1600	-	5,4	19,3	4,1	14,9	2,6	9,4	1,4	5,2	3,9	14, 1	4,1	14,9	4,1	14,6
	2000	-	6,1	21,8	4,6	16,7	3,3	11,9	1,4	5,2	4,6	16,6	4,6	16,7	4,8	17,1
M	2000	0,1	7,1	25,7	6,0	21,6	4,6	16,4	1,4	5,2	5,7	20,5	6,0	21,6	6,0	21,7
	(deels gesleept)	1,0	7,7	27,7	6,4	23,0	5,1	18,4	1,4	5,2	6,3	22,5	6,4	23,0	6,6	23,6
н	1600	-	5,2	18,7	4,1	14,6	-	-	1,4	5,2	3,8	13,5	4,1	14,6	~	-
	2000		5,9	21,2	4,6	16,7	3,3	11,7	1,4	5,2	4,4	16,0	4,6	16,7	4,7	16,9
Н	2000	0,1	6,6	23,9	5,3	18,9	4,3	15,4	1,4	5,2	5,2	18,7	5,3	18,9	5,7	20,6
	(deels gesleept)	1,0	6,8	24,6	5,3	19,1	4,4	15,7	1,4	5,2	5,4	19,4	5,3	19,1	5,8	20,9
1	1600	-	4,9	17,6	3,9	14,0	2,6	9,2	1,4	4,9	3,6	12,8	3,9	14,0	3,9	14,0
	2000	-	5,6	20,0	4,4	15,7	3,1	11,3	1,4	4,9	4,2	15,1	4,4	15,7	4,5	16,3
٦ ۲	2000	0,1	5,8	20,7	4,8	17,1	3,8	13,7	1,4	4,9	4,4	15,9	4,8	17,1	5,2	18,6
T	(deels gesleept)	1,0	5,9	21,2	4,9	17,6	3,9	14,2	1,4	4,9	4,5	16,3	4,9	17,6	5,3	19,0
grenssnelheid	van het schip		4,4	15,8	5,7	20,4	6,9	25,0	1,3	4,6	5,7	20,4	5,7	20,4	5,7	20,4

kancalpeil	l: N.A.P.,	debiet	door	het	kanaal:	0 m	1 <sup>3</sup> /s, re	esp, l	090	m³/s
schip	: Ri in-Herne	ekanaal	schip	"Ac	riaan".	diep	gang	2,58	m.	

~

1) Een schroeftoerental van 1600, resp. 2000 omw/min (model) komt overeen met een prototypevermagen in de orde van grootte van 500, resp. 750 pk.

2) Betreft de gemiddelde snelheid over de scheepsdoorsnede van het ongestoorde water, indien stroomaf of stroomop gevaren wordt.

### Tabel 8.1 Invloed van debieten door het kanaal op de schade

kanaalpeil:	N,A.F 2 m, debiet door het kandal + 0 m <sup>3</sup> /s
	N.A.P 1,87 m, debiet door het kanaal: 815 m <sup>3</sup> /s
schip :	Rijn-Hernekanaalschip "Adriaan", diepgang 2,58 m.

plaats schip	schrooftoorental 1)	schadegetal		apsolu	te sche	epssnelhe	id		etow	orsnelheid		relatiev	vo schee	scheepssnelheid stil water s	4	
(figuur 29)	en voortbeweging	\$	stro	omaf	stil	water	stro	отор		schip 1)	stro	omaf	stil	water	stro	omop
-	omw/min (model)		m∕s	km/h	m∕s	km/h	m∕s	km/h	m/s	km/h	m/s	km,∕h	m/s	km/h	m∕s	km∕h
м	1600		5,3	18,9	3,8	13,7	2,1	7,4	1,6	5,6	3,7	13,3	3,8	13,7	3,6	13,0
	2000	-	5,6	20,2	4,2	15,1	2,6	9,4	1,8	5,6	4,1	14,6	4,2	15,1	4,1	14,9
м	2000	0,1	6,2	22,3	4,6	16,5	3,3	12,0	1,6	5,6	4,6	16,7	4,6	16,5	4,9	17,6
	(deels gesleept)	1,0	6,6	23,9	4,9	17,8	3,5	12,5	1,6	5,6	5,1	18,3	4,9	17,8	5,0	18,1
н	1600	-	5,2	18,6	3,9	13,9	2,0	7,3	1,6	5,6	3,6	13,0	3,9	13,9	3,6	12,9
	2000	-	5,6	20,1	4,2	15,1	2,6	9,4	1,6	5,6	4,0	14,5	4,2	15,1	4,1	14,9
н	2000	0,1	5,8	20,8	4,2	15,2	2,9	10,6	1,6	5,6	4,2	15,2	4,2	15,2	4,5	16,2
	(deels gesleept)	1,0	5,9	21,2	4,4	16,0	3,4	12,3	1,6	5,6	4,3	15,6	4,4	16,0	5,0	17,9
ĩ	1600	~	4,6	16,7	3,4	12,4	2,0	7,2	1,4	5,2	3,2	11,5	3,4	12,4	3,4	12,4
	2000	-	5,1	18,2	3,9	14,0	2,4	8,5	1,4	5,2	3,6	13,0	3,9	14,0	3,8	13,8
T	2000	0,1	5,1	18,2	3,8	13,7	2,9	10,3	1,4	5,2	3,6	13,0	3,8	13,7	4,3	15,5
	(deels gesleept)	1,0	5,3	18,9	3,9	14,2	3,3	11,9	1,4	5,2	3,8	13,7	3,9	14,2	4,8	17,1
grenssnelheid	van het schip		6,0	21,5	4,4	15,9	3,0	10,9	1,5	5,3	4,5	16,2	4,4	15,9	4,5	16,2

٠

1) Een schroeftoerental van 1600,resp. 2000 omw/min (model) komt overeen met een prototypevermogen in de orde van groatte van 500, resp. 750 pk.

2) Betreft de gemiddelde snelheid over de scheepsdoorsnede van het ongestoorde water, indien stroomaf of stroomop gevaren wordt.

Tabel 8.2 Invloed van debieten door het kanaal op de schade

plaats schip	schroeftoerental 1)	schadegetal		absolute	scheeps	snelheid		· · · · -	woter	snelheid		relatie	ve sche	eossnelhe	id.	
(figuur 29)	en voortbeweging	S	strog	maf	stil	water	straa	mop	VOOT	schip <sup>2</sup> )	stroc	maf	stil	water	sinoo	mop
	omw/min (model)		m∕s	km,∕h	m∕s	km∕h	m∕s	km,∕h	m∕s	km∕h	m∕s	km,∕h	m∤'s	km∕h	m∕s	km∕h
м	1400	-	4,1	14,8	2,7	9,7	1,4	5,1	1,4	5,2	2,7	9,6	2,7	9,7	2,9	10,3
	1800	-	4,8	17,3	3,6	12,8	2,2	7,8	1,4	5,2	3,4	12,1	3,6	12,8	3,6	13, 1
м	1800	0,1	6,0	21,7	4,8	17,3	3,6	12,8	1,4	5,2	4,6	16,5	4,8	17,3	5,0	18,0
[	(deels gesleept)	1,0	6,3	22,7	4,9	t7,7	3,6	13,0	1,4	5,2	4,9	17,5	4,9	17,7	5,1	18,2
н	1400	-	4,1	14,8	2,9	10,3	1,4	5,0	1,4	5,2	2,7	9,6	2,9	10,3	2,8	10,2
	1800	-	4,8	17,1	3,6	12,8	2,2	7,8	1,4	5,2	3,3	11,9	3,6	12,8	3,6	13,1
Н	1800	0,1	5,8	20,8	4,6	16,6	3,4	12,1	1,4	5,2	4,3	15,6	4,6	16,6	4,8	17,3
	(deels gesleept)	1,0	5,9	21,2	4,7	16,8	3,4	12,4	1,4	5,2	4,4	16,0	4,7	16,8	4,9	17,6
Т	1400	-	3,9	13,9	2,6	9,4	1,4	5,2	1,4	4,9	2,5	9,0	2,6	9,4	2,8	10,1
l	1800	-	4,4	16,0	3,3	11,7	2,2	7,9	1,4	4,9	3,1	11,2	3,3	11,7	3,6	12,8
Ŧ	1800	0,1	5,3	18,9	4,1	14,8	3,1	11,0	1,4	4,9	3,9	14,0	4,1	14,8	4,4	15,9
	(deels gesleept)	1,0	5,4	19,3	4,3	15,5	3,4	12,2	1,4	4,9	4,0	14,4	4,3	15,5	4,8	17,1
grenssnelheid	van het schip		5,9	21.2	4,6	16,6	3,3	12,0	1,3	4,6	4,6	16,6	4,6	16,6	4,6	16,6

kanaalpeil: N.A.P., debiet door het kanaal: 0 m<sup>3</sup>/s,resp. 1090 m<sup>3</sup>/s. schip : duwboot "Vulcaan I" met 4 Europa-II bakken, diepgang 3,30 m

1) Een schroeftaerental van 1400,resp. 1800 omw/min (modei) kamt overeen met een prototypevermogen in de orde van groatte van 750,resp. 1500 a 2000 pk.

2) Betreft de gemiddelde snelheid over de scheepsdoorsnede van het ongestoarde water, indien stroomog fof stroomog gevaren wordt.

#### Tabel 8.3 Invloed van debieten door het kanaal op de schade

kanaalpeil: N.A.P. - 2 m, debiet door het kanaal;0 m<sup>3</sup>/s

N.A.P. - 1,87 m, deblet door het kanaal:815 m<sup>3</sup>/s

plaats schip	schroeftcerental 1)	schadegetal		absolut	e schee	pssnelhel	d		water	snelheid		relati	ieve sch	eepssnelh	eid	
(figuur 29)	en voortbeweging	s	stroa	stroomaf s		water	stroo	төр	voor	schip 2)	stroc	maf	stil	water	stroo	mop
	omw/min (model)		m∕s	kn/h	m∕s	km∕h	m∕s	km/h	m/s	km∕h	rr∕s	km,∕h	m/s	km,∕h	m∕s	km/h
м	1400	-	3,7	13,2	2,4	8,5	1,0	3,6	1,5	5,4	2,2	7,8	2,4	8,5	2,5	9,0
	1800	- 1	4,2	15,1	2,8	9,9	1,4	4,9	1,5	5,4	2,7	9,7	2,8	9,9	2,9	10,3
M	1800	0,1	4,8	17,1	3,4	12,1	2,3	8,3	1,5	5,4	3,3	11,7	3,4	12,1	3,8	13,7
	(deels gesleept)	1,0	4,8	17,4	3,5	12,6	2,9	10,6	1,5	5,4	3,3	12,0	3,5	12,6	4,4	16,0
Н	1400	-	3,8	13,5	2,3	8,1	0,9	3,4	1,5	5,4	2,3	8,1	2,3	8,1	2,4	8,8
	1800	-	4,2	15,1	2,8	10,1	1,4	4,9	1,5	5,4	2,7	9,7	2,8	10,1	2,9	10,3
н	1800	0,1	4,6	16,6	3,4	12,1	2,3	8,1	1,5	5,4	3,1	11,2	3,4	12,1	3,8	13,5
	(deels gesleept)	1,0	4,8	17,3	3,4	12,3	3,1	11,0	1,5	5,4	3,3	11,9	3,4	12,3	4,6	16,4
т <u>т</u>	1400	-	3,4	12,4	2,2	7,9	0,8	2,9	1,4	5,2	2,0	7,2	2,2	7,9	2,3	8,1
	1800		3,8	13,5	2,6	9,4	1,3	4,7	1,4	5,2	2,3	8,3	2,6	9,4	2,8	9,9
T	1800	0,1	4,4	15,7	3,1	11,0	2,1	7,4	1,4	5,2	2,9	10,5	3,1	11,0	3,5	12,6
	(deels gesleept)	1,0	4,6	16,6	3,3	12,0	2,2	7,9	1,4	5,2	3,1	11,3	3,3	12,0	3,6_	13,1
grenssnelheid	van het schip		4,9	17,5	3,3	11,9	1,9	6,9	1,5	5,3	3,4	12,2	3,3	11,9	3,4	12,2

schip i duwboot "Vulcaon I" met 4 Europa-II bakken, diepgang bakken 3,30 m

Een schroeftoerental van 1400, resp. 1800 omw/min (madel) komt overeen met een prototypevermogen in de orde van grootte van 750, resp. 1500 a 2000 pk.
Betreft de gemiddelde snelheid over de scheepsdoorsnede van het ongestoorde water, indien stroomof of stroomop gevaren wordt.



debiet door het kanaal 0 m<sup>3</sup>/s

schip	kanaalpeil	<u>snelhe</u> gr	<u>snelheid (schade 0,1)<sup>1)</sup></u> grenssnelheid			snelheid (schade 1,0) <sup>1)</sup> grenssnelheid			snelheid (schade 0,1) <sup>1)</sup> snelheid (max, toerental) <sup>2)</sup>			<u>snelheid (schade 1,0)<sup>1)</sup></u> snelheid (max.toerental) <sup>2)</sup>		
		M	ГН	<u>т</u>	M N	ats schip H	(fig. 29	) M	ГH	J T	ТМ	н	<del>-</del>	
"Adriaan" diepgang 2,58 m	N. A. P2m N. A. P. N. A. P. +1m N. A. P. +2m	1,04 1,06 1,05 -	0,96 0,93 1,01 >1,03	0,86 0,84 0,88 >0,94	1,12 1,13 - -	1,01 0,94 1,10 ~	0,89 0,86 0,91 -	1,09 1,29 1,35	1,01 1,13 1,32 >1,44	0,98 1,09 1,18 >1,32	1,18 1,38 - -	1,06 1,14 1,42 -	1,01 1,12 1,23 -	
"Vulcaan l" +4 Europa+li bakken diepgang 3,30 m	N.A.P2m N.A.P. N.A.P. +1m	1,02 1,04 1,11	1,02 1,00 0,88	0,92 0,89 0,90	1,06 1,07 >1,14	1,03 1,01 >1,14	1,01 0,93 0,96	1,22 1,35 1,58	1,20 1,30 1,28	1,17 1,26 1,33	1,27 1,38 >1,60	1,22 1,31 >1,60	1,28 1,32 1,50	

 snelheid (schade 0, 1, resp. 1,0) is de scheepssnelheid, waarbij een schadegetal 0, 1, resp. 1,0 aan de stortsteen optreedt snelheid (max. toerental) is de scheepssnelheid bij respectievelijk 2000 schroefomw/min (model) (ca. 750 pk prototypevermogen) voor de "Adriaan" en 1800 schroefomw/min model (1500 a 2000 pk prototypevermogen) voor de duwboot

Tabel 9 Invloed van de plaats in het dwarsprofiel en de waterstand op de schade.

plaats schip	kanaal	peil		N.A.P 2	m	N.A.P 2,25 m			
(figuur 27) en geleiding	drifthoøk	roerhoek	schei	epssnelheid	schadegetal S	sche	epssnelheid	schadegetal S	
	_		m/s	km/h		m/s	km/h		
M, aan	00	0°	4,2	15,0	0,00	4,0	14,4	0,00	
meetwagen									
T, aan	0°	0 <sup>0</sup>	3,8	13,6	0,50	3,4	12,4	0,09	
meetwagen	0 <sup>0</sup>	0°	3,7	13,4	0,27	3,6	12,8	0,21	
-	°0	0 <sup>0</sup>	3,6	13,1	0,06				
	0°	23 <sup>0</sup> 58	3,6	12,8	0,12				
	0°	45 <sup>0</sup> 58	3,1	11,2	0,00				
Τ,	ca, - 2 <sup>0</sup> 40'	variabel	3,4	12, 1	0,06	3,2	11,4	0,03	
vrijvarend									
T, aan	-2 <sup>0</sup> 40′	variabel	3,4	12,1	0,03	3,1	11,3	0,06	
meetwagen									
T, aan	-2 <sup>°</sup> 40′	00	3,6	13,0	0,39	3,3	11,7	0,21	
meetwagen	- 2 <sup>0</sup> 40'	23 <sup>0</sup> 5B	3,5	12,5	0,06	3,1	11,3	0,12	
-	-2 <sup>0</sup> 40′	45 <sup>0</sup> SB	3,0	10,8	0,00	2,8	10,1	0,03	

schip: Rijn-Hernekanaalschip "Adriaan". Toerental 2000 omw/min (komt overeen met een prototypevermogen in de orde van grootte van 750 pk).

Tabel 10 Invloed van roer- en drifthoeken op de schade

kanaalpeil: N.A.P., plaats schip: Α.

C.

kanaalpeil: N.A.P., plaats schip: Β.

met de zijkant 25 m uit de teen van het talud met de zijkant langs de teen van het talud kanaalpeil: N.A.P. - 2 m, plaats schip: met de zijkant 25 m uit de teen van het talud

kanaalpeil: N.A.P. - 2 m, plaats schip: met de zijkant langs de teen van het talud D,

schip			"Ad	riaan <sup>u 1</sup>	)		"Vulo	aan l <sup>u2</sup>	2)
voortbeweging	schadegetal S		snelh	eid (km	/h)		snelhe	id (km/	ĥ)
		А	В	С	D	A	В	С	D
zelfvarend	-	16,7	15,7	15,1	14,0 <sup>3)</sup>	12,8	11,7	10,1	9,4
deels gesleept	0,1	18,9	17,1	15,2	13,7	16,6	14,8	12,1	11,0
deels gesleept	1,0	19,1	17,6	16,0	14,2	16,8	15,5	12,3	12,0
grenssnelheid		20,4	20,4	15,9	15,9	16,6	16,6	11,9	11,9
		snelheid ( <sup>0</sup> /o grenssnelheid)				snelhe	eid ( <sup>0</sup> /o	grenssr	nelheid)
		ABCD				A	В	C	D
zelfvarend	-	82	77	95	88	77	70	85	79
deels gesleept	0,1	93	84	96	86	100	89	102	92
deels gesleept	1,0	94	86	101	89	101	93	103	101
		snelhe	eid (°⁄o	snelhe	id bij	snelhe	eid ( <sup>0</sup> /o	snelhe	id bij
			"ze	lfvareng	4")		"ze	lfvarenc	1")
		А	В	С	D	А	В	С	D
deels gesleept	0,1	113	109	101	98	130	126	120	117
deels gesleept	1,0	114	112	106	101	131	132	122	128

1) Rijn-Hernekanaalschip "Adriaan", diepgang 2,58 m, 2000 schroefomw/min (model) (vrijvarend overeenkomend met een prototypevermogen van ca. 750 pk).

2) Duwboot "Vulcaan I" met 4 Europa-II bakken, diepgang 3,30 m, 1800 schroefomw/min. (vrijvarend overeenkomend met een prototypevermogen van 1500 à 2000 pk)

3) Schadegetal 0,6

Tabel 11 Samenvatting van de schade

#### kanaalpeil: N.A.P.

schepen: V.I. = duwboot "Vulcaan I" met 4 Europa-II bakken (76,50 x 11,40 x 3,30 m<sup>3</sup>)

V.111.= duwboot "Vulcaan 111" met 4 Europa-1 bakken (70,00 x 9,50 x 3,00 m<sup>3</sup>)

A. = Rijn-Hernekanaalschip "Adriaan", diepgang 2,58 m

Schroeftoerental van de "Adriaan" steeds 2000 omw/min (model);van de "Vulcaan !" steeds 1800 omw/min (model); de "Vulcaan III" had geen eigen aandrijving, maar werd gesleept.

plaats (figuu	schip 29)	)	snelheid zelfvarend	snelheid S=0, 1	waarbij S=1.0	grenssnelheid				
	A.	V.III.	(1)	(2)	(3)	(4)	(2)/(4)	(3)/(4)	(2)/(1)	(3)/(1)
			km/h	km/h	km/h	km/h	°/o	°/o	°/o	%
Т			11,7	14,8	15,5	16,6	89	93	126	132
	м		16,7	21,6	23,0	20,4	106	113	129	138
ίτ	м		12,0	15,2	15,6	15,3	99	102	127	130
н			12,8	16,6	16,8	16,6	100	101	129	131
	Т		15,7	17,1	17,6	20,4	84	86	109	112
н	τ		12,2	13,9	14,1	15,3	91	92	114	116
	Т		15,7	17,1	17,6	20,4	84	86	109	112
м			12,8	17,3	17,7	16,6	104	107	135	138
м	Т		12,4	13,9	14,2	15,3	91	93	112	115
	н		16,7	18,9	19,1	20,4	93	94	113	114
м			12,8	17,3	17,7	16,6	104	107	135	138
м	н		12,4	14,8	15,0	15,3	97	<del>9</del> 8	119	121
T			11,7	14,8	15,5	16,6	89	93	126	132
Т		м	10,21)	13,7	14,4	13,7	100	105	134	141
Н			12,8	16,6	16,8	16,6	100	101	129	131
н		M		14,6	14,9	13,7	107	109	-	-

<sup>1)</sup> Vulcaan I, waarbij Vulcaan III gesleept.

## Tabel 12.1 Invloed van inhalende schepen op de schade

kanaalpeil: N.A.P. - 2 m respectievelijk N.A P. - 1 m

schepen: V.I. = duwboot "Vulcaan I" met 4 Europa-II bakken (76,50 x 11,40 x 3,30 m<sup>3</sup>) V.III.= duwboot "Vulcaan III" met 4 Europa-I bakken (70,00 x 9,50 x 3,00 m<sup>3</sup>)

A. = Rijn-Hernekanaalschip "Adriaan", diepgang 2,58 m

schroeftoerental van de Adriaan steeds 2000 omw/min (model), van de Vulcaan I

steeds 1800 omw/min (model); de Vulcaan III had geen eigen aandrijving , maar werd gesleept.

kanaalpeil	plaa	ts scl	nip	snelheid	snelheid	waarbij	grenssnelheid				
	(figu	ur 29	9)	zelfvarend	S=0,1	S=1,0					
	V.I.	Α.	V.111.	(1)	(2)	(3)	(4)	(2)/(4)	(3)/(4)	(2)/(1)	(3)/(1)
				km/h	km∕h	km∕h	km⁄h	%	%	°/o	⁰∕₀
NAP-2,0	ĩ			9,4	11,0	12,0	11,9	92	101	117	128
		м		15,1	16,5	17,8	15,9	104	112	109	118
	Т	М		8,6	> 11,2	>11,2	10,5	> 107	> 107	> 130	>130
NAP-2,0	T			9,4	11,0	12,0	11,9	92	101	106	128
		H'		15,1	15,2	16,0	15,9	96	101	100	107
	Т	H'		8,8	>10,3	-	10,5	> 98	-	> 117	-
NAP-2,0		Т		14,0	13,7	14,2	15,9	86	89	<b>9</b> 8	101
	м			9,9	12,1	12,6	11,9	102	106	122	127
	м	Т		10,1	9,0	11,0	10,5	86	105	90	109
NAP-2,0		н		15,1	15,2	16,0	15,9	96	101	100	107
	м			9,9	12,1	12,6	11,9	102	106	122	127
	м	н		10,3	10,4	>11,2	10,5	99	> 107	101	109
NAP-1 m	Т			9,4	11,9	13,7	12,2	<b>9</b> 8	112	127	146
	T		м	8,5	11,3	>12,6	11,4	99	> 111	133	>148
NAP-1 m	Н			11,5	14,0	14,4	12,2	115	118	122	125
	Н		M'	8,8	11,9	12,6	11,4	104	111	135	143

Tabel	12,2	Invloed	van	inhalende	schepen	ор	de	schade
		11111040	* <b>G</b> 11	in the field of th		- 1-		

kanaalpeil: N.A.P. - 2 m.

schip	plaats schip	schroeftoerental	erental     scheepssnelheid       beweging     m/s     km/h       (model)     m/s     km/h       Ifvarend)     4,2     14,9       els gesleept)     4,6     16,6       els gesleept)     4,9     17,5       Ifvarend)     4,1     14,8       els gesleept)     4,2     15,2       Ifvarend)     3,6     13,0       els gesleept)     3,8     13,7       els gesleept)     3,9     14,0       Ifvarend)     4,7     16,7       els gesleept)     4,9     17,5       els gesleept)     4,9     17,5       els gesleept)     4,9     17,5       els gesleept)     4,9     17,5       els gesleept)     4,9     17,8       ifvarend)     4,4     15,7       els gesleept)     4,5     16,2       els gesleept)     4,6     16,5       ifvarend)     3,7     13,3	id schadegetal S				
	(figuur 29)	en voortbeweging			porfier 10/50	grind 50/200	porfier 50/200	
		omw/min (model)	m∕s	km∕h		op 10/80	op 10/80	
"Adriaan" <sup>1)</sup>	м	2000 (zelfvarend)	4,2	14,9	-	-	-	
	ļ	2000 (deels gesleept)	4,6	16,6	3	-	-	
		2000 (deels gesleept)	4,9	17,5	22	5	4	
	Н	2000 (zelfvarend)	4,1	14,8	1		-	
		2000 (deels gesleept)	4,2	15,2	8	3	2	
	T	2000 (zelfvarend)	3,6	13,0	3	-	-	
		2000 (deels gesleept)	3,8	13,7	11	1	1	
		2000 (deels gesleept)	3,9	14,0	17	2	2	
"Vulcaran	M	1800 (zelfvarend)	4,7	16,7	-	-	-	
" <sup>2</sup> )		1800 (deels gesleept)	4,8	17,2	3	-	~	
		1800 (deels gesleept)	4,9	17,5	12	1	2	
		1800 (deels gesleept)	4,9	17,8	26	3	4	
	Н	1800 (zelfvarend)	4,4	15,7	1	-	-	
		1800 (deels gesleept)	4,5	16,2	7	Ī	T	
		1800 (deals gesleept)	4,6	16,5	26	4	5	
	Т	1300 (zelfvarend)	3,7	13,3	2	~	-	
		1400 (zelfvarend)	3,8	13,7	5	1	T	
		2000 (zelfvarend) 2000 (deels gesleept) 2000 (deels gesleept) 2000 (deels gesleept) 2000 (deels gesleept) 1800 (zelfvarend) 1800 (deels gesleept) 1800 (zelfvarend) 1400 (zelfvarend) 1500 (zelfvarend)	3,9	14,0	11	3	3	

1) Rijn-Hernekanaalschip "Adriaan", diepgang 2,58 m.

2) Duwboot "Vulcaan I" met 1 Europa-I bak, diepgang 2,50 m.

## Tabel 13.1 Schade aan de verschillende taludverdedigingen door eenzelfde scheepspassage

kanaalpeil: N.A.P. en N.A.P. - 2 m, geen debiet

schip : duwboot "Vulcaan I" met 4 ongeladen bakken, diepgang boeg voorste bakken 0,75 m; hek voorste bakken en boeg achterste bakken 0,80 m; en hek achterste bakken 1,30 m toerental 1800 omw/min (model) en aangesleept tot de aangegeven snelheid.

kanaalpeil	plaats schip	snelhe	id schip		schadegetal	
	(figuur 29)		Í	porfier 10/50	grind 50/200	porfier 50/200
		m/s	km/h			
N.A.P.	M	6,0	21,5	2	-	-
		6,1	22,0	8	1	2
		6,3	22,7	18	3	3
N.A.P.	н	5,7	20,5	1	-	-
		5,9	21,2	11	3	1
		6,1	22,1	25	5	3
N.A.P.	Ť	5,3	18,9	1		-
		5,5	20,0	5	1	1
	1	5,7	20,6	28	4	4
N.A.P.	grenssnelheid	5,7	20,4	-	-	-
N.A.P 2 m	M	4,8	17,1	2	-	-
		5,0	17,8	23	4	4
N.A.P 2 m	н	4,4	16,0	1	-	-
		4,7	16,9	22	4	3
N.A.P 2 m	Т	4,2	15,3	1	_	_
	Ŧ	4,4	16,0	27	2	4
N.A.P 2 m	grenssnelheid	4,4	15,9	-	-	-

Tabel 13.2 Schade aan verschillende taludverdedigingen door eenzelfde scheepspassage

						g	jevond	en verplaats	te stenen		
waterstand	schip	diepgang	stortsteen	totaal	Ŵ	/aarva	n uit	vak 1)	waarvan i	n rich:	ing 1)
		in m				(ir	n ⁰∕₀)		(ir	n °/o)	
					1	2	3	4	Н	Ν	rest
N. A. P2m	Rixt	3.0	porfier 50/200	100			14	86	87	9	4
			arind 50/200	30			21	79	93	7	
			porfier 10/50	90			41	59	99	1	
	Adrigan	2,58	porfier 50/200	690			34	66	73	16	11
		,	arind 50/200	50			34	66	68	12	20
			porfier 10/50	250			64	36	88	9	3
	Vulcaan I+	2,50	porfier 50/200	130			29	71	94	3	3
	1 Europa-1	,	arind 50/200	50			27	73	84	8	8
	duwbak		porfier 10/50	350			52	48	85	6	9
	Vulcaan I+	3,30	porfier 50/200	4320			14	86	61	37	2
	4 Europa-11	-									
	duwbakken	1,05	porfier 50/200	70			28	72	94	1	5
			grind 50/200	40			37	63	95	3	2
			porfier 10/50	280			30	70	92	3	5
N.A.P.	Rixt	3,0	porfier 50/200	50		93	7		88	10	2
			grind 50/200	10		90	10		90	10	
			porfier 10/50	100		89	11		90	7	3
	Adriaan	2,58	porfier 50/200	1560	2	94	4		82	11	7
		1,05	porfier 50/200	420	4	92	4		53	6	41
	Superbrousse	4,0	porfier 50/200	160		41	58	1	80	15	5
	+ 4 Europa-II		grind 50/200	120		59	40	1	86	12	2
	duwbakken		porfier 10/50	470		51	47	2	72	18	10
		3,3	porfier 50/200	130		58	42	0	93	4	3
			grind 50/200	100		66	34		96	4	
			porfier 10/50	440		59	40	1	87	7	6
	Vulcaan I+	3,3	porfier 50/200	1350	0	60	40		80	9	11
1	4 Europa-II										
	duwbakken	1,85	porfier 50/200	360	T	81	18		81	7	12
			grind 50/200	110	2	76	22		79	6	15
		1,05	porfier 50/200	120	3	73	24		84	7	9
			grind 50/200	50		76	24		80	6	14
			porfier 10/50	300	3	75	22		75	-	25
N. A. P. +1m	Adriaan	2,58	porfier 50/200	360	15	85	0		67	27	4
	Vulcaan 1 +										
	4 Europa-II	3,3	porfier 50/200	1250	12	87	1		61	38	1
	duwbakken						<b></b>			<b> </b>	
-	-	-	alle verplaat-	13.910					72	21	7
			singen								

٠

1)<sub>zie figuur 43</sub>

Tabel 14Verdeling van de schade over het talud en verplaatsingsrichtingen<br/>van de stortsteen

schip : Rijn-Hernekanaalschip "Adriaan"

kanaalpeil: N.A.P. - 2 m, geen debiet

plaats : zijwand schip komt juist niet boven het talud

meetpunt watersnelheden: 40 cm boven het talud op 5 m uit de teen. Gemeten zijn de snelheden evenwijdig aan de kanaatas.

meetpunt waterspiegelvariaties: boven het talud op 5 m uit de teen.

N.B. : de weergegeven waarden van retourstroom, volgstroom en spiegeldaling zijn de maxima, die tijdens de betreffende scheepspassage werden gemeten.

drifthoek	roerhoek	schroeftoerental 1)	scheepssnelheid		retourstroom	volgstroom	spiegeldaling
		omw/min (model)	m/s	km/h	m/s	m∕s	m
0 <sup>0</sup>	00	1600	3,3	11,9	1,15	0,50	0,53
-1°	0°	1600	3,3	11,9	1,02	0,47	0,40
-2°	0 <sup>0</sup>	1600	3,3	11,7	1,22	0,50	0,53
00	00	2000	3,6	12,8	1,40	0,60	0,68
0 <sup>0</sup>	30 <sup>0</sup> 58	2000	3,4	12,2	1,22	0,85	0,58
-1°	00	2000	3,8	13,6	1,58	0,76	0,90
-1 <sup>0</sup>	_30 <sup>0</sup> SB	2000	3,5	12,6	1,26	0,67	0,60
-1°10′	28 <sup>0</sup> SB	2000	3,5	12,6	1,38	0,67	0,66
~2 <sup>0</sup>	00	2000	3,7	13,3	1,73	0,58	0,95
-2 <sup>0</sup>	30°SB	2000	3,4	12,2	1,46	0,67	0,65
-2 <sup>0</sup>	40°SB	2000	3,2	11,5	1,12	0,47	0,43
0°	00	2000	4,0	14,4	1,73	0,78	0,99
		(deels gesleept)					

1) Een schroeftoerental van 1600, resp. 2000 omw/min (model) van het niet-gesleepte schip komt overeen met een prototypevermogen in de orde van grootte van 500, resp. 750 pk.

Tabel 15 Invloed van roer- en drifthoeken op watersnelheden en waterspiegelveranderingen

schip	vaarrichting	plaats schip (figuur 29)	voortbeweging	scheepssnelheid		retourstroom 3)	spiegeldaling 3)	spiegelrijzing 3)
	1			m∕s	km∕h	m/s	m	m
"Adriaan" <sup>1)</sup>	stil water	н	zelfvarend	4,4	16,0	0,32	0,17	0,10
	{		deels gesleept	5,7	20,5	0,41	0,20	0,25
		T	zelfvarend	4,4	15,9	0,40	0,10	0,20
			deels gesleept	5,0	18,0	0,55	0,15	0,35
"Adriaan"†)	stroomop	н	zelfvarend	3,6	12,8	0,77	0,17	0,15
	]	ļ	deels gesleept	5,3	19,1	0,86	0,25	0,55
		τ	zelfvarend	3,5	12,6	0,90	0,25	0,33
			deels gesleept	4,9	17,8	0,85	0,15	0,65
"Vulcaan 1" <sup>2</sup>	stroomop	н	zelfvarend	2,4	8,6	1,05	0,20	-
	1	T	zelfvarend	2,3	8,3	1,10	0,30	-
			deels gesleept	3,9	14,1	1,05	0,30	0,80
"Vulcaan (" <sup>2)</sup>	stroomaf	н	zelfvarend	4,4	15,8	0,94	0,35	0,25
		T	zelfvarend	4,3	15,6	1,05	0,25	0,25
			deels gesleept	5,4	19,5	1,30	0,35	0,60

kanaalpeil: N.A.P. + 1 m, debiet: 1230 m<sup>3</sup>/s, respectievelijk 0 m<sup>3</sup>/s,

 Rijn-Hernekanaalschip "Adriaan", diepgang 2,58 m, schroeftaerental 2000 omw/min (model) (overeenkomend met prototypevermogen van ca. 750 pk)

2) Duwboot "Vulcaan 1" met 4 Europa-11 bakken, diepgang 3,30 m, schroeftoerental 1800 omw/min (model) (overeenkomend met prototypevermogen van 1500 à 2000 pk)

3) De hiergenoemde waarden voor retourstroom, spiegeldaling en spiegelrijzing betreffende de maxima van de gemeten waarden

# AANHANGSEL 1

s .

.

, -

.

-, ,

:

۴

# TOERENTAL EN VERMOGEN BIJ MODELBOTEN

# INHOUD

# SYMBOLEN

1	Verhoging van het toerental van modelboten voor correctie van de wrij-
	vingsweerstand
1.1	Inleiding
1.2	Wrijvingsweerstand van de scheepshuid
1.3	Berekening van de schroefkracht
1.4	Berekening van de toerentaloverdrijvingsfactor
1.5	Rekenvoorbeeld
1.6	Empirische vaststelling toerentaloverdrijvingsfactor
1.7	Invloed van de grootte van de schroeven op de voortstuwing
2	Vertaling van het schroeftoerental van modelboten in prototypevermogens.
2.1	Inleiding
2.2	Empirische bepaling van het prototypevermogen uit het schroeftoerental
	van de modelboten
2.3	Rekenvoorbeelden
3	Kritische beschouwing van de gehanteerde methoden en aanbevelingen voo
	de uitvoering van onderzoek met modelboten

LITERATUUR

TABEL 1

FIGUREN 1...6

# FIGUREN

- 1 Schoenherr's lijn
- 2 Rendementskromme van een schroef Ka 4-90, P/D = 1,0
- 3 Rendementskromme van de schroeven van de in M 1115-1 gebruikte modelboten
- 4 In model gemeten volgstroomgetallen van een RHK-schip, type "Johann Welker"
- 5 In model gemeten volgstroomgetallen voor duwboten met 4 duwbakken
- 6 Toerental-snelheidsrelatie in model onder met prototypevaarten overeenkomende omstandigheden
# SYMBOLEN

.

A <sub>F</sub>	ontwikkelde gestrekte bladoppervlak van de schroef (m <sup>2</sup> )
A <sub>O</sub>	oppervlak van de schroefcirkel (m <sup>2</sup> )
ເັ	willekeurige constante (dimensieloos)
D	diameter van de schroef (m)
d	diameter van de schroefnaaf (m)
J	"advance coefficient" (dimensieloos)
Κ <sub>τ</sub>	schroefkrachtcoëfficiënt (dimensieloos)
ĸ	schroefasmomentcoëfficiënt (dimensieloos)
L	scheepslengte (m)
١	kenmerkende lengte voor de schroef m.b.t. het Reynoldsgetal voor de
	schroef (m)
N	prototypevermogen (pk)
n	toerental van de schroeven (s <sup>~1</sup> )
Р	spoed van de schroef (m)
Q	schroefasmoment (m)
R <sub>fr</sub>	wrijvingsweerstand van het schip (N)
Re	Reynoldsgetal voor de schroef volgens Gutsche (dimensieloos)
Re	Reynoldsgetal betrokken op de scheepslengte (dimensieloos)
t	zoggetal
T	schroefkracht (N)
VA	intreesnelheid van het water in de schroef (m/s)
V <sub>S</sub>	scheepssnelheid (m/s)
Ŵ	totale weerstand (N)
z	aantal bladen van de schroef (dimensieloos)
Δζ fr	toeslag voor proefvaarten op de coëfficiënt ter bepaling van de wrij-
	vingsweerstand (dimensieloos)
η	schroefrendement (dimensieloos)
ζ <sub>fr</sub>	coefficient ter bepaling van de wrijvingsweerstand (dimensieloos)
V	kinematische viscositeit (m²/s)
ρ	dichtheid van het water (kg/m <sup>3</sup> )
Ψ	volgstroomgetal (maat voor de snelheid waarmee het water achter het schip
1	met het schip meebeweegt) (dimensieloos)
ጉ	ondergedompelde oppervlak van het schip

## Toerental en vermogen bij modelboten

# 1 Verhoging van het toerental van modelboten voor correctie van de wrijvingsweerstand

### I.I Inleiding

De wrijvingsweerstand van schepen voldoet niet aan de schaalregels volgens Froude. Daardoor hebben modelboten een grotere wrijvingsweerstand dan, uitgaande van de schaalregels van Froude, uit de wrijvingsweerstand van het prototypeschip volgt. Om te voorkomen dat de snelheid van de modelboten in vergelijking tot het prototype te laag wordt, is in het onderzoek naar de aantasting van dwarsprofielen in vaarwegen, deel I, het toerental hoger genomen dan uit het prototype, gebruik makend van de schaalregels van Froude, volgt.

De grootte van de factor, waarmee het toerental van een modelschip moet worden verhoogd, kan door berekening of empirisch worden bepaald. Voor beide methoden zijn de volgende gegegens van een prototypemeting nodig: toerental van de schroeven, vermogen, scheepssnelheid en volgstroom. Daarnaast zijn een aantal schroefgegevens en/of een rendementskromme van de vrijvarende schroef (eventueel met straalbuis) nodig. Voor de empirische bepaling van de toerentaloverdrijvingsfactor is herhaling van de prototypemeting op modelschaal nodig, waarbij de afmetingen van de vaarweg en eventuele mee- of tegenstroom ook goed op schaal zijn weergegeven, en dezelfde gegevens worden gemeten als bij de prototypevaart.

## 1.2 Wrijvingsweerstand van de scheepshuid

De oudste manier om gegevens over de wrijvingsweerstand van schepen te krijgen, was het slepen van platen, zo ver onder het wateroppervlak dat geen oppervlakteverstoringen ontstonden, en het daarbij meten van de benodigde sleepkracht. In de loop der tijd zijn talloze van dergelijke proeven uitgevoerd. Schoenherr [6] verzamelde in 1932 deze gegevens en zette ze, in de vorm van dimensieloze coëfficiënten ( $\zeta_{\rm fr} = R_{\rm fr}/0.5 \ \rho \Omega V_{\rm s}^2$ ) uit tegen het getal van Reynolds (Re<sub>L</sub> =  $V_{\rm S}L/V$ ). Deze lijn (zie figuur 1), die voldoet aan de vergelijking:  $\sqrt{\zeta_{\rm fr}} \log (Re_{\rm L}\zeta_{\rm fr}) = 0.242$  is door de American Towing Tank Conference aanvaard als een standaardlijn voor het bepalen van de wrijvingsweerstand van schepen. In verband met de ruwheid van de scheepshuid tijdens de proefvaart van nieuwe schepen moet de coëfficiënt  $\zeta_{\rm fr}$  worden verhoogd met een toeslag  $\Delta \zeta_{\rm fr}$  van 2 à 3 x 10<sup>-4</sup> [4]. De wrijvingsweerstand voor de modelboten wordt bepaald met de formule

$$R_{\rm fr} = \zeta_{\rm fr} \cdot \frac{1}{2} \rho V_{\rm S}^2 \cdot \Omega,$$

terwijl voor proefvaarten in het prototype de uit de lijn van Schoenherr gevonden  $\zeta_{\rm fr}$  wordt verhoogd met een toeslag  $\Delta \zeta_{\rm fr}$  van 0,25 x 10<sup>-3</sup>.

#### 1.3 Berekening van de schroefkracht

Onder meer in het Nederlands Scheepsbouwkundig Proefstation is veel onderzoek verricht naar de voortstuwing van scheepsschroeven. De resultaten van dergelijk onderzoek worden in het algemeen gegeven in de vorm van dimensieloze coëfficiënten. Door Van Manen worden in een tweetal publicaties [3,5] rendementskrommen gegeven van een groot aantal verschillende schroeven in combinatie met straalbuizen. Met behulp van deze krommen zijn door interpolatie ook voor de in M 1115-1 onderzochte modelboten schroefrendementskrommen samengesteld (zie de figuren 2 en 3). Voor deze rendementskrommen is gebruik gemaakt van de volgende dimensieloze grootheden:

$$J = V_A / nD = V_S (1 - \Psi) / nD$$

 $K_{T} = T/\rho n^{2} D^{4}$   $K_{Q} = Q/\rho n^{2} D^{5}$   $\eta = \frac{K_{T}}{K_{Q}} \frac{J}{2\pi} = \frac{TV_{A}}{2\pi Q n}$ 

De gegevens van de modelboten en de bijbehorende schroeven zijn in tabel 1 gegeven. De volgstroomgetallen ( $\Psi$ ) zijn in het model voor een aantal gevallen globaal gemeten door een micromolen in de straalbuis van verschillende gesleepte modelboten te plaatsen (zie figuur 4).

Zijn verder het toerental en de scheepssnelheid van de modelboot, respectie-

velijk het prototypeschip bekend, dan kan de kracht T worden berekend die door schroef en straalbuis samen wordt opgebracht om het schip te bewegen.

### 1.4 Berekening van de toerentaloverdrijvingsfactor

In de voorgaande paragrafen is beschreven, hoe de wrijvingsweerstand en de totale weerstand van een schip of modelboot kunnen worden berekend. Uitgaande van prototypegegevens van een bepaalde vaart kunnen voor het prototype de totale weerstand en de wrijvingsweerstand worden bepaald. Door de wrijvingsweerstand van de totale weerstand af te trekken, blijft een restweerstand ("residual resistance") over. Deze restweerstand voldoet wél aan de schaalregels volgens Froude en kan door toepassing van die regels voor modelomstandigheden worden bepaald. Daarnaast moet voor de modelomstandigheden de wrijvingsweerstand opnieuw worden berekend. Beide weerstanden, gesommeerd, geven de totale weerstand van het modelschip. Deze weerstand wordt vergeleken met de totale weerstand van het prototypeschip, omgerekend naar modelomstandigheden met de schaalregels volgens Froude.

Voor de totale weerstand geldt volgens o.a. Henschke [2]

 $W = (1 - t) T_{\ell}$ 

waarin voor bepaalde binnenschepen, waarvan de schroeven geheel onder water zitten, volgens deze auteur t op 0,05 à 0,10 kan worden gesteld. Gezien het globale karakter van de berekeningen wordt hier verder t op 0,1 gesteld, zodat voor de berekening van de totale weerstand onderstaande formules kunnen worden gebruikt:

W = 0,9 T, en $T = K_T \rho n^2 D^4$ 

Ter verduidelijking zal in de volgende paragraaf de toerentaloverdrijvingsfactor voor het RHK-schip "Adriaan" worden berekend.

### 1.5 Rekenvoorbeeld

Van het RHK-schip "Adriaan" (voor gegevens van schip en schroeven zie tabel 1) zijn de volgende gegevens van een prototypevaart bekend. Vermogen 680 pk bij een toerental van de schroef van 340 omw/min, een diepgang van het schip van 2,5 m en een scheepssnelheid van 16 km/h op water met een diepte van 5 m en onbeperkte breedte. Volgstroomgetal  $\Psi$  ca. 0,65 (bepaald door modelmetingen).

Berekening wrijvingsweerstand van het prototypeschip:

$$V_{s} = 16 \text{ km/h} = 4,4 \text{ m/s}$$

$$L = 80 \text{ m}$$

$$V = 1,1 \times 10^{-6} \text{ (aanname)}$$

$$Re_{L} = V_{s}L/V = 3,23 \times 10^{8} \text{ en } \text{ lgRe}_{L} = 8,51$$
Schoenherrs' lijn (fig. 1)  $\rightarrow \zeta_{\text{fr}} = 1,77 \times 10^{-3}$ 

$$\Delta \zeta_{\text{fr}} = 0,25 \times 10^{-3}$$

$$-\Omega = 80 \times (2,5 \times 2 + 9,5) \approx 1200 \text{ m}^{2}$$

$$R_{\text{fr}} = \zeta_{\text{fr}} \times \frac{1}{2} \text{ pv}^{2} \cdot \Omega \approx 23.000 \text{ N}$$

Berekening wrijvingsweerstand van het modelschip ( $n_1 = 25$ ):

$$Re_{L} = \sqrt{s}L/\sqrt{25} = 0.9 \text{ m/s}$$

$$V_{s} = 4.4/\sqrt{25} = 0.9 \text{ m/s}$$

$$L = 80/25 = 3.2 \text{ m}$$

$$V = 1.1 \times 10^{-6} \text{ m/s} \text{ (aanname)}$$

$$Re_{L} = \sqrt{s}L/\sqrt{25} = 2.58 \times 10^{6} \text{ en } \text{ lg } \text{Re}_{L} = 6.412$$
Schoenherrs' lijn (fig. 1)  $\rightarrow \zeta_{\text{fr}} = 3.73 \times 10^{-3}$ 

$$\Omega = 1200/25 \times 25 \approx 1.9 \text{ m}^{2}$$

$$R_{\text{fr}} = 2.8 \text{ N}$$

Berekening totale weerstand van het prototypeschip:

$$\Psi = 0,65$$
  

$$V_{s} = 4,4 \text{ m/s}$$
  

$$n = 340 \text{ omw/min} = 5,6 \text{ omw/s}$$
  

$$D = 1,75 \text{ m}$$
  

$$J = V_{s} (1 - \Psi) / nD = 0,155$$

Uit figuur 3 (bovenste grafiek, lijn voor RHK-schip "Adriaan") volgt dan:

$$K_T = 0,287$$
  
 $T = K_T \rho n^2 D^4 = 86.500 N$   
 $W = 0_9 T = 78.000 N$ 

Restweerstand prototypeschip = 78.000 - 24.000 = 54.000 N Restweerstand modelschip = 54.000 / (25)<sup>3</sup> = 3,45 N Totale weerstand modelschip = 2,80 + 3,45 = 6,25 N Schroefkracht modelschip = 6,25/0,9 = 6,95 N Stel n<sub>model</sub> = 5  $\alpha$  n<sub>prototype</sub> Dan wordt  $\zeta = V_S (1 - \Psi) / nD = 0,157/\alpha$ en  $K_T = T/\rho n^2 D^4 = 0,363/\alpha^2$ Voor  $\alpha = 1,11$  wordt aan beide betrekkingen en tevens aan de  $K_T - J$  kromme voor de schroef van de "Adriaan" (zie figuur 3) voldaan.

Op analoge wijze kan de benodigde verhoging van het toerental voor een duweenheid met 2 x 2 Europa-II bakken en een snelheid van 21 km/h worden berekend. Daarbij werd een factor 1,08 gevonden. Ook voor het onderzoekingsvaartuig de "Rixt" is een dergelijke berekening uitgevoerd, met als resultaat een factor 1,06.

### 1.6 Empirische vaststelling toerentaloverdrijvingsfactor

Wanneer van een bepaald schip de gegevens van een proefvaart volgens paragraaf 1.1 bekend zijn, kan de factor waarmee het toerental voor modelomstandigheden moet worden verhoogd ook worden bepaald door in het model dezelfde omstandigheden als in het prototype (op Froudeschalen) weer te geven, waarbij alleen het toerental zodanig wordt gekozen dat de scheepssnelheid gelijk is aan die in het prototype.

Als voorbeeld wordt eerst het RHK-schip "Adriaan" genomen. Bekend is, dat in het prototype een snelheid van 16 km/h wordt bereikt bij 340 omw/min van de schroef, een diepgang van 2,5 m en op water met een diepte van 5 m en onbeperkte breedte. Onder gelijke omstandigheden is in het model van de Schelde-Rijnverbinding (waterdiepte 0,2 m; breedte op de waterspiegel 6,4 m, wat als vrijwel onbeperkt kan worden beschouwd; scheepsdiepgang 0,1 m) een snelheid van 0,89 m/s gemeten bij 1915 omw/min van de schroef (zie figuur 6). De toerentaloverdrijfingsfactor bedraagt hier dus 1915/5 x 340 = 1,13. De berekende waarde is 1,11, zodat er een redelijke overeenkomst is.

Bij het onderzoekingsvaartuig de "Rixt" is deze benadering niet mogelijk. Het roer van het prototypeschip was namelijk voorzien van een eigen schroef (zogenaamd "actief roer"). Hierdoor zal de weerstand van dat roer veel hoger zijn dan voor het roer van het modelschip, zodat voor het bereiken van dezelfde snelheid het prototypeschip een hoger toerental nodig zal hebben dan het modelschip.

De duwboot "Vulcaan I" met 2 x 2 Europa-1 bakken (diepgang 3 m) behaalde in het prototype een snelheid van 13 km/h op water met een diepte van 5 m en onbeperkte breedte, bij een toerental van de schroeven van 275 omw/min. Onder dezelfde omstandigheden werd op modelschaal een snelheid van 0,72 m/s behaald bij een schroeftoerental van 1700 omw/min (figuur 6). De benodigde toerentaloverdrijvingsfactor was in dit geval dus 1,24. Op de in paragraaf 1.4 beschreven wijze werd voor dit geval een factor 1,12 gevonden.

### 1.7 Invloed van de grootte van de schroeven op de voortstuwing

Zoals reeds in paragraaf 1.1 is vermeld, kan in een model dat voldoet aan de schaalwetten van Froude niet ook aan de schaalwetten van Reynolds worden voldaan. De fout die hierdoor ontstaat bij het vertalen van proeven met schroeven op schaal mag volgens Gutsche [1,2] alleen worden verwaarloosd als het getal van Reynolds voor de schroef:

 $\text{Re}_{G} = \text{n.D.I}_{m}/v$ 

$$(\text{waarin } 1_m = (A_E / A_O) D \cdot \pi / 2z (1 - d_n / D))$$

groter is dan 7 à  $8 \times 10^4$  (voor het type schroeven dat in de verschillende modelboten bij het onderzoek M 1115-1 is gebruikt).

Voor de drie in paragraaf 1.6 onderzochte gevallen zijn de Reynoldsgetallen voor de schroeven van de modelboten bij de betreffende toerentallen berekend. Deze Reynoldsgetallen liggen tussen  $4 \times 10^4$  en  $5 \times 10^4$ . Dat is dus in het gebied, waarin volgens Gutsche met schaaleffekten in de voortstuwing rekening moet worden gehouden.

Het feit, dat deze invloed voor de schroef van de modelboot "Adriaan" niet van groot belang lijkt te zijn, betekent blijkbaar niet dat hetzelfde geldt voor de schroeven van de onderzochte duwboten. Mogelijk is hier het grote verschil in vormgeving van het achterschip en de stroming in de schroeftunnels mede van belang.

Voor het modelonderzoek M 1115-I is het toerental uiteindelijk vastgelegd op grond van de in paragraaf 1.6 beschreven methode. De aldus gevonden toerentaloverdrijvingsfactor dient ter compensatie van het niet voldoen aan de schaalwetten van Reynolds, zowel voor wat de wrijving langs de scheepshuid als voor wat de voortstuwing van de schroeven betreft.

### 2 Vertaling van het schroeftoerental van modelboten in prototypevermogens

### 2.1 Inleiding

In het onderzoek M 1115-1 zijn bij de verschillende metingen de scheepssnelheid, de schade aan de stortsteen, waterspiegelveranderingen en watersnelheden gemeten als functie van (onder meer) het schroeftoerental van de modelboten.

De bestaande vloot van binnenvaartschepen is uiteraard uitgerust met vele soorten schroeven, waarover geen statistische informatie beschikbaar is. Wel bestaan overzichten van de geinstalleerde motorvermogens van motorschepen, sleep- en duwboten. Daarom is naast het schroeftoerental van de modelboot het bijbehorende motorvermogen van het prototypeschip van veel belang.

-7-

Aanhangsel 1

Uiteraard mogen de in het vorige hoofdstuk bepaalde toerentaloverdrijvingsfactoren in principe alleen worden toegepast bij de betreffende toerentallen en bijbehorende scheepssnelheden. Daar een nauwkeurige berekening van het bijbehorende prototypevermogen – gezien onder meer de belangrijke invloed van de grootte van de schroeven op de voortstuwing, alsmede de weinig uitgebreide gegevens van bijvoorbeeld volgstroomgetallen van binnenschepen – niet mogelijk lijkt, moeten de berekeningen in de volgende paragrafen slechts worden gezien als een handleiding voor het bepalen van de orde van grootte van het prototypevermogen. Ter vereenvoudiging zal in dit hoofdstuk verder de toerentaloverdrijvingsfactor voor verschillende toerentallen en scheepssnelheden constant worden gesteld, wat binnen de te bereiken nauwkeurigheid acceptabel lijkt.

# 2.2 Empirische bepaling van het prototypevermogen uit het schroeftoerental van de modelboten

Voor deze bewerking zijn de in paragraaf 1.1 opgesomde gegevens van een prototypevaart nodig. Dan kan de benodigde toerentaloverdrijvingsfactor voor de modelproeven worden bepaald op de in paragraaf 1.6 beschreven manier. Afgezien van een wat te sterke schroefstraal wordt dan voor model en prototype dezelfde toestand voor de waterbeweging gevonden. Dan kan ook gesteld worden, dat het schroeftoerental van de modelboot in deze situatie optreedt bij het (bekende) vermogen van het prototypeschip. Ter vereenvoudiging wordt de toerentaloverdrijvingsfactor voor verschillende toerentallen en snelheden constant gesteld.

Door onderlinge vergelijking van modelmetingen met verschillende toerentallen en hetzelfde schip kan vervolgens voor die modelproeven een prototypevermogen worden uitgerekend. Daartoe wordt uitgegaan van de formules

$$N = K_Q \cdot 2 \pi \rho D^5 n^3$$
, en

$$J = V_{s} (I - \Psi) / nD$$

alsmede van het verband tussen  $K_Q$  en J, dat in figuur 3 voor de verschillende in M 1115-1 gebruikte schroeven is aangegeven.

Daar alle modelproeven op dezelfde schaal zijn uitgevoerd ( $n_1 = 25$ ) zijn voor de onderlinge vergelijking van bij verschillende modelproeven behorende prototypegegevens de diameter en de dichtheid van het water niet interessant. Daardoor kan in de praktijk worden gewerkt met de formule

$$N = C \cdot K_Q \cdot n^3$$

### 2.3 Rekenvoorbeelden

Opnieuw wordt als voorbeeld het RHK-schip "Adriaan" genomen. De prototypegegevens zijn: bij een diepgang van 2,5 m, een vermogen van 680 pk en 340 omw/min van de schroeven wordt een snelheid van 16 km/h bereikt op water met 5 m diepte en onbeperkte breedte. Onder overeenkomstige omstandigheden wordt in het model van de Schelde-Rijnverbinding ( $n_1 = 25$ ; waterdiepte 0,2 m; breedte op waterspiegel 6,4 m, dus practisch onbeperkt; scheepsdiepgang 0,1 m) een snelheid van 0,89 m/s gemeten bij 1915 omw/min (31,9 omw/s) van de schroef. Voor het volgstroomgetal wordt daarbij 0,65 aangehouden (gevonden door interpolatie tussen de in figuur 4 gepresenteerde meetresultaten). De coëfficiënt J wordt dan 0,89 x 0,35/(31,9 x 0,07) = 0,139, waarbij in figuur 3 voor K<sub>Q</sub> een waarde 0,0242 wordt gevonden. Dus:

$$N = 680 \text{ pk} = C \times 0,0242 \times 31,9^3$$

Bij een waterdiepte van 0,24 m en een toerental van de schroef van 2350 omw/min (39,2 omw/s) werd een snelheid van 1 m/s bereikt. Het volgstroomgetal kan onder die omstandigheden op 0,55 worden gesteld (zie figuur 4), zodat J = 0,16 en  $K_Q = 0,024$ Dan wordt

$$N_1 = C \times 0,024 \times 39,2^3$$
 en  
680 pk = C × 0,0242 × 31,9<sup>3</sup>, dus  
 $N_1 = 680 \times (0,024/0,0242) \times (39,2/31,9)^3 = 1246$  pk

Op analoge wijze kan bij ieder toerental in het model een prototypevermogen worden berekend, indien de scheepssnelheid en het volgstroomgetal bekend zijn.

Voor het onderzoekingsvaartuig "Rixt" is dezelfde benadering aangehouden. Uitgaande van de prototypevaart (met het bijbehorende vermogen) is de overeenkomende snelheid in het model bepaald en het daarbij behorende modeltoerental. Gesteld is, dat dat modeltoerental overeenkomt met het in het prototype gemeten vermogen. Voor andere modeltoerentallen kan dan het daarbij behorende prototypevermogen worden bepaald.

De duwboot "Superbrousse" is een model van de duwboot "Pierre Brousse" op schaal 1:22,5. De schaalfactor van het model is 25, zodat het prototype van de "Superbrousse" in feite een 10/9 x vergrote "Pierre Brousse" is.

Van de "Pierre Brousse" zijn de volgende proefvaartgegevens bekend: in een convooi met 4 Europa-II bakken, diepgang 2,5 m, op water met onbeperkte breedte en diepte, wordt een snelheid van 21 km/h gehaald bij 260 omw/min (4,33 omw/s) van de schroeven en een vermogen van 3900 pk.

Hieruit kan een virtuele proefvaart van de "Superbrousse" worden berekend, er van uitgaande dat het volgstroomgetal alleen door de duwbakken wordt bepaald en niet door de afmetingen van de duwboot. De berekening gaat als volgt:

Voor de "Pierre Brousse":

 $J = V_{S} (1 - \Psi) / nD = (21/3,6) \times (1 - 0,45) / (4,33 \times 2,05) = 0,36$   $K_{Q} = 0,041 \text{ (uit figuur 3)}$  $N = 2\pi \rho K_{Q} D^{5}n^{3} = C \cdot 0,041 D^{5} \cdot 4,33^{3} = 3900 \text{ pk}$ 

Voor de "Superbrousse":

aangenomen wordt, dat de weerstand overwegend wordt bepaald door de duwbakken, en dat het volgstroomgetal gelijk blijft: 0,45 (zie figuur 5, volgstroomgetal voor "Vulkaan I" en "Superbrousse" zijn daar gelijk terwijl de vorm sterk verschilt).

Eerste benadering van  $K_{O}$  wordt op 0,04 gesteld.

3900 pk = C × 0,041 × D<sup>5</sup> × 4,33<sup>3</sup> = C × 0,04 × (D<sup>5</sup>/0,9<sup>5</sup>) × n<sup>3</sup> n =  $\sqrt[3]{\frac{0,041}{0,04}}$  × 0,9<sup>5</sup> × 4,33 = 3,67 omw/s = 220 omw/min J = (21/3,6) × (1 - 0,45)/(3,67 × 2,05/0,9) = 0,384 en K<sub>Q</sub> = 0,040 De berekende gegevens van de virtuele prototypevaart van de "Superbrousse" worden dus: Op water met onbeperkte breedte en diepte haalt de duwboot "Superbrousse", in een duweenheid met 2 x 2 Europa-II bakken met een diepgang van 2,5 m, een snelheid van 21 km/h bij een vermogen van 3900 pk en een toerental van de schroeven van 220 omw/min. In het model werd een snelhied van 21/(3,6 x 5) = 1,17 m/s gemeten (onder met bovengenoemde vaart overeenkomende omstandigheden) bij een modeltoerental van 1370 omw/min (23,2 omw/s). Dan is J = 1,17 x 0,55/23,2 x 0,091 = 0,31 en K<sub>Q</sub> = 0,0425.

Op onbeperkt water werd met dezelfde duweenheid, maar een diepgang van de bakken van 3 m, in model een snelheid van 0,99 m/s bereikt bij een toerental van 1230 omw/min (20,5 omw/s). Het bijbehorende prototypevermogen wordt dan als volgt berekend:

Uit figuur 5 volgt  $\psi = 0,50$ ;  $J = V_S (1 - \psi)/nD = 0,99 \times 0,5/(20,5 \times 0,091) = 0,265$ ; Uit figuur 3 volgt  $K_Q = 0,043$ 3900 pk = C  $\times 0,0425 \times 23,2^3$ N = 3900  $\times (0,043/0,0425) \times (20,5/23,2)^3 = 2730$  pk. Onder dezelfde omstandigheden werd in het prototype een prototypevaart uitgevoerd, weerhij in plagts van de "Superbrousse" een andere duwboot werd gebrui

voerd, waarbij in plaats van de "Superbrousse" een andere duwboot werd gebruikt (de "Mannesmann III"). Daarbij werd een scheepssnelheid van 17,87 km/h gemeten bij een vermogen van 2700 pk, wat zeer goed overeenkomt met de hierboven berekende waarde.

Op overeenkomstige wijze zijn ook bij de duwboot "Vulcaan I" voor de verschillende gemeten combinaties van toerentallen en scheepssnelheden in het model prototypevermogens berekend.

## <u>3 Kritische beschouwing van de gehanteerde methoden en aanbevelingen voor</u> de uitvoering van onderzoek met modelboten

Om de invloed van de schaalwetten volgens Reynolds op de wrijvingsweerstand en de voortstuwing van de schroeven te compenseren, bestaan twee mogelijkheden: een verhoging van het schroeftoerental of het aanbrengen van een extra kracht op het schip. Wanneer de laatste mogelijkheid niet aanwezig is (wat bij de proeven in M 1115-1 het geval was) dan komt in feite alleen een verhoging van het schroeftoerental in aanmerking.

Aanhangsel I

De extra wrijvingsweerstand van modelschepen kan voor iedere scheepssnelheid worden berekend op de in de paragrafen  $1.2_{\sigma}$  1.4 en 1.5 beschreven wijze. Voor beperkte breedte en diepte moet bij de scheepssnelheid de retourstroomsnelheid worden opgeteld. Uitgaande van deze weerstand kan dan de benodigde verhoging van het toerental worden bepaald, of de kracht kan in de vorm van een extra sleepkracht op het schip worden uitgeoefend. Daar de kracht en de benodigde toerentaloverdrijvingsfactor sterk afhankelijk zijn van de snelheid, moeten zij in feite voor iedere nieuwe situatie worden uitgerekend

De invloed van de schaalwetten van Reynolds op de voortstuwing is door berekening niet eenduidig vast te leggen. Alleen empirische vaststelling van de gecombineerde invloed op wrijvingsweerstand en voortstuwing is mogelijk, op de in paragraaf 1.6 genoemde wijze. Daar er niet van mag worden uitgegaan, dat deze invloed vaar verschillende toerentallen van de schroeven gelijk is moet in feite voor iedere toestand deze invloed worden bepaald. Dit is door het ontbreken van voldoende prototypemetingen niet mogelijk, zodat volstaan moet worden met een benadering.

Indien alleen een verhoging van het toerental wordt toegepast om beide invloeden te compenseren, dan zijn de volgende methoden denkbaar:

- a Een voor alle vaarten gelijke toerentaloverdrijvingsfactor.
- b Een snelheidsafhankelijke toerentaloverdrijving als correctie op de wrijvingsweerstand, in combinatie met een constante overdrijvingsfactor voor de invloed op de voortstuwing. Deze laatste kan worden bepaald door van de volgens paragraaf 1.6 empirisch bepaalde overdrijvingsfactor de factor af te trekken, die door berekening (volgens paragrafen 1.2, 1.4 en 1.5) is bepaald.

Bij toepassing van een extra kracht ter compensatie van de Reynolds-invloeden kan gekozen worden uit:

- a een correctie voor de gecombineerde invloed, als functie van het toerental (komt overeen met een constante toerentaloverdrijvingsfactor);
- b een snelheidsafhankelijke correctiekracht voor de wrijvingsweerstand en een verhoging van het toerental met een constante factor ter compensatie van de invloed op de voortstuwing;
- c een snelheidsafhankelijke correctiekracht voor de wrijvingsweerstand en een constante correctiekracht voor de voortstuwing.

Aanhangsel 1

Bij het onderzoek M 1115-I was alleen een correctie door verhoging van het toerental mogelijk. Gekozen werd daarbij voor een constante toerentaloverdrijvingsfactor. Voor alleen de wrijvingsweerstand leidt dit tot te lage toerentallen bij lage scheepssnelheden en te hoge toerentallen bij hoge snelheden. De invloed op de voortstuwing van de schroef ( $\operatorname{Re}_G = \operatorname{nD} \operatorname{I}_m/v$ ) neemt af bij toenemende toerentallen (het Reynoldsgetal volgens Gutsche neemt dan toe en komt dichter bij de waarde van 7 x 10<sup>4</sup>, waarbij de schaalinvloed op de schroeven verwaarloosbaar wordt). Beide invloeden werken elkaar dus tegen, al is de grootte van de laatste invloed niet bekend. Daar deze methode modeltechnisch ook veel eenvoudiger te realiseren is, werd hiervoor gekozen.

Nadat deel I van het onderzoek M 1115 was afgesloten, ontstond de mogelijkheid, een meetbare sleepkracht op de modelboten aan te brengen. Daarmee wordt een correctie aangebracht voor de wrijvingsweerstand. De invloed op de voortstuwing wordt gecompenseerd door een verhoging van het toerental, dat lineair afhankelijk is gesteld van het Reynoldsgetal voor de schroeven volgens Gutsche. Dit lineaire verband voldoet aan de voorwaarden dat voor  $\text{Re}_{G} = 7 \times 10^4$ de verhoging nihil is, en dat voor een empirisch bepaald geval (methode paragraaf 1.6) de dan gevonden waarde voor de toerentaloverdrijvingsfactor, verminderd met de berekende factor ter compensatie van de wrijvingsweerstand, optreedt.

Bij de berekening van de prototypevermogens is het duidelijk, dat door de vele onzekerheden, vooral wat de invloed van de schaalwetten van Reynolds op de voortstuwing betreft, een nauwkeurige bepaling zinloos is. Volstaan is voor de in M 1115-l onderzochte gevallen met een globale berekening, waarbij de uitkomsten zijn afgerond op veelvouden van 250 pk (beneden de 1500 pk), respectievelijk 1000 pk (daarboven), om te voorkomen dat een indruk van te grote nauwkeurigheid ontstaat. Het gaat om een schatting van de orde van grootte, en niet meer dan dat.

### LITERATUUR

- 1 GUTSCHE, F. Kennwerteinflüsse bei Schiffsschrauben Modellversuchen. JSTG, Bd. 37, 1936, pp 277-297.
- HENSCHKE, W. Schiffbautechnisches Handbuch, band I.
   Berlin, VEB Verlag, 1966, pp. 428 431, p. 646.
- 3 VAN MANEN, J.D. Open-water test series with propellers in nozzles. Wageningen, N.S.P., publ. no. 115a, 1954.
- VAN MANEN, J.D. Fundamentals of ship resistance and propulsion, part
   B, Propulsion.
   Wageningen, N.S.P., publ. no. 132a.
- 5 VAN MANEN, J.D. Recent research on propellers in nozzles. Wageningen, N.S.P., publ. no. 136, 1957.
- 6 SCHOENHERR, K. Resistance of flat surfaces moving through a fluid. Trans. Soc. of N.A. and M.E., 1932.

amschrijving gegevens	symbooi	eenheid	duwboot Vulcaan l	duwboot Superbrousse	R. H. K. –schip Adriaan	onderzoekingsv. Rixt	2 x 2 Europa-il bakken	2 x 2 Europa-i bakken
<u>scheepsafmetingen</u> - lengte over alles - lengte op waterlijn - breedte over alles - diepgang (max.) - grootspantoppervlak - waterverplaatsing (max.) - natte oppervlak	L <sub>OA</sub> L <sub>WL</sub> B T Am ♥ N	m m m 2 m 3 m 2 m	38,00 37 10,00 1,80 18,0 468	35,56 34 1 4,45 1,83 26,4 650 540	79,95 79 9,50 2,50 23,8 1600	31,75 29 7,50 3,00 18,4 325 255	153,00 152 22,80 3,30 <sup>6)</sup> 75,4 10,800	140,00 [39 19,00 3,20 60,8 7.950
schroeven - N. S. P. schroeinr. - schroeftype - aantal bladen - diameter - spoed (op 0, 7 R) - spoedverhouding - ontwikkeld gestrekt bladoppervlak - schroefcirkeloppervlak - antw. gestr. bladopp. verh. - conus-diameterverh.	- z D P <sub>0,7</sub> /D A <sub>E</sub> A <sub>O</sub> A <sub>Z</sub> /A <sub>O</sub> d/D t/D	- - m m - m 2 m - -	2926 Ka-3 3 1,95 1,62 0,83 1,60 3,00 <b>0</b> ,54	4529 Ka-4 4 2,28 2,28 1,00 3,67 4,08 0,90 0,22 0,05	3499 Ka=4 1,75 1,39 0,79 1,54 2,40 0,64	4550 Ka-3 3 1,60 1,52 0,95 1,32 2,01 0,65 0,28 0,06		
<u>straalbuis</u> - type - lengte - lengte~diameterverh.	- I I/D	- m	1,45 0,75	v. Manen 19A 1,72 0,75	0,88 0,50	0,80 0,50		
aantal schroeven	-	-	2	3	1	1		
proefyaartgegeyens - vermogen - toerental schroeven - vaarsnelheid	N n V5	pk min <sup>-1</sup> m/s	1500 275 3,6 <sup>2)</sup>	3900 <sup>1</sup> ) 220 <sup>1</sup> ) 5,8 <sup>1</sup> )3)	680 340 4,4 <sup>4)</sup>	670 375 5, 3 <sup>5)</sup>		

1) berekend uit proefvaartgegevens van de "Pierre Brousse" met 4 Europa~ii bakken, diepgang 2,5 m: (N = 1600 pk,  $\pi = 260 \text{ omw/min}$  en V<sub>s</sub> = 21 km/h)

2) in duweenheid met 2 x 2 Europa~I bakken, diepgang bakken 3 m; waterbreedte onbeperkt, waterdiepte 5 m

3) in duweenheld met 2 x 2 Europa-11 bakken, diepgang 2,5 m, onbeperkt water

4) waterbreedte onbeperkt, waterdiepte 5 m

5) onbeperkt water

6) indien van een speciaal verhoogde boeg voorzien is een diepgang van 4 m mogelijk

Tabel 1 Gegevens van de modelboten











Duwboot "Vulcaan I" met 4 Europa-II bakken, diepgang bakken 2,5 m en 3,0 m, waterdiepte 10,5 m



Duwboot "Superbrousse" met 4 Europa-III bakken, diepgang bakken 2,5 m en 3,0 m, waterdiepte 10,5 m

į¢^



Duwboot "Superbrousse" met 4 Europa-II bakken, diepgang bakken 0,9m, 3,3m en 4,0m, waterdiepte 6m

· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·			
IN MODEL GEMETEN VOLGSTROOMGETALLEN			
VOOR DUWBOTEN MET 4 BAKKEN	AANHANGSEL 1		
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	M. 1115-I FIG. 5		



AANHANGSEL 2

.

.

.

. . .

#### Schaalinvloeden volgens Weber

### 1 Inleiding

Het onderzoek M 1115, "Aantasting van dwarsprofielen in vaarwegen" is uitgevoerd in een model, dat voldoet aan de schaalwetten van Froude. Volgens deze schaalwetten wordt de krachtenschaal gelijk aan de derde macht van de lengteschaal (de schaalfactor voor de dichtheid van de vloeistof en de zwaartekrachtversnelling is 1, van volumina uiteraard  $n_1^3$ ). Wordt aan deze schaalwetten voldaan, dan is het (bij gebruik van water en bij normale atmosferische drukken) niet mogelijk om ook de krachten, die tengevolge van de oppervlaktespanning op het water werken, op Froudeschaal weer te geven. Immers, de oppervlaktespanning op het grensvlak van water en lucht (bij atmosferische druk) is voor model en prototype gelijk. De krachtenschaal, waarop de oppervlaktespanning wordt weergegeven, is dus niet  $n_1^3$  maar  $n_1$ . Uiteraard zijn naast de krachtenschaalfactor ook tijd-, snelheids- en andere schaalfactoren te bepalen. De bij oppervlakte- of capillaire spanningen optredende modelschalen voldoen aan de schaalwetten van Weber. In de volgende paragrafen wordt onderzocht, in hoeverre het niet voldoen aan deze schaalwetten van belang is voor het onderzoek M 1115.

### 2 Zwaartekracht versus oppervlaktespanning bij golven

Zoals reeds in de vorige paragraaf werd opgemerkt, wordt bij een modelonderzoek op basis van Froude-schalen de zwaartekracht wel en de oppervlaktespanning niet op de juiste schaal weergegeven. Beide krachten trachten een golf van willekeurige afmetingen af te vlakken, totdat een horizontaal oppervlak is bereikt. Door de golftoppen en dalen te schematiseren tot parabolen (zie figuur 2) ontstaan eenvoudige uitdrukkingen voor zwaartekracht en capillaire krachten als functie van de golflengte. Wordt bijvoorbeeld gesteld, dat de capillaire krachten niet meer dan 10 °/o van de zwaartekracht mogen bedragen, dan volgt daaruit dat de golflengte minimaal 0,08 m moet zijn.

### 3 Voortplantingssnelheid van golven

In figuur 1 zijn tevens de formules voor de voortplantingssnelheid van capillaireen zwaartekrachtgolven gegeven. Wordt hier als eis gesteld, dat de voorplantingssnelheid van in het model gemeten golven tengevolge van capillaire werking niet

Aanhangsel 2

meer dan 2,5 <sup>o</sup>/o mag afwijken van de voortplantingssnelheid tengevolge van alleen de zwaartekracht, (dus

$$\sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} \operatorname{tgh} \frac{2\pi h}{\lambda} / \sqrt{\frac{(2\pi\sigma}{\rho\lambda} + \frac{g\lambda}{2\pi})} \operatorname{tgh} \frac{2\pi h}{\lambda}} > 0,975),$$

dan volgt daaruit dat de golflengte minimaal 0,08 m moet bedragen. De minimale golflengte, waarbij schaaleffecten in het modelonderzoek te verwachten zijn, is dus ongeveer 100 mm.

# <u>4 Eventueel te verwachten schaaleffekten door de oppervlaktespanning bij het</u> onderzoek M 1115

In figuur 2 zijn een aantal golven getekend, zoals die tijdens het onderzoek M 1115-I werden gemeten in het model van de Schelde-Rijnverbinding ( $n_1 = 25$ ). In één geval werd bij een vaart met het onderzoekingsvaartuig "Rixt" een waterspiegelverandering geconstateerd die vergeleken zou kunnen worden met een parabolische golftop met een golflengte van ca. 40 mm. Op dit verschijnsel zullen de capillaire krachten zeker invloed hebben gehad. Deze meting moet dan ook uit dien hoofde als niet volledig betrouwbaar worden beschouwd, voor wat de gradiënt ter plaatse betreft.

Bij alle overige metingen, zowel met het onderzoekingsvaartuig "Rixt" als de duwboot "Superbrousse" met 4 Europa-II bakken en het R.H.K.-schip "Adriaan" werden golflengten van minimaal 160 mm geconstateerd. Bij deze golven mag dan ook worden aangenomen, dat de schaaleffecten volgens Weber te verwaarlozen zijn.

Daarnaast is in figuur 3 een aantal gemeten golfpatronen bij prototypemetingen weergegeven. De kleinste golflengte, die daarbij werd gevonden, was 2 m (onderzoekingsvaartuig "Fritz Horn" in het Main-Donaukanaal). Bij een schaalfactor van  $n_1 = 25$  voor modelonderzoek zou dat een golflengte van ongeveer 80 mm geven, waarbij nog juist geen invloed van betekenis van de capillaire spanning op de voortbeweging van de golf te verwachten is.

### 5 Metingen in het Nederlandsch Scheepsbouwkundig Proefstation

Van het Nederlandsch Scheepsbouwkundig Proefstation werd nog de volgende informatie ontvangen.

In de diepwatertank van het bovengenoemde instituut worden regelmatig voor diverse schepen (met de voor modelschepen gebruikelijke afmetingen bij weerstandsonderzoek) "wake-survey" onderzoeken gedaan. Daarbij wordt het door een schip opgewekte golfpatroon onderzocht door in verschillende raaien, evenwijdig aan de voortbewegingsrichting van het schip, de waterspiegelveranderingen te meten. Bij controle van de energiebalans van de verschillende doorsneden werden - binnen de meetnauwkeurigheid - geen schaaleffekten tengevolge van het niet voldoen aan de schaalwetten volgens Weber geconstateerd.

### 6 Capillaire opstijging langs de scheepshuid

Zowel langs de huid van het prototypeschip als langs die van de modelboot zal enige capillaire stijging van het water optreden. Deze capillaire stijghoogte zal voor model en prototype beneden een waarde van ongeveer 2 mm liggen. Voor de krachten van het water op het schip maakt dat geen verschil, daar de capillaire stijghoogte op alle plaatsen langs het modelschip gelijk zal zijn. Ook voor de waterbeweging rondom het schip valt geen meetbare invloed van deze zeer lokale afwijking te verwachten.

#### 7 Conclusies voor het onderzoek M 1115

Tijdens het onderzoek M 1115-I werden – behoudens één uitzondering – geen oppervlakteverstoringen met een golflengte kleiner dan 160 mm gevonden. Onder deze omstandigheden kan de invloed van de oppervlaktespanning op de totale verticale kracht, die op de golftoppen werkt  $(2,5 \circ/\circ)$  worden verwaarloosd, evenals de invloed van de capillariteit op de voortplantingssnelheid  $(0,6 \circ/\circ)$ .

De weergave van de onderzochte prototypemetingen (golflengte minimaal ca. 2 m) op schaal 1:25 zal eveneens nauwelijks moeilijkheden opleveren voor wat betreft de invloed op de kracht op de golftop en de voortplantingssnelheid van de golf (de kracht op de golftop wordt maximaal 10  $^{\circ}$ /o te groot, de golfsnelheid 2,5  $^{\circ}$ /o).







WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

FIG. 3

AANHANGSEL 3

### De wrijvingsweerstand van een schip in stromend water

Tijdens het onderzoek in het model van de Schelde-Rijnverbinding bleek, dat de relatieve snelheid ten opzichte van het water van stroomopwaarts varende schepen hoger is dan die van stroomafwaarts varende schepen. Is er geen stromend water, dan blijkt de scheepssnelheid tussen beide bovengenoemde gevallen in te liggen. Daar stroomopwaarts varende schepen een zwaartekrachtsverhang moeten overwinnen zou eerder het omgekeerde effect kunnen worden verwacht. Uit de literatuur blijkt, dat bij een schip, dat in een kanaal vaart, het aandeel van de wrijvingsweerstand al snel 60 °/o bedraagt (zie o.a. Ir. A.J.W. Lap: Fundamentals of ship resistance and propulsion, part A: Resistance, p. 46 Table VII). Het leek daarom zinvol, te onderzoeken wat de invloed van stromend water op de wrijvingsweerstand van een schip is.

Wordt nu het verschil in snelheid tussen de scheepshuid en het onmiddellijk daaraan grenzende waterlaagje berekend, uitgaande van "ideaal gladde" scheepswanden (geen wrijving), dan is duidelijk, dat het gevonden snelheidsverschil een maat is voor de door het schip te overwinnen wrijvingsweerstand. Bekend is immers dat, daar de scheepswanden niet "ideaal glad" zijn, de snelheid van het water direct langs de scheepswanden nul is. Het schip moet dus een zodanige schuifkracht op het water uitoefenen, dat de berekende watersnelheid langs de wand van het schip daardoor tot nul wordt teruggebracht. Hoe groter die snelheid is, hoe groter dan ook de uit te oefenen schuifkracht wordt, en daarmee de wrijvingsweerstand van het schip die moet worden overwonnen. In concreto is berekend het geval, waarin het model 1:25 van de duweenheid "Vulcaan I" met 4 geladen bakken vaart in het model van de Schelde-Rijnverbinding. Alle verder genoemde waarden zijn in modelgrootheden uitgedrukt. De waterstand in het model is N.A.P. - 7,5 cm en het debiet door het kanaal is 0, respectievelijk 0,261 m<sup>3</sup>/s. De scheepssnelheid ( $V_s$ ) ten opzichte van het ongestoorde water wordt op 0,55 m/s gesteld. Voor de wandruwheid van de betonnen modelwanden wordt als eerste schatting  $a = 4 \times 10^{-4}$  m aangehouden.

Bij de berekening is aangenomen, dat de stroomsnelheidsvertikalen een logarithmische vorm hebben. Verder is gebruik gemaakt van onderstaande formules en symbolen:

$$\bar{V}_{w} = \Omega/F = \frac{\text{debiet}}{\text{natte doorsnede}};$$
 (1)

$$\bar{\nabla}_{w} = C\sqrt{RI} (de Chézy) ,$$
 (2)

waarin:

R = hydraulische straal in m, l = verhang (dimensieloos) en

C = 18 log 
$$\frac{6R}{\alpha + \delta/7}$$
 m<sup>2</sup>/s (volgens White-Colebrook), (3)

### waarin:

 $a = \frac{1}{2} k$  in m (k is een maat voor de wandruwheid volgens Nikuradse) en

$$\delta = 12 \frac{\sqrt{2}}{V_x}$$
 in m = dikte van de visceuse grenslaag langs de kanaalbodem,(4)  
 $V_x$  waarin

$$V = de kinematische viscositeit in m2/s, en
 $V_{x} = \sqrt{gRl}, de schuifspanningssnelheid in m/s;$ 
(5)$$

$$v_y = \frac{v_x}{K} \ln \frac{10y}{a+\delta/7}$$
 m/s = de snelheid y m boven de kanaalbodem, (6)

waarin :

 $\chi = 0.4$  (dimensieloos) volgens Von Kármán. De berekeningen zijn uitgevoerd met onderstaande waarden:  $Q = 0.261 \text{ m}^3/\text{s}$   $F = 0.902 \text{ m}^2$  R = 0.146 mwaterdiepte 0.165 m; temperatuur 17°, waarbij:  $v = 1.1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}; g = 9.81 \text{ m/s}^2; a = 4 \times 10^{-4} \text{ m}.$ 

Voor de berekening van de watersnelheden wordt eerst  $\delta = 0$  gesteld. Met (3) wordt dan C berekend, en met (1)  $\tilde{V}_w$ , waarna met (2) I bepaald kan worden. Formule (5) geeft dan  $V_x$ , en  $\delta$  volgt uit (4). Deze bewerking wordt herhaald met de berekende waarde van  $\delta$ , tot de waarde van  $\delta$ , die in de berekening is gestopt, gelijk blijft aan de waarde die uit de berekening volgt. De formule van  $V_y$  is gecontroleerd aan de hand van de in het model gemeten verhangen. Volgens deze controle (zie tabel) variëert de C-waarde volgens de Chézy van 60 tot 70, terwijl de berekende waarde 58,1 was. Deze controle geeft de indruk dat de berekening van  $V_y$  een redelijke benadering van de werkelijkheid is.

Datum	14.6	21,6	22.6	23.6	24.6	14.6-24.6 gemiddeld	volgens berekening	eenheid
Peilnaaldaflezing   Waterdiepte   Peilnaaldaflezing    Waterdiepte    Verval  -   Afstand  -   Verhang  -   Gemiddelde waterdiepte Afvoer Rehbock Debiet door model F	11,87 17,06 13,40 16,04 1,02 6880 1,48 16,55 0,019 0,260 0,905	11,83 17,02 13,43 16,07 0,95 6880 1,39 16,55 0,016 0,263 0,905	11,45 16,64 13,18 15,82 0,82 6880 1,19 16,23 0,017 0,262 0,885	11,58 16,77 13,30 15,94 0,83 6880 1,21 16,36 0,018 0,261 0,893	11,63 16,82 13,27 15,91 0,91 6880 1,32 16,37 0,018 0,261 0,894	gemiddeld 1,32 16,41 0,018 0,261 0,896	1,70 16,50 0,018 0,261 0,902	eenheid cm cm cm cm cm cm cm x 10 <sup>-4</sup> cm m <sup>3</sup> /s m <sup>3</sup> /s m <sup>3</sup> /s
$R = \frac{Q}{F\sqrt{RI}}$	0,147 61,5	0,147 64,4	0,144 71,5	0,145 69,7	0,145 66,8	0,146 60-70	0,146 58,1	m <sup>2</sup> m

De berekening is uitgevoerd voor het stromende water zonder schip, en als resultaat werd gevonden  $V_y = 0,0897 \log (2,88 y.10^4)$ . Geïntegreerd over de waterdiepte wordt voor de gemiddelde stroomsnelheid  $\overline{V}_w = 0,29$  m/s gevonden, wat goed overeenkomt met de uit (1) berekende waarde van 0,289 m/s. Over een afstand van 11,8 cm onder de waterspiegel wordt een gemiddelde snelheid van 0,312 m/s gevonden. Deze uitkomst is goed in overeenstemming met de resultaten van metingen met stokdrijvers van die lengte, waarbij een gemiddelde snelheid van eveneens 0,312 m/s werd gevonden (zie figuur 1). Hieruit blijkt, dat de aanname voor  $a = 4 \times 10^{-4}$  goed voldoet.

Vervolgens wordt er van uitgegaan, dat het schip op het water drijft. De scheepshuid is "ideaal glad" aangenomen, de wrijving tussen schip en water is dus nul en de watersnelheid van het water langs de scheepshuid behoeft niet nul te zijn. Het schip zal dan bij benadering dezelfde snelheid krijgen als de gemiddelde snelheid van het ongestoorde water over de diepgang van het schip (0,132 m).

Gaat het schip nu bewegen ten opzichte van het water, dan treedt tussen het schip en de kanaalbegrenzing een retourstroom op. Deze retourstroom gaat gepaard met een waterspiegeldaling. Daardoor zal ook het schip dieper komen te liggen. Nu wordt de afstand, waarover het schip zakt, gelijk gesteld aan de spiegeldaling ten gevolge van de retourstroom. De snelheid ( $V_s$ ) van de "Vulcaan 1" ten opzichte van het ongestoorde water is 0,55 m/s. Met behulp van de theorie van Schijf kan nu de grootte van retourstroom en waterspiegelda-ling worden bepaald. Uit proeven van het Waterloopkundig Laboratorium blijkt

dat voor een duweenheid  $\alpha = 1,1$  kan worden aangehouden. Met behulp van bovengenoemde theorie wordt dan een retourstroom  $\overline{u} = 0,158$  m/s en een spiegeldaling z = 0,013 m gevonden.

De gemiddelde snelheid van het ongestoorde water over de diepte van het schip wordt dan de gemiddelde watersnelheid over de bovenste 0,132 + 0,013 = 0,145 m. Deze gemiddelde snelheid wordt dan

$$\bar{\nabla}_{w} = \frac{1}{0,145} \int_{0,020}^{0,165} \nabla_{y} dy = 0.30 \text{ m/s}.$$

Voor de verdeling van de retourstroom over de verticaal wordt, geheel analoog aan de berekening van de stroomsnelheidsverticaal voor het ongestoorde water, gevonden:

$$u_y = 0,0506 \log (2,45 \text{ y} \cdot 10^4) \text{ m/s}.$$

Voor stroomopwaarts varende schepen wordt gevonden:

$$(V + u)_{v} = 0,1395 \log (3,14 v . 10^{4}) m/s$$

voor stroomafwaarts varende schepen:

$$(V - u)_y = 0,0426 \log (2,30 y \cdot 10^4) m/s.$$

Nu is de snelheid van het water ten opzichte van de kanaalbodem bekend. Deze stroomsnelheidsvertikalen zijn uitgezet in figuur 2.

De snelheid van het schip ten opzichte van de kanaalbodem is in stromend water  $(V_s \pm \bar{V}_w)$ , waarin  $\bar{V}_w$  de snelheid van het ongestoorde water over de diepgang van het schip is  $(\bar{V}_w = 0.30 \text{ m/s}, \text{ zie figuur 2})$ . De relatieve snelheid van het water ten opzichte van het schip wordt gevonden door de stroomsnelheden  $v_y$ ,  $(V + v)_y$  en  $(V - v)_y$  te superponeren op de bovengenoemde scheepssnelheid  $V_s$   $(\pm \bar{V}_w)$ . Een overzicht van de diverse snelheden voor de drie gevallen met mee- en tegenstroom en stilstaand water wordt gegeven in onderstaande tabel.

Geval	Snelheden ten opz	Stroomsne Iheden	
	Scheepssnelheid	Stroomsnelheid naast schip	ten opzichte van schip
Stilstaand water	+ V <sub>s</sub>	- u <sub>y</sub>	V <sub>s</sub> + u <sub>y</sub>
Stroomaf	$+ \vee_{s} + \tilde{\vee}_{w}$	(V - u) <sub>y</sub>	$\nabla_{s} + \overline{\nabla}_{w} - (\nabla - u)_{y}$
Stroomop	+ V <sub>s</sub> - V <sub>w</sub>	- (V + u) <sub>y</sub>	$V_{s} - \overline{V}_{w} + (V + u)_{y}$

-4-

De gevonden stroomsnelheidsverticalen ten opzichte van het schip zijn weergegeven in figuur 3. Het blijkt, dat de snelheid van het water langs de "ideaal gladde" scheepsbodem het grootst is bij stroomafwaarts varen, kleiner wordt bij stil water en het kleinst is bij stroomop varen. Hieruit volgt, dat de wrijvingsweerstand het kleinst zal zijn voor het stroomopvarende schip, groter voor het schip op stil water en het grootst voor stroomafvarende schepen. Dit, omdat het kielvlak van het schip  $(5, 6 \text{ m}^2)$  veel groter is dan de zijwanden (tesamen 1, 6 m<sup>2</sup>), terwijl de verschillen tussen de gemiddelde stroomsnelheid langs de zijwanden bij stroomop varen, stil water en stroomaf varen veel kleiner zijn (maximaal  $\pm 2 \text{ cm/s}$ ) dan ter plaatse van het kielvlak (grootste verschil 9 cm/s).



.


<sup>➡</sup> Snelheden van het water t.ov, de kanaalbodem in cm/s

