

**Bodembeschermingen belast
door schroefstralen**
Huidige ontwerpmethode

PROJECT: **Studie bodembeschermingen en
schroefstralen**

Project-code: IH01.030

Rapport-code: 61.00-R96.089

Versie: 1

Datum: 16 januari 1997

Exemplaar bestemd voor TU - Delft.

Opdrachtgever:


Gemeentelijk Havenbedrijf Rotterdam
Directie Exploitatie en Acquisitie
Infrastructuur/Havenontwikkeling
Galvanistraat 15
3029 AD Rotterdam

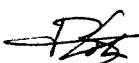
Ingenieursbureau Havenwerken


Opsteller:
ir.T. Blokland

Projectleider:
ir.T. Blokland

Geautoriseerd:
ir.J.G. de Gijt

Paraaf: 

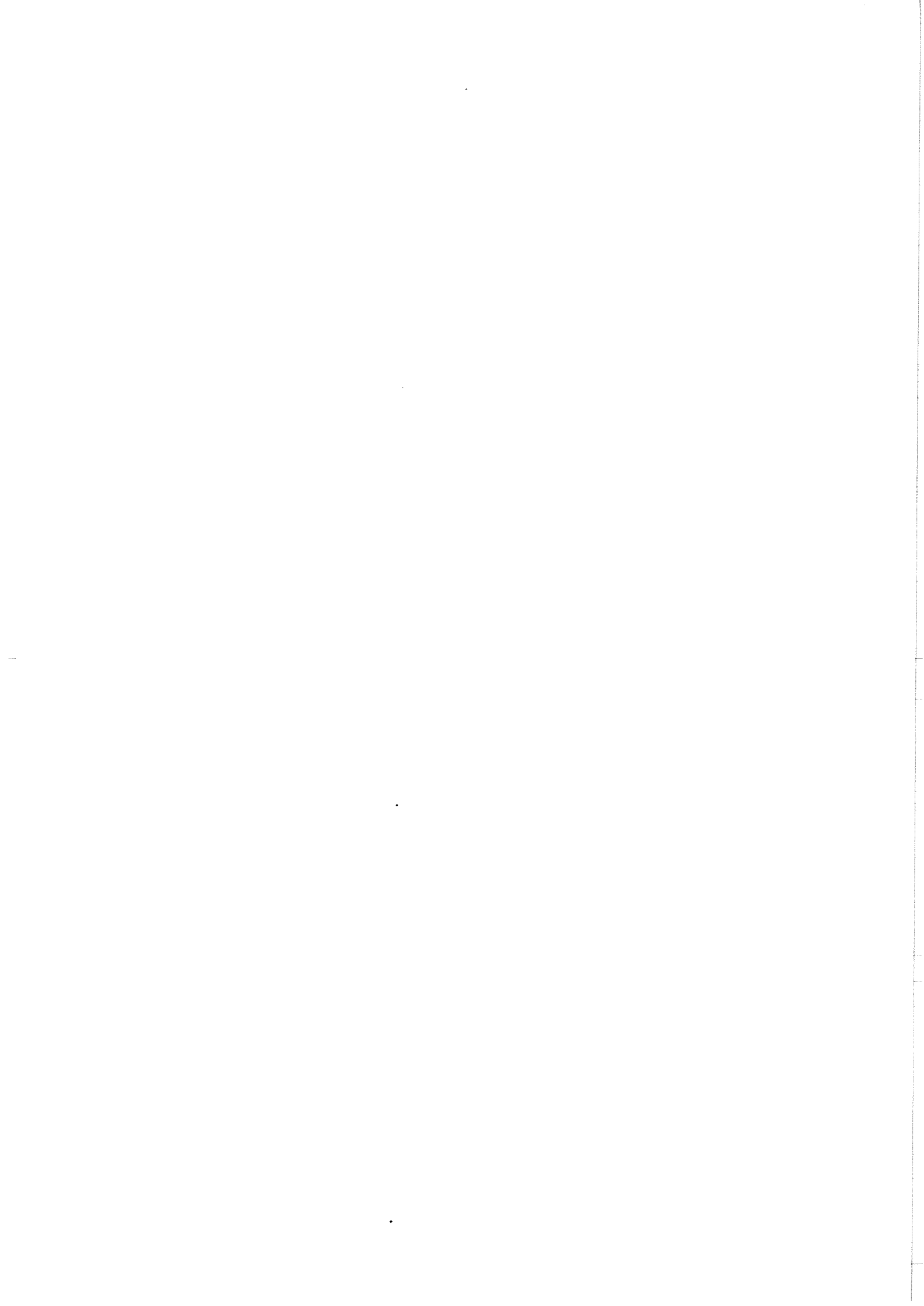
Paraaf: 

Paraaf: 

Datum : 21-01-97

Datum: 21-01-97

Datum : 22/1/97



NOTITIE

Van : T. Blokland

Ingenieursbureau: Havenwerken

Betreft : **Erratum bij rapport:**
**"Bodembeschermingen belast door schroefstralen. Huidige ontwerp-
methode"**, rapport 61.00-R96.089, versie 1, d.d. 16 januari 1997

Datum : 18 maart 1997

Pag.13:

Tabel. Laagwaterstanden bij verschillende onderschrijdingsfrequenties.

onderschrijdingsfrequentie	laagwaterstand t.o.v. N.A.P.			laagwaterstand t.o.v. GLW
	Rotterdam	Hoek v. Holland	Europoort	
GLW (ca. 300 getijden per jaar)	-0,43 m	-0,64 m	-0,80 m	0,00 m
100 getijden per jaar	-0,71 m	-0,92 m	-1,08 m	-0,28 m
25 getijden per jaar (≈ aantal springtijden)	-0,91 m	-1,12 m	-1,28 m	-0,48 m
10 getijden per jaar	-1,01 m	-1,22 m	-1,38 m	-0,58 m
1 getij per jaar	-1,28 m	-1,49 m	-1,65 m	-0,85 m

Bijlage A, pagina 3:

$\sqrt{3} \cdot U_{b,max, enkel}$ in de situatie met 3 schroeven.

Bijlage A, pagina 4:

Aan eind van 3^e regel van onderen toevoegen.

Voor deze reductie-factor f_{roer} geldt: $f_{\text{roer}} = [1,0 + 5,2 \cdot 10^{-6} \cdot \theta^{3,25}]^{-1}$. Hierbij is θ de roerhoek in graden (ref. 1, p.42). Deze reductie-factor mag alleen worden toegepast als de hoogte van de schroefas boven de bodem minimaal $1,5 \cdot D_p$ bedraagt.

Bijlage A, pagina 7:

Formule (A.10) voor stroming tegen talud op moet luiden:

$$m_h = \frac{\sin(\varphi)}{\sin(\varphi + \alpha)} \quad (\text{A.10})$$

Deze formule geldt ook voor stroming van talud af, als men voor α een negatieve waarde invult.

INHOUD

SYMBOLLEN	5
1 INLEIDING	7
1.1 Voorgeschiedenis	7
1.2 Inhoud onderhavig rapport	7
2 RANDVOORWAARDEN EN UITGANGSPUNTEN	9
3 BEREKENING STROOMSNELHEDEN	14
4 DIMENSIONERING VAN BODEMBESCHERMING	16
4.1 Typen bodembeschermingen	16
4.2 Dimensionering van steengrootte in toplaag	17
4.3 Breedte van bodembescherming voor kademuur	18
5 GEVOELIGHEIDSONDERZOEK STEENDIAMETER	20
6 DISCUSSIE EN AANBEVELINGEN	27
6.1 Discussie	27
6.2 Aanbevelingen	32
REFERENTIES	33
BIJLAGE A. OVERZICHT VAN SCHROEFSTRAAL- EN DIMENSIONE- RINGS-FORMULES BIJ DE METHODE VAN IH	1
A.1 Uitstroomsnelheid achter schroef	1
A.2 Schroefstraal zonder kade of ongeveer evenwijdig aan kade	2
A.3 Schroefstraal loodrecht tegen kademuur	5
A.4 Dimensioneren steenbestorting	6
BIJLAGE B. VERGELIJKING MET METHODE VAN RÖMISCH	1
B.1 Inleiding	1
B.2 Uitstroomsnelheid achter schroef	1
B.3 Schroefstraal zonder kade of ongeveer evenwijdig aan kade	2
B.4 Boegschroefstraal loodrecht tegen kademuur	5
B.5 Dimensioneren steenbestorting	5
B.6 Conclusies	6

BIJLAGE C.	ONDERZOEK HAMBURG	1
	C.1 Beschrijving van het onderzoek	1
	C.2 Stroomsnelheden door de hoofdschroef	3
	C.3 Stroomsnelheden door de boegschroef	4
	C.4 Stabiliteit van stenen	5
	C.5 Afvaarmanoeuvres	6
	C.6 Conclusies	6
BIJLAGE D.	LITERATUUR-OVERZICHT BETREFFENDE SCHROEFSTRAL- LEN EN BODEMBESCHERMINGEN	1

SYMBOLEN

- $a_s, b_s =$ coëfficiënten in vgl.(B.4)-(B.5) in bijlage B voor de berekening van stroomsnelheden in een schroefstraal [-]
- $E =$ coëfficiënt in vgl.(B.8) in bijlage B voor de berekening van de maximale stroomsnelheid boven de bodem [-]
- $D_0 =$ diameter van de straal kort achter de schroef, ter plaatse van maximale dwarscontractie [m]
 $D_0 = D/\sqrt{2} \approx 0,70.D_p$ bij schroeven zonder straalbuis
 $D_0 = 0,85.D_p$ bij schroef-straalbuiscombinaties in tunnel
 $D_0 = 1,00.D_p$ bij schroeven in een straalbuis
- $D_p =$ diameter van de schroef (Eng.: "propeller") [m]
- $f =$ correctie-factor die de toename van de stroomsnelheid in rekening brengt als gevolg van begrenzingen van de radiale verspreiding van de straal ($f \geq 1$) [-]
- $h_{pb} =$ hoogte van de schroefas (Eng: 'propeller-axis') boven de bodem [m].
- $K_{TP} =$ stuwkrachtscoëfficiënt van de schroef [-]
- $m =$ coëfficiënt in vgl.(B.4) in bijlage B [-]
- $n_p =$ toerental van de schroef [omw/sec.]
- $P =$ aangewend motorvermogen per schroef [W]
- $T_p =$ stuwkracht van de schroef [Newton = kg.m/s²]
- $r =$ radiale afstand tot de schroefas [m]
- $U(x,r) =$ tijd-gemiddelde stroomsnelheid evenwijdig aan de schroefas in punt met coördinaten (x,r) [m/s]
- $U_0 =$ stroomsnelheid achter de schroef, ter plaatse van maximale dwarscontractie van de straal [m/s]
- $U_{b,max} =$ maximale snelheid boven de bodem [m/s]
- $U_{b,max,enkel} = U_{b,max}$ in de situatie van één enkele schroef [m/s]
- $x =$ horizontale afstand achter de schroef, gemeten in het verlengde van de schroefas [m]

- x_{pk} = horizontale afstand van de uitstroomopening van een boeg- of hek-schroefstraalbuis tot de kade [m]
- y = horizontale coördinaat loodrecht op de straalas [m]
- y_p = horizontale afstand tussen de schroefas en de scheepsas [m]
- r_{pb} = $\sqrt{(h_{pb})^2 + y_p^2}$
- D_{50} = mediane steendiameter [m]
- m_h = coëfficiënt voor helling [-]
- $U_{b,max}$ = maximale tijd-gemiddelde stroomsnelheid nabij de bodem [m/s]
- Δ = $(\rho_s - \rho_w)/\rho_w$ = relatieve dichtheid van stortsteen [-]
- ρ_s = dichtheid van steen [kg/m³]
- ρ_w = dichtheid van water [kg/m³]
- $\beta_{ls,cr}$ = kritieke stabiliteitscoëfficiënt in de relatie van Isbash bij begin van beweging [-]
- α = hellingshoek van talud [°]
- φ = hoek van inwendige wrijving van stenen [°]

1 INLEIDING

1.1 Voorgeschiedenis

De laatste jaren is er sprake van een groeiende erkenning van de noodzaak om de havenbodem voor kademuuren te voorzien van een bodembescherming, teneinde ontgrondingen als gevolg van de stralen van boeg-, hek- en hoofdschroeven te voorkomen. Bodembescherming wordt steeds meer noodzakelijk vanwege de toenemende capaciteit van de schroeven en vanwege het toenemende gebruik van boeg- en hekschroeven¹⁾.

Anderzijds is ook onderkend dat het rekeninstrumentarium voor het dimensioneren van een bodembescherming nog steeds vrij gebrekkig is. Er blijkt bijvoorbeeld een aanzienlijk verschil te bestaan tussen de rekenmethode die in Nederland wordt gehanteerd (gebaseerd op metingen bij het Waterloopkundig Laboratorium) en de rekenmethode van Römisch en Fuehrer die in Duitsland wordt gehanteerd.

Voor de situatie van een boegschroefstraal loodrecht tegen een kademuur waren tot 1993 nog geen meetresultaten bekend.

Daarom zijn in opdracht van het Gemeentelijk Havenbedrijf in 1993/94 door het Ingenieursbureau Havenwerken veld-proeven uitgevoerd met een schroefstraal loodrecht tegen een kademuur in de Beneluxhaven (ref.4). Op basis hiervan is een berekeningsmethode afgeleid voor schroefstralen loodrecht tegen een kademuur.

Verder is in Duitsland in 1994 in opdracht van Strom- und Hafengebäudebau van de haven van Hamburg een vrij omvangrijk modelonderzoek gedaan naar de belasting door boeg- en hoofdschroeven (ref.9, 10).

1.2 Inhoud onderhavig rapport

In opdracht van het Gemeentelijk Havenbedrijf wordt in het onderhavige rapport in de eerste plaats een overzicht gegeven van de huidige reken- en ontwerpmethodes die door het Ingenieursbureau Havenwerken van Gemeentewerken Rotterdam wordt gehanteerd bij het dimensioneren van bodembeschermingen die worden belast door schroefstralen.

Bij de beschrijving van de huidige ontwerpmethodes wordt achtereenvolgens een beschrijving gegeven van:

- het vaststellen van uitgangspunten en randvoorwaarden (hfdst.2);

1) Een hekschroef is een vergelijkbare schroef als een boegschroef (dus met de as dwars op de lengterichting van het schip), maar dan geplaatst aan de achterzijde van het schip.

- het berekenen van de stroomsnelheden boven de bodem (hfdst.3, en gedetailleerde beschrijving van wiskundige relaties in bijlage A);
- het dimensioneren van de steengrootte (hfdst.4 , en wiskundige relatie in bijlage A);
- het dimensioneren van de belangrijkste afmetingen van een bodem-bescherming (hfdst.4).

Een gevoeligheidsonderzoek betreffende de dimensionering van steengrootte wordt gepresenteerd in hoofdstuk 5.

Verder wordt in bijlage B een beschrijving gegeven van de rekenmethode van Römisch en Fuehrer, en wordt deze rekenmethode vergeleken met de rekenmethode die wordt gehanteerd door het Ingenieursbureau Havenwerken (IH).

In bijlage C wordt een samenvatting gegeven van de belangrijkste onderdelen en resultaten van het onderzoek dat is uitgevoerd in opdracht van Strom- und Hafenubau van de haven van Hamburg. Hierbij wordt ook een vergelijking gemaakt met de rekenmethode van IH.

Tenslotte wordt in bijlage D een overzicht gegeven van alle bij het Ingenieursbureau Havenwerken beschikbare literatuur betreffende schroefstralen, en daarbij te dimensioneren bodembeschermingen.

2 RANDVOORWAARDEN EN UITGANGSPUNTEN

In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de randvoorwaarden en uitgangspunten die worden toegepast bij het dimensioneren van een bodembescherming belast door schroefstralen.

De randvoorwaarden en uitgangspunten dienen in principe door of in overleg met de opdrachtgever te worden vastgesteld.

Algemeen uitgangspunt:

Bij de vigerende ontwerppraktijk voor bodembeschermingen wordt in het algemeen uitgegaan van de randvoorwaarden die gelden in de huidige situatie of in de periode direct na oplevering van de constructie. Dit betekent dat geen rekening wordt gehouden met ontwikkelingen op langere termijn, zoals toename van scheepsafmetingen en motorvermogens. In onderling overleg met de opdrachtgever kan wel rekening worden gehouden met ontwikkelingen op de langere termijn.

Schip:

Van het maatgevende schip dienen de volgende gegevens bekend te zijn:

- lengte en breedte
- maximale diepgang (bij 'summer salt water')
- aantal schroeven
- beschikbaar vermogen per schroef
- diameter van schroeven
- plaatsing van schroeven (wel/niet in tunnel of buis)
- horizontale afstand tussen schroefassen (indien 2 of meer schroeven naast elkaar zijn geplaatst)
- hoogte van schroefas boven scheepskiel
- lengte van buis van boeg- en hekschroeven
- wel/niet aanwezig zijn van roer achter de hoofdschroef

Manoeuvre en afmering:

Relevante gegevens betreffende de aankomst- en afvaarmanoeuvre en de afmering van de schepen zijn:

- primair noodzakelijke gegevens:
 - actuele diepgang
 - actueel vermogengebruik
- aanvullende gegevens:
 - actuele roerhoeken
 - frequentie van aankomst en afvaart
 - variabele of vaste ligplaats
 - afmeerrichting (haveninwaarts of havenuitwaarts)

gebruikelijk afmeer- en afvaarmanoeuvres

(o.a. hoek van scheepsas t.o.v. kademuur, posities waarbij hoofdschroef wordt gebruikt, tijdsduur van schroefgebruik)

De primair noodzakelijke gegevens (diepgang en motorvermogen) worden expliciet ingevoerd bij de toegepaste rekenmethode.

De overige gegevens worden alleen globaal of kwalitatief in rekening gebracht, omdat de rekenmethode geen relaties of parameters bevat waarmee deze gegevens kwantitatief en met redelijke nauwkeurigheid kunnen worden verdisconteerd.

De genoemde gegevens dienen in principe door de opdrachtgever verstrekt te worden. Indien dit niet het geval is worden de volgende uitgangspunten gehanteerd:

actuele diepgang:

maximale diepgang van het schip bij 'summer salt water', met deze beperking dat de combinatie van actuele diepgang en maatgevende waterstand geen kielspeling oplevert die kleiner is dan een zekere minimale kielspeling.

actueel vermogengebruik van boegschroef en hekschroef:

100 % van het beschikbare vermogen.

Dit geldt ook indien er sprake is van sleepboothulp.

De tijdsduur waarover de boeg- en hekschroef worden gebruikt wordt mede bepaald door de windrichting. Indien schepen door de overheersende windrichting van de kade af worden gezet, dan worden boeg- en hekschroef minder gebruikt. Expliciete gegevens hierover zijn echter niet bekend, en de rekenmethode is niet geavanceerd genoeg om de tijdsduur van de belasting in rekening te brengen.

actueel vermogengebruik van hoofdschroef bij zeeschepen:

25 % van het beschikbare vermogen²⁾;

echter er wordt uitgegaan van 50 à 75 % ³⁾ indien er sprake is van:

- een relatief klein zeeschip;
- afwezigheid van sleepboothulp en hekschroef;

-
- 2) In een overleg van 23-02-1993 tussen IH, een nauticus van GHR en loodsen is voor het plan Delta 2000-8 gesteld dat containerschepen bij het afmeren de hoofdschroef in het algemeen in de stand 'zeer langzaam' (25 % van het vermogen) gebruiken, maar dat soms ook de stand 'langzaam' wordt gebruikt.
- 3) Bij een onderzoek van 6 afvaarmanoeuvres van grote containerschepen (lengte ca. 260 m, breedte ca. 32 m, diepgang 9 à 11 m) in de haven van Hamburg is bij 3 afvaarten een maximaal vermogengebruik van 40 % geconstateerd, en bij 3 afvaarten 65 %. De afvaarten met 65 % van het vermogen betrof vooruit afvaren zonder hekschroef. De afvaarten met 40 % van het vermogen betrof 1 afvaart vooruit met hekschroef en 2 afvaarten achteruit zonder hekschroef. Bij alle manoeuvres is er sleepboothulp aan de achterzijde van het schip. Bij één manoeuvre (achteruit wegvarend) is er ook een sleepboot aan de voorzijde van het schip.

- een gecompliceerde afmeersituatie, waarin relatief veel gemanoeuvreed wordt.

actueel vermogengebruik van hoofdschroef bij binnenvaartschepen:
50 à 100 % van het beschikbare vermogen.

actuele roerhoeken:

roerhoek varieert tussen 0° en 35°.

Indien geen sleepboothulp en geen hekschroef aanwezig is, dan wordt uitgegaan van een hoek van 35°, met een relatief groot vermogengebruik (om met het achterschip los te komen van de kade).

frequentie van aankomst en afvaart:

frequente afvaart (meerder malen per week)

variabele of vaste ligplaats:

vaste ligplaats, zodat de bodem steeds op dezelfde plaats wordt belast.

afmeerrichting:

beide afmeerrichtingen komen voor (met de boeg zowel haveninwaarts als havenuitwaarts).

Kademuur:

De geometrie van de kademuur en de afmetingen van fenders zijn mede bepalend voor de afstand tussen de uitstroomopening van de boeg/hekschroef en de kademuur/damwand.

Er wordt (nog) geen rekening gehouden met de mogelijke reductie van stroomsnelheden boven de bodem onder invloed van de vorm van de kademuur en de stand (verticaal of schuin) van de damwand onder de kademuur.

Niveau bovenkant bodembescherming:

Het hoogst mogelijke aanlegniveau van de bovenkant van de bodembescherming wordt zodanig gekozen dat rekening houdend met aanlegtoleranties de bovenkant van de bodembescherming op een zeker minimaal percentage van het oppervlak meer dan 0,5 m beneden de contractdiepte komt te liggen.

Deze 0,5 m is de vereiste vrije ruimte (of tolerantie) voor de uitvoering van onderhoudsbaggerwerk (d.w.z. het verwijderen van aanslibbing en aanzanding) boven de bodembescherming.

Deze ontwerpmethode voor de bovenkant van de bodembescherming, waarbij expliciet rekening worden gehouden met aanlegtoleranties en over- en onderschrijdingspercentages van de ondergrens van de baggertoleran-

tie, is een recente ontwikkeling. Dit betekent dat de discussie over de te hanteren toleranties en over- en overschrijdingspercentages nog niet is afgerond.

Voorlopige richtlijn is:

op minimaal 97,5 % van het oppervlak ligt de bovenkant meer dan 0,5 m beneden de contractdiepte.

Dit betekent dat op maximaal 2,5 % van het oppervlak de bovenkant van de bodembescherming binnen de tolerantie voor onderhoudsbaggerwerk komt te liggen.

Een overschrijdingspercentage van 2,5 % correspondeert met 2 maal de standaardafwijking ($= 2.\sigma$) van de variaties die optreden bij het aanbrengen van de bodembescherming. (Dit geldt als wordt uitgegaan van een statistisch normale verdeling).

Afhankelijk van de situatie en de wensen van de opdrachtgever kan ook worden gekozen voor een strenger criterium:

op maximaal 0,1 % van het oppervlak komt de bovenkant van de bodembescherming binnen de baggertolerantie, corresponderend met 3 maal de standaardafwijking ($3.\sigma$) van de variaties bij het aanbrengen.

Het is ook mogelijk om te eisen dat de bovenkant van de bodembescherming nergens binnen de baggertolerantie komt.

In dit geval geldt als richtlijn dat het aanlegniveau van de bovenkant van de bodembescherming minimaal $3.\sigma$ beneden de baggertolerantie wordt gekozen. Hierbij zullen op maximaal 0,1 % van het oppervlak van de bodembescherming corrigerende maatregelen (bijv. verwijderen van stenen) moeten worden uitgevoerd, omdat de bovenkant van de bodembescherming hier na eerste aanleg binnen de baggertolerantie ligt.

Waterstand:

Als maatgevende waterstand wordt een laagwaterstand met een bepaalde overschrijdings-frequentie gekozen.

Bij de keuze van de overschrijdings-frequentie wordt impliciet rekening gehouden met de kans dat een bepaalde laagwaterstand samenvalt met de afvaart van een schip met maximale diepgang en met het aangenomen vermogen-gebruik.

Richtlijn voor keuze van een maatgevende waterstand is:

- de gemiddelde laagwaterstand (GLW, overschrijdings-frequentie ca. 300 maal per jaar) wordt gekozen als de schepen vaak niet tot maximale diepgang zijn beladen (zoals bij containerschepen) of als de afvaarfrequentie van het maatgevende schip laag is;
- een laagwaterstand met een overschrijdings-frequentie van 25 of 10 getijden per jaar wordt gekozen als de maatgevende schepen

meestal met maximale diepgang afvaren (bijv. duwbotten, olietankers en ertstankers) èn als de afvaarfrequentie (vrij) hoog is.
Deze laagwaterstand ligt 50 à 60 cm beneden GLW (zie tabel).

Tabel. Laagwaterstanden bij verschillende onderschrijdingsfrequenties.

onderschrijdingsfrequentie	laagwaterstand t.o.v. N.A.P.			laagwaterstand t.o.v. GLW
	Rotterdam	Hoek v. Holland	Europoort	
GLW (ca. 300 getijden per jaar)	-0,43 m	-0,64 m	-0,80 m	0,00 m
100 getijden per jaar	-0,71 m	-0,92 m	-1,08 m	-0,28 m
25 getijden per jaar (≈ aantal springtijden)	-1,19 m	-1,40 m	-1,56 m	-0,48 m
10 getijden per jaar	-1,77 m	-1,98 m	-2,14 m	-0,58 m
1 getij per jaar	-2,62 m	-2,83 m	-2,99 m	-0,85 m

Onderhoudsniveau, c.q. veiligheid in de gebruiksfase:

Er kan worden gekozen voor een constructie die 'veilig' of 'minder veilig' wordt gedimensioneerd.

Bij een 'veilig' gedimensioneerde constructie wordt in de gebruiksfase (vrijwel) geen onderhoud verwacht.

Bij een 'minder veilig' gedimensioneerde constructie is er een significante kans op schade, en moet rekening worden gehouden met de mogelijke noodzaak van (regelmatig) onderhoud. In dit geval is in principe een intensievere monitoring noodzakelijk.

De huidige rekenmethode is niet geavanceerd genoeg om het onderhoudsniveau met redelijke nauwkeurigheid kwantitatief te kunnen voorspellen.

3 BEREKENING STROOMSNELHEDEN

Uitstroomsnelheid achter de schroef

De uitstroomsnelheid achter de schroef wordt berekend met één van de relaties uit § A.1 van bijlage A.

Stralen die niet loodrecht tegen een kademuur staan

De maximale stroomsnelheid boven de bodem ($U_{b,max}$) wordt berekend met vgl.(A.4) of (A.5) uit § A.2 van bijlage A.

Deze vergelijkingen zijn afgeleid uit vergelijking (A.3) voor de snelheidsverdeling binnen een vrije schroefstraal. De laatstgenoemde vergelijking is gebaseerd op metingen in een schaalmodel in het Waterloopkundig Laboratorium (ref.1 en 2).

Er is sprake van een vrije straal als de verspreiding van de straal nergens wordt belemmerd.

In werkelijkheid is er wél sprake van belemmering van de verspreiding als gevolg van de aanwezigheid van een havenbodem en een wateroppervlak. Dit heeft tot gevolg dat de werkelijke snelheid boven de bodem groter is dan de snelheid die met de relatie voor een vrije straal wordt berekend.

Het verschil tussen de berekende en de werkelijke snelheid wordt groter indien er sprake is van extra belemmeringen, zoals de aanwezigheid van een kademuur of een oevertalud. In mindere mate kunnen ook palen (van steiger of remming-werk) en fenders de verspreiding belemmeren.

Het verschil tussen de werkelijke en de berekende waarde voor $U_{b,max}$ wordt in rekening worden gebracht door de met de vrije-straal-vergelijking berekende waarde met een correctie-factor f te vermenigvuldigen.

Toegepast wordt:

- $f = 1$ als er alleen sprake is van begrenzing door bodem en wateroppervlak;
- $f = 1,1$ als de straal ongeveer evenwijdig aan een kademuur of oevertalud is gericht;
- $f = 1,2$ als de straal schuin tegen een kademuur of tegen een oevertalud is gericht.

Het verschil tussen de werkelijke en de met de vrije straal relatie berekende snelheid is groter dan de toegepaste factor f .

Voor de situatie met alleen een bodem en een wateroppervlak wordt immers $f = 1$ toegepast, terwijl er de werkelijke snelheid toch groter is dan de vrije straal snelheid.

Overeenkomstig met de rekenmethode van ref.1 wordt er echter vanuit gegaan dat het verschil tussen werkelijke snelheid en berekende vrije straal snelheid, voor de situatie met alleen een bodem en een wateroppervlak, is verdisconteerd in de stabiliteitsfactor β_s (zie § B.5 in bijlage B) van de stenen.

Stralen loodrecht tegen een kademuur

De maximale stroomsnelheid boven de bodem voor een kademuur die wordt veroorzaakt door een schroefstraal loodrecht tegen de kademuur wordt berekend met vergelijking (A.6) en (A.7) in § A.3 van bijlage A.

Deze vergelijkingen zijn getoetst door één serie prototype-metingen in de Beneluxhaven (ref.4).

Terugdraaiende hoofdschroeven

Terugdraaiende schroeven werken minder efficiënt dan vooruit draaiende schroeven. De uitstroomsnelheid zal bij een gelijk vermogengebruik daarom kleiner zijn dan bij een vooruit draaiende schroef.

De verspreiding van de straal uit een terugdraaiende schroef wordt belemmerd door de scheepsromp. Enerzijds betekent dit extra energie-dissipatie, anderzijds wordt de straal afgebogen naar de bodem en kan de impuls zich in radiale richting minder verspreiden.

Er zijn voor zover bekend nog nooit metingen uitgevoerd bij een terugdraaiende hoofdschroef en er is ook nog geen rekenmethode voor ontwikkeld.

Bij gebrek aan kennis wordt er vooralsnog vanuit gegaan dat terugdraaiende hoofdschroeven geen grotere belasting op de bodem veroorzaken dan vooruit draaiende schroeven.

4 DIMENSIONERING VAN BODEMBESCHERMING

4.1 Typen bodembeschermingen

De volgende typen bodembeschermingen zijn mogelijk:

- 1) A) toplaag van los granulair materiaal (meestal breuksteen) op een granulaire filterconstructie;
B) toplaag van los granulair materiaal (meestal breuksteen) op een filterconstructie met een filterdoek (c.q. zinkstuk of kraagstuk);
- 2) breuksteen gepenetreerd met colloïdaal beton of gietasfalt;
- 3) matten of matrassen, in de vorm van:
steenasfaltmatten (toegepast in Antwerpen en Zeebrugge)
blokkenmatten (toegepast in Hamburg en bij veerhaven Texel).
steenmatrassen (toegepast in Antwerpen)
geotextielmatten gevuld met beton (toegepast in Hamburg);
- 4) bodeminjectie.

Bodembeschermingen in de vorm van matten, matrassen of bodeminjectie zijn in de Rotterdamse haven nog niet op grote schaal toegepast.

De typen bodembeschermingen zijn gerangschikt in volgorde van toenemende aanlegkosten, waarbij type 2 (met colloïdaal beton) en type 1 (met zware breuksteen) relatief het minst in aanlegkosten verschillen.

De toename van de aanlegkosten gaat gepaard met een afname van de dikte van de bodembeschermingstypen.

De voorkeur gaat uit naar een bestorting van los granulair materiaal (type 1), omdat dit type het meest gunstig is ten aanzien van:

- aanlegkosten,
- flexibiliteit van de constructie,
- herstelmogelijkheden van schade.

Een ander type bodembescherming dan type 1 wordt in principe alleen in de volgende gevallen toegepast:

- als de stroomsnelheden zodanig groot zijn dat de dikte van het bestortingspakket niet binnen de beschikbare constructieruimte (bijv. tussen contract- en constructiediepte) gerealiseerd kan worden;
- als de totale bouwkosten van bodembescherming en kademuurconstructie bij toepassing van een duur type bodembescherming met een kleine laagdikte lager zijn dan bij toepassing van een goedkoop type bodembescherming met grote laagdikte. Deze situatie kan zich voordoen omdat bij een

dunne bodembescherming een minder diep stekende kademuurconstructie nodig is;

- als op een relatief klein deel van een type 1 bodembescherming lokaal extra grote stroomsnelheden optreden. Hier kan een bestorting van los breuksteen lokaal worden versterkt door penetratie (type 2).

Opgemerkt dient te worden dat bij de keuze van een type bodembescherming in principe ook de onderhoudskosten in beschouwing moeten worden genomen. Deze zijn echter nog moeilijk vooraf te kwantificeren.

In deze versie van het onderhavige rapport wordt in het vervolg alleen ingegaan op bodembeschermingen bestaande uit los granulair materiaal (type 1).

4.2 Dimensionering van steengrootte in toplaag

Vanwege de zwaarte van de stromingsbelasting door schroefstralen, bestaat de toplaag in de meeste gevallen uit breuksteen.

In situaties met minder grote belasting (bijv. bij relatief grote kielspeling) kunnen mogelijk andere materialen worden toegepast, zoals betonpuin, staalslakken, fosforslakken of mijnsteen.

De mediane steendiameter (D_{50}) van een steenbestorting wordt gedimensioneerd met de relatie van Isbash (zie § A.4 van bijlage A). In deze relatie komt een stabiliteitscoëfficiënt $\beta_{Is,cr}$ voor. Voor deze coëfficiënt worden in de literatuur waarden gegeven die variëren tussen 1,3 en 6,6. De te gebruiken waarde van $\beta_{Is,cr}$ is mede afhankelijk van de methode waarmee de maximale stroomsnelheid boven de bodem wordt berekend.

Door het Ingenieursbureau Havenwerken wordt uitgegaan van:

$$\beta_{Is,cr} = 3,0, \text{ als geen beweging van stenen wordt geaccepteerd,}$$

$$\beta_{Is,cr} = 2,5, \text{ als enige beweging van stenen acceptabel is.}$$

De waarde $\beta_{Is,cr} = 3,0$ komt overeen met de waarde die door in ref.3 wordt aanbevolen in combinatie met de berekening van $U_{b,max}$ met de vrije straal theorie.

De waarde $\beta_{Is,cr} = 3,0$ is ook bevestigd door de prototype-metingen in de Beneluxhaven met een schroefstraal loodrecht tegen een kademuur (ref.4).

Voor de situatie zonder kademuur kan theoretisch een andere waarde van $\beta_{Is,cr}$ geldig zijn, dan voor de situatie van een straal loodrecht tegen een kademuur. Dit omdat bij een straal loodrecht tegen een kademuur dicht voor de kademuur lokale overdrukken optreden, waardoor de stenen mogelijk bij een lagere stroomsnelheid in beweging kunnen komen dan in de situatie zonder kademuur. Echter zoals in hoofdstuk 3 is vermeld, wordt de werkelijke stroomsnelheid door de vrije straal relatie onderschat. Dit verschil wordt gedeeltelijk verdisconteerd

in de waarde van $\beta_{s,cr}$. Daarom wordt ook voor een straal die niet loodrecht tegen een kademuur is gericht, gerekend met $\beta_{s,cr} = 3,0$ (à 2,5). Opgemerkt moet worden dat de onderbouwing van deze waarden nog steeds zwak is.

Bij de keuze van een steenbestorting wordt tot nu toe uitgegaan van de verwachtingswaarde van de mediane steendiameter (D_{50}). Er wordt dus buiten beschouwing gelaten dat de D_{50} van de werkelijk aangevoerde steensortering binnen de bestek- of NEN-eisen enigszins kan afwijken van de verwachtingswaarde.

4.3 Breedte van bodembescherming voor kademuur

De basisregel voor de keuze van de breedte van een bodembescherming naast een kademuur is, dat deze 5 m breder wordt gekozen dan de breedte van de passieve grondwig voor de kademuur.

De bodembescherming wordt 5 m breder gekozen dan de passieve grondwig om te voorkomen dat de inhoud van de passieve grondwig wordt aangetast als gevolg van het meezakken van de rand van de bodembescherming met ontgroningen naast de bodembescherming.

In de volgende gevallen kan een kleinere breedte dan volgens de basisregel worden gekozen:

- als het toelaatbaar is dat een deel van de inhoud van de passieve grondwig wordt aangetast door erosie of zakkings van de rand van bodembescherming.
Dit kan toelaatbaar zijn als de bovenkant van de bodembescherming voldoende ver boven de constructiediepte van de kademuur ligt, en daardoor voor een significante bovenbelasting op de passieve grondwig zorgt.
- als verwacht wordt dat de hoofdschroeven van schepen naast de bodembescherming geen significante erosie zullen veroorzaken, bijvoorbeeld omdat:
 - * een erosiebestendige laag aanwezig is (klei),
 - * een sterke natuurlijke sedimentatie optreedt,
 - * schepen steeds op een andere manier wegvaren en daarbij eerder gemaakte erosiekuilen weer opvullen met nieuw geërodeerd bodemmateriaal.

Bij 'normale' ontgrondingen naast een bodembescherming (c.q. ontgrondingsdiepte maximaal ca. 3 m) hoeft bij het ontwerp geen rekening te worden gehouden met de kans op afschuivingen of zettingsvloeiingen.⁴⁾

4) Bij onderzoek in de Zeeuwse wateren is gebleken dat zettingsvloeiingen en afschuivingen daar pas optreden bij een minimale ontgrondingsdiepte van resp. 5 en 9 m (ref.5). Een en ander is echter sterk afhankelijk van de lokale grondparameters.

5 GEVOELIGHEIDSONDERZOEK

De berekening van stroomsnelheden en de dimensionering van de bodembescherming wordt gekenmerkt door verschillende onnauwkeurigheidsmarges. Dit betreft onnauwkeurigheden in de berekenings-variabelen en het betreft onnauwkeurigheden in de rekenmethodiek (bijv. geen rekening houden met de aanwezigheid van een roer). Laatstgenoemde onnauwkeurigheden worden gekwantificeerd in een correctie-factor f .

In tabel 1 aan het eind van dit hoofdstuk worden schattingen gepresenteerd van de onnauwkeurigheidsmarges in de diverse berekenings-variabelen en correctiefactoren.

Tevens zijn in tabel 1 de corresponderende onnauwkeurigheidsmarges in de stroomsnelheid en steendiameter vermeld, zoals deze zijn berekend met vgl.(A.1), (A.2), (A.6) en (A.8) uit bijlage A.

In het vervolg wordt eerste een onderbouwing gegeven van de schatting van de onnauwkeurigheidsmarges in de berekenings-variabelen en correctiefactoren. Aan het eind van dit hoofdstuk worden conclusies geformuleerd.

Onderbouwing van schatting van onnauwkeurigheidsmarges.

$P =$ bij manoeuvre ingezet motorvermogen.

Hoofdschroef:

Bij methode van IH wordt in principe uitgegaan van 25 % van het maximale vermogen.

In Hamburg is een vermogengebruik van 65 % van het maximale vermogen gemeten.

In extreme (nood-)situaties is gebruik van het volledige maximale vermogen denkbaar.

Boegschroef:

Er doen zich altijd situaties voor waarin boeg- en hekschroef met maximaal vermogen worden gebruikt. Bij de boeg- en hekschroef is er dus geen sprake van een onzekerheidsmarge betreffende het maximale vermogengebruik.

$D_o =$ diameter van schroefstraal direct achter de schroef.

Römisch rekent in vgl.(B.7) altijd met $D_o = D_p$, terwijl bij de IH-methode voor een vrij staande schroef wordt gerekend met $D_o = 0,7 * D_p$.

Het is ook niet altijd goed bekend wat de exacte schroefdiameter van maatgevende schepen is. Hierbij kan een onzekerheid ca. 25 % bestaan.

$h_{pb} =$ hoogte van de schroefas van hoofdschroeven boven de bovenkant van de bodembescherming.

Twee recente bodembeschermingsontwerpen voor zeebaden in de Rotterdamse haven, waarbij sprake is van een zeer kleine waarde van h_{pb} , zijn:

- * Eemhaven, Interforrest:
maatgevend schip heeft een hoofdschroef-diameter van 4,25 m;
bij extreem laagwater van N.A.P.-1,20 m en een maximale belading van het maatgevend schip bedraagt de kielspeling 1,00 m;
bij het maatgevende schip bedraagt de verticale afstand van de schroefas boven de scheepskiel 2,60 m;
dit betekent dat h_{pb} minimaal 3,60 m bedraagt;
- * Laurens haven, O.Z.:
bij een bepaald deel van de kademuur kan het maatgevende schip in maximaal beladen toestand bij extreem laagwater niet afmeren voor de kademuur, omdat de kielspeling dan kleiner is dan nul;
een extreem kleine kielspeling van ca. 0,5 m behoort hier dus tot de mogelijkheden;
rekening houdend met de hoogte van de schroefas boven de kiel bedraagt h_{pb} hierbij ca. 4,00 m.

In overweging nemend dat extreem laagwaterstanden niet zo vaak optreden, en dat schepen (met name containerschepen) vaak niet maximaal beladen zijn zal h_{pb} bij de meeste manoeuvres minstens 2 m groter zijn dan de genoemde minimale waarden van h_{pb} . Dus $h_{pb} = 4$ à 6 m.

$x_{pk} + h_{pb} =$ afstand van de uitstroomopening van de straalbuis van boeg- of hekschroeven naar de bodem.
(x_{pk} = horizontale afstand van de uitstroomopening tot de kade).

Uitgaande van een schip van 32 m breedte, en rekening houdend met een fender-dikte van 0,5 à 1 m en een halve straalbuislengte van 2 à 3 m wordt $x_{pk} \approx 13,5$ à 15 m.

Uitgaande van $h_{pb} = 4$ à 6 m volgt nu $x_{pk} + h_{pb} = 17,5$ à 21 m.

Bij smallere schepen is x_{pk} kleiner. Bij binnenvaartschepen kan gelden:

$x_{pk} + h_{pb} \approx 7$ à 10 m.

$f_{roer} =$ vergrotingsfactor van stroomsnelheid boven de bodem t.o.v. de vrije straal theorie ten gevolge van de splitsing van de straal door een roer.

Uit één meting, waarvan het resultaat in ref.1 (fig.31) wordt gepresenteerd, volgt dat op een niveau van $1,41 \cdot D_0$ onder de schroefas de maximale stroomsnelheid ongeveer 1,4 maal groter is dan de maximale snelheid die wordt gerekend met vgl.(A.4) met $f = 1$. Bij deze meting was geen vaste bodem aanwezig.

De maximale stroomsnelheid die bij het onderzoek van Hamburg is gemeten boven een ruwe bodembescherming in de situatie van een schroef met roer dicht boven de bodem was een factor 2,0 groter dan de maximale stroomsnelheid die met de methode van IH wordt berekend. De verschil-factor 2 is voor een onbekend deel veroorzaakt door de begrenzen invloed van de kanaalbodem.

Aanname is dat een factor 1,7 wordt veroorzaakt door het roer.

f_{kade} = vergrotingsfactor van stroomsnelheid boven de bodem t.o.v. de vrije straal theorie ten gevolge van de begrenzing van de straal door kademuur.

f_{kade} heeft betrekking op een straal die evenwijdig aan of onder een flauwe hoek ten opzichte van de kade is gericht.

Volgens de rekenmethodiek van Römisch is de maximale snelheid boven de bodem in de situatie waarin sprake is van begrenzing door een kademuur ongeveer een factor 2 groter dan in de situatie zonder kademuur. Dit volgt uit vgl.(B.7-8) met $b_s = 22,2$ en $m =$ resp. 0,3 en 0,6.

Bij de meting in de Beneluxhaven (ref.4) was de gemeten snelheid als gevolg van een straal onder een hoek van ca. 15° met de kademuur een factor een factor 1,4 groter dan volgens de rekenmethode van IH. Hierbij speelt ook begrenzing van de straal door de bodem een rol.

Het vermoeden bestaat dat de methode van Römisch een overschatting geeft van de invloed van een kade.

Bij een straal ongeveer evenwijdig met de kademuur wordt bij de IH-methode gerekend met $f_{kade} = 1,1$.

f_{bodem} = vergrotingsfactor van stroomsnelheid boven de bodem t.o.v. de vrije straal theorie ten gevolge van de begrenzing van de straal door de kanaalbodem.

De invloed van alleen een begrenzing door een bodem is niet kwantitatief bekend. Bij de meting in de Beneluxhaven (ref.4) was de gemeten snelheid boven de bodem voor de kademuur een factor 1,4 groter dan volgens de rekenmethode van IH. Hierbij was ook sprake van begrenzing door een kademuur. Aangenomen wordt dat begrenzing door een bodem alleen de snelheid met maximaal een factor 1,2 kan vergroten. Het effect hiervan is impliciet verdisconteerd in de waarde van $\beta_{ls,cr}$ voor een straal die niet loodrecht tegen een kademuur staat. Dit is echter nog niet door metingen onderbouwd.

$f_{kadevorm}$ = verkleiningsfactor van stroomsnelheid boven de bodem ten gevolge van een afwijkende vorm van de kademuur.

$f_{kadevorm}$ heeft betrekking op een straal die loodrecht tegen een kade is gericht.

Bij twee kadevormen met een breuksteenbestorting die bij het Duitse onderzoek zijn onderzocht verschilde de maximale snelheid boven de bodem een factor 1,16.

$f_{ruwheid}$ = vergrotingsfactor van stroomsnelheid boven de bodem t.o.v. de vrije straal theorie ten gevolge verschil in ruwheid van de bodembescherming.

De invloed van de bodemruwheid op de stroomsnelheden is onderzocht bij het Duitse modelonderzoek.

Bij de hoofdschroef was de maximale snelheid boven een gladde bodem een factor $1,45 \approx 1,5$ groter dan boven een breuksteenbestorting.

Bij de boegschroef was de maximale snelheid boven een gladde bodem een factor 1,30 à 1,55 groter dan boven de meest ruwe bodembescherming (de factor is afhankelijk van de vorm van de kademuur).

De grotere stroomsnelheid bij een kleinere ruwheid impliceert in dit geval geen zwaardere bodembescherming, want de belasting op de bodembescherming is mede afhankelijk van de ruwheid.

$1-\zeta$ = reductie-factor van de uitstroomsnelheid van boeg- en hekschroeven als gevolg van energieverliezen in de straalbuis.

Volgens Römisch kan de uitstroomsnelheid van boegschroeven door energie-verliezen met een factor $1-\zeta = 0,68$ à $0,93$ worden gereduceerd, en bij goed gestroomlijnde straalbuizen van containerschepen met een factor $0,86$ à $0,93$.

Bij de IH-methode wordt geen rekening gehouden met energieverliezen:

$1-\zeta = 1,0$.

$\beta_{is,cr}$ = kritieke stabiliteitscoëfficiënt bij begin van beweging van stenen.

Als alle in de literatuur vermelde waarden voor $\beta_{is,cr}$ in beschouwing worden genomen, dan kan $\beta_{is,cr}$ variëren tussen 1,3 en 6,6 (zie tabel B.1 in ref.1). Als de hoogste waarde van het WL voor 'geen transport' buiten beschouwing wordt gelaten, dan varieert $\beta_{is,cr}$ tussen 1,3 en 4. Dit is een factor 3 verschil tussen hoogste en laagste waarden.

De waarde van $\beta_{is,cr}$ is echter mede gekoppeld aan de rekenmethodiek voor de stroomsnelheden. Als de stroomsnelheden door de rekenmethodiek worden overschat, dan kan dit worden gecompenseerd door een kleinere waarde voor $\beta_{is,cr}$.

Gegeven de rekenmethodiek van IH wordt aangenomen dat $\beta_{is,cr}$ kan variëren tussen 2 en 3. En grotere variatie is echter niet uitgesloten, bijvoorbeeld mede afhankelijk van de ruwheid van de bodembeschermings-elementen.

Conclusies (op grond van tabel 1):

De grootste onnauwkeurigheid in D_{50} (factor 2,9) wordt veroorzaakt door de onnauwkeurigheid in f_{roer} .

Dit speelt waarschijnlijk alleen een rol als de schroefas van de hoofdschroef zich minder dan 1,5 maal de schroefdiameter boven de bodem bevindt. Dit is echter nog niet goed onderzocht.

Vervolgens wordt de grootste onnauwkeurigheid in D_{50} (factor 2,3) bij hoofdschroeven veroorzaakt door de hoogte van de schroefas boven de bodem (h_{pb}) en de begrenzende invloed van de kademuur (f_{kade}).

De gevoeligheid voor h_{pb} geldt alleen bij kleine kielspeling (ca. 1 m).

De mogelijke (grote) invloed van de kademuur is vooral gebaseerd op de theorie van Römisch en Fuehrer, waarvan de onderbouwing niet bekend is.

Daarna veroorzaakt het ingezette motorvermogen (P) de grootste onnauwkeurigheid in D_{50} (factor 1,9 à 2,5),

gevolgd door de stabiliteitscoëfficiënt $\beta_{is,cr}$ (factor 1,5, bij ongunstige aannames mogelijk oplopend tot 2 à 3).

Bij de boegschroeven van binnenvaartschepen kan het energieverlies $(1-\zeta)$ en de afstand van uitstroomopening naar bodem $(x_{pk} + h_{pb})$ een belangrijke onnauwkeurigheidsmarge in D_{50} veroorzaken, namelijk factor 2,0 à 2,3. Hierbij moet worden opgemerkt dat het energieverlies sterk afhankelijk is van de specifieke constructievorm van de straalbuis, en daarom nooit goed bekend zal zijn. Dit betekent dat altijd veilig ontworpen zal worden.

Wat buiten beschouwing is gelaten bij de gevoeligheidsanalyse is dat bij binnenvaartschepen de uitstroomopening van de boegschroef vaak schuin naar de bodem is gericht. In theorie kan hierdoor een grote stromingsbelasting op de bodem worden veroorzaakt. Er zijn voor zover bekend nog geen metingen verricht aan schuin naar beneden gerichte boegschroefstralen.

Tabel 1 Resultaten gevoeligheidsanalyse van dimensionering steendiameter

hoofd/ boegschroef	variabele X	minimale à maximale waarde van X	verhou- ding X_{max}/X_{min}	$U_{b,max}$ is evenredig met:	$U_{b,max}(X_{max})/U_{b,max}(X_{min})$	D_{50} is evenredig met:	$D_{50}(X_{max})/D_{50}(X_{min})$
H	P	(0,25 à 0,65) P_{max} (0,25 à 1,0) P_{max}	2,60 4,00	$P^{1/3}$	1,4 1,6	$P^{2/3}$	1,9 2,5
H + B	D_0		1,30	$D_0^{1/3}$	1,1	$D_0^{2/3}$	1,2
H	h_{pb}	4 à 6 m	1,50	h_{pb}^{-1}	$(1,5)^{-1}$	h_{pb}^{-2}	$(2,3)^{-1}$
zeevaart B	$x_{pk} + h_{pb}$	17,5 à 21 m	1,20	$(x_{pk} + h_{pb})^{-1}$	$(1,2)^{-1}$	$(x_{pk} + h_{pb})^{-2}$	$(1,4)^{-1}$
binnenvaart B	$x_{pk} + h_{pb}$	7 à 10 m	1,43	$(x_{pk} + h_{pb})^{-1}$	$(1,4)^{-1}$	$(x_{pk} + h_{pb})^{-2}$	$(2,0)^{-1}$
H	f_{roer}	1 à 1,7	1,70	f^1	1,7	f^2	2,9
H	f_{kade}	1 à 1,5	1,50	f^1	1,5	f^2	2,3
B	$f_{kadevorm}$	1 à 1,2	1,20	f^1	1,2	f^2	1,4
H	f_{bodem}	1 à 1,2	1,20	f^1	1,2	f^2	1,4
H + B	$f_{ruwheid}$	1 à 1,5	1,50	f^1	1,5	?	?
zeevaart B	$1-\zeta$	0,86 à 1,0	1,16	$(1-\zeta)^1$	1,2	$(1-\zeta)^2$	1,3
binnenvaart B	$1-\zeta$	0,68 à 1,0	1,47	$(1-\zeta)^1$	1,5	$(1-\zeta)^2$	2,2
H + B	$\beta_{ls,cr}$	2 à 3	1,50 (3,0)	-	-	$\beta_{ls,cr}^1$	1,5 (3,0)

Legenda: zie volgende pagina.

Legenda bij tabel 1:

- kolom 1: hier wordt aangegeven bij welk type schroefstraal de onnauwkeurigheid een rol speelt:
H: speelt een rol bij de straal van een hoofdschroef die niet loodrecht tegen een kade is gericht;
B: speelt een rol bij de straal van een boeg- of een hekschroef die loodrecht tegen een kade is gericht;
- kolom 2: variabele X, waarbij $X = P, D_0, h_{pb}, \text{ enz.}$
- kolom 3: schatting van de maximale en de minimale waarde van de variabele (resp. X_{\max} en X_{\min});
- kolom 4: verhouding tussen de maximale en de minimale waarde van de variabele X;
- kolom 5: verband tussen de $U_{b,\max}$ (maximale snelheid boven de bodem) en de variabele X:
 $U_{b,\max}$ is evenredig met X_{m1} , waarbij m1 varieert per variabele;
- kolom 6: verhouding tussen de waarden van $U_{b,\max}$ uitgaande van resp. X_{\max} en X_{\min} ;
- kolom 7: verband tussen de D_{50} (vereiste mediane steendiameter) en de variabele X:
 D_{50} is evenredig met X_{m2} , waarbij m varieert per variabele. Voor de meeste variabelen is $m2 = 2*m1$ omdat $D_{50} :: U_{b,\max}^2$.
- kolom 8: verband tussen de D_{50} (vereiste mediane steendiameter) en de variabele X:
 D_{50} is evenredig met X_{m2} , waarbij m varieert per variabele. Voor de meeste variabelen is $m2 = 2*m1$ omdat $D_{50} :: U_{b,\max}^2$.

6 DISCUSSIE EN AANBEVELINGEN

6.1 Discussie

In dit rapport is een beschrijving gegeven van de rekenmethode die door het Ingenieursbureau Havenwerken wordt gehanteerd bij het dimensioneren van bodembeschermingen van los gestorte breuksteen belast door schroefstralen. Tevens is in bijlage B een vergelijking gemaakt met de rekenmethode van Römisch (en Fuehrer) die bijv. in Duitsland en België (ref.5) wordt toegepast. Ook is in bijlage C een vergelijking gemaakt met recent onderzoek dat in Duitsland is uitgevoerd in opdracht van Strom- und Hafengebäudeamt van de haven van Hamburg (ref.9 en ref.10).

Boegschroefstralen loodrecht tegen een kademuur

Ten aanzien van de rekenmethode die door IH wordt gehanteerd bij het berekenen van snelheden veroorzaakt door boegschroeven kan worden geconcludeerd dat de resultaten van deze methode goed overeenkomen met de snelheden die bij het recente Duitse onderzoek zijn gemeten.

De eenvoudige rekenmethode van Römisch geeft duidelijk een overschatting van de gemeten snelheden.

Over de stabiliteitscoëfficiënt bij het dimensioneren van stenen is discussie mogelijk, want Römisch hanteert een coëfficiënt die ongeveer 4 maal kleiner is dan die bij de methode van IH ($\beta_{ls,cr} = 0,7$ i.p.v. 3,0).

De resulterende steendiameter is echter geen factor 4 groter, omdat de methode van IH een kleinere stroomsnelheid boven de bodem berekent dan Römisch.

Bij een kleine kielspeling berekent de IH-methode globaal een 2 maal kleinere stroomsnelheid boven de bodem, zodat beide methoden ongeveer dezelfde steendiameter opleveren (want de steendiameter is evenredig met het kwadraat van de snelheid).

Bij een grotere kielspeling geeft de IH-methode echter een kleinere steendiameter dan Römisch, want bij de IH-methode neemt de snelheid boven de bodem af met toenemende hoogte van de schroef boven de bodem. (Dit in tegenstelling tot de methode van Römisch).

Vooralsnog wordt er van uit gegaan dat de methode van IH bij schroefstralen loodrecht tegen een kademuur een goed resultaat geeft.

Wel moet worden opgemerkt dat bij de metingen in de Beneluxhaven, die aan de methode van IH ten grondslag liggen, de afhankelijkheid van de hoogte van de schroefas boven de bodem niet is onderzocht.

Hoofdschroefstralen zonder kademuur

Bij de hoofdschroefstraal wordt de stroomsnelheid boven de bodem door IH berekend met de vrije straal theorie. Er wordt geen rekening gehouden met de invloed van een roer. Dit is de algemeen gebruikelijke methode in Nederland. Omdat door de aanwezigheid van een bodem en een wateroppervlak geen sprake is van een vrije straal, wordt de snelheid boven de bodem met de vrije straal theorie onderschat. Er wordt vanuit gegaan dat het verschil met de werkelijke snelheid is verdisconteerd in de stabiliteitscoëfficiënt

In de situatie zonder kademuur berekent Römisch een snelheid boven de bodem die een factor 1,3 à 1,7 groter is dan bij de IH-methode. Maar Römisch rekent met een kleinere stabiliteitscoëfficiënt, zodat beide methoden toch ongeveer dezelfde steengrootte opleveren.

Bij het recente Duitse onderzoek zijn boven de bodem echter veel grotere snelheden gemeten dan volgens de methode van IH en de methode van Römisch zonder kademuur. Deze zeer grote gemeten snelheden zijn waarschijnlijk veroorzaakt door de aanwezigheid van een roer, in combinatie met een zeer kleine kielspeling.

Een roer veroorzaakt een splitsing van de schroefstraal, waarbij een deel van de straal naar beneden schiet. Hierdoor kan boven de bodem een veel grotere snelheid optreden dan volgens de vrije straal theorie.

Waarschijnlijk neemt de invloed van een roer snel af met toenemende kielspeling.

De invloed van het roer is duidelijk een 'blinde vlek' in de rekenmethode van IH. De kielspeling is in de Rotterdamse situatie in het algemeen wel groter dan bij het Duitse onderzoek. Tot op heden is aangenomen dat bij de grotere kielspeling in de Rotterdamse situatie het roer geen belangrijke rol speelt. Dit is echter zeer matig onderbouwd (zie discussie in § A.2 in bijlage A).

Hoofdschroefstralen met kademuur

De rekenmethode van Römisch voor stroomsnelheden houdt - in tegenstelling tot de methode van IH - expliciet rekening met de aanwezigheid van begrenzingen.

Bij de aanwezigheid van een kademuur berekent Römisch veel grotere snelheden dan in de situatie zonder kademuur.

In de situatie met kademuur berekend Römisch zelfs nog grotere snelheden dan de snelheden die bij het onderzoek in Hamburg zijn gemeten met de zeer kleine kielspeling.

Bij een meting in de Beneluxhaven met een schroefstraal schuin tegen een kademuur, bleek de aanwezigheid van de kademuur inderdaad een grotere stroomsnelheid boven de bodem te veroorzaken: ongeveer een factor 1,4 groter dan bij de vrije straal theorie. Deze factor is echter niet zo groot als de verschilfactor bij de methode van Römisch.

Bij de huidige methode van IH wordt een correctie-factor 1,2 toegepast op de vrije-straaltheorie.

De steendiameters die met de methode van Römisch worden gedimensioneerd voor een kademuur zijn veel groter dan bij de methode van IH.

De indruk bestaat dat de methode van Römisch erg conservatief is, en een te grote steendiameter oplevert.

Het is echter onduidelijk hoe groot de invloed van de kademuur op de snelheden boven de bodem in werkelijkheid wel is.

Het is mogelijk dat met de methode van IH (met een correctie-factor van 1,2) de invloed van een kademuur wordt onderschat, en een te klein steendiameter wordt verkregen.

Vergelijking met de praktijk

De huidige rekenmethode die door IH wordt gehanteerd levert zwaardere stenen op dan de methode die enkele jaren terug werd gehanteerd. Dit komt doordat IH op grond van de meting in de Beneluxhaven nu rekent met een grotere stabiliteitscoëfficiënt $\beta_{s,cr}$ bij het dimensioneren van stenen.

De rekenmethode die IH gebruikt voor boegschroefstralen (loodrecht tegen een kademuur) wordt bevestigd door metingen.

De rekenmethode van IH voor hoofdschroefstralen kan een onderschatting geven van de invloed van een roer en van een kademuur op de snelheid boven de bodem.

Als wordt nagegaan hoe de bodembeschermingen die door IH in het verleden zijn gedimensioneerd met een relatief (te) kleine stabiliteitscoëfficiënt, dan moet worden geconstateerd dat er wel schades optreden, maar dat (voor zover bekend) toch geen sprake is van schade op grote schaal.

Situaties waarin duidelijk een te lichte bodembescherming aanwezig is (zoals mijnsteen of staalslakken), dienen hierbij buiten beschouwing te worden gelaten.

In sommige gevallen blijkt een bodembescherming uit (te) licht materiaal in de praktijk toch nog redelijk te functioneren. Hierbij kan worden gedacht aan de smalle grindstrook voor de kademuur van Delta 1 en 2 in de Europahaven. Er treden daar wel verdiepingen op, maar toch minder dan men theoretisch zou verwachten.

Als in de Rotterdamse haven door hoofdschroeven dezelfde snelheden zouden worden veroorzaakt als die zijn gemeten bij het recente Duitse modelonderzoek, dan hadden veel bodembeschermingen in de Rotterdamse haven zeer omvangrijke schade moeten vertonen. Dat dit niet zo is komt waarschijnlijk mede door de grotere kielspeling, maar deze veronderstelling is nog niet met onderzoeksresultaten te onderbouwen.

Er wordt daarom geconstateerd dat er vooralsnog een niet te verklaren discrepantie lijkt te bestaan tussen enerzijds de theorie en de metingen, en anderzijds het functioneren in de praktijk.

Omdat metingen in schaalmodellen (onderzoek in opdracht van Hamburg) en in prototype (meting in de Beneluxhaven), toch grote snelheden boven de bodem aantonen, en potentieel aanzienlijke verplaatsing van stenen, is het niet verantwoord om met de huidige kennis minder zwaar te gaan dimensioneren dan nu gebruikelijk is bij de methode van IH.

In de haven van Hamburg wordt met de methode van Römisch (veel) zwaarder gedimensioneerd dan in de haven van Rotterdam. Voor de boegschroef is dit waarschijnlijk ten onrechte, maar voor de hoofdschroef mogelijk gedeeltelijk terecht. In Rotterdam zou hierbij dan ook zwaarder gedimensioneerd moeten worden.

Echter omdat met de IH-methode nu al zwaarder wordt gedimensioneerd dan enkele jaren terug, en omdat in de praktijk geen schades op grote schaal optreden, wordt een zwaardere dimensionering voorlopig niet nodig geacht. Er wordt daarom aanbevolen om in de nabije toekomst te blijven dimensioneren volgens de huidige methode van IH, zoals beschreven in dit rapport.

Omdat er grote verschillen bestaan tussen de ontwerpmethodes, en omdat er een onverklaarbaar verschil bestaat tussen enerzijds theorie en metingen en anderzijds het functioneren van bodembeschermingen in de praktijk, wordt aanbevolen om in de toekomst nader onderzoek uit te voeren.

Verder is het wenselijk dat door een nauwkeurig monitorings- en onderhoudsprogramma, in de loop van de jaren een zo duidelijk mogelijk beeld wordt opgebouwd van het functioneren van bestaande bodemverdedigingen in de praktijk.

Randvoorwaarden en uitgangspunten

In hoofdstuk 2 is beschreven welke randvoorwaarden en uitgangspunten worden gehanteerd bij de ontwerpmethode van IH.

Bij een aantal randvoorwaarden zijn bij de huidige ontwerpen eigenlijk te weinig gegevens bekend over de waarden die in de actuele praktijk optreden, en met welke frequentie dit gebeurt.

Dit betreft met name het actuele vermogen van de hoofdschroef. Hiervoor wordt in principe 25 % aangenomen, maar in de haven van Hamburg is ook regelmatig een gebruik van 65 % gemeten. Een nader onderzoek hiernaar zou wenselijk zijn.

Ook over de frequentie waarmee schepen met een bepaalde actuele diepgang aankomen en afvaren zijn in principe meer gegevens wenselijk.

Gevoeligheid van steendiameter voor onnauwkeurigheidsmarges

Uit de in hoofdstuk 5 beschreven gevoeligheidsanalyse volgt dat de volgende factoren of variabelen de meeste invloed hebben op de onnauwkeurigheid bij het dimensioneren van een steendiameter:

- de aanwezigheid van een roer (speelt waarschijnlijk alleen een rol bij zeer kleine kielspeling);
- de hoogte van een hoofdschroef boven de bodem (speelt alleen een belangrijke rol bij kleine kielspeling);
- de aanwezigheid van een kademuur, waardoor de verspreiding van een straal wordt belemmerd (voor de situatie van een straal niet loodrecht tegen een kademuur);
- het ingezette motorvermogen;
- de stabiliteitscoëfficiënt $\beta_{s,cr}$ van stenen.

De genoemde factoren en variabelen zijn gerangschikt in volgorde van afnemen de invloed op de onnauwkeurigheid.

Bij binnenvaartschepen is de schuin naar de bodem gerichte oriëntatie van de uitstroomopening van de boegschroefstraalbuis vaak een zeer onnauwkeurige factor. Er kan niet goed worden berekend welke stroomsnelheid hierdoor bij de bodem wordt veroorzaakt.

Probabilistisch rekenen

Bodembeschermingen worden tot nu toe deterministisch gedimensioneerd uitgaande van één combinatie of enkele combinaties van maatgevende randvoorwaarden.

Bodembeschermingen zouden ook probabilistisch kunnen worden gedimensioneerd. Hierbij kunnen stochastische verdelingen worden ingevoerd voor randvoorwaarden zoals waterdiepte, scheepsdiepgang, scheepsbreedte, motorvermogen en afvaarmanoeuvre.

Een goede probabilistische berekening is alleen mogelijk als:

- stochastische verdelingen van de genoemde randvoorwaarden goed bekend zijn,
- wiskundige relaties voor stroomsnelheden en verplaatsing van stenen voldoende nauwkeurig bekend zijn,
- als goed is gedefinieerd wanneer er sprake is van falen van de constructie, en welke kans op falen acceptabel is.

Bij de huidige stand van zaken is aan al deze voorwaarden nog niet in voldoende mate voldaan.

Er zou echter wel een 'vingeroefening' met probabilistisch rekenen kunnen worden uitgevoerd, waarmee bijvoorbeeld meer inzicht kan worden verkregen in de meest gevoelige parameters bij het dimensioneren van een bodembescherming.

Het is wenselijk om meer onderzoek te doen naar de statistische verdeling van genoemde randvoorwaarden. Dit kan mogelijk ook duidelijkheid scheppen in de gesignaleerde discrepantie tussen theorie/metingen en praktijk.

6.2 Aanbevelingen

Aanbevolen wordt om in de nabije toekomst te blijven dimensioneren volgens de huidige methode van IH, zoals beschreven in dit rapport.

Omdat er grote verschillen bestaan tussen de ontwerpmethodes, en omdat er een onverklaarbaar verschil bestaat tussen enerzijds theorie en metingen en anderzijds het functioneren van bodembeschermingen in de praktijk, wordt aanbevolen om in de toekomst nader onderzoek uit te voeren, om tot een verbetering van de ontwerpmethodiek te komen.

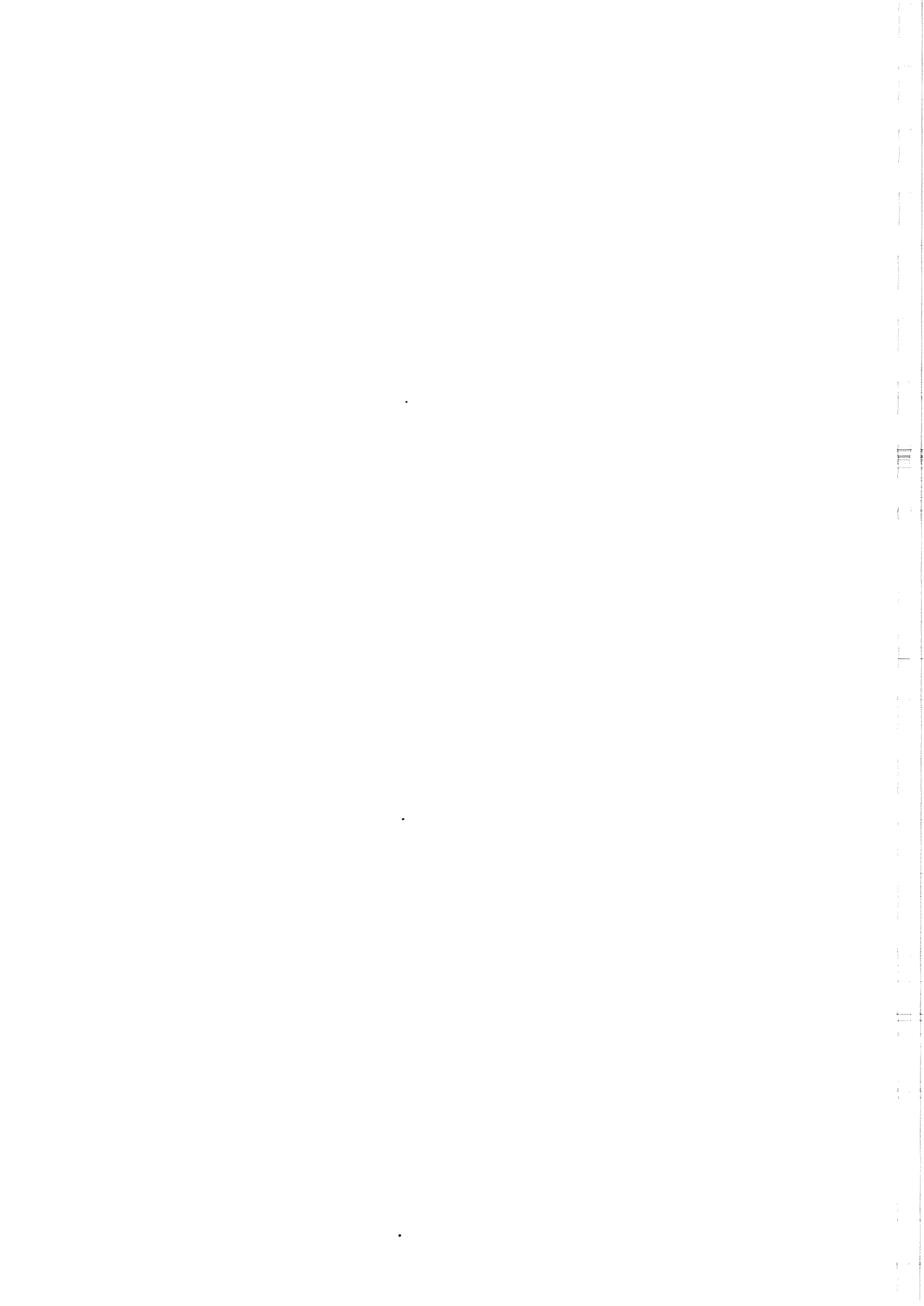
Dit nadere onderzoek dient zich niet alleen te richten op het fenomeen van de schroefstraal en de stabiliteit van de bodembescherming, maar ook op een vergroting van de kennis van de in de praktijk optredende randvoorwaarden. Indien van de randvoorwaarden frequentie-verdelingen geformuleerd kunnen worden, dan kan een eerste stap worden gezet naar probabilistisch ontwerpen.

Verder is het wenselijk dat door een nauwkeurig monitorings- en onderhoudsprogramma, in de loop van de jaren een zo duidelijk mogelijk beeld wordt opgebouwd van het functioneren van bestaande bodemverdedigingen in de praktijk. Het inzicht dat hiermee wordt verkregen, wordt vergroot als er tevens een zo duidelijk mogelijk beeld bestaat van de scheepsbewegingen die in de praktijk hebben plaatsgevonden. Hierbij wordt in eerste instantie gedacht aan een administratie van actuele scheepsdiepgang en van vermogens van boeg-, hek- en hoofdschroeven.

REFERENTIES

1. WL, 1985,
"Aantasting van dwarsprofielen van vaarwegen.
Schroefstralen en de stabiliteit van bodem en oevers onder invloed van de stroomsnelheden in de schroefstraal", Waterloopkundig Laboratorium, M1115, deel VII en Xa, november 1985
2. Fuehrer, M, Pohl, H, Römisch, K., 1987,
"Propeller jet erosion and stability criteria for bottom protections of various constructions", PIANC bulletin nr. 58
3. CUR, 1989,
"Ontwerpregels voor oeververdedigingen in vaarwegen (DIPRO)", CUR Gouda, rapport 89-8.
4. Blokland, T., 1996,
"Schroefstraal tegen kademuur. Stroomsnelheid- en erosiemetingen", Gemeentewerken Rotterdam, Ingenieursbureau Havenwerken, rapport 61.00-R94.038, 3 april 1996
5. Elkens, F., Römisch, K., Sas, M., Raes, L., 1996,
"The effects of ship propellers on bottom velocities and on scour near berths and protection methods using thin flexible revetments", 11th Int. Harbour Congress, Antwerpen, juni 1996
6. Fuehrer, M, Römisch, K., Engelke, G., 1981,
"Criteria for dimensioning the bottom and slope protections and for applying the new methods of protecting navigation canals", PIANC-congress, Edinburgh
7. Römisch, K., 1993,
"Propellerstrahlinduzierte erosionserscheinungen in Häfen", HANSA, 130 (1993), p.62-68.
8. Meijer, D.G., Verhey, H.J., 1993,
"Stroomsnelheden bij de oever veroorzaakt door boegschroeven", Waterloopkundig Laboratorium, rapport Q1657, juli 1993
9. "Untersuchungen van Maßnahmen gegen propellerstrahlinduzierte Erosion an Schiffsliegeplätzen", Strom- und Hafengebäudebau, Hamburg, Franzius-Institut van de universiteit van Hannover, Leichtweis-Institut van de universiteit van Braunschweig, deel A t/m D, maart 1995
10. Dücker, H.P., Miller, C, 1996
"Harbour bottom erosion at berths due to propeller jets", proc. 11th Int. Harbour Congress, Antwerpen, pp. 411-423, juni 1996

11. Fuehrer, M, Römisch, K, 1977,
"Effects of modern ship traffic on inland- and ocean-waterways and their
structures", proc. 24^e PIANC congress, Leningrad.





BIJLAGE A. OVERZICHT VAN SCHROEFSTRAAL- EN DIMENSIONERINGS-FORMULES BIJ DE METHODE VAN IH

Navolgend wordt een overzicht gegeven van de door het Ingenieursbureau Havenwerken (IH) gehanteerde formules voor het berekenen van stroomsnelheden als gevolg van een schroefstraal, en voor het dimensioneren van een bodembescherming.

A.1 Uitstroomsnelheid achter schroef

De stroomsnelheid direct achter een schroef, ter plaatse van de maximale dwarscontractie van de straal, wordt berekend met de volgende relatie:

$$U_0 \approx 1,17 \cdot \sqrt[3]{\frac{P}{\rho_w \cdot D_0^2}} \quad (\text{A.1})$$

waarin:

$U_0 =$	stroomsnelheid achter de schroef, ter plaatse van maximale dwarscontractie van de straal	[m/s]
$D_0 =$	diameter van de straal kort achter de schroef, ter plaatse van maximale dwarscontractie	[m]
	$D_0 = D/2 \approx 0,70 \cdot D_p$ bij schroeven zonder straalbuis	
	$D_0 = 0,85 \cdot D_p$ bij schroef-straalbuiscombinaties in tunnel	
	$D_0 = 1,00 \cdot D_p$ bij schroeven in een straalbuis	
$D_p =$	diameter van de schroef (Eng.: "propeller")	[m]
$P =$	aangewend motorvermogen per schroef	[W]
$\rho_w =$	dichtheid van water	[kg/m ³]

Indien gegevens over het toerental en de stuwkracht van de schroef bekend zijn, wordt de stroomsnelheid achter de schroef berekend met de volgende relatie (ref.1, p.27, 38):

$$U_0 = \sqrt{\frac{8}{\pi} \cdot \frac{T_p}{\rho_w \cdot D_p^2}} = 1,60 \cdot n_p \cdot D_p \cdot \sqrt{K_{TP}} \quad (\text{A.2})$$

waarin:

$\rho_w =$	dichtheid van water $\approx 1.000 \text{ kg/m}^3$.
$n_p =$	toerental van de schroef [omw/sec.],
$T_p =$	stuwkracht van de schroef [Newton = kg.m/s ²]
$K_{TP} =$	stuwkrachtscoëfficiënt van de schroef [-].

Beide voorgaande relaties zijn afgeleid voor de situatie zonder aanstroming van de schroef, d.w.z. voor een (nagenoeg) **stil liggend schip**.

Vgl.(A.2) is in principe betrouwbaarder dan vgl.(A.1), maar meestal is de stuwkrachtscoëfficiënt van de schroef niet bekend. Een richtlijn voor de waarde van K_{TP} is: $K_{TP} = 0,25$ à $0,45$.

A.2 Schroefstraal zonder kade of ongeveer evenwijdig aan kade

Voor de berekening van het snelheidsveld binnen een schroefstraal wordt uitgegaan van de relatie voor een vrije, onbegrensde schroefstraal. Er is sprake van een vrije straal als de straal zich in alle richtingen onbelemmerd kan verspreiden. De relatie voor een vrije straal luidt:

$$U(x,r) = 2,8 \cdot U_0 \cdot \frac{D_0}{x} \cdot \exp\left[-15,4 \cdot \frac{r^2}{x^2}\right] \quad \text{voor } x > 2,8 \cdot D_0 \quad (\text{A.3})$$

waarin:

$U(x,r)$	=	tijd-gemiddelde stroomsnelheid evenwijdig aan de schroefas in punt met coördinaten (x,r)	[m/s]
x	=	horizontale afstand achter de schroef, gemeten in het verlengde van de schroefas	[m]
r	=	radiale afstand tot de schroefas	[m]

Het snelheidsveld **bij de bodem** wordt als eerste benadering berekend door in vgl.(A.3) te substitueren:

$$r^2 = y^2 + h_{pb}^2,$$

waarin:

y	=	horizontale coördinaat loodrecht op de straalas [m],
h_{pb}	=	hoogte van de schroefas (Eng: 'propeller-axis') boven de bodem [m].

Hiermee wordt een onderschatting verkregen van de werkelijke snelheid bij de bodem. De aanwezigheid van de bodem vormt namelijk een begrenzing voor de radiale verspreiding van de straal. Hierdoor is de snelheid bij de bodem groter wordt dan volgens vgl.(A.3) die geldt in de situatie van een vrije straal, waarvan de verspreiding niet wordt begrensd.

Voor het dimensioneren van bodembeschermingen is het van belang om te weten hoe groot de **maximale** stroomsnelheid boven de bodem is.

De maximale snelheid boven de bodem in de situatie van één enkele schroef wordt berekend met de volgende relatie:

$$U_{b,max} = U_{b,max, enkel} = f \cdot 0,306 \cdot \frac{U_0 \cdot D_0}{h_{pb}} \quad (A.4)$$

waarin:

- $U_{b,max}$ = maximale snelheid boven de bodem [m/s]
- $U_{b,max, enkel}$ = $U_{b,max}$ in de situatie van één enkele schroef [m/s]
- f = correctie-factor die de toename van de stroomsnelheid in rekening brengt als gevolg van begrenzingen van de radiale verspreiding van de straal ($f \geq 1$) [-]

Vgl.(A.4) volgt uit vgl.(A.3) door partiële differentiatie naar x met $r = h_{pb}$, waarbij een correctie-factor f is toegevoegd om de toename van de stroomsnelheid als gevolg van de begrenzen invloed van de bodem in rekening te kunnen brengen.

Uit de partiële differentiatie van vgl.(A.3) volgt ook dat (uitgaande van de vrije straal theorie) de maximale snelheid boven de bodem optreedt op een afstand $x_{Umax} = 5,55 \cdot h_{pb}$ achter de schroef. (In de praktijk tussen $4 \cdot h_{pb}$ en $10 \cdot h_{pb}$).

In de situatie van meerdere schroeven wordt het totale snelheidsveld van de schroeven berekend door superpositie van de snelheidsvelden van de afzonderlijke schroeven. Hierbij wordt op grond van energetische overwegingen voor de maximale snelheid boven de bodem een bovengrens die gelijk is aan:

- $\sqrt{2} \cdot U_{b,max, enkel}$ in de situatie met 2 schroeven,
- $2 \cdot U_{b,max, enkel}$ in de situatie met 3 schroeven.

In de situatie met **twee schroeven** resulteert de superpositie in het volgende set vergelijkingen voor de maximale snelheid boven de bodem:

$$\begin{aligned} U_{b,max} &= U_{b,max, enkel} & \text{als } \frac{h_{pb}}{y_p} &\leq 0,578 \\ &= f \cdot 0,612 \cdot \frac{U_0 \cdot D_0}{r_{pb}} & \text{als } 0,578 < \frac{h_{pb}}{y_p} < 1 \\ &= \sqrt{2} \cdot U_{b,max, enkel} & \text{als } \frac{h_{pb}}{y_p} &\geq 1 \end{aligned} \quad (A.5)$$

waarin:

- y_p = horizontale afstand tussen de schroefas en de scheepsas [m]
- $r_{pb} = \sqrt{(h_{pb})^2 + y_p^2}$

Voor de situatie met 3 schroeven is het niet mogelijk om een eenvoudige wiskundige relatie af te leiden voor maximale snelheid boven de bodem. De maximale bodemsnelheid wordt in deze situatie bepaald door superpositie van de (vrije straal) snelheidsvelden volgens vgl.(A.3) van de drie afzonderlijke stralen. Hierbij wordt uit energetische overwegingen een bovengrens gesteld: in de situatie met 3 schroeven is $U_{b,max}$ maximaal 2 maal groter dan in de situatie met één schroef.

Dus: $U_{b,max, 3\text{ schroeven}} \leq 2 \cdot U_{b,max, enkel}$

Voor de waarde van f wordt toegepast:

- $f = 1$ als er alleen sprake is van begrenzing door bodem en wateroppervlak;
- $f = 1,1$ als de straal ongeveer evenwijdig aan een kademuur of oevertalud is gericht,
- $f = 1,2$ als de straal schuin tegen een kademuur of tegen een oevertalud is gericht.

Opgemerkt moet worden dat de verschilfactor in werkelijkheid afhankelijk zal zijn van de afstand van de schroefas tot de bodem en de kademuur en van de hoek tussen de schroefas en de kademuur. Deze afhankelijkheden zijn echter niet kwantitatief bekend. Bovenstaande waarden zijn slechts ruwe schattingen.

Het verschil tussen de werkelijke en de met de vrije straal relatie berekende snelheid is groter dan de toegepaste factor f . Dit blijkt duidelijk voor de situatie met alleen een bodem en een wateroppervlak, waarbij men zou verwachten dat $f > 1$. Overeenkomstig met de rekenmethode van ref.1 wordt er echter vanuit gegaan dat het verschil tussen werkelijke snelheid en berekende vrije straal snelheid, voor de situatie met alleen een bodem en een wateroppervlak, is verdisconteerd in de stabiliteitsfactor β_{1s} (zie ook § B.5 in bijlage B) van de stenen.

Er wordt bij de rekenmethode van IH geen rekening gehouden met de invloed van het roer. Het roer veroorzaakt een spitsing van de straal, waarbij een deel van de straal naar boven schiet en een deel van de straal naar beneden. Volgens Römisch en volgens recent onderzoek van het Franzius Institut (ref.9), kan dit gepaard gaan met een sterke toename van de stroomsnelheid boven de bodem. Bij het Franzius Institut is dit alleen vastgesteld bij zeer kleine afstand van de schroef boven de bodem.

Uit een meting die is uitgevoerd bij het Waterloopkundig Laboratorium in een verticaal vlak door de as van een schroefstraal, blijkt dat de naar beneden gerichte straal is waar te nemen tot een afstand van $(8 \text{ à } 12) \cdot D_0$ achter de schroef en tot een diepte van $(1,5 \text{ à } 2) \cdot D_0 = (1 \text{ à } 1,5) \cdot D_p$ onder de schroefas (ref.1, figuur 31 en 32). Op grotere afstand en op grotere diepte is gesplitste straal door menging en diffusie weer veranderd in één samengestelde straal met het normale Gaussische snelheidsprofiel. De snelheden in deze integrale straal zijn echter wat lager dan in een straal die niet is beïnvloed door een roer, omdat de splitsing door een roer gepaard gaat met energie-verlies. Dit energie-verlies wordt groter als het roer ook onder een hoek staat. Daarom wordt door het WL een reductie-factor geïntroduceerd voor de snelheid in een schroefstraal afhankelijk van de roerhoek.

Op grond van de meting in het Waterloopkundig Laboratorium zou men kunnen concluderen dat de aanwezigheid van een roer alleen een toename van de

snelheid boven de bodem veroorzaakt als de als de schroefas zich minder dan 1,5 maal de schroefdiameter boven de bodem bevindt.

Bij hoger gelegen schroefas zou de aanwezigheid van een roer daarentegen enige afname van de snelheid boven de bodem veroorzaken.

Deze conclusie moet echter met voorzichtigheid worden gehanteerd, omdat het WL alleen in een verticaal vlak door de schroefas heeft gemeten. Waarschijnlijk zal de door het roer afgesplitste straal ook schuin wegschieten. Als ook in een schuin vlak was gemeten, zou mogelijk zijn waargenomen dat de afgesplitste straal tot een grotere diepte dan 1,5 maal de schroefdiameter doordringt.

Resumerend moet worden gesteld dat de invloed van het roer afhankelijk is van de hoogte van de schroefas boven de bodem. Hoe deze afhankelijkheid er uit ziet, is nog niet bekend.

Bij de rekenmethode van IH wordt geen rekening gehouden met de aanwezigheid van een roer. Bij kleine afstand tussen schroefas en bodem kan dit een onveilig resultaat opleveren.

A.3 Schroefstraal loodrecht tegen kademuur

De maximale stroomsnelheid die boven de bodem voor een kademuur wordt veroorzaakt door een schroefstraal loodrecht tegen de kademuur, wordt berekend met de volgende relaties:

$$U_{b,\max} = 2,8 \cdot \frac{U_0 \cdot D_0}{x_{pk} + h_{pb}} \quad \text{als} \quad \frac{x_{pk}}{h_{pb}} \geq 1,8 \quad (\text{A.6})$$

$$U_{b,\max} = 1,0 \cdot \frac{U_0 \cdot D_0}{h_{pb}} \quad \text{als} \quad 1,0 < \frac{x_{pk}}{h_{pb}} < 1,8 \quad (\text{A.7})$$

waarin:

x_{pk} = afstand van de schroef tot de kademuur [m].

De situatie met $x_{pk}/h_{pb} < 1,0$ komt in de praktijk vrijwel niet voor.

Deze relaties zijn getoetst door prototype metingen met de straal van een sleepboot loodrecht tegen een kademuur in de Beneluxhaven (zie ref.4). Bij deze metingen was er sprake van één constante waarde van h_{pb} en drie verschillende waarden van x_{pk} .

A.4 Dimensioneren steenbestorting

Een steenbestorting, die wordt belast met schroefstralen, wordt gedimensioneerd met de relatie van Isbash:

$$D_{50} > \beta_{Is,cr} \cdot m_h \cdot \frac{U_{b,max}^2}{2 \cdot g \cdot \Delta} \quad (A.8)$$

waarin:

D_{50}	=	mediane steendiameter	[m]
m_h	=	coëfficiënt voor helling	[-]
$U_{b,max}$	=	maximale tijd-gemiddelde stroomsnelheid nabij de bodem	[m/s]
Δ	=	$(\rho_s - \rho_w)/\rho_w$ = relatieve dichtheid van stortsteen	[-]
ρ_s	=	dichtheid van stortsteen	[kg/m ³]
ρ_w	=	dichtheid van water	[kg/m ³]
$\beta_{Is,cr}$	=	kritieke stabiliteitscoëfficiënt bij begin van beweging	[-]

Voor de waarde van $\beta_{Is,cr}$ bij schroefstralen geldt: $\beta_{Is,cr} = 3,0$ als (vrijwel) geen beweging van stenen mag optreden. Die waarde wordt aanbevolen in ref.3 en is ook getoetst bij de metingen in de Beneluxhaven (ref.4).

Als wèl enige beweging van stenen mag optreden, òf als de ontwerpbelasting van de bodembescherming zich slechts met een lage frequentie op dezelfde plaats zal herhalen, wordt uitgegaan van $\beta_{Is,cr} \doteq 2,5$.

Onder 'lage frequentie' wordt in dit verband verstaan: 4 maal per jaar of minder. Bij een dergelijk lage belastingsfrequentie wordt bij een 'normale' lodingsfrequentie van één maal per jaar tussen twee opeenvolgende lodingen geen onaanvaardbaar grote schade verwacht.

Met de voorafgaande vergelijking kan de minimaal vereiste steendiameter direct worden berekend.

Het is ook mogelijk om gegeven een maximale stroomsnelheid en gegeven één of meerdere steensorteringen, de bijbehorende Isbash-coëfficiënt te berekenen met:

$$\beta_{Is} = \frac{1}{m_h} \cdot \frac{2 \cdot g \cdot \Delta \cdot D_{50}}{U_{b,max}^2} \quad (A.9)$$

Als $\beta_{Is} > \beta_{Is,cr}$, dan voldoet de steensortering aan de gestelde stabiliteitseis.

Voor m_h geldt bij stroming tegen een talud op:

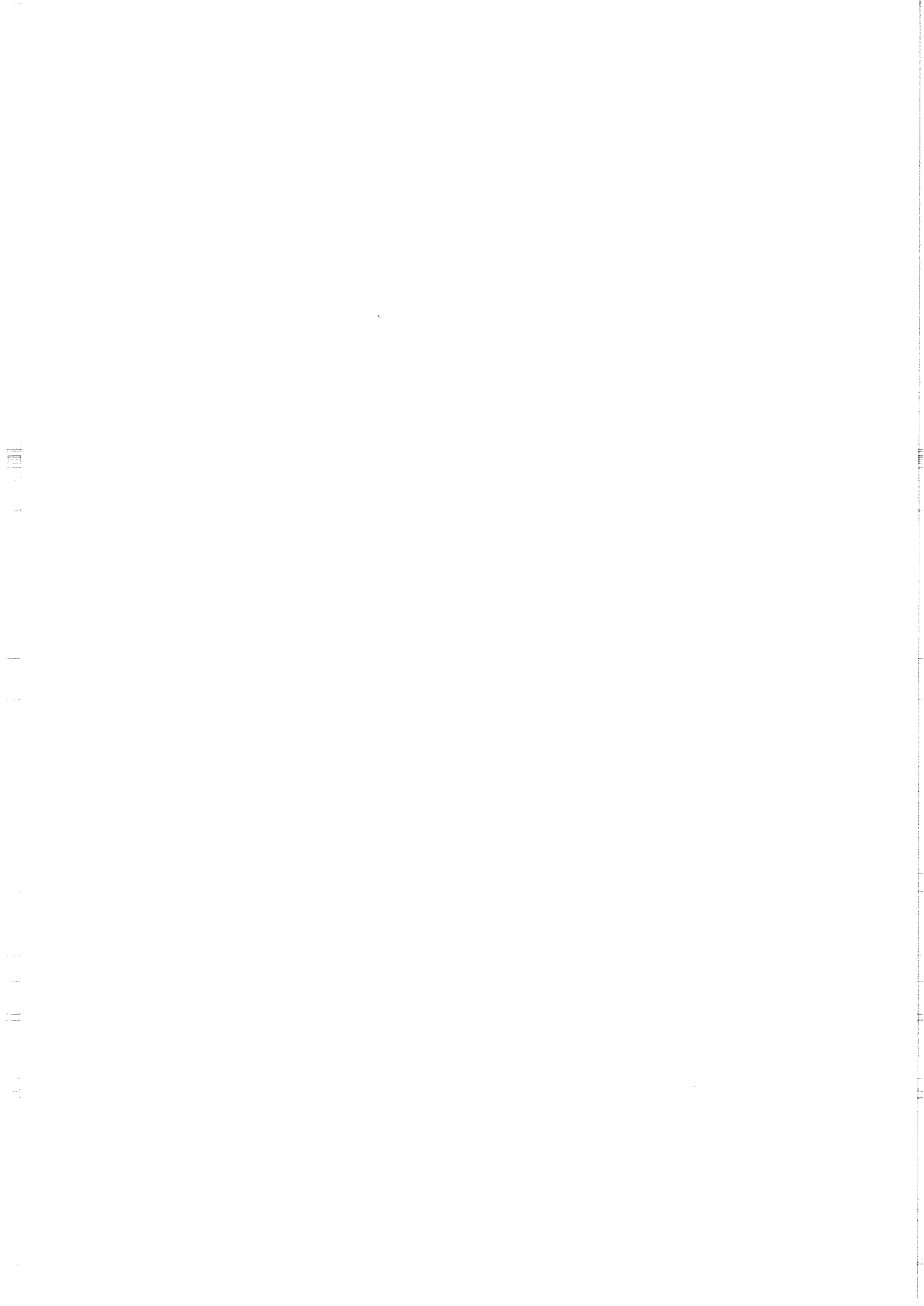
$$m_h = \frac{\sin(\varphi)}{\sin(\varphi - \alpha)} \quad (\text{A.10})$$

, en bij stroming langs een talud:

$$m_h = \left[1 - \left(\frac{\sin(\alpha)}{\sin(\varphi)} \right)^2 \right]^{-0,5} \quad (\text{A.11})$$

waarin:

- α = hellingshoek van talud [°]
- φ = hoek van inwendige wrijving van stenen [°]
(bij breuksteen geldt $\varphi \approx 40^\circ$ als $D_{50} \approx 1$ cm tot 42° als $D_{50} \geq 10$ cm; bij grind gelden lagere waarden).





BIJLAGE B. VERGELIJKING MET METHODE VAN RÖMISCH (EN FUEHRER)

B.1 Inleiding

In deze bijlage wordt een vergelijking gemaakt tussen de rekenmethode van het Ingenieursbureau Havenwerken (IH) en de rekenmethode van Römisch (en Fuehrer) zoals deze in ref.6 en 7 wordt gepresenteerd.

De rekenmethode van IH is beschreven in bijlage A. Deze methode is voor het grootste deel gebaseerd op studies van het Waterloopkundig Laboratorium, en wordt in Nederland algemeen gebruikt voor het berekenen van stroomsnelheden in schroefstralen. Voor de stabiliteitscoëfficiënt van stenen worden binnen Nederland echter verschillende waarden gehanteerd.

De rekenmethode van Römisch wordt onder andere gebruikt voor het dimensioneren van bodembeschermingen in de haven van Hamburg.

Bij de methode van Römisch worden in het algemeen dezelfde relaties gebruikt als bij de methode van IH. Er worden echter andere coëfficiënten toegepast, waardoor de resultaten van beide methoden toch sterk kunnen verschillen.

Voor de betekenis van symbolen wordt verwezen naar bijlage A en naar de symbolenlijst in het hoofdrapport.

B.2 Uitstroomsnelheid achter schroef

Voor de berekening van uitstroomsnelheid U_0 achter een hoofdschroef of uit een boegschroefbuis maakt Römisch ook gebruik van vergelijking (A.1).

Voor de uitstroomsnelheid achter een hoofdschroef is er geen enkel verschil tussen de methoden van Römisch en van IH.

Bij boegschroeven houdt Römisch in afwijking van de IH-methode rekening met energie-verliezen (intree-verliezen en wrijvingsverliezen).

De relatie die Römisch gebruikt voor de berekening van de uitstroomsnelheid van een boegschroef (ref.7) kan in analogie met vgl.(A.1) worden geschreven in de volgende vorm:

$$U_0 = (1 - \zeta) \cdot 1,17 \cdot \sqrt[3]{\frac{P}{\rho_w \cdot D_0^2}} \quad (\text{B.1})$$

, met:

$$\zeta = 1 - 1,167 \cdot (1 + \Sigma \zeta)^{-1/3} \quad (\text{B.2})$$

, waarbij $\Sigma \zeta$ het totaal van de energie-verliezen is.

Römisch stelt dat in het algemeen $\Sigma \zeta = 1$ à 5 , zodat $\zeta = 0,07$ à $0,32$, maar dat bij goed ontworpen boegschroefbuizen bij moderne containerschepen $\Sigma \zeta = 1$ à $1,5$, zodat $\zeta = 0,07$ à $0,14$.

Dit betekent dat de door Römisch berekende stroomsnelheden in een boegschroefstraal van moderne containerschepen 7 à 14 % lager zijn dan de snelheden die met de IH-methode worden berekend.

Ter vergelijking:

In ref.8 wordt voor boegschroeven van binnenvaartschepen de volgende verliesfactor aanbevolen: $\zeta = 0,1$ à $0,15$, waarbij wordt opgemerkt dat dit 'veilige' (c.q. lage) waarden zijn. De werkelijke verliesfactor kan bij binnenvaartschepen groter zijn, omdat bij deze schepen de boegschroefbuizen vaak slecht gestroomlijnd zijn, terwijl er vaak bochten in voorkomen die extra energieverlies veroorzaken.

B.3 Schroefstraal zonder kade of ongeveer evenwijdig aan kade

De relaties voor een schroefstraal die niet loodrecht tegen een kademuur is gericht, kunnen bij de methodes van IH en van Römisch in de dezelfde vorm worden geschreven, namelijk:

voor de snelheid in de as van de straal:

$$U_{as}(x) = U_0 \quad \text{voor} \quad x \leq a_s \cdot \frac{1}{m} \cdot D_0 \quad (\text{B.3})$$

$$U_{as}(x) = a_s \cdot U_0 \cdot \left(\frac{D_0}{x}\right)^m \quad \text{voor} \quad x > a_s \cdot \frac{1}{m} \cdot D_0 \quad (\text{B.4})$$

voor de radiale snelheidsverdeling loodrecht op de as van de straal:

$$U(x,r) = U_{as} \cdot \exp\left(-b_s \cdot \frac{r^2}{x^2}\right) \quad (\text{B.5})$$

Het snelheidsveld $U_b(x,y)$ ter hoogte van de bodem wordt berekend door in vgl.(B.5) te substitueren:

$$r = \sqrt{h_{pb}^2 + y^2} \quad (\text{B.6})$$

, waarin:

h_{pb} = hoogte van de schroef(as) boven de bodem,
 y = horizontale coördinaat loodrecht op de as van de straal .

Onder de as van de schroefstraal geldt $y = 0$, zodat $r = h_{pb}$.

Door vgl.(B.4-5) bij gegeven $r = h_{pb}$ partieel te differentiëren naar x en gelijk te stellen aan nul, volgt dat de maximale snelheid boven de bodem optreedt bij $x = x_{U_{max}}$ met:

$$x_{U_{max}} = \sqrt{\frac{2 \cdot b_s}{m}} \cdot h_{pb} \quad (\text{B.7})$$

Door deze waarde van x in te vullen in vgl.(B.4-5), volgt voor de maximale snelheid boven de bodem ($U_{b,max}$) de volgende relatie:

$$U_{b,max} = E \cdot \left(\frac{D_0}{h_{pb}} \right)^m \cdot U_0 \quad (\text{B.8})$$

, met:

$$E = a_s \cdot \left(\frac{m}{5,43 \cdot b_s} \right)^{\frac{m}{2}} \quad (\text{B.9})$$

Bij de rekenmethode van IH (c.q. de Nederlandse methode) worden voor de verschillende coëfficiënten de volgende waarden gehanteerd (ref.1, p.38):

$a_s = 2,8$, $m = 1,0$, $b_s = 15,4$,
 $D_0 = 0,7 D_p$ voor een schroef zonder straalbuis,
 $0,85 D_p$ voor een schroef-straalbuiscombinatie in een tunnel,
 $1,0 D_p$ voor een schroef met straalbuis.

Substitutie hiervan in de voorafgaande vergelijkingen resulteert in de vergelijkingen die in bijlage A zijn gepresenteerd.

Bij de rekenmethode van Römisch (c.q. de Duitse methode) zijn de waarden van de coëfficiënten afhankelijk van de aanwezigheid van belemmeringen voor de radiale verspreiding van de straal (ref.7 en ref.11). Er worden drie zones onderscheiden:

- zone van constante stroomsnelheid achter de schroef:

$$U_{as}(x) = U_0, \text{ voor } x < 2,6 \cdot D_p,$$

- zone met onbelemmerde straaluitbreiding:

vgl.(B.4) en (B.5) met $a_s = 2,6$ en $m = 1$,

- zone met belemmering door bodem, wateroppervlak en/of kademuur:

vgl.(B.4) en (B.5) met de volgende waarden voor a_s en m :

$m = 0,6$ bij begrenzing door havenbodembodem en waterspiegel,

$m = 0,3$ bij begrenzing door havenbodembodem, waterspiegel en kademuur,

$a_s = 1,88 \cdot \exp(-0,092 \cdot h/D_p)$, indien geen roer midden achter de schroef aanwezig is, en $0,9 \leq h/D_p \leq 9$,
(h = waterdiepte)

$a_s = 1,88 \cdot \exp(-0,161 \cdot h_{pb}/D_p)$, indien wél een roer midden achter de schroef aanwezig is,
en $0,9 \leq h_{pb}/D_p \leq 8$.

Voor alle zones geldt bij de methode van Römisch:

$D_0 = D_p$ (er wordt dus geen rekening gehouden met dwarscontractie van de straal)

$b_s = 22,2$ (dit betekent dat de straal in radiale richting een factor $(15,4/22,2)^{0,5} = 0,83$ minder snel verspreid dan bij de Nederlandse methode).

Römisch stelt in ref.9 dat uit het voorgaande volgt dat voor de maximale stroomsnelheid boven de bodem geldt:

$$U_{b,max} = E \cdot \frac{D_p}{h_{pb}} \cdot U_0 \quad (B.10)$$

met: $E = 0,71$, voor zeeschip met roer midden achter schroef,

$E = 0,42$, voor zeeschip zonder roer midden achter schroef,

$E = 0,25$, voor binnenschip met "Tunnelheck mit Zwillingruder"

Dit is een merkwaardige conclusie, want vgl.(B.10) kan alleen met vgl.(B.8) overeenkomen als $m = 1$ (en $D_0 = D_p$), terwijl volgens Römisch bij de aanwezigheid van een bodembodem geldt $m = 0,6$ of $0,3$.

De maximale stroomsnelheden boven de bodembodem die worden berekend met de methode van IH en met de verschillende relaties en coëfficiënten van Römisch, zijn uitgezet in figuur B.1 voor de situatie met één roer midden achter één vrij staande schroef (zonder straalbuis).

Uit deze figuur blijkt dat vgl.(B.10) van Römisch ongeveer overeenkomt met vgl.(B.8) in de situatie waarin een kade aanwezig is. Beide krommen vallen echter niet samen, omdat de waarde van m verschilt.

De verhouding tussen de snelheden volgens beide berekeningsmethoden is uitgezet in figuur B.2. Deze verhouding bedraagt (er vanuit gaande dat in de praktijk $0,6 < h_{pb}/D_p < 2$):

- 1,3 à 1,7 als geen kade aanwezig is, uitgaande van vgl.(B.8),
- 2,3 à 4 als wel een kade aanwezig is, uitgaande van vgl.(B.8),
- 3,3 als wel een kade aanwezig is, uitgaande van vgl.(B.10).

Er kan worden geconcludeerd dat bij de methode van Römisch (veel) grotere snelheden boven de bodem worden berekend dan bij de methode van IH. Het verschil is extreem groot wanneer de radiale verspreiding wordt belemmerd door een kademuur.

B.4 Boegschroefstraal loodrecht tegen kademuur

Voor de berekening van de stroomsnelheid die door een boegschroefstraal op de havenbodem voor de kademuur wordt veroorzaakt gebruikt Römisch een zeer eenvoudige benadering. Hij gaat er vanuit dat de horizontale afstand tussen de uitstroomopening en de kademuur en de verticale afstand tussen de schroefbuis en de havenbodem zo klein zijn, dat de straal zich in radiale richting vrijwel niet heeft kunnen spreiden. Op grond hiervan gaat hij er van uit dat de stroomsnelheid voor de kademuur ongeveer even groot is als de uitstroomsnelheid uit de schroefbuis. Dus: $U_{b,max} = U_0$.

Bij de methode van IH wordt wel rekening gehouden met radiale verspreiding van de schroefstraal.

Dit betekent dat de stroomsnelheid waar de bodembescherming op wordt gedimensioneerd bij de methode van Römisch veel groter is dan bij de IH-methode. Het verschil is afhankelijk van de afstand van de schroef tot de kade en van de hoogte van de schroefas boven de bodem. Het verschil kan een factor 2 bedragen.

B.5 Dimensioneren steenbestorting

Voor de dimensionering van stenen wordt bij de methode van Römisch - evenals bij de methode van IH - de relatie van Isbash gebruikt (vgl.(A.8)), maar dan met een kleinere stabiliteitscoëfficiënt $\beta_{Is,cr}$.

Römisch (1993) gaat uit van $\beta_{Is,cr} = 1,3$, terwijl door IH wordt uitgegaan van $\beta_{Is,cr} = 2,5$ à 3.

In de figuren C.2 tot C.4 in ref.9 (deel C) wordt met verwijzing naar Fuehrer en Römisch (ref.11) vermeld:

$$\begin{array}{ll} \beta_{Is,cr} = 1,3 & \text{bij hoofdschroef,} \\ \beta_{Is,cr} = 0,7 & \text{bij boegschroef.} \end{array}$$

In de tekst van ref.9 wordt merkwaardigerwijs geen motivatie of toelichting gegeven bij de verschillende waarden van $\beta_{Is,cr}$ bij een hoofd- en een boegschroef.

Opgemerkt moet worden dat bij veel onderzoeken de waarde van de factor $\beta_{Is,cr}$ niet wordt bepaald op grond van gemeten snelheden, maar op grond van berekende snelheden, uitgaande van een bepaalde rekenrelatie.

Dit is zeker het geval bij het onderzoek dat door het Waterloopkundig Laboratorium (ref.1). Bij dit onderzoek is het begin van bewegen van bodemmateriaal gekoppeld aan de stroomsnelheid die bij deze conditie is berekend uitgaande van de theoretische relatie voor een vrije schroefstraal. Deze berekende snelheid is kleiner dan de werkelijke snelheid, waardoor de hierbij bepaalde coëfficiënt $\beta_{Is,cr}$ groter is dan de coëfficiënt die zou behoren bij de werkelijk optredende snelheid.

Hoewel het nergens expliciet is vermeld, is de door Fuehrer en Römisch, en door het LEICHTWEIS-INSTITUT bepaalde waarde van $\beta_{Is,cr}$ waarschijnlijk gekoppeld aan de stroomsnelheid die wordt berekend met de rekenmethode van Römisch (en niet aan de werkelijke snelheden).

Omdat met de methode van Römisch grotere snelheden worden berekend dan met de methode van het WL en van IH, is het begrijpelijk dat Römisch een kleinere waarde van $\beta_{Is,cr}$ geeft dan het WL en IH. Alle methoden zouden echter dezelfde steendiameter moeten opleveren.

De steendiameter is bij de relatie van Isbash evenredig met $\beta_{Is,cr} * U_{b,max}^2$. De verhouding tussen de waarden van $\beta_{Is,cr} * U_{b,max}^2$ volgens de methoden van Römisch en IH is uitgezet in figuur B.3. Deze verhouding is gelijk aan de verhouding tussen de ontwerp-steendiameter bij beide rekenmethodes.

Uit figuur B.3 blijkt dat in de situatie zonder kademuur de methodes van Römisch en van IH ongeveer dezelfde steengrootte geven.

In de situatie met een kademuur geeft Römisch daarentegen een steendiameter die een factor 2,2 à 7 groter is dan bij de methode van IH (als $0,6 < h_{pb}/D_p < 2$). Bij de algemene vergelijking van Römisch (vgl.(B.4) met $E=0,71$) is de steendiameter een factor 4,75 groter dan bij de methode van IH.

In de situatie met kademuur geeft Römisch dus een onvergelijkbaar veel grotere steendiameter dan de methode van IH.

B.6 Conclusies

Bij de methode van Römisch worden voor de straal van de hoofdschroef de zelfde relaties gebruikt als bij de methode van IH. Er worden echter andere coëfficiënten toegepast, waardoor de resultaten van beide methoden toch sterk kunnen verschillen.

De maximale stroomsnelheid boven de bodem is bij de methode van Römisch veel groter dan bij de methode van IH. In de situatie zonder kademuur verschilt de snelheid volgens beide methoden een factor 1,3 à 1,7. Echter in de situatie met kademuur verschillen beide methoden zelfs een factor 3,3, uitgaande van de literatuur veel gebruikte algemene relatie van Römisch (vgl.(B.10) met $E = 0,71$).

Bij het dimensioneren van stenen gebruikt Römisch een kleinere stabiliteitsfactor dan IH. Hierdoor wordt het verschil in de maximale stroomsnelheid volgens beide methoden enigszins gecompenseerd.

Hier door wordt in de situatie zonder kademuur met de methoden van Römisch en IH ongeveer dezelfde steendiameter berekend.

Echter in de situatie met kademuur is de vereiste steendiameter volgens de methode van Römisch (vgl.(B.10) met $E = 0,71$) een factor 4,75 groter dan volgens de methode van IH.

Voor de situatie met een schroefstraal loodrecht tegen een kademuur past Römisch een zeer eenvoudige benadering toe, met als resultaat dat de stroomsnelheid boven de bodem voor de kademuur even groot is als de uitstroomsnelheid van de schroef.

Deze benadering van Römisch geeft een veel grotere stroomsnelheid dan de methode van IH. Het verschil is afhankelijk van de afstand van de schroef tot de kade en van de hoogte van de schroefas boven de bodem. Het verschil kan een factor 2 bedragen.

Legenda bij figuur B.1 tot B.3:**x-as:**

bij alle figuren: h_{pb}/D_p

y-as:

figuur B.1: $U_{b,max}/U_0$

figuur B.2: verhouding $\{U_{b,max}$ volgens Römisch $\} / \{U_{b,max}$ volgens IH $\}$
Hierbij is $\{U_{b,max}$ volgens IH $\}$ berekend met vgl.(A.4) met $f = 1$.

figuur B.3: verhouding $\{D_{50}$ volgens Römisch $\} / \{D_{50}$ volgens IH $\} =$
 $\{\beta_{Is,cr} * U_{b,max}^2$ volgens Römisch $\} / \{\beta_{Is,cr} * U_{b,max}^2$ volgens IH $\}$
Hierbij is $U_{b,max}$ volgens IH berekend met vgl.(A.4) met $f = 1$, en er is uitgegaan van $\beta_{Is,cr} = 3$.
Bij de methode van Römisch is uitgegaan van $\beta_{Is,cr} = 1,3$.

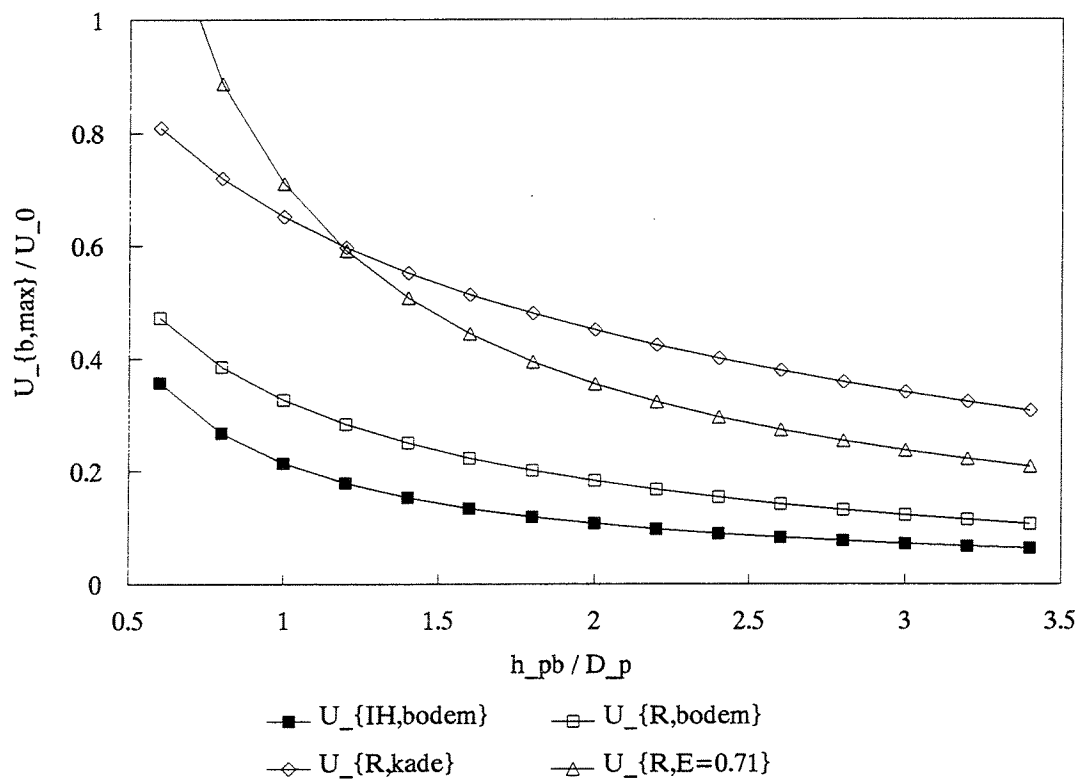
Legenda bij grafieklijnen:

$U_{\{IH,bodem\}}$: variabele op de y-as is berekend met de methode van IH:
vgl.(A.4) met $f = 1$

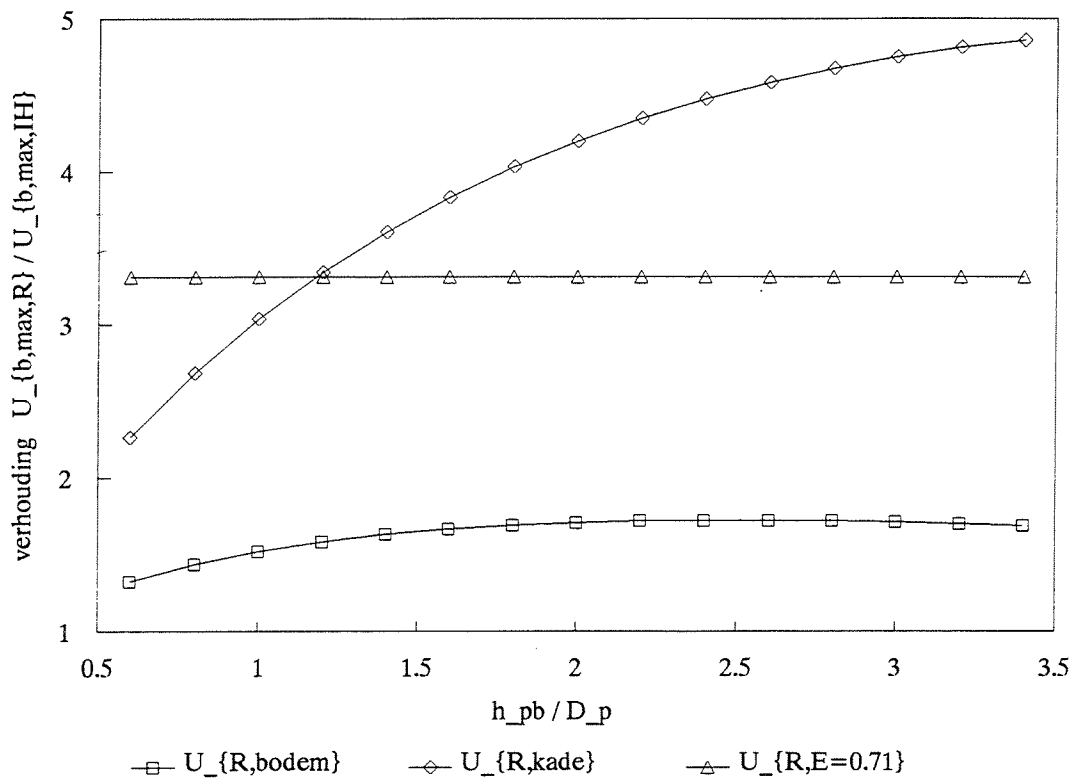
$U_{\{R,bodem\}}$: variabele op de y-as is berekend uitgaande van de methode van
Römisch zonder kade: vgl.(B.8-9), met $a_s = 0,6$

$U_{\{R,kade\}}$: variabele op de y-as is berekend uitgaande van de methode van
Römisch met kade: vgl.(B.8-9), met $a_s = 0,3$

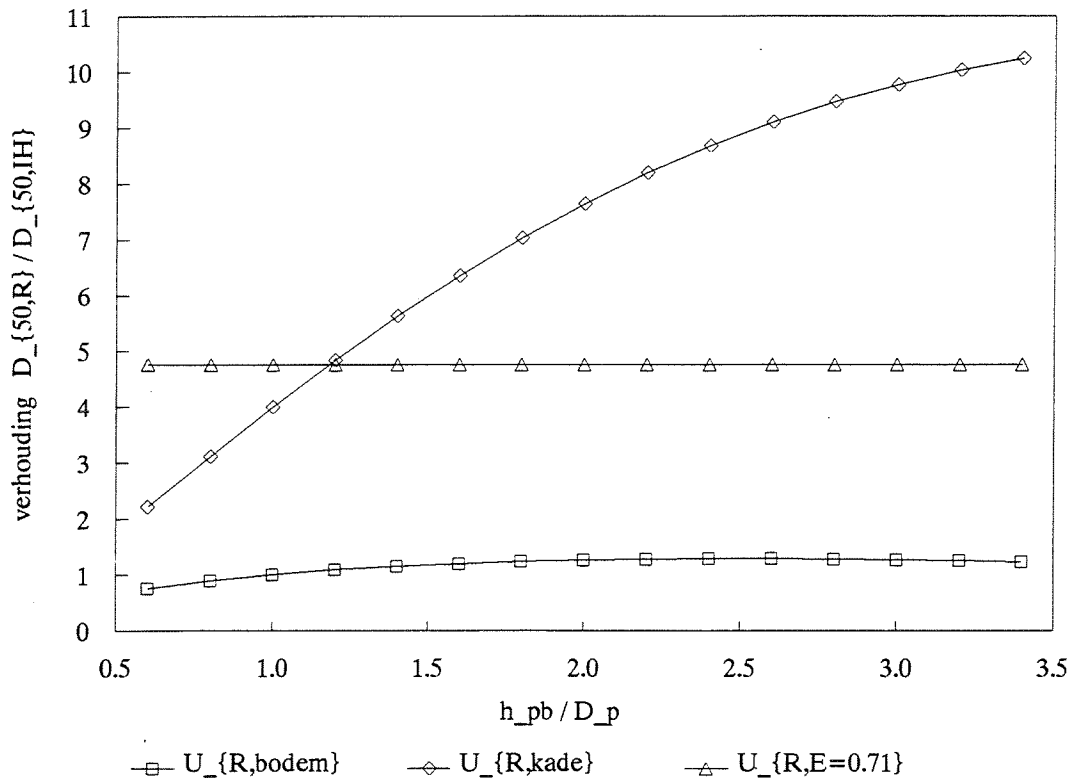
$U_{\{R,E=0.71\}}$: variabele op de y-as is berekend uitgaande van de algemene
relatie van Römisch: vgl.(B.10), met $E = 0,71$



Figuur B.1 Stroomsnelheid boven de bodem volgens de methode van IH en van Römisch als functie van de hoogte van de schroefas boven de bodem



Figuur B.2 Verhouding tussen de methode van Römisch en de methode van IH bij de berekening van de maximale stroomsnelheid boven de bodem



Figuur B.3 Verhouding tussen de methode van Römisch en de methode van IH bij de berekening van de vereiste stabiele steendiameter ($\beta_{ls,cr} = 1,3$ bij Römisch en $\beta_{ls,cr} = 3,0$ bij IH-methode)







BIJLAGE C. ONDERZOEK HAMBURG

C.1 Beschrijving van het onderzoek

In opdracht van de haven van Hamburg (Strom- und Hafengebäude) is recent onderzoek uitgevoerd naar verschillende aspecten van schroefstralen en bodembeschermingen. De opzet en de resultaten van het onderzoek zijn beknopt beschreven in ref.10, terwijl een uitgebreidere beschrijving wordt gegeven in ref.9.

Het onderzoek bestond uit drie onderdelen:

- schaalmodelonderzoek bij het FRANZIUS-INSTITUT van de universiteit van Hannover, betreffende de stroomsnelheden die door de hoofdschroef en de boegschroef van een maatgevend containerschip worden veroorzaakt boven verschillende typen bodembeschermingen en (voor de boegschroef) bij verschillende kademuurconstructies;
- schaalmodelonderzoek bij het LEICHTWEIS-INSTITUT van de universiteit van Braunschweig, betreffende de stabiliteit van bodemmateriaal en ontgroningen van niet stabiel bodemmateriaal;
- veldonderzoek in de haven van Hamburg en modelonderzoek bij het LEICHTWEIS-INSTITUT betreffende de afvaarmanoeuvres van grote containerschepen.

Alle maten die in het vervolg van deze bijlage worden gegeven, zijn allemaal prototypeschaal. In het modelonderzoek zijn alle maten uiteraard op modelschaal weergegeven of gemeten (schaal 1:45 tot 1:25).

Uitgangspunt voor het modelonderzoek is een derde generatie containerschip, de Hannover Express.

Bij de proeven in het FRANZIUS-INSTITUT is echter een beschikbaar scheepsmodel gebruikt dat enigszins afwijkt van de "Hannover Express".

Er zijn vier typen bodembeschermingen beproefd. In volgorde van toenemende ruwheid zijn dit:

- een gladde bodem: een PVC-bodem in het model; in het prototype bijv. een asfaltmat;
- systeem CONCRETE: geotextielmat, gevuld met beton;
- systeem MÖBIUS: een blokkenmat bestaande uit 80 cm hoge blokken met relatief grote tussenruimte;
- breuksteen: losse stenen met een diameter van 45 à 60 cm.

Er zijn 4 typen kademuurconstructies beproefd:

type 0: gladde betonwand

- type 1: combiwand, geplaatst direct onder de voorkant van de kade
- type 2: ca. 4 m achteruit geplaatste damwand (figuur C.1):
 onder de kade bevinden zich buispalen zonder damwandplanken;
 de voorkant van de damwand bevindt zich ca. 3,9 m achteruit de
 voorkant van de buispalen.
- type 3: ca. 2 m achteruit geplaatste damwand op meer dan 3 m boven de
 havenbodem (figuur C.2);
 tot 3 m boven de bodem een combiwand recht onder de voorkant
 van de kade; op meer dan 3 m boven de bodem alleen buispalen zonder
 tussenplanken, en een damwand die ca. 1,9 m achteruit is geplaatst

Bij alle typen is er sprake van verticaal staande wanden. Er zijn geen schoor
 staande wanden beproefd.

Karakteristieken van de proeven met het scheepsmodel in het FRANZIUS-
 INSTITUT zijn:

breedte schip = 33,3 m (is 1,05 m breder dan H.Express)
 kielspeling = 0,68 m (dit is 5 % van de maximale diepgang van de "Han-
 nover Express", die 13,52 m bedraagt)

Hoofdschroef:

diameter: $D_p = 6,60$ m
 (vgl. H.Express: 9,28 m)

toerental: 1,12 omw/s, overeenkomend met
 "langzaam vooruit".

uitstroomsnelheid: $U_o = 6,7$ m/s

hoogte schroefas boven scheepskiel: 3,60 m (bij H.Express 5,05 m)

hoogte schroefas boven havenbodem: $h_{pb} = 4,28$ m = $0,648 \cdot D_p$

Boegschroef:

diameter: $D_p = 3,24$ m
 (vgl. H.Express: 2,95 m)

uitstroomsnelheid: $U_o = 9,39$ m/s

hoogte schroefas boven scheepskiel: 3,24 m (bij H.Express 5,10 m).

hoogte schroefas boven havenbodem: $h_{pb} = 3,92$ m

Een aantal van deze karakteristieken wijken af van de 'normale' karakteristieken
 bij grote containerschepen in de Rotterdamse haven:

- de kielspeling is zeer klein (slechts 0,68 m),
- de boegschroef heeft een relatief grote diameter.
 (Ter vergelijking: de Regina Maersk heeft een boegschroef van
 2,75 m; ACL-schepen hebben een hekschroef van 2,83 m).

C.2 Stroomsnelheden door de hoofdschroef

De proeven met de hoofdschroef zijn uitgevoerd op een zodanige afstand van de kademuur dat de kademuur geen belemmering is voor de verspreiding van de straal.

Midden achter de hoofdschroef is een roer geplaatst. Dit roer heeft bij alle proeven een uitslag van 36° . Dit is een weergave van de situatie waarin het containerschip met behulp van de hoofdschroef loskomt van de kademuur. Het is enigszins merkwaardig dat de proeven niet direct naast de kademuur zijn uitgevoerd.

Er zijn met de hoofdschroef geen proeven uitgevoerd boven het CONCRETE systeem, omdat dit als glad wordt beschouwd.

De grootste stroomsnelheden die boven de drie beproefde typen bodembescherming zijn:

gladde bodem:	ca. 6,5 m/s = $0,97 * U_0$
systeem Möbius:	ca. 5,0 m/s = $0,75 * U_0$
breuksteen:	ca. 4,5 m/s = $0,67 * U_0$

Bij toenemende ruwheid van de bodem neemt de maximale snelheid boven de bodembescherming dus af. Bij breuksteen is de max. snelheid 31 % kleiner dan bij een gladde bodem.

De ruwheid van de bodembescherming heeft ook een zeer sterke invloed op de afstand vanaf de schroef waarbinnen de schroefstraalsnelheden worden uitgedempt. De afstand achter de schroef tot waar een snelheid van 2,5 m/s wordt gemeten boven de bodem bedraagt:

41 m boven een gladde havenbodem,
ca. 18 m boven het MÖBIUS systeem,
20 m boven de losse breuksteen.

Uit deze resultaten blijkt dat de energie in de straal sneller wordt 'vernietigd' als de bodembescherming ruwer is. Dit betekent tevens dat de 'schuifspanningsbelasting' per m^2 bodembescherming groter is naarmate de ruwheid groter is. Bij de dimensioneringsrelatie van Isbash wordt hiermee geen rekening gehouden, zodat ruwe bodembeschermingen relatief minder veilig worden gedimensioneerd.

Volgens de rekenmethodes van IH en van Römisch zouden de volgende snelheden verwacht worden:

IH (met $D_0 = 0,7 * D_p$):	$U_{b,max} = 0,33 * U_0$
Römisch, zonder kade ($m = 0,6$):	$U_{b,max} = 0,45 * U_0$
Römisch, met kade ($m = 0,3$):	$U_{b,max} = 0,78 * U_0$
Römisch, algemene vgl(B.10):	$U_{b,max} = 1,09 * U_0$
Opm.:	De proefsituatie met $h_{pb}/D_p = 0,648$ valt eigenlijk buiten het geldigheidsgebied van Römisch ($h_{pb}/D_p \geq 0,9$)

De gemeten snelheden zijn dus veel groter dan de snelheden die worden berekend met de methode van IH en de methode van Römisch zonder kademuur.

De gemeten maximale snelheid boven breuksteen is een factor 2 groter dan de snelheid volgens de IH-methode, en een factor 1,5 groter dan volgens de methode van Römisch zonder kade.

Maar de gemeten maximale snelheid boven breuksteen is een factor 0,61 kleiner dan volgens de algemene vgl.(B.10) van Römisch.

Uit het voorgaande moet het volgende worden geconcludeerd:

- de gemeten maximale snelheden zijn een factor 1,5 à 2 groter dan volgens de methode van IH en de methode van Römisch zonder kade.
Dat zo'n grote snelheid is gemeten is waarschijnlijk voor een belangrijk deel een gevolg van het roer in combinatie met de zeer korte afstand (kielspeling 0,68 m) van de schroef boven de bodem. Het roer veroorzaakt namelijk een spitsing van de straal, waarbij een deel van de straal naar beneden schiet. De invloed van het roer wordt waarschijnlijk snel kleiner bij grotere afstand van de schroef boven de bodem, terwijl bij grotere afstand boven de bodem het roer een reducerende invloed heeft op de snelheid (zie § A.2 in bijlage A).
Het verschil met de rekenmethode van IH zal voor een deel ook een gevolg zijn van de belemmering van de verspreiding van de straal door de bodem.
- de gemeten maximale snelheden zijn een factor 0,6 kleiner dan volgens de algemene vgl.(B.10) van Römisch. Deze vergelijking, die ook in ref.9 (deel C, pag. 28) wordt gebruikt, geeft dus een sterke overschatting van de werkelijke snelheden.

C.3 Stroomsnelheden door de boegschroef

In de navolgende tabel zijn de waarden vermeld van $U_{b,max}/U_0$ zoals deze zijn gemeten door het Franzius Instituut, en zoals deze zijn berekend met de rekenmethode van IH.

kade nr.	rekenmethode IH		gemeten $U_{b,max}/U_0$			
	x_{pk}	berekende $U_{b,max}/U_0$	gladde bodem	CON-GRETE	MÖ-BIUS	Breuksteen
0	14,15	0,50	0,51			
1	15,65	0,46	0,51	0,48	0,37	0,43
2	19,15	0,39	0,35		0,27	
3	16,55	0,44	0,45	0,45	0,29	0,37

De gemeten snelheden boven een breuksteen zijn ca. 15 % lager dan de snelheden boven een gladde bodem.

De gemeten snelheden boven het systeem MÖBIUS zijn ca. 30 % lager dan de snelheden boven een gladde bodem.

De rekenmethode van IH geeft een zeer goede benadering van de gemeten snelheden. De maximale snelheid boven de breuksteen worden door de rekenmethode van IH bij kade type 1 met 7 % overschat.

Bij kade type 3 bedraagt de overschatting door de IH-methode 19 %. Dit komt omdat de vorm van dit kade-type een verlaging van de snelheid boven de bodem veroorzaakt (door ombuiging van de straal en door extra energie-dissipatie).

Volgens de benadering van Römisch zou de snelheid boven de bodem gelijk zijn aan U_0 . Bij deze benadering wordt de werkelijke maximale snelheid met een factor 2 à 2,5 overschat.

C.4 Stabiliteit van stenen

De erosie van niet stabiel bodemmateriaal is bij het onderzoek vrij uitgebreid. Er zijn echter slechts drie bepalingen uitgevoerd van de stabiliteitscoëfficiënt bij het begin van bewegen van stabiel bodemmateriaal (één bepaling voor de hoofdschroef en twee voor de boegschroef). Deze bevestigen de eerder in een schaalmodel bepaalde waarden door Fuehrer en Römisch.

In prototype geldt volgens Fuehrer en Römisch (1977, ref.11):

$$\begin{aligned} \text{bij hoofdschroef:} & \quad \beta_{Is,cr} = 1,3 \\ \text{bij boegschroef:} & \quad \beta_{Is,cr} = 0,7 \end{aligned}$$

Deze waarden worden ook vermeld in het rapport

Zonder dat dit expliciet wordt vermeldt, bestaat de indruk dat deze stabiliteitswaarden niet zijn gebaseerd op gemeten snelheden boven de bodem, maar op berekende snelheden volgens de methode van (Fuehrer en) Römisch.

Het verschil in rekenmethode tussen hoofd- en boegschroef kan de verklaring zijn voor het verschil tussen de $\beta_{Is,cr}$ -waarden voor hoofd- en boegschroef.

C.5 Afvaarmanoeuvres

Bij 6 afvaarmanoeuvres van grote containerschepen (lengte ca. 260 m, breedte ca. 32 m, diepgang 9 à 11 m) in de haven van Hamburg is het vermogengebruik gemeten.

Voor de hoofdschroef is bij 3 afvaarten een maximaal vermogengebruik van 40 % geconstateerd, en bij 3 afvaarten 65 %. De afvaarten met 65 % van het vermogen betrof vooruit afvaren zonder hekschroef. De afvaarten met 40 % van het vermogen betrof 1 afvaart vooruit met hekschroef en 2 afvaarten achteruit zonder hekschroef. Bij alle manoeuvres is er sleepboothulp aan de achterzijde van het schip. Bij één manoeuvre (achteruit wegvarend) is er ook een sleepboot aan de voorzijde van het schip.

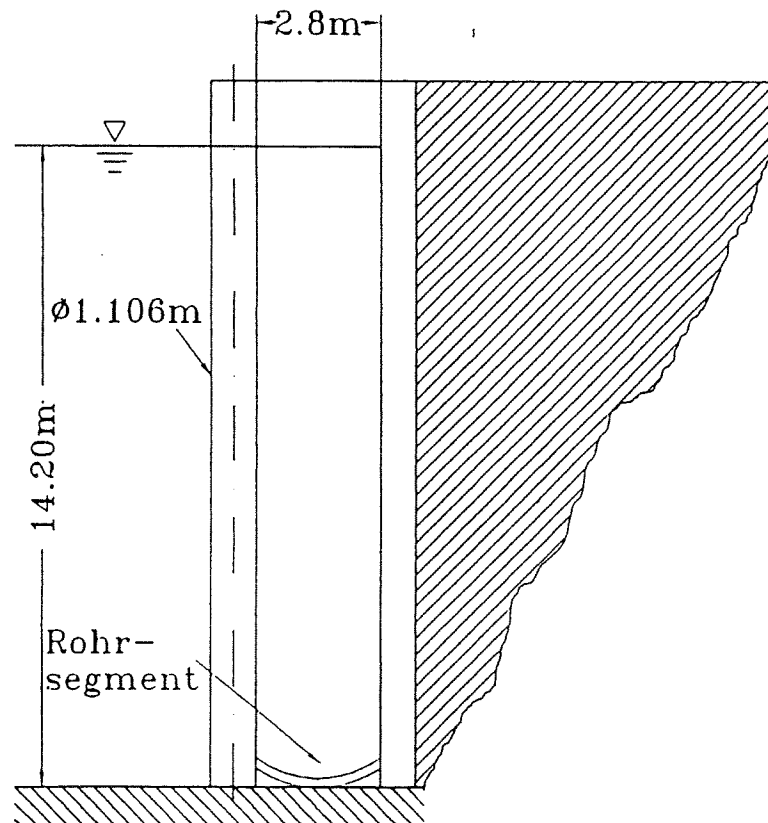
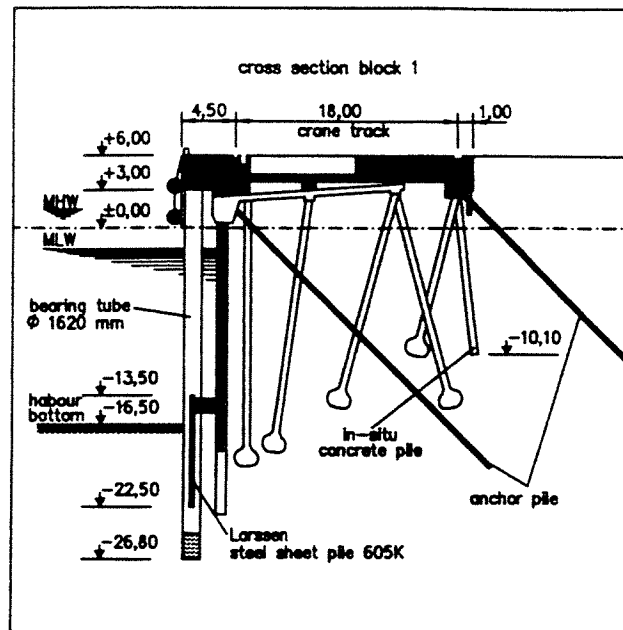
De boegschroef en de hekschroef (indien aanwezig) werd bij alle afvaarten met 100 % van het vermogen gebruikt. Dit geldt ook bij de manoeuvre waarbij aan de voorzijde ook sprake was van sleepboothulp.

C.6 Conclusies

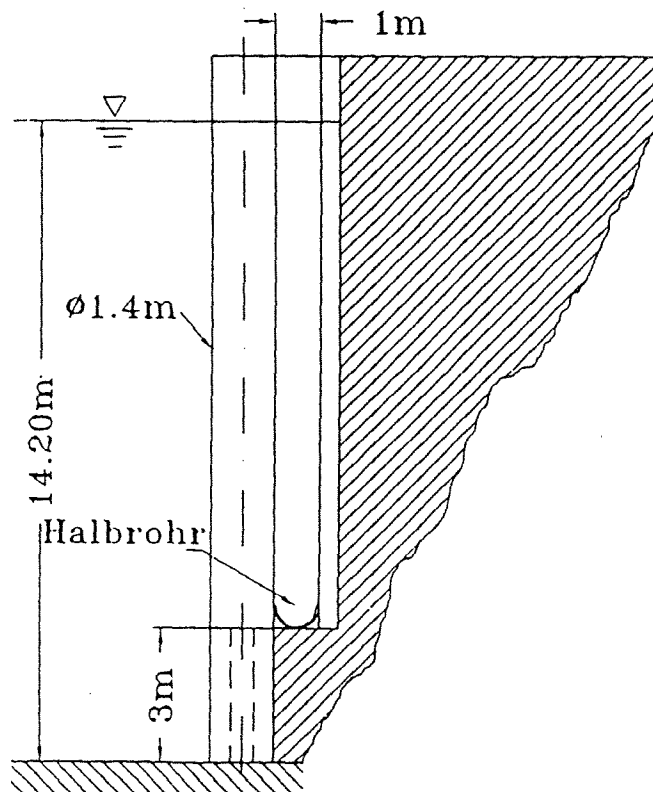
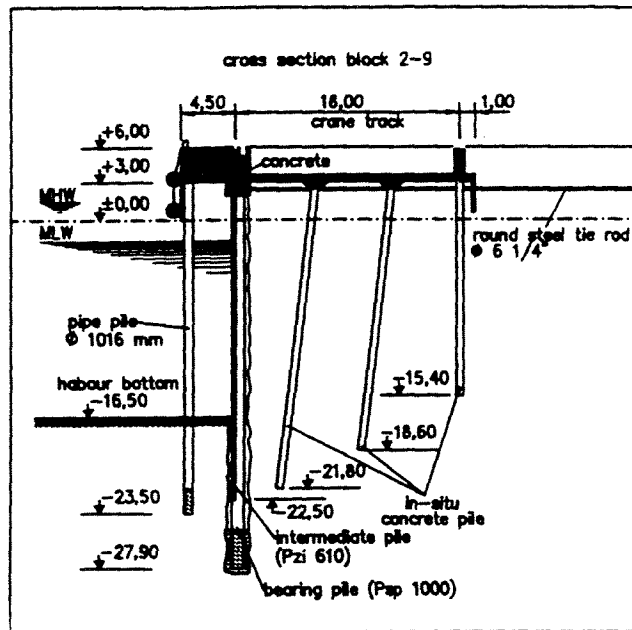
Opmerkelijke resultaten die uit het onderzoek volgen zijn:

- de stroomsnelheden die volgens de metingen door de hoofdschroef boven de bodem worden veroorzaakt, zijn veel groter dan de snelheid die met de methode van IH wordt berekend.
Waarschijnlijk wordt dit voor een belangrijk deel veroorzaakt door het roer, in combinatie met de kleine kielspeling. (De rekenmethode van IH houdt geen rekening met de aanwezigheid van een roer).
De aanwezigheid van een kademuur speelt geen rol, want de metingen van de stroomsnelheden zijn uitgevoerd buiten de invloedssfeer van een kademuur;
- de stroomsnelheden die volgens de metingen door de hoofdschroef boven de bodem worden veroorzaakt, zijn echter weer kleiner dan de snelheid volgens de algemene (in de literatuur veel gebruikte) relatie van Römisch met $E=0,71$;
- de snelheden die volgens de metingen door de boegschroef worden veroorzaakt worden door de methode van IH goed berekend, en door de methode van Römisch sterk overschat;

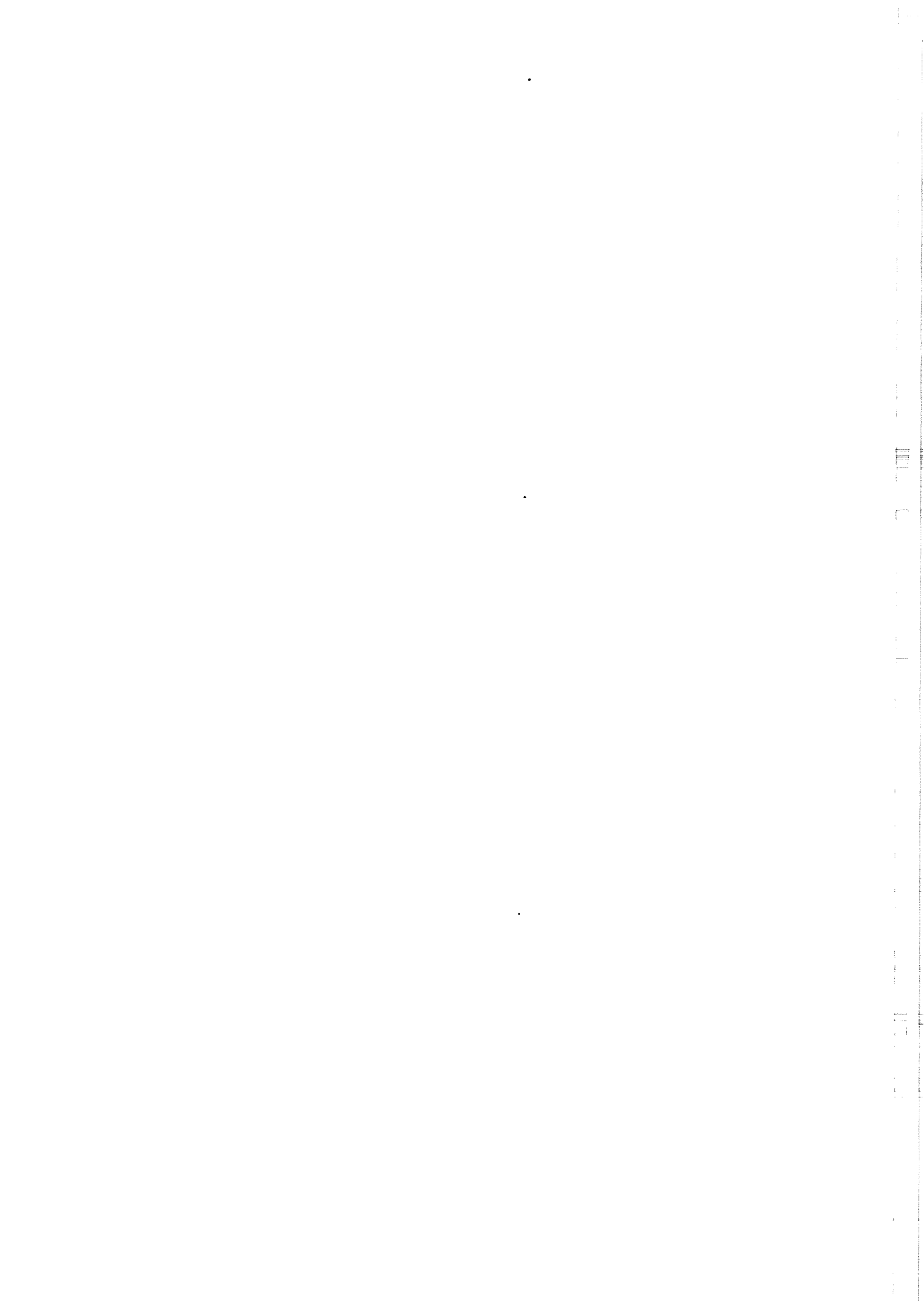
- het onderzoek geeft geen inzicht in de invloed van een kademuur op de stroomsnelheden die boven de bodem door een hoofdschroef worden veroorzaakt;
- bij toenemende ruwheid van de bodembescherming wordt de snelheid boven de bodem kleiner (door een snellere energie-dissipatie). Echter de belasting (c.q. schuifspanning) op de bodembescherming wordt hierbij waarschijnlijk groter i.p.v. kleiner;
- er zijn slechts een beperkt aantal bepalingen uitgevoerd van de stabiliteitscoëfficiënt van stenen. Hieruit volgt ongeveer dezelfde coëfficiënt als bij de methode van Römisch. Deze is ongeveer een factor 2 kleiner dan de coëfficiënt die door IH wordt gehanteerd. De bepaalde coëfficiënt is echter waarschijnlijk niet gekoppeld aan gemeten snelheden, maar aan berekende snelheden (berekend met de methode van Römisch);
- er is een opvallend groot vermogengebruik van de hoofdschroef gemeten: 65 % van het maximale vermogen.



Figuur C.1 Beproefde kademuurconstructie type 2, met ca. 4 m achteruit geplaatste damwand



Figuur C.2 Beproeft kademuurconstructie type 3, met ca. 2 m achteruit geplaatste damwand op meer dan 3 m boven de bodem





BIJLAGE D. LITERATUUR-OVERZICHT BETREFFENDE SCHROEFSTRALEN EN BODEMBESCHERMINGEN

In de navolgende tabel wordt een overzicht gegeven van alle bij het Ingenieursbureau Havenwerken beschikbare literatuur betreffende schroefstralen, en daarbij te dimensioneren bodembeschermingen.

Het overzicht is chronologisch gesorteerd op jaartal. Binnen één jaartal is alfabetisch gesorteerd op de naam van de eerste auteur.

De jaartallen zijn vet gedrukt op de plaats waar ze het eerst in de tabel voorkomen (om het zoeken op jaartal te vergemakkelijken).

Titel (eventueel met rapportnummer)	Auteur (land)	Dienst/Instituut/-Tijdschrift etc.	Jaar- maand
Der propellerstrahl als erodierendes Element bei An- und Ablegemanövern im Hafenbecken.	K. Römisch (D)	Seewirtschaft, Jahrgang 7, Heft 7	75
Turbulent Jets	N. Rajaratnam	Elsevier	76
Effects of modern ship traffic on inland- and ocean-waterways and their structures	M. Fuehrer (D) K. Römisch	PIANC, 24 ^e congress, Leningrad	77
Erosion of bottom and sloping banks caused by the screw race of manoeuvring ships	H.G. Blaauw (NL) E.J. van de Kaa	Waterloopkundig Laboratorium, publicatie nr. 202	78-07
Kademuur EECV. Bescherming tegen ontgraving. (Meting stroomsnelheden bij meerdere schroeven)		GW-IH, rapport code 61.00-R8016	80-07
Propeller erosion in harbours	H. Bergh (S) K. Cederwall	PIANC, 25 ^e congres, Edinburgh	81
Criteria for dimensioning the Bottom and Slope protections and for Applying the New methods of Protecting Navigation Canals	M. Fuehrer (D) K. Römisch G. Engelke	PIANC, 25 ^e congres, Edinburgh	81
Erosion by plane turbulent jets	N. Rajaratnam	Journal of Hydraulic Research 19, N ^o 4	81
The stability of bottom and banks subjected to the velocities in propeller jet behind ships	H.J. Verhey (NL) (WL-Delft, publ. nr. 303)	8 th Int. Harbour Congress, Antwerp	83-06
Schroefstraalerosie bij aanlegplaatsen langs het Amsterdam-Rijnkanaal, concept-nota S85.105		RWS Dienst Verkeerskunde, Dordrecht	85-04
Aantasting van dwarsprofielen in vaarwegen, schroefstralen en de stabiliteit van bodem en oevers onder invloed van de stroomsnelheden in de schroefstraal, verslag modelonderzoek, deel VII en Xa		Waterloopkundig Laboratorium, project M1115	85-11
Propeller induced scour	M.J. Prosser (UK)	BHRA, the Fluid Engineering Centre, Cranfield	86
Propeller erosion & protection methods used in ferry terminals in the port of Stockholm	H. Bergh (S) N. Magnusson	AIPCN-PIANC bulletin N ^o 58	87

Titel (eventueel met rapportnummer)	Auteur (land)	Dienst/Instituut/ Tijdschrift etc.	Jaar- maand
Propeller wash effects on protective armor layer design for contained aquatic disposal sites	J.E. Clausner C.L. Truit (USA)	PIANC bulletin N° 58	87
Propeller jet erosion and stability criteria for bottom protections of various constructions	M. Fuehrer (D) H. Pohl K. Römisch	PIANC bulletin N° 58	87
Seabed erosion in ferry berths	M. Kristensen (DK)	PIANC bulletin N° 58	87
Problems d'érosion aux ouvrages de Quai existants causes par les propulseurs d'étrave et les helices principales des navires lors de leurs accostages ou appareillages	J.P. Longe (F) P. Hebert M. Raymond	PIANC bulletin N° 58	87
Bottom erosion as an effect of ship propeller action near the harbour quays	W. Robakiewicz (Polen)	PIANC bulletin N° 58	87
Experience in the Netherlands with quay structures subjected to velocities created by bow thrusters & main propellers of mooring and unmooring ships	H.J. Verhey (NL) T. Blokland M. Bogaerts e.a.	PIANC bulletin N° 58	87
Theoretical forecast and field examination of the propeller jet erosion at a dock trial site in a shipyard harbour with complicated boundary conditions and unprotected bottom	M. Fuehrer (D)	9 th Int. Harbour Congress, Antwerp	88-06
The scouring action of the propeller jet produced by a slowly manoeuvring ship	G.A. Hamill (UK)	PIANC bulletin N° 62	88
Aantasting van dwarsprofielen in vaarwegen, technische aanbevelingen voor oeververdedigingen van losgestorte en gezette steen. Samenvattend verslag, deel XIX		Waterloopkundig Laboratorium, project M1115	88-12
Velocities in a ship's propeller wash	D.P.J. Stewart G.A. Hamill (UK) H.T. Johnston	Environmental hydraulics	91
Research on the effect of propeller erosion on quay-walls and comparison of bottom protection schemes	M. Dossche (B) F. Elskens M. Sas	10 th Int. Harbour Congress, Antwerp	92-06
Scouring by ship's propellers. Tracing, repair, prevention. Ontgrondingen door scheepsschroeven. Opsporen, repareren en voorkomen. GW-IH, rapportnr, 88.80-R92.	R.W. vd Weijde A.C. Noordijk P.J.M. Heijndijk J.Th. Kleyheeg	10 th Int. Harbour Congress, Antwerp	92-06
Stroomsnelheden bij de oever veroorzaakt door boegschroeven	D.G. Meijer H.J. Verhey	Waterloopkundig Laboratorium, project Q1657	93-07
Propellerstrahlinduzierte Erosionserscheinungen in Häfen	K. Römisch (D)	HANSA Schifffahrt- Schiffbau-Hafen, 130 ^e Jahrgang, nr.8	93
Scour protection in new ferry terminal of Elsinore (DK)	B. Pankchik (DK) H. Gravesen J. Thomsen	PIANC-bulletin Nr.83/84.	94
Bugstrahlsteueranlagen	E. Latterman	Jahrbuch der Hafent- bautechnische Gesellschaft	94
Quantification of Navigation-Induces Forces and Their impact on the Environment (geeft Amerikaanse formule)	S. Martin (USA) S. Maynard	PIANC, 28 ^e congress, Seville	94

Titel (eventueel met rapportnummer)	Auteur (land)	Dienst/Instituut/ Tijdschrift etc.	Jaar- maand
Propellerstrahlinduzierte Erosionserscheinungen	K. Römisch (D)	HANSA Schifffahrt- Schiffbau-Hafen, 131 ^e Jahrgang, nr.9	94
Propellerstrahlinduzierte Erosionserscheinungen	K. Römisch (D)	Jahrbuch der Hafentech- nische Gesellschaft	94
Ferry developments and their consequences for ports. Recommendations for the design and operation of port facilities. § 3.5: Protection methods against propeller erosion.		PIANC, PTC II, Working Group 11, Supplement to bulletin No 87	95
Handleiding voor het ontwerpen van granulaire bodemverdedigingen achter tweedimensionale uitstromingsconstructies, doc. nr. BOD-R95002, 2 ^e herziene druk	A. Franken E. Ariëns H. Klatter	Bouwdienst Rijkswaterstaat	95
Zoeken naar een berekeningsmethode. Het effect van boegschroeven op oeverbelasting	P.Kik (NL) H.J. Verheij	Land + Water nr.3	95
Modelonderzoek schroefstralen tegen kademuur	T.J. Koman (NL) S.N. Duijm J.Guis	HTO Dordrecht, afstudeerverslag	95-06
Erosion of loose beds by submerged circular impinging vertical turbulent jets	O.O. Aderigbe (Canada) N. Rajaratnam	Journal of hydraulic research Vol.34, No.1	96
Schroefstraal tegen kademuur, stroomsnelheid en erosiemetingen, rapportnr. 61.00-R94.038	T. Blokland (NL)	GW-IH,	96-04
In situ tests of current velocities and stone movements caused by a propeller jet against a vertical quay wall	T. Blokland (NL)	11 th Int. Harbour Congress, Antwerp	96-06
De stabiliteit van de bodembescherming voor een kademuur bij het gebruik van boegschroeven.	A. Bok (NL)	Afstudeerverslag, TU Delft, faculteit der Civiele Techniek	96-03
Uses of wire enclosed riprap to protect against bow propeller effects.	A.D. Crowhurst (UK)	11 th Int. Harbour Congress, Antwerp	96-06
Harbour bottom erosion berths due to propeller jets.	H.P. Dücker (D) C. Miller	11 th Int. Harbour Congress, Antwerp	96-06
Die CONCRETE-Matte und die verklammerte Steinschüttung. Systeme zum Schutz hochbelasteter Hafensohlen.	G. Hackmann (D) K. Römisch	HANSA Schifffahrt- Schiffbau-Hafen, 133 ^e Jahrgang, nr.8	96
Estimating the velocities in a ship's propeller wash.	G.A. Hamill (UK) H.T. Johnston D.P.J. Stewart	PIANC bulletin, No 89	96-01
The influence of a revetment on diffusion of a propeller wash	G.A. Hamill (UK) R.M.M. Qurrain H.T. Johnston	PIANC bulletin N° 91	96-06
The effects of ship propellers on bottom velocities and on scour near berths and protection methods using thin flexible revetments	L. Raes (B) F. Elkens (B) K. Römisch (G) M. Sas (B)	11 th Int. Harbour Congress, Antwerpen	96-06

Titel (eventueel met rapportnummer)	Auteur (land)	Dienst/Instituut/ Tijdschrift etc.	Jaar- maand
Literatuur betreffende voortstuwing en schroeven:			
G.C. Schneider - C. Pronk Offshore technology conference 1975 Performance of thrusters.			
Ervaringen met afgeplatte straalbuizen op binnenvaartschepen	J.L. Gelling (NL)	Schip & Werf de Zee	95-11
Diesel engines for large container vessels.	O. Grøne (Dk)	HANSA Schifffahrt- Schiffbau-Hafen, 133 ^e Jahrgang, nr.3	96
Neue Motoren und Getriebe.		HANSA Schifffahrt- Schiffbau-Hafen, 133 ^e Jahrgang, nr.4	96