

Bodembeschermingen bij afmeerplaatsen

Opdracht

Rijkswaterstaat, Dienst Utrecht heeft via een opdrachtaanvraag dd. 2 april 2009 de Sectie Waterbouwkunde van de TU Delft gevraagd om “advisering met betrekking tot de ontwerpaspecten van de renovatie van meerplaatsen langs het Amsterdam-Rijnkanaal (UTI-7253), in het bijzonder het geven van een visie op de vertaling van de algemene bestekseisen naar de uitgangspunten voor het ontwerp en aandachtspunten voor de beoordeling van het ontwerp”.

Algemene visie

Bij afmeerplaatsen is het over het algemeen nodig om een bodembescherming toe te passen. Deze bescherming is nodig om te voorkomen dat er ontoelaatbare ontgroningen nabij de kadewand of oever optreden. De oorzaak van deze ontgroningen is de grote (turbulente) stroomsnelheid van schroeven die ontstaat bij het afmeren en wegvaren van schepen. In de vaarweg zelf geven deze schroefstralen vaak ook aanleiding tot beweging van de bodem, maar omdat dan het schip beweegt, is de gemiddelde erosie over plaats en tijd meestal nul. Bij een afmeerplaats is de beweging van het schip vrij klein, en treedt de ontgroning dus altijd op dezelfde plek en kan daardoor tot problemen leiden.

De bodembescherming moet:

- voldoende stabiel zijn, dus blijven liggen onder invloed van de belasting (= schroefstralen);
- voldoende uitgestrekt zijn, dus geen ontoelaatbare erosie net buiten de randen van het beschermde gebied;
- de bodembescherming moet voldoende zanddicht zijn om uitspoeling door de constructie te voorkomen.

Om tot een goed ontwerp te komen moet eerst de belasting bepaald worden (stroming en turbulentie), vervolgens moet een stabiliteitscriterium gekozen worden (de te gebruiken formule) en tot slot moet de bodembescherming zelf gedimensioneerd worden.

Er zijn meerdere methoden beschikbaar om e.e.a. uit te rekenen.

Echter, in de Vraagspecificatie is een aantal bindende documenten gegeven, dus in het onderstaande is daarom alleen rekening gehouden met methoden die in de bindende documenten beschreven worden. Methodes en waarden van elders worden alleen gebruikt als de bindende documenten geen uitsluiting geven.

Het is in dit kader belangrijk om aan te geven dat een aantal van de bindende documenten enigszins verouderd zijn. Vooral op het gebied van vermogens van boegschroeven is er de laatste jaren een stormachtige ontwikkeling geweest. Om deze reden heeft PIANC ook besloten om een nieuwe handleiding te maken voor bepaling van de effecten van boegschroeven. (Working Group MarCom 48; Effect of Bow thrusters). Het concept van deze handleiding is gereed, uitgave wordt in dit jaar nog verwacht.

Aangegeven is in de Vraagspecificatie dat de genoemde vaarwegen CEMT-klasse V**ib** (Amsterdam-Rijnkanaal) en V**b** (Lekkanaal) zijn. De CEMT-klasse geeft de maat van het

maximale schip dat gebruik kan maken van deze vaarweg. De beheerder wordt geacht te garanderen dat schepen van deze maat ongehinderd gebruik kunnen maken van deze vaarweg (dwz er is voldoende breedte en diepte beschikbaar (en er is voldoende vrije ruimte onder de bruggen). CEMT klasse Vb is een vaarweg geschikt voor motorschepen met een breedte van 11.4 m en een diepgang van 3.5 m alsmede voor duwstellen van 11.4 m breed en 4 m diepgang. CEMT klasse VIb is een vaarweg geschikt voor motorschepen met een breedte van 17 m en 4 m diepgang, alsmede duwstellen met een breedte van 22.8 m en een diepgang van 4. (Opmerking: In de CEMT systematiek is de a-reeks de maximale maat voor motorschepen en de b-reeks de maat voor duwstellen. Motorschepen van een a-reeks moeten natuurlijk ook in een b-reeks kunnen varen; hierdoor is de eis voor bijv. een klasse I Ib vaarweg een maximale waarde voor duwstellen klasse VIb en voor motorschepen klasse VIa.)

De CEMT klassen zijn vaarwegklassen, en dus geen scheepsklassen. Er is in de CEMT methodiek geen informatie over bijv. toegelaten vermogens en maten van hoofd- en boegschroeven.

In het onderstaande wordt alleen gekeken naar bodembescherming uit losse breuksteen. Voor bodembescherming met samenhang (bijv. asfaltmatten) gelden natuurlijk andere regels. Belangrijk bij constructies met samenhang is dat zij zanddicht, maar welvoldoende doorlatend zijn. Ook zullen zij een bepaalde flexibiliteit moeten hebben om breuk door ongelijke zettingen te voorkomen.

Kenmerkende gegevens

De belasting hangt af van het soort schepen in het kanaal. Voor de Europese vaarwegen is een classificatie gemaakt, waarbij bepaalde scheepstypen horen. In principe zou een kanaal ook gebruikt kunnen worden door andere schepen dan waarvoor het kanaal ontworpen is. Echter, dit is niet waarschijnlijk omdat de sluizen en bruggen voor deze klasse schepen gedimensioneerd zijn, en het dus fysiek niet goed mogelijk is voor grotere schepen om door het kanaal te kunnen varen. Er is sprake van een klasse VIb schip voor het Amsterdam Rijnkanaal en een klasse Vb schip voor het Lekkanaal. Het kanaalpeil varieert van -0.,0 tot -0,20 m onder NAP, en de bodemligging is NAP -5,50 voor het Lekkanaal en -6,20 voor het Amsterdam Rijnkanaal.

Uit de “Richtlijnen voor vaarwegen” [2] zijn de volgende waarden af te leiden:

	Klasse Va/Vb Lekkanaal	Klasse VIa/VIb Amsterdam-Rijnkanaal
duwstel, breedte	11.40	22.80
duwstel, diepgang	2.50-4.50	2.50-4.50
motorschip, breedte	11.4	17.0
motorschip, diepgang	3.5	4.0

Opmerking: In de oorspronkelijke CEMT classificatie uit 1992 wordt voor motorschepen niet de klasse VIa, maar VIb gebruikt, en daarbij wordt een breedte van 15 m en een diepgang van 3.9 m gegeven. In [2] is aangegeven dat voor Nederland deze waarden verouderd zijn, op blz. 179 van deze publicatie worden de in de tabel hierboven genoemde waarden gegeven.

Echter, middels Binnenvaart Politierglement is de maximale toegelaten diepgang in het Lekkanaal 3.5 m, en in het Amsterdam-Rijnkanaal 4.0 m.

Het boek “Ontwerp van Schutsluizen” [1], blz. 16.16 geeft waarden voor klasse Vb vaarwegen, voor klasse VIb vaarwegen wordt in dit boek helemaal niets gegeven. De ontwerper zal hier dus zelf keuzes moeten maken.

	Echte schroefdiameter D_p	Effectieve schroefdiameter D_0 (m)	Vermogen van schip P_d (kW)	breedte schip (m)
Klasse Vb Lekkanaal	1,60 (3 schroeven in straalbuis)	1,60	3600	11,4

De nota “Classificatie en kenmerken van de Europese vloot” van de AVV, 2002 [3] geeft de volgende kentallen:

	Klasse Va motorschip	Klasse VIa motorschip Amsterdam-Rijnkanaal	Klasse Vb duwstel Lekkanaal	Klasse VIb duwstel Amsterdam-Rijnkanaal
breedte	11.09/0.69	17.0	11.40	22.80
diepgang	3.19/0.47	4.0	2.50-4.50	2.50-4.50
vermogen	1145/434	--	1427	3791

De getallen voor de schuine streep zijn gemiddelden, de waarde erachter is de standaardafwijking.

Voor zeer grote motorschepen in klasse VIa vaarwegen worden in publicatie [3] geen vermogens gegeven. Voorbeelden van grote schepen:

		breedte (m)	diepgang (m)	Motorvermogen (kW)
Jowi	containerschip	16.9	3.2	1998 (3)
Innovation 4	tankschip	11.38	3.2	2900 (2)
Dordrecht 40	tankschip	11.38	4.01	1804 (2)
Sterrenburg	containerschip	11.3	3	2030 (2)
Apollo	-	17.5	4.2	2236 (2)
Aquapolis	containerschip	17.35	3.4	2500 (2)
Allegro	containerschip	11.45	3.69	1434 (2)
Cortina	containerschip	11.45	3.43	1566 (2)
Veerhagen VII	duwboot	15	1.94	3960 (3)

Keuzes

Om de berekeningen te kunnen maken, moet de ontwerper een aantal keuzes maken. Zo is gesteld dat de vaarweg enerzijds een klasse Vb, cq VIb vaarweg is, maar anderzijds stelt het BPR dat de maximaal toegelaten diepgang 3,5, cq. 4.0 m is. Feitelijk zijn de vaarwegen hiermee dus geen klasse Vb en VIb vaarwegen. De ontwerper moet dus kiezen of er voor een echte klasse Vb en VIb vaarweg gekozen wordt, of dat er voor een beperkte diepgang gekozen moet worden.

Omdat het overheidsbeleid is om deze kanalen te onderhouden als Vb en VIb kanalen, is het realistisch om te stellen dat de huidige beperkende diepgang een tijdelijke maatregel is, en dus geen grondslag is voor een ontwerp met een levensduur van 50 jaar. Bovendien staat de

CEMT classificatie wel in de bindende documenten (in [2]) en staat het BPR niet in de lijst van bindende documenten.

In het onderstaande is daarom in principe gerekend met de door de CEMT klasse toegelaten diepgang.

Daarnaast blijken schepen niet altijd zowel de maximale breedte als de maximale diepgang te hebben. Uit [3] volgt hier enige informatie over. Echter, scheepseigenaren zullen schepen altijd ontwerpen op de maximale toegestane maten voor een bepaalde vaarweg. Dus voor een ontwerp dat 50 jaar mee moet, is het verstandig om uit te gaan van de maximaal mogelijke scheepsafmetingen.

De economische vaarsnelheid van een schip is gelimiteerd door de afmetingen van het schip en de diepgang van de vaarwegen. Hierdoor zal het motorvermogen voor binnenvaartschepen in de toekomst vermoedelijk niet sterk toenemen als hun maten ook niet mogen toenemen (en die zijn beperkt middels de CEMT vaarwegklassen). De huidige range van vermogens voor de hoofdschroef is daarom een valide basis voor ontwerp. Voor de boegschroef is dat een ander verhaal. Boegschroeven kunnen steeds kleiner uitgevoerd worden, en meer vermogen betekent voor de schipper ook meer wendbaarheid. De huidige regel dat het vermogen van de boegschroef 18.5 maal de scheepsbreedte is [1] is gebaseerd op een analyse uit 1985. Dit bekennt voor schepen met een breedte van ongeveer 11 m een vermogen van ruim 200 kW. De standaardafwijking hierbij was toen ca. 45 kW (meer dan 20% van het gemiddelde). Het statische verband tussen scheepsbreedte en geïnstalleerd boegschroefvermogen heeft weinig fysische onderbouwing.

Ondanks bovenstaande opmerkingen is als keuze gemaakt om de genoemde relatie tussen scheepsbreedte en boegschroefvermogen uit [1] te gebruiken voor het ontwerp, omdat [1] een bindend document is.

De belasting

Hoofdschroef

De belasting bestaat uit stroming door boeg- en hoofdschroeven van afmerende en wegvarende schepen. Voor het dimensioneren van de bodembescherming is de stroomsnelheid aan de bodem van belang. Voor vrije schroefstralen zijn daarvoor standaardformules beschikbaar. Deze worden hieronder samengevat. De formulenummers komen overeen met de nummers gebruikt in [1].

Vervolgens kan met de stroomsnelheid direct achter de schroef berekend worden met:

$$u_p = 1.15 \left(\frac{P_d}{D_0^2} \right)^{1/3} \quad 16.7$$

De snelheid aan de bodem is dan te berekenen met:

$$u_{bp} = 0.30 u_p \sqrt{n} \frac{D_0}{d_p} \quad 16.9$$

waarin n het aantal schroeven is en d_p de afstand tussen bodem en schroef.

In de bindende documenten worden geen waarden gegeven voor Klasse VIb schepen. De in de berekening benodigde hoogte van de schroef boven de bodem (d_p) is ook niet gegeven in de bindende documenten. Aangenomen kan worden dat de schroefas $\alpha_1 D_p$ boven de scheepsbodem ligt. De waarde van α_1 wordt niet in bindende documenten gegeven. In de berekening is verder aangenomen dat de schroef altijd in een straalbuis geplaatst is.

De turbulentie-intensiteit is gegeven op blz. 16.15 van [1] als $r = 0,35 - 0,40$.

Boegschroef

Voor de berekening van de boegschroefstraal kan de methode van [1], blz. 16.18 gevolgd worden met gebruikmaking van de aangegeven benaderingsmethoden. Het vermogen en de effectieve diameter van de boegschroef kan geschat worden met:

$$P_d = 18.5b_s \quad 16.17a$$

en

$$D_0 = 0.068P_d^{0.5} \quad 16.17b$$

Hierin is b_s de breedte van het schip in meters. Aangetekend moet hierbij worden dat deze beide formules oorspronkelijk afkomstig zijn uit een rapport van het Waterloopkundig Laboratorium uit 1993 [4], dat gebaseerd is op de technologie van boegschroeven van meer dan 15 jaar geleden. In tegenstelling tot de meeste andere gebruikte formules, zijn de formules 16.17 niet gebaseerd op fysische grondslagen, maar zuiver op een statistische relatie tussen scheepsbreedte, vermogen en schroefdiameter van boegschroeven die in 1993 op de markt waren.

De stroomsnelheid achter de boegschroef is:

$$v_p = 1.15\zeta \left(\frac{P_d}{D_0^2} \right)^{1/3} \quad 16.14$$

Hierin is ζ een energieverliesfactor (0.9). De snelheid aan de bodem is geven middels:

$$v_b = 1.03v_p \frac{D_0}{d_p} \quad 16.16$$

De breedte van het schip en de hoogte van de schroef boven de bodem zijn hier de enige onbekenden. De breedte van het schip volgt uit de scheepvaartklasse. De turbulente intensiteit is ook hier gegeven en wordt gesteld op 35%. Aangenomen kan worden dat de schroefas $\alpha_2 D_p$ boven de scheepsbodem ligt. De waarde van α_2 wordt niet in bindende documenten gegeven.

De stabiliteit

De stabiliteit van losse breuksteen kan bepaald worden met de formule van Izbash. De formule van Shields is minder van toepassing, omdat die uitgaat van een evenwichtsverhang van de waterlijn, veroorzaakt door een evenwicht tussen de door de zwaartekracht aangedreven stroming en de weerstand. Een dergelijk evenwicht is er bij schroefstralen niet. De formule van Izbash, of varianten daarvan, dient dus toegepast te worden.

Op blz. 16.23 van [1] wordt een formule gegeven voor de stabiliteit van breuksteen bij schroefstralen. Het kopje deze paragraaf zegt: "Shields formulering aangepast voor stralen", maar dit kopje is feitelijk niet helemaal correct. De formule is feitelijk een Izbash formulering, waarvan de coëfficiënt gekalibreerd is met een vergelijking met belasting bij eenparige uniforme zwaartekrachtstroming die volgens Shields bepaald kan worden. De formule die gegeven wordt is:

$$D_n = \left\{ \frac{0.80}{\Delta h^{1/3}} \cdot \frac{(u_b(1+3r))^2}{2g} \right\}^{3/2} \quad 16.23$$

Hierin is h de waterdiepte (dus 6.2 m voor het ARK en 5.5 m voor het Lekkanaal), u_b de hierboven berekende bodemsnelheid door boegschroef en/of hoofdschroef, en r de relatieve turbulentie intensiteit ($r= 0,35$).

De berekening

De berekening van de benodigde steengroottes staat in onderstaande tabel. Voor het duwstel is geen steengewicht voor boegschroef berekend, omdat deze combinaties geen boegschroeven hebben. Bij de diepgangen is de waarde aangehouden die de CEMT-klassen aangeven (dus voor een motorschip 3.5 en 4 m en voor een duwstel 4.5 m; echter, bij de diepgang van het duwstel moet niet de diepgang van de bakken, maar de diepgang van de duwboot genomen worden. Deze is 2 m). Voor de berekening zijn de volgende parameters gebruikt:

			Motorschip Lekkanaal	Motorschip A Rijnkanaal	Duwstel A Rijnkanaal	
Schip	diepgang schip	d	3.5	4.0	2.0	m
	breedte schip	bs	11.4	17	22.8	m
	aantal schroeven **	n	2	3	3	-
	Vermogen schip	Pd	1804	3000	3791	kW
	Schroefdiameter	Dp	1.6	1.6	1.6	m
	straalbuis (wel=1, niet=0.7) **		1.00	1.00	1.00	-
	vaar- weg	bodemligging t.o.v NAP	h	5.5	6.2	6.2
kanaalpeil t.o.v. NAP			-0.60	-0.60	-0.60	
turbulentie intensiteit		r	35%	35%	35%	
mate- riaal	relatieve steendichtheid **	delt a	1.65	1.65	1.65	-
	dichtheid van de steen **	rho	1650	1650	1650	kg/m ³
	berekend vermogen boegschroef	Pb	211	315	-	kW
	steengewicht tgv hoofdschroef		35	111	1	kg
	steengewicht tgv boegschroef		297	369	-	kg

Een aantal gegevens uit bovenstaande tabel komen uit de bindende documenten. De parameters gemerkt met ** worden niet in de bindende documenten gegeven, de ontwerper moet daarvoor dus een realistische schatting maken. Daarnaast zijn schattingen voor nodig voor α_1 en α_2 ; in deze notitie zijn de waarden $\alpha_1 = 0,5$ en $\alpha_2=0,6$ aangenomen.

De getallen die in bovenstaande tabel staan gelden voor een duwstel in vaarweg klasse Vb. In alle gevallen is het maximaal mogelijke genomen, behalve voor het duwstel, waarbij aangenomen is dat de diepgang (van de duwboot) niet meer dan 2 m is. Bij het duwstel is het steengewicht t.g.v. de boegschroef niet uitgerekend, omdat aangenomen is dat duwbakken geen boegschroef hebben.

Aangenomen is dat altijd het maximale vermogen gebruikt wordt. De gedachte hierachter is dat het oncontroleerbaar is om een limiet te stellen op het te gebruiken vermogen.

Als een duwboot achteruit vaart komt de schroefstraal wel onder de duwbakken. De maximale snelheid aan de bodem ligt op een afstand van 5.6 m maal de kielspeling. Bij een duwboot in het Amsterdam Rijnkanaal is de kielspeling 4.2 m, en is de maximale snelheid bereikt

op ca 20 m vanaf de schroef. Aangezien de lengte van een duwboot iets meer als 20 m is, is de verwachting dat het effect van de dieper stekende bak niet zodanig is dat de erosie hierdoor zal toenemen.

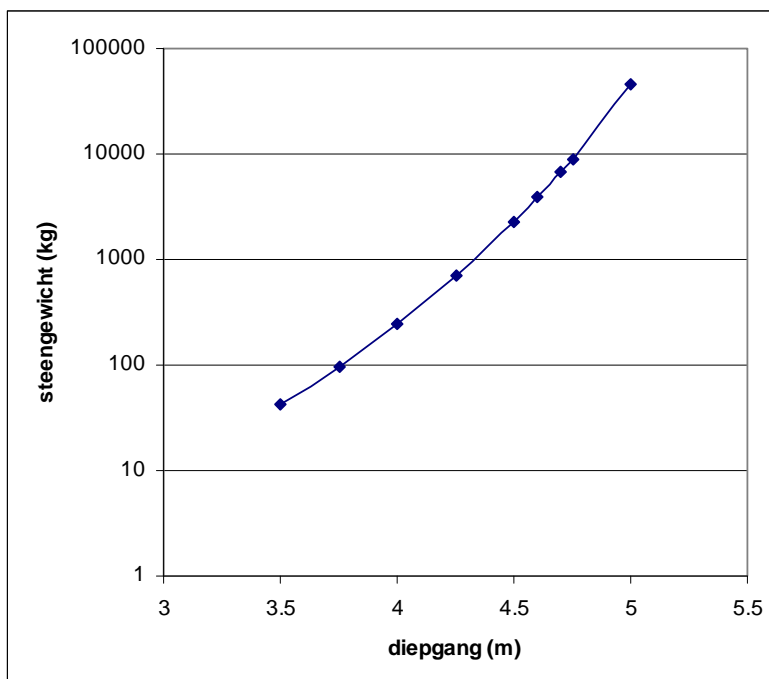
Een berekening voor een aantal bestaande schepen leidt tot kleine steengewichten; dit komt hoofdzakelijk omdat de diepgang van deze schepen heel klein is.

		breedte (m)	diepgang (m)	Motorvermogen (kW)		benodigd steengewicht in Amst.Rijnkanaal (W50, kg)	
				hoofdschroef	boegschroef	hoofdschroef	boegschroef
Jowi	containerschip	16.9	3.2	1998 (3)		2	25
Innovation 4	tankschip	11.38	3.2	2900 (2)		4	6
Dordrecht 40	tankschip	11.38	4.01	1804 (2)		13	102
Sterrenburg	containerschip	11.3	3	2030 (2)		1	1
Apollo	-	17.5	4.2	2236 (2)	552	55	903 (4476)
Aquapolis	containerschip	17.35	3.4	2500 (2)	853	5	50 (938)
Allegro	containerschip	11.45	3.69	1434 (2)	300	12	32 (90)
Cortina	containerschip	11.45	3.43	1566 (2)	389 (2)	5	13 (81)
Veerhaven VII	duwboot	15	1.94	3960 (3)		1	1

Bovenstaande berekening is ter illustratie uitgevoerd. De conclusie uit het bovenstaande is dat de invoeren van de theoretisch maximale schepen leidt tot hele zware bestortingen, terwijl het gebruik van grote, maar reële schepen leidt tot veel kleinere stenen.

Bij enkele schepen van 2007 is ook het werkelijk boegschroefvermogen bekend; in de berekening is zowel het met de formule uit [1] berekende boegschroefvermogen als het werkelijk boegschroefvermogen gebruikt voor de bepaling van het steengewicht. De getallen tussen haakjes zijn gebaseerd op het werkelijk vermogen.

Overigens zijn er nogal wat schepen met dubbele boegschroeven. In bovenstaande berekening is uitgaande van het effect van één boegschroef; de aanname is dus dat de beide boegschroefstralen elkaar aan de bodem niet beïnvloeden. Dit is een optimistische aanname.



De oorzaak hiervan is onder andere te vinden in het feit dat het steengewicht erg gevoelig is voor de kielspeling. In bijstaande grafiek is het benodigde steengewicht gegeven als functie van de diepgang van het schip (gebruikt zijn de waarden van een motorschip in het Amsterdam Rijnkanaal, de berekende waarden zijn voor de boegschroef). Let wel, het steengewicht staat op een logaritmische as.

Er kan ook een probabilistische berekening gemaakt worden. Hierbij wordt het

zelfde rekenmodel gebruikt, maar worden niet de maximale waarden voor de diverse parameters ingevoerd, maar hun gemiddelde en standaardafwijking.

			gemiddelde	standaard afwijking	eenheid
Schip	diepgang schip	d	3.1	0.47	m
	breedte schip	bs	10.09	0.47	m
	aantal schroeven	n	3	-	-
	Vermogen schip	Pd	1145	434	kW
	Schroefdiameter	Dp	1.4	0.15	m
	met of zonder staalbuis (1.0/0.71)		0.9	.05	-
vaarweg	bodemligging t.o.v NAP	h	5.5	0.1	-
	kanaalpeil t.o.v. NAP		-0.60	0.02	
	turbulentie intensiteit	r	35%	1%	
	relatieve steendichtheid	delta	1.65	0.02	-
materiaal	relatieve dichtheid van de steen	rho	1650	20	kg/m ³
	Mediaan steengewicht bestorting	W50	750	80	kg
constanten	ashoogte hoofdschroef	α_1	0.5	0.05	
	ashoogte boegschroef	α_2	0.6	0.04	
	relatie u0 -motorvermogen	c3	1.15	0.03	
	relatie ub en u0	c4	0.3	0.01	
	relatie breedte-vermogen boegschroef	c5	18.5	2	kW/m

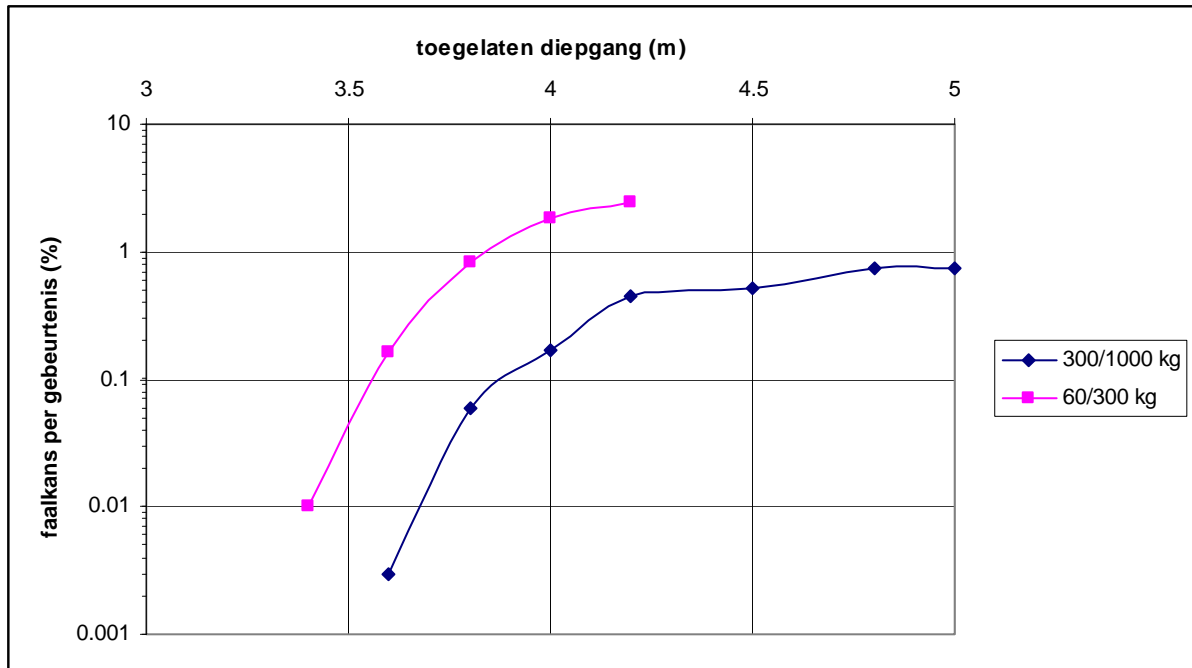
In de berekening worden verschillende mediane gewichten gebruikt, bijv. het mediane steengewicht van 300/1000 kg is 750 kg, met een standaardafwijking van 80 kg. Het mediane steengewicht van 60/300 is 155 kg met een standaardafwijking van 15 kg. Deze waarden zijn conform EN13383.

In de probabilistische berekening is uitgegaan van schepen met een gemiddelde diepgang van 3.1 m, met een standaardafwijking van 0.47 m. Dit volgt uit een analyse van de scheepsafmetingen van de Nederlandse vloot. Ten aanzien van de diepgang is aangenomen dat de diepgang nooit negatief kan worden en dat de diepgang ook nooit meer kan zijn dan de maximaal toelaatbare diepgang (3.5 m voor het Lekkanaal en 4.0 m voor het Amsterdam Rijnkanaal).

Een berekening met de bovenstaande waarden (dus met een 60/300 steen) leidt tot een faalkans van de bodembescherming van 1.82%. Dit is vrij hoog, het betekent dat bij 1.82% van de afmeeroperaties er meer of minder beweging van de bestorting plaats vindt. Als er een zwaardere steensortering gebruikt wordt (300/1000 kg) is deze kans nog steeds 0.6%.

Als we er vanuit gaan dat er dagelijks één schip aanlegt aan een afmeerplaats, en de levensduur van de afmeerplaats is 20 jaar, dan zijn dat dus ongeveer 7500 afmeeroperaties. Als er dus 0.6% kans op schade is, dan zijn dat dus nog altijd 45 gevallen van schade (en dus van onderhoud). Dit is dus geen onderhoudsvrije constructie te noemen. Een schadekans in der orde van 0.05 % (minder dan 5 schadegevallen, dus minder dan 5x onderhoud gedurende de levensduur van de constructie) zou men “onderhoudsvrij” mogen noemen.

Een dergelijke probabilistische berekening is te maken voor verschillende toegelaten diepgangen. Dit leidt tot de volgende figuur voor schade door de hoofdschroef.

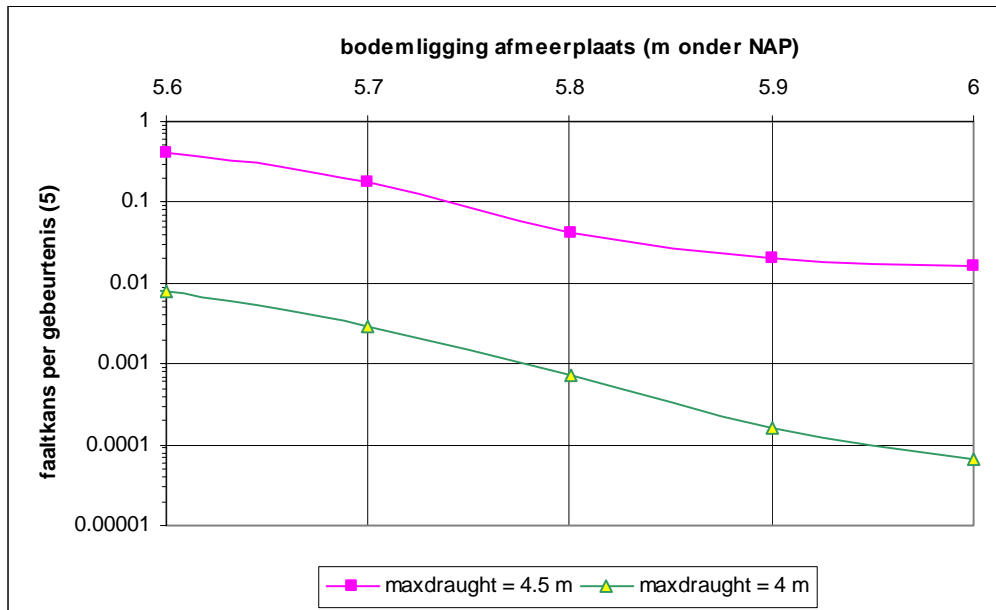


Hieruit volgt dus dat voor “onderhoudsvrij” en een combinatie van steen 60/300 de maximaal toelaatbare diepgang op het kanaal 3.5 m is, terwijl als 300/1000 gebruikt wordt, de maximaal toelaatbare diepgang 3.8 m is.

Het gebruiken van zeer grote steen is niet aantrekkelijk. Er zijn twee alternatieven mogelijk:

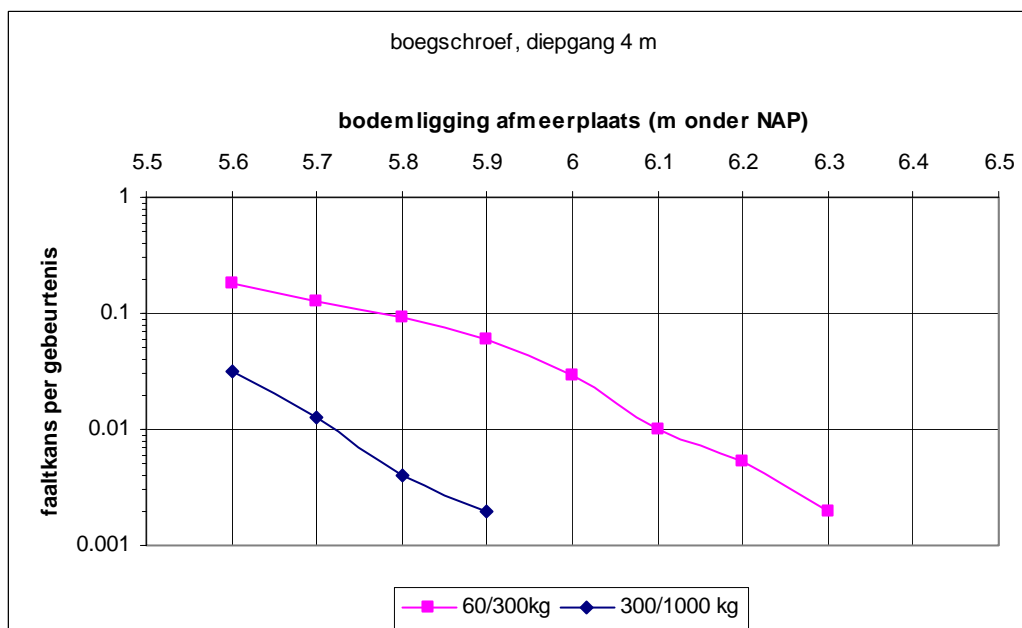
- het aanbrengen van een bodembescherming van samenhangend materiaal (dus matconstructies of andere vormen van verkitting van het bodemmateriaal);
- het verdiepen van de ligplaats.

Deze laatste optie is wellicht aantrekkelijk. In het voorafgaande is steeds gerekend met een bodemdiepte van 5.5 m. Echter, bij een diepte van 5.8 m en een toegelaten diepgang van de schepen 4.0 m, dan is de faalkans bij gebruik van stenen 60/300 maar 0.07%, en bij 5.9 m loopt de faalkans terug tot 0.02 %.

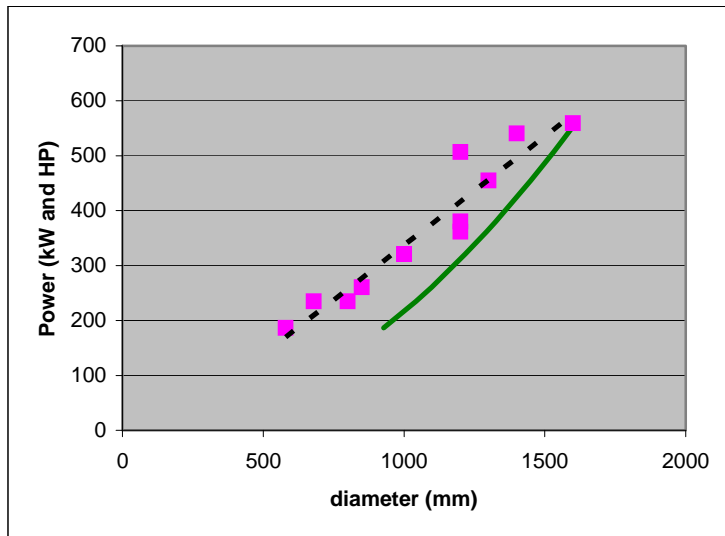


Het kan dus voor een aannemer/ontwerper economischer zijn om een wat kleinere steen en een wat grotere aanlegdiepte te kiezen.

Een vergelijkbare analyse is mogelijk voor de boegschroef. Die leidt tot zwaardere stenen, maar het beeld is hetzelfde:



In bovenstaande grafiek is de kans aangegeven als fractie, niet als percentage. Om de kans in procenten te hebben, moeten de getallen langs de verticale as met 100 vermenigvuldigd worden. De kans op falen door gebruik van boegschroeven is dus maatgevend. Een van de belangrijkste redenen dat in de probabilistische berekening de faalkansen zo groot worden komt door de grote standaardafwijking die aangenomen is bij de constante 18.5 uit formule 16.17a. Een grote standaardafwijking is aangenomen omdat de betrouwbaarheid van deze formule laag is. Nader onderzoek zou dit kunnen verbeteren, maar dit wordt niet aanbevolen. Het is beter om trachten te komen tot een betere relatie voor het bepalen van de gebruikte boegschroefvermogens in binnenvaartschepen.



Een voorbeeld van de onbetrouwbaarheid van de relaties 16.17 is te zien in nevenstaande grafiek. Hierin is het vermogen van de schroef uitgezet als functie van de diameter. De getrokken lijn is relatie 16.17b, de punten zijn op dit moment op de markt beschikbare boegschroeven voor binnenvaartschepen. De gestippelde lijn is de (lineaire) regressielijn door deze punten.

Aangezien alle binnenvaartschepen ongeveer de maximale breedte krijgen die voor hun

klasse mogelijk is, is een relatie tussen de scheepsbreedte en het geïnstalleerd vermogen van de boegschroef ook niet zo'n goede relatie meer.

Conclusies

De conclusies bij de berekeningen tot nu toe is dat bij realistische combinaties diepgang, vermogen en scheepsbreedte er geen bijzonder grote stenen nodig zijn voor de hoofdschroef. De boegschroefbelasting maakt grote stenen nodig (steenklasse LMA60/300, deze stenen zijn groot, maar nog wel te verwerken als bodembescherming). Echter, als de maximaal mogelijke waarden ingevuld worden (dus maximaal mogelijke diepgang, maximaal voorkomend motorvermogen, ongunstig aantal schroeven, etc.) dat dan in sommige gevallen kan leiden tot exorbitante steengewichten. Zie bovenstaand voorbeeld van het motorschip in het Lekkanaal. Hierbij is een diepgang van 4.0 aangenomen (de Dordrecht 40). Als een dieper stekend schip genomen wordt (maximale diepgang 4.5 m), dan worden de benodigde steengewichten exorbitant (steenklassen van 1/3 ton en zwaarder).

Aangenomen is dat de formules voor de bepaling van de hydraulische belasting en de steenstabiliteit correct zijn. Deze formules zijn expliciet gegeven in de bindende documenten, en het is daarom niet verstandig om ze ter discussie te stellen. De gegeven relatie tussen maat en vermogen van de boegschroef en de scheepsbreedte is wel een redelijk onnauwkeurige; hier moet in de verdere discussie wel rekening mee gehouden worden. Onduidelijk is echter de precieze maat van de te gebruiken ontwerpschepen. Bij een bepaalde vaarwegklasse horen maximale scheepsafmetingen, maar er is geen één-op-één relatie tussen de maximaal toelaatbare maat, het motorvermogen en de hoogte van de schroefas vanaf de bodem.

Ter voorkoming van exorbitant grote stenen kan het wellicht effectief zijn om de aanlegdiepte van de afmeerplaatsen een paar decimeter groter te maken of een bodembescherming te maken van samenhangend materiaal. Hierbij komen dan natuurlijk wel de problemen van zanddichtheid, waterdoorlatendheid en flexibiliteit naar voren.

In samenvatting kan gesteld worden dat bij een deterministische berekening uitgaande van de bodembescherming met inachtneming van de bindende documenten gebruikt gemaakt kan worden de maximale afmetingen die door de CEMT classificatie wordt gegeven, met daarbij

een goede schatting van het hoofdmotorvermogen. Voor het boegschroefvermogen is in de bindende documenten een relatie voorgeschreven.

Echter, de bindende documenten geven geen berekeningsmethode op basis waarvan aangetoond kan worden dat de constructie voor 50 jaar onderhoudsvrij is. Dit zal daarom apart door de ontwerper beschouwd moeten worden.

Referenties

- [1] Ontwerp van Schutsluizen, deel 2 [2000], Bouwdienst Rijkswaterstaat, Utrecht
- [2] Richtlijnen vaarwegen 2005 [2006], Rijkswaterstaat AVV, Rotterdam
- [3] Classificatie en kenmerken van de Europese vloot en de actieve vloot in Nederland [2002] Rijkswaterstaat AVV, Rotterdam
- [4] Meyer, D.G., Verheij, H.J. [1993] Stroomsnelheden bij de oever veroorzaakt door boegschroeven, Waterloopkundig Laboratorium, rapport Q1657-1