

## INF14 Maatregelen ter reductie wateroverlast langs kanalen (Amsterdam-Rijnkanaal)

DP 3.1 Inventarisatie van kansrijke maatregelen



**INF14 Maatregelen ter reductie wateroverlast langs kanalen (Amsterdam-Rijnkanaal)**  
DP 3.1 Inventarisatie van kansrijke maatregelen

**Auteur(s)**  
Alex Capel

## INF14 Maatregelen ter reductie wateroverlast langs kanalen (Amsterdam-Rijnkanaal)

### DP 3.1 Inventarisatie van kansrijke maatregelen

<b>Opdrachtgever</b>	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
<b>Contactpersoon</b>	SITO-PS Ien W
<b>Projectreferenties</b>	INF14 Maatregelen ter reductie wateroverlast langs kanalen
<b>Trefwoorden</b>	Kanaalbodem, kanaalmaatregelen, Bodemschuifspanning, Erosie

#### Documentgegevens

<b>Versie</b>	1.0
<b>Datum</b>	09-10-2025
<b>Projectnummer</b>	11210303-028
<b>Document ID</b>	11210303-028-GEO-0002
<b>Pagina's</b>	22
<b>Classificatie</b>	
<b>Status</b>	Definitief

#### Auteur(s)

	Alex Capel	

# Samenvatting

In Deelproject 3.1 “Inventarisatie van kansrijke maatregelen” binnen het SITO-PS onderzoek “Maatregelen ter reductie wateroverlast langs kanalen (ARK)” waarbij het Amsterdam Rijn Kanaal tussen Breukelen en Nigtevegt als case wordt gebruikt, is gekeken naar mogelijke kanaalgebonden maatregelen om erosie van de kanaalbodem te reduceren en de weerstand te vergroten. Het mogelijkere toepassen van een maatregel is afhankelijk van de grootte van de belasting in verhouding met de sterkte van de maatregel. Er is daarom onderzocht hoe de bodemschuifspanning kan worden bepaald op basis van de berekende stroomsnelheden en hoe dit zich dan verhoudt bij bijvoorbeeld een bestorting op een bentonietmat.

Mogelijke kanaalgebonden maatregelen:

1. Zand-Bentoniet mengsel:
  - a. Onderzoek naar mengselsamenstelling, zie ook Chen et al (2021).
  - b. Of alternatieven zoals zand inregen na opbrengen klei, of stortsteen toevoegen als harnas.
  - c. Of alternatief zoals LAPAM (flocculatie).
2. Bentonietmatten
  - a. Ook drijvend (in den natte) aan te brengen met zinkstukken en bestorting.
3. Vaste Klei.
4. Passief Herstel met Scheepvaart beperkingen.
5. Slib vasthoudende zinkstukken.
6. SIBELONMAT®.
7. Gel Barrier.
8. Bodemverbeteringen.
  - a. Bentonietklei injecten/inwoelen/intrekken.

Ontwerpgrafieken zijn bepaald voor de bodemschuifspanning als gevolg van retourstroming langs de boeg (1), midden van het schip (2) en hek van het schip (3) voor twee scheepstypen, namelijk M8 en M12. Voor 2 scenario's: scenario 1: “ $0,85 V_{L,Schip}$ ” en scenario 2: “ $V_{s,med,AIS}$  met excentriciteit” wordt de bodemschuifspanning en de daarvan afgeleide steenbestortingsmaat  $D_{50}$  voor de 3 delen van het schip bekeken.

De berekeningen ten aanzien van de bodemschuifspanning als gevolg van varende schepen laten zien dat deze schuifspanningen aan de bodem aanzienlijk zijn en dat, wanneer er als maatregel een bentonietmat met een bestorting zou worden gekozen, een lichte gradering als 10-60 kg of 5-40 kg niet voldoet.

In de berekeningen zitten een aantal aannames die onder andere afkomstig zijn uit metingen met een duwbak konvooi, waarbij een dubbele schroefpropeller is gebruikt. Hoewel er in dit onderzoek een inschatting is gedaan om hiervoor te corrigeren, is er rond deze inschatting vrij veel onzekerheid. Er is ook nog uitsluitel of bij het ontwerp moet worden uitgegaan van de gemeten piek of dat er wellicht bij varende schepen er een zekere traagheid in het systeem zit, waardoor je met een lagere waarde zou mogen werken. Zowel de spreiding in tijd als in ruimte kan een significante reductie opleveren, waardoor je een meer representatieve schuifspanning zou kunnen krijgen, waardoor lichtere graderingen dan stabiel zouden kunnen zijn.

Verder is er nog onduidelijkheid over hoe om te gaan met de combinatie van retourstroming en propellerstroming en eventueel het kielzog. In de literatuur zijn methoden beschikbaar om propeller stroming met algemene omgevingsstroming te combineren, maar deze gaan nog

niet in over de het omgaan met retourstroming. In de nu beschreven berekeningsmethodiek is hiervoor een vertaling gemaakt die aansluit op de gemeten resultaten van het onderzoek van de duwbak konvooi.

### **Vervolgonderzoek**

Met betrekking tot ZandBentonietMengsel is onderzoek nodig naar de effectiviteit van de variaties die hierin mogelijk zijn, het gaat dan om mengselsamenstelling, materiaal alternatieven, alternatieve aanbrenghmethode. Kennisvragen rondom erosiebestendigheid en benodigde samenstelling kunnen als eerste opgepakt worden.

Voor de overige methoden met matten en bestorting liggen de kennisvragen rondom het vaststellen van bodemschuifspanning als gevolg van een propeller met omgevingsstroming. De eerste stap is op basis van de bestaande literatuur een rekenmodel te ontwikkelen worden. Hier zal naar alle waarschijnlijkheid een kalibratiefactor in komen welke als eerste geschat zal worden maar alleen via fysieke modeltesten binnen een bepaalde marge bepaald kan worden.

Een vervolgstap is het opzetten van een fysiek model , waarbij een M8 en M12 schip met verschillende beladinggraad gebruikt wordt en waar dan het stromingsprofiel langs het schip, de bodemschuifspanning en turbulentiëfactoren voor bepaald kunnen worden waarmee het rekenmodel mee aangescherpt kan worden. Door deze modelproeven breed op te zetten kan veel data genereerd worden, waarmee inzicht in het gehele fysische proces wordt verkregen, waardoor ook een doorvertaling naar andere locaties in Nederland makkelijker wordt.

# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
	<b>Inhoud</b>	<b>6</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>7</b>
1.1	Aanleiding	7
1.2	Doel	7
<b>2</b>	<b>Kanaalgebonden Maatregelen</b>	<b>8</b>
2.1	Overzicht	8
2.2	Verdieping	10
2.2.1	Bodemschuifspanning als gevolg van varende schepen	10
2.2.2	Toetsing coëfficiënten	14
2.2.3	Inschatting bodemschuifspanning en benodigde D <sub>50</sub> steenbestorting	15
2.3	Erosiekuilen	17
<b>3</b>	<b>Conclusies</b>	<b>19</b>
<b>4</b>	<b>Referenties</b>	<b>21</b>

# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding

Deltares voert binnen het thema infrastructuur o.a. onderzoeken uit die oplossingen moeten aandragen voor vraagstukken die optreden bij nieuwe infrastructuur en/of instandhouding van reeds bestaande infrastructuur, meer specifiek kanalen. Verbredingen en/of verdiepingen van kanalen zoals die in het verleden zijn uitgevoerd om meer scheepvaart en schepen van zwaardere klasse toe te staan, zijn in de toekomst niet zondermeer mogelijk. De beperkte beschikbare ruimte langs kanalen en de invloed die verbreding en verdieping op de omgeving hebben, kan een bezwaar of belemmering inhouden. De invloed op de omgeving kan door aanpassing van kanalen toenemen, o.a. in de vorm van wateroverlast, bijvoorbeeld als het kanaal hoger ligt dan de omgeving. Het is voor kanaalbeheerder noodzakelijk inzicht te hebben in de mogelijke maatregelen ter verbetering van de kanalen (met reductie van wateroverlast) en de consequenties daarvan om onderbouwde keuzes te kunnen maken. Dit staat centraal in het SITO-PS onderzoek "Maatregelen ter reductie wateroverlast langs kanalen (ARK)" waarbij het Amsterdam Rijn Kanaal tussen Breukelen en Nigtevegt als case wordt gebruikt.

Deze rapportage is een product binnen Deelproject 3.1 Inventarisatie van kansrijke maatregelen.

## 1.2 Doel

Dit rapport is het resultaat van de in 2024 uitgevoerde studie en geeft een eerste aanzet naar mogelijke kansrijke maatregelen en hoe je modelmatig via bodemschuifspanning maatregelen zou kunnen beoordelen.

## 2 Kanaalgebonden Maatregelen

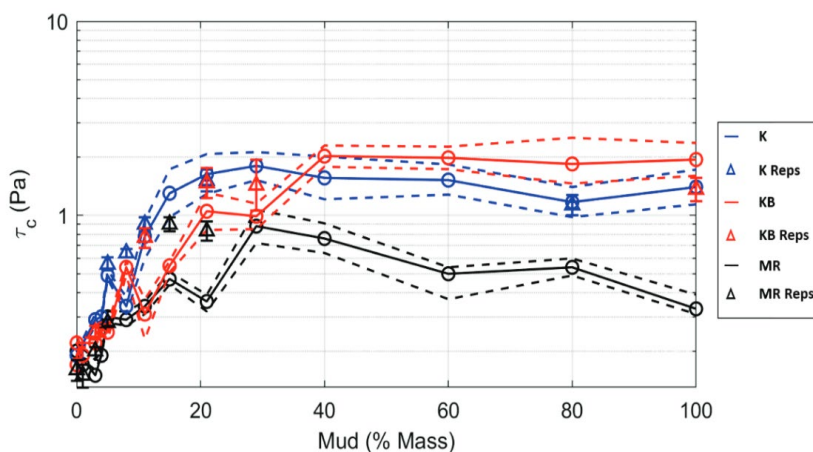
### 2.1 Overzicht

In TAUW, 2024 zijn eerder 5 mogelijke kanaalmaatregelen geschetst. Deze kanaalmaatregelen betreffen het toepassen van:

1. Zand-Bentoniet mengsel.
2. Bentonietmatten.
3. Vaste Klei.
4. Passief Herstel met Scheepvaart beperkingen.
5. Slib vasthoudende zinkstukken.

Naast deze genoemde 5 maatregelen is gekeken welke maatregelen er internationaal getroffen zijn. Voor de eerste 2 opties is gebleken dat er varianten hierop mogelijk zijn.

Bij Optie 1, zou onderzocht kunnen worden of andere verhoudingen van mengsel, of het veranderen van de samenstelling tot grotere belastbaarheid kan leiden. Zo wordt in Perkey (2020) aangegeven dat het toevoegen van kleine hoeveelheden silt aan zand, de erosiesnelheid met een factor 10 tot soms 100 wordt verkleind.



Figuur 2.1 Kritieke schuifspanning versus % silt van o.a. Kalonite en Kalonite/Bentonite mengsels (Perkey et al, 2020).

Met behulp van bijvoorbeeld het onderzoek van Chen et al (2021), kan een inschatting van de kritieke schuifspanning in relatie tot erosie van verschillende zand-silt mengsels gemaakt worden.

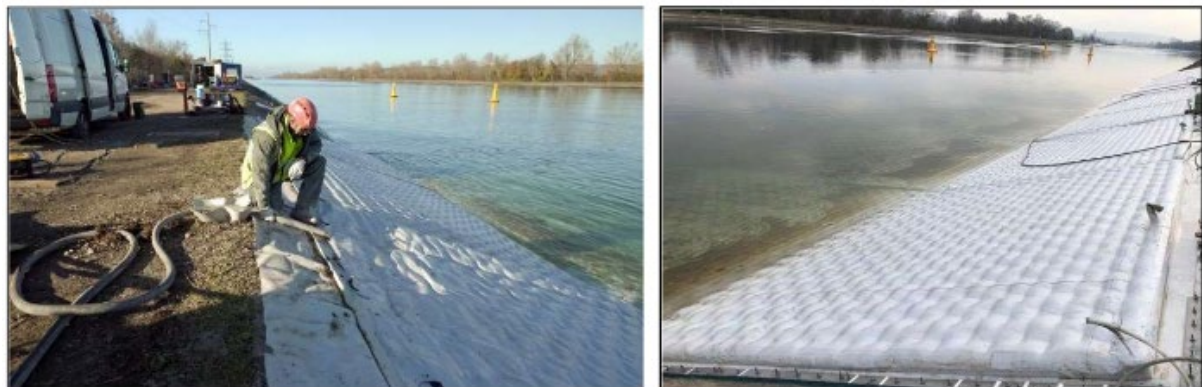
Daarnaast kan ook gekeken worden of bentoniet in de zandige ondergrond geïnjecteerd kan worden. Daarmee kan wellicht voldoende weerstand worden gecreëerd in de ondergrond, zonder dat het bentoniet door scheepsgelateerde belasting geërodeerd wordt. In het onderzoek van Foortse (2016) is bijvoorbeeld aangetoond dat wanneer zandmengsel voor 5-6% uit bentoniet bestaat, dat de doorlatendheid met een factor 50 teruggebracht wordt, wat tevens een voordeel heeft op de erosiesnelheid van het mengsel.

Bij Optie 2, het toepassen van bentonietmatten, was uitgegaan dat het kanaal droog zou moeten staan. Hoewel deze optie voorkomt, is er ook ervaring opgedaan in België met het afzinken van bentonietmatten, zie Figuur 2.2.



Figuur 2.2 Plaatsen van bentonietmatten bij Pelt in België (bron: Van Aalsburg).

Een andere nieuwe optie is recent toegepast in een kanaal bij Kemps in Frankrijk. Hier is de SIBELONMAT® toegepast, een product van CarpiTech. Dit is een geomembraan die gegroot wordt en dan over de bodem uitrolt als een soort self-inflating matras.



Figuur 2.3 Toepassing van de SIBELONMAT® bij Kemps in Frankrijk (bron: Vaschetti, 2024).

Nog een andere nieuwe optie welke in Duitsland is toegepast, was de installatie van een membraan. De methode is wel alleen toegepast in den droge. Deze membranen zijn met ankers in de bodem gefixeerd en zowel een stugger HDPE membraan als een flexibele PVC membraan kunnen worden toegepast. De keuze ligt aan de afmetingen van het kanaal en de benodigde ankerkracht.

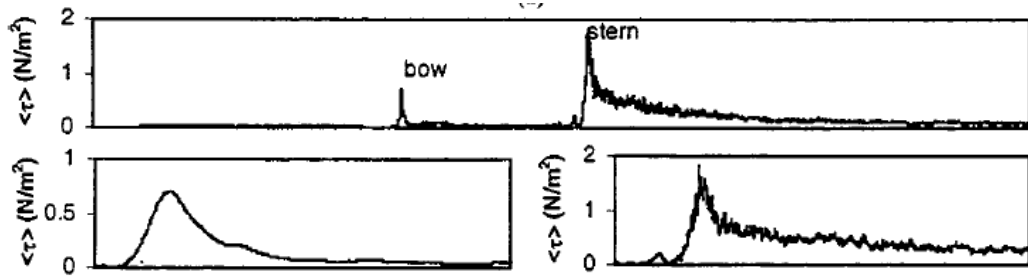
Een derde nieuwe optie is het toepassen van gel barrières. Een product zoals Xanthaan Gum, Kaumera of Carboxymethyl cellulose CMC, zorgt voor een gelachtig product. Veel van deze producten zijn biologisch afbreekbaar, maar wanneer door toevoegingen de duur van de afbreekbaarheid kan worden beïnvloed, zou het een mogelijke oplossing kunnen zijn. In Bampatzeliou (2022) is hier onderzoek naar gedaan in relatie tot sedimentatieproblemen in de Rotterdamse haven. Sommige gel mengsel waren stabiel onder hoge schuifspanningswaarden, zie Figuur 2.4.



draaiende propeller ook een toename van de stroomsnelheid op de retourstroom aanwezig is geweest.

Wanneer de verhouding diepgang/waterdiepte in het onderzoek groter werd en daarmee de kielspeling (UKC) kleiner nam niet alleen voor beide locaties de bodemschuifspanning toe, maar werd het verschil in bodemschuifspanning ook groter tussen hek en boeg. Dit als gevolg van de steeds groter wordende bijdrage van de propeller naarmate de UKC kleiner werd.

Onderstaande figuur is afkomstig uit deze publicatie met de schuifspanningspieken bij de boeg en hek voor een situatie waarbij de verhouding diepgang/waterdiepte 0,59 was.



Figuur 2.5 Bodemschuifspanning van een duwbakcombinatie op modelschaal, met onder de ingezoomde delen boeg en hek (bron: Rodriguez et al, 2002).

Het model onderzoek was uitgevoerd op een modelschaal van 1:25. Verschillende ratio's tussen diepgang en waterdiepte, variërend van ongeveer 0,4 tot 0,8 alsmede relatieve vaarsnelheid (ten opzicht van stroomsnelheid) van 2 tot 3 m/s zijn in het onderzoek beschouwd.

In lijn met andere studies binnen het SITO project (Deltares, 2024) selecteren we de M8 en M12 als maatgevende scheepstypes, waarvan M12 het grootste type is. Tabel 2.1 geeft de karakteristieken weer van deze scheepstypes.

Tabel 2.1 Karakteristieken van scheepstypen M8 en M12 (Richtlijnen Vaarwegen, 2020).

	M8	M12
Lengte (m)	110	135
Breedte (m)	11,4	17
Diepgang geladen schip (m)	3,5	4,0
Diepgang ongeladen schip (m)	1,8	2,0
Max. vermogen (kW)	1700	2800
Diameter propeller (m)	2,0	2,3

Wanneer we de kentallen van het duwvaart onderzoek vergelijken met het M8 en M12 schip, dan komt de ratio tussen diepgang en waterdiepte overeen met deze range, ongeveer 0,6. Als we kijken naar de relatieve vaarsnelheid dan varen de twee schepen in het ARK 2x zo hard als de duwbakcombinatie. Wel wordt in het duwvaart onderzoek gebruik gemaakt van een dubbele propeller.

Op basis van de analyse van de retourstroming van M8 en M12 schepen (Deltares, 2024), kun je een maximale retoursnelheid verwachten van ongeveer de helft van de vaarsnelheid bij de relatieve diepte verhouding van ongeveer 0,6. Als we dit ook toepassen op de duwbakcombinatie uit het modelonderzoek dan zou de maximale retourstroming hier vertaald in prototypeschaal 1 à 1,5 m/s geweest kunnen zijn.

Met behulp van de formule van Pilarczyk en de definitie voor schuifspanningssnelheid kunnen we een verband vinden tussen de stroomsnelheid (diepte-gemiddeld) en de bodemschuifspanning waarbij we kiezen voor het stadium “begin van bewegen” ( $\psi_{cr}=0,035$ ).

$$\Delta \cdot D_{n50} = \frac{0.035 \cdot \phi_{sc} \cdot K_T \cdot k_h \cdot U_0^2}{\psi_{cr} \cdot K_{sl} \cdot 2 \cdot g}$$

$$\tau_b = u_*^2 \cdot \rho_w \rightarrow \Delta \cdot g \cdot D_{n50} \cdot \psi \cdot \rho_w$$

Voor  $\psi = \psi_{cr}$  en  $\phi_{sc} = 0.75$  (geen randeffecten) en  $\rho_w = 1000 \cdot \frac{kg}{m^3}$  en  $K_{sl} = 1$  (hellingsfactor)

wordt de volgende relatie tussen de bodemschuifspanning en de dieptegemiddelde stroomsnelheid  $U_0$  verkregen waarbij de turbulentiefactor  $K_T$  en stromingsprofiel factor  $k_h$  input variabelen zijn:

$$\tau_b = 13.125 \cdot \frac{kg}{m^3} \cdot K_T \cdot k_h \cdot U_0^2$$

We moeten dus 2 parameters inschatten om de bodemschuifspanning te berekenen. De eerste parameter  $K_T$  is afhankelijk van de relatieve turbulentie coëfficiënt  $r_0$ . Deze coëfficiënt zit als volgt in de  $K_T$ -waarde:

$$K_T = \left( \frac{1 + 3 \cdot r_0}{1.3} \right)^2$$

Voor de boeg nemen we aan dat de relatieve turbulentie coëfficiënt  $r_0$  gelijk is aan 0,2 en daarmee de  $K_T$ -waarde gelijk is aan 1,515. Voor het hek waar ook het effect van de schroefstraal aanwezig is, stellen we  $r_0$  gelijk aan 0,4 waarmee de  $K_T$ -waarde 2,864 wordt. Met behulp van de  $k_h$  waarde wordt een vertaalslag gemaakt van de dieptegemiddelde stroomsnelheid naar de snelheid aan de bodem.  $U_b = \sqrt{k_h} \cdot U_0 \rightarrow U_b^2 = k_h \cdot U_0^2$ .

Als gevolg van de versnelling die plaats vindt vanaf de boeg zal er weinig spreiding zijn en kun je verwachten dat de retourstroomsnelheid niet veel kleiner is bij de bodem dan het gemiddelde. We schatten dat  $k_{h-boeg}=0,75$ , dus  $\sqrt{k_{h-boeg}}=0,87$ , zie ook locatie 1 in Figuur 2.6. De Chézy coëfficiënt kan voor dit deel afgeleid worden vanuit de relatie:

$$\frac{u_*^2}{K_T \cdot U_0^2} = \frac{g}{C^2} \rightarrow C = \sqrt{\frac{g \cdot \rho_w}{13.125 \cdot \frac{kg}{m^3} \cdot k_h}}$$

en is daarmee hier voor locatie 1 gelijk aan 31,6  $\sqrt{m/s}$ .

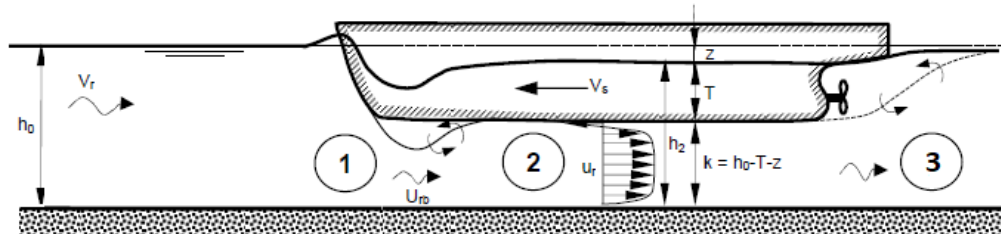
Door de grenslaag ontwikkeling, aan zowel de onderkant van de huid van het schip als aan de bodem, zal de bodemsnelheid afnemen, waarbij de bodemsnelheid wordt geschat op 40% van  $U_0$  wat overeenkomt met een  $k_{h-midschip}$ -waarde van 0,16 (zie locatie 2 in Figuur 2.6). De Chézy coëfficiënt voor dit deel is dan gelijk aan 68,3  $\sqrt{m/s}$ .

Bij het hek van het schip wordt het nogal complex. In Rodriguez et al, 2002 is geconcludeerd dat de hoogste schuifspanning plaats vindt direct onder de propeller. De retourstroom kan hier niet naar boven toe en wordt door de straal naar onder gestuwd, zolang de snelheid van de propeller wash hoger is dan de retourstroming. Er vindt echter wel impulsoverdracht plaats tussen de 2 stromen, welke door de rotatie van de propeller wash wordt versterkt. De snelheid van de propeller is in de as bepaald in (Deltares, 2024). Samen met het kielzog van

het schip levert dat gemiddeld genomen een kleinere stroming op dan direct vanuit de retourstroming berekend is.

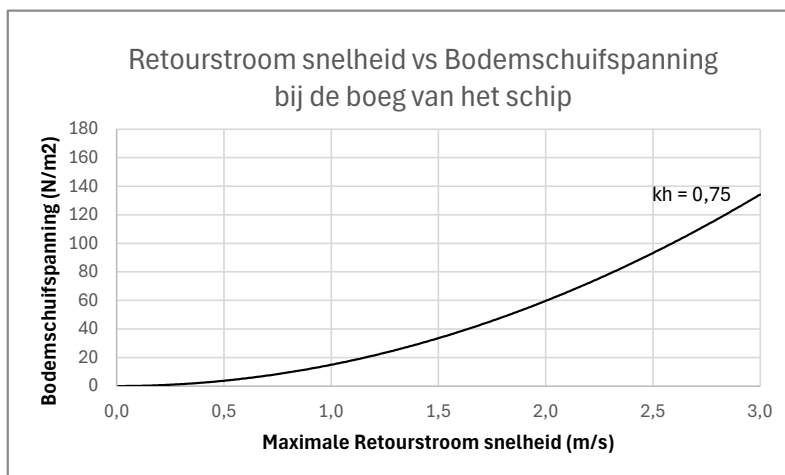
De snelheid aan de bodem zal nogal kunnen variëren door de interactie van al deze componenten en is in de as van de propeller het grootst. De inschatting is dat de bodemsnelheid ter plaatse van de propeller as nog minimaal 70% van dieptegemiddelde stroming zal zijn ( $k_h > 0,5$ ), maar dat deze kleiner is dan bij de boeg  $k_h < 0,75$ , dus  $0,5 < k_{h-hek} < 0,75$ , locatie 3 in onderstaande figuur.

De Chézy coëfficiënt voor dit deel is dan afhankelijk van  $k_h$  en ligt dus tussen  $38,7 \sqrt{m/s}$  ( $k_h = 0,5$ ) en  $31,6 \sqrt{m/s}$  ( $k_h = 0,75$ ).



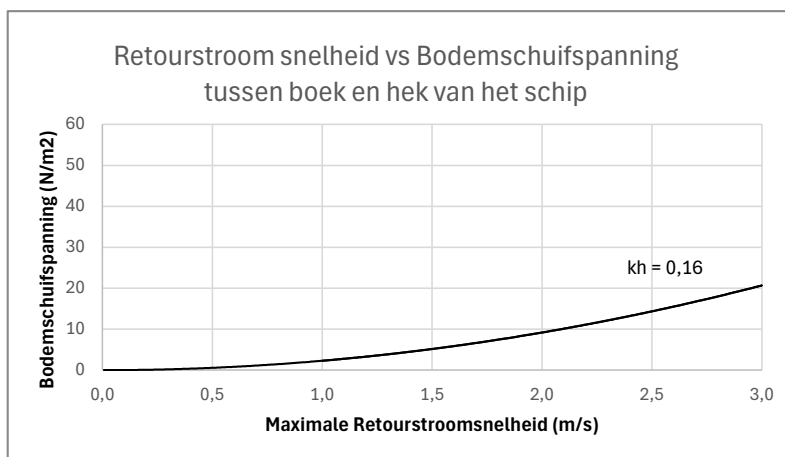
Figuur 2.6 Schematisering en definitie stromingscomponenten (1=boeg, 2=middenschip, 3=hek).

Samengevat geldt dat rond de boeg, zie locatie 1 in Figuur 2.6, je een versnelling krijgt van het water met loslaatpunten waar zich neren zullen gaan vormen. De retourstroom ontwikkelt zich hier. Figuur 2.7 geeft voor deze locatie de berekende bodemschuifspanning als functie van de maximale retourstroomsnelheid waarbij een  $k_h$  factor van 0,75 is toegepast.



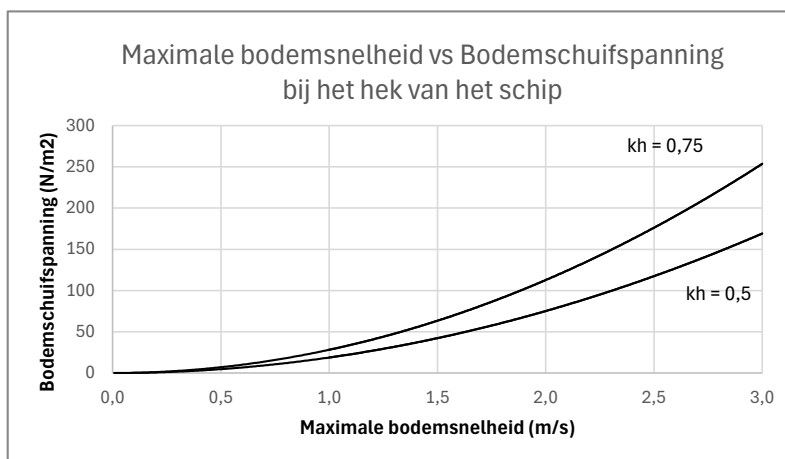
Figuur 2.7 Berekende bodemschuifspanning op locatie 1 o.b.v. maximale retourstroming.

Bij locatie 2 in Figuur 2.6 heeft zich al een grenslaag ontwikkeld, zowel aan de onderkant van het schip als op de bodem. Hier zal een lagere  $k_h$  factor aanwezig zijn. Figuur 2.8 geeft voor deze locatie de berekende bodemschuifspanning als functie van de maximale retourstroomsnelheid weer.



Figuur 2.8 Berekende bodemschuifspanning op locatie 2 o.b.v. maximale retourstroming.

Bij locatie 3 introduceert de schroef veel turbulentie aan de retourstroming. Ook zal hier invloed zijn van het kielzog. In dit gebied zal de stroming aan de bodem door meerdere componenten beïnvloed worden, waarbij de bijdrage van elke component niet constant is in zowel lengte als breedterichting. Figuur 2.9 geeft hier de twee lijnen waartussen voor een verwachte bodemschuifspanning in horizontale richting de mogelijke bodemsnelheid zich bevindt.



Figuur 2.9 Berekende bodemschuifspanning op locatie 3 o.b.v. maximale retourstroming.

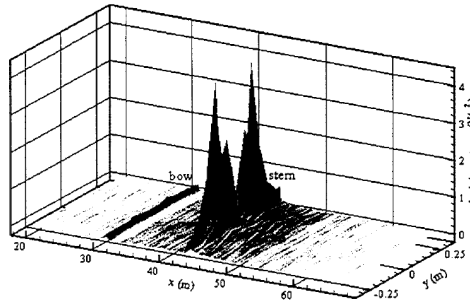
### 2.2.2 Toetsing coëfficiënten

De gemeten schuifspanningen in Rodriguez et al (2002) zijn op prototype schaal bij de boeg 17,5 N/m<sup>2</sup>, bij het hek 40 N/m<sup>2</sup> (bij gebruikmaking van een dubbele propeller) en mid-schip schatten we rond de 2 á 3 N/m<sup>2</sup>.

Wanneer we op basis van bovenstaande formules de retourstroming berekenen dan vinden we voor de boeg 1,08 m/s, voor mid-schip tussen 0,93 en 1,14 m/s en voor het hek 1,19 m/s bij  $k_h=0,75$  en 1,46 m/s bij  $k_h=0,5$ . Op basis van de verhouding vaarsnelheid en retourstroming zagen we eerder dat een retourstroming tussen 1 en 1,5 m/s aannemelijk is. De berekende waarden bij zowel de boeg als het mid-schip komen hier goed mee overeen. Dit geldt ook voor de snelheden bij het hek, maar zoals eerder aangegeven verwachten we dat de maximale bodemsnelheid een combinatie is van meerdere componenten. Op basis van impulsstheorie gaan we van het volgende uit  $U_{b-tot}^2 = U_{b-retour}^2 + U_{b-prop}^2$ .

We onderscheiden 2 situaties. In de eerste situatie corrigeren we de gemeten bodemschuifspanning niet voor het feit dat deze meting gemaakt is bij gebruikmaking van een dubbele propeller. De bijdrage van de propeller aan de bodem wordt in dat geval, gegeven  $k_h=0,75$ ,  $U_{b-prop} = 0,50$  m/s en in het geval van  $k_h=0,5$ ,  $U_{b-prop} = 0,98$  m/s.

Wanneer we wel corrigeren, moeten we een aanname maken voor het effect van de dubbele propeller. De enige informatiebron die we hebben is een 3D plaatje voor een situatie waarbij de waterdiepte-diepgang verhouding 0,77 was. We zien de 2 pieken duidelijk, maar ook de



overlap in het midden, waaruit geconcludeerd kan worden dat de hoogte van de piek beïnvloed is door de tweede propeller. De overlap is voor deze waterdiepte-diepgang verhouding nog niet heel groot, maar zal zeker toenemen bij een grotere diepgang.

Uit de literatuur is bekend dat de stroomsnelheid van een dubbele propeller in de “zone van ontwikkelde stroming”, dus op een zekere afstand uit de propeller,  $\sqrt{2}$  groter is. Vanuit de relatie

tussen stroomsnelheid en bodemschuifspanning kan dan dus afgeleid worden dat de

bodemschuifspanning maximaal 2x zo groot wordt,  $n = 2^{1/r}$  waarbij  $r=1$ . In de zone van stromingsontwikkeling is  $r$  groter dan 1. Een eerste schatting die we nu maken is dat  $r=4$  voor

de beschouwde casus uit Rodriguez (2002), daarmee verkrijgen we  $n = 2^{1/4} = 1.19$ , wat dan betekent dat we de gerapporteerde bodemschuifspanning met 19% verkleinen.

De bijdrage van de propeller aan de bodem wordt in dat geval, gegeven  $k_h=0,75$ ,  $U_{b-prop} = 0,14$  m/s en in het geval van  $k_h=0,5$ ,  $U_{b-prop} = 0,78$  m/s.

De eerdergenoemde snelheden zijn dus naar beneden bijgesteld, maar verschillen ook niet enorm. Vergelijkbare snelheden komen ook terug in Deltares (2024). Omdat er geen gegevens uit het modelonderzoek hierover zijn, gaan we ervan uit dat we in de berekening voor de bodemschuifspanning de snelheid aan de bodem mogen berekenen met:

$$U_{b-tot}^2 = 1.017 \cdot U_{b-retour}^2 \quad i.g.v. k_h = 0.75 \quad en \quad U_{b-tot}^2 = 1.525 \cdot U_{b-retour}^2 \quad i.g.v. k_h = 0.50$$

waarbij dus de bijdrage van de propeller is gerelateerd aan de retourstroomsnelheid.

### 2.2.3 Inschatting bodemschuifspanning en benodigde $D_{50}$ steenbestorting

Op basis van dit (enige) modelonderzoek is het mogelijk gebleken om een inschatting te maken van de bodemschuifspanning op basis van de retourstroming bij een duwbakcombinatie waarbij de verhouding diepgang/waterdiepte in de buurt van 0,6 ligt. Dit is ook de waarde die geldt voor de geladen schepen M8 en M12 op het Amsterdam Rijnkanaal. Zonder modelonderzoek dan wel metingen in het Amsterdam Rijnkanaal zijn geen betere inschattingen voor de betreffende coëfficiënten te verkrijgen.

Voor het dimensioneren van een eventuele bodembescherming in het ARK wordt dan ook aanbevolen om in eerste instantie gebruik te maken van de hier boven ingeschatte parameters.

Onderstaande twee tabellen geven voor beide type schepen een gemiddelde, minimum en maximum in zowel bodemschuifspanning als benodigde  $D_{50}$  voor de 3 locaties. De retourstroomsnelheden zijn overgenomen uit Deltares (2024), en geven 2 van de gepresenteerde scenario's weer, namelijk scenario 1 “0,85  $V_{LSchijf}$ ” en scenario 2 “ $V_{s,med,AIS}$  met excentriciteit”. Het laatste scenario is steeds de grootste van de twee.

Tabel 2.2 Bodemschuifspanning en minimum D<sub>50</sub> voor belastingen van M8 scheepstypen.

Retourstromingssnelheden	Minimum	Gemiddelde	Maximum
	Scenario 1/ Scenario 2	Scenario 1/ Scenario 2	Scenario 1/ Scenario 2
Retourstroomsnelheid M8 schepen (m/s)	1,9 / 2,1	2,0 / 2,4	2,1 / 2,6
Bodemschuifspanning locatie 1 (N/m <sup>2</sup> )	53,8 / 65,8	59,6 / 85,9	65,8 / 100,8
Bodemschuifspanning locatie 2 (N/m <sup>2</sup> )	8,3 / 10,1	9,2 / 13,2	10,1 / 15,5
Bodemschuifspanning locatie 3 (N/m <sup>2</sup> )	103,5 / 126,4	114,6 / 165,1	126,4 / 193,7
D <sub>50</sub> minimum locatie 1 (m)	0,11 / 0,14	0,13 / 0,18	0,14 / 0,21
D <sub>50</sub> minimum locatie 2 (m)	0,017 / 0,021	0,019 / 0,028	0,021 / 0,033
D <sub>50</sub> minimum locatie 3 (m)	0,22 / 0,27	0,24 / 0,35	0,27 / 0,41

Tabel 2.3 Bodemschuifspanning en minimum D<sub>50</sub> voor belastingen van M12 scheepstypen.

Retourstromingssnelheden	Minimum	Gemiddelde	Maximum
	Scenario 1/ Scenario 2	Scenario 1/ Scenario 2	Scenario 1/ Scenario 2
Retourstroomsnelheid M12 schepen (m/s)	2,2 / 2,5	2,4 / 2,7	2,6 / 3,0
Bodemschuifspanning locatie 1 (N/m <sup>2</sup> )	72,2 / 93,2	85,9 / 108,7	100,8 / 134,2
Bodemschuifspanning locatie 2 (N/m <sup>2</sup> )	11,1 / 14,4	13,2 / 16,8	15,5 / 20,7
Bodemschuifspanning locatie 3 (N/m <sup>2</sup> )	138,7 / 179,1	165,1 / 208,9	193,7 / 257,9
D <sub>50</sub> minimum locatie 1 (m)	0,15 / 0,20	0,18 / 0,23	0,21 / 0,28
D <sub>50</sub> minimum locatie 2 (m)	0,023 / 0,030	0,028 / 0,035	0,033 / 0,043
D <sub>50</sub> minimum locatie 3 (m)	0,29 / 0,38	0,35 / 0,44	0,41 / 0,54

Het M12 schip is maatgevend wanneer we de uitkomsten vergelijken. De uitkomsten van scenario 2 van het M12 schip zijn vergelijkbaar met de uitkomsten van scenario 1 van het M8 schip.

De keuze voor een scenario kan behoorlijk veel invloed hebben op de uiteindelijke steengradering. Kijken we bijvoorbeeld naar locatie 3 en passen we daar de gemiddelde snelheid toe, dan levert dat voor scenario 1 een D<sub>50</sub> van 0,35m op en daarmee zou een 40-200 kg graderingen voldoende zijn. Echter bij scenario 2 zou een D<sub>50</sub> van 0,44m nodig zijn wat leidt tot een 60-300 kg gradering.

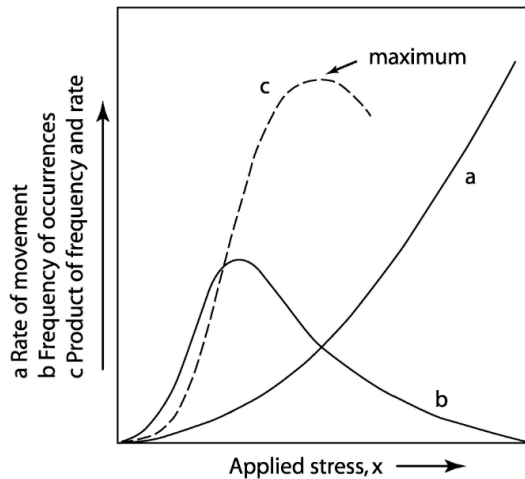
Tabel 2.4 Steensorteringen.

Sortering		M <sub>15</sub> (kg)	M <sub>50</sub> (kg)	M <sub>85</sub> (kg)	D <sub>n50</sub> (m)	D <sub>15</sub> (m)	D <sub>50</sub> (m)	D <sub>85</sub> (m)
5-40 kg	min	6	14	25	0,174	0,156	<b>0,206</b>	0,250
	gem	9	21	37	0,199	0,176	<b>0,236</b>	0,282
	max	12	28	49	0,219	0,196	<b>0,259</b>	0,314
10-60 kg	min	13	27	45	0,217	0,202	<b>0,257</b>	0,304
	gem	18	37	61	0,241	0,223	<b>0,286</b>	0,335
	max	23	47	78	0,261	0,244	<b>0,310</b>	0,366
40-200 kg	min	53	102	159	0,337	0,322	<b>0,400</b>	0,464
	gem	67	127	199	0,363	0,346	<b>0,431</b>	0,498
	max	80	152	238	0,386	0,369	<b>0,458</b>	0,531
60-300 kg	min	78	149	233	0,383	0,367	<b>0,454</b>	0,527
	gem	101	193	301	0,417	0,397	<b>0,495</b>	0,571
	max	124	236	369	0,447	0,427	<b>0,530</b>	0,615
300-1000 kg	min	387	628	879	0,619	0,625	<b>0,734</b>	0,821
	gem	441	715	1001	0,646	0,651	<b>0,766</b>	0,856
	max	495	802	1123	0,672	0,678	<b>0,796</b>	0,890

## 2.3 Erosiekuilen

De hierboven berekende bodembescherming geeft indirect aan dat de zandige bodem van het ARK niet bestand is tegen de belasting. De gemeten erosiegeulen, zie Figuur 2.11, zijn daarmee verklaarbaar.

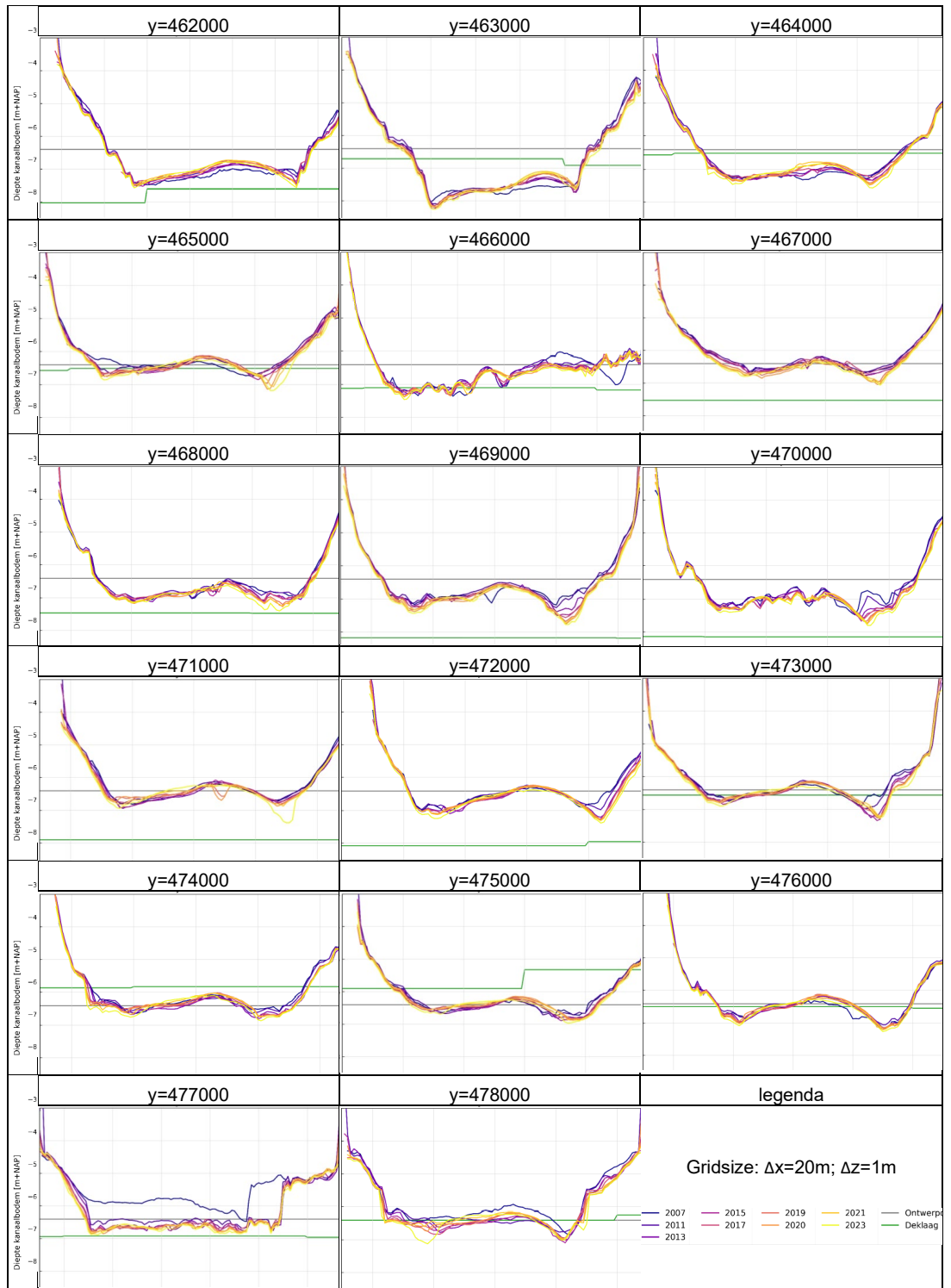
Vermoed wordt dat de huidige vorm van de erosiegeulen gevormd zijn door scheepsbewegingen die qua combinatie van frequentie en belastinggrootte samen cumulatief de grootste schuifspanningen aan de bodem vormen. Hiermee wordt bedoeld dat het niet zozeer gaat om de maximale belasting, zie lijn a in onderstaande figuur (Leopold et al, 1995), die slechts zelden voorkomt. Ook de piek van lijn b uit onderstaande figuur, is niet de maatgevende combinatie, maar juist het product van de 2 lijnen.



Figuur 2.10 Erosievorm als gevolg van belastinggrootte en frequentie van voorkomen (bron: Figure 3-23 *Fluvial Processes in Geomorphology in Leopold et al, 1995*).

Bij een toename van het aantal scheepsbewegingen, maar zeker ook bij een toename van grotere klasse scheepsbewegingen, zal lijn b veranderen (naar rechts verschuiven) waarmee lijn c dus ook verschuift. De erosiegeuldiepte zou dan logischerwijs ook nog toenemen.

Het is niet mogelijk om de bestaande erosiegeuldiepte te toetsen aan de belastingen omdat hiervoor geen model/formules zijn ontwikkeld. Voor stilliggende schepen zijn verschillende ontwerpformules ontwikkeld waarbij gekeken wordt naar schroefstraalerosie. De erosiediepte is dan altijd groter dan bij voorbijvarende schepen. De spreiding tussen de formules is ook nog eens erg groot waardoor het niet zinnig is hier verder nog onderzoek aan te doen.



Figuur 2.11 Dwarsdoorsneden ARK.

### 3 Conclusies

In deelproject 3.1 van het onderzoek is gekeken naar mogelijke kanaalgebonden maatregelen. Het mogelijkkerwijs toepassen van een maatregel is afhankelijk van de grootte van de belasting in verhouding met de stepte van de maatregel. Er is daarom onderzocht hoe de bodemschuifspanning kan worden bepaald op basis van de berekende stroomsnelheden en hoe dit zich dan verhoudt bij bijvoorbeeld een bestorting op een bentonietmat.

Mogelijke kanaalgebonden maatregelen:

1. Zand-Bentoniet mengsel:
  - a. Onderzoek naar mengselsamenstelling.
  - b. Of alternatieven zoals zand inregen na opbrengen klei, of stortsteen toevoegen als harnas.
  - c. Of alternatief zoals LAPAM (flocculatie).
2. Bentonietmatten:
  - a. Ook drijvend (in den natte) aan te brengen met zinkstukken en bestorting.
3. Vaste Klei.
4. Passief Herstel met Scheepvaart beperkingen.
5. Slib vasthoudende zinkstukken.
6. SIBELONMAT®.
7. Gel Barrier.
8. Bodemverbeteringen:
  - a. Bentonietklei injetten/inwoelen/intrekken.

Een belangrijke uitgangspunt is de stabiliteit van de oplossing, oftewel de score op robuustheid en duurzaamheid. Om daar iets over te kunnen zeggen is er een methode ontwikkeld om de belasting aan de bodem van voorbijvarende schepen te bepalen. Hiervoor is de input van de retourstroming een bepalende factor of vervolgens afhankelijk van de locatie de bodemschuifspanning te berekenen.

Ontwerpgrafieken en formules zijn ontwikkeld waarmee de bodemschuifspanning als gevolg van retourstroming langs de boeg (1), midden van het schip (2) en hek van het schip (3) voor twee scheepstypen, namelijk M8 en M12 kan worden uitgerekend. Dit is gedaan voor 2 scenario's: scenario 1: "0,85  $V_{L\text{Schif}}$ " en scenario 2: " $V_{s,\text{med,AIS}}$  met excentriciteit". Uit de berekende bodemschuifspanning is vervolgens de minimale steenbestortingsmaat  $D_{50}$  voor de 3 delen van het schip berekend.

Retourstromingssnelheden	Gemiddelde M8 Scenario 1/ Scenario 2	Gemiddelde M12 Scenario 1/ Scenario 2
Retourstroomsnelheid (m/s)	2,0 / 2,4	2,4 / 2,7
Bodemschuifspanning locatie 1 (N/m <sup>2</sup> )	59,6 / 85,9	85,9 / 108,7
Bodemschuifspanning locatie 2 (N/m <sup>2</sup> )	9,2 / 13,2	13,2 / 16,8
Bodemschuifspanning locatie 3 (N/m <sup>2</sup> )	114,6 / 165,1	165,1 / 208,9
$D_{50}$ locatie 1 (m)	0,13 / 0,18	0,18 / 0,23
$D_{50}$ locatie 2 (m)	0,019 / 0,028	0,028 / 0,035
$D_{50}$ locatie 3 (m)	0,24 / 0,35	0,35 / 0,44

De berekeningen ten aanzien van de bodemschuifspanning als gevolg van varende schepen hebben laten zien dat deze schuifspanningen aan de bodem aanzienlijk zijn en dat, wanneer

er als maatregel een bentonietmat met een bestorting zou worden gekozen, een lichte gradering als 10-60 kg of 5-40 kg niet voldoet.

In de berekeningen zitten een aantal aannames die onder andere afkomstig zijn uit metingen met een duwbak konvooi, waarbij een dubbele schroefpropeller is gebruikt. Hoewel er in dit onderzoek een inschatting is gedaan om hiervoor te corrigeren, is er rond deze inschatting vrij veel onzekerheid. Er is ook nog uitsluitel of bij het ontwerp moet worden uitgegaan van de gemeten piek of dat er wellicht bij varende schepen er een zekere traagheid in het systeem zit, waardoor je met een lagere waarde zou mogen werken. Zowel de spreiding in tijd als in ruimte kan een significante reductie opleveren, waardoor je een meer representatieve schuifspanning zou kunnen krijgen, waardoor lichtere graderingen dan stabiel zouden kunnen zijn.

Verder is er nog onduidelijkheid over hoe om te gaan met de combinatie van retourstroming en propellerstroming en eventueel het kielzog. In de literatuur zijn methoden beschikbaar om propeller stroming met algemene omgevingsstroming te combineren, maar deze gaan nog niet in over de het omgaan met retourstroming. In de nu beschreven berekeningsmethodiek is hiervoor een vertaling gemaakt die aansluit op de gemeten resultaten van het onderzoek van de duwbak konvooi.

### **Vervolgonderzoek**

Met betrekking tot ZandBentonietMengsel is onderzoek nodig naar de effectiviteit van de variaties die hierin mogelijk zijn, het gaat dan om mengselsamenstelling, materiaal alternatieven, alternatieve aanbrenghmethode. Kennisvragen rondom erosiebestendigheid en benodigde samenstelling kunnen als eerste opgepakt worden.

Voor de overige methoden met matten en bestorting liggen de kennisvragen rondom het vaststellen van bodemschuifspanning als gevolg van een propeller met omgevingsstroming. De eerste stap is op basis van de bestaande literatuur een rekenmodel te ontwikkelen worden. Hier zal naar alle waarschijnlijkheid een kalibratiefactor in komen welke als eerste geschat zal worden maar alleen via fysieke modeltesten binnen een bepaalde marge bepaald kan worden.

Een vervolgstap is het opzetten van een fysiek model , waarbij een M8 en M12 schip met verschillende beladinggraad gebruikt wordt en waar dan het stromingsprofiel langs het schip, de bodemschuifspanning en turbulentiefactoren voor bepaald kunnen worden waarmee het rekenmodel mee aangescherpt kan worden. Door deze modelproeven breed op te zetten kan veel data genereerd worden, waarmee inzicht in het gehele fysische proces wordt verkregen, waardoor ook een doorvertaling naar andere locaties in Nederland makkelijker wordt.

## 4 Referenties

- Bampatzeliou, A. (2022). Design of a Gel Product for sedimentation control in the Rotterdam port area. <http://resolver.tudelft.nl/uuid:a4c2e14d-8705-4ae7-a9ab-bdf0481ee2c7>
- Chen, D. J Zheng, C Zhang, D Guan, Y., Li and Y.Wang. 2021. Critical Shear Stress for Erosion of Sand-Mud Mixtures and Pure Mud. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.713039>
- Deltares, 2024. Belasting door scheepvaart in Amsterdam-Rijnkanaal. Rapport 11210303-018-GEO-0005, december 2024.
- Foortse, B, 2016. Retardation of breach growth under high flow velocities. M.Sc. Thesis Delft University of Technology. <https://repository.tudelft.nl/islandora/search/?collection=education>
- Leopold, L.B., M.G. Wolman and J.P. Miller. 1995. Fluvial Processes in Geomorphology. Dover Publications, INC. New York.
- Perkey, D.W., S.J. Smith, and A.M. Priestas. Erosion Thresholds and Rates for Sand-Mud Mixtures. Report US Army Corps of Engineers, ERDC/CHL TR-20-13.
- Rijkswaterstaat, Water, Verkeer en Leefomgeving (WVL). (2020). Richtlijnen Vaarwegen 2020: 2e, gewijzigde druk. Rijswijk: Rijkswaterstaat. ISBN: 978-90-9033878-1
- Rodriguez, J.F., D.M. Admiraal, F. López and M.H. Garcia, (2002). Unsteady Bed Shear Stresses Induced by Navigation: Laboratory Observations. Journal of Hydraulic Engineering, Volume 128, Issue 5. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2002\)128:5\(515\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:5(515))
- TAUW, 2024. Quickscan kansrijke oplossingsrichtingen voor ARK wellenproblematiek. Rapport R001-1291856SGR-V01-hme-NL.

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

**Deltares**

[www.deltares.nl](http://www.deltares.nl)