



Vlaanderen
is wetenschap



16_101_1
WL rapporten

Strandingsbank Coeck in de Rupel

Benodigde bodembescherming en sedimentatieproblematiek

DEPARTEMENT
MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

Strandingsbank Coeck in de Rupel

Benodigde bodembescherming en sedimentatieproblematiek

Plancke, Y.; Verelst, K.; Verwaest, T.; Mostaert, F.

Juridische kennisgeving

Het Waterbouwkundig Laboratorium is van mening dat de informatie en standpunten in dit rapport onderbouwd worden door de op het moment van schrijven beschikbare gegevens en kennis.

De standpunten in deze publicatie zijn deze van het Waterbouwkundig Laboratorium en geven niet noodzakelijk de mening weer van de Vlaamse overheid of één van haar instellingen.

Het Waterbouwkundig Laboratorium noch iedere persoon of bedrijf optredend namens het Waterbouwkundig Laboratorium is aansprakelijk voor het gebruik dat gemaakt wordt van de informatie uit dit rapport of voor verlies of schade die eruit voortvloeit.

Copyright en wijze van citeren

© Vlaamse overheid, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Waterbouwkundig Laboratorium 2017
D /2017/3241/36

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Plancke, Y.; Verelst, K.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2017). Strandingsbank Coeck in de Rupel: Benodigde bodembescherming en sedimentatieproblematiek. Versie 5.0. WL Rapporten, 16_101_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

Overname uit en verwijzingen naar deze publicatie worden aangemoedigd, mits correcte bronvermelding.

Documentidentificatie

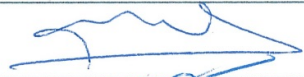
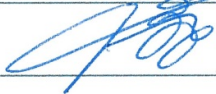
Opdrachtgever:	W&Z NV - Afdeling Zeeschelde	Ref.:	WL2017R16_101_1
Keywords (3-5):	Bodembescherming, sedimentatie, stroming		
Tekst (p.):	20	Bijlagen (p.):	-
Vertrouwelijk:	<input checked="" type="checkbox"/> Nee	<input checked="" type="checkbox"/> Online beschikbaar	

Auteur(s):	Plancke, Y.
------------	-------------

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Verelst, K.	
Projectleider:	Plancke, Y.	

Goedkeuring

Coördinator onderzoeksgroep:	Verwaest, T.	
Afdelingshoofd:	Mostaert, F.	

Abstract

Vanuit W&Z n.v. werd het Waterbouwkundig Laboratorium gevraagd te adviseren omtrent 2 problemen ter hoogte van de strandingsbank van Betoncentrale Coeck, gelegen langs de Rupel:

- (1) welk kaliber van steenbestorting is noodzakelijk als bodembescherming op de strandingsbank?
- (2) waarom treedt er sedimentatie op ter hoogte van de opwaartse zijde van de nieuwe kaaimuur, terwijl dit niet het geval is aan de afwaartse zijde?

Om antwoord te geven op deze vragen werd tijdens de laatste fase van de vloed een stroommeting uitgevoerd ter hoogte van de strandingsbank. Deze ingewonnen gegevens, in combinatie met beschikbare modelresultaten en historische luchtfoto's lieten toe beide vragen te beantwoorden.

De belangrijkste factor in de dimensionering van de bodembescherming bleek niet de getijdenstroming te zijn, maar wel de invloed van scheepsschroeven bij een beperkte kielspeling.

De sedimentatie kon worden verklaard op basis van de historische ligging van het slik.

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	V
Lijst van de tabellen.....	VI
Lijst van de figuren	VII
1 Inleiding	1
1.1 Situering.....	1
1.2 Probleemstelling.....	1
2 Dimensionering steenbestorting zaat	3
2.1 Randvoorwaarden	3
2.1.1 Getijdenstroming.....	3
2.1.2 Schroefwerking schepen	5
2.1.3 Stromingscontractie rond afgemeerde schepen.....	5
2.2 Berekening steenbestorting	6
2.2.1 Algemeen.....	6
2.2.2 Stroomsnelheid nabij bodem ten gevolge van scheepvaart	6
2.2.3 Dimensionering bodembescherming	10
2.3 Conclusies	16
3 Sedimentatie	18
3.1 Analyse	18
3.2 Conclusies.....	18
4 Referenties	20

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Overzicht instelling ADCP.....	3
Tabel 2 – Afmetingen en karakteristieken hoofdschroef en boegschroef voor een schip CEMT klasse Va	6
Tabel 3 – Berekening maximale stroomsnelheid boven de bodem ten gevolge van de hoofdschroef	8
Tabel 4 – Berekening maximale stroomsnelheid boven de bodem ten gevolge van de boegschroef.....	9
Tabel 5 – Overzicht parameterwaarden voor berekening breuksteengewicht volgens Escarameia & May ..	10
Tabel 6 – Overzicht parameterwaarden voor berekening breuksteengewicht volgens Pilarczyk	12
Tabel 7 – Overzicht parameterwaarden voor berekening breuksteengewicht volgens Maynord	14
Tabel 8 – Overzicht parameterwaarden voor berekening breuksteengewicht aan de hand van de Shields-formulering aangepast voor stralen.....	15
Tabel 9 – Overzicht benodigd breuksteengewicht	16

Lijst van de figuren

Figuur 1 – Strandingsbank bij laagwater ter hoogte van nieuwe kaaimuur	1
Figuur 2 – Detail van steenbestorting met zones met ongewenste erosie (putten)	2
Figuur 3 – Sedimentatie ter hoogte van de overgang tussen de nieuwe en oude kaaimuur	2
Figuur 4 – Ligging ADCP-raai langsheen oude, nieuwe kaaimuur en gemeentelijke kaaimuur	4
Figuur 5 – Variatie van de diepte-gemiddelde snelheid langsheen de meetraai.....	5
Figuur 6 – Verband tussen maximaal toegelaten stroomsnelheid en breuksteendiameter voor (met beton) geopenetreerde breuksteen.....	17
Figuur 7 – Luchtfoto van de oude kaaimuur (boven) en zelfde luchtfoto met nieuwe kaaimuur ingetekend (onder)	19

1 Inleiding

1.1 Situering

Betonfabriek Coeck (gevestigd in Niel) beschikt over aanmeermogelijkheden langs de Rupel voor het laden en lossen van goederen. Deze aanmeermogelijkheden bestaan uit een kaaimuur met daarvoor een strandingsbank. Deze strandingsbank (ook wel zaat genoemd) laat schepen toe droog te vallen bij laagwater, om bij het volgende hoogwater af te kunnen varen. De kaaimuur zelf bestaat uit 2 delen: een oude gesloten kaaimuur en een nieuwe (gebouwd in 2015) open kaaimuur. Deze nieuwe kaaimuur werd gerealiseerd via een PPS waarbij de overheid (W&Z) een deel (80%) van de kosten financierde.

De strandingsbank voor de nieuwe kaaimuur werd aangelegd met een steenbestorting met een kaliber 80/500 kg (zoals bepaald in het bestek). Bij indienstname van de strandingsbank bleek dit een te groot kaliber te zijn, waardoor de strandingsbank opgevuld werd met een kleinere breuksteen kaliber 0/80 kg. Ook ter hoogte van de oude kaaimuur is een dergelijke strandingsbank aanwezig, maar hier is de oorspronkelijke steenbestorting bedekt door een sedimentlaag die afgezet werd in de loop der jaren.

Figuur 1 – Strandingsbank bij laagwater ter hoogte van nieuwe kaaimuur



1.2 Probleemstelling

Na de ingebruikname van de nieuwe kaaimuur in 2015 werd de zaat intensief gebruikt door grote schepen (2000T). Sedert enkele maanden wordt vastgesteld dat er putten zijn in de strandingsbank, waarbij de grote stenen boven steken en de kleinere uitspoelen (Figuur 2). Vanuit W&Z n.v. (contact Ir. Roeland Notelé) werd het Waterbouwkundig Laboratorium gevraagd te adviseren omtrent 2 problemen:

- Welk kaliber van steenbestorting als bodembescherming is noodzakelijk op de strandingsbank?
- Waarom treedt er sedimentatie (zie Figuur 3) op ter hoogte van de opwaartse zijde van de nieuwe kaaimuur, terwijl dit niet het geval is langs de afwaartse zijde?

In voorliggend advies gaat het WL in op beide vragen.

Figuur 2 – Detail van steenbestorting met zones met ongewenste erosie (putten)



Figuur 3 – Sedimentatie ter hoogte van de overgang tussen de nieuwe en oude kaaimuur



2 Dimensionering steenbestorting zaat

2.1 Randvoorwaarden

Voor de dimensionering van de steenbestorting ter hoogte van de strandingsbank is het belangrijk alle relevante randvoorwaarden te beschouwen. Voor deze locatie zijn volgende aspecten belangrijk:

- Getijdenstroming
- Schroefwerking schepen
- Stromingscontractie rond afgemeerde schepen

2.1.1 Getijdenstroming

De strandingsbank is gelegen in de Rupel ter hoogte van Niel. De Rupel is één van de belangrijkste zijrivieren van de Schelde en wordt dan ook gekarakteriseerd door sterke getijdenstromingen. Ter hoogte van Schelle (afwaarts van de locatie) treden getijverschillen op van 4,53 m bij doottij tot 6,02 m bij springtij (Vanlierde et al., 2016). Deze waterstandsverschillen resulteren in eb- en vloedstromingen. Slechts op enkele locaties in het Schelde-estuarium worden metingen van de stroomsnelheden uitgevoerd, waarbij één locatie op de Rupel (Boom) gelegen is. Daarnaast zijn er andere methodes om een beeld te verkrijgen van de stroomsnelheden zoals numerieke modellen. Op basis van deze modellen (eenvoudig via kubatuur of complex m.b.v. Scaldis model) kan een idee verkregen worden van de lokale stroomsnelheden. Er dient echter opgemerkt te worden dat omwille van de lokale complexiteit ter hoogte van de kaaimuur, deze modellen niet in staat zijn om een exacte waarde te geven.

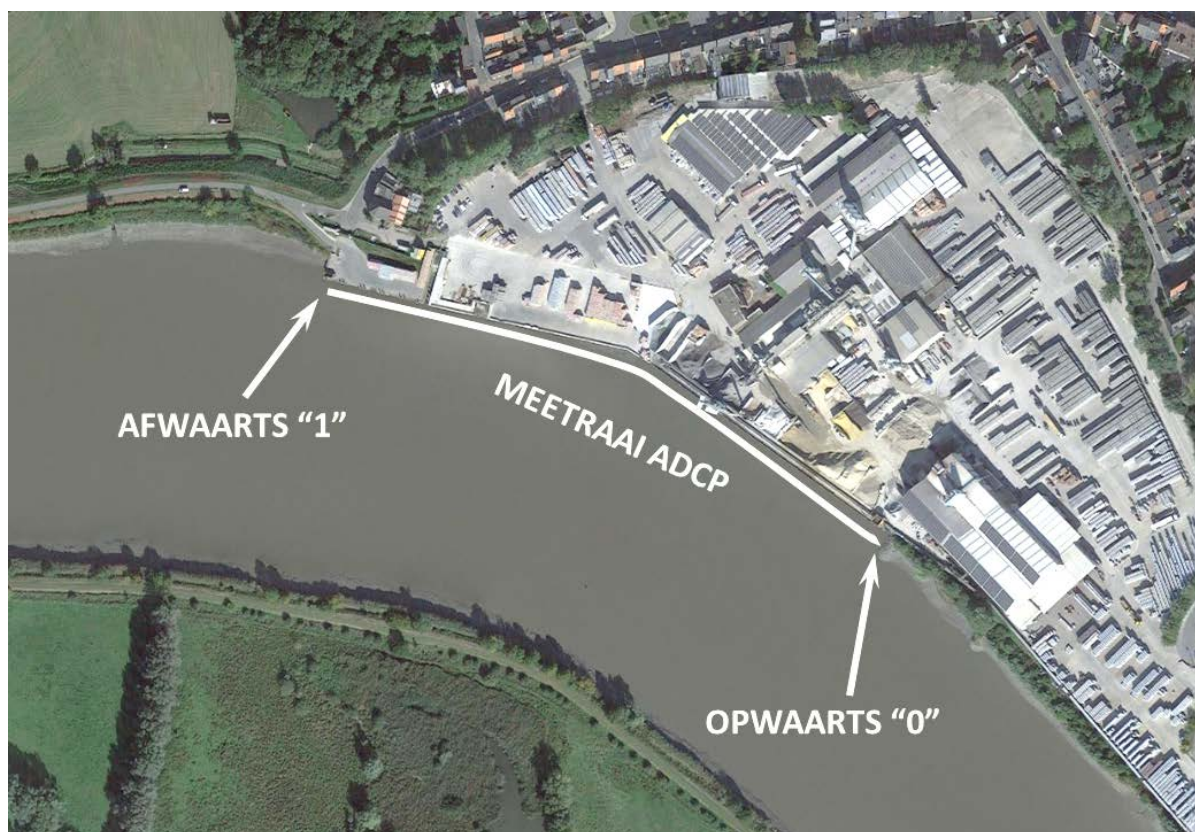
Om de lokale stroompatronen in beeld te brengen, werd op dinsdag 13 december 2016 een stroommeting ter hoogte van de kaaimuur uitgevoerd. Hierbij werd met behulp van de bijboot van de MS Pierre Petit gedurende de laatste fase van de vloed (HW – 2u tot HW) de stroming gemeten nabij de kaaimuur. Op een afstand tot de kaaimuur van ca. 10-20 m (Figuur 4) werd herhaaldelijk een langsraai gevaren (de ene keer van op- naar afwaarts, de volgende van af- naar opwaarts). Hierbij werd een Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) ingezet. Voor een overzicht van de belangrijkste instelling wordt verwezen naar Tabel 1.

Tabel 1 – Overzicht instelling ADCP

Type	RD Instruments Rio Grande 1200 kHz
Cell size	0,25 m
Aantal cellen	33 (~ maximale diepterange = 8 m)
Referentie	Bottom Track
Parameters	TE = 0000500/0000800 TP = 000020/000080

Bij het uitvoeren van de meting bleek er een probleem op te treden te wijten aan een slecht signaal van de Bottom Track, die fungeert als referentie voor de afgelegde weg. Om dit probleem op te lossen werden een aantal tijdsinstellingen aangepast (met name de tussentijd individuele “pings” (TP) waarvan er steeds 4 gemeten werden en de tijd tussen opeenvolgende ensembles (TE)), doch dan nog bleek een deel (25% - 50%) van de metingen niet bruikbaar te zijn.

Figuur 4 – Ligging ADCP-raai langsheen oude, nieuwe kaaimuur en gemeentelijke kaaimuur



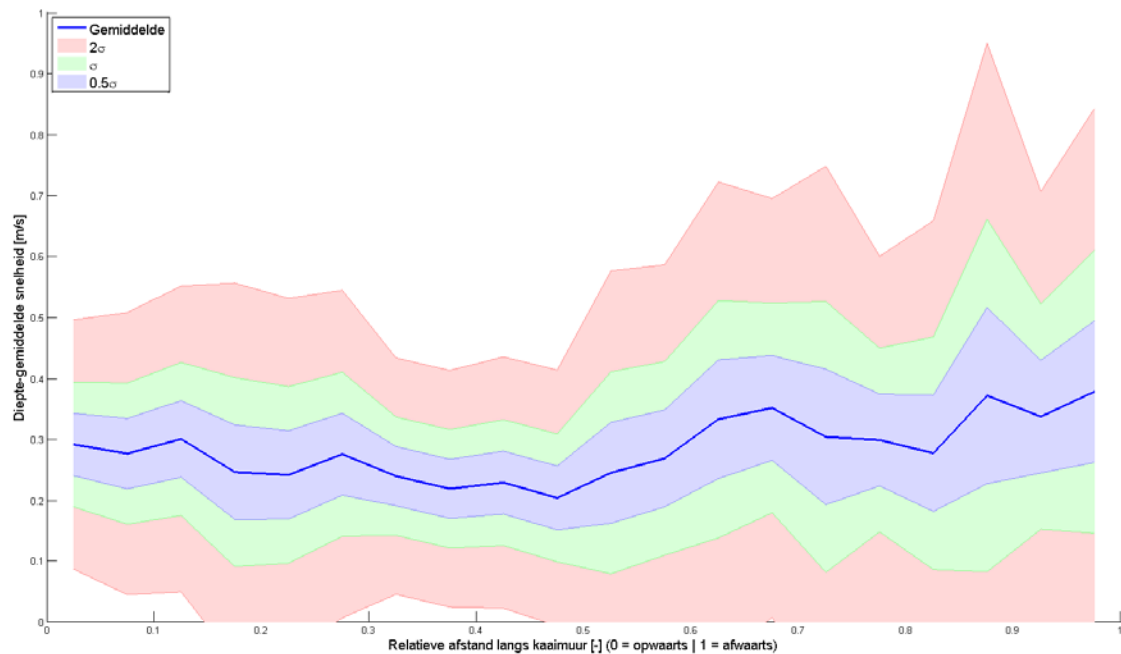
Relatieve afstand strekt zich uit van de oude ("0") over de nieuwe kaaimuur, tot de gemeentelijke kaaimuur ("1")

Door de problemen met het meettoestel op het terrein is geen volledig beeld beschikbaar van de stroming, desalniettemin kunnen de belangrijkste resultaten gepresenteerd worden. Tijdens de vloedfase werden stroomsnelheden gemeten tot maximaal 1 m/s. De ruimtelijke variatie kan opgedeeld worden in twee vaststellingen:

- (1) de stroomsnelheid nabij de kaaimuur is aanzienlijk lager dan in het centrale deel van de Rupel waar de diepere geul gelegen is; deze vaststelling werd gedaan aan boord van de bijboot, op basis van drijvende takken die in het centrale deel aanzienlijk sneller voorbij dreven dan nabij de kaaimuur.
- (2) langsheen de kaaimuur is er een beperkte variatie, waarbij het afwaartse deel (gemeentelijke kaaimuur) ietwat hogere snelheden kent, terwijl het opwaartse deel nabij de oude kaaimuur minder hoge snelheden kent (Figuur 5); deze variatie kan vermoedelijk verklaard worden door het feit dat de oude kaaimuur van het "gesloten" type (damwand) is, terwijl de nieuwe en de gemeentelijke kaaimuur van het "open" type (palen) zijn (zie Figuur 3).

Conclusie: Op basis van de modellen en de uitgevoerde terreinmeting, kan gesteld worden dat de **maximale stroomsnelheden** ter hoogte van de site, nodig voor de dimensionering van de steenbestorting, steeds beneden de **2 m/s** blijven. Deze maximale stroomsnelheden zullen optreden bij springtij (enkele getijden eens per springtij-doodtij-cyclus die 14,5 dagen duurt) op het moment van maximum vloedstroming (ca. één uur voor hoogwater). Tijdens de eb en bij niet-springtij-condities zullen de maximale stroomsnelheden lager liggen 1 à 1,5 m/s afhankelijk van de fase in de getijcyclus.

Figuur 5 – Variatie van de diepte-gemiddelde snelheid langsheen de meetraai



0 = opwaartse punt van de oude kaaimuur | 1 = afwaartse punt van de gemeentelijke kaaimuur

2.1.2 Schroefwerking schepen

Afgemeerde schepen zullen bij het vertrekken een minimale kielspeling moeten hebben om veilig te kunnen manoeuvreren. De minimale kielspeling bedraagt 1 m. Bij het vertrek zal de schroef van het schip echter een jet creëren die voor een extra belasting op de bodem zorgt. Belangrijke factoren, naast de kielspeling, zijn de scheepskarakteristieken (schroefdiameter, vermogen, ...) die de belasting op de bodem zullen bepalen.

2.1.3 Stromingscontractie rond afgemeerde schepen

Wanneer een schip afgemeerd ligt aan de kaaimuur, zal de stroming rond het schip geforceerd worden. Hierdoor kunnen er lokaal rond en onder schip versnellingen ontstaan die resulteren in een verhoging van de stroomsnelheid onder invloed van de getijden. Aangezien de oppervlakte van het schip beperkt is ten opzichte van de volledige dwarssectie van de Rupel, zal dit echter beperkt blijven. Het effect zal in volgende paragraaf meegenomen worden als een extra turbulentie en zal aanleiding geven tot een vergroting van het noodzakelijke kaliber van de steenbestorting.

2.2 Berekening steenbestorting

2.2.1 Algemeen

Voor het berekenen van een steenbestorting zijn verschillende theorieën beschikbaar (Escarameia, 1998; CIRIA; CUR, 2007)). Indien stroomsnelheden aan de bodem gekend zijn, wordt in Vlaanderen vaak de Shields-formulering aangepast voor stralen uit Ontwerp van Schutsluizen (Beem *et al.*, 2000) toegepast. De voorzichtige benadering bestaat erin de verschillende theorieën toe te passen en het grootste kaliber te weerhouden. Volgende formuleringen worden hier toegepast:

- Escarameia & May (1992)
- Maynord (1993)
- Pilarczyk (1990)
- Shields-formulering aangepast voor stralen (Beem *et al.*, 2000)

Deze formuleringen gaan uit van een bepaalde stroomsnelheid, een dieptegemiddelde stroomsnelheid of een stroomsnelheid nabij de bodem. Voor de stroming ten gevolge van het getij volgt de dieptegemiddelde stroming uit de metingen (zie paragraaf 2.1.1). In paragraaf 2.2.2 wordt de berekening van de stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van scheepvaart uitgevoerd.

Aan de hand van de berekende stroomsnelheid wordt in paragraaf 2.2.3 de dimensionering van de breuksteen uitgevoerd gebruik makend van de hierboven vermelde formuleringen.

2.2.2 Stroomsnelheid nabij bodem ten gevolge van scheepvaart

Uit paragraaf 1.2 volgt dat de kaaimuur gebruikt wordt door schepen tot 2000 ton (CEMT-klasse V). Op de Rupel bedraagt de maximale toegelaten afmetingen van de schepen 95,0 m x 11,4 m (bron: www.binnenvaart.be) en een lengte van 105 m voor duwkonvoeien. Dit zijn de afmetingen van schepen CEMT klasse Va. Tabel 2 geeft een overzicht van de afmetingen en de karakteristieken van hoofdschroef en boegschroef voor deze scheepsklasse.

Tabel 2 – Afmetingen en karakteristieken hoofdschroef en boegschroef voor een schip CEMT klasse Va

		CEMT Va
Lengte		95,0 m
Breedte		11,4 m
Diepgang		*
Hoofdschroef	Aantal schroeven	1
	Motorvermogen 50% - percentiel	1300 kW
	Motorvermogen 90% - percentiel	1800 kW
	Diameter schroef	2,00
Boegschroef	Aantal schroeven	1
	Totaal motorvermogen boegschroef	450 kW
	Diameter schroef	1,20m

*Op de strandingsbank geldt dat schepen aanmeren of vertrekken met een kielspeling van 1,0 m. De werkelijke diepgang is niet gekend, maar is bijgevolg afhankelijke van het waterpeil in de Rupel.

Bij Tabel 2 wordt opgemerkt dat de vermogens van hoofdschroef en boegschroef bepaald zijn op basis van de waarden vermeld in ten Hove (2010) en Geerts *et al.* (2011). In ten Hove (2010) wordt de verdeling van de vermogens vermeld van de Nederlandse vloot. In de tabel worden zowel de 50 %- als de 90 %-percentiel van het geïnstalleerde motorvermogen voor de hoofdschroef vermeld. Voor de bepaling van de stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de hoofdschroef in dit rapport wordt de 90 %- percentielwaarde voor dit vermogen toegepast.

Met behulp van deze gegevens kan de stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de hoofdschroef berekend worden. Volgens de formuleringen in "Ontwerp van schutsluizen" (Beem *et al.*, 2000) en de Rock Manual (CIRIA; CUR, 2007) wordt de stroomsnelheid aan de bodem gegeven door volgende formule:

$$u_p = 1,15 \left(\frac{P_{schroef}}{\rho_w D_0^2} \right)^{1/3}$$

met:

u_p : stroomsnelheid juist achter de schroef [m/s]

$P_{schroef}$: vermogen geleverd door de schroef [W]

ρ_w : Dichtheid water [kg/m³]

D_0 : Effectieve diameter van de schroef [m]

$$D_0 = \begin{cases} 0,7 D_p & \text{schroef zonder straalbuis} \\ 1,0 D_p & \text{schroef in straalbuis} \\ 0,85 D_p & \text{schroef/straalbuiscombinatie} \end{cases}$$

D_p = Echte diameter van de schroef [m]

De maximale stroomsnelheid boven de bodem u_{bp} doet zich voor op een afstand x_{bp} achter de schroef. Deze beide grootheden kunnen als volgt berekend worden (Beem *et al.*, 2000):

$$x_{bp} = 5,6 d_p$$

$$u_{bp} = \min \left(0,3 u_p \sqrt{n} \left(\frac{D_0}{d_p} \right), u_p \right)$$

met:

x_{bp} : horizontale afstand van de schroef tot de plaats met maximale stroomsnelheid aan de [m/s]

d_p : verticale afstand van de as van de schroef tot de bodem [m]

u_{bp} : maximale stroomsnelheid boven de bodem [m/s]

D_0 : effectieve diameter van de schroef [m]

n : aantal schroeven [-]

Met betrekking tot het toepassen van deze formuleringen dient het volgende opgemerkt te worden:

- Bij recente schepen is een schroef in een straalbuis aanwezig. Bij de oudere types is nog een schroef zonder straalbuis aanwezig. Om die reden wordt zowel een effectieve diameter gelijk aan 0,7 maal de echte diameter van de schroef als een effectieve diameter gelijk aan de echte diameter van de schroef beschouwd.
- Voor het schip CEMT klasse Va wordt voor het geïnstalleerd vermogen de 90 %-percentielwaarde van 1800 kW, uit Tabel 2 toegepast voor de berekening van de stroomsnelheid aan de bodem.
- Met betrekking tot het toegepast vermogen van de hoofdschroef beveelt de EAU 2004 (Members of the Committee for Waterfront Structures, 2006) aan om voor manoeuvreren, aanmeren aan een kaaimuur een toegepast vermogen van 42 % van het geïnstalleerde motorvermogen te beschouwen. Het PIANC rapport 180 (MarCom Working Group 180, 2015) beveelt aan om voor binnenvaartschepen 50 à 100 % van het geïnstalleerd vermogen toe te passen. Voor dit advies

wordt voor de berekening van de stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de hoofdschroef 50 % van het geïnstalleerd motorvermogen beschouwd voor aanmeren aan een kaaimuur, analoog als in eerdere studies (Verelst *et al.*, 2016).

Gebruik makend van deze formuleringen worden in Tabel 3 de resultaten gegeven van de berekening van de maximale stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de hoofdschroef. Uit deze tabel volgt een maximale stroomsnelheid aan de bodem van 2,10 m/s bij een kielspeling van 1,0 m. Indien de kielspeling kleiner zou zijn (bv. 0,5 m), neemt de maximale stroomsnelheid aan de bodem toe tot 2,80 m/s.

Tabel 3 – Berekening maximale stroomsnelheid boven de bodem ten gevolge van de hoofdschroef

D0/Dp=0,71			D0/Dp=1,0	D0/Dp=1,0	D0/Dp=0,7
CEMT-klasse	-	-	Va	Va	Va
echt schroefdiameter	D _p	m	2,00	2,00	2,00
effectieve schroefdiameter	D _o	m	2,00	2,00	1,40
Motorvermogen		kW	1800	1800	1800
aantal schroeven	n	-	1	1	1
% motorvermogen		%	50	50	50
aangewend vermogen per schroef	P _d	kW	900	900	900
Kielspeling		m	1,0	0,5	1,0
stroomsnelheid achter schroef	u _p	m/s	7,00	7,00	8,87
vert.afst. straaalsas tot bodem	d _p	m	2,00	1,50	2,00
max.snelh.boven bodem	u _{bp}	m/s	2,10	2,80	1,86
u _{bp} < u _p	-	-	Ja	Ja	Ja

Wat de stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de boegschroef betreft, wordt de stroomsnelheid van de uittredende straal, volgens de formuleringen in “Ontwerp van Schutsluizen” (Beem *et al.*, 2000), gegeven door volgende formule:

$$v_p = \zeta 1,15 \left(\frac{P_d}{D_o^2} \right)^{1/3}$$

met:

v_p = stroomsnelheid uittredende straal [m/s]

P_d = aangewend vermogen [kW]

D0 = effectieve diameter van de schroef (=DP) [m]

Dp = echte diameter van de schroef [m]

ζ = energieverlies-factor (= 0,9 voor kanalsystemen met uitstroming langs de zijkant) [-]

Hierbij wordt het volgende opgemerkt:

- De formuleringen uit “Ontwerp van Schutsluizen” (Beem *et al.*, 2000) betreffen enkel boegschroeven met een kanalsysteem met uitstroming langs de zijkant van het schip. Systemen met een uitstroming gericht naar de bodem, zoals pumpjets worden niet beschouwd.
- Voor het aangewend vermogen van een boegschroef wordt altijd 100 % van het geïnstalleerd vermogen wordt beschouwd, zoals ook aanbevolen in het PIANC rapport 180 (MarCom Working Group 180, 2015).

De kaaimuur ter hoogte van het betonbedrijf Coeck bestaat uit een kaaimuur op palen. Dit is een open constructie. Bijgevolg doet er zich een vrije onbegrensde stroming uit de boegschroef voor. De stroomsnelheid aan de bodem voor dit type stroming wordt berekend aan de hand van dezelfde formulerings als voor de stroming van de hoofdschroef.

Deze stroomsnelheid wordt gegeven door volgende formulerings:

$$x_{bp} = 5,6 d_p$$

$$v_{bp} = \min \left(1,68 v_p \sqrt{n} \left(\frac{D_0}{x_{bp}} \right), v_p \right)$$

met:

x_{bp} : horizontale afstand van Schroef tot de plaats met maximale stroomsnelheid aan de bodem [m]

d_p : verticale afstand van de as van de Schroef tot de bodem [m]

v_{bp} : maximale stroomsnelheid boven de bodem [m/s]

v_p : stroomsnelheid uittredende straal [m/s]

D_0 : effectieve diameter van de Schroef [m]

n : aantal boegschroeven [-]

Gebruik makend van deze formulerings worden in Tabel 4 de resultaten gegeven van de berekening van de maximale stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de boegschroef. Uit deze tabel volgt een maximale stroomsnelheid aan de bodem van 1,58 m/s.

Tabel 4 – Berekening maximale stroomsnelheid boven de bodem ten gevolge van de boegschroef

CEMT-klasse	-	-	Va
echt schroefdiameter	D_p	m	1,20
effectieve schroefdiameter	D_0	m	1,20
Motorvermogen		kW	450
aantal schroeven	n	-	1
% motorvermogen		%	100
aangewend vermogen per schroef	P_d	kW	450
Kielsing		m	1,0
stroomsnelheid achter schroef	v_p	m/s	7,02
vert.afst. straaas tot bodem	d_p	m	1,60
max.snelh.boven bodem	v_{bp}	m/s	1,58
$v_{bp} < v_p$	-	-	Ja

Hierbij wordt opgemerkt dat deze berekening een vrije ongehinderde uitstroming veronderstelt. In werkelijkheid zorgen de palen van de kaaimuur en de taludhelling onder de kaaimuur ervoor dat dit niet het geval is. Het PIANC rapport 180 (MarCom Working Group 180, 2015) vermeldt dat juist naast een paal de stroomsnelheid twee maal hoger kan zijn dan de stroomsnelheid vòòr de palenrij. In hetzelfde PIANC-rapport worden ook formulerings vermeld voor de berekening van de stroomsnelheid op een talud en worden ook correctiefactoren vermeld voor het inrekening brengen van de invloed van palen en de taludhelling. Aangezien dit advies de dimensionering van de steenbestorting op de strandingsbank betreft wordt de stroomsnelheid onder de palenrij of ter plaatse van het talud niet begroot.

2.2.3 Dimensionering bodembescherming

Escarameia & May (1992)

Escarameia & May (1992) stellen volgende formule voor voor het berekenen van rip rap (steenbestorting), losse en verbonden betonblokken en schanskorf-matrassen:

$$D_{n50} = C \cdot \frac{U_b^2}{2 \cdot g \cdot \Delta}$$

Met D_{n50} : karakteristieke nominale breuksteendiameter [m]

$W_{50} = \rho_s \cdot D_{n50}^3$: karakteristiek gewicht van de steen [m]

$C = 12,3 \cdot TI - 0,20$ (rip rap): parameter die turbulentie intensiteit (TI) in rekening brengt

U_b = stroming nabij de bodem [m/s]

TI = Turbulentie-intensiteit [-]

g : valversnelling (=9,81 m/s²) [m/s²]

$\Delta = (\rho_s - \rho_w) / \rho_w$ relatieve dichtheid breuksteen [-]

ρ_s = dichtheid breuksteen (= 2650 kg/m³) [kg/m³]

ρ_w = dichtheid water (= 1000 kg/m³) [kg/m³]

Voor getijwerking wordt de stroomsnelheid nabij de bodem benaderd als de stroomsnelheid die zich voordoet op een hoogte van 10 % van de waterdiepte boven de bodem. Escarameia & May (1992) vermelden hiervoor de volgende formulering: $U_b = (-1,48 TI + 1,04) U$

Met U_b = stroomsnelheid nabij de bodem [m/s]

U_d = dieptegemiddelde stroomsnelheid [m/s]

TI = Turbulentie-intensiteit [-]

De stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van hoofdschroef en boegschroef volgen uit paragraaf 2.2.2.

Tabel 5 geeft een overzicht van de waarden gebruikt voor de berekening van het benodigde breuksteengewicht op de strandingsbank. In deze tabel zijn de waarden voor de turbulentie-intensiteit overgenomen uit Escarameia & May (1992) of uit Beem *et al.* (2000).

Tabel 5 – Overzicht parameterwaarden voor berekening breuksteengewicht volgens Escarameia & May

	Getijwerking		Schroefwerking	
	Zonder schip	Met afgemeerd schip	Hoofdschroef	Boegschroef
TI [-]	0,12	0,35	0,40	0,35
C [-]	1,3	4,1	4,7	4,1
U_d [m/s]	2,00	2,00	NVT	NVT
U_b [m/s]	1,72	1,04	2,10	1,58
ρ_s [kg/m ³]	2650	2650	2650	2650
ρ_w [kg/m ³]	1000	1000	1000	1000
D_{n50} [m]	0,12	0,14	0,64	0,32
W_{50} [kg]	4	7	704	84

Pilarczyk (1990)

Pilarczyk (1990) stelt volgende formule voor voor het berekenen van rip rap (steenbestorting), losse en verbonden betonblokken en asfalt-matrassen:

$$D_{n50} = \frac{\phi}{\Delta} \cdot \frac{0,035}{\psi_{cr}} \cdot K_T \cdot K_h \cdot K_s^{-1} \cdot \frac{U_d^2}{2 \cdot g}$$

Met D_{n50} : karakteristieke nominale breuksteendiameter [m]

$W_{50} = \rho_s \cdot D_{n50}^3$: karakteristiek gewicht van de steen [m]

ϕ : correctiefactor stabiliteit (= 1,00 voor doorgaande breuksteenbekleding) [-]

$\Delta = (\rho_s - \rho_w) / \rho_w$: relatieve dichtheid breuksteen [-]

ρ_s : dichtheid breuksteen (= 2650 kg/m³) [kg/m³]

ρ_w : dichtheid water (= 1000 kg/m³) [kg/m³]

ψ_{cr} : stabiliteitsfactor (= 0,035) [-]

K_T : turbulentiefactor [-]

$K_h = (D_{n50}/y)^{0,2}$: dieptefactor [-]

Y : waterdiepte [m]

K_s : hellingsfactor (=1 voor bodem) [-]

U_d : dieptegemiddelde stroomsnelheid [m/s]

g : valversnelling [m/s²]

Hierbij wordt opgemerkt dat de stroomsnelheid in de formulering volgens Pilarczyk een dieptegemiddelde stroomsnelheid betreft. Bij getijwerking volgt uit de metingen een dieptegemiddelde stroomsnelheid van 2,0 m/s. Bij schroefstraalwerking volgt uit paragraaf 2.2.2 enkel de stroomsnelheid aan de bodem en is geen dieptegemiddelde stroomsnelheid gekend. Om die reden wordt deze formulering enkel toegepast voor getijwerking en niet voor schroefwerking.

Voor de berekening van de dieptefactor wordt (als eerste schatting) een D_{n50} van 0,10 m en een (minimale) waterdiepte van 2,0 m verondersteld.

Tabel 6 geeft een overzicht van de waarden gebruikt voor de berekening van het benodigde breuksteengewicht op de strandingsbank.

Tabel 6 – Overzicht parameterwaarden voor berekening breuksteengewicht volgens Pilarczyk

	Zonder schip	Met afgemeerd schip
ϕ [-]	1,00	1,00
Δ [-]	1,65	1,65
U_d [m/s]	2,00	2,00
Ψ_{cr} [-]	0,035	0,035
ρ_s [kg/m ³]	2650	2650
ρ_w [kg/m ³]	1000	1000
K_T [-]	1	1,5
K_h [-]	0,55	0,55
K_s [-]	1	1
D_{n50} [m]	0,07	0,11
W_{50} [kg]	< 1	2,8

Maynord (1993)

Maynord (1993) stelt volgende formule voor voor het berekenen van rip rap (steenbestorting):

$$D_{50} = (f_g)^{0,32} S_f \cdot C_s \cdot C_v \cdot C_T \cdot y \cdot \left[\left(\frac{1}{\Delta} \right)^{0,5} \cdot \frac{U_D}{\sqrt{K_1 \cdot g \cdot y}} \right]^{2,5}$$

Met D_{50} : karakteristieke breuksteendiameter (= 0,84 D_{n50}) [m]

D_{n50} : karakteristieke nominale breuksteendiameter [m]

$W_{50} = \rho_s \cdot D_{n50}^3$: karakteristiek gewicht van de steen [m]

f_g = Sorteringsfactor (= D_{85}/D_{15}) [-]

S_f : veiligheidsfactor (1 à 1,5) [-]

$\Delta = (\rho_s - \rho_w)/\rho_w$: relatieve dichtheid breuksteen [-]

ρ_s : dichtheid breuksteen (= 2650 kg/m³) [kg/m³]

ρ_w : dichtheid water (= 1000 kg/m³) [kg/m³]

C_s : stabiliteitsfactor (= 0,30 voor hoekige breuksteen) [-]

C_v : snelheidsverdelingsfactor (1 à 1,25) [-]

C_T : diktefactor [-] (=1)

y : lokale waterdiepte [m]

K_1 : hellingsfactor (=1 voor vlakke bodem) [-]

U_D : dieptegemiddelde stroomsnelheid [m/s]

g : valversnelling [m/s²]

Hierbij wordt opgemerkt dat de stroomsnelheid in de formulering volgens Maynord een dieptegemiddelde stroomsnelheid betreft. Bij getijwerking volgt uit de metingen een dieptegemiddelde stroomsnelheid van 2,0 m/s. Bij schroefstraalwerking volgt uit paragraaf 2.2.2 enkel de stroomsnelheid aan de bodem en is geen dieptegemiddelde stroomsnelheid gekend. Analoog als bij de formulering volgens Pilarczyk wordt deze formulering enkel toegepast voor getijwerking en niet voor schroefwerking.

Voor sorteringsfactor f_g vermeldt de Rock Manual (CIRIA; CUR, 2007) een waarde kleiner dan 1,5 voor smalle sorteringen, een waarde tussen 1,5 en 2,5 voor brede sorteringen. Voor dit advies wordt de waarde 1,5 voor deze factor beschouwd.

Aangezien in de overige toegepaste formuleringen ook geen veiligheidsfactor wordt beschouwd, wordt voor het toepassen van deze formulering een waarde 1,0 beschouwd voor de veiligheidsfactor S_f .

Tabel 7 geeft een overzicht van de waarden gebruikt voor de berekening van het benodigde breuksteengewicht op de strandingsbank.

Tabel 7 – Overzicht parameterwaarden voor berekening breuksteengewicht volgens Maynard

	Zonder schip	Met afgemeerd schip
f_g	1,50	1,50
S_f [-]	1,0	1,0
s [-]	2,65	2,65
U_d [m/s]	2,00	2,00
C_s [-]	0,3	0,3
C_v [-]	1	1,1
C_T [-]	1	1
ρ_s [kg/m ³]	2650	2650
ρ_w [kg/m ³]	1000	1000
K_1 [-]	1	1
y [m]	2	2
D_{50} [m]	0,07	0,08
D_{n50} [m]	0,08	0,10
W_{50} [kg]	1,3	2,5

Shields-formulering aangepast voor stralen (Beem *et al.*, 2000)

Voor stroomsnelheden aan de bodem wordt de breuksteendiameter berekend aan de hand van de Shields-formulering aangepast voor stralen uit Ontwerp van Schutsluizen (Beem *et al.*, 2000):

$$D_{n50} = \left[\frac{0,8}{\Delta \cdot h^{1/3}} \cdot \frac{(U_b (1 + 3r))^2}{2g} \right]^{3/2}$$

met:

D_{n50} = nominale breuksteendiameter [m]

Δ = relatieve dichtheid van de stenen ($\Delta = (\rho_s - \rho_w)/\rho_w$) [-]

ρ_s = dichtheid breuksteen (= 2650 kg/m³) [kg/m³]

ρ_w = dichtheid water (= 1000 kg/m³) [kg/m³]

U_b = stroomsnelheid boven de bodem [m/s]

h = waterdiepte [m]

r = turbulentie-intensiteit [-]

g = valversnelling (=9,81 m/s²) [m/s²]

Hierbij wordt opgemerkt dat de stroomsnelheid in deze formulering een stroomsnelheid aan de bodem betreft. Bij getijwerking volgt uit de metingen een dieptegemiddelde stroomsnelheid van 2,0 m/s. Bij schroefstraalwerking volgt uit paragraaf 2.2.2 een maximale stroomsnelheid aan de bodem van 2,10 m/s voor de hoofdschroef¹ en 1,58 m/s voor de boegschroef. Om die reden wordt deze formulering enkel toegepast voor schroefwerking en niet voor getijwerking.

Voor de waterdiepte wordt een (minimale) waterdiepte van 2,0 m beschouwd. De waarden voor de turbulentie-intensiteit zijn de waarden vermeld in Beem *et al.* (2000).

Tabel 8 geeft een overzicht van de waarden gebruikt voor de berekening van het benodigde breuksteengewicht op de strandingsbank.

Tabel 8 – Overzicht parameterwaarden voor berekening breuksteengewicht aan de hand van de Shields-formulering aangepast voor stralen.

	Hoofdschroef	Boegschroef
U_b [m/s]	2,10	1,58
ρ_s [kg/m ³]	2650	2650
ρ_w [kg/m ³]	1000	1000
Δ [-]	1,65	1,65
r [-]	0,40	0,35
h [m]	2	2
D_{n50} [m]	0,27	0,09
W_{50} [kg]	53	2

¹ Deze snelheid gaat uit van een kielspeling van minimaal 1,0 m. Indien de kielspeling later zou zijn (i.e. 0,5 m), zal de snelheid toenemen tot 2,80 m/s. Dit vertaalt zich door in de noodzakelijke kalibers van breuksteen, waarbij de benodigde W_{50} toeneemt tot 700 kg ($d_{n50} = 0,64$ m).

2.3 Conclusies

Tabel 9 geeft een overzicht van het benodigd breuksteengewicht om te weerstaan aan getijwerking en aan schroefwerking.

Tabel 9 – Overzicht benodigd breuksteengewicht

	Getijwerking		Schröefwerking	
	Zonder schip	Met afgemeerd schip	Hoofdschroef	Boegschroef
Escameia & May	4 kg	7 kg	704 kg	84 kg
Pilarczyk	< 1 kg	2,8 kg	-	-
Maynord	1,3 kg	2,5 kg	-	-
Shields formulering aangepast voor stralen	-	-	53 kg	2 kg

- = formulering niet toegepast voor deze belasting

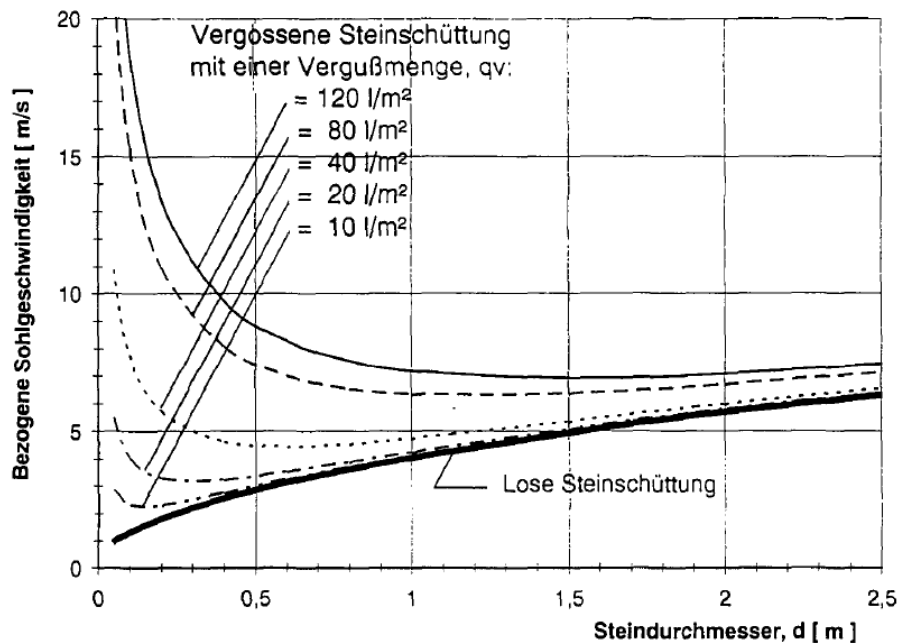
Uit Tabel 9 volgt dat de belasting veroorzaakt door de schroefwerking van de schepen veel belangrijker is dan de belasting door de getijdenstroming. Daarnaast volgt ook uit de tabel dat aan de hand van de formulering volgens Escameia & May een groter breuksteengewicht berekend wordt dan gebruik makend van de overige formuleringen. Dit volgt ook uit de Rock Manual (CIRIA; CUR, 2007), waarin enkel de formuleringen volgens Escameia & May, Pilarczyk en Maynord vermeld zijn. De Rock Manual vermeldt dat bij een normale turbulentie deze formuleringen vergelijkbare resultaten geven, waarbij met de formulering volgens Escameia & May iets hogere breuksteengewichten berekend worden dan met de overige formuleringen. Bij hoge turbulenties (zoals bij schroefstraalwerking) volgt dat met de formulering volgens Escameia & May een beduidend conservatieve waarde voor het breuksteengewicht berekend wordt in vergelijking met de overige formuleringen.

Op de strandingsbank is een zware steenbestorting 80/500 kg ($W_{50} = 290$ kg) aanwezig, dewelke opgevuld is met een kleinere sortering 0/80 kg ($W_{50} = 40$ kg). Hieruit volgt dat de "lichte" steenbestorting met kaliber 0/80 kg voldoende is wanneer enkel rekening gehouden wordt met getijwerking. Echter, wanneer de schroefwerking mee in rekening wordt gebracht, bij een kielspel van 1,0 m, neemt het mediaan breuksteengewicht W_{50} toe tot 53 kg (de formulering volgens Escameia geeft nog grotere waarden), waardoor minimaal een breuksteensortering 40 - 200 kg (sortering geselecteerd uit het Standaardbestek 260) nodig is. Hieruit blijkt dat de zware steenbestorting voldoende is, doch indien men opteert voor een extra fijnere bestorting, deze dus een groter kaliber (40 - 200 kg) dient te hebben dan de aanwezige fijnere bestorting (0/80 kg).

Als alternatief voor het aanbrengen van een nieuwe bestorting met kaliber 40 – 200 kg, kan worden geopteerd om de bestaande bestorting te penetreren met colloïdaal beton, indien dit uitvoer-technisch haalbaar is. Deze ingreep kan in de toekomst verdere erosie van de lichte breuksteensortering op de strandingsbank ten gevolge van de schroefwerking tegengaan.

Figuur 6 uit Römisch (2000) geeft het verband tussen de maximaal toelaatbare stroomsnelheid boven (met beton) gepenetreerde breuksteen en de breuksteendiameter.

Figuur 6 – Verband tussen maximaal toegelaten stroomsnelheid en breuksteendiameter voor (met beton) gepenetreerde breuksteen



Bron: Römisch (2000)

Uit Figuur 6 volgt dat breuksteen met diameters tussen 0,20 m en 0,30 m gepenetreerd met 120 l/m^2 kan weerstaan aan stroomsnelheden hoger dan $10,0 \text{ m/s}$. Römisch (2000) merkt hierbij wel op dat de weerstand van gepenetreerde breuksteen tegen stroomsnelheden tot $6,0$ à $8,0 \text{ m/s}$ bewezen is uit proeven en metingen, maar dat de toelaatbare stroomsnelheden hoger dan $6,0$ à $8,0 \text{ m/s}$ volgen uit theoretische berekeningen.

Door penetratie van de lichte breuksteensortering met colloïdaal beton kan deze bijgevolg weerstaan aan de hoge stroomsnelheden ten gevolge van de scheepvaart. De uitvoer-technische haalbaarheid (beschikbaar tijdvenster in het getij, aanwezigheid sediment tussen breuksteen, ...) van deze actie dient echter nog nagegaan te worden.

3 Sedimentatie

3.1 Analyse

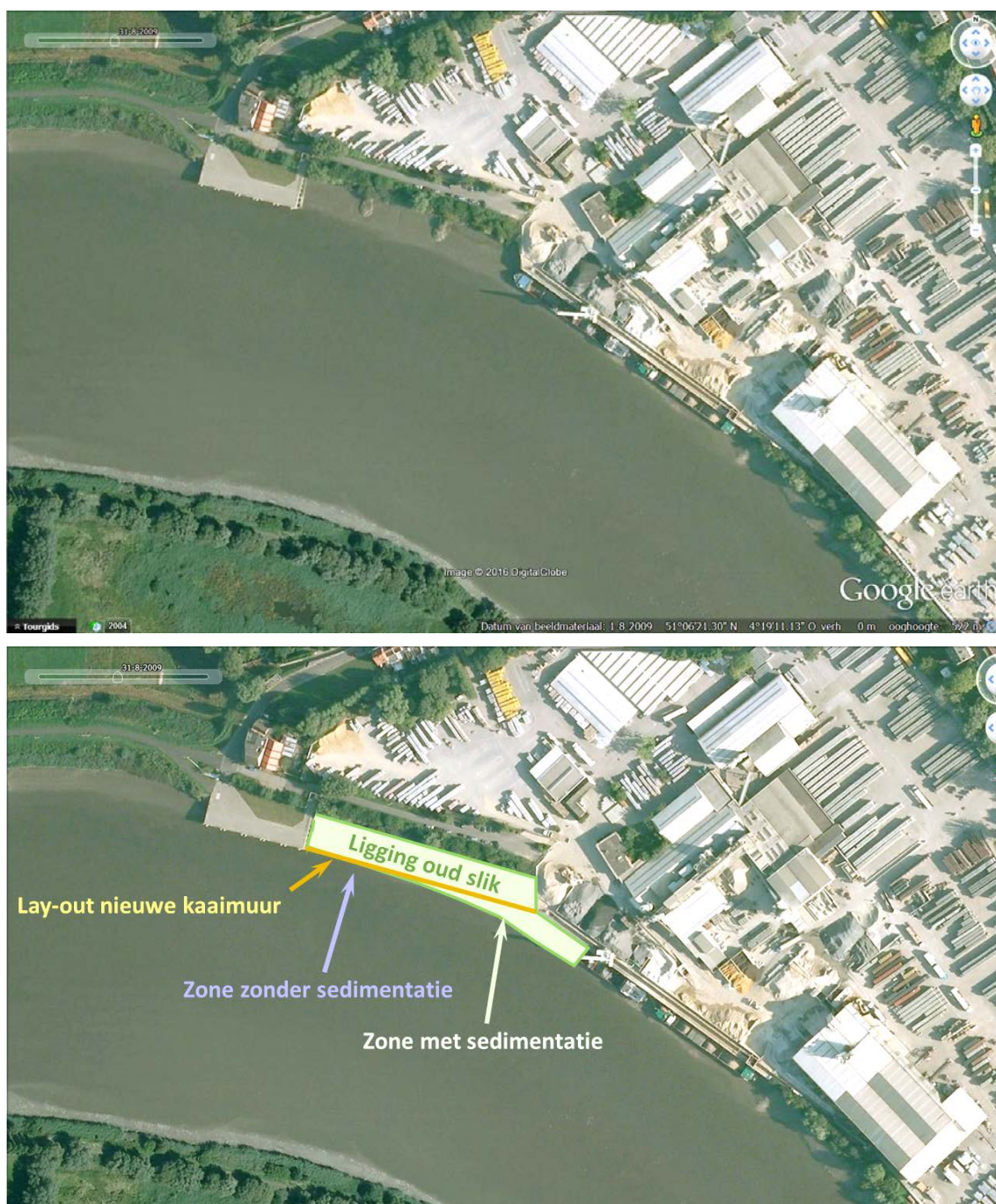
De kaaimuur van Betonfabriek Coeck is gelegen in een buitenbocht van de Rupel ter hoogte van Niel. Het diepste deel van een rivier is steeds in de buitenbocht gelegen aangezien de stroming de neiging heeft de buitenkant van de bocht op te zoeken (onder invloed van de centrifugaalkracht). In een estuarium is de toestand meestal gecompliceerder aangezien de aanstroming van de eb en van de vloed kan verschillen, waardoor de stroming niet altijd in hetzelfde deel van de geul geconcentreerd is. Tijdens de meetcampagne kon een ruimtelijke variatie vastgesteld worden waarbij enerzijds de stroomsnelheid nabij de kaaimuur aanzienlijk lager is dan in het centrale deel van de Rupel en anderzijds het afwaartse deel (gemeentelijke kaaimuur) ietwat hogere snelheden kent ten opzichte van het opwaartse deel nabij de oude kaaimuur.

Op basis van de historische luchtfoto's (Figuur 7 - toestand 2009) is vast te stellen dat de buitenkant van de bocht "versterkt" werd door enkele kribben, tussen de gemeentelijke kaaimuur en de oude kaaimuur van Coeck, oftewel ter hoogte van de locatie van de nieuwe kaaimuur. Dit geeft aan dat de Rupel hier inderdaad de neiging had/heeft om uit te bochten. Op dezelfde luchtfoto is echter ook te zien dat het slik (intergetijdengebied dat bij laagwater droogvalt, ook zichtbaar op luchtfoto) mede door de infrastructuurwerken (kaaimuren, kribben) redelijk breed is. Wanneer de nieuwe kaaimuur ingetekend wordt op deze oude luchtfoto, kan vastgesteld worden (Figuur 7 - onder) dat langs de opwaartse zijde van de nieuwe kaaimuur het oud slik breder was dan de positie van de kaaimuur, terwijl dit langs de afwaartse kant niet het geval is. Op basis hiervan – mits de veronderstelling dat de hydraulische en sedimenttransport condities niet significant gewijzigd zijn – kan dus ook worden verwacht dat de opwaartse kant gekenmerkt wordt door sedimentatie terwijl dit langs de afwaartse kant niet het geval is. Deze bevinding komt overeen met de vaststellingen op het terrein, waar ter hoogte van de aansluiting tussen de oude en de nieuwe kaaimuur een afzetting van sediment kan worden vastgesteld (Figuur 3).

3.2 Conclusies

De ruimtelijke variatie in sedimentatie kan toegeschreven worden aan twee processen. Ten eerste is er tijdens de stroommeting vastgesteld dat ter hoogte van de oude kaaimuur de stroomsnelheden, in beperkte mate, lager zijn dan ter hoogte van het afwaartse deel. Het type kaaimuur, gesloten versus open, speelt hier een belangrijke rol in, aangezien de stroming bij een open kaaimuur ook onder de kaaimuur kan, en minder afgeremd wordt dan bij een gesloten kaaimuur. Ten tweede is op basis van historische luchtfoto's vastgesteld dat langs de opwaartse zijde van de nieuwe kaaimuur het oud slik breder was dan de positie van de kaaimuur, terwijl dit langs de afwaartse kant niet het geval is. Op basis hiervan kan dus ook worden verwacht dat de opwaartse kant gekenmerkt wordt door sedimentatie terwijl dit langs de afwaartse kant niet het geval is.

Figuur 7 – Luchtfoto van de oude kaaimuur (boven) en zelfde luchtfoto met nieuwe kaaimuur ingetekend (onder)



4 Referenties

- Beem, R.C.A.; Boogaard, A.; Glerum, A.; de Graaf, M.A.; Henneberque, S.D.; Hiddinga, P.H.; Kranenburg, D.; van der Meer, M.T.J.; Nagtegaal, G.; Van der Paverd, M.; Smink, L.M.C.; Vrijburcht, A.; Weijers, J.** (2000). Ontwerp van schutsluizen: deel 2. Bouwdienst Rijkswaterstaat: Utrecht. ISBN 90-369-3306-4
- CIRIA; CUR.** (2007). Manual on the use of rock in hydraulic engineering (2nd edition)
- Escameia, M.** (1998). River and channel revetments – A design manual. Thomas Telford.
- Geerts, S.; Verwerft, B.; Vantorre, M.; Delefortrie, G.; Mostaert, F.** (2011). Modelproeven voorspelling manoeuvreergedrag binnenvaart: Deelrapport 7 - Derde driemaandelijke rapportering wetenschappelijke bijstand Ugent. *WL Rapporten*, 809_01. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- MarCom Working Group 180.** (2015). Guidelines for protecting berthing structures from scour caused by ships. *PIANC Report*. PIANC: Brussels. ISBN 978-2-87223-223-9
- Members of the Committee for Waterfront Structures.** (2006). Recommendations of the committee for waterfront structures harbours and waterways: EAU 2004. Ernst & Sohn: Berlin. ISBN 978-3-433-01666-4
- Pilarczyk, K.W.** (1990). Proceedings of the short course on coastal protection, Delft University of Technology / 30 June-1 July 1990. Balkema: Rotterdam. ISBN 90-6191-127-3
- Römis, K.** (2000). Strömungsstabilität vergossener Steinschüttungen. *Wasserwirtschaft* 90 7–8: 356
- ten Hove, D.** (2010). Scheepskarakteristieken van nieuwe grote schepen. Rapport nr. 24032.600/2. 10/02/2010. MARIN: Wageningen: Nederland
- Vanlierde, E.; Michielsen, S.; Vereycken, K.; Hertoghs, R.; Meire, D.; Deschamps, M.; Verwaest, T.; Mostaert, F.** (2016). Tienjarig overzicht van de tijwaarnemingen in het Zeescheldebekken: Decennium 2001-2010. Versie 4.0. *WL Rapporten*, 12_071. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België.
- Verelst, K.; Vercruysse, J.; Taverniers, E.; De Mulder, T.; Verwilligen, J.; Peeters, P.; Mostaert, F.** (2016). Ondersteuning ontwerp klasse Vb-sluiz te Sint-Baafs-Vijve: Deelrapport 4 – Dimensionering erosiebescherming stuwsluiz. Versie 11.0. 1 *WL Rapporten*, 12_142: Antwerpen, België.

DEPARTEMENT **MOBILITEIT & OPENBARE WERKEN**
Waterbouwkundig Laboratorium

Berchemlei 115, 2140 Antwerpen

T +32 (0)3 224 60 35

F +32 (0)3 224 60 36

waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be

www.waterbouwkundiglaboratorium.be