

18_082_1
WL rapporten

Kanaal Bossuit - Kortrijk

Dimensionering oever – en bodembescherming
kaaimuur BSV

Kanaal Bossuit - Kortrijk

Dimensionering oever – en bodembescherming kaaimuur BSV

Verelst, K.; Visser, K.P.

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 2023
D/2023/3241/011

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Verelst, K.; Visser, K.P. (2023). Kanaal Bossuit - Kortrijk: Dimensionering oever – en bodembescherming kaaimuur BSV. Versie 2.0. WL Rapporten, 18_082_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

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

Documentidentificatie

Oprachtgever:	De Vlaamse Waterweg nv Afdeling Regio West	Ref.:	WL2023R18_082_1
Trefwoorden (3-5):	Quay wall, erosion protection, thruster, dimensioning		
Kennisdomeinen:	Waterbouwkundige constructies		
Tekst (p.):	47	Bijlagen (p.):	/
Vertrouwelijk:	<input checked="" type="checkbox"/> Nee	<input checked="" type="checkbox"/> Online beschikbaar	

Auteur(s):	Verelst, K.
------------	-------------

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Visser, K.P.	Getekend door:Klaas Visser (Signature) Getekend op:2023-01-16 16:50:46 +01:0 Reden:Ik keur dit document goed <i>Klaas Pieter Visser</i>
Projectleider:	Verelst, K.	Getekend door:Kristof Verelst (Signature) Getekend op:2023-01-16 16:30:02 +01:0 Reden:Ik keur dit document goed <i>Kristof Verelst</i>

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Bellafkih, K.	Getekend door:Abdelkarim Bellafkih (Sig) Getekend op:2023-01-17 11:11:46 +01:0 Reden:Ik keur dit document goed <i>Abdelkarim Bellafkih</i>
-----------------	---------------	---



Abstract

Op het Kanaal Bossuit-Kortrijk is ter hoogte van het bedrijf Devamix te Harelbeke erosie van de bodem nabij de kaaimuur vastgesteld. Op vraag van De Vlaamse Waterweg nv afdeling Regio West heeft het studiebureau SBE daarom reeds een ontwerp gemaakt van de oeverbescherming opwaarts en afwaarts van de kaaimuur en de bodembescherming ter plaatse van een nieuw te bouwen (meer naar achter gelegen) kaaimuur op deze locatie. Op dit ogenblik is er echter een studie lopende naar opwaardering van het Kanaal Bossuit-Kortrijk, waarbij een waterpeilverlaging van maximaal 1.0 m en een verlaging van het bodempeil mogelijke opties zijn. Dit betekent dat een herstelling van de ontgronding en van de oeverbekleding volgens de wijze voorgesteld door het studiebureau op dit ogenblik niet mogelijk is, aangezien de voorgestelde werkwijze een relatief definitief karakter heeft en mogelijk bij opwaardering van het kanaal nog moet aangepast worden. Om die reden vraagt de Vlaamse Waterweg nv afdeling Regio West om de dimensionering uit te voeren van de nodige bodembescherming ter plaatse van de kaaimuur en de nodige bodembescherming en oeverbescherming in de zones opwaarts en afwaarts van de kaaimuur voor drie mogelijke scenario's: de huidige toestand met het huidige bodempeil, de huidige toestand met een verlaagd bodempeil en het ontwerpscenario bestaande uit het meest bepalende scenario (wat betreft bodem- en oeverbescherming) uit de opwaarderingsstudie van het kanaal.

Voor elk van deze drie scenario's is vooreerst de hydraulische belasting op de bodem bepaald. De oeverbescherming opwaarts en afwaarts van de kaaimuur en de bodembescherming ter plaatse van de kaaimuur is voornamelijk onderhevig aan de stroming ten gevolge van scheepvaart, namelijk stroming ten gevolge van hoofdschroef en boegschroef en retourstroming. De oeverbescherming opwaarts en afwaarts van de kaaimuur is daarnaast ook onderhevig aan golfklap ten gevolge van scheepsgolven.

Daarna is voor elk beschouwd scenario de dimensionering uitgevoerd van de bodembescherming en de oeverbescherming. Hieruit volgt dat ter plaatse van de kaaimuur in het scenario met het huidige bodempeil enkel breuksteensortering gepenetreerd met colloïdaal beton kan weerstaan aan de optredende hoge stroomsnelheden ten gevolge van scheepvaart. In het scenario waarbij het bodempeil met 1.0 m wordt verlaagd is ter plaatse van de kaaimuur een bodembescherming uit niet-gepenetreeerde breuksteen mogelijk (sortering 5-40 kg of 10-60 kg). In beide scenario's is opwaarts en afwaarts van de kaaimuur een breuksteensortering 5-40 kg voldoende als bodembescherming. Wat de oeverbescherming betreft is in deze beide scenario's eigenlijk breuksteen gepenetreerd met beton nodig. Het opleggen van restricties van het gebruik van de boegschroef in deze zone door de opdrachtgever maakt echter dat in het scenario met verlaagd bodempeil ook een oeverbescherming bestaande uit niet-gepenetreeerde breuksteen (sortering 5-40 kg) mogelijk is. Bij het ontwerpscenario is zowel ter plaatse van de kaaimuur als opwaarts en afwaarts van de kaaimuur een bodembescherming bestaande uit met beton gepenetreerde breuksteen (sortering 5-40 kg of sortering 10-60 kg) noodzakelijk. Na opwaardering van het kanaal wordt als oeverbescherming opwaarts en afwaarts van de kaaimuur een verticale oever voorzien.

Wat het opvullen van de erosiekuilen betreft, is door de opdrachtgever gesuggereerd om deze op te vullen met kleigrond, dewelke bij de bouw van een nieuwe kaaimuur op overschot is. Klei kan echter niet weerstaan aan de relatief hoge stroomsnelheden aan de bodem die ten gevolge van scheepvaart zullen optreden, waardoor snel opnieuw erosiekuilen zullen ontstaan op dezelfde locatie. Het is wel een optie om de erosiekuilen gedeeltelijk op te vullen met de beschikbare kleigrond en deze daarna te bedekken met breuksteen tot het juiste bodempeil bekomen is. Als alternatieve types bodembescherming kunnen ook betonmatrassen, een bodembescherming uit colloïdaal beton en voorgevormde matten (bijvoorbeeld asfaltmatten, blokkenmatten of schanskorfmatten) weerstaan aan grotere stroomsnelheden dan breuksteen. De keuze tussen deze alternatieven is afhankelijk van kostprijs en het feit of deze even makkelijk weg te nemen zijn als breuksteen bij de toekomstige verdieping van het kanaal. Dit behoort echter niet tot het onderwerp van deze studie.

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	IV
Lijst van de tabellen.....	VI
Lijst van de figuren	VIII
1 Inleiding	1
2 Gegevens	3
2.1 Kanaal en kaaimuur	3
2.2 Waterstand.....	5
2.3 Scheepvaart.....	5
2.4 Breuksteensorteringen	7
3 Hydraulische belastingen	9
3.1 Types hydraulische belastingen.....	9
3.2 Stroming ten gevolge van retourstroming	10
3.3 Stroming ten gevolge van hoofdschroef	13
3.4 Stroming ten gevolge van de boegschroef.....	15
3.5 Scheepgolven	22
4 Dimensionering oeverbescherming en bodembescherming	24
4.1 Algemeen.....	24
4.2 Methodologie	26
4.3 Resultaten bodembescherming en oeverbescherming voor scenario 1.....	31
4.3.1 Bodembescherming ter plaatse van kaaimuur.....	31
4.3.2 Oeverbescherming in zones opwaarts en afwaarts van de kaaimuur	31
4.3.3 Bodembescherming in zones opwaarts en afwaarts van kaaimuur.....	34
4.3.4 Samenvatting bodem- en oeverbescherming	34
4.4 Resultaten bodembescherming en oeverbescherming voor scenario 2.....	35
4.4.1 Bodembescherming ter plaatse van kaaimuur.....	35
4.4.2 Oeverbescherming in zones opwaarts een afwaarts van de kaaimuur	35
4.4.3 Bodembescherming in zones opwaarts en afwaarts van de kaaimuur.....	37
4.4.4 Samenvatting bodem- en oeverbescherming	38
4.5 Resultaten bodembescherming en oeverbescherming voor scenario 3.....	39
4.5.1 Bodembescherming ter plaatse van kaaimuur.....	39
4.5.2 Oever- en bodembescherming in zones opwaarts en afwaarts van de kaaimuur.....	39

5	Opvullen van erosiekuilen	40
6	Conclusies	43
7	Referenties	46

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Waterstand kanaal Bossuit-Kortrijk in de huidige toestand	5
Tabel 2 – Afmetingen maatgevende schepen	5
Tabel 3 – Karakteristieken hoofdschroef en boegschroef voor de beschouwde maatgevende schepen	6
Tabel 4 – Beschouwde breuksteensorteringen	7
Tabel 5 – Overzicht types hydraulische belastingen	9
Tabel 6 – Resultaten berekening vaarsnelheid	11
Tabel 7 – Resultaten berekening retourstroomsnelheid	12
Tabel 8 – Berekening stroomsnelheid aan bodem ten gevolge van hoofdschroef.....	14
Tabel 9 – Berekening stroomsnelheid uittredende straal.....	15
Tabel 10 – Berekening stroomsnelheid aan bodem ten gevolge van boegschroef op een gehele oever	17
Tabel 11 – Berekening stroomsnelheid aan bodem ten gevolge van boegschroef tegen een rechte kaaimuur	19
Tabel 12 – Berekening stroomsnelheid aan bodem ten gevolge van boegschroef bij wegvaren.....	21
Tabel 13 – Berekening golfhoogte en golfperiode van scheepsgolven.....	23
Tabel 14 – Scenario 1: Resultaten dimensionering bodembescherming ter plaatse van de kaaimuur.....	31
Tabel 15 – Scenario 1: resultaten dimensionering oeverbekleding aan de hand van formulering volgens Pilarczyk.....	32
Tabel 16 – Scenario 1: resultaten dimensionering oeverbekleding aan de hand van Shields-formulering aangepast voor stralen	32
Tabel 17 – Scenario 1: resultaten dimensionering oeverbekleding aan de hand van de formulering volgens Laboyrie	32
Tabel 18 - Scenario 1: resultaten oeverbekleding onderhevig aan scheepsgolven aan de hand van de formulering volgens Pilarczyk.....	33
Tabel 19 – Scenario 1: resultaten bepaling breuksteensortering voor oeverbescherming	33
Tabel 20 - Resultaten dimensionering gepenetreerde breuksteen als oeverbekleding onderhevig aan golfklap ten gevolge van secundaire scheepsgolven aan de hand van de formulering volgens Pilarczyk	34
Tabel 21 – Overzicht benodigde bodem- of oeverbescherming voor scenario 1	34
Tabel 22 – Scenario 2: Resultaten dimensionering bodembescherming ter plaatse van de kaaimuur	35
Tabel 23 – Scenario 2: Resultaten dimensionering oeverbekleding aan de hand van formulering volgens Pilarczyk.....	36
Tabel 24 – Scenario 2: Resultaten dimensionering oeverbekleding aan de hand van Shields-formulering aangepast voor stralen	36
Tabel 25 – Scenario 2: Resultaten dimensionering breuksteen als oeverbekleding onderhevig aan golfklap aan de hand van de formulering volgens Laboyrie	36
Tabel 26 – Scenario 2: Resultaten dimensionering breuksteen als oeverbekleding onderhevig aan golfklap ten gevolge van secundaire scheepsgolven aan de hand van de formulering volgens Pilarczyk.....	37

Tabel 27 – Scenario 2: Resultaten bepaling breuksteensortering voor oeverbescherming	37
Tabel 28 – Overzicht benodigde bodem- of oeverbescherming voor scenario 2	38
Tabel 29 – Scenario 3: Resultaten dimensionering bodembescherming ter plaatse van de kaaimuur	39
Tabel 30 – Kritische stroomsnelheid voor erosie (V_c) van klei (MarCom Working Group 180, 2015)	41
Tabel 31 – Benodigde dikte plaat colloïdaal beton of asfaltmatten	42
Tabel 32 – Overzicht benodigde bodembescherming of oeverbescherming	44

Lijst van de figuren

Figuur 1 – Locatie kaaimuur	1
Figuur 2 – locatie kaaimuur BSV	3
Figuur 3 – Ontwerp gehelde oever in zone naast kaaimuur bij scenario 1	4
Figuur 4 – Ontwerp gehelde oever in zone naast kaaimuur bij scenario 2	4
Figuur 5 – Principeschets schip in vaarweg voor bepaling afstand tussen zijkant schip en oever.	10
Figuur 6 – Principeschets schip in vaarweg voor bepaling afstand L tussen helling en uitstroomopening van boegschroef	16
Figuur 7 – Variatie van de stroomsnelheid aan de bodem naast de kaaimuur ten gevolge van de boegschroef	20
Figuur 8 – Locaties waar oeverbescherming en bodembescherming wordt voorzien.	24
Figuur 9 – Verband tussen maximaal toegelaten stroomsnelheid en breuksteendiameter voor (met beton) gepenetreerde breuksteen.....	29
Figuur 10 – Bathymetrie voor de bestaande kaaimuur.....	40
Figuur 11 – Locaties waar oeverbescherming en bodembescherming wordt voorzien	44

1 Inleiding

Op het Kanaal Bossuit-Kortrijk is ter hoogte van het bedrijf Devamix te Harelbeke erosie van de bodem nabij de kaaimuur vastgesteld. Figuur 1 situeert de kaaimuur. In deze figuur is de kaaimuur in paars gekleurd.



Figuur 1 – Locatie kaaimuur

Op vraag van De Vlaamse Waterweg nv afdeling Regio West (D VW) heeft het studiebureau SBE een ontwerp gemaakt van de oeverbescherming opwaarts en afwaarts van de kaaimuur en de bodembescherming ter plaatse van de kaaimuur bij een nieuw te bouwen (meer naar achter gelegen) kaaimuur op deze locatie. Hiervoor werd een oeverbescherming voorgesteld bestaande uit een verankerde damwand ofwel een oeverbescherming bestaande uit gepenetreerde breuksteen onder helling 4/4 bovenop een onderwaterdamplank.

Op dit ogenblik is echter een studie lopende naar opwaardering van het Kanaal Bossuit-Kortrijk, waardoor onder meer het bodempeil van het kanaal nog niet vast ligt. Bij de opwaardering van het kanaal Bossuit-Kortrijk is namelijk een waterpeilverlaging van maximaal 1 m, inclusief verlaging van het bodempeil, één van de opties. Dit betekent dat een herstelling van de ontgronding en van de oeverbekleding volgens de wijze voorgesteld door het studiebureau in dat geval niet mogelijk is, aangezien de voorgestelde werkwijze een relatief definitief karakter heeft en mogelijk bij opwaardering van het kanaal nog moet aangepast worden. Daarnaast geldt ook dat de dimensionering van oeverbescherming en bodembescherming door het studiebureau is uitgevoerd voor een ontwerpdiepgang van het schip CEMT klasse Va na opwaardering van het kanaal gelijk aan 3.5 m, terwijl de diepgang van de schepen op dit ogenblik begrensd is tot 2.6 m.

Daarom vraagt DVW (contactpersoon: Dries Depreeuw) aan het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) om de dimensionering uit te voeren van een bodembescherming voor de bestaande kaaimuur voor een aantal mogelijke scenario's. De volgende scenario's worden beschouwd voor de dimensionering van de bodembescherming ter plaatse van de kaaimuur en de oeverbescherming in de zone opwaarts en afwaarts van de kaaimuur:

- 1) Scenario 1: Bij dit tijdelijke scenario wordt het schip CEMT klasse Va als maatgevend schip beschouwd met een diepgang gelijk aan de huidige diepgang op het kanaal van 2.6 m. Het bodempeil ter plaatse van de kaaimuur is in dit scenario gelijk aan het huidig bodempeil +12.75 mTAW. De gemiddelde waterdiepte is daarmee 4.45 m. Opwaarts en afwaarts van de kaaimuur wordt een tijdelijke oeverbescherming beschouwd bestaande uit breuksteen onder helling 6/4.
- 2) Scenario 2: Bij dit tijdelijke scenario wordt het schip CEMT klasse IV als maatgevend schip beschouwd met een diepgang gelijk aan de huidige diepgang van 2.6 m. Het bodempeil ter plaatse van de kaaimuur wordt met 1 m verlaagd en is in dit scenario daarmee gelijk aan bodempeil +11.75 mTAW, i.e. het bodempeil na opwaardering van het kanaal. De gemiddelde waterdiepte bedraagt in dat geval 5.45 m. Daarnaast wordt opwaarts en afwaarts van de kaaimuur een tijdelijke oeverbescherming beschouwd uit breuksteen onder helling 10/4 en wordt door de opdrachtgever in de zones opwaarts en afwaarts van de kaaimuur met gehele oeverbescherming een beperking op het gebruik van de boegschroef opgelegd.
- 3) Scenario 3: Dit is het ontwerpscenario en betreft het meest bepalende scenario (wat betreft bodem- en oeverbescherming) uit de opwaarderingsstudie van het Kanaal Bossuit-Kortrijk. In dit scenario wordt rekening gehouden met een verlaging van het waterpeil van het kanaal van 0.95 m, een verlaging van het bodempeil met 1.0 m tot +11.75 mTAW (de gemiddelde waterdiepte bedraagt in dat geval van 4.5 m) en een schip CEMT klasse Va of CEMT klasse Va+ met diepgang 3.5 m. Wat de oeververdediging in dit scenario betreft is een gehele oever niet meer mogelijk, maar wordt een verticale oever voorzien.

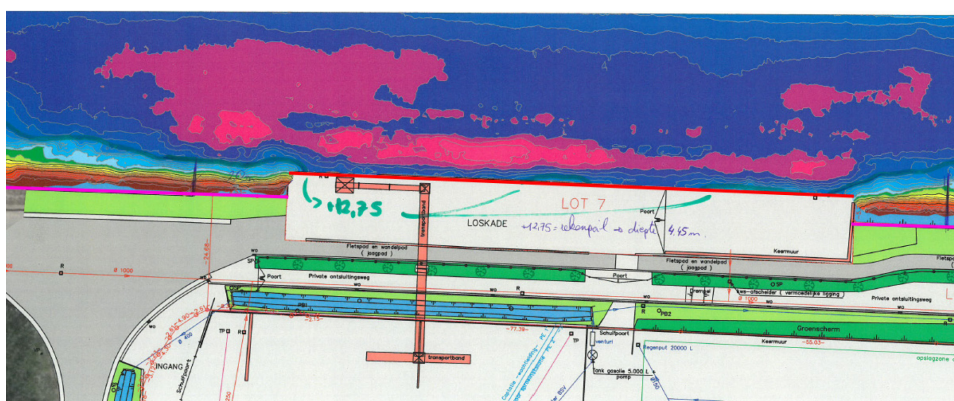
Naast de dimensionering van de oeverbescherming en bodembescherming wordt ook gevraagd of er alternatieven zijn voor breuksteen om de aanwezige ontgrondingskuilen (tijdelijk) op te vullen in afwachting van een definitieve oplossing bij opwaardering van het kanaal in de toekomst.

Hoofdstuk 2 van dit rapport beschrijft de gegevens gebruikt voor de dimensionering van de bodembescherming ter plaatse van de bestaande kaaimuur en de oeverbescherming opwaarts en afwaarts van de bestaande kaaimuur. De bepaling van de hydraulische belasting op de bodem wordt uitgevoerd in hoofdstuk 3. De resultaten van de dimensionering van de bodembescherming ter plaatse van de kaaimuur en de oever- en bodembescherming opwaarts en afwaarts van de kaaimuur wordt beschreven in hoofdstuk 4, terwijl in hoofdstuk 5 enkele alternatieven voor breuksteen voor het opvullen van de aanwezige erosiekuilen beschreven worden. Hoofdstuk 6 vat de conclusies van dit rapport samen.

2 Gegevens

2.1 Kanaal en kaaimuur

In Figuur 2 zijn met behulp van een rode en een paarse lijn de locaties aangeduid waar bodembescherming en/of oeverbescherming dient te worden voorzien. Ter plaatse van de kaaimuur is het kanaal ca. 50 m breed. Het huidige bodempeil van het kanaal op deze locatie bedraagt +12.75 mTAW. Na opwaardering van het kanaal wordt dit bodempeil verdiept met 1.0 m tot +11.75 mTAW.

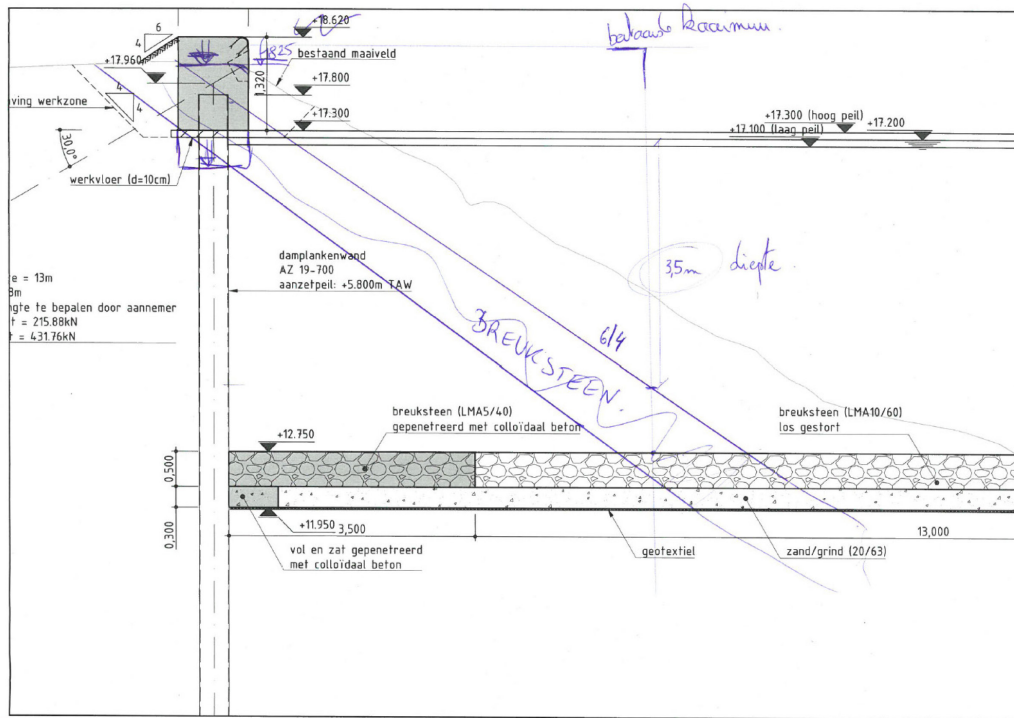


LEGENDE					
nummer	bodempcil in mTAW		kleurcode	waterdiepte in m	
	min. bodempcil	max. bodempcil		min. waterdiepte	max. waterdiepte
1	16.60	17.20		0.00	0.60
2	16.35	16.60		0.60	0.85
3	16.10	16.35		0.85	1.10
4	15.85	16.10		1.10	1.35
5	15.60	15.85		1.35	1.60
6	15.35	15.60		1.60	1.85
7	15.10	15.35		1.85	2.10
8	14.85	15.10		2.10	2.35
9	14.60	14.85		2.35	2.60
10	14.35	14.60		2.60	2.85
11	14.10	14.35		2.85	3.10
12	13.85	14.10		3.10	3.35
13	13.60	13.85		3.35	3.60
14	13.35	13.60		3.60	3.85
15	13.10	13.35		3.85	4.10
16	12.85	13.10		4.10	4.35
17	12.60	12.85		4.35	4.60
18	12.35	12.60		4.60	4.85
19	12.10	12.35		4.85	5.10
20	11.85	12.10		5.10	5.35
21	11.60	11.85		5.35	5.60
22	11.35	11.60		5.60	5.85
23	11.12	11.35		5.85	6.08
24	...	...		...	...
25	...	...		...	...

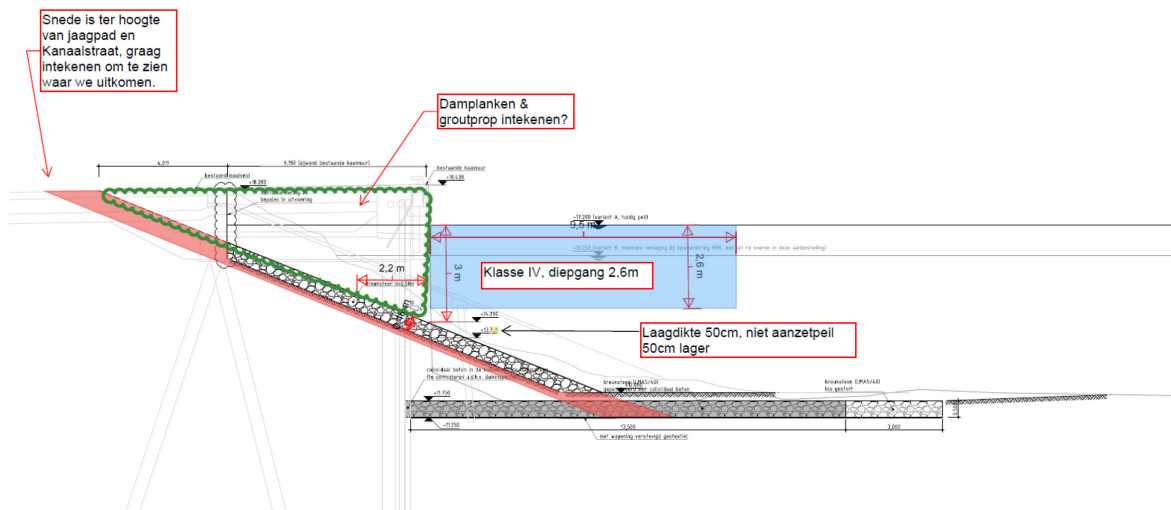
Figuur 2 – locatie kaaimuur BSV

Rode lijn: huidige kaaimuur BSV; paarse lijn: zone naast kaaimuur waar oeverbescherming wordt voorzien

In de zone opwaarts en afwaarts van de kaaimuur, aangeduid in Figuur 2 met de paarse lijn, wordt een gehelde oever voorzien. De teen van deze gehelde oever bevindt zich op een afstand voorbij het kaavlak van de bestaande kaaimuur. Bij scenario 1 heeft deze oever een helling 6/4. In dit scenario is in het verlengde van het kaavlak van de huidige kaaimuur boven de gehelde oever een minimale waterdiepte van 3.5 m aanwezig. Het ontwerp van deze oever is voorgesteld in Figuur 3. Bij scenario 2 heeft de gehelde oever een helling 10/4. In dit scenario is in het verlengde van het kaavlak van de huidige kaaimuur boven de gehelde oever een minimale waterdiepte van 3.0 m aanwezig. Dit ontwerp is voorgesteld in Figuur 4. Ter plaatse van de teen van de gehelde oever is de gemiddelde waterdiepte in het kanaal vermeld in hoofdstuk 1 aanwezig, namelijk 4.45 m bij scenario 1 en 5.45 m bij scenario 2.



Figuur 3 – Ontwerp gehelde oever in zone naast kaaimuur bij scenario 1



Figuur 4 – Ontwerp gehelde oever in zone naast kaaimuur bij scenario 2

2.2 Waterstand

Tabel 1 geeft een overzicht van het minimaal, gemiddeld en maximaal waterpeil op het kanaal Bossuit – Kortrijk in de huidige toestand. Bij scenario 1 en scenario 2 wordt voor de dimensionering van de oeverbescherming en de bodembescherming het streefpeil +17.20 mTAW beschouwd. Scenario 3 betreft een scenario na opwaardering van het Kanaal Bossuit-Kortrijk en verlaging van het streefpeil met 0.95 m. Het gemiddeld waterpeil bij dit scenario bedraagt +16.25 mTAW.

Tabel 1 – Waterstand kanaal Bossuit-Kortrijk in de huidige toestand

Minimaal waterpeil	+17.10 mTAW
Gemiddeld waterpeil	+17.20 mTAW
Maximaal waterpeil	+17.30 mTAW

2.3 Scheepvaart

Op het kanaal Bossuit – Kortrijk is op dit ogenblik scheepvaart tot CEMT klasse Va toegelaten. In de huidige toestand bedraagt de maximaal toegelaten diepgang 2.6 m. Bij scenario 1 wordt als maatgevend schip het schip CEMT klasse Va beschouwd met diepgang 2.6 m, bij scenario 2 het schip CEMT klasse IV met diepgang 2.6 m. Scenario 3 betreft het scenario na opwaardering van het kanaal. Hiervoor wordt het schip CEMT klasse Va met diepgang 3.5 m en het schip CEMT klasse Va+ met diepgang 3.5 m beschouwd. Tabel 2 geeft een overzicht van de afmetingen van de voor het ontwerp van de oeverbescherming en bodembescherming toegepaste maatgevende schepen.

Tabel 2 – Afmetingen maatgevende schepen

	CEMT klasse IV	CEMT klasse Va	CEMT klasse Va+
Lengte	105.0 m	110.0 m	135.0 m
Breedte	9.5 m	11.4 m	11.4 m
Diepgang (ongeladen)	1.5 m	1.5 m	1.5 m
Diepgang (geladen)	2.6 m	2.6 m en 3.5 m	3.5 m

Tabel 3 geeft voor deze scheepstypes een overzicht van de voor deze studie toegepaste de karakteristieken van hoofdschroef en boegschroef. Deze gegevens zijn als volgt bepaald:

1) Schip CEMT klasse IV

“Ontwerp van Schutsluizen” (Beem et al., 2000a) vermeldt als voorbeeld een schip CEMT-klasse IV, met een totaal geïnstalleerd motorvermogen van 1200 kW, uitgerust met een schroef/straalbus-combinatie van ofwel 1 schroef met diameter 1.70 m, ofwel 2 schroeven met diameter 1.60 m. Het motorvermogen, indien vermeld, van de schepen die op de website www.debinnenvaart.nl (Anon., 2012) als voorbeeld gegeven worden, varieert tussen 1200 pk en 1700 pk (omgerekend ca. 880 à 1200 kW). Dit zijn dezelfde waarden als toegepast bij de dimensionering van de bodembescherming voor de sluis te Denderbelle (Verelst *et al.*, 2013).

2) Schepen CEMT klasse Va en CEMT klasse Va+

De vermogens van hoofdschroef en boegschroef zijn bepaald 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 Tabel 3 worden zowel de 50 %- als de 90 %-percentiel van het geïnstalleerde motorvermogen voor de hoofdschroef vermeld. Voor de bepaling van de hydraulische belastingen ten gevolge van de hoofdschroef (zie paragraaf 3.3) in dit rapport wordt de 90 % - percentielwaarde voor dit vermogen toegepast. Voor de boegschroef van het schip CEMT klasse Va+ wordt hetzelfde aantal schroeven en motorvermogen beschouwd als toegepast bij de dimensionering van de bodembescherming voor de nieuwe sluis te Sint-Baafs-Vijve (Verelst *et al.*, 2016).

Tabel 3 – Karakteristieken hoofdschroef en boegschroef voor de beschouwde maatgevende schepen

		CEMT klasse IV		CEMT klasse Va	CEMT klasse Va+
		1	2	1	2
Hoofdschroef	Aantal schroeven	1	2	1	2
	Motorvermogen 50% - percentiel	-	-	1300 kW	1800 kW
	Motorvermogen 90% - percentiel	1200 kW	1200 kW	1800 kW	2200 kW
	Diameter schroef	1.70 m	1.60 m	2.00 m	2.00 m
Boegschroef	Aantal schroeven	1	1	1	2
	Totaal motorvermogen boegschroef	450 kW	450 kW	450 kW	840 kW
	Diameter schroef	1.20 m	1.20 m	1.20 m	1.20 m

Bij de in Tabel 3 vermelde waarden moet het volgende opgemerkt worden:

- De onderzijde van zowel de hoofdschroef als de boegschroef wordt verondersteld samen te vallen met de kiel van het schip. Dit is een conservatieve benadering, aangezien in werkelijkheid de hoofdschroef en de boegschroef zich op een kleine afstand boven de kiel van het schip bevinden.
- Uit de bepaling van de hydraulische belastingen (hoofdstuk 3) en de dimensionering van de bodembescherming (hoofdstuk 4) volgt dat de stroomsnelheden ten gevolge van hoofdschroeven en boegschroeven het meest bepalend zijn bij de dimensionering van de bodembescherming. Om die reden zou het interessant zijn voor vermogen en diameter van hoofdschroef en boegschroef een range van waarden te beschouwen. Op deze wijze zou een inschatting kunnen gemaakt worden van de gevoeligheid van de berekende bodembescherming aan deze parameters. Dit vereist echter verder onderzoek naar gegevens met betrekking tot aanwezige diameters en vermogens van hoofdschroeven en boegschroeven van schepen CEMT klasse IV, CEMT klasse Va en CEMT klasse Va+. In deze studie echter wordt (conservatief) de maximale waarde voor deze parameters beschouwd.

2.4 Breuksteensorteringen

Voor het selecteren van een breuksteensortering worden de verschillende klassen voor breuksteen uit de norm voor waterbouwsteen NBN EN 13383 (BIN, 2002) beschouwd. Tabel 4 geeft een overzicht van de in het standaardbestek 260 voor de waterbouw beschouwde klassen voor breuksteen.

Tabel 4 – Beschouwde breuksteensorteringen

Sortering	M ₅₀ [kg]	D _{n50} [m]	Laagdikte [m]
5 – 40 kg	14 – 28	0.17 – 0.21	0.42
10 – 60 kg	27 – 47	0.21 – 0.26	0.52
15 -120 kg	45 - 78	0.26 – 0.31	0.62
40 – 200 kg	101 – 152	0.32 – 0.37	0.74
60 – 300 kg	149 – 236	0.38 – 0.43	0.86
15 – 300 kg	70 – 211	0.30 – 0.43	0.86

Bron: NBN EN 13383 (BIN, 2002);

M₅₀: Mediaan breuksteengewicht; D_{n50}: Mediaan breuksteendiameter

Bij deze breuksteensorteringen moet het volgende opgemerkt worden:

- De norm voor waterbouwsteen NBN EN 13383 (BIN, 2002) vermeldt ook een aantal lichtere breuksteensorteringen dan 5-40 kg, dewelke niet vermeld zijn in het standaardbestek 260 voor de waterbouw. Uit de dimensionering van de oeverbescherming en de bodembescherming in hoofdstuk 4 volgt dat om te weerstaan aan de hoge hydraulische belastingen van hoofdschroef en boegschroef van scheepvaart minimaal een breuksteensorteringen gelijk aan 5-40 kg benodigd is. Om die reden is in dit rapport de kleinste breuksteensortering (sortering 5-40 kg) uit het standaardbestek 260 voor de waterbouw beschouwd bij de gevallen waarbij een nominale breuksteendiameter D_{n50} berekend wordt die beduidend kleiner is dan 0.17 m.
- De breuksteensorteringen uit het standaardbestek 260 voor de waterbouw zijn dezelfde als vermeld in de norm voor waterbouwsteen NBN EN 13383 (BIN, 2002). Aan de norm voor waterbouwsteen NBN EN 13383 zal in de toekomst de breuksteensortering 15 – 120 kg (45 kg < M₅₀ < 78 kg) toegevoegd worden. Waar nodig zal ook deze verdeling in deze studie reeds toegepast worden. De breuksteensortering uit Tabel 4 worden gekarakteriseerd door een gemiddeld breuksteengewicht. Om de laagdikte te bepalen, is dit gemiddeld breuksteengewicht omgerekend naar de bijbehorende nominale breuksteendiameter D_{n50}.
- Voor elke sortering wordt in Tabel 4 een laagdikte van de breuksteensortering vermeld. Deze is berekend als het maximum van de volgende 3 voorwaarden (CIRIA; CUR, 2007; De Rouck, s.d.):

$$t = 1.25 D_{n50}$$

$$t = n \cdot k_t \cdot D_{n50}$$

$$t \geq 0.30$$

met:

- t	Theoretisch orthogonale laagdikte (laagdikte gemeten loodrecht op de bodem)	[m]
- D_{n50}	Mediaan nominale breuksteendiameter	[m]
- n	Aantal lagen (n = 2, De Rouck (n.d.))	[-]
- k_t	Laagdiktecoëfficiënt ($k_t = 1,00$)	[-]

Bij de berekening van de laagdikte moet het volgende opgemerkt worden:

- Voor de diameter D_{n50} wordt de maximale D_{n50} van de breuksteensortering beschouwd.
- De 3^e voorwaarde wordt enkel vermeld in De Rouck (n.d.) verwijzend naar de vorige editie van de Rock Manual (CIRIA; CUR, 1991). De Rouck (n.d.) vermeldt echter, om constructieve redenen, voor rivieren een minimale laagdikte van 0.50 m. In deze studie is een minimale laagdikte van 0.30 m gebruikt.
- De Rouck (n.d.) vermeldt dat voor rivieren “a standard double layer thickness” wordt toegepast. Dit betekent dat de laagdikte van de breuksteen standaard gelijk genomen wordt aan 2 maal de nominale breuksteendiameter ($n=2$).
- In De Rouck (n.d.) worden voor de laagdiktecoëfficiënt k_t bij een standaarduitvoering in één laag, waarvan de laagdikte gelijk is aan 2 maal de nominale diameter, waarden tussen 0.87 en 0.96 vermeld. In deze studie zal voor k_t , als conservatieve benadering, de waarde 1.00 beschouwd worden.

3 Hydraulische belastingen

3.1 Types hydraulische belastingen

De oeverbescherming opwaarts en afwaarts van de kaaimuur en de bodembescherming ter plaatse van de kaaimuur is voornamelijk onderhevig aan de stroming ten gevolge van scheepvaart, namelijk stroming ten gevolge van hoofdschroef en boegschroef en retourstroming. Wat stroming ten gevolge van de boegschroef betreft, wordt zowel de vrije uitstroming van een boegschroef van een manoeuvrerend schip beschouwd, als de uitstroming van de boegschroef tegen een rechte kaaimuur of de gehelde oever. De oeverbescherming opwaarts en afwaarts van de kaaimuur is daarnaast ook onderhevig aan golfklap ten gevolge van scheepsgolven. Tabel 5 geeft een overzicht van de in deze studie toegepaste types hydraulische belastingen.

Tabel 5 – Overzicht types hydraulische belastingen

	Hydraulische belastingen
Bodembescherming ter plaatse van kaaimuur	Retourstroming scheepvaart
	Stroming ten gevolge van hoofdschroef tegen bodem
	Stroming ten gevolge van boegschroef tegen rechte kaaimuur
	Stroming ten gevolge van boegschroef tegen de bodem
Oeverbescherming in zone naast kaaimuur	Retourstroming scheepvaart
	Stroming ten gevolge van boegschroef tegen gehelde oever
	Golfklap ten gevolge van scheepsgolven
Bodembescherming in zone naast kaaimuur	Retourstroming scheepvaart
	Stroming ten gevolge van hoofdschroef tegen bodem
	Stroming ten gevolge van boegschroef tegen rechte kaaimuur (enkel bij scenario 3)
	Stroming ten gevolge van boegschroef tegen de bodem

Paragraaf 3.2, respectievelijk paragraaf 3.3 en paragraaf 3.4 beschrijven de bepaling van de stroming aan de bodem ten gevolge van retourstroming, respectievelijk stroming ten gevolge van hoofdschroef en de stroming ten gevolge van boegschroef. In paragraaf 3.5 wordt de golfhoogte en golfperiode van scheepsgolven bepaald.

3.2 Stroming ten gevolge van retourstroming

Voor het berekenen van de retourstroming ten gevolge van het varende schip wordt eerst de grenssnelheid van het schip berekend aan de hand van de formulering volgens Schijf voor een in de as van de vaarweg varende schip (Waterloopkundig Laboratorium, 1997):

$$\frac{V_{L,Schijf,centr}}{\sqrt{g h'}} = \left(\frac{2}{3}\right)^{\frac{3}{2}} \left(1 - \frac{A_m}{A_c} + \frac{V_L^2}{2 g h'}\right)^{\frac{3}{2}}$$

met:

-	$V_{L,Schijf,centr}$	Grenssnelheid van een in de as van de vaarweg varende schip	[m/s]
-	g	Valversnelling (=9.81 m/s ²)	[m/s ²]
-	h'	Imaginaire waterdiepte (= $\frac{A_c}{b_w}$)	[m]
-	A_c	Natte sectie waterweg	[m ²]
-	b_w	Breedte vaarweg aan waterlijn	[m]
-	A_m	Natte sectie schip	[m ²]

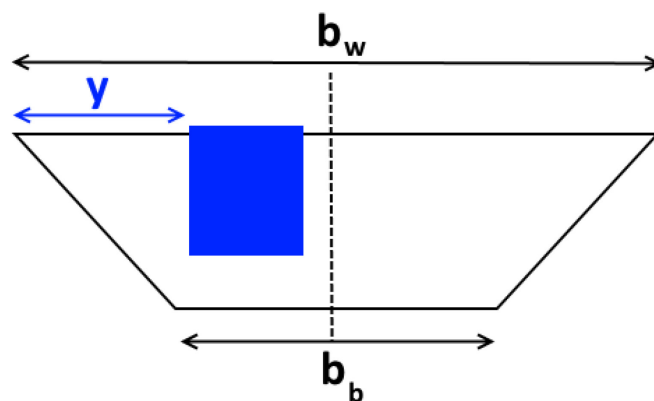
Voor een schip dat excentrisch vaart wordt de grenssnelheid als volgt berekend:

$$V_{L,Schijf,exc} = V_{L,Schijf,cent} \left(1 - \frac{0.15 y}{0.5 b_w}\right)$$

met:

-	$V_{L,Schijf,excentr}$	Grenssnelheid van een excentrisch varende schip	[m/s]
-	$V_{L,Schijf,centr}$	Grenssnelheid van een in de as van de vaarweg varende schip	[m/s]
-	y	Afstand tussen zijkant schip en oever	[m]
-	b_w	Breedte aan de waterlijn	[m ²]

Voor de afstand tussen zijkant schip en oever wordt de principeschets uit Figuur 5 gebruikt.



Figuur 5 – Principeschets schip in vaarweg voor bepaling afstand tussen zijkant schip en oever.

De vaarsnelheid van het schip (V_{schip}) is meestal gelijk aan 0.9 maal de grenssnelheid van het schip (Waterloopkundig Laboratorium, 1997). De natte sectie van het schip is berekend als de breedte van het schip vermenigvuldigd met de diepgang en de blokcoëfficiënt van het schip. Voor het schip CEMT klasse IV wordt een blokcoëfficiënt gelijk aan 0.80 beschouwd en voor het schip CEMT Klasse Va een blok-coëfficiënt gelijk aan 0.88. Tabel 6 geeft voor de verschillende beschouwde scenario's een overzicht van de berekening van de vaarsnelheid van het schip, zowel voor een geladen als een ongeladen schip.

Tabel 6 – Resultaten berekening vaarsnelheid

Parameter	Symbool	eenheid	Scenario 1		Scenario 2		Scenario 3	
			CEMT klasse Va		CEMT klasse IV		CEMT klasse Va/Va+	
			geladen	ongeladen	geladen	ongeladen	geladen	ongeladen
Breedte schip	b	m	11.4	11.4	9.5	9.5	11.4	11.4
Diepgang schip	d	m	2.6	1.5	2.6	1.5	3.5	1.5
Blok-coëfficiënt schip	C _b	-	0.88	0.88	0.80	0.80	0.88	0.88
Natte sectie schip	A _m	m ²	26.1	15.1	19.8	11.4	35.1	15.0
Bodembreedte vaarweg	b _b	m	50	50	50	50	75	75
Bodempeil vaarweg		mTAW	+12.75	+12.75	+11.75	+11.75	+11.75	+11.75
Waterpeil		mTAW	+17.20	+17.20	+17.20	+17.20	+16.25	+16.25
Waterdiepte	h	m	4.45	4.45	5.45	5.45	4.50	4.50
Taludhelling oever		-	6/4	6/4	10/4	10/4	*	*
Natte sectie vaarweg	A _c	m ²	252.2	252.2	346.8	346.8	337.5	337.5
Breedte vaarweg aan waterlijn	b _w	m	56.7	56.7	63.6	63.6	75.0	75.0
Imaginaire waterdiepte	h'	m	4.45	4.45	5.45	5.45	4.50	4.50
Grenssnelheid centrisc varend schip	V _{i,Schijf,centr}	m/s	4.08	4.67	5.19	5.70	4.09	4.95
Afstand zijkant schip - oever	y	m	12.5	12.5	12.5	12.5	18.8	18.8
Grenssnelheid excentrisch varend schip	V _{i,Schijf,excentr}	m/s	3.81	4.36	4.89	5.37	3.78	4.57
Vaarsnelheid schip	v_s	m/s	3.42	3.92	4.40	4.83	3.40	4.12

* Een verticale oever wordt voorzien.

Uit Tabel 6 volgt voor het geladen schip een vaarsnelheid tussen 3.42 m/s en 4.40 m/s en voor het ongeladen schip een vaarsnelheid tussen 3.92 m/s en 4.83 m/s. Op het kanaal Bossuit-Kortrijk is de vaarsnelheid op dit ogenblik echter beperkt tot 12 km/u (3.33 m/s) voor pleziervaart, tot 9 km/u (2.5 m/s) voor ongeladen schepen met een diepgang tot 1.5 m en tot 7 km/u (1.94 m/s) voor geladen schepen met een diepgang tussen 1.5 m en 4.0 m (bron: <https://www.visuris.be/download/3206c8fa-e987-4c83-9671-86ab9cb6ef92?dl=0>). Deze maximale vaarsnelheden zullen voor de verdere berekening van de retourstroomsnelheid toegepast worden.

Met behulp van de methode van Schijf (Waterloopkundig Laboratorium, 1997) wordt de retourstroming onder het schip in de vaargeul daarna berekend aan de hand van de onderstaande formuleringen:

$$\Delta h = \frac{V_{schip}^2}{2g} \left(\alpha_s \left(\frac{A_c}{A_w} \right)^2 - 1 \right)$$

$$\alpha_s = 1.4 - 0.4 \frac{V_L}{V_s}$$

$$A_w = b_b (h - \Delta h) + m (h - \Delta h)^2 - A_m$$

$$A_c V_{schip} = A_w (V_{schip} + u_r)$$

met:

-	Δh	Waterspiegeldaling naast schip	[m]
-	V_{Schip}	Vaarsnelheid van het schip	[m/s]
-	A_w	Parameter	[m ²]
-	g	Valversnelling (=9.81 m/s ²)	[m/s ²]
-	A_c	Natte sectie waterweg	[m ²]
-	α_s	Correctiefactor	[-]
-	V_L	Grenssnelheid	[m/s]
-	b_b	Bodembreedte profiel	[m]
-	h	Waterdiepte	[m]
-	m	Taludhelling van het trapeziumvormig profiel	[-]
-	A_m	Natte sectie schip	[m ²]
-	u_r	Retourstroomsnelheid	[m/s]

Gebruik makend van de bovenstaande formuleringen wordt in Tabel 7 voor de verschillende beschouwde scenario's de retourstroomsnelheid van het schip berekend. De retourstroomsnelheid voor de beschouwde scenario's varieert tussen 0.15 m/s en 0.29 m/s.

Tabel 7 – Resultaten berekening retourstroomsnelheid

Parameter	Symbool	Eenheid	Scenario 1		Scenario 2		Scenario 3	
			CEMT klasse Va		CEMT klasse IV		CEMT klasse Va/Va+	
			geladen	ongeladen	geladen	ongeladen	geladen	ongeladen
Natte sectie schip	A_m	m ²	26.1	15.1	19.8	11.4	35.1	15.0
Natte sectie vaarweg	A_c	m ²	252.2	252.2	346.8	346.8	337.5	337.5
Bodembreedte profiel	b_b	m	50	50	50	50	75	75
Waterdiepte	h	m	4.45	4.45	5.45	5.45	4.50	4.50
Grenssnelheid	V_L	m/s	4.08	4.67	4.67	5.13	3.87	4.69
Vaarsnelheid schip	V_{schip}	m/s	1.94	2.50	1.94	2.50	1.94	2.50
Taludhelling	m	-	6/4	6/4	10/4	10/4	*	*
Correctiefactor	α_s	-	1.20	1.17	1.23	1.20	1.20	1.19
Parameter	A_w	-	219.0	228.6	320.06	326.57	293.77	313.11
Waterspiegeldaling	Δh	m	0.11	0.14	0.09	0.11	0.11	0.12
Retourstroomsnelheid	u_r	m/s	0.29	0.26	0.16	0.15	0.29	0.19

3.3 Stroming ten gevolge van hoofdschroef

De stroomsnelheid juist achter een schroef wordt, volgens de formuleringen in “Ontwerp van schutsluizen” (Beem *et al.*, 2000) en de Rock Manual (CIRIA; CUR, 2007), 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 (= 1000 kg/m ³)	[kg/m ³]
-	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):

$$x_{bp} = 5.6 d_p$$

$$u_{bp} = \min \left(1.68 u_p \left(\frac{D_0}{x_{bp}} \right), u_p \right)$$

met:

-	x_{bp}	Horizontale afstand van de 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]
-	u_{bp}	Maximale stroomsnelheid boven de bodem	[m/s]
-	D_0	Effectieve diameter van de schroef	[m]

Voor twee hoofdschroeven vermeldt het PIANC rapport 180 (MarCom Working Group 180, 2015), verwijzend naar Blokland (1997) volgende formulering:

$$u_{bpn} = u_{bp} \sqrt{2} \quad \frac{d_p}{y_p} > 1$$

$$u_{bpn} = u_{bp} \left(2 \frac{d_p}{r_p} \right) \quad 0.578 < \frac{d_p}{y_p} < 1$$

$$u_{bpn} = u_{bp} \quad 0.578 < \frac{d_p}{y_p}$$

met:

-	u_{bpn}	Maximale stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de hoofdschroef voor meerdere schroeven	[m/s]
-	u_{bp}	Maximale stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van één hoofdschroef	[m/s]
-	d_p	Afstand tussen as van hoofdschroef en de bodem	[m]
-	y_p	Afstand tussen as van de hoofdschroef en de aslijn van het schip	[m]
-	r_p	$\sqrt{h_p^2 + y_p^2}$	[m]

Voor binnenvaartschepen, zowel schepen CEMT klasse IV, CEMT klasse Va als CEMT klasse Va+ wordt hierbij een schroef zonder straalbuis verondersteld. Daarnaast beveelt het PIANC rapport 180 (MarCom Working Group 180, 2015) aan om voor binnenvaartschepen 50 à 100 % van het geïnstalleerd vermogen toe te passen. Bij het ontwerp van de bodembescherming voor de nieuwe sluis te Sint-Baafs-Vijve (Verelst *et al.*, 2016) is, in overleg met een aantal externe experts, besloten om bij aanmeren aan een kaaimuur 50 % van het geïnstalleerde vermogen toe te passen voor de hoofdschroef. Deze waarde zal ook in dit advies toegepast worden.

Tabel 8 geeft voor de verschillende beschouwde scenario's de berekening van de stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de hoofdschroef. Op deze wijze wordt voor scenario 1 een stroomsnelheid aan de bodem berekend gelijk aan 1.87 m/s, voor scenario 2 een stroomsnelheid tussen 1.19 m/s en 1.33 m/s en voor scenario 3 een stroomsnelheid tussen 2.66 m/s en 3.19 m/s. Dit is de stroomsnelheid boven de bodem achter het schip.

Tabel 8 – Berekening stroomsnelheid aan bodem ten gevolge van hoofdschroef

Parameter	Symbool	Eenheid	Scenario 1	Scenario 2		Scenario 3	
			CEMT Va	CEMT IV	CEMT Va	CEMT Va+	
Diepgang schip	T	m	2.6	2.6	2.6	3.5	3.5
Geïnstalleerd motorvermogen	P_{motor}	kW	1800	1200	1200	1800	2200
Aantal hoofdschroeven	n	-	1	1	2	1	2
Percentage toegepast vermogen		%	50	50	50	50	50
Vermogen geleverd door de hoofdschroef	$P_{schroef}$	kW	900	600	300	900	550
Echte diameter schroef	D_0	m	2.00	1.70	1.60	2.00	2.00
Effectieve diameter van de schroef	D_p	m	1.40	1.19	1.12	1.40	1.40
Waterpeil	H	mTAW	17.20	17.20	17.20	16.25	16.25
Bodempeil	Z	mTAW	12.75	11.75	11.75	11.75	11.75
Waterdiepte	h	m	4.45	5.45	5.45	4.50	4.50
Stroomsnelheid juist achter de schroef	u_p	m/s	8.87	8.64	7.14	8.87	7.53
Verticale afstand van de as van de schroef tot de bodem	d_p	m	2.85	3.70	3.65	2.00	2.00
Horizontale afstand van de schroef tot de plaats met maximale stroomsnelheid aan de bodem	x_{bp}	m	16.0	20.7	20.4	11.2	11.2
Maximale stroomsnelheid boven de bodem	u_{bp}	m/s	1.87	1.19	1.33	2.66	3.19

3.4 Stroming ten gevolge van de boegschroef

De stroomsnelheid van de uittredende straal wordt voor boegschroeven, volgens de formuleringen in “Ontwerp van Schutsluizen” (Beem *et al.*, 2000) of de formuleringen uit het PIANC rapport 180 (MarCom Working Group 180, 2015), gegeven door volgende formulering:

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

met:

-	v_p	Stroomsnelheid uittredende straal	[m/s]
-	P_d	Aangewend vermogen	[kW]
-	D_0	Effectieve diameter van de schroef (= D_p)	[m]
-	D_p	Echte diameter van de schroef	[m]
-	ζ	Energieverliesfactor (= 0,9 voor kanalsystemen met uitstroming langs de zijkant)	[-]

Hierbij wordt opgemerkt dat voor het aangewend vermogen van een boegschroef altijd 100 % van het geïnstalleerd vermogen beschouwd wordt, zoals aanbevolen in het PIANC rapport 180 (MarCom Working Group 180, 2015).

Voor de drie beschouwde scenario's is de berekening van de stroomsnelheid van de uittredende straal gegeven in Tabel 9. Uit overleg met de nautische collega's van WL volgt dat het geïnstalleerd motorvermogen van 450 kW voor de boegschroef van binnenvaartschepen een bovengrens betreft voor de huidige vloot. Aangezien scenario 1 en scenario 2 de huidige toestand betreffen, wordt voor deze beide scenario's naast het geïnstalleerd vermogen van 450 kW ook de helft van dit geïnstalleerd vermogen beschouwd (225 kW). De helft van het geïnstalleerd vermogen is dan eerder representatief voor een gemiddeld schip. Scenario 3 betreft de toekomstige situatie na opwaardering van het kanaal. Voor dit scenario wordt voor het schip CEMT klasse Va en het schip CEMT klasse Va+ enkel het maximaal geïnstalleerd vermogen beschouwd.

Tabel 9 – Berekening stroomsnelheid uittredende straal

Parameter	Symbool	Eenheid	Scenario 1		Scenario 2		Scenario 3	
			CEMT Va	225	CEMT IV	225	CEMT Va	CEMT Va+
Geïnstalleerd motorvermogen	P_{motor}	kW	450	225	450	225	450	840
Aantal boegschroeven	n	-	1	1	1	1	1	2
Vermogen geleverd door de boegschroef	$P_{schroef}$	kW	450	225	450	225	450	420
Echte diameter schroef	D_0	m	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20
Effectieve diameter van de schroef	D_p	m	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20
Stroomsnelheid juist achter de schroef	v_p	m/s	7.02	5.57	7.02	5.57	7.02	6.86

Voor de dimensionering van de bodembescherming of oeverbescherming worden 3 types belastingen ten gevolge van boegschroeven beschouwd:

1) Stroomsnelheid ten gevolge van de boegschroef op een gehelde oever:

Enkel scenario 1 en scenario 2 betreffen de huidige toestand waarbij er opwaarts en afwaarts van de kaaimuur een gehelde oever aanwezig is. In scenario 3 wordt na de opwaardering van het kanaal opwaarts en afwaarts van de kaaimuur een verticale oever voorzien.

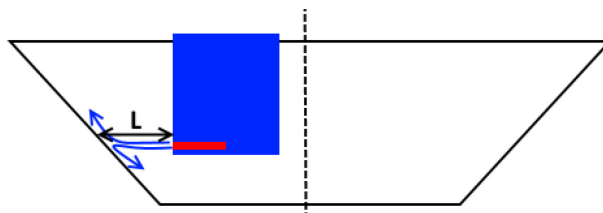
Voor gehelde kaaimuren of oevers vermeldt het PIANC rapport 180 volgende formulering voor de bepaling van de afstand tussen de boegschroef en de kaaimuur waar zich de maximale stroomsnelheid voordoet:

$$\frac{x_{Vmax}}{L} = K \left(\sqrt{1 + \frac{2}{K}} - 1 \right)$$

$$K = \frac{b}{a (\cot g (\alpha))^2}$$

met:

- x_{Vmax} X-coördinaat van de locatie op de helling waar de maximale stroomsnelheid berekend met behulp van de formulering van vrije uitstroming na een propeller zich voordoet (zie paragraaf 3.3) [m]
- L Afstand langs as van jet tussen helling en de uitstroomopening van de boegschroef [m]
- K Parameter [-]
- a Parameter (= 1) [-]
- b Parameter (= 15.4) [-]
- α Taludhelling [°]



Figuur 6 – Principeschets schip in vaarweg voor bepaling afstand L tussen helling en uitstroomopening van boegschroef

Met behulp van deze waarde van x_{Vmax} wordt de stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de boegschroef berekend aan de hand van volgende formulering voor de stroomsnelheid ten gevolge van een jet met vrije uitstroming:

$$v_{bp} = A v_p \left(\frac{D_0}{x_{Vmax}} \right) \exp \left(-15.4 \frac{r^2}{x_{Vmax}^2} \right)$$

met:

-	v_{bp}	Maximale stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de boegschroef	[m/s]
-	v_b	Stroomsnelheid uittredende straal boegschroef	[m/s]
-	D_0	Effectieve diameter van de schroef	[m]
-	x_{Vmax}	X-coördinaat van de locatie op de helling waar de maximale stroomsnelheid aan de bodem zich voordoet.	[m]
-	r	Afstand tussen as van jet en locatie op de helling waar de maximale stroomsnelheid aan de bodem zich voordoet (= (L-x) tg (α))	[m]
-	L	Afstand langs as van de jet tussen het punt op de helling en de uitstroomopening van de schroef	[m]
-	α	Taludhelling	[rad]
-	A	Parameter (=2.8)	[-]

Tabel 10 geeft de berekening van de stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de boegschroef. Hierbij wordt opgemerkt dat voor de bepaling van de afstand L tussen het talud en de uitstroomopening van de boegschroef verondersteld wordt dat het schip zich met zijn zijkant tegen de bestaande kaaimuur bevindt. Voor scenario 1 volgt uit de berekening een stroomsnelheid gelijk aan 8.61 m/s en 10.85 m/s, voor scenario 2 een stroomsnelheid gelijk aan 8.16 m/s en 10.29 m/s. Deze waarden zijn voor deze beide scenario's hoger dan de stroomsnelheid juist achter de schroef. Dit is onrealistisch. Voor de dimensionering van de oeverbescherming voor deze beide scenario's zal in deze studie een stroomsnelheid gelijk aan de stroomsnelheid juist achter de schroef beschouwd worden, i.e. 5.57 m/s en 7.02 m/s.

Tabel 10 – Berekening stroomsnelheid aan bodem ten gevolge van boegschroef op een gehelde oever

Parameter	Symbool	Eenheid	Scenario 1		Scenario 2	
			CEMT Va	CEMT IV	CEMT Va	CEMT IV
Geïnstalleerd motorvermogen	P_{motor}	kW	450	225	450	225
Aantal boegschroeven	n	-	1	1	1	1
Vermogen geleverd door de boegschroef	$P_{schroef}$	kW	450	225	450	225
Stroomsnelheid juist achter de schroef	v_p	m/s	7.02	5.57	7.02	5.57
Afstand langs as van jet tussen het talud en de uitstroomopening van de boegschroef	L		2.25	2.25	2.50	2.50
Parameter a	a	-	1	1	1	1
Parameter b	b	-	15.4	15.4	15.4	15.4
Taludhelling	$\cotg(\alpha)$	-	6/4	6/4	10/4	10/4
Parameter K	K	-	6.84	6.84	2.46	2.46
X-coördinaat van de locatie op de helling waar de maximale stroomsnelheid berekend met behulp van de formulering van vrije uitstroming na een propeller zich voordoet	x_{Vmax}	m	2.11	2.11	2.13	2.13
Afstand tussen as van jet en locatie op de helling waar de maximale stroomsnelheid aan de bodem zich voordoet	r	m	0.10	0.10	0.15	0.15
Maximale stroomsnelheid aan de bodem	v_{bp}	m/s	10.85*	8.61*	10.29*	8.16*

* Stroomsnelheid v_{bp} is groter dan v_p . Dit is onrealistisch. Voor de dimensionering van de oeverbescherming wordt $v_{bp} = v_p$ beschouwd.

2) Stroomsnelheid ten gevolge van de boegschroef tegen een rechte kaaimuur:

Indien een schip zich dichtbij een kaaimuur of rechte oever bevindt, doet de maximale stroomsnelheid aan de bodem zich voor in de hoek tussen de kaaimuur en de bodem en wordt deze gegeven door volgende formulering (“Ontwerp van Schutsluizen” (Beem *et al.*, 2000)):

$$v_{bp} = 1.03 v_p \left(\frac{D_0}{d_p} \right)$$

Deze formulering is geldig onder volgende voorwaarden:

$$v_{bp} \leq v_p$$

$$v_{bp} \leq 6.3 v_p D_0 / y_{bp}$$

Met:

-	v_{bp}	Maximale waarde van de stroomsnelheid aan de bodem	[m/s]
-	v_p	Stroomsnelheid uittredende straal	[m/s]
-	D_0	Effectieve diameter van de schroef (= D_p)	[m]
-	d_p	Verticale afstand tussen straalas en bodem	[m]
-	y_{bp}	Horizontale afstand tussen zijkant schip en kaaimuur (= 1.0 m)	[m]

Voor twee boegschroeven vermeldt het PIANC rapport 180 (MarCom Working Group 180, 2015), verwijzend naar Blokland (1997) volgende formulering:

$$v_{bpn} = v_{bp} \sqrt{2} \quad \frac{d_p}{y_p} > 1$$

$$v_{bpn} = v_{bp} \left(2 \frac{d_p}{r_p} \right) \quad 0.578 < \frac{d_p}{y_p} < 1$$

$$v_{bpn} = v_{bp} \quad 0.578 < \frac{d_p}{y_p}$$

met:

-	v_{bpn}	Maximale stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de boegschroef voor meerdere schroeven	[m/s]
-	v_{bp}	Maximale stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de boegschroef	[m/s]
-	d_p	Afstand tussen as van de boegschroef en de bodem	[m]
-	y_p	Halve afstand tussen de assen van de boegschroeven	[m]
-	r_p	$\sqrt{h_p^2 + y_p^2}$	[m]

Bij deze laatste formulering wordt opgemerkt dat deze formulering eigenlijk geldt voor de maximale stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van een hoofdschroef bij een vlakke bodem. In dit rapport wordt deze formulering analoog toegepast voor een boegschroef bij een rechte kaaimuur. Voor de halve afstand tussen de assen van de boegschroeven wordt (conservatief) de diameter van de boegschroef beschouwd.

Tabel 11 geeft voor elke van de beschouwde scenario's een overzicht van de berekening van de stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de boegschroef. Voor scenario 1 volgt uit deze tabel een stroomsnelheid aan de bodem tussen 2.81 m/s en 3.54 m/s en voor scenario 2 een stroomsnelheid aan de bodem tussen 2.00 m/s en 2.52 m/s. Voor scenario 3 bedraagt deze stroomsnelheid 5.43 m/s voor het schip CEMT-klasse Va en 7.50 m/s voor het schip CEMT-klasse Va+.

Tabel 11 – Berekening stroomsnelheid aan bodem ten gevolge van boegschroef tegen een rechte kaaimuur

Parameter	Symbool	Eenheid	Scenario 1		Scenario 2		Scenario 3	
			CEMT Va	CEMT IV	CEMT Va	CEMT Va+		
Geïnstalleerd motorvermogen	P_{motor}	kW	450	225	450	225	450	840
Aantal boegschroeven	n	-	1	1	1	1	1	2
Vermogen geleverd door de boegschroef	$P_{schroef}$	kW	450	225	450	225	450	420
Stroomsnelheid juist achter de schroef	v_p	m/s	7.02	5.57	7.02	5.57	7.02	6.86
Echte diameter schroef	D_0	m	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20
Waterpeil	H	mTAW	17.20	17.20	17.20	17.20	16.25	16.25
Bodempeil	Z	mTAW	12.75	12.75	11.75	11.75	11.75	11.75
Waterdiepte	h	m	4.45	4.45	5.45	5.45	4.50	4.50
Diepgang	T	m	2.6	2.6	2.6	2.6	3.5	3.5
Verticale afstand van de as van de schroef tot de bodem	d_p	m	2.45	2.45	3.45	3.45	1.60	1.60
Halve afstand tussen de assen van boegschroeven	y_p	m	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	1.20
Verhouding d_p/y_p	d_p/y_p	-	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	1.33
Maximale stroomsnelheid aan de bodem	v_{bp}	m/s	3.54	2.81	2.52	2.00	5.43	7.50

Bij een verticale oever of kaaimuur doet deze maximale waarde van de stroomsnelheid aan de bodem zich voor in de hoek tussen de kaaimuur en de bodem. Voor punten op de bodem op een afstand x_{bp} van de verticale wand wordt de stroomsnelheid aan de bodem als volgt berekend:

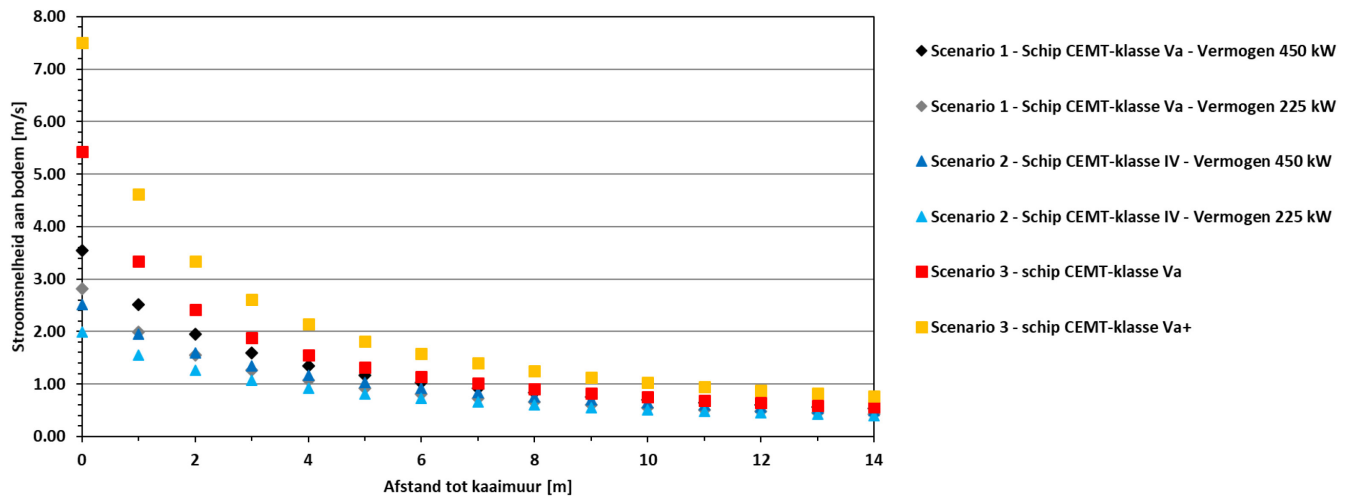
$$v_{bp} = \sqrt{n} \cdot 1.03 \cdot v_p \left(\frac{D_0}{d_p + x_{bp}} \right)$$

Met:

- v_{bp} Maximale waarde van de stroomsnelheid aan de bodem [m/s]
- v_p Stroomsnelheid uittredende straal [m/s]
- D_0 Effectieve diameter van de schroef (=D_p) [m]
- d_p Verticale afstand tussen straalas en bodem [m]
- x_{bp} Afstand tussen punt en de verticale wand [m]
- n Aantal boegschroeven

Hierbij wordt opgemerkt dat uit Tabel 11 volgt dat voor de twee boegschroeven van het schip CEMT-klasse Va+ de waarde van de verhouding d_p/y_p groter is dan 1. Om die reden is in de bovenstaande formulering voor twee hoofdschroeven \sqrt{n} reeds aanwezig en worden de formuleringen uit Blokland (1997) hier niet meer herhaald.

Figuur 7 geeft voor de verschillende beschouwde scenario's de op deze wijze berekende variatie van de stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de boegschroef in functie van de afstand tot de kaaimuur. Bij scenario 1 is de stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de boegschroef vanaf een afstand van 2 à 3 m lager dan de stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de hoofdschroef. Bij scenario 2 is dit het geval vanaf een afstand van 3 à 4 m en bij scenario 3 vanaf een afstand van 2 m voor het schip CEMT-klasse Va en 4 m voor het schip CEMT-klasse Va+. In deze eerste zone naast de kaaimuur is de boegschroef maatgevend en in het overige gedeelte de hoofdschroef (in vergelijking met de stroomsnelheid ten gevolge van de boegschroef).



Figuur 7 – Variatie van de stroomsnelheid aan de bodem naast de kaaimuur ten gevolge van de boegschroef

3) Stroomsnelheid ten gevolge van de boegschroef tegen de bodem:

Indien een schip wegvaart van de kaaimuur en daarbij de boegschroef gebruikt tijdens het manoeuvreren is er een moment dat de stroming van de boegschroef ongehinderd door de kaaimuur de bodem raakt. In deze toestand doet de maximale stroomsnelheid boven de bodem v_{bp} zich voor op een afstand x_{bp} achter de schroef. Deze beide grootheden kunnen, analoog als bij de vrije uitstroom bij een hoofdschroef, als volgt berekend worden (Beem *et al.*, 2000):

$$x_{bp} = 5.6 d_p$$

$$v_{bp} = \min \left(1.68 v_p \sqrt{n} \left(\frac{D_0}{x_{bp}} \right), v \right)$$

met:

- x_{bp} Horizontale afstand van de 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]
- D_0 Effectieve diameter van de schroef [m]
- n Aantal schroeven [-]

Hierbij wordt opgemerkt dat uit Tabel 11 volgt dat voor de twee boegschroeven van het schip CEMT-klasse Va+ de waarde van de verhouding d_p/y_p groter is dan 1. Om die reden is in de bovenstaande formulering voor twee hoofdschroeven \sqrt{n} reeds aanwezig en worden de formuleringen uit Blokland (1997) hier niet meer herhaald.

Voor de drie verschillende beschouwde scenario's geeft Tabel 12 de berekening van de stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de boegschroef bij wegvaren. Op deze wijze wordt voor scenario 1 een stroomsnelheid aan de bodem berekend gelijk tussen 0.82 m/s en 1.03 m/s, voor scenario 2 een stroomsnelheid aan de bodem tussen 0.58 m/s en 0.73 m/s. Voor scenario 3 wordt een stroomsnelheid aan de bodem berekend gelijk aan 5.43 m/s voor het schip CEMT klasse Va en een stroomsnelheid aan de bodem gelijk aan 7.50 m/s voor het schip CEMT-klasse Va+. Deze stroomsnelheden betreffen de stroomsnelheid aan de bodem naast het schip.

Tabel 12 – Berekening stroomsnelheid aan bodem ten gevolge van boegschroef bij wegvaren

Parameter	Symbool	Eenheid	Scenario 1		Scenario 2		Scenario 3	
			CEMT Va	CEMT IV	CEMT Va	CEMT Va+		
Geïnstalleerd motorvermogen	P_{motor}	kW	450	225	450	225	450	840
Aantal boegschroeven	n	-	1	1	1	1	1	2
Vermogen geleverd door de boegschroef	$P_{schroef}$	kW	450	225	450	225	450	420
Stroomsnelheid juist achter de schroef	v_p	m/s	7.02	5.57	7.02	5.57	7.02	6.86
Waterpeil	H	mTAW	17.20	17.20	17.20	17.20	16.25	16.25
Bodempeil	Z	mTAW	12.75	12.75	11.75	11.75	11.75	11.75
Waterdiepte	h	m	4.45	4.45	5.45	5.45	4.50	4.50
Diepgang	T	m	2.6	2.6	2.6	2.6	3.5	3.5
Verticale afstand van de as van de schroef tot de bodem	d_p	m	2.45	2.45	3.45	3.45	1.60	1.60
Horizontale afstand van de schroef tot de plaats met maximale stroomsnelheid aan de bodem	x_{bp}	m	13.7	13.7	19.3	19.3	9.0	9.0
Halve afstand tussen de assen van boegschroeven	y_p	m	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	1.20
Verhouding d_p/y_p	d_p/y_p	-	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	1.33
Maximale stroomsnelheid boven de bodem	v_{bp}	m/s	1.03	0.82	0.73	0.58	5.43	7.50

n.v.t. = niet van toepassing

3.5 Scheepsgolven

De golfhoogte van golven ten gevolge van de scheepvaart wordt berekend aan de hand van volgende formuleringen uit Waterloopkundig Laboratorium, (1997):

1. Haalgolf:

$$z_{max} = 1.5 \widehat{\Delta h}$$

$$\frac{\widehat{\Delta h}}{\Delta h} = 2.0 - 2.0 \frac{A'_c}{A_c} \quad \text{voor } \frac{b_w}{L_s} < 1.5$$

2. Stroomsnelheid in de haalgolf:

$$\frac{u_{max}}{V_{schip}} = 0.15 \quad \text{voor } \frac{z_{max}}{\Delta k_s} < 1.0$$

3. Secundaire golven:

$$\frac{H_i}{h} = 1.2 \alpha_1 \left(\frac{s}{h}\right)^{-0.33} F_h^4$$

$$L_{wi} = 0.67 \cdot 2\pi \cdot \frac{V_{schip}^2}{g}$$

$$T_i = 5.1 \frac{V_{schip}}{g}$$

Met:

–	z_{max}	Golfhoogte van de haalgolf	[m]
–	$\widehat{\Delta h}$	Extreme waterspiegeldaling naast oever	[m]
–	Δh	Gemiddelde waterspiegeldaling tussen schip en oever (zie paragraaf 3.2)	[m]
–	A'_c	Oppervlakte natte kanaaldwarsdoorsnede tussen scheepsas en oever bij uit de as varen $A'_c = 0.5 A_c - y h$	[m ²]
–	A_c	Oppervlakte natte kanaaldwarsdoorsnede (zie paragraaf 3.2)	[m ²]
–	y	Positie in de vaarweg	[m]
–	h	Waterdiepte	[m]
–	b_w	Breedte vaarweg aan de waterspiegel	[m]
–	L_s	Lengte schip	[m]
–	u_{max}	Maximale stroomsnelheid in de haalgolf	[m/s]
–	V_{schip}	Vaarsnelheid van het schip	[m/s]
–	Δ	Relatieve dichtheid oeverbekleding ($\Delta = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}$)	[-]
–	ρ_s	Dichtheid breuksteen (= 2650 kg/m ³)	[kg/m ³]
–	ρ_w	Dichtheid water (= 1000 kg/m ³)	[kg/m ³]
–	k_s	Ruwheid toplaag (= D_{50})	[m]
–	D_{50}	Mediaan breuksteendiameter	[m]
–	H_i	Golfhoogte van de interferentiepieken van secundaire golven	[m]
–	s	Afstand van interferentiepieken tot zijkant schip	[m]
–	F_h	Froudegetal ($F_h = \frac{V_{schip}}{\sqrt{g h}}$)	[-]
–	L_{wi}	Gemiddelde golflengte van de interferentiepiek	[m]
–	T_i	Gemiddelde golfperiode van de interferentiepiek	[s]
–	α_1	Scheepsafhankelijke coëfficiënt ($\alpha_1 = 0.28 T_s^{1.25}$)	[-]
–	T_s	Diepgang schip	[m]

Aan de hand van deze formuleringen wordt voor de drie beschouwde scenario's in Tabel 13 de golfhoogte en golfperiode van de scheepsgolven berekend voor de bij de scenario's beschouwde maatgevende scheepstypes. Bij de bepaling van de afstanden s en y is verondersteld dat het schip in het midden vaart van de helft van het kanaal naast de kaaimuur.

Uit deze tabel volgt dat de golfhoogte van de haalgolf voor een ongeladen schip tussen 0.24 m en 0.29 m bedraagt en voor een geladen schip tussen 0.19 m en 0.26 m bedraagt. De maximale stroomsnelheid in de haalgolf bedraagt 0.29 m/s voor een geladen schip en 0.38 m/s voor een ongeladen schip. De berekende golfhoogte en golfperiode van de interferentiepieken van de secundaire golven bedraagt 0.03 m en 1.01 s voor een geladen schip en 0.04 m en 1.30 m/s voor een ongeladen schip.

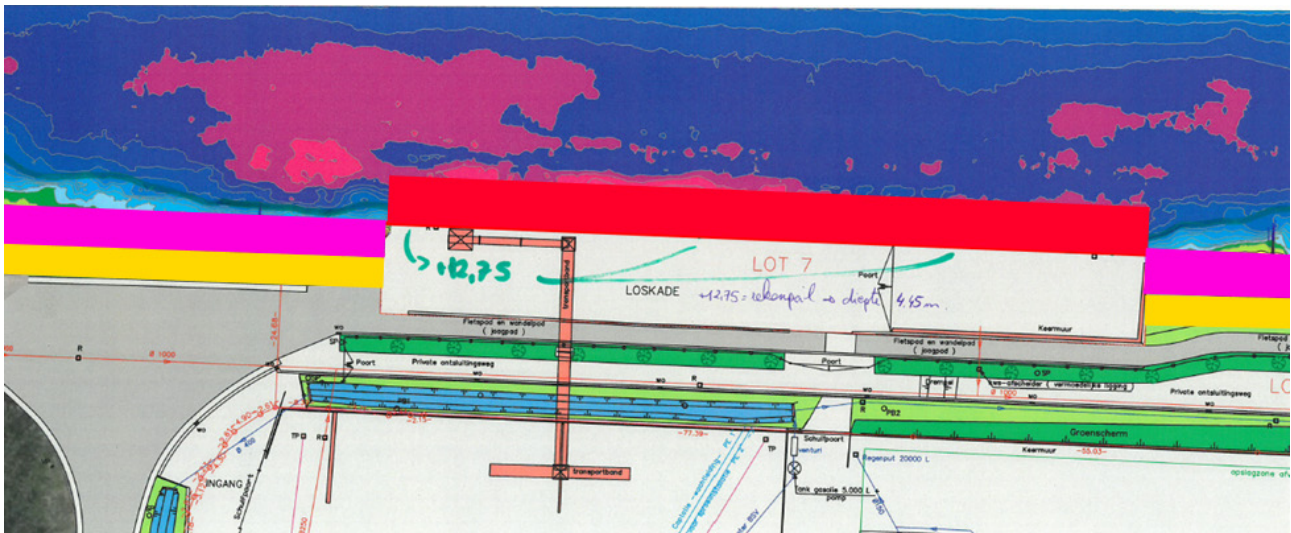
Tabel 13 – Berekening golfhoogte en golfperiode van scheepsgolven

Parameter	Symbool	eenheid	Scenario 1		Scenario 2		Scenario 3	
			CEMT klasse Va		CEMT klasse IV		CEMT klasse Va/Va+	
			geladen	ongeladen	geladen	ongeladen	geladen	ongeladen
Lengte schip	L_s	m	110.0	110.0	105.0	105.0	110.0	110.0
Breedte schip	b	m	11.4	11.4	9.5	9.5	11.4	11.4
Diepgang schip	T_s	m	2.6	1.5	2.6	1.5	3.5	1.5
Breedte vaarweg aan waterlijn	b_w	m	56.7	56.7	63.6	63.6	75.0	75.0
Verhouding b_w/L_s	b_w/L_s	-	0.52	0.52	0.61	0.61	0.68	0.68
Natte sectie vaarweg	A_c	m ²	252.2	252.2	346.8	346.8	337.5	337.5
Waterdiepte	h	m	4.45	4.45	5.45	5.45	4.50	4.50
Positie schip in vaarweg	y	m	12.5	12.5	12.5	12.5	18.8	18.8
Oppervlakte natte kanaaldwarsdoorsnede tussen scheepsas en oever bij uit de as varen	A'_c	m ²	70.5	70.5	105.3	105.3	84.4	84.4
Gemiddelde waterspiegeldaling tussen schip en oever	Δh	m	0.11	0.14	0.09	0.11	0.11	0.12
Extreme waterspiegeldaling naast oever	$\widehat{\Delta h}$	m	0.16	0.19	0.13	0.16	0.17	0.19
Golfhoogte van de haalgolf	z_{max}	m	0.24	0.29	0.19	0.24	0.26	0.28
Maximale stroomsnelheid in de haalgolf	u_{max}	m/s	0.29	0.38	0.29	0.38	0.29	0.38
Scheepsafhankelijke coëfficiënt	α_1	-	0.92	0.46	0.92	0.46	0.92	0.46
Froudegetal	F_h	-	0.27	0.34	0.27	0.34	0.29	0.38
Afstand van interferentiepieken tot zijkant schip	s	m	6.8	6.8	7.8	7.8	13.1	13.1
Golfhoogte van de interferentiepieken van secundaire golven	H_i	m	0.03	0.04	0.03	0.04	0.03	0.04
Gemiddelde golflengte van de interferentiepiek	L_{wi}	m	1.62	2.68	1.62	2.68	1.62	2.68
Gemiddelde golfperiode van de interferentiepiek	T_i	s	1.01	1.30	1.01	1.30	1.01	1.30

4 Dimensionering oeverbescherming en bodembescherming

4.1 Algemeen

Figuur 8 geeft een voorstelling van de locaties waar de bodembescherming en de oeverbescherming dient te worden aangebracht. Een bodembescherming wordt voorzien ter plaatse van de kaaimuur (rood gekleurd in Figuur 8) en in de zones opwaarts en afwaarts van de kaaimuur (paars gekleurd in Figuur 8). Bij scenario 1 en scenario 2 is in de zones opwaarts en afwaarts van de kaaimuur een gehelde oever aanwezig (geel gekleurd in Figuur 8). Deze oever wordt voorzien van een oeverbescherming. Bij scenario 3 is een verticale oever aanwezig. In dit scenario is een oeverbescherming bijgevolg niet van toepassing en wordt opwaarts en afwaarts van de kaaimuur enkel een bodembescherming voorzien.



Figuur 8 – Locaties waar oeverbescherming en bodembescherming wordt voorzien.
Rood en paars: zone met bodembescherming; geel: zone met oeverbescherming

Voor deze verschillende zones is bij elk scenario eenzelfde type hydraulische belasting aanwezig. De volgende hydraulische belastingen worden beschouwd bij de dimensionering van de bodembescherming of de oeverbescherming voor de verschillende zones:

1. Bodembescherming ter plaatse van kaaimuur (rood gekleurde zone in Figuur 8):
 - a. Stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van retourstroming
 - b. Stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de hoofdschroef
 - c. Stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de boegschroef tegen een rechte kaaimuur
 - d. Stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de boegschroef tegen de bodem.
2. Oeverbescherming voor gehelde oever in zones opwaarts en afwaarts van de kaaimuur (geel gekleurde zone in Figuur 8; enkel bij scenario 1 en scenario 2):
 - a. Stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van retourstroming
 - b. Stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de boegschroef tegen een gehelde oever
 - c. Golfklap ten gevolge van scheepsgolven

3. Bodembescherming in zones opwaarts en afwaarts van de kaaimuur (paars gekleurde zone in Figuur 8)
 - a. Stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de hoofdschroef
 - b. Stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de boegschroef tegen een rechte kaaimuur (enkel bij scenario 3)
 - c. Stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de boegschroef tegen de bodem.

Wat de breedte van de bodembescherming ter plaatse van een kaaimuur betreft, wordt in Ontwerp van Schutsluizen (Beem *et al.*, 2000), een praktische waarde gelijk aan 1.0 à 1.5 maal de scheepsbreedte vermeld, wat neerkomt op 11.4 à 17.1 m voor een schip CEMT klasse Va (bij scenario 1 en scenario 3) of CEMT klasse Va+ (bij scenario 3) of 9.5 à 14.3 m voor een schip CEMT klasse IV (bij scenario 2). Anderzijds vermelden Blokland & Roubos, (2013) een breedte gelijk aan de breedte van de passieve grondwig naast een kaaimuur. Voor een nieuwe kaaimuur is de breedte op deze wijze te bepalen uit het ontwerp van de kaaimuur, voor de bestaande kaaimuur is deze werkwijze vermoedelijk moeilijker uit te voeren. Wat betreft de lengte van de zones waarin opwaarts en afwaarts van de kaaimuur een oeverbescherming of bodembescherming dient voorzien te worden zijn in de literatuur geen ontwerpformules beschikbaar. Als richtwaarde kan een minimale lengte gelijk aan één scheeps lengte van het ontwerpschip (110.0 m bij scenario 1, 105.0 m bij scenario 2 en 135 m bij scenario 3) opwaarts en afwaarts van de kaaimuur beschouwd worden.

Vooreerst wordt in paragraaf 4.2 algemeen de methodologie voor de dimensionering van oeverbescherming en bodembescherming beschreven. Daarna wordt voor elk beschouwd scenario in paragraaf 4.3 (scenario 1), paragraaf 4.4 (scenario 2) en paragraaf 4.5 (scenario 3) het resultaat gegeven van de dimensionering van oeverbescherming en bodembescherming.

4.2 Methodologie

Voor de dimensionering van de oeverbescherming en de bodembescherming wordt initieel verondersteld dat breuksteen wordt toegepast. Indien uit de dimensionering blijkt dat breuksteen niet toegepast kan worden, worden alternatieve types erosiebescherming voorgesteld.

Wat stroomsnelheid betreft volgt uit hoofdstuk 3 dat een stroomsnelheid aan de bodem berekend wordt voor de stroming ten gevolge van de hoofdschroef, de stroming ten gevolge van de boegschroef en stroming ten gevolge van retourstroming. Wanneer een stroomsnelheid aan de bodem gekend is, wordt de bepaling van de breuksteendiameter voor de bodembescherming of oeverbescherming uitgevoerd aan de hand van de Shields-formulering aangepast voor stralen uit "Ontwerp van Schutsluizen" (Beem *et al.*, 2000):

$$D_{n50} = \left[\frac{0.8}{\Delta h^{1/3}} \cdot \frac{(u_b(1+3r))^2}{2g} \right]^{3/2}$$

met:

-	D_{n50}	Nominale breuksteendiameter	[m]
-	Δ	Relatieve dichtheid van de stenen ($\Delta = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}$)	[-]
-	ρ_s	Dichtheid breuksteen (= 2650 kg/m ³)	[kg/m ³]
-	ρ_w	Dichtheid water (= 1000 kg/m ³)	[kg/m ³]
-	u_b	Stroomsnelheid boven de bodem	[m/s]
-	h	Waterdiepte	[m]
-	r	Turbulentie-intensiteit	[-]
-	g	Valversnelling (= 9.81 m/s ²)	[m/s ²]

Voor de turbulentie-intensiteit r worden volgende waarden toegepast:

- $r = 0.40$ voor stroming ten gevolge van de hoofdschroef
- $r = 0.35$ voor stroming ten gevolge van de boegschroef
- $r = 0.25$ voor retourstroming
- $r = 0.10$ voor normale turbulentie in rivieren

Om de helling van de gehele oever in rekening te brengen wordt voor de dimensionering van breuksteen op een gehele oever onderhevig aan stroming ten gevolge van hoofdschroef, boegschroef en retourstroming de formulering volgens Pilarczyk (Pilarczyk, 1990, 1998) toegepast:

$$\Delta D_{n50} = 0.035 \frac{\Phi}{\Psi} \frac{K_T K_H}{K_S} \frac{u_{cr}^2}{2g}$$

met:

-	D_{n50}	Nominale breuksteendiameter	[m]
-	Δ	Relatieve dichtheid van de stenen ($\Delta = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}$)	[-]
-	ρ_s	Dichtheid breuksteen (= 2650 kg/m ³)	[kg/m ³]
-	ρ_w	Dichtheid water (= 1000 kg/m ³)	[kg/m ³]
-	K_T	Turbulentiefactor $K_T = ((1+3r)/1.3)^2$	[-]
-	r	Turbulentie-intensiteit	[-]
-	K_h	Diepte – (of snelheidsprofiel) factor	[-]
-	h	Waterdiepte	[m]

$K_h = \left(\frac{h}{D_{n50}} \right)^{-0.2}$ *niet volledig ontwikkeld snelheidsprofiel*

-	K_s	Hellingfactor $K_s = \sin(\theta - \alpha) / \sin \theta$ $K_s = \cos \alpha \sqrt{1 - \frac{\tan^2 \alpha}{\tan^2 \theta}}$	voor een stroming die een talud op of afloopt voor een stroming parallel aan een talud	[-]
-	α	Helling talud		[°]
-	Θ	Hoek van inwendige wrijving van de stenen (= 40°)		[°]
-	Ψ	Kritische schuifspanningsparameter (= 0.035 voor breuksteen)		[-]
-	Φ	Stabiliteitsfactor voor stroming (= 1.00)		[-]
-	u_{cr}	Dieptegemiddelde stroomsnelheid		[m/s]

Eigenlijk is deze formulering enkel geldig wanneer een dieptegemiddelde stroming gekend is. Algemeen beveelt het PIANC rapport 180 (MarCom Working Group 180, 2015) bij een stroming aan de bodem ten gevolge van schroefstraalwerking aan om voor de parameter K_h een waarde gelijk aan 1.0 toe te passen. Dit wordt ook in dit rapport toegepast. Daarnaast beveelt het PIANC rapport 180 (MarCom Working Group 180, 2015) voor de stabiliteitsfactor Φ een waarde tussen 0.75 en 1.00 aan voor een continue breuksteenbekleding. In dit rapport wordt voor deze factor de waarde 1.00 toegepast.

Daarnaast is in hoofdstuk 3 de golfhoogte en golfperiode van scheepsgolven berekend. De dimensionering van breuksteen onderhevig aan golfklap ten gevolge van scheepsgolven wordt meestal uitgevoerd gebruik makend van de formuleringen voor de dimensionering van breuksteen onderhevig aan golfklap van windgolven. Hiervoor wordt de formulering volgens Pilarczyk (Pilarczyk, 1990) toegepast:

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = \frac{\psi_u \phi \cos(\alpha)}{\xi_m^b}$$

Met:

-	D_{n50}	Nominale diameter breuksteensortering	[m]
-	Δ	Relatieve dichtheid; $\Delta = \left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \right)$	[-]
-	H_i	Significante golfhoogte scheepsgolven	[m]
-	T_i	Gemiddelde golfperiode scheepsgolven	[s]
-	ξ_m	Brekerparameter $\xi_m = \tan(\alpha) \left(\frac{H_s}{L_0} \right)^{-0.5} = 1.25 T_z (H_s)^{-0.5} \tan(\alpha)$	[-]
-	α	Taludhelling	[°]
-	b	Exponent gerelateerd aan de interactie tussen golven en bekledings-type (1 ≤ b ≤ 0.5). Ruwe en doorlaatbare bekledingen: b=0.5 Gladde en ondoorlaatbare bekledingen: b=1	[-]
-	Ψ_u	Bekledingsafhankelijke (empirische) stabiliteitsopwaarderingsfactor	[-]
-	ϕ	Stabiliteitsfactor. In Pilarczyk, (1990) wordt hiervoor de waarde $\phi=2.25$ gebruikt als referentie	[-]

Met betrekking tot de waarde voor de factor Ψ_u vermeldt Pilarczyk, (1998) de volgende waarden:

- $\Psi_u=1$ voor breuksteensorteringen
- $\Psi_u>1$ voor andere types bekledingen. Voor gedeeltelijk gepenetreerde breuksteen wordt een waarde $\Psi_u=1.00-1.05$ vermeld voor breuksteen waarvan 30% van het oppervlak van de stenen gepenetreerd is en $\Psi_u=1.50-1.90$ voor breuksteen waarvan 60% van het oppervlak van de stenen gepenetreerd is

Specifiek voor de dimensionering van breuksteen onderhevig aan golfklap ten gevolge van scheepsgolven vermeldt InCom Working Group 04, (1987) volgende formuleringen:

- Transversale boeggolf of haalgolf (volgens Laboyrie)

$$D_{n50} \geq \frac{z_{max}}{1.5 (\cot g (\alpha))^{1/3} \Delta}$$

Met:

-	z_{max}	Golfhoogte van de boeggolf	[m]
-	D_{n50}	Nominale diameter breuksteensortering	[m]
-	Δ	Relatieve dichtheid; $\Delta = \left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}\right)$	[-]
-	α	Taludhelling	[°]

- Secundaire golven (volgens Verhey en Pilarczyk):

$$D_{n50} \geq \frac{H_i (\cos \beta)^{0.5}}{1.8 \Delta}$$

Met:

-	H_i	Golfhoogte van de secundaire golven	[m]
-	D_{n50}	Nominale diameter breuksteensortering	[m]
-	Δ	Relatieve dichtheid; $\Delta = \left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}\right)$	[-]
-	β	De hoek van de boeggolf ten opzichte van de loodlijn op de oever (meestal 55°).	[°]

Deze beide formuleringen zijn ook in de DIPRO-software ingebouwd (Waterloopkundig Laboratorium, 1997)

Aan de hand van de bovenstaande formuleringen wordt de mediaan nominale diameter D_{n50} van de breuksteen berekend. Daarna wordt de mediaan nominale breuksteendiameter D_{n50} omgerekend naar een gemiddeld breuksteengewicht M_{50} ($M_{50} = \rho_s (D_{n50})^3$; met $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$). Op basis van het berekende gemiddeld breuksteengewicht wordt een breuksteensortering geselecteerd uit Tabel 4 in paragraaf 2.4.

Indien breuksteen niet voldoet om te weerstaan aan de hydraulische belasting aan de bodem wordt een alternatief type bodembescherming voorgesteld. Een mogelijk alternatief is gepenetreerde breuksteen. Door het toepassen van een grouting wordt de stabiliteit van losse breuksteen onder invloed van stroming vergroot. EAU 2004 (Members of the Committee for Waterfront Structures, 2006) vermeldt, verwijzend naar Römisch (2000), dat partieel gegroute stortsteen stabiel blijft tot stroomsnelheden van 6 à 8 m/s.

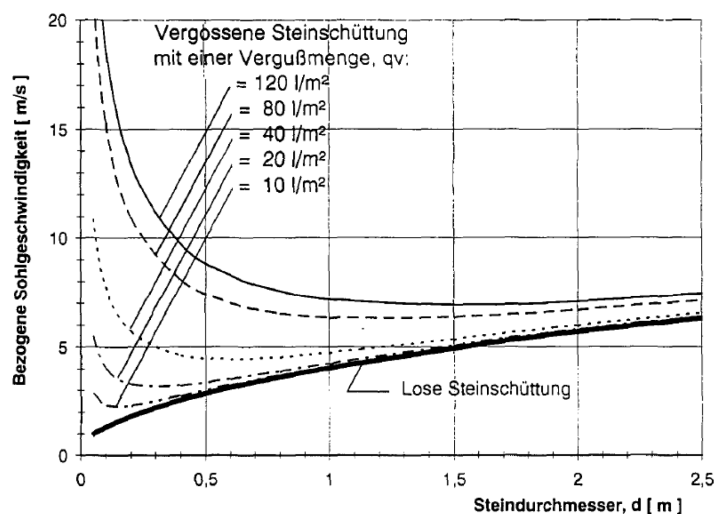
Aangezien de auteurs van dit rapport geen formules of aanbevelingen bekend zijn voor de bepaling van de breuksteendiameter die bij grouting dient toegepast te worden, worden hiervoor de twee kleinste breuksteensorteringen uit standaardbestek 260 voor de waterbouw beschouwd (5-40 kg en 10-60 kg met een laagdikte van respectievelijk 0.42 m en 0.52 m).

Het standaardbestek 260 voor de waterbouw voorziet twee soorten van grouting:

- Penetratie met gietasfalt of asfaltmastiek.
- Penetratie met colloïdaal beton.

Hierbij wordt opgemerkt dat in de praktijk penetratie met gietasfalt en asfaltmastiek voornamelijk bij uitvoering boven water toegepast wordt en dat penetratie met colloïdaal beton vooral voor onderwatertoepassingen toegepast wordt. Aangezien de bodembescherming onder water uitgevoerd zal worden, wordt voor de dimensionering enkel penetratie met colloïdaal beton beschouwd.

Figuur 9 uit Römisch (2000) geeft het verband tussen de maximaal toelaatbare stroomsnelheid boven (met beton) gepenetreerde breuksteen en de breuksteendiameter.



Figuur 9 – Verband tussen maximaal toegelaten stroomsnelheid en breuksteendiameter voor (met beton) gepenetreerde breuksteen
Bron: Römisch (2000)

Uit Figuur 9 volgt dat breuksteen met diameters tussen 0.20 m en 0.30 m gepenetreerd met 150 l/m² kan weerstaan aan stroomsnelheden hoger dan 10 m/s. Römisch (2000) merkt hierbij wel op dat de weerstand van gepenetreerde breuksteen tegen stroomsnelheden tot 6 à 8 m/s bewezen is uit proeven en metingen, maar dat de toelaatbare stroomsnelheden hoger dan 6 à 8 m/s volgen uit theoretische berekeningen.

Met betrekking tot de hoeveelheid beton voor penetratie moet het volgende opgemerkt worden:

- Het standaardbestek 260 voor de waterbouw voorziet enkel in volledige penetratie van de breuksteen en vermeldt hiervoor een hoeveelheid van 150 l/m² beton.
- In Nederland (TAW, 2002) wordt een onderscheid gemaakt tussen volledige penetratie en patroonpenetratie (stippenpenetratie of strokenpenetratie). Hierbij worden geen hoeveelheden toe te passen penetratiemateriaal vermeld. Persoonlijke communicatie met Nederlandse experts leert dat bij volledige penetratie geen hoeveelheden penetratiemateriaal voorgeschreven worden in het bestek, maar dat voldoende penetratiemateriaal dient gebruikt te worden zodat de breuksteen volledig gepenetreerd wordt. Bij dijken (aangelegd boven water) wordt dit gecontroleerd door boorkernen te nemen en deze te onderzoeken op de vullingsgraad van de boorkern.
- In de Duitse richtlijnen (Bundesanstalt für Wasserbau, 2008) wordt een onderscheid gemaakt tussen volledige en gedeeltelijke penetratie. Bij volledige penetratie wordt de hoeveelheid beton berekend aan de hand van volgende formulering:

$$V_{penetratie} = 10 n d_D$$

Met:

- $V_{penetratie}$	Hoeveelheid penetratiemateriaal	[l/m ²]
- n	Poriëngehalte	[%]
- d_D	Laagdikte bodembescherming	[m]

- Persoonlijke communicatie met de Bundesanstalt für Wasserbau (Dr.-ing. Jan Kayser, Afdeling Geotechniek van BAW), leert dat naast kaaimuren volgende penetratie in de praktijk wordt toegepast:

- In een zone met een breedte van 1.0 m naast de kaaimuur wordt een volledige penetratie toegepast.
- In het overige gedeelte van de bodembescherming (tot en met een breedte gelijk aan 1 maal de scheepsbreedte) wordt een gedeeltelijke penetratie toegepast met een hoeveelheid beton van 70 à 90 l/m².
- Daarnaast wordt nog een overgangszone met een breedte van 3.0 à 5.0 m voorzien waarin de hoeveelheid penetratie afneemt van 60 l/m² over 30 l/m² naar 0 l/m².

Bij het ontwerp van de bodembescherming voor de sluis te Sint-Baafs-Vijve (Verelst *et al.*, 2016) is beslist om bij geopeneteerde breuksteen enkel een volledige penetratie toe te laten. Dit wordt ook in deze studie toegepast. Hierbij dient een voldoende hoeveelheid beton voorzien te worden zodat een volledige penetratie bereikt wordt. Dit kan bijgevolg meer bedragen dan de 150 l/m², dewelke in het standaardbestek 260 voor de waterbouw vermeld wordt. Uit ervaringen met penetratie van breuksteen bij DVW blijkt namelijk dat een hoeveelheid van 200 l/m² nodig is voor het volledig penetreren van een breuksteen met sortering 5 - 40 kg.

4.3 Resultaten bodembescherming en oeverbescherming voor scenario 1

4.3.1 Bodembescherming ter plaatse van kaaimuur

De bodembescherming ter plaatse van de kaaimuur is onderhevig aan stroming ten gevolge van de hoofdschroef, stroming ten gevolge van de boegschroef tegen de bodem, stroming ten gevolge van de boegschroef tegen een rechte kaaimuur en stroming ten gevolge van retourstroming. Tabel 14 geeft de resultaten van de dimensionering van de bodembescherming ter plaatse van de kaaimuur onderhevig aan deze belastingen. De dimensionering is uitgevoerd aan de hand van de Shields-formulering aangepast voor stralen. In deze tabel is voor elk type hydraulische belasting ook de bijbehorende breuksteensortering gegeven. Uit de tabel volgt dat ter plaatse van de kaaimuur geen breuksteen mogelijk is als bodembescherming om te weerstaan aan de stroming ten gevolge van de boegschroef. Echter uit paragraaf 3.5 volgt dat de stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de boegschroef vanaf een afstand van 2 à 3 m uit de kaaimuur lager wordt dan de stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de hoofdschroef. Om te weerstaan aan de stroming ten gevolge van de hoofdschroef is een breuksteensortering 5-40 kg nodig. Bijgevolg wordt voorgesteld om ter plaatse van de kaaimuur een breuksteensortering 5-40 kg te voorzien, dewelke in een zone met breedte 3.0 m naast de kaaimuur gepenetreerd wordt met colloïdaal beton.

Tabel 14 – Scenario 1: Resultaten dimensionering bodembescherming ter plaatse van de kaaimuur.

		Retourstroming		Hoofd- schroef	Boegschroef tegen rechte kaaimuur		Boegschroef tegen bodem	
		0.29	0.26	1.87	3.54	2.81	1.03	0.82
U	m/s	0.29	0.26	1.87	3.54	2.81	1.03	0.82
Bodempeil	mTAW	12.75	12.75	12.75	12.75	12.75	12.75	12.75
Waterpeil	mTAW	17.20	17.20	17.20	17.20	17.20	17.20	17.20
Waterdiepte	m	4.45	4.45	4.45	4.45	4.45	4.45	4.45
r	-	0.25	0.25	0.40	0.35	0.35	0.35	0.35
Δ	-	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65
D_{n50}	m	< 0.01	< 0.01	0.13	0.70	0.35	0.02	< 0.01
M₅₀	kg	< 1	< 1	6	924	116	< 1	< 1
Breuksteensortering	-	5 -40 kg	5 -40 kg	5 -40 kg	*	*	5 -40 kg	5 -40 kg

* = Geen breuksteen mogelijk

4.3.2 Oeverbescherming in zones opwaarts en afwaarts van de kaaimuur

In de zones opwaarts en afwaarts van de kaaimuur is in scenario 1 een oever met helling 6/4 aanwezig. Wat retourstroming en de stroming ten gevolge van de boegschroef betreft, is de stroomsnelheid aan de bodem gekend. Eigenlijk zou de bepaling van de breuksteendiameter dan enkel uitgevoerd moeten worden aan de hand van de Shields-formulering aangepast voor stralen. Echter, deze formulering houdt geen rekening met de helling van de oever. Om die reden wordt de dimensionering ook uitgevoerd aan de hand van de formulering volgens Pilarczyk. Tabel 15 en Tabel 16 geven de resultaten van deze dimensionering gebruik makend van deze beide formuleringen.

Wat betreft scheepsgolven wordt de breuksteendiameter eerst bepaald voor golfklap ten gevolge van de haalgolf aan de hand van de formulering volgens Laboyrie. Het resultaat van deze berekening is gegeven in Tabel 17. Daarna is voor golfklap ten gevolge van de secundaire golven de benodigde breuksteendiameter bepaald aan de hand van de formulering volgens Pilarczyk voor windgolven en de formulering volgens Pilarczyk voor scheepsgolven. De resultaten hiervan zijn gegeven in Tabel 18.

Tabel 15 – Scenario 1: resultaten dimensionering oeverbekleding aan de hand van formulering volgens Pilarczyk

		Retourstroming		Boegschroef	
U	m/s	0.29	0.26	7.02	5.57
Ψ	-	0.035	0.035	0.035	0.035
φ	-	1.0	1.0	1.0	1.0
K_t	-	1.50	1.50	2.49	2.49
Bodempeil	mTAW	12.75	12.75	12.75	12.75
Waterpeil	mTAW	17.20	17.20	17.20	17.20
Waterdiepte	m	4.45	4.45	4.45	4.45
α	°	33.7	33.7	33.7	33.7
Δ	-	1.65	1.65	1.65	1.65
D_{n50}	m	<0.01	<0.01	*	*
M₅₀	kg	< 1	< 1	*	*

* = Onrealistische grote breuksteendiameters worden berekend

Tabel 16 – Scenario 1: resultaten dimensionering oeverbekleding aan de hand van Shields-formulering aangepast voor stralen

		Retourstroming		Boegschroef	
U	m/s	0.29	0.26	7.02	5.57
Bodempeil	mTAW	12.75	12.75	12.75	12.75
Waterpeil	mTAW	17.20	17.20	17.20	17.20
Waterdiepte	m	4.45	4.45	4.45	4.45
r	-	0.25	0.25	0.35	0.35
Δ	-	1.65	1.65	1.65	1.65
D_{n50}	m	<0.01	<0.01	*	*
M₅₀	kg	< 1	< 1	*	*

* = Onrealistische grote breuksteendiameters worden berekend

Tabel 17 – Scenario 1: resultaten dimensionering oeverbekleding aan de hand van de formulering volgens Laboyrie

		Geladen schip	Ongeladen schip
z_{max}	m	0.24	0.29
α	°	33.7	33.7
Δ	-	1.65	1.65
D_{n50}	m	0.09	0.10
M₅₀	kg	2	3

Tabel 18 - Scenario 1: resultaten oeverbekleding onderhevig aan scheepsgolven aan de hand van de formulering volgens Pilarczyk

Pilarczyk (windgolven)				Pilarczyk (scheepsgolven)			
		Geladen schip	Ongeladen schip			Geladen schip	Ongeladen schip
H_s	m	0.03	0.04	H_i	m	0.03	0.04
T_i	s	1.01	1.30	β	°	55.0	55.0
x_m	-	4.70	5.15	Δ	-	1.65	1.65
α	°	33.7	33.7	D_{n50}	m	0.01	0.01
b	-	0.5	0.5	M_{50}	kg	< 1	< 1
γ_u	-	1.0	1.0				
φ	-	2.25	2.25				
Δ	-	1.65	1.65				
D_{n50}	m	0.02	0.03				
M_{50}	kg	< 1	< 1				

In Tabel 19 zijn de resultaten van deze berekeningen nog eens samengevat en is ook de bijbehorende breuksteensortering geselecteerd uit Tabel 4 in paragraaf 2.4.

Tabel 19 – Scenario 1: resultaten bepaling breuksteensortering voor oeverbescherming

Hydraulische belasting	M_{50}	Breuksteensortering
Haalgolf	3 kg	5 – 40 kg
Secundaire scheepsgolven	< 1	5 – 40 kg
Retourstroming	< 1kg	5 – 40 kg
Boegschroef gehelde oever	-	-

- Breuksteen niet toepasbaar

Uit Tabel 19 volgt dat om te weerstaan aan de stroomsnelheid ten gevolge van de haalgolf, de secundaire golven en de retourstroming een breuksteensortering 5-40 kg voldoende is, maar dat breuksteen niet toepasbaar is als oeverbescherming om te weerstaan aan de stroomsnelheid ten gevolge van de boegschroef.

Als alternatief kan volgende oeverbescherming voorzien worden:

- 1) Bodembescherming uit gepenetreerde breuksteen (bijvoorbeeld sortering 5-40 kg): Door toepassen van gepenetreerde breuksteen kan weerstaan worden aan hoge stroomsnelheden. Echter gepenetreerde breuksteen is een gesloten bekleding. Hierbij moet dan wel nog rekening gehouden worden met wateroverdrukken, dewelke kunnen aanleiding geven tot barsten van de oeverbescherming. Anderzijds dient ook nog gecontroleerd te worden of de gepenetreerde breuksteen kan weerstaan aan golfklap ten gevolge van de secundaire scheepsgolven. Hierbij wordt de parameter γ_u in de formulering volgens Pilarczyk voor windgolven verhoogd van 1.0 naar 1.9 en wordt de parameter b verhoogd van 0.5 (ruwe en doorlatende bekleding) naar 1.0 (gladde en ondoorlatende bekleding). Het resultaat van deze berekening is gegeven in Tabel 20. Uit deze berekening volgt dat een breuksteensortering 5-40 kg gepenetreerd met beton volstaat om te weerstaan aan golfklap ten gevolge van scheepsgolven.

Tabel 20 - Resultaten dimensionering gepenetreerde breuksteen als oeverbekleding onderhevig aan golfklap ten gevolge van secundaire sloopgolven aan de hand van de formulering volgens Pilarczyk

Pilarczyk (windgolven)			
		Geladen schip	Ongeladen schip
H_s	m	0.03	0.04
T_i	s	1.01	1.30
x_m	-	4.70	5.15
α	°	33.7	33.7
b	-	1.0	1.0
y_u	-	1.9	1.9
φ	-	2.25	2.25
Δ	-	1.65	1.65
D_{n50}	m	0.03	0.04
M_{50}	kg	< 1	< 1

- 2) Het toepassen van een verticale damplank: bij toepassen van een verticale damplank worden aan de bodem dezelfde stroomsnelheden bekomen als bij de kaaimuur uit paragraaf 4.3.1. Bijgevolg kan de bodembescherming uit paragraaf 4.3.1 hiervoor overgenomen worden.

4.3.3 Bodembescherming in zones opwaarts en afwaarts van kaaimuur

In de zones opwaarts en afwaarts van de kaaimuur, waar zich de gehelde oeverbescherming bevindt, is voor de dimensionering van de bodembescherming de stroomsnelheid aan de bodem van de hoofdschroef en de stroomsnelheid aan de bodem van de boegschroef bij wegvaren van het schip van belang. Uit Tabel 14 in paragraaf 4.3.1 volgt dat om te weerstaan aan deze belastingen een bodembescherming uit breuksteen sortering 5-40 kg noodzakelijk is.

4.3.4 Samenvatting bodem- en oeverbescherming

Tabel 21 geeft voor alle zones uit Figuur 8 in paragraaf 4.1 een overzicht van de benodigde bodembescherming en oeverbescherming om te weerstaan aan de hydraulische belastingen ten gevolge van scheepvaart. Uit de tabel volgt dat ter plaatse van de kaaimuur geen bodembescherming met breuksteen mogelijk is en dat op de gehelde oever opwaarts en afwaarts van de kaaimuur geen oeverbescherming uit breuksteen mogelijk is. Enkel penetratie met colloïdaal beton van breuksteen sortering 5-40 kg of 10-60 kg is voldoende om te weerstaan aan de stroming aan de bodem ten gevolge van de scheepvaart.

Tabel 21 – Overzicht benodigde bodem- of oeverbescherming voor scenario 1

	Kleur zone in Figuur 8 in paragraaf 4.1	Type bodem- of oeverbescherming
Bodembescherming ter plaatse van kaaimuur	Rood	Breuksteen 5-40 kg in zone met breedte 3.0 m naast kaaimuur gepenetreerd met beton
Oeverbescherming in zones opwaarts en afwaarts van de kaaimuur	Geel	Breuksteen 5-40 kg of 10-60 kg gepenetreerd met beton
Bodembescherming in zones opwaarts en afwaarts van de kaaimuur	Paars	Breuksteen 5-40 kg

4.4 Resultaten bodembescherming en oeverbescherming voor scenario 2

4.4.1 Bodembescherming ter plaatse van kaaimuur

De bodembescherming ter plaatse van de kaaimuur is onderhevig aan stroming ten gevolge van de hoofdschroef, stroming ten gevolge van de boegschroef tegen de bodem, stroming ten gevolge van de boegschroef tegen een rechte kaaimuur en retourstroming. Tabel 22 geeft de resultaten van de dimensionering van de bodembescherming ter plaatse van de kaaimuur onderhevig aan deze belastingen. De dimensionering is uitgevoerd aan de hand van de Shields-formulering aangepast voor stralen. In deze tabel is voor elk type hydraulische belasting ook de bijbehorende breuksteensortering gegeven. Uit de tabel volgt dat ter plaatse van de kaaimuur een breuksteensortering 10-60 kg nodig is om te weerstaan aan de stroming ten gevolge van de optredende scheepvaart. Uit paragraaf 3.4 volgt dat de hogere stroomsnelheden ten gevolge van de boegschroef zich voordoen in een zone met breedte 3.0 m naast de kaaimuur. Theoretisch zou naast de kaaimuur ook een breuksteensortering 5-40 kg aangebracht kunnen worden, dewelke in de eerste 3.0 m naast de kaaimuur gepenetreerd wordt met beton. Aangezien de opdrachtgever op zoek is naar een oplossing waarbij enkel breuksteen wordt aangebracht wordt deze oplossing hier niet beschouwd, maar wordt in de volledige zone naast de kaaimuur een breuksteensortering 10-60 kg voorzien.

Tabel 22 – Scenario 2: Resultaten dimensionering bodembescherming ter plaatse van de kaaimuur

		Retourstroming		Hoofdschroef		Boegschroef tegen rechte kaaimuur		Boegschroef tegen bodem	
U	m/s	0.16	0.15	1.19	1.33	2.52	2.00	0.73	0.58
Bodempeil	mTAW	11.75	11.75	11.75	11.75	11.75	11.75	11.75	11.75
Waterpeil	mTAW	17.20	17.20	17.20	17.20	17.20	17.20	17.20	17.20
Waterdiepte	m	5.45	5.45	5.45	5.45	5.45	5.45	5.45	5.45
r	-	0.25	0.25	0.40	0.40	0.35	0.35	0.35	0.35
Δ	-	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65
D_{n50}	m	< 0.01	< 0.01	0.03	0.04	0.23	0.11	< 0.01	< 0.01
M₅₀	kg	< 1	< 1	< 1	< 1	32	4	< 1	< 1
Breksteensortering	-	5 -40 kg	5 -40 kg	5 -40 kg	5 -40 kg	10-60 kg	5 -40 kg	5 -40 kg	5 -40 kg

4.4.2 Oeverbescherming in zones opwaarts een afwaarts van de kaaimuur

In de zones opwaarts en afwaarts van de kaaimuur is in scenario 2 een oever met helling 10/4 aanwezig. Wat retourstroming en de stroming ten gevolge van de boegschroef betreft, is de stroomsnelheid aan de bodem gekend. Analoog als in paragraaf 4.3.2 wordt de bepaling van de breuksteendiameter zowel uitgevoerd aan de hand van de Shields-formulering aangepast voor stralen als aan de hand van de formulering volgens Pilarczyk. Tabel 23 en Tabel 24 geven de resultaten van deze dimensionering gebruik makend van deze beide formuleringen.

Wat betreft scheepsgolven wordt de benodigde breuksteendiameter, analoog als in paragraaf 4.3.2, bepaald voor zowel golfklap ten gevolge van de haalgolf aan de hand van de formulering volgens Laboyrie (Tabel 25) als voor golfklap ten gevolge van de secundaire golven aan de hand van de formulering volgens Pilarczyk voor windgolven en de formulering volgens Pilarczyk voor scheepsgolven (Tabel 26).

Tabel 23 – Scenario 2: Resultaten dimensionering oeverbekleding aan de hand van formulering volgens Pilarczyk

		Retourstroming		Boegschroef	
U	m/s	0.16	0.15	7.02	5.57
Ψ	-	0.035	0.035	0.035	0.035
ϕ	-	1.0	1.0	1.0	1.0
K_t	-	1.50	1.50	2.49	2.49
Bodempeil	mTAW	11.75	11.75	11.75	11.75
Waterpeil	mTAW	17.20	17.20	17.20	17.20
Waterdiepte	m	5.45	5.45	5.45	5.45
α	°	21.8	21.8	21.8	21.8
Δ	-	1.65	1.65	1.65	1.65
D_{n50}	m	<0.01	<0.01	*	*
M_{50}	kg	< 1	< 1	*	*

* = Onrealistische grote breuksteendiameters worden berekend

Tabel 24 – Scenario 2: Resultaten dimensionering oeverbekleding aan de hand van Shields-formulering aangepast voor stralen

		Retourstroming		Boegschroef	
U	m/s	0.16	0.15	7.02	5.57
Bodempeil	mTAW	11.75	11.75	11.75	11.75
Waterpeil	mTAW	17.20	17.20	17.20	17.20
Waterdiepte	m	5.45	5.45	5.45	5.45
r	-	0.25	0.25	0.35	0.35
Δ	-	1.65	1.65	1.65	1.65
D_{n50}	m	<0.01	<0.01	*	*
M_{50}	kg	< 1	< 1	*	*

* = Onrealistische grote breuksteendiameters worden berekend

Tabel 25 – Scenario 2: Resultaten dimensionering breuksteen als oeverbekleding onderhevig aan golfklap aan de hand van de formulering volgens Laboyrie

		Geladen schip	Ongeladen schip
z_{max}	m	0.19	0.24
α	°	21.8	21.8
Δ	-	1.65	1.65
D_{n50}	m	0.06	0.07
M_{50}	kg	< 1	1

Tabel 26 – Scenario 2: Resultaten dimensionering breuksteen als oeverbekleding onderhevig aan golfklap ten gevolge van secundaire scheepsgolven aan de hand van de formulering volgens Pilarczyk

Pilarczyk (windgolven)			
		Geladen schip	Ongeladen schip
H_s	m	0.03	0.04
T_i	s	1.01	1.30
x_m	-	3.08	3.38
α	°	21.8	21.8
b	-	1.0	1.0
γ_u	-	1.0	1.0
φ	-	2.25	2.25
Δ	-	1.65	1.65
D_{n50}	m	0.02	0.04
M_{50}	kg	< 1	< 1

Pilarczyk (scheepsgolven)			
		Geladen schip	Ongeladen schip
H_i	m	0.03	0.04
β	°	55.0	55.0
Δ	-	1.65	1.65
D_{n50}	m	0.01	0.01
M_{50}	kg	< 1	< 1

In Tabel 27 zijn de resultaten van deze berekeningen nog eens samengevat en is ook de bijbehorende breuksteensortering geselecteerd uit Tabel 4 in paragraaf 2.4. Uit deze tabel volgt dat een breuksteensortering 5-40 kg voldoende is om te weerstaan aan de optredende hydraulische belastingen ten gevolge van scheepsgolven en retourstroming. Een breuksteenbekleding is niet toepasbaar om te weerstaan aan de stroming ten gevolge van de boegschroef tegen de gehelde oever. Door de opdrachtgever wordt echter gekozen om restricties in het gebruik van de boegschroef op te leggen in de zones opwaarts en afwaarts van de kaaimuur in plaats van een oeverbescherming te voorzien uit gepenetreerde breuksteen.

Tabel 27 – Scenario 2: Resultaten bepaling breuksteensortering voor oeverbescherming

Hydraulische belasting	M_{50}	Breuksteensortering
Haalgolf	1 kg	5 – 40 kg
Secundaire scheepsgolven	< 1 kg	5 – 40 kg
Retourstroming	< 1kg	5 – 40 kg
Boegschroef gehelde oever	-	-

- Breuksteen niet toepasbaar

4.4.3 Bodembescherming in zones opwaarts en afwaarts van de kaaimuur

In de zones opwaarts en afwaarts van de kaaimuur, waar de gehelde oeverbescherming aanwezig is, is voor de dimensionering van de bodembescherming de stroomsnelheid aan de bodem van de hoofdschroef en de stroomsnelheid aan de bodem van de boegschroef bij wegvaren van het schip van belang. Uit Tabel 22 in paragraaf 4.4.1 volgt dat om te weerstaan aan deze belastingen een bodembescherming uit breuksteen 5-40 kg voldoende is. Dit is eenzelfde bodembescherming als ter plaatse van de kaaimuur.

4.4.4 Samenvatting bodem- en oeverbescherming

Tabel 28 geeft een overzicht van de bodembescherming of oeverbescherming die voorzien wordt in alle zones uit Figuur 8 in paragraaf 4.1. Uit de tabel volgt dat zowel ter plaatse van de kaaimuur als in de zones opwaarts en afwaarts van de kaaimuur een bodembescherming met breuksteen mogelijk is (sortering 10-60 kg). Op de gehele oever wordt een breuksteensortering 5-40 kg aangebracht. In de zones opwaarts en afwaarts van de kaaimuur worden door de opdrachtgever restricties in het gebruik van de boegschroef opgelegd om erosie van deze oeverbescherming tegen te gaan, aangezien uit de dimensionering volgt dat deze oeverbescherming niet kan weerstaan aan de hoge stroomsnelheden ten gevolge van de boegschroef.

Tabel 28 – Overzicht benodigde bodem- of oeverbescherming voor scenario 2

	Kleur zone in Figuur 8 in paragraaf 4.1	Type bodem- of oeverbescherming
Bodembescherming ter plaatse van kaaimuur	Rood	Breuksteen 10-60 kg
Oeverbescherming in zones opwaarts en afwaarts van de kaaimuur	Geel	Breuksteen 5-40 kg
Bodembescherming in zones opwaarts en afwaarts van de kaaimuur	Paars	Breuksteen 5-40 kg

4.5 Resultaten bodembescherming en oeverbescherming voor scenario 3

4.5.1 Bodembescherming ter plaatse van kaaimuur

De bodembescherming ter plaatse van de kaaimuur is onderhevig aan stroming ten gevolge van de hoofdschroef, stroming ten gevolge van de boegschroef tegen de bodem, stroming ten gevolge van de boegschroef tegen een rechte kaaimuur en retourstroming. Tabel 29 geeft de resultaten van de dimensionering van de bodembescherming ter plaatse van de kaaimuur onderhevig aan deze belastingen. De dimensionering is uitgevoerd aan de hand van de Shields-formulering aangepast voor stralen. In deze tabel is voor elk type hydraulische belasting ook de bijbehorende breuksteensortering gegeven. Uit de tabel volgt dat het niet mogelijk is om breuksteen toe te passen om te weerstaan aan de stroming ten gevolge van de hoofdschroef. Om te weerstaan aan de stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de boegschroef tegen de rechte kaaimuur is het ook niet mogelijk om breuksteen toe te passen, maar deze hoge stroomsnelheden doen zich enkel voor in de hoek tussen de kaaimuur en de bodem. Uit paragraaf 3.4 volgt dat vanaf een afstand van 4.0 m uit de kaaimuur de stroming ten gevolge van de hoofdschroef maatgevend is. Bijgevolg is ter plaatse van de kaaimuur enkel breuksteen (sortering 4-50 kg of 10-60 kg) gepenetreerd met colloïdaal beton mogelijk om te weerstaan aan de hoge stroomsnelheden aan de bodem.

Tabel 29 – Scenario 3: Resultaten dimensionering bodembescherming ter plaatse van de kaaimuur

		Retourstroming		Hoofdschroef		Boegschroef tegen rechte kaaimuur		Boegschroef tegen bodem	
		CEMT Va	CEMT Va+	CEMT Va	CEMT Va+	CEMT Va	CEMT Va+	CEMT Va	CEMT Va+
Schip									
U	m/s	0.29	0.19	2.66	2.26	5.43	7.50	1.58	2.18
Bodempeil	mTAW	11.75	11.75	11.75	11.75	11.75	11.75	11.75	11.75
Waterpeil	mTAW	16.25	16.25	16.25	16.25	16.25	16.25	16.25	16.25
Waterdiepte	m	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50
r	-	0.25	0.25	0.40	0.40	0.35	0.35	0.35	0.35
Δ	-	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65
D_{n50}	m	< 0.01	< 0.01	0.37	0.63	2.53	6.66	0.06	0.16
M₅₀	kg	< 1	< 1	131	-	-	-	< 1	12
Breuksteensortering	-	5 -40 kg	5 -40 kg	40-200 kg	-	-	-	5 -40 kg	5 -40 kg

- Breuksteen niet toepasbaar

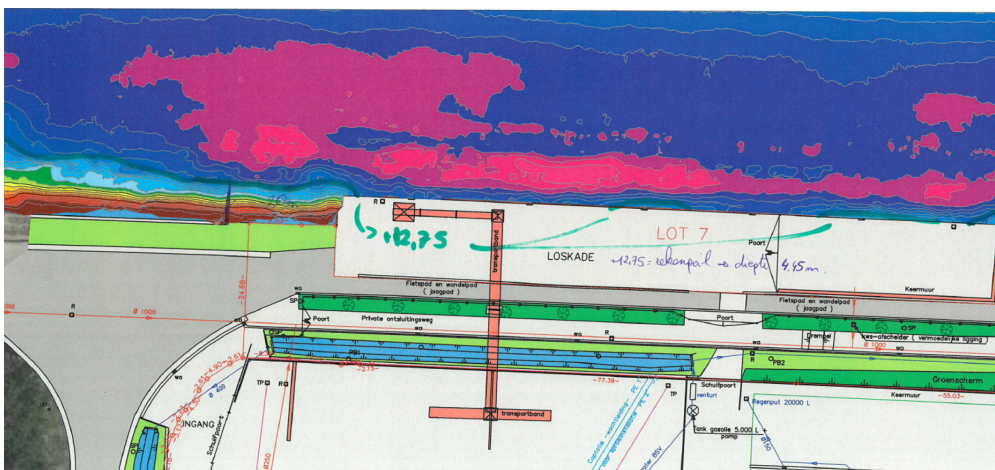
4.5.2 Oever- en bodembescherming in zones opwaarts en afwaarts van de kaaimuur

In de zones opwaarts en afwaarts van de kaaimuur is een verticale oever aanwezig. De bodem naast deze verticale oever is onderhevig aan dezelfde hydraulische belastingen als de bodem ter plaatse van de kaaimuur. Ook voor deze bodem is breuksteen (sortering 4-50 kg of 10-60 kg) gepenetreerd met colloïdaal beton de enige mogelijkheid om te weerstaan aan de hoge stroomsnelheden aan de bodem ten gevolge van hoofdschroef en boegschroef.

5 Opvullen van erosiekuilen

Naast de kaaimuur en aan de oevers van het kanaal zijn erosiekuilen ontstaan. Figuur 10 geeft een voorstelling van de bathymetrie voor de bestaande kaaimuur. Hieruit volgt dat de diepte van deze erosiekuilen kan oplopen tot 1 à 1.3 m. De locatie van de erosiekuilen voor de kaaimuur duidt erop dat deze ontstaan zijn onder invloed van de schroefwerking van de scheepvaart tijdens manoeuvreren en aanmeren aan de kaaimuur. De helling van de bodem tussen de erosiekuil in het kanaal en de oevers opwaarts en afwaarts van de kaaimuur is niet zo steil. Dit wijst erop dat eventuele oevererosie opwaarts en afwaarts van de kaaimuur niet ontstaan is door afschuiven van de oever in deze erosiekuilen, maar mogelijks ontstaan is onder invloed van scheepsgolven of van de invloed van de werking van boegschroeven tijdens manoeuvreren. Door de opdrachtgever is gevraagd welke mogelijkheden er zijn om de erosiekuilen op te vullen, met de nadruk op alternatieven voor breuksteen, aangezien het een tijdelijke oplossing betreft tussen nu en de mogelijke eigenlijke opwaardering/verdieping van het kanaal. Hierbij wordt opgemerkt dat de erosiekuilen ter plaatse van de kaaimuur met het oog op het aanbrengen van de benodigde bodembescherming opgevuld dienen te worden. Mogelijk kunnen de erosiekuilen naast de aan te brengen bodembescherming (met het oog op een mogelijke verdieping van de kanaalbodem na opwaardering van het kanaal) aanwezig blijven en dienen deze niet opgevuld te worden in het geval deze stabiel zijn en niet verder verdiepen. De beschouwingen in dit hoofdstuk zijn enkel geldig voor scenario 1 en scenario 2 uit dit rapport, aangezien enkel voor deze tijdelijke scenario's het opvullen van de erosiekuilen van toepassing is.

Figuur 10 – Bathymetrie voor de bestaande kaaimuur



LEGENDE					
bodempcil in mTAW			waterdiepte in m		
nummer	min. bodempcil	max. bodempcil	kleurcode	min. waterdiepte	max. waterdiepte
1	16.60	17.20		0.00	0.60
2	16.35	16.60		0.60	0.85
3	16.10	16.35		0.85	1.10
4	15.85	16.10		1.10	1.35
5	15.60	15.85		1.35	1.60
6	15.35	15.60		1.60	1.85
7	15.10	15.35		1.85	2.10
8	14.85	15.10		2.10	2.35
9	14.60	14.85		2.35	2.60
10	14.35	14.60		2.60	2.85
11	14.10	14.35		2.85	3.10
12	13.85	14.10		3.10	3.35
13	13.60	13.85		3.35	3.60
14	13.35	13.60		3.60	3.85
15	13.10	13.35		3.85	4.10
16	12.85	13.10		4.10	4.35
17	12.60	12.85		4.35	4.60
18	12.35	12.60		4.60	4.85
19	12.10	12.35		4.85	5.10
20	11.85	12.10		5.10	5.35
21	11.60	11.85		5.35	5.60
22	11.35	11.60		5.60	5.85
23	11.12	11.35		5.85	6.08
24	...	...		...	...
25	...	...		...	...

Uit de dimensionering in hoofdstuk 4 volgt dat op de bodem ter plaatse van de kaaimuur in scenario 1 een breuksteensortering 5-40 kg aangebracht dient te worden, dewelke in een strook met breedte 3.0 m naast de kaaimuur gepenetreerd wordt met beton. In scenario 2 wordt ter plaatse van de kaaimuur een breuksteensortering 10-60 kg aangebracht. De opdrachtgever heeft gesuggereerd om de erosiekuilen op te vullen met kleigrond, dewelke bij de bouw van een nieuwe kaaimuur op overschot is. Met betrekking tot de erosie van klei vermeldt PIANC rapport 180 (MarCom Working Group 180, 2015) de waarden voor de kritische stroomsnelheid voor erosie uit Tabel 30.

Tabel 30 – Kritische stroomsnelheid voor erosie (V_c) van klei (MarCom Working Group 180, 2015)

Quality of clay	⁽¹⁾ $C_{clay,c}$ (kN/m ²)	⁽¹⁾ V_c (m/s)	⁽²⁾ V_c (m/s)
sand	-	< 0.4	< 0.2
poor	< 0.15	0.4 – 0.8	0.2 – 0.4
average	0.15 – 0.33	0.8 – 1.2	0.4 – 0.6
good	0.33 – 0.75	1.2 – 1.8	0.6 – 0.9
very good	> 0.75	> 1.8	> 0.9

⁽¹⁾ $r = 0.1$ (clayey river beds; normal turbulence conditions)

⁽²⁾ $r = 0.2$ (structured soil; high turbulence conditions)

Schroefstraalwerking van schepen is een hoog turbulente conditie. Voor deze condities geldt dat de kritische stroomsnelheid voor erosie van zeer goede klei groter is dan 0.9 m/s. De stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de hoofdschroef bedraagt in scenario 1 1.87 m/s en in scenario 2 tussen 1.19 m/s en 1.33 m/s, wat beduidend hoger is dan deze waarde. Bijgevolg kan de klei niet weerstaan aan deze stroomsnelheden en zullen snel opnieuw erosiekuilen ontstaan op dezelfde locatie. Het is wel een optie om de erosiekuilen gedeeltelijk op te vullen met de beschikbare kleigrond die vrijkomt bij de bouw van een nieuwe kaaimuur en deze daarna te bedekken met breuksteen tot het juiste bodempeil bekomen is, aangezien de benodigde laagdikte voor breuksteenbekleding 5-40 kg 0.42 m betreft en de erosiekuilen dieper zijn dan 0.42 m.

Wat de breedte van de bodembescherming naast een kaaimuur betreft, wordt in Ontwerp van Schutsluizen (Beem *et al.*, 2000), een praktische waarde gelijk aan 1.0 à 1.5 maal de scheepsbreedte vermeld, wat neerkomt op 11.4 à 17.1 m voor een schip CEMT klasse Va (bij scenario 1) of 9.5 à 14.3 m voor een schip CEMT klasse IV (bij scenario 2). Anderzijds vermelden Blokland & Roubos, (2013) een breedte gelijk aan de breedte van de passieve grondwig naast een kaaimuur. Voor een nieuwe kaaimuur is de breedte op deze wijze te bepalen uit het ontwerp van de kaaimuur, voor de bestaande kaaimuur is deze werkwijze vermoedelijk moeilijker uit te voeren.

Aangezien de oevererosie vermoedelijk ontstaan is onder invloed van scheepsgolven of straalwerking van de boegschroeven van een schip tijdens aanmeren en vermoedelijk onafhankelijk is van de erosie van de bodem, kan het herstellen van de oever gebeuren onafhankelijk van het opvullen van de erosiekuilen in de bodem. De vraag stelt zich of het tijdelijk opvullen van de erosiekuilen in de bodem en bij opwaardering van het kanaal deze breuksteen terug wegnemen praktisch of wat betreft kostprijs haalbaar is.

Door de opdrachtgever is gevraagd om in de literatuur op zoek te gaan naar alternatieven voor breuksteen voor een bodembescherming naast de kaaimuur. Echter in de literatuur zijn niet echt veel alternatieven voor breuksteen aanwezig, dewelke na verloop van tijd ook makkelijk terug weg te nemen zijn. Door Hawkswood *et al.*, (2014) worden volgende mogelijke alternatieve types bodembescherming vermeld naast kaaimuren onderhevig aan schroefstraalwerking:

- 1) Beton matrassen: deze matrassen worden door duikers uitgerold over de bodem en daarna gevuld met een vloeibaar beton. Hierbij wordt vermeld dat deze ook gebruikt kunnen worden als oeverbescherming.
- 2) Bodembescherming uit colloïdaal beton.
- 3) Voorgevormde matten: bijvoorbeeld asfaltmatten, blokkenmatten of schanskorf matten. Bij deze matten dient vooral aandacht besteed te worden aan de overlappings/naden van deze matten.

Raes et al. (1996) vermelden een methode voor de bepaling van de dikte van voorgevormde matten, waarbij de dikte van de mat bepaald wordt om te weerstaan aan de liftkracht ten gevolge van de stroming. De dikte van de mat wordt bepaald aan de hand van volgende formulering:

$$d = \frac{U^2}{\Delta g \theta^2}$$

Met:

- d	Dikte mat	[m]
- U	Stroomsnelheid boven de mat	[m/s]
- θ	Parameter	[-]
- Δ	Relatieve dichtheid; $\Delta = \left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \right)$	[-]
- ρ_s	Dichtheid (= 2100 kg/m ³ voor open steenasfalt en 2400 kg/m ³ voor beton)	[kg/m ³]
- ρ_w	Dichtheid water (= 1000 kg/m ³)	[kg/m ³]
- g	Valversnelling (= 9.81 m/s ²)	[m/s ²]

Voor de waarde van de parameter θ wordt een onderscheid gemaakt tussen de overlap tussen twee naburige matten ($\theta = 2.0$) en de (ontgronding aan de) rand van de bekleding ($\theta = 1.4$).

Als voorbeeld wordt de formulering volgens Raes *et al.*, (1996) voor de bepaling van de dikte van matten toegepast op de stroomsnelheden aan de bodem berekend in hoofdstuk 4. Hiervoor wordt voor de hoofdschroef en de boegschroef enkel de maximale waarde van de stroomsnelheid aan de bodem uit scenario 1 en scenario 2 beschouwd. Voor de hoofdschroef geeft dit 1.87 m/s en voor de boegschroef 3.54 m/s (beiden voor scenario 1). Toepassen van deze waarden geeft voor een plaat uit colloïdaal beton of voor asfaltmatten de dikte uit Tabel 31. Voor de hoofdschroef zijn deze diktes kleiner dan de minimale diktes die nodig zijn voor de aanleg van deze types bodembescherming. Voor de boegschroef wordt een dikte van 0.23 m à 0.29 m berekend. Echter deze hoge stroomsnelheden doen zich voor in de hoek tussen de kaaimuur en de bodem en zijn over een afstand van 3 à 4 m uit de kaaimuur al lager dan de stroomsnelheden van de hoofdschroef. Bijgevolg dient enkel in een strook met breedte 3 à 4 m deze dikkere bodembescherming aangebracht te worden. Aangezien blokkenmatten en een plaat uit colloïdaal beton dezelfde dichtheid hebben, geeft de formulering volgens Raes *et al.*, (1996) nagenoeg dezelfde resultaten voor deze beide types bodembescherming, zie Tabel 31.

Tabel 31 – Benodigde dikte plaat colloïdaal beton of asfaltmatten

	Eenheid	Plaat uit colloïdaal beton of blokkenmatten		Asfaltmatten	
		hoofdschroef	boegschroef	hoofdschroef	boegschroef
Type hydraulische belasting	-				
Stroomsnelheid	m/s	1.87	3.54	1.87	3.54
Lift coëfficiënt	-	0.5	0.5	0.5	0.5
Relatieve dichtheid	-	1.4	1.4	1.1	1.1
Dikte	m	0.06	0.23	0.08	0.29

Echter deze alternatieve types bodembescherming kunnen ook weerstaan aan grotere stroomsnelheden dan breuksteen, maar deze zijn vermoedelijk wel duurder dan breuksteen. Een vergelijking van de kostprijs van de verschillende types bodembescherming behoort niet tot deze studie. Daarnaast zijn deze alternatieve types bodembescherming vermoedelijk even moeilijk of nog moeilijker weg te nemen als breuksteen wanneer het kanaal in de toekomst verdiept zou worden.

6 Conclusies

Op het Kanaal Bossuit-Kortrijk is ter hoogte van het bedrijf Devamix te Harelbeke erosie van de bodem nabij de kaaimuur vastgesteld. Op vraag van De Vlaamse Waterweg nv afdeling Regio West (DVW) heeft het studiebureau SBE daarom een ontwerp gemaakt van de oeverbescherming opwaarts en afwaarts van de kaaimuur en bodembescherming ter plaatse van de kaaimuur bij een nieuw te bouwen (meer naar achter gelegen) kaaimuur op deze locatie. Op dit ogenblik is echter een studie lopende naar opwaardering van het Kanaal Bossuit-Kortrijk, waardoor onder meer de ligging van het bodempeil van het kanaal nog niet vast ligt. Een waterpeilverlaging van maximaal 1 m en een verlaging van het bodempeil zijn daarbij mogelijke opties. Dit heeft tot gevolg dat een herstelling van de ontgronding en van de oeverbekleding volgens de wijze voorgesteld door het studiebureau op dit ogenblik niet mogelijk is, aangezien de voorgestelde bodembescherming en oeverbescherming een relatief definitief karakter heeft en bij opwaardering van het kanaal in de toekomst mogelijk aangepast moet worden aan het definitieve bodempeil.

Daarom vraagt DVW (contactpersoon: Dries Depreeuw) om de dimensionering uit te voeren van de bodembescherming en de oeverbescherming rond de bestaande kaaimuur voor de volgende mogelijke scenario's:

- 1) Scenario 1: Bij dit scenario wordt het schip CEMT klasse Va als maatgevend schip beschouwd met een diepgang gelijk aan de huidige diepgang op het kanaal van 2.6 m. Het bodempeil ter plaatse van de kaaimuur is in dit scenario gelijk aan het huidig bodempeil +12.75 mTAW. De gemiddelde waterdiepte is daarmee 4.45 m. Opwaarts en afwaarts van de kaaimuur wordt een tijdelijke oeverbescherming beschouwd bestaande uit breuksteen onder helling 6/4.
- 2) Scenario 2: Bij dit scenario wordt het schip CEMT klasse IV als maatgevend schip beschouwd met een diepgang gelijk aan de huidige diepgang van 2.6 m. Het bodempeil ter plaatse van de kaaimuur wordt met 1 m verlaagd en is in dit scenario daarmee gelijk aan bodempeil +11.75 mTAW, i.e. het bodempeil na opwaardering van het kanaal. De gemiddelde waterdiepte is 5.45 m. Daarnaast wordt opwaarts en afwaarts van de kaaimuur een tijdelijke oeverbescherming beschouwd uit breuksteen onder helling 10/4 en wordt door de opdrachtgever in de zones opwaarts en afwaarts van de kaaimuur, waar deze gehele oeverbescherming aanwezig is, een beperking op het gebruik van de boegschroef opgelegd.
- 3) Scenario 3: Dit is het ontwerpscenario, waarin rekening gehouden wordt met een verlaging van het waterpeil van het kanaal van 0.95 m, een waterdiepte van 4.5 m en een schip CEMT klasse Va of CEMT klasse Va+ met diepgang 3.5 m. Het bodempeil bedraagt +11.75 mTAW. Wat de oeververdediging in dit scenario betreft is opwaarts en afwaarts van de kaaimuur een gehele oever niet meer mogelijk, maar wordt een verticale oever voorzien.

Bij scenario 1 en scenario 2 wordt opgemerkt dat deze de huidige (tijdelijke) toestand van de kaaimuur betreffen en dat de opdrachtgever bij voorkeur een bodembescherming of oeverbescherming uit breuksteen wenst te voorzien, aangezien deze bij de opwaardering en verdieping van het kanaal eenvoudiger te verwijderen is. Daarnaast vraagt de opdrachtgever ook of er alternatieven zijn voor breuksteen om de aanwezige ontgrondingskuilen (tijdelijk) op te vullen in afwachting van een definitieve oplossing bij opwaardering van het kanaal in de toekomst. Scenario 3 is het ontwerpscenario en betreft het meest maatgevend scenario (wat oeverbescherming en bodembescherming betreft) uit de opwaarderingstudie van het kanaal. Dit scenario is ter vergelijking toegevoegd.

Voor elk van deze drie scenario's is vooreerst de hydraulische belasting op de bodem bepaald. De oeverbescherming en bodembescherming opwaarts en afwaarts van de kaaimuur en de bodembescherming ter plaatse van de kaaimuur is voornamelijk onderhevig aan de stroming ten gevolge van scheepvaart, namelijk stroming ten gevolge van hoofdschroef en boegschroef en retourstroming.

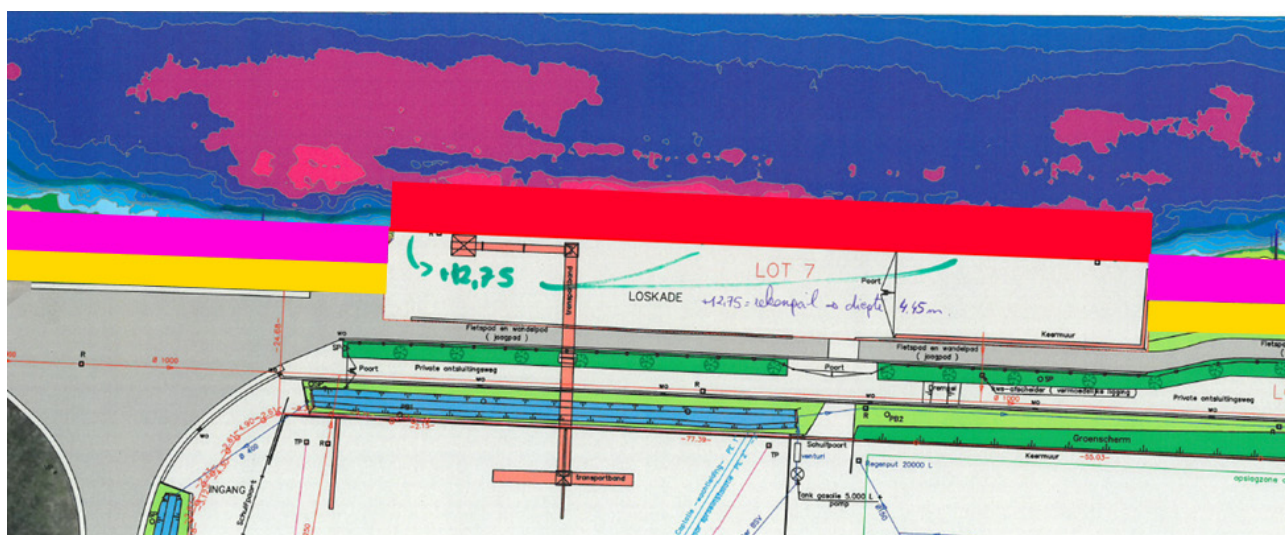
Wat stroming ten gevolge van de boegschroef betreft, wordt zowel de vrije uitstroming tegen de bodem van een boegschroef van een manoeuvrerend schip beschouwd, als de uitstroming van de boegschroef tegen een rechte kaaimuur of de gehelde oever. De oeverbescherming opwaarts en afwaarts van de kaaimuur is daarnaast ook onderhevig aan golfklap ten gevolge van scheepsgolven.

Daarna is voor elk beschouwd scenario de dimensionering uitgevoerd van de bodembescherming of de oeverbescherming. Het resultaat van deze dimensionering is gegeven in Tabel 32. De verschillende zones in deze tabel zijn grafisch voorgesteld in Figuur 11.

Tabel 32 – Overzicht benodigde bodembescherming of oeverbescherming

	Kleur zone in Figuur 11	Type bodem- of oeverbescherming		
		Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
Bodembescherming ter plaatse van kaaimuur	Rood	Breksteen 5-40 kg in strook met breedte 3.0 m naast kaaimuur gepenetreerd met beton	Breksteen 10-60 kg	Breksteen 5-40 kg of 10-60 kg gepenetreerd met beton
Oeverbescherming in zones opwaarts en afwaarts van kaaimuur	Geel	Breksteen 5-40 kg of 10-60 kg gepenetreerd met beton	Breksteen 5-40 kg*	n.v.t.
Bodembescherming in zones opwaarts en afwaarts van kaaimuur	Paars	Breksteen 5-40 kg	Breksteen 5-40 kg	Breksteen 5-40 kg of 10-60 kg gepenetreerd met beton

n.v.t. = niet van toepassing; * = in combinatie met restrictie van gebruik van boegschroef in deze zone



Figuur 11 – Locaties waar oeverbescherming en bodembescherming wordt voorzien

Uit Tabel 32 volgt dat ter plaatse van de kaaimuur bij scenario 1 een breuksteensortering 5-40 kg, dewelke in een strook met breedte 3.0 m naast de kaaimuur gepenetreerd is met colloïdaal beton, kan weerstaan aan de optredende hoge stroomsnelheden ten gevolge van scheepvaart en bij scenario 2 een niet-gepenetreerde breuksteen sortering 10-60 kg. Opwaarts en afwaarts van de kaaimuur is in beide scenario's een breuksteen sortering 5-40 kg nodig als bodembescherming. Wat de oeverbescherming betreft is in beide scenario's eigenlijk breuksteen gepenetreerd met beton nodig. Het bijkomend opleggen van restricties in het gebruik van de boegschroef in deze zones bij scenario 2 zorgen ervoor dat een oeverbescherming bestaande uit een breuksteensortering 5-40 kg voldoende is. Bij scenario 3 is zowel ter plaatse van de kaaimuur als opwaarts en afwaarts van de kaaimuur een bodembescherming uit breuksteen niet mogelijk en dient de breuksteen (sortering 5-40 kg of sortering 10-60 kg) gepenetreerd te worden met beton.

Hierbij wordt opgemerkt dat de bodembescherming ter plaatse van de kaaimuur dient voorzien te worden in een zone met breedte 11.4 m à 17.1 m bij scenario 1 en scenario 3 en in een zone met breedte 9.5 m à 14.3 m bij scenario 2. Anderzijds vermelden Blokland & Roubos, (2013) een breedte van de bodembescherming naast de kaaimuur gelijk aan de breedte van de passieve grondwig naast een kaaimuur. Voor een nieuwe kaaimuur is de breedte op deze wijze te bepalen uit het ontwerp van de kaaimuur, voor de bestaande kaaimuur is deze werkwijze vermoedelijk moeilijker uit te voeren. Wat betreft de lengte van de zones waarin opwaarts en afwaarts van de kaaimuur een oeverbescherming of bodembescherming dient voorzien te worden zijn in de literatuur geen ontwerpformules beschikbaar. Als richtwaarde kan een minimale lengte gelijk aan één scheepslengte van het ontwerpschip (110.0 m bij scenario 1, 105.0 m bij scenario 2 en 135 m bij scenario 3) opwaarts en afwaarts van de kaaimuur beschouwd worden.

Wat betreft het opvullen van de erosiekuilen was door de opdrachtgever gesuggereerd om deze op te vullen met kleigrond, dewelke bij de bouw van een nieuwe kaaimuur op overschot is. Klei kan echter niet weerstaan aan de hoge optredende stroomsnelheden aan de bodem, waardoor snel opnieuw erosiekuilen zullen ontstaan op dezelfde locatie. Hierbij wordt opgemerkt dat de erosiekuilen ter plaatse van de kaaimuur met het oog op het aanbrengen van de benodigde bodembescherming opgevuld dienen te worden. Mogelijk kunnen de erosiekuilen naast de aan te brengen bodembescherming (met het oog op een mogelijke verdieping van de kanaalbodem na opwaardering van het kanaal) aanwezig blijven en dienen deze niet opgevuld te worden in het geval deze stabiel zijn en niet verder verdiepen. Het is wel een optie om de erosiekuilen gedeeltelijk op te vullen met de beschikbare kleigrond en deze daarna te bedekken met breuksteen tot het juiste bodempeil bekomen is, aangezien de benodigde laagdikte voor een breuksteenbekleding kleiner is dan de diepte van de erosiekuilen (tot 1.0 à 1.3 m).

Daarnaast is door de opdrachtgever gevraagd om in de literatuur op zoek te gaan naar alternatieven voor breuksteen voor een bodembescherming ter plaatse van kaaimuur die na verloop van tijd terug kunnen weggenomen worden. Als alternatieven voor breuksteen worden betonmatrassen, een bodembescherming uit colloïdaal beton en voorgevormde matten (vb.: asfaltmatten, blokkenmatten of schanskorfmaten) in de literatuur vermeld. Voor bijvoorbeeld een plaat uit colloïdaal beton of voor asfaltmatten worden hiervoor diktes bekomen die kleiner zijn dan de minimale diktes die nodig zijn voor de aanleg ervan. Enkel in een strook met breedte 3 à 4 m naast de kaaimuur worden hogere diktes bekomen tot 0.29 m. Deze alternatieve types bodembescherming kunnen bijgevolg weerstaan aan grotere stroomsnelheden dan breuksteen. De keuze tussen deze alternatieven is afhankelijk van de kostprijs en van het feit of deze na verloop van tijd makkelijk weg te nemen zijn. Dit behoort echter niet tot het onderwerp van dit rapport.

7 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
- Belgisch Instituut voor Normalisatie (BIN).** (2002). NBN EN 13383-1. Waterbouwsteen – Deel 1: Specificatie.: Brussel, Belgium
- Blokland, T.** (1997). Bodembescherming belast door schroefstralen. Huidige ontwerpmethod. rapport 61.00-R96.089: Rotterdam
- Blokland, T.; Roubos, A.A.** (2013). PAO cursus Ontwerp en uitvoering van kademuren. OUK 04. Ontwerp van bodembescherming. Stichting Postacademisch Onderwijs: Delft
- Bundesanstalt für Wasserbau.** (2008). Code of practice Use of Cementitious and Bituminous Materials for Grouting Armourstone on Waterways (MAV): Karlsruhe
- CIRIA; CUR.** (1991). Manual on the use of rock in coastal and shoreline engineering. *CUR-Publicatie*, 154: Gouda. ISBN 0-86017-326-7
- CIRIA; CUR.** (2007). Manual on the use of rock in hydraulic engineering (2nd edition)
- De Rouck, J.** (S.d.). Rivieren, kanalen en sluizen. Partim: rivieren en kanalen [CURSUS]. Universiteit Gent. Faculteit Ingenieurswetenschappen: Gent
- Hawkswood, M.G.; Lafeber, F.H.; Hawkswood, G.M.** (2014). Berth scour protection for modern vessels, *in:* (2014). *PIANC World Congress San Francisco USA 2014*
- InCom Working Group 04.** (1987). Guidelines for the design and construction of flexible revetments incorporating geotextiles for inland waterways. PIANC = AIPCN: Brussel. ISBN 2-87223-000-9. 153 pp.
- 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
- Pilarczyk, K.W.** (1998). Dikes and revetments: design, maintenance and safety assessment. Balkema: Rotterdam. ISBN 90-5410-455-4
- Raes, L.; Elskens, F.; Romisch, K.; Sas, M.** (1996). The effects of ship propellers on bottom velocities and on scour near berths and protection methods using thin flexible revetments, *in:* (1996). *11th International Harbour Congress, Antwerpen, June 17-21, 1996*. pp.433–442
- Römisch, K.** (2000). Strömungsstabilität vergossener Steinschüttungen. *Wasserwirtschaft* 90 7–8: 356
- Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW).** (2002). Technisch rapport asfalt voor waterkeren. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW): Delft. ISBN 90-369-5519-X. 340 pp.
- Vantorre, M.; Verwerft, B.** (2009). VERBETEREN VAN HET ENERGIERENDEMENT VAN BEPAALDE BINNENSCHEPEN. Universiteit Gent. Faculteit Ingenieurswetenschappen: Gent

Verelst, K.; Peeters, P.; Mostaert, F. (2013). Dender - vernieuwing stuwsuis Denderbelle: dimensionering erosiebescherming. *WL Rapporten*, 00_149. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Verelst, K.; Vercruyse, J.B.; Taverniers, E.; De Mulder, T.; Verwilligen, J.; Peeters, P.; Mostaert, F. (2016). Ondersteuning ontwerp klasse Vb-suis te Sint-Baafs-Vijve: deelrapport 4. Dimensionering bodembescherming stuwsuis. versie 11.. *WL Rapporten*, 12_142_4. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. XII, 63 + 51 p. bijlagen pp.

Waterloopkundig Laboratorium. (1997). Dipro 3.02n Gebruikershandleiding

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