



Vlaanderen
is wetenschap

Ondersteuning ontwerp klasse Vb-sluist te Sint-Baafs-Vijve

12_142_4
WL rapporten

Deelrapport 4
Dimensionering bodembescherming stuwsluist

DEPARTEMENT
MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

Ondersteuning ontwerp klasse Vb-sluist te Sint-Baafs-Vijve

Deelrapport 4 – Dimensionering bodembescherming stuwsluist

Verelst, K.; Vercruysse, J.; Taverniers, E.; De Mulder, T.; Verwilligen, J.; Peeters, P.; Mostaert, F.

Juridische kennisgeving

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

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

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

Copyright en wijze van citeren

© Vlaamse overheid, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Waterbouwkundig Laboratorium 2016
D/2016/3241/282

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Verelst, K.; Vercruysse, J.; Taverniers, E.; De Mulder, T.; Verwilligen, J.; Peeters, P.; Mostaert, F. (2016). Ondersteuning ontwerp klasse Vb-sluis te Sint-Baafs-Vijve: Deelrapport 4 – Dimensionering bodembescherming stuwsuis. Versie 11.0. WL Rapporten, 12_142_4. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

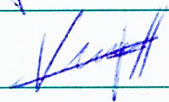
Overname uit en verwijzingen naar deze publicatie worden aangemoedigd, mits correcte bronvermelding.

Documentidentificatie

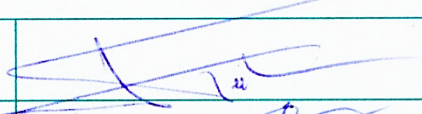
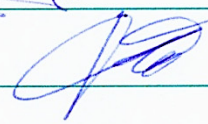
Opdrachtgever:	W&Z nv Afdeling Bovenschelde	Ref.:	WL2016R 12_142_4
Keywords (3-5):	Leie, lock, erosion protection, dimensions		
Tekst (p.):	63	Bijlagen (p.):	51
Vertrouwelijk:	☒ Nee	☒ Online beschikbaar	

Auteur(s):	Verelst, K.; Vercruysse, J.; Taverniers, E.
------------	---

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	De Mulder, T. (UGent)	
Projectleider:	Verwilligen, J.	

Goedkeuring

Coördinator onderzoeksgroep:	Peeters, P.	
Afdelingshoofd:	Mostaert, F.	



Abstract

In het kader van het Seine-Scheldeproject wordt de Leie door Waterwegen en Zeekanaal nv (W&Z) toegankelijk gemaakt voor schepen CEMT klasse Vb. Hiervoor dient te Sint-Baafs-Vijve een nieuwe sluis gebouwd te worden en wordt ook het vismigratieknelpunt ter hoogte van het stuwsluiscomplex opgelost.

Door Grontmij werd een voorontwerp van de nieuwe klasse Vb-sluis uitgewerkt. Dit voorontwerp werd in maart 2013 aan W&Z Afdeling Bovenschelde overgemaakt. Tijdens de opmaak van dit voorontwerp fungeerde het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) als klankbord en leverde zo input.

Voor het uitwerken van het finale ontwerp doet de Afdeling Bovenschelde beroep op de afdelingen Expertise Beton en Staal, Elektromechanica en Telematica, Geotechniek en WL. Aan WL werd gevraagd ondersteuning te bieden aan het ontwerp, in het bijzonder wat betreft het ontwerp van het nivelleersysteem, het ontwerp van de oever- en bodemverdediging, de nautische aspecten en het ontwerp van de vispassage.

Dit rapport beschrijft de dimensionering van de bodembescherming in de opwaartse en afwaartse voorhavens van de sluiscolk en de toegangseul naar het insteeddok uit het voorontwerp van Grontmij.

Hiervoor werden eerst de hydraulische belastingen begroot die optreden op de bodem van de beide voorhavens en de wachtplaatsen ten gevolge van het nivelleren van de sluiscolk en ten gevolge van scheepvaart.

Aan de hand van deze hydraulische belastingen is een mogelijke opbouw van de bodembescherming bepaald. Hiervoor is eerst het type bodembescherming bepaald. In overleg met de opdrachtgever is besloten dat een bodembescherming uit Open Steensasfalt en een bodembescherming uit colloïdaal beton niet mogelijk zijn. Voor de bodembescherming wordt gekozen voor een bodembescherming uit gepenetreerde breuksteen. Daarna is de minimale lengte van de aan te brengen bodembescherming in de opwaartse en afwaartse voorhavens bepaald en de minimale strookbreedte voor de bodembescherming naast remmingwerken en kaaimuren (in wachtplaatsen).

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	V
Lijst van de tabellen.....	VII
Lijst van de figuren	XI
1 Inleiding	1
2 Gegevens	4
2.1 Voorontwerp sluiskolk en nivelleersysteem.....	4
2.2 Ontwerpschip	7
2.3 Bodemsamenstelling	9
2.4 Breuksteensorteringen	11
3 Hydraulische belastingen	13
3.1 Algemeen.....	13
3.2 Stroming ten gevolge van nivelleren van de sluiskolk via de sluisdeuren.....	14
3.2.1 Algemeen	14
3.2.2 Berekening van de maximale stroomsnelheid aan de bodem opwaarts van de sluisdeur	15
3.2.3 Berekening van de maximale stroomsnelheid aan de bodem afwaarts van de sluisdeur	17
3.3 Stroming ten gevolge van de hoofdschroef.....	19
3.4 Stroming ten gevolge van de boegschroef	23
3.5 Retourstroming ten gevolge van scheepvaart.....	29
4 Dimensionering bodembescherming	31
4.1 Algemeen.....	31
4.2 Methodologie bepaling type bodembescherming	33
4.3 Resultaten dimensionering bodembescherming.....	40
4.4 Minimale lengte bodembescherming opwaarts en afwaarts van de nieuwe sluis en opwaarts van het insteeddok.....	47
4.5 Minimale strookbreedte bodembescherming naast remmings-werken en kaaimuren	50
4.6 Filterlagen	52
4.7 Overgangsconstructies en beëindiging van de bodembescherming.....	53
4.8 Voorgestelde bodembescherming opwaarts en afwaarts van de nieuwe sluis	54
5 Conclusie.....	57
6 Referenties	62
Bijlage 1 : Plannen nieuwe sluis.....	B1

Bijlage 2 : Tabellen hydraulische belasting.....	B5
Bijlage 3: Tabellen dimensionering bodembescherming	B17
Bepaling maatgevende stroomsnelheid aan de bodem.....	B17
Resultaten berekening mediaan breuksteendiameter en mediaan breuksteengewicht.....	B19
Resultaten berekening dikte Open Steenasfalt	B22
Resultaten berekening dikte colloïdaal beton.....	B25
Berekening lengte bodembescherming	B29
Berekening breedte bodembescherming ter plaatse van remmingswerken en kaaimuren	B36
Bijlage 4: 2D-stromingspatroon aan de bodem naast een kaaimuur ten gevolge van schroefstralen	B40
Inleiding	B40
Spreiding stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de hoofdschroef	B42
Spreiding stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de boegschroef	B46
Bijlage 5: Rondvraag toepassing colloïdaal beton als bodembescherming	B50

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Enkele karakteristieke afmetingen van het voorontwerp van de nieuwe sluis.....	5
Tabel 2 – Nivelleertijd en maximum debiet bij vullen / ledigen van de volledige sluiskolk, de opwaartse kolk en de afwaartse kolk.	6
Tabel 3 - Afmetingen ontwerpschepen.....	7
Tabel 4 – Karakteristieken hoofschroef en boegschroef voor een schip CEMT klasse Vb.....	7
Tabel 5 – Karakteristieken hoofschroef en boegschroef voor een schip CEMT klasse Va en een schip CEMT klasse Va+	8
Tabel 6 – Korrelverdeling bodemmateriaal uit bodemonderzoek (Afdeling Geotechniek, 2014).....	10
Tabel 7 – Beschouwde breuksteensorteringen.....	11
Tabel 8 – Lichtere breuksteensorteringen	11
Tabel 9 - Berekende waarden voor de stroomsnelheid door de openingen en de stroomsnelheid boven de bodem aan het begin van de bodembescherming ($X = 7,50$ m) opwaarts van de sluiskolk ten gevolge van vullen van de volledige sluiskolk via het bovenhoofd.	16
Tabel 10 - Berekende waarden voor de maximale stroomsnelheid boven bodem afwaarts van de sluisdeur ten gevolge van ledigen van de volledige sluiskolk bij gebruik van openingswet nr. 9.	18
Tabel 11 – Overzicht berekende maximale stroomsnelheden boven de bodem ten gevolge van hoofdschroef.	21
Tabel 12 – Overzicht maximale waarde van de stroomsnelheid boven de bodem ten gevolge van boegschroeven ter plaatse van de fuik bij in- en uitvaren van de nieuwe sluis en het insteeddok.....	24
Tabel 13 – Overzicht maximale waarde van de stroomsnelheid boven de bodem ten gevolge van boegschroeven bij aanmeren aan een kaaimuur of manoeuvreren naast een remmingswerk opwaarts van de nieuwe sluis, afwaarts van de nieuwe sluis en in de toegangsgeul naar het insteeddok	27
Tabel 14 – Maximale waarde van de stroomsnelheid boven de bodem ten gevolge van retourstroming	30
Tabel 15 - Breuksteensortering vòòr grouting	34
Tabel 16 – Overzicht optredende hydraulische belastingen, type schip en bodempeil toegepast voor de dimensionering van de bodembescherming in de verschillende zones.	40
Tabel 17 – Maatgevende maximale stroomsnelheid boven de bodem (u) en waarde voor de turbulentie-intensiteit (r) voor de verschillende hydraulische belastingen in de beschouwde zones.....	41
Tabel 18 - Benodigd mediaan breuksteengewicht M_{50} en overeenkomstige breuksteensortering voor de gedefinieerde zones en beschouwde hydraulische belastingen.....	42
Tabel 19 – Benodigde dikte van de Open Steenasfalt voor de gedefinieerde zones en beschouwde hydraulische belastingen.....	43
Tabel 20 – Benodigde dikte van de colloïdaal beton voor de gedefinieerde zones en beschouwde hydraulische belastingen.....	45
Tabel 21 – Breuksteensortering voor penetratie	54
Tabel 22 – Bodembescherming uit gepenetreerde breuksteen.	55
Tabel 23 – Dikte bodembescherming uit Open Steenasfalt en colloïdaal beton.....	58

Tabel 24 – Zones met bodembescherming uit gepenetreerde breuksteen.....	59
Tabel 25 - Maximale waarden voor de stroomsnelheid boven bodem.	B5
Tabel 26 – Maximale waarden voor de stroomsnelheid boven de bodem ter plaatse van de fuik opwaarts en afwaarts ten gevolge van de hoofdschroef van het duwkonvooi CEMT klasse Vb bij binnenvaren van de nieuwe sluis.	B6
Tabel 27 – Maximale waarden voor de stroomsnelheid boven de bodem ter plaatse van de fuik opwaarts en afwaarts en ter plaatse van het insteeddok ten gevolge van de hoofdschroef van het schip CEMT klasse Va+ bij binnenvaren van de nieuwe sluis, respectievelijk het insteeddok.	B7
Tabel 28 – Maximale waarden voor de stroomsnelheid boven de bodem ter plaatse van de fuik opwaarts en afwaarts en ter plaatse van het insteeddok ten gevolge van de hoofdschroef van het schip CEMT klasse Va bij binnenvaren van de nieuwe sluis, respectievelijk het insteeddok.	B8
Tabel 29 – Maximale waarden voor de stroomsnelheid boven de bodem ter plaatse van de wachtplaatsen opwaarts, afwaarts en in de vaargeul naar het insteeddok ten gevolge van de hoofdschroef van het duwkonvooi CEMT klasse Vb en het schip CEMT Va+ bij aanmeren.....	B9
Tabel 30 – Maximale waarden voor de stroomsnelheid boven de bodem ter plaatse van de wachtplaatsen opwaarts, afwaarts en in de vaargeul naar het insteeddok ten gevolge van de hoofdschroef van het schip CEMT Va bij aanmeren.	B10
Tabel 31 – Maximale waarden voor de stroomsnelheid boven de bodem in de fuik opwaarts van het insteeddok, de fuik opwaarts van de nieuwe sluis en de fuik afwaarts van de nieuwe sluis ten gevolge van de boegschroef van het duwkonvooi CEMT klasse Vb, het schip CEMT Va+ en het schip CEMT Va bij invaren van de nieuwe sluis of het insteeddok.	B11
Tabel 32 – Maximale waarden voor de stroomsnelheid boven de bodem in de opwaartse voorhaven en de toegangsgeul van het insteeddok ten gevolge van de boegschroef van het duwkonvooi CEMT Vb en het schip CEMT Va bij aanmeren aan een kaaimuur of manoeuvreren naast een remmingswerk.	B12
Tabel 33 – Maximale waarden voor de stroomsnelheid boven de bodem in de opwaartse voorhaven en de toegangsgeul van het insteeddok ten gevolge van de boegschroef van het schip CEMT Va+ bij aanmeren aan een kaaimuur of manoeuvreren naast een remmingswerk.	B13
Tabel 34 – Maximale waarden voor de stroomsnelheid boven de bodem in de afwaartse voorhaven ten gevolge van de boegschroef van het duwkonvooi CEMT klasse Vb en het schip CEMT Va bij aanmeren aan een kaaimuur of manoeuvreren naast een remmingswerk.	B14
Tabel 35 – Maximale waarden voor de stroomsnelheid boven de bodem in de afwaartse voorhaven ten gevolge van de boegschroef van het schip CEMT Va+ bij aanmeren aan een kaaimuur of manoeuvreren naast een remmingswerk.	B15
Tabel 36 – Berekening stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van retourstroming in de opwaartse en de afwaartse voorhaven.....	B16
Tabel 37 – Resultaten bepaling maatgevende stroomsnelheid voor de wachtplaats opwaartse voorhaven en toegangsgeul insteeddok, de fuik in het insteeddok en de fuik in de opwaartse voorhaven	B17
Tabel 38 – Resultaten bepaling maatgevende stroomsnelheid voor de wachtplaats en de fuik in de afwaartse voorhaven.....	B18
Tabel 39 – Berekening mediaan breuksteendiameter en mediaan breuksteengewicht volgens de Shields-formulering aangepast voor stralen voor de wachtplaats in de opwaartse voorhaven, de wachtplaats en het remmingswerk in de toegangsgeul naar het insteeddok en voor de fuik van het insteeddok	B19
Tabel 40 – Berekening mediaan breuksteendiameter en mediaan breuksteengewicht volgens de Shields-formulering aangepast voor stralen voor de fuik in de opwaartse voorhaven.....	B20

Tabel 41 – Berekening mediaan breuksteendiameter en mediaan breuksteengewicht volgens de Shields-formulering aangepast voor stralen de fuik in de afwaartse voorhaven	B20
Tabel 42 – Berekening mediaan breuksteendiameter en mediaan breuksteengewicht volgens de Shields-formulering aangepast voor stralen voor de wachtplaats in de afwaartse voorhaven	B21
Tabel 43 – Berekening dikte Open Steenasfalt voor de wachtplaats in de opwaartse voorhaven, de wachtplaats en het remmingswerk in de toegangsgeul naar het insteekdok en voor de fuik van het insteekdok	B22
Tabel 44 – Berekening dikte Open Steenasfalt voor de fuik in de opwaartse voorhaven	B23
Tabel 45 – Berekening dikte Open Steenasfalt voor de fuik in de afwaartse voorhaven	B23
Tabel 46 – Berekening dikte Open Steenasfalt voor de wachtplaats in de afwaartse voorhaven.....	B24
Tabel 47 – Berekening dikte colloïdaal beton aan de hand van de formulering volgens Raes et. al (1996) en de formulering volgens Pilarczyk voor de wachtplaats in de opwaartse voorhaven, de wachtplaats en het remmingswerk in de toegangsgeul naar het insteekdok en voor de fuik van het insteekdok.	B25
Tabel 48 – Berekening dikte colloïdaal beton aan de hand van de formulering volgens Raes et. al (1996) en de formulering volgens Pilarczyk voor de fuik in de opwaartse voorhaven.	B26
Tabel 49 – Berekening dikte colloïdaal beton aan de hand van de formulering volgens Raes et. al (1996) en de formulering volgens Pilarczyk voor de fuik in de afwaartse voorhaven.	B27
Tabel 50 – Berekening dikte colloïdaal beton aan de hand van de formulering volgens Raes et. al (1996) en de formulering volgens Pilarczyk voor de wachtplaats in de afwaartse voorhaven.....	B28
Tabel 51 – Berekening lengte bodembescherming afwaarts van de nieuwe sluis ten gevolge van ledigingsstroming.	B29
Tabel 52 - Berekening lengte bodembescherming in de opwaartse voorhaven en de toegangsgeul naar het insteekdok ten gevolge van retourstroming.	B30
Tabel 53 - Berekening lengte bodembescherming in de afwaartse voorhaven ten gevolge van retourstroming.	B31
Tabel 54 - Berekening lengte bodembescherming in de fuik van de opwaartse voorhaven, de fuik van het insteekdok en de fuik in de afwaartse voorhaven voor stroming ten gevolge van schroefstraalwerking van het schip CEMT Va volgens theorie van erosie achter ronde straal.....	B32
Tabel 55 - Berekening lengte bodembescherming in de fuik van de opwaartse voorhaven, de fuik van het insteekdok en de fuik in de afwaartse voorhaven voor stroming ten gevolge van schroefstraalwerking van schip CEMT Va+ volgens theorie van erosie achter ronde straal.	B33
Tabel 56 - Berekening lengte bodembescherming in de fuik van de opwaartse voorhaven, de fuik van het insteekdok en de fuik in de afwaartse voorhaven voor stroming ten gevolge van schroefstraalwerking van schip CEMT Va volgens theorie van straalspreading.....	B34
Tabel 57 - Berekening lengte bodembescherming in de fuik van de opwaartse voorhaven, de fuik van het insteekdok en de fuik in de afwaartse voorhaven voor stroming ten gevolge van schroefstraalwerking van schip CEMT Va+ volgens theorie van straalspreading.....	B35
Tabel 58 - Berekening breedte bodembescherming ter plaatse van remmingswerken en kaaimuren in de opwaartse voorhaven, toegangsgeul naar het insteekdok en de afwaartse voorhaven voor stroming ten gevolge van schroefstraalwerking van schip CEMT Va volgens theorie van erosie achter ronde straal.	B36
Tabel 59 - Berekening breedte bodembescherming ter plaatse van remmingswerken en kaaimuren in de opwaartse voorhaven, toegangsgeul naar het insteekdok en de afwaartse voorhaven voor stroming ten gevolge van schroefstraalwerking van schip CEMT Va+ volgens theorie van erosie achter ronde straal. ...	B37

Tabel 60 - Berekening breedte bodembescherming ter plaatse van remmingswerken en kaaimuren in de opwaartse voorhaven, toegangseul naar het insteekdok en de afwaartse voorhaven voor stroming ten gevolge van schroefstraalwerking van CEMT Va volgens theorie van straalspreading.	B38
Tabel 61 - Berekening breedte bodembescherming ter plaatse van remmingswerken en kaaimuren in de opwaartse voorhaven, toegangseul naar het insteekdok en de afwaartse voorhaven voor stroming ten gevolge van schroefstraalwerking van CEMT Va+ volgens theorie van straalspreading.	B39
Tabel 62 – Gegevens hoofdschroef en boegschroef schip CEMT klasse Va+	B40

Lijst van de figuren

Figuur 1 - Situering nieuwe sluis te Sint-Baafs-Vijve.	1
Figuur 2 – In deze studie toegepaste naamgeving.	2
Figuur 3 – Variatie in de tijd van het debiet door de openingen bij vullen van de volledige kolk en toepassen van openingswet nr. 5 en bij ledigen van volledige kolk en toepassen van openingswet nr. 12.	6
Figuur 4 – Uitgevoerd grondonderzoek in de omgeving van de nieuwe sluis te Sint-Baafs-Vijve.	9
Figuur 5 - Stroming door een sluisdeur ten gevolge van nivelleren van de sluiskolk.	14
Figuur 6 – Variatie van de stroomsnelheid aan de bodem opwaarts van de sluisdeur in het bovenhoofd in functie van de afstand tot de sluisdeur bij een bodempeil + 0,91 m TAW en een bodempeil + 3,50 m TAW	16
Figuur 7 – Afname van de stroomsnelheid aan de bodem afwaarts van de afwaartse sluisdeur ten gevolge van nivelleren van de sluiskolk in functie van de afstand tot de sluisdeur	18
Figuur 8 – Afstand tussen uitlaat van de boegschroef en de kaaimuur voor een binnenschip CEMT klasse Va.	25
Figuur 9 – Variatie van de stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van boegschroeven van het duwkonvooi CEMT klasse Vb en het schip CEMT klasse Va bij aanmeren aan een kaaimuur of manoeuvreren naast een remmingswerk, in functie van de afstand tot de verticale wand	28
Figuur 10 – Variatie van de stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van boegschroeven van het schip CEMT klasse Va+ bij aanmeren aan een kaaimuur of manoeuvreren naast een remmingswerk in functie van de afstand tot de verticale wand.....	28
Figuur 11 – Zones waar bodembescherming dient voorzien te worden.	31
Figuur 12 – Verband tussen maximaal toegelaten stroomsnelheid en breuksteendiameter voor (met beton) gepenetreerde breuksteen.....	34
Figuur 13 – Bodembescherming uit gepenetreerde breuksteen	55
Figuur 14 – Locatie bodembescherming uit gepenetreerde breuksteen.....	59
Figuur 15 – Bovenaanzicht en langsdoorsnede nieuwe sluis (Grontmij, 2013d)	B1
Figuur 16 – Grondplan afwaartse voorhaven (Grontmij, 2013b).....	B2
Figuur 17 – Grondplan sluis en afwaartse voorhaven (Grontmij, 2013c)	B3
Figuur 18 – Grondplan opwaartse voorhaven (Grontmij, 2013).....	B4
Figuur 19 – Locatie hoofdschroef (paars) en boegschroef (blauw) aan het hek van het schip CEMT klasse Va+ (arcering).	B41
Figuur 20 – Stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van hoofdschroef 1	B43
Figuur 21 – Stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van hoofdschroef 2	B43
Figuur 22 – Stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de hoofdschroef na lineaire superpositie van de stroomsnelheid aan de bodem van beide hoofdschroeven.....	B44
Figuur 23 – Stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de hoofdschroef na kwadratische superpositie van de stroomsnelheid aan de bodem van beide hoofdschroeven.	B45
Figuur 24 – Stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van boegschroef 1.	B47

Figuur 25 – Stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van boegschroef 2.	B47
Figuur 26 - Stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van één boegschroef van een afgemeerd schip. ..	B48
Figuur 27 – Stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van één boegschroef van een afgemeerd schip. .	B48
Figuur 28 – Bodembescherming in colloïdaal beton afwaarts van de sluis van Klein-Willebroek.....	B51

1 Inleiding

In het kader van het Seine-Scheldeproject wordt de Leie door Waterwegen en Zeekanaal nv (W&Z) toegankelijk gemaakt voor schepen CEMT klasse Vb. Hiervoor dient te Sint-Baafs-Vijve een nieuwe sluis gebouwd te worden en wordt ook het vismigratieknelpunt ter hoogte van het stuwsluiscomplex opgelost.

Door Grontmij werd een voorontwerp van de nieuwe klasse Vb-sluis uitgewerkt. Dit voorontwerp werd in maart 2013 aan W&Z Afdeling Bovenschelde overgemaakt. Tijdens de opmaak van dit voorontwerp fungeerde het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) als klankbord en leverde zo input.

Voor het uitwerken van het finale ontwerp doet de Afdeling Bovenschelde (contactpersoon: ir. C. Beels) beroep op de afdelingen Expertise Beton en Staal (EBS), Elektromechanica en Telematica (EMT), Geotechniek en WL. Aan WL werd gevraagd ondersteuning te bieden aan het ontwerp, in het bijzonder wat betreft het ontwerp van het nivelleersysteem, het ontwerp van de oever- en bodemverdediging, de nautische aspecten en de vispassage.

De nieuwe sluis te Sint-Baafs-Vijve is gelegen aan de linkeroever van de gekanaliseerde Leie, net opwaarts van de bestaande sluis klasse Va. Figuur 1 situeert de ligging van nieuwe sluis te Sint-Baafs-Vijve.

Figuur 1 - Situering nieuwe sluis te Sint-Baafs-Vijve.



Boven: situering nieuwe sluis; onder: detail ter plaatse van nieuwe sluis; bron: Grontmij (2013a).

De huidige stuwen, dewelke zich in een zijarm van de gekanaliseerde Leie bevinden, zullen behouden blijven, maar zullen wel gerenoveerd worden. In de bestaande klasse I-sluits naast de huidige stuw, zal de vispassage gerealiseerd worden.

In het kader van het finale ontwerp van de nieuwe sluis te Sint-Baafs-Vijve werd het voorontwerp van de sluis door WL reeds nautisch beoordeeld op basis van real-time manoeuvreersimulaties op de binnenvaartsimulator van WL (Verwilligen *et al.*, 2013). Daarnaast werd ook het ontwerp van het nivelleersysteem voor de nieuwe sluis uitgevoerd (Vercruysse *et al.*, 2014).

Dit rapport beschrijft de dimensionering van de bodembescherming in de opwaartse en afwaartse voorhavens van de nieuwe sluis en de toegangsgeul naar het insteeddok uit voorontwerp van Grontmij (Grontmij, 2013a).

Voor de dimensionering van de bodembescherming wordt volgende indeling in zones en naamgeving toegepast (zie Figuur 2):

- De fuik en zone naast remmingswerken: Deze zone is in Figuur 2 rood gekleurd
- De wachtplaats is in Figuur 2 paars gekleurd
- De opwaartse, respectievelijke afwaartse voorhaven omvat zowel de fuik, de zone naast de remmingswerken als de wachtplaats gelegen opwaarts, respectievelijk afwaarts van de nieuwe sluis.
- De huidige sluis wordt als insteeddok ingericht: Deze zone is in Figuur 2 groen gekleurd.
- De vaargeul naar de huidige sluis: deze zone is in Figuur 2 geel gekleurd en wordt in dit rapport aangeduid met toegangsgeul naar het insteeddok.

Figuur 2 – In deze studie toegepaste naamgeving.



rood: fuik en zone naast remmingswerken; paars: wachtplaats; geel: toegangsgeul naar insteeddok.

Hierbij wordt het volgende opgemerkt:

- In februari 2016 werd door afdeling Bovenschelde beslist om in het finale ontwerp de breedte van de sluiskolk te vergroten naar 16,0 m. Hierbij wordt de huidige sluis CEMT klasse Va ook niet meer als insteeddok voorzien. Dit rapport beschrijft het ontwerp van de bodembescherming voor een sluiskolk met een breedte van 12,5 m uit het voorontwerp van Grontmij (Grontmij, 2013a). In de conclusie van dit rapport (hoofdstuk 5) wordt ook een inschatting gemaakt van de invloed van het verbreden van de sluiskolk op het ontwerp van de bodembescherming.
- De huidige sluis wordt in het voorontwerp van Grontmij als insteeddok ingericht, waarin maximaal schepen klasse Va kunnen aanmeren. De opwaartse toegangsgeul naar de huidige sluis wordt op dezelfde bodemdpte uitgevoerd als het opwaarts kanaalpand (+ 3,50 m TAW). In de toegangsgeul naar dit insteeddok wordt aan de rechteroever een kaaiwand voorzien, waar schepen CEMT klasse Vb kunnen aanmeren. In deze studie zal voor deze toegangsgeul (geel gekleurd in Figuur 2) ook een dimensionering van de bodembescherming uitgevoerd worden.

- De nieuwe sluiskolk zelf wordt uitgevoerd in beton. Beton kan weerstaan aan hoge stroomsnelheden. Met betrekking tot de maximaal toegelaten stroomsnelheden voor beton geldt:
 - Bij het ontwerp van de nieuwe Post-Panamax sluizen voor het Panama-kanaal werd de stroomsnelheid in de omloopriolen door de opdrachtgever beperkt tot 7 m/s. Later werd deze waarde opgetrokken tot 8 m/s.
 - Bij het ontwerp van regenwaterrioleringen in Vlaanderen wordt een maximale waarde van de stroomsnelheid van 6 m/s beschouwd (Berlamont, 2004).
 - Beton kan bij een gepaste samenstelling, verdichting en afwerkingsgraad van het oppervlak een nog veel hogere snelheid aan dan de hoger vermelde waarden suggereren. De vermelde waarden hebben trouwens betrekking op riolen, waar de maximaal toegelaten stroomsnelheid bewust laag gehouden wordt, omdat bij het hydraulisch ontwerp een aantal hydraulische verschijnselen verwaarloosd worden.

Ten gevolge van het nivelleren van de sluiskolk en ten gevolge van scheepvaart worden stroomsnelheden bekomen die beduidend lager zijn dan deze maximale waarden. Om die reden zal in deze studie enkel de hydraulische belasting op de bodem bepaald worden en een dimensionering van de bodembescherming uitgevoerd worden voor de opwaartse en afwaartse voorhaven en de toegangsgeul naar het insteeddok. De nieuwe sluiskolk zelf wordt in deze studie niet beschouwd.

- De dimensionering van de bodembescherming opwaarts en afwaarts van de huidige (te renoveren) stuwen behoort niet tot het onderwerp van deze studie.
- In deze studie wordt enkel een dimensionering van de bodembescherming uitgevoerd. De dimensionering van de overige erosiebescherming (oeverbescherming, ...) behoort niet tot het onderwerp van deze studie.

In een eerste hoofdstuk (hoofdstuk 2) worden de gegevens (voorontwerp sluiskolk en nivelleersysteem, ontwerpschip, bodemsamenstelling en breuksteensorteringen) beschreven die gebruikt worden bij de dimensionering van de bodembescherming.

Alvorens een dimensionering van de bodembescherming uit te voeren worden de hydraulische belastingen op de bodem bepaald (hoofdstuk 3).

Op basis van deze hydraulische belastingen wordt de dimensionering van de bodembescherming uitgevoerd. Deze dimensionering is beschreven in hoofdstuk 4.

Hoofdstuk 5 vat de conclusies van dit rapport samen.

2 Gegevens

2.1 Voorontwerp sluiskolk en nivelleersysteem

Een bovenaanzicht en een langsdoorsnede van het voorontwerp van de nieuwe sluis uit het voorontwerp van Grontmij (Grontmij, 2013a) zijn gegeven in Bijlage 1 (Figuur 15). Daarnaast zijn in Bijlage 1 ook de grondplannen van de opwaartse voorhaven, de sluiskolk en de afwaartse voorhaven gegeven (Figuur 16, Figuur 17 en Figuur 18).

De nieuwe sluis heeft een lengte van 258,2 m en een breedte van 12,5 m. Het bodempeil van de sluiskolk bedraagt + 0,91 m TAW. De sluiskolk wordt in het bovenhoofd en het benedenhoofd afgesloten door middel van puntdeuren. In de sluiskolk is ook een tussendeur aanwezig, dewelke de sluis opdeelt in een opwaartse sluiskolk met een lengte van 144,1 m⁽¹⁾ en een afwaartse sluiskolk met een lengte van 114,1 m⁽¹⁾.

In overleg met de opdrachtgever wordt de dimensionering van de bodembescherming uitgevoerd bij streefpeil in het opwaartse en het afwaartse kanaalpand.

Het streefpeil in het opwaartse kanaalpand bedraagt + 8,00 m TAW. Het bodempeil in dit kanaalpand bedraagt + 3,50 m TAW. Opwaarts van de sluiskolk werd door Grontmij over een afstand van ca. 3,0 m een bodembescherming voorzien met bovenzijde op het peil + 0,91 m TAW. Daarna neemt het peil van de bodembescherming toe met een helling 1/10 (over een afstand van 25,9 m) van + 0,91 m TAW tot het bodempeil van het opwaarts kanaalpand (+ 3,50 m TAW). De bodembescherming begint op 7,50 m⁽²⁾ opwaarts van de puntdeuren in het bovenhoofd.

In het afwaarts kanaalpand bedraagt het bodempeil + 1,11 m TAW. De overgang van het bodempeil van de sluiskolk (+ 0,91 m TAW) naar dit bodempeil gebeurt over een afstand van ca. 2,0 m (benaderend afgelezen op de langsdoorsnede uit Grontmij (2013e)). De bodembescherming begint ca. 5,70 m⁽²⁾ afwaarts van de puntdeuren van het benedenhoofd.

Tabel 1 vat deze karakteristieke afmetingen van het voorontwerp van de nieuwe sluis nog eens samen.

¹ Deze afstand betreft de afstand tussen de scharnierpunten van de sluisdeuren in het bovenhoofd en het middenhoofd voor de opwaartse sluiskolk en de scharnierpunten van de sluisdeuren in het middenhoofd en het benedenhoofd voor de afwaartse sluiskolk. De lengte van het middenhoofd wordt hierbij deels bij de lengte van de opwaartse sluiskolk en deels bij de lengte van de afwaartse sluiskolk bijgeteld. De nuttige lengte bedraagt 125 m voor de opwaartse sluiskolk en 95 m voor de afwaartse sluiskolk.

² Voor deze afstand wordt de kleinste afstand beschouwd, i.e. de afstand tussen de punt van de puntdeur van het bovenhoofd en het begin van de bodembescherming opwaarts van de sluiskolk en de afstand tussen de scharnier van de puntdeur van het benedenhoofd en het begin van de bodembescherming afwaarts van de sluiskolk. Over deze afstanden loopt de sluiskolkbodem verder door tot aan het begin van de bodembescherming.

Tabel 1 – Enkele karakteristieke afmetingen van het voorontwerp van de nieuwe sluis

Lengte volledige kolk ¹	258,2 m
Lengte opwaartse kolk ¹	144,1 m
Lengte afwaartse kolk ¹	114,1 m
Breedte sluiskolk	12,5 m
Bodempeil sluiskolk	+ 0,91 m TAW
Bodempeil opwaarts kanaalpand	+ 3,50 m TAW
Bodempeil afwaarts kanaalpand	+ 1,11 m TAW
Streefpeil opwaarts kanaalpand	+ 8,00 m TAW
Streefpeil afwaarts kanaalpand	+ 5,61 m TAW
Waterdiepte opwaarts kanaalpand bij streefpeil	4,50 m
Waterdiepte afwaarts kanaalpand bij streefpeil	4,50 m
Afstand tussen puntdeur bovenhoofd en begin bodembescherming opwaarts sluiskolk	7,50 m ⁽²⁾
Afstand tussen sluisdeur benedenhoofd en begin bodembescherming afwaarts sluiskolk	5,70 m ⁽²⁾

De bovenzijde van de bodembescherming wordt aangelegd op een peil dat 0,25 m lager is dan de in Tabel 1 vermelde bodempeilen van opwaarts en afwaarts kanaalpand. Deze overdiepte van 0,25 m omvat enerzijds de uitvoeringstolerantie van de bovenzijde van de bodembescherming en anderzijds de baggertolerantie. In deze studie wordt de dimensionering van de bodembescherming uitgevoerd voor het bodempeil van het opwaarts en afwaarts kanaalpand vermeld in Tabel 1, wat bijgevolg hoger is dan het in werkelijkheid uitgevoerde peil van de bodembescherming. Bijgevolg is het in deze studie voor de dimensionering beschouwde bodempeil eerder conservatief (al moet hierbij opgemerkt worden dat het werkelijk optredende waterpeil ook lager kan zijn dan de in deze studie gehanteerde streefpeilen).

Het ontwerp van het nivelleersysteem is beschreven in Vercruysse *et al.* (2014a). In de puntdeuren van zowel het bovenhoofd, het middenhoofd als het benedenhoofd worden 6 cirkelvormige openingen met een diameter van 1,35 m afgesloten met hefschuiven voorzien. De openingen bevinden zich loodrecht op de sluisdeur. De onderzijde van de openingen bevinden zich op + 1,10 m TAW, i.e. ca. 0,20 m boven de sluiskolkbodem.

In Vercruysse *et al.* (2014a) zijn met dit nivelleersysteem hydraulische simulaties uitgevoerd met het programma vul_sluis voor vullen en ledigen van de volledige kolk, de opwaartse kolk en de afwaartse kolk. Enerzijds is bij het ontwerp van het nivelleersysteem voor elke sluisdeur en elk type nivellering een zelfde openingswet beschouwd (openingswet nr. 5), zoals bij de meeste sluizen gebruikelijk is. Daarnaast is voor ledigen van de volledige kolk en voor het nivelleren van de opwaartse en de afwaartse kolk een verdere optimalisering van de openingswet uitgevoerd (openingswetten nr. 10, 11, 12, 13 en 14 voor respectievelijk vullen opwaartse kolk, vullen afwaartse kolk, ledigen volledige kolk, ledigen opwaartse kolk en ledigen afwaartse kolk).

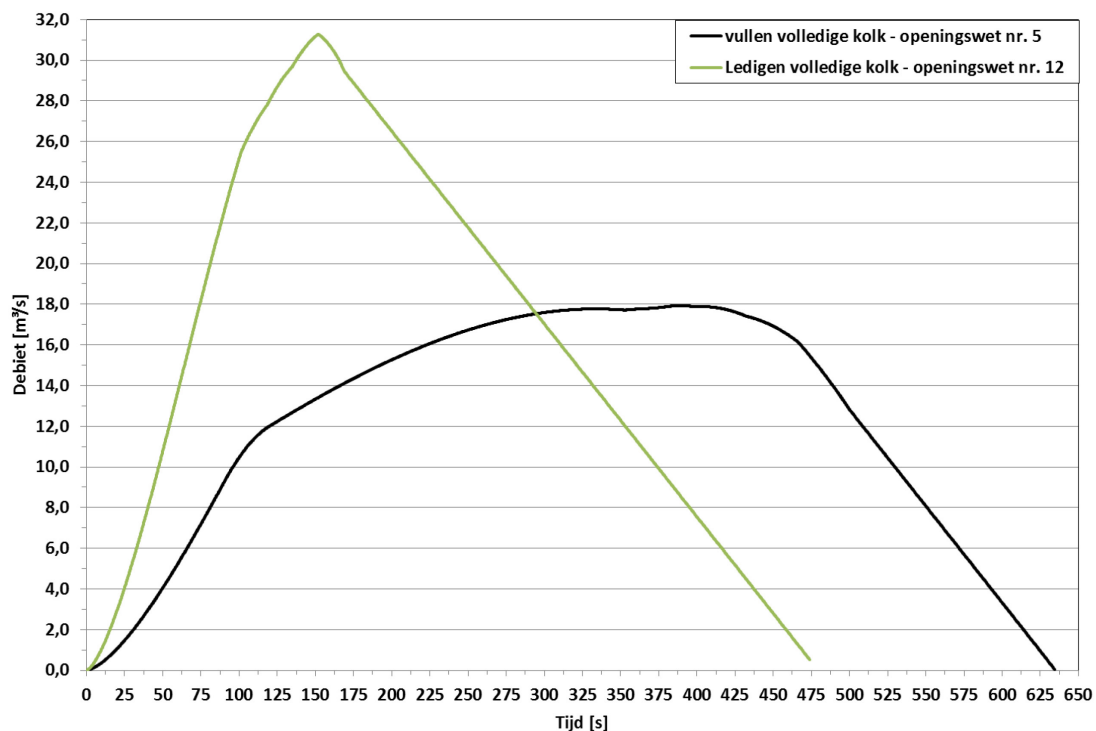
Voor al deze simulaties geeft Tabel 2 een overzicht van de nivelleertijd en het maximum debiet door de openingen. Uit deze tabel volgt dat voor vullen het grootste debiet door de openingen van 17,9 m³/s berekend wordt bij vullen van de volledige sluiskolk met openingswet nr. 5. Voor ledigen wordt het grootste debiet door de openingen van 31,3 m³/s berekend bij ledigen van de volledige sluiskolk en toepassing van openingswet nr. 12. Enkel deze condities zullen in deze studie beschouwd worden voor de dimensionering van de bodembescherming.

De variatie in de tijd van het debiet door de openingen bij vullen van de volledige kolk en toepassing van openingswet nr. 5 en ledigen van de volledige kolk bij toepassen van openingswet nr. 12 is gegeven in Figuur 3.

Tabel 2 – Nivelleertijd en maximum debiet bij vullen / ledigen van de volledige sluiskolk, de opwaartse kolk en de afwaartse kolk.

	Openingswet	Nivelleertijd	Maximum debiet
Vullen volledige sluiskolk	5	10,6 min	17,9 m ³ /s
Ledigen volledige sluiskolk	5	10,6 min	17,9 m ³ /s
	12	8,0 min	31,3 m ³ /s
Vullen opwaartse kolk	5	7,6 min	13,8 m ³ /s
	10	6,9 min	16,0 m ³ /s
Ledigen opwaartse kolk	5	7,6 min	13,8 m ³ /s
	13	4,5 min	31,1 m ³ /s
Vullen afwaartse kolk	5	6,7 min	12,6 m ³ /s
	11	5,8 min	15,1 m ³ /s
Ledigen afwaartse kolk	5	6,7 min	12,6 m ³ /s
	14	3,6 min	29,8 m ³ /s

Figuur 3 – Variatie in de tijd van het debiet door de openingen bij vullen van de volledige kolk en toepassen van openingswet nr. 5 en bij ledigen van volledige kolk en toepassen van openingswet nr. 12.



2.2 Ontwerpschip

De volledige sluiskolk wordt ontworpen voor een duwkonvooi CEMT klasse Vb. De opwaartse sluiskolk is ontworpen om een schip CEMT klasse Va te verschutten, de afwaartse kolk voor een schip CEMT klasse IV. Daarnaast zullen ook verlengde schepen klasse Va ("aangeduid met CEMT klasse Va+") gebruik maken van de sluis. Een overzicht van de afmetingen van deze schepen is gegeven in Tabel 3.

Tabel 3 - Afmetingen ontwerpschepen

	Volledige sluiskolk		Opwaartse sluiskolk	Afwaartse sluiskolk
CEMT-classificatie	Vb	Va+	Va	IV
Lengte	185,0 m	135,0 m	110,0 m	85,0
Breedte	11,4 m	11,4 m	11,4 m	9,5 m
Diepgang (geladen)	3,5 m	3,5 m	3,5 m	3,0 m

Met betrekking tot het duwkonvooi CEMT klasse Vb wordt opgemerkt dat de diepgang vermeld in Tabel 3 de diepgang van de duwbak betreft en dat de lengte de totale lengte van het duwkonvooi betreft. De diepgang van de duwboot is echter kleiner. Voor de diepgang van de duwboot wordt in deze studie dezelfde diepgang beschouwd als deze van de duwboot die tijdens het simulatoronderzoek is toegepast, i.e. een diepgang van 2,5 m.

Initieel wordt voor de dimensionering van de bodembescherming het duwkonvooi CEMT klasse Vb als ontwerpschip beschouwd. Echter, bij een duwkonvooi CEMT klasse Vb bevindt de hoofdschroef zich aan de duwboot, dewelke een diepgang heeft van 2,5 m. Om die reden zullen, wat de hoofdschroef betreft en abstractie makend van de verschillen in motorvermogen, het schip CEMT klasse Va en het schip CEMT klasse Va+ met een diepgang van 3,5 m mogelijks meer bepalend zijn voor de bepaling van de stroomsnelheid aan de bodem. Ook wat aantal boegschroeven betreft en het totale geïnstalleerde motorvermogen voor de boegschroef, zie lager, is het schip CEMT klasse Va+ meer bepalend voor de stroomsnelheid aan de bodem. Om die reden zullen ook de schepen CEMT klasse Va en CEMT klasse Va+ beschouwd worden voor de dimensionering van de bodembescherming. Voor al deze scheepstypes is het nodig het aantal schroeven, de diameter van de schroeven en het aangewend vermogen per schroef te kennen, zowel voor de hoofdschroef als voor de boegschroef.

Voor het duwkonvooi CEMT klasse Vb is het aantal schroeven en het gemiddeld vermogen van de hoofdschroef bepaald op basis van de lijst met bestaande duwbaten op www.debinnenvaart.nl. Het motorvermogen wordt beschouwd van een duwkonvooi met 2 hoofdschroeven van elk 1300 pk. Dit geeft een totaal motorvermogen van 2600 pk of 1912 kW. Uit eenvoud is deze waarde afgerond naar boven naar 2000 kW. Een overzicht van de karakteristieken van hoofdschroef en boegschroef voor het duwkonvooi CEMT klasse Vb is gegeven in Tabel 4. De in deze tabel vermelde waarden zijn dezelfde als toegepast bij het ontwerp van de erosiebescherming voor de nieuwe sluis te Asper en de nieuwe sluis te Harelbeke.

Tabel 4 – Karakteristieken hoofdschroef en boegschroef voor een schip CEMT klasse Vb.

Hoofdschroef	Aantal schroeven	2
	Motorvermogen	2000 kW
	Diameter schroef	2,00 m
Boegschroef	Aantal schroeven	1
	Vermogen	450 kW
	Diameter schroef	1,20 m

Voor het schip CEMT klasse Va+ en het schip CEMT klasse Va zijn de vermogens van de hoofdschroef 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. Een overzicht van de karakteristieken van hoofdschroef en boegschroef voor het schip CEMT klasse Va en het schip CEMT klasse Va+ is gegeven in Tabel 5. In deze tabel 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) van dit rapport wordt de 90 %-percentielwaarde voor dit vermogen toegepast. Uit communicatie van de nautische collega's van WL met een kapitein van het CEMT klasse Va+ schip Venezia volgt dat dit betreffende schip 2 hoofdschroeven bezit met een totaal geïnstalleerd vermogen van 2556 pk (1879 kW) en 2 boegschroeven naast elkaar met elk een vermogen van 575 pk (422 kW). De waarde voor het vermogen van de hoofdschroef is iets hoger dan de 50 %- percentiel van 1800 kW uit ten Hove (2010), maar lager dan de 90 %- percentiel. Het vermogen voor de boegschroef is gelijk aan de 90 %- percentielwaarden uit ten Hove (2010). Voor het vermogen van de boegschroef van het schip CEMT klasse Va+ wordt deze waarde beschouwd. Voor de boegschroef van het schip CEMT klasse Va wordt hetzelfde aantal schroeven en motorvermogen beschouwd als voor het duwkonvooi CEMT klasse Vb.

Tabel 5 – Karakteristieken hoofdschroef en boegschroef voor een schip CEMT klasse Va en een schip CEMT klasse Va+

		CEMT Va+	CEMT Va
Hoofdschroef	Aantal schroeven	2	1
	Motorvermogen 50% - percentiel	1800 kW	1300 kW
	Motorvermogen 90% - percentiel	2200 kW	1800 kW
	Diameter schroef	2,00 m	2,00
Boegschroef	Aantal schroeven	2	1
	Totaal motorvermogen boegschroef	840 kW	450 kW
	Diameter schroef	1,20 m	1,20m

Bij de in Tabel 4 en Tabel 5 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 of de duwboot. 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 het duwkonvooi CEMT klasse Vb en de schepen CEMT klasse Va+ en CEMT klasse Va. In deze studie echter wordt (conservatief) de maximale waarde voor deze parameters beschouwd.

2.3 Bodemsamenstelling

Opwaarts en afwaarts van de nieuwe sluis te Sint-Baafs-Vijve is volgend grondonderzoek beschikbaar:

- Boring GEO-66/238-b13 uitgevoerd in 1966
- Grondonderzoek uitgevoerd in 2012 het kader van het ontwerp van de nieuwe sluis (verslag GEO 12/037; (Afdeling Geotechniek, 2014))

Figuur 4 geeft een overzicht van de uitgevoerde sonderingen en boringen opwaarts en afwaarts van de stuwsluis.

Figuur 4 – Uitgevoerd grondonderzoek in de omgeving van de nieuwe sluis te Sint-Baafs-Vijve.



Blauwe en gele rechthoeken: boringen; rode, groene en lichtblauwe cirkels: sonderingen;
Bron: Afdeling Geotechniek (2014).

Voor de berekening van de lengte van de zone waarin bodembescherming opwaarts en afwaarts van de sluiskolk dient aangebracht te worden is de mediaan korreldiameter D_{50} nodig. De korreldiameter D_{90} is nodig voor de dimensionering van de filterlagen die tussen de bodembescherming en de oorspronkelijke bodem aangebracht worden. Voor de boringen die uitgevoerd zijn in de opwaartse en afwaartse voorhaven geeft Tabel 6 een overzicht van de grondsoort en de korreldiameters D_{50} en D_{90} van het bodemmateriaal op een diepte in de buurt van het toekomstig bodempeil van de opwaartse en de afwaartse voorhaven. Bij deze tabel moet opgemerkt worden dat de getalwaarden sterk benaderend grafisch afgelezen zijn op de (logaritmische assen van de) grafieken met de korrelverdelingen uit het verslag GEO 12/037.

In de opwaartse voorhaven vindt een overgang met helling 1/10 plaats tussen het bodempeil + 0,91 m TAW ter plaatse van de sluiskolk en het bodempeil + 3,50 m TAW opwaarts. In de afwaartse voorhaven doet zich een overgang met helling 1/10 voor tussen het bodempeil + 0,91 m TAW van de sluiskolk en het bodempeil + 1,11 m TAW afwaarts. Zoals vermeld in paragraaf 2.1 worden deze peilen voor de dimensionering beschouwd als bovenzijde van de bodembescherming. Het werkelijke aanlegpeil van de bovenzijde van de bodembescherming bevindt zich 0,25 m lager.

Rekening houdend met de overdiepte van 0,25 m en de uit te baggeren diepte die nodig is voor het realiseren van de bodembescherming volgt uit Tabel 6 voor de opwaartse voorhaven een korreldiameter D_{50} van 70 à 200 μm en een korreldiameter D_{90} van 150 à 600 μm en voor de afwaartse voorhaven een korreldiameter D_{50} van 50 à 200 μm en een korreldiameter D_{90} van 150 à 325 μm .

Tabel 6 – Korrelverdeling bodemmateriaal uit bodemonderzoek (Afdeling Geotechniek, 2014)

Locatie	Boring	Nummer monster	Diepte [mTAW]	Grondsoort	D ₅₀ [µm]	D ₉₀ [µm]
Opwaartse voorhaven	B3	N2	4,41 tot 3,98	Weinig kleihoudend fijnzand	140	210
		N3	2,16 tot 1,72	Weinig kalkhoudend, weinig kleihoudend zand	180	300
		N4A	-1,14 tot -1,32	Weinig kleihoudend zand	210	600
	B8	N2	6,19 tot 5,81	Kleihoudend fijnzand	90	160
		N3	2,69 tot 2,25	Kalkhoudend kleihoudend fijnzand	80	150
		N4	-2,81 tot -3,12	Kleihoudend fijnzand	70	160
	B27	N3	4,51 tot 4,03	Weinig kalkhoudende zandhoudende klei	90	190
		N4	2,01 tot 1,53	Weinig kalkhoudend zand	190	300
		N5	-4,99 tot -5,28	Kalkhoudende zandhoudende klei	27	125
Afwaartse voorhaven	B13	11A	5,08 tot 4,83	Fijnzand	160	230
		11B	5,08 tot 4,83	Kleihoudend zand à fijnzandhoudende leem	53	170
		29	-3,32 tot -3,45	Klei	18	85
	B19	N2	4,20 tot 3,79	Weinig kalkhoudend fijnzand	160	230
		N3A	0,70 tot 0,58	Zand	190	325
	B26	N2	2,12 tot 1,75	Weinig kalkhoudend fijnzand	150	225
		N4	-3,88 tot -4,24	Kalkhoudende zandhoudende klei	25	160

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 7 geeft een overzicht van de in het standaardbestek 260 voor de waterbouw beschouwde klassen voor breuksteen.

Tabel 7 – 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

Bij deze breuksteensorteringen moet het volgende opgemerkt worden:

- 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 ($45 \text{ kg} < M_{50} < 78 \text{ kg}$) toegevoegd worden. Waar nodig zal ook deze verdeling in deze studie reeds toegepast worden. De breuksteensortering uit Tabel 7 worden gekarakteriseerd door een gemiddeld breuksteengewicht. Om de laagdikte te bepalen, is dit gemiddeld breuksteengewicht omgerekend naar de bijbehorende gemiddelde breuksteendiameter.
- De norm voor waterbouwsteen NBN EN 13383 vermeldt ook lichtere breuksteensorteringen (zie Tabel 8). Deze worden niet vermeld in het standaardbestek 260 voor de waterbouw. Indien lichtere breuksteensorteringen dan 5 – 40 kg kunnen toegepast worden, zullen in deze studie de lichtere breuksteensorteringen beschouwd worden. Deze lichtere breuksteensorteringen worden gekarakteriseerd door een gemiddelde breuksteendiameter. In Tabel 8 is deze breuksteendiameter ook omgerekend naar een gemiddeld breuksteengewicht. Op deze wijze kan de selectie van deze breuksteensortering in het vervolg van het rapport op eenzelfde wijze uitgevoerd worden als voor de sorteringen in Tabel 7, namelijk op basis van het gemiddelde breuksteengewicht.
- De norm voor waterbouwsteen NBN EN 13383 vermeldt dat de breuksteensortering 45/180 mm een speciale sortering met een brede verdeling is en dat de breuksteensortering 90/180 mm enkel toegepast wordt voor schanskorven. Deze (speciale) sorteringen (grijs gearceerd in Tabel 8) worden in deze studie niet beschouwd.

Tabel 8 – Lichtere breuksteensorteringen

Sortering	D _{n50} [m]	M ₅₀ [kg]	Laagdikte [m]
32/90 mm	0,03 – 0,08	0,1 – 1,1	0,30
45/125 mm	0,04 – 0,11	0,1 – 3,1	0,30
63/180 mm	0,05 – 0,15	0,4 – 9,2	0,30
90/250 mm	0,08 – 0,21	1,1 – 24,5	0,42
45/180 mm	0,04 – 0,15	0,1 – 9,2	0,30
90/180 mm	0,08 – 0,15	1,1 – 9,2	0,30

Bron: NBN EN 13383 (BIN, 2002)

- Voor elke sortering wordt in Tabel 7 en Tabel 8 een laagdikte van de breuksteensortering vermeld. Deze is berekend als het maximum van de volgende 3 voorwaarden (CIRIA; CUR, 2007; De Rouck, n.d.):

$$t = 1.25D_{n50}$$

$$t = n.k_t.D_{n50}$$

$$t \geq 0.30$$

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 (dd. 1991) van de Rock Manual (CIRIA et al., 2007). 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 Algemeen

Dit hoofdstuk beschrijft de begroting van de hydraulische belastingen die op de bodembescherming inwerken.

Deze studie omvat enerzijds de dimensionering van de bodembescherming in de opwaartse en afwaartse voorhaven ter plaatse van de wachtplaatsen opwaarts en afwaarts van de nieuwe sluis. In deze zone doet zich enkel stroming ten gevolge van nivelleren van de sluiskolk en stroming ten gevolge van de scheepvaart (schroefstraalstroming, stroming ten gevolge van boegschroeven en retourstroming) voor. Daarnaast wordt de dimensionering van de bodembescherming ook uitgevoerd voor de toegangsgeul naar het insteeddok, waar zich enkel stroming ten gevolge van scheepvaart (schroefstraalstroming, stroming ten gevolge van boegschroeven en retourstroming ten gevolge van het invaren van het insteeddok) voordoet.

Zowel voor de opwaartse en de afwaartse voorhavens als voor de toegangsgeul naar het insteeddok, wordt de stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de scheepvaart bepaald voor het duwkonvooi CEMT klasse Vb, het schip CEMT klasse Va+ en het schip CEMT klasse Va.

De huidige (te renoveren) stuwen zijn in een zijarm van de gekanaliseerde Leie gelegen, wat maakt dat er zich in de afwaartse voorhaven en een gedeelte van de opwaartse voorhaven geen stroming naar de huidige (te renoveren) stuwen voordoet. Enkel het opwaartse uiteinde van de opwaartse wachtplaats is gelegen in een zone waar zich stroming voordoet naar de huidige (te renoveren) stuwen. Omdat dit gedeelte van de wachtplaats in een verbreding van de Leie gelegen is doet zich hier een stroming met een lagere stroomsnelheid voor dan in de Leie zelf (Coen *et al.*, 2013). Deze stroming is in grootte ook beduidend lager dan de stroming ten gevolge van de scheepvaart. Om die reden wordt in deze studie stroming naar de (te renoveren) huidige stuwen niet beschouwd.

In de volgende paragrafen worden bijgevolg achtereenvolgens volgende hydraulische belastingen begroot:

1. Stroming ten gevolge van nivelleren van de sluiskolk via de sluisdeuren (paragraaf 3.2)
2. Stroming ten gevolge van de hoofdschroef (paragraaf 3.3)
3. Stroming ten gevolge van de boegschroef (paragraaf 3.4)
4. Retourstroming ten gevolge van scheepvaart (paragraaf 3.5)

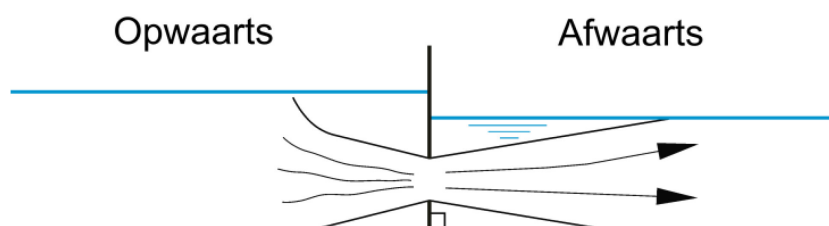
De begroting van de hydraulische belastingen in paragrafen 3.2 tot en met paragraaf 3.5 wordt, zoals reeds vermeld in paragraaf 2.1, uitgevoerd bij streefpeil in het opwaartse en het afwaartse kanaalpand. Alle in dit hoofdstuk berekende stroomsnelheden betreffen stroomsnelheden aan de bodem. Aan de hand van deze stroomsnelheden wordt in hoofdstuk 4 de bodembescherming gedimensioneerd met behulp van de Shields-formule aangepast voor stralen (zie paragraaf 4.1). Deze formule bevat de turbulentie-intensiteit als parameter. In dit hoofdstuk zal naast de berekende stroomsnelheden aan de bodem voor de verschillende types hydraulische belastingen ook de toegepaste waarde voor de turbulentie-intensiteit vermeld worden.

3.2 Stroming ten gevolge van nivelleren van de sluiscolk via de sluisdeuren

3.2.1 Algemeen

Figuur 5 geeft een voorstelling van de stroming door een sluisdeur ten gevolge van nivelleren van de sluiscolk.

Figuur 5 - Stroming door een sluisdeur ten gevolge van nivelleren van de sluiscolk.



Hierbij worden 2 stromingstypes onderscheiden:

1. Stroming opwaarts van de sluisdeur

Tijdens het vullen van de sluis, wordt het water in het opwaarts kanaalpand gravitair aangezogen naar de vulopeningen in de opwaartse sluisdeur. Deze stroming naar de openingen in de sluisdeur kan (benaderend) berekend worden door de formulering van de potentiaalstroming volgens Shammaa et al. (2005).

In paragraaf 3.2.2 wordt de berekening van de stroomsnelheid aan de bodem opwaarts van de sluisdeur beschreven.

2. Stroming afwaarts van de sluisdeur

Afwaarts van de sluisdeur spreidt de straal die ontstaat ten gevolge van het nivelleren van de sluis uit, zowel in horizontale als in verticale richting.

Bij nivelleren van de sluis door de sluisdeur, wordt de bodem afwaarts van de sluisdeur het meest belast op het tijdstip van voorkomen van het maximale debiet door de openingen.

Aan de hand van de stroomsnelheid door de openingen in de sluisdeur kan volgens de formuleringen uit "Ontwerp van Schutsluizen" (Beem et al., 2000b) de maximale waarde van de stroomsnelheid aan de bodem berekend worden. Paragraaf 3.2.3 beschrijft de berekening van de stroomsnelheid aan de bodem afwaarts van de sluisdeur.

3.2.2 Berekening van de maximale stroomsnelheid aan de bodem opwaarts van de sluisdeur

De stroomsnelheid aan de bodem opwaarts van de sluisdeur wordt (benaderend) berekend aan de hand van de formulering van de potentiaalstroming (cfr. Shammaa et al. (2005)³).

Bij deze berekening worden volgende veronderstellingen gemaakt:

- De cirkelvormige gaten in de sluisdeur (gelijk verdeeld over de breedte van de sluisdeur) worden benaderd door één grote rechthoekige opening. Deze opening heeft een hoogte gelijk aan de diameter van de cirkelvormige openingen (1,35 m) en een breedte die gelijk is aan totale oppervlakte van alle openingen (i.e. $6 \times \pi \times 1,35^2 / 4 = 8,59$) gedeeld door de hoogte van de rechthoekige opening (i.e. 1,35). Op deze wijze wordt een opening met een breedte van 6,36 m en een hoogte van 1,35 m bekomen.
- De openingen bevinden zich juist boven de bodem. De afstand van 0,26 m tussen bodem van de sluis en de onderzijde van de rechthoekige openingen wordt voor deze berekening verwaarloosd.

Enkel bij het bovenhoofd wordt de bodembescherming opwaarts van de sluiskolk belast door een stroming naar de sluisdeur toe. Bij het benedenhoofd en het middenhoofd doet deze stroming zich voor boven de sluiskolkbodem uit beton. Om die reden wordt de bepaling van de stroomsnelheid aan de bodem opwaarts van de sluisdeur enkel uitgevoerd voor nivelleren door het bovenhoofd. Hierbij wordt enkel vullen van de volledige sluiskolk beschouwd, aangezien voor dit type nivellering een groter maximaal debiet door de openingen wordt berekend dan bij vullen van de opwaartse kolk door het bovenhoofd.

Met behulp van de formulering van de potentiaalstroming wordt de variatie van de stroomsnelheid aan de bodem in functie van de afstand berekend. Aangezien het bodempeil opwaarts van de sluiskolk varieert tussen + 0,91 m TAW en + 3,50 m TAW wordt de berekening uitgevoerd voor de beide bodempeilen (en de waterdieptes bij deze bodempeilen). Tijdens het vullen van de volledige sluiskolk wordt het opwaarts kanaalpand maximaal belast op het tijdstip van het voorkomen van het maximaal debiet door de nivelleeropeningen (zie Tabel 2). De stroomsnelheid door de openingen op dit tijdstip wordt berekend door de maximale waarde van het debiet door de openingen (17,9 m³/s) te delen door de totale oppervlakte van de openingen op het betreffende tijdstip (6,20 m²)⁽⁴⁾.

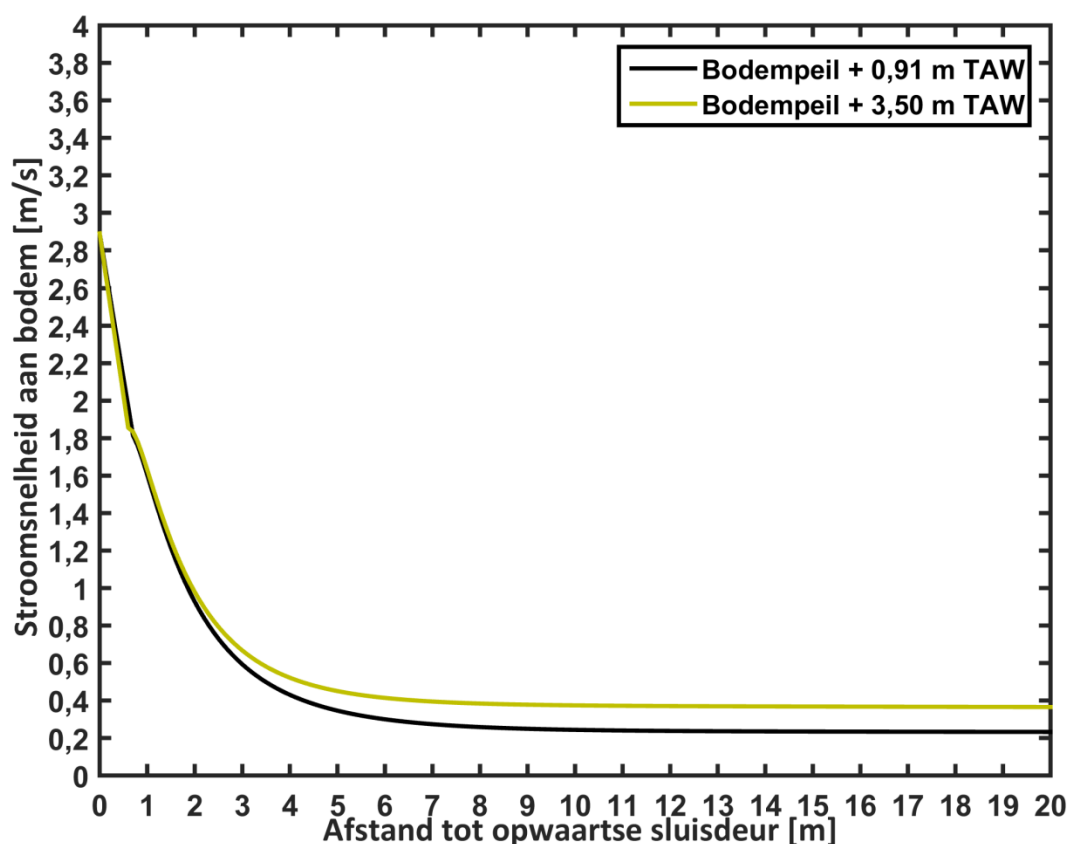
De bepaling van de parameters voor de variatie van de stroomsnelheid aan de bodem opwaarts van de sluisdeur in het bovenhoofd en de bepaling van de stroomsnelheid ter plaatse van het begin van de bodembescherming bij deze twee bodempeilen is gegeven in Tabel 25.

Figuur 6 toont de variatie van de stroomsnelheid aan de bodem opwaarts van de sluisdeur in functie van de afstand tot de sluisdeur zowel voor een bodempeil + 0,91 m TAW als voor een bodempeil + 3,50 m TAW.

³ De formuleringen voor de potentiaalstroming uit Shammaa et al. (2005) gelden voor aanstroming vanuit een oneindig breed reservoir naar een opening in een verticale wand. Deze formulering werd voor deze studie aangepast om rekening te houden met de beperkte breedte tussen (het verlengde van) de sluiskolkmuren.

⁴ De stroomsnelheid door de openingen wordt bij benadering berekend door het maximale debiet te delen door de totale oppervlakte van de openingen. Bij rechthoekige openingen afgesloten door hefschuiven doet de maximale stroomsnelheid door de openingen zich echter voor bij het begin van de nivellering ten gevolge van de zeer kleine hefhoogtes. Deze kleine hefhoogtes en dus de hoge stroomsnelheden doen zich ook maar gedurende een korte periode voor. Bij toepassing van formuleringen voor de potentiaalstroming uit Shammaa et al. (2005) doet zich voor deze toestand echter een instabiliteit in de berekening voor. Om die reden wordt deze toestand niet beschouwd.

Figuur 6 – Variatie van de stroomsnelheid aan de bodem opwaarts van de sluisdeur in het bovenhoofd in functie van de afstand tot de sluisdeur bij een bodempeil + 0,91 m TAW en een bodempeil + 3,50 m TAW



De bodem van het bovenhoofd is uitgevoerd in beton. Deze beton eindigt op ca. 7,50 m opwaarts van de puntdeur (zie Tabel 1). Op deze locatie begint de bodembescherming. Op basis van Figuur 6 wordt op deze locatie (aan het begin van de bodembescherming) een stroomsnelheid van 0,27 m/s bij een bodempeil van + 0,91 m TAW en een stroomsnelheid van 0,39 m/s bij een bodempeil van + 3.50 m TAW berekend. Hierbij wordt opgemerkt dat op deze locatie de stroming volledig gespreid is over de verticale.

Tabel 9 geeft een overzicht van de berekende waarden voor de stroomsnelheid aan de bodem aan het begin van de bodembescherming.

De Rock Manual (CIRIA; CUR, 2007) vermeldt voor stroming met een normale turbulentie een waarde $r = 0,10$ voor de turbulentie-intensiteit van de stroming. Deze waarde wordt voor dit type stroming toegepast.

Tabel 9 - Berekende waarden voor de stroomsnelheid door de openingen en de stroomsnelheid boven de bodem aan het begin van de bodembescherming ($X = 7,50$ m) opwaarts van de sluiskolk ten gevolge van vullen van de volledige sluiskolk via het bovenhoofd.

Bodempeil	Stroomsnelheid t.p.v. openingen	Stroomsnelheid op $X = 7,50$ m	Turbulentie-intensiteit
mTAW	m/s	m/s	-
0,91	2,89	0,27	0,10
3,50	2,89	0,39	0,10

3.2.3 Berekening van de maximale stroomsnelheid aan de bodem afwaarts van de sluisdeur

Afwaarts van het benedenhoofd wordt de bodembescherming belast door spreiding van de stroming uit de openingen in de sluisdeur ten gevolge van nivelleren van de sluiskolk. Afwaarts van de sluisdeur in het bovenhoofd en het middenhoofd doet deze stroming zich voor boven de sluiskolkbodem uit beton. Om die reden wordt de bepaling van de maximale stroomsnelheid aan de bodem afwaarts van de sluisdeur enkel uitgevoerd voor het benedenhoofd. Uit paragraaf 2.1 volgt dat het maximale debiet door de openingen in de sluisdeur berekend wordt bij ledigen van de volledige sluiskolk bij gebruik van openingswet nr. 12. Om die reden wordt enkel dit type nivellering beschouwd voor de bepaling van de maximale stroomsnelheid aan de bodem.

De maximale stroomsnelheid aan de bodem afwaarts van de sluisdeur wordt volgens de formuleringen uit “Ontwerp van Schutsluizen” (Beem *et al.*, 2000) als volgt uitgevoerd:

$$u_{bn} = 2.5 u_n \sqrt{d_n/x_{bn}}$$

met:

-	u_{bn}	Maximale stroomsnelheid aan de bodem	[m/s]
-	u_n	Stroomsnelheid van de uittredende straal (= Q_n/A_n)	[m/s]
-	Q_n	Debiet door de openingen	[m ³ /s]
-	A_n	Oppervlakte van de openingen	[m ²]
-	d_n	Hoogte of dikte uittredende straal	[m]
-	x_{bn}	Horizontale afstand van hart straal tot plaats van maximale stroomsnelheid nabij de bodem (=10 e_n voor $\alpha=0^\circ$)	[m]
-	e_n	Verticale afstand van straalas tot bodem	[m]
-	α	Hoek van de as van de straal met de horizontale (= 0°)	[°]

Deze berekening wordt uitgevoerd voor het tijdstip dat het maximale debiet door de openingen in de sluisdeur zich voordoet. Aangezien het bodempeil in de afwaartse voorhaven varieert tussen + 0,91 m TAW en + 1,11 m TAW wordt de berekening van de maximale stroomsnelheid aan de bodem uitgevoerd voor deze beide bodempeilen. Hierbij wordt opgemerkt dat op het tijdstip van voorkomen van het maximale debiet de schuiven nog niet volledig geopend zijn. Door de aanwezigheid van de breekbalken zal de straal zich na de breekbalken uitspreiden tot de volledige hoogte van de openingen. Om die reden wordt bij de bepaling van de stroomsnelheid door de openingen voor de parameter A_n de totale oppervlakte van de cirkelvormige openingen en voor d_n de diameter van de cirkelvormige openingen beschouwd⁵.

Tabel 25 in Bijlage 3 geeft een overzicht van de resultaten van deze berekening. In Tabel 10 is voor de beide bodempeilen in de afwaartse voorhaven het resultaat van de berekening van de maximale waarde van de stroomsnelheid aan de bodem samengevat. Voor de waarde voor de turbulentie-intensiteit vermeldt “Ontwerp van Schutsluizen” (Beem *et al.*, 2000) $r = 0,35$.

⁵ Bij het ontwerp van het niveleersysteem in Vercruysse et al. (2014a) is standaard een verwijding van de vulstraal na de breekbalken van 120 % verondersteld. In deze studie wordt als conservatieve aanname geen verwijding van de vulstraal na de breekbalken verondersteld.

Tabel 10 - Berekende waarden voor de maximale stroomsnelheid boven bodem afwaarts van de sluisdeur ten gevolge van ledigen van de volledige sluiskolk bij gebruik van openingswet nr. 9.

Bodempeil	Stroomsnelheid	Turbulentie-intensiteit
mTAW	m/s	-
0,91	3,46	0,35
1,11	3,46	0,35

De in Tabel 10 vermelde maximale stroomsnelheid aan de bodem doet zich voor op 9,35 m afwaarts van de sluisdeur. Aangezien de sluiskolkbodem doorloopt tot 5,7 m afwaarts van de afwaartse sluisdeur betekent dit dat deze maximale waarde van de stroomsnelheid zich voordoet boven de bodembescherming (ca. 3,7 m afwaarts van het begin van de bodembescherming). Op deze locatie is het bodempeil + 1,11 m TAW aanwezig.

Op verdere afstand van de sluisdeur, kan de stroomsnelheid aan de bodem berekend worden aan de hand van de hierboven vermelde formulering voor de maximale stroomsnelheid aan de bodem, waarbij x_{bn} vervangen wordt door x (met $x > x_{bn}$):

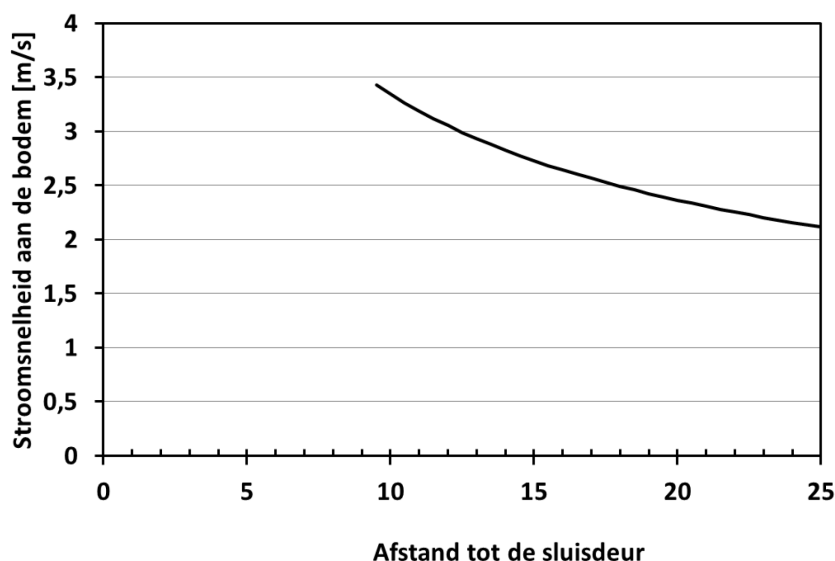
$$u_{xn} = 2.5 u_n \sqrt{d_n/x}$$

met:

- u_{xn} Stroomsnelheid aan de bodem op locatie x ($x > x_{bn}$) [m/s]
- u_n Stroomsnelheid van de uittredende straal [m/s]
- d_n Hoogte of dikte uittredende straal [m]
- x Afstand tot de sluisdeur [m]
- x_{bn} Horizontale afstand van hart straal tot plaats van maximale stroomsnelheid nabij de bodem [m]

Uit Tabel 25 in bijlage 3 volgt een stroomsnelheid van de uittredende straal van 3,64 m/s (onafhankelijk van het bodempeil). Voor deze stroomsnelheid van de uittredende straal wordt de afname van de stroomsnelheid aan de bodem in functie van de afstand tot de afwaartse sluisdeur voorgesteld in Figuur 7.

Figuur 7 – Afname van de stroomsnelheid aan de bodem afwaarts van de afwaartse sluisdeur ten gevolge van nivelleren van de sluiskolk in functie van de afstand tot de sluisdeur



3.3 Stroming ten gevolge van de hoofdschroef

Dit type stroming doet zich voor:

- Boven de bodembescherming van de fuik opwaarts bij in- of uitvaren van de sluiskolk van de nieuwe sluis via het bovenhoofd.
- Boven de bodembescherming van de fuik afwaarts bij in- of uitvaren van de sluiskolk van de nieuwe sluis via het benedenhoofd.
- Boven de bodembescherming van de fuik van het insteeddok, bij in- of uitvaren het insteeddok.
- Bij aanmeren aan een kaaimuur ter plaatse van de wachtplaatsen opwaarts, afwaarts of in het insteeddok.

De stroomsnelheid juist achter een schroef wordt, volgens de formuleren 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	[kg/m ³]
-	D_0	Effectieve diameter van de schroef	[m]
	$D_0 = \begin{cases} 0,7 D_p & \text{schroef zonder straalbuis} \\ 1,0 D_p & \text{schroef in straalbuis} \\ 0,85 D_p & \text{schroef / straalbuis combinatie} \end{cases}$		
-	D_p	Echte diameter van de schroef	[m]

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

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

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

met:

-	x_{bp}	Horizontale afstand van de schroef tot de plaats met maximale stroomsnelheid aan de 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]
-	n	Aantal schroeven	[-]

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

- Bij recente duwbotten is een schroef in een straalbuis aanwezig. Bij de oudere types is nog een schroef zonder straalbuis aanwezig. Om die reden wordt zowel een effectieve diameter gelijk aan 0,7 maal de echte diameter van de schroef als een effectieve diameter gelijk aan de echte diameter van de schroef beschouwd. Deze beide waarden voor de effectieve diameter worden ook toegepast voor het schip CEMT klasse Va+ en het schip CEMT klasse Va.
- Voor het duwkonvooi CEMT klasse Vb wordt het totaal geïnstalleerd vermogen van 2000 kW vermeld in Tabel 4 (paragraaf 2.2) toegepast. Voor het schip CEMT klasse Va+, respectievelijk het schip CEMT klasse Va wordt voor het geïnstalleerd vermogen de 90 %-percentielwaarde van 2200 kW, respectievelijk 1800 kW, uit Tabel 5 toegepast voor de berekening van de stroomsnelheid aan de bodem. Bij het duwkonvooi CEMT klasse Vb en het schip CEMT klasse Va+ zijn 2 hoofdschroeven aanwezig. Hiermee wordt rekening gehouden door per schroef de helft van het totale geïnstalleerde vermogen te beschouwen.
- Met betrekking tot het toegepast vermogen van de hoofdschroef beveelt de EAU 2004 (Members of the Committee for Waterfront Structures, 2006) aan om voor manoeuvreren, aanmeren aan een kaaimuur een toegepast vermogen van 42 % van het geïnstalleerde motorvermogen te beschouwen. Het PIANC rapport 180 (MarCom Working Group 180, 2015) beveelt aan om voor binnenvaartschepen 50 à 100 % van het geïnstalleerd vermogen toe te passen. Op het overleg van 12/09/2014 met de opdrachtgever en externe experts werd daarom besloten om voor de bepaling van de hydraulische belasting op de bodem ten gevolge van de hoofdschroef 50 % van het geïnstalleerd motorvermogen te beschouwen in het geval van aanmeren aan een kaaimuur en 75 % van het geïnstalleerd motorvermogen in het geval van binnenvaren van de sluiskolk.

Voor binnenvaren van de sluiskolk of het insteeddok wordt de berekening van de maximale stroomsnelheid aan de bodem ter plaatse van de fuik ten gevolge van de hoofdschroef bijgevolg uitgevoerd voor:

- Het duwkonvooi CEMT klasse Vb, het schip CEMT klasse Va+ en het schip CEMT klasse Va bij in- of uitvaren van de sluiskolk van de nieuwe sluis, zowel via het benedenhoofd als via het bovenhoofd. Bij in- of uitvaren van het insteeddok worden enkel het schip CEMT klasse Va+ en het schip CEMT klasse Va beschouwd.
- Zowel een verhouding D_0/D_p gelijk aan 1,00 (schroef in straalbuis) als een verhouding D_0/D_p gelijk aan 0,70 (schroef zonder straalbuis).
- De beide beschouwde waarden voor de bodemligging in de opwaartse voorhaven (+ 0,91 m TAW en + 3,50 m TAW) en de bodemligging van de afwaartse voorhaven (+ 0,91 m TAW en + 1,11 m TAW). Voor het insteeddok wordt enkel de bodemligging + 3,50 m TAW beschouwd.
- Een toegepast vermogen aan de hoofdschroef gelijk aan 75 % van het geïnstalleerd motorvermogen (2000 kW voor het duwkonvooi CEMT klasse Vb, 2200 kW voor het schip CEMT klasse Va+ en 1800 kW voor het schip CEMT klasse Va).

Tabel 26 (voor duwkonvooi CEMT klasse Vb), Tabel 27 (voor schip CEMT klasse Va+) en Tabel 28 (voor schip CEMT klasse Va) in Bijlage 2 geven de resultaten van de berekening van de maximale stroomsnelheid boven de bodem van de fuik bij binnenvaren van de sluiskolk van de nieuwe sluis of binnenvaren van het insteeddok.

Daarnaast wordt de berekening van de maximale stroomsnelheid aan de bodem van de wachtplaatsen ten gevolge van de hoofdschroef bij aanmeren uitgevoerd voor:

- Het duwkonvooi CEMT klasse Vb, het schip CEMT klasse Va+ en het schip CEMT klasse Va bij aanmeren aan de wachtplaatsen in de opwaartse voorhaven, de afwaartse voorhaven en in de toegangseul naar het insteeddok.
- Zowel een verhouding D_0/D_p gelijk aan 1,00 (schroef in straalbuis) als een verhouding D_0/D_p gelijk aan 0,70 (schroef zonder straalbuis).

- Een bodemligging in de opwaartse voorhaven en in de toegangsgeul naar het insteeddok van + 3,50 m TAW en een bodemligging in de afwaartse voorhaven van + 1,11 m TAW.
- Een toegepast vermogen aan de hoofdschroef gelijk aan 50 % van het geïnstalleerd motorvermogen (2000 kW voor het duwkonvooi CEMT klasse Vb, 2200 kW voor het schip CEMT klasse Va+ en 1800 kW voor het schip CEMT klasse Va).

Tabel 29 (voor duwkonvooi CEMT klasse Vb en schip CEMT klasse Va+) en Tabel 30 (voor duwkonvooi CEMT klasse Va) in Bijlage 2 geven de resultaten van de berekening van de maximale stroomsnelheid boven de bodem van de wachtplaats bij aanmeren in de opwaartse voorhaven, de afwaartse voorhaven en de toegangsgeul naar het insteeddok.

Tabel 11 vat voor de opwaartse voorhaven, de afwaartse voorhaven en de toegangsgeul naar het insteeddok de maximale waarden voor de berekende stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de hoofdschroef samen. Voor de turbulentie-intensiteit vermeldt "Ontwerp van Schutsluizen" (Beem *et al.*, 2000) de waarde $r = 0,40$.

Tabel 11 – Overzicht berekende maximale stroomsnelheden boven de bodem ten gevolge van hoofdschroef.

Locatie		Bodempeil [mTAW]	Type Schip	Stroomsnelheid [m/s]		Turbulentie- intensiteit [-]
				$D_0/D_p = 0,7$	$D_0/D_p = 1,0$	
Fuik	Opwaarts nieuwe sluis	0,91	CEMT Vb	0,89	1,00	0,40
			CEMT Va+	1,12	1,26	0,40
			CEMT Va	0,93	1,05	0,40
		3,50	CEMT Vb	1,66	1,86	0,40
			CEMT Va+	2,57	2,88	0,40
			CEMT Va	2,14	2,40	0,40
	Insteekdok	3,50	CEMT Va+	2,57	2,88	0,40
			CEMT Va	2,14	2,40	0,40
	Afwaarts nieuwe sluis	0,91	CEMT Vb	1,56	1,75	0,40
			CEMT Va+	2,34	2,62	0,40
			CEMT Va	1,95	2,18	0,40
		1,11	CEMT Vb	1,66	1,86	0,40
			CEMT Va+	2,57	2,88	0,40
			CEMT Va	2,14	2,40	0,40
Wachtplaats	Opwaartse voorhaven en toegangsgeul insteeddok	3,50	CEMT Vb	1,45	1,63	0,40
			CEMT Va+	2,25	2,52	0,40
			CEMT Va	1,87	2,10	0,40
	Afwaartse voorhaven	1,11	CEMT Vb	1,45	1,63	0,40
			CEMT Va+	2,25	2,52	0,40
			CEMT Va	1,87	2,10	0,40

Met betrekking tot de remmingswerken moet opgemerkt worden dat de breedte van de bodembescherming naast deze remmingswerken (zie paragraaf 4.5) in de opwaartse en de afwaartse voorhaven maakt dat de bodembescherming op deze locaties zich in het bereik bevindt van een schip dat de sluis kolk in- of uitvaart. Bijgevolg wordt voor de dimensionering van de bodembescherming naast deze remmingswerken dezelfde hydraulische belasting op de bodem toegepast als voor de fuiken in de opwaartse en de afwaartse voorhaven. Voor de berekening van de hydraulische belasting wordt bijgevolg ook 75 % van het geïnstalleerd motorvermogen toegepast.

Omwillen van de lagere vaarsnelheid van schepen in de toegangsgeul naar het insteekdok⁶, wordt voor de bodembescherming naast de nieuwe sluiswaaier in deze toegangsgeul, dewelke als remmingswerk kan beschouwd worden, de hydraulische belasting op de bodem toch berekend gebruik makend van 50 % van het geïnstalleerd motorvermogen, in tegenstelling tot de remmingswerken in de opwaartse en de afwaartse voorhavens.

Hierbij wordt opgemerkt dat voor de dimensionering van de bodembescherming de maximale waarde voor de stroomsnelheid aan de bodem wordt beschouwd. In Bijlage 4 is, ter informatie, de spreiding van de stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de hoofdschroef in twee dimensies berekend. Bij de verdere dimensionering van de bodembescherming is geen rekening meer gehouden met de spreiding van de stroomsnelheid aan de bodem en is (conservatief) de maximale waarde van de stroomsnelheid aan de bodem toegepast.

⁶ Bron: persoonlijke communicatie nautische collega's WL.

3.4 Stroming ten gevolge van de boegschroef

Dit type stroming doet zich voor bij:

- Aan- of ontmeren van het schip tegen een kaaimuur.
- Manoeuvreren van het schip naast een remmingswerk
- In- en uitvaren van de nieuwe sluis, zowel aan opwaartse als aan afwaartse zijde
- In- en uitvaren van het insteekdok

De stroomsnelheid van de uittredende straal wordt voor boegschroeven, volgens de formuleringen in “Ontwerp van Schutsluizen” (Beem *et al.*, 2000), gegeven door volgende formule:

$$v_p = \zeta 1,15 \left(\frac{P_d}{D_0^2} \right)^{1/3}$$

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

Hierbij wordt het volgende opgemerkt:

- De formuleringen uit “Ontwerp van Schutsluizen” (Beem *et al.*, 2000) betreffen enkel boegschroeven met een kanalsysteem met uitstroming langs de zijkant van het schip. Systemen met een uitstroming gericht naar de bodem, zoals pompjets worden niet beschouwd.
- Voor het aangewend vermogen van een boegschroef wordt altijd 100 % van het geïnstalleerd vermogen wordt beschouwd, zoals afgesproken op het overleg dd. 12/09/2014 met de opdrachtgever en externe experts en zoals ook aanbevolen in het PIANC rapport 180 (MarCom Working Group 180, 2015).

Bij gebruik van de boegschroef tijdens in- of uitvaren van een sluiskolk of bij in- of uitvaren van het insteekdok doet zich een vrije onbegrensde stroming voor. De stroomsnelheid aan de bodem voor dit type stroming wordt berekend aan de hand van dezelfde formuleringen als voor de stroming van de hoofdschroef. Deze stroomsnelheid wordt gegeven door volgende formuleringen (zie ook paragraaf 3.3).

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

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

met:

-	x_{bp}	Horizontale afstand van 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]
-	v_p	Stroomsnelheid uittredende straal	[m/s]
-	D_0	Effectieve diameter van de schroef	[m]
-	n	Aantal boegschroeven	[-]

Aan de hand van deze formuleringen wordt de berekening van de maximale stroomsnelheid boven de bodem ten gevolge van de boegschroef bij in- of uitvaren van de nieuwe sluis of het insteeddok uitgevoerd voor:

- Zowel het duwkonvoi CEMENT klasse Vb, het schip CEMENT klasse Va+ als het schip CEMENT klasse Va. Voor de diepgang van deze schepen wordt een diepgang 3,5 m beschouwd. Met betrekking tot geïnstalleerd motorvermogen, en de diameter van de boegschroef worden voor deze schepen de waarden vermeld in paragraaf 2.2 beschouwd. Bij het schip CEMENT klasse Va+ zijn 2 boegschroeven aanwezig. Hiermee wordt rekening gehouden door per boegschroef de helft van het totale geïnstalleerde vermogen te beschouwen.
- Zowel voor de fuik opwaarts van de nieuwe sluis, de fuik afwaarts van de nieuwe sluis als de fuik opwaarts van het insteeddok.
- De beide beschouwde waarden voor de bodemligging in de opwaartse voorhaven (+ 0,91 m TAW en + 3,50 m TAW) en de afwaartse voorhaven (+ 0,91 m TAW en + 1,11 m TAW). Voor het insteeddok bedraagt de bodemligging + 3,50 m TAW.

De resultaten van deze berekeningen van de stroomsnelheid boven de bodem ten gevolge van de boegschroeven zijn gegeven in Tabel 31 in Bijlage 2.

Tabel 12 geeft voor de fuik opwaarts van de nieuwe sluis, de fuik afwaarts van de nieuwe sluis en de fuik van het insteeddok een overzicht van de maximale waarde van de berekende stroomsnelheid boven de bodem. Voor de turbulentie-intensiteit vermeldt "Ontwerp van Schutsluizen" (Beem *et al.*, 2000) de waarde $r = 0,35$.

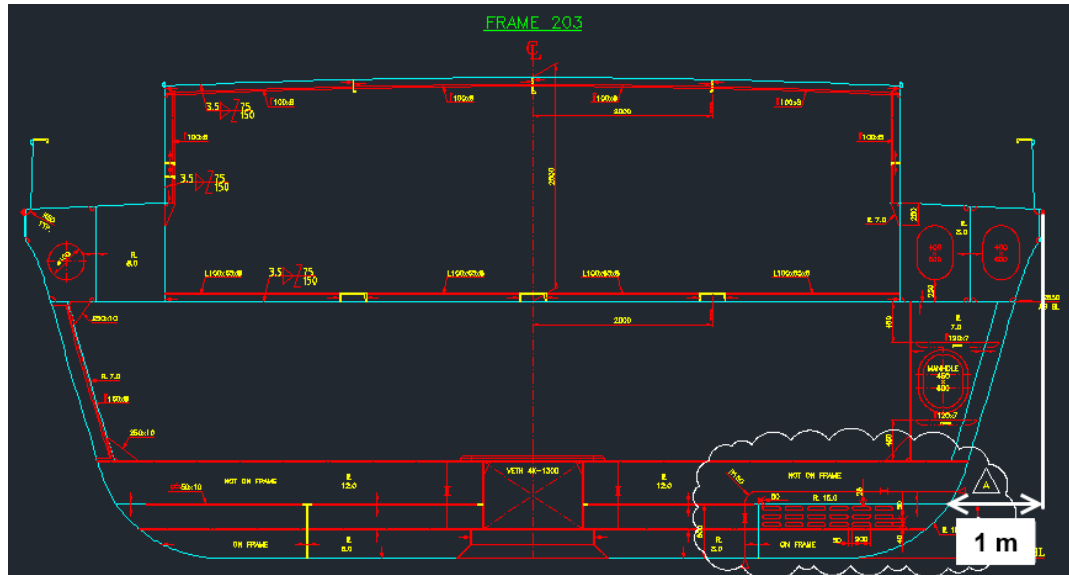
Tabel 12 – Overzicht maximale waarde van de stroomsnelheid boven de bodem ten gevolge van boegschroeven ter plaatse van de fuik bij in- en uitvaren van de nieuwe sluis en het insteeddok

Locatie	Type schip	Bodempeil	Stroomsnelheid	Turbulentie-intensiteit
		mTAW	m/s	-
Opwaarts nieuwe sluis	CEMT Vb, CEMENT Va	0,91	0,60	0,35
		3,50	1,58	0,35
	CEMT Va+	0,91	0,83	0,35
		3,50	2,18	0,35
Insteekdok	CEMT Vb, CEMENT Va	3,50	1,58	0,35
	CEMT Va+	3,50	2,18	0,35
Afwaarts nieuwe sluis	CEMT Vb, CEMENT Va	0,91	1,40	0,35
		1,11	1,58	0,35
	CEMT Va+	0,91	1,94	0,35
		1,11	2,18	0,35

Bij gebruik van de boegschroef bij aan- of ontmeren van een schip tegen een kaaimuur en manoeuvreren van het schip naast een remmingswerk, doet zich een stroming gehinderd door de kaaimuur of het remmingswerk voor. In de fuiken en aan de wachtplaatsen in de opwaartse en afwaartse voorhaven zijn verticale gesloten oevers aanwezig. Ook de remmingswerken in de opwaartse en de afwaartse voorhaven zijn gesloten constructies. In het insteeddok is de ene oever verticaal (de kolkwand van de nieuwe sluis) en is de andere oever een verticale kaaimuur. Om die redenen worden voor de berekening van de stroomsnelheden aan de bodem ten gevolge van de boegschroef de formuleringen uit "Ontwerp van Schutsluizen" (Beem *et al.*, 2000) voor verticale oevers toegepast. Hierbij wordt verondersteld – als conservatieve aanname – dat het schip zich dicht bij de kaaimuur of de verticale oever bevindt. Voor de afstand tussen de mond van de boegschroeftunnel en de kaaimuur of verticale oever wordt 1,0 m

beschouwd. Deze afstand is afgelezen op een lijnenplan van een schip CEMT klasse Va (zie Figuur 8). Voor het duwkonvooi CEMT klasse Vb en het schip CEMT klasse Va+ wordt dezelfde afstand beschouwd.

Figuur 8 – Afstand tussen uitlaat van de boegschroef en de kaaimuur voor een binnenschip CEMT klasse Va.



Indien een schip zich dicht bij de 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)):

$$v_{bp} = 1,03v_p \left(\frac{D_0}{d_p} \right)$$

Deze formulering is geldig onder volgende voorwaarden:

$$v_{bp} \leq v_p$$

$$v_{bp} \leq 6,3v_p D_0 / y_{bp}$$

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 oever (= 1,0 m) | [m] |

De hierboven vermelde formulering uit “Ontwerp van schutsluizen” is geldig voor één boegschroef. Voor twee boegschroeven naast elkaar zijn de auteurs van dit rapport echter geen formuleringen uit de literatuur gekend. Om die reden wordt de invloed van twee boegschroeven naast elkaar op de maximale stroomsnelheid aan de bodem in deze studie op een analoge manier in rekening gebracht als bij de formulering voor de maximale stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van een vrije onbegrensde uitstroming. Bovenstaande formulering wordt bijgevolg als volgt gewijzigd:

$$v_{bp} = \sqrt{n} 1,03v_p \left(\frac{D_0}{d_p} \right)$$

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]
-	n	Aantal boegschroeven	[-]

Het is wel mogelijk dat door deze wijziging van de formulering niet meer voldaan wordt aan één van beide voorwaarden die bij de originele formulering vermeld werden.

Aan de hand van deze formuleringen wordt de berekening van de maximale stroomsnelheid boven de bodem ten gevolge van de boegschroef bij aanmeren aan een kaaimuur of manoeuvreren naast een remmingswerk uitgevoerd voor:

- Zowel het duwkonvooi CEMENT klasse Vb, het schip CEMENT klasse Va+ als het schip CEMENT klasse Va. Voor de diepgang van deze schepen wordt een diepgang 3,5 m beschouwd. Met betrekking tot geïnstalleerd motorvermogen, en de diameter van de boegschroef worden voor deze schepen de waarden vermeld in paragraaf 2.2 beschouwd. Bij het schip CEMENT klasse Va+ zijn 2 boegschroeven aanwezig. Hiermee wordt rekening gehouden door per boegschroef de helft van het totale geïnstalleerde vermogen te beschouwen.
- Zowel de remmingswerken en wachtplaatsen opwaarts als afwaarts van de nieuwe sluis en in de toegangsgeul naar het insteeddok.
- De beide beschouwde waarden voor de bodemligging in de opwaartse voorhaven (+ 0,91 m TAW en + 3,50 m TAW) en de afwaartse voorhaven (+ 0,91 m TAW en + 1,11 m TAW). Voor het insteeddok wordt de bodemligging van + 3.50 m TAW beschouwd.

De resultaten van de berekening van de stroomsnelheid boven de bodem ten gevolge van boegschroeven bij aanmeren aan een kaaimuur of manoeuvreren naast een remmingswerk zijn gegeven in Tabel 32 (voor opwaartse voorhaven, duwkonvooi CEMENT Vb en schip CEMENT Va), Tabel 33 (voor opwaartse voorhaven, en schip CEMENT Va+), Tabel 34 (voor afwaartse voorhaven, duwkonvooi CEMENT Vb en schip CEMENT Va) en Tabel 35 (voor afwaartse voorhaven en schip CEMENT Va+) in Bijlage 2.

Tabel 13 geeft een overzicht van de maximale waarde van de berekende stroomsnelheid boven de bodem ten gevolge van boegschroeven bij aanmeren aan een kaaimuur of manoeuvreren naast een remmingswerk. Voor de turbulentie-intensiteit vermeldt "Ontwerp van Schutsluizen" (Beem *et al.*, 2000) de waarde $r = 0,35$.

Tabel 13 – Overzicht maximale waarde van de stroomsnelheid boven de bodem ten gevolge van boegschroeven bij aanmeren aan een kaaimuur of manoeuvreren naast een remmingswerk opwaarts van de nieuwe sluis, afwaarts van de nieuwe sluis en in de toegangsgeul naar het insteeddok

Locatie	Type schip	Bodempeil	Stroomsnelheid	Turbulentie-intensiteit
		mTAW	m/s	-
Opwaarts nieuwe sluis	CEMT Vb, CEMT Va	0,91	2,07	0,35
		3,50	5,43	0,35
	CEMT Va+	0,91	2,86	0,35
		3,50	7,50	0,35
Toegangsgeul insteeddok	CEMT Vb, CEMT Va	3,50	5,43	0,35
	CEMT Va+	3,50	7,50	0,35
Afwaarts nieuwe sluis	CEMT Vb, CEMT Va	0,91	4,82	0,35
		1,11	5,43	0,35
	CEMT Va+	0,91	6,67	0,35
		1,11	7,50	0,35

De in Tabel 13 berekende waarde voor de maximale waarde van de stroomsnelheid boven de bodem doet zich voor in de hoek tussen de verticale wand 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:

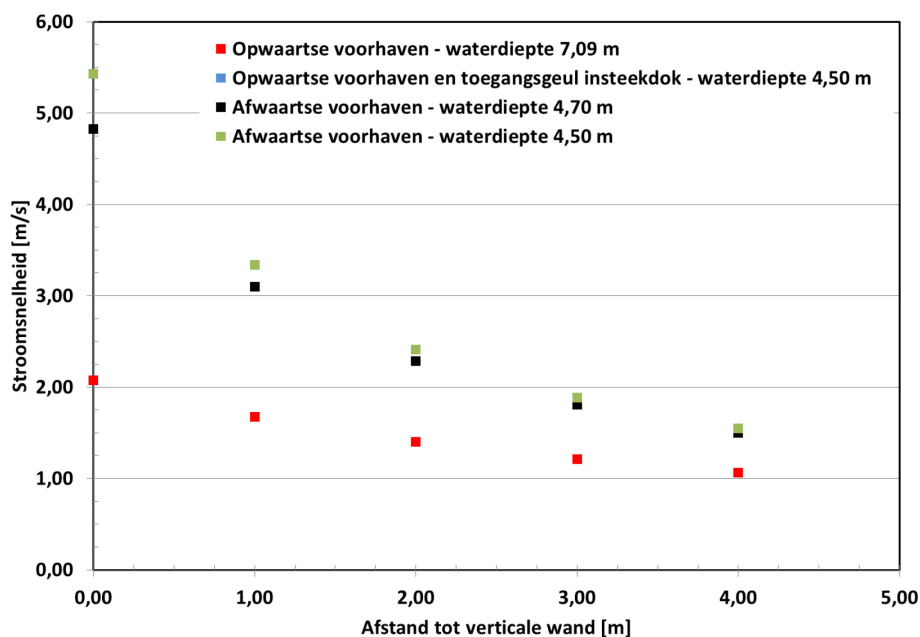
- v_{bp} Maximale waarde van de stroomsnelheid aan de bodem [m/s]
- v_p Stroomsnelheid uittredende straal [m/s]
- D_0 Effectieve diameter van de schroef (= D_p) [m]
- d_p Verticale afstand tussen straalas en bodem [m]
- x_{bp} Afstand tussen punt en de verticale wand [m]
- n Aantal boegschroeven [-]

Voor de wachtplaatsen en de remmingswerken opwaarts van de nieuwe sluiskolk, afwaarts van de nieuwe sluiskolk en in het insteeddok zijn de resultaten van de berekening van de stroomsnelheid aan de bodem voor punten op 1,0 m; 2,0 m, 3,0 m en 4,0 m verwijderd van de verticale wand gegeven in respectievelijk Tabel 32 (opwaarts van nieuwe sluiskolk en toegangsgeul insteeddok) en Tabel 34 (afwaarts van nieuwe sluiskolk) in Bijlage 2. Figuur 9 (voor duwkonvooi CEMT klasse Vb en het schip CEMT klasse Va) en Figuur 10 (voor het schip CEMT klasse Va+) geven een grafische voorstelling van de variatie van de stroomsnelheid aan de bodem in functie van de afstand tot de verticale wand. Uit deze figuren volgt het volgende:

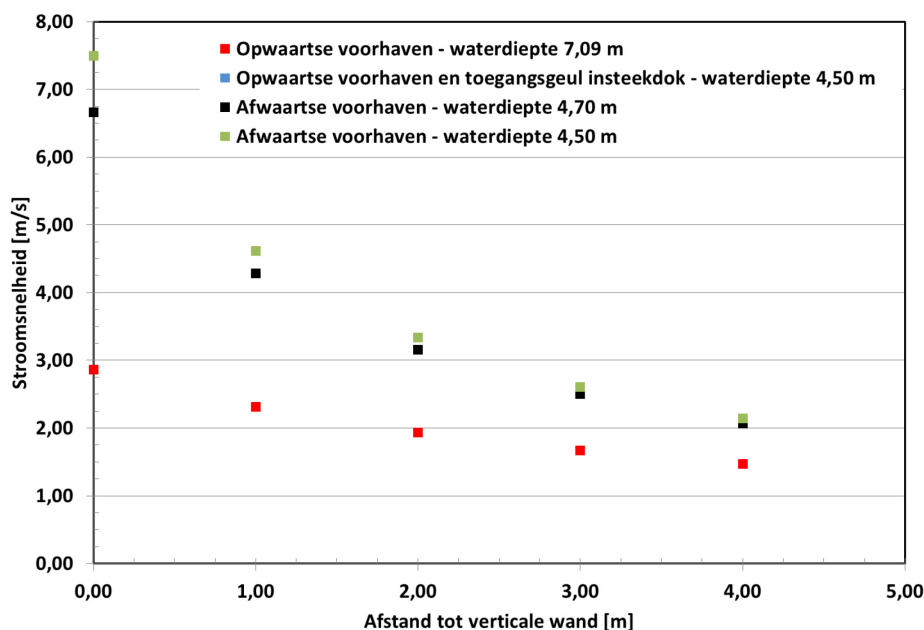
- Voor het duwkonvooi CEMT klasse Vb en het schip CEMT klasse Va wordt op een afstand 1,0 m à 2,0 m van de verticale wand, de stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de boegschroef (tegen de kaaimuur) lager dan de stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de hoofdschroef (zie paragraaf 3.3). Voor het schip CEMT klasse Va+ is deze locatie gelegen tussen 2,0 m à 3,0 m verwijderd van de verticale wand.
- Voor de drie beschouwde scheepstypes is de stroomsnelheid aan de bodem ten gevolg van de boegschroef tegen de kaaimuur of het remmingswerk lager dan deze berekend voor een vrije uitstroming voor afstanden groter dan 3,0 m à 4,0 m verwijderd van de verticale wand.

Hierbij wordt opgemerkt dat deze resultaten de maximale stroomsnelheid aan de bodem betreffen. In Bijlage 4 is, ter informatie, voor 2 boegschroeven naast elkaar de spreiding van de stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van elke boegschroef in twee dimensies berekend. Bij de verdere dimensionering van de bodembescherming is geen rekening meer gehouden met de spreiding van de stroomsnelheid aan de bodem en is (conservatief) de maximale waarde van de stroomsnelheid aan de bodem toegepast.

Figuur 9 – Variatie van de stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van boegschroeven van het duwkonvooi CEMT klasse Vb en het schip CEMT klasse Va bij aanmeren aan een kaaimuur of manoeuvreren naast een remmingswerk, in functie van de afstand tot de verticale wand



Figuur 10 – Variatie van de stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van boegschroeven van het schip CEMT klasse Va+ bij aanmeren aan een kaaimuur of manoeuvreren naast een remmingswerk in functie van de afstand tot de verticale wand



3.5 Retourstroming ten gevolge van scheepvaart

Volgens de formuleringen in “Ontwerp van schutsluizen” (Beem *et al.*, 2000) wordt de stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van retourstroming berekend als:

$$u_r = \beta v_{smax} \frac{A_s}{(A_k - A_s)}$$

Met:

-	u_r	Retourstroomsnelheid	[m/s]
-	A_s	Natte sectie schip ($=b_s \cdot d_s$)	[m ²]
-	b_s	Breedte schip	[m]
-	d_s	Diepgang schip	[m]
-	A_k	Natte sectie sluiskolk boven de drempel ($=b_k(h_k - z_d)$)	[m ²]
-	b_k	Breedte sluiskolk	[m]
-	h_k	Waterpeil	[mTAW]
-	z_d	Drempelpeil	[mTAW]
-	v_{smax}	Maximum invaarsnelheid sluismond	[m/s]
-	β	coëfficiënt	[-]
		$= 0,60 (A_s/A_k=0,35) \text{ tot } 0,80 (A_s/A_k=0,80) \text{ voor } v_{smax}=1,0v_g$	
		$= 0,45 (A_s/A_k=0,35) \text{ tot } 0,70 (A_s/A_k=0,80) \text{ voor } v_{smax}=1,5v_g$	
		$= 0,30 (A_s/A_k=0,35) \text{ tot } 0,65 (A_s/A_k=0,80) \text{ voor } v_{smax}=2,0v_g$	

Voor de maximum invaarsnelheid van de sluismond wordt in “Ontwerp van schutsluizen” (Beem *et al.*, 2000) 1 tot 2 maal de grenssnelheid beschouwd. Hierbij wordt de grenssnelheid berekend ter plaatse van de drempel van de sluiskolk. Bij het naderen van de sluis in de fuik kan de vaarsnelheid hoger zijn dan de grenssnelheid berekend ter plaatse van de drempel. Om die reden wordt in “Ontwerp van schutsluizen” een maximum vaarsnelheid beschouwd die gelijk is aan 1 à 2 maal de berekende grenssnelheid. De grenssnelheid (ter plaatse van de drempel) wordt hierbij berekend aan de hand van volgende formulering:

$$v_g = [0,76(A_s/A_k)^2 - 1,45(A_s/A_k) + 0,74] \sqrt{g(h_k - z_d)}$$

Met:

-	v_g	Grenssnelheid	[m/s]
-	A_s	Natte sectie schip	[m ²]
-	A_k	Natte sectie sluiskolk boven de drempel	[m ²]
-	h_k	Waterpeil	[mTAW]
-	z_d	Drempelpeil	[mTAW]
-	g	Valversnelling ($=9,81 \text{ m/s}^2$)	[m/s ²]

Indien (conservatief) een maximum invaarsnelheid gelijk aan twee maal de grenssnelheid beschouwd wordt, wordt op deze wijze een invaarsnelheid van 4,0 m/s berekend opwaarts van de nieuwe sluis, een vaarsnelheid van 1,4 m/s afwaarts van de nieuwe sluis en een vaarsnelheid van 2,2 m/s opwaarts van het insteekdok. Deze waarden zijn vergeleken met de vaarsnelheid bij het binnenvaren van de sluiskolk uit de uitgevoerde scheepssimulaties (Verwilligen *et al.*, 2013). Hiervoor is voor de vaarsimulaties, dewelke binnenvaren van de sluiskolk betreffen door een duwkonvooi CEMT klasse Vb of een schip CEMT klasse Va, de vaarsnelheid afgelezen op het tijdstip dat de boeg van het schip juist binnen de sluiskolk is. Hieruit volgt een vaarsnelheid van 2 km/h à 7 km/h (0,55 m/s à 1,94 m/s) opwaarts van de nieuwe sluis en een vaarsnelheid van 3 km/h à 7 km/h (0,83 m/s à 1,94 m/s) afwaarts van de nieuwe sluis. De maximale invaarsnelheid van 1,94 m/s is lager dan de berekende maximale invaarsnelheid opwaarts van de nieuwe sluis en hoger dan de berekende maximale invaarsnelheid afwaarts van de nieuwe sluis. Voor de berekening van de retourstroomsnelheid wordt deze waarde van 1,94 m/s, afgeleid uit het simulatoronderzoek weerhouden, zowel opwaarts van de nieuwe sluis, afwaarts van de nieuwe sluis. Voor het binnenvaren van het insteekdok door een schip CEMT klasse Va of een schip CEMT klasse Va+ zijn geen

vaarsimulaties uitgevoerd. Voor de berekening van de retourstroomsnelheid bij het binnenvaren van het insteeddok wordt dezelfde maximale invaarsnelheid van 1,94 m/s beschouwd.

De berekening van stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van retourstroming wordt uitgevoerd:

- Voor de nieuwe sluiskolk voor het duwkonvooi CEMT klasse Vb, het schip CEMT klasse Va+ en het schip CEMT klasse Va. Deze scheepstypes hebben bij het invaren van de nieuwe sluis de grootste blokkering van het dwarsprofiel. Bijgevolg wordt voor deze scheepstypes ook de grootste retourstroomsnelheid berekend. Voor de bepaling van de retourstroming bij het in- of uitvaren van het insteeddok wordt het schip CEMT klasse Va+ en het schip CEMT klasse Va beschouwd.
- Volgens de hierboven vermelde formuleringen. Hierbij wordt als vaarsnelheid 1,94 m/s beschouwd opwaarts van de nieuwe sluis, afwaarts van de nieuwe sluis en opwaarts van het insteeddok.
- Zowel voor de opwaartse voorhaven en de afwaartse voorhaven van de nieuwe sluiskolk als voor het insteeddok. De berekening van de retourstroomsnelheid is enkel afhankelijk van het drempelpeil van de sluiskolk. Voor de nieuwe sluis wordt hierbij het bodempeil van de sluiskolk van + 0,91 m TAW beschouwd. Voor het insteeddok is dit het bodempeil + 3,50 m TAW.

De resultaten van de berekening van de stroomsnelheid ten gevolge van retourstroming voor deze condities zijn, zowel voor de opwaartse voorhaven, de afwaartse voorhaven als de toegangsgeul naar het insteeddok gegeven in Tabel 36 in bijlage 2.

Tabel 14 vat voor de opwaartse voorhaven, de afwaartse voorhaven en de toegangsgeul naar het insteeddok de berekende waarde van de stroomsnelheid ten gevolge van retourstroming samen. Voor de turbulentie-intensiteit vermeldt "Ontwerp van Schutsluizen" (Beem *et al.*, 2000) de waarde $r = 0,25$.

Tabel 14 – Maximale waarde van de stroomsnelheid boven de bodem ten gevolge van retourstroming

	Stroomsnelheid	Turbulentie-intensiteit
	m/s	-
Opwaartse voorhaven	0,59	0,25
Toegangsgeul insteeddok	1,11	0,25
Afwaartse voorhaven	2,34	0,25

4 Dimensionering bodembescherming

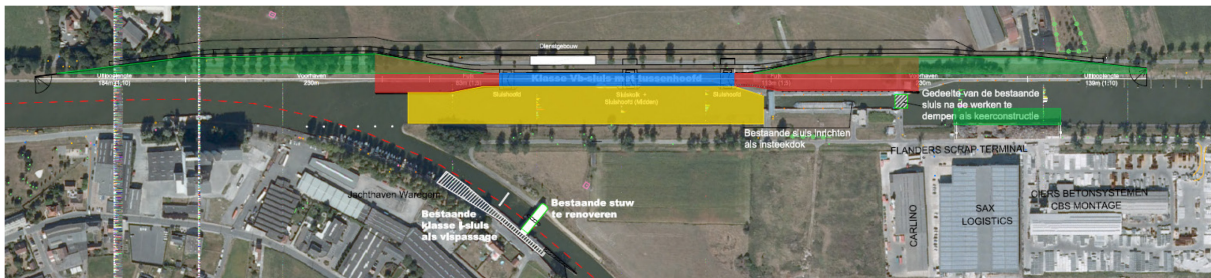
4.1 Algemeen

Dit hoofdstuk beschrijft de dimensionering van de bodembescherming in de opwaartse en de afwaartse voorhaven van de nieuwe sluis en in het insteeddok uit het voorontwerp van Grontmij (Grontmij, 2013a). Vooreerst dient bodembescherming voorzien te worden in de fuiken en de zones naast de remmingswerken opwaarts en afwaarts van de nieuwe sluiskolk (respectievelijk aangeduid met rood en groen in Figuur 11).

Opwaarts en afwaarts van de sluiskolk is nog een wachtplaats voor schepen aanwezig (aangeduid in groen in Figuur 11). Ook ter plaatse van deze wachtplaatsen dient een bodembescherming aangebracht te worden. Aan rechteroever afwaarts van de bestaande sluis is een kaaimuur aanwezig van het bedrijf Flanders Scrap Terminal. De geplande verdieping van de Leie afwaarts van de bestaande sluis maakt dat ter plaatse van deze kaaimuur een nieuwe bodembescherming dient aangebracht te worden. Deze bodembescherming is in Figuur 11 ook groen gekleurd.

De huidige sluiskolk te Sint-Baafs-Vijve wordt in het voorontwerp van Grontmij ingericht als insteeddok. Dit insteeddok is toegankelijk voor schepen CEMT klasse Va. In de toegangsgeul naar dit insteeddok (aangeduid in bruin in Figuur 11) dient ook een bodembescherming aangebracht te worden. In de opwaartse toegangsgeul naar dit insteeddok wordt aan de rechteroever een kaaimuur voorzien, waar ook schepen CEMT klasse Vb kunnen aanmeren. Bijgevolg wordt ook een dimensionering van de bodembescherming in de toegangsgeul naar het insteeddok uitgevoerd. Deze zone is aangeduid in geel in Figuur 11.

Figuur 11 – Zones waar bodembescherming dient voorzien te worden.



In dit hoofdstuk wordt de volgende naamgeving toegepast voor de in Figuur 11 voorgestelde zones:

- Wachtplaats en kaaimuren opwaarts (groen gekleurd in Figuur 11)
- Fuik opwaarts (rood gekleurd in Figuur 11)
- Toegangsgeul naar het insteeddok (geel gekleurd in Figuur 11)
- Fuik opwaarts insteeddok (geel gekleurd in Figuur 11)
- Fuik afwaarts (rood gekleurd in Figuur 11)
- Wachtplaats en kaaimuur afwaarts (groen gekleurd in Figuur 11)

In paragraaf 4.2 wordt de methodologie voor de dimensionering van de bodembescherming in deze zones beschreven. De eigenlijke dimensionering van de bodembescherming voor deze zones aan de hand van deze methodologie is beschreven in paragraaf 4.3. Hierbij wordt opgemerkt dat de bodembescherming ter plaatse van de bestaande kaaimuur van Flanders Scrap Terminal niet expliciet meer vermeld zal worden.

Wegens dezelfde bodemligging als bij de afwaartse wachtplaats, wordt hiervoor eenzelfde bodembescherming beschouwd als voor de afwaartse wachtplaats.

De berekening van de minimale lengte van de bodembescherming die opwaarts en afwaarts van de nieuwe sluiskolk en opwaarts van het insteeddok dient aangebracht te worden, is beschreven in paragraaf 4.4. De berekening van de minimale strookbreedte van de bodembescherming naast remmingswerken en wachtplaatsen is beschreven in paragraaf 4.5.

In paragraaf 4.6 wordt in detail ingegaan op de eigenschappen van de filterlaag tussen het oorspronkelijke bodemmateriaal en de bodembescherming. Paragraaf 4.7 beschrijft de overgangsconstructies tussen verschillende types bodembescherming en de beëindiging van de bodembescherming.

Op basis van de uitgevoerde dimensionering in paragraaf 4.3, paragraaf 4.4 en paragraaf 4.5 en rekening houdend met de breedte van overgangsconstructies in paragraaf 4.7 wordt in paragraaf 4.8 een voorstel gegeven voor de bodembescherming in de opwaartse voorhaven, de afwaartse voorhaven van de nieuwe sluis en de toegangseul naar het insteeddok.

4.2 Methodologie bepaling type bodembescherming

In hoofdstuk 3 is de hydraulische belasting op de bodem in de opwaartse voorhaven, de afwaartse voorhaven en de toegangsgeul naar het insteeddok bepaald. Alle in hoofdstuk 3 berekende stroomsnelheden zijn stroomsnelheden aan de bodem.

Aan de hand van deze berekende stroomsnelheden aan de bodem zal er initieel van uitgegaan worden dat voor alle zones een bodembescherming uit breuksteen voorzien wordt.

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

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

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	[m/s ²]

Aan de hand van deze 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 $\rho_s = 2650$ kg/m³). Op basis van het berekende gemiddeld breuksteengewicht wordt een breuksteensortering geselecteerd uit Tabel 7 en Tabel 8 in paragraaf 2.4.

Indien breuksteen niet voldoet om te weerstaan aan de hydraulische belasting aan de bodem worden volgende alternatieve types bodembescherming voorgesteld:

1. 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. Tabel 15 geeft een overzicht van het mediaan breuksteengewicht M_{50} voor deze sorteringen. Op basis hiervan is de mediaan breuksteendiameter D_{n50} en de minimale laagdikte voor het aanbrengen van deze sortering berekend en vermeld in de laatste kolom van de tabel.

Tabel 15 - Breuksteensortering vòòr grouting

Sortering	M ₅₀ [kg]	D _{n50} [m]	Laagdikte [m]
5 – 40 kg	14 - 28	0,17-0,22	0,44 m
10 – 60 kg	27 - 47	0,22-0,26	0,52 m

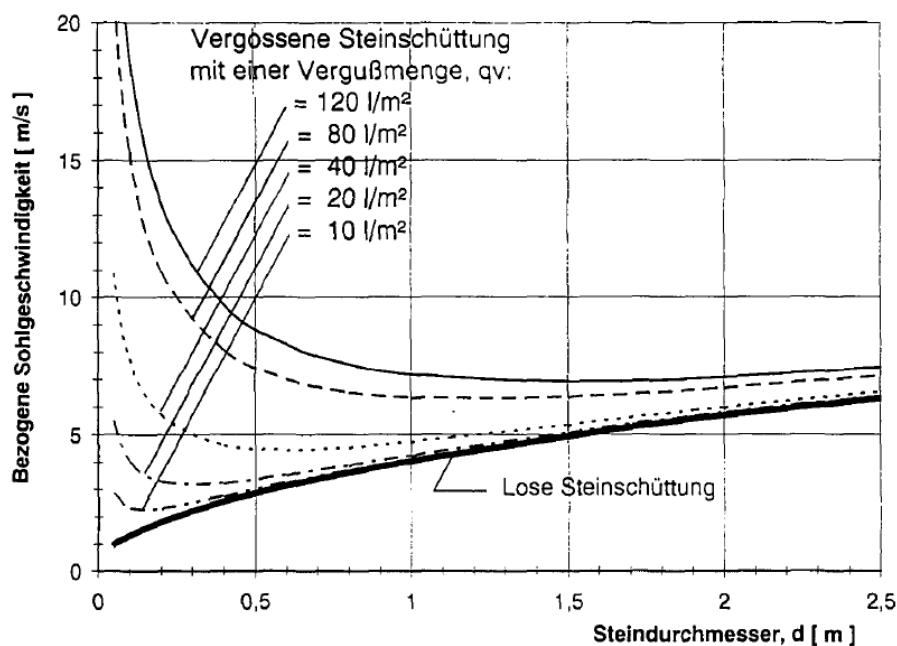
Het standaardbestek 260 voor de waterbouw voorziet twee soorten van grouting:

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

Figuur 12 – Verband tussen maximaal toegelaten stroomsnelheid en breuksteendiameter voor (met beton) gepenetreerde breuksteen



Bron: Römisch (2000).

Uit Figuur 12 volgt dat breuksteen met diameters tussen 0,20 m en 0,30 m gepenetreerd met 150 l/m² kan weerstaan aan stroomsnelheden hoger dan 10,0 m/s. Römisch (2000) merkt hierbij wel op dat de weerstand van gepenetreerde breuksteen tegen stroomsnelheden tot 6,0 à 8,0 m/s bewezen is uit proeven en metingen, maar dat de toelaatbare stroomsnelheden hoger dan 6,0 à 8,0 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 vermeld 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 volledige 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:

$$V_{\text{penetratie}} = 10 \cdot n \cdot d_D$$

Met:

- $V_{\text{penetratie}}$	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.

Hierbij wordt opgemerkt dat in kanalen en rivieren in Duitsland aan grotere minimale kielspeling (43 %; i.e. een kielspeling van 1,2 m bij een diepgang van 2,8 m) van toepassing is dan toegepast binnen het Seine-Schelde project (= 29 %, i.e. een kielspeling van 1,0 m bij een diepgang van 3,5 m).

Op het overleg van 12/09/2014 met de opdrachtgever en externe experts met betrekking tot de dimensionering van de bodembescherming werd besloten om, indien nodig, analoog aan de werkwijze in Duitsland, naast de kaaimuur een zone met volledige penetratie te voorzien en in het overige gedeelte van de bodembescherming naast de kaaimuur een gedeeltelijke penetratie met 90 l/m² te voorzien.

Omwille van de onzekerheid op de bepaling van de hoeveelheid penetratiemateriaal en omwille van de hogere kielspeling in de Duitse kanalen is later door de opdrachtgever beslist om bij gepenetreerde breuksteen enkel een volledige en geen gedeeltelijke penetratie toe te laten. 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 de opdrachtgever blijkt namelijk dat een hoeveelheid van 200 l/m² nodig is voor het volledig penetreren van een breuksteen met sortering 5 - 40 kg.

2. Open Steenasfaltmatten

Raes et al. (1996) vermelden een methode voor de bepaling van de dikte van open Steenasfaltmatten, 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 Open Steenasfaltmat	[m]
- U	Stroomsnelheid boven de mat	[m/s]
- θ	Parameter	[-]
- Δ	Relatieve dichtheid Open Steenasfalt ($\Delta = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}$)	[-]
- ρ_s	Dichtheid Open Steenasfalt (= 2000 kg/m ³)	[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 ($\theta = 1,4$).

3. Bodembescherming uit colloïdaal beton

Aangezien bij de opdrachtgever geen voorbeelden van het gebruik van colloïdaal beton als bodembescherming gekend zijn, is door de opdrachtgever gevraagd om een korte rondvraag uit te voeren naar het gebruik van colloïdaal beton als bodembescherming bij overige waterwegbeheerders en in het buitenland. De resultaten van deze rondvraag zijn gegeven in Bijlage 5 bij dit rapport.

Uit de antwoorden op de rondvraag volgt dat slechts een beperkt aantal voorbeelden gekend zijn van het gebruik van colloïdaal beton als bodembescherming. Colloïdaal beton werd gebruikt bij de (op dit ogenblik in aanbouw zijnde) Deurganckdoksloop⁷ op de linkeroever van de haven van Antwerpen, ter bescherming van de leidingentunnel in de geul van de Petroleumbrug in de haven van Antwerpen en als ballast voor de Liefkenshoekspoortunnel in de haven van Antwerpen en (in 1980) als bodembescherming afwaarts van de sluis van Klein-Willebroek.

Met betrekking tot het gebruik van colloïdaal beton als bodembescherming volgt uit de rondvraag ook het volgende:

- Bij de (op dit ogenblik in aanbouw zijnde) Deurganckdoksloop⁷ op de linkeroever van de haven van Antwerpen werd om constructieve redenen een minimale dikte van 0,40 m voorzien. Bij het ontwerp van de bodembescherming werd door de aannemer gesteld dat een bodemhelling van 6% (zelfs eerder 4 à 5 %) de maximale helling betreft voor het toepassen van colloïdaal beton als bodembescherming.
- Colloïdaal beton heeft een lage grenssnelheid voor erosie in de periode voor het beton uitgehard is.
- Colloïdaal beton kan niet gebruikt worden in zones met al te grote bodemhellingen. Dit is voornamelijk van belang bij het uitwerken van de beëindiging van de bodembescherming.
- Het is moeilijk om betrouwbare voegen te vormen in colloïdaal beton.

⁷ Bij opmaak van dit rapport was de sluis tussen de Waaslandhaven en het Deurganckdok (werknaam: Deurganckdoksloop) op de linkeroever van de haven van Antwerpen nog in aanbouw. Bij afwerken van het rapport was deze sluis ingehuldigd als de Kieldrechtssluit en was deze reeds in gebruik genomen.

Algemeen kan de dikte van de bodembescherming uit colloïdaal beton berekend worden door het eigengewicht van het beton gelijk te stellen aan de liftkracht ten gevolge van de stroomsnelheid boven de bodembescherming:

$$\frac{\rho_w C_L u_b^2}{2} = (\rho_s - \rho_w) g d$$

Of:

$$d = \frac{C_L u_b^2}{2 g \Delta}$$

Met:

-	u_b	Stroomsnelheid aan de bodem	[m/s]
-	C_L	Liftcoëfficiënt	[-]
-	ρ_w	Dichtheid water	[kg/m ³]
-	ρ_s	Dichtheid beton	[kg/m ³]
-	g	Valversnelling (=9,81 m/s ²)	[m/s ²]
-	d	Dikte bodembescherming uit beton	[m]
-	Δ	Relatieve dichtheid beton ($= \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}$)	[-]
-	ρ_s	Dichtheid beton (= 2400 kg/m ³)	[kg/m ³]
-	ρ_w	Dichtheid water (= 1000 kg/m ³)	[kg/m ³]

De moeilijkheid bij het gebruik van deze formulering bestaat in de bepaling van de liftcoëfficiënt voor een bodembescherming uit beton.

Hawkswood *et al.* (2014) vermelden dat de dikte van de bodembescherming uit colloïdaal beton bepaald kan worden aan de hand van de formuleringen voor blokkenmatten indien de afmetingen van de betonplaat groter zijn dan 45 maal de dikte van de bodembescherming die volgt uit de dimensionering of groter dan de diameter van de schroef. De bekomen diktes dienen wel nog verhoogd te worden om oneffenheden bij de uitvoering van de betonplaat in rekening te brengen.

Uit de dimensionering van de bodembescherming in paragraaf 4.3 en de berekening van de lengte (paragraaf 4.4) en de strookbreedte van de bodembescherming (paragraaf 4.5) volgt dat zowel in de fuiken opwaarts en afwaarts van de sluiskolk als naast de kaaimuren en remmingswerken opwaarts en afwaarts aan deze voorwaarden voldaan zijn.

In deze studie wordt bijgevolg de dimensionering van de bodembescherming uit beton uitgevoerd aan de hand van volgende formuleringen voor de dimensionering van blokkenmatten:

- a. De formulering voor de bepaling van de dikte van blokkenmatten volgens Raes *et. al* (1996)

De dikte wordt berekend aan de hand van volgende formulering

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

Met:

-	d	Dikte bodembescherming	[m]
-	u_b	Stroomsnelheid aan de bodem	[m/s]
-	g	Valversnelling (=9,81 m/s ²)	[m/s ²]
-	Δ	Relatieve dichtheid beton ($= \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}$)	[-]
-	ρ_s	Dichtheid beton (= 1400 kg/m ³)	[kg/m ³]
-	ρ_w	Dichtheid water (= 1000 kg/m ³)	[kg/m ³]
-	θ	Parameter ($= \sqrt{\frac{2}{C_L}}$)	[-]
-	C_L	Liftcoëfficiënt	[-]

Voor blokkenmatten wordt voor de parameter θ een waarde 2,0 toegepast voor doorgaande delen en een waarde 1,0 voor hoeken en overgangen.

In feite komt deze formulering neer op het oplossen van de eerder vermelde formulering waarbij de lift ten gevolge van de stroomsnelheid aan de bodem gelijk gesteld wordt aan het eigengewicht van de bodembescherming en waarbij een liftcoëfficiënt van 0,5 beschouwd wordt voor doorgaande delen en een liftcoëfficiënt van 1,0 voor hoeken en overgangen.

PIANC rapport 180 (MarCom Working Group 180, 2015) vermeldt dat om een zekere veiligheid in te bouwen de coëfficiënt C_L kan vermenigvuldigd worden met een veiligheidsfactor S_f ($= 1,0$ à $1,5$). Aangezien bij de dimensionering van breuksteen of Open Steenasfaltmatten geen veiligheidsfactor wordt in rekening gebracht, wordt dit in dit rapport ook niet toegepast bij de dimensionering van de bodembescherming uit beton.

- b. Hawkswood et al. (2014) vermelden een onderzoek uitgevoerd door Wellicome in 1981.

In dit onderzoek wordt de zuigkracht onder een schroef van een (zee)schip gerelateerd aan de stuwkracht van de schroef per oppervlakte aan de hand van volgende formulering:

$$t = 2\tau\rho u_p^2$$

Met:

- t	Stuwkracht schroef per oppervlakte	[kN/m ²]
- ρ	Dichtheid water	[kg/m ³]
- u_p	Stroomsnelheid achter de schroef	[m/s]
- τ	Verhouding stuwkracht schroef tot totale stuwkracht	[-]

Het toepassen van deze formulering voor de sluis van Sint-Baafs-Vijve leert dat voor bepaalde parameters geëxtrapoleerd dient te worden buiten het toepassingsgebied voor deze parameters. Het toepassen van deze formuleringen, vermoedelijk enkel afgeleid voor zeeschepen, voor binnenvaartschepen is bijgevolg niet mogelijk. Om die reden wordt deze formulering in deze studie niet toegepast.

- c. De formulering voor de bepaling van de dikte van blokkenmatten volgens Pilarczyk (Beem et al., 2000b; Pilarczyk, 1998; Pilarczyk, 1990).

$$\Delta d = 0,035 \frac{\phi}{\psi} \frac{K_T K_H}{K_S} \frac{u_b^2}{2g}$$

Met:

- d	Minimale dikte bodembescherming	[m]
- Δ	Specifieke dichtheid; $\Delta = \frac{(\rho_s - \rho_w)}{\rho_w}$	[-]
- ρ_s	Dichtheid beton ($= 2400 \text{ kg/m}^3$)	[kg/m ³]
- ρ_w	Dichtheid water ($= 1000 \text{ kg/m}^3$)	[kg/m ³]
- K_T	Turbulentiefactor	[-]
- K_h	Diepte- (of snelheidsprofiel) factor $\left(1 + \frac{h}{d}\right)^{-0.2}$	[-]
- α	Bodemhelling ($= 0^\circ$)	[°]
- K_S	Hellingfactor ($= \cos(\alpha)$)	[-]
- Ψ	Kritische schuifspanningsparameter ($= 0,07$)	[-]
- Φ	Stabiliteitsfactor voor stroming	[-]
- u_b	Stroomsnelheid aan de bodem	[m/s]
- g	Valversnelling ($= 9,81 \text{ m/s}^2$)	[m/s ²]

Bij deze formulering wordt het volgende opgemerkt:

- De formulering voor de diepte- of snelheidsprofielfactor K_h bevat impliciet de waarde voor de dikte van de bodembescherming. Deze waarde wordt iteratief bepaald op basis van de berekende dikte van de bodembescherming uit beton.

- Raes et al. (1996) vermeldt dat voor de dimensionering van blokkenmatten om praktische redenen in de formulering volgens Pilarczyk de parameter $\phi=0,50$ dient beschouwd te worden voor doorgaande delen en $\phi=1,00$ voor hoeken en overgangen, in plaats van $\phi=0,50$ voor doorgaande delen en $\phi=0,75$ voor hoeken en overgangen uit de originele formulering volgens Pilarczyk (Pilarczyk, 1998). PIANC rapport 180 (MarCom Working Group 180, 2015) vermeldt dat $\phi=0,50$ à $0,75$ dient beschouwd te worden voor doorgaande delen en $\phi=0,75$ à $1,00$ voor hoeken en overgangen. In dit rapport worden conservatief de waarde $\phi = 0,75$ beschouwd voor doorgaande delen en $\phi = 1,00$ voor hoeken en overgangen.
- Bij de bepaling van de hydraulische belastingen in hoofdstuk 3 is telkens de turbulentie-intensiteit r vermeld. PIANC rapport 180 (MarCom Working Group 180, 2015) vermeldt dat de turbulentiefactor K_T als volgt kan berekend kan worden aan de hand van de turbulentie-intensiteit r :

$$K_T = \left(\frac{1 + 3r}{1,3} \right)^2$$

Met:

- | | | |
|---------|-------------------------|-----|
| - K_T | Turbulentiefactor | [-] |
| - r | Turbulentie-intensiteit | [-] |

Bij de dimensionering van de bodembescherming uit beton zal deze formulering toegepast worden om de turbulentiefactor te bepalen aan de hand van in de hoofdstuk 3 vermelde waarden voor de turbulentie-intensiteit.

4.3 Resultaten dimensionering bodembescherming

Voor de verschillende gedefinieerde zones geeft Tabel 16 een overzicht van de optredende hydraulische belastingen, het type schip en het bodempeil dat toegepast wordt voor de dimensionering van de bodembescherming.

Tabel 16 – Overzicht optredende hydraulische belastingen, type schip en bodempeil toegepast voor de dimensionering van de bodembescherming in de verschillende zones.

Locatie	Optredende hydraulische belastingen	Schip	Bodempeil
Wachtplaats opwaartse voorhaven	Stroming ten gevolge van hoofdschroef Stroming ten gevolge van boegschroef	CEMT Vb CEMT Va+ CEMT Va	3,50 m TAW
Fuik opwaartse voorhaven	Stroming ten gevolge van hoofdschroef Stroming ten gevolge van boegschroef Stroming ten gevolge van nivelleren sluiskolk Retourstroming	CEMT Vb CEMT Va+ CEMT Va	+ 0,91 m TAW + 3,50 m TAW
Fuik insteeddok	Stroming ten gevolge van hoofdschroef Stroming ten gevolge van boegschroef Retourstroming	CEMT Va+ CEMT Va	+ 3,50 m TAW
Wachtplaats en remmingswerk toegangsgeul insteeddok	Stroming ten gevolge van hoofdschroef Stroming ten gevolge van boegschroef	CEMT Vb CEMT Va+ CEMT Va	+ 3,50 m TAW
Fuik afwaartse voorhaven	Stroming ten gevolge van hoofdschroef Stroming ten gevolge van boegschroef Stroming ten gevolge van nivelleren sluiskolk Retourstroming	CEMT Vb CEMT Va+ CEMT Va	+ 0,91 m TAW + 1,11 m TAW
Wachtplaats afwaartse voorhaven	Stroming ten gevolge van hoofdschroef Stroming ten gevolge van boegschroef	CEMT Vb CEMT Va+ CEMT Va	+ 1,11 m TAW

Tabel 17 geeft voor elk type hydraulische belastingen in de verschillende gedefinieerde zones een overzicht van de maatgevende berekende maximale stroomsnelheid boven de bodem. Bij deze tabel wordt het volgende opgemerkt:

- In de tabel wordt per hydraulische belasting de maatgevende maximale stroomsnelheid vermeld. Hiervoor wordt het maximum bepaald over de verschillende beschouwde scheepstypes, de verschillende beschouwde bodempeilen en de twee beschouwde waarden van de verhouding D_0/D_p . In de tabel worden de waarden voor deze parameters die horen bij deze maatgevende maximale stroomsnelheid aan de bodem vermeld.
- In paragraaf 3.4 is de stroming ten gevolge van de boegschroef enerzijds berekend tegen een kaaimuur en anderzijds als vrije uitstroming. Hieruit volgt dat voor alle beschouwde scheepstypes de stroming ten gevolge van de boegschroef tegen een kaaimuur op een afstand van 3 m à 4 m verwijderd uit de kaaimuur lager is dan deze berekend als vrije uitstroming. Dit is voornamelijk van toepassing in de fuiken, waar bij het in- of uitvaren van de sluiskolk of het insteeddok, de boegschroef met vrije uitstroming (dus niet tegen een verticale wand) toegepast wordt. Anderzijds geldt dat de maximale stroomsnelheden aan de bodem ten gevolge van de boegschroef berekend als vrije uitstroming voor alle scheepstypes en voor alle bodempeilen kleiner zijn dan de maximale waarde van de stroomsnelheid ten gevolge van de hoofdschroef. Dit heeft tot gevolg dat de maximale stroomsnelheid van de boegschroef ten gevolge van vrije uitstroming niet bepalend is,

waardoor deze niet vermeld wordt in de tabel. Voor de boegschroef wordt enkel de waarde van de maximale stroomsnelheid aan de bodem tegen een kaaimuur vermeld.

- De maximale waarde voor de stroomsnelheid boven de bodem in de fuik afwaarts ten gevolge van nivelleren van de sluiscolk doet zich voor op 3,7 m afwaarts van het begin van de bodembescherming. Op deze locatie doet zich het bodempeil + 1,11 m TAW voor. Om die reden is enkel dit bodempeil vermeld in de tabel.

Tabel 17 – Maatgevende maximale stroomsnelheid boven de bodem (u) en waarde voor de turbulentie-intensiteit (r) voor de verschillende hydraulische belastingen in de beschouwde zones

Locatie	Type hydraulische belasting	Bodempeil	Type schip	D_o/D_p [-]	Stroomsnelheid (u); Turbulentie-intensiteit (r)
Wachtplaats opwaartse voorhaven en toegangsgeul insteekdok	Stroming ten gevolge van hoofdschroef	+ 3,50 m TAW	CEMT Va+	1,0	$u = 2,52 \text{ m/s}; r = 0,40$
	Stroming ten gevolge van boegschroef tegen kaaimuur	+ 3,50 m TAW	CEMT Va+	1,0	$u = 7,50 \text{ m/s}; r = 0,35$
Fuik insteekdok	Stroming ten gevolge van hoofdschroef	+ 3,50 m TAW	CEMT Va+	1,0	$u = 2,88 \text{ m/s}; r = 0,40$
	Stroming ten gevolge van boegschroef	+ 3,50 m TAW	CEMT Va+	1,0	$u = 7,50 \text{ m/s}; r = 0,40$
	Retourstroming	+ 3,50 m TAW	CEMT Va+ CEMT Va	n.v.t.	$u = 1,11 \text{ m/s}; r = 0,25$
Fuik opwaartse voorhaven	Stroming ten gevolge van hoofdschroef	+ 0,91 m TAW	CEMT Va+	1,0	$u = 1,26 \text{ m/s}; r = 0,40$
		+ 3,50 m TAW	CEMT Va+	1,0	$u = 2,88 \text{ m/s}; r = 0,40$
	Stroming ten gevolge van boegschroef	+ 0,91 m TAW	CEMT Va+	1,0	$u = 2,86 \text{ m/s}; r = 0,35$
		+ 3,50 m TAW	CEMT Va+	1,0	$u = 7,50 \text{ m/s}; r = 0,35$
	Stroming ten gevolge van nivelleren sluiscolk	+ 0,91 m TAW	n.v.t.	n.v.t.	$u = 0,27 \text{ m/s}; r = 0,10$
		+ 3,50 m TAW	n.v.t.	n.v.t.	$u = 0,39 \text{ m/s}; r = 0,10$
Fuik afwaartse voorhaven	Stroming ten gevolge van hoofdschroef	+ 0,91 m TAW	CEMT Va+	1,0	$u = 2,62 \text{ m/s}; r = 0,40$
		+ 1,11 m TAW	CEMT Va+	1,0	$u = 2,88 \text{ m/s}; r = 0,40$
	Stroming ten gevolge van boegschroef	+ 0,91 m TAW	CEMT Va+	1,0	$u = 6,67 \text{ m/s}; r = 0,35$
		+ 1,11 m TAW	CEMT Va+	1,0	$u = 7,50 \text{ m/s}; r = 0,35$
	Stroming ten gevolge van nivelleren sluiscolk	+ 1,11 m TAW	n.v.t.	n.v.t.	$u = 3,46 \text{ m/s}; r = 0,10$
	Retourstroming	+ 0,91 m TAW + 1,11 m TAW	CEMT Vb CEMT Va+ CEMT Va	n.v.t.	$u = 2,34 \text{ m/s}; r = 0,25$
Wachtplaats afwaartse voorhaven	Stroming ten gevolge van hoofdschroef	+ 3,50 m TAW	CEMT Va+	1,0	$u = 2,52 \text{ m/s}; r = 0,40$
	Stroming ten gevolge van boegschroef	+ 3,50 m TAW	CEMT Va+	1,0	$u = 7,50 \text{ m/s}; r = 0,35$

Met behulp van de maatgevende maximale stroomsnelheden aan de bodem uit Tabel 17 is voor elke zone, voor elk beschouwd bodempeil en voor elk type hydraulische belasting aan de hand van de Shields-formulering aangepast voor stralen het mediaan breuksteengewicht M_{50} bepaald, die nodig is om te weerstaan aan deze stroomsnelheid. De resultaten van deze berekening zijn gegeven in Tabel 39 (wachtplaats in opwaartse voorhaven, wachtplaats en remmingswerk in toegangsgeul insteedok en fuik insteedok), Tabel 40 (fuik opwaartse voorhaven), Tabel 41 (fuik afwaartse voorhaven) en Tabel 42 (wachtplaats afwaartse voorhaven) in Bijlage 3. Tabel 18 geeft voor de verschillende zones en de verschillende types hydraulische belastingen een samenvatting van het berekende mediaan breuksteengewicht. In deze tabel is ook de overeenkomstige breuksteensortering vermeld.

Tabel 18 - Benodigd mediaan breuksteengewicht M_{50} en overeenkomstige breuksteensortering voor de gedefinieerde zones en beschouwde hydraulische belastingen.

Zone	Parameter	Stroming ten gevolge van hoofdschroef	Stroming ten gevolge van boegschroef	Stroming ten gevolge van nivelleren sluiskolk	Retourstroming
Wachtplaats opwaartse voorhaven	M_{50}	81 kg	781349 kg	n.v.t.	n.v.t.
	Breuksteensortering	40 – 200 kg		n.v.t.	n.v.t.
Wachtplaats en remmingswerk in toegangsgeul insteedok	M_{50}	81 kg	781349 kg	n.v.t.	n.v.t.
	Breuksteensortering	40 – 200 kg		n.v.t.	n.v.t.
Fuik insteedok	M_{50}	268 kg	781349 kg	n.v.t.	< 0,1 kg
	Breuksteensortering			n.v.t.	32 / 90 mm
Fuik opwaartse voorhaven	M_{50}	268 kg	781349 kg	< 0,1 kg	< 0,1 kg
	Breuksteensortering			32/90 mm	32/90 mm
Fuik afwaartse voorhaven	M_{50}	268 kg	781349 kg	740 kg	5,3 kg
	Breuksteensortering				90 / 250 mm
Wachtplaats afwaartse voorhaven	M_{50}	81 kg	781349 kg	n.v.t.	n.v.t.
	Breuksteensortering	40 – 200 kg		n.v.t.	n.v.t.

n.v.t. = niet van toepassing; grijze arcering = onbestaande breuksteensortering

Uit Tabel 18 volgt het volgende:

- Om te weerstaan aan stroming ten gevolge van boegschroeven (naast een kaaimuur of remmingswerk) is een breuksteensortering met een mediaan breuksteengewicht van ca. 780 ton nodig. Dit is onrealistisch groot. Uit paragraaf 3.4 volgt voor het duwkonvooi CEMT klasse Vb en het schip CEMT klasse Va de maximale waarde van de stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de boegschroef tegen een kaaimuur vanaf een afstand van 1,0 m à 2,0 m uit de kaaimuur lager is dan deze van de hoofdschroef. Voor het schip CEMT klasse Va+ bedraagt deze afstand 3,0 m à 4,0 m.
- In de fuiken (opwaartse voorhaven, afwaartse voorhaven en fuik insteedok) is een breuksteensortering met een mediaan breuksteengewicht van ca. 270 ton nodig om te weerstaan aan de stroming ten gevolge van de hoofdschroef. Dit is ook onrealistisch groot. Voor de wachtplaatsen in de opwaartse voorhaven, de afwaartse voorhaven en de toegangsgeul naar het insteedok kan om te weerstaan aan deze hydraulische belasting volstaan worden met een breuksteensortering 40 – 200 kg ($0,2 \text{ m} < D_{n50} < 0,37 \text{ m}$). Echter voor de aanleg van de bodembescherming is bij het ontwerp van de kaaimuren rekening gehouden met een maximale

ontgraving van 0,50 m. Bijgevolg wordt deze sorteringen niet weerhouden, wegens een te grote aanlegdiepte (0,74 m).

- In de fuik in de afwaartse voorhaven wordt ook een onrealistisch grote breuksteensortering berekend om te weerstaan aan de stroming ten gevolge van het nivelleren van de sluiscolk.

Omwille van de hierboven vermelde redenen wordt besloten dat breuksteen niet mogelijk is als bodembescherming om te weerstaan aan de optredende hydraulische belastingen op de bodem. Daarna zijn volgende alternatieve types bodembescherming onderzocht:

1. Geopenetreerde breuksteen:

Elke zone wordt volledig voorzien van geopenetreerde breuksteen. Hiervoor wordt, zoals vermeld in paragraaf 4.2, een breuksteensortering 5 – 40 kg of een breuksteensortering 10 – 60 kg beschouwd.

2. Open Steenasfaltmatten

Als alternatief voor de geopenetreerde breuksteen zou elke zone kunnen voorzien worden van Open Steenasfaltmatten als bodembescherming. Op basis van de maatgevende stroomsnelheden in Tabel 17 wordt de dikte van de Open Steenasfaltmatten voor elke zone aan de hand van de formuleringen uit paragraaf 4.2 bepaald, zowel gebruik makend van de waarde $\theta = 2,0$ voor doorgaande delen als van de waarde $\theta = 1,4$ voor hoeken en overgangen.

De resultaten van de berekening van de dikte van Open Steenasfaltmatten volgens de formulering uit paragraaf 4.2 zijn gegeven in Tabel 43 (wachtplaats in opwaartse voorhaven, wachtplaats en remmingswerk in toegangsgeul insteedok en fuik insteedok), Tabel 44 (fuik opwaartse voorhaven), Tabel 45 (fuik afwaartse voorhaven) en Tabel 46 (wachtplaats afwaartse voorhaven) in Bijlage 3. Tabel 19 geeft voor de verschillende zones en de verschillende types hydraulische belastingen een overzicht van de berekende dikte van de Open Steenasfaltmatten.

Tabel 19 – Benodigde dikte van de Open Steenasfalt voor de gedefinieerde zones en beschouwde hydraulische belastingen.

Zone	Parameter	Stroming ten gevolge van hoofdschroef	Stroming ten gevolge van boegschroef	Stroming ten gevolge van nivelleren sluiscolk	Retour- stroming
Wachtplaats opwaartse voorhaven	Doorgaande delen	0,16 m	1,43 m	n.v.t.	n.v.t.
	Hoeken en overgangen	0,33 m	2,93 m	n.v.t.	n.v.t.
Wachtplaats en remmingswerk in toegangsgeul insteekdok	Doorgaande delen	0,16 m	1,43 m	n.v.t.	n.v.t.
	Hoeken en overgangen	0,33 m	2,93 m	n.v.t.	n.v.t.
Fuik insteedok	Doorgaande delen	0,21 m	1,43 m	n.v.t.	0,03 m
	Hoeken en overgangen	0,43 m	2,93 m	n.v.t.	0,06 m
Fuik opwaartse voorhaven	Doorgaande delen	0,21 m	1,43 m	< 0,01 m	0,04 m
	Hoeken en overgangen	0,43 m	2,93 m	0,01 m	0,08 m
Fuik afwaartse voorhaven	Doorgaande delen	0,21 m	1,43 m	0,31 m	0,14 m
	Hoeken en overgangen	0,43 m	2,93 m	0,62 m	0,28 m
Wachtplaats afwaartse voorhaven	Doorgaande delen	0,16 m	1,43 m	n.v.t.	n.v.t.
	Hoeken en overgangen	0,33 m	2,93 m	n.v.t.	n.v.t.

n.v.t. = niet van toepassing

Bij deze bodembescherming uit Open Steenasfaltmatten moet het volgende opgemerkt worden:

- Op het overleg met de opdrachtgever dd. 28/11/2013 is beslist om Open Steenasfaltmatten niet te weerhouden als bodembescherming in de opwaartse en de afwaartse voorhavens en in de toegangseul naar het insteekdok. De reden hiervoor was de grotere benodigde overdiepte voor het aanleggen van de Open Steenasfaltmatten en de vele overgangen tussen de verschillende diktes.
- In praktijk zal de bodembescherming onder water aangebracht worden. Dit betekent dat de Open Steenasfaltmatten eerst op de oever worden uitgevoerd en daarna met een kraan op de bodem geplaatst zullen worden. Open Steenasfaltmatten met een dikte van 1,4 m kunnen echter niet op deze wijze uitgevoerd worden, wegens een grote kans op scheuren en breken onder invloed van het grote eigengewicht van de Open Steenasfaltmatten. Om te weerstaan aan de stroming ten gevolge van boegschroeven, moet in de eerste 3,0 m naast een kaaimuur bijgevolg gepenetreerde breuksteen aangebracht worden in plaats van Open Steenasfaltmatten. Een combinatie van gepenetreerde breuksteen en Open Steenasfaltmatten is echter niet logisch om als bodembescherming aan te brengen.

3. Bodembescherming uit colloïdaal beton

Als alternatief voor de gepenetreerde breuksteen zou geopteerd kunnen worden voor colloïdaal beton als bodembescherming. Op basis van de maatgevende stroomsnelheden in Tabel 17 wordt de dikte van de beton voor elke zone aan de hand van de formulerings volgens Raes *et al.* (1996) en de formulering volgens Pilarczyk (zie paragraaf 4.2) bepaald. In de formulerings volgens Raes *et al.* (1996), respectievelijk de formulering volgens Pilarczyk worden hierbij voor de parameters θ , respectievelijk Φ , zowel de waarden voor doorgaande delen toegepast als de waarden voor hoeken en overgangen.

De op deze wijze berekende dikte van colloïdaal beton is gegeven in Tabel 47 (wachtplaats in opwaartse voorhaven, wachtplaats en remmingswerk in toegangseul insteekdok en fuik insteekdok), Tabel 48 (fuik opwaartse voorhaven), Tabel 49 (fuik afwaartse voorhaven) en Tabel 50 (wachtplaats afwaartse voorhaven) in Bijlage 3.

Tabel 20 geeft voor de verschillende zones en de verschillende types hydraulische belastingen een overzicht van de berekende dikte van colloïdaal beton.

Om te weerstaan aan de stroomsnelheden van de boegschroef worden hoge diktes van de bodembescherming uit beton berekend. Zoals vermeld in paragraaf 3.4 is de stroomsnelheid ten gevolge van de boegschroef maatgevend in een zone naast een kaaimuur of naast een remmingswerk met een breedte van 3 à 4 m. Hiervoor wordt een grote dikte van 1,55 m berekend.

Tabel 20 – Benodigde dikte van de colloïdaal beton voor de gedefinieerde zones en beschouwde hydraulische belastingen.

Zone	Parameter	Stroming ten gevolge van hoofdschroef	Stroming ten gevolge van boegschroef	Stroming ten gevolge van nivelleren sluisolk	Retourstroming
Wachtplaats opwaartse voorhaven	Doorgaande delen	0,12	1,55	n.v.t.	n.v.t.
	Hoeken en overgangen	0,23	2,22	n.v.t.	n.v.t.
Wachtplaats en remmingswerk in toegangsgeul insteedok	Doorgaande delen	0,12	1,55	n.v.t.	n.v.t.
	Hoeken en overgangen	0,23	2,22	n.v.t.	n.v.t.
Fuik insteedok	Doorgaande delen	0,17	1,55	n.v.t.	0,02
	Hoeken en overgangen	0,24	2,22	n.v.t.	0,04
Fuik opwaartse voorhaven	Doorgaande delen	0,17	1,55	< 0,01	0,01
	Hoeken en overgangen	0,30	2,22	0,01	0,01
Fuik afwaartse voorhaven	Doorgaande delen	0,17	1,55	0,22	0,10
	Hoeken en overgangen	0,30	2,22	0,44	0,20
Wachtplaats afwaartse voorhaven	Doorgaande delen	0,12	1,55	n.v.t.	n.v.t.
	Hoeken en overgangen	0,23	2,22	n.v.t.	n.v.t.

n.v.t. = niet van toepassing

Voor de wachtplaatsen in de opwaartse en de afwaartse voorhaven wordt een dikte van 0,12 m berekend voor doorlopende delen en 0,23 m voor hoeken en overgangen. Voor de fuik in het insteedok en de fuik in de opwaartse voorhaven wordt een dikte van 0,17 m berekend voor doorgaande delen en 0,30 m voor hoeken en overgangen. Om te weerstaan aan de stroming ten gevolge van nivelleren dient in de fuik in de afwaartse voorhaven een bodembescherming te worden voorzien met een dikte van 0,22 m. Echter indien de variatie in functie van de afstand tot de sluisdeur van de stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van nivelleren vergeleken wordt met de maximale waarde van stroomsnelheid ten gevolge van de hoofdschroef (2,88 m/s voor het schip CEMT klasse Va+), volgt daaruit dat vanaf een afstand van 15,0 m afwaarts van de sluisdeur (of 7,5 m afwaarts van de beton van de bouwkuip van de sluis) de stroomsnelheid ten gevolge van nivelleren lager is dan de stroomsnelheid ten gevolge van de hoofdschroef. Bijgevolg kan na ca. 10,0 m afwaarts van de bouwkuip van de sluisolk de dikte van de beton reeds gereduceerd worden tot 0,17 m (0,30 m bij hoeken en overgangen).

Hierbij wordt het volgende opgemerkt: Bij het ontwerp van de Deurganckdoksluis⁸ in de haven van Antwerpen wordt (gevezeld) colloïdaal beton voorzien als bodembescherming in de toegangsgeul naar de sluis. Uit dat communicatie met afdeling Maritieme toegang volgt dat in het ontwerp een minimale dikte van colloïdaal beton van 0,40 m voorzien is omwille van uitvoeringstechnische redenen.

⁸ Bij opmaak van dit rapport was de sluis tussen de Waaslandhaven en het Deurganckdok (werknaam: Deurganckdoksluis) op de linkeroever van de haven van Antwerpen nog in aanbouw. Bij afwerken van het rapport was deze sluis ingehuldigd als de Kieldrechtssluis en was deze reeds in gebruik genomen.

Op basis van deze alternatieve types bodembescherming is in overleg met de opdrachtgever het volgende besloten:

- Omwille van de vermelde constructieve problemen bij aanleg van Open Steenasfaltmatten, namelijk de grote overdieptes en de vele overgangen tussen de verschillende diktes, is door de opdrachtgever beslist om geen Open Steenasfaltmatten te voorzien als bodembescherming.
- Door de opdrachtgever is berekend dat de kostprijs voor een bodembescherming uit colloïdaal beton lager is dan de kostprijs van een bodembescherming uit gepenetreerde breuksteen indien het een dunne betonnen plaat betreft; i.e. een dikte beduidend lager dan een breuksteensortering 5-40 kg met dikte 0,44 m volledig gepenetreerd met beton). Tenzij in zones naast een kaaimuur, waar de stroomsnelheid ten gevolge van de boegschroef maatgevend is, wordt voor alle overige zones een dikte lager dan 0,44 m berekend. Om uitvoeringstechnische redenen echter wordt een minimale dikte van 0,40 m beschouwd, wat maakt dat de kostprijs van een bodembescherming uit colloïdaal beton bijna hetzelfde is als deze van een bodembescherming uit gepenetreerde breuksteen. Om die reden, en omwille van de geringe ervaring met een bodembescherming uit colloïdaal beton is door de opdrachtgever beslist om ook geen bodembescherming uit colloïdaal beton te voorzien.
- Bijgevolg blijft enkel de bodembescherming uit gepenetreerde breuksteen nog over als mogelijkheid voor bodembescherming in de opwaartse voorhaven, de afwaartse voorhaven en de toegangsgeul naar het insteeddok.

Algemeen moet bij de bepaling van het type bodembescherming opgemerkt worden dat deze uitgevoerd is volgens een deterministische methode. Hierbij wordt het type bodembescherming bepaald aan de hand van vaste (eerder) conservatieve waarden voor de verschillende ontwerpparameters. Roubos & Verhagen (2007) stellen een probabilistische methode voor de dimensionering van een bodembescherming. Bij deze probabilistische methode wordt rekening gehouden met de variatie van de verschillende parameters (vermogen van hoofdschroef, boegschroef, diepgang schip, breuksteendiameter,). Aan de hand van deze probabilistische methode kan volgens Roubos & Verhagen (2007) volstaan worden met een minder zware bodembescherming. Voor de uitwerking van zulke probabilistische methode dient bijgevolg het voorkomen van de verschillende parameters statistisch beschreven te worden. Deze statistische beschrijving is voor alle parameters op dit ogenblik niet beschikbaar. Dit heeft tot gevolg dat een probabilistische methode voor de dimensionering van de bodembescherming nog dient uitgewerkt te worden en op dit ogenblik niet toepasbaar is.

4.4 Minimale lengte bodembescherming opwaarts en afwaarts van de nieuwe sluis en opwaarts van het insteekdok

De minimale lengte van de zone met bodembescherming, zowel opwaarts als afwaarts van een sluis, moet zodanig zijn dat de eventuele erosiekuil die achter de bodembescherming ontstaat zich door afschuiving of zettingsvloeiing niet kan uitstrekken tot tegen de constructie. Deze minimale lengte van de aan te brengen bodembescherming wordt volgens de formuleringen uit “Ontwerp van Schutsluizen” (Beem *et al.*, 2000) berekend op basis van de aanzethelling en mogelijke diepte van eventuele erosiekuilen en de eigenschappen van de bodem in de opwaartse voorhaven, de afwaartse voorhaven en de toegangsgeul naar het insteekdok.

Bij de berekening van de minimale lengte van de bodembescherming wordt gebruik gemaakt van de mediaan korreldiameter D_{50} van het aanwezige bodemmateriaal. Uit paragraaf 2.3 volgt voor de opwaartse voorhaven en de toegangsgeul naar het insteekdok een D_{50} van 70 à 150 μm en voor de afwaartse voorhaven een D_{50} van 50 à 200 μm . Bij wijze van gevoeligheidsanalyse worden in deze paragraaf voor de berekening van de minimale lengte van de bodembescherming voor de zone opwaarts van de nieuwe sluis, de zone afwaarts van de nieuwe sluis en fuik van het insteekdok, drie waarden voor de mediaan korreldiameter van het bodemmateriaal beschouwd, namelijk $D_{50} = 50 \mu\text{m}$, $D_{50} = 100 \mu\text{m}$ en $D_{50} = 200 \mu\text{m}$.

Volgens de formuleringen uit “Ontwerp van Schutsluizen” (Beem *et al.*, 2000) wordt de minimale lengte van de aan te brengen bodembescherming bepaald als het maximum van:

1. De minimale lengte voor ledigingsstroming

Stroming ten gevolge van lediging van een sluis is meestal op een afstand van 8 keer de waterdiepte (gemeten vanaf de sluisdeuren) gelijkmatig gespreid over een dwarsprofiel gelijk aan de sluisbreedte maal de waterdiepte. Indien de stroomsnelheid op deze locatie kleiner is dan de kritische stroomsnelheid voor het bodemmateriaal wordt een lengte van de bodembescherming beschouwd die gelijk is aan 8 maal de waterdiepte.

Dit type stroming is enkel van toepassing afwaarts van de nieuwe sluis. Om die reden wordt de bepaling van de minimale lengte voor ledigingsstroming enkel uitgevoerd voor de afwaartse voorhaven.

De berekening van de minimale lengte voor ledigingsstroming wordt uitgevoerd voor de beide bodempeilen van de afwaartse voorhaven (+ 0,91 m TAW en + 1,11 m TAW) en voor de drie beschouwde waarden voor de mediaan korreldiameter D_{50} (50 μm , 100 μm en 200 μm). De resultaten van deze berekening zijn gegeven in Tabel 51 in Bijlage 3.

Uit Tabel 51 in Bijlage 3 volgt een minimale lengte van de bodembescherming van 33,4 m. De formuleringen voor de minimale lengte voor ledigingsstroming uit “Ontwerp van Schutsluizen” zijn geldig onder de voorwaarde dat de berekende minimale lengte groter is dan 8 maal de waterdiepte ($8 \times 4,50 \text{ m} = 36,0 \text{ m}$). Aangezien de berekende minimale lengte van de bodembescherming van 33,4 m kleiner is dan 8 maal de waterdiepte, wordt een minimale lengte van 36,0 m beschouwd voor de minimale lengte van de bodembescherming afwaarts van de sluis voor ledigingstroming.

2. De minimale lengte voor retourstroming

Analoog als bij stroming ten gevolge van lediging van een sluis is de stroming ten gevolge van retourstroming meestal op een afstand van 8 keer de waterdiepte (gemeten vanaf de sluisdeuren) gelijkmatig gespreid over een dwarsprofiel gelijk aan de sluisbreedte maal de waterdiepte. Indien de stroomsnelheid op deze locatie kleiner is dan de kritische stroomsnelheid voor het bodemmateriaal wordt een lengte van de bodembescherming beschouwd die gelijk is aan 8 maal de waterdiepte.

De berekening van de minimale lengte voor retourstroming wordt uitgevoerd:

- Zowel voor de bodembescherming opwaarts van de nieuwe sluis, afwaarts van de nieuwe sluis als voor de bodembescherming opwaarts van het insteeddok.
- Voor de bodempeilen + 0,91 m TAW en + 3,50 m TAW voor de opwaartse voorhaven, de bodempeilen + 0,91 m TAW en + 1,11 m TAW voor de afwaartse voorhaven en het bodempeil + 3,50 m TAW voor de toegangseul naar het insteeddok.
- Voor de drie beschouwde waarden voor de mediaan korreldiameter D_{50} (50 μm , 100 μm en 200 μm).

De resultaten van deze berekening zijn gegeven in Tabel 52 (opwaarts nieuwe sluis en opwaarts insteeddok) en Tabel 53 (afwaarts nieuwe sluis) in Bijlage 3.

Uit deze beide tabellen volgt een minimale lengte van de bodembescherming van 30,0 m opwaarts van de nieuwe sluis, 49,0 m afwaarts van de nieuwe sluis en 28,0 m opwaarts van het insteeddok.

3. De minimale lengte voor schroefstraalstroming van de hoofdschroef

De minimale lengte van de bodembescherming onder invloed van schroefstraalstroming van de hoofdschroef kan enerzijds berekend worden volgens de theorie van erosie achter een ronde straal en anderzijds volgens de theorie van straalspreiding.

Bij de theorie van erosie achter een ronde straal wordt de lengte van de erosiekuil ingeschat aan de hand van een formulering voor de lengte van een erosiekuil achter een ronde rioolopening. Bij de theorie van straalspreiding wordt de lengte van de erosiekuil ingeschat als de afstand achter het schip waarop de stroomsnelheid aan de bodem lager wordt dan de kritische snelheid voor erosie van het betreffende bodemmateriaal.

De berekening van de minimale lengte voor schroefstraalstroming wordt uitgevoerd voor:

- Zowel de fuik in de opwaartse voorhaven, de fuik in het insteeddok als de fuik in de afwaartse voorhaven.
- De beide beschouwde bodempeilen voor de opwaartse en de afwaartse voorhavens, i.e. het bodempeil + 0,91 m TAW en het bodempeil + 3,50 m TAW voor de opwaartse voorhaven en het bodempeil + 0,91 m TAW en + 1,11 m TAW voor de afwaartse voorhaven. Voor de fuik in het insteeddok wordt een bodempeil van + 3,50 m TAW beschouwd.
- De drie beschouwde waarden voor de mediaan korreldiameter D_{50} (50 μm , 100 μm en 200 μm).
- De twee beschouwde waarden voor de effectieve diameter van de schroef (1,42 m en 2,00 m).
- Voor het schip CEMT Va en het schip CEMT Va+. Het duwkonvooi CEMT Vb wordt hierbij niet beschouwd, omdat de hoofdschroef van dit schip zich hoger boven de bodem bevindt en niet maatgevend is voor de bepaling van de lengte van de bodembescherming.

De resultaten van deze berekening zijn gegeven in Tabel 54 (voor schip CEMT Va en theorie van erosie achter ronde straal), Tabel 55 (schip CEMT Va+ en theorie van erosie achter een ronde straal), Tabel 56 (schip CEMT Va en theorie van straalspreiding) en Tabel 57 (voor schip CEMT Va+ en theorie van straalspreiding) in Bijlage 3.

Uit deze tabellen in Bijlage 3 volgt een minimale lengte van de bodembescherming van 115,5 m opwaarts van de nieuwe sluis, opwaarts van het insteeddok en afwaarts van de nieuwe sluis.

4. Een minimale waarde van 8 maal de waterdiepte.

Voor de beide voorhavens bedraagt het laagste bodempeil, i.e. het bodempeil met de grootste waterdiepte, + 0,91 m TAW. Bij de waterstand van + 8,00 m TAW in de opwaartse voorhaven en + 5,61 m TAW in de afwaartse voorhaven volgt hieruit een waterdiepte van 7,09 m in de opwaartse voorhaven en 4,70 m in de afwaartse voorhaven. Aan de hand van deze waterdieptes wordt opwaarts van de nieuwe sluis een minimale lengte van 56,7 m ($= 8 \times 7,09$ m) berekend en afwaarts van de nieuwe sluis een minimale lengte van 37,6 m ($= 8 \times 4,70$ m). Hierbij wordt opgemerkt dat het voorzien van een grotere lengte van bodembescherming opwaarts enkel ten gevolge van een hogere waterdiepte eerder tegen-intuïtief is, aangezien een grotere waterdiepte meestal leidt tot kleinere belastingen op de bodem.

In de toegangsgeul van het insteekdok is het bodempeil + 3,50 m TAW. Bij een waterstand van + 8,00 m TAW opwaarts volgt hieruit een waterdiepte van 4,50 m. Aan de hand van deze waterdiepte wordt een minimaal benodigde lengte van de bodembescherming van 36,0 m ($= 8 \times 4,50$ m) berekend.

Bij deze berekeningsresultaten voor de minimaal benodigde lengte van de bodembescherming wordt opgemerkt dat de minimaal benodigde lengte voor schroefstraalstroming beduidend hoger is dan deze voor ledigingsstroming, retourstroming en de minimale lengte van 8 maal de waterdiepte. Uit de resultaten in Bijlage 3 ten gevolge van dit type belasting volgt ook dat relatief grote lengtes en dieptes (tot 20,0 m) van de erosiekuil achter de bodembescherming berekend worden. Ter vergelijking: Roubos & Verhagen (2007) vermelden ontgrondingskuilen in het Amsterdam – Rijnkanaal van maximaal 3,0 m naast een kaaimuur ten gevolge van het aanmeren van containerschepen.

Enerzijds wordt voor de berekening van de minimale lengte van de bodembescherming voor schroefstraalstroming een formulering gebruikt die van oorsprong afgeleid is voor erosie ten gevolge van uitstroom uit ronde rioolbuizen (theorie van erosie achter een ronde straal). Anderzijds kunnen vragen gesteld worden bij het toepassen van de theorie van straalspreading voor stralen die eerder geconcentreerd zijn (zoals schroefstralen) in plaats van voor stralen die zich over de volledige breedte van de sluis kolk gespreid zijn (zoals retourstroming en ledigingsstroming).

Om die redenen wordt de grote minimale lengte van de bodembescherming voor schroefstraalstroming in deze studie niet beschouwd bij de bepaling van de minimaal benodigde lengte.

Op deze wijze wordt een minimale lengte van de te voorziene bodembescherming bepaald van 57 m opwaarts van de nieuwe sluis, een lengte van 49 m afwaarts van de nieuwe sluis en een lengte van 36 m opwaarts van het insteekdok.

4.5 Minimale strookbreedte bodembescherming naast remmingswerken en kaaimuren

Het remmingswerk opwaarts van de nieuwe sluis bestaat uit een gesloten wand. Afwaarts van de nieuwe sluis omvat het remmingswerk de gesloten wand van de oude sluiskolk. In de toegangsgeul naar het insteekdok kan de sluiskolkmuur van de nieuwe sluis als gesloten remmingswerk beschouwd worden. De kaaimuren van de wachtplaatsen in de opwaartse voorhaven, de afwaartse voorhaven en het insteekdok zijn ook allen gesloten constructies. De minimaal aan te brengen strookbreedte van de bodembescherming naast de remmingswerken en de kaaimuren kan bijgevolg berekend worden aan de hand van de formulerings voor een gesloten remmingswerk uit “Ontwerp van Schutsluizen” (Beem *et al.*, 2000).

Volgens “Ontwerp van Schutsluizen” (Beem *et al.*, 2000) wordt de strookbreedte van de aan te brengen bodembescherming ter plaatse van remmingswerken en wachtplaatsen berekend als het maximum van:

- De strookbreedte berekend volgens de theorie van erosie achter een ronde straal.
- De strookbreedte berekend volgens de theorie van straa spreiding.
- Een praktische waarde van 1 à 1,5 keer de scheepsbreedte (i.e. 11,4 à 17,1 m voor een schip CEMT-klasse Vb, een schip CEMT klasse Va+ en een schip CEMT klasse Va).

Ter plaatse van remmingswerken en wachtplaatsen zijn stroming ten gevolge van hoofdschroef en boegschroef van het schip de belangrijkste optredende hydraulische belastingen. Uit paragraaf 4.3 volgt dat de belasting ten gevolge van boegschroeven op een afstand van ca. 2,5 m uit de kaaimuur of het remmingswerk reeds kleiner is dan de stroming ten gevolge van de hoofdschroef. Om die reden wordt de berekening van de minimale strookbreedte van de bodembescherming enkel uitgevoerd voor stroming ten gevolge van de hoofdschroef. Aangezien de hoofdschroef bij het duwkonvooi CEMT Vb aan de duwboot met een diepgang van 2,5 m aanwezig is, is deze minder bepalend voor de bepaling van de strookbreedte van de bodembescherming dan het schip CEMT Va en het schip CEMT Va+, beide met een diepgang van 3,5 m.

Het remmingswerk en de wachtplaats in de opwaartse en de afwaartse voorhaven zijn nagenoeg volledig in de zone met het hoogste bodempeil gelegen. Het bodempeil van het insteekdok bedraagt + 3,50 m TAW. Om die reden wordt enkel het bodempeil + 3,50 m TAW beschouwd voor het remmingswerk en de wachtplaats opwaarts en het bodempeil +1,11 m TAW voor het remmingswerk en de wachtplaats afwaarts. Daarnaast wordt de berekening van de minimale strookbreedte uitgevoerd voor de drie beschouwde waarden voor de mediaan korreldiameter D_{50} (50 μm , 100 μm en 200 μm) en voor de twee beschouwde waarden voor de effectieve diameter van de schroef (1,42 m en 2,00 m).

De resultaten van deze berekeningen zijn gegeven in Tabel 58 (voor schip CEMT Va en aan de hand van theorie van erosie achter een ronde straal), Tabel 59 (voor schip CEMT Va+ en aan de hand van theorie van erosie achter een ronde straal), Tabel 60 (voor schip CEMT Va en aan de hand van theorie van straa spreiding), Tabel 61 (voor schip CEMT Va+ en aan de hand van theorie van straa spreiding) in Bijlage 3. Uit deze tabellen volgt voor de remmingswerken en wachtplaatsen, zowel opwaarts van de nieuwe sluis, afwaarts van de nieuwe sluis en in de toegangsgeul naar het insteekdok, een minimaal strookbreedte van de bodembescherming van 3,4 m. Deze strookbreedte is kleiner dan de praktische waarde van 1,0 à 1,5 keer de scheepsbreedte (11,4 m à 17,1 m).

Blokland & Roubos (2013) vermelden dat naast een wachtplaats de breedte van de bodembescherming minimaal gelijk dient te zijn aan de breedte van de passieve grondwig naast de kaaimuur. Daarnaast dient nog een overgangszone naar de onbeschermd bodem (zie ook paragraaf 4.7) voorzien te worden. Uit het ontwerp van de kaaimuren voor het stuwsluisluiscomplex te Sint-Baafs-Vijve volgt dat de breedte van de passieve grondwig in de opwaartse voorhaven 12,8 m bedraagt en 19,7 m in de afwaartse voorhaven.

Op het overleg met de opdrachtgever van 23/06/2015 werd besloten om voor wachtplaatsen een breedte van de bodembescherming te voorzien gelijk aan de breedte van de passieve grondwig en voor

remmingswerken een breedte gelijk aan éénmaal de scheepsbreedte. Op basis hiervan worden volgende breedtes van de bodembescherming beschouwd:

- Wachtplaatsen in de opwaartse voorhaven: 13,0 m
- Remmingswerk in de opwaartse voorhaven: 12,0 m
- Remmingswerk in de afwaartse voorhaven: 12,0 m
- Wachtplaatsen in de afwaartse voorhaven: 20,0 m

Bij deze strookbreedtes van de bodembescherming wordt opgemerkt dat de in deze paragraaf vermelde breedtes uit praktische overwegingen naar boven afgerond zijn.

In de toegangsgeul naar het insteeddok is aan de rechteroever een wachtplaats voor schepen CEMT klasse Vb aanwezig. Anderzijds dient ook naast de nieuwe sluiskolk een bodembescherming aangebracht te worden. Aangezien geen schepen aanmeren naast de nieuwe sluiskolk wordt deze kolkmuur voor de bepaling van de strookbreedte als een soort remmingswerk beschouwd. Bijgevolg wordt voor de wachtplaats in de toegangsgeul naar het insteeddok een strookbreedte van 13,0 m voorzien voor de wachtplaats en 12,0 m naast de sluiskolkmuur van de nieuwe sluis.

4.6 Filterlagen

Tussen de toplaag van de bodembescherming en het basismateriaal (i.e. het oorspronkelijke bodemmateriaal) dient een filterlaag aangebracht te worden.

Als filterlaag kan gekozen worden voor (één of meerdere lagen van) een granulair filter en/of een geotextiel.

Er wordt verondersteld dat gekozen wordt voor een geotextiel filter. Aan een geometrisch dicht, geotextiel filter worden, cfr. “Ontwerp van Schutsluizen” (Beem *et al.*, 2000), volgende eisen gesteld:

1. Grensvlakstabiliteit: Voor een geometrisch dicht filter geldt de eis dat:

- $O_{90, \text{geotextiel}} / D_{90, \text{basismateriaal}} \leq 2$ (voor een stationaire belasting)
- $O_{90, \text{geotextiel}} / D_{90, \text{basismateriaal}} \leq 1$ (voor een dynamische belasting)

Hierin is O_{90} een karakteristieke openingsgrootte die door 90 % van de openingen van het geotextiel wordt onderschreden.

In Schiereck (2003) worden als dynamische belastingen eerder cyclische belastingen zoals stroming ten gevolge van windgolven beschouwd. Het is de vraag of het nu en dan voorkomen van een stroming ten gevolge van scheepvaart in die redenering als een dynamische belasting beschouwd mag worden. Om die reden wordt in deze studie de belasting als eerder statisch beschouwd.

Op basis van de bodemsamenstelling uit paragraaf 2.3 volgt voor de opwaartse voorhaven, de wachtplaats opwaarts, de afwaartse voorhaven en de wachtplaats afwaarts een $O_{90, \text{geotextiel}}$ van 300 μm .

2. Waterdoorlatendheid: De doorlatendheid van het geotextiel moet zo groot zijn dat geen lokale verhangconcentraties kunnen optreden. Dit leidt tot de eis dat:

$$k_{n, \text{geotextiel}} > 50 \times k_{b, \text{basismateriaal}}$$

Hierbij is $k_{n, \text{geotextiel}}$ de doorlatendheidscoëfficiënt van het geotextiel voor stroming loodrecht op het geotextiel en $k_{b, \text{basismateriaal}}$ de doorlatendheidscoëfficiënt van het basismateriaal (het oorspronkelijke bodemmateriaal).

Uit het uitgevoerde grondonderzoek worden voor de doorlatendheidscoëfficiënt van het basismateriaal (k_b) volgende waarden bepaald:

- Opwaartse voorhaven: de doorlatendheidscoëfficiënt varieert afhankelijk van de locatie tussen $10^{-4} - 10^{-5}$ m/s en $10^{-7} - 10^{-8}$ m/s.
- Afwaartse voorhaven: De doorlatendheidscoëfficiënt bedraagt $10^{-4} - 10^{-5}$ m/s

4.7 Overgangsconstructies en beëindiging van de bodembescherming

In deze paragraaf wordt dieper ingegaan op overgangsconstructies tussen verschillende types bekledingen en beëindiging van de bodembescherming.

Wat overgangsconstructies betreft worden twee types overgangsconstructies gedefinieerd: langse overgangen (i.e. evenwijdig met de stroomrichting) en dwarse overgangen (i.e. loodrecht op de stroomrichting). Hierbij dienen langse overgangen zoveel mogelijk vermeden te worden.

De Rock Manual (CIRIA; CUR, 2007), Pilarczyk (1998) en De Rijcke et al. (1992) vermelden volgende functionele eisen met betrekking tot overgangsconstructies tussen bekledingen:

- De sterkte van de overgangsconstructie dient minstens even groot te zijn als de sterkte van de zwaarste van de aansluitende bekledingen.
- De permeabiliteit van de toplaag ter plaatse van de overgangsconstructie moet minstens even groot zijn als de meest doorlatende van de aansluitende bekledingen. Bij het ontwerp van een overgangsconstructie dient rekening gehouden te worden met opwaartse drukken.
- De overgangszone moet minstens even flexibel zijn als de aansluitende bekledingen.
- De duurzaamheid van de overgangsconstructie moet minstens even goed zijn als deze van de beide bekledingen die erdoor verbonden worden.

Aangezien voor de bodembescherming in de opwaartse voorhaven, de afwaartse voorhaven en de toegangsgeul naar het insteeddok slechts één type bodembescherming voorgesteld wordt, namelijk gepenetreerde breuksteen, zijn overgangsconstructies tussen verschillende types bodembescherming niet van toepassing voor deze studie.

Een speciale vorm van een overgangsconstructie is de beëindiging van een bodembescherming (overgang van zone met bodembescherming naar een onbeschermd zone).

Met betrekking tot de beëindiging van een bodembescherming vermeldt CUR-publicatie 197 “breuksteen in de praktijk” (Bakker & Wouters, 2000) dat zich aan het einde van de bodembescherming mogelijks nog een erosiekuil kan voordoen omwille van de hogere turbulentie of het nog niet uitgedempt zijn van eventuele wervels, zelfs al is de stroomsnelheid op deze plaats lager dan de toelaatbare stroomsnelheid van het aanwezige bodemmateriaal. Indien een starre bodembescherming aanwezig is, is het mogelijk dat deze erosiekuil zich uitstrekt onder de bodembescherming en dat dit aanleiding geeft tot het breken van de bodembescherming. Bij toepassing van een flexibele bodembescherming zal de bodembescherming mee vervormen en wordt de aanzethelling van de eventuele erosiekuil beschermd, waardoor de erosiekuil de constructie niet zal naderen.

Om die reden wordt aangeraden bij de overgang van een zone met bodembescherming naar een onbeschermd zone een voldoende flexibele bodembescherming te voorzien. Een volledig gepenetreerde breuksteenbekleding is een weinig flexibele breuksteenbekleding, waardoor deze onder invloed van een erosiekuil aan het einde van de bekleding mogelijks zou kunnen breken. Om die reden wordt aangeraden om voor de overgang tussen gepenetreerde breuksteen en de onbeschermd zone een zone met een (meer flexibele) breuksteenbekleding te voorzien. Voor de breedte van deze overgangszone wordt in Pilarczyk (1998) een minimale breedte van 1 m vermeld. In overleg met de opdrachtgever is voor deze studie de breedte van de overgangszone gelijk genomen aan 3 m.

4.8 Voorgestelde bodembescherming opwaarts en afwaarts van de nieuwe sluis

Uit de dimensionering van de bodembescherming in paragrafen 4.2 tot en met 4.5 wordt het volgende besloten met betrekking tot de aan te brengen bodembescherming voor de opwaartse voorhaven, de afwaartse voorhaven en de toegangsgeul naar het insteeddok:

1. Wat het type bodembescherming betreft wordt enkel gepenetreerde breuksteen weerhouden. Tabel 21 geeft een overzicht van de mogelijk toepasbare sorteringen en de aan te brengen laagdikte van de breuksteen. Zoals vermeld in paragraaf 4.2 dient hierbij een voldoende hoeveelheid penetratiemateriaal (beton) voorzien te worden zodat een volledige penetratie bekomen wordt.

Tabel 21 – Breuksteensortering voor penetratie

Sortering	M ₅₀	D _{n50}	Laagdikte
5 – 40 kg	14 kg – 28 kg	0,17 m - 0,22 m	0,44 m
10 – 60 kg	27 kg – 47 kg	0,22 m – 0,26 m	0,52 m

2. Opwaarts, respectievelijk afwaarts van de nieuwe sluis dient een bodembescherming aangebracht te worden over een lengte van minimaal 57 m (opwaarts), respectievelijk 49 m (afwaarts). Opwaarts van het insteeddok dient een bodembescherming aangebracht te worden over een lengte van 36 m.
3. Volgende breedtes van de bodembescherming dienen minimaal voorzien te worden:
 - Wachtplaats in de toegangsgeul naar het insteeddok: 13,0 m
 - Naast de sluiscolmuur van de nieuwe sluis in het insteeddok: 12,0 m
 - Wachtplaatsen in de opwaartse voorhaven: 13,0 m
 - Remmingswerk in de opwaartse voorhaven: 12,0 m
 - Remmingswerk in de afwaartse voorhaven: 12,0 m
 - Wachtplaatsen in de afwaartse voorhaven: 20,0 m
4. Tussen de zone met gepenetreerde breuksteen en de onbeschermd bodem wordt een overgangszone met een breedte van 3,0 m in niet-gepenetreerde breuksteen (zelfde sortering als de gepenetreerde breuksteen) voorzien.

De zones waarin bodembescherming dient voorzien te worden, zijn voorgesteld in Figuur 13 en samengevat in Tabel 22. De strookbreedtes van de bodembescherming in Figuur 13 en in Tabel 22 zijn inclusief de breedtes van de overgangszones.

brengen bodembescherming voorgesteld. Het staat de opdrachtgever vrij om de onbeschermd zone met een breedte van respectievelijk 8 m, respectievelijk 1 m, omwille van praktische redenen, ook te voorzien van een bodembescherming (uit gepenetreerde breuksteen).

- In de toegangsgeul naar de huidige sluis, dat als insteeddok wordt ingericht, wordt een kaaimuur aan de rechteroever voorzien. In Figuur 13 is een bodembescherming voorzien over de volledige lengte van de rechteroever. Minimaal dient een bodembescherming te worden voorzien over de lengte van de toekomstige kaaimuur. Daarnaast is in de toegangsgeul naar het insteeddok aan linkeroever (naast het remmingswerk en de kolkmuur van de nieuwe sluis) een bodembescherming voorzien over een totale breedte van 15 m. Tussen de bodembescherming naast de kaaimuur en de bodembescherming naast de sluiskolkmuur is een onbeschermd zone aanwezig met een breedte van ca. 12 m. Het staat de opdrachtgever vrij, omwille van praktische redenen, ook deze onbeschermd zone te voorzien van bodembescherming (uit gepenetreerde breuksteen).
- Voor gepenetreerde breuksteen is in deze studie enkel colloïdaal beton voorgesteld, aangezien de penetratie in praktijk onder water zal aangebracht worden. Hierbij is penetratie met open colloïdaal beton en penetratie met gesloten colloïdaal beton mogelijk. Ervaring met penetratie van breuksteen met open colloïdaal beton in Duitsland (pers. comm. Bundesanstalt für Wasserbau; Dr. – ing. Jan Kayser, Afdeling Geotechniek BAW) leert dat deze breuksteenbekleding niet kan weerstaan aan hoge stroomsnelheden. Om die reden wordt penetratie van breuksteen met open colloïdaal beton niet aangeraden.

5 Conclusie

In het kader van het Seine-Scheldeproject wordt de Leie door Waterwegen en Zeekanaal nv (W&Z) toegankelijk gemaakt voor schepen CEMT klasse Vb. Hiervoor dient te Sint-Baafs-Vijve een nieuwe sluis gebouwd te worden en wordt ook het vismigratieknelpunt ter hoogte van het stuwsluisscomplex opgelost.

Door Grontmij werd een voorontwerp van de nieuwe klasse Vb-sluis uitgewerkt. Dit voorontwerp werd in maart 2013 aan W&Z Afdeling Bovenschelde overgemaakt. Tijdens de opmaak van dit voorontwerp fungeerde het Waterbouwkundig laboratorium (WL) als klankbord en leverde zo input.

Voor het uitwerken van het finale ontwerp doet de Afdeling Bovenschelde (contactpersoon: ir. C. Beels) beroep op de afdelingen Expertise Beton en Staal (EBS), Elektromechanica en Telematica (EMT) en Geotechniek en WL. Aan WL werd gevraagd ondersteuning te bieden aan het ontwerp, in het bijzonder wat betreft het ontwerp van het nivelleersysteem, het ontwerp van de oever- en bodemverdediging, de nautische aspecten en het ontwerp van de vispassage.

In het kader van het finale ontwerp van de nieuwe sluis te Sint-Baafs-Vijve werd het voorontwerp van de sluis, dat uitgewerkt werd door Grontmij (Grontmij, 2013a), door WL reeds nautisch beoordeeld op basis van real-time manoeuvresimulaties op de binnenvaartsimulator van WL (Verwilligen *et al.*, 2013). Daarnaast werd ook het ontwerp van het nivelleersysteem voor de nieuwe sluis uitgevoerd (Vercruysse *et al.*, 2014).

Dit rapport beschrijft de dimensionering van de bodembescherming in de opwaartse en afwaartse voorhavens van de sluiskolk en in de toegangsgoed naar het insteeddok uit het voorontwerp van Grontmij.

Hiervoor werden eerst de hydraulische belastingen begroot die optreden ten gevolge van het nivelleren van de sluiskolk en ten gevolge van scheepvaart.

Op basis van deze hydraulische belastingen is een mogelijke opbouw van de bodembescherming bepaald. Hiervoor is eerst **het type bodembescherming** bepaald. Daarna is de minimale lengte van de aan te brengen bodembescherming opwaarts en afwaarts van de nieuwe sluis bepaald en de minimale strookbreedte voor de bodembescherming naast remmingwerken en kaaimuren (in wachtplaatsen). Hiervoor zijn de formuleringen uit "Ontwerp van Schutsluizen" (Beem *et al.*, 2000) toegepast.

Op basis van de uitgevoerde dimensionering is besloten dat een bodembescherming uit **breuksteen** niet voldoet om te weerstaan aan de hoge stroomsnelheden ten gevolge van scheepvaart. Daarom werd in deze studie als alternatief een bodembescherming uit gepenetreerde breuksteen, een bodembescherming uit Open Steenasfaltmatten en een bodembescherming uit colloïdaal beton onderzocht.

Voor een bodembescherming uit **Open Steenasfaltmatten** en een bodembescherming uit **colloïdaal beton** worden de berekende diktes gegeven in Tabel 23. Bij deze tabel wordt opgemerkt dat voor de overgangszones in plaats van een grotere dikte ook een overgang in een meer flexibele bodembescherming (zoals breuksteen) kan voorzien worden. De diktes van de Open Steenasfaltmatten hoger dan 0,75 m zijn echter praktisch niet uitvoerbaar (wegens een te groot gewicht voor inzetbaar hijsmateriaal) en er is een te grote overdiepte ten opzichte van het te realiseren bodempeil noodzakelijk. Om die reden is, in overleg met de opdrachtgever, de bodembescherming uit Open Steenasfaltmatten verder niet beschouwd.

Door de opdrachtgever is berekend dat de kostprijs voor een bodembescherming uit colloïdaal beton lager is dan de kostprijs van een bodembescherming uit gepenetreerde breuksteen indien het een dunne betonnen plaat betreft; i.e. een dikte beduidend lager dan een breuksteensortering 5-40 kg met dikte 0,42 m volledig gepenetreerd met beton. Tenzij in zones naast een kaaimuur, waar de stroomsnelheid ten gevolge van de boegschroef maatgevend is, wordt voor alle overige zones een dikte beduidend lager dan 0,42 m berekend. Om uitvoeringstechnische redenen echter wordt een minimale dikte van 0,40 m beschouwd, wat maakt dat de kostprijs van een bodembescherming uit colloïdaal beton bijna hetzelfde is als deze van een bodembescherming uit gepenetreerde breuksteen. Om die reden, en omwille van de

geringe ervaring met een bodembescherming uit colloïdaal beton is door de opdrachtgever beslist om ook geen bodembescherming uit colloïdaal beton te voorzien.

Tabel 23 – Dikte bodembescherming uit Open Steenasfalt en colloïdaal beton

Zone	Open Steenasfalt			Colloïdaal beton		
	Zone 3 à 4 m naast kaaimuur	Doorgaande delen	Overgangs-zone (breedte 2,0 m)	Zone 3 à 4 m naast kaaimuur	Doorgaande delen	Overgangs-zone (breedte 2,0 m)
Wachtplaats opwaartse voorhaven	1,43 m	0,16 m	0,33 m	1,55 m	0,12 m	0,23 m
Wachtplaats en remmingswerk in toegangsgeul insteeddok	1,43 m	0,16 m	0,33 m	1,55 m	0,12 m	0,23 m
Fuik insteeddok	1,43 m	0,21 m	0,43 m	1,55 m	0,17 m	0,24 m
Fuik opwaartse voorhaven	1,43 m	0,21 m	0,43 m	1,55 m	0,17 m	0,30 m
Eerste 10,0 m fuik afwaartse voorhaven	1,43 m	0,31 m	n.v.t.	1,55 m	0,22 m	n.v.t.
Overige gedeelte fuik afwaartse voorhaven	1,43 m	0,21 m	0,43 m	1,55 m	0,17 m	0,30 m
Wachtplaats afwaartse voorhaven	1,43 m	0,16 m	0,33 m	1,55 m	0,12 m	0,23 m

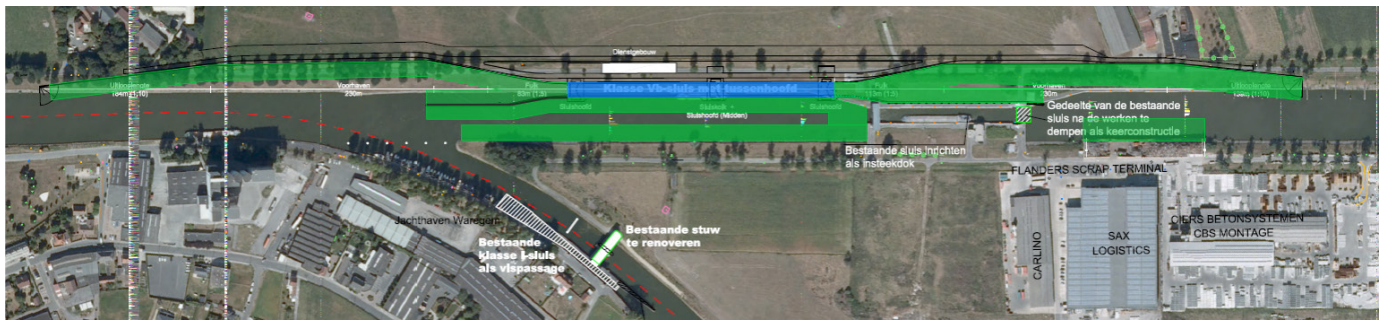
Aangezien een bodembescherming uit Open Steenasfalt en een bodembescherming uit colloïdaal beton niet mogelijk zijn blijft als enige mogelijkheid een bodembescherming uit **gepenetreerde breuksteen** over.

Deze bodembescherming bestaat uit ofwel een breuksteensortering 5/40 kg (laagdikte: 0,42 m) ofwel een breuksteensortering 10/60 kg (laagdikte: 0,52 m) gepenetreerd met colloïdaal beton.

Wat de **overgang** van een zone met bodembescherming naar een onbeschermd bodem betreft is vooral van belang dat de bodembescherming voldoende flexibel is, zodat bij het ontstaan van een eventuele erosiekuil na de bodembescherming, de bodembescherming de vervorming van de bodem volgt. Bij minder flexibele types bodembescherming (zoals gepenetreerde breuksteen) wordt aangeraden om een zone met een (meer flexibele) breuksteenbekleding te voorzien als overgang naar de onbeschermd bodem. In overleg met de opdrachtgever is beslist om zowel voor de bodembescherming naast kaaimuren, als voor de bodembescherming naast remmingswerken een overgangzone (uit niet-gepenetreerde breuksteenbekleding) naar de onbeschermd zone te voorzien met een breedte van 3,0 m. Deze (niet-gepenetreerde) breuksteenbekleding dient ook aangebracht te worden aan het uiteinde (in lengterichting) van de bodembescherming.

De zones waarin bodembescherming dient voorzien te worden, zijn voorgesteld in Figuur 14 en samengevat in Tabel 24. De strookbreedtes van de bodembescherming in deze figuur en deze tabel zijn inclusief de breedte van de overgangszones.

Figuur 14 – Locatie bodembescherming uit gepenetreerde breuksteen



Tabel 24 – Zones met bodembescherming uit gepenetreerde breuksteen.

Zone	Afmetingen	Bodembescherming
Wachtplaats opwaarts	Lengte: lengte wachtplaats Breedte: 16 m	Gepenetreerde breuksteen 5/40 kg of Gepenetreerde breuksteen 10/60 kg Overgangszone: (niet-gepenetreerde breuksteen 5/40 kg of 10/60 kg)
Fuik opwaarts	Lengte: 57 m Breedte: volledige breedte fuik	
Zone naast remmingswerk opwaarts	Lengte: lengte remmingswerk breedte: 15 m	
Sluis	Lengte en breedte bouwkuip	Beton
Zone naast remmingswerk (kaaimuur oude sluis) afwaarts	Lengte: lengte kaaimuur oude sluiskolk Breedte: 15 m	Gepenetreerde breuksteen 5/40 kg of Gepenetreerde breuksteen 10/60 kg Overgangszone: (niet-gepenetreerde breuksteen 5/40 kg of 10/60 kg)
Fuik afwaarts	Lengte: 49 m breedte: Volledige breedte fuik	
Wachtplaats afwaarts	Lengte: lengte wachtplaats Breedte: 23 m	
Sluiskolkmuur in toegangsgeul naar insteeddok	Lengte: lengte sluiskolkmuur Breedte: 15 m	
Kaaimuur in toegangsgeul naar insteeddok	Lengte: lengte kaaimuur Breedte: 16 m	
Fuik insteeddok	Lengte: 36 m Breedte: Breedte fuik	
Overige kaaimuren afwaarts	Lengte: lengte kaaimuur Breedte: 23 m	

breedte = inclusief overgangszone met breedte 3,0 m

Bij de hierboven voorgestelde bodembescherming in de opwaartse voorhaven, de afwaartse voorhaven en in de toegangsgeul naar het insteeddok worden volgende **opmerkingen / aanbevelingen** geformuleerd:

- 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. In deze studie is voor het duwkonvooi CEMT klasse Vb, het schip CEMT klasse Va+ en, het schip CEMT klasse Va (conservatief) een maximale waarde voor deze parameters beschouwd. Het is een aanbeveling om bij het ontwerp van een bodembescherming 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 bij deze scheepstypes.

- In deze studie is de dimensionering van de bodembescherming uitgevoerd volgens een deterministische methode. Hierbij wordt het type bodembescherming bepaald aan de hand van eerder conservatief bepaalde waarden voor de verschillende ontwerpparameters. Roubos & Verhagen (2007) stellen voor de dimensionering van een bodembescherming een probabilistische methode voor. Bij deze probabilistische methode wordt rekening gehouden met de onzekerheid op de verschillende parameters (vermogen van hoofdschroef, boegschroef, diepgang schip, breuksteendiameter,). Aan de hand van deze probabilistische methode kan volgens Roubos & Verhagen (2007) mogelijks volstaan worden met een minder zware bodembescherming. Voor de uitwerking van zulke probabilistische methode dient bijgevolg het voorkomen van de verschillende parameters statistisch beschreven te worden, wat op dit ogenblik niet beschikbaar is. Dit heeft tot gevolg dat een probabilistische methode voor de dimensionering van de bodembescherming nog uitgewerkt dient te worden en op dit ogenblik niet toepasbaar is.
- De keuze tussen de twee voorgestelde sorteringen bij een bodembescherming uit gepenetreerde breuksteen dient gemaakt te worden uit constructieve en financiële overwegingen. Dit maakt geen onderdeel uit van deze studie.
- Bij gepenetreerde breuksteen dient een voldoende hoeveelheid colloïdaal beton toegepast te worden, zodat een volledige penetratie bekomen wordt. De benodigde hoeveelheid kan hierbij meer bedragen dan de 150 l/m² vermeld in het standaardbestek 260 voor de waterbouw. Uit ervaringen met penetratie van breuksteen bij de opdrachtgever blijkt namelijk dat een hoeveelheid van 200 l/m² nodig is voor het volledig penetreren van een breuksteen met sortering 5 - 40 kg.
- Opwaarts van de nieuwe sluis dient een bodembescherming aangebracht te worden over een minimale lengte van 57 m, afwaarts over een lengte van 49 m. Naast de kaaimuur van de wachtplaats in de opwaartse voorhaven wordt een bodembescherming voorzien over een breedte van 16 m, naast het remmingswerk in de opwaartse en afwaartse voorhaven over een breedte van 15 m en naast de kaaimuur in de afwaartse voorhaven over een breedte van 23 m. Deze breedtes zijn inclusief de breedte van de overgangszone uit niet-gepenetreerde breuksteen. De breedte tussen de kaaimuur van de wachtplaats aan linkeroever en het remmingswerk aan rechteroever bedraagt 39 m. Dit heeft tot gevolg dat in het midden van de opwaartse voorhaven een zone met een breedte van ca. 8 m onbeschermd zou blijven en in het midden van de afwaartse voorhaven een zone met een breedte van 1 m. In Figuur 14 is de minimale aan te brengen bodembescherming voorgesteld. Het staat de opdrachtgever vrij om de onbeschermd zone, omwille van praktische redenen, ook te voorzien van een bodembescherming (uit gepenetreerde breuksteen). Hetzelfde is van toepassing voor de toegangsgeul naar het insteeddok, waar een onbeschermd zone met een breedte van 12 m aanwezig is.
- Het opwaartse uiteinde van de bodembescherming naast het remmingswerk en naast de kaaimuur in de toegangsgeul naar het insteeddok, bevinden zich in werkelijkheid ter plaatse van de opwaartse splitsing van de Leie in een stuwgeul en een vaargeul (naar het insteeddok). Ter plaatse van deze splitsing kan zich bij was een driedimensionaal stromingspatroon voordoen, hetgeen mogelijks aanleiding kan geven tot erosie aan de uiteinden van de aanwezige bodembescherming. Hiermee is geen rekening gehouden bij de dimensionering van de bodembescherming. Voorafgaand aan de uitgevoerde scheepvaartsimulaties voor de nieuwe sluis te Sint-Baafs-Vijve is wel een tweedimensionale modellering van het stromingspatroon uitgevoerd. Echter om mogelijke erosieproblemen in deze zone in te kunnen schatten is een driedimensionale modellering van het stromingspatroon rond het stuwsuiscomplex aangewezen.
- In deze studie is in overleg met de opdrachtgever, conform het SB260, enkel volledige penetratie van breuksteen met colloïdaal beton beschouwd. Mogelijks is een bodembescherming, bestaande uit een zone met een breedte van 3 m met volledige penetratie van de breuksteen naast een verticale wand (kaaimuur of remmingswerk) en een gedeeltelijke penetratie voor het overige gedeelte ook een mogelijkheid. Wegens de onzekerheid op de bepaling van de benodigde hoeveelheid beton voor de gedeeltelijke penetratie is deze mogelijkheid, in overleg met de

opdrachtgever, niet weerhouden. Meer onderzoek is echter nodig naar de bepaling van de hoeveelheid penetratiemateriaal bij gedeeltelijk gepenetreerde breuksteen.

- Voor de penetratie van breuksteen is in deze studie enkel colloïdaal beton voorgesteld, aangezien de penetratie in praktijk onder water zal aangebracht worden. Hierbij is penetratie met open colloïdaal beton en penetratie met gesloten colloïdaal beton mogelijk. Ervaring met penetratie van breuksteen met open colloïdaal beton in Duitsland (pers. comm. Bundesanstalt für Wasserbau) leert dat deze breuksteenbekleding niet kan weerstaan aan hoge stroomsnelheden ten gevolge van scheepvaart. Om die reden wordt penetratie van breuksteen met open colloïdaal beton niet aangeraden.
- Door de opdrachtgever is in februari 2016 beslist om de breedte van de sluiskolk te wijzigen naar 16,0 m. Deze wijziging van de breedte van de sluiskolk beïnvloedt enkel de stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van nivelleren en ten gevolge van retourstroming. De retourstroming zal hierbij verlagen en zorgen voor lagere stroomsnelheden aan de bodem. De ledigingsdebieten, volgend uit het nieuwe ontwerp van het nivelleersysteem voor deze bredere sluis, zullen vermoedelijk hoger zijn, waardoor iets hogere stroomsnelheden aan de bodem zullen gegenereerd worden. Echter, met uitzondering van de fuik afwaarts, zijn de stroomsnelheden aan de bodem ten gevolge van hoofdschroeven en boegschroeven het meest bepalend bij de dimensionering van de bodembescherming. Deze wijzigen echter niet. Daarnaast wordt voor alle beschouwde locaties gepenetreerde breuksteen voorzien als bodembescherming, dewelke kan weerstaan aan hoge stroomsnelheden (tot 8 à 10 m/s). Dit maakt dat deze bodembescherming ook kan weerstaan aan een verhoging van de stroomsnelheid aan de bodem in de afwaartse voorhaven ten gevolge van ledigen van de sluiskolk. Het voorgestelde type bodembescherming zal bijgevolg voor alle beschouwde zones niet wijzigen. De berekende lengte van de bodembescherming kan wel nog beperkt wijzigen, aangezien deze vooral afwaarts van de nieuwe sluis bepaald is op basis van de ledigingsstroming en de retourstroming. Dit moet echter via een meer gedetailleerde berekening nagegaan worden.
- Algemeen is het een aanbeveling om in het bestek met betrekking tot de bouw van de sluis voldoende controles te voorzien met betrekking tot het uitvoeren van de bodembescherming, o.a. door het inzetten van duikers om de penetratie te controleren en eventueel door het registreren van de coördinaten van de kraan tijdens het aanbrengen van het colloïdaal beton met behulp van GPS. Daarnaast is het aanbevolen om na aanleg van de bodembescherming regelmatig een monitoring van de bodembescherming uit te voeren, zeker gezien de onzekerheden op de bepaling van de minimaal aan te brengen lengte van de bodembescherming opwaarts en afwaarts van een constructie.

6 Referenties

- Afdeling Geotechniek.** (2014). Verslag over de resultaten van de boringen met aanvullend laboratoriumonderzoek en van de metingen aan de peilfilters uitgevoerd langs het Leiekanaal linkeroever + rechteroever voor het bouwen van een nieuwe sluis klasse Vb te Wielsbeke (Sint-Baafs-Vijve)
- Bakker, J.J.; Wouters, J.** (2000). Breuksteen in de praktijk - deel 2: dimensionering van constructies in binnenwateren. Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving (CUR): Gouda
- 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.; 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.** (2007). Manual on the use of rock in hydraulic engineering (2nd edition)
- Coen, L.; Schramkowski, G.; Vanlede, J.; Verwilligen, J.; Verwaest, T.; Mostaert, F.** (2013). Ondersteuning ontwerp klasse Vb-sluis te Sint-Baafs-Vijve: Deelrapport 1 – 2D modellering in Delft3D. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België
- de Jong, M.** (2003). Schade veroorzaakt door boegschroeven van manoeuvrerende schepen bij verticale kademuren
- de Rijcke, W.G.; Klein Breteler, M.; Stoutjesdijk, T.P.; Philipse, L.A.** (1992). Overgangsconstructies in dijkbekledingen. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW)
- De Rouck, J.** (n.d.) Rivieren, kanalen en sluizen. Partim: rivieren en kanalen [CURSUS]. Universiteit Gent. Faculteit Ingenieurswetenschappen: Gent
- Geerts, S.; Verwerft, B.; Vantorre, M.; Delefortrie, G.; Mostaert, F.** (2011). Modelproeven voorspelling manoeuvreergedrag binnenvaart: deelrapport A.I - Achtergrondstudie binnenvaart: binnenvaartuigen en binnenvaartwegen. *WL Rapporten*, 809_01. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- Grontmij.** (2013a). Seine - Schelde. Leie te St-Baafs-Vijve. Bouwen van een klasse Vb-sluis. Opmaak voorontwerp & project-MER. Voorontwerp Omgevingsaanleg. Plan - INFRA 04.00 rev. D dd. 06/03/2013
- Grontmij.** (2013b). Seine - Schelde. Leie te St-Baafs-Vijve. Bouwen van een klasse Vb-sluis. Opmaak voorontwerp & project-MER. Voorontwerp Omgevingsaanleg. Plan - INFRA 04.01 rev. B dd. 08/03/2013
- Grontmij.** (2013c). Seine - Schelde. Leie te St-Baafs-Vijve. Bouwen van een klasse Vb-sluis. Opmaak voorontwerp & project-MER. Voorontwerp Omgevingsaanleg. Plan - INFRA 04.02 rev. B dd. 08/03/2013
- Grontmij.** (2013d). Seine - Schelde. Leie te St-Baafs-Vijve. Bouwen van een klasse Vb-sluis. Opmaak voorontwerp & project-MER. Voorontwerp Omgevingsaanleg. Plan - INFRA 04.03 rev. B dd. 08/03/2013
- Grontmij.** (2013e). Seine - Schelde. Leie te St-Baafs-Vijve. Bouwen van een klasse Vb-sluis. Opmaak voorontwerp & project-MER. Voorontwerp Sluishoofd sluiskolk. Plan - STAB 06 rev. B dd. 08/03/2013
- Hawkswood, M.G.; Lafeber, F.H.; Hawkswood, G.M.** (2014). Berth scour protection for modern vessels. *PIANC World Congr. San Fr. USA 2014*
- 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

NV Zeekanaal en haveninrichtingen van Brussel. (1981). Zeekanaal. Verstevenigen van de kanaalmonding te Klein-Willebroek. Toevaargeul tot de sluis van Klein-Willebroek. Profielen. Te verwezenlijken damwanden. Plan nr. 81005 dd. 18/03/81

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*: 11th International Harbour Congress, Antwerpen, June 17-21, 1996. pp. 433–442

Römis, K. (2000). Strömungsstabilität vergossener Steinschüttungen. *Wasserwirtschaft* 90 7–8: 356

Roubos, A.; Verhagen, H.J. (2007). Uncertainties in the design of bed protections near quay walls. *4th Int. Conf. Port Dev. Coast. Environ. PDCE 2007*

Schiereck, J. (2003). Introduction to bed, bank and shore protection

Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW). (2002). Technisch rapport asfalt voor waterkeren. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW): Delft. ISBN 90-369-5519-X

ten Hove, D. (2010). Scheepskarakteristieken van nieuwe grote schepen. Rapport nr. 24032.600/2. 10/02/2010. MARIN: Wageningen: Nederland

van Blaaderen, E.A. (2006). Modelling bowthruster induced flow near a quay-wall

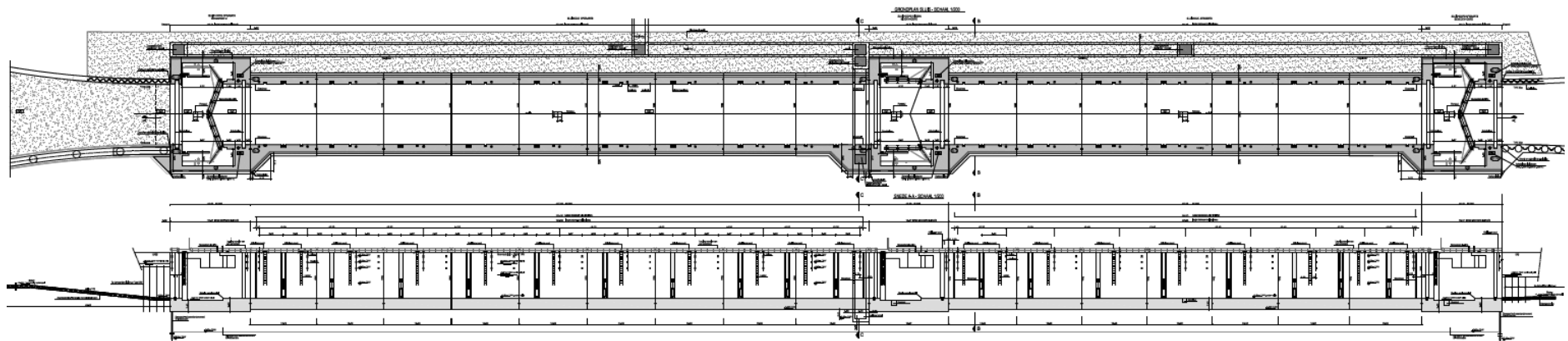
van der Laan, T. (2005). Het ontwikkelen van een model voor boegschroefstralen bij verticale kademuren

Vercruysse, J.; Verelst, K.; De Mulder, T.; Peeters, P.; Mostaert, F. (2014). Ondersteuning ontwerp klasse Vb sluis te Sint-Baafs-Vijve: Deelrapport 3 – Ontwerp nivelleersysteem. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België

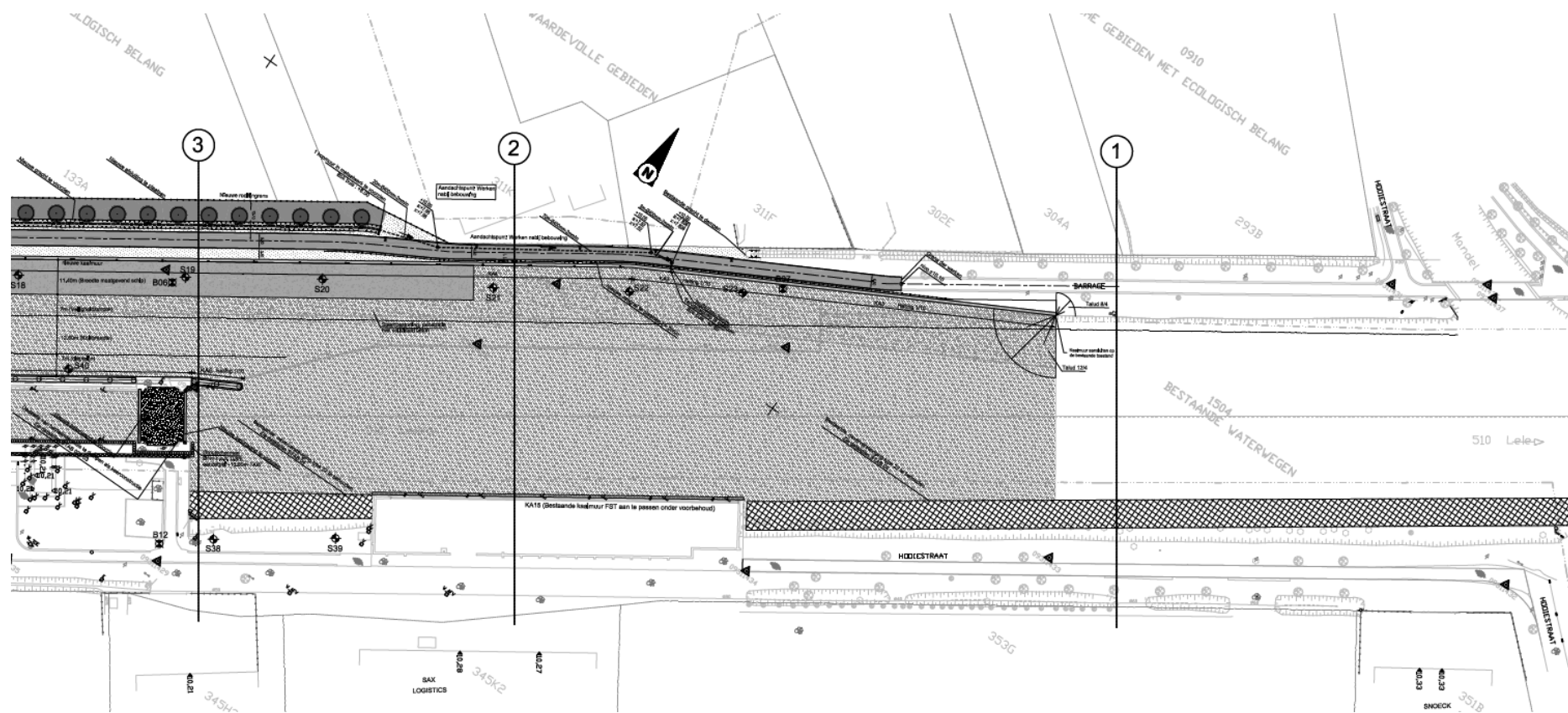
Verwilligen, J.; Vos, S.; Peeters, P.; Mostaert, F. (2013). Ondersteuning ontwerp klasse Vb-sluis te Sint-Baafs-Vijve: deelrapport 2 – Real-time manoeuvreersimulaties. *WL Rapporten*, 12_142. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Bijlage 1 : Plannen nieuwe sluis

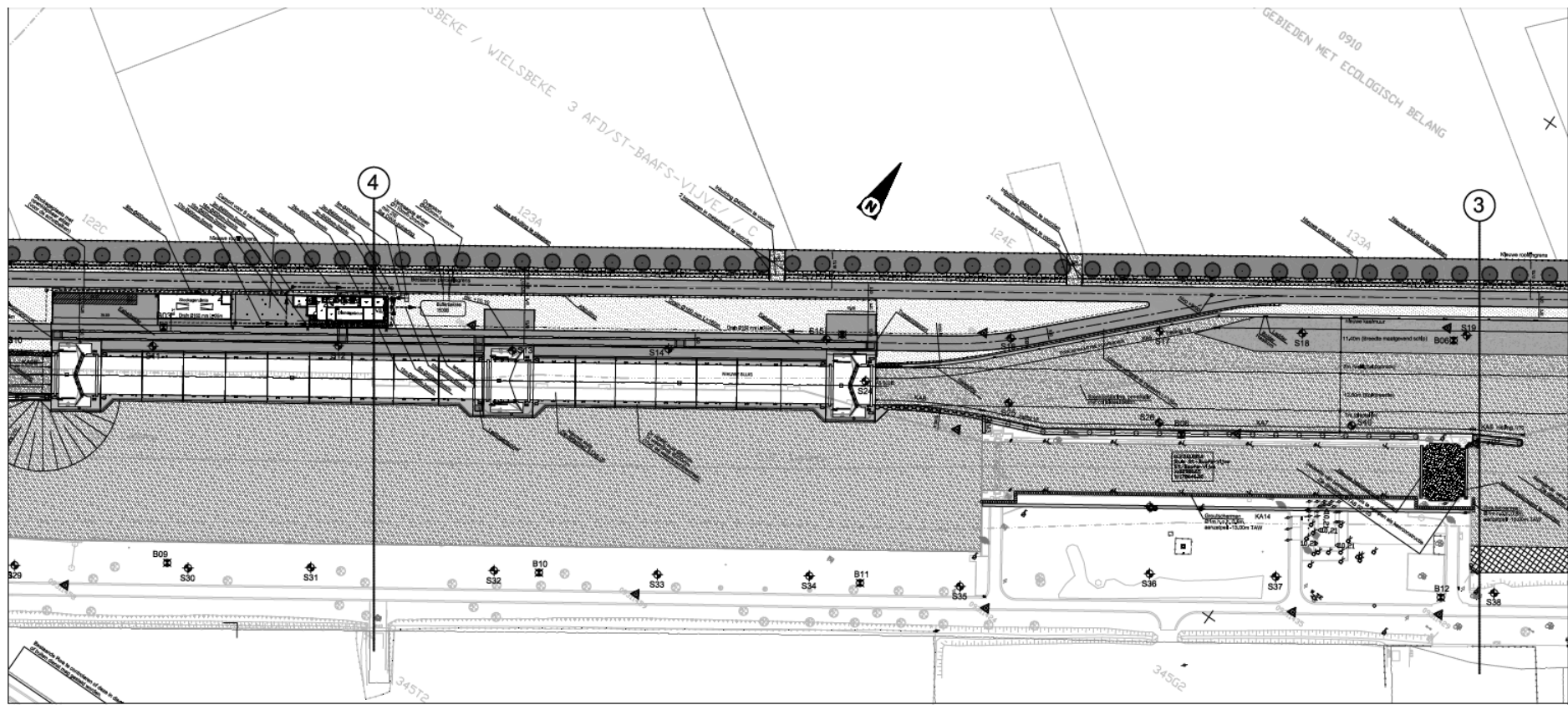
Figuur 15 – Bovenaanzicht en langsdoorsnede nieuwe sluis (Grontmij, 2013e)



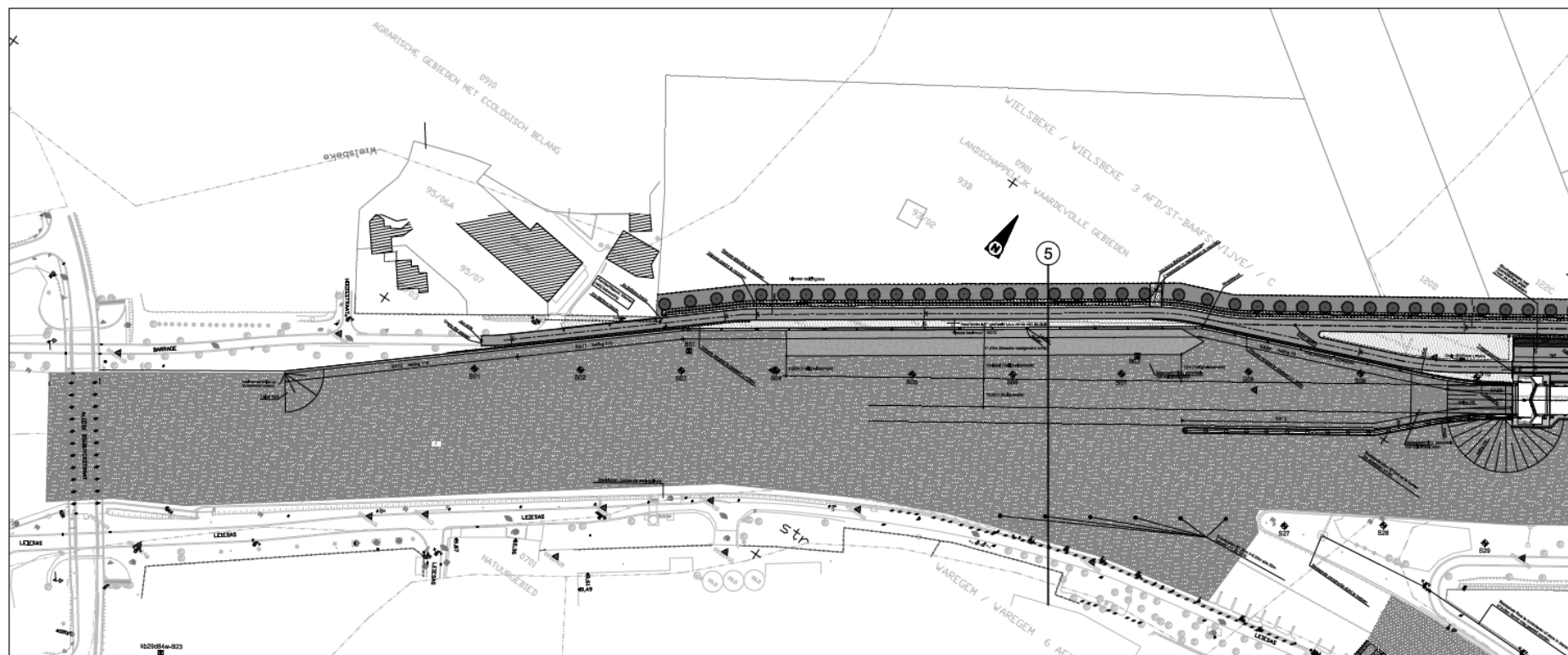
Figuur 16 – Grondplan afwaartse voorhaven (Grontmij, 2013b)



Figuur 17 – Grondplan sluis en afwaartse voorhaven (Grontmij, 2013c)



Figuur 18 – Grondplan opwaartse voorhaven (Grontmij, 2013d)



Bijlage 2 : Tabellen hydraulische belasting

Tabel 25 - Maximale waarden voor de stroomsnelheid boven bodem.

Opwaarts van de sluisdeur ten gevolge van vullen van de volledige sluiskolk via het bovenhoofd				
Eigenschap	Symbool	Eenheid	Bodempeil + 0,91 m TAW	Bodempeil + 3,50 m TAW
Aantal openingen	n	-	6	6
Diameter openingen	D	m	1,35	1,35
Totale oppervlakte openingen	O_{tot}	m ²	8,59	8,59
Hoogte onderrand opening boven sluiskolkbodem	z_0	m	0,26	0,26
Waterpeil opwaarts van de sluisdeur bij maximaal debiet	H_{opw}	mTAW	8,00	8,00
bodempeil sluiskolk	Z	mTAW	0,91	3,50
Waterdiepte opwaarts sluisdeur bij maximaal debiet	h	m	7,09	4,50
Totale breedte openingen	c	m	6,36	6,36
Dubbele hoogte openingen	a	m	2,70	2,70
Verhouding c/a	c/a	-	3,44	3,44
Verhouding h/a	h/a	-	2,63	1,67
Maximaal debiet door openingen	Q_{max}	m ³ /s	25,50	25,50
Totale oppervlakte openingen	O_{tot}	m ²	12,56	12,56
Stroomsnelheid door openingen bij maximaal debiet	U_0	m/s	2,89	2,89
Afstand tot de sluisdeur	x	m	7,50	7,50
Berekende stroomsnelheid aan de bodem	U	m/s	0,27	0,39

Afwaarts van de sluisdeur ten gevolge van ledigen van de volledige sluiskolk via het benedenhoofd				
Eigenschap	Symbool	Eenheid	Bodempeil + 0,91 m TAW	Bodempeil + 1,11 m TAW
Aantal openingen	n	-	6	6
Diameter openingen	D	m	1,35	1,35
Totale oppervlakte openingen	O_{tot}		8,59	8,59
Hoogte onderrand opening boven sluiskolkbodem	z_0	m	0,26	0,26
Maximaal debiet door openingen	Q_{max}	m ³ /s	31,3	31,3
Totale oppervlakte vulopening	O_{tot}	m ²	8,59	8,59
Snelheid uittredende straal	u_n	m/s	3,64	3,64
Verticale afstand straalas tot bodem	e_n	m	0,94	0,94
Helling asstraal met horizontale	α	°	0	0
Horizontale afstand opening tot locatie met maximale snelheid aan de bodem	x_{bn}	m	9,35	9,35
Maximale waarde stroomsnelheid bij de bodem	u_{bn}	m/s	3,46	3,46
Waterpeil afwaarts sluisdeur bij max. debiet	h_{Qmax}	m ³ /s	5,61	5,61
Bodempeil	z	mTAW	0,91	1,11
Totale waterdiepte afwaarts sluisdeur	h	m	4,70	4,50
$Q_{max}/(b \cdot h_{Qmax})$		m/s	0,82	0,86
$Q_{max}/(b \cdot h_{Qmax}) < u_{bn}$	-	-	Ja	Ja
$U_{bn} < u_n$	-	-	Ja	Ja

Tabel 26 – Maximale waarden voor de stroomsnelheid boven de bodem ter plaatse van de fuik opwaarts en afwaarts ten gevolge van de hoofdschroef van het duwkonvooi CEMT klasse Vb bij binnenvaren van de nieuwe sluis.

Eigenschap	Symbool	Eenheid	Fuik opwaarts nieuwe sluis				Fuik afwaarts nieuwe sluis			
			Bodempeil + 0,91 m TAW		Bodempeil + 3,50 m TAW		Bodempeil + 0,91 m TAW		Bodempeil + 1,11 m TAW	
			$D_0/D_p=0,7$	$D_0/D_p=1,0$	$D_0/D_p=0,7$	$D_0/D_p=1,0$	$D_0/D_p=0,7$	$D_0/D_p=1,0$	$D_0/D_p=0,7$	$D_0/D_p=1,0$
CEMT klasse	-	-	Vb	Vb	Vb	Vb	Vb	Vb	Vb	Vb
Diepgang	T	m	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50
Echte schroefdiameter	D_p	m	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Effectieve schroefdiameter	D_0	m	1,40	2,00	1,40	2,00	1,40	2,00	1,40	2,00
Motorvermogen		kW	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
Aantal schroeven	n	-	2	2	2	2	2	2	2	2
% aangewend vermogen		%	75	75	75	75	75	75	75	75
Aangewend vermogen per schroef	P_d	kW	750	750	750	750	750	750	750	750
Waterstand	H	mTAW	8,00	8,00	8,00	8,00	5,61	5,61	5,61	5,61
Bodempeil	Z	mTAW	0,91	0,91	3,50	3,50	0,91	0,91	1,11	1,11
Waterdiepte	h	m	7,09	7,09	4,50	4,50	4,70	4,70	4,50	4,50
Stroomsnelheid achter schroef	u_p	m/s	8,27	6,58	8,27	6,58	8,27	6,58	8,27	6,58
Verticale afstand straalas tot bodem	d_p	m	5,59	5,59	3,00	3,00	3,20	3,20	3,00	3,00
Horizontale afstand tot maximale snelheid boven bodem	x_{bp}	m/s	31,30	31,30	16,80	16,80	17,92	17,92	16,80	16,80
Maximale waarde stroomsnelheid boven de bodem	u_{bp}	m/s	0,89	1,00	1,66	1,86	1,56	1,75	1,66	1,86
$u_{bp} < u_p$	-	-	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja

Tabel 27 – Maximale waarden voor de stroomsnelheid boven de bodem ter plaatse van de fuik opwaarts en afwaarts en ter plaatse van het insteeddok ten gevolge van de hoofdschroef van het schip CEMT klasse Va+ bij binnenvaren van de nieuwe sluis, respectievelijk het insteeddok.

Eigenschap	Symbool	Eenheid	Fuik opwaarts nieuwe sluis		Fuik opwaarts nieuwe sluis en fuik insteeddok		Fuik afwaarts nieuwe sluis			
			Bodempeil + 0,91 m TAW		Bodempeil + 3,50 m TAW		Bodempeil + 0,91 m TAW		Bodempeil + 1,11 m TAW	
			$D_0/D_p=0,7$	$D_0/D_p=1,0$	$D_0/D_p=0,7$	$D_0/D_p=1,0$	$D_0/D_p=0,7$	$D_0/D_p=1,0$	$D_0/D_p=0,7$	$D_0/D_p=1,0$
CEMT klasse	-	-	Va+	Va+	Va+	Va+	Va+	Va+	Va+	Va+
Diepgang	T	m	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50
Echte schroefdiameter	D_p	m	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Effectieve schroefdiameter	D_0	m	1,40	2,00	1,40	2,00	1,40	2,00	1,40	2,00
Motorvermogen		kW	2200	2200	2200	2200	2200	2200	2200	2200
Aantal schroeven	n	-	2	2	2	2	2	2	2	2
% aangewend vermogen		%	75	75	75	75	75	75	75	75
Aangewend vermogen per schroef	P_d	kW	825	825	825	825	825	825	825	825
Waterstand	H	mTAW	8,00	8,00	8,00	8,00	5,61	5,61	5,61	5,61
Bodempeil	Z	mTAW	0,91	0,91	3,50	3,50	0,91	0,91	1,11	1,11
Waterdiepte	h	m	7,09	7,09	4,50	4,50	4,70	4,70	4,50	4,50
Stroomsnelheid achter schroef	u_p	m/s	8,54	6,79	8,54	6,79	8,54	6,79	8,54	6,79
Verticale afstand straalas tot bodem	d_p	m	4,59	4,59	2,00	2,00	2,20	2,20	2,00	2,00
Horizontale afstand tot maximale snelheid boven bodem	x_{bp}	m/s	25,70	25,70	11,20	11,20	12,32	12,32	11,20	11,20
Maximale waarde stroomsnelheid boven de bodem	u_{bp}	m/s	1,12	1,26	2,57	2,88	2,34	2,62	2,57	2,88
$u_{bp} < u_p$	-	-	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja

Tabel 28 – Maximale waarden voor de stroomsnelheid boven de bodem ter plaatse van de fuik opwaarts en afwaarts en ter plaatse van het insteeddok ten gevolge van de hoofdschroef van het schip CEMT klasse Va bij binnenvaren van de nieuwe sluis, respectievelijk het insteeddok.

Eigenschap	Symbool	Eenheid	Fuik opwaarts nieuwe sluis		Fuik opwaarts nieuwe sluis en fuik insteeddok		Fuik afwaarts nieuwe sluis			
			Bodempeil + 0,91 m TAW		Bodempeil + 3,50 m TAW		Bodempeil + 0,91 m TAW		Bodempeil + 1,11 m TAW	
			$D_0/D_p=0,7$	$D_0/D_p=1,0$	$D_0/D_p=0,7$	$D_0/D_p=1,0$	$D_0/D_p=0,7$	$D_0/D_p=1,0$	$D_0/D_p=0,7$	$D_0/D_p=1,0$
CEMT klasse	-	-	Va	Va	Va	Va	Va	Va	Va	Va
Diepgang	T	m	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50
Echte schroefdiameter	D_p	m	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Effectieve schroefdiameter	D_0	m	1,40	2,00	1,40	2,00	1,40	2,00	1,40	2,00
Motorvermogen		kW	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800
Aantal schroeven	n	-	1	1	1	1	1	1	1	1
% aangewend vermogen		%	75	75	75	75	75	75	75	75
Aangewend vermogen per schroef	P_d	kW	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350
Waterstand	H	mTAW	8,00	8,00	8,00	8,00	5,61	5,61	5,61	5,61
Bodempeil	Z	mTAW	0,91	0,91	3,50	3,50	0,91	0,91	1,11	1,11
Waterdiepte	h	m	7,09	7,09	4,50	4,50	4,70	4,70	4,50	4,50
Stroomsnelheid achter schroef	u_p	m/s	10,06	8,01	10,06	8,01	10,06	8,01	10,06	8,01
Verticale afstand straalas tot bodem	d_p	m	4,59	4,59	2,00	2,00	2,20	2,20	2,00	2,00
Horizontale afstand tot maximale snelheid boven bodem	x_{bp}	m/s	25,70	25,70	11,20	11,20	12,32	12,32	11,20	11,20
Maximale waarde stroomsnelheid boven de bodem	u_{bp}	m/s	0,93	1,05	2,14	2,40	1,95	2,18	2,14	2,40
$u_{bp} < u_p$	-	-	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja

Tabel 29 – Maximale waarden voor de stroomsnelheid boven de bodem ter plaatse van de wachtplaatsen opwaarts, afwaarts en in de vaargeul naar het insteedok ten gevolge van de hoofdschroef van het duwkonvooi CEMT klasse Vb en het schip CEMT Va+ bij aanmeren.

Eigenschap	Symbool	Eenheid	Duwkonvooi CEMT Vb				Schip CEMT Va+			
			Wachtplaats opwaartse voorhaven en insteeddok		Wachtplaats afwaartse voorhaven		Wachtplaats opwaartse voorhaven en insteeddok		Wachtplaats afwaartse voorhaven	
			Bodempeil + 0,91 m TAW		Bodempeil + 3,50 m TAW		Bodempeil + 0,91 m TAW		Bodempeil + 1,11 m TAW	
			D ₀ /D _p =0,7	D ₀ /D _p =1,0	D ₀ /D _p =0,7	D ₀ /D _p =1,0	D ₀ /D _p =0,7	D ₀ /D _p =1,0	D ₀ /D _p =0,7	D ₀ /D _p =1,0
CEMT klasse	-	-	Vb	Vb	Vb	Vb	Va+	Va+	Va+	Va+
Diepgang	T	m	2,50	2,50	2,50	2,50	3,50	3,50	3,50	3,50
Echte schroefdiameter	D _p	m	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Effectieve schroefdiameter	D ₀	m	1,40	2,00	1,40	2,00	1,40	2,00	1,40	2,00
Motorvermogen		kW	2000	2000	2000	2000	2200	2200	2200	2200
Aantal schroeven	n	-	2	2	2	2	2	2	2	2
% aangewend vermogen		%	50	50	50	50	50	50	50	50
Aangewend vermogen per schroef	P _d	kW	500	500	500	500	450	450	450	450
Waterstand	H	mTAW	8,00	8,00	5,61	5,61	8,00	8,00	5,61	5,61
Bodempeil	Z	mTAW	3,50	3,50	1,11	1,11	3,50	3,50	1,11	1,11
Waterdiepte	h	m	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50
Stroomsnelheid achter schroef	u _p	m/s	7,22	5,75	7,22	5,75	7,46	5,94	7,46	5,94
Verticale afstand straalas tot bodem	d _p	m	3,00	3,00	3,00	3,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Horizontale afstand tot maximale snelheid boven bodem	x _{bp}	m/s	16,80	16,80	16,80	16,80	11,20	11,20	11,20	11,20
Maximale waarde stroomsnelheid boven de bodem	u_{bp}	m/s	1,45	1,63	1,45	1,63	2,25	2,52	2,25	2,52
u _{bp} <u _p	-	-	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja

Tabel 30 – Maximale waarden voor de stroomsnelheid boven de bodem ter plaatse van de wachtplaatsen opwaarts, afwaarts en in de vaargeul naar het insteekdok ten gevolge van de hoofdschroef van het schip CEMT Va bij aanmeren.

Eigenschap	Symbool	Eenheid	Schip CEMT Va			
			Wachtplaats opwaartse voorhaven en insteekdok		Wachtplaats afwaartse voorhaven	
			Bodempeil + 3,50 m TAW		Bodempeil + 1,11 m TAW	
			$D_0/D_p=0,7$	$D_0/D_p=1,0$	$D_0/D_p=0,7$	$D_0/D_p=1,0$
CEMT klasse	-	-	Va	Va	Va	Va
Diepgang	T	m	3,50	3,50	3,50	3,50
Echte schroefdiameter	D_p	m	2,00	2,00	2,00	2,00
Effectieve schroefdiameter	D_0	m	1,40	2,00	1,40	2,00
Motorvermogen		kW	1800	1800	1800	1800
Aantal schroeven	n	-	1	1	1	1
% aangewend vermogen		%	50	50	50	50
Aangewend vermogen per schroef	P_d	kW	950	950	950	950
Waterstand	H	mTAW	8,00	8,00	5,61	5,61
Bodempeil	Z	mTAW	3,50	3,50	1,11	1,11
Waterdiepte	h	m	4,50	4,50	4,50	4,50
Stroomsnelheid achter schroef	u_p	m/s	8,79	6,99	8,79	6,99
Verticale afstand straalas tot bodem	d_p	m	2,00	2,00	2,00	2,00
Horizontale afstand tot maximale snelheid boven bodem	x_{bp}	m/s	11,20	11,20	11,20	11,20
Maximale waarde stroomsnelheid boven de bodem	u_{bp}	m/s	1,87	2,10	1,87	2,10
$u_{bp} < u_p$	-	-	Ja	Ja	Ja	Ja

Tabel 31 – Maximale waarden voor de stroomsnelheid boven de bodem in de fuik opwaarts van het insteeddok, de fuik opwaarts van de nieuwe sluis en de fuik afwaarts van de nieuwe sluis ten gevolge van de boegschroef van het duwkonvooi CEMENT klasse Vb, het schip CEMENT Va+ en het schip CEMENT Va bij invaren van de nieuwe sluis of het insteeddok.

Eigenschap	Symbool	Eenheid	Fuik insteeddok		Fuik opwaarts nieuwe sluis				Fuik afwaarts nieuwe sluis			
			Bodempeil + 3,50 m TAW		Bodempeil + 0,91 m TAW		Bodempeil + 3,50 m TAW		Bodempeil + 0,91 m TAW		Bodempeil + 1,10 m TAW	
CEMENT klasse	-	-	Vb, Va	Va+	Vb, Va	Va+	Vb, Va	Va+	Vb, Va	Va+	Vb, Va	Va+
Diepgang	T	m	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50
Echte schroefdiameter	D_p	m	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20
Effectieve schroefdiameter	D_0	m	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20
Motorvermogen		kW	450	840	450	840	450	840	450	840	450	840
Aantal schroeven	n	-	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
% aangewend vermogen		%	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Aangewend vermogen per schroef	P_d	kW	450	420	450	420	450	420	450	420	450	420
Waterstand	H	mTAW	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	5,61	5,61	5,61	5,61
Bodempeil	Z	mTAW	3,50	3,50	0,91	0,91	3,50	3,50	0,91	0,91	1,11	3,50
Waterdiepte	h	m	4,50	4,50	7,09	7,09	4,50	4,50	4,70	4,70	4,50	4,50
Stroomsnelheid achter schroef	u_p	m/s	7,02	6,86	7,02	6,86	7,02	6,86	7,02	6,86	7,02	6,86
Verticale afstand straalas tot bodem	d_p	m	1,60	1,60	4,19	4,19	1,60	1,60	1,80	1,80	1,60	1,60
Horizontale afstand tot maximale snelheid boven bodem	x_{bp}	m/s	8,96	8,96	23,46	23,46	8,96	8,96	10,08	10,08	8,96	8,96
Maximale waarde stroomsnelheid boven de bodem	u_{bp}	m/s	1,58	2,18	0,60	0,83	1,58	2,18	1,40	1,94	1,58	2,18
$u_{bp} < u_p$	-	-	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja

Tabel 32 – Maximale waarden voor de stroomsnelheid boven de bodem in de opwaartse voorhaven en de toegangsgeul van het insteeddok ten gevolge van de boegschroef van het duwkonvooi CEMT Vb en het schip CEMT Va bij aanmeren aan een kaaimuur of manoeuvreren naast een remmingswerk.

Eigenschap	Symbool	Eenheid	Wachtplaats en remmingswerk opwaarts nieuwe sluis					Wachtplaats, remmingswerk opwaarts nieuwe sluis en in toegangsgeul insteeddok				
			Bodempeil + 0,91 m TAW					Bodempeil + 3,50 m TAW				
			X=0,0 m	X=1,0 m	X=0,0 m	X=1,0 m	X=0,0 m	X=1,0 m	X=0,0 m	X=1,0 m	X=0,0 m	X=1,0 m
CEMT klasse	-	-	Vb, Va	Vb, Va	Vb, Va	Vb, Va	Vb, Va	Vb, Va	Vb, Va	Vb, Va	Vb, Va	Vb, Va
Diepgang	T	m	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50
Echte schroefdiameter	D_p	m	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20
Effectieve schroefdiameter	D_0	m	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20
Motorvermogen		kW	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450
Aantal schroeven	n	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
% aangewend vermogen		%	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Aangewend vermogen per schroef	P_d	kW	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450
Waterstand	H	mTAW	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00
Bodempeil	Z	mTAW	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50
Waterdiepte	h	m	7,09	7,09	7,09	7,09	7,09	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50
Stroomsnelheid achter schroef	v_p	m/s	7,02	7,02	7,02	7,02	7,02	7,02	7,02	7,02	7,02	7,02
Verticale afstand straalas tot bodem	d_p	m	4,19	4,19	4,19	4,19	4,19	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60
Afstand tot kaaimuur	X	m/s	0,00	1,00	2,00	3,00	4,00	0,00	1,00	2,00	3,00	4,00
Stroomsnelheid boven de bodem	v_{bp3}	m/s	2,07	1,67	1,40	1,21	1,06	5,43	3,34	2,41	1,89	1,55
$v_{bp3} < v_p$	-	-	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
$v_{bp3} < 6.3 v_p D_0 / y_{bp}$	-		Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja

Tabel 33 – Maximale waarden voor de stroomsnelheid boven de bodem in de opwaartse voorhaven en de toegangsgeul van het insteeddok ten gevolge van de boegschroef van het schip CEMT Va+ bij aanmeren aan een kaaimuur of manoeuvreren naast een remmingswerk.

Eigenschap	Symbool	Eenheid	Wachtplaats en remmingswerk opwaarts nieuwe sluis					Wachtplaats, remmingswerk opwaarts nieuwe sluis en in toegangsgeul insteeddok				
			Bodempeil + 0,91 m TAW					Bodempeil + 3,50 m TAW				
			X=0,0 m	X=1,0 m	X=2,0 m	X=3,0 m	X=4,0 m	X=0,0 m	X=1,0 m	X=2,0 m	X=3,0 m	X=4,0 m
CEMT klasse	-	-	Va+	Va+	Va+	Va+	Va+	Va+	Va+	Va+	Va+	Va+
Diepgang	T	m	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50
Echte schroefdiameter	D_p	m	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20
Effectieve schroefdiameter	D_0	m	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20
Motorvermogen		kW	840	840	840	840	840	840	840	840	840	840
Aantal schroeven	n	-	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
% aangewend vermogen		%	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Aangewend vermogen per schroef	P_d	kW	420	420	420	420	420	420	420	420	420	420
Waterstand	H	mTAW	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00
Bodempeil	Z	mTAW	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50
Waterdiepte	h	m	7,09	7,09	7,09	7,09	7,09	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50
Stroomsnelheid achter schroef	v_p	m/s	6,86	6,86	6,86	6,86	6,86	6,86	6,86	6,86	6,86	6,86
Verticale afstand straalas tot bodem	d_p	m	4,19	4,19	4,19	4,19	4,19	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60
Afstand tot kaaimuur	X	m/s	0,00	1,00	2,00	3,00	4,00	0,00	1,00	2,00	3,00	4,00
Stroomsnelheid boven de bodem	v_{bp3}	m/s	2,86	2,31	1,94	1,67	1,46	7,50	4,61	3,33	2,61	2,14
$v_{bp3} < v_p$	-	-	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
$v_{bp3} < 6.3 v_p D_0 / y_{bp}$	-		Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja

Tabel 34 – Maximale waarden voor de stroomsnelheid boven de bodem in de afwaartse voorhaven ten gevolge van de boegschroef van het duwkonvooi CEMT klasse Vb en het schip CEMT Va bij aanmeren aan een kaaimuur of manoeuvreren naast een remmingswerk.

Eigenschap	Symbool	Eenheid	Wachtplaats en remmingswerk afwaarts nieuwe sluis					Wachtplaats en remmingswerk afwaarts nieuwe sluis				
			Bodempeil + 0,91 m TAW					Bodempeil + 1,11 m TAW				
			X=0,0 m	X=1,0 m	X=2,0 m	X=3,0 m	X=4,0 m	X=0,0 m	X=1,0 m	X=2,0 m	X=3,0 m	X=4,0 m
CEMT klasse	-	-	Vb, Va	Vb, Va	Vb, Va	Vb, Va	Vb, Va	Vb, Va	Vb, Va	Vb, Va	Vb, Va	Vb, Va
Diepgang	T	m	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50
Echte schroefdiameter	D_p	m	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20
Effectieve schroefdiameter	D_0	m	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20
Motorvermogen		kW	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450
Aantal schroeven	n	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
% aangewend vermogen		%	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Aangewend vermogen per schroef	P_d	kW	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450
Waterstand	H	mTAW	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61
Bodempeil	Z	mTAW	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11
Waterdiepte	h	m	4,70	4,70	4,70	4,70	4,70	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50
Stroomsnelheid achter schroef	v_p	m/s	7,02	7,02	7,02	7,02	7,02	7,02	7,02	7,02	7,02	7,02
Verticale afstand straalas tot bodem	d_p	m	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60
Afstand tot kaaimuur	X	m/s	0,00	1,00	2,00	3,00	4,00	0,00	1,00	2,00	3,00	4,00
Stroomsnelheid boven de bodem	v_{bp3}	m/s	4,82	3,10	2,28	1,81	1,50	5,43	3,34	2,41	1,89	1,55
$v_{bp3} < v_p$	-	-	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
$v_{bp3} < 6.3 v_p D_0 / y_{bp}$	-		Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja

Tabel 35 – Maximale waarden voor de stroomsnelheid boven de bodem in de afwaartse voorhaven ten gevolge van de boegschroef van het schip CEMT Va+ bij aanmeren aan een kaaimuur of manoeuvreren naast een remmingswerk.

Eigenschap	Symbool	Eenheid	Wachtplaats en remmingswerk afwaarts nieuwe sluis					Wachtplaats en remmingswerk afwaarts nieuwe sluis				
			Bodempeil + 0,91 m TAW					Bodempeil + 1,11 m TAW				
			X=0,0 m	X=1,0 m	X=2,0 m	X=3,0 m	X=4,0 m	X=0,0 m	X=1,0 m	X=2,0 m	X=3,0 m	X=4,0 m
CEMT klasse	-	-	Va+	Va+	Va+	Va+	Va+	Va+	Va+	Va+	Va+	Va+
Diepgang	T	m	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50
Echte schroefdiameter	D_p	m	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20
Effectieve schroefdiameter	D_0	m	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20
Motorvermogen		kW	840	840	840	840	840	840	840	840	840	840
Aantal schroeven	n	-	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
% aangewend vermogen		%	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Aangewend vermogen per schroef	P_d	kW	420	420	420	420	420	420	420	420	420	420
Waterstand	H	mTAW	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61
Bodempeil	Z	mTAW	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11
Waterdiepte	h	m	4,70	4,70	4,70	4,70	4,70	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50
Stroomsnelheid achter schroef	v_p	m/s	6,86	6,86	6,86	6,86	6,86	6,86	6,86	6,86	6,86	6,86
Verticale afstand straalas tot bodem	d_p	m	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60
Afstand tot kaaimuur	X	m/s	0,00	1,00	2,00	3,00	4,00	0,00	1,00	2,00	3,00	4,00
Stroomsnelheid boven de bodem	v_{bp3}	m/s	6,67	4,28	3,16	2,50	2,07	7,50	4,61	3,33	2,61	2,14
$v_{bp3} < v_p$	-	-	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
$v_{bp3} < 6.3 v_p D_0 / y_{bp}$	-		Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja

Tabel 36 – Berekening stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van retourstroming in de opwaartse en de afwaartse voorhaven

Eigenschap	Symbool	Eenheid	Opwaartse voorhaven	Afwaartse voorhaven	Toegangseul insteeddok
CEMT klasse	-	-	Vb, Va+, Va	Vb, Va+, Va	Vb, Va+, Va
Breedte schip	b	m	11,4	11,4	11,4
Diepgang schip	T	m	3,5	3,5	3,5
Natte sectie schip	A_s	m ²	39,90	39,90	39,90
Waterstand	H	mTAW	8,00	5,61	8,00
Drempelpeil sluiskolk	z_d	mTAW	0,91	0,91	3,50
Breedte sluiskolk	b_k	m	12,5	12,5	16,0
Natte sectie sluiskolk	A_k	m ²	88,63	58,75	72,00
Grenssnelheid	v_g	m/s	1,99	0,70	1,13
A_s/A_k	-	-	0,45	0,69	0,55
Voorwaarde 1 voor A_s/A_k (>0.35)	-	-	Ja	Ja	Ja
Voorwaarde 2 voor A_s/A_k (<0.8)	-	-	Ja	Ja	Ja
Maximum invaarsnelheid in sluismond	v_{smax}	m/s	1,94	1,94	1,94
Coëfficiënt β	β	-	0,37	0,57	0,46
Retourstroomsnelheid	u_r	m/s	0,59	2,34	1,11

Bijlage 3: Tabellen dimensionering bodembescherming

Bepaling maatgevende stroomsnelheid aan de bodem

Tabel 37 – Resultaten bepaling maatgevende stroomsnelheid voor de wachtplaats opwaartse voorhaven en toegangseul insteeddok, de fuik in het insteeddok en de fuik in de opwaartse voorhaven

Zone	Type hydraulische belasting	Type schip	Bodempeil + 0,91 m TAW		Maatgevende stroomsnelheid	Bodempeil + 3,50 m TAW		Maatgevende stroomsnelheid
			$D_0/D_p=0,7$	$D_0/D_p=1,0$		$D_0/D_p=0,7$	$D_0/D_p=1,0$	
Wachtplaats opwaartse voorhaven en toegangseul insteeddok	Stroming ten gevolge van de hoofdschroef	CEMT Vb	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	1,45 m/s	1,63 m/s	2,52 m/s
		CEMT Va+	n.v.t.	n.v.t.		2,25 m/s	2,52 m/s	
		CEMT Va	n.v.t.	n.v.t.		1,87 m/s	2,10 m/s	
	Stroming ten gevolge van de boegschroef tegen kaaimuur	CEMT Vb; CEMENT Va	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	5,43 m/s	7,50 m/s
		CEMT Va+	n.v.t.	n.v.t.		n.v.t.	7,50 m/s	
Fuik insteeddok	Stroming ten gevolge van de hoofdschroef	CEMT Va+	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	2,57 m/s	2,88 m/s	2,88 m/s
		CEMT Va	n.v.t.	n.v.t.		2,14 m/s	2,40 m/s	
	Stroming ten gevolge van de boegschroef tegen kaaimuur	CEMT Va+	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	2,18 m/s	7,50 m/s
		CEMT Va	n.v.t.	n.v.t.		n.v.t.	1,58 m/s	
	Stroming ten gevolge van de boegschroef – vrije uitstroming	CEMT Va+	n.v.t.	n.v.t.		n.v.t.	7,50 m/s	
		CEMT Va	n.v.t.	n.v.t.		n.v.t.	5,43 m/s	
	Retourstroming	CEMT Va+; CEMENT Va	n.v.t.		n.v.t.	1,11 m/s		1,11 m/s
Fuik opwaartse voorhaven	Stroming ten gevolge van de hoofdschroef	CEMT Vb	0,89 m/s	1,00 m/s	1,26 m/s	1,66 m/s	1,86 m/s	2,88 m/s
		CEMT Va+	1,12 m/s	1,26 m/s		2,57 m/s	2,88 m/s	
		CEMT Va	0,93 m/s	1,05 m/s		2,14 m/s	2,40 m/s	
	Stroming ten gevolge van de boegschroef tegen kaaimuur	CEMT Vb; CEMENT Va	n.v.t.	2,07 m/s	2,86 m/s	n.v.t.	5,43 m/s	7,50 m/s
		CEMT Va+	n.v.t.	2,86 m/s		n.v.t.	7,50 m/s	
	Stroming ten gevolge van de boegschroef – vrije uitstroming	CEMT Vb; CEMENT Va	n.v.t.	0,60 m/s		n.v.t.	1,58 m/s	
		CEMT Va+	n.v.t.	0,83 m/s		n.v.t.	2,18 m/s	
	Stroming ten gevolge van nivelleren sluisolk	n.v.t.	0,27 m/s		0,27 m/s	0,39 m/s		0,39 m/s
	Retourstroming	CEMT Vb;CEMT Va+; CEMENT Va	0,59 m/s		0,59 m/s	n.v.t.		n.v.t.

Tabel 38 – Resultaten bepaling maatgevende stroomsnelheid voor de wachtplaats en de fuik in de afwaartse voorhaven

Zone	Type hydraulische belasting	Type schip	Bodempeil + 0,91 m TAW		Maatgevende stroomsnelheid	Bodempeil + 1,11 m TAW		Maatgevende stroomsnelheid
			$D_0/D_p=0,7$	$D_0/D_p=1,0$		$D_0/D_p=0,7$	$D_0/D_p=1,0$	
Wachtplaats afwaartse voorhaven	Stroming ten gevolge van de hoofdschroef	CEMT Vb	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	1,45 m/s	1,63 m/s	2,52 m/s
		CEMT Va+	n.v.t.	n.v.t.		2,25 m/s	2,52 m/s	
		CEMT Va	n.v.t.	n.v.t.		1,87 m/s	2,10 m/s	
	Stroming ten gevolge van de boegschroef tegen kaaimuur	CEMT Vb; CEMT Va	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	5,43 m/s	7,67 m/s
		CEMT Va+	n.v.t.	n.v.t.		n.v.t.	7,67 m/s	
Fuik afwaartse voorhaven	Stroming ten gevolge van de hoofdschroef	CEMT Vb	1,56 m/s	1,75 m/s	2,62 m/s	1,66 m/s	1,86 m/s	2,88 m/s
		CEMT Va+	2,34 m/s	2,62 m/s		2,57 m/s	2,88 m/s	
		CEMT Va	1,95 m/s	2,18 m/s		2,14 m/s	2,40 m/s	
	Stroming ten gevolge van de boegschroef tegen kaaimuur	CEMT Vb; CEMT Va	n.v.t.	4,82 m/s	6,67 m/s	n.v.t.	5,43 m/s	7,50 m/s
		CEMT Va+	n.v.t.	6,67 m/s		n.v.t.	7,50 m/s	
	Stroming ten gevolge van de boegschroef – vrije uitstroming	CEMT Vb; CEMT Va	n.v.t.	1,40 m/s		n.v.t.	1,58 m/s	
		CEMT Va+	n.v.t.	1,94 m/s		n.v.t.	2,18 m/s	
	Stroming ten gevolge van nivelleren sluiskolk	n.v.t.	n.v.t.		n.v.t.	3,46 m/s		3,46 m/s
	Retourstroming	CEMT Vb; CEMT Va+; CEMT Va	2,34 m/s		2,34 m/s	2,34 m/s		2,34 m/s

Resultaten berekening mediaan breuksteendiameter en mediaan breuksteengewicht

Tabel 39 – Berekening mediaan breuksteendiameter en mediaan breuksteengewicht volgens de Shields-formulering aangepast voor stralen voor de wachtplaats in de opwaartse voorhaven, de wachtplaats en het remmingswerk in de toegangseul naar het insteeddok en voor de fuik van het insteeddok

Parameter	Symbool	Eenheid	Wachtplaats opwaartse voorhaven en wachtplaats en remmingswerk in toegangseul insteeddok		Fuik insteeddok		
			Stroming ten gevolge van hoofdschroef	Stroming ten gevolge van boegschroef	Stroming ten gevolge van hoofdschroef	Stroming ten gevolge van boegschroef	Retourstroming
Dichtheid breuksteen	ρ_s	kg/m ³	2650	2650	2650	2650	2650
Dichtheid water	ρ_w	kg/m ³	1000	1000	1000	1000	1000
Relatieve dichtheid	Δ	-	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65
Valversnelling	g	m/s ²	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81
Waterstand	H	mTAW	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00
Bodempeil	Z	mTAW	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50
Waterdiepte	h	m	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50
Stroomsnelheid bij bodem	u_b	m/s	2,52	7,50	2,88	7,67	1,11
Turbulentieintensiteit	r	-	0,40	0,35	0,40	0,35	0,25
Mediaan Breuksteendiameter	D_{n50}	m	0,31	6,66	0,47	7,12	0,01
Mediaan breuksteengewicht	M_{50}	kg	80,5	781348,7	267,8	781348,7	< 0,1

Tabel 40 – Berekening mediaan breuksteendiameter en mediaan breuksteengewicht volgens de Shields-formulering aangepast voor stralen voor de fuik in de opwaartse voorhaven

Parameter	Symbool	Eenheid	Stroming ten gevolge van nivelleren sluiskolk		Stroming ten gevolge van hoofdschroef		Stroming ten gevolge van boegschroeven		Stroming ten gevolge van retourstroming	
Dichtheid breuksteen	ρ_s	kg/m ³	2650	2650	2650	2650	2650	2650	2650	2650
Dichtheid water	ρ_w	kg/m ³	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Relatieve dichtheid	Δ	-	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65
Valversnelling	g	m/s ²	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81
Waterstand	H	mTAW	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00
Bodempeil	Z	mTAW	0,91	3,50	0,91	3,50	0,91	3,50	0,91	3,50
Waterdiepte	h	m	7,09	4,50	7,09	4,50	7,09	4,50	7,09	4,50
Stroomsnelheid bij bodem	u_b	m/s	0,27	0,39	1,26	2,88	2,86	7,50	1,22	1,22
Turbulentieintensiteit	r	-	0,10	0,10	0,40	0,40	0,35	0,35	0,25	0,25
Mediaan Breuksteendiameter	D_{n50}	m	< 0,01	< 0,01	0,03	0,47	0,29	6,66	< 0,01	< 0,01
Mediaan breuksteengewicht	M_{50}	kg	< 0,1	< 0,1	0,08	267,8	67,4	781348,7	< 0,1	< 0,1

Tabel 41 – Berekening mediaan breuksteendiameter en mediaan breuksteengewicht volgens de Shields-formulering aangepast voor stralen de fuik in de afwaartse voorhaven

Parameter	Symbool	Eenheid	Stroming ten gevolge van nivelleren sluiskolk		Stroming ten gevolge van hoofdschroef		Stroming ten gevolge van boegschroef		Stroming ten gevolge van retourstroming	
Dichtheid breuksteen	ρ_s	kg/m ³	2650	2650	2650	2650	2650	2650	2650	2650
Dichtheid water	ρ_w	kg/m ³	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Relatieve dichtheid	Δ	-	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65
Valversnelling	g	m/s ²	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81
Waterstand	H	mTAW	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61
Bodempeil	Z	mTAW	0,91	1,11	0,91	1,11	0,91	1,11	0,91	1,11
Waterdiepte	h	m	4,70	4,50	4,70	4,50	4,70	4,50	4,70	4,50
Stroomsnelheid bij bodem	u_b	m/s	3,46	3,46	2,62	2,88	6,67	7,50	2,34	2,34
Turbulentieintensiteit	r	-	0,35	0,35	0,40	0,40	0,35	0,35	0,25	0,25
Mediaan Breuksteendiameter	D_{n50}	m	0,64	0,65	0,34	0,47	4,58	6,66	0,12	0,13
Mediaan breuksteengewicht	M_{50}	kg	692,9	739,6	107,1	267,8	254740,5	781348,7	4,9	5,3

Tabel 42 – Berekening mediaan breuksteendiameter en mediaan breuksteengewicht volgens de Shields-formulering aangepast voor stralen voor de wachtplaats in de afwaartse voorhaven

Parameter	Symbool	Eenheid	Stroming ten gevolge van hoofdschroef	Stroming ten gevolge van boegschroef
Dichtheid breuksteen	ρ_s	kg/m ³	2650	2650
Dichtheid water	ρ_w	kg/m ³	1000	1000
Relatieve dichtheid	Δ	-	1,65	1,65
Valversnelling	g	m/s ²	9,81	9,81
Waterstand	H	mTAW	5,61	5,61
Bodempeil	Z	mTAW	1,11	1,11
Waterdiepte	h	m	4,50	4,50
Stroomsnelheid bij bodem	u_b	m/s	2,52	7,50
Turbulentieintensiteit	r	-	0,40	0,35
Mediaan Breuksteendiameter	D_{n50}	m	0,31	6,66
Mediaan breuksteengewicht	M_{50}	kg	80,5	781348,7

Resultaten berekening dikte Open Steenasfalt

Tabel 43 – Berekening dikte Open Steenasfalt voor de wachtplaats in de opwaartse voorhaven, de wachtplaats en het remmingswerk in de toegangsgeul naar het insteeddok en voor de fuik van het insteeddok

Parameter	Symbool	Eenheid	Wachtplaats opwaartse voorhaven en wachtplaats en remmingswerk in toegangsgeul insteeddok		Fuik insteeddok		
			Stroming ten gevolge van hoofdschroef	Stroming ten gevolge van boegschroef	Stroming ten gevolge van hoofdschroef	Stroming ten gevolge van boegschroef	Retourstroming
Bodempeil	Z	mTAW	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50
Dichtheid OSA	ρ_s	kg/m ³	2000	2000	2000	2000	2000
Dichtheid water	ρ_w	kg/m ³	1000	1000	1000	1000	1000
Relatieve dichtheid	Δ	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Valversnelling	g	m/s ²	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81
Stroomsnelheid bij bodem	u_b	m/s	2,52	7,50	2,88	7,50	1,11
Parameter θ	θ	-	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Dikte OSA	d	m	0,16	1,43	0,21	1,43	0,03
Stroomsnelheid bij bodem	u_b	m/s	2,52	7,50	2,88	7,50	1,11
Parameter θ	θ	-	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Dikte OSA	d	m	0,33	2,93	0,43	2,93	0,06

Tabel 44 – Berekening dikte Open Steenasfalt voor de fuik in de opwaartse voorhaven

Parameter	Symbool	Eenheid	Stroming ten gevolge van nivelleren sluiskolk		Stroming ten gevolge van schroefstraalwerking		Stroming ten gevolge van boegschroeven		Stroming ten gevolge van retourstroming	
Bodempeil	Z	mTAW	0,91	3,50	0,91	3,50	0,91	3,50	0,91	3,50
Dichtheid OSA	ρ_s	kg/m ³	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
Dichtheid water	ρ_w	kg/m ³	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Relatieve dichtheid	Δ	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Valversnelling	g	m/s ²	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81
Stroomsnelheid bij bodem	u_b	m/s	0,27	0,39	1,26	2,88	2,86	7,50	0,59	0,59
Parameter θ	θ	-	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Dikte OSA	d	m	< 0,01	< 0,01	0,04	0,21	0,21	1,43	0,01	0,01
Stroomsnelheid bij bodem	u_b	m/s	0,27	0,39	1,26	2,88	2,86	7,50	0,59	0,59
Parameter θ	θ	-	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Dikte OSA	d	m	< 0,01	0,01	0,08	0,43	0,43	2,93	0,02	0,02

Tabel 45 – Berekening dikte Open Steenasfalt voor de fuik in de afwaartse voorhaven

Parameter	Symbool	Eenheid	Stroming ten gevolge van nivelleren sluiskolk		Stroming ten gevolge van hoofdschroef		Stroming ten gevolge van boegschroef		Stroming ten gevolge van retourstroming	
Bodempeil	Z	mTAW	0,91	1,11	0,91	1,11	0,91	1,11	0,91	1,11
Dichtheid OSA	ρ_s	kg/m ³	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
Dichtheid water	ρ_w	kg/m ³	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Relatieve dichtheid	Δ	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Valversnelling	g	m/s ²	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81
Stroomsnelheid bij	u_b	m/s	3,46	3,46	2,62	2,88	6,67	7,50	2,34	2,34
Parameter θ	θ	-	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Dikte OSA	d	m	0,31	0,31	0,17	0,21	1,13	1,43	0,14	0,14
Stroomsnelheid bij	u_b	m/s	3,46	3,46	2,62	2,88	6,67	7,50	2,34	2,34
Parameter θ	θ	-	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Dikte OSA	d	m	0,62	0,62	0,36	0,43	2,31	2,93	0,28	0,28

Tabel 46 – Berekening dikte Open Steenasfalt voor de wachtplaats in de afwaartse voorhaven

Parameter	Symbool	Eenheid	Stroming ten gevolge van hoofdschroef	Stroming ten gevolge van boegschroef
Bodempeil	Z	mTAW	1,11	1,11
Dichtheid OSA	ρ_s	kg/m ³	2000	2000
Dichtheid water	ρ_w	kg/m ³	1000	1000
Relatieve dichtheid	Δ	-	1,00	1,00
Valversnelling	g	m/s ²	9,81	9,81
Stroomsnelheid bij bodem	u_b	m/s	2,52	7,50
Parameter θ	θ	-	2,0	2,0
Dikte OSA	d	m	0,16	1,43
Stroomsnelheid bij bodem	u_b	m/s	2,52	7,50
Parameter θ	θ	-	1,4	1,4
Dikte OSA	d	m	0,33	2,93

Resultaten berekening dikte colloïdaal beton

Tabel 47 – Berekening dikte colloïdaal beton aan de hand van de formulering volgens Raes et. al (1996) en de formulering volgens Pilarczyk voor de wachtplaats in de opwaartse voorhaven, de wachtplaats en het remmingswerk in de toegangsgeul naar het insteeddok en voor de fuik van het insteeddok.

Parameter		Symbool	Eenheid	Wachtplaats opwaartse voorhaven en wachtplaats en remmingswerk in toegangsgeul insteekdok		Fuik insteekdok		
				Stroming ten gevolge van hoofdschroef	Stroming ten gevolge van boegschroef	Stroming ten gevolge van hoofdschroef	Stroming ten gevolge van boegschroef	Retourstroming
Waterstand		H	mTAW	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00
Bodempeil		Z	mTAW	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50
Waterdiepte		h	m	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50
Dichtheid beton		ρ_s	kg/m³	2400	2400	2400	2400	2400
Dichtheid water		ρ_w	kg/m³	1000	1000	1000	1000	1000
Relatieve dichtheid		Δ	-	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40
Valversnelling		g	m/s²	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81
Raes et. al (1996)	Stroomsnelheid bij bodem	u_b	2,52	7,50	2,88	7,50	1,11	1.11
	Parameter θ	θ	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2.0
	Dikte beton	d	0,12	1,02	0,15	1,02	0,02	0.02
	Stroomsnelheid bij bodem	u_b	2,52	7,50	2,88	7,50	1,11	1.11
	Parameter θ	θ	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1.4
	Dikte beton	d	0,23	2,05	0,30	2,05	0,04	0.04
Pilarczyk	Turbulentiefactor	K_T	2,9	2,5	2,9	2,5	1,8	1.8
	Hellingfactor	K_s	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1.0
	Kritische schuifspanningsparameter	ψ	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0.07
	Stroomsnelheid bij bodem	u_b	2,52	7,50	2,88	7,50	1,11	1.11
	Stabiliteitsfactor voor stroming	ϕ	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0.75
	Dikte beton	d	0,12	1,55	0,17	1,55	0,01	0.01
	Stroomsnelheid bij bodem	u_b	2,52	7,50	2,88	7,50	1,11	1.11
	Stabiliteitsfactor voor stroming	ϕ	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1.00
	Dikte beton	d	0,17	2,22	0,24	2,22	0,01	0.01

Tabel 48 – Berekening dikte colloïdaal beton aan de hand van de formulering volgens Raes et. al (1996) en de formulering volgens Pilarczyk voor de fuik in de opwaartse voorhaven.

Parameter		Symbol	Eenheid	Stroming ten gevolge van nivelleren sluiscolk		Stroming ten gevolge van hoofdschroef		Stroming ten gevolge van boegschroeven		Stroming ten gevolge van retourstroming	
Waterstand		H	mTAW	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00
Bodempeil		Z	mTAW	0,91	3,50	0,91	3,50	0,91	3,50	0,91	3,50
Waterdiepte		h	m	7,09	4,50	7,09	4,50	7,09	4,50	7,09	4,50
Dichtheid beton		ρ_s	kg/m ³	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400
Dichtheid water		ρ_w	kg/m ³	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Relatieve dichtheid		Δ	-	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40
Valversnelling		g	m/s ²	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81
Raes et. al (1996)	Stroomsnelheid bij bodem	u_b	0,27	0,39	1,26	2,88	2,86	7,50	0,59	0,59	0,59
	Parameter θ	θ	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
	Dikte beton	d	< 0,01	< 0,01	0,03	0,15	0,15	1,02	0,01	0,01	0,01
	Stroomsnelheid bij bodem	u_b	0,27	0,39	1,26	2,88	2,86	7,50	0,59	0,59	0,59
	Parameter θ	θ	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
	Dikte beton	d	< 0,01	0,01	0,06	0,30	0,30	2,05	0,01	0,01	0,01
Pilarczyk	Turbulentiefactor	K_T	1,0	1,0	2,9	2,9	2,5	2,5	1,8	1,8	1,8
	Hellingfactor	K_S	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	Kritische schuifspanningsparameter	ψ	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
	Stroomsnelheid bij bodem	u_b	0,27	0,39	1,26	2,88	2,86	7,50	0,59	0,59	0,59
	Stabiliteitsfactor voor stroming	ϕ	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
	Dikte beton	d	< 0,01	< 0,01	0,02	0,17	0,12	1,55	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	Stroomsnelheid bij bodem	u_b	0,27	0,39	1,26	2,88	2,86	7,50	0,59	0,59	0,59
	Stabiliteitsfactor voor stroming	ϕ	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Dikte beton	d	< 0,01	< 0,01	0,03	0,24	0,18	2,22	< 0,01	< 0,01	< 0,01

Tabel 49 – Berekening dikte colloïdaal beton aan de hand van de formulering volgens Raes et. al (1996) en de formulering volgens Pilarczyk voor de fuik in de afwaartse voorhaven.

Parameter		Symbol	Eenheid	Stroming ten gevolge van nivelleren sluiscolk		Stroming ten gevolge van hoofdschroef		Stroming ten gevolge van boegschroeven		Stroming ten gevolge van retourstroming	
Waterstand		H	mTAW	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61
Bodempeil		Z	mTAW	0,91	1,11	0,91	1,11	0,91	1,11	0,91	1,11
Waterdiepte		h	m	4,70	4,50	4,70	4,50	4,70	4,50	4,70	4,50
Dichtheid beton		ρ_s	kg/m ³	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400
Dichtheid water		ρ_w	kg/m ³	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Relatieve dichtheid		Δ	-	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40
Valversnelling		g	m/s ²	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81
Raes et. al (1996)	Stroomsnelheid bij bodem	u_b	3,46	3,46	2,62	2,88	6,67	7,50	2,34	2,34	2,34
	Parameter θ	θ	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
	Dikte beton	d	0,22	0,22	0,12	0,15	0,81	1,02	0,10	0,10	0,10
	Stroomsnelheid bij bodem	u_b	3,46	3,46	2,62	2,88	6,67	7,50	2,34	2,34	2,34
	Parameter θ	θ	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
	Dikte beton	d	0,44	0,44	0,25	0,30	1,62	2,05	0,20	0,20	0,20
Pilarczyk	Turbulentiefactor	K_T	1,0	1,0	2,9	2,9	2,5	2,5	1,8	1,8	1,8
	Hellingfactor	K_S	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	Kritische schuifspanningsparameter	ψ	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
	Stroomsnelheid bij bodem	u_b	3,46	3,46	2,62	2,88	6,67	7,50	2,34	2,34	2,34
	Stabiliteitsfactor voor stroming	ϕ	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
	Dikte beton	d	0,07	0,07	0,13	0,17	1,14	1,55	0,05	0,05	0,05
	Stroomsnelheid bij bodem	u_b	3,46	3,46	2,62	2,88	6,67	7,50	2,34	2,34	2,34
	Stabiliteitsfactor voor stroming	ϕ	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Dikte beton	d	0,10	1,10	0,19	0,24	1,64	2,22	0,08	0,08	0,08

Tabel 50 – Berekening dikte colloïdaal beton aan de hand van de formulering volgens Raes et. al (1996) en de formulering volgens Pilarczyk voor de wachtplaats in de afwaartse voorhaven.

Parameter		Symbool	Eenheid	Stroming ten gevolge van hoofdschroef		Stroming ten gevolge van boegschroeven	
Waterstand		H	mTAW	5,61	5,61	5,61	5,61
Bodempeil		Z	mTAW	1,11	1,11	1,11	1,11
Waterdiepte		h	m	4,50	4,50	4,50	4,50
Dichtheid beton		ρ_s	kg/m ³	2400	2400	2400	2400
Dichtheid water		ρ_w	kg/m ³	1000	1000	1000	1000
Relatieve dichtheid		Δ	-	1,40	1,40	1,40	1,40
Valversnelling		g	m/s ²	9,81	9,81	9,81	9,81
Raes et. al (1996)	Stroomsnelheid bij bodem	u_b	2,52	7,50	2,52	7,50	7,50
	Parameter θ	θ	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
	Dikte beton	d	0,12	1,02	0,12	1,02	1,02
	Stroomsnelheid bij bodem	u_b	2,52	7,50	2,52	7,50	7,50
	Parameter θ	θ	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
	Dikte beton	d	0,23	2,05	0,23	2,05	2,05
Pilarczyk	Turbulentiefactor	K_T	2,9	2,5	2,9	2,5	2,5
	Hellingfactor	K_S	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	Kritische schuifspanningsparameter	ψ	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
	Stroomsnelheid bij bodem	u_b	2,52	7,50	2,52	7,50	7,50
	Stabiliteitsfactor voor stroming	ϕ	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
	Dikte beton	d	0,12	1,55	0,12	1,55	1,55
	Stroomsnelheid bij bodem	u_b	2,52	7,50	2,52	7,50	7,50
	Stabiliteitsfactor voor stroming	ϕ	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Dikte beton	d	0,17	2,22	0,17	2,22	2,22

Berekening lengte bodembescherming

Tabel 51 – Berekening lengte bodembescherming afwaarts van de nieuwe sluis ten gevolge van ledigingsstroming.

Eigenschap	Symbool	Eenheid	Bodempeil + 0,91 m TAW			Bodempeil + 1,11 m TAW		
			D ₅₀ =100µm	D ₅₀ =200µm	D ₅₀ =300µm	D ₅₀ =100µm	D ₅₀ =200µm	D ₅₀ =300µm
Debiet ledigingsstroming	Q	m ³ /s	31,3	31,3	31,3	31,3	31,3	31,3
Waterpeil	H	mTAW	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61
Bodempeil	Z	mTAW	0,91	0,91	0,91	1,11	1,11	1,11
Waterdiepte	h	m	4,70	4,70	4,70	4,50	4,50	4,50
Breedte kolk	b _k	m	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
Stroomsnelheid op x=8*h	u	m	0,53	0,53	0,53	0,56	0,56	0,56
Korrel diameter bodem	D ₅₀	m	0,00005	0,00010	0,00020	0,00005	0,00010	0,00020
Relatieve dichtheid	Δ	-	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65
Kritische stroomsnelheid	u _{cr}	m/s	0,27	0,34	0,43	0,27	0,34	0,42
u < u _{cr}			nee	nee	nee	nee	nee	nee
Aanzethelling	β	°	17	17	17	17	17	17
Eindhelling (na afschuiving/verweking)	γ	°	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
cotg(γ)-cotg(β)	t	-	13,08	13,08	13,08	13,08	13,08	13,08
Hulponbekende a	a	m	236,27	236,27	236,27	236,86	236,86	236,86
Hulponbekende b	b	m ²	-1509,38	-1028,50	-646,84	-1546,89	-1062,52	-678,08
Maximumdiepte kuil	y _e	m	5,00	3,62	2,41	5,10	3,72	2,51
Lengte bodembescherming	L _b	m	32,7	23,7	15,8	33,4	24,3	16,4

Tabel 52 - Berekening lengte bodembescherming in de opwaartse voorhaven en de toegangsgoel naar het insteeddok ten gevolge van retourstroming.

Eigenschap	Symbool	Eenheid	Opwaartse voorhaven						Toegangsgoel insteeddok		
			Bodempeil + 0.91 m TAW			Bodempeil + 3.50 m TAW			Bodempeil + 3.50 m TAW		
			D ₅₀ =50µm	D ₅₀ =100µm	D ₅₀ =200µm	D ₅₀ =50µm	D ₅₀ =100µm	D ₅₀ =200µm	D ₅₀ =50µm	D ₅₀ =100µm	D ₅₀ =200µm
Retourstroomsnelheid	u _r	m/s	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	1,11	1,11	1,11
Breedte schip	b _s	m	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4
Diepgang schip	T	m	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Natte sectie schip	A _s	m ²	39,9	39,9	39,9	39,9	39,9	39,9	39,9	39,9	39,9
Waterpeil	H	mTAW	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00
Drempelpeil	z _d	mTAW	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	3,50	3,50	3,50
Breedte kolk	b _k	m	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	16,0	16,0	16,0
Natte sectie	A	m ²	88,6	88,6	88,6	88,6	88,6	88,6	72,0	72,0	72,0
Retourstroomdebiet	Q	m ³ /s	28,7	28,7	28,7	28,7	28,7	28,7	35,6	35,6	35,6
Bodempeil	Z	mTAW	0,91	0,91	0,91	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50
Waterdiepte	h	m	7,09	7,09	7,09	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50
Stroomsnelheid op x=8*h	u	m	0,32	0,32	0,32	0,51	0,51	0,51	0,49	0,49	0,49
Korrel diameter bodem	D ₅₀	m	0,00005	0,00010	0,00020	0,00005	0,00010	0,00020	0,00005	0,00010	0,00020
Relatieve dichtheid	Δ	-	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65
Kritische stroomsnelheid	u _{cr}	m/s	0,29	0,36	0,46	0,27	0,34	0,42	0,27	0,34	0,42
u < u _{cr}			nee	nee	nee	nee	nee	nee	nee	nee	nee
Aanzethelling	β	°	17	17	17	17	17	17	17	17	17
Eindhelling (na afschuiving/verweking)	γ	°	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
cotg(γ)-cotg(β)	t	-	13,08	13,08	13,08	13,08	13,08	13,08	13,08	13,08	13,08
Hulponbekende a	a	m	229,29	229,29	229,29	236,86	236,86	236,86	306,86	306,86	306,86
Hulponbekende b	b	m ²	-1030,88	-618,47	-291,14	-1355,44	-910,57	-557,47	-1556,77	-1005,38	-567,74
Maximumdiepte kuil	y _e	m	3,71	2,38	1,19	4,57	3,26	2,11	4,29	2,91	1,72
Lengte bodembescherming	L _b	m	24,3	15,5	7,8	29,9	21,3	13,8	28,1	19,1	11,3

Tabel 53 - Berekening lengte bodembescherming in de afwaartse voorhaven ten gevolge van retourstroming.

Eigenschap	Symbool	Eenheid	Bodempeil + 0,91 m TAW			Bodempeil + 1,11 m TAW		
			D ₅₀ =50µm	D ₅₀ =100µm	D ₅₀ =200µm	D ₅₀ =50µm	D ₅₀ =100µm	D ₅₀ =200µm
Retourstroomsnelheid	u_r	m/s	2,34	2,34	2,34	2,34	2,34	2,34
Breedte schip	b_s	m	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4
Diepgang schip	T	m	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Natte sectie schip	A_s	m ²	39,9	39,9	39,9	39,9	39,9	39,9
Waterpeil	H	mTAW	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61
Drempelpeil	z_d	mTAW	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91
Breedte kolk	b_k	m	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
Natte sectie	A	m ²	58,8	58,8	58,8	58,8	58,8	58,8
Retourstroomdebiet	Q	m ³ /s	44,1	44,1	44,1	44,1	44,1	44,1
Bodempeil	Z	mTAW	0,91	0,91	0,91	1,11	1,11	1,11
Waterdiepte	h	m	4,70	4,70	4,70	4,50	4,50	4,50
Stroomsnelheid op $x=8 \cdot h$	u	m	0,75	0,75	0,75	0,78	0,78	0,78
Korreldiameter bodem	D ₅₀	m	0,00005	0,00010	0,00020	0,00005	0,00010	0,00020
Relatieve dichtheid	Δ	-	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65
Kritische stroomsnelheid	u_{cr}	m/s	0,27	0,34	0,43	0,27	0,34	0,42
$u < u_{cr}$			nee	nee	nee	nee	nee	nee
Aanzethelling	β	°	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0
Eindhelling (na afschuiving/verweking)	γ	°	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
$\cotg(\gamma) - \cotg(\beta)$	t	-	13,08	13,08	13,08	13,08	13,08	13,08
Hulponbekende a	a	m	236,27	236,27	236,27	236,86	236,86	236,86
Hulponbekende b	b	m ²	-2463,27	-1785,61	-1247,75	-2507,72	-1825,14	-1283,37
Maximumdiepte kuil	y_e	m	7,40	5,74	4,27	7,49	5,83	4,37
Lengte bodembescherming	L _b	m	48,4	37,5	27,9	49,0	38,1	28,6

Tabel 54 - Berekening lengte bodembescherming in de fuik van de opwaartse voorhaven, de fuik van het insteeddok en de fuik in de afwaartse voorhaven voor stroming ten gevolge van schroefstraalwerking van het schip CEMT Va volgens theorie van erosie achter ronde straal.

	Eigenschap	Symbool	Eenheid	Fuik opwaartse voorhaven			Fuik opwaartse voorhaven en fuik insteeddok / fuik afwaartse voorhaven			Fuik afwaartse voorhaven		
				D ₅₀ =50µm	D ₅₀ =100µm	D ₅₀ =200µm	D ₅₀ =50µm	D ₅₀ =100µm	D ₅₀ =200µm	D ₅₀ =50µm	D ₅₀ =100µm	D ₅₀ =200µm
	Waterpeil	H	mTAW	8,00	8,00	8,00	8,00 / 5,61	8,00 / 5,61	8,00 / 5,61	5,61	5,61	5,61
	Bodempeil	Z	mTAW	0,91	0,91	0,91	3,50 / 1,11	3,50 / 1,11	3,50 / 1,11	0,91	0,91	0,91
	waterdiepte	h	-	7,09	7,09	7,09	4,50	4,50	4,50	4,70	4,70	4,70
Effectieve schroefdiameter 1.42 m	Aantal schroeven	n	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Effectieve schroefdiameter	D ₀	m	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42
	Stroomsnelheid achter schroef	u _b	m/s	10,06	10,06	10,06	10,06	10,06	10,06	10,06	10,06	10,06
	Verticale afstand straalas tot bodem	d	m	4,60	4,60	4,60	2,00	2,00	2,00	2,20	2,20	2,20
	Korrel diameter bodem	D ₅₀	m	0,00005	0,00010	0,00020	0,00005	0,00010	0,00020	0,00005	0,00010	0,00020
	Nominale diameter korrels (~0.84* D ₅₀)	D _n	m	0,00004	0,00008	0,00017	0,00004	0,00008	0,00017	0,00004	0,00008	0,00017
	Relatieve dichtheid	Δ	-	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65
	Shieldscoefficient	ψ _c	-	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032
	Kritieke schuifspanningssnelheid	u _{*c}	m/s	0,005	0,007	0,009	0,005	0,007	0,009	0,005	0,007	0,009
	Maximumdiepte kuil	γ _e	m	7,34	6,03	4,88	9,93	8,62	7,47	9,73	8,42	7,27
	Aanzethelling	β	°	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,00	30,00	30,00
	Eindhelling (na afschuiving/verweking)	γ	°	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,50	3,50	3,50
	cotg(γ)-cotg(β)	t	-	14,62	14,62	14,62	14,62	14,62	14,62	14,62	14,62	14,62
	Lengte bodembescherming	L _b	m	53,6	44,1	35,6	72,5	63,0	54,6	71,08	61,57	53,10
Effectieve schroefdiameter 2.00 m	Aantal schroeven	n	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Effectieve schroefdiameter	D ₀	m	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
	Stroomsnelheid achter schroef	u _b	m/s	8,01	8,01	8,01	8,01	8,01	8,01	8,01	8,01	8,01
	Verticale afstand straalas tot bodem	d	m	4,60	4,60	4,60	2,00	2,00	2,00	2,20	2,20	2,20
	Korrel diameter bodem	D ₅₀	m	0,00005	0,00010	0,00020	0,00005	0,00010	0,00020	0,00005	0,00010	0,00020
	Nominale diameter korrels (~0.84* D ₅₀)	D _n	m	0,00004	0,00008	0,00017	0,00004	0,00008	0,00017	0,00004	0,00008	0,00017
	Relatieve dichtheid	Δ	-	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65
	Shieldscoefficient	ψ _c	-	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032
	Kritieke schuifspanningssnelheid	u _{*c}	m/s	0,005	0,007	0,009	0,005	0,007	0,009	0,005	0,007	0,009
	Maximumdiepte kuil	γ _e	m	10,97	9,27	7,76	13,57	11,87	10,36	13,37	11,67	10,16
	Aanzethelling	β	°	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,00	30,00	30,00
	Eindhelling (na afschuiving/verweking)	γ	°	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50
	cotg(γ)-cotg(β)	t	-	14,62	14,62	14,62	14,62	14,62	14,62	14,62	14,62	14,62
	Lengte bodembescherming	L _b	m	80,2	67,8	56,7	99,2	86,8	75,7	97,7	85,3	74,2

Tabel 55 - Berekening lengte bodembescherming in de fuik van de opwaartse voorhaven, de fuik van het insteekdok en de fuik in de afwaartse voorhaven voor stroming ten gevolge van schroefstraalwerking van schip CEMT Va+ volgens theorie van erosie achter ronde straal.

	Eigenschap	Symbool	Eenheid	Fuik opwaartse voorhaven			Fuik opwaartse voorhaven en fuik insteekdok / fuik afwaartse voorhaven			Fuik afwaartse voorhaven		
				D ₅₀ =50µm	D ₅₀ =100µm	D ₅₀ =200µm	D ₅₀ =50µm	D ₅₀ =100µm	D ₅₀ =200µm	D ₅₀ =50µm	D ₅₀ =100µm	D ₅₀ =200µm
Effectieve schroefdiameter 1.42 m	Waterpeil	H	mTAW	8,00	8,00	8,00	8,00 / 5,61	8,00 / 5,61	8,00 / 5,61	5,61	5,61	5,61
	Bodempeil	Z	mTAW	0,91	0,91	0,91	3,50 / 1,11	3,50 / 1,11	3,50 / 1,11	0,91	0,91	0,91
	waterdiepte	h	-	7,09	7,09	7,09	4,50	4,50	4,50	4,70	4,70	4,70
	Aantal schroeven	n	-	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Effectieve schroefdiameter	D ₀	m	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42
	Stroomsnelheid achter schroef	u _p	m/s	8,54	8,54	8,54	8,54	8,54	8,54	8,54	8,54	8,54
	Verticale afstand straalas tot bodem	d	m	4,60	4,60	4,60	2,00	2,00	2,00	2,20	2,20	2,20
	Korrel diameter bodem	D ₅₀	m	0,00005	0,00010	0,00020	0,00005	0,00010	0,00020	0,00005	0,00010	0,00020
	Nominale diameter korrels (~0.84* D ₅₀)	D _n	m	0,00004	0,00008	0,00017	0,00004	0,00008	0,00017	0,00004	0,00008	0,00017
	Relatieve dichtheid	Δ	-	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65
	Shieldscoefficient	ψ _c	-	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032
	Kritieke schuifspanningssnelheid	u _{*c}	m/s	0,005	0,007	0,009	0,005	0,007	0,009	0,005	0,007	0,009
	Maximumdiepte kuil	y _e	m	6,70	5,47	4,37	9,29	8,06	6,96	9,09	7,86	6,76
	Aanzethelling	β	°	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,00	30,00	30,00
	Eindhelling (na afschuiving/verweking)	γ	°	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,50	3,50	3,50
Effectieve schroefdiameter 2.00 m	cotg(γ)-cotg(β)	t	-	14,62	14,62	14,62	14,62	14,62	14,62	14,62	14,62	14,62
	Lengte bodembescherming	L _b	m	49,0	40,0	32,0	67,9	58,9	50,9	66,5	57,5	49,4
	Aantal schroeven	n	-	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Effectieve schroefdiameter	D ₀	m	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
	Stroomsnelheid achter schroef	u _p	m/s	6,79	6,79	6,79	6,79	6,79	6,79	6,79	6,79	6,79
	Verticale afstand straalas tot bodem	d	m	4,60	4,60	4,60	2,00	2,00	2,00	2,20	2,20	2,20
	Korrel diameter bodem	D ₅₀	m	0,00005	0,00010	0,00020	0,00005	0,00010	0,00020	0,00005	0,00010	0,00020
	Nominale diameter korrels (~0.84* D ₅₀)	D _n	m	0,00004	0,00008	0,00017	0,00004	0,00008	0,00017	0,00004	0,00008	0,00017
	Relatieve dichtheid	Δ	-	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65
	Shieldscoefficient	ψ _c	-	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032
	Kritieke schuifspanningssnelheid	u _{*c}	m/s	0,005	0,007	0,009	0,005	0,007	0,009	0,005	0,007	0,009
	Maximumdiepte kuil	y _e	m	10,13	8,53	7,09	12,73	11,13	9,69	12,53	10,93	9,49
	Aanzethelling	β	°	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,00	30,00	30,00
	Eindhelling (na afschuiving/verweking)	γ	°	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50
	cotg(γ)-cotg(β)	t	-	14,62	14,62	14,62	14,62	14,62	14,62	14,62	14,62	14,62
	Lengte bodembescherming	L _b	m	74,1	62,3	51,9	93,1	81,3	70,9	91,6	79,9	69,4

Tabel 56 - Berekening lengte bodembescherming in de fuik van de opwaartse voorhaven, de fuik van het insteeddok en de fuik in de afwaartse voorhaven voor stroming ten gevolge van schroefstraalwerking van schip CEMT Va volgens theorie van straaIspreiding.

	Eigenschap	Symbool	Eenheid	Fuik opwaartse voorhaven			Fuik opwaartse voorhaven en fuik insteeddok /			Fuik afwaartse voorhaven		
				D ₅₀ =50µm	D ₅₀ =100µm	D ₅₀ =50µm	D ₅₀ =50µm	D ₅₀ =50µm	D ₅₀ =200µm	D ₅₀ =50µm	D ₅₀ =50µm	D ₅₀ =200µm
	Waterpeil	H	mTAW	8,00	8,00	8,00	8,00 / 5,61	8,00 / 5,61	8,00 / 5,61	5,61	5,61	5,61
	Bodempeil	Z	mTAW	0,91	0,91	0,91	3,50 / 1,11	3,50 / 1,11	3,50 / 1,11	0,91	0,91	0,91
	waterdiepte	h	-	7,09	7,09	7,09	4,50	4,50	4,50	4,70	4,70	4,70
Effectieve schroefdiameter 1.42 m	Aantal schroeven	n	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Effectieve schroefdiameter	D ₀	m	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42
	Stroomsnelheid achter schroef	u _p	m/s	10,06	10,06	10,06	10,06	10,06	10,06	10,06	10,06	10,06
	Verticale afstand straalas tot bodem	d	m	4,60	4,60	4,60	2,00	2,00	2,00	2,20	2,20	2,20
	Korrel diameter bodem	D ₅₀	m	0,00005	0,00010	0,00020	0,00005	0,00010	0,00020	0,00005	0,00010	0,00020
	Relatieve dichtheid	Δ	-	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65
	Kritieke stroomsnelheid	u _{cr}	m/s	0,29	0,36	0,46	0,27	0,34	0,42	0,27	0,34	0,43
	Maximumlengte kuil	l _e	m	83,44	66,23	52,57	90,01	71,44	56,70	89,36	70,93	56,29
	Maximumdiepte kuil	y _e	m	10,30	7,23	4,79	14,07	10,76	8,13	13,76	10,47	7,85
	Aanzethelling	β	°	21,22	18,76	15,65	26,87	25,88	24,63	26,46	25,36	23,98
	Eindhelling (na afschuiving/verweking)	γ	°	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,50	3,50	3,50
	cotg(γ)-cotg(β)	t	-	13,77	13,40	12,78	14,38	14,29	13,77	14,34	14,24	14,10
	Lengte bodembescherming	L _b	m	70,9	48,4	30,6	101,2	76,9	57,6	98,7	74,5	55,4
Effectieve schroefdiameter 2.00 m	Aantal schroeven	n	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Effectieve schroefdiameter	D ₀	m	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
	Stroomsnelheid achter schroef	u _p	m/s	8,01	8,01	8,01	8,01	8,01	8,01	8,01	8,01	8,01
	Verticale afstand straalas tot bodem	d	m	4,60	4,60	4,60	2,00	2,00	2,00	2,20	2,20	2,20
	Korrel diameter bodem	D ₅₀	m	0,00005	0,00010	0,00020	0,00005	0,00010	0,00020	0,00005	0,00010	0,00020
	Relatieve dichtheid	Δ	-	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65
	Kritieke stroomsnelheid	u _{cr}	m/s	0,29	0,36	0,46	0,27	0,34	0,42	0,27	0,34	0,43
	Maximumlengte kuil	l _e	m	93,58	74,27	58,95	100,94	80,12	93,58	100,21	79,54	63,13
	Maximumdiepte kuil	y _e	m	12,11	8,66	5,93	16,03	12,31	12,11	15,70	12,00	9,07
	Aanzethelling	β	°	22,24	20,05	17,28	27,29	26,40	22,24	26,92	25,94	24,70
	Eindhelling (na afschuiving/verweking)	γ	°	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50
	cotg(γ)-cotg(β)	t	-	13,90	13,61	13,14	14,41	14,34	13,90	14,38	14,29	14,18
	Lengte bodembescherming	L _b	m	84,2	59,0	38,9	115,5	88,2	84,2	112,9	85,8	64,3

Tabel 57 - Berekening lengte bodembescherming in de fuik van de opwaartse voorhaven, de fuik van het insteeddok en de fuik in de afwaartse voorhaven voor stroming ten gevolge van schroefstraalwerking van schip CEMT Va+ volgens theorie van straalspreading.

	Eigenschap	Symbool	Eenheid	Fuik opwaartse voorhaven			Fuik opwaartse voorhaven en fuik insteeddok			Fuik afwaartse voorhaven		
				D ₅₀ =50µm	D ₅₀ =100µm	D ₅₀ =200µm	D ₅₀ =50µm	D ₅₀ =100µm	D ₅₀ =200µm	D ₅₀ =50µm	D ₅₀ =100µm	D ₅₀ =200µm
	Waterpeil	H	mTAW	8,00	8,00	8,00	8,00 / 5,61	8,00 / 5,61	8,00 / 5,61	5,61	5,61	5,61
	Bodempeil	Z	mTAW	0,91	0,91	0,91	3,50 / 1,11	3,50 / 1,11	3,50 / 1,11	0,91	0,91	0,91
	waterdiepte	h	-	7,09	7,09	7,09	4,50	4,50	4,50	4,70	4,70	4,70
Effectieve 1.42 m	Aantal schroeven	n	-	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Effectieve schroefdiaameter	D ₀	m	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42
	Stroomsnelheid achter schroef	u _p	m/s	8,54	8,54	8,54	8,54	8,54	8,54	8,54	8,54	8,54
	Verticale afstand straalas tot bodem	d	m	4,60	4,60	4,60	2,00	2,00	2,00	2,20	2,20	2,20
	Korrel diameter bodem	D ₅₀	m	0,00005	0,00010	0,00020	0,00005	0,00010	0,00020	0,00005	0,00010	0,00020
	Relatieve dichtheid	Δ	-	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65
	Kritieke stroomsnelheid	u _{cr}	m/s	0,29	0,36	0,46	0,27	0,34	0,42	0,27	0,34	0,43
	Maximumlengte kuil	l _e	m	100,18	79,51	63,11	108,06	85,77	68,07	107,28	85,15	67,58
	Maximumdiepte kuil	y _e	m	13,29	9,60	6,67	17,30	13,32	10,16	16,96	13,01	9,87
	Aanzethelling	β	°	22,80	20,75	18,17	27,51	26,69	25,64	27,17	26,25	25,10
	Eindhelling (na afschuiving/verweking)	γ	°	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50
	cotg(γ)-cotg(β)	t	-	13,97	13,71	13,30	14,43	14,36	14,27	14,40	14,32	14,21
	Lengte bodembescherming	L _b	m	92,8	65,8	44,4	124,8	95,6	72,5	122,1	93,1	70,1
Effectieve 2.00 m	Aantal schroeven	n	-	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Effectieve schroefdiaameter	D ₀	m	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
	Stroomsnelheid achter schroef	u _p	m/s	6,79	6,79	6,79	6,79	6,79	6,79	6,79	6,79	6,79
	Verticale afstand straalas tot bodem	d	m	4,60	4,60	4,60	2,00	2,00	2,00	2,20	2,20	2,20
	Korrel diameter bodem	D ₅₀	m	0,00005	0,00010	0,00020	0,00005	0,00010	0,00020	0,00005	0,00010	0,00020
	Relatieve dichtheid	Δ	-	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65
	Kritieke stroomsnelheid	u _{cr}	m/s	0,29	0,36	0,46	0,27	0,34	0,42	0,27	0,34	0,43
	Maximumlengte kuil	l _e	m	112,18	89,04	70,67	121,01	96,05	76,23	120,14	95,35	75,68
	Maximumdiepte kuil	y _e	m	15,43	11,30	8,02	19,61	15,15	11,61	19,25	14,83	11,31
	Aanzethelling	β	°	23,65	21,81	19,51	27,85	27,11	26,18	27,55	26,73	25,70
	Eindhelling (na afschuiving/verweking)	γ	°	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50
	cotg(γ)-cotg(β)	t	-	14,07	13,85	13,53	14,46	14,40	14,32	14,43	14,36	14,27
	Lengte bodembescherming	L _b	m	108,5	78,3	54,2	141,8	109,1	83,1	138,9	106,5	80,7

Berekening breedte bodembescherming ter plaatse van remmingswerken en kaaimuren

Tabel 58 - Berekening breedte bodembescherming ter plaatse van remmingswerken en kaaimuren in de opwaartse voorhaven, toegangsgeul naar het insteeddok en de afwaartse voorhaven voor stroming ten gevolge van schroefstraalwerking van schip CEMT Va volgens theorie van erosie achter ronde straal.

Eigenschap	Symbool	Eenheid	Opwaartse voorhaven, toegangsgeul insteeddok : Bodempeil + 3,50 m TAW					
			Afwaartse voorhaven: Bodempeil + 1,11 m TAW					
			Effectieve schroefdiameter 1,42 m			Effectieve schroefdiameter 2,00 m		
			D ₅₀ =50µm	D ₅₀ =100µm	D ₅₀ =200µm	D ₅₀ =50µm	D ₅₀ =100µm	D ₅₀ =200µm
Waterpeil	H	mTAW	8,00 / 5,61	8,00 / 5,61	8,00 / 5,61	8,00 / 5,61	8,00 / 5,61	8,00 / 5,61
Bodempeil	Z	mTAW	3,50 / 1,11	3,50 / 1,11	3,50 / 1,11	3,50 / 1,11	3,50 / 1,11	3,50 / 1,11
waterdiepte	h	-	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50
Aantal schroeven	n	-	1	1	1	1	1	1
Effectieve schroefdiameter	D ₀	m	1,42	1,42	1,42	2,00	2,00	2,00
Stroomsnelheid achter schroef	u _p	m/s	10,06	10,06	10,06	8,01	8,01	8,01
Verticale afstand straalas tot bodem	d	m	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Korreldiameter bodem	D ₅₀	m	0,00005	0,00010	0,00020	0,00005	0,00010	0,00020
Nominale diameter korrels (~0.84* D ₅₀)	D _n	m	0,00004	0,00008	0,00017	0,00004	0,00008	0,00017
Relatieve dichtheid	Δ	-	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65
Shieldscoefficient	ψ _c	-	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032
Kritieke schuifspanningssnelheid	u _{*c}	m/s	0,005	0,007	0,009	0,005	0,007	0,009
Maximumdiepte kuil	y _e	m	9,93	8,62	7,47	13,57	11,87	10,36
Aanzethelling	β	°	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0
Eindhelling (na afschuiving/verweking)	γ	°	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5
cotg(γ)-cotg(β)	t	-	4,96	4,96	4,96	4,96	4,96	4,96
Toegestane verdieping nabij kaaimuur	d _e	m	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Hulponbekende a	a	-	146,44	146,44	146,44	146,44	146,44	146,44
Hulponbekende b	b	m	-422,49	-364,24	-312,35	-585,57	-509,53	-441,78
Hulponbekende c	c	m ²	297,22	220,83	162,31	571,32	432,46	325,01
Breedte bodembescherming gesloten remmingswerk/kaaimuur	L _b	m	1,7	1,4	1,2	2,3	2,0	1,7

Tabel 59 - Berekening breedte bodembescherming ter plaatse van remmingswerken en kaaimuren in de opwaartse voorhaven, toegangsecul naar het insteeddok en de afwaartse voorhaven voor stroming ten gevolge van schroefstraalwerking van schip CEMT Va+ volgens theorie van erosie achter ronde straal.

Eigenschap	Symbool	Eenheid	Opwaartse voorhaven, toegangsecul insteeddok : Bodempeil + 3,50 m TAW					
			Afwaartse voorhaven: Bodempeil + 1,11 m TAW					
			Effectieve schroefdiameter 1,42 m			Effectieve schroefdiameter 2,00 m		
			D ₅₀ =50µm	D ₅₀ =100µm	D ₅₀ =200µm	D ₅₀ =50µm	D ₅₀ =100µm	D ₅₀ =200µm
Waterpeil	H	mTAW	8,00 / 5,61	8,00 / 5,61	8,00 / 5,61	8,00 / 5,61	8,00 / 5,61	8,00 / 5,61
Bodempeil	Z	mTAW	3,50 / 1,11	3,50 / 1,11	3,50 / 1,11	3,50 / 1,11	3,50 / 1,11	3,50 / 1,11
waterdiepte	h	-	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50
Aantal schroeven	n	-	2	2	2	2	2	2
Effectieve schroefdiameter	D ₀	m	1,42	1,42	1,42	2,00	2,00	2,00
Stroomsnelheid achter schroef	u _p	m/s	8,54	8,54	8,54	6,79	6,79	6,79
Verticale afstand straalas tot bodem	d	m	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Korrel diameter bodem	D ₅₀	m	0,00005	0,00010	0,00020	0,00005	0,00010	0,00020
Nominale diameter korrels (~0.84* D ₅₀)	D _n	m	0,00004	0,00008	0,00017	0,00004	0,00008	0,00017
Relatieve dichtheid	Δ	-	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65
Shieldscoefficient	ψ _c	-	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032
Kritieke schuifspanningssnelheid	u _{*c}	m/s	0,005	0,007	0,009	0,005	0,007	0,009
Maximumdiepte kuil	y _e	m	9,29	8,06	6,96	12,73	11,13	9,69
Aanzethelling	β	°	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0
Eindhelling (na afschuiving/verweking)	γ	°	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5
cotg(γ)-cotg(β)	t	-	4,96	4,96	4,96	4,96	4,96	4,96
Toegestane verdieping nabij kaaimuur	d _e	m	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Hulponbekende a	a	-	146,44	146,44	146,44	146,44	146,44	146,44
Hulponbekende b	b	m	-394,12	-338,97	-289,83	-548,22	-476,25	-412,13
Hulponbekende c	c	m ²	258,60	191,20	139,72	500,70	377,76	282,80
Breedte bodembescherming gesloten remmingswerk/kaaimuur	L _b	m	1,6	1,3	1,1	2,2	1,9	1,6

Tabel 60 - Berekening breedte bodembescherming ter plaatse van remmingswerken en kaaimuren in de opwaartse voorhaven, toegangseul naar het insteeddok en de afwaartse voorhaven voor stroming ten gevolge van schroefstraalwerking van CEMT Va volgens theorie van straalspreading.

Eigenschap	Symbool	Eenheid	Opwaartse voorhaven, toegangseul insteeddok : Bodempeil + 3,50 m TAW					
			Afwaartse voorhaven: Bodempeil + 1,11 m TAW					
			Effectieve schroefdiameter 1,42 m			Effectieve schroefdiameter 2,00 m		
			D ₅₀ =50µm	D ₅₀ =100µm	D ₅₀ =200µm	D ₅₀ =50µm	D ₅₀ =100µm	D ₅₀ =200µm
Waterpeil	H	mTAW	8,00 / 5,61	8,00 / 5,61	8,00 / 5,61	8,00 / 5,61	8,00 / 5,61	8,00 / 5,61
Bodempeil	Z	mTAW	3,50 / 1,11	3,50 / 1,11	3,50 / 1,11	3,50 / 1,11	3,50 / 1,11	3,50 / 1,11
waterdiepte	h	-	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50
Aantal schroeven	n	-	1	1	1	1	1	1
Effectieve schroefdiameter	D ₀	m	1,42	1,42	1,42	2,00	2,00	2,00
Stroomsnelheid achter schroef	u _p	m/s	10,06	10,06	10,06	8,01	8,01	8,01
Verticale afstand straalas tot bodem	d	m	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Korrel diameter bodem	D ₅₀	m	0,00005	0,00010	0,00020	0,00005	0,00010	0,00020
Relatieve dichtheid	Δ	-	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65
Kritieke stroomsnelheid	u _{cr}	m/s	0,27	0,34	0,42	0,27	0,34	0,42
Maximumlengte kuil	l _e	m	90,01	71,44	56,70	100,94	80,12	63,59
Maximumdiepte kuil	y _e	m	14,07	10,76	8,13	16,03	12,31	9,36
Aanzethelling	β	°	26,87	25,88	24,63	27,29	26,40	25,29
Eindhelling (na afschuiving/verweking)	γ	°	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50
cotg(γ)-cotg(β)	t	-	4,72	4,63	4,51	4,75	4,68	4,57
Toegestane verdieping nabij kaaimuur	d _e	m	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Hulponbekende a	a	-	146,441	146,441	146,441	146,441	146,441	146,441
Hulponbekende b	b	m	-608,208	-459,747	-341,914	-695,601	-529,111	-396,968
Hulponbekende c	c	m ²	616,391	352,014	194,549	806,421	466,379	262,351
Breedte bodembescherming gesloten remmingswerk/kaaimuur	L _b	m	2,4	1,8	1,4	2,7	2,1	1,6

Tabel 61 - Berekening breedte bodembescherming ter plaatse van remmingswerken en kaaimuren in de opwaartse voorhaven, toegangsgeul naar het insteeddok en de afwaartse voorhaven voor stroming ten gevolge van schroefstraalwerking van CEMT Va+ volgens theorie van straaIspreiding.

Eigenschap	Symbool	Eenheid	Opwaartse voorhaven, toegangsgeul insteeddok : Bodempeil + 3,50 m TAW					
			Afwaartse voorhaven: Bodempeil + 1,11 m TAW					
			Effectieve schroefdiameter 1,42 m			Effectieve schroefdiameter 2,00 m		
			D ₅₀ =50µm	D ₅₀ =100µm	D ₅₀ =200µm	D ₅₀ =50µm	D ₅₀ =100µm	D ₅₀ =200µm
Waterpeil	H	mTAW	8,00 / 5,61	8,00 / 5,61	8,00 / 5,61	8,00 / 5,61	8,00 / 5,61	8,00 / 5,61
Bodempeil	Z	mTAW	3,50 / 1,11	3,50 / 1,11	3,50 / 1,11	3,50 / 1,11	3,50 / 1,11	3,50 / 1,11
waterdiepte	h	-	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50
Aantal schroeven	n	-	2	2	2	2	2	2
Effectieve schroefdiameter	D ₀	m	1,42	1,42	1,42	2,00	2,00	2,00
Stroomsnelheid achter schroef	u _p	m/s	8,54	8,54	8,54	6,79	6,79	6,79
Verticale afstand straalas tot bodem	d	m	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Korrel diameter bodem	D ₅₀	m	0,00005	0,00010	0,00020	0,00005	0,00010	0,00020
Relatieve dichtheid	Δ	-	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65
Kritieke stroomsnelheid	u _{cr}	m/s	0,27	0,34	0,42	0,27	0,34	0,42
Maximumlengte kuil	l _e	m	108,06	85,77	68,07	121,01	96,05	76,23
Maximumdiepte kuil	y _e	m	17,30	13,32	10,16	19,61	15,15	11,61
Aanzethelling	β	°	27,51	26,69	25,64	27,85	27,11	26,18
Eindhelling (na afschuiving/verweking)	γ	°	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50	8,50
cotg(γ)-cotg(β)	t	-	4,77	4,70	4,61	4,80	4,74	4,66
Toegestane verdieping nabij kaaimuur	d _e	m	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Hulponbekende a	a	-	146,441	146,441	146,441	146,441	146,441	146,441
Hulponbekende b	b	m	-752,520	-574,288	-432,825	-856,051	-656,460	-498,045
Hulponbekende c	c	m ²	943,899	549,502	311,952	1221,681	718,160	413,172
Breedte bodembescherming gesloten remmingswerk/kaaimuur	L _b	m	3,0	2,3	1,7	3,4	2,6	2,0

Bijlage 4: 2D-stromingspatroon aan de bodem naast een kaaimuur ten gevolge van schroefstralen

Inleiding

Voor de dimensionering van de bodembescherming aan de hand van de stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van schroefstralen is het gebruikelijk om de maximale waarde van de stroomsnelheid aan de bodem te berekenen en daarna op basis van deze maximale waarde de dimensionering uit te voeren.

Voor de boegschroef doet deze maximale waarde zich voor juist naast de verticale wand en neemt deze (kwadratisch) af voor locaties verder weg van de verticale wand. Voor de hoofdschroef doet deze maximale waarde zich voor, cf. de formuleringen in Ontwerp van Schutsluizen (Beem *et al.*, 2000), achter het schip op een afstand gelijk aan 5,6 maal de afstand tussen de as van de schroef en de bodem.

Voornamelijk met betrekking tot de stroomsnelheid ten gevolge van de boegschroef werd door de opdrachtgever de vraag gesteld of het mogelijk is om een inschatting te maken van de spreiding in 2 dimensies van de stroomsnelheid aan de bodem.

In de eerstvolgende paragraaf wordt de spreiding van de stroomsnelheid aan de bodem berekend voor de hoofdschroef. In de daaropvolgende paragraaf wordt deze berekening uitgevoerd voor de stroming aan de bodem ten gevolge van de boegschroef.

Uit eenvoud is de berekening van de stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van hoofdschroef en boegschroef slechts uitgevoerd voor één configuratie, namelijk het schip CEMT Va+ aangemeerd aan een kaaimuur.

Voor de berekening zijn voor hoofdschroef en boegschroef de gegevens uit Tabel 62 toegepast (zie ook paragraaf 2.2).

Tabel 62 – Gegevens hoofdschroef en boegschroef schip CEMT klasse Va+

		CEMT Va+
Hoofdschroef	Aantal schroeven	2
	Totaal motorvermogen 90% - percentiel	2200 kW
	Diameter schroef	2,00 m
Boegschroef	Aantal schroeven	2
	Totaal motorvermogen boegschroef	840 kW
	Diameter schroef	1,20 m

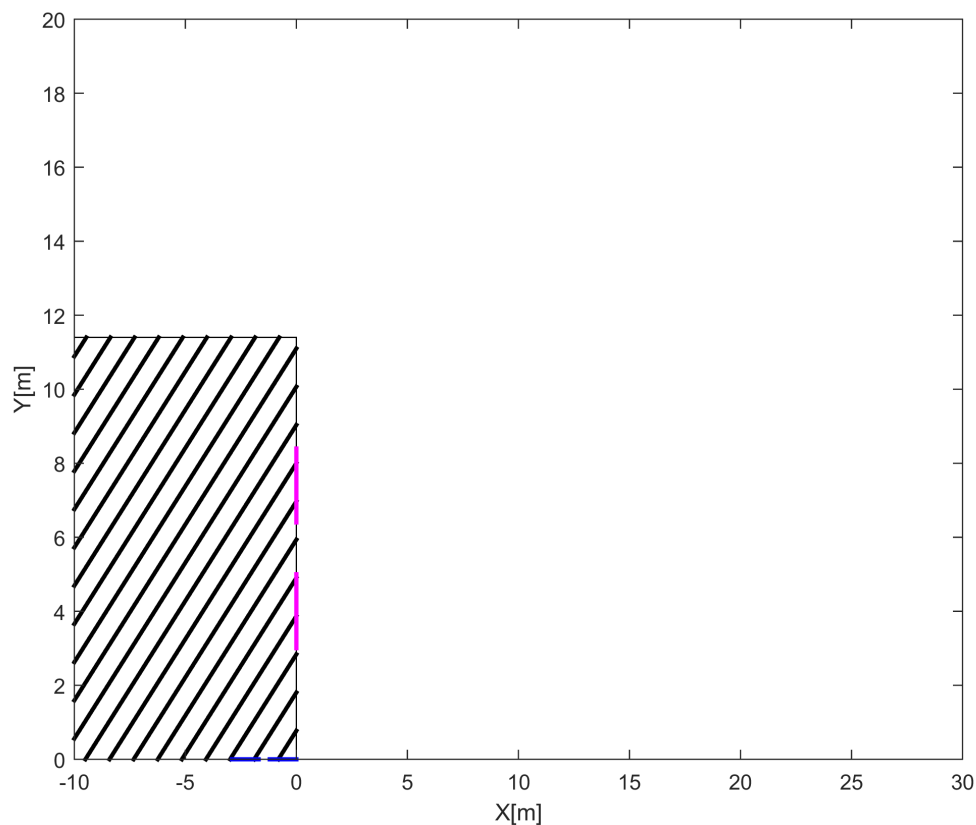
Voor de berekeningen wordt volgende configuratie voor de beide hoofdschroeven en boegschroeven beschouwd:

- De tussenafstand tussen de assen van beide hoofdschroeven bedraagt 3,4 m. Deze waarde is bepaald in overleg met nautische collega's van WL op basis van gegevens met betrekking tot binnenvaartschepen toegepast voor simulatoronderzoek.
- De beide hoofdschroeven worden symmetrisch aan beide zijden van de as van het schip beschouwd.

- De tussenafstand tussen de assen van beide boegschroeven bedraagt 1,70 m. De tussenafstand van 0,50 m tussen beide boegschroeven is eerder arbitrair bepaald en is sterk afhankelijk van schip tot schip.
- De beide boegschroeven worden juist naast de boeg van het schip beschouwd. Om de grafische voorstelling te vereenvoudigen worden de boegschroeven en hoofdschroeven juist naast $X = 0$ grafisch voorgesteld.

Deze configuratie wordt voorgesteld in Figuur 19. Hierbij is het schip aangemeerd naast de kaaimuur ($Y=0$) en in de zone $Y<0$.

Figuur 19 – Locatie hoofdschroef (paars) en boegschroef (blauw) aan het hek van het schip CEMT klasse Va+ (arcering).



Spreiding stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de hoofdschroef

In paragraaf 3.3 van dit rapport zijn de formuleringen vermeld voor de berekening van de maximale stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de hoofdschroef. De algemene formulering voor de stroomsnelheid achter een propeller wordt gegeven door (Beem *et al.*, 2000; MarCom Working Group 180, 2015):

$$u_{p \text{ axis}} = 2,8 u_p \left(\frac{D_0}{x} \right)$$

$$u_{p, xr} = u_{p \text{ axis}} \exp \left(-15,4 \frac{r^2}{x^2} \right)$$

met:

-	$u_{p \text{ axis}}$	Stroomsnelheid in het verlengde van de as van de schroef	[m/s]
-	u_p	Stroomsnelheid juist achter de schroef	[m/s]
-	$u_{p, xr}$	Stroomsnelheid achter de schroef ter plaatse van locatie x,r	
-	D_0	Effectieve diameter van de schroef	[m]
-	x	Afstand tot de schroef in X-richting	[m]
-	r	Afstand tot de lijn in het verlengde van de as van de schroef	[m]

Bij deze formuleringen moet opgemerkt worden dat deze eigenlijk geldig zijn voor een jet in onbeperkt water, i.e. niet begrensd door bodem, wateroppervlak of verticale kaaimuren.

Om de stroomsnelheid aan de bodem te berekenen kan voor r de afstand tot de bodem in deze formuleringen ingevuld worden. Voor het in Figuur 19 beschouwde domein wordt r dan als volgt berekend:

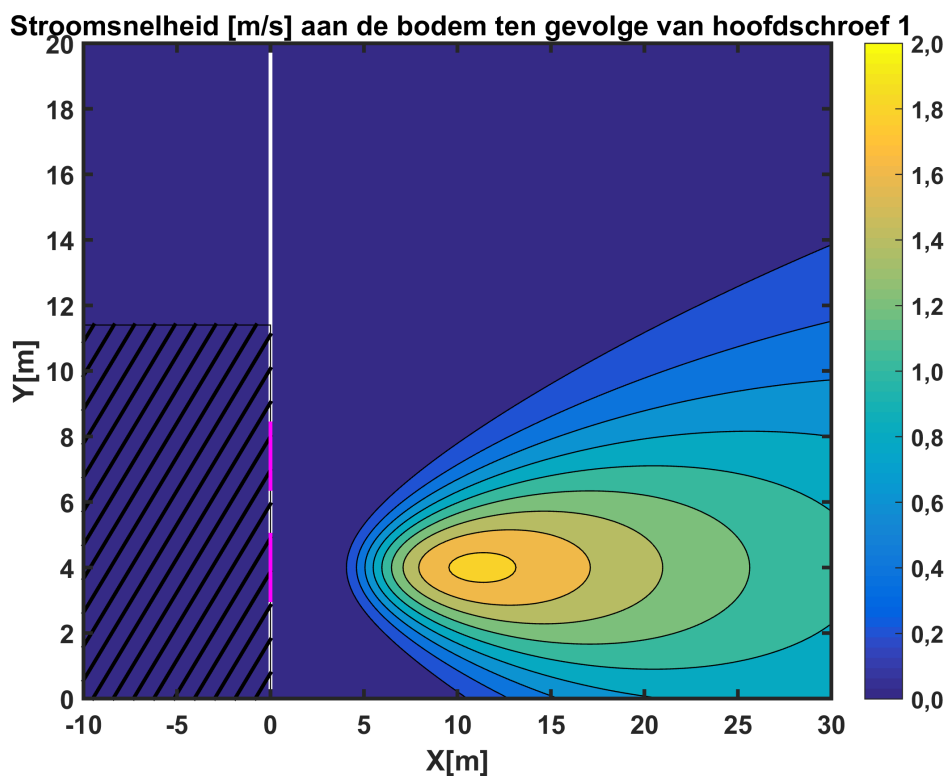
$$r = \sqrt{d_p^2 + (y - y_s)^2}$$

met:

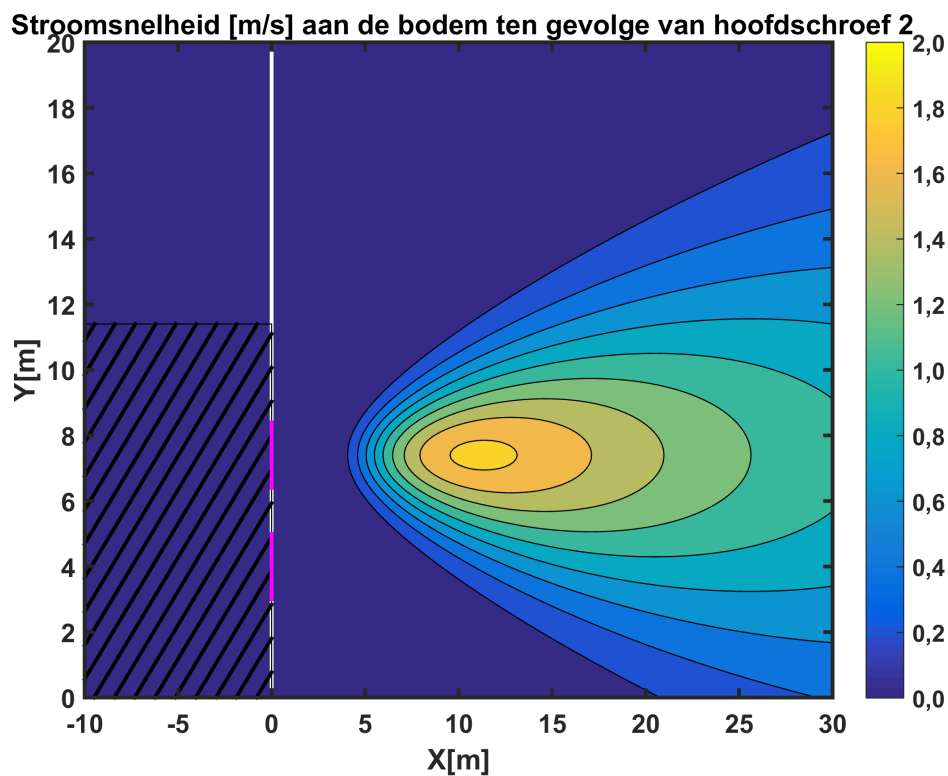
-	r	Afstand tot de lijn in het verlengde van de as van de schroef	[m]
-	y	Y-coördinaat punt	[m]
-	y_s	Y-coördinaat van de as van de betreffende schroef	[m]
-	d_p	Verticale afstand van de as van de schroef tot de bodem	[m]

Voor elke schroef afzonderlijk wordt op deze wijze de waarde van de stroomsnelheid aan de bodem berekend in de zone achter het schip. De resultaten van deze berekening zijn voorgesteld in Figuur 20 voor hoofdschroef 1 en in Figuur 21 voor hoofdschroef 2.

Figuur 20 – Stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van hoofdschroef 1



Figuur 21 – Stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van hoofdschroef 2



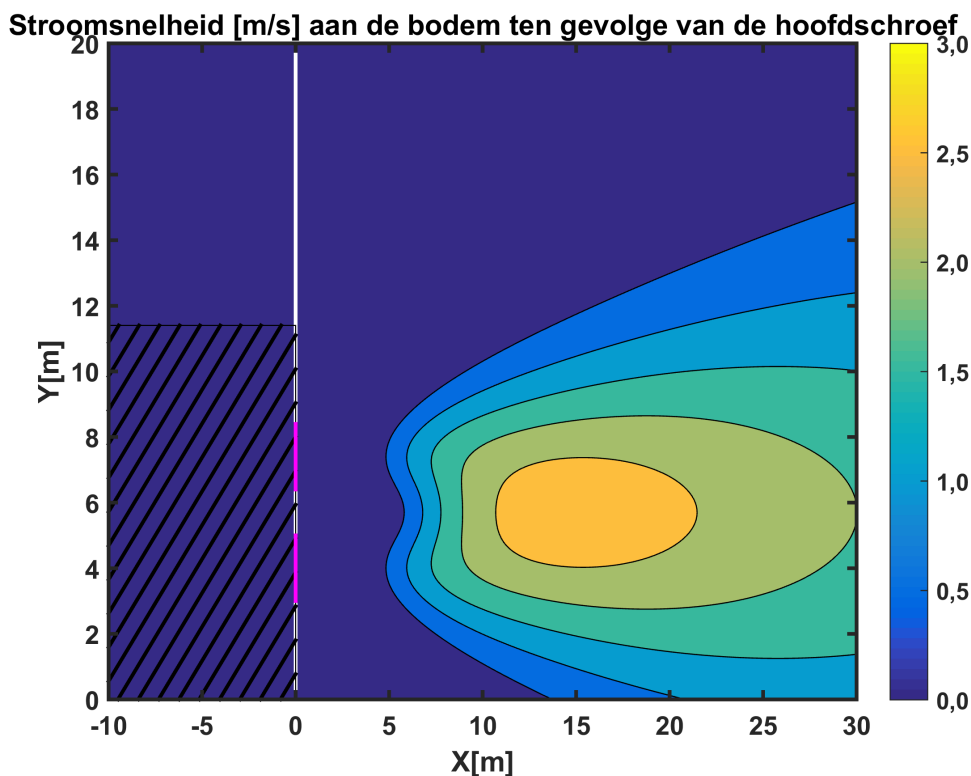
Volgens de PAO-cursus Ontwerp en uitvoering van kademuren (Blokland & Roubos, 2013) kan de berekening van het gecombineerde stroomveld aan de bodem ten gevolge van beide hoofdschroeven als volgt uitgevoerd worden:

- Lineaire superpositie: $U_{p,x,r\ 2schroeven} = U_{p,x,r\ schroef1} + U_{p,x,r\ schroef2}$
- Kwadratische superpositie: $U_{p,x,r\ 2schroeven} = \sqrt{U_{p,x,r\ schroef1}^2 + U_{p,x,r\ schroef2}^2}$

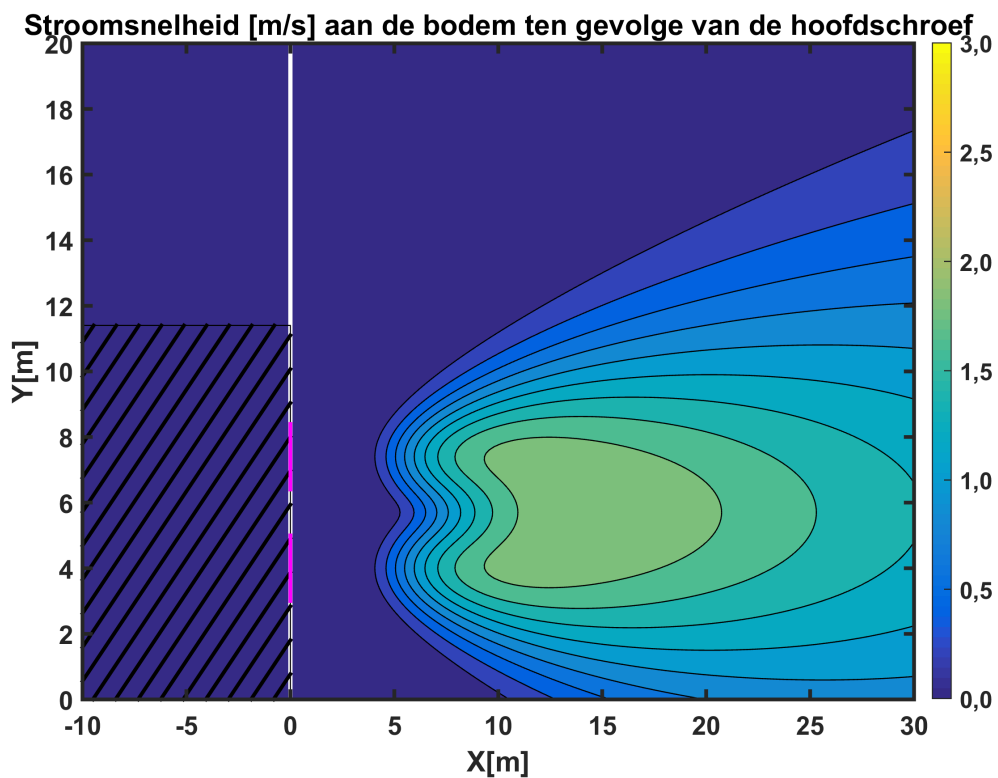
De PAO-cursus kaaimuren vermeldt hierbij dat lineaire superpositie aanleiding geeft tot een overschatting van de stroomsnelheid, maar dat kwadratische superpositie eerder aanleiding geeft tot een onderschatting van de stroomsnelheid.

De grafische voorstellingen van de stroomsnelheid aan de bodem berekend volgens deze beide methodes zijn gegeven in Figuur 22 (lineaire superpositie) en Figuur 23 (kwadratische superpositie). Uit deze figuren volgt dat bij kwadratische superpositie een maximale waarde van de stroomsnelheid aan de bodem van 2,0 m/s berekend wordt, wat lager is dan de waarde voor de maximale stroomsnelheid aan de bodem (2,5 m/s, zie Tabel 11 in paragraaf 3.3) berekend aan de hand van de formulerings uit de literatuur. Na lineaire superpositie wordt een maximale waarde voor de stroomsnelheid aan de bodem berekend van 2,8 m/s, wat hoger is dan de waarde berekend op basis van de formulerings uit de literatuur.

Figuur 22 – Stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de hoofdschroef na lineaire superpositie van de stroomsnelheid aan de bodem van beide hoofdschroeven



Figuur 23 – Stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de hoofdschroef na kwadratische superpositie van de stroomsnelheid aan de bodem van beide hoofdschroeven.



Spreiding stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de boegschroef

In paragraaf 3.4 zijn de formuleringen gegeven voor de berekening van de maximale stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de boegschroef.

Deze maximale waarden van de stroomsnelheid aan de bodem worden berekend voor een lijn op de bodem loodrecht op de kaaimuur ter plaatse van de as van de boegschroef.

Voor de spreiding van de stroomsnelheid aan de bodem ten opzichte van deze lijn worden in de literatuur geen formuleringen vermeld.

Om een indicatie te verkrijgen van de spreiding van de stroomsnelheid ten opzichte van deze lijn wordt verondersteld dat zich ter plaatse van de bodem een analoge spreiding voordoet als bij de jet ten gevolge van de hoofdschroef. Echter, nu wordt deze spreiding enkel berekend in een vlak ter plaatse van de bodem en niet in 3 dimensies zoals bij de hoofdschroef. Voor één schroef geeft dit voor het in Figuur 19 beschouwde domein volgende formuleringen:

$$v_{bp,xr} = \begin{cases} 1,0 & v_p \left(\frac{D_0}{d_p + y} \right) \exp \left(-15,4 \frac{r^2}{(d_p + y)^2} \right) & \text{als } \frac{y_{pq}}{d_p} \leq 1,8 \\ 2,8 & v_p \left(\frac{D_0}{y_{pq} + d_p + y} \right) \exp \left(-15,4 \frac{r^2}{(d_p + y)^2} \right) & \text{als } \frac{y_{pq}}{d_p} > 1,8 \end{cases}$$

Met:

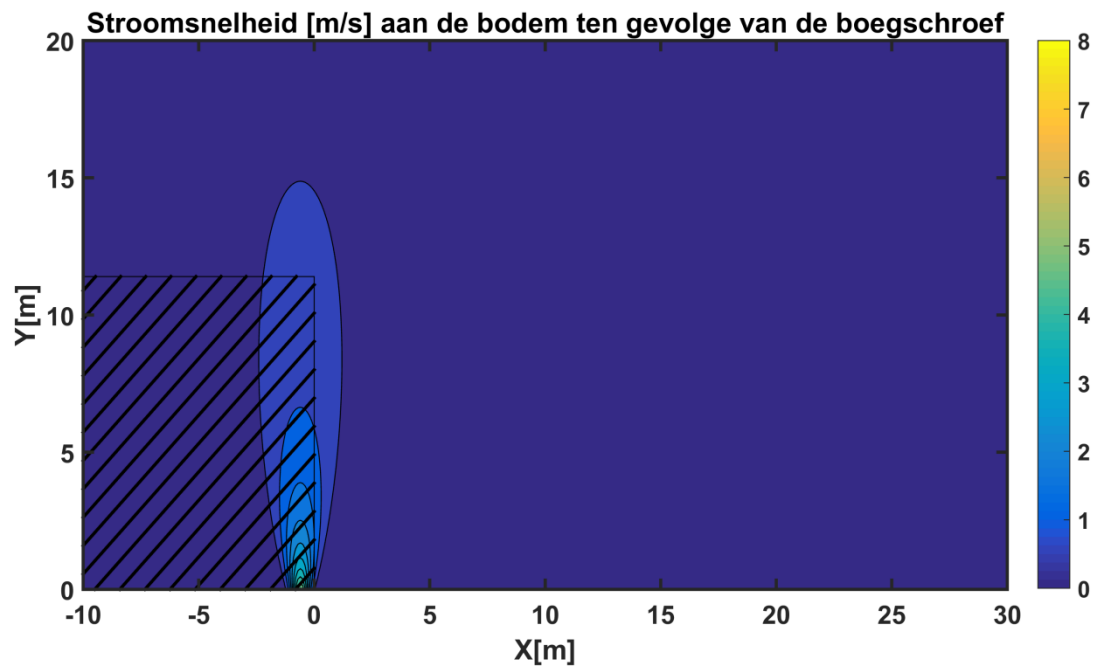
-	$v_{bp,xr}$	Stroomsnelheid aan de bodem ter plaatse van locatie x,r	[m/s]
-	v_p	Stroomsnelheid uittredende straal	[m/s]
-	D_0	Effectieve diameter van de schroef (= D_p)	[m]
-	d_p	Verticale afstand tussen straalas en bodem	[m]
-	y_{pq}	Afstand tussen zijkant schip en kaaimuur	[m]
-	y	Afstand tussen punt en de verticale wand (= y-coördinaat)	[m]
-	r	Afstand in x-richting tussen punt en lijn loodrecht op kaaimuur ter plaatse van de boegschroef (= $x_{\text{schroef}} - x$)	[m]
-	x_{schroef}	X-coördinaat van de boegschroef	[m]
-	x	X-coördinaat	
-	n	Aantal schroeven	[-]

Hierbij wordt opgemerkt dat het toevoegen van de exponentiële spreiding aan de formuleringen analoog is uitgevoerd als bij de hoofdschroef. De formuleringen voor de stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de boegschroef, gaan uit van het principe dat de straal tegen de kaaimuur botst, langs de kaaimuur verder loopt om dan langs de bodem verder te lopen als bodemstraal. De exponentiële spreiding is enkel berekend voor de straal tegen de bodem. In werkelijkheid zal na het botsen van de straal van de boegschroef tegen de kaaimuur zich langs de kaaimuur zelf al een uitspreiding van de straal voordoen, waarna de bodemstraal verder zal uitspreiden. Fysisch gezien is dit niet hetzelfde fenomeen.

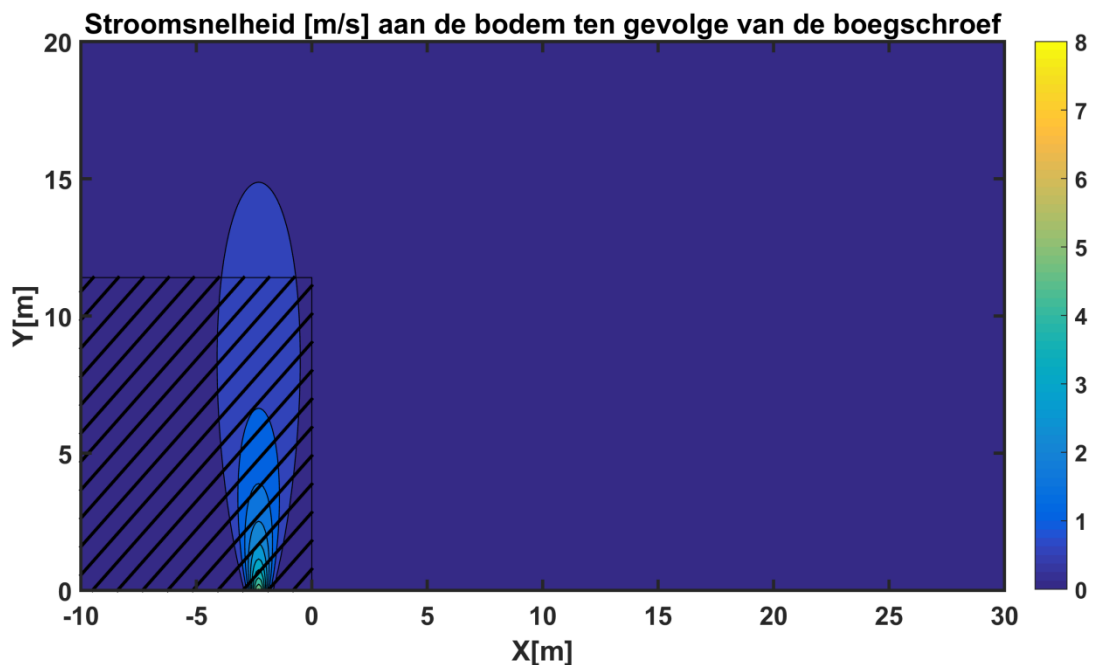
Gebruik makend van deze formulering wordt voor elke boegschroef de spreiding van de stroomsnelheid aan de bodem berekend. De grafische voorstelling van de stroming aan de bodem ten gevolge van de beide boegschroeven afzonderlijk is gegeven in Figuur 24 voor boegschroef 1 en Figuur 25 voor boegschroef 2.

De maximale waarde van de stroomsnelheid aan de bodem wordt bereikt ter plaatse van de kaaimuur en bedraagt voor beide boegschroeven 5,14 m/s, wat lager is dan de maximale waarde van 7,50 m/s (zie Tabel 13 in paragraaf 3.4) die beschouwd is voor dimensionering van de bodembescherming. Dit verschil wordt verklaard door het niet beschouwen van de factor $\sqrt{n}$ in de formuleringen voor de stroomsnelheid aan de bodem.

Figuur 24 – Stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van boegschroef 1.

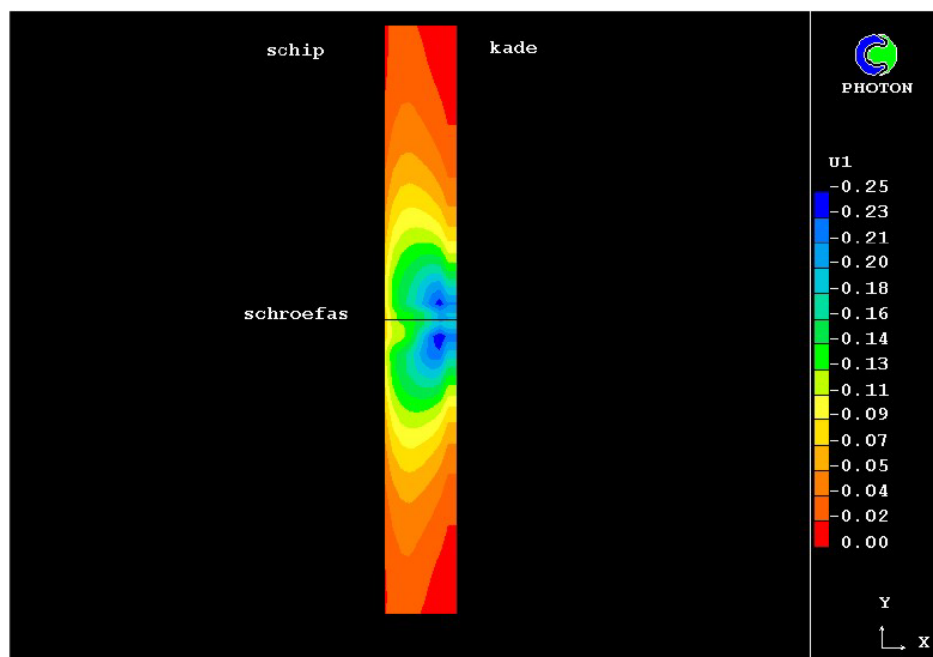


Figuur 25 – Stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van boegschroef 2.



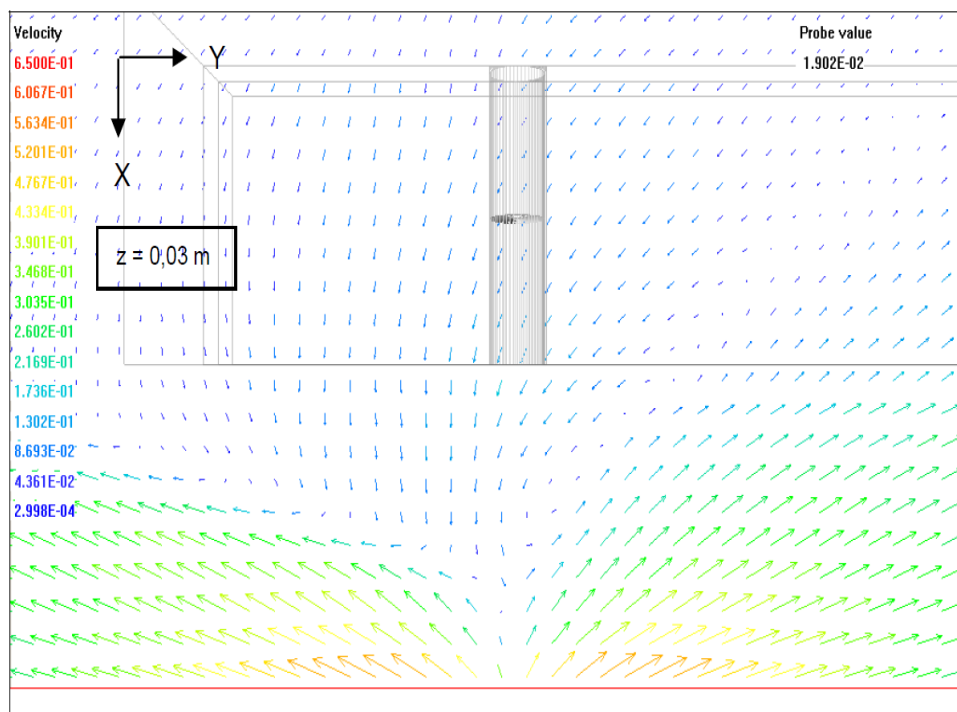
De resultaten van de stroomsnelheid aan de bodem uit Figuur 24 en Figuur 25 voor één boegschroef zijn daarna vergeleken met resultaten van numerieke simulaties (gebruik makend van CFD-modellering) van de stroomsnelheid aan de bodem van een afgemeerd schip uit de Jong (2003) en van der Laan (2005), zie Figuur 26 en Figuur 27.

Figuur 26 - Stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van één boegschroef van een afgemeerd schip.



Bron: de Jong (2003)

Figuur 27 – Stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van één boegschroef van een afgemeerd schip.



Bron: van der Laan (2005)

Bij deze stroombeelden berekend aan de hand van numerieke modellering en bij de resultaten uit eigen onderzoek merkt van Blaaderen (2006) op dat vergelijking met fysische modellering goede resultaten oplevert ter plaatse van de locatie van de boegschroef, maar minder goede overeenkomsten verder weg van de locatie van de boegschroef.

Hieruit volgt dat via CFD – modellering een beduidend verschillende stroombeeld wordt bekomen dan berekend op basis van de analytische formulerings, aangepast naar analogie met de stroomsnelheid ten gevolge van de hoofdschroef. Bijgevolg mag deze aanpassing niet toegepast worden. Aangezien in de Jong (2003) en van der Laan (2005) geen analytische formulerings voor de stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van één boegschroef van een afgemeerd schip afgeleid worden en aangezien het stroombeeld voor één boegschroef berekend aan de hand van numerieke modellering beduidend afwijkt dan dit berekend aan de hand van bovenstaande (aangepaste) analytische formulerings, wordt een superpositie van het de stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van twee boegschroeven niet uitgevoerd. Het is aanbevolen om hiervoor schaalmodelonderzoek of CFD-modellering toe te passen.

Bijlage 5: Rondvraag toepassing colloïdaal beton als bodembescherming

Aangezien bij de opdrachtgever geen voorbeelden van het gebruik van colloïdaal beton als bodembescherming gekend zijn, is door de opdrachtgever gevraagd om een korte rondvraag uit te voeren naar het gebruik van colloïdaal beton als bodembescherming bij overige waterwegbeheerders en in het buitenland. De rondvraag werd uitgestuurd naar de overige waterwegbeheerders in Vlaanderen. Bijkomend werden ook het Gemeentelijk Havenbedrijf Antwerpen (GHA), Laboratoire de Recherches Hydraulique de Châtelet onderdeel van Service Public de Wallonie, Rijkswaterstaat en Deltares uit Nederland, BundesAnstalt für Wasserbau uit Duitsland, Compagnie National du Rhône uit Frankrijk en het bedrijf Proserve Ltd. uit Engeland aangeschreven. Daarnaast werd de rondvraag ook uitgestuurd naar de Belgische Betongroepering, Febelcem en leveranciers van colloïdaal beton (Holcim, Inter-Beton).

Hierbij wordt opgemerkt dat de rondvraag enkel het gebruik van colloïdaal beton als bodembescherming betreft. Penetratie van breuksteen met colloïdaal beton behoort niet tot het onderwerp van de rondvraag.

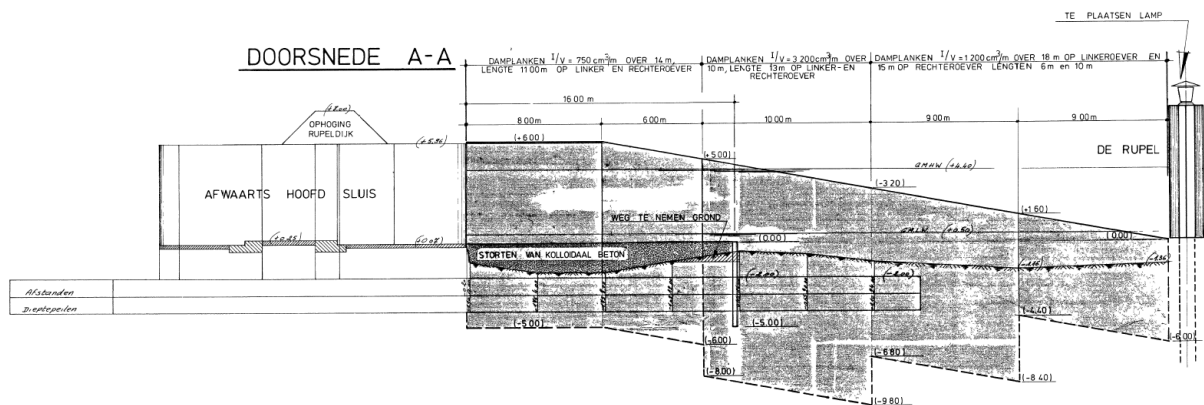
Antwoorden werden ontvangen van NV De Scheepvaart, W&Z nv afdeling Zeekanaal, GHA, Deltares, Rijkswaterstaat, CNR Lyon, Proserve Ltd en Febelcem.

Uit deze antwoorden op de rondvraag volgt dat slechts een zeer beperkt aantal voorbeelden zijn gekend van het gebruik van colloïdaal beton als bodembescherming. Uit de rondvraag volgt het volgende in verband met het gebruik van colloïdaal beton als bodembescherming:

- Bij de (op dit ogenblik in aanbouw) zijnde Deurganckdoksluis⁹ op de linkeroever van de haven van Antwerpen wordt een bodembescherming uit colloïdaal beton voorzien. Om constructieve redenen wordt hierbij een minimale dikte van 0,40 m voorzien. Bij het ontwerp van de bodembescherming werd door de aannemer gesteld dat een bodemhelling van 6 % (zelfs eerder 4 à 5 %) de maximale helling betreft voor het toepassen van colloïdaal beton als bodembescherming.
- Door het Gemeentelijk Havenbedrijf Antwerpen werd colloïdaal beton (met dikte 1,0 m) gestort ter bescherming van de leidingentunnel in de geul van de Petroleumbrug (ter plaatse van het Marshalldok). Daarnaast werd in het kanaaldok B2 colloïdaal beton gestort als ballast voor de Liefkenshoekspoortunnel onder de Schelde.
- Door W&Z nv Afdeling Zeekanaal werd in 1980 een bodembescherming in colloïdaal beton aangebracht afwaarts van de sluis van Klein-Willebroek (zie Figuur 28). Hierbij werd over een lengte van 16,0 m een bodembescherming uit colloïdaal beton aangebracht met een maximale dikte van 1,75 m. Als overgang naar de onbeschermd bodem werd aan het afwaartse uiteinde een damplank voorzien.

⁹ Bij opmaak van dit rapport was de sluis aan het einde van het Deurganckdok (werknaam: Deurganckdoksluis) op de linkeroever van de haven van Antwerpen nog in aanbouw. Bij afwerken van het rapport was deze sluis ingehuldigd als de Kieldrechtssluits en was deze reeds in gebruik genomen.

Figuur 28 – Bodembescherming in colloïdaal beton afwaarts van de sluis van Klein-Willebroek



Bron: NV Zeekanaal en haveninrichtingen van Brussel (1981)

- Door W&Z nv Afdeling Zeekanaal werd colloïdaal beton overwogen als bodembescherming voor boven de Rupeltunnel bij een toekomstige verdieping van het Zeekanaal Brussel-Schelde. Omdat dit als een te starre bodembescherming werd beschouwd, zijn nu betonnen matrassen gepland als bodembescherming boven de Rupeltunnel.
- In Nederland is geen voorbeeld gekend van het gebruik van colloïdaal beton als bodembescherming. Colloïdaal beton wordt in Nederland wel meer toegepast als oeververdediging.
- Door Proserve Ltd, verdeler van betonnen matrassen in Engeland, worden volgende aandachtspunten aangehaald in verband met het gebruik van colloïdaal beton als bodembescherming (zie ook Hawkswood *et al.* (2014)):
 - Colloïdaal beton heeft een lage grenssnelheid voor erosie in de periode voor het beton uitgehard is.
 - Colloïdaal beton kan niet gebruikt worden in zones met al te grote bodemhellingen. Dit is voornamelijk van belang bij het uitwerken van de beëindiging van de bodembescherming.
 - Het is moeilijk om betrouwbare voegen te vormen in colloïdaal beton.

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