



Vlaanderen
is wetenschap

Oudegem

Denderbelle

Mespelare

Molenstraat

15_062_4
WL rapporten

Ondersteuning ontwerp stuwsluis Denderbelle

Deelrapport 4
Dimensionering bodembescherming

DEPARTEMENT
MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

Ondersteuning ontwerp stuwsluis Denderbelle

Deelrapport 4 – Dimensionering bodembescherming

Verelst, K.; Visser, K.P.; 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 2017
D/2017/3241/136

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Verelst, K.; Visser, K.P.; Peeters, P.; Mostaert, F. (2017). Ondersteuning ontwerp stuwsuis Denderbelle: Deelrapport 4 – Dimensionering bodembescherming. Versie 4.0. WL Rapporten, 15_062_4. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

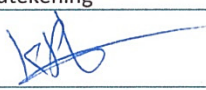
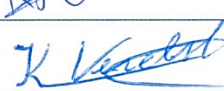
Tot en met de datum van vrijgave, kan overname uit en verwijzen naar deze publicatie enkel mits uitdrukkelijke en schriftelijke toestemming van de opdrachtgever of het Waterbouwkundig Laboratorium. Correcte bronvermelding is steeds noodzakelijk.

Documentidentificatie

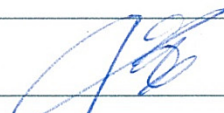
Opdrachtgever:	W&Z nv Afdeling Bovenschelde	Ref.:	WL2017R15_062_4
Keywords (3-5):	Denderbelle, stuwsuis, bodembescherming, ontwerp		
Tekst (p.):	60	Bijlagen (p.):	23
Vertrouwelijk	☒ Ja	Vrijgegeven vanaf:	01/01/2020
		Uitzondering:	☐ Vlaamse overheid

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

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Visser, K.P.	
Projectleider:	Verelst, K.	

Goedkeuring

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



Abstract

Bij Afdeling Bovenschelde van W&Z loopt momenteel een project voor de opwaardering van de Dender tot (scheepvaart-)klasse IV. Voor het stuwsluiscomplex te Denderbelle wordt hierbij een nieuwe sluis gebouwd op de linkeroever, naast de huidige sluis. De ontubbeling van de stuw wordt gerealiseerd door in de huidige sluiskolk een nieuwe stuw te bouwen en tegelijkertijd de huidige stuw te vervangen door een nieuwe stuw.

Voor het nieuwe stuwsluiscomplex te Denderbelle werd reeds een voorontwerp gemaakt. Dit voorontwerp werd in januari 2015 door het studiebureau SBE aan W&Z nv, Afdeling Bovenschelde overgemaakt. Het Waterbouwkundig Laboratorium leverde hiervoor een aantal inputs, namelijk een voorontwerp van een nivelleersysteem met openingen in de deuren en de dimensionering van de bodembescherming.

Voor het uitwerken van het finale ontwerp doet Afdeling Bovenschelde nu beroep op de afdelingen Expertise Beton en Staal (EBS), Elektromechanica en Telematica (EMT) en Geotechniek. Bij de verdere uitwerking is gebleken dat het voorgestelde nivelleersysteem constructief niet mogelijk was. Om die reden is door WL een nieuw hydraulisch ontwerp van het nivelleersysteem uitgevoerd. Omdat het nivelleersysteem van de nieuwe sluis gewijzigd is, dient de dimensionering van de bodembescherming deels opnieuw uitgevoerd te worden.

Voorliggend rapport beschrijft de bepaling van de hydraulische belastingen op de bodem en de dimensionering van de bodembescherming rekening houdend met dit nieuwe hydraulisch ontwerp van het nivelleersysteem. Hierbij wordt naast de wijziging van het nivelleersysteem van de nieuwe sluis ook rekening gehouden met een mogelijke waterpeildaling van 0.40 m in het afwaartse pand, gecombineerd met een verlaging van het drempelpeil naar – 0.28 m TAW en een verlaging van het bodempeil van de sluiskolk, naar – 0.78 m TAW. Daarnaast is in deze studie ook rekening gehouden met een aantal nieuwe inzichten met betrekking tot de berekening van de hydraulische belasting aan de bodem ten gevolge van scheepvaart, zoals opgedaan bij het ontwerp van de bodembescherming voor de nieuwe sluis te Sint-Baafs-Vijve.

Eerst zijn de hydraulische belastingen op de bodem bepaald onder invloed van schroefstraalstroming en retourstroming ten gevolge van scheepvaart, onder invloed van het nivelleren van de nieuwe sluis en onder invloed van waterafvoer in de normale toestand en bij was. Wat waterafvoer betreft, zijn zowel de afvoer van water via de 2 stuwen als de afvoer van water in twee noodscenario's (afvoer via één stuw, en afvoer via één stuw en de sluis) beschouwd. Daarna is het type bodembescherming bepaald voor de opwaartse en afwaartse voorhavens, de minimale strookbreedte voor de bodembescherming naast remmingwerken en kaaimuren (in wachtplaatsen) en de bodembescherming in de stuwgeulen.

Uit de dimensionering volgt dat een bodembescherming uit breuksteen voldoet in de opwaartse en afwaartse stuwgeulen en in de opwaartse en afwaartse voorhavens. In de opwaartse en afwaartse voorhavens dient wel een zone met een breedte van 3 meter naast een gesloten constructie (een kaaimuur of remmingswerk) gepenetreerd te worden met colloïdaal beton.

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	V
Lijst van de tabellen.....	VII
Lijst van de figuren	X
1 Inleiding	1
2 Gegevens en uitgangspunten	3
2.1 Voorontwerp sluiskolk, stuwen en nivelleersysteem	3
2.2 Waterpeilen	8
2.3 Ontwerpschip	10
2.4 Bodemsamenstelling	11
2.5 Breuksteensorteringen	11
3 Hydraulische belasting op de bodem	14
3.1 Algemeen.....	14
3.2 Stroming ten gevolge van nivelleren van de sluiskolk.....	15
3.2.1 Algemeen	15
3.2.2 Berekening van de maximale stroomsnelheid aan de bodem opwaarts van de sluisdeur	16
3.2.3 Berekening van de maximale stroomsnelheid aan de bodem afwaarts van de sluisdeur	18
3.3 Stroming ten gevolge van de hoofdschroef.....	21
3.4 Stroming ten gevolge van de boegschroef	24
3.5 Retourstroming ten gevolge van scheepvaart.....	28
3.6 Stroming ten gevolge van waterafvoer	30
4 Dimensionering bodembescherming	35
4.1 Algemeen.....	35
4.2 Methodologie bepaling type bodembescherming	36
4.2.1 Breuksteenbekleding	36
4.2.2 Gepenetreerde breuksteen	37
4.2.3 Bodembescherming uit beton	40
4.3 Resultaten dimensionering bodembescherming onderhevig aan stroming ten gevolge van scheepvaart en nivelleren sluiskolk.....	42
4.3.1 Algemeen	42
4.3.2 Bepaling type bodembescherming	43
4.3.3 Lengte bodembescherming opwaarts en afwaarts van de nieuwe sluis.....	44

4.3.4	Minimale strookbreedte bodembescherming naast remmingswerken en kaaimuren.....	46
4.3.5	Samenvatting benodigde bodembescherming onderhevig aan stroming ten gevolge van scheepvaart en nivelleren sluiskolk.....	48
4.4	Resultaten dimensionering bodembescherming onderhevig aan stroming ten gevolge van waterafvoer	49
4.5	Filterlagen	53
4.6	Overgangsconstructies en beëindiging van de bodembescherming.....	54
5	Conclusies	56
6	Referenties	59
Bijlage 1: Plannen nieuwe sluis		B1
Bijlage 2: Tabellen berekening hydraulische belasting		B5
Bijlage 3: Tabellen dimensionering bodembescherming		B13
	Resultaten berekening mediaan breuksteendiameter en mediaan breuksteengewicht.....	B13
	Resultaten berekening lengte bodembescherming	B18
	Resultaten berekening breedte bodembescherming.....	B22

Lijst van de tabellen

Tabel 1 - Belangrijkste afmetingen en peilen met betrekking tot het ontwerp van de sluis	6
Tabel 2 - Maximum debiet, tijdstip van voorkomen van het maximum debiet en waterstand in de sluiskolk bij maximum debiet bij vullen en ledigen van de volledige sluiskolk, de opwaartse en de afwaartse kolk.	7
Tabel 3 – Ontwerpwaterpeilen.....	8
Tabel 4 – Waterpeilen en debieten in de normale toestand en bij was	9
Tabel 5 - Afmetingen ontwerpschepen	10
Tabel 6 - Karakteristieke hoofdschroef en boegschroef voor een schip CEMT klasse IV.....	11
Tabel 7 – Beschouwde breuksteensorteringen.....	11
Tabel 8 – Lichtere breuksteensorteringen	12
Tabel 9 – Parameters berekening stroomsnelheid boven de bodem opwaarts van de sluisdeur in het bovenhoofd ten gevolge van vullen van de sluiskolk.....	17
Tabel 10 - Stroomsnelheid boven de bodem aan het begin van de bodembescherming ($X = 8$ m) opwaarts van de sluiskolk ten gevolge van vullen van de volledige sluiskolk via het bovenhoofd.	18
Tabel 11 – Berekening maximale stroomsnelheid nabij de bodem afwaarts van het benedenhoofd ten gevolge van ledigen sluiskolk	19
Tabel 12 – Maximale stroomsnelheid boven de bodem afwaarts van de sluiskolk ten gevolge van ledigen van de volledige sluiskolk via het benedenhoofd	19
Tabel 13 – Overzicht berekende maximale stroomsnelheden boven de bodem ten gevolge van hoofdschroef.	23
Tabel 14 – 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.....	25
Tabel 15 – Overzicht maximale waarde van de stroomsnelheid boven de bodem ten gevolge van boegschroeven bij aanmeren aan een kaaimuur of manoeuvreren naast een remmingswerk in de opwaartse en de afwaartse voorhaven.....	26
Tabel 16 – Berekening stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van retourstroming in de opwaartse en de afwaartse voorhaven.....	29
Tabel 17 – Maximale waarde van de stroomsnelheid boven de bodem ten gevolge van retourstroming	29
Tabel 18 - Locatie sectie 1 tot en met sectie 12	30
Tabel 19 - Berekende stroomsnelheid in de gedefinieerde secties in de normale toestand en in wasregime	34
Tabel 20 - Breuksteensortering vòòr grouting	38
Tabel 21 – Optredende hydraulische belastingen ten gevolge van scheepvaart.....	42
Tabel 22 - Benodigd mediaan breuksteengewicht M_{50} en overeenkomstige breuksteensortering voor de gedefinieerde zones om te weerstaan aan stroming ten gevolge van scheepvaart en nivelleren sluiskolk.	43
Tabel 23 – Overzicht berekende lengte bodembescherming voor opwaartse en de afwaartse voorhaven ..	46

Tabel 24 – Samenvatting bodembescherming onderhevig aan stroming ten gevolge van scheepvaart en nivelleren sluisolk	48
Tabel 25 - Benodigd mediaan breuksteengewicht M_{50} en overeenkomstige breuksteensortering voor de gedefinieerde secties en de beschouwde condities om te weerstaan aan stroming ten gevolge van waterafvoer	49
Tabel 26 – Benodigde bodembescherming voor de gedefinieerde zones om te weerstaan aan stroming ten gevolge van waterafvoer	51
Tabel 27 – Maximale stroomsnelheden voor beton in huidige stuwgeul en huidige sluisolk	51
Tabel 28 – Samenvatting voorgestelde bodembescherming opwaartse en afwaartse voorhaven (zie ook Figuur 19).....	57
Tabel 29 – Samenvatting voorgestelde bodembescherming opwaartse en afwaartse stuwgeulen (zie ook Figuur 19).....	57
Tabel 30 – Resultaten berekening maximale stroomsnelheid boven bodem ter plaatse van de fuik en zone naast remmingswerken in de opwaartse en afwaartse voorhaven ten gevolge van de hoofdschroef bij binnenvaren van de nieuwe sluis.	B5
Tabel 31 – Resultaten berekening maximale stroomsnelheid boven bodem ter plaatse van de kaaimuren in de opwaartse en afwaartse voorhaven ten gevolge van de hoofdschroef bij aanmeren.....	B6
Tabel 32 – Resultaten berekening maximale stroomsnelheid boven de bodem in de fuik van de opwaartse en de afwaartse voorhaven ten gevolge van de boegschroef bij invaren van de nieuwe sluis.	B7
Tabel 33 – Resultaten berekening maximale stroomsnelheid boven de bodem in de opwaartse voorhaven ten gevolge van de boegschroef bij aanmeren aan een kaaimuur of manoeuvreren naast een remmingswerk.....	B8
Tabel 34 – Resultaten berekening maximale stroomsnelheid boven de bodem in de afwaartse voorhaven ten gevolge van de boegschroef bij aanmeren aan een kaaimuur of manoeuvreren naast een remmingswerk.....	B9
Tabel 35 – Resultaten berekening dieptegemiddelde stroomsnelheid ter plaatse van de verschillende secties ten gevolge van waterafvoer bij afvoer via 2 stuwen.	B10
Tabel 36 – Resultaten berekening dieptegemiddelde stroomsnelheid ter plaatse van de verschillende secties ten gevolge van waterafvoer bij noodscenario 1.	B11
Tabel 37 – Resultaten berekening dieptegemiddelde stroomsnelheid ter plaatse van de verschillende secties ten gevolge van waterafvoer bij noodscenario 2.	B12
Tabel 38 – Resultaten berekening mediaan breuksteendiameter en mediaan breuksteengewicht volgens de Shields-formulering aangepast voor stralen voor de wachtplaats en het remmingswerk in de opwaartse en de afwaartse voorhaven	B13
Tabel 39 – Resultaten berekening mediaan breuksteendiameter en mediaan breuksteengewicht volgens de Shields-formulering aangepast voor stralen voor fuik in de opwaartse voorhaven	B14
Tabel 40 – Resultaten berekening mediaan breuksteendiameter en mediaan breuksteengewicht volgens de Shields-formulering aangepast voor stralen voor fuik in de afwaartse voorhaven	B14
Tabel 41 – Resultaten berekening mediaan breuksteendiameter en mediaan breuksteengewicht aan de hand van de formulering volgens Pilarczyk voor stroming ten gevolge van waterafvoer voor sectie 4, sectie 5, sectie 6 en sectie 7.	B15
Tabel 42 – Resultaten berekening mediaan breuksteendiameter en mediaan breuksteengewicht aan de hand van de formulering volgens Pilarczyk voor stroming ten gevolge van waterafvoer voor sectie9, sectie 10 en sectie 12.....	B16

Tabel 43 – Resultaten berekening mediaan breuksteendiameter en mediaan breuksteengewicht aan de hand van de formulering volgens Pilarczyk voor stroming ten gevolge van waterafvoer voor sectie1, sectie 2, sectie 3, sectie 8 en sectie 11.	B17
Tabel 44 – Berekening lengte bodembescherming afwaarts van de nieuwe sluis ten gevolge van ledigingsstroming.	B18
Tabel 45 - Berekening lengte bodembescherming in de opwaartse en afwaartse voorhaven ten gevolge van retourstroming.	B19
Tabel 46 - Berekening lengte bodembescherming in de fuik van de opwaartse en de afwaartse voorhaven voor stroming ten gevolge van schroefstraalwerking volgens theorie van erosie achter ronde straal.	B20
Tabel 47 – Berekening lengte bodembescherming in de fuik van de opwaartse en de afwaartse voorhaven voor stroming ten gevolge van schroefstraalwerking volgens theorie van straa spreiding.....	B21
Tabel 48 –Berekening breedte bodembescherming ter plaatse van wachtplaatsen en remmingswerken in de opwaartse en afwaarse voorhaven voor stroming ten gevolge van schroefstraalwerking volgens theorie van erosie achter ronde straal.	B22
Tabel 49 - Berekening breedte bodembescherming ter plaatse van wachtplaatsen en remmingswerken in de opwaartse en de afwaartse voorhaven voor stroming ten gevolge van schroefstraalwerking volgens theorie van straa spreiding.....	B23

Lijst van de figuren

Figuur 1 - Situering sluis Denderbelle (Bron: Google Earth).....	1
Figuur 2 - Grondplan nieuwe sluis en stuwen en toegepaste naamgeving en nummering van zones.....	3
Figuur 3 – Dwarsdoorsnede nieuwe sluis en stuwen.....	4
Figuur 4 - Bestaande erosiebescherming en zone waarvoor erosiebescherming dient gedimensioneerd te worden.	5
Figuur 5 - Bodembescherming afwaarts van de huidige sluis, bestaande uit droog beton in visgraatverband	5
Figuur 6 – Voorontwerp nieuwe sluis Denderbelle.....	6
Figuur 7 - Debiet bij vullen en ledigen van de volledige sluiskolk, de opwaartse kolk en de afwaartse kolk ...	7
Figuur 8 - Stroming door een sluisdeur ten gevolge van nivelleren van de sluiskolk.	15
Figuur 9 – Variatie van de stroomsnelheid aan de bodem opwaarts van de sluisdeur in het bovenhoofd in functie van de afstand tot de sluisdeur.....	17
Figuur 10 – 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.....	20
Figuur 11 – Afstand tussen uitlaat van de boegschroef en de kaaimuur voor een binnenschip CEMT klasse Va.....	25
Figuur 12 – Variatie van de stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de boegschroef bij aanmeren aan een kaaimuur of manoeuvreren naast een remmingswerk, in functie van de afstand tot de verticale wand.	27
Figuur 13 - Gedefinieerde secties voor berekening stroomsnelheden.....	30
Figuur 14 – Stromingspatroon opwaarts en afwaarts van een vernauwing	32
Figuur 15 – Verband tussen maximaal toegelaten stroomsnelheid en breuksteendiameter voor (met beton) gepenetreerde breuksteen.....	38
Figuur 16 – Bodembescherming onderhevig aan stroming ten gevolge van scheepvaart en nivelleren sluiskolk	48
Figuur 17 – Zones benodigde bodembescherming onderhevig aan stroming ten gevolge van waterafvoer	50
Figuur 18 – Beëindiging bodembescherming uit Open steenasfalt bij stuwsuis Asper	55
Figuur 19 – Zonering voorgestelde bodembekleding (zie ook Tabel 28 en Tabel 29).....	56
Figuur 20 – Grondplan nieuwe sluis en nieuwe stuwen	B1
Figuur 21 – Planzicht opwaartse voorhaven	B2
Figuur 22 – Planzicht afwaartse voorhaven	B3
Figuur 23 – Langsdoorsnede nieuwe sluis en nieuwe stuwen	B4

1 Inleiding

Bij Afdeling Bovenschelde van W&Z loopt momenteel een project voor de opwaardering van de Dender tot (scheepvaart-)klasse IV.

Voor het stuwsluiscomplex te Denderbelle wordt hierbij een nieuwe sluis gebouwd op de linkeroever, naast de huidige sluis. De ont dubbeling van de stuw wordt gerealiseerd door in de huidige sluiskolk een nieuwe stuw te bouwen en tegelijkertijd de huidige stuw te vervangen door een nieuwe stuw.

Figuur 1 situeert de ligging van de huidige sluis te Denderbelle.

Figuur 1 - Situering sluis Denderbelle (Bron: Google Earth)



Voor het nieuwe stuwsluiscomplex te Denderbelle werd reeds een voorontwerp gemaakt door het studie bureau SBE en in januari 2015 aan W&Z nv, Afdeling Bovenschelde overgemaakt. Het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) leverde hiervoor een aantal inputs. Zo werd door het WL in 2010 reeds een voorontwerp gemaakt van een nivelleersysteem met openingen in de deuren (Verelst *et al.*, 2010) en werd de dimensionering van de bodembescherming uitgevoerd (Verelst *et al.*, 2013).

Voor het uitwerken van het finale ontwerp doet Afdeling Bovenschelde (contactpersoon: ir. Lien Vanhoutte) nu beroep op de afdelingen Expertise Beton en Staal (EBS), Elektromechanica en Telematica (EMT) en Geotechniek. Bij de verdere uitwerking van het finale ontwerp is gebleken dat het reeds ontworpen nivelleersysteem constructief niet mogelijk is. Om die reden is door WL een nieuw hydraulisch ontwerp van het nivelleersysteem uitgevoerd. Dit is beschreven in Verelst *et al.* (2016a) en bestaat uit 6 rechthoekige openingen in de puntdeuren met breedte 0.90 m en hoogte 0.90 m afgesloten met hefschuiven.

Omdat het nivelleersysteem van de nieuwe sluis gewijzigd is, dient de dimensionering van de bodembescherming deels opnieuw uitgevoerd te worden. Daarnaast wordt in het nieuwe ontwerp van de sluis ook rekening gehouden met een mogelijke waterpeildaling van 0.40 m in het afwaartse pand. Het streefpeil in het afwaarts kanaalpand verlaagt hierdoor tot + 3.45 m TAW. Rekening houdend met deze mogelijke waterpeildaling is door de opdrachtgever ook gesteld dat het drempelpeil, respectievelijk het bodempeil van de sluiskolk en het bodempeil van de afwaartse voorhaven verlaagd dienen te worden met 0.60 m tot – 0.28 m TAW, respectievelijk – 0.78 m TAW. Hierbij wordt door de opdrachtgever 0.20 m extra kielspeling in rekening gebracht. De wijziging van het bodempeil van de afwaartse voorhaven zorgt ervoor dat de dimensionering van de bodembescherming in het afwaartse kanaalpand opnieuw dient uitgevoerd te worden.

In het opwaarts kanaalpand blijft het bodempeil behouden, waardoor de bepaling van de hydraulische belasting aan de bodem ten gevolge van schroefstraalwerking van scheepvaart in theorie niet opnieuw uitgevoerd dient te worden. Echter, bij het ontwerp van de bodembescherming voor de nieuwe sluis te Sint-Baafs-Vijve (Verelst *et al.*, 2016b) zijn een aantal nieuwe inzichten opgedaan met betrekking tot de berekening van de hydraulische belasting aan de bodem ten gevolge van scheepvaart. Bij de dimensionering van de bodembescherming in deze studie zal hiermee ook rekening gehouden worden, waardoor ook in het opwaartse kanaalpand de dimensionering van de bodembescherming opnieuw uitgevoerd zal worden.

Voorliggend rapport beschrijft de bepaling van de hydraulische belastingen op de bodem en de dimensionering van de bodembescherming voor de nieuwe stuwsuis te Denderbelle. Hierbij wordt opgemerkt dat een dimensionering van de overige erosiebescherming (oeverbescherming, ...) niet tot het onderwerp van deze studie behoort.

Hoofdstuk 2 van dit rapport vat de gebruikte gegevens samen voor de uitvoering van de berekeningen en de dimensionering van de bodembescherming.

De bepaling van de hydraulische belasting op de bodem wordt beschreven in Hoofdstuk 3

Hoofdstuk 4 beschrijft de dimensionering van de bodembescherming.

Hoofdstuk 5 vat de conclusies van dit rapport samen.

2 Gegevens en uitgangspunten

2.1 Voorontwerp sluiskolk, stuwen en nivelleersysteem

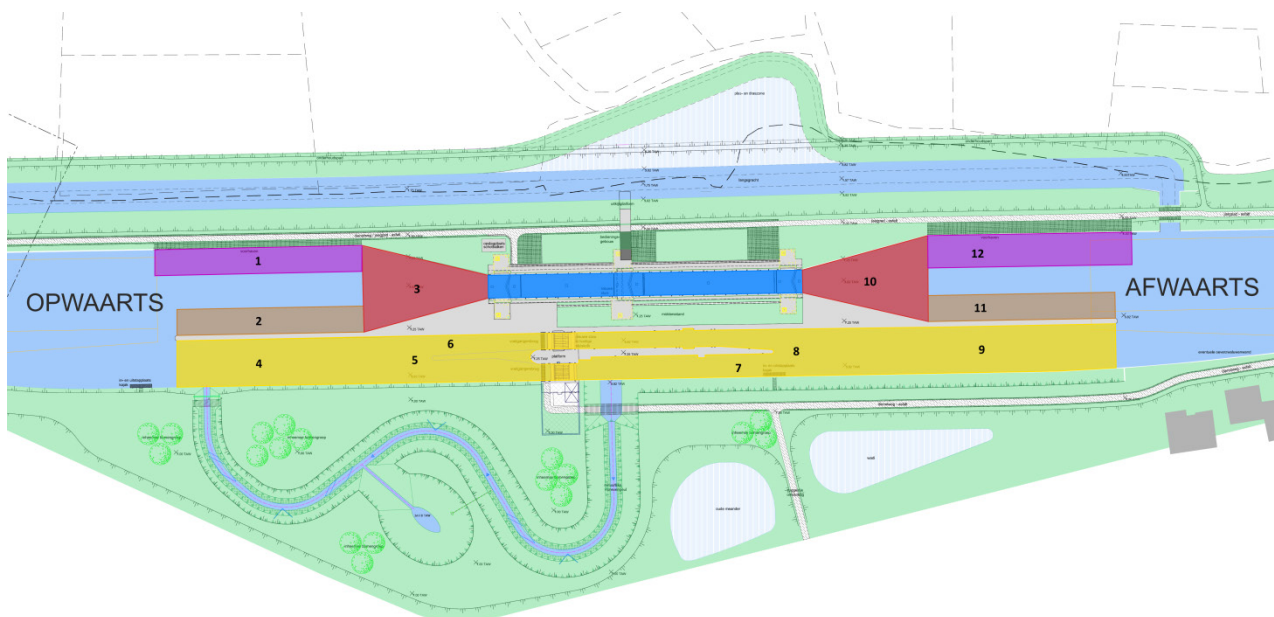
Uit de omgevingsanalyse (SBE & Omgeving, 2010) volgt dat de nieuwe sluis van Denderbelle bij voorkeur aangelegd wordt op linkeroever, naast de huidige sluis. In het behouden concept voor de stuwsluis wordt een ontdebbling van de stuw gerealiseerd door in de huidige sluiskolk een nieuwe stuw te bouwen en tegelijkertijd de huidige stuw te vervangen door een nieuwe stuw op dezelfde locatie. (Zie Figuur 2). Voor de stuwen werd in SBE & Omgeving (2010) een minimum breedte van 2 x 7.0 m vooropgesteld. Om de breedte van 7.5 m van de huidige sluis volledig te benutten en een betere inpassing in de huidige sluiskolk te bewerkstelligen zullen twee stuwen van 7.5 m (Obermeyerstuwen) gerealiseerd worden.

Een grondplan en langsdoorsnede van de sluis en een planzicht van de opwaartse en afwaartse voorhavens zijn gegeven in Figuur 20, Figuur 21, Figuur 22 en Figuur 23 in Bijlage 1. Figuur 3 geeft een grondplan van de nieuwe sluis met aanduiding van volgende naamgeving:

- Nieuwe sluiskolk (blauw gekleurd).
- De fuiken (rood gekleurd).
- De zone naast de remmingswerken is bruin gekleurd.
- De wachtplaatsen zijn 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 stuwgeulen in het opwaartse en afwaartse pand zijn geel gekleurd.

In Figuur 3 is ook de nummering weergegeven van de zones die later in dit rapport wordt toegepast.

Figuur 2 - Grondplan nieuwe sluis en stuwen en toegepaste naamgeving en nummering van zones



Bron: SBE (2011b); Blauw: nieuwe sluis, rood: fuiken; bruin: remmingswerken; paars: wachtplaatsen; geel: stuwgeulen; Nummering van zones in zwart wordt later in dit rapport toegepast.

In Figuur 4 is een dwarsdoorsnede door de nieuw te bouwen sluis, de stuw in de huidige sluiskolk en de stuw ter plaatse van de huidige stuw gegeven. De voor deze studie relevante peilen zijn ook in deze figuren weergegeven. De peilen houden rekening met de verlaging van het waterpeil in de afwaartse voorhaven tot + 3.45 m TAW en de bijbehorende verlaging van het bodempeil van de afwaartse voorhaven tot - 0.78 m TAW.

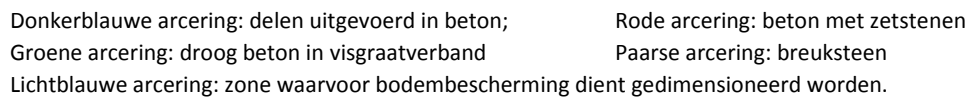
Figuur 3 – Dwarsdoorsnede nieuwe sluis en stuwen



a: Dwarsdoorsnede nieuwe sluis (SBE, 2011c); b: Dwarsdoorsnede nieuwe stuw in de huidige sluiskolk (SBE, 2011d);
c: Dwarsdoorsnede nieuwe stuw ter plaatse van de huidige stuw (SBE, 2011d).

Met het oog op de dimensionering van de erosiebescherming wordt het volgende opgemerkt inzake de bouw van de nieuwe sluis en de stuwen en de reeds aanwezige erosiebescherming (zie ook Figuur 4, Ministerie van Openbare Werken - Bruggen en Wegen (1950a; b)):

- De bouwput van de nieuwe sluis wordt afgebakend met damplanken. Binnen deze bouwput wordt de vloer in beton uitgevoerd (donkerblauwe arcering in Figuur 4).
- De bouwput van de bestaande sluis (met lengte 83.1 m) is ook afgebakend met damplanken, waarbinnen de sluiskolkvloer is uitgevoerd in beton (donkerblauwe arcering in Figuur 4).
- Opwaarts van de bestaande sluis en opwaarts van de bestaande stuw is over een lengte van respectievelijk 25 m en 50 m een vloer uitgevoerd in beton als erosiebescherming aanwezig (donkerblauwe arcering in Figuur 4).
- Afwaarts van de bestaande sluis is over een lengte van 25 m een bodembescherming bestaande uit droog beton in visgraatverband als erosiebescherming aanwezig (groene arcering in Figuur 4; voorgesteld in Figuur 5).
- Afwaarts van de bestaande stuw is over een lengte van 65 m een erosiebescherming bestaande uit beton met zetstenen aanwezig (rood gearceerd in Figuur 4). De zetstenen zorgen voor de energiedissipatie afwaarts van de huidige stuw. Afwaarts van deze erosiebescherming is een breuksteenbestorting over een lengte van 25 m (paars gearceerd in Figuur 4) aanwezig. Het exacte kaliber van deze breuksteenbestorting is niet gekend.



Technical drawing of a bridge deck layout, showing two cross-sections, D and D', with dimensions and structural details.

Section D (Left):

- Overall width: 25.00
- Top flange width: 13.50
- Top flange thickness: 1.00
- Web thickness: 0.50
- Bottom flange width: 10.00
- Bottom flange thickness: 1.00
- Deck thickness: 0.20
- Structural details: Reinforcement bars (circles) and a central cross-section of a T-beam.

Section D' (Right):

- Overall width: 25.30
- Top flange width: 13.50
- Top flange thickness: 1.00
- Web thickness: 0.50
- Bottom flange width: 10.00
- Bottom flange thickness: 1.00
- Deck thickness: 0.20
- Structural details: Reinforcement bars (circles) and a central cross-section of a T-beam.

Section D'' (Bottom):

- Overall width: 25.00
- Top flange width: 13.50
- Top flange thickness: 1.00
- Web thickness: 0.50
- Bottom flange width: 10.00
- Bottom flange thickness: 1.00
- Deck thickness: 0.20
- Structural details: Reinforcement bars (circles) and a central cross-section of a T-beam.

Section D''' (Bottom Right):

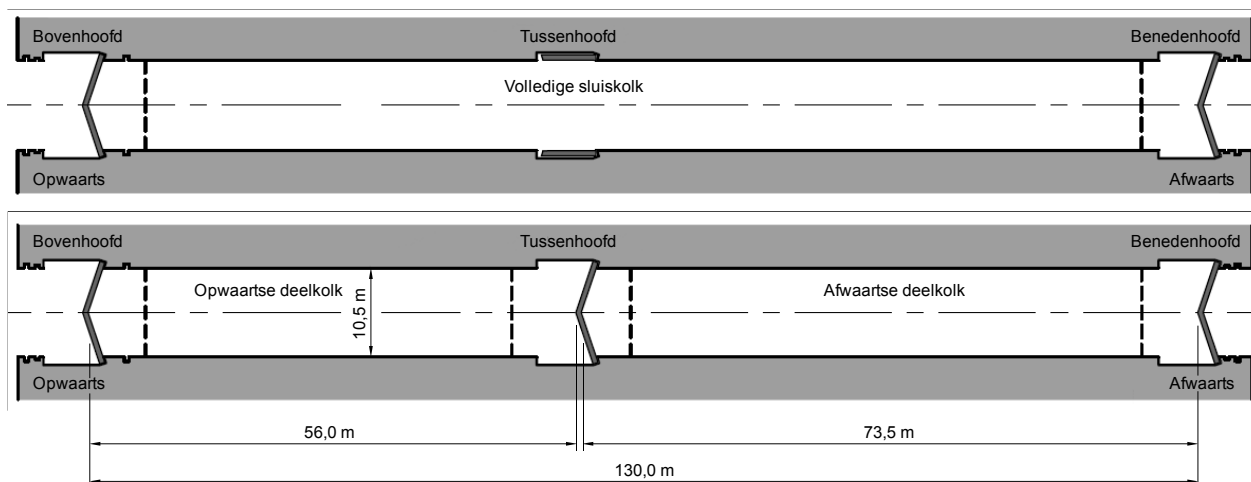
- Overall width: 25.10
- Top flange width: 13.50
- Top flange thickness: 1.00
- Web thickness: 0.50
- Bottom flange width: 10.00
- Bottom flange thickness: 1.00
- Deck thickness: 0.20
- Structural details: Reinforcement bars (circles) and a central cross-section of a T-beam.

Het voorontwerp van de nieuwe sluis bestaat uit een kolk met tussendeuren. Hierbij wordt één kolk ontworpen voor schepen CEMT-klasse I en één kolk ontworpen voor schepen CEMT-klasse II. De combinatie van deze beide kolken laat toe een schip CEMT-klasse IV te verschutten. De sluisdeuren betreffen puntdeuren.

- Volledige sluiskolk: De sluiskolk waarbij de sluisdeuren van het bovenhoofd en de sluisdeuren van het benedenhoofd gesloten zijn. De sluisdeuren van het tussenhoofd zijn open.
- Opwaartse deelkolk: De sluiskolk waarbij de sluisdeuren van het bovenhoofd en de sluisdeuren van het tussenhoofd gesloten zijn. De sluisdeuren van het benedenhoofd zijn open. Dit is de kleinste sluiskolk bij gebruik van de tussendeuren.
- Afwaartse deelkolk: De sluiskolk waarbij de sluisdeuren van het tussenhoofd en de sluisdeuren van het benedenhoofd gesloten zijn. De sluisdeuren van het bovenhoofd zijn open. Deze kolk is de grotere sluiskolk bij gebruik van de tussendeuren.

Figuur 6 geeft een schets van de sluis, voor zowel de volledige sluiskolk als voor de 2 kleinere sluiskolken. Een overzicht van de belangrijkste afmetingen en peilen met betrekking tot het ontwerp van de nieuwe sluis zijn gegeven in Tabel 1.

Figuur 6 – Voorontwerp nieuwe sluis Denderbelle



Tabel 1 - Belangrijkste afmetingen en peilen met betrekking tot het ontwerp van de sluis

Totale lengte opwaartse deelkolk	56,0 m
Totale lengte afwaartse deelkolk	73,5 m
Totale lengte volledige sluiskolk	130,0 m
Breedte sluiskolk	10,5 m
Bodempeil sluiskolk	– 0,78 m TAW
Drempelpeil opwaarts	– 0,28 m TAW
Drempelpeil afwaarts	– 0,28 m TAW
Type sluisdeur bovenhoofd	Puntdeuren
Type sluisdeur tussenhoofd	Puntdeuren
Type sluisdeur benedenhoofd	Puntdeuren
Type nivelleersysteem	Rechthoekige openingen afgesloten met hefschuiven
Aantal openingen in de deur	6
Afmetingen openingen in de deur	Breedte: 0,90 m Hoogte: 0,90 m
Peil onderzijde openingen	+ 0,15 m TAW

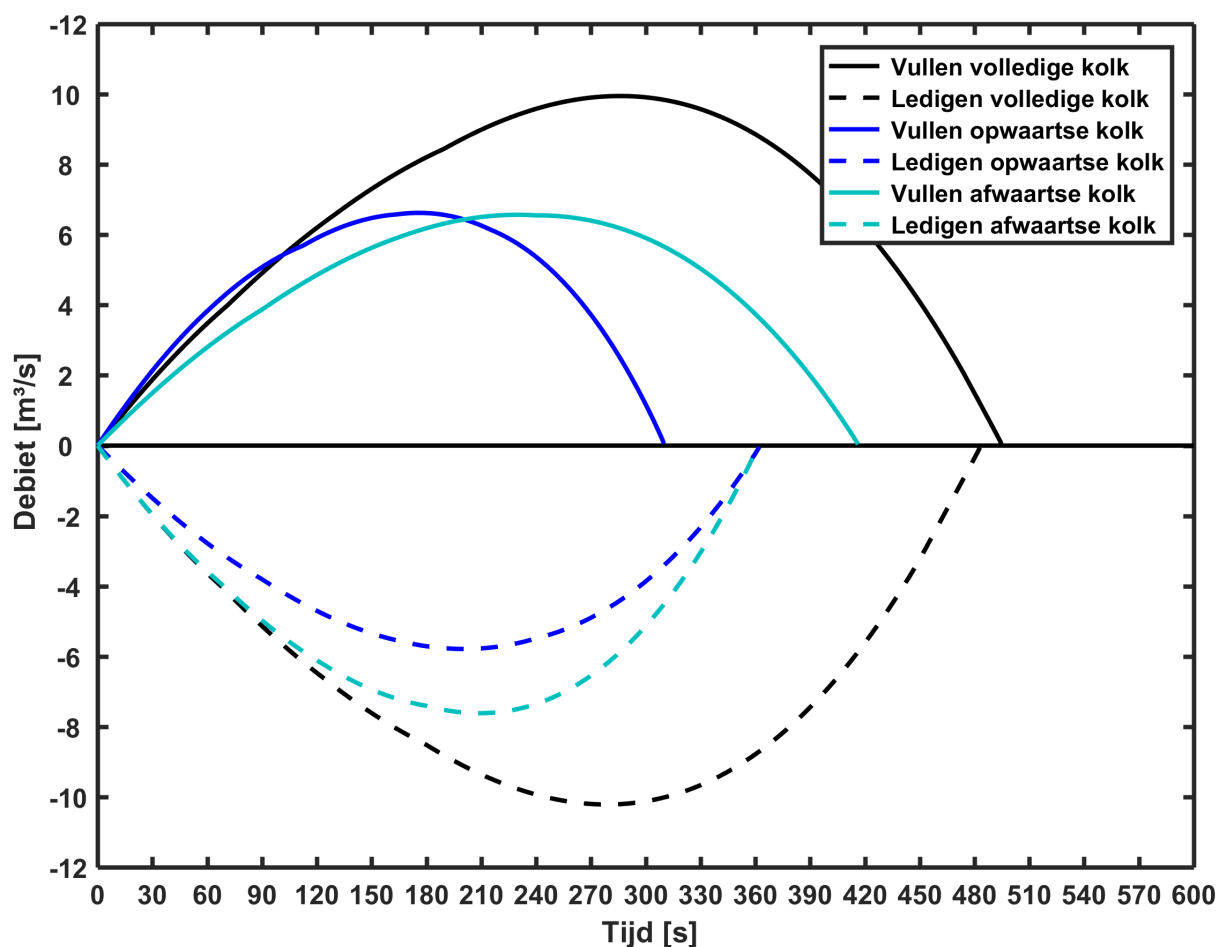
Het nivelleersysteem van de nieuwe sluis bestaat uit openingen in de deuren. Uit het ontwerp van het nivelleersysteem (Verelst *et al.*, 2016a) volgen 6 rechthoekige openingen in de puntdeuren met breedte 0,90 m en hoogte 0,90 m afgesloten met hefschuiven. Figuur 7 geeft een voorstelling van de variatie in de tijd van het debiet bij vullen en ledigen van de volledige sluiskolk, vullen en ledigen van de opwaartse kolk en bij vullen en ledigen van de afwaartse kolk. De daarbij optredende maximale waarden voor het totale debiet door de openingen, het tijdstip van voorkomen van het maximum debiet en de waterstand in de sluiskolk bij maximum debiet zijn gegeven in Tabel 2. Bij deze tabel en de figuur wordt opgemerkt dat door de opdrachtgever besloten is om voor het bovenhoofd (vullen volledige kolk en vullen opwaartse kolk) de openingswet uit Verelst *et al.* (2016a) te beschouwen waarbij geen rekening gehouden wordt met recreatievaart in de kolk. Voor het benedenhoofd (ledigen volledige kolk en ledigen afwaartse kolk) en het

middenhoofd (vullen afwaartse kolk en ledigen opwaartse kolk) is besloten om de openingswetten uit Verelst *et al.* (2016a) te beschouwen waarbij wel rekening gehouden wordt met recreatievaart in de sluiskolk.

Tabel 2 - Maximum debiet, tijdstip van voorkomen van het maximum debiet en waterstand in de sluiskolk bij maximum debiet bij vullen en ledigen van de volledige sluiskolk, de opwaartse en de afwaartse kolk.

		Maximum debiet	Tijdstip maximum debiet	Waterstand in sluiskolk bij maximum debiet
Volledige sluis	Vullen	10.0 m ³ /s	286.0 s	+ 4.79 m TAW
	ledigen	-10.2 m ³ /s	278.8 s	+ 4.49 m TAW
Opwaartse kolk	Vullen	6.5 m ³ /s	176.0 s	+ 4.69 m TAW
	Ledigen	-5.8 m ³ /s	200.6 s	+ 4.55 m TAW
Afwaartse kolk	Vullen	6.6 m ³ /s	230.0 s	+ 4.72 m TAW
	Ledigen	-7.6 m ³ /s	209.0 s	+ 4.48 m TAW

Figuur 7 - Debiet bij vullen en ledigen van de volledige sluiskolk, de opwaartse kolk en de afwaartse kolk



2.2 Waterpeilen

Tabel 3 toont de ontwerpwaterpeilen voor de dimensionering van de bodembescherming. Deze zijn overgenomen uit de conceptnota voor het ontwerp van de stuwsuis (SBE & Omgeving, 2010), waarbij rekening gehouden is met een mogelijke waterpeilverlaging van het afwaarts pand tot + 3.45 m TAW. Bij de dimensionering van de bodembescherming geeft een lager waterpeil aanleiding tot hogere stroomsnelheden aan de bodem en bijgevolg aanleiding tot een zwaardere bodembescherming. Om die reden wordt de dimensionering van de bodembescherming conservatief uitgevoerd voor het waterpeil na toepassen van de waterpeilverlaging in het afwaarts kanaalpand. Het verlaagde waterpeil van het afwaartse pand wordt daarom in Tabel 3 vermeld als streefpeil.

Tabel 3 – Ontwerpwaterpeilen

	Opwaarts	Afwaarts
Streefpeil	+ 5.83 m TAW	+ 3.45 m TAW*
Maximum schutpeil	+ 6.20 m TAW	
Hoogst gemeten waterpeil	+ 6.45 m TAW	+ 6.45 m TAW
Laagst gemeten waterpeil	+ 5.70 m TAW	+ 3.70 m TAW

Bron: SBE & Omgeving (2010);

* afwaarts waterpeil aangepast aan mogelijke waterpeilverlaging afwaarts pand.

De toestand waarbij zowel in het op- als afwaartse kanaalpand het streefpeil uit Tabel 3 gehandhaafd blijft, wordt de **normale toestand** genoemd. In deze toestand doet zich een overstorting over de stuwen voor, waarbij het debiet over de stuwen een functie is van het kruinpeil van de stuw en de waterstand in het opwaarts kanaalpand. Analooq als in Verelst *et al.* (2013) wordt voor deze toestand een maximaal debiet van 75 m³/s beschouwd waarbij het streefpeil nog gehandhaafd kan worden.

Voor de begroting van de hydraulische belasting waartegen de erosiebescherming bestand dient te zijn, wordt in deze studie naast de normale toestand ook een **wasregime** beschouwd. Hierbij wordt zowel een was met terugkeerperiode 100 jaar (T100) als een was met terugkeerperiode 1000 jaar (T1000) beschouwd. Bij grote afvoeren tijdens was zullen beide stuwen plat gelegd worden, waardoor het kruinpeil van de stuwklep gelijk wordt aan + 0.83 m TAW. De waterpeilen in het opwaarts en afwaarts kanaalpand en de overeenkomstige debieten voor dit wasregime zijn berekend met het Mike11-model van de Dender van WL en zijn gegeven in Tabel 4. Voor het wasregime zijn in deze tabel de volgende scenario's weergegeven:

- Alle debiet wordt afgevoerd via de beide stuwen
- Noodscenario 1: Alle debiet wordt afgevoerd via 1 stuw. Dit scenario doet zich voor indien tijdens de was één stuw buiten gebruik is.
- Noodscenario 2: Alle debiet wordt afgevoerd via 1 stuw en via de sluis. Door de opdrachtgever wordt overwogen om bij één stuw buiten gebruik ook waterafvoer via de sluis toe te laten.

Tijdens een was kan te Dendermonde echter enkel bij laagwater in de Schelde water van de Dender in de Schelde worden geloosd. Het maximale debiet over de stuwen te Denderbelle doet zich daarom niet voor op het tijdstip van maximale waterstand in opwaarts en afwaarts kanaalpand. Om die reden zijn in Tabel 4 voor elk scenario ook de waterstand in het opwaarts en afwaarts kanaalpand en de bijbehorende debieten vermeld zowel voor het tijdstip dat de waterstand in het opwaarts kanaalpand maximaal is als voor het tijdstip dat het totale debiet (over beide stuwen en eventueel de sluis samen) maximaal is.

Bij Tabel 4 wordt opgemerkt dat in deze tabel de waterstanden voor het wasregime vermeld zijn met 1 decimaal, analoog met de schrijfwijze in Boey *et al.* (2017), waarbij rekening gehouden wordt met de nauwkeurigheid van het MIKE11-model. De waterstanden en debieten voor de scenario's van het wasregime zijn afgelezen uit de resultaten van het MIKE11-model van WL en daarna (conservatief) naar

beneden afgerond tot lagere decimaal. Dit is een andere werkwijze dan in Boey *et al.* (2017), waar is afgerond naar de hogere decimaal. Bij een lagere waterstand zullen echter hogere stroomsnelheden aan de bodem berekend worden. Daarom wordt in dit rapport gekozen voor deze meer conservatieve afronding.

Tabel 4 – Waterpeilen en debieten in de normale toestand en bij was

		Waterstand [mTAW]		Debiet [m³/s]			
		Afwaarts	Opwaarts	Totaal	Stuw1	Stuw2	Sluis
Afvoer via 2 stuwen	Normale toestand	3.45	5.83	75	38	38	n.v.t.
	Was T100 - maximale waterstand	6.1	6.1	110	55	55	n.v.t.
	Was T100 - maximaal debiet	5.5	5.6	130	65	65	n.v.t.
	Was T1000 - maximale waterstand	6.5	6.5	104	52	52	n.v.t.
	Was T1000 - maximaal debiet	5.6	5.7	166	83	83	n.v.t.
Noodscenario 1 afvoer via 1 stuw	Was T100 - maximale waterstand	6.0	6.4	105	105*	105*	n.v.t.
	Was T100 - maximaal debiet	5.3	6.0	123	123*	123*	n.v.t.
	Was T1000 - maximale waterstand	6.4	6.6	94	94*	94*	n.v.t.
	Was T1000 - maximaal debiet	5.5	6.4	144	144*	144*	n.v.t.
Noodscenario 2 Afvoer via 1 stuw en sluis	Was T100 - maximale waterstand	6.1	6.2	109	34*	34*	75
	Was T100 - maximaal debiet	5.3	5.5	132	46*	46*	86
	Was T1000 - maximale waterstand	6.5	6.5	103	47*	47*	56
	Was T1000 - maximaal debiet	5.5	5.7	166	72*	72*	95

Bron: Mike 11-model WL; n.v.t. = niet van toepassing; * = Het debiet wordt afgevoerd via 1 stuw, voor de dimensionering in dit rapport wordt voor elke stuw hetzelfde debiet beschouwd.

2.3 Ontwerpschip

De sluiskolk wordt ontworpen voor volgende scheepstypes:

- De volledige sluiskolk wordt ontworpen voor een schip CEMENT-klasse IV.
- De opwaartse deelkolk, i.e. de kleinste sluiskolk bij gebruik van de tussendeuren, wordt ontworpen voor een schip CEMENT-klasse I.
- De afwaartse deelkolk, i.e. de grootste sluiskolk bij gebruik van de tussendeuren, wordt ontworpen voor een schip CEMENT-klasse II.

Tabel 5 vat de afmetingen van deze ontwerpschepen nog eens samen.

Bij de afmetingen van de ontwerpschepen in Tabel 5 moet het volgende opgemerkt worden:

- De originele CEMENT-classificatie (Richtlijnen Vaarwegen (Rijkswaterstaat Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2011)) vermeldt voor schepen van klasse IV een maximale lengte van 85 m. Richtlijnen Vaarwegen vermeldt dat door schaalvergroting de lengte van klasse IV-schepen maximaal 105 m kan bedragen. Deze laatste waarde is door de opdrachtgever gekozen als ontwerplengte.
- De literatuur vermeldt voor deze 3 types schepen meestal een maximaal geladen diepgang van respectievelijk 2.2 m (CEMENT-klasse I), 2.5 m (CEMENT-klasse II) en 2.5 m (CEMENT-klasse IV). Richtlijnen Vaarwegen (Anon., 2005) vermeldt dat de maximaal geladen diepgang van de huidige vloot door schaalvergroting 2.5 m kan bedragen voor CEMENT-klasse I, 2.6 m voor CEMENT-klasse II en 3.0 m voor CEMENT-klasse IV. Deze laatste waarden zijn door de opdrachtgever gekozen als ontwerpdiepgang.

Tabel 5 - Afmetingen ontwerpschepen

	Kolk 1	Kolk 2	Volledige sluiskolk
CEMENT-classificatie	I	II	IV
Lengte	38.5 m	55.0 m	105.0 m
Breedte	5.05 m	6.6 m	9.5 m
Diepgang (geladen)	2.5 m	2.6 m	3.0 m
Diepgang (ongeladen)	1.2 m	1.4 m	1.6 m

Voor de dimensionering van de bodembescherming wordt enkel het maatgevend schip CEMENT klasse IV beschouwd. Voor dit type schip is het nodig het aantal schroeven, de diameter van de schroeven en het aangewend vermogen per schroef te kennen. "Ontwerp van Schutsluizen" (Beem *et al.*, 2000) vermeldt als voorbeeld een CEMENT-klasse IV schip, met een totaal geïnstalleerd motorvermogen van 1200 kW, uitgerust met een schroef/straalbuis-combinatie van ofwel 1 schroef met diameter 1.7 m, ofwel 2 schroeven met diameter 1.6 m. Het motorvermogen, indien vermeld, van de schepen die op de website www.debinnenvaart.nl (Vereniging 'De Binnenvaart', 2012) als voorbeeld gegeven worden, varieert tussen 1200 pk en 1700 pk (omgerekend ca. 880 à 1200 kW). Dezelfde maximale vermogens voor de hoofdschroef worden ook vermeld in Dofferhoff *et al.* (2002).

Naast gegevens voor de hoofdschroef is voor de dimensionering van de erosiebescherming ook informatie met betrekking tot de boegschroef nodig. Op basis van de schepen vermeld op de website www.debinnenvaart.nl (Vereniging 'De Binnenvaart', 2012) wordt een boegschroef met een vermogen van 550 pk (ca. 405 kW) beschouwd. Voor binnenvaartschepen vermeldt Ontwerp van schutsluizen (Beem *et al.*, 2000) volgende formule voor het berekenen van de schroefdiameter op basis van het aangewend vermogen:

$$D_p = 0.068 P_d^{0.5}$$

met:

- D_p Diameter boegschroef [m]
- P_d Maximum vermogen geleverd door de boegschroef [kW]

Op basis van deze formule wordt voor een vermogen van 405 kW een diameter van 1.4 m berekend.

Tabel 6 geeft een overzicht van de in deze studie beschouwde karakteristieken van hoofdschroef en boegschroef voor het schip CEMT klasse IV.

Tabel 6 - Karakteristieken hoofdschroef en boegschroef voor een schip CEMT klasse IV

		CEMT IV	CEMT IV
Hoofdschroef	Aantal schroeven	1	2
	Motorvermogen	1200 kW	1200 kW
	Diameter schroef	1.7 m	1.6 m
Boegschroef	Aantal schroeven	1	1
	Totaal motorvermogen boegschroef	450 kW	450 kW
	Diameter schroef	1.4 m	1.4 m

2.4 Bodemsamenstelling

In Verelst *et al.* (2013) is vermeld dat door de opdrachtgever de resultaten ter beschikking gesteld zijn van een boring uit 1971, uitgevoerd in het kader van de opwaardering van de Dender. Uit deze resultaten volgt dat de D_{50} behoort tot fractie III (tussen 60 μm en 200 μm).

Analoog als in Verelst *et al.* (2013), zal in deze studie, wegens de beperkte informatie in verband met de bodemsamenstelling, bij wijze van gevoeligheidsanalyse, een D_{50} beschouwd worden die gelijk is aan 100 μm , 200 μm en 300 μm .

2.5 Breuksteensorteringen

Tabel 7 geeft een overzicht van de in deze studie 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

Bron: NBN EN 13383 (BIN, 2002);

M_{50} : Mediaan breuksteengewicht; D_{n50} : Mediaan breuksteendiameter

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, s.d.):

$$t = 1.25 D_{n50}$$

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

$$t \geq 0.30$$

met:

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

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

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

3 Hydraulische belasting op de bodem

3.1 Algemeen

Dit hoofdstuk beschrijft de begroting van de hydraulische belastingen die op de bodembescherming inwerken. De bodembescherming wordt gedimensioneerd in de opwaartse en afwaartse voorhaven, ter plaatse van de wachtplaatsen en remmingswerken in de opwaartse en afwaartse voorhaven en in de opwaartse en afwaartse stuwgeulen. In de opwaartse en de afwaartse voorhaven en ter plaatse van wachtplaatsen doet zich stroming ten gevolge van nivelleren van de sluiskolk en stroming ten gevolge van de scheepvaart (stroming ten gevolge van hoofdschroef, boegschroeven en retourstroming) voor. In de stuwgeulen doet zich stroming voor ten gevolge van het waterafvoer. Enkel in noodscenario 2, wanneer de sluis bijkomend ingezet wordt voor afvoer van wassen, doet zich in de opwaartse en afwaartse voorhavens ook stroming ten gevolge van waterafvoer voor.

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)
5. Stroming ten gevolge van waterafvoer (paragraaf 3.6)

Bij de berekening van de hydraulische belastingen in dit hoofdstuk wordt het volgende opgemerkt:

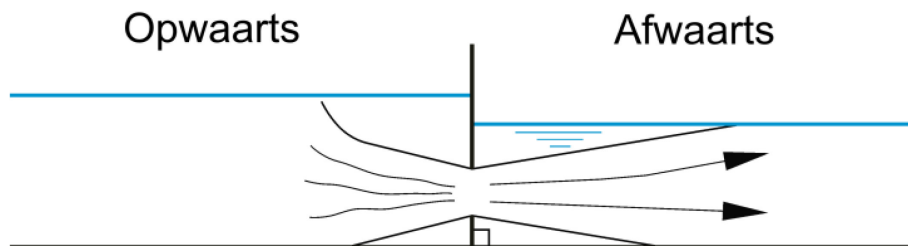
- De in dit hoofdstuk begrootte hydraulische belastingen betreffen enerzijds stroomsnelheden nabij de bodem (bij stroming ten gevolge van nivelleren van de sluiskolk en bij stroming ten gevolge van scheepvaart) en anderzijds dieptegemiddelde stroomsnelheden (bij stroming ten gevolge van waterafvoer).
- De berekening van de stroomsnelheden zelf wordt uitgevoerd met een nauwkeurigheid van 2 decimalen. Echter voor de dimensionering van de bodembescherming worden deze stroomsnelheden, om rekening te houden met de onzekerheid op de berekeningswijze, afgerond één decimaal. Hierbij wordt (conservatief) telkens naar de hogere decimaal afgerond.
- Met behulp van de begrootte stroomsnelheden wordt in hoofdstuk 4 de bodembescherming gedimensioneerd met behulp van de Shields-formule aangepast voor stralen indien de stroomsnelheid aan de bodem gekend is of de formulering volgens Pilarczyk indien de dieptegemiddelde stroomsnelheid gekend is. Deze formuleringen zijn vermeld in paragraaf 4.2 en bevatten ook de turbulentie-intensiteit als parameter. In dit hoofdstuk zal naast de berekende stroomsnelheden telkens voor de verschillende types hydraulische belastingen ook de toegepaste waarde voor de turbulentie-intensiteit vermeld worden. Hierbij wordt enkel de waarde voor de turbulentie-intensiteit r vermeld uit de Shields-formulering aangepast voor stralen indien een stroomsnelheid nabij de bodem berekend wordt en de waarde voor K_T uit de formulering volgens Pilarczyk indien een dieptegemiddelde stroomsnelheid berekend wordt.

3.2 Stroming ten gevolge van nivelleren van de sluiscolk

3.2.1 Algemeen

Figuur 8 geeft een voorstelling van de stroming door een sluisdeur ten gevolge van nivelleren van de sluiscolk.

Figuur 8 - 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 in de openingen in de sluisdeur kan volgens de formuleringen uit "Ontwerp van Schutsluizen" (Beem *et al.*, 2000) 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)¹).

Bij deze berekening worden volgende veronderstellingen gemaakt:

- De rechthoekige gaten in de sluisdeur (gelijk verdeeld over de breedte van de sluisdeur) worden benaderd door één grote rechthoekige opening met hoogte 0.90 m en breedte 5.40 m (= 6 x 0.90 m).
- De openingen bevinden zich juist boven de bodem. In werkelijkheid bevindt de onderzijde van de openingen zich op + 0.15 m TAW of 0.93 m boven de bodem van de sluiskolk. Deze afstand 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. 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 (10.0 m³/s) te delen door de totale oppervlakte van de openingen op het betreffende tijdstip (2.92 m², bij een hefhoogte van de hefschuiven van 0.54 m)⁽²⁾. Dit geeft een stroomsnelheid ter plaatse van de openingen van 3.4 m/s.

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 is gegeven in Tabel 9. Figuur 9 toont de variatie van de stroomsnelheid aan de bodem opwaarts van de sluisdeur in functie van de afstand tot de sluisdeur.

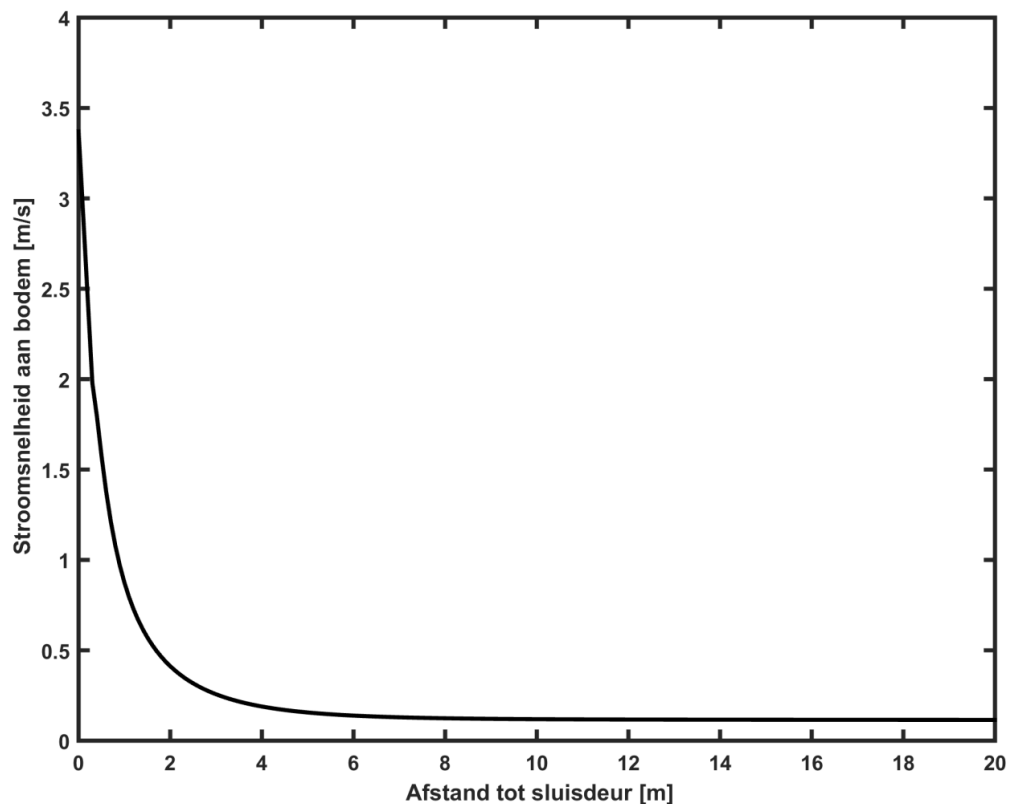
¹ De formuleringen voor de potentiaalstroming uit Shammaa *et al.* (2005) gelden voor aanstroming vanuit een oneindig breed reservoir naar een opening in een verticale wand. Deze formulering werd voor deze studie aangepast om rekening te houden met de beperkte breedte tussen (het verlengde van) de sluiskolkmuren.

² 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.

Tabel 9 – Parameters berekening stroomsnelheid boven de bodem opwaarts van de sluisdeur in het bovenhoofd ten gevolge van vullen van de sluiskolk

Eigenschap	Symbool	Eenheid	
Aantal openingen	n	-	6
Hoogte openingen	h_o	M	0.90
Breedte openingen	b_o	m	0.90
Hoogte onderrand opening boven sluiskolkbodem	z_0	m	0.93
Waterpeil opwaarts van de sluisdeur bij maximaal debiet	H_{opw}	m TAW	5.83
Bodempeil sluiskolk	Z	m TAW	-0.78
Waterdiepte opwaarts sluisdeur bij maximaal debiet	h	m	6.61
Maximaal debiet door openingen	Q_{max}	m^3/s	10.0
Hoogte hefschuif bij maximaal debiet	h_{HS}	m	0.54
Totale oppervlakte openingen	O_{tot}	m^2	2.92
Totale breedte openingen	c	m	5.40
Dubbele hoogte openingen	a	m	1.08
Verhouding c/a	c/a	-	5.00
Verhouding h/a	h/a	-	6.12
Stroomsnelheid door openingen bij maximaal debiet	U_0	m/s	3.4
Afstand tot de sluisdeur	x	m	8.0
Berekende stroomsnelheid aan de bodem	U	m/s	0.14

Figuur 9 – Variatie van de stroomsnelheid aan de bodem opwaarts van de sluisdeur in het bovenhoofd in functie van de afstand tot de sluisdeur



De bodem van het bovenhoofd is uitgevoerd in beton. Deze beton eindigt op ca. 8.0 m opwaarts van de puntdeur. Hierbij wordt opgemerkt dat dit de kleinste afstand betreft tussen de puntdeur en het einde van de beton. Op deze locatie begint de bodembescherming. Op basis van Figuur 9 wordt op deze locatie (aan het begin van de bodembescherming) een stroomsnelheid berekend van 0.14 m/s. Indien het debiet door de openingen (10.0 m³/s) gedeeld wordt door de natte sectie op deze locatie (10.5 m x 6.61 m = 69.4 m²) wordt ook een stroomsnelheid bekomen die gelijk is aan 0.14 m/s. Dit betekent dat op deze locatie de stroming volledig gespreid is over de verticale.

Tabel 10 geeft een overzicht van de voor de dimensionering toegepaste 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 10 - Stroomsnelheid boven de bodem aan het begin van de bodembescherming ($X = 8$ m) opwaarts van de sluiskolk ten gevolge van vullen van de volledige sluiskolk via het bovenhoofd.

Stroomsnelheid	Turbulentie-intensiteit r
0.2 m/s	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. Om die reden wordt enkel dit type nivellering beschouwd voor de bepaling van de maximale stroomsnelheid aan de bodem.

De berekening van 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 ($= 0^\circ$)	[°]

Deze berekening wordt uitgevoerd voor het tijdstip dat het maximale debiet door de openingen in de sluisdeur zich voordoet. Hierbij wordt opgemerkt dat op het tijdstip van voorkomen van het maximale debiet de schuiven geopend zijn tot een hoogte van 0.55 m. Deze hoogte wordt toegepast als hoogte van de uittredende straal bij de berekening van de stroomsnelheid uit de opening. Tabel 11 geeft een overzicht van de resultaten van deze berekening.

Tabel 11 – Berekening maximale stroomsnelheid nabij de bodem afwaarts van het benedenhoofd ten gevolge van ledigen sluisolk

Eigenschap	Symbool	Eenheid	
Aantal openingen	n	-	6
Hoogte openingen	h_o	m	0.90
Breedte openingen	b_o	m	0.90
Hoogte onderrand opening boven sluiscolkbodem	z_0	m	0.93
Maximaal debiet door vulopening	Q_{max}	m ³ /s	10.2
Hoogte uittredende straal	d_n	m	0.55
Totale oppervlakte vulopening	O_{tot}	m ²	2.97
Snelheid uittredende straal	u_n	m/s	3.43
Verticale afstand straalsas tot bodem	e_n	m	1.2
Horizontale afstand vulopening tot locatie met maximale snelheid aan de bodem	x_{bn}	m	12
Maximale stroomsnelheid bij de bodem	u_{bn}	m/s	1.83

De in Tabel 11 vermelde maximale stroomsnelheid aan de bodem doet zich voor op 12 m afwaarts van de sluisdeur. Aangezien de sluiscolkbodem doorloopt tot 3.1 m afwaarts van de afwaartse sluisdeur betekent dit dat deze maximale waarde van de stroomsnelheid zich voordoet boven de bodembescherming (op 8.9 m afwaarts van het begin van de bodembescherming). Voor de waarde voor de turbulentie-intensiteit vermeldt "Ontwerp van Schutsluizen" (Beem *et al.*, 2000) $r = 0.35$.

Tabel 12 – Maximale stroomsnelheid boven de bodem afwaarts van de sluisolk ten gevolge van ledigen van de volledige sluisolk via het benedenhoofd

Stroomsnelheid	Turbulentie-intensiteit r
1.9 m/s	0.35

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 $x > x_{bn}$):

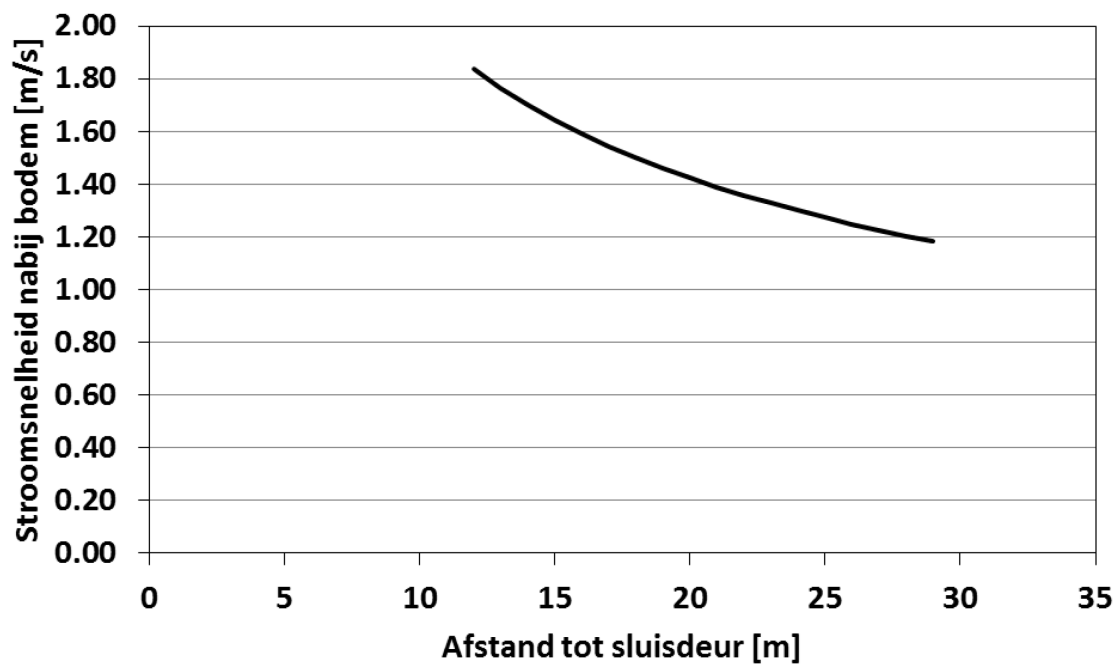
$$u_{xn} = 2.5u_n \sqrt{d_n/x}$$

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]

Voor de in Tabel 11 berekende stroomsnelheid van de uittredende straal van 3.43 m/s wordt de afname van de stroomsnelheid aan de bodem in functie van de afstand tot de afwaartse sluisdeur voorgesteld in Figuur 10.

Figuur 10 – 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, respectievelijk afwaarts bij in- of uitvaren van de sluiskolk van de nieuwe sluis via het bovenhoofd, respectievelijk het benedenhoofd.
- Boven de bodembescherming naast de remmingswerken in de opwaartse, respectievelijk de afwaartse voorhaven bij in- of uitvaren van de sluiskolk van de nieuwe sluis via het bovenhoofd, respectievelijk het benedenhoofd.
- Bij aanmeren aan een kaaimuur ter plaatse van de wachtplaatsen in de opwaartse en afwaartse voorhaven.

De stroomsnelheid juist achter een schroef wordt, volgens de formulerings 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]
	$D_0 = \begin{cases} 0.7 D_p & \text{schroef zonder straalbuis} \\ 1.0 D_p & \text{schroef in straalbuis} \\ 0.85 D_p & \text{schroef/straalbuiscombinatie} \end{cases}$	
- D_p	Echte diameter van de schroef	[m]

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

$$x_{bp} = 5.6 d_p$$

$$u_{bp} = \min \left(0.3 u_p \sqrt{n} \left(\frac{D_0}{d_p} \right), u_p \right)$$

met:

- x_{bp}	Horizontale afstand van de schroef tot de plaats met maximale stroomsnelheid aan de 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 formulerings dient het volgende opgemerkt te worden:

- Paragraaf 2.3 vermeldt de aanwezigheid van een schroef/straalbuis combinatie bij schepen CEMT klasse IV. Om die reden wordt een effectieve diameter gelijk aan 0.85 maal de echte diameter van de schroef beschouwd.
- Uit Tabel 6 volgt voor het schip CEMT klasse IV een totaal geïnstalleerd vermogen van 1200 kW. Bij aanwezigheid van 1 hoofdschroef wordt voor deze schroef het volledige totaal geïnstalleerd vermogen beschouwd bij de berekening van de stroomsnelheid juist achter de schroef. Bij aanwezigheid van 2 schroeven wordt per schroef de helft van het totale geïnstalleerde vermogen beschouwd.

- 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 of 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. Bij het ontwerp van de bodembescherming voor de sluis te Sint-Baafs-Vijve (Verelst *et al.*, 2016b) is 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.
- De breedte van de bodembescherming naast remmingswerken (zie paragraaf 4.3.4) in de opwaartse en de afwaartse voorhaven maakt dat de bodembescherming op deze locaties zich in het bereik bevindt van een schip dat de sluiskolk 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.

Voor binnenvaren van de sluiskolk wordt de berekening van de maximale stroomsnelheid aan de bodem ter plaatse van de fuik en ter plaatse van de remmingswerken ten gevolge van de hoofdschroef uitgevoerd voor:

- Het schip CEMT klasse IV bij in- of uitvaren van de sluiskolk van de nieuwe sluis, zowel voor de fuik als naast de remmingswerken in de opwaartse en de afwaartse voorhaven.
- Zowel voor 1 hoofdschroef als voor 2 hoofdschroeven. Hierbij wordt telkens een verhouding D_0/D_p gelijk aan 0.85 (schroef/straalbuis combinatie) beschouwd.
- Zowel voor een bodemligging van + 1.53 m TAW als een bodemligging van – 0.78 m TAW in de opwaartse voorhaven. Voor de afwaartse voorhaven wordt enkel het bodempeil van - 0.78 m TAW beschouwd.
- Een toegepast vermogen aan de hoofdschroef gelijk aan 75 % van het geïnstalleerd motorvermogen.

Tabel 30 Bijlage 2 geeft de resultaten van de berekening van de maximale stroomsnelheid boven de bodem van de fuik en naast de remmingswerken bij binnenvaren van de sluiskolk van de nieuwe sluis.

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

- Het schip CEMT klasse IV bij aanmeren aan de wachtplaatsen in de opwaartse voorhaven en de afwaartse voorhaven.
- Zowel voor 1 hoofdschroef als voor 2 hoofdschroeven. Hierbij wordt telkens een verhouding D_0/D_p gelijk aan 0.85 (schroef/straalbuis combinatie) beschouwd.
- Voor een bodemligging van + 1.53 m TAW in de opwaartse voorhaven en een bodemligging van - 0.78 m TAW in de afwaartse voorhaven.
- Een toegepast vermogen aan de hoofdschroef gelijk aan 50 % van het geïnstalleerd motorvermogen.

Tabel 31 in Bijlage 2 geeft de resultaten van de berekening van de maximale stroomsnelheid boven de bodem van de wachtplaats bij aanmeren in de opwaartse en de afwaartse voorhaven.

Voor de opwaartse en afwaartse voorhaven vat Tabel 13 de voor dimensionering van de bodembescherming gebruikte maximale waarden van 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 13 – Overzicht berekende maximale stroomsnelheden boven de bodem ten gevolge van hoofdschroef.

Locatie	Bodempeil	Stroomsnelheid	Turbulentie-intensiteit r
Fuik en remmingswerk opwaarts nieuwe sluis	1.53 m TAW	2.0 m/s	0.40
	- 0.78 m TAW	1.0 m/s	0.40
Fuik en remmingswerk afwaarts nieuwe sluis	- 0.78 m TAW	2.1 m/s	0.40
Wachtplaats opwaartse voorhaven	1.53 m TAW	1.8 m/s	0.40
Wachtplaats afwaartse voorhaven	- 0.78 m TAW	1.8 m/s	0.40

3.4 Stroming ten gevolge van de boegschroef

Dit type stroming doet zich voor bij:

- Aanmeren 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

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

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

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 formuleren 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 beschouwd, zoals aanbevolen in het PIANC rapport 180 (MarCom Working Group 180, 2015).

Bij gebruik van de boegschroef tijdens in- of uitvaren van een sluiskolk doet zich een vrije onbegrensde stroming voor. De stroomsnelheid aan de bodem voor dit type stroming wordt berekend aan de hand van dezelfde formuleren als voor de stroming van de hoofdschroef (zie ook paragraaf 3.3):

$$x_{bp} = 5.6 d_p$$

$$v_{bp} = \min \left(0.30 v_p \sqrt{n} \left(\frac{D_0}{d_p} \right), v_p \right)$$

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 formuleren wordt de berekening van de maximale stroomsnelheid boven de bodem ten gevolge van de boegschroef bij in- of uitvaren van de nieuwe sluis uitgevoerd voor:

- Het schip CEMT klasse IV bij in- of uitvaren van de sluiskolk van de nieuwe sluis, zowel voor de fuik in de opwaartse als voor de fuik in de afwaartse voorhaven.
- Zowel voor een bodemligging van + 1.53 m TAW als een bodemligging van – 0.78 m TAW in de opwaartse voorhaven. Voor de afwaartse voorhaven wordt enkel het bodempeil van - 0.78 m TAW beschouwd.

- Een toegepast vermogen aan de hoofdschroef gelijk aan 100 % van het geïnstalleerd motorvermogen.

De resultaten van deze berekeningen van de stroomsnelheid boven de bodem ten gevolge van de boegschroeven bij in- en uitvaren van een sluis zijn gegeven in Tabel 32 in Bijlage 2.

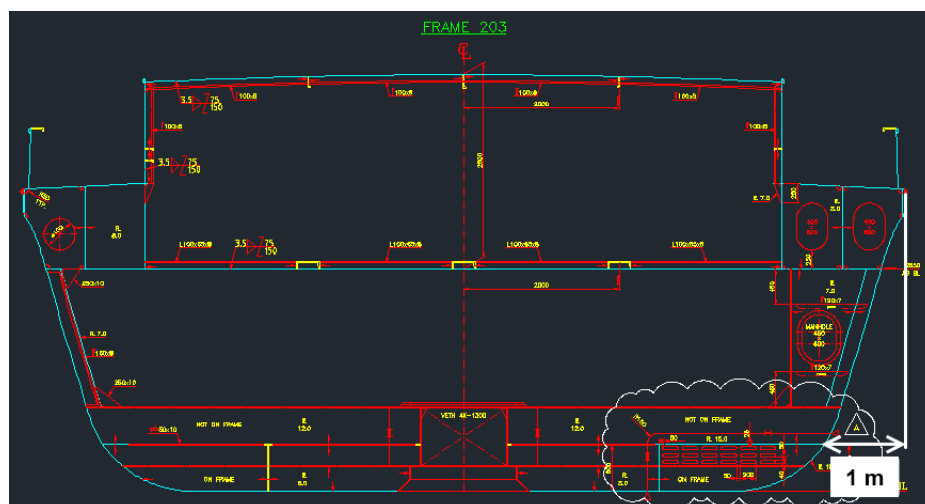
Tabel 14 geeft voor de fuik in de opwaartse en de afwaartse voorhaven een overzicht van de voor dimensionering van de bodembescherming gebruikte maximale waarde van de berekende stroomsnelheid boven de bodem. Voor de turbulentie-intensiteit vermeldt “Ontwerp van Schutsluizen” (Beem *et al.*, 2000) de waarde $r = 0.35$.

Tabel 14 – 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.

Locatie	Bodempeil	Stroomsnelheid	Turbulentie-intensiteit r
Fuik opwaarts nieuwe sluis	+ 1.53 m TAW	1.4 m/s	0.35
	- 0.78 m TAW	0.7 m/s	0.35
Fuik afwaarts nieuwe sluis	- 0.78 m TAW	1.4 m/s	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 voor die gehinderd wordt door de kaaimuur of het remmingswerk. 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. 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 voor zowel de wachtplaatsen als de remmingswerken. 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 m beschouwd. Deze afstand is in Verelst *et al.* (2016b) afgelezen op een lijnenplan van een schip CEMT klasse Va (zie Figuur 11). Voor het schip CEMT klasse IV wordt dezelfde afstand beschouwd.

Figuur 11 – 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)):

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

Deze formulering is geldig onder volgende voorwaarden:

$$v_{bp} \leq v_p$$

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

met:

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

Aan de hand van deze formuleringen wordt de berekening van de maximale stroomsnelheid boven de bodem ten gevolge van de boegschroef uitgevoerd voor:

- Het schip CEMT klasse IV bij aanmeren aan een kaaimuur of manoeuvreren naast een remmingswerk zowel in de opwaartse als in de afwaartse voorhaven.
- Zowel voor een bodemligging van + 1.53 m TAW als een bodemligging van – 0.78 m TAW in de opwaartse voorhaven en een bodemligging van - 0.78 m TAW in de afwaartse voorhaven.
- Een toegepast vermogen aan de hoofdschroef gelijk aan 100 % van het geïnstalleerd motorvermogen.

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 33 in Bijlage 2.

Tabel 15 geeft een overzicht van de voor de dimensionering van de bodembescherming gebruikte 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 15 – Overzicht maximale waarde van de stroomsnelheid boven de bodem ten gevolge van boegschroeven bij aanmeren aan een kaaimuur of manoeuvreren naast een remmingswerk in de opwaartse en de afwaartse voorhaven

Locatie	Bodempeil	Stroomsnelheid	Turbulentie-intensiteit r
Remmingswerk of wachtplaats opwaartse voorhaven	1.53 m TAW	4.5 m/s	0.35
Fuik opwaartse voorhaven	- 0.78 m TAW	2.1 m/s	0.35
Remmingswerk, wachtplaats of fuik afwaartse voorhaven	- 0.78 m TAW	4.6 m/s	0.35

De in Tabel 15 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:

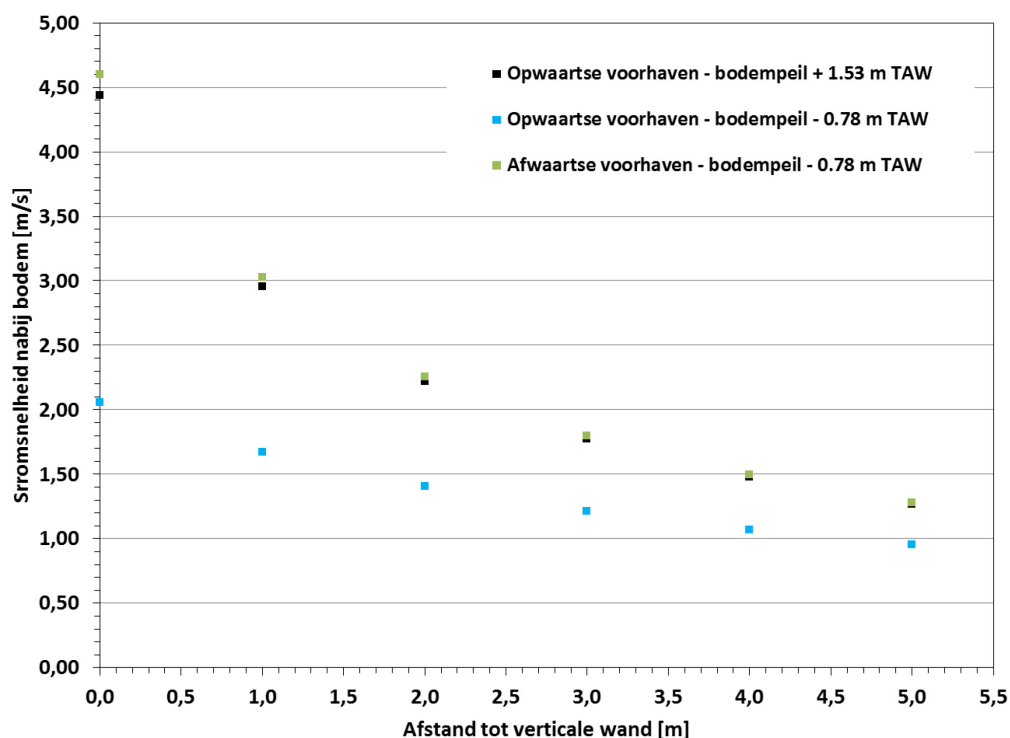
- v_{bp}	Maximale waarde van de stroomsnelheid aan de bodem	[m/s]
- v_p	Stroomsnelheid uittredende straal	[m/s]
- D_0	Effectieve diameter van de schroef (= D_p)	[m]
- d_p	Verticale afstand tussen straalas en bodem	[m]
- x_{bp}	Afstand tussen punt en de verticale wand	[m]
- n	Aantal boegschroeven	[-]

Voor de wachtplaatsen en de remmingswerken in de opwaartse en de afwaartse voorhaven zijn de resultaten van de berekening van de stroomsnelheid aan de bodem voor punten op 1.0 m, 2.0 m, 3.0 m, 4.0 m en 5.0 m verwijderd van de verticale wand gegeven in Figuur 12.

Op basis van Figuur 12 kan het volgende besloten worden:

- Voor het bodempeil + 1.53 m TAW in het opwaarts pand en het bodempeil – 0.78 m TAW in het afwaarts pand wordt bij een boegschroef tegen een kaai muur vanaf een afstand van 4 à 5 m uit de verticale wand een lagere stroomsnelheid nabij de bodem berekend dan bij een boegschroef met vrije uitstroming (stroomsnelheid gelijk aan 1.4 m/s; zie hoger). Voor het bodempeil – 0.78 m TAW in het opwaarts pand is deze afstand zelfs groter dan 5 m.
- Voor het bodempeil + 1.53 m TAW in het opwaarts pand en het bodempeil – 0.78 m TAW in het afwaarts pand is de stroomsnelheid nabij de bodem ten gevolge van de boegschroef tegen de kaai muur vanaf een afstand van 2 à 3 m lager dan de stroomsnelheid nabij de bodem van de hoofdschroef. Bij het bodempeil van -0.78 m in het opwaarts pand bedraagt deze afstand 5 m.

Figuur 12 – Variatie van de stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de boegschroef bij aanmeren aan een kaai muur 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 ($=b_s d_s$)	[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 ($A_s/A_k=0.35$) tot 0.80 ($A_s/A_k=0.80$) voor $v_{smax} = 1.0 v_g$	
	= 0.45 ($A_s/A_k=0.35$) tot 0.70 ($A_s/A_k=0.80$) voor $v_{smax} = 1.5 v_g$	
	= 0.30 ($A_s/A_k=0.35$) tot 0.65 ($A_s/A_k=0.80$) voor $v_{smax} = 2.0 v_g$	

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 3.8 m/s berekend opwaarts van de nieuwe sluis en een vaarsnelheid van 1.1 m/s afwaarts van de nieuwe sluis. Deze waarden zijn vergeleken met de vaarsnelheid bij het binnenvaren van de sluiskolk uit de uitgevoerde scheepssimulaties (Vos *et al.*, 2016). Hiervoor is voor de vaarsimulaties, dewelke binnenvaren van de sluiskolk betreffen, de vaarsnelheid afgelezen op het tijdstip dat de boeg van het schip juist binnen de sluiskolk is. Hieruit volgt een invaarsnelheid van 0.9 m/s à 1.7 m/s voor het binnenvaren van de nieuwe sluis via het bovenhoofd en een invaarsnelheid van 0.2 m/s à 1.4 m/s voor het binnenvaren van de nieuwe sluis via het benedenhoofd. De maximale invaarsnelheid van 1.4 à 1.7 m/s is beduidend lager dan de berekende maximale invaarsnelheid van 3.8 m/s opwaarts van de nieuwe sluis en iets hoger dan de berekende invaarsnelheid van 1.1 m/s afwaartse van de nieuwe sluis. Om die reden wordt voor de berekening van de retourstroomsnelheid de vaarsnelheid van 1.4 m/s in de afwaartse voorhaven en 1.7 m/s in de opwaartse voorhaven, afgeleid uit het simulatoronderzoek, weerhouden.

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

- Voor het schip CEMT klasse IV aan de hand van de hierboven vermelde formuleringen. Hierbij wordt een vaarsnelheid van 1.4 m/s in de afwaartse voorhaven en 1.7 m/s in de opwaartse voorhaven beschouwd.
- Zowel voor de opwaartse als de afwaartse voorhaven. De berekening van de retourstroomsnelheid is enkel afhankelijk van het drempelpeil van de sluisolk (- 0.28 m TAW).

De resultaten van de berekening van de stroomsnelheid ten gevolge van retourstroming voor deze condities zijn zowel voor de opwaartse als voor de afwaartse voorhaven gegeven in Tabel 16.

Tabel 16 – Berekening stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van retourstroming in de opwaartse en de afwaartse voorhaven

Eigenschap	Symbol	Eenheid	Opwaartse voorhaven	Afwaartse voorhaven
CEMT klasse	-	-	IV	IV
Breedte schip	b	m	9.5	9.5
Diepgang schip	T	m	3.0	3.0
Natte sectie schip	A_s	m ²	28.5	28.5
Waterstand	H	mTAW	5.83	3.45
Drempelpeil sluisolk	z_d	mTAW	- 0.28	- 0.28
Breedte sluisolk	b_k	m	10.5	10.5
Natte sectie sluisolk	A_k	m ²	64.2	39.2
Grenssnelheid	v_g	m/s	1.90	0.53
A_s/A_k	-	-	0.44	0.73
Voorwaarde 1 voor A_s/A_k (>0.35)	-	-	Ja	Ja
Voorwaarde 2 voor A_s/A_k (<0.80)	-	-	Ja	Ja
Maximum invaarsnelheid in sluismond	v_{smax}	m/s	1.7	1.4
Coëfficiënt β	β	-	0.37	0.60
Retourstroomsnelheid	u_r	m/s	0.50	2.24

Tabel 17 geeft voor de opwaartse en de afwaartse voorhaven een overzicht van de voor de dimensionering van de bodembescherming gebruikte waarde van de stroomsnelheid ten gevolge van retourstroming. Voor de turbulentie-intensiteit vermeldt "Ontwerp van Schutsluizen" (Beem *et al.*, 2000) de waarde $r = 0.25$.

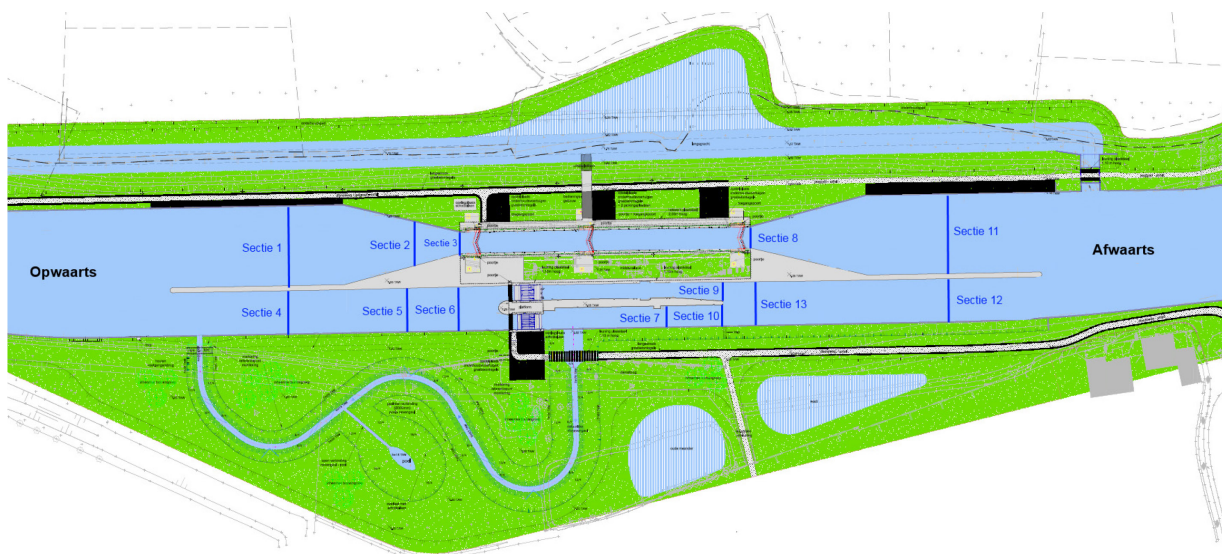
Tabel 17 – Maximale waarde van de stroomsnelheid boven de bodem ten gevolge van retourstroming

	Stroomsnelheid	Turbulentie-intensiteit r
Opwaartse voorhaven	0.5 m/s	0.25
Afwaartse voorhaven	2.3 m/s	0.25

3.6 Stroming ten gevolge van waterafvoer

Voor de berekening van de stroomsnelheid ten gevolge van waterafvoer worden een aantal secties gedefinieerd in de stuwgeulen naar de beide stuwen en in de afwaartse en opwaartse voorhavens. De ligging van deze secties is voorgesteld in Figuur 13. Bij de keuze van de locatie van deze secties is voornamelijk rekening gehouden met de variatie van de bodemligging in de opwaartse en afwaartse stuwgeulen of in de opwaartse en afwaartse voorhavens. Tabel 18 geeft een aanduiding van de afstand van de gedefinieerde sectie tot de as van de stuw of de puntdeuren van het bovenhoofd of het benedenhoofd van de sluis.

Figuur 13 - Gedefinieerde secties voor berekening stroomsnelheden



Tabel 18 - Locatie sectie 1 tot en met sectie 12

Sectie 1	In de opwaartse voorhaven
Sectie 2	38.6 m opwaarts van as van puntdeur bovenhoofd
Sectie 3	10.5 m opwaarts van as van puntdeur bovenhoofd
Sectie 4	In de stuwgeul opwaarts
Sectie 5	57.0 m opwaarts van as van de stuw
Sectie 6	32.0 m opwaarts van as van de stuw
Sectie 7	76.0 m afwaarts van as van de stuw
Sectie 8	3.5 m afwaarts van as van puntdeur benedenhoofd
Sectie 9	101.0 m afwaarts van as van de stuw
Sectie 10	101.0 m afwaarts van as van de stuw
Sectie 11	In de afwaartse voorhaven
Sectie 12	In de stuwgeul afwaarts
Sectie 13	113.3 m afwaarts van de as van de stuw

Bij de definitie van de secties wordt het volgende opgemerkt:

- Opwaarts van de sluis is de bodemligging over een afstand van 5 m gelijk aan -0.78 m TAW, waarna zich een stijging van de bodem met een helling $1/10$ tot het peil $+1.53$ m TAW voordoet. Deze bodemstijging doet zich voor over een afstand van 23.1 m. Sectie 2 is gedefinieerd op de

locatie waar de bodemligging gelijk is aan + 1.53 m TAW (ca. 28.1 m afwaarts van de sluiskolk of 38.6 m afwaarts van de puntdeur van het bovenhoofd).

- Afwaarts van de sluis is de bodemligging van de volledige afwaartse voorhaven gelijk aan - 0.78 m TAW.
- De bodemligging van de volledige afwaartse stuwgeul is gelijk aan + 0.45 m TAW. Sectie 13 is indicatief gepositioneerd op 12.3 m afwaarts van sectie 9 en sectie 10. Deze sectie bevindt zich in het gebied waar zich de uitspreiding van de stroming voordoet in het geval slechts één stuw in gebruik is (zie ook verder in deze paragraaf).
- De bodemligging in Sectie 6 bedraagt + 0.45 m TAW opwaarts van de nieuwe stuw ter plaatse van de huidige stuw en - 0.05 m TAW opwaarts van de nieuwe stuw in de huidige sluis. Voor de bepaling van de hydraulische belasting wordt, om conservatieve redenen, voor de volledige sectie de hoogste van deze waarden beschouwd.

De berekening van de stroomsnelheden in deze secties wordt uitgevoerd voor de volgende condities (zie Tabel 4 in paragraaf 2.2):

- De normale toestand, waarbij de streefpeilen in het opwaarts, respectievelijk afwaarts kanaal pand van 5.83 m TAW, respectievelijk 3.45 m TAW worden gehandhaafd.
- Het wasregime, zowel T100 als T1000, met afvoer via 2 stuwen. Hierbij worden zowel de condities bij maximale waterstand als deze bij maximaal debiet beschouwd.
- Het wasregime, zowel T100 als T1000, in noodscenario 1 en noodscenario 2. Hierbij worden zowel de condities bij maximale waterstand als deze bij maximaal debiet beschouwd.

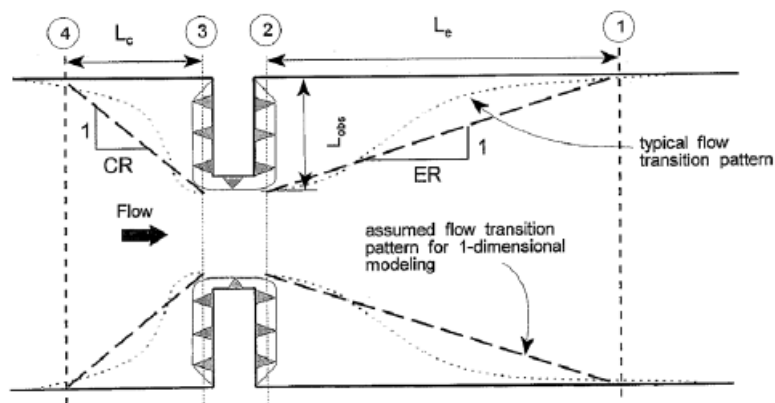
Juist afwaarts van de nieuwe stuwen doet zich stroming ten gevolge van overstorting over de stuwen voor. Hierbij doet zich afwaarts van de nieuwe stuwen een watersprong voor. Het ontstaan van een watersprong gaat gepaard met hoge stroomsnelheden en een zeer turbulente stroming. Het bepalen van stroomsnelheden aan de bodem ten gevolge van overstortend water of bij de ontwikkeling van een watersprong kan enkel uitgevoerd worden aan de hand van schaalmodelonderzoek of CFD-modellering. In paragraaf 4.4 wordt nagegaan aan welke stroomsnelheden de aanwezig beton in de huidige sluis en de huidige stuwgeul kan weerstaan en worden deze vergeleken met opgemeten of berekende waarden uit andere studies. In deze paragraaf worden enkel de dieptegemiddelde stroomsnelheden in de overige delen van de opwaartse en afwaartse stuwgeul berekend.

In Verelst *et al.* (2013) werd de (dieptegemiddelde) stroomsnelheid in de gedefinieerde secties als volgt berekend:

- Indien geen stroming door de sluiskolk plaatsvindt, doen zich in de opwaartse en afwaartse voorhavens neren voor. Hierdoor is de stroomsnelheid in de secties, die in de voorhavens gelegen zijn verwaarloosbaar. Bijgevolg wordt de stroomsnelheid in de secties in de voorhaven niet berekend wanneer er geen stroming door de sluiskolk plaatsvindt.
- In sectie 4, sectie 5 en sectie 6 wordt de (dieptegemiddelde) stroomsnelheid berekend door de sectiegemiddelde stroomsnelheid (quotiënt van de natte sectie en het debiet door deze sectie) te verhogen met 30 %. Uit de numerieke modellering in SBE (2011e) volgt dat bij een eddy viscosity van $0.05 \text{ m}^2/\text{s}$ in de stuwgeul een stroomsnelheid berekend wordt die (afgelezen op de grafische voorstellingen) ca. 30 % hoger is dan de sectiegemiddelde stroomsnelheid.
- Voor alle overige secties wordt verondersteld dat er zich, zowel in de normale toestand als bij was, een uniforme stroming voordoet. Dit wordt ook verondersteld in de voorhavens wanneer er zich bij noodscenario 2 een stroming door de sluiskolk voordoet. Vooral afwaarts de stuw doet zich in de normale toestand een sterk turbulente stroming voor ten gevolge van overstorting. De afstand tussen sectie 9, respectievelijk sectie 10 en de stuw bedraagt 76.0 m, respectievelijk en 101.0 m. Er wordt verondersteld dat op deze afstand de sterk turbulente stroming niet meer waarneembaar is en dat zich reeds een uniforme stroming voordoet. In alle overige secties wordt de stroomsnelheid bijgevolg berekend als het quotiënt het debiet door deze sectie en de natte sectie.

In de noodscenario's doet zich stroming voor over één stuw. Opwaarts van de beide stuwen doet zich een contractie van de stroming voor en afwaarts een verwijding. Met betrekking tot de lengte waarover deze contractie en verwijding van de stroming zich voordoet wordt opgemerkt dat in Hunt & Brunner (1995), voor het toepassen in 1D-modellering, het algemene stromingspatroon opwaarts en afwaarts van een vernauwing zoals voorgesteld in Figuur 14 beschouwd wordt.

Figuur 14 – Stromingspatroon opwaarts en afwaarts van een vernauwing



Bron: Hunt & Brunner (1995)

De zones aan beide oevers opwaarts en afwaarts van een vernauwing, waarin zich de neren voordoen worden hierbij geïdealiseerd voorgesteld als driehoekige zones. Opwaarts van de vernauwing wordt de helling van de zone waarin de neervorming optreedt weergegeven door een contractieverhouding, afwaarts door de expansieverhouding. Hunt & Brunner (1995) vermelden dat in de software HEC-RAS een helling 4:1 wordt verondersteld voor expansieverhouding en 1:1 voor de contractieverhouding. De helling 4:1 voor de expansieverhouding kan ook (visueel) afgeleid worden uit Duc & Rodi (2008) en Nagata & Hosoda (2005). Op basis van bovenstaande wordt in deze studie een helling 4:1 beschouwd voor de bepaling van de lengte van het gebied waarin de expansie van de stroming zich voordoet.

Met behulp van deze verwijding van de stroming wordt in deze studie voor sectie 4, sectie 5 en sectie 6 de (dieptegemiddelde) stroomsnelheid op volgende wijze berekend:

- Bij waterafvoer via 2 stuwen wordt voor deze secties een breedte beschouwd gelijk aan de totale breedte van de stuwgeul van 21.9 m. Voor deze conditie wordt de hierboven beschreven verhoging van de sectiegemiddelde stroomsnelheid met 30 % toegepast.
- In de beide noodscenario's wordt het water afgevoerd via één van beide stuwen. Bij deze conditie doet zich opwaarts van de stuwen een contractie van de stroming voor van een breedte 21.9 m naar de halve breedte van de stuwgeul. Deze contractie doet zich voor in een gebied met een lengte van ca. 11 m opwaarts van de stuwen (midden tussen sectie 6 en de stuwen). Voor de bepaling van de hydraulische belasting wordt voor sectie 4 en sectie 5 de totale breedte van de stuwgeul beschouwd. Voor sectie 6 wordt conservatief de halve breedte van de stuwgeul beschouwd. Voor deze condities wordt de hierboven beschreven verhoging van de sectiegemiddelde stroomsnelheid met 30 % (omwille van contractie) niet toegepast, aangezien de contractie van de stroming voor sectie 6 al meegenomen is in het beschouwen van de halve breedte van de sectie.

Een analoge redenering geldt voor sectie 13. Bij waterafvoer via 2 stuwen wordt voor deze sectie de totale breedte van de stuwgeul van 21.9 m beschouwd. Bij de beide noodscenario's doet zich stroming over één stuw voor en doet zich afwaarts van sectie 9 en sectie 10 een uitspreiding van de stroming voor tot de breedte van de stroomvoerende sectie gelijk wordt aan de totale breedte van de stuwgeul. De hoogste stroomsnelheid doet zich voor wanneer waterafvoer gebeurt via de smalste stuwgeul, i.e. de stuwgeul ter

plaats van de huidige sluis. Voor de lengte van de zone waarover de uitspreiding zich voordoet wordt in deze studie 48 m beschouwd ($= 4 \times (\text{totale breedte stuwgeul (21.9 m)} - \text{breedte huidige sluis (9.5 m)})$). Voor sectie 13, dewelke zich in deze zone bevindt wordt verondersteld dat de stroming in deze sectie (conservatief) nog een breedte heeft die gelijk is aan de breedte van de stuwgeul ter plaats van de huidige sluis (9.5 m)

Voor alle beschouwde condities en voor alle secties zijn de resultaten van de op deze wijze berekende (dieptegemiddelde) stroomsnelheid gegeven in Tabel 35 (waterafvoer via 2 stuwen), Tabel 36 (noodscenario 1) en Tabel 37 (noodscenario 2) in Bijlage 2. Tabel 19 geeft een overzicht van de voor dimensionering van de bodembescherming gebruikte waterstanden en berekende stroomsnelheden.

Op basis van Tabel 19 wordt het volgende besloten met betrekking tot het toepassen van de berekende stroomsnelheden bij de dimensionering van de bodembescherming:

1. Voor de was T100 en de was T1000 geldt voor alle secties dat bij de conditie met het maximale debiet zich hogere stroomsnelheden en lagere waterstanden voordoen dan bij de conditie met de maximale waterstand. Bij dimensionering van bodembescherming is een lagere waterstand in combinatie met hogere stroomsnelheden altijd conservatief. Om die reden zal de dimensionering van de bodembescherming enkel uitgevoerd worden voor de conditie met het maximale debiet.
2. Voor de secties gelegen in de opwaartse en afwaartse stuwgeulen (secties 4, 5, 6, 7, 9, 10, 12 en 13) geldt dat de waterpeilen bij afvoer van de wassen T100 en T1000 met 2 stuwen ongeveer gelijk zijn aan deze bij afvoer van dezelfde wassen in noodscenario 2. In noodscenario 2 echter worden voor deze secties beduidend lagere stroomsnelheden berekend dan bij afvoer met 2 stuwen. Om die reden zal de dimensionering van de bodembescherming voor deze secties enkel uitgevoerd worden voor afvoer van wassen T100 en T1000 via 2 stuwen en afvoer van de wassen T100 en T1000 in noodscenario 1.
3. Voor de secties gelegen in de opwaartse en afwaartse voorhaven (secties 1, 2, 3, 8 en 11) is enkel een stroomsnelheid berekend bij afvoer van de wassen T100 en T1000 in noodscenario 2. Voor deze secties worden enkel de stroomsnelheden berekend met dit scenario beschouwd voor de dimensionering van de bodembescherming.
4. Omwille van de verschillen in waterstand en stroomsnelheden zal de dimensionering van de bodembescherming zowel uitgevoerd worden voor de was T100 als voor de was T1000.

De op basis van deze besluiten voor de dimensionering van de bodembescherming gebruikte stroomsnelheden zijn in Tabel 19 grijs gearceerd.

Voor de turbulentie-intensiteit vermeldt "Ontwerp van Schutsluizen" (Beem *et al.*, 2000) en de Rock Manual (CIRIA; CUR, 2007) een waarde $K_T = 1.0$ voor stroming in rivieren en $K_T = 1.5$ bij verhoogde turbulentie. Voor de dimensionering van de bodembescherming zal in deze studie de waarde $K_T = 1.5$ bij verhoogde turbulentie toegepast worden.

Tabel 19 - Berekende stroomsnelheid in de gedefinieerde secties in de normale toestand en in wasregime

	Sectie	Breedte	Bodem- peil	Normale toestand		Was T100 – maximale waterstand		Was T100 – maximaal debiet		Was T1000 – maximale waterstand		Was T1000 – maximaal debiet	
				Water- peil	Stroom- snelheid	Water- peil	Stroom- snelheid	Water- peil	Stroom- snelheid	Water- peil	Stroom- snelheid	Water- peil	Stroom- snelheid
		m	mTAW	mTAW	m/s	mTAW	m/s	mTAW	m/s	mTAW	m/s	mTAW	m/s
Afvoer via 2 stuwen	1	41.5	1.53	5.83	n.v.t.	6.1	n.v.t.	5.6	n.v.t.	6.5	n.v.t.	5.7	n.v.t.
	2	12.0	1.53	5.83	n.v.t.	6.1	n.v.t.	5.6	n.v.t.	6.5	n.v.t.	5.7	n.v.t.
	3	10.5	-0.78	5.83	n.v.t.	6.1	n.v.t.	5.6	n.v.t.	6.5	n.v.t.	5.7	n.v.t.
	4	21.9	1.53	5.83	1.1	6.1	1.5	5.6	1.9	6.5	1.3	5.7	2.4
	5	21.9	0.45	5.83	0.9	6.1	1.2	5.6	1.5	6.5	1.1	5.7	1.9
	6	21.9	0.45	5.83	0.9	6.1	1.2	5.6	1.5	6.5	1.1	5.7	1.9
	7	10.4	0.15	3.45	1.2	6.1	0.9	5.5	1.2	6.5	0.8	5.6	1.5
	8	10.5	-0.78	3.45	n.v.t.	6.1	n.v.t.	5.5	n.v.t.	6.5	n.v.t.	5.6	n.v.t.
	9	9.7	0.45	3.45	1.4	6.1	1.0	5.5	1.4	6.5	0.9	5.6	1.7
	10	10.4	0.45	3.45	1.3	6.1	1.0	5.5	1.3	6.5	0.9	5.6	1.6
	11	41.2	-0.78	3.45	n.v.t.	6.1	n.v.t.	5.5	n.v.t.	6.5	n.v.t.	5.6	n.v.t.
	12	21.9	0.45	3.45	1.2	6.1	0.9	5.5	1.2	6.5	0.8	5.6	1.5
	13	21.9	0.45	3.45	1.2	6.1	0.9	5.5	1.2	6.5	0.8	5.6	1.5
Noodscenario 1	1	41.5	1.53	n.v.t.	n.v.t.	6.4	n.v.t.	6.0	n.v.t.	6.6	n.v.t.	6.4	n.v.t.
	2	12.0	1.53	n.v.t.	n.v.t.	6.4	n.v.t.	6.0	n.v.t.	6.6	n.v.t.	6.4	n.v.t.
	3	10.5	-0.78	n.v.t.	n.v.t.	6.4	n.v.t.	6.0	n.v.t.	6.6	n.v.t.	6.4	n.v.t.
	4	21.9	1.53	n.v.t.	n.v.t.	6.4	1.0	6.0	1.3	6.6	0.9	6.4	1.4
	5	21.9	0.45	n.v.t.	n.v.t.	6.4	0.9	6.0	1.1	6.6	0.7	6.4	1.2
	6	11.0	0.45	n.v.t.	n.v.t.	6.4	1.6	6.0	2.1	6.6	1.4	6.4	2.2
	7	10.4	0.15	n.v.t.	n.v.t.	6.0	1.8	5.3	2.3	6.4	1.5	5.5	2.6
	8	10.5	-0.78	n.v.t.	n.v.t.	6.0	n.v.t.	5.3	n.v.t.	6.4	n.v.t.	5.5	n.v.t.
	9	9.7	0.45	n.v.t.	n.v.t.	6.0	2.0	5.3	2.7	6.4	1.7	5.5	3.0
	10	10.4	0.45	n.v.t.	n.v.t.	6.0	1.9	5.3	2.5	6.4	1.6	5.5	2.8
	11	41.2	-0.78	n.v.t.	n.v.t.	6.0	n.v.t.	5.3	n.v.t.	6.4	n.v.t.	5.5	n.v.t.
	12	21.9	0.45	n.v.t.	n.v.t.	6.0	0.9	5.3	1.2	6.4	0.8	5.5	1.3
	13	9.7	0.45	n.v.t.	n.v.t.	6.0	2.0	5.3	2.7	6.4	1.7	5.5	3.0
Noodscenario 2	1	41.5	1.53	n.v.t.	n.v.t.	6.2	0.4	5.5	0.6	6.5	0.3	5.7	0.6
	2	12.0	1.53	n.v.t.	n.v.t.	6.2	1.4	5.5	1.9	6.5	1.0	5.7	1.9
	3	10.5	-0.78	n.v.t.	n.v.t.	6.2	1.1	5.5	1.3	6.5	0.8	5.7	1.4
	4	21.9	1.53	n.v.t.	n.v.t.	6.2	0.4	5.5	0.6	6.5	0.5	5.7	0.8
	5	21.9	0.45	n.v.t.	n.v.t.	6.2	0.3	5.5	0.5	6.5	0.4	5.7	0.7
	6	11.0	0.45	n.v.t.	n.v.t.	6.2	0.6	5.5	0.9	6.5	0.8	5.7	1.3
	7	10.4	0.15	n.v.t.	n.v.t.	6.1	0.6	5.3	0.9	6.5	0.8	5.5	1.3
	8	10.5	-0.78	n.v.t.	n.v.t.	6.1	1.1	5.3	1.4	6.5	0.8	5.5	1.5
	9	9.7	0.45	n.v.t.	n.v.t.	6.1	0.7	5.3	1.0	6.5	0.8	5.5	1.5
	10	10.4	0.45	n.v.t.	n.v.t.	6.1	0.6	5.3	1.0	6.5	0.8	5.5	1.4
	11	41.2	-0.78	n.v.t.	n.v.t.	6.1	0.3	5.3	0.4	6.5	0.2	5.5	0.4
	12	21.9	0.45	n.v.t.	n.v.t.	6.1	0.3	5.3	0.5	6.5	0.4	5.5	0.7
	13	9.7	0.45	n.v.t.	n.v.t.	6.1	0.7	5.3	1.0	6.5	0.8	5.5	1.5

n.v.t. = niet van toepassing; grijze arcering: voor dimensionering bodembescherming toegepaste stroomsnelheden

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 de opwaartse en afwaartse stuwgeulen. Een bodembescherming dient voorzien te worden in de fuiken opwaarts en afwaarts van de nieuwe sluiskolk, naast de remmingswerken in de opwaartse en afwaartse voorhavens en ter plaatse van de wachtplaatsen voor schepen in de opwaartse en afwaartse voorhavens. Daarnaast dient ook een bodembescherming voorzien te worden in de opwaartse en de afwaartse stuwgeul.

In paragraaf 4.2 wordt de methodologie voor de dimensionering van de bodembescherming in deze zones beschreven. Uit hoofdstuk 3 volgt dat ten gevolge van scheepvaart en nivelleren van de nieuwe sluis enkel stroomsnelheden aan de bodem berekend worden en ten gevolge van waterafvoer enkel dieptegemiddelde stroomsnelheden. Voor deze beide types stroomsnelheden worden andere formuleringen toegepast om de dimensionering van de bodembescherming uit te voeren, waardoor het niet mogelijk is om eerst een maatgevende belasting te bepalen. Bijgevolg zullen, omwille van de leesbaarheid van het rapport, de resultaten van de dimensionering van de bodembescherming dan ook beschreven worden in twee aparte paragrafen. De resultaten van de dimensionering van de bodembescherming in de zone onderhevig aan stroming ten gevolge van scheepvaart en nivelleren van de nieuwe sluis worden beschreven in paragraaf 4.3 en de resultaten van de dimensionering van de bodembescherming onderhevig aan stroming ten gevolge van waterafvoer in Paragraaf 4.4.

In paragraaf 4.5 wordt in detail ingegaan op de eigenschappen van de filterlaag tussen het oorspronkelijke bodemmateriaal en de bodembescherming. Paragraaf 4.6 beschrijft de overgangsconstructies tussen verschillende types bodembescherming en de beëindiging van de bodembescherming.

De bodem van de nieuwe sluis wordt uitgevoerd in beton. Opwaarts en afwaarts van de nieuw te bouwen stuwen is reeds volgende bestaande erosiebescherming aanwezig (zie paragraaf 2.1):

- Opwaarts van de beide nieuwe stuwen is een betonvloer aanwezig. Opwaarts van de nieuwe stuw in de huidige sluiskolk bedraagt de lengte van deze betonvloer 25 m. Opwaarts van de nieuwe stuw ter plaatse van de huidige stuw is de lengte gelijk aan 50 m.
- Afwaarts van de nieuwe stuw in de huidige sluiskolk is een betonvloer met een lengte van 65 m aanwezig. Afwaarts van deze betonvloer is over een lengte van 25 m een erosiebescherming bestaande uit droog beton in visgraatverband aanwezig.
- Afwaarts van de nieuwe stuw ter plaatse van de huidige stuw is een erosiebescherming bestaande uit beton met zetstenen aanwezig met een lengte van 65 m.

In paragraaf 4.4 wordt nagegaan aan welke stroomsnelheden deze bestaande bodembescherming uit beton kan weerstaan en worden deze stroomsnelheden vergeleken met waarden van stroomsnelheden ten gevolge van overstortend water afwaarts van stuwen opgemeten of berekend in andere studies.

4.2 Methodologie bepaling type bodembescherming

In hoofdstuk 3 is de hydraulische belasting op de bodem van de opwaartse en de afwaartse voorhaven en op de bodem van de opwaartse en afwaartse stuwgeulen bepaald. Ten gevolge van scheepvaart en nivelleren van de sluiskolk werd hierbij een stroomsnelheid aan de bodem berekend, ten gevolge van waterafvoer werd een dieptegemiddelde stroomsnelheid berekend.

Aan de hand van deze berekende stroomsnelheden zal er initieel van uitgegaan worden dat in al de beschouwde zones een bodembescherming uit breuksteen voorzien wordt. Indien een breuksteenbekleding niet voldoet om te weerstaan aan de hydraulische belasting aan de bodem wordt in dit rapport enkel gepenetreerde breuksteen als alternatief type bodembescherming voorgesteld. Als alternatieve bodembescherming zou ook Open steenasfalt of colloïdaal beton voorgesteld kunnen worden. Uit paragraaf 4.3 en paragraaf 4.4 volgt dat breuksteen niet voldoet in een zone met breedte van enkele meters naast een gesloten wand van een kaaimuur of remmingswerk. In het overige gedeelte van de voorhaven voldoet breuksteen wel. Bij toepassen van penetratie naast de gesloten wand kan hetzelfde type bodembescherming toegepast worden als in de rest van de voorhaven. Om die reden wordt Open steenasfalt of colloïdaal beton in deze studie verder niet meer beschouwd als alternatief type bodembescherming.

In paragraaf 4.2.3 worden de formulerings voor de dimensionering van een bodembescherming uit beton gegeven. Deze formulerings worden in paragraaf 4.4 gebruikt om na te gaan aan welke stroomsnelheden de bestaande bodem uit beton in de huidige sluis en in de huidige stuwgeul kan weerstaan.

4.2.1 Breuksteenbekleding

Wat breuksteen betreft wordt de diameter van breuksteen berekend aan de hand van de volgende formulerings:

1. De Shields-formulering aangepast voor stralen uit “Ontwerp van Schutsluizen” (Beem *et al.*, 2000), wanneer de stroomsnelheid nabij de bodem gekend is:

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

met:

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

2. De formulering volgens Pilarczyk (Pilarczyk, 1990, 1998) wanneer een dieptegemiddelde stroomsnelheid gekend is:

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

met:

- D	Dikte schanskorven	[m]
- Δ	Specifieke dichtheid ($\Delta = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}$)	[-]
- ρ_s	Dichtheid breuksteen (= 2650 kg/m ³)	[kg/m ³]
- ρ_w	Dichtheid water (= 1000 kg/m ³)	[kg/m ³]
- K_T	Turbulentiefactor	[-]
	Waarden: 1.0 Normale turbulentie	
	1.5 Verhoogde turbulentie	
	2.0 Hevige turbulentie (watersprong)	
	3.0 (tot 4.0) Schroefstraalstroming	
- K_h	Diepte- (of snelheidsprofiel) factor	[-]
	$K_h = \left(\frac{h}{D_{n50}} \right)^{-0.2}$ <i>niet volledig ontwikkeld snelheidsprofiel</i>	
- h	Waterdiepte	[m]
- K_S	Hellingfactor (= 1 voor vlakke bodem)	[-]
- Ψ	Kritische schuifspanningsparameter (= 0.035 voor breuksteen)	[-]
- Φ	Stabiliteitsfactor voor stroming (= 1.00)	[-]

Wat betreft de stabiliteitsfactor Φ beveelt het PIANC rapport 180 (MarCom Working Group 180, 2015) een waarde tussen 0.75 en 1.00 aan voor een continue breuksteenbekleding. In deze studie wordt voor deze factor de waarde 1.00 toegepast.

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 2.5.

4.2.2 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 20 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 20 - 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

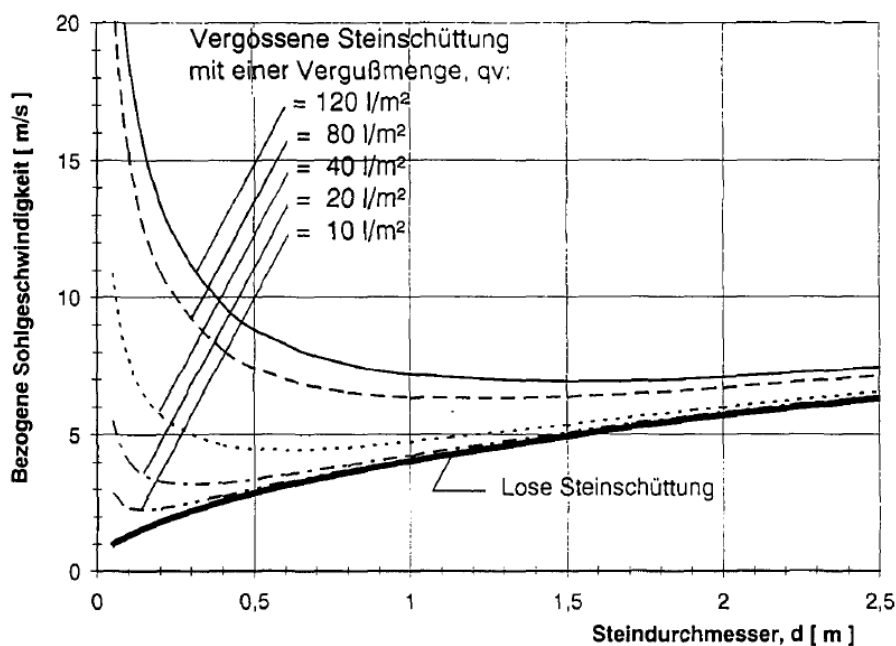
Het standaardbestek 260 voor de waterbouw voorziet twee soorten van grouting:

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

Figuur 15 – Verband tussen maximaal toegelaten stroomsnelheid en breuksteendiameter voor (met beton) gepenetreerde breuksteen



Bron: Römisch (2000).

Uit Figuur 15 volgt dat breuksteen met diameters tussen 0.20 m en 0.30 m gepenetreerd met 150 l/m² kan weerstaan aan stroomsnelheden hoger dan 10 m/s. Römisch (2000) merkt hierbij wel op dat de weerstand van gepenetreerde breuksteen tegen stroomsnelheden tot 6 à 8 m/s bewezen is uit proeven en metingen, maar dat de toelaatbare stroomsnelheden hoger dan 6 à 8 m/s volgen uit theoretische berekeningen.

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

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

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

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.

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

4.2.3 Bodembescherming uit beton

Algemeen kan de dikte van de bodembescherming uit 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 (bij belasting door scheepvaart). De bekomen diktes dienen wel nog verhoogd te worden om oneffenheden bij de uitvoering van de betonplaat in rekening te brengen.

De betonplaat in de bestaande sluis, respectievelijk de betonplaat in de huidige stuwgeul hebben een dikte van 1.00 à 1.50 m, respectievelijk 0.75 m. De lengte van de betonplaat bedraagt 65 m, wat bij een dikte van 1.50 m juist gelijk is aan 45 maal de maximale dikte van de betonplaat (45 x 1.50 = 67 m).

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 geen veiligheidsfactor wordt in rekening gebracht, wordt dit in dit rapport ook niet toegepast bij de dimensionering van de bodembescherming uit beton.

- b. 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 kg/m ³)	[kg/m ³]
- ρ_w	Dichtheid water (= 1000 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°)	[°]
- K_S	Hellingfactor (= cos (α)) .	[-]
- Ψ	Kritische schuifspanningsparameter (= 0.07)	[-]
- Φ	Stabiliteitsfactor voor stroming	[-]
- u_b	Stroomsnelheid aan de bodem	[m/s]
- g	Valversnelling (= 9.81 m/s ²)	[m/s ²]

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.

4.3 Resultaten dimensionering bodembescherming onderhevig aan stroming ten gevolge van scheepvaart en nivelleren sluiskolk

4.3.1 Algemeen

Stroming ten gevolge van scheepvaart en nivelleren van de sluiskolk doet zich voor in de fuik en ter plaatse van wachtplaatsen en remmingswerken in de opwaartse en de afwaartse voorhaven. Tabel 21 geeft een overzicht van de optredende hydraulische belastingen ten gevolge van scheepvaart in deze zones.

Tabel 21 – Optredende hydraulische belastingen ten gevolge van scheepvaart

Zone	Optredende hydraulische belasting
Wachtplaats opwaartse voorhaven	Stroming ten gevolge van hoofdschroef Stroming ten gevolge van boegschroef
Remmingswerk opwaartse voorhaven	Stroming ten gevolge van hoofdschroef Stroming ten gevolge van boegschroef
Fuik opwaartse voorhaven	Stroming ten gevolge van hoofdschroef Stroming ten gevolge van boegschroef Stroming ten gevolge van nivelleren sluiskolk Retourstroming bij invaren sluiskolk
Fuik afwaartse voorhaven	Stroming ten gevolge van hoofdschroef Stroming ten gevolge van boegschroef Stroming ten gevolge van nivelleren sluiskolk Retourstroming bij invaren sluiskolk
Remmingswerk afwaartse voorhaven	Stroming ten gevolge van hoofdschroef Stroming ten gevolge van boegschroef
Wachtplaats afwaartse voorhaven	Stroming ten gevolge van hoofdschroef Stroming ten gevolge van boegschroef

Voor al deze zones en de bijbehorende optredende hydraulische belastingen wordt in paragraaf 4.3.2 eerst het type bodembescherming en de dikte van de bodembescherming bepaald. Daarna wordt in paragraaf 4.3.3 de minimale lengte van de bodembescherming, die opwaarts en afwaarts van de nieuwe sluiskolk dient aangebracht te worden, berekend. De berekening van de minimale strookbreedte van de bodembescherming naast remmingswerken en wachtplaatsen is beschreven in paragraaf 4.3.4.

In paragraaf 4.3.5 wordt aan de hand van deze resultaten een samenvatting gegeven van de bodembescherming die nodig is om te weerstaan aan stroming ten gevolge van scheepvaart en stroming ten gevolge van nivelleren van de nieuwe sluis.

4.3.2 Bepaling type bodembescherming

Voor alle in Tabel 21 vermelde zones en de bijbehorende optredende hydraulische belasting is de benodigde mediaan breuksteendiameter en het mediaan breuksteengewicht berekend met behulp van de Shields-formulering aangepast voor stralen. De resultaten van deze berekening zijn gegeven in Tabel 38 (wachtplaats en remmingswerk in de opwaartse en afwaartse voorhaven), Tabel 39 (fuik opwaartse voorhaven) en Tabel 40 (fuik afwaartse voorhaven) in Bijlage 3. Tabel 22 geeft voor elke zone en voor elke hydraulische belasting een overzicht van het benodigd mediaan breuksteengewicht. Aan de hand van de breuksteensorteringen uit paragraaf 2.5 is in deze tabel voor elke zone en voor elke hydraulische belasting ook een breuksteensortering geselecteerd. Deze geselecteerde breuksteensortering is ook in Tabel 22 vermeld.

Tabel 22 - Benodigd mediaan breuksteengewicht M_{50} en overeenkomstige breuksteensortering voor de gedefinieerde zones om te weerstaan aan stroming ten gevolge van scheepvaart en nivelleren sluiskolk.

	Zone		Bodempeil	Stroming t.g.v. hoofdschroef	Stroming t.g.v. boegschroef*	Stroming t.g.v. nivelleren sluiskolk	Retourstroming
Mediaan Breuksteengewicht	Opwaartse voorhaven	Wachtplaats	1.53 m TAW	4 kg	8430 kg	n.v.t.	n.v.t.
		Remmingswerk	1.53 m TAW	11 kg	8430 kg	n.v.t.	n.v.t.
		Fuik	1.53 m TAW	11 kg	8430 kg	n.v.t.	n.v.t.
			- 0.78 m TAW	< 1 kg	5 kg	< 1 kg	< 1 kg
	Afwaartse voorhaven	Wachtplaats	- 0.78 m TAW	4 kg	10530 kg	n.v.t.	n.v.t.
		Remmingswerk	- 0.78 m TAW	17 kg	10530 kg	n.v.t.	n.v.t.
		Fuik	- 0.78 m TAW	17 kg	10530 kg	< 1 kg	< 1 kg
Breuksteensortering	Opwaartse voorhaven	Wachtplaats	1.53 m TAW	63/180 mm	-	n.v.t.	n.v.t.
		Remmingswerk	1.53 m TAW	5-40 kg	-	n.v.t.	n.v.t.
		Fuik	1.53 m TAW	5-40 kg	-	n.v.t.	n.v.t.
			- 0.78 m TAW	32/90 mm	63/180 mm	32/90 mm	32/90 mm
	Afwaartse voorhaven	Wachtplaats	- 0.78 m TAW	63/180 mm	-	n.v.t.	n.v.t.
		Remmingswerk	- 0.78 m TAW	5-40 kg	-	n.v.t.	n.v.t.
		Fuik	- 0.78 m TAW	5-40 kg	-	32/90 mm	63/180 mm

n.v.t. = niet van toepassing; - = onbestaande breuksteensortering;

* Deze sortering geldt enkel voor de bodembescherming naast een verticale wand.

Wordt de stroming ten gevolge van de boegschroef buiten beschouwen gelaten, dan volgt uit Tabel 22 dat in de fuiken en ter plaatse van het remmingswerk een breuksteensortering 5 – 40 kg volstaat om te weerstaan aan de stroming ten gevolge van de hoofdschroef en een sortering 63/180 mm ter plaatse van de wachtplaats. Om te weerstaan aan stroming ten gevolge van nivelleren sluiskolk en retourstroming is een bodembescherming 32/90 mm in de fuik in de opwaartse voorhaven voldoende en 63/180 mm in de fuik in de afwaartse voorhaven.

Om te kunnen weerstaan aan de boegschroefbelasting blijkt dat een onrealistisch grote breuksteensortering nodig is naast de kaaimuren en remmingswerken in de opwaartse en de afwaartse voorhaven. Enkel in het gedeelte van de opwaartse voorhaven met bodempeil – 0.78 m TAW volstaat een breuksteensortering 63/180 mm. Echter, uit paragraaf 3.4 volgt dat in de afwaartse voorhaven en bij een bodempeil + 1.53 m TAW in de opwaartse voorhaven de stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de boegschroef op een afstand groter dan 2 à 3 m verwijderd van een verticale wand zoals een kaaimuur of

een remmingswerk reeds lager is dan de stroomsnelheid ten gevolge van de hoofdschroef. Dit heeft tot gevolg dat in deze zone met hoge stroomsnelheden enkel juist naast de verticale wand een alternatieve bodembescherming voorzien dient te worden. Als alternatieve bodembescherming wordt voor penetratie van de breuksteen met colloïdaal beton gekozen. Op deze wijze kan in de fuiken van de opwaartse en afwaartse voorhaven zelf en ter plaatse van wachtplaatsen en remmingswerken in de opwaartse en afwaartse voorhaven zelf breuksteen voorzien worden, waarbij aan de randen naast verticale wanden een penetratie van dezelfde breuksteen wordt toegepast om te weerstaan aan de hoge stroomsnelheden ten gevolge van de boegschroef.

Bijgevolg wordt volgende bodembescherming voorgesteld voor de verschillende zones:

1. Wachtplaats en remmingswerk in de opwaartse voorhaven: breuksteen 5 – 40 kg. Hierbij wordt een strook van 3 m naast de kaaimuur gepenetreerd met colloïdaal beton.
2. Fuik opwaartse voorhaven: breuksteen 5 – 40 kg. Hierbij wordt een strook van 3 m naast de kaaimuur gepenetreerd met colloïdaal beton. In het gedeelte met lengte 5 m opwaarts van de sluiscolk met bodempeil – 0.78 m TAW wordt geen penetratie naast de kaaimuur voorzien, aangezien een bodembescherming uit breuksteen hier volstaat.
3. Fuik, remmingswerk en wachtplaats in de afwaartse voorhaven: breuksteen 5 – 40 kg. Hierbij wordt een strook van 3 m naast de kaaimuur gepenetreerd met colloïdaal beton.

4.3.3 Lengte bodembescherming opwaarts en afwaarts van de nieuwe sluis

Opwaarts en afwaarts van een sluis moet de minimale lengte van de zone met bodembescherming 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 en de afwaartse voorhaven.

Bij de berekening van de minimale lengte van de bodembescherming wordt gebruik gemaakt van de mediaan korreldiameter D_{50} van het aanwezige bodemmateriaal. In paragraaf 2.4 is gesteld dat bij wijze van gevoeligheidsanalyse drie waarden voor de mediaan korreldiameter van het bodemmateriaal beschouwd worden, namelijk $D_{50} = 100 \mu\text{m}$, $D_{50} = 200 \mu\text{m}$ en $D_{50} = 300 \mu\text{m}$.

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 (bodempesil – 0.78 m TAW) en voor de drie beschouwde waarden voor de mediaan korreldiameter D_{50} (100 μm , 200 μm en 300 μm). De resultaten van deze berekening zijn gegeven in Tabel 44 in Bijlage 3.

Uit Tabel 44 in Bijlage 3 volgt dat de stroomsnelheid in de afwaartse voorhaven kleiner is dan de kritische stroomsnelheid voor het bodemmateriaal. Bijgevolg wordt een lengte van de bodembescherming beschouwd van 8 maal de waterdiepte, i.e. 34 m (= 8 x 4.23 m).

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 zowel uitgevoerd voor de fuik opwaarts van de nieuwe sluis, als voor de fuik afwaarts van de nieuwe sluis. Voor deze beide locaties wordt het bodempeil – 0.78 m TAW beschouwd en worden de drie beschouwde waarden voor de mediaan korreldiameter toegepast (100 μm , 200 μm en 300 μm).

De resultaten van deze berekening zijn gegeven in Tabel 45 in Bijlage 3. Uit deze tabel volgt een minimale lengte van de bodembescherming tussen 13 m ($D_{50} = 300 \mu\text{m}$) en 24 m ($D_{50} = 100 \mu\text{m}$) afwaarts van de nieuwe sluis. Opwaarts van de nieuwe sluis is de stroomsnelheid kleiner dan de kritische stroomsnelheid voor het bodemmateriaal. Bijgevolg wordt opwaarts een lengte van de bodembescherming van 53 m beschouwd ($= 8 \times 6.61 \text{ m}$).

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 als de fuik in de afwaartse voorhaven.
- De beide beschouwde bodempeilen voor de opwaartse voorhaven, i.e. het bodempeil – 0.78 m TAW en het bodempeil + 1.53 m TAW. Voor de afwaartse voorhaven wordt het bodempeil - 0.78 m TAW beschouwd.
- 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 46 (theorie van erosie achter ronde straal) en Tabel 47 (theorie van straalspreiding) in Bijlage 3. Uit deze tabellen volgt een lengte van de bodembescherming tussen 47 m ($D_{50} = 300 \mu\text{m}$) en 75 m ($D_{50} = 100 \mu\text{m}$) in de afwaartse voorhaven en een lengte tussen 46 m ($D_{50} = 300 \mu\text{m}$) en 74 m ($D_{50} = 100 \mu\text{m}$) in de opwaartse voorhaven

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, – 0.78 m TAW. Bij de waterstand van + 5.83 m TAW in de opwaartse voorhaven en + 1.53 m TAW in de afwaartse voorhaven volgt hieruit een waterdiepte van 6.61 m in de opwaartse voorhaven en 4.23 m in de afwaartse voorhaven. Aan de hand van deze waterdieptes wordt opwaarts van de nieuwe sluis een minimale lengte van 53 m ($= 8 \times 6.61 \text{ m}$) berekend en afwaarts van de nieuwe sluis een minimale lengte van 34 m ($= 8 \times 4.23 \text{ m}$). 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.

Tabel 23 geeft een samenvatting van de hierboven berekende lengtes van de bodembescherming.

Tabel 23 – Overzicht berekende lengte bodembescherming voor opwaartse en de afwaartse voorhaven

Hydraulische belasting	Locatie	D ₅₀ = 100 µm	D ₅₀ = 200 µm	D ₅₀ = 300 µm
Ledigingsstroming	Afwaartse voorhaven	34 m	34 m	34 m
Retourstroming	Afwaartse voorhaven	24 m	17 m	13 m
	Opwaartse voorhaven	53 m	53 m	53 m
Schroefstraalstroming	Afwaartse voorhaven	75 m	56 m	47 m
	Opwaartse voorhaven	74 m	55 m	46 m
8 x waterdiepte	Afwaartse voorhaven	34 m	34 m	34 m
	Opwaartse voorhaven	53 m	53 m	53 m

Bij resultaten uit Tabel 23 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 volgt dat voor dit type belasting relatief grote lengtes (tussen 40 m en 70 m) en dieptes (tussen 3 m en 11 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. Bij het ontwerp van de bodembescherming voor de nieuwe sluis te Sint-Baafs-Vijve (Verelst *et al.*, 2016b) zijn om die reden en omwille van het feit dat formuleringen toegepast worden die niet afgeleid zijn voor stroming achter een schroef de resultaten van deze formulering niet beschouwd bij de bepaling van de minimale lengte van de bodembescherming.

Om die reden en op basis van de resultaten uit Tabel 23 wordt voorgesteld om zowel opwaarts als afwaarts van de nieuwe sluis de volledige fuik met een lengte van 58 m te voorzien van een bodembescherming. Deze lengte is enerzijds hoger dan de benodigde lengte voor ledigingsstroming, retourstroming en 8 maal de waterdiepte, maar nog iets kleiner dan de maximale benodigde lengte van 75.0 m voor schroefstraalstroming berekend voor D₅₀ = 100 µm.

4.3.4 Minimale strookbreedte bodembescherming naast remmingswerken en kaaimuren

Het remmingswerk opwaarts en afwaarts van de nieuwe sluis bestaat uit een gesloten wand. Ook de kaaimuren van de wachtplaatsen in de opwaartse en de afwaartse voorhaven zijn 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 formuleringen voor een gesloten remmingswerk uit “Ontwerp van Schutsluizen” (Beem *et al.*, 2000).

Volgens “Ontwerp van Schutsluizen” 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 straalspreading.
- Een praktische waarde van 1 à 1.5 keer de scheepsbreedte (i.e. 9.5 à 14.3 m voor een schip CEMT-klasse IV).

Ter plaatse van remmingswerken en wachtplaatsen zijn stroming ten gevolge van hoofdschroef en boegschroef van het schip de belangrijkste optredende hydraulische belastingen. Uit paragraaf 3.4 volgt dat de belasting ten gevolge van boegschroeven op een afstand van ca. 2 à 3 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. Het bodempeil ter plaatse van het remmingswerk en de wachtplaats in de opwaartse voorhaven bedraagt + 1.53 m TAW, dit voor het remmingswerk en de wachtplaats in de afwaartse voorhaven – 0.78 m TAW. Om die reden wordt het bodempeil + 1.53 m TAW beschouwd voor het remmingswerk en de wachtplaats opwaarts en het bodempeil – 0.78 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} (100 μm , 200 μm en 300 μm).

De resultaten van deze berekeningen zijn gegeven Tabel 48 (theorie van erosie achter een ronde straal) en Tabel 49 (theorie van straalspreading) in Bijlage 3. Uit deze tabellen volgt voor de remmingswerken en wachtplaatsen, zowel opwaarts als afwaarts van de nieuwe sluis, een minimaal strookbreedte van de bodembescherming van 1.9 m. Deze strookbreedte is kleiner dan de praktische waarde van 1.0 à 1.5 keer de scheepsbreedte (i.e. 9.5 à 14.3 m).

Daarnaast vermelden Blokland & Roubos (2013) dat naast een wachtplaats de breedte van de bodembescherming minimaal gelijk dient te zijn aan de breedte van de passieve grondwig naast de kaaimuur. Uit het ontwerp van de kaaimuren voor het stuwsluiscomplex te Denderbelle volgt dat de breedte van de passieve grondwig in de opwaartse voorhaven 21 m bedraagt, 20 m aan de linkeroever in de afwaartse voorhaven en 16 m aan de rechteroever in de afwaartse voorhaven.

Analoog als in Verelst *et al.* (2016b) wordt in deze studie voor wachtplaatsen een breedte van de bodembescherming 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: 21 m
- Remmingswerk in de opwaartse voorhaven: 10 m
- Remmingswerk in de afwaartse voorhaven: 10 m
- Wachtplaatsen in de afwaartse voorhaven: 20 m

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

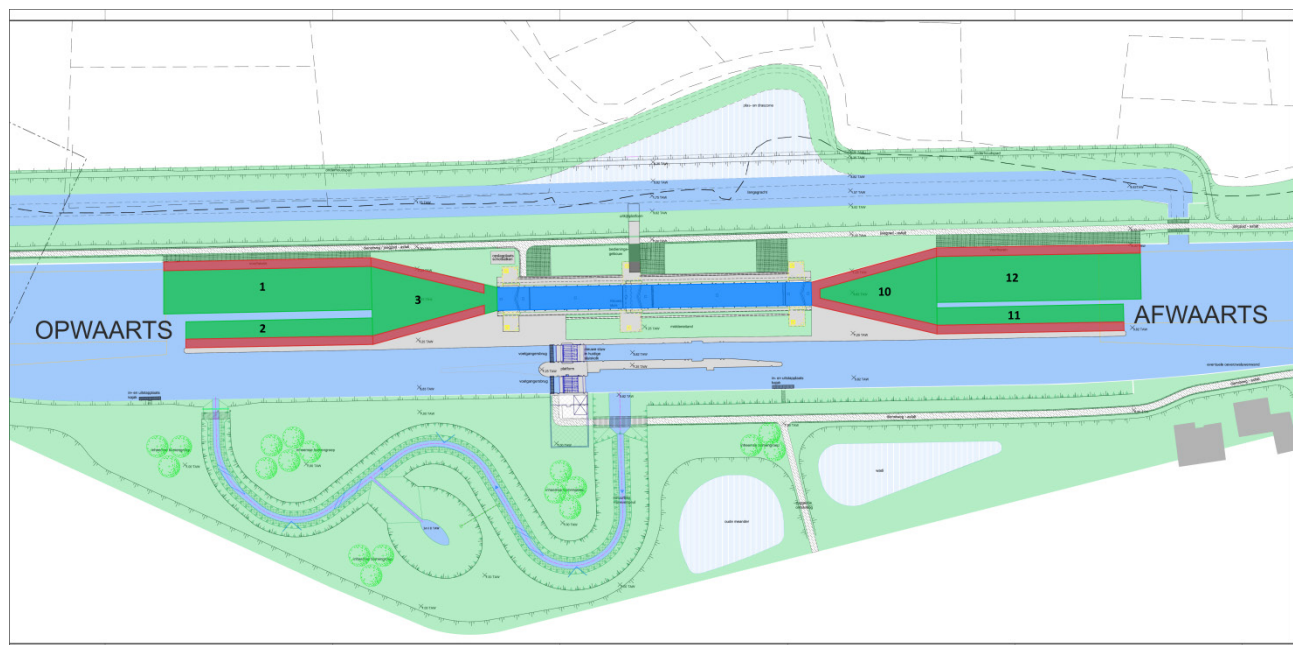
4.3.5 Samenvatting benodigde bodembescherming onderhevig aan stroming ten gevolge van scheepvaart en nivelleren sluiskolk

Op basis van de resultaten van de dimensionering van de bodembescherming uit paragrafen 4.3.2, 4.3.3 en 4.3.4 wordt de bodembescherming uit Tabel 24 voorgesteld voor de opwaartse en afwaartse voorhavens. Deze bodembescherming is ook voorgesteld in Figuur 16.

Tabel 24 – Samenvatting bodembescherming onderhevig aan stroming ten gevolge van scheepvaart en nivelleren sluiskolk

	Zone	Type bodembescherming	Lengte	Breedte
Wachtplaats opwaarts	1	Breuksteen 5 – 40 kg; Strook met breedte 3 m naast kaaimuur gepenetreerd met colloïdaal beton	Lengte kaaimuur	21 m
Remmingswerk opwaarts	2		Lengte remmingswerk	10 m
Fuik opwaarts	3	Breuksteen 5 – 40 kg; Strook met breedte 3 m naast kaaimuur gepenetreerd met colloïdaal beton. Het gedeelte met bodempeil – 0.78 m TAW wordt niet geopenetreerd.	58 m	Breedte fuik
Fuik afwaarts	10	Breuksteen 5 – 40 kg; Strook met breedte 3 m naast kaaimuur gepenetreerd met colloïdaal beton	58 m	Breedte fuik
Remmingswerk afwaarts	11		Lengte remmingswerk	10 m
Wachtplaats afwaarts	12		Lengte kaaimuur	20 m

Figuur 16 – Bodembescherming onderhevig aan stroming ten gevolge van scheepvaart en nivelleren sluiskolk



4.4 Resultaten dimensionering bodembescherming onderhevig aan stroming ten gevolge van waterafvoer

Stroming ten gevolge van waterafvoer doet zich voornamelijk voor in de stuwgeulen opwaarts en afwaarts. Enkel bij noodscenario 2, waarbij er ook waterafvoer door de sluiskolk is, doet zich een stroming in de opwaartse en de afwaartse voorhaven van de sluiskolk voor. In al deze zones is in paragraaf 3.6 een dieptegemiddelde stroomsnelheid berekend als hydraulische belasting op de bodem.

Voor elke gedefinieerde sectie in de opwaartse en afwaartse stuwgeulen en in de opwaartse en afwaartse voorhavens en voor elke in paragraaf 3.6 beschouwde conditie is de benodigde mediaan breuksteendiameter en het mediaan breuksteengewicht berekend met behulp van formulering volgens Pilarczyk. De resultaten van deze berekening zijn gegeven in Tabel 41 (secties 4, 5, 6 en 7), Tabel 42 (secties 9, 10, 11 en 12) en Tabel 43 (secties 1, 2, 3, 8 en 11) in Bijlage 3. Tabel 25 geeft voor elke gedefinieerde sectie en voor elke beschouwde conditie een overzicht van het benodigd mediaan breuksteengewicht. Aan de hand van de breuksteensorteringen uit paragraaf 2.5 is voor elke gedefinieerde sectie ook een breuksteensortering geselecteerd. Deze zijn ook in Tabel 25 vermeld.

Tabel 25 - Benodigd mediaan breuksteengewicht M_{50} en overeenkomstige breuksteensortering voor de gedefinieerde secties en de beschouwde condities om te weerstaan aan stroming ten gevolge van waterafvoer.

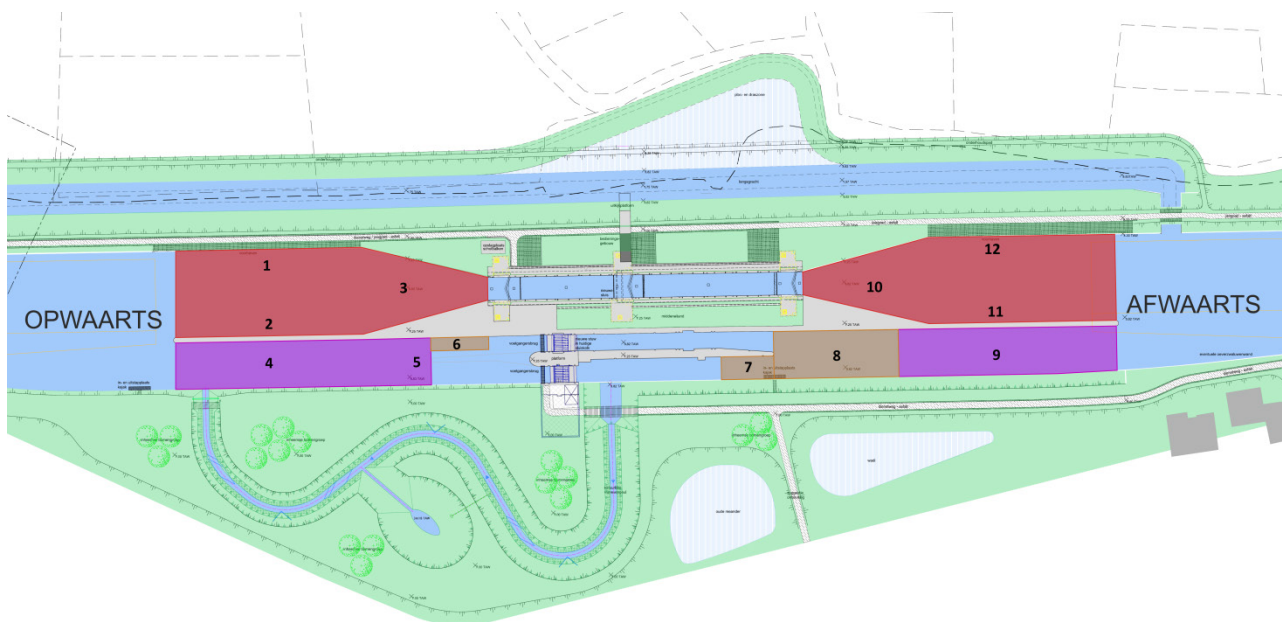
	Sectie	Breuksteengewicht M_{50}			Breuksteensortering		
		Normale toestand	Was T100	Was T1000	Normale toestand	Was T100	Was T1000
Afvoer via 2 stuwen	4	< 1 kg	1 kg	6 kg	32/90 mm	32/90 mm	63/180 mm
	5	< 1 kg	< 1 kg	< 1 kg	32/90 mm	32/90 mm	32/90 mm
	6	< 1 kg	< 1 kg	< 1 kg	32/90 mm	32/90 mm	32/90 mm
	7	< 1 kg	< 1 kg	< 1 kg	32/90 mm	32/90 mm	32/90 mm
	9	< 1 kg	< 1 kg	< 1 kg	32/90 mm	32/90 mm	32/90 mm
	10	< 1 kg	< 1 kg	< 1 kg	32/90 mm	32/90 mm	32/90 mm
	12	< 1 kg	< 1 kg	< 1 kg	32/90 mm	32/90 mm	32/90 mm
	13	< 1 kg	< 1 kg	0.2 kg	32/90 mm	32/90 mm	32/90 mm
Noodscenario 1	4	n.v.t.	< 1 kg	< 1 kg	n.v.t.	32/90 mm	32/90 mm
	5	n.v.t.	< 1 kg	< 1 kg	n.v.t.	32/90 mm	32/90 mm
	6	n.v.t.	2 kg	3 kg	n.v.t.	63/180 mm	63/180 mm
	7	n.v.t.	4 kg	10 kg	n.v.t.	63/180 mm	5 – 40 kg
	9	n.v.t.	14 kg	29 kg	n.v.t.	5 - 40 kg	10 - 60 kg
	10	n.v.t.	8 kg	18 kg	n.v.t.	63/180 mm	5 - 40 kg
	12	n.v.t.	< 1 kg	< 1 kg	n.v.t.	32/90 mm	32/90 mm
	13	n.v.t.	14 kg	30 kg	n.v.t.	5 - 40 kg	10 - 60 kg
Noodscenario 2	1	n.v.t.	< 1 kg	< 1 kg	n.v.t.	32/90 mm	32/90 mm
	2	n.v.t.	1 kg	1 kg	n.v.t.	32/90 mm	32/90 mm
	3	n.v.t.	< 1 kg	< 1 kg	n.v.t.	32/90 mm	32/90 mm
	8	n.v.t.	< 1 kg	< 1 kg	n.v.t.	32/90 mm	32/90 mm
	11	n.v.t.	< 1 kg	< 1 kg	n.v.t.	32/90 mm	32/90 mm

n.v.t. = niet van toepassing; * = onbestaande breuksteensortering

Uit Tabel 25 volgt dat in de opwaartse stuwgeul (sectie 4, sectie 5 en sectie 6) relatief kleine breuksteensorteringen (32/90 mm en 63/180 mm) volstaan om te weerstaan aan waterafvoer in de normale toestand en in het noodscenario. Voor de afwaartse stuwgeul is de grootste breuksteensortering de sortering 5 – 40 kg in sectie 9 en sectie 13 om te weerstaan aan waterafvoer bij was T100 in noodscenario 1 en een sortering 10 - 60 kg in dezelfde secties om te weerstaan aan waterafvoer bij was T1000 in noodscenario 1. Omwille van de grotere breedte van de sectie en de bijbehorende lagere stroomsnelheden wordt in sectie 10 een iets lichtere bodembescherming berekend (63/180 mm om te weerstaan aan waterafvoer bij was T100 in noodscenario 1 en 5 - 40 kg om te weerstaan aan waterafvoer bij was T1000 in noodscenario 1).

Aan de hand van de in Tabel 25 vermelde resultaten wordt de bodembescherming in de opwaartse en afwaartse voorhavens en de opwaartse en afwaartse stuwgeulen nodig om te weerstaan aan waterafvoer onderverdeeld in de 7 zones afgebeeld in Figuur 17. Voor de lengte van zone 5 (bruin gekleurd in Figuur 17) wordt de lengte van het gebied beschouwd waarin de uitspreiding van de stroming zich voordoet (= 48 m; zie paragraaf 3.6).

Figuur 17 – Zones benodigde bodembescherming onderhevig aan stroming ten gevolge van waterafvoer



Tabel 26 geeft voor deze zones een overzicht van de benodigde breuksteensortering om te weerstaan aan stroming ten gevolge van waterafvoer. In deze tabel worden twee condities beschouwd, namelijk de bodembescherming die nodig is om te weerstaan aan waterafvoer in de normale toestand en bij was T100 en de bodembescherming die nodig is om te weerstaan aan waterafvoer bij was T1000. Dit onderscheid laat de opdrachtgever toe om aan de hand van andere factoren (kostprijs, e.d.) een keuze te maken tussen de benodigde bodembescherming en de terugkeerperiode van de was waaraan deze bodembescherming dient de weerstaan.

Uit Tabel 26 volgt wel dat voor de opwaartse en afwaartse voorhavens een breuksteensortering bekomen wordt die beduidend kleiner is dan deze die nodig is om te weerstaan aan scheepvaart en nivelleren van de sluisolk (zie paragraaf 4.3.5). Voor zone 8 wordt een zwaardere bodembescherming berekend dan bij zone 7, aangezien de bodembescherming voor zone 8 bepaald is als het maximum van deze berekend in sectie 9 en sectie 13. De bodembescherming in zone 7 is het maximum van de (minder zware bodembescherming) in sectie 7 en sectie 10.

Tabel 26 – Benodigde bodembescherming voor de gedefinieerde zones om te weerstaan aan stroming ten gevolge van waterafvoer

	Zone (kleur)	Normale toestand en Was T100	Was T1000
Opwaartse voorhaven	1,2,3 (rood)	Breuksteen 32/90 mm	Breuksteen 32/90 mm
Opwaartse stuwgeul	4,5 (paars)	Breuksteen 32/90 mm	Breuksteen 63/180 mm
	6 (bruin)	Breuksteen 63/180 mm	Breuksteen 63/180 mm
Afwaartse stuwgeul	7 (bruin)	Breuksteen 63/180 mm	Breuksteen 5 – 40 kg
	8 (bruin)	Breuksteen 5 - 40 kg; Lengte: 48 m	Breuksteen 10 - 60 kg; Lengte: 48 m
	9 (paars)	Breuksteen 63/180 mm	Breuksteen 63/180 mm
Afwaartse voorhaven	10,11,12 (rood)	Breuksteen 32/90 mm	Breuksteen 32/90 mm

Grijze arcering: enkel bij vernieuwing van de bestaande bodembescherming uit breuksteen

Met betrekking tot de bestaande bodembescherming uit beton volgt uit de plannen van de huidige sluis, de huidige stuw en de huidige stuwgeul het volgende:

- In de bestaande sluis bestaat de sluiskolkvloer uit gewapend beton met een dikte tussen 1.0 m en 1.5 m.
- In de stuwgeul is een vloer uit beton aanwezig met een dikte van 0.75 m in het midden van de stuwgeul en een dikte van 1.5 m aan de beide zijanten van de stuwgeul. Dit gedeelte met dikte 1.50 m heeft een breedte van 1.5 m.

Aan de hand van de formulering volgens Raes *et al.* (1996) en de formulering volgens Pilarczyk (zie paragraaf 4.2.3) is berekend aan welke maximale stroomsnelheden een betonplaat met de hierboven vermelde diktes kan weerstaan. De waarden voor deze maximale stroomsnelheden zijn gegeven in Tabel 27. Uit deze tabel volgt dat de beton in de huidige stuwgeul kan weerstaan aan stroomsnelheden van 4.5 m/s à 6.2 m/s. De beton in de huidige sluiskolk kan weerstaan aan stroomsnelheden van 5.2 m/s à 8.4 m/s. Hierbij wordt opgemerkt dat bij deze inschatting geen rekening gehouden is met de zetstenen in de huidige stuwgeul, dewelke voor energiedissipatie (dus lagere stroomsnelheden) zullen zorgen en met de wapening van de beton in de huidige sluiskolk (wat zorgt voor een extra versteviging).

Tabel 27 – Maximale stroomsnelheden voor beton in huidige stuwgeul en huidige sluiskolk

Locatie	Dikte beton	Stroomsnelheid	
		Raes <i>et al.</i> (1996)	Pilarczyk
As van huidige stuwgeul	0.75 m	4.5 m/s	6.2 m/s
Huidige sluiskolk	1.00 m	5.2 m/s	7.0 m/s
	1.50 m	6.4 m/s	8.4 m/s

Voorafwaarts van de nieuwe stuwen kunnen zich ten gevolge van het over de stuwen overstortende water hoge stroomsnelheden aan de bodem voordoen. Uit metingen uitgevoerd in het schaalmodel van de stuwsuis te Aalst in het kader van de dimensionering van de erosiebescherming (Verelst *et al.*, 2009) volgt dat zich in de eerste ca. 10 m afwaarts van de nieuwe stuwen stroomsnelheden juist boven de bodem tot

4 à 5 m/s kunnen voordoen. Verder afwaarts gaat de stroming over in een uniforme (over de verticale) stroming met lagere stroomsnelheden aan de bodem.

Ten gevolge van overstorting over de stuw kan zich een watersprong vormen, wat gepaard kan gaan met hoge stroomsnelheden en hoge turbulenties. Uit de dimensionering van de bodembescherming voor de stuwgeul te Asper (Verelst *et al.*, 2015) volgt dat afwaarts van een stuw stroomsnelheden tot 6 m/s kunnen ontstaan. Anderzijds doen zich ten gevolge van waterafvoer in de stuwgeulen stroomsnelheden tot 3 m/s voor (zie paragraaf 3.6).

Deze stroomsnelheden ten gevolge van overstortende water zijn hoger of juist gelijk aan de berekende maximale stroomsnelheden uit Tabel 27. De zetstenen afwaarts van de huidige stuw zorgen nog voor een bijkomende energiedissipatie (met lagere stroomsnelheden aan de bodem tot gevolg).

Uit hoofdstuk 3 volgt ook dat de stroomsnelheden aan de bodem ten gevolge van scheepvaart en de stroomsnelheden ten gevolge van afvoer van water door de sluis in noodscenario 2 beduidend lager zijn dan de stroomsnelheid van 6 à 7 m/s, waaraan beton algemeen kan weerstaan.

Hieruit mag besloten worden dat zowel de bestaande bodembescherming opwaarts en afwaarts van de nieuwe stuwen als het beton op de bodem van de sluiskolk voldoet.

4.5 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 2.4 volgt voor de opwaartse en de afwaartse voorhaven een $O_{90, \text{geotextiel}}$ van 200 μm à 600 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).

4.6 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.

In de opwaartse en afwaartse voorhavens en de opwaartse en afwaartse stuwgeulen wordt voor het overgrote deel een bodembescherming uit breuksteen voorzien, wat een flexibele bodembescherming is. Enkel de bestaande bodembescherming uit beton opwaarts en afwaarts van de nieuwe stuwen en de bodembescherming uit gepenetreerde breuksteen of colloïdaal beton opwaarts van de nieuwe stuw in de huidige sluiskolk zijn een starre bodembescherming.

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

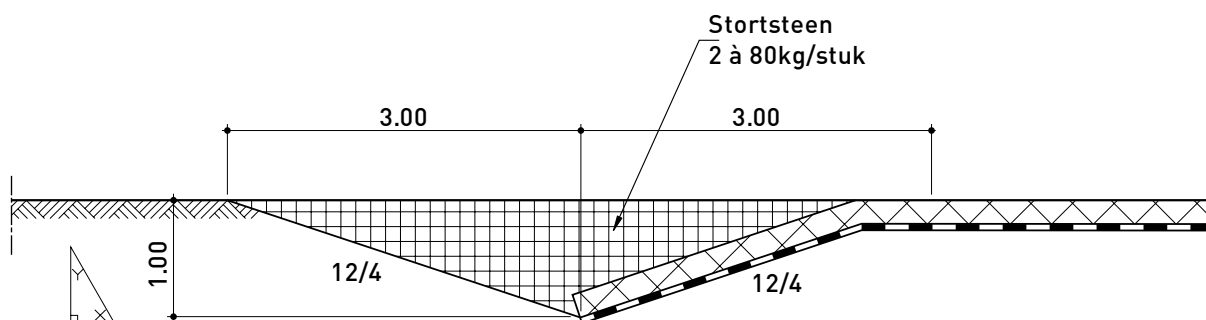
Met betrekking tot de beëindiging van een bodembescherming vermeldt CUR-publicatie 197 “breuksteen in de praktijk” (Bakker & Wouters, 2000) dat zich aan het einde van de bodembescherming mogelijks nog een erosiekuil kan voordoen omwille van de hogere turbulentie of het nog niet uitgedempt zijn van eventuele 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 breuksteenbekleding is een voldoende flexibele bodembescherming. Een bodembescherming uit gepenetreerde breuksteen, Open steenasfalt of (colloïdaal) beton zijn allen 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 deze types breuksteen en de onbeschermd zone een zone met een (meer flexibele) breuksteenbekleding te voorzien. Voor de breedte (naast een kaaimuur of remmingswerk) van deze overgangszone wordt in Pilarczyk (1998) een minimale breedte van 1 m vermeld. In Verelst *et al.* (2016b) werd de breedte van de overgangszone gelijk genomen aan 3 m. Deze (niet-gepenetreerde) breuksteenbekleding dient ook aangebracht te worden aan het uiteinde (in lengterichting) van de bodembescherming.

Uit Tabel 26 volgt een zeer kleine bodembescherming voor de opwaartse en afwaartse stuwgeulen. De opdrachtgever zou kunnen opteren om in deze zones geen bodembescherming aan te brengen. In dat geval dient een overgangszone tussen de bestaande bodembescherming uit beton opwaarts en afwaarts van de nieuwe stuwen, de bodembescherming uit gepenetreerde breuksteen of colloïdaal beton opwaarts van de nieuwe stuw in de huidige sluiskolk en de onbeschermd bodem te worden voorzien. Voor de opwaartse

stuwgeul wordt voorgesteld om een zone met minimaal een lengte 3 m te voorzien van breuksteen (vb. sortering 5 – 40 kg). Uit paragraaf 4.3.2 volgt dat de beëindiging van een bodembescherming uit Open steenasfalt of colloïdaal beton ook kan bestaan uit een bodembescherming met een dikte die het dubbel is dan deze van de bodembescherming zelf. Alternatief kan ook een type beëindiging voorzien worden als deze toegepast bij de bodembescherming uit Open steenasfalt voor de stuwsluis te Asper (zie Figuur 18).

Figuur 18 – Beëindiging bodembescherming uit Open steenasfalt bij stuwsluis Asper



5 Conclusies

Voor het uitwerken van het finale ontwerp van het stuwsluiscomplex te Denderbelle doet Afdeling Bovenschelde (contactpersoon: ir. Lien Vanhoutte) beroep op de afdelingen Expertise Beton en Staal (EBS), Elektromechanica en Telematica (EMT) en Geotechniek. Bij de verdere uitwerking van het finale ontwerp is gebleken dat het in het verleden door WL reeds ontworpen nivelleersysteem constructief niet inpasbaar is in de puntdeuren. Om die reden is door WL een nieuw hydraulisch ontwerp van het nivelleersysteem uitgevoerd. Dit is beschreven in Verelst *et al.* (2016a) en bestaat uit 6 rechthoekige openingen in de puntdeuren met breedte 0.90 m en hoogte 0.90 m afgesloten met hefschuiven.

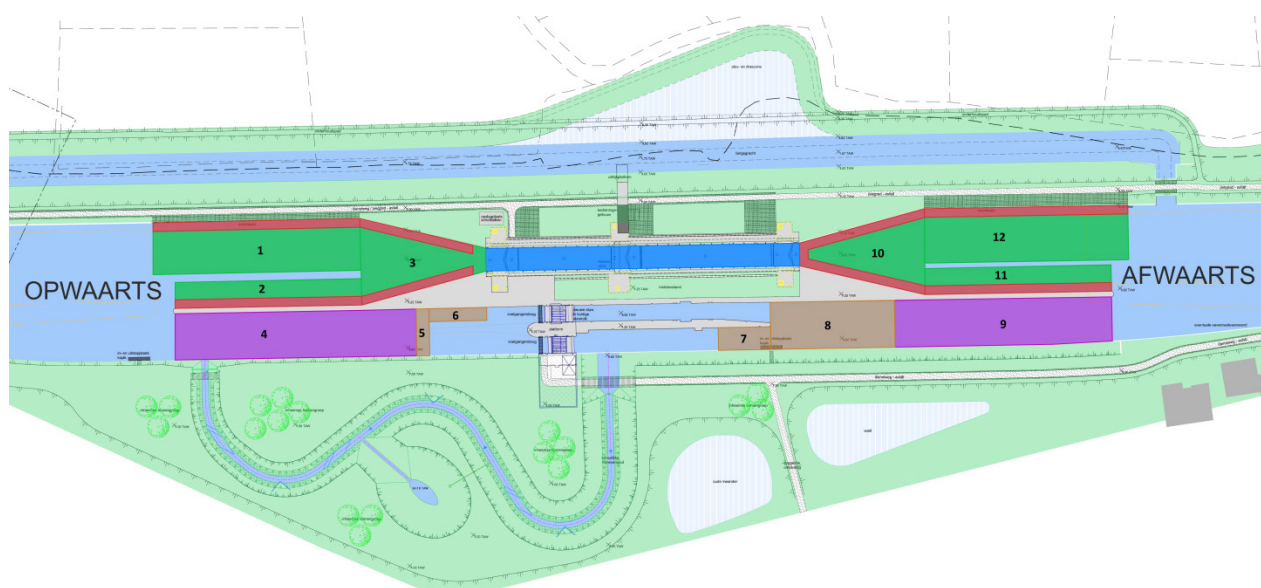
Voorliggend rapport beschrijft de bepaling van de hydraulische belastingen op de bodem en de dimensionering van de bodembescherming voor de nieuwe stuwsluis te Denderbelle. Hierbij wordt naast de wijziging van het nivelleersysteem van de nieuwe sluis ook rekening gehouden met een mogelijke waterpeildaling van 0.40 m in het afwaartse pand, gecombineerd met een verlaging van het drempelpeil, respectievelijk het bodempeil van de sluiskolk naar – 0.28 m TAW, respectievelijk – 0.78 m TAW. Daarnaast is in deze studie ook rekening gehouden met een aantal nieuwe inzichten opgedaan bij het ontwerp van de bodembescherming voor de nieuwe sluis te Sint-Baafs-Vijve (Verelst *et al.*, 2016b) met betrekking tot de berekening van de hydraulische belasting aan de bodem ten gevolge van scheepvaart.

Eerst zijn de hydraulische belastingen op de bodem bepaald onder invloed van schroefstraalstroming en retourstroming ten gevolge van scheepvaart, nivelleren van de nieuwe sluis en waterafvoer in de normale toestand en bij was. Wat waterafvoer betreft, zijn zowel de afvoer van water via de 2 stuwen als de afvoer van water in twee noodscenario's beschouwd.

Daarna is het type bodembescherming bepaald voor de opwaartse en de afwaarts voorhaven, de minimale strookbreedte voor de bodembescherming naast remmingwerken en kaaimuren (in wachtplaatsen) en het type bodembescherming voor de opwaartse en de afwaartse stuwgeul.

Op basis van de uitgevoerde dimensionering geven Tabel 28 en Tabel 29 per zone een samenvatting van de voorgestelde bodembescherming. De betreffende zones in de opwaartse en afwaartse voorhaven en in de opwaartse en afwaartse stuwgeul zijn visueel voorgesteld in Figuur 19.

Figuur 19 – Zonering voorgestelde bodembekleding (zie ook Tabel 28 en Tabel 29)



Tabel 28 – Samenvatting voorgestelde bodembescherming opwaartse en afwaartse voorhaven (zie ook Figuur 19)

Zone (nr)	Type bodembescherming (kleur)	Lengte	Breedte
Wachtplaats opwaarts (1)	Breuksteen 5 – 40 kg; laagdikte: 0.42 m (groen); Strook met breedte 3 m naast kaaimuur gepenetreerd met colloïdaal beton (rood); Gedeelte naast kaaimuur met bodempeil – 0.78 m TAW wordt niet gepenetreerd.	Lengte kaaimuur	21 m
Remmingswerk opwaarts (2)		Lengte remmingswerk	10 m
Fuik opwaarts (3)		58 m	Breedte fuik
Fuik afwaarts (10)	Breuksteen 5 – 40 kg; laagdikte: 0.42 m (groen); Strook met breedte 3 m naast kaaimuur gepenetreerd met colloïdaal beton (rood)	58 m	Breedte fuik
Remmingswerk afwaarts (12)		Lengte remmingswerk	10 m
Wachtplaats afwaarts (11)		Lengte kaaimuur	20 m

Tabel 29 – Samenvatting voorgestelde bodembescherming opwaartse en afwaartse stuwgeulen (zie ook Figuur 19)

Zone nr (kleur)		Normale toestand en Was T100	Was T1000
Opwaartse stuwgeul	4 (paars)	Breuksteen 32/90 mm; laagdikte: 0.30 m.	Breuksteen 63/180 mm; laagdikte: 0.30 m
	5 (bruin)	Breuksteen 5 - 40 kg; laagdikte: 0.42 m; lengte: 3 m.	Breuksteen 5 - 40 kg; laagdikte: 0.42 m;
	6 (bruin)	Breuksteen 5 - 40 kg; laagdikte: 0.42 m.	Breuksteen 5 - 40 kg; laagdikte: 0.42 m;
Afwaartse stuwgeul	7 (bruin)	Breuksteen 63/180 mm; laagdikte: 0.30 m	Breuksteen 5 -40 kg; laagdikte: 0.42 m
	8 (bruin)	Breuksteen 5 - 40 kg; laagdikte: 0.42 m; lengte: 48 m	Breuksteen 10 - 60 kg; laagdikte: 0.52 m;
	9 (paars)	Breuksteen 63/180 mm; laagdikte: 0.30 m	Breuksteen 63/180 mm; laagdikte: 0.30 m

Grijze arcering: enkel wanneer vernieuwing van de bestaande bodembescherming (breuksteen) benodigd is.

Bij de voorgestelde bodembescherming wordt het volgende opgemerkt/aanbevolen:

- Voor zone 3 (fuik opwaartse voorhaven) volgt uit de dimensionering dat geen penetratie met colloïdaal beton nodig is naast de verticale wanden in het gedeelte met bodemdikte – 0.78 m TAW. Het staat de opdrachtgever vrij om in dit gebied ook een penetratie van de breuksteen naast de verticale wanden te voorzien, analoog als in het deel van de fuik met de hoger gelegen bodempeilen.
- In zone 7 in de afwaartse stuwgeul is reeds een bodembescherming uit breuksteen aanwezig. Het kaliber hiervan is echter niet gekend. De opdrachtgever kan ervoor opteren om deze bestaande bodembescherming te behouden of deze te vervangen door een nieuwe bodembescherming. In Tabel 29 is de benodigde bodembescherming gegeven in het geval een nieuwe bodembescherming wordt aangebracht.
- Voor de opwaartse stuwgeul (zone 4) en de afwaartse stuwgeul (zone 9) volgt uit Tabel 29 een zeer kleine bodembescherming. De opdrachtgever zou kunnen opteren om in deze zones geen bodembescherming aan te brengen. Zone 5 en zone 8 vormen in dat geval een overgang tussen de overige bodembescherming en de onbeschermd bodem. Om die reden is voor zone 5 en zone 6 van de opwaartse voorhaven de kleinste breuksteensortering (5 – 40 kg) uit het standaardbestek 260 voor de waterbouw beschouwd. De lengte van zone 8 (48 m) is gelijk aan de lengte van het gebied waarin zich de uitspreiding van de stroming voordoet, wanneer er zich stroming over één stuw voordoet (in een noodscenario).
- In Tabel 29 worden twee condities beschouwd, namelijk de bodembescherming die nodig is om te weerstaan aan waterafvoer in de normale toestand en bij was T100 en de bodembescherming die nodig is om te weerstaan aan waterafvoer bij was T1000. Dit onderscheid laat de opdrachtgever

toe om aan de hand van andere factoren (kostprijs, e.d.) een keuze te maken tussen de benodigde bodembescherming en de terugkeerperiode van de was waaraan deze bodembescherming dient de weerstaan.

- e) De breedte van de opwaartse en de afwaartse voorhavens bedraagt 39.5 m. Naast de kaaimuur wordt een bodembescherming voorzien met een breedte van 21 m in de opwaartse voorhaven en 20 m in de afwaartse voorhaven en naast de remmingswerken een bodembescherming met een breedte van 10 m. Dit maakt dat in de opwaartse, respectievelijk de afwaartse voorhaven een strook met breedte 8.5 m, respectievelijk 9.5 m onbeschermd blijft. De opdrachtgever kan eventueel opteren om deze onbeschermdde strook ook te voorzien van een bodembescherming.
- f) 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 de opwaartse en de afwaartse voorhaven. In deze studie is voor het schip CEMT klasse IV (conservatief) een maximale waarde voor vermogen en diameter van de hoofdschroef en boegschroef beschouwd. Het is een aanbeveling om bij het ontwerp van een bodembescherming voor deze parameters 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 dit scheepstype.
- g) 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.
- h) 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.
- i) 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.
- j) 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.

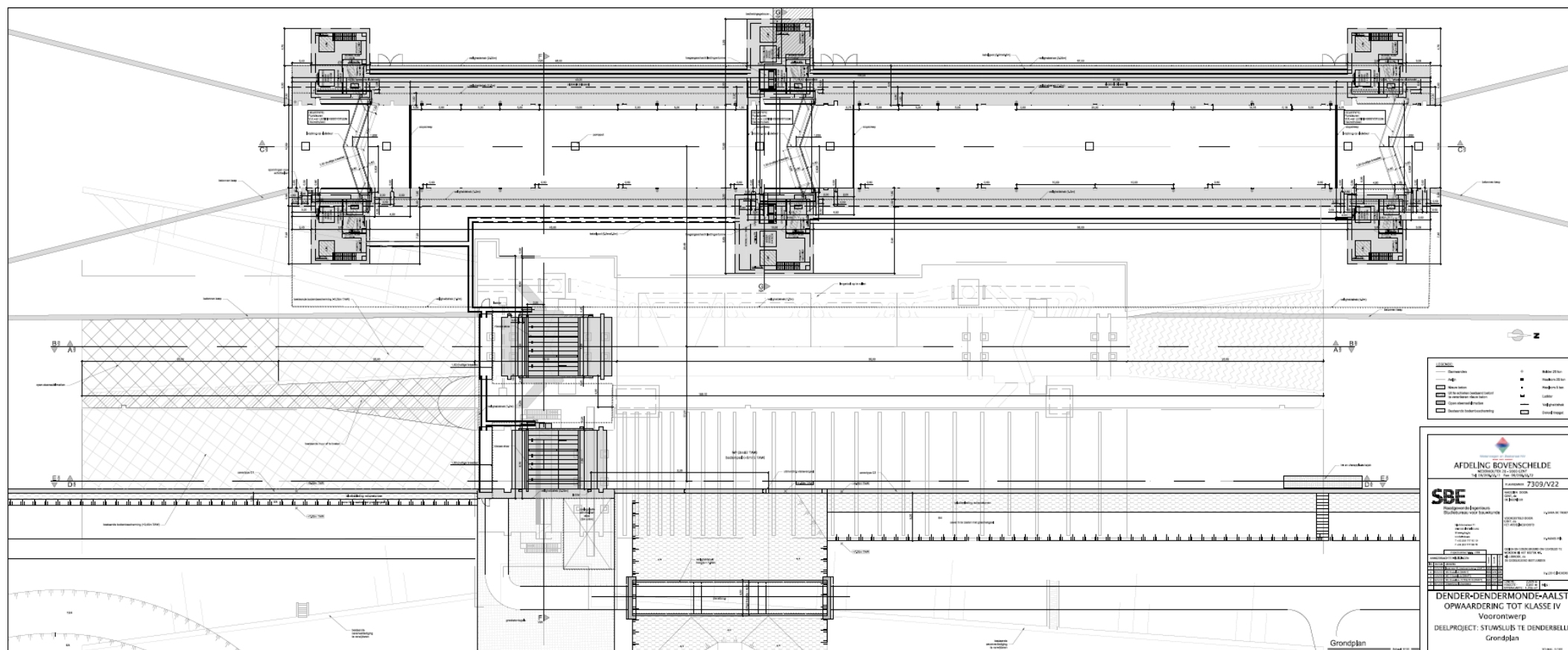
6 Referenties

- 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
- Boey, I.; Verelst, K.; Verwaest, T.; Mostaert, F.** (2017). Ondersteuning stuwsluis Denderbelle. Bundeling memo's deelopdrachten (DO) 1,2,6,8 en 12.. *versie 2.0, 15_062_2*. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- Bundesanstalt für Wasserbau.** (2008). Code of practice Use of Cementitious and Bituminous Materials for Grouting Armourstone on Waterways (MAV): Karlsruhe
- CIRIA; CUR.** (1991). Manual on the use of rock in coastal and shoreline engineering. *CUR-Publicatie*, 154: Gouda. ISBN 0-86017-326-7
- CIRIA; CUR.** (2007). Manual on the use of rock in hydraulic engineering (2nd edition)
- de 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.** (S.d.). Rivieren, kanalen en sluizen. Partim: rivieren en kanalen [CURSUS]. Universiteit Gent. Faculteit Ingenieurswetenschappen: Gent
- Dofferhoff, N.J.P.; Roelse, K.; Westdijk, C.V.J.** (2002). Classificatie en kenmerken van de Europese vloot en de Actieve vloot in Nederland. Rijkswaterstaat Adviesdienst Verkeer en Vervoer: Rotterdam
- Duc, B.M.; Rodi, W.** (2008). Numerical Simulation of Contraction Scour in an Open Laboratory Channel. *J. Hydraul. Eng.* 134(4): 367–377. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:4(367)
- 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
- Ministerie van Openbare Werken - Bruggen en Wegen.** (1950a). Dender. Schutsluis met stuw te Denderbelle. Plan II Algemeen plan – Metselwerk. Plan nummer B³ 3194
- Ministerie van Openbare Werken - Bruggen en Wegen.** (1950b). Dender. Schutsluis met stuw te Denderbelle. Plan III Langsdoorsneden metstelwerk. Plan nummer B³ 3195
- Nagata, N.; Hosoda, T.** (2005). Three-dimensional numerical model for flow and bed deformation around river hydraulic structures. *J. Hydraul. ... (December)*: 1074–1087. Available at: [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2005\)131:12\(1074\)](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0733-9429(2005)131:12(1074)) [date of retrieval: 04/04/2014]
- Pilarczyk, K.W.** (1990). Proceedings of the short course on coastal protection, Delft University of Technology / 30 June-1 July 1990. Balkema: Rotterdam. ISBN 90-6191-127-3
- Pilarczyk, K.W.** (1998). Dikes and revetments: design, maintenance and safety assessment. Balkema: Rotterdam. ISBN 90-5410-455-4
- Raes, L.; Elskens, F.; Romisch, K.; Sas, M.** (1996). The effects of ship propellers on bottom velocities and on scour near berths and protection methods using thin flexible revetments, *in*: (1996). *11th International Harbour Congress, Antwerpen, June 17-21, 1996*. pp.433–442
- Rijkswaterstaat Ministerie van Infrastructuur en Milieu.** (2011). Richtlijnen Vaarwegen 2011. RVW 2011
- Römisch, 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, *in*: (2007). *4th international Conference Port Development and Coastal Environment: PDCE 2007*
- SBE.** (2011a). Dender – Dendermonde – Aalst. Opwaardering tot klasse IV. Voorontwerp. Deelproject: Stuwsuis te Denderbelle. Afwaartse voorhaven en fuik: planzicht en snedes. Plan nummer 7309/V29-0 dd. 09/12/2010
- SBE.** (2011b). Dender – Dendermonde – Aalst. Opwaardering tot klasse IV. Voorontwerp. Deelproject: Stuwsuis te Denderbelle. Grondplan. Plan nummer 7309/V22-D dd. 09/12/2011
- SBE.** (2011c). Dender – Dendermonde – Aalst. Opwaardering tot klasse IV. Voorontwerp. Deelproject: Stuwsuis te Denderbelle. Langsdoorsnedes nieuwe en bestaande sluis. Plan nummer 7309/V23-C dd. 09/12/2011
- SBE.** (2011d). Dender – Dendermonde – Aalst. Opwaardering tot klasse IV. Voorontwerp. Deelproject: Stuwsuis te Denderbelle. Langsdoorsnedes stuw - dwarsdoorsnede. Plan nummer 7309/V24-C dd. 09/12/2011
- SBE.** (2011e). Dender – Dendermonde – Aalst. Opwaardering tot klasse IV. Voorontwerp. Deelproject: Stuwsuis te Denderbelle. Opwaartse voorhaven en fuik: planzicht en snedes. Plan nummer 7309/V25-C dd. 09/12/2011.
- SBE; Omgeving.** (2010). Dender. Opwaardering tot klasse IV van Dendermonde tot Aalst. Omgevingsanalyse, opmaak concept en voorontwerp. Ontwerp bedieningsgebouw en omgevingsaanleg. Opmaak project-mer. Deelopdracht 1: Omgevingsanalyse, opmaak concept en voorontwerp. Conceptnota st
- Schiereck, J.** (2003). Introduction to bed, bank and shore protection
- Shammas, Y.; Zhu, D.Z.; Rajaratnam, N.** (2005). Flow upstream of orifices and sluice gates. *J. Hydraul. Eng.* (februari 2005): 127–133
- Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW).** (2002). Technisch rapport asfalt voor waterkeren. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW): Delft. ISBN 90-369-5519-X. 340 pp.
- Verelst, K.; De Mulder, T.; Mostaert, F.** (2010). Dender - Vernieuwing sluis Denderbelle: toetsing kolkafmetingen en voorontwerp nivelleersysteem van de sluis. *WL Rapporten*, 760_11. Flanders Hydraulics Research: Antwerpen
- Verelst, K.; Peeters, P.; Mostaert, F.** (2013). Dender - vernieuwing stuwsuis Denderbelle: dimensionering erosiebescherming. *WL Rapporten*, 00_149. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- Verelst, K.; Vercruysse, J.B.; Boey, I.; Peeters, P.; Mostaert, F.** (2016a). Ondersteuning ontwerp stuwsuis Denderbelle. Deelrapport 3 - Simulaties ontwerp nivelleersysteem sluis. Versie 1.0. *WL Rapporten*, 15_062_3. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België. X, 48 + 14p appendices pp.
- Verelst, K.; Vercruysse, J.B.; Cui, J.; De Mulder, T.; Mostaert, F.** (2009). Dender - stuwsuis Aalst: erosiebescherming. *WL Rapporten*, 760_10b. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- Verelst, K.; Vercruysse, J.B.; Taverniers, E.; De Mulder, T.; Verwilligen, J.; Peeters, P.; Mostaert, F.** (2016b). Ondersteuning ontwerp klasse Vb-sluist te Sint-Baafs-Vijve: deelrapport 4. Dimensionering bodembescherming stuwsuis. versie 11.. *WL Rapporten*, 12_142_4. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. XII, 63 + 51 bijlagen pp.
- Verelst, K.; Visser, K.P.; Peeters, P.; Mostaert, F.** (2015). Bovenschelde – Stuwsuis Asper: deelrapport 3 – Analyse peilingen periode 2013 – 2015 en dimensionering bodembescherming afwaartse stuwgeul. *WL Rapporten*, 13_045. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- Vos, S.; Verwilligen, J.; Boey, I.; Peeters, P.; Mostaert, F.** (2016). Ondersteuning ontwerp stuwsuis van Denderbelle: deelrapport 1 – Real-time simulatiestudie. *WL Rapporten*, 15_062. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- (2012). www.debinnenvaart.nl. Vereniging ‘De Binnenvaart’

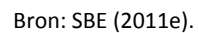
Bijlage 1: Plannen nieuwe sluis

Figuur 20 – Grondplan nieuwe sluis en nieuwe stuw



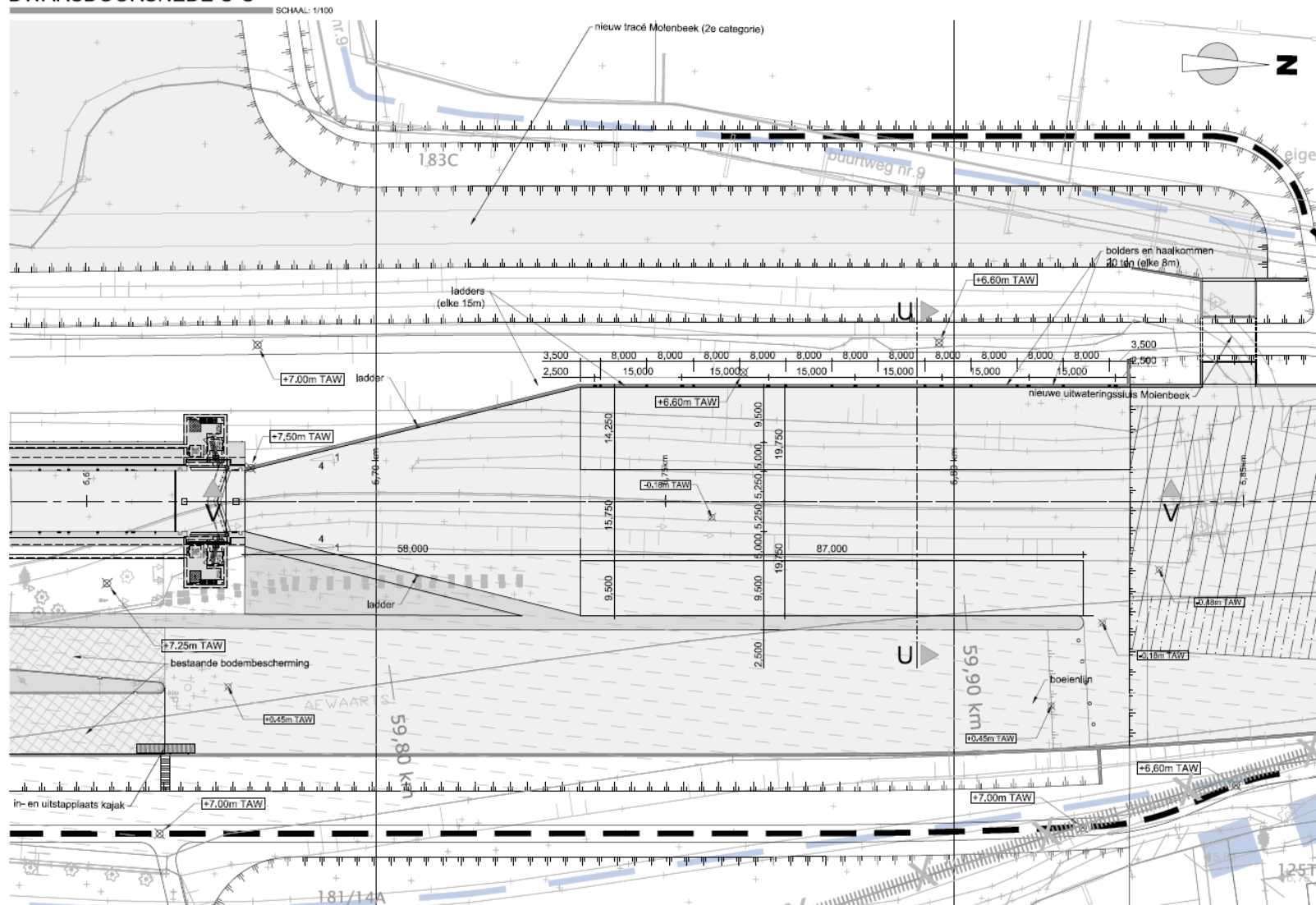
Bron: SBE (2011b)

Figuur 21 – Planzicht opwaartse voorhaven



Figuur 22 – Planzicht afwaartse voorhaven

DWARSDOORSNEDE U-U



Bron: SBE (2011a)

WL2017R15_062_4



Bron: SBE (2011c)

Bijlage 2: Tabellen berekening hydraulische belasting

Tabel 30 – Resultaten berekening maximale stroomsnelheid boven bodem ter plaatse van de fuik en zone naast remmingswerken in de opwaartse en afwaartse voorhaven ten gevolge van de hoofdschroef bij binnenvaren van de nieuwe sluis.

Parameter	Symbool	Eenheid	Opwaartse voorhaven				Afwaartse voorhaven	
			Bodempeil + 1.53 m TAW		Bodempeil – 0.78 m TAW		Bodempeil – 0.78 m TAW	
			1 schroef	2 schroeven	1 schroef	2 schroeven	1 schroef	2 schroeven
CEMT klasse	-	-	IV	IV	IV	IV	IV	IV
Diepgang	T	m	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
Echte schroefdiameter	D_p	m	1.70	1.60	1.70	1.60	1.70	1.60
Effectieve schroefdiameter	D_0	m	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45
Motorvermogen		kW	1200	1200	1200	1200	1200	1200
Aantal schroeven	n	-	1	2	1	2	1	2
% aangewend vermogen		%	75	75	75	75	75	75
Aangewend vermogen per schroef	P_d	kW	900	450	900	450	900	450
Waterstand	H	mTAW	5.83	5.83	5.83	5.83	3.45	3.45
Bodempeil	Z	mTAW	1.53	1.53	- 0.78	- 0.78	- 0.78	- 0.78
Waterdiepte	h	m	4.30	4.30	6.61	6.61	4.23	4.23
Stroomsnelheid achter schroef	u_p	m/s	8.69	7.18	8.69	7.18	8.69	7.18
Verticale afstand straalas tot bodem	d_p	m	2.15	2.10	4.46	4.41	2.08	2.03
Horizontale afstand tot maximale snelheid boven bodem	x_{bp}	m/s	12.0	11.8	25.0	24.7	11.6	16.4
Maximale waarde stroomsnelheid boven de bodem	u_{bp}	m/s	1.75	1.97	0.84	0.94	1.81	2.04
$u_{bp} < u_p$	-	-	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja

Tabel 31 – Resultaten berekening maximale stroomsnelheid boven bodem ter plaatse van de kaaimuren in de opwaartse en afwaartse voorhaven ten gevolge van de hoofdschroef bij aanmeren.

Parameter	Symbool	Eenheid	Opwaartse voorhaven		Afwaartse voorhaven	
			Bodempeil + 1.53 m TAW		Bodempeil – 0.78 m TAW	
			1 schroef	2 schroeven	1 schroef	2 schroeven
CEMT klasse	-	-	IV	IV	IV	IV
Diepgang	T	m	3.0	3.0	3.0	3.0
Echte schroefdiameter	D_p	m	1.70	1.60	1.70	1.60
Effectieve schroefdiameter	D_0	m	1.45	1.45	1.45	1.45
Motorvermogen		kW	1200	1200	1200	1200
Aantal schroeven	n	-	1	2	1	2
% aangewend vermogen		%	50	50	50	50
Aangewend vermogen per schroef	P_d	kW	600	300	600	300
Waterstand	H	mTAW	5.83	5.83	3.45	3.45
Bodempeil	Z	mTAW	1.53	1.53	- 0.78	- 0.78
Waterdiepte	h	m	4.30	4.30	4.23	4.23
Stroomsnelheid achter schroef	u_p	m/s	7.59	6.27	7.59	7.18
Verticale afstand straalas tot bodem	d_p	m	2.15	2.10	2.08	2.03
Horizontale afstand tot maximale snelheid boven bodem	x_{bp}	m/s	12.0	11.8	11.6	16.4
Maximale waarde stroomsnelheid boven de bodem	u_{bp}	m/s	1.53	1.72	1.58	1.78
$u_{bp} < u_p$	-	-	Ja	Ja	Ja	Ja

Tabel 32 – Resultaten berekening maximale stroomsnelheid boven de bodem in de fuik van de opwaartse en de afwaartse voorhaven ten gevolge van de boegschroef bij invaren van de nieuwe sluis.

Eigenschap	Symbool	Eenheid	Opwaartse voorhaven		Afwaartse voorhaven
			Bodempeil + 1.53 m TAW	Bodempeil - 0.78m TAW	Bodempeil - 0.78m TAW
CEMT klasse	-	-	IV	IV	IV
Diepgang	T	m	3.0	3.0	3.0
Echte schroefdiameter	D_p	m	1.4	1.4	1.4
Effectieve schroefdiameter	D_0	m	1.4	1.4	1.4
Motorvermogen		kW	450	450	450
Aantal schroeven	n	-	1	1	1
% aangewend vermogen		%	100	100	100
Aangewend vermogen per schroef	P_d	kW	450	450	450
Waterstand	H	mTAW	5.83	5.83	3.45
Bodempeil	Z	mTAW	1.53	- 0.78	- 0.78
Waterdiepte	h	m	4.30	6.61	4.23
Stroomsnelheid achter schroef	u_p	m/s	6.34	6.34	6.34
Verticale afstand straalas tot bodem	d_p	m	2.00	4.31	1.93
Horizontale afstand tot maximale snelheid boven bodem	x_{bp}	m/s	11.2	24.1	10.8
Maximale waarde stroomsnelheid boven de bodem	u_{bp}	m/s	1.33	0.62	1.38
$u_{bp} < u_p$	-	-	Ja	Ja	Ja

Tabel 33 – Resultaten berekening maximale stroomsnelheid boven de bodem in de opwaartse voorhaven ten gevolge van de boegschroef bij aanmeren aan een kaaimuur of manoeuvreren naast een remmingswerk.

Eigenschap	Symbool	Eenheid	Bodempeil + 1.53 m TAW						Bodempeil – 0.78 m TAW					
			X = 0 m	X = 1 m	X = 2 m	X = 3 m	X = 4 m	X = 5 m	X = 0 m	X = 1 m	X = 2 m	X = 3 m	X = 4 m	X = 5 m
CEMT klasse	-	-	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV
Diepgang	T	m	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
Echte schroefdiameter	D _p	m	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
Effectieve schroefdiameter	D ₀	m	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
Motorvermogen		kW	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450
Aantal schroeven	n	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
% aangewend vermogen		%	100	100	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	450	450
Waterstand	H	mTAW	5.83	5.83	5.83	5.83	5.83	5.83	5.83	5.83	5.83	5.83	5.83	5.83
Bodempeil	Z	mTAW	1.53	1.53	1.53	1.53	1.53	1.53	-0.78	-0.78	-0.78	-0.78	-0.78	-0.78
Waterdiepte	h	m	4.30	4.30	4.30	4.30	4.30	4.30	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61	6.61
Stroomsnelheid achter schroef	v _p	m/s	6.34	6.34	6.34	6.34	6.34	6.34	6.34	6.34	6.34	6.34	6.34	6.34
Verticale afstand straalas tot bodem	d _p	m	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	4.31	4.31	4.31	4.31	4.31	4.31
Afstand tot kaaimuur	X	m/s	0	1	2	3	4	5	0	1	2	3	4	5
Stroomsnelheid boven de bodem	v _{bp3}	m/s	4.43	2.95	2.22	1.78	1.48	1.27	2.06	1.67	1.41	1.21	1.07	0.95
v _{bp3} < v _p	-	-	Ja	Ja	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	Ja	Ja

Tabel 34 – Resultaten berekening maximale stroomsnelheid boven de bodem in de afwaartse voorhaven ten gevolge van de boegschroef bij aanmeren aan een kaaimuur of manoeuvreren naast een remmingswerk.

Eigenschap	Symbool	Eenheid	Bodempeil – 0.78 m TAW					
			X = 0 m	X = 1 m	X = 2 m	X = 3 m	X = 4 m	X = 5 m
CEMT klasse	-	-	IV	IV	IV	IV	IV	IV
Diepgang	T	m	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
Echte schroefdiameter	D_p	m	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
Effectieve schroefdiameter	D_0	m	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
Motorvermogen		kW	450	450	450	450	450	450
Aantal schroeven	n	-	1	1	1	1	1	1
% aangewend vermogen		%	100	100	100	100	100	100
Aangewend vermogen per schroef	P_d	kW	450	450	450	450	450	450
Waterstand	H	mTAW	3.45	3.45	3.45	3.45	3.45	3.45
Bodempeil	Z	mTAW	-0.78	-0.78	-0.78	-0.78	-0.78	-0.78
Waterdiepte	h	m	4.23	4.23	4.23	4.23	4.23	4.23
Stroomsnelheid achter schroef	v_p	m/s	6.34	6.34	6.34	6.34	6.34	6.34
Verticale afstand straalas tot bodem	d_p	m	1.93	1.93	1.93	1.93	1.93	1.93
Afstand tot kaaimuur	X	m/s	0	1	2	3	4	5
Stroomsnelheid boven de bodem	v_{bp3}	m/s	4.59	3.03	2.26	1.80	1.49	1.28
$v_{bp3} < v_p$	-	-	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
$v_{bp3} < 6.3 v_p D_0 / \gamma_{bp}$	-		Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja

Tabel 35 – Resultaten berekening dieptegemiddelde stroomsnelheid ter plaatse van de verschillende secties ten gevolge van waterafvoer bij afvoer via 2 stuwen.

Sectie		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Breedte [m]		41.5	12	10.5	21.9	9.5	10.4	10.4	10.5	9.7	10.4	41.2	21.9	21.9
Bodempeil [mTAW]		1.53	1.53	-0.78	1.53	0.45	0.45	0.15	-0.78	0.45	0.45	-0.78	0.45	0.45
Normale toestand	Waterpeil [mTAW]	5.83	5.83	5.83	5.83	5.83	5.83	3.45	3.45	3.45	3.45	3.45	3.45	3.45
	Waterdiepte [m]	4.30	4.30	6.61	4.30	5.38	5.38	3.30	4.23	3.00	3.00	4.23	3.00	3.00
	Natte sectie [m ²]	178.5	51.6	69.4	94.2	51.1	56.0	34.3	44.4	29.1	31.2	174.3	65.7	65.7
	Debiet [m ³ /s]	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	75	75	75	38	n.v.t.	38	38	n.v.t.	75	75
	Stroomsnelheid [m/s]	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	1.04	0.83	0.83	1.11	n.v.t.	1.31	1.22	n.v.t.	1.14	1.14
Was T100 – Maximale waterstand	Waterpeil [mTAW]	6.10	6.10	6.10	6.10	6.10	6.10	6.10	6.10	6.10	6.10	6.10	6.10	6.10
	Waterdiepte [m]	4.57	4.57	6.88	4.57	5.65	5.65	5.95	6.88	5.65	5.65	6.88	5.65	5.65
	Natte sectie [m ²]	189.7	54.8	72.2	100.1	53.7	58.8	61.9	72.2	54.8	58.8	283.5	123.7	123.7
	Debiet [m ³ /s]	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	110	110	110	55	n.v.t.	55	55	n.v.t.	110	110
	Stroomsnelheid [m/s]	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	1.43	1.16	1.16	0.89	n.v.t.	1.00	0.94	n.v.t.	0.89	0.89
Was T100 – Maximaal debiet	Waterpeil [mTAW]	5.60	5.60	5.60	5.60	5.60	5.60	5.50	5.50	5.50	5.50	5.50	5.50	5.50
	Waterdiepte [m]	4.07	4.07	6.38	4.07	5.15	5.15	5.35	6.28	5.05	5.05	6.28	5.05	5.05
	Natte sectie [m ²]	168.9	48.8	67.0	89.1	48.9	53.6	55.6	65.9	49.0	52.5	258.7	110.6	110.6
	Debiet [m ³ /s]	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	130	130	130	65	n.v.t.	65	65	n.v.t.	130	130
	Stroomsnelheid [m/s]	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	1.90	1.50	1.50	1.17	n.v.t.	1.33	1.24	n.v.t.	1.18	1.18
Was T1000 – Maximale waterstand	Waterpeil [mTAW]	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50
	Waterdiepte [m]	4.97	4.97	7.28	4.97	6.05	6.05	6.35	7.28	6.05	6.05	7.28	6.05	6.05
	Natte sectie [m ²]	206.3	59.6	76.4	108.8	57.5	62.9	66.0	76.4	58.7	62.9	299.9	132.5	132.5
	Debiet [m ³ /s]	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	104	104	104	52	n.v.t.	52	52	n.v.t.	104	104
	Stroomsnelheid [m/s]	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	1.24	1.02	1.02	0.79	n.v.t.	0.89	0.83	n.v.t.	0.78	0.78
Was T1000 – Maximaal debiet	Waterpeil [mTAW]	5.70	5.70	5.70	5.70	5.70	5.70	5.60	5.60	5.60	5.60	5.60	5.60	5.60
	Waterdiepte [m]	4.17	4.17	6.48	4.17	5.25	5.25	5.45	6.38	5.15	5.15	6.38	5.15	5.15
	Natte sectie [m ²]	173.1	50.0	68.0	91.3	49.9	54.6	56.7	67.0	50.0	53.6	262.9	112.8	112.8
	Debiet [m ³ /s]	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	166	166	166	83	n.v.t.	83	83	n.v.t.	166	166
	Stroomsnelheid [m/s]	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	2.36	1.88	1.88	1.46	n.v.t.	1.66	1.55	n.v.t.	1.47	1.47

Tabel 36 – Resultaten berekening dieptegemiddelde stroomsnelheid ter plaatse van de verschillende secties ten gevolge van waterafvoer bij noodscenario 1.

Sectie		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Breedte [m]		41.5	12	10.5	21.9	9.5	10.4	10.4	10.5	9.7	10.4	41.2	21.9	9.7
Bodempeil [mTAW]		1.53	1.53	-0.78	1.53	0.45	0.45	0.15	-0.78	0.45	0.45	-0.78	0.45	0.45
Was T100 – Maximale waterstand	Waterpeil [mTAW]	6.40	6.40	6.40	6.40	6.40	6.40	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00
	Waterdiepte [m]	4.87	4.87	7.18	4.87	5.95	5.95	5.85	6.78	5.55	5.55	6.78	5.55	5.55
	Natte sectie [m²]	202.1	58.4	75.4	106.7	56.5	61.9	60.8	71.2	53.8	57.7	279.3	121.5	53.8
	Debiet [m³/s]	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	105	105	105	105	n.v.t.	105	105	n.v.t.	105	105
	Stroomsnelheid [m/s]	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	0.98	0.81	1.60	1.73	n.v.t.	1.95	1.82	n.v.t.	0.86	1.95
Was T100 – Maximaal debiet	Waterpeil [mTAW]	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	5.30	5.30	5.30	5.30	5.30	5.30	5.30
	Waterdiepte [m]	4.47	4.47	6.78	4.47	5.55	5.55	5.15	6.08	4.85	4.85	6.08	4.85	4.85
	Natte sectie [m²]	185.5	53.6	71.2	97.9	52.7	57.7	53.6	63.8	47.0	50.4	250.5	106.2	47.0
	Debiet [m³/s]	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	123	123	123	123	n.v.t.	123	123	n.v.t.	123	123
	Stroomsnelheid [m/s]	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	1.26	1.01	2.01	2.30	n.v.t.	2.61	2.44	n.v.t.	1.16	2.61
Was T1000 – Maximale waterstand	Waterpeil [mTAW]	6.60	6.60	6.60	6.60	6.60	6.60	6.40	6.40	6.40	6.40	6.40	6.40	6.40
	Waterdiepte [m]	5.07	5.07	7.38	5.07	6.15	6.15	6.25	7.18	5.95	5.95	7.18	5.95	5.95
	Natte sectie [m²]	210.4	60.8	77.5	111.0	58.4	64.0	65.0	75.4	57.7	61.9	295.8	130.3	57.7
	Debiet [m³/s]	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	94	94	94	94	n.v.t.	94	94	n.v.t.	94	94
	Stroomsnelheid [m/s]	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	0.85	0.70	1.39	1.45	n.v.t.	1.63	1.52	n.v.t.	0.72	1.63
Was T1000 – Maximaal debiet	Waterpeil [mTAW]	6.40	6.40	6.40	6.40	6.40	6.40	5.50	5.50	5.50	5.50	5.50	5.50	5.50
	Waterdiepte [m]	4.87	4.87	7.18	4.87	5.95	5.95	5.35	6.28	5.05	5.05	6.28	5.05	5.05
	Natte sectie [m²]	202.1	58.4	75.4	106.7	56.5	61.9	55.6	65.9	49.0	52.5	258.7	110.6	49.0
	Debiet [m³/s]	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	144	144	144	144	n.v.t.	144	144	n.v.t.	144	144
	Stroomsnelheid [m/s]	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	1.35	1.11	2.20	2.59	n.v.t.	2.94	2.74	n.v.t.	1.30	2.94

Tabel 37 – Resultaten berekening dieptegemiddelde stroomsnelheid ter plaatse van de verschillende secties ten gevolge van waterafvoer bij noodscenario 2.

Sectie		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Breedte [m]		41.5	12	10.5	21.9	9.5	10.4	10.4	10.5	9.7	10.4	41.2	21.9	9.7
Bodempeil [mTAW]		1.53	1.53	-0.78	1.53	0.45	0.45	0.15	-0.78	0.45	0.45	-0.78	0.45	0.45
Was T100 – Maximale waterstand	Waterpeil [mTAW]	6.20	6.20	6.20	6.20	6.20	6.20	6.10	6.10	6.10	6.10	6.10	6.10	6.10
	Waterdiepte [m]	4.67	4.67	6.98	4.67	5.75	5.75	5.95	6.88	5.65	5.65	6.88	5.65	5.65
	Natte sectie [m ²]	193.8	56.0	73.3	102.3	54.6	59.8	61.9	72.2	54.8	58.8	283.5	123.7	54.8
	Debiet [m ³ /s]	75	75	75	34	34	34	34	75	34	34	75	34	34
	Stroomsnelheid [m/s]	0.39	1.34	1.02	0.33	0.27	0.54	0.55	1.04	0.62	0.58	0.26	0.27	0.62
Was T100 – Maximaal debiet	Waterpeil [mTAW]	5.50	5.50	5.50	5.50	5.50	5.50	5.30	5.30	5.30	5.30	5.30	5.30	5.30
	Waterdiepte [m]	3.97	3.97	6.28	3.97	5.05	5.05	5.15	6.08	4.85	4.85	6.08	4.85	4.85
	Natte sectie [m ²]	164.8	47.6	65.9	86.9	48.0	52.5	53.6	63.8	47.0	50.4	250.5	106.2	47.0
	Debiet [m ³ /s]	86	86	86	46	46	46	46	86	46	46	86	46	46
	Stroomsnelheid [m/s]	0.52	1.81	1.30	0.53	0.42	0.83	0.86	1.35	0.98	0.91	0.34	0.43	0.98
Was T1000 – Maximale waterstand	Waterpeil [mTAW]	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50
	Waterdiepte [m]	4.97	4.97	7.28	4.97	6.05	6.05	6.35	7.28	6.05	6.05	7.28	6.05	6.05
	Natte sectie [m ²]	206.3	59.6	76.4	108.8	57.5	62.9	66.0	76.4	58.7	62.9	299.9	132.5	58.7
	Debiet [m ³ /s]	56	56	56	47	47	47	47	56	47	47	56	47	47
	Stroomsnelheid [m/s]	0.27	0.94	0.73	0.43	0.35	0.71	0.71	0.73	0.80	0.75	0.19	0.35	0.80
Was T1000 – Maximaal debiet	Waterpeil [mTAW]	5.70	5.70	5.70	5.70	5.70	5.70	5.50	5.50	5.50	5.50	5.50	5.50	5.50
	Waterdiepte [m]	4.17	4.17	6.48	4.17	5.25	5.25	5.35	6.28	5.05	5.05	6.28	5.05	5.05
	Natte sectie [m ²]	173.1	50.0	68.0	91.3	49.9	54.6	55.6	65.9	49.0	52.5	258.7	110.6	49.0
	Debiet [m ³ /s]	95	95	95	72	72	72	72	95	72	72	95	72	72
	Stroomsnelheid [m/s]	0.55	1.90	1.40	0.79	0.63	1.25	1.29	1.44	1.47	1.37	0.37	0.65	1.47

Bijlage 3: Tabellen dimensionering bodembescherming

Resultaten berekening mediaan breuksteendiameter en mediaan breuksteengewicht

Tabel 38 – Resultaten berekening mediaan breuksteendiameter en mediaan breuksteengewicht volgens de Shields-formulering aangepast voor stralen voor de wachtplaats en het remmingswerk in de opwaartse en de afwaartse voorhaven

Parameter	Symbool	Eenheid	Wachtplaats opwaartse voorhaven		Wachtplaats afwaartse voorhaven		Remmingswerk opwaartse voorhaven		Remmingswerk afwaartse voorhaven	
			Hoofdschroef	Boegschroef	Hoofdschroef	Boegschroef	Hoofdschroef	Boegschroef	Hoofdschroef	Boegschroef
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	5.83	5.83	3.45	3.45	5.83	5.83	3.45	3.45
Bodempeil	Z	mTAW	1.53	1.53	-0.78	-0.78	1.53	1.53	-0.78	0.78
Waterdiepte	h	m	4.30	4.30	4.23	4.23	4.30	4.30	4.23	4.23
Stroomsnelheid bij bodem	u_b	m/s	1.8	4.5	1.8	4.6	2.0	4.5	2.1	4.6
Turbulentieintensiteit	r	-	0.40	0.35	0.40	0.35	0.40	0.35	0.40	0.35
Mediaan	D_{n50}	m	0.12	1.47	0.12	1.58	0.16	1.47	0.19	1.58
Mediaan breuksteengewicht	M_{50}	kg	4.2	8429.9	4.3	10529.9	10.8	8429.9	17.1	10529.9

Tabel 39 – Resultaten berekening mediaan breuksteendiameter en mediaan breuksteengewicht volgens de Shields-formulering aangepast voor stralen voor fuik in de opwaartse voorhaven

Parameter	Symbool	Eenheid	Bodempeil + 1.53 mTAW		Bodempeil -0.78 m TAW			
			Hoofdschroef	Boegschroef	Hoofdschroef	Boegschroef	Nivelleren	Retourstroming
Dichtheid breuksteen	ρ_s	kg/m ³	2650	2650	2650	2650	2650	2650
Dichtheid water	ρ_w	kg/m ³	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Relatieve dichtheid	Δ	-	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
Waterstand	H	mTAW	5.83	5.83	5.83	5.83	5.83	5.83
Bodempeil	Z	mTAW	1.53	1.53	-0.78	-0.78	-0.78	-0.78
Waterdiepte	h	m	4.30	4.30	6.61	6.61	6.61	6.61
Stroomsnelheid bij bodem	u_b	m/s	2.0	4.5	1.0	2.1	0.2	0.5
Turbulentieintensiteit	r	-	0.40	0.35	0.40	0.35	0.10	0.25
Mediaan	D_{n50}	m	0.16	1.47	0.02	0.12	< 0.01	< 0.01
Mediaan breuksteengewicht	M_{50}	kg	10.8	8429.9	< 0.1	4.6	< 0.1	< 0.1

Tabel 40 – Resultaten berekening mediaan breuksteendiameter en mediaan breuksteengewicht volgens de Shields-formulering aangepast voor stralen voor fuik in de afwaartse voorhaven

Parameter	Symbool	Eenheid	Bodempeil - 0.78 m TAW			
			Hoofdschroef	Boegschroef	Nivelleren	Retourstroming
Dichtheid breuksteen	ρ_s	kg/m ³	2650	2650	2650	2650
Dichtheid water	ρ_w	kg/m ³	1000	1000	1000	1000
Relatieve dichtheid	Δ	-	1.65	1.65	1.65	1.65
Valversnelling	g	m/s ²	9.81	9.81	9.81	9.81
Waterstand	H	mTAW	5.83	5.83	3.45	3.45
Bodempeil	Z	mTAW	1.53	1.53	-0.78	0.78
Waterdiepte	h	m	4.30	4.30	4.23	4.23
Stroomsnelheid bij bodem	u_b	m/s	2.1	4.6	1.9	2.3
Turbulentieintensiteit	r	-	0.40	0.35	0.10	0.25
Mediaan	D_{n50}	m	0.19	1.58	0.03	0.12
Mediaan breuksteengewicht	M_{50}	kg	17.1	10529.9	0.06	4.95

Tabel 41 – Resultaten berekening mediaan breuksteendiameter en mediaan breuksteengewicht aan de hand van de formulering volgens Pilarczyk voor stroming ten gevolge van waterafvoer voor sectie 4, sectie 5, sectie 6 en sectie 7.

	Parameter	Symbool	Eenheid	Sectie 4			Sectie 5			Sectie 6			Sectie 7		
				Normale Toestand	Was T100	Was T1000	Normale Toestand	Was T100	Was T1000	Normale Toestand	Was T100	Was T1000	Normale Toestand	Was T100	Was T1000
	Dichtheid breuksteen	ρ_s	kg/m ³	2650	2650	2650	2650	2650	2650	2650	2650	2650	2650	2650	2650
	Dichtheid water	ρ_w	kg/m ³	1000	1000	1000	1000	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	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	9.81	9.81	9.81	9.81
Afvoer 2 stuwen	Waterstand	H	mTAW	5.83	5.6	5.7	5.83	5.6	5.7	5.83	5.6	5.7	3.45	5.5	5.6
	Bodempeil	Z	mTAW	1.53	1.53	1.53	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.15	0.15	0.15
	Waterdiepte	h	m	4.30	4.07	4.17	5.38	5.15	5.25	5.38	5.15	5.25	3.30	5.35	5.45
	Stroomsnelheid bij bodem	u_b	m/s	1.1	1.9	2.4	0.9	1.5	1.9	0.9	1.5	1.9	1.2	1.2	1.5
	Stabiliteitsfactor voor stroming	Φ	-	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	Kritische schuifspanningsparameter	Ψ	-	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035
	Turbulentiefactor	K_T	-	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	Hellingfactor	K_S	-	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	Mediaan Breuksteendiameter	D_{n50}	m	0.02	0.07	0.13	0.01	0.04	0.07	0.01	0.04	0.07	0.02	0.02	0.04
Noodscenario 1	Mediaan breuksteengewicht	M_{50}	kg	< 0.1	1.1	6.3	< 0.1	0.02	0.9	< 0.1	0.02	0.9	< 0.1	< 0.1	0.2
	Waterstand	H	mTAW	n.v.t.	6.0	6.4	n.v.t.	6.0	6.4	n.v.t.	6.0	6.4	n.v.t.	5.3	5.5
	Bodempeil	Z	mTAW	n.v.t.	1.53	1.53	n.v.t.	0.45	0.45	n.v.t.	0.45	0.45	n.v.t.	0.15	0.15
	Waterdiepte	h	m	n.v.t.	4.47	4.87	n.v.t.	5.55	5.95	n.v.t.	5.55	5.95	n.v.t.	5.15	5.35
	Stroomsnelheid bij bodem	u_b	m/s	n.v.t.	1.3	1.4	n.v.t.	1.1	1.2	n.v.t.	2.1	2.2	n.v.t.	2.3	2.6
	Stabiliteitsfactor voor stroming	Φ	-	n.v.t.	1.0	1.0	n.v.t.	1.0	1.0	n.v.t.	1.0	1.0	n.v.t.	1.0	1.0
	Kritische schuifspanningsparameter	Ψ	-	n.v.t.	0.035	0.035	n.v.t.	0.035	0.035	n.v.t.	0.035	0.035	n.v.t.	0.035	0.035
	Turbulentiefactor	K_T	-	n.v.t.	1.5	1.5	n.v.t.	1.5	1.5	n.v.t.	1.5	1.5	n.v.t.	1.5	1.5
	Hellingfactor	K_S	-	n.v.t.	1.0	1.0	n.v.t.	1.0	1.0	n.v.t.	1.0	1.0	n.v.t.	1.0	1.0
	Mediaan Breuksteendiameter	D_{n50}	m	n.v.t.	0.03	0.03	n.v.t.	0.02	0.02	n.v.t.	0.09	0.10	n.v.t.	0.11	0.15
	Mediaan breuksteengewicht	M_{50}	kg	n.v.t.	< 0.1	0.1	n.v.t.	< 0.1	< 0.1	n.v.t.	1.9	2.6	n.v.t.	3.9	9.5

n.v.t. = niet van toepassing

Tabel 42 – Resultaten berekening mediaan breuksteendiameter en mediaan breuksteengewicht aan de hand van de formulering volgens Pilarczyk voor stroming ten gevolge van waterafvoer voor sectie 9, sectie 10 en sectie 12.

	Parameter	Symbool	Eenheid	Sectie 9			Sectie 10			Sectie 12			Sectie 13		
				Normale Toestand	Was T100	Was T1000	Normale Toestand	Was T100	Was T1000	Normale Toestand	Was T100	Was T1000	Normale Toestand	Was T100	Was T1000
	Dichtheid breuksteen	ρ_s	kg/m ³	2650	2650	2650	2650	2650	2650	2650	2650	2650	2650	2650	2650
	Dichtheid water	ρ_w	kg/m ³	1000	1000	1000	1000	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	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	9.81	9.81	9.81	9.81
Afvoer 2 stuwen	Waterstand	H	mTAW	3.45	5.5	5.6	3.45	5.5	5.6	3.45	5.5	5.6	3.45	5.5	5.6
	Bodempeil	Z	mTAW	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
	Waterdiepte	h	m	3.00	5.05	5.15	3.00	5.05	5.15	3.00	5.05	5.15	3.00	5.05	5.15
	Stroomsnelheid bij bodem	u_b	m/s	1.4	1.4	1.7	1.3	1.3	1.6	1.2	1.2	1.5	0.9	1.0	1.2
	Stabiliteitsfactor voor stroming	Φ	-	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.2	1.2	1.5
	Kritische schuifspanningsparameter	Ψ	-	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035
	Turbulentiefactor	K_T	-	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	Hellingfactor	K_S	-	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	Mediaan Breuksteendiameter	D_{n50}	m	0.04	0.03	0.05	0.03	0.03	0.04	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02
Noodscenario 1	Mediaan breuksteengewicht	M_{50}	kg	0.1	0.1	0.4	0.1	0.1	0.2	< 0.1	< 0.1	0.2	< 0.1	< 0.1	0.2
	Waterstand	H	mTAW	n.v.t.	5.3	5.5	n.v.t.	5.3	5.5	n.v.t.	5.3	5.5	n.v.t.	5.3	5.5
	Bodempeil	Z	mTAW	n.v.t.	0.45	0.45	n.v.t.	0.45	0.45	n.v.t.	0.45	0.45	n.v.t.	0.45	0.45
	Waterdiepte	h	m	n.v.t.	4.85	5.05	n.v.t.	4.85	5.05	n.v.t.	4.85	5.05	n.v.t.	4.85	5.05
	Stroomsnelheid bij bodem	u_b	m/s	n.v.t.	2.7	3.0	n.v.t.	2.5	2.8	n.v.t.	1.2	1.3	n.v.t.	2.7	3.0
	Stabiliteitsfactor voor stroming	Φ	-	n.v.t.	1.0	1.0	n.v.t.	1.0	1.0	n.v.t.	1.0	1.0	n.v.t.	1.0	1.0
	Kritische schuifspanningsparameter	Ψ	-	n.v.t.	0.035	0.035	n.v.t.	0.035	0.035	n.v.t.	0.035	0.035	n.v.t.	0.035	0.035
	Turbulentiefactor	K_T	-	n.v.t.	1.5	1.5	n.v.t.	1.5	1.5	n.v.t.	1.5	1.5	n.v.t.	1.5	1.5
	Hellingfactor	K_S	-	n.v.t.	1.0	1.0	n.v.t.	1.0	1.0	n.v.t.	1.0	1.0	n.v.t.	1.0	1.0
	Mediaan Breuksteendiameter	D_{n50}	m	n.v.t.	0.17	0.22	n.v.t.	0.14	0.19	n.v.t.	0.01	0.02	n.v.t.	0.09	0.12
	Mediaan breuksteengewicht	M_{50}	kg	n.v.t.	13.7	29.3	n.v.t.	7.7	17.7	n.v.t.	< 0.1	< 0.1	n.v.t.	13.7	29.3

n.v.t. = niet van toepassing

Tabel 43 – Resultaten berekening mediaan breuksteendiameter en mediaan breuksteengewicht aan de hand van de formulering volgens Pilarczyk voor stroming ten gevolge van waterafvoer voor sectie1, sectie 2, sectie 3, sectie 8 en sectie 11.

	Parameter	Symbool	Eenheid	Sectie 1		Sectie 2		Sectie 3		Sectie 8		Sectie 11	
				Was T100	Was T1000	Was T100	Was T1000	Was T100	Was T1000	Was T100	Was T1000	Was T100	Was T1000
	Dichtheid breuksteen	ρ_s	kg/m ³	2650	2650	2650	2650	2650	2650	2650	2650	2650	2650
	Dichtheid water	ρ_w	kg/m ³	1000	1000	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	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	9.81	9.81
Noodscenario 2	Waterstand	H	mTAW	5.5	5.7	5.5	5.7	5.5	5.7	5.3	5.5	5.3	5.5
	Bodempeil	Z	mTAW	1.53	1.53	1.53	1.53	-0.78	-0.78	-0.78	-0.78	-0.78	-0.78
	Waterdiepte	h	m	3.97	4.17	3.97	4.17	6.28	6.48	6.08	6.28	6.08	6.28
	Stroomsnelheid bij bodem	u_b	m/s	0.6	0.6	1.9	1.9	1.3	1.4	1.4	1.5	0.4	0.4
	Stabiliteitsfactor voor stroming	Φ	-	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	Kritische schuifspanningsparameter	Ψ	-	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035
	Turbulentiefactor	K_T	-	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	Hellingfactor	K_S	-	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	Mediaan Breuksteendiameter	D_{n50}	m	< 0.01	< 0.01	0.07	0.07	0.02	0.03	0.03	0.04	< 0.01	< 0.01
	Mediaan breuksteengewicht	M_{50}	kg	< 0.1	< 0.1	1.1	1.1	0.04	0.08	0.08	0.14	< 0.1	< 0.1

Resultaten berekening lengte bodembescherming

Tabel 44 – Berekening lengte bodembescherming afwaarts van de nieuwe sluis ten gevolge van ledigingsstroming.

Eigenschap	Symbol	Eenheid	D ₅₀ =100µm	D ₅₀ =200µm	D ₅₀ =300µm
Debiet ledigingsstroming	Q	m ³ /s	10.2	10.2	10.2
Waterpeil	H	mTAW	3.45	3.45	3.45
Bodempeil	Z	mTAW	-0.78	-0.78	-0.78
Waterdiepte	h	m	4.23	4.23	4.23
Breedte kolk	b _k	m	10.5	10.5	10.5
Stroomsnelheid op x=8*h	u	m	0.23	0.23	0.23
Korrel diameter bodem	D ₅₀	m	0,0001	0,0002	0,0003
Relatieve dichtheid	Δ	-	1.65	1.65	1.65
Kritische stroomsnelheid	u _{cr}	m/s	0.33	0.42	0.48
u < u _{cr}			Ja	Ja	Ja

Tabel 45 - Berekening lengte bodembescherming in de opwaartse en afwaartse voorhaven ten gevolge van retourstroming.

Eigenschap	Symbool	Eenheid	Opwaartse voorhaven			Afwaartse voorhaven		
			D ₅₀ =100µm	D ₅₀ =200µm	D ₅₀ =300µm	D ₅₀ =100µm	D ₅₀ =200µm	D ₅₀ =300µm
Retourstroomsnelheid	u_r	m/s	0.5	0.5	0.5	2.3	2.3	2.3
Breedte schip	b_s	m	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5
Diepgang schip	T	m	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
Natte sectie schip	A_s	m ²	28.5	28.5	28.5	28.5	28.5	28.5
Waterpeil	H	mTAW	5.83	5.83	5.83	3.45	3.45	3.45
Drempelpeil	z_d	mTAW	-0.28	-0.28	-0.28	-0.28	-0.28	-0.28
Breedte kolk	b_k	m	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5
Natte sectie	A	m ²	64.2	64.2	64.2	39.2	39.2	39.2
Retourstroomdebiet	Q	m ³ /s	17.8	17.8	17.8	24.5	24.5	24.5
Bodempeil	Z	mTAW	-0.78	-0.78	-0.78	-0.78	-0.78	-0.78
Waterdiepte	h	m	6.61	6.61	6.61	4.23	4.23	4.23
Stroomsnelheid op $x=8 \cdot h$	u	m	0.26	0.26	0.26	0.55	0.55	0.55
Korrel diameter bodem	D_{50}	m	0.0001	0.0002	0.0003	0.0001	0.0002	0.0003
Relatieve dichtheid	Δ	-	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65
Kritische stroomsnelheid	u_{cr}	m/s	0.36	0.45	0.52	0.33	0.42	0.48
$u < u_{cr}$			Ja	Ja	Ja	Nee	Nee	Nee
Aanzethelling	β	°	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	17	17	17
Eindhelling (na afschuiving/verweking)	γ	°	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	3.5	3.5	3.5
Maximumdiepte kuil	y_e	m	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	3.57	2.47	1.89
Lengte bodembescherming	L_b	m	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	23.4	16.2	12.4

n.v.t. = niet van toepassing

Tabel 46 - Berekening lengte bodembescherming in de fuik van de opwaartse en de afwaartse voorhaven voor stroming ten gevolge van schroefstraalwerking volgens theorie van erosie achter ronde straal.

	Eigenschap	Symbool	Eenheid	Opwaartse voorhaven						Afwaartse voorhaven		
				Bodempeil + 1.53 mTAW			Bodempeil - 0.78 mTAW			Bodempeil – 0.78 mTAW		
				D ₅₀ =100µm	D ₅₀ =200µm	D ₅₀ =300µm	D ₅₀ =100µm	D ₅₀ =200µm	D ₅₀ =300µm	D ₅₀ =100µm	D ₅₀ =200µm	D ₅₀ =300µm
	Waterpeil	H	mTAW	5.83	5.83	5.83	5.83	5.83	5.83	3.45	3.45	3.45
	Bodempeil	Z	mTAW	1.53	1.53	1.53	-0.78	-0.78	-0.78	-0.78	-0.78	-0.78
	waterdiepte	h	-	4.30	4.30	4.30	6.61	6.61	6.61	4.23	4.23	4.23
	Korrel diameter bodem	D ₅₀	m	0.0001	0.0002	0.0003	0.0001	0.0002	0.0003	0.0001	0.0002	0.0003
	Relatieve dichtheid	Δ	-	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65
1 hoofdschroef diameter	Aantal schroeven	n	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Effectieve schroef diameter	D ₀	m	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45
	Stroomsnelheid achter schroef	u _p	m/s	8.69	8.69	8.69	8.69	8.69	8.69	8.69	8.69	8.69
	Verticale afstand straalas tot bodem	d	m	2.15	2.15	2.15	4.46	4.46	4.46	2.08	2.08	2.08
	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	0.007	0.009	0.011	0.007	0.009	0.011	0.007	0.009	0.011
	Maximumdiepte kuil	y _e	m	8.14	7.02	6.42	5.84	4.71	4.11	8.22	7.09	6.49
	Aanzethelling	β	°	30	30	30	30	30	30	30	30	30
	Eindhelling (na afschuiving/verweking)	γ	°	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
	Lengte bodembescherming	L _b	m	59.5	51.3	46.9	42.7	34.4	30.1	60.1	51.8	47.5
2 hoofdschroeven diameter	Aantal schroeven	n	-	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Effectieve schroef diameter	D ₀	m	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36
	Stroomsnelheid achter schroef	u _p	m/s	7.18	7.18	7.18	7.18	7.18	7.18	7.18	7.18	7.18
	Verticale afstand straalas tot bodem	d	m	2.28	2.28	2.28	4.41	4.41	4.41	2.03	2.03	2.03
	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	0.007	0.009	0.011	0.007	0.009	0.011	0.007	0.009	0.011
	Maximumdiepte kuil	y _e	m	6.81	5.82	5.29	4.68	3.69	3.16	7.06	6.07	5.54
	Aanzethelling	β	°	30	30	30	30	30	30	30	30	30
	Eindhelling (na afschuiving/verweking)	γ	°	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
	Lengte bodembescherming	L _b	m	49.8	42.5	38.7	34.2	26.9	23.1	51.6	44.4	40.5

Tabel 47 – Berekening lengte bodembescherming in de fuik van de opwaartse en de afwaartse voorhaven voor stroming ten gevolge van schroefstraalwerking volgens theorie van straalspreading.

	Eigenschap	Symbool	Eenheid	Opwaartse voorhaven						Afwaartse voorhaven		
				Bodempeil + 1.53 mTAW			Bodempeil - 0.78 mTAW			Bodempeil – 0.78 mTAW		
				D ₅₀ =100µm	D ₅₀ =200µm	D ₅₀ =300µm	D ₅₀ =100µm	D ₅₀ =200µm	D ₅₀ =300µm	D ₅₀ =100µm	D ₅₀ =200µm	D ₅₀ =300µm
	Waterpeil	H	mTAW	5.83	5.83	5.83	5.83	5.83	5.83	3.45	3.45	3.45
	Bodempeil	Z	mTAW	1.53	1.53	1.53	-0.78	-0.78	-0.78	-0.78	-0.78	-0.78
	waterdiepte	h	-	4.30	4.30	4.30	6.61	6.61	6.61	4.23	4.23	4.23
	Korrel diameter bodem	D ₅₀	m	0.0001	0.0002	0.0003	0.0001	0.0002	0.0003	0.0001	0.0002	0.0003
	Relatieve dichtheid	Δ	-	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65
1 hoofdschroef diameter	Aantal schroeven	n	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Effectieve schroef diameter	D ₀	m	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45
	Stroomsnelheid achter schroef	u _p	m/s	8.69	8.69	8.69	8.69	8.69	8.69	8.69	8.69	8.69
	Verticale afstand straalas tot bodem	d	m	2.15	2.15	2.15	4.46	4.46	4.46	2.08	2.08	2.08
	Kritieke stroomsnelheid	u _c	m/s	0.33	0.42	0.48	0.36	0.45	0.52	0.33	0.42	0.48
	Maximum lengte kuil	l _e	m	63.2	50.2	43.8	58.9	46.8	40.4	63.5	50.4	44.0
	Maximum diepte kuil	y _e	m	9.15	6.82	5.68	6.06	3.89	2.83	9.25	6.91	5.78
	Aanzethelling	β	°	24.9	23.3	22.3	17.7	14.3	11.9	25.1	23.6	22.6
	Eindhelling (na afschuiving/verweking)	γ	°	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
	Lengte bodembescherming	L _b	m	64.9	4738	39.5	40.0	24.2	16.5	65.7	48.6	10.3
2 hoofdschroeven diameter	Aantal schroeven	n	-	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Effectieve schroef diameter	D ₀	m	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36
	Stroomsnelheid achter schroef	u _p	m/s	7.18	7.18	7.18	7.18	7.18	7.18	7.18	7.18	7.18
	Verticale afstand straalas tot bodem	d	m	2.28	2.28	2.28	4.41	4.41	4.41	2.03	2.03	2.03
	Kritieke stroomsnelheid	u _c	m/s	0.33	0.42	0.48	0.36	0.45	0.52	0.33	0.42	0.48
	Maximum lengte kuil	l _e	m	69.6	55.2	48.3	64.8	51.4	44.9	69.8	55.4	48.4
	Maximum diepte kuil	y _e	m	10.3	7.76	6.52	7.15	4.77	3.61	10.43	7.86	6.61
	Aanzethelling	β	°	25.5	14.2	23.2	19.0	16.0	13.8	25.7	24.4	23.5
	Eindhelling (na afschuiving/verweking)	γ	°	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
	Lengte bodembescherming	L _b	m	73.4	54.8	45.7	48.1	30.7	22.2	74.4	55.6	46.4

Resultaten berekening breedte bodembescherming

Tabel 48 –Berekening breedte bodembescherming ter plaatse van wachtplaatsen en remmingswerken in de opwaartse en afwaartse voorhaven voor stroming ten gevolge van schroefstraalwerking volgens theorie van erosie achter ronde straal.

	Eigenschap	Symbool	Eenheid	Opwaartse voorhaven			Afwaartse voorhaven		
				D ₅₀ =100µm	D ₅₀ =200µm	D ₅₀ =300µm	D ₅₀ =100µm	D ₅₀ =200µm	D ₅₀ =300µm
	Waterpeil	H	mTAW	5.83	5.83	5.83	3.45	3.45	3.45
	Bodempeil	Z	mTAW	1.53	1.53	1.53	-0.78	-0.78	-0.78
	waterdiepte	h	-	4.30	4.30	4.30	4.23	4.23	4.23
	Korrel diameter bodem	D ₅₀	m	0.0001	0.0002	0.0003	0.0001	0.0002	0.0003
	Relatieve dichtheid	Δ	-	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65
1 hoofdschroef diameter	Aantal schroeven	n	-	1	1	1	1	1	1
	Effectieve schroef diameter	D ₀	m	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45
	Stroomsnelheid achter schroef	u _p	m/s	8.69	8.69	8.69	8.69	8.69	8.69
	Verticale afstand straalas tot bodem	d	m	2.15	2.15	2.15	2.08	2.08	2.08
	Shieldscoefficient	ψ _c	-	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032
	Kritieke schuifspanningssnelheid	u* _c	m/s	0.007	0.009	0.011	0.007	0.009	0.011
	Maximumdiepte kuil	y _e	m	8.15	7.02	6.42	8.22	7.09	6.49
	Aanzethelling	β	°	30	30	30	30	30	30
	Eindhelling (na afschuiving/verweking)	γ	°	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5
	Lengte bodembescherming	L _b	m	1.4	1.2	1.1	1.4	1.2	1.1
2 hoofdschroeven diameter	Aantal schroeven	n	-	2	2	2	2	2	2
	Effectieve schroef diameter	D ₀	m	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36
	Stroomsnelheid achter schroef	u _p	m/s	7.18	7.18	7.18	7.18	7.18	7.18
	Verticale afstand straalas tot bodem	d	m	2.28	2.28	2.28	2.03	2.03	2.03
	Shieldscoefficient	ψ _c	-	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032
	Kritieke schuifspanningssnelheid	u* _c	m/s	0.007	0.009	0.011	0.007	0.009	0.011
	Maximumdiepte kuil	y _e	m	6.99	6.00	5.47	7.06	6.07	5.54
	Aanzethelling	β	°	30	30	30	30	30	30
	Eindhelling (na afschuiving/verweking)	γ	°	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5
	Lengte bodembescherming	L _b	m	1.2	1.0	0.9	1.2	1.0	0.9

Tabel 49 - Berekening breedte bodembescherming ter plaatse van wachtplaatsen en remmingswerken in de opwaartse en de afwaartse voorhaven voor stroming ten gevolge van schroefstraalwerking volgens theorie van straa spreiding.

	Eigenschap	Symbool	Eenheid	Opwaartse voorhaven			Afwaartse voorhaven		
				D ₅₀ =100µm	D ₅₀ =200µm	D ₅₀ =300µm	D ₅₀ =100µm	D ₅₀ =200µm	D ₅₀ =300µm
	Waterpeil	H	mTAW	5.83	5.83	5.83	3.45	3.45	3.45
	Bodempeil	Z	mTAW	1.53	1.53	1.53	-0.78	-0.78	-0.78
	waterdiepte	h	-	4.30	4.30	4.30	4.23	4.23	4.23
	Korrel diameter bodem	D ₅₀	m	0.0001	0.0002	0.0003	0.0001	0.0002	0.0003
	Relatieve dichtheid	Δ	-	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65
1 hoofdschroef diameter	Aantal schroeven	n	-	1	1	1	1	1	1
	Effectieve schroef diameter	D ₀	m	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45
	Stroomsnelheid achter schroef	u _p	m/s	8.69	8.69	8.69	8.69	8.69	8.69
	Verticale afstand straalas tot bodem	d	m	2.15	2.15	2.15	2.08	2.08	2.08
	Kritieke stroomsnelheid	u _c	m/s	0.33	0.42	0.48	0.33	0.42	0.48
	Maximum lengte kuil	l _e	m	63.3	50.2	43.9	63.5	50.4	44.0
	Maximum diepte kuil	y _e	m	9.15	6.82	5.68	9.25	6.91	5.78
	Aanzethelling	β	°	24.9	23.3	22.3	25.1	23.6	22.6
	Eindhelling (na afschuiving/verweking)	γ	°	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5
	Lengte bodembescherming	L _b	m	1.5	1.1	0.9	1.6	1.4	0.9
2 hoofdschroeven diameter	Aantal schroeven	n	-	2	2	2	2	2	2
	Effectieve schroef diameter	D ₀	m	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36
	Stroomsnelheid achter schroef	u _p	m/s	7.18	7.18	7.18	7.18	7.18	7.18
	Verticale afstand straalas tot bodem	d	m	2.28	2.28	2.28	2.03	2.03	2.03
	Kritieke stroomsnelheid	u _c	m/s	0.33	0.42	0.48	0.33	0.42	0.48
	Maximum lengte kuil	l _e	m	69.6	55.2	48.3	69.8	55.4	48.4
	Maximum diepte kuil	y _e	m	10.33	7.76	6.51	10.43	7.86	6.61
	Aanzethelling	β	°	25.5	24.2	23.2	25.7	24.4	23.5
	Eindhelling (na afschuiving/verweking)	γ	°	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5
	Lengte bodembescherming	L _b	m	1.7	1.3	1.1	1.8	1.3	1.1

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