



Vlaanderen
is wetenschap

VAARGEUL GEO VLAANDEREN

18_120_4
WL rapporten

Advies Scheldebrug Antwerpen

Deelrapport 4 – Conceptontwerp bodembescherming

DEPARTEMENT
MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

Advies Scheldebrug Antwerpen

Deelrapport 4 – Conceptontwerp bodembescherming

Verelst, K.; Visser, K.P.; De Maerschallck, B.; 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 2019
D/2019/3241/229

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Verelst, K.; Visser, K.P.; De Maerschallck, B.; Mostaert, F. (2019). Advies Scheldebrug Antwerpen: Deelrapport 4 – Conceptontwerp bodembescherming. Versie 4.0. WL Rapporten, 18_120_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:	De Vlaamse Waterweg nv Afdeling Zeeschelde-Zeekanaal	Ref.:	WL2019R18_120_4
Keywords (3-5):	Schelde, Rede van Antwerpen, brugpijlers, bodembescherming, voorontwerp		
Tekst (p.):	38	Bijlagen (p.):	7
Vertrouwelijk:	<input checked="" type="checkbox"/> Ja	Vrijgegeven vanaf:	01/01/2025

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

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Visser, K.P.	Getekend door: Klaas Visser (Signature) Getekend op: 2019-12-05 10:46:53 +01:00 Reden: Ik keur dit document goed <i>Klaas Visser</i>
Projectleider:	De Maerschallck, B.	Getekend door: Bart De Maerschallck (Signature) Getekend op: 2019-12-05 10:47:53 +01:00 Reden: Ik keur dit document goed <i>Bart De Maerschallck</i>

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Mostaert, F.	Getekend door: Frank Mostaert (Signature) Getekend op: 2019-12-05 10:52:14 +01:00 Reden: Ik keur dit document goed <i>Frank Mostaert</i>
-----------------	--------------	---



Abstract

Eén van de overkappings- en leefbaarheidsprojecten van de Antwerpse ring betreft de aanleg van een Scheldebrug voor fietsers ter hoogte van de Kennedytunnel. De Vlaamse Waterweg nv staat in voor de realisatie van de nieuwe Scheldebrug. De Studiebureaus SBE en Omgeving zijn aangesteld voor de opmaak van een projectdefinitie en het onderzoek van de haalbaarheid van de fiets- en voetgangersbrug. De Vlaamse Waterweg nv Afdeling Zeeschelde-Zeekanaal (contactpersoon: Michiel Derycke) vraagt aan het WL om een conceptontwerp uit te voeren van de bodembescherming rond de brugpijlers van de nieuwe fiets- en voetgangersbrug over de Schelde te Antwerpen. Dit conceptontwerp moet het studiebureau toelaten een raming op te maken van de kostprijs van het project.

Vooreerst is voor de drie pijlers van de Scheldebrug de hydraulische belasting aan de bodem bepaald. Deze bestaat uit getijstroming in de Schelde, retourstroming ten gevolge van scheepvaart en stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van hoofdschroef en boegschroef van scheepvaart. Wat scheepvaart betreft is zowel het grootste schip uit de scheepvaartsimulaties beschouwd, i.e. de tanker Stolt Kimberley, als een binnenvaartschip CEMT klasse VIa en een duwkonvooi CEMT-klasse VIb.

Daarna werd aan de hand van formuleringen uit de literatuur nagegaan wat de grootte van de erosiekuil ter plaatse van de brugpijlers zou zijn indien geen bodembescherming aangebracht wordt. Hieruit volgen evenwichtsdieptes van de erosiekuil tussen 9.5 m en 35.3 m. Vervolgens is voor de drie brugpijlers van de Scheldebrug aan de hand van de maatgevende hydraulische belastingen het concept bodembescherming rond de brugpijlers bepaald. Twee concepten zijn bepaald: enerzijds een concept waarbij enkel breuksteen rond de pijlers aanwezig is en anderzijds een concept waarbij de breuksteen wordt gepenetreerd met colloïdaal beton waardoor een relatief kleinere sortering mogelijk is. Bij beide concepten wordt bodembescherming over een minimale afstand van 50 m opwaarts en 50 m afwaarts van de pijler aangebracht.

De voorgestelde concepten voor de bodembescherming rond de brugpijlers van de nieuwe Scheldebrug te Antwerpen is ook vergeleken met de bodembescherming van de pijlers van de al bestaande Scheldebrug te Temse. In vergelijking met het in dit rapport bepaalde conceptontwerp van de bodembescherming rond de brugpijlers van de Scheldebrug te Antwerpen, wordt vastgesteld dat ter plaatse van de Scheldebrug te Temse geen erosiebescherming rond de brugpijlers is aangebracht. De afwezigheid van erosiebescherming rond de brugpijlers te Temse heeft echter niet gezorgd voor een noemenswaardige erosie rond de brugpijlers. De grote dieptes van de erosiekuilen zoals berekend aan de hand van de literatuurformules worden daar dus niet waargenomen.

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	V
Lijst van de tabellen.....	VI
Lijst van de figuren	VIII
1 Inleiding	1
2 Conceptontwerp Scheldebrug voor fietsers en voetgangers	3
3 Hydraulische belastingen op de bodem	4
3.1 Stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van getijstroming in de Schelde	4
3.2 Stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van scheepvaart	6
3.2.1 Algemeen.....	6
3.2.2 Retourstroming ten gevolge van scheepvaart	8
3.2.3 Stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de hoofdschroef	10
3.2.4 Stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de boegschroef.....	12
3.3 Samenvatting.....	18
4 Conceptontwerp bodembescherming brugpijlers Scheldebrug	19
4.1 Algemeen.....	19
4.2 Inschatting erosiekuil ter plaatse van brugpijlers bij afwezigheid bodembescherming	21
4.3 Methodologie dimensionering bodembescherming.....	24
4.3.1 Breuksteenbekleding.....	24
4.3.2 Gepenetreerde breuksteen	26
4.4 Resultaten dimensionering bodembescherming	28
4.5 Vergelijking met bodembescherming Scheldebrug te Temse.....	31
5 Conclusies	35
6 Referenties	37
Bijlage 1 Tabellen	B1

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Ontwerpbodempeilen brugpijlers	3
Tabel 2 – Stroomsnelheid en waterpeil voor dimensionering bodembescherming	5
Tabel 3 – Ontwerpschepen bepaling stroomsnelheid aan bodem ten gevolge van scheepvaart	6
Tabel 4 – Diepgang beschouwd voor bepaling hydraulische belasting op bodem ten gevolge van scheepvaart	7
Tabel 5 – Berekening vaarsnelheid schip	9
Tabel 6 – Berekening retourstroomsnelheid schip	10
Tabel 7 – Resultaten berekening maximale stroomsnelheid boven bodem ten gevolge van de hoofdschroef van de tanker Stolt Kimberley	11
Tabel 8 – Resultaten berekening maximale stroomsnelheid boven bodem ten gevolge van de hoofdschroef van het schip CEMT klasse VIa en het duwkonvooi CEMT VIb	11
Tabel 9 – Resultaten berekening maximale stroomsnelheid boven bodem ten gevolge van de boegschroef in open water voor de tanker Stolt Kimberley	14
Tabel 10 – Resultaten berekening maximale stroomsnelheid boven bodem ten gevolge van de boegschroef in open water voor schip CEMT klasse VIa en duwkonvooi CEMT klasse VIb	14
Tabel 11 – Overzicht maximale waarde van de stroomsnelheid boven de bodem bij gebruik van de boegschroef tegen de brugpijler	15
Tabel 12 – Afstanden waarvoor stroomsnelheid bij gebruik van boegschroef tegen pijler kleiner is dan de stroomsnelheid bij gebruik van boegschroef in open water en stroomsnelheid bij gebruik van hoofdschroef	16
Tabel 13 – Samenvatting hydraulische belastingen op de bodem voor dimensionering bodembescherming	18
Tabel 14 – Maatgevende waarden hydraulische belastingen op de bodem voor dimensionering bodembescherming	19
Tabel 15 – Toegepaste waarden voor de correctiecoëfficiënten in de formulering	23
Tabel 16 – Minimale en maximale waarde van de berekende diepte van de erosiekuil ter plaatse van de brugpijlers	23
Tabel 17 – Beschouwde breuksteensorteringen	25
Tabel 18 – Benodigde breuksteensortering voor brugpijlers	28
Tabel 19 – Resultaten berekening maximale stroomsnelheid boven de bodem ten gevolge van gebruik van de boegschroef van schip Stolt Kimberley naast een brugpijler voor bodempeil -12.50 mTAW	B1
Tabel 20 – Resultaten berekening maximale stroomsnelheid boven de bodem ten gevolge van gebruik van de boegschroef van schip Stolt Kimberley naast een brugpijler voor bodempeil -10.50 mTAW	B2
Tabel 21 – Resultaten berekening maximale stroomsnelheid boven de bodem ten gevolge van gebruik van de boegschroef van schip CEMT VIa naast een brugpijler	B3
Tabel 22 – Resultaten berekening maximale stroomsnelheid boven de bodem ten gevolge van gebruik van de boegschroef van duwkonvooi CEMT VIb naast een brugpijler	B4

Tabel 23 – Resultaten bepaling benodigde breuksteensortering B5
Tabel 24 – Resultaten inschatting diepte erosiekuil a.d.h.v. formulering volgens Breusers *et al.* (1977) B6
Tabel 25 – Resultaten inschatting diepte erosiekuil a.d.h.v. formulering volgens Johnson P.A. (1992) B6
Tabel 26 – Resultaten inschatting diepte erosiekuil a.d.h.v. formulering volgens Arneson *et al.* (2012) B7
Tabel 27 – Resultaten inschatting diepte erosiekuil a.d.h.v. formulering volgens Schiereck (2003) B7

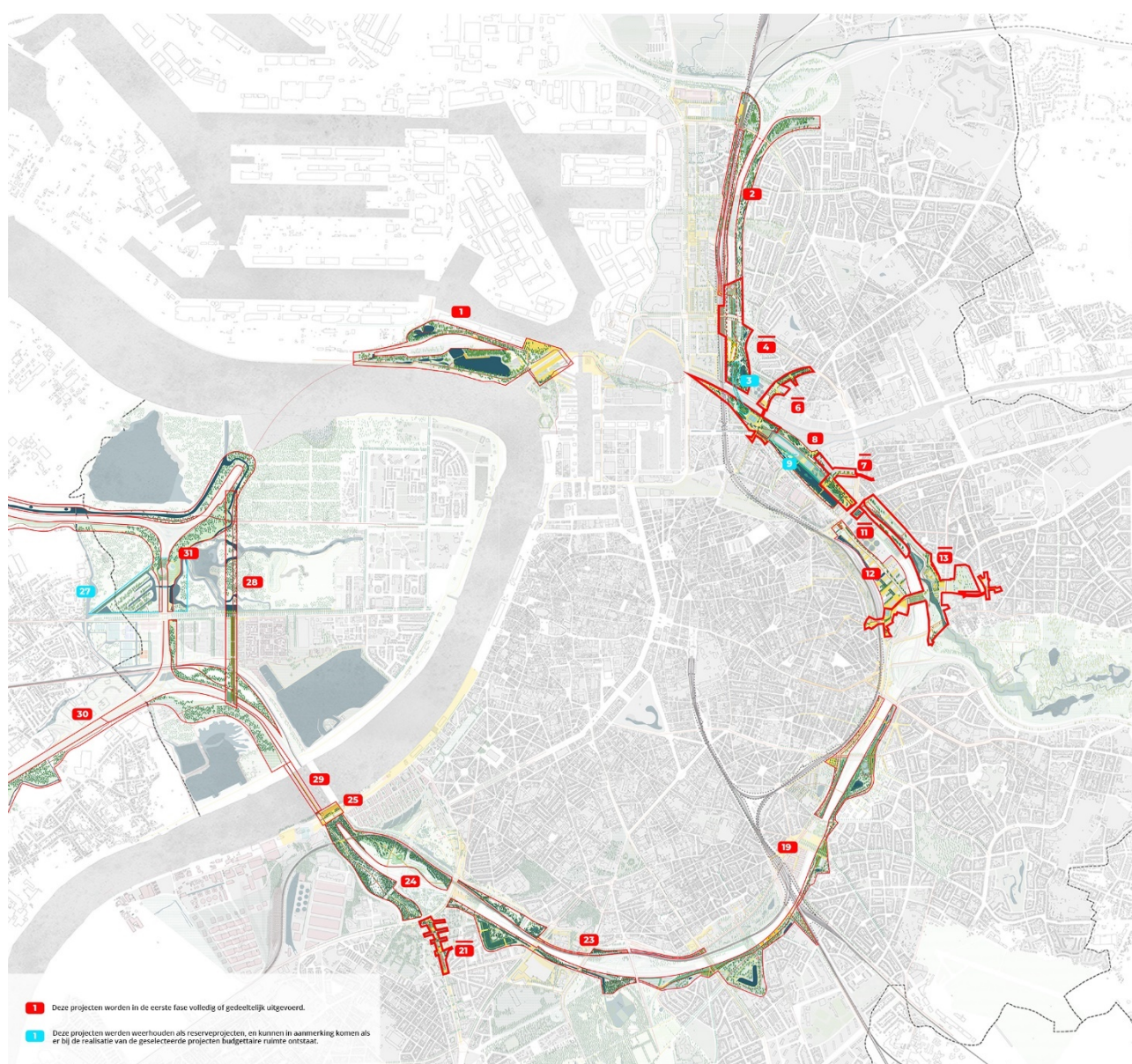
Lijst van de figuren

Figuur 1 – Overzicht van alle overkappings- en leefbaarheidsprojecten voor de Antwerpse ringzone geselecteerd door het politiek stuurcomité.....	1
Figuur 2 – Locatie Scheldebrug voor fietsers uit conceptontwerp	3
Figuur 3 – Dieptegemiddelde en sectiegemiddelde stroomsnelheid bij gemiddeld springtij.....	4
Figuur 4 – Maximale stroming (dieptegemiddeld) raai Scheldebrug bij gemiddeld springtij	5
Figuur 5 – Bathymetrie ter plaatse van de Scheldebrug	7
Figuur 6 – Schematisering van het dwarsprofiel ter plaatse van de Scheldebrug (zwart) door een trapeziumvormig profiel (rood).....	8
Figuur 7 – Variatie van de stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de boegschroef tegen een verticale wand in functie van de afstand tot de verticale wand voor de tanker Stolt Kimberley.....	17
Figuur 8 – Variatie van de stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de boegschroef tegen een verticale wand in functie van de afstand tot de verticale wand voor het schip CEMT VIa en het duwkonvooi CEMT VIb	17
Figuur 9 – Waarde coëfficiënt K_{gr} voor een groep van 2 pijlers.....	21
Figuur 10 – Verband tussen maximaal toegelaten stroomsnelheid en breuksteendiameter voor (met beton) gepenetreerde breuksteen.....	26
Figuur 11 – Invloedszone van een enkele pijler	29
Figuur 12 – Concept bodembescherming ter plaatse van brugpijlers met enkel breuksteen	30
Figuur 13 – Concept bodembescherming met gepenetreerde breuksteen.....	30
Figuur 14 – Scheldebrug te Temse	31
Figuur 15 – Algemeen aanzicht en planzicht tweede Scheldebrug te Temse	31
Figuur 16 – Bathymetrie Boven-Zeeschelde ter plaatse van Scheldebrug te Temse voor 1990, 2001, 2009 en 2016.....	33
Figuur 17 – Schets Oude Scheldebrug te Temse	34
Figuur 18 – Erosie in de buurt van een onbekend element (links) en een scheepswrak (rechts) in de Beneden-Zeeschelde ter hoogte van Saeftinghe	34
Figuur 19 – Concept bodembescherming ter plaatse van brugpijlers op basis van stroomsnelheden ten gevolg van scheepvaart.....	36

1 Inleiding

Onder leiding van een door de Vlaamse Regering aangestelde intendant wordt sinds 2016 de leefbaarheid van de Antwerpse Ring onderzocht in het project “OVER DE RING” (<https://www.overdering.be/>). Achttien overkappings- en leefbaarheidsprojecten werden door het politieke stuurcomité geselecteerd om eerst volledig of gedeeltelijk uit te voeren voor een totaal investeringsbudget van 1,25 miljard euro, Figuur 1.

Figuur 1 – Overzicht van alle overkappings- en leefbaarheidsprojecten voor de Antwerpse ringzone geselecteerd door het politiek stuurcomité



Bron: <https://www.overdering.be/overzichtskaart/>; 29: Project Scheldebrug.

Eén van deze achttien projecten is de aanleg van een Scheldebrug voor fietsers en voetgangers ter hoogte van de Kennedytunnel, nr. 29 in Figuur 1. Met het oog op een modal shift waarmee nog slechts 50% van de verplaatsingen met de wagen zou gebeuren, is een vlotte connectie nodig tussen Linker- en Rechteroever noodzakelijk. Daarom voorziet *Team West* ter hoogte van de Kennedytunnel een Scheldebrug die beide oevers dichter, vlotter en comfortabeler bij elkaar brengt.

De Vlaamse Waterweg nv is de opdracht toegeschreven de fietsersbrug te realiseren. Op het ogenblik van de voorliggende studie staat het ontwerp van de brug nog niet vast. De Studiebureaus SBE en Omgeving zijn aangesteld voor de opmaak van een projectdefinitie en het onderzoek van de haalbaarheid van de fiets- en voetgangersbrug. Als onderdeel hiervan maakt SBE een conceptueel brugontwerp met als doel het nagaan van de technische haalbaarheid en het opstellen van een gefundeerde raming van de kostprijs. Door het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) is hiervoor reeds advies gegeven met betrekking tot de impact op stroming en morfologie (De Maerschallck *et al.*, 2019) en met betrekking tot de nautische impact (Eloot *et al.*, 2019).

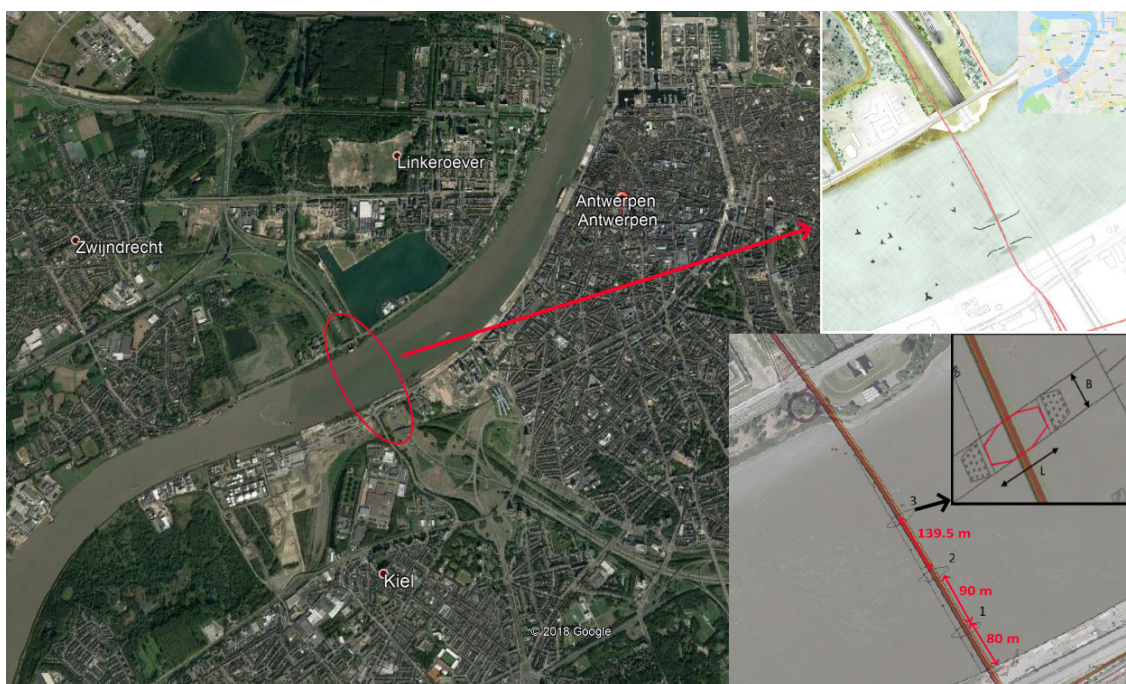
Het conceptontwerp van de bodembescherming rond de brugpijlers is echter niet opgenomen in de opdracht van SBE. Om die reden vraagt de Vlaamse Waterweg nv Afdeling Zeeschelde-Zeekanaal (contactpersoon: Michiel Derycke) aan het WL om een conceptontwerp van de bodembescherming rond de brugpijlers uit te voeren. Dit conceptontwerp moet het studiebureau toelaten een raming op te maken van de kostprijs van het project. Een meer gedetailleerd ontwerp van de bodembescherming rond de brugpijlers behoort niet tot de scope van dit advies, maar behoort tot het detailontwerp van de fietsbrug.

Hoofdstuk 2 beschrijft de locatie en het conceptontwerp van de nieuwe Scheldebrug. De bepaling van de hydraulische belasting aan de bodem is beschreven in hoofdstuk 3. Hoofdstuk 4 beschrijft het eigenlijke conceptontwerp van de bodembescherming rond de brugpijlers van de fietsbrug. Tevens wordt de voorgestelde bodembescherming vergeleken met de uitvoering rond de pijlers van de al bestaande brug over de Schelde te Temse. De conclusies van dit rapport zijn samengevat in hoofdstuk 5.

2 Conceptontwerp Scheldebrug voor fietsers en voetgangers

Volgens het conceptontwerp zal de Scheldebrug voor fietsers en voetgangers zich net opwaarts van de Kennedytunnel bevinden. Figuur 2 geeft de locatie van de brug volgens het conceptontwerp. In de Schelde worden 3 pijlers geplaatst. De nummering van de pijlers zoals gebruikt in dit rapport, de afstanden tussen de pijlers onderling en de afstand tussen pijlers en de kaaimuur op rechteroever is gegeven in de detailfiguur van Figuur 2. De pijlers zijn achthoekig van vorm. Pijler 1 en pijler 2 hebben een lengte van 50 m en een breedte van 25 m, pijler 3 heeft een lengte van 50 m en een breedte van 20 m. Het gedeelte van de brug tussen linkeroever en pijler 2 en het gedeelte tussen rechteroever en pijler 1 bestaat uit een vast brugdek. Het gedeelte tussen pijler 1 en pijler 2 bestaat uit een beweegbaar brugdek. Zeevaart met een te grote hoogte dient hierbij het gedeelte met het beweegbaar brugdek te nemen, binnenvaart kan nog passeren onder het gedeelte met het vast brugdek tussen pijler 2 en pijler 3. De randvoorwaardennota SBE & Omgeving (2019) vermeldt voor de verschillende pijlers de ontwerpbodempeilen zoals vermeld in Tabel 1.

Figuur 2 – Locatie Scheldebrug voor fietsers uit conceptontwerp (SBE & Omgeving, 2019)



Tabel 1 – Ontwerpbodempeilen brugpijlers

	Bodempeil	Lengte	Breedte
Pijler 1	-12.5 mTAW	50 m	25 m
Pijler 2	-10.5 mTAW	50 m	25 m
Pijler 3	-7.4 mTAW	50 m	25 m

3 Hydraulische belastingen op de bodem

Dit hoofdstuk beschrijft de bepaling van de hydraulische belastingen op de bodem ter plaatse van de Scheldebrug. paragraaf 3.1 beschrijft de bepaling van de stroomsnelheden aan de bodem ten gevolge van de getijstroming in de Schelde. Paragraaf 3.2 bevat de bepaling van de stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van scheepvaart op de Schelde. Een samenvatting van de verschillende beschouwde hydraulische belastingen op de bodem is gegeven in paragraaf 3.3.

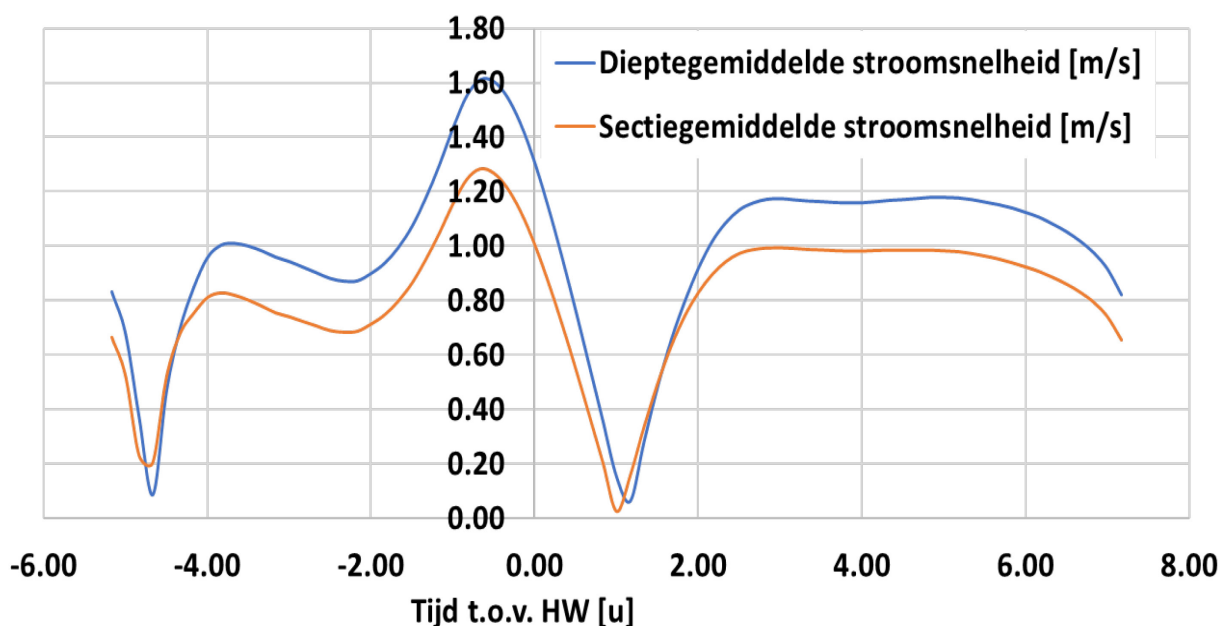
3.1 Stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van getijstroming in de Schelde

In het kader van het Sigmaplan vermelden Peeters *et al.* (2009) dat ter hoogte van Antwerpen een veiligheid en bescherming dient geboden te worden tot een terugkeerperiode van 4000 jaar (bij het Meest Wenselijk Alternatief 2000). Voor dimensionering wordt hierbij rekening gehouden met een maximale waterstand op de Schelde van 8.75 m en een sectiegemiddelde stroomsnelheid van 2.5 m/s.

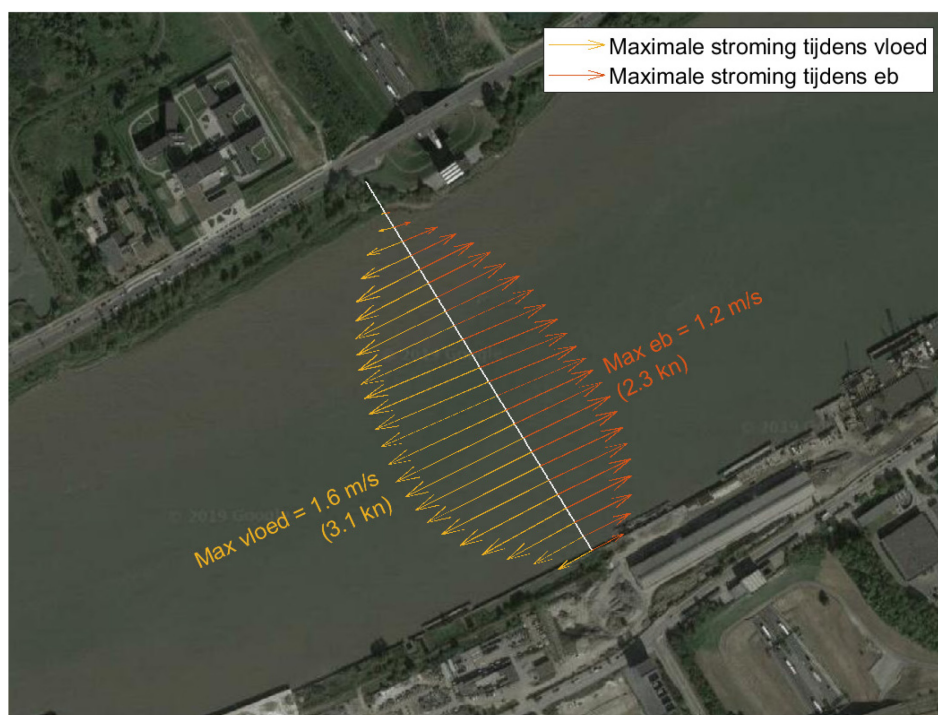
In De Maerschack *et al.* (2019) is de maximale dieptegemiddelde stroomsnelheid bij gemiddeld springtij ter plaatse van de Scheldebrug begroot gebruik makend van het door het WL ontwikkelde Scaldis-model van de Schelde (Smolders *et al.*, 2016). Dit driedimensionaal model van het volledige Schelde-estuarium is opgebouwd in de TELEMAC Software.

Figuur 3 toont voor een gemiddeld springtij de variatie in de tijd (uitgedrukt ten opzichte van het tijdstip van hoogwater) van de dieptegemiddelde stroomsnelheid en de sectiegemiddelde stroomsnelheid berekend met het Scaldis-model. In Figuur 4 is voor de raai ter plaatse van de Scheldebrug de maximale waarde van de dieptegemiddelde stroomsnelheid bij eb en bij vloed grafisch weergegeven.

Figuur 3 – Dieptegemiddelde en sectiegemiddelde stroomsnelheid bij gemiddeld springtij



Figuur 4 – Maximale stroming (dieptegemiddeld) raai Scheldebrug bij gemiddeld springtij



Uit Figuur 3 volgt dat de maximale sectiegemiddelde stroomsnelheid bij gemiddeld springtij 1.3 m/s bedraagt. Hierbij bedraagt de maximale dieptegemiddelde stroomsnelheid bij vloed, respectievelijk eb, 1.6 m/s, respectievelijk 1.2 m/s, wat 23 %, respectievelijk 8 %, hoger is dan de maximale waarde van de sectiegemiddelde stroomsnelheid. Uit Figuur 4 volgt dat maximale waarde van de dieptegemiddelde stroomsnelheid, zowel bij eb als bij vloed, ter plaatse van de locatie van de Scheldebrug zo goed als uniform verdeeld is over de dwarssectie.

Op basis van deze analyse van de dieptegemiddelde en de sectiegemiddelde stroomsnelheid bij springtij wordt de maximale sectiegemiddelde stroomsnelheid van 2.5 m/s uit het Sigmaplan omgerekend naar een dieptegemiddelde stroomsnelheid. Dit kan mogelijk leiden tot een overschatting van de stroomsnelheid aangezien de maximale waarde van 2.5 m/s bepaald is voor een groter gedeelte van de Schelde. Deze berekening geeft aanleiding tot een stroomsnelheid van 3.1 m/s (= 2.5 x 1.23) bij vloed en een stroomsnelheid van 2.7 m/s (= 2.5 m/s x 1.08) bij eb. Voor de dimensionering van de bodembescherming rond de brugpijlers van de Scheldebrug zullen deze stroomsnelheden toegepast worden. Ter vergelijking wordt zowel bij vloed als bij eb ook een stroomsnelheid gelijk aan 2.5 m/s toegepast.

Voor de dimensionering van de bodembescherming is meestal ook de waterdiepte van belang. Voor de stroomsnelheid bij vloed wordt het maximale waterpeil van +8.75 mTAW uit het Sigmaplan beschouwd, bij eb wordt als waterpeil het gemiddeld laagwater bij springtij beschouwd (-0.19 mTAW; Vlaamse Hydrografie (2019)). Tabel 2 geeft een overzicht van de voor de dimensionering van de bodembescherming beschouwde stroomsnelheden en waterpeilen.

Tabel 2 – Stroomsnelheid en waterpeil voor dimensionering bodembescherming

	Vloed		Eb	
Stroomsnelheid	3.1 m/s	2.5 m/s	2.7 m/s	2.5 m/s
Waterpeil	8.75 mTAW	8.75 mTAW	-0.19 mTAW	-0.19 mTAW

3.2 Stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van scheepvaart

3.2.1 Algemeen

Zoals vermeld in hoofdstuk 2 kan zeevaart met een te grote hoogte en binnenvaart de Scheldebrug passeren ter plaatse van het opengaan gedeelte tussen pijler 1 en pijler 2. Voor dit gedeelte van de Scheldebrug zal zeevaart echter maatgevend zijn ten opzichte van binnenvaart. Tussen pijler 2 en pijler 3 kan enkel binnenvaart de Scheldebrug passeren.

Wat betreft het ontwerpschip voor de bepaling van de stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van scheepvaart worden volgende ontwerpschepen beschouwd:

1. Zeevaart

Het grootste schip uit de scheepvaartsimulaties in Eloot *et al.* (2019) wordt beschouwd. De scheepvaartsimulaties zijn uitgevoerd met de tankers Stolt Kimberley (176.8 m x 31.01 m x 10.80 m) en Rhone (175.0 m x 31.0 m x 10.80 m) en met een kleiner schip Kapitonas (110.0 m x 15.80 m x 5.23 m). Voor deze studie wordt de tanker Stolt Kimberley beschouwd met de twee diepgangen die ook in de scheepvaartsimulaties toegepast zijn, i.e. 10.8 m en 7.0 m. De karakteristieke afmetingen van het schip en de afmetingen en vermogens van hoofdschroef en boegschroef zijn opgevraagd bij de nautische collega's van WL.

2. Binnenvaart

Volgens www.binnenvaart.be is de Schelde ter hoogte van Antwerpen bevaarbaar voor schepen tot CEMT klasse VI. In overleg met de opdrachtgever wordt een duwkonvooi CEMT klasse VIb als maatgevend schip beschouwd. Daarnaast wordt ook een binnenvaartschip CEMT klasse VIa beschouwd. De afmetingen en vermogens van hoofdschroef en boegschroef voor het schip CEMT klasse VIa zijn overgenomen uit ten Hove (2010) en uit het maatgevend scheepvaartaanbod gebruikt bij het ontwerp van de Nieuwe Sluis Terneuzen (VNSC, 2015). Hierbij wordt opgemerkt dat voor de diepgang de 90% percentielwaarde uit ten Hove (2010) beschouwd is. De afmetingen en vermogens van hoofdschroef en boegschroef van het duwkonvooi CEMT klasse VIb zijn eveneens overgenomen uit het maatgevend scheepvaartaanbod gebruikt bij het ontwerp van de Nieuwe Sluis Terneuzen.

Tabel 3 geeft een overzicht van de karakteristieke afmetingen van de ontwerpschepen beschouwd voor de bepaling van de stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van scheepvaart.

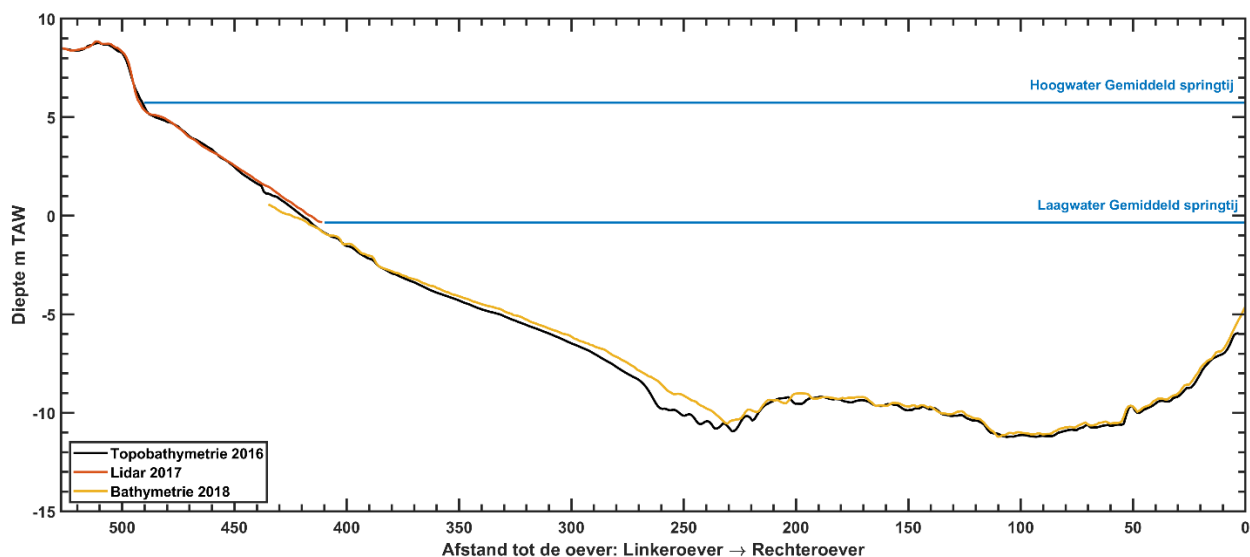
Tabel 3 – Ontwerpschepen bepaling stroomsnelheid aan bodem ten gevolge van scheepvaart

	Stolt Kimberley	Schip CEMT VIa	Duwkonvooi CEMT VIb	
			Duwboot	Duwbak
Lengte	176.8 m	135.0 m	40.0 m	76.0
Breedte	31.01 m	17.0 m	15.0 m	22.8
Diepgang	10.8 m/7.0 m	4.5 m	2.0 m	4.5
Blok-coëfficiënt	0.76	0.88	0.71	0.93
Aantal hoofdschroeven	1	2	3	n.v.t.
Diameter hoofdschroef	8.32 m	1.85 m	2.05 m	n.v.t.
Vermogen hoofdschroef	10000 kW	2650 KW	4140 kW	n.v.t.
Aantal boegschroeven	1	3	-	2
Diameter boegschroef	2.0 m	1.40 m	-	1.26 m
Vermogen boegschroef	1100 KW	1251 kW	-	881 kW

n.v.t. = niet van toepassing; - = boegschroef wordt niet beschouwd bij dimensionering.

Figuur 5 toont de bathymetrie ter plaatse van de Scheldebrug. Uit deze figuur volgt dat het bodempeil ter plaatse van de brug varieert tussen -11.00 mTAW en -9.00 mTAW. Voor de bepaling van de stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van scheepvaart worden de ontwerpbodempeilen ter plaatse van de drie pijlers uit de randvoorwaardennota SBE & Omgeving (2019) beschouwd, i.e. -12.5 mTAW voor pijler 1, -10.5 mTAW voor pijler 2 en -7.4 mTAW voor pijler 3.

Figuur 5 – Bathymetrie ter plaatse van de Scheldebrug



Voor de bepaling van de stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van scheepvaart wordt conservatief een waterpeil gelijk aan het gemiddeld laagwater bij springtij (-0.19 mTAW) beschouwd. Voor zeevaart is de maximale diepgang van 10.80 m in combinatie met deze waterstand niet mogelijk bij het ontwerpbodempeil -10.5 mTAW ter plaatse van pijler 2, rekening houdend met de minimale kielspeling van 10 % in dit gedeelte van de Zeeschelde. Om die reden is voor de bepaling van de hydraulische belasting op de bodem ten gevolge van zeevaart voor pijler 2 de maximale diepgang beschouwd, die bij dit laagwater met een kielspeling van 10 % kan voorkomen. Voor pijler 1 kan voor zeevaart wel de maximale diepgang van 10.80 mTAW beschouwd worden. Daarnaast wordt voor zeevaart ook een lagere diepgang van 7.0 m beschouwd. Voor binnenvaart wordt voor pijler 2 en pijler 3 de maximale diepgang van 4.5 m beschouwd.

Tabel 4 – Diepgang beschouwd voor bepaling hydraulische belasting op bodem ten gevolge van scheepvaart

	Stolt Kimberley				CEMT VI/ CEMT Vb	
	Pijler 1		Pijler 2		Pijler 2	Pijler 3
Bodempeil	-12.5 mTAW	-12.5 mTAW	-10.5 mTAW	-10.5 mTAW	-10.5 mTAW	-7.4 mTAW
Waterpeil	-0.19 mTAW	-0.19 mTAW	-0.19 mTAW	-0.19 mTAW	-0.19 mTAW	-0.19 mTAW
Waterdiepte	-12.31 m	-12.31 m	-10.31 m	-10.31 m	-10.31 m	-7.21 m
Diepgang	10.80 m	7.00 m	9.37 m	7.00 m	4.50 m	4.50 m

Vooreerst wordt de stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van retourstroming begroot (paragraaf 3.2.2), waarna de stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de hoofdschroef (paragraaf 3.2.3), respectievelijk de boegschroef (paragraaf 3.2.4) bepaald wordt.

3.2.2 Retourstroming ten gevolge van scheepvaart

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

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

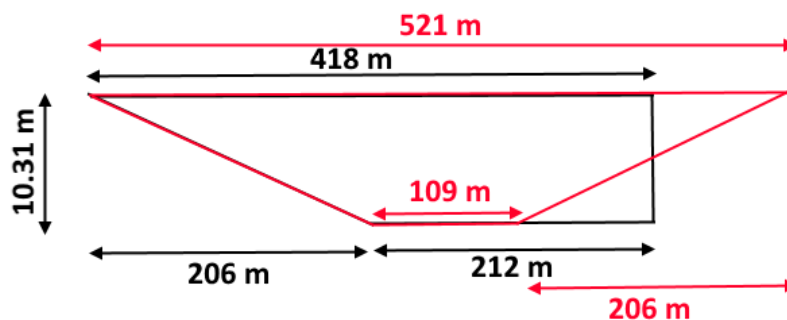
met:

-	V_L	Grenssnelheid	[m/s]
-	g	Valversnelling (=9.81 m/s ²)	[m/s ²]
-	h'	Imaginaire waterdiepte (= $\frac{A_c}{b_w}$)	[m]
-	A_c	Natte sectie waterweg	[m ²]
-	b_w	Breedte vaarweg aan waterlijn	[m]
-	A_m	Natte sectie schip	[m ²]

De vaarsnelheid van het schip (V_{schip}) is meestal gelijk aan 0.9 maal de grenssnelheid van het schip (Waterloopkundig Laboratorium, 1997). De natte sectie van het schip is berekend als de breedte van het schip vermenigvuldigd met de diepgang en de blok-coëfficiënt van het schip.

De formuleringen die in het programma DIPRO (Waterloopkundig Laboratorium, 1997) worden gebruikt om de waterspiegeldaling en de retourstroming van een varende schip te bepalen, zijn afgeleid voor een schip dat in het midden van een trapeziumvormig dwarsprofiel vaart. Voor andere types dwarsprofielen raadt de handleiding van het programma DIPRO aan om het dwarsprofiel te schematiseren als een trapeziumvormig dwarsprofiel met eenzelfde natte sectie (= 3207 m²) als het betreffende dwarsprofiel. Figuur 6 geeft een voorstelling van het dwarsprofiel ter plaatse van de Scheldebrug (in zwart) samen met het geschematiseerde dwarsprofiel (in rood).

Figuur 6 – Schematisering van het dwarsprofiel ter plaatse van de Scheldebrug (zwart) door een trapeziumvormig profiel (rood)



Tabel 5 geeft een overzicht van de berekening van de vaarsnelheid van het schip voor het geschematiseerde dwarsprofiel ter plaatse van de Scheldebrug. Uit de tabel volgt een vaarsnelheid tussen 4.6 m/s en 5.8 m/s op de Schelde ter plaatse van de Scheldebrug. Een vergelijking van deze berekende vaarsnelheid met de vaarsnelheden uit de nautische simulaties leert dat dit een realistische vaarsnelheid is.

Tabel 5 – Berekening vaarsnelheid schip

		Stolt Kimberley			CEMT VIa	CEMT VIb
Diepgang schip	T	10.80 m	9.37 m	7.00 m	4.50 m	4.50 m
Blok-coëfficiënt schip	C_b	0.76	0.76	0.76	0.88	0.93
Natte sectie schip	A_m	254.5 m ²	220.96 m ²	165.0 m ²	67.3 m ²	95.4 m ²
Natte sectie vaarweg	A_c	3207 m ²	3207 m ²	3207 m ²	3207 m ²	3207 m ²
Breedte vaarweg aan waterlijn	b_w	521 m	521 m	521 m	521 m	521 m
Imaginaire waterdiepte	h'	6.16 m	6.16 m	6.16 m	6.16 m	6.16 m
Grenssnelheid	v_l	5.15 m/s	5.33 m/s	5.64 m/s	6.39 m/s	6.14 m/s
Vaarsnelheid (= 0.9 x v_g)	V_{schip}	4.6 m/s	4.8 m/s	5.1 m/s	5.8 m/s	5.5 m/s

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

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

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

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

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

met:

- Δh	Waterspiegeldaling naast schip	[m]
- V_{Schip}	Vaarsnelheid van het schip	[m/s]
- A_w	Parameter	[m ²]
- g	Valversnelling (=9.81 m/s ²)	[m/s ²]
- A_c	Natte sectie waterweg (= 3207 m ²)	[m ²]
- α_s	Correctiefactor	[-]
- V_L	Grenssnelheid	[m/s]
- b_b	Bodembreedte profiel	[m]
- h	Waterdiepte	[m]
- m	Taludhelling van het trapeziumvormig profiel	[-]
- A_m	Natte sectie schip	[m ²]
- u_r	Retourstroomsnelheid	[m/s]

Aan de hand van bovenstaande formuleringen en het geschematiseerde dwarsprofiel wordt in Tabel 6 de retourstroomsnelheid van het schip berekend. Op deze wijze wordt een retourstroomsnelheid van 0.36 m/s à 0.65 m/s berekend. Bij de berekening van de waterspiegeldaling aan de hand van de methode van Schijf wordt vastgesteld dat voor het schip Stolt Kimberley met een diepgang van 10.80 m een onrealistische negatieve waterspiegeldaling berekend wordt. Hier is geen verklaring voor gevonden.

Voor de turbulentie-intensiteit vermeldt "Ontwerp van Schutsluizen" (Beem *et al.*, 2000) de waarde $r = 0.25$.

Tabel 6 – Berekening retourstroomsnelheid schip

		Stolt Kimberley			CEMT VIa	CEMT VIb
Diepgang schip	T	10.80 m	9.37 m	7.00 m	4.50 m	4.50 m
Natte sectie schip	A _m	254.5 m ²	220.96 m ²	165.0 m ²	67.3 m ²	95.4 m ²
Natte sectie vaarweg	A _c	3207 m ²	3207 m ²	3207 m ²	3207 m ²	3207 m ²
Bodembreedte profiel	b _b	109 m	109 m	109 m	109 m	109 m
Waterdiepte	h	12.31 m	10.31 m	10.31 m	10.31 m	10.31 m
Grenssnelheid	V _I	5.15 m/s	5.33 m/s	5.64 m/s	6.39 m/s	6.14 m/s
Vaarsnelheid schip	V _{schip}	4.63 m/s	4.80 m/s	5.07 m/s	5.75 m/s	5.52 m/s
Taludhelling	m	20	20	20	20	20
Correctiefactor	α _s	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04
Parameter	A _w	4420.5 m ²	2822.9 m ²	2903.5 m ²	3056.0 m ²	3008.6 m ²
Waterspiegeldaling	Δh	*	0.40 m	0.35 m	0.25 m	0.28 m
Retourstroomsnelheid	u _r	*	0.65 m/s	0.53 m/s	0.28 m/s	0.36 m/s

* = Berekening van de waterspiegeldaling volgens de methode van Schijf geeft onrealistische negatieve resultaten voor de berekende waterspiegeldaling.

3.2.3 Stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de hoofdschroef

De stroomsnelheid juist achter een schroef wordt, volgens de formuleringen in “Ontwerp van schutsluizen” (Beem *et al.*, 2000) en de Rock Manual (CIRIA; CUR, 2007), gegeven door volgende formule:

$$u_p = 1.15 \left(\frac{P_{schroef}}{\rho_w D_0^2} \right)^{1/3}$$

met:

- u_p Stroomsnelheid achter de schroef [m/s]
 - P_{schroef} Vermogen geleverd door de schroef [W]
 - ρ_w Dichtheid water [kg/m³]
 - D₀ 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]
- D₀ Effectieve diameter van de schroef [m]
- n Aantal schroeven [-]

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

- Voor de tanker en het schip CEMT klasse VIa wordt een schroef zonder straalbuis beschouwd. Bijgevolg is de effectieve diameter gelijk aan 0.70 maal de echte diameter van de schroef. Voor de duwboot wordt een combinatie schroef/straalbuis beschouwd. Bijgevolg is de effectieve diameter van de hoofdschroef van de duwboot gelijk aan 0.85 maal de echte diameter van de schroef.
- Uit Tabel 3 volgt voor de tanker een totaal geïnstalleerd vermogen van 10000 kW en aanwezigheid van één hoofdschroef, voor het schip CEMT klasse VIa een totaal geïnstalleerd vermogen van 2650 kW en aanwezigheid van 2 hoofdschroeven en voor de duwboot een totaal geïnstalleerd vermogen van 4140 kW en aanwezigheid van 3 hoofdschroeven. 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 meerdere schroeven wordt voor elke schroef het totaal geïnstalleerd vermogen gedeeld door het aantal aanwezige schroeven. Voor de bepaling van de hydraulische belasting op de bodem wordt voor elke beschouwde schroef het toepassen van 100 % van het op deze wijze voor deze schroef berekende vermogen beschouwd.

Voor de tanker Stolt Kimberley geeft Tabel 7 de resultaten van de berekening van de maximale stroomsnelheid boven de bodem ten gevolge van de hoofdschroef bij de bodempeilen -12.5 mTAW en -10.5 mTAW. Bij bodempeil -12.5 m TAW is zowel een diepgang 10.80 m als de diepgang 7.00 m beschouwd, bij bodempeil -10.5 mTAW zijn de diepgangen 9.37 m en 7.00 m beschouwd. Voor de schepen CEMT VIa en CEMT VIb zijn de resultaten van de berekening van de maximale stroomsnelheid boven de bodem ten gevolge van de hoofdschroef bij bodempeilen -10.5 mTAW en -7.4 mTAW en de maximale diepgang 4.50 m gegeven in Tabel 8.

Voor de turbulentie-intensiteit vermeldt “Ontwerp van Schutsluizen” (Beem *et al.*, 2000) de waarde $r = 0.40$.

Tabel 7 – Resultaten berekening maximale stroomsnelheid boven bodem ten gevolge van de hoofdschroef van de tanker Stolt Kimberley

Parameter	Symbool	Eenheid	Bodempeil			
			-12.5 mTAW		-10.5 mTAW	
Waterpeil	H	mTAW	-0.19	-0.19	-0.19	-0.19
Bodempeil	Z	mTAW	-12.5	-12.5	-10.5	-10.5
Waterdiepte	h	m	12.31	12.31	10.31	10.31
Diepgang	T	m	10.80	7.00	9.37	7.00
Echte schroefdiameter	D_p	m	8.32	8.32	8.32	8.32
Effectieve schroefdiameter	D_o	m	5.82	5.82	5.82	5.82
Motorvermogen		kW	10000	10000	10000	10000
Aantal schroeven	n	-	1	1	1	1
% aangewend vermogen		%	100	100	100	100
Aangewend vermogen per schroef	P_d	kW	10000	10000	10000	10000
Stroomsnelheid achter schroef	u_p	m/s	7.65	7.65	7.65	7.65
Verticale afstand straalas tot bodem	d_p	m	5.67	9.47	5.10	7.47
Horizontale afstand tot maximale snelheid boven bodem	x_{bp}	m	31.8	53.0	28.6	41.8
Maximale waarde stroomsnelheid boven de bodem	u_{bp}	m/s	2.36	1.41	2.62	1.79
$U_{bp} < U_p$	-	-	Ja	Ja	Ja	Ja

Tabel 8 – Resultaten berekening maximale stroomsnelheid boven bodem ten gevolge van de hoofdschroef van het schip CEMT klasse VIa en het duwkonvooi CEMT VIb

Parameter	Symbool	Eenheid	CEMT VIa	CEMT VIb
-----------	---------	---------	----------	----------

Waterpeil	H	mTAW	-0.19	-0.19	-0.19	-0.19
Bodempeil	Z	mTAW	-10.5	-7.4	-10.5	-7.4
Waterdiepte	h	m	10.31	7.21	10.31	7.21
Diepgang	T	m	4.50	4.50	4.50	4.50
Echte schroefdiameter	D_p	m	1.85	1.85	2.05	2.05
Effectieve schroefdiameter	D_0	m	1.30	1.74	1.30	1.74
Totaal geïnstalleerd motorvermogen		kW	2650	2650	4140	4140
Aantal schroeven	n	-	2	2	3	3
% aangewend vermogen		%	100	100	100	100
Aangewend vermogen per schroef	P_d	kW	1325	1325	1380	1380
Stroomsnelheid achter schroef	u_p	m/s	10.63	10.63	8.84	8.84
Verticale afstand straalas tot bodem	d_p	m	6.74	3.64	9.34	6.24
Horizontale afstand tot maximale snelheid boven bodem	x_{bp}	m	37.7	20.4	52.3	34.5
Maximale waarde stroomsnelheid boven de bodem	u_{bp}	m/s	0.87	1.61	0.86	1.28
$u_{bp} < u_p$	-	-	Ja	Ja	Ja	Ja

3.2.4 Stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de boegschroef

Tijdens de nautische simulaties werd de boegschroef van het schip niet gebruikt (Eloot *et al.*, 2019). Voor de dimensionering van de bodembescherming wordt de stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de boegschroef wel in rekening gebracht, in de veronderstelling dat de boegschroef gebruikt wordt om (last-minute) bij te sturen indien een schip te veel in de richting van de pijlers van de brug vaart. Uit persoonlijke communicatie met de nautische collega's van WL blijkt dat loodsen zich onveilig beginnen voelen als een schip ca. 10.0 m verwijderd is van de brugpijler. Deze afstand wordt dan ook beschouwd als minimale afstand voor het bepalen van de stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de boegschroef.

Bij gebruik van de boegschroef worden volgende twee toestanden onderscheiden:

- Gebruik van een boegschroef in open water (juist voor of na de brugpijler).
- Gebruik van een boegschroef tegen een verticale wand, in dit geval de pijler van de brug.

Voor het bepalen van de stroomsnelheid aan de bodem in deze twee toestanden wordt eerst de stroomsnelheid van de uittredende straal van de boegschroef berekend. Hiervoor wordt, volgens de formuleringen in "Ontwerp van Schutsluizen" (Beem *et al.*, 2000), volgende formule toegepast:

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

met:

-	v_p	Stroomsnelheid uittredende straal	[m/s]
-	P_d	Aangewend vermogen	[kW]
-	D_0	Effectieve diameter van de schroef (= D_p)	[m]
-	D_p	Echte diameter van de schroef	[m]
-	ζ	Energieverlies-factor (= 0.9 voor kanalsystemen met uitstroming langs de zijkant)	[-]

Hierbij wordt het volgende opgemerkt:

- De formuleringen uit “Ontwerp van Schutsluizen” (Beem *et al.*, 2000) betreffen enkel boegschroeven met een kanalsysteem met uitstroming langs de zijkant van het schip. Systemen met een uitstroming gericht naar de bodem, zoals pumpjets 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 in open water doet zich een vrije onbegrensde stroming voor. De stroomsnelheid aan de bodem voor dit type stroming wordt berekend aan de hand van dezelfde formuleringen als voor de stroming van de hoofdschroef (zie ook paragraaf 3.2.3):

$$x_{bp} = 5.6 d_p$$

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

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 schroeven	[-]

Aan de hand van deze formuleringen wordt de berekening van de maximale stroomsnelheid boven de bodem ten gevolge van de boegschroef in open water uitgevoerd voor de tanker Stolt Kimberley met diepgang 10.80 m en 7.00 m bij het bodempeil -12.50 mTAW en met diepgang 9.37 m en 7.00 m bij het bodempeil -10.50 mTAW. Voor het schip CEMT klasse VIa en het duwkonvooi CEMT klasse VIb wordt de bepaling van de maximale stroomsnelheid boven de bodem ten gevolge van de boegschroef in open water uitgevoerd voor een bodempeil -10.50 mTAW en het bodempeil -7.40 mTAW en de maximale diepgang 4.50 m. De resultaten van deze berekeningen zijn gegeven in Tabel 9 (tanker Stolt Kimberley) en Tabel 10 (schip CEMT VI en duwkonvooi CEMT VIb).

Tabel 9 – Resultaten berekening maximale stroomsnelheid boven bodem ten gevolge van de boegschroef in open water voor de tanker Stolt Kimberley

Parameter	Symbool	Eenheid	Bodempeil			
			-12.5 mTAW		-10.5 mTAW	
Waterpeil	H	mTAW	-0.19	-0.19	-0.19	-0.19
Bodempeil	Z	mTAW	-12.5	-12.5	-10.5	-10.5
Waterdiepte	h	m	12.31	12.31	10.31	10.31
Diepgang	T	m	10.80	7.00	9.37	7.00
Echte schroefdiameter	D_p	m	2.00	2.00	2.00	2.00
Effectieve schroefdiameter	D_0	m	2.00	2.00	2.00	2.00
Motorvermogen		kW	1100	1100	1100	1100
Aantal schroeven	n	-	1	1	1	1
% aangewend vermogen		%	100	100	100	100
Aangewend vermogen per schroef	P_d	kW	1100	1100	1100	1100
Stroomsnelheid achter schroef	u_p	m/s	6.73	6.73	6.73	6.73
Verticale afstand straalas tot bodem	d_p	m	2.51	6.31	1.94	4.31
Horizontale afstand tot maximale snelheid boven bodem	x_{bp}	m/s	14.1	35.3	10.9	24.1
Maximale waarde stroomsnelheid boven de bodem	u_{bp}	m/s	1.61	0.64	2.08	0.94
$u_{bp} < u_p$	-	-	Ja	Ja	Ja	Ja

Tabel 10 – Resultaten berekening maximale stroomsnelheid boven bodem ten gevolge van de boegschroef in open water voor schip CEMT klasse VIa en duwkonvooi CEMT klasse VIb

Parameter	Symbool	Eenheid	CEMT VIa		CEMT VIb	
Waterpeil	H	mTAW	-0.19	-0.19	-0.19	-0.19
Bodempeil	Z	mTAW	-10.5	-7.4	-10.5	-7.4
Waterdiepte	h	m	10.31	7.21	10.31	7.21
Diepgang	T	m	4.50	4.50	4.50	4.50
Echte schroefdiameter	D_p	m	1.40	1.40	1.40	1.40
Effectieve schroefdiameter	D_0	m	1.40	1.40	1.40	1.40
Motorvermogen		kW	1251	1251	881	881
Aantal schroeven	n	-	3	3	2	2
% aangewend vermogen		%	100	100	100	100
Aangewend vermogen per schroef	P_d	kW	417	417	441	441
Stroomsnelheid achter schroef	u_p	m/s	6.18	6.18	6.75	6.75
Verticale afstand straalas tot bodem	d_p	m	6.51	3.41	6.44	3.34
Horizontale afstand tot maximale snelheid boven bodem	x_{bp}	m/s	36.5	19.1	36.1	18.7
Maximale waarde stroomsnelheid boven de bodem	u_{bp}	m/s	0.69	1.32	0.56	1.08
$u_{bp} < u_p$	-	-	Ja	Ja	Ja	Ja

Bij gebruik van de boegschroef tegen de brugpijler, doet zich een stroming voor die gehinderd wordt door de brugpijler. Voor de begroting van de stroomsnelheid aan de bodem in deze toestand worden de formuleringen uit “Ontwerp van Schutsluizen” (Beem *et al.*, 2000) voor verticale oevers toegepast. Hierbij wordt tussen schip en kaaimuur een afstand van 10 m beschouwd. De maximale stroomsnelheid aan de bodem doet zich voor in de hoek tussen de brugpijler en de bodem. Deze wordt 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	[m]
-	d_p	Verticale afstand van de as van de schroef tot de bodem	[m]
-	y_{bp}	Horizontale afstand tussen zijkant schip en oever (= 10 m)	[m/s]

Aan de hand van deze formuleringen wordt de berekening van de maximale stroomsnelheid boven de bodem ten gevolge van de boegschroef tegen de brugpijler uitgevoerd voor de tanker Stolt Kimberley met diepgang 10.80 m en 7.00 m bij het bodempeil -12.5 mTAW en met diepgang 9.37 m en 7.00 m bij het bodempeil -10.5 mTAW. Voor het schip CEMT klasse VIa en het duwkonvooi CEMT klasse VIb wordt de bepaling van de maximale stroomsnelheid boven de bodem ten gevolge van de boegschroef tegen de brugpijler uitgevoerd voor een bodempeil -10.5 mTAW en het bodempeil -7.4 mTAW en de maximale diepgang 4.50 m. De resultaten van deze berekeningen zijn gegeven in Tabel 19 (Stolt Kimberley bij bodempeil -12.5 mTAW), Tabel 20 (Stolt Kimberley bij bodempeil -10.5 mTAW), Tabel 21 (schip CEMT Klasse VIa) en Tabel 22 (schip CEMT Klasse VIb) in Bijlage 1. Tabel 11 geeft een overzicht van de maximale waarde van de berekende stroomsnelheid boven de bodem bij gebruik van de boegschroef tegen de brugpijler. Voor de turbulentie-intensiteit vermeldt “Ontwerp van Schutsluizen” (Beem *et al.*, 2000) de waarde $r = 0.35$.

Tabel 11 – Overzicht maximale waarde van de stroomsnelheid boven de bodem bij gebruik van de boegschroef tegen de brugpijler

Bodempeil	Schip	Diepgang	Stroomsnelheid	Turbulentie-intensiteit r
-12.5 mTAW	Stolt Kimberley	10.80 m	3.01 m/s	0.35
		7.00 m	2.13 m/s	0.35
-10.5 mTAW	Stolt Kimberley	9.37 m	3.16 m/s	0.35
		7.00 m	2.63 m/s	0.35
	CEMT VIa	4.50 m	2.30 m/s	0.35
	CEMT VIb	4.50 m	2.87 m/s	0.35
-7.4 mTAW	CEMT VIa	4.50 m	3.13 m/s	0.35
	CEMT VIb	4.50 m	2.52 m/s	0.35

De in Tabel 11 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	[m]
-	d_p	Verticale afstand van de as van de schroef tot de bodem	[m]
-	x_{bp}	Afstand tussen punt en de verticale wand	[m/s]
-	n	Aantal boegschroeven	[-]

Voor tanker Stolt Kimberley is het verloop van de stroomsnelheid in functie van de afstand tot de pijler gegeven in Figuur 7 en voor het schip CEMT klasse VIa en het duwkonvooi CEMT klasse VIb in Figuur 8.

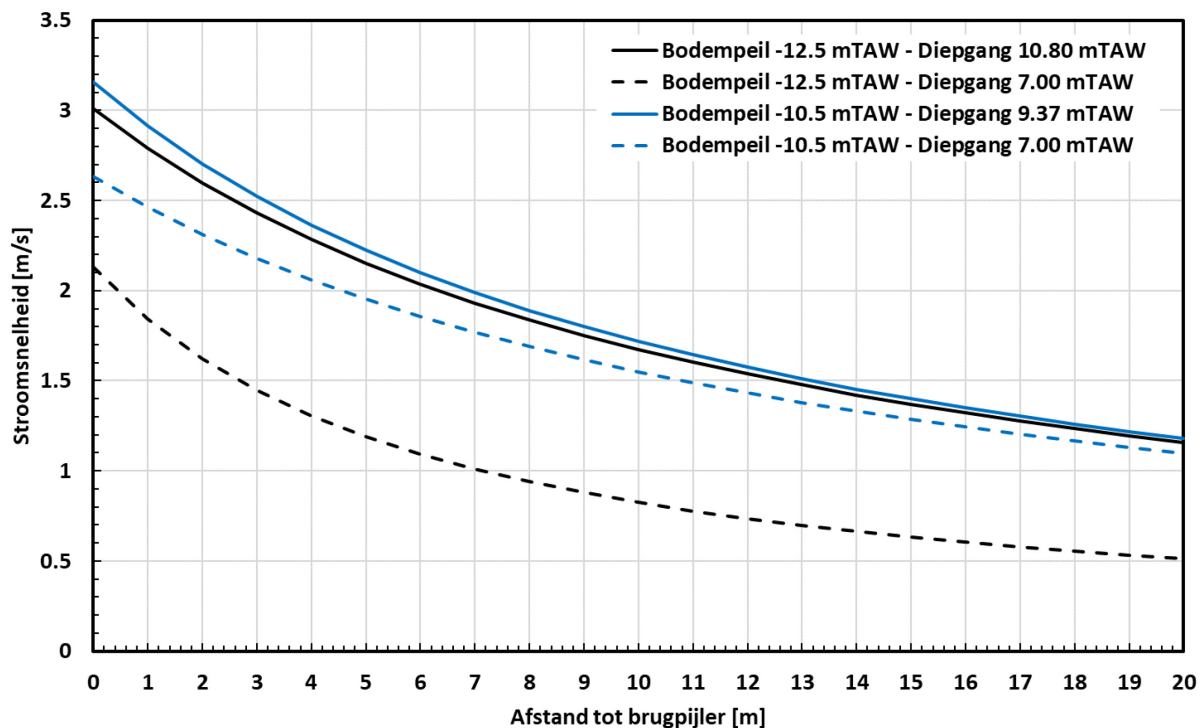
Op basis van Figuur 7 en Figuur 8 worden de afstanden bepaald waarvoor de stroomsnelheid bij gebruik van de boegschroef tegen de pijler kleiner is dan stroomsnelheid bij gebruik van boegschroef in open water en kleiner is dan de stroomsnelheid bij gebruik van hoofdschroef. De resultaten hiervan zijn gegeven in Tabel 12.

Tabel 12 – Afstanden waarvoor stroomsnelheid bij gebruik van boegschroef tegen pijler kleiner is dan de stroomsnelheid bij gebruik van boegschroef in open water en stroomsnelheid bij gebruik van hoofdschroef

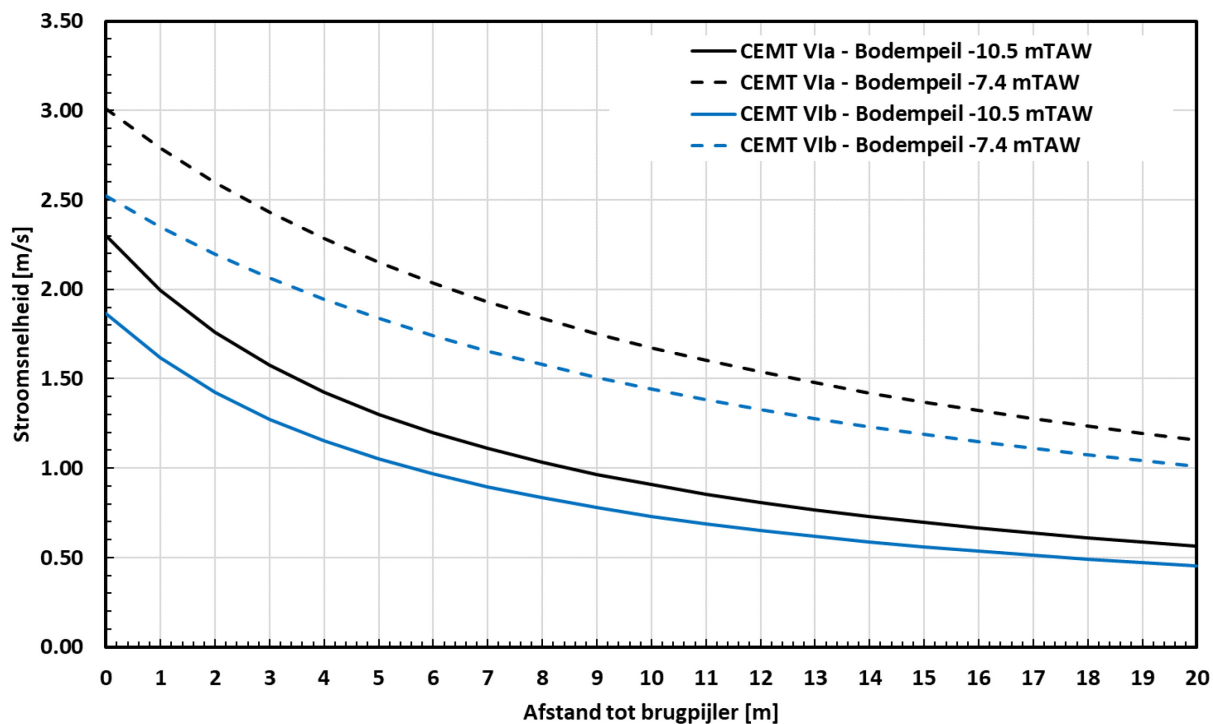
Bodempeil	Schip	Diepgang	Stroomsnelheid boegschroef tegen pijler < stroomsnelheid boegschroef vrije uitstroming	Stroomsnelheid boegschroef tegen pijler < stroomsnelheid hoofdschroef
-12.50	Stolt Kimberley	10.80 m	> 12 m	> 4.0 m
		7.00 m	> 14 m	> 3.4 m
-10.50	Stolt Kimberley	9.37 m	> 6.4 m	> 3.8 m
		7.00 m	*	> 7.0 m
	CEMT VIa	4.50 m	> 16 m	> 12.5 m
	CEMT VIb	4.50 m	> 15 m	> 9 m
-7.40	CEMT VIa	4.50 m	> 17 m	> 11.5 m
	CEMT VIb	4.50 m	> 18 m	> 12.5 m

* = afstand groter dan 20.0 m waarvoor berekeningen zijn uitgevoerd.

Figuur 7 – Variatie van de stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de boegschroef tegen een verticale wand in functie van de afstand tot de verticale wand voor de tanker Stolt Kimberley



Figuur 8 – Variatie van de stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de boegschroef tegen een verticale wand in functie van de afstand tot de verticale wand voor het schip CEMT Vla en het duwkonvooi CEMT Vlb



3.3 Samenvatting

Tabel 13 geeft voor de drie pijlers van de fietsersbrug een samenvatting van de in paragraaf 3.1 en paragraaf 3.2 berekende hydraulische belasting op de bodem. In de tabel wordt ook voor elk type hydraulische belasting ook het type stroming aangeduid.

Tabel 13 – Samenvatting hydraulische belastingen op de bodem voor dimensionering bodembescherming

Hydraulische belasting	Type stroming		Pijler 1	Pijler 2	Pijler 3
Getijstroming Schelde	Dieptegemiddelde stroming	Vloed	3.1 m/s	3.1 m/s	3.1 m/s
			2.5 m/s	2.5 m/s	2.5 m/s
		eb	2.7 m/s	2.7 m/s	2.7 m/s
			2.5 m/s	2.5 m/s	2.5 m/s
Retourstroming scheepvaart	Stroomsnelheid aan bodem	Stolt Kimberley diepgang 10.80 m	*	*	*
		Stolt Kimberley diepgang 9.37 m	0.65 m/s	0.65 m/s	0.65 m/s
		Stolt Kimberley diepgang 7.00 m	0.53 m/s	0.53 m/s	0.53 m/s
		CEMT VIa	0.28 m/s	0.28 m/s	0.28 m/s
		CEMT VIb	0.36 m/s	0.36 m/s	0.36 m/s
Stroomsnelheid aan bodem t.g.v. hoofdschroef	Stroomsnelheid aan bodem	Stolt Kimberley diepgang 10.80 m	2.36 m/s	n.v.t.	n.v.t.
		Stolt Kimberley diepgang 9.37 m	-	2.62 m/s	n.v.t.
		Stolt Kimberley diepgang 7.00 m	1.41 m/s	1.79 m/s	n.v.t.
		CEMT VIa	-	0.87 m/s	1.61 m/s
		CEMT VIb	-	0.86 m/s	1.28 m/s
Stroomsnelheid aan bodem t.g.v. boegschroef in open water	Stroomsnelheid aan bodem	Stolt Kimberley diepgang 10.80 m	1.61 m/s	n.v.t.	n.v.t.
		Stolt Kimberley diepgang 9.37 m	-	2.08 m/s	n.v.t.
		Stolt Kimberley diepgang 7.00 m	0.64 m/s	0.99 m/s	n.v.t.
		CEMT VIa	-	0.69 m/s	1.32 m/s
		CEMT VIb	-	0.56 m/s	1.08 m/s
Stroomsnelheid aan bodem t.g.v. boegschroef tegen pijler	Stroomsnelheid aan bodem	Stolt Kimberley diepgang 10.80 m	3.01 m/s	n.v.t.	n.v.t.
		Stolt Kimberley diepgang 9.37 m		3.16 m/s	n.v.t.
		Stolt Kimberley diepgang 7.00 m	2.31 m/s	2.63 m/s	n.v.t.
		CEMT VIa	-	2.30 m/s	3.13 m/s
		CEMT VIb	-	2.87 m/s	2.50 m/s

n.v.t. = niet van toepassing; * = onrealistische resultaten voor deze diepgang; - = berekening niet uitgevoerd.

4 Conceptontwerp bodembescherming brugpijlers Scheldebrug

4.1 Algemeen

Dit hoofdstuk beschrijft het conceptontwerp van de bodembescherming voor de brugpijlers van Scheldebrug. In hoofdstuk 3 is de hydraulische belasting op de bodem bepaald ter plaatse van de brugpijlers van de Scheldebrug. Het conceptontwerp van de bodembescherming wordt uitgevoerd voor de maatgevende waarden van elk type hydraulische belasting op de bodem. Tabel 14 geeft voor elke pijler en voor elk type hydraulische belasting een overzicht van deze maatgevende waarden. Bij deze tabel wordt opgemerkt dat voor getijstroming in de Schelde bij vloed, zowel de waarde 3.1 m/s als de lagere waarde 2.5 m/s wordt beschouwd en bij eb zowel de waarde 2.7 m/s als de waarde 2.5 m/s. De beide waarden worden beschouwd om na te gaan wat het verschil is in bodembescherming bij toepassing van enerzijds de stroomsnelheid van 2.5 m/s uit het Sigmaplan en anderzijds de waarde ingeschat op basis van gemiddeld springtij op de Schelde. Voor pijler 2 worden voor stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van hoofdschroef en boegschroef twee waarden vermeld, aangezien aan beide zijden van de pijler andere combinaties van schepen maatgevend zijn (Stolt Kimberley met diepgang 9.37 m aan ene zijde van de pijler en schip CEMT VIa en duwkonvooi CEMT VIb aan de andere zijde van de pijler).

Tabel 14 – Maatgevende waarden hydraulische belastingen op de bodem voor dimensionering bodembescherming

Hydraulische belasting	Type stroming	Maatgevende combinatie	Pijler 1	Pijler 2	Pijler 3
Getijstroming Schelde	Dieptegemiddelde stroming	Vloed	3.1 m/s	3.1 m/s	3.1 m/s
			2.5 m/s	2.5 m/s	2.5 m/s
		eb	2.7 m/s	2.7 m/s	2.7 m/s
			2.5 m/s	2.5 m/s	2.5 m/s
Retourstroming scheepvaart	Stroomsnelheid aan bodem	Stolt Kimberley diepgang 9.37 m	0.65 m/s	0.65 m/s	0.65 m/s
Stroomsnelheid aan bodem t.g.v. hoofdschroef	Stroomsnelheid aan bodem	Pijler 1: Stolt Kimberley diepgang 10.80 m Pijler 2: Stolt Kimberley diepgang 9.37 m Pijler 2: CEMT VIa Pijler 3: CEMT VIa	2.36 m/s	2.62 m/s 0.87 m/s	1.61 m/s
Stroomsnelheid aan bodem t.g.v. boegschroef in open water	Stroomsnelheid aan bodem	Pijler 1: Stolt Kimberley diepgang 10.80 m Pijler 2: Stolt Kimberley diepgang 9.37 m Pijler 2: CEMT VIa Pijler 3: CEMT VIa	1.61 m/s	2.08 m/s 0.69 m/s	1.32 m/s
Stroomsnelheid aan bodem t.g.v. boegschroef tegen pijler	Stroomsnelheid aan bodem	Pijler 1: Stolt Kimberley diepgang 10.80 m Pijler 2: Stolt Kimberley diepgang 9.37 m Pijler 2: CEMT VIb Pijler 3: CEMT VIb	3.01 m/s	3.16 m/s 2.87 m/s	3.13 m/s

Bij Tabel 14 wordt opgemerkt dat Hoffmans & Verheij (1997) vermelden dat voor het ontwerp van een bodembescherming uit breuksteen tweemaal de stroomsnelheid bij afwezigheid van de brugpijlers moet toegepast worden. Anderzijds vermeldt National Highway Institute (2009) dat de stroomsnelheid in de onmiddellijke omgeving van een brugpijler door de contractie groter is dan de berekende dieptegemiddelde stroomsnelheid. Voor ontwerp wordt aanbevolen om de sectiegemiddelde stroomsnelheid te vermenigvuldigen met een vormfactor K_1 (= 1.5 voor een afgeronde vorm of 1.7 voor een rechthoekige vorm). De vermenigvuldigingsfactoren uit deze beide publicaties worden voor deze studie niet toegepast, omdat het gebruik van de sectiegemiddelde stroomsnelheid van 2.5 m/s reeds een conservatieve benadering is. Hierbij nog eens een vermenigvuldigingsfactor toepassen voor de vorm van de pijler, zou onrealistisch hoge stroomsnelheden geven.

De opdrachtgever heeft gevraagd om na te gaan hoe groot de erosie zou zijn indien geen bodembescherming zou aangebracht worden naast de brugpijlers. Aan de hand van een aantal literatuurformules wordt in paragraaf 4.2 getracht de grootte van de erosiekuil rond de brugpijlers in te schatten.

De methodologie voor de bepaling van de bodembescherming naast de brugpijlers wordt beschreven in paragraaf 4.3. Paragraaf 4.4 beschrijft de resultaten van de dimensionering van de bodembescherming. Daarna wordt in paragraaf 4.5 nagegaan welke bodembescherming aanwezig is rond de brugpijlers van de brug over de Schelde te Temse en wordt deze vergeleken met de in dit rapport berekende bodembescherming.

4.2 Inschatting erosiekuil ter plaatse van brugpijlers bij afwezigheid bodembescherming

In deze paragraaf wordt getracht een inschatting te maken van de erosiekuil die ontstaat ter plaatse van een brugpijler bij afwezigheid van een bodembescherming. Hierbij dient vooreerst opgemerkt te worden dat de formuleringen in de literatuur met betrekking tot de evenwichtsdiepte van een erosiekuil afwaarts van een pijler afgeleid zijn op basis van onderzoek in stroomgoten, waarbij zich slechts stroming in één richting voordoet, en gebruikmakend van niet-cohesief bodemmateriaal. De Schelde is echter onderhevig aan getij waarbij de stroomrichting twee maal per dag wijzigt. Op de locatie van de Scheldebrug is zowel harde bodem (rechteroever), als zand en zandhoudend slib (linkeroever) aanwezig (De Maerschallck *et al.*, 2019). Mogelijk kunnen deze formuleringen niet toegepast worden om de grootte van een erosiekuil rond de brugpijler in te schatten. Daarnaast zijn deze formuleringen meestal ook afgeleid voor cirkelvormige pijlers in een stroming, waarbij een aantal correctiefactoren beschouwd worden om de vorm van de pijler in rekening te brengen.

Door Breusers *et al.* (1977) is een “state of the art” rapport opgemaakt met met betrekking tot lokale erosie rond brugpijlers. Dit rapport is opgemaakt voor cilindrische pijlers in niet-cohesief bodemmateriaal en in stroming met één richting (in afwezigheid van getij en golven). Aan de hand van data van verschillende auteurs vermelden Breusers *et al.* (1977) de volgende formulering voor de grootte van een erosiekuil afwaarts van een brugpijler:

$$\frac{d_s}{b} = \left[2.0 \tanh \frac{d_0}{b} \right] K_S K_\omega K_{gr}$$

Met:

-	d_s	Diepte erosiekuil afwaarts van een pijler	[m]
-	b	Breedte pijler	[m]
-	h_0	Waterdiepte	[m]
-	K_S	Correctiefactor voor de vorm van de pijler $K_1 = 1.00$ voor cirkelvormige pijlers $K_1 = 0.75$ voor gestroomlijnde vormen $K_1 = 1.01$ voor rechthoekige pijlers met afgeschuinde hoeken $K_1 = 1.30$ voor rechthoekige pijlers	[-]
-	K_ω	Correctiefactor voor de hoek van de stroming met de pijler (= 1.0)	[-]
-	K_{gr}	Correctiefactor voor een groep pijlers	[-]

Figuur 9 – Waarde coëfficiënt K_{gr} voor een groep van 2 pijlers (Hoffmans & Verheij, 1997)

Table 6.5. The factor K_{gr} for a group of 2 circular piers.

		Pier spacing	Front pier K_{gr}	Rear pier K_{gr}
→	○ ○	$1b$	1.0	0.9
		2 to $3b$	1.15	0.9
		$>15b$	1.0	0.8
→	○	$1b$	1.9	1.9
		$5b$	1.15	1.2
	○	$>8b$	1.0	1.0
→	○	$1b$	1.9	1.9
		2 to $3b$	1.2	1.2
	○	$>8b$	1.0	1.0

Johnson P.A. (1992) vermeldt volgende formulering, afgeleid door de Colorado State University (CSU), voor het bepalen van de diepte van de erosiekuil:

$$\frac{d_s}{h_0} = 2.0 K_S K_\omega \left(\frac{b}{h_0}\right)^{0.65} Fr^{0.43}$$

Met:

- d_s Diepte erosiekuil afwaarts van een pijler [m]
- b Breedte pijler [m]
- h_0 Waterdiepte [m]
- K_S Correctiefactor voor de vorm van de pijler [-]
 $K_1 = 1.00$ voor cirkelvormige pijlers
 $K_1 = 0.75$ voor gestroomlijnde vormen
 $K_1 = 1.01$ voor rechthoekige pijlers met afgeschuinde hoeken
 $K_1 = 1.30$ voor rechthoekige pijlers
- K_ω Correctiefactor voor de hoek van de stroming met de pijler (= 1.0) [-]
- Fr_1 Froudegetal van de stroming ter plaatse van de pijler [-]
 $Fr_1 = \frac{V}{\sqrt{9.81 h_0}}$
- V Stroomsnelheid juist opwaarts van de pijler [m/s]

Arneson *et al.* (2012) vermeldt de HEC-18 formulering voor de erosie ter plaatse van een pijler. Deze formulering is gebaseerd op de CSU-formulering.

$$\frac{d_s}{h_0} = 2.0 K_S K_\omega K_b \left(\frac{b}{h_0}\right)^{0.35} Fr^{0.43}$$

Met:

- d_s Diepte erosiekuil afwaarts van een pijler [m]
- b Breedte pijler [m]
- h_0 Waterdiepte [m]
- K_S Correctiefactor voor de vorm van de pijler [-]
 $K_1 = 1.0$ voor cirkelvormige pijlers, pijlers met afgeronde punt
 $K_1 = 1.1$ voor rechthoekige pijlers
 $K_1 = 0.9$ voor pijlers met een scherpe punt
- K_ω Correctiefactor voor de hoek van de stroming met de pijler (= 1.0) [-]
- K_b Correctiefactor voor de toestand van de bodem ter plaatse van de pijler [-]
 $K_b = 1.1$ voor erosie in zuiver water
 $K_b = 1.1$ voor vlak bed, bodem met antidunnen en kleine duinen
 $K_b = 1.2-1.1$ voor bodem met gemiddelde duinen
 $K_b = 1.3$ voor bodem met grote duinen
- Fr_1 Froudegetal van de stroming ter plaatse van de pijler [-]
 $Fr_1 = \frac{V}{\sqrt{9.81 h_0}}$
- V Stroomsnelheid juist opwaarts van de pijler [m/s]

Schiereck (2003) vermeldt volgende formulering voor de erosie ter plaatse van een pijler:

$$\frac{d_s}{D} = 2.0 K_S K_\omega \left(\frac{h_0}{D}\right)$$

Met:

- d_s Diepte erosiekuil afwaarts van een pijler [m]
- D Diameter van de pijler [m]

- h_0 Waterdiepte [m]
- K_S Correctiefactor voor de vorm van de pijler [-]
 $K_1 = 1.00$ voor cilindervormige pijlers
 $K_1 = 1.20$ voor rechthoekige pijlers met $L/B = 1$
 $K_1 = 1.10$ voor rechthoekige pijlers met $L/B = 3$
 $K_1 = 0.85$ voor elliptische pijlers met $L/B = 2$
- K_ω Correctiefactor voor de hoek van de stroming met de pijler (= 1.0) [-]
- L Lengte pijler [m]
- B Breedte pijler [m]

De bovenstaande vergelijkingen worden toegepast op de drie pijlers van de Scheldebrug. Hiervoor wordt zowel de maximale stroomsnelheid bij vloed van 3.1 m/s toegepast als de maximale stroomsnelheid bij eb van 2.5 m/s. Voor de verschillende correctiefactoren in de toegepaste formuleringen worden de waarden uit Tabel 15 beschouwd. De stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van retourstroming, hoofdschroef en boegschroef worden niet beschouwd, aangezien deze hydraulische belastingen eerder tijdelijk zijn en (in vergelijking met getijstroming) zich niet gedurende een lange tijd voordoen.

Tabel 15 – Toegepaste waarden voor de correctiecoëfficiënten in de formulering volgens Breusers *et al.* (1977), Johnson P.A. (1992) en Arneson *et al.* (2012)

	Breusers <i>et al.</i> (1977)	Johnson P.A. (1992)	Arneson <i>et al.</i> (2012)	Schiereck (2003)
K_S	0.76; 1.00; 1.30	0.76; 1.00; 1.30	0.90; 1.10	0.85; 1.2
K_ω	1.0	1.0	1.0	1.0
K_{gr}	1.2	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
K_b	n.v.t.	n.v.t.	1.1;1.2	n.v.t.

n.v.t. = niet van toepassing

Het resultaat van de op deze wijze berekende diepte van de erosiekuil is gegeven in Tabel 24 (formulering volgens Breusers *et al.* (1977)), Tabel 25 (formulering volgens Johnson P.A. (1992), Tabel 26 (formulering volgens Arneson *et al.* (2012)) en Tabel 27 (formulering volgens Schiereck (2003)) in Bijlage 1. Tabel 16 geeft voor elke pijler een overzicht van de minimale en de maximale waarde van de berekende diepte van de erosiekuil ter plaatse van de betreffende pijler. Uit deze tabel volgt voor pijler 1 een diepte van de erosiekuil tussen 15.6 m en 35.3 m, voor pijler 2 een diepte tussen 13.4 m en 34.5 m en voor pijler 3 een diepte tussen 9.5 m en 28.4 m. De breedte van de pijlers van 25 m, respectievelijk 20 m, maakt dat voor deze pijlers relatief grote waarden voor de diepte van de erosiekuil berekend worden. De berekende dieptes van de erosiekuil ter plaatse van brugpijlers lijken eerder onrealistisch groot. Het feit dat deze dieptes berekend worden gebruik makend van formuleringen die afgeleid zijn voor stroming in één richting in niet-cohesief bodemmateriaal is mogelijk een verklaring voor deze grote berekende dieptes van de erosiekuil.

Tabel 16 – Minimale en maximale waarde van de berekende diepte van de erosiekuil ter plaatse van de brugpijlers

	Pijler 1		Pijler 2		Pijler 3	
	min.	max.	min.	max.	min.	max.
Breusers <i>et al.</i> (1977)	15.6 m	26.7 m	13.4 m	22.8 m	9.5 m	16.2 m
Johnson P.A. (1992)	18.8 m	35.3 m	18.4 m	34.5 m	15.2 m	28.4 m
Arneson <i>et al.</i> (2012)	20.4 m	29.9 m	20.0 m	29.2 m	16.4 m	24.1 m
Schiereck (2003)	19.4 m	27.4 m	16.6 m	23.4 m	11.9 m	16.8 m

4.3 Methodologie dimensionering bodembescherming

In hoofdstuk 3 is voor elke pijler van de Scheldebrug de hydraulische belasting op de bodem ten gevolge van getijstrooming in de Schelde en deze ten gevolge van scheepvaart bepaald. Ten gevolge van scheepvaart werd hierbij een stroomsnelheid aan de bodem berekend, ten gevolge van getijstrooming werd een dieptegemiddelde stroomsnelheid berekend.

Aan de hand van deze berekende stroomsnelheden zal er initieel van uitgegaan worden dat rond de pijlers een bodembescherming uit breuksteen voorzien wordt. Indien een breuksteenbekleding niet voldoet om te weerstaan aan de hydraulische belasting aan de bodem wordt een alternatief type bodembescherming voorgesteld. Uit paragraaf 4.4 volgt dat breuksteen eigenlijk voldoet als bodembescherming naast de brugpijler. Eventueel zou een kleinere sortering breuksteen gepenetreerd met beton beschouwd kunnen worden in plaats van een grotere sortering. Om die reden wordt in deze studie enkel gepenetreerde breuksteen beschouwd als alternatief type bodembescherming en niet Open steenasfalt of colloïdaal beton.

4.3.1 Breuksteenbekleding

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

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:

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

met:

-	D_{n50}	Nominale breuksteendiameter	[m]
-	Δ	Relatieve dichtheid van de stenen ($\Delta = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}$)	[-]
-	ρ_s	Dichtheid breuksteen (=2650 kg/m ³)	[kg/m ³]
-	ρ_w	Dichtheid water (=1000 kg/m ³)	[kg/m ³]
-	K_T	Turbulentiefactor	[-]
	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 schuifspanningsfactor (=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. Voor de dieptegemiddelde getijstrooming bij was zou normaal $K_T = 1.0$ toegepast worden. Rond brugpijlers doet zich een stroming voor met een hogere turbulentie. Om die reden wordt voor de dimensionering van de bodembescherming in deze studie een waarde $K_T = 1.5$ 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 $\rho_s=2650 \text{ kg/m}^3$). Op basis van het berekende gemiddeld breuksteengewicht wordt een breuksteensortering geselecteerd uit Tabel 17.

Tabel 17 – Beschouwde 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
5 – 40 kg	0.17 – 0.21	14 – 28	0.42
10 – 60 kg	0.21 – 0.26	27 – 47	0.52
15 -120 kg	0.26 – 0.31	45 - 78	0.62
40 – 200 kg	0.32 – 0.37	101 – 152	0.74
60 – 300 kg	0.38 – 0.43	149 – 236	0.86
15 – 300 kg	0.30 – 0.43	70 – 211	0.86

Bron: NBN EN 13383 (BIN, 2002);

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

4.3.2 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 (sortering 5-40 kg en 10-60 kg uit Tabel 17).

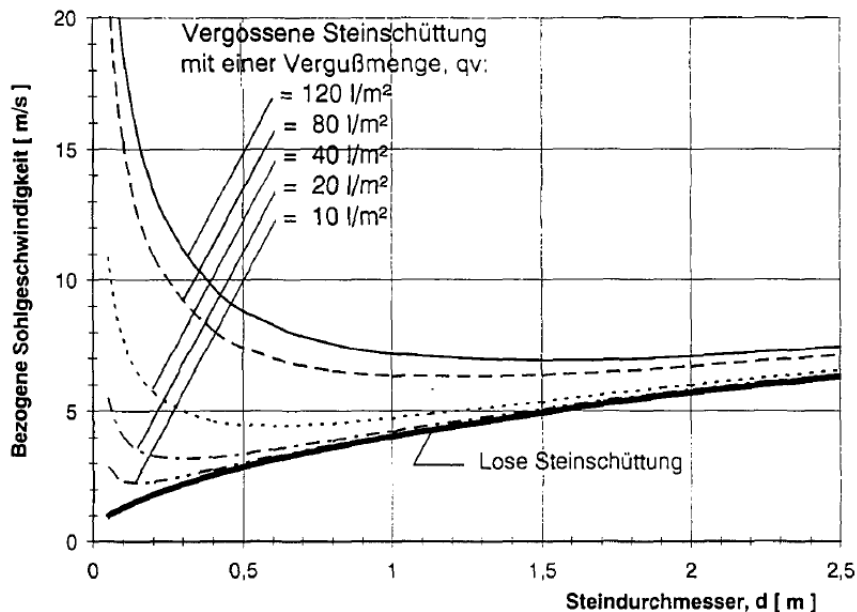
Het standaardbestek 260 voor de waterbouw voorziet twee soorten van grouting:

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

Figuur 10 – Verband tussen maximaal toegelaten stroomsnelheid en breuksteendiameter voor (met beton) gepenetreerde breuksteen



Bron: Römisch (2000).

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

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

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

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

met:

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

- Persoonlijke communicatie met de Bundesanstalt für Wasserbau (Dr.-ing. Jan Kayser, Afdeling Geotechniek van BAW), leert dat naast kaaimuren volgende penetratie in de praktijk wordt toegepast:
 - In een zone met een breedte van 1.0 m naast de kaaimuur wordt een volledige penetratie toegepast.
 - In het overige gedeelte van de bodembescherming (tot en met een breedte gelijk aan 1 maal de scheepsbreedte) wordt een gedeeltelijke penetratie toegepast met een hoeveelheid beton van 70 à 90 l/m².
 - Daarnaast wordt nog een overgangszone met een breedte van 3.0 à 5.0 m voorzien waarin de hoeveelheid penetratie afneemt van 60 l/m² over 30 l/m² naar 0 l/m².

Bij het ontwerp van bodembescherming opwaarts en afwaarts van sluizen is door de Vlaamse Waterweg nv Afdeling Bovenschelde 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 De Vlaamse Waterweg nv blijkt namelijk dat een hoeveelheid van 200 l/m² nodig is voor het volledig penetreren van een breuksteen met sortering 5-40 kg.

4.4 Resultaten dimensionering bodembescherming

Voor de maatgevende waarden van de verschillende types hydraulische belastingen uit Tabel 14 wordt aan de hand van de formuleringen in paragraaf 4.3.1 de bepaling van de benodigde breuksteensortering uitgevoerd. De resultaten hiervan zijn gegeven in Tabel 23 in Bijlage 1. Tabel 18 geeft voor elk type hydraulische belasting een overzicht van de benodigde breuksteensortering om te kunnen weerstaan aan deze belasting.

Tabel 18 – Benodigde breuksteensortering voor brugpijlers

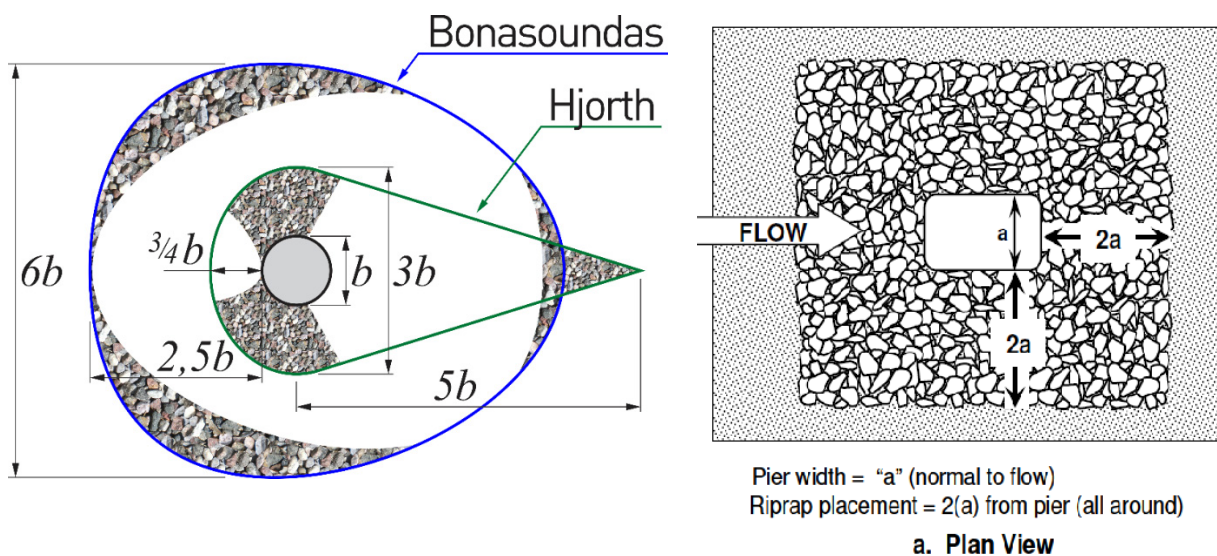
Hydraulische belasting	Maatgevende combinatie	Pijler 1	Pijler 2	Pijler 3
Getijstroming Schelde	Vloed 3.1 m/s	5-40 kg	5-40 kg	5-40 kg
	Vloed 2.5 m/s	45/125 mm	45/125 mm	45/125 mm
	Eb 2.7 m/s	63/180 mm	63/180 mm	5-40 kg
	Eb 2.5 m/s	63/180 mm	63/180 mm	63/180 mm
Retourstroming scheepvaart	Stolt Kimberley diepgang 9.37 m	32/90 mm	32/90 mm	32/90 mm
Stroming aan de bodem t.g.v. hoofdschroef	Pijler 1: Stolt Kimberley diepgang 10.80 m Pijler 2: Stolt Kimberley diepgang 9.37 m Pijler 3: CEMT VIa	5-40 kg	10-60 kg	32/90 mm
	Pijler 2: CEMT VIa	n.v.t.	32/90 mm	n.v.t.
Stroming aan de bodem t.g.v. boegschroef in open water	Pijler 1: Stolt Kimberley diepgang 10.80 m Pijler 2: Stolt Kimberley diepgang 9.37 m Pijler 3: CEMT VIa	32/90 mm	45/125 mm	32/90 mm
	Pijler 2: CEMT VIa	n.v.t.	32/90 mm	n.v.t.
Stroming aan de bodem t.g.v. boegschroef tegen pijler	Pijler 1: Stolt Kimberley diepgang 10.80 m Pijler 2: Stolt Kimberley diepgang 9.37 m Pijler 3: CEMT VIb	10/60 kg	40-200 kg	60-300 kg
	Pijler 2: CEMT VIb	n.v.t.	10-60 kg	n.v.t.

Hoffmans & Verheij (1997) bevelen aan om bodembescherming aan te brengen in de invloedszone rond een pijler. De invloedszone bestaat uit een zone met breedte gelijk aan 6 maal de breedte van de brugpijler en een lengte van 2.5 maal de breedte van de brugpijler opwaarts van de pijler en 5 maal de breedte van de pijler afwaarts van de pijler. NHI (2009) beveelt aan om bodembescherming aan te brengen tot een afstand van twee maal de breedte van de pijler in alle richtingen rond de pijler. Figuur 11 geeft een voorstelling van de zone waarin bodembescherming dient aangebracht te worden volgens deze beide referenties. Hierbij wordt opgemerkt dat zeker de aanbevelingen uit Hoffmans & Verheij (1997), mogelijk ook deze uit NHI (2009), opgesteld zijn voor een pijler in een uniforme stroming. Bij een pijler in een getijderivier keert de stroomrichting twee maal per dag om. Bijgevolg is de lengte van 5 maal de breedte van de brugpijler volgens Hoffmans & Verheij (1997) zowel geldig voor opwaarts als afwaarts van de brugpijler.

Zoals vermeld in hoofdstuk 2 bedraagt de breedte van pijler 1 en pijler 2 25 m en de breedte van pijler 3 20 m. Indien de aanbevelingen gevolgd worden uit Hoffmans & Verheij (1997) dient rond pijler 1 en pijler 2 een zone met bodembescherming voorzien te worden met een breedte van 150 m en een lengte van 250 m. Voor pijler 3 moet de lengte van de zone met bodembescherming rond de pijler 250 m bedragen en de breedte 200 m. Hieruit zou volgen dat de gehele rivier over een lengte van 250 m zou voorzien moeten worden van een bodembescherming. Volgens de aanbevelingen uit NHI (2009) dient rond pijler 1 en pijler 2 een bodembescherming aangebracht te worden tot een afstand van 50 m rond de pijler en voor pijler 3 tot een afstand van 40 m rond de pijler. Rekening houdend met de tussenafstand van de pijlers betekent dit dat de bodembescherming aangebracht wordt over bijna de volledige breedte van de rivier en over een lengte

van 50 m opwaarts van de pijler en 50 m afwaarts van de pijler. Deze laatste afmetingen lijken nog enigszins realistisch, maar toch nog beduidend groot. De afmetingen van 250 m opwaarts en afwaarts van de brugpijler volgens Hoffmans & Verheij (1997) worden als eerder onrealistisch beschouwd.

Figuur 11 – Invloedszone van een enkele pijler



Links: Bonasoundas en Hjorth (Hoffmans & Verheij, 1997); rechts: National Highway Institute (2009)

Uit Tabel 18 volgt een beduidend grotere breuksteensortering om te weerstaan aan de stroomsnelheid van de boegschroef tegen de brugpijler dan bij de andere hydraulische belastingen. De benodigde bodembescherming om te weerstaan aan de stroming ten gevolge van de boegschroef in open water bestaat uit een beduidend kleinere sortering dan de bodembescherming om te weerstaan aan de stroming ten gevolge van de hoofdschroef. Zoals vermeld in paragraaf 3.2.4 doet de maximale waarde van de stroomsnelheid bij gebruik van een boegschroef tegen een brugpijler zich voor in de hoek tussen de brugpijler en de bodem en neemt deze stroomsnelheid af met de afstand tot de brugpijler. Voor pijler 1 is de stroomsnelheid ten gevolge van de hoofdschroef groter dan deze ten gevolge van de boegschroef tegen de pijler vanaf een afstand van 4 m. Voor pijler 2 bedraagt deze afstand aan de zijde van het opengaande gedeelte 7 m en aan de andere zijde 13 m. Voor pijler 3 bedraagt deze afstand ook 13 m.

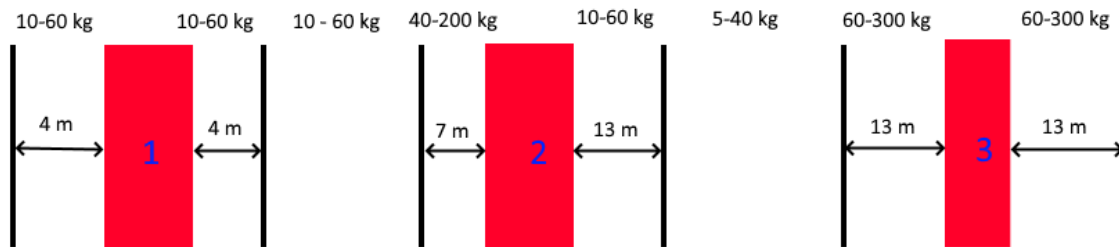
Rekening houdend met deze afstanden en met de benodigde bodembescherming uit Tabel 18 wordt het concept bodembescherming uit Figuur 12 bepaald voor de drie brugpijlers van de Scheldebrug. Dit concept bodembescherming wordt dan over een minimale afstand van 50 m opwaarts en 50 m afwaarts van de pijler aangebracht.

In het concept bodembescherming zijn ter plaatse van pijler 2 en pijler 3 zeer grote breuksteensorteringen aanwezig. Door het toepassen van penetratie met colloïdaal beton kunnen deze grote breuksteensorteringen vervangen worden door de kleinere sortering 10-60 kg. Indien ook voor de zone tussen pijler 2 en pijler 3 een sortering 10-60 kg beschouwd wordt, wordt voor alle zones eenzelfde breuksteensortering beschouwd. Dit concept met gepenetreerde breuksteen is voorgesteld in Figuur 13.

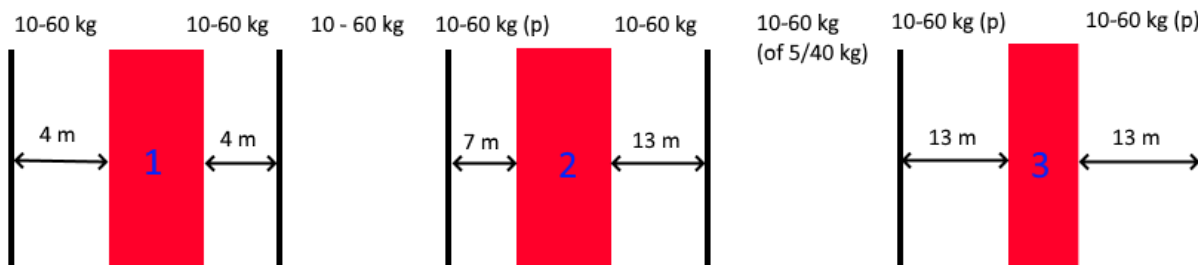
Bij deze conceptontwerpen voor de bodembescherming rond de pijlers van de Scheldebrug moet opgemerkt worden dat afwaarts van de Scheldebrug het dak van de Kennedytunnel gelegen is, waarboven geen erosiebescherming aanwezig is (info De Vlaamse Waterweg). Om erosie van de bodem boven het dak van de Kennedytunnel tegen te gaan zal afwaarts van de brugpijlers een bodembescherming moeten aangebracht worden. Deze bodembescherming zal echter ook ontworpen moeten worden tegen vallende en slepende

ankers. Een breuksteenbekleding kan hieraan echter niet aan weerstaan. Boven een dak van een tunnel worden gebruikelijk asfaltmatten als bodembescherming voorzien.

Figuur 12 – Concept bodembescherming ter plaatse van brugpijlers met enkel breuksteen



Figuur 13 – Concept bodembescherming met gepenetreerde breuksteen



(p) = breuksteen gepenetreerd met colloïdaal beton.

4.5 Vergelijking met bodembescherming Scheldebrug te Temse

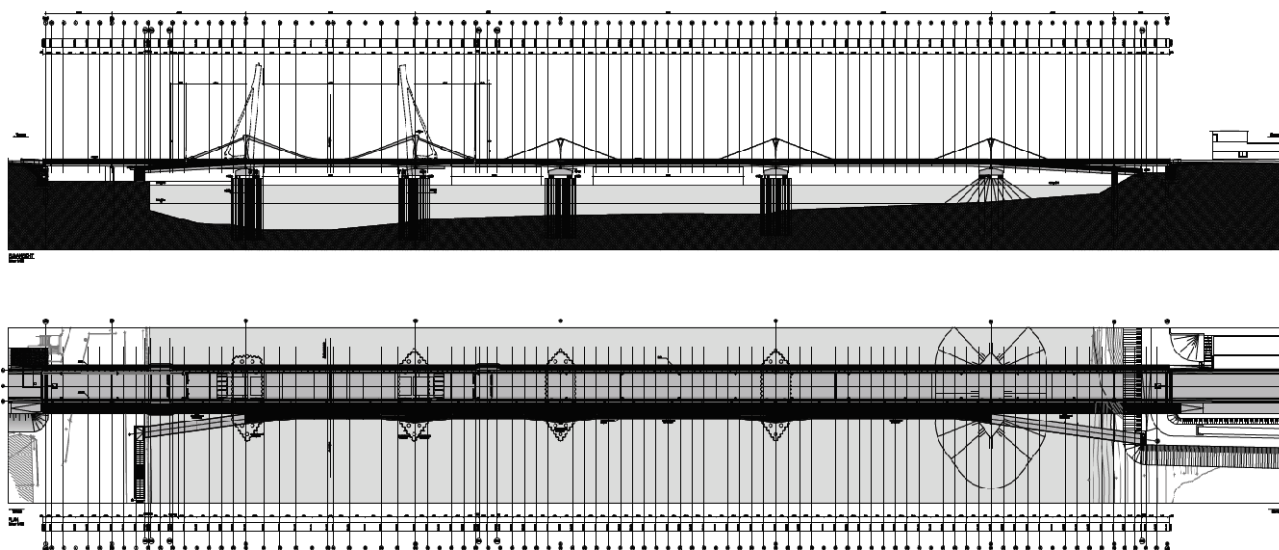
Opwaarts van Antwerpen is te Temse een brug voor autoverkeer aanwezig. In 2009 is naast de oude Scheldebrug een nieuwe brug gebouwd (Figuur 14). Figuur 15 geeft het algemeen aanzicht en het planzicht van de nieuwe Scheldebrug. De nieuwe Scheldebrug bestaat uit 5 pijlers met 6 overspanningen tussen de pijlers onderling en tussen de pijlers en de beide oevers.

Figuur 14 – Scheldebrug te Temse



Bron: Ney en Partners nv.

Figuur 15 – Algemeen aanzicht en planzicht tweede Scheldebrug te Temse

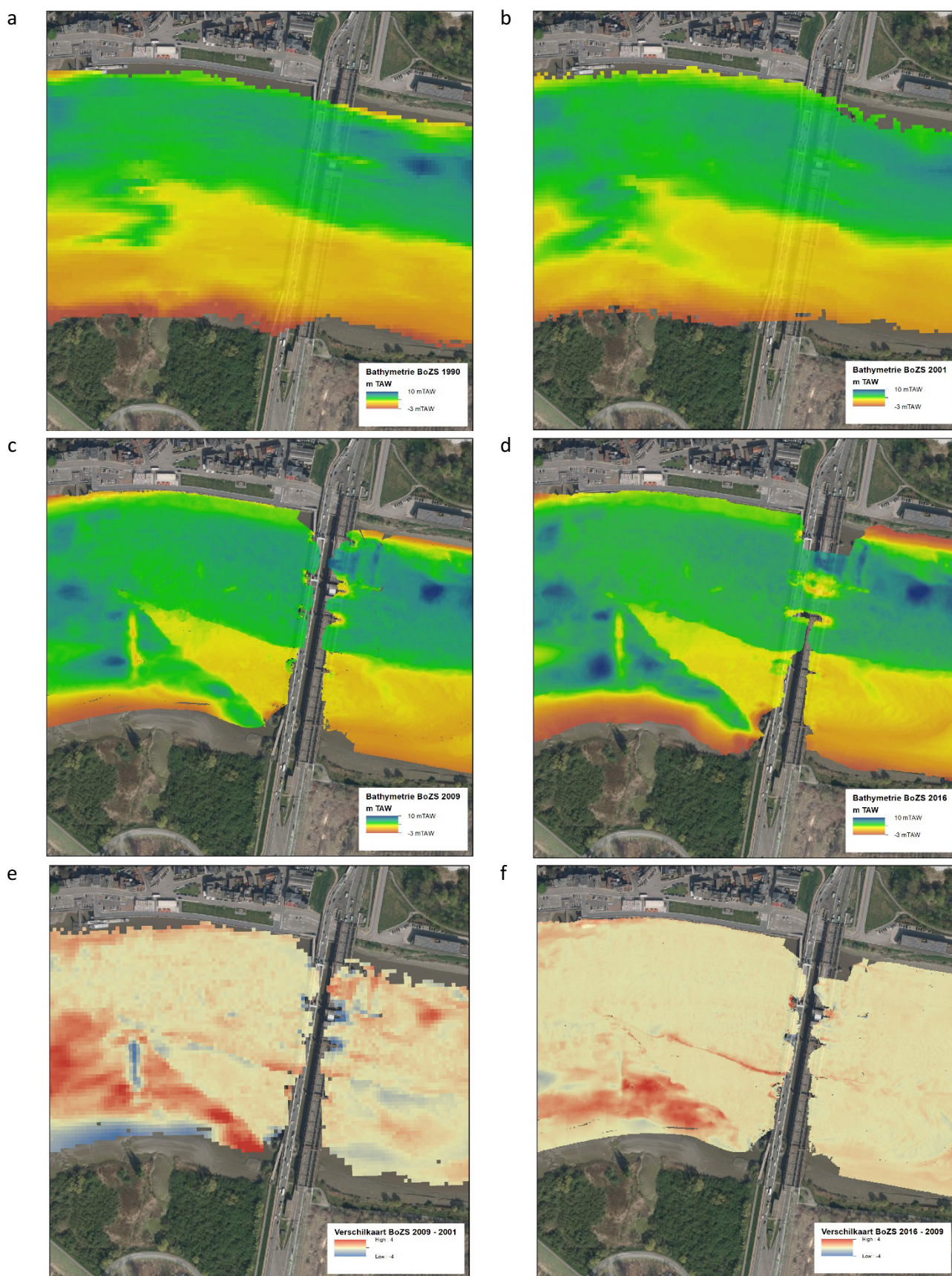


Boven: Algemeen aanzicht; Beneden: planzicht; Bron: THV Tweede Scheldebrug - Temse (2009).

Alle pijlers van de nieuwe Scheldebrug te Temse hebben een breedte van 8 à 10 m. De pijlers zijn opgebouwd uit een aantal palen dewelke omgeven zijn door damplanken. Rond de pijler aan rechteroever is in plaats van damplanken een kegelvormige constructie uit beton aanwezig. Rond de pijlers is geen bodembescherming aangebracht.

Figuur 16 toont de bathymetrische opmetingen van 1990, 2001, 2009 en 2016 van de Boven-Zeeschelde ter plaatse van de Scheldebrug te Temse. De opmetingen van 1990 en 2001 zijn uitgevoerd voor de bouw van de nieuwe Scheldebrug en zijn opgemeten aan de hand van singlebeam peilingen. De opmetingen van 2009 en 2016 zijn uitgevoerd na de bouw van de nieuwe brug en zijn opgemeten aan de hand van multibeam peilingen. Bij singlebeam peilingen zijn steile gradiënten of kleine features niet zichtbaar. Figuur 16 toont ook een verschilkaart tussen de opmetingen van 2009 en 2001 en deze van 2016 en 2009. Uit deze figuur volgen geen noemenswaardige erosiekuilen in de omgeving van de pijlers van de Scheldebrug. Er wordt een erosie van het slik aan rechteroever opwaarts van de Scheldebrug waargenomen. Opwaarts van deze erosie wordt ook een uitbreiding van het slik waargenomen. Deze uitbreiding is vermoedelijk de natuurlijke uitbreiding van het slik in de binnenbocht van de Schelde op deze locatie. De erosie van het slik juist opwaarts van de Scheldebrug wordt vermoedelijk niet veroorzaakt door de aanwezigheid van de pijlers van de nieuwe Scheldebrug of door de beperking van de dwarssectie door de kegelvormige constructie rond de pijler aan rechteroever van de nieuwe Scheldebrug, aangezien het begin van de erosie reeds opgemerkt wordt in de bathymetrische opmeting van 1990. Opvallend is de aanwezigheid van een harde laag in de bodem (in de vorm van een driehoek) ter plaatse van de twee uiterste pijlers van de nieuwe brug aan rechteroever. Opwaarts van deze harde laag, maar ook aan de zijkant van de harde laag doet zich een wel erosie van de bodem voor.

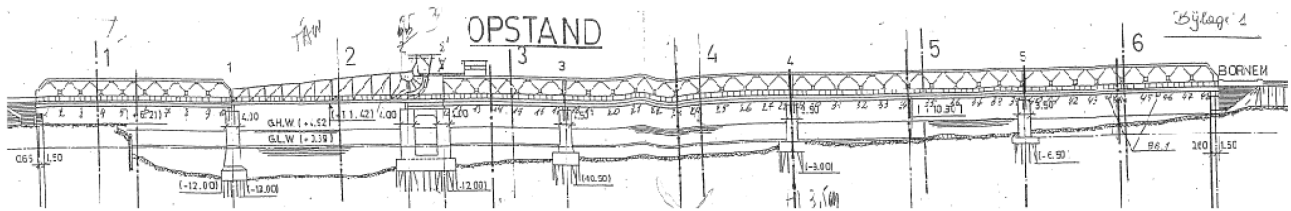
Figuur 16 – Bathymetrie Boven-Zeeschelde ter plaatse van Scheldebrug te Temse voor 1990, 2001, 2009 en 2016



a: bathymetrie 1990; b: bathymetrie 2001; c: bathymetrie 2009; d: bathymetrie 2016; e: verschilkaart 2009 – 2001; f: verschilkaart 2016-2009; blauw = sedimentatie; rood = erosie.

In vergelijking met het in paragraaf 4.4 bepaalde conceptontwerp van de bodembescherming rond de brugpijlers van de Scheldebrug te Antwerpen, wordt vastgesteld dat ter plaatse van de Scheldebrug te Temse geen erosiebescherming rond de brugpijlers is aangebracht. De afwezigheid van erosiebescherming rond de brugpijlers heeft ook niet gezorgd voor een noemenswaardige erosie rond de brugpijlers. De dieptes van erosiekuilen zoals berekend in paragraaf 4.2 worden hier niet waargenomen. De verschilkaarten tonen rond de pijlers wel een zone waar het bodempeil min of meer constant blijft. Deze zone betreft de betonnen funderingszool van de Oude Scheldebrug, zoals volgt uit Figuur 17.

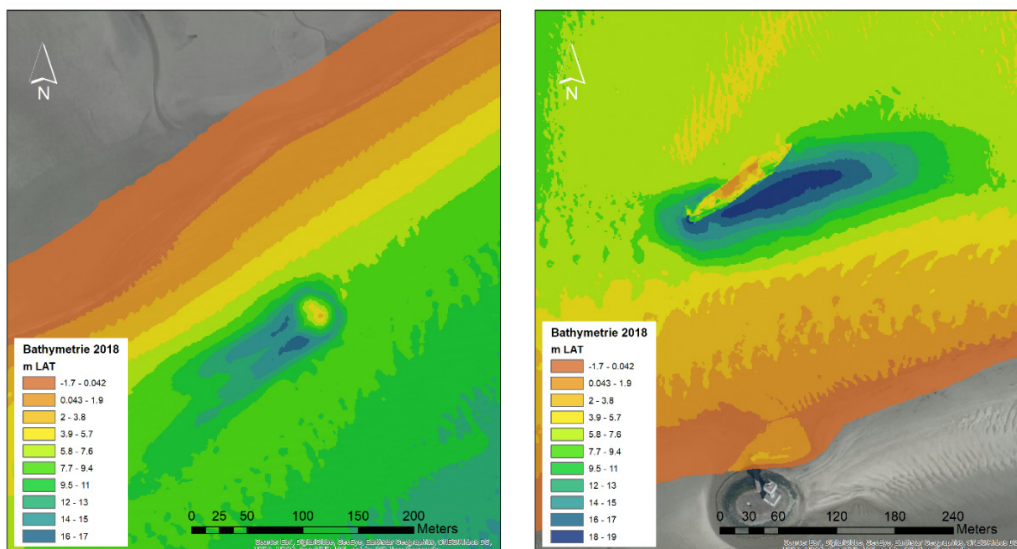
Figuur 17 – Schets Oude Scheldebrug te Temse



Het grote verschil tussen de afwezigheid van noemenswaardige erosie rond de pijlers van de Scheldebrug te Temse en de berekening van eerder onrealistische grote dieptes van de erosiekuilen aan de hand van literatuurformules kan mogelijks verklaard worden doordat de toegepaste formuleringen uit de literatuur opgesteld zijn op basis van onderzoek in stroomgoten met niet-cohesief bodemmateriaal, waarbij zich slechts stroming in één richting voordoet. De Schelde is echter onderhevig aan getij waarbij de stroomrichting twee maal per dag wijzigt. Mogelijk kunnen deze formuleringen bijgevolg niet toegepast worden voor een pijler in een getijderivier. Daarnaast zijn deze formuleringen meestal ook afgeleid voor cirkelvormige pijlers in een stroming, waarbij een aantal correctiefactoren beschouwd worden om de vorm van de pijler in rekening te brengen.

De bodem van de Schelde ter hoogte van Antwerpen bestaat ook uit eerder cohesief materiaal. Ter vergelijking geeft Figuur 18 een voorbeeld van een erosiekuil in de buurt van een onbekend element en een scheepswrak in de Beneden-Zeeschelde ter hoogte van Saeftinghe. Uit deze figuur volgt in de buurt van deze elementen een erosiekuil van ca. 10 m diepte en een lengte van 150 à 200 m. De diepte is relatief groot maar nog beduidend minder dan de berekende waarden van 20 à 30 m. De aanwezigheid van deze erosiekuilen met relatief grote diepte op deze locaties doet vermoeden dat het type bodemmateriaal een beduidende invloed heeft op de aanwezigheid en de diepte van de erosiekuilen.

Figuur 18 – Erosie in de buurt van een onbekend element (links) en een scheepswrak (rechts) in de Beneden-Zeeschelde ter hoogte van Saeftinghe



5 Conclusies

Eén van de overkappings- en leefbaarheidsprojecten van de Antwerpse ring betreft de aanleg van een Scheldebrug voor fietsers en voetgangers ter hoogte van de Kennedytunnel. De Vlaamse Waterweg nv staat in voor de realisatie van de nieuwe Scheldebrug. De studiebureaus SBE en Omgeving zijn aangesteld voor de opmaak van een projectdefinitie en het onderzoek van de haalbaarheid van de fiets- en voetgangersbrug. SBE maakt hierbij een conceptueel brugontwerp met als doel het nagaan van de technische haalbaarheid en het opstellen van een gefundeerde raming van de kostprijs. Het conceptontwerp van de bodembescherming rond de brugpijlers is echter niet opgenomen in de opdracht van SBE. Om die reden vraagt de Vlaamse Waterweg nv Afdeling Zeeschelde-Zeekanaal (contactpersoon: Michiel Derycke) aan het WL om een conceptontwerp uit te voeren van de bodembescherming rond de brugpijlers van de nieuwe fiets- en voetgangersbrug over de Schelde te Antwerpen. Dit conceptontwerp moet het studiebureau toelaten een raming op te maken van de kostprijs van dit onderdeel van het project.

De Scheldebrug bestaat uit drie pijlers, dewelke achthoekig van vorm zijn. Pijler 1 en pijler 2 hebben een lengte van 50 m en een breedte van 25 m, pijler 3 heeft een lengte van 50 m en een breedte van 20 m. Het gedeelte van de brug tussen linkeroever en pijler 2 en het gedeelte tussen rechteroever en pijler 1 bestaat uit een vast brugdek. Het gedeelte tussen pijler 1 en pijler 2 bestaat uit een beweegbaar brugdek. Zeevaart met een te grote hoogte dient hierbij het gedeelte met het beweegbaar brugdek te nemen, binnenvaart kan nog passeren onder het gedeelte met het vast brugdek tussen pijler 2 en pijler 3.

Vooreerst is voor de drie pijlers de hydraulische belasting aan de bodem bepaald. Deze bestaat uit getijstroming in de Schelde, retourstroming ten gevolge van scheepvaart en stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van hoofdschroef en boegschroef van scheepvaart. Wat scheepvaart betreft is zowel het grootste schip uit de scheepvaartsimulaties beschouwd, i.e. de tanker Stolt Kimberley, als een binnenvaartschip CEMT klasse VIa en een duwkonvooi CEMT-klasse VIb.

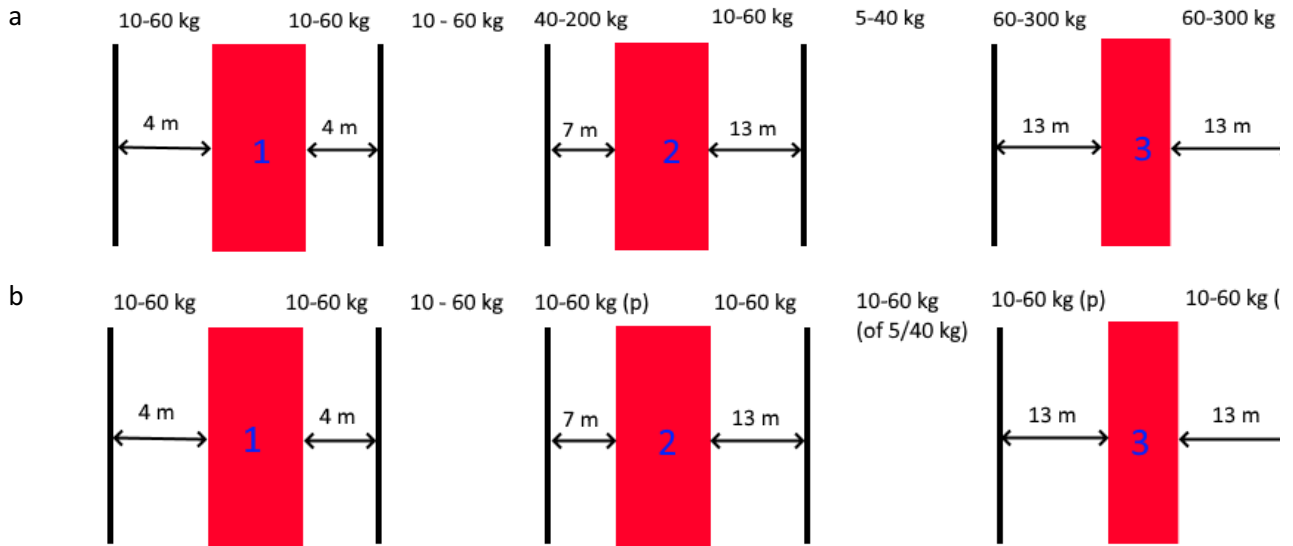
Daarna is nagegaan wat de grootte van de erosiekuil ter plaatse van de brugpijlers zou zijn indien geen bodembescherming aangebracht wordt. Hiervoor wordt de evenwichtsdiepte van een erosiekuil rond een brugpijler berekend aan de hand van de formulerings volgens Breusers *et al.* (1977), volgens Johnson P.A. (1992), volgens Arneson *et al.* (2012) en volgens Schiereck (2003). Hieruit volgt voor pijler 1 een evenwichtsdiepte van de erosiekuil tussen 15.6 m en 35.3 m, voor pijler 2 een evenwichtsdiepte tussen 13.4 m en 34.5 m en voor pijler 3 een evenwichtsdiepte tussen 9.5 m en 28.4 m. De breedte van de pijlers van 25 m, respectievelijk 20 m, maakt dat voor deze pijlers relatief grote waarden voor de diepte van de erosiekuil berekend worden. De berekende dieptes van de erosiekuil ter plaatse van brugpijlers lijken eerder onrealistisch groot. Het feit dat deze dieptes berekend worden gebruik makend van formulerings die afgeleid zijn voor stroming in één richting in niet-cohesief bodemmateriaal is mogelijk een verklaring voor deze grote berekende dieptes van de erosiekuil.

Vervolgens is voor de drie brugpijlers van de Scheldebrug aan de hand van de maatgevende hydraulische belastingen het concept bodembescherming rond de brugpijlers uit Figuur 19 bepaald. Enerzijds is een concept bepaald waarbij een relatief grotere breuksteensortering rond de pijlers wordt toegepast, anderzijds een concept waarbij de breuksteen gepenetreerd wordt met colloïdaal beton waardoor een relatief kleinere sortering kan worden toegepast. Bij beide concepten wordt de bodembescherming over een minimale afstand van 50 m opwaarts en 50 m afwaarts van de pijler aangebracht.

Bij deze conceptontwerpen voor de bodembescherming rond de pijlers van de Scheldebrug moet opgemerkt worden dat afwaarts van de Scheldebrug het dak van de Kennedytunnel gelegen is, waarop geen erosiebescherming aanwezig is. Om erosie van de bodem boven het dak van de Kennedytunnel tegen te gaan, zal afwaarts van de brugpijlers een bodembescherming moeten aangebracht worden. Deze bodembescherming zal echter ook ontworpen moeten worden tegen vallende en slepende ankers. Een

breuksteenbekleding kan hieraan echter niet aan weerstaan. Boven een dak van een tunnel worden meestal asfaltmatten als bodembescherming voorzien.

Figuur 19 – Concept bodembescherming ter plaatse van brugpijlers op basis van stroomsnelheden ten gevolg van scheepvaart



a: concept bodembescherming met enkel breuksteen; b: concept bodembescherming met gepenetreerde breuksteen; (p) = breuksteen gepenetreerd met colloïdaal beton.

De voorgestelde bodembescherming rond de brugpijlers van de nieuwe Scheldebrug voor fietsers en voetgangers te Antwerpen is ook vergeleken met de bodembescherming rond de pijlers van de al bestaande Scheldebrug te Temse. De pijlers van de Scheldebrug te Temse hebben een breedte van 8 à 10 m en zijn opgebouwd uit een aantal palen dewelke omgeven zijn door damplanken. Rond de pijler aan rechteroever is in plaats van damplanken een kegelvormige constructie uit beton aanwezig. Rond de damplanken en betonnen kegelvormige constructie van de pijlers is geen bodembescherming aangebracht. Peilingen van de Schelde tonen echter ter plaatse van de Scheldebrug te Temse geen noemenswaardige erosie rond de brugpijlers. Er wordt wel een harde laag in de bodem ter plaatse van de twee uiterste pijlers aan rechteroever waargenomen. Bijgevolg worden bij afwezigheid van een erosiebescherming rond de brugpijlers van de Scheldebrug te Temse de grote dieptes van de erosiekuilen zoals berekend aan de hand van de literatuurformules niet waargenomen. Eén mogelijke verklaring hiervoor is het feit dat de toegepaste formuleringen uit de literatuur opgesteld zijn op basis van onderzoek in stroomgoten in niet-cohesief materiaal. Hierbij doet zich slechts stroming in één richting voor, terwijl de stroming in de Schelde onder invloed van het getij twee maal per dag van richting verandert. Het type aanwezig bodemmateriaal, i.e. meer cohesief materiaal ter plaatse van de nieuwe Scheldebrug, is hierbij een belangrijke invloedsparameter. In de Beneden-Zeeschelde ter hoogte van Saeftinghe, waar een meer zanderige bodem aanwezig is, worden rond een aantal aanwezige elementen, zoals een wrak van een schip, wel erosiekuilen waargenomen met een diepte van ca. 10 m en een lengte van 150 à 200 m. De aanwezigheid van deze erosiekuilen met relatief grote diepte op deze locaties laat besluiten dat het type bodemmateriaal een beduidende invloed heeft op de aanwezigheid en de diepte van de erosiekuilen in de buurt van een constructie.

6 Referenties

- Arneson, L.A.; Zevenbergen, L.W.; Lagasse, P.F.; Clopper, P.E.** (2012). Evaluating Scour at Bridges. Fifth Edition. Report No. FHWA-HIF-12-003 HEC-18. U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration
- 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
- Breusers, H.N.C.; Nicollet, G.; Shen, H.W.** (1977). Local Scour Around Cylindrical Piers. *J. Hydraul. Res.* 15(3): 211–252. doi:10.1080/00221687709499645
- Bundesanstalt für Wasserbau.** (2008). Code of practice Use of Cementitious and Bituminous Materials for Grouting Armourstone on Waterways (MAV): Karlsruhe
- CIRIA; CUR.** (2007). Manual on the use of rock in hydraulic engineering (2nd edition)
- De Maerschallck, B.; Eloit, K.; Plancke, Y.; Mostaert, F.** (2019). Advies Scheldebrug: Deelrapport 1 - Stroming en morfologie. versie 4.0. *WL rapporten*. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België
- Eloit, K.; Verwilligen, J.; De Maerschallck, B.; Mostaert, F.** (2019). Advies Scheldebrug: deelrapport 2. Nautica. Versie 5.0. *WL Rapporten*, 18_120_2. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- Hoffmans, G.J.C.M.; Verheij, H.J.** (1997). Scour manual. A.A. Balkema Publishers: Rotterdam. 205 pp.
- Johnson P.A.** (1992). Reliability-Based Pier Scour Engineering. *J. Hydraul. Eng.* 118(10)
- 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
- National Highway Institute.** (2009). Bridge Scour and Stream Instability Countermeasures: Experience, Selection, and Design Guidance - Third Edition. Volume 2. Publication No. FHWA-NHI-09-112
- Peeters, P.; Taverniers, E.; Mostaert, F.** (2009). Studie ten behoeve van aanleg van overstromingsgebieden en natuurgebieden in het kader van het Sigmaplan: hydraulische randvoorwaarden voor toetsen op en ontwerpen naar veiligheid. *WL Rapporten*, 713_15a. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- 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

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

SBE; Omgeving. (2019). AZZ-18-0079 Fiets- en voetgangersbrug Antwerpen. Randvoorwaarden technische conceptstudie. 13514-DOC-011-B. SBE. Omgeving

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

Smolders, S.; Maximova, T.; Vanlede, J.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2016). Integraal plan Bovenzeeschede: Subreport 1. SCALDIS: a 3D Hydrodynamic model for the Scheldt Estuary. *WL Rapporten*, 13_131. Flanders Hydraulics Research: Antwerp

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.

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

THV Tweede Scheldebrug - Temse. (2009). Bouwen van een tweede Scheldebrug. Algemeen aanzicht en plan. Plan 06.023.A.02D dd. 19/08/2009. Waterwegen en Zeekanaal NV. Afdeling Zeeschede

Vlaams Nederlandse Scheldec commissie. (2015). Nieuwe sluis Terneuzen. Memo maatgevende schepen, scheepvaartaanbod en ontwerpuitgangspunten.

Vlaamse Hydrografie. (2019). Getijtafels 2019 voor Nieuwpoort, Oostende, Blankenberge, Zeebrugge, Vlissingen, Prosperpolder, Antwerpen en Wintam

Waterloopkundig Laboratorium. (1997). Dipro 3.02n Gebruikershandleiding

Bijlage 1 Tabellen

Tabel 19 – Resultaten berekening maximale stroomsnelheid boven de bodem ten gevolge van gebruik van de boegschroef van schip Stolt Kimberley naast een brugpijler voor bodempeil -12.50 mTAW

Eigenschap	Symbool	Eenheid	Diepgang 10.80 m						Diepgang 7.00 m						
			X = 0 m	X = 2 m	X = 4 m	X = 6 m	X = 8 m	X = 10 m	X = 0 m	X = 2 m	X = 4 m	X = 6 m	X = 8 m	X = 10 m	
Waterpeil	H	mTAW	-0.19	-0.19	-0.19	-0.19	-0.19	-0.19	-0.19	-0.19	-0.19	-0.19	-0.19	-0.19	-0.19
Bodempeil	Z	mTAW	-12.50	-12.50	-12.50	-12.50	-12.50	-12.50	-12.50	-12.50	-12.50	-12.50	-12.50	-12.50	-12.50
Waterdiepte	h	m	12.31	12.31	12.31	12.31	12.31	12.31	12.31	12.31	12.31	12.31	12.31	12.31	12.31
Diepgang	T	m	10.80	10.80	10.80	10.80	10.80	10.80	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00
Echte schroefdiameter	D_p	m	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Effectieve schroefdiameter	D_0	m	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Motorvermogen		kW	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100
Aantal schroeven	n	-	1	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	100
Aangewend vermogen per schroef	P_d	kW	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100
Stroomsnelheid achter schroef	v_p	m/s	6.73	6.73	6.73	6.73	6.73	6.73	6.73	6.73	6.73	6.73	6.73	6.73	6.73
Verticale afstand straalas tot bodem	d_p	m	2.51	2.51	2.51	2.51	2.51	2.51	6.31	6.31	6.31	6.31	6.31	6.31	6.31
Afstand tot kaaimuur	X	m/s	0	2	4	6	8	10	0	2	4	6	8	10	10
Stroomsnelheid boven de bodem	v_{bp3}	m/s	3.01	2.60	2.28	2.04	1.84	1.67	2.13	1.62	1.31	1.09	0.94	0.83	0.83
$v_{bp3} < v_p$	-	-	Ja	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	Ja

Tabel 20 – Resultaten berekening maximale stroomsnelheid boven de bodem ten gevolge van gebruik van de boegschroef van schip Stolt Kimberley naast een brugpijler voor bodempeil -10.50 mTAW

Eigenschap	Symbool	Eenheid	Diepgang 9.37 m						Diepgang 7.00 m						
			X = 0 m	X = 2 m	X = 4 m	X = 6 m	X = 8 m	X = 10 m	X = 0 m	X = 2 m	X = 4 m	X = 6 m	X = 8 m	X = 10 m	
Waterpeil	H	mTAW	-0.19	-0.19	-0.19	-0.19	-0.19	-0.19	-0.19	-0.19	-0.19	-0.19	-0.19	-0.19	-0.19
Bodempeil	Z	mTAW	-10.50	-10.50	-10.50	-10.50	-10.50	-10.50	-10.50	-10.50	-10.50	-10.50	-10.50	-10.50	-10.50
Waterdiepte	h	m	10.31	10.31	10.31	10.31	10.31	10.31	10.31	10.31	10.31	10.31	10.31	10.31	10.31
Diepgang	T	m	9.37	9.37	9.37	9.37	9.37	9.37	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00
Echte schroefdiameter	D_p	m	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Effectieve schroefdiameter	D_0	m	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Motorvermogen		kW	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100
Aantal schroeven	n	-	1	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	100
Aangewend vermogen per schroef	P_d	kW	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100
Stroomsnelheid achter schroef	v_p	m/s	6.73	6.73	6.73	6.73	6.73	6.73	6.73	6.73	6.73	6.73	6.73	6.73	6.73
Verticale afstand straalas tot bodem	d_p	m	1.94	1.94	1.94	1.94	1.94	1.94	4.31	4.31	4.31	4.31	4.31	4.31	4.31
Afstand tot kaaimuur	X	m/s	0	2	4	6	8	10	0	2	4	6	8	10	
Stroomsnelheid boven de bodem	v_{bp3}	m/s	3.16	2.70	2.36	2.10	1.89	1.72	2.63	2.31	2.06	1.86	1.69	1.55	
$v_{bp3} < v_p$	-	-	Ja	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	Ja

Tabel 21 – Resultaten berekening maximale stroomsnelheid boven de bodem ten gevolge van gebruik van de boegschroef van schip CEMT Vla naast een brugpijler

Eigenschap	Symbool	Eenheid	Bodempeil -10.50 mTAW						Bodempeil -7.40 mTAW						
			X = 0 m	X = 2 m	X = 4 m	X = 6 m	X = 8 m	X = 10 m	X = 0 m	X = 2 m	X = 4 m	X = 6 m	X = 8 m	X = 10 m	
Waterpeil	H	mTAW	-0.19	-0.19	-0.19	-0.19	-0.19	-0.19	-0.19	-0.19	-0.19	-0.19	-0.19	-0.19	-0.19
Bodempeil	Z	mTAW	-10.50	-10.50	-10.50	-10.50	-10.50	-10.50	-10.50	-7.40	-7.40	-7.40	-7.40	-7.40	-7.40
Waterdiepte	h	m	10.31	10.31	10.31	10.31	10.31	10.31	10.31	10.31	10.31	10.31	10.31	10.31	10.31
Diepgang	T	m	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50
Echte schroefdiameter	D _p	m	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40
Effectieve schroefdiameter	D ₀	m	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40
Motorvermogen		kW	1251	1251	1251	1251	1251	1251	1251	1251	1251	1251	1251	1251	1251
Aantal schroeven	n	-	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
% aangewend vermogen		%	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Aangewend vermogen per schroef	P _d	kW	417	417	417	417	417	417	417	417	417	417	417	417	417
Stroomsnelheid achter schroef	v _p	m/s	6.18	6.18	6.18	6.18	6.18	6.18	6.18	6.18	6.18	6.18	6.18	6.18	6.18
Verticale afstand straalas tot bodem	d _p	m	6.51	6.51	6.51	6.51	6.51	6.51	6.51	3.41	3.41	3.41	3.41	3.41	3.41
Afstand tot kaaimuur	X	m/s	0	2	4	6	8	10	0	2	4	6	8	10	10
Stroomsnelheid boven de bodem	v_{bp3}	m/s	2.30	1.76	1.43	1.20	1.03	0.91	3.13	2.72	2.41	2.16	1.96	1.79	1.79
v _{bp3} < v _p	-	-	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
v _{bp3} < 6.3 v _p D ₀ / γ _{bp}	-		Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja

Tabel 22 – Resultaten berekening maximale stroomsnelheid boven de bodem ten gevolge van gebruik van de boegschroef van duwkonvooi CEMT V1b naast een brugpijler

Eigenschap	Symbool	Eenheid	Bodempeil -10.50 mTAW						Bodempeil -7.40 mTAW					
			X = 0 m	X = 2 m	X =4 m	X = 6 m	X = 8 m	X = 10 m	X = 0 m	X = 2 m	X =4 m	X = 6 m	X = 8 m	X = 10 m
Waterpeil	H	mTAW	-0.19	-0.19	-0.19	-0.19	-0.19	-0.19	-0.19	-0.19	-0.19	-0.19	-0.19	-0.19
Bodempeil	Z	mTAW	-10.50	-10.50	-10.50	-10.50	-10.50	-10.50	-7.40	-7.40	-7.40	-7.40	-7.40	-7.40
Waterdiepte	h	m	10.31	10.31	10.31	10.31	10.31	10.31	10.31	10.31	10.31	10.31	10.31	10.31
Diepgang	T	m	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50
Echte schroefdiameter	D _p	m	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26
Effectieve schroefdiameter	D ₀	m	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26
Motorvermogen		kW	881	881	881	881	881	881	881	881	881	881	881	881
Aantal schroeven	n	-	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
% aangewend vermogen		%	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Aangewend vermogen per schroef	P _d	kW	441	441	441	441	441	441	441	441	441	441	441	441
Stroomsnelheid achter schroef	v _p	m/s	6.75	6.75	6.75	6.75	6.75	6.75	6.75	6.75	6.75	6.75	6.75	6.75
Verticale afstand straalas tot bodem	d _p	m	6.44	6.44	6.44	6.44	6.44	6.44	3.34	3.34	3.34	3.34	3.34	3.34
Afstand tot kaaimuur	X	m/s	0	2	4	6	8	10	0	2	4	6	8	10
Stroomsnelheid boven de bodem	v_{bp3}	m/s	1.87	1.43	1.15	0.97	0.83	0.73	2.52	2.20	1.94	1.74	1.58	1.44
v _{bp3} <v _p	-	-	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
v _{bp3} <6.3 v _p D ₀ / γ _{bp}	-		Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja

Tabel 23 – Resultaten bepaling benodigde breuksteensortering

	Maatgevende combinatie	Pijler 1			Pijler 2			Pijler 3		
		D _{n50}	M ₅₀	Sortering	D _{n50}	M ₅₀	Sortering	D _{n50}	M ₅₀	Sortering
Getijstroming Schelde	Vloed 3.1 m/s	0.17 m	12.9 kg	5-40 kg	0.17 m	13.7 kg	5-40 kg	0.18 m	15.8 kg	5-40 kg
	Vloed 2.5 m/s	0.10 m	2.6 kg	45/125 mm	0.10 m	2.7 kg	45/125 mm	0.10 m	3.0 kg	45/125 mm
	Eb 2.7 m/s	0.14 m	7.0 kg	63/180 mm	0.14 m	7.7 kg	63/180 mm	0.16 m	10.4 kg	5-40 kg
	Eb 2.5 m/s	0.11 m	3.8 kg	63/180 mm	0.12 m	4.4 kg	63/180 mm	0.13 m	5.8 kg	63/180 mm
Retourstroming scheepvaart	Stolt Kimberley diepgang 9.37 m	< 0.01 m	< 0.1 kg	32/90 mm	< 0.01 m	< 0.1 kg	32/90 mm	< 0.01 m	< 0.1 kg	32/90 mm
Stroming aan de bodem t.g.v. hoofdschroef	Pijler 1: Stolt Kimberley diepgang 10.80 m Pijler 2: Stolt Kimberley diepgang 9.37 m Pijler 3: CEMT VIa	0.15 m	9.9 kg	5-40 kg	0.23	33.0 kg	10-60 kg	0.06 m	0.7 kg	32/90 mm
	Pijler 2: CEMT VIa	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	< 0.01 m	< 0.1 kg	32/90 mm	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Stroming aan de bodem t.g.v. boegschroef in open water	Pijler 1: Stolt Kimberley diepgang 10.80 m Pijler 2: Stolt Kimberley diepgang 9.37 m Pijler 3: CEMT VIa	0.04 m	0.2 kg	32/90 mm	0.09	2.2	45/125 mm	0.03 m	< 0.1 kg	32/90 mm
	Pijler 2: CEMT VIa	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	< 0.01 m	< 0.1 kg	32/90 mm	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Stroming aan de bodem t.g.v. boegschroef tegen pijler	Pijler 1: Stolt Kimberley diepgang 10.80 m Pijler 2: Stolt Kimberley diepgang 9.37 m Pijler 3: CEMT VIb	0.26 m	46.6 kg	10/60 kg	0.33	94.3	40-200 kg	0.38 m	147.9 kg	60-300 kg
	Pijler 2: CEMT VIb	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	0.25	39.6	10-60 kg	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.

n.v.t. = niet van toepassing

Tabel 24 – Resultaten inschatting diepte erosiekuil a.d.h.v. formulering volgens Breusers *et al.* (1977)

Parameter		Eenheid	Pijler 1			Pijler 2			Pijler 3		
			$K_s = 0.76$	$K_s = 1.00$	$K_s = 1.30$	$K_s = 0.76$	$K_s = 1.00$	$K_s = 1.30$	$K_s = 0.76$	$K_s = 1.00$	$K_s = 1.30$
Breedte pijler	b	m	25	25	25	25	25	25	25	25	25
Waterdiepte	h_0	m	12.31	12.31	12.31	10.31	10.31	10.31	7.21	7.21	7.21
Correctiefactor vorm pijler	K_s	-	0.76	1.00	1.30	0.76	1.00	1.30	0.76	1.00	1.30
Correctiefactor hoek stroming	K_ω	-	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Correctiefactor groep pijlers	K_{gr}	-	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
Diepte erosiekuil	d_s	m	15.6	20.5	26.7	13.4	17.6	22.8	9.5	12.4	16.2

Tabel 25 – Resultaten inschatting diepte erosiekuil a.d.h.v. formulering volgens Johnson P.A. (1992)

Parameter		Eenheid	Pijler 1						Pijler 2						Pijler 3					
			U = 3.1 m/s			U = 2.5 m/s			U = 3.1 m/s			U = 2.5 m/s			U = 3.1 m/s			U = 2.5 m/s		
			$K_s = 0.76$	$K_s = 1.0$	$K_s = 1.3$	$K_s = 0.76$	$K_s = 1.0$	$K_s = 1.3$	$K_s = 0.76$	$K_s = 1.0$	$K_s = 1.3$	$K_s = 0.76$	$K_s = 1.0$	$K_s = 1.3$	$K_s = 0.76$	$K_s = 1.0$	$K_s = 1.3$	$K_s = 0.76$	$K_s = 1.0$	$K_s = 1.3$
Breedte pijler	b	m	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
Stroomsnelheid	V	m/s	3.1	3.1	3.1	2.5	2.5	2.5	3.1	3.1	3.1	2.5	2.5	2.5	3.1	3.1	3.1	2.5	2.5	2.5
Waterdiepte	h_0	m	12.31	12.31	12.31	12.31	12.31	12.31	10.31	10.31	10.31	10.31	10.31	10.31	7.21	7.21	7.21	7.21	7.21	7.21
Froude-getal	Fr_1	-	0.28	0.28	0.28	0.23	0.23	0.23	0.31	0.31	0.31	0.25	0.25	0.25	0.37	0.37	0.37	0.30	0.30	0.30
Correctiefactor vorm pijler	K_s	-	0.76	1.00	1.30	0.76	1.00	1.30	0.76	1.00	1.30	0.76	1.00	1.30	0.76	1.00	1.30	0.76	1.00	1.30
Correctiefactor hoek stroming	K_ω	-	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Diepte erosiekuil	d_s	m	20.7	27.2	35.3	18.8	24.8	32.2	20.2	26.5	34.5	18.4	24.2	31.4	16.6	21.9	28.4	15.2	19.9	25.9

Tabel 26 – Resultaten inschatting diepte erosiekuil a.d.h.v. formulering volgens Arneson *et al.* (2012)

Parameter	Eenheid	Pijler 1								Pijler 2								Pijler 3								
		U = 3.1 m/s				U = 2.5 m/s				U = 3.1 m/s				U = 2.5 m/s				U = 3.1 m/s				U = 2.5 m/s				
		K _s = 0.9		K _s = 1.1		K _s = 0.9		K _s = 1.1		K _s = 0.9		K _s = 1.1		K _s = 0.9		K _s = 1.1		K _s = 0.9		K _s = 1.1		K _s = 0.9		K _s = 1.1		
		K _b = 1.1	K _b = 1.2	K _b = 1.1	K _b = 1.2	K _b = 1.1	K _b = 1.2	K _b = 1.1	K _b = 1.2	K _b = 1.1	K _b = 1.2	K _b = 1.1	K _b = 1.2	K _b = 1.1	K _b = 1.2	K _b = 1.1	K _b = 1.2	K _b = 1.1	K _b = 1.2	K _b = 1.1	K _b = 1.2	K _b = 1.1	K _b = 1.2	K _b = 1.1	K _b = 1.2	
Breedte pijler	b	m	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
Stroomsnelheid	V	m/s	3.1	3.1	3.1	3.1	2.5	2.5	2.5	2.5	3.1	3.1	3.1	3.1	2.5	2.5	2.5	2.5	3.1	3.1	3.1	3.1	2.5	2.5	2.5	2.5
Waterdiepte	h ₀	m	12.31	12.31	12.31	12.31	12.31	12.31	12.31	12.31	10.31	10.31	10.31	10.31	10.31	10.31	10.31	10.31	7.21	7.21	7.21	7.21	7.21	7.21	7.21	7.21
Froude-getal	Fr ₁	-	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37
Correctiefactor vorm pijler	K _s	-	0.9	0.9	1.1	1.1	0.9	0.9	1.1	1.1	0.9	0.9	1.1	1.1	0.9	0.9	1.1	1.1	0.9	0.9	1.1	1.1	0.9	0.9	1.1	1.1
Correctiefactor hoek stroming	K _ω	-	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Correctiefactor toestand bodem	K _b	-	1.1	1.2	1.1	1.2	1.1	1.2	1.1	1.2	1.1	1.2	1.1	1.2	1.1	1.2	1.1	1.2	1.1	1.2	1.1	1.2	1.1	1.2	1.1	1.2
Diepte erosiekuil	d _s	m	22.4	24.5	27.4	29.9	20.4	22.3	25.0	27.2	21.9	23.9	26.8	29.2	20.0	21.8	24.4	26.6	18.0	19.7	22.0	24.1	16.4	17.9	20.1	21.9

Tabel 27 – Resultaten inschatting diepte erosiekuil a.d.h.v. formulering volgens Schiereck (2003)

Parameter	Eenheid	Pijler 1		Pijler 2		Pijler 3	
		K _s = 0.85	K _s = 1.20	K _s = 0.85	K _s = 1.20	K _s = 0.85	K _s = 1.20
Breedte pijler	b	m	25	25	25	25	25
Waterdiepte	h ₀	m	12.31	12.31	10.31	10.31	7.21
Correctiefactor vorm pijler	K _s	-	0.85	1.20	0.85	1.20	0.85
Correctiefactor hoek stroming	K _ω	-	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Diepte erosiekuil	d _s	m	19.4	27.4	16.6	23.4	11.9

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