

Vlaanderen
is wetenschap

17_113_1
WL rapporten

IJzer - Diksmuide

Dimensionering oever- en bodembescherming

DEPARTEMENT
**MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN**

waterbouwkundiglaboratorium.be

IJzer - Diksmuide

Dimensionering oever- en bodembescherming

Verelst, K.; Visser, K.P.; Mostaert, F.

Waterbouwkundig Laboratorium
Vlaanderen is wetenschap

Cover figuur © Vlaamse overheid, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Waterbouwkundig Laboratorium

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 2018
D/2018/3241/171

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Verelst, K.; Visser, K.P.; Mostaert, F. (2018). IJzer - Diksmuide: Dimensionering oever- en bodembescherming. Versie 5.0. WL Rapporten, 17_113_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

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

Documentidentificatie

Opdrachtgever:	MOW Afdeling Expertise Beton en Staal	Ref.:	WL2018R17_113_1
Keywords (3-5):	Ijzer, brugpijler, breuksteen, dimensionering		
Tekst (p.):	22	Bijlagen (p.):	-
Vertrouwelijk:	☒ Nee	☒ Online beschikbaar	

Auteur(s)	Verelst, K.

Controle

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

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Mostaert, F.	

Abstract

Door Afdeling Expertise Beton en Staal (EBS) wordt het bouwkundig ontwerp opgemaakt voor een nieuwe brug over de Ijzer te Diksmuide. Ter plaatse van de brug hebben de oevers uit het typeprofiel van de Ijzer een taludhelling 6/4 zonder aanwezigheid van een oeverbescherming. Echter de huidige oevers van de Ijzer op deze locatie hebben een talud 8/4, wat laat vermoeden dat het profiel 6/4 op deze locatie niet stabiel is. EBS wil bij het ontwerp van de nieuwe brug naast de brugpijler opnieuw een taludhelling 6/4 voorzien, maar nu met een oeverbescherming om deze te stabiliseren.

Dit rapport beschrijft de berekening van de te voorziene oeverbescherming en de bodembescherming aan de teen van de oever. Hiervoor zijn eerst de hydraulische belastingen op de oever en bodem bepaald. Deze bestaan uit stroming ten gevolge van waterafvoer, de stroming aan de bodem ten gevolge van retourstroming van scheepvaart (CEMT-klasse I), de stroming aan de bodem ten gevolge van de hoofdschroef en de boegschroef van scheepvaart en de scheepsgolven van de passerende schepen.

Daarna is de dimensionering van de oever- en bodembescherming uitgevoerd. Hieruit volgt dat de stroming ten gevolge van de boegschroef maatgevend is voor de oeverbescherming en de stroming ten gevolge van de hoofschroef voor de bodembescherming. Uit de dimensionering van de oeverbescherming volgt dat losse breuksteen niet kan toegepast worden om te weerstaan aan de hoge stroomsnelheden ten gevolge van de boegschroef. Daarom wordt voor de taluds een breuksteensortering 10-60 kg voorgesteld, gepenetreerd met gesloten colloïdaal beton. Voor de bodembescherming volstaat een breuksteensortering 40-200 kg. Uit constructieve en financiële overwegingen kan ook geopteerd worden om de gegroute breuksteensortering 10-60 kg gepenetreerd met gesloten colloïdaal beton die voor de taluds onder de brugpijler wordt voorgesteld, door te trekken op de bodem van de Ijzer ter plaatse van de nieuwe brug.

Inhoudstafel

Abstract III
Inhoudstafel V
Lijst van de tabellen VI
Lijst van de figuren VII
1 Inleiding 1
2 Gegevens 3
2.1 Dwarsprofiel Ijzer ter plaats van brugpijler 3
2.2 Waterstanden en debieten 3
2.3 Scheepvaart 5
2.4 Breuksteensorteringen 6
3 Hydraulische belastingen 7
3.1 Stroming ten gevolge van waterafvoer 7
3.2 Stroming aan bodem ten gevolge van retourstroming scheepvaart 7
3.3 Stroming aan de bodem ten gevolge van hoofdschroef scheepvaart 9
3.4 Stroming ten gevolge van de boegschroef 10
3.5 Scheepsgolven 11
4 Dimensionering oeverbescherming en bodembescherming 13
4.1 Methodologie 13
4.2 Oeverbescherming 16
4.3 Bodembescherming 19
5 Conclusies 20
6 Referenties 22

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Waterstanden op de Ijzer te Diksmuide 3
Tabel 2 – Debieten op de Ijzer te Keiem en Haringe-Roesbrugge 4
Tabel 3 – Afmetingen schip CEMT klasse I 5
Tabel 4 – Beschouwde breuksteensorteringen 6
Tabel 5 – Berekening van de dieptegemiddelde stroomsnelheid ter plaatse van de brug 7
Tabel 6 – Berekening vaarsnelheid schip 8
Tabel 7 – Berekening retourstroomsnelheid schip 8
Tabel 8 – Berekening stroomsnelheid aan bodem ten gevolge van hoofdschroef 9
Tabel 9 – Berekening stroomsnelheid aan bodem ten gevolge van boegschroef 11
Tabel 10 – Berekening golfhoogte en golfperiode van scheepsgolven. 12
Tabel 11 – Dimensionering oeverbekleding. 16
Tabel 12 - Geselecteerde breuksteensortering vòòr grouting 17
Tabel 13 – Dimensionering bodembekleding aan de hand van de formulering volgens Pilarczyk 19
Tabel 14 – Dimensionering bodembekleding aan de hand van de Shields formulering aangepast voor stralen 19

Lijst van de figuren

Figuur 1 – Situering brug over Ijzer te Diksmuide 1
Figuur 2 – Typedwarsprofiel Ijzer ter plaatse van brugpijler..... 2
Figuur 3 – Debietmeetlocaties te Haringe-Roesbrugge en Keiem 3
Figuur 4 – Waterstand en debiet te Haringe/Roesbrugge en Keiem tussen 05/03/2012 en 20/03/2012 4
Figuur 5 – Aanbevolen zone voor aanbrengen oeverbescherming naast brugpijler 13
Figuur 6 – Minimale zone met te voorziene oever- en bodembescherming 14
Figuur 7 – Verband tussen maximaal toegelaten stroomsnelheid en breuksteendiameter voor (met beton) gepenetreerde breuksteen..... 17
Figuur 8 – Minimale zone met te voorziene oever- en bodembescherming 20

1 Inleiding

Door Afdeling Expertise Beton en Staal (EBS) wordt het bouwkundig ontwerp opgemaakt voor een nieuwe brug over de Ijzer te Diksmuide. Figuur 1 situeert de brug over de Ijzer te Diksmuide.

Figuur 1 – Situering brug over Ijzer te Diksmuide



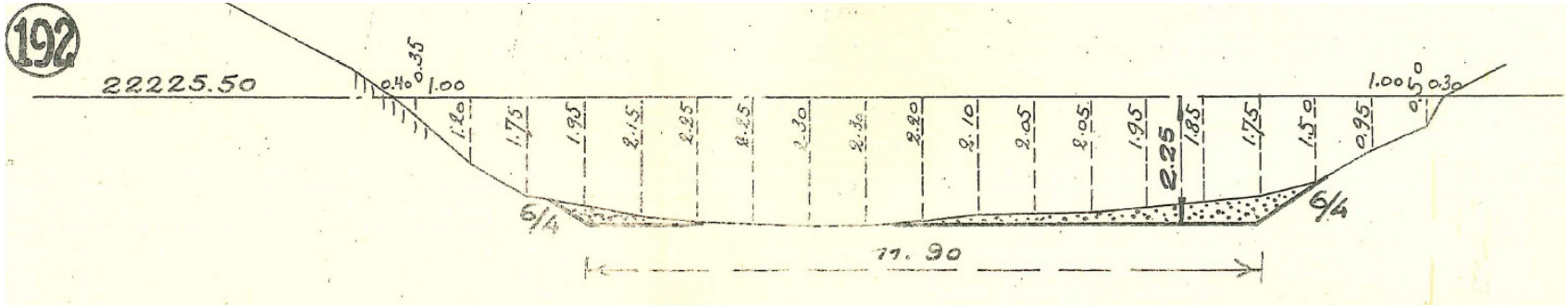
Ter plaatse van de brug hebben de oevers uit het typeprofiel van de Ijzer (Figuur 2) een taludhelling 6/4 zonder aanwezigheid van een oeverbescherming. Echter de huidige oevers van de Ijzer op deze locatie hebben een talud 8/4, wat laat vermoeden dat het profiel 6/4 op deze locatie niet stabiel is.

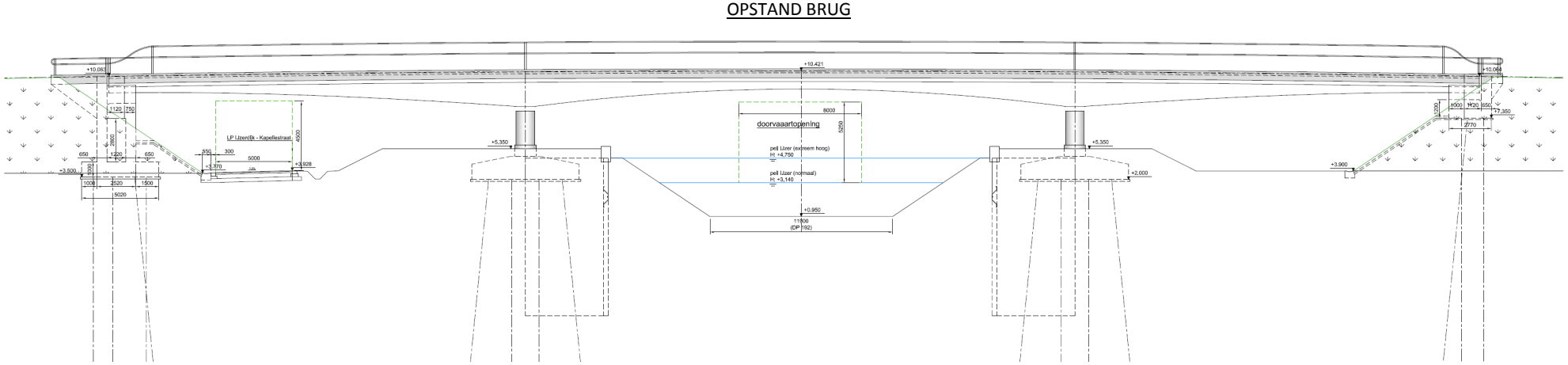
EBS (contactpersoon: Ruth Reynders) wil bij het ontwerp van de nieuwe brug naast de brugpijler opnieuw een taludhelling 6/4 voorzien (Figuur 2), maar met een oeverbescherming om deze te stabiliseren. Hierbij vraagt EBS aan het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) advies met betrekking tot de toe te passen oeverbescherming om deze taluds te stabiliseren.

Hoofdstuk 2 van dit rapport beschrijft de gegevens die voor de dimensionering van de oeverbescherming ter plaats van de brug worden toegepast. De bepaling van de hydraulische belastingen op de bodem volgt in hoofdstuk 3. Hoofdstuk 4 beschrijft de uiteindelijke dimensionering van de oeverbescherming.

Tenslotte vat hoofdstuk 5 de conclusies van dit rapport samen.

Figuur 2 – Typedwarsprofiel Ijzer ter plaatse van brugpijler





Boven: Typedwarsprofiel Ijzer ter plaatse van brugpijler.
Onder: Dwarsprofiel van de nieuwe brug.

2 Gegevens

2.1 Dwarsprofiel Ijzer ter plaats van brugpijler

Voor de dimensionering van de bodem- en oeverbescherming wordt volgend trapeziumvormig dwarsprofiel van de Ijzer ter plaatse van de brugpijler beschouwd (zie Figuur 2):

- Bodempeil: + 0.95 mTAW.
- Bodembreedte: 11.90 m.
- Taludhelling: 6/4.

2.2 Waterstanden en debieten

Informatie met betrekking tot waterstanden en debieten is opgevraagd bij het Hydrologisch Informatiecentrum van WL.

Over de periode 1987-2017 is te Diksmuide een laagste peil van +2.28 mTAW opgemeten en een hoogste waterpeil gelijk aan + 4.76 mTAW (Tabel 1). Dit laatste waterpeil werd opgemeten op 03/01/1994.

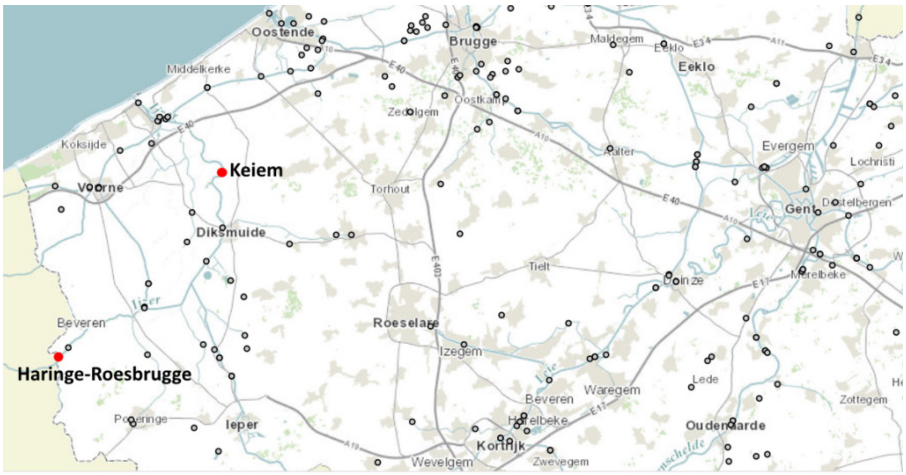
Tabel 1 – Waterstanden op de Ijzer te Diksmuide

Minimaal waterpeil	2.28 mTAW
25 % - percentiel	3.00 mTAW
Gemiddeld waterpeil	3.08 mTAW
75 % - percentiel	3.13 mTAW
Maximaal waterpeil	4.67 mTAW

Statistische waarden berekend op basis van uurgemiddelde meetwaarden

Op de Ijzer bevindt zich opwaarts van Diksmuide een debietmeetlocatie te Haringe-Roesbrugge aan de Franse Grens en afwaarts van Diksmuide te Keiem (zie de rode stippen in Figuur 3).

Figuur 3 – Debietmeetlocaties te Haringe-Roesbrugge en Keiem



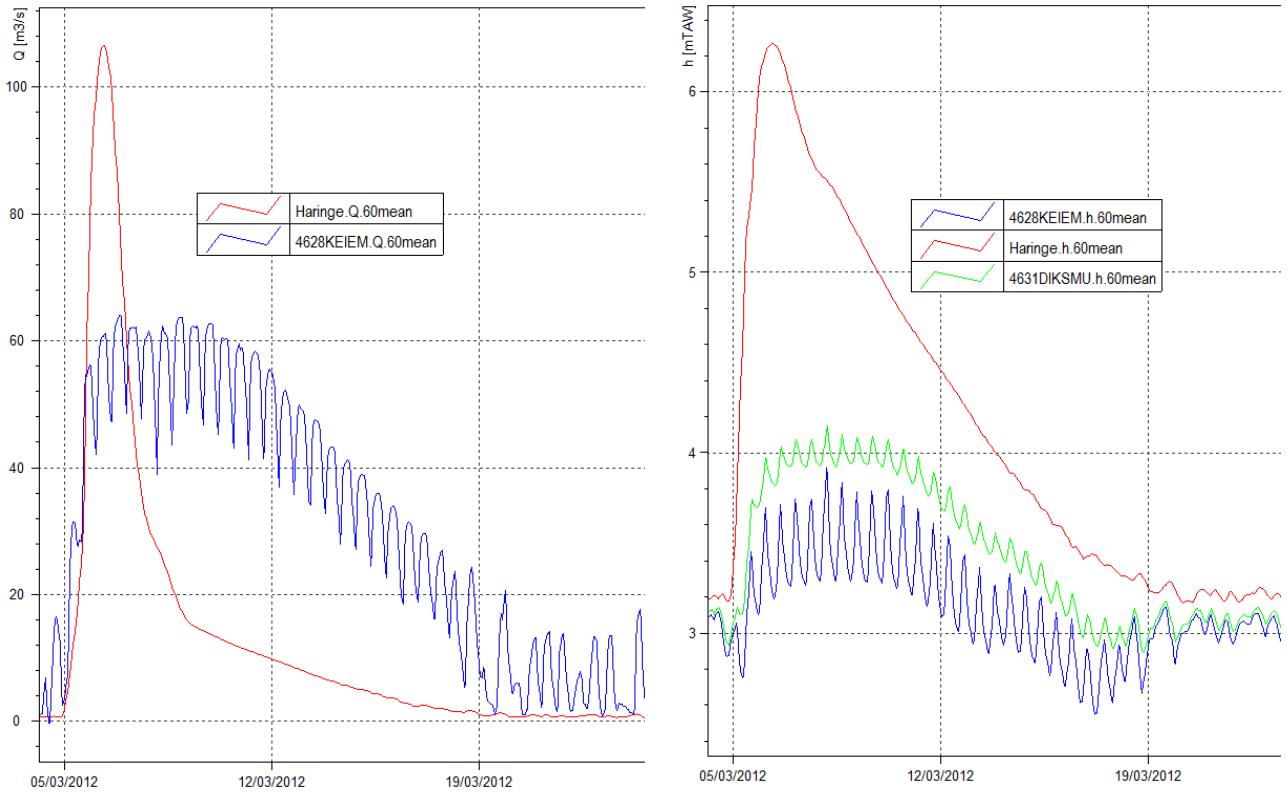
Tussen 2008 en 2017 werden te Keiem debieten gemeten die, onder invloed van het getij schommelen tussen -12.4 m³/s en 64.6 m³/s (Tabel 2). Te Haringe-Roesbrugge werd een maximaal debiet opgemeten van 106.4 m³/s. Dit debiet werd opgemeten op 06/03/2013. Tijdens dezelfde was (Figuur 4) steeg het waterpeil te Diksmuide tot + 4.16 mTAW en werd te Keiem het maximale debiet van 64.6 m³/s opgemeten. Het debiet te Keiem is bijgevolg beduidend lager dan het maximaal opgemeten debiet te Haringe-Roesbrugge. Dit verschil wordt voornamelijk verklaard door de aanwezigheid van de bergende werking van de Ijzervlakte. Bijgevolg wordt voor het ontwerp van de oever- en bodembescherming te Diksmuide het maximale gemeten debiet te Keiem beschouwd.

Tabel 2 – Debieten op de Ijzer te Keiem en Haringe-Roesbrugge

	Keiem	Haringe/Roesbrugge
Minimaal debiet	-12.41 m³/s	0.00 m³/s
25 % - percentiel	0.27 m³/s	0.62 m³/s
Gemiddeld debiet	2.47 m³/s	1.55 m³/s
75 % - percentiel	12.63 m³/s	2.79 m³/s
Maximaal debiet	64.63 m³/s	106.4 m³/s

Statistische waarden berekend op basis van uurgemiddelde meetwaarden

Figuur 4 – Waterstand en debiet te Haringe/Roesbrugge en Keiem tussen 05/03/2012 en 20/03/2012



Links: Debiet te Keiem en Haringe-Roesbrugge tussen 05/03/2012 en 20/03/2012
Rechts: Waterstand te Keiem, Diksmuide en Haringe-Roesbrugge tussen 05/03/2012 en 20/03/2012

Voor de dimensionering van de bodembescherming worden op basis van deze gegevens volgende scenario's met betrekking tot waterstanden en debieten beschouwd:

1. Gemiddeld scenario: een waterstand te Diksmuide gelijk aan + 3.08 mTAW en een debiet gelijk aan 2.47 m³/s.
2. Maximaal scenario: Een waterstand te Diksmuide gelijk aan + 4.67 mTAW en een debiet gelijk aan 64.6 m³/s.

2.3 Scheepvaart

Op de Ijzer te Diksmuide is scheepvaart CEMT klasse I aanwezig. Tabel 3 geeft een overzicht van de afmetingen van dit type schepen. Bij deze tabel wordt opgemerkt dat de maximale geladen diepgang van een schip CEMT klasse I volgens de CEMT-classificatie 2.5 m bedraagt. In het gemiddeld (alledaags) scenario bedraagt de waterdiepte op de Ijzer (zie paragraaf 2.2) 2.13 m, wat lager is dan deze maximale diepgang. Voor binnenvaartschepen bedraagt de kielspeling 30 % (bij een krap profiel zoals ter plaatse van een brug) à 40 % (normaal vaarwegprofiel)[1]. Rekening houdend met een kielspeling van 30 % wordt bij deze waterdiepte een diepgang van 1.5 m bekomen, wat iets hoger is dan de diepgang van het ongeladen schip.

Tabel 3 – Afmetingen schip CEMT klasse I

Lengte	38.5 m
Breedte	5.05 m
Diepgang (ongeladen)	1.2 m
Diepgang (maximaal)	2.5 m
Diepgang (kielspeling 30%)	1.5 m

Wat betreft het motorvermogen van een schip CEMT-klasse I vermeldt Vantorre & Verwerft (2009) een motorvermogen (grafisch afgelezen) tussen 100 kW en 300 kW met enkele uitschieters tot 400 kW. Hierbij wordt een gemiddeld motorvermogen van 215 kW vermeld. Wat de diameter van de schroef betreft vermeldt "Ontwerp van Schutsluizen" (Beem *et al.*, 2000) voor binnenvaartschepen de volgende relatie:

$$D_p = 0.6 \text{ à } 0.7\ d_s$$

Met:

- D_p Schroefdiameter [m]
- d_s Diepgang schip [m]

Gebruik makend van de diepgang van het ongeladen schip van 1.2 m wordt met deze relatie een schroefdiameter van de hoofschroef gelijk aan 0.7 x 1.2 = 0.84 m berekend.

Geerts *et al.* (2011) vermelden dat bij binnenvaartschepen CEMT-klasse I een boegschroef niet altijd aanwezig is. Indien deze aanwezig is, is deze later ingebouwd en heeft deze een vermogen van ca. 150 kW. Anderzijds vermeldt "Richtlijnen Vaarwegen" (Rijkswaterstaat Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2011) voor boegschroeven van binnenvaartschepen een vermogen van 100 kW. Op de website www.veth.net staan (tunnel)boegschroeven vermeld met een diameter van 0.60 m en een vermogen van 120 kW en boegschroeven met een diameter van 0.70 m en een vermogen van 130 kW. Omdat een schroefdiameter van 0.70 m juist kleiner is dan de diameter van de hoofdschroef, wordt voor dit advies een diameter van de boegschroef gelijk aan 0.60 m met een vermogen van 120 kW toegepast.

[1] Persoonlijke communicatie met nautische collega's van WL.

2.4 Breuksteensorteringen

Tabel 4 geeft een overzicht van de in deze studie beschouwde klassen voor breuksteen.

Tabel 4 – Beschouwde breuksteensorteringen

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

Bron: NBN EN 13383 (BIN, 2002);
M_{50}: Mediaan breuksteengewicht; D_{n50}: Mediaan breuksteendiameter

Bij deze breuksteensorteringen moet het volgende opgemerkt worden:

- De breuksteensorteringen uit het standaardbestek 260 voor de waterbouw zijn dezelfde als vermeld in de norm voor waterbouwsteen NBN EN 13383 (BIN, 2002). Aan de norm voor waterbouwsteen NBN EN 13383 zal in de toekomst de breuksteensortering 15 – 120 kg (45 kg < M_{50} < 78 kg) toegevoegd worden. Waar nodig zal ook deze verdeling in deze studie reeds toegepast worden. De breuksteensortering uit Tabel 4 worden gekarakteriseerd door een gemiddeld breuksteengewicht. Om de laagdikte te bepalen, is dit gemiddeld breuksteengewicht omgerekend naar de bijbehorende gemiddelde breuksteendiameter.
- Voor elke sortering wordt in Tabel 4 een laagdikte van de breuksteensortering vermeld. Deze is berekend als het maximum van de volgende 3 voorwaarden (CIRIA; CUR, 2007; De Rouck, s.d.):

$$t = 1.25\, D_{n50}$$
$$t = n\,.\,k_t\,.\,D_{n50}$$
$$t \geq 0.30$$

met:

–	t	Theoretisch orthogonale laagdikte (gemeten loodrechte op de bodem	[m]
–	D_{n50}	Mediaan nominale breuksteendiameter	[m]
–	n	Aantal lagen (n = 2; De Rouck (n.d.))	[-]
–	k_t	Laagdiktecoëfficiënt (k_t = 1.00)	[-])

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

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

3 Hydraulische belastingen

3.1 Stroming ten gevolge van waterafvoer

Tabel 5 geeft de berekening van de dieptegemiddelde stroomsnelheid ter plaatse van de brug voor het gemiddeld scenario en het maximaal scenario van waterafvoer. Uit deze tabel volgt een stroomsnelheid gelijk aan 0.08 m/s in het gemiddeld scenario en een stroomsnelheid gelijk aan 0.99 m/s in het maximale scenario.

Tabel 5 – Berekening van de dieptegemiddelde stroomsnelheid ter plaatse van de brug

	Gemiddeld scenario	Maximaal scenario
Waterstand	+3.08 mTAW	+4.67 mTAW
Debiet	2.5 m³/s	64.6 m³/s
Natte sectie	32.1 m²	65.0 m²
Dieptegemiddelde stroomsnelheid	**0.08 m/s**	**0.99 m/s**

3.2 Stroming aan bodem ten gevolge van retourstroming scheepvaart

Voor het berekenen van de retourstroming ten gevolge van het varend 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 varend schip (Waterloopkundig Laboratorium, 1997):

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

met:

- V_L Grenssnelheid [m/s]
- g Valversnelling (=9.81 m/s²) [m/s²]
- h’ Imaginaire waterdiepte ($= \frac{A_c}{b_W}$) [m]
- A_c Natte sectie waterweg [m²]
- b_w Breedte vaarweg aan waterlijn [m]
- A_m Natte sectie schip (= 6.29 m²) [m²]

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 een blok-coëfficiënt voor een CEMT Klasse I schip gelijk aan 0.83.

Tabel 6 geeft een overzicht van de berekening van de vaarsnelheid van het schip. Uit deze tabel volgt een vaarsnelheid van 1.27 m/s voor de Ijzer ter plaatse van de brug. Ter vergelijking: Vantorre & Verwerft, (2009) vermelden algemeen voor alle vaarwegen in Vlaanderen voor een schip CEMT – klasse I vaarsnelheden tussen 4 km/h (= 1.11 m/s) en 6 km/h (1.67 m/s). De berekende vaarsnelheid gelijk aan 1.79 m/s is juist hoger dan deze waarden.

Tabel 6 – Berekening vaarsnelheid schip

Blok-coëfficiënt schip	C_b	0.83
Natte sectie schip	A_m	6.29 m²
Natte sectie vaarweg	A_c	32.15 m²
Breedte vaarweg aan waterlijn	b_w	18.3 m
Imaginaire waterdiepte	h'	1.76 m
Grenssnelheid	v_l	1.99 m/s
Vaarsnelheid (= 0.9 x v_g)	**V_{schip}**	**1.79 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:

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

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

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

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

met:

- Δh Waterspiegeldaling naast schip [m]
- V_{Schip} Vaarsnelheid van het schip [m/s]
- A_w Parameter [m²]
- g Valversnelling (=9.81 m/s²) [m/s²]
- A_c Natte sectie waterweg [m²]
- 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 [m²]
- u_r Retourstroomsnelheid [m/s]

Aan de hand van bovenstaande formuleringen wordt in Tabel 7 de retourstroomsnelheid van het schip berekend. Op deze wijze wordt een retourstroomsnelheid gelijk aan 0.75 m/s berekend.

Tabel 7 – Berekening retourstroomsnelheid schip

Natte sectie schip	A_m	6.29 m²
Natte sectie vaarweg	A_c	32.15 m²
Bodembreedte profiel	b_b	11.9 m
Waterdiepte	h	2.13 m
Grenssnelheid	V_l	1.99 m/s
Vaarsnelheid schip	V_{schip}	1.79 m/s
Taludhelling	m	1.5
Correctiefactor	α_s	1.04
Parameter	A_w	22.67
Waterspiegeldaling	Δh	0.18 m
Retourstroomsnelheid	**u_r**	**0.75 m/s**

3.3 Stroming aan de bodem ten gevolge van hoofdschroef scheepvaart

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

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

met:

- u_p Stroomsnelheid juist achter de schroef [m/s]
- $P_{schroef}$ Vermogen geleverd door de schroef [W]
- ρ_w Dichtheid water (= 1000 kg/m³) [kg/m³]
- D_0 Effectieve diameter van de schroef [m]

$$D_0 = \begin{cases} 0.7 \, D_p & Schroef \ zonder \ straalbuis \\ 1.0 \, D_p & Schroef \ in \ straalbuis \\ 0.85 \, D_p & Schroef/straalbuiscombinatie \end{cases}$$

- D_p Echte diameter van de schroef [m]

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

$$x_{bp} = 5.6 \, d_p$$

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

met:

- x_{bp} Horizontale afstand van de schroef tot de plaats met maximale stroomsnelheid aan de bodem [m]
- d_p Verticale afstand van de as van de schroef tot de bodem [m]
- u_{bp} Maximale stroomsnelheid boven de bodem [m/s]
- D_0 Effectieve diameter van de schroef [m]
- n Aantal schroeven [-]

Voor een schip CEMT-klasse I wordt hierbij een schroef zonder straalbuis verondersteld. Daarnaast beveelt het PIANC rapport 180 (MarCom Working Group 180, 2015) aan om voor binnenvaartschepen 50 à 100 % van het geïnstalleerd vermogen toe te passen. Om die reden is de berekening van de maximale stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de hoofdschroef ook uitgevoerd voor 100 % van het geïnstalleerde vermogen.

Tabel 8 geeft de berekening van de stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de hoofschroef. Op deze wijze wordt een stroomsnelheid aan de bodem berekend gelijk aan 2.36 m/s.

Tabel 8 – Berekening stroomsnelheid aan bodem ten gevolge van hoofdschroef

Geïnstalleerd motorvermogen	P_{motor}	215 kW
Vermogen geleverd door de schroef	$P_{schroef}$	215 kW
Echte diameter schroef	D_0	0.84 m
Effectieve diameter van de schroef	D_p	0.59 m
Stroomsnelheid juist achter de schroef	u_p	9.82 m/s
Horizontale afstand van de schroef tot de plaats met maximale stroomsnelheid aan de bodem	x_{bp}	3.29 m
Verticale afstand van de as van de schroef tot de bodem	d_p	1.05 m
Maximale stroomsnelheid boven de bodem	**u_{bp}**	**2.36 m**

3.4 Stroming ten gevolge van de boegschroef

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

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

met:

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

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

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

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

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

met:

-	x_{Vmax}	X-coördinaat van de locatie op de helling waar de maximale stroomsnelheid berekend met behulp van de formulering van vrije uitstroming na een propeller zich voordoet (zie paragraaf 3.3)	[m]
-	L	Afstand langs as van jet tussen helling en de uitstroomopening van de boegschroef	[m]
-	K	Parameter	[-]
-	a	Parameter (= 1)	[-]
-	b	Parameter (= 15.4)	[-]
-	α	Taludhelling (= 33.7°)	[°]

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

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

met:

-	v_{bp}	Maximale stroomsnelheid aan de bodem	[m/s]
-	v_p	Stroomsnelheid uittredende straal	[m/s]
-	x_{Vmax}	X-coördinaat van de locatie op de helling waar de maximale stroomsnelheid berekend met behulp van de formulering van vrije uitstroming na een propeller zich voordoet	[m]
-	D_0	Effectieve diameter van de schroef	[m]
-	n	Aantal schroeven	[-]

Tabel 9 geeft de berekening van de stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de boegschroef. Op deze wijze wordt een stroomsnelheid aan de bodem berekend gelijk aan 2.31 m/s. Hierbij wordt opgemerkt dat voor de bepaling van de afstand L tussen het talud en de uitstroomopening van de boegschroef verondersteld wordt dat het schip aan de zijkant vaart van de in Figuur 2 voorgestelde doorvaartopening (met breedte 8.0 m).

Tabel 9 – Berekening stroomsnelheid aan bodem ten gevolge van boegschroef

Geïnstalleerd motorvermogen	P_{motor}	120 kW
Vermogen geleverd door de schroef	$P_{schroef}$	120 kW
Echte diameter schroef	D_0	0.60 m
Effectieve diameter van de schroef	D_p	0.60 m
Stroomsnelheid juist achter de schroef	v_p	7.18 m/s
Afstand langs as van jet tussen het talud en de uitstroomopening van de boegschroef	L	3.35 m
Parameter	K	6.84
X-coordinaat van de locatie op de helling waar de maximale stroomsnelheid berekend met behulp van de formulering van vrije uitstroming na een propeller zich voordoet	x_{vmax}	3.13 m
Maximale stroomsnelheid aan de bodem	**v_{bp}**	**2.31 m/s**

3.5 Scheepsgolven

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

1. Haalgolf:

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

$$\frac{\widehat{\Delta h}}{\Delta h} = 2.0 - 2.0\,\frac{A_c'}{A_c} \qquad voor\ \frac{b_w}{L_s} < 1.5$$

2. Stroomsnelheid in de haalgolf:

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

3. Secundaire golven:

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

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

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

Met:

- z_{max} Golfhoogte van de haalgolf [m]
- $\widehat{\Delta h}$ Extreme waterspiegeldaling naast oever [m]
- Δh Gemiddelde waterspiegeldaling tussen schip en oever (= 0.18 m; zie paragraaf 3.2) [m]

- A'_c Oppervlakte natte kanaaldwarsdoorsnede tussen scheepsas en oever bij uit de as varen ($A'_c = 0.5\ A_c\ - y\ h$) [m²]
- A_c Oppervlakte natte kanaaldwarsdoorsnede (= 32.15 m²; zie paragraaf 3.2) [m²]
- y Positie in de vaarweg (= 1.98 m) [m]
- h Waterdiepte (= 2.13 m) [m]
- b_w Breedte vaarweg aan de waterspiegel (= 18.3 m) [m]
- L_s Lengte schip (= 38.56 m) [m]
- u_{max} Maximale stroomsnelheid in de haalgolf [m/s]
- V_{schip} Vaarsnelheid van het schip [m/s]
- Δ Relatieve dichtheid oeverbekleding ($\Delta = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}$) [-]
- ρ_s Dichtheid breuksteen (= 2650 kg/m³) [kg/m³]
- ρ_w Dichtheid water (= 1000 kg/m³) [kg/m³]
- k_s Ruwheid toplaag (= D_{50}) [m]
- D_{50} Mediaan breuksteendiameter [m]
- H_i Golfhoogte van de interferentiepieken van secundaire golven [m]
- s Afstand van interferentiepieken tot zijkant schip (= 1.95 m) [m]
- F_h Froudegetal ($F_h = {V_{schip}}/{\sqrt{g\ h}}$) [-]
- L_{wi} Gemiddelde golflengte van de interferentiepiek [m]
- T_i Gemiddelde golfperiode van de interferentiepiek [s]
- α_1 Scheepsafhankelijke coëfficiënt ($\alpha_1 = 0.28\ T_s^{1.25}$) [-]
- T_s Diepgang schip (= 1.5 m) [m]

Aan de hand van deze formuleringen wordt in Tabel 10 de golfhoogte en golfperiode van de scheepsgolven berekend voor een schip CEMT klasse I dat op de Ijzer vaart. Bij de bepaling van de afstanden s en y is verondersteld dat het schip aan de zijkant vaart van de in Figuur 2 voorgestelde doorvaartopening (met breedte 8.0 m).

Uit deze tabel volg dat de golfhoogte van de haalgolf 0.34 m bedraagt en dat de maximale stroomsnelheid in de haalgolf 0.27 m/s bedraagt. De berekende golfhoogte en golfperiode van de interferentiepieken van de secundaire golven bedraagt respectievelijk 0.03 m en 0.93 s. De berekende golfhoogte en golfperiode van de secundaire golven is verwaarloosbaar klein.

Tabel 10 – Berekening golfhoogte en golfperiode van scheepsgolven.

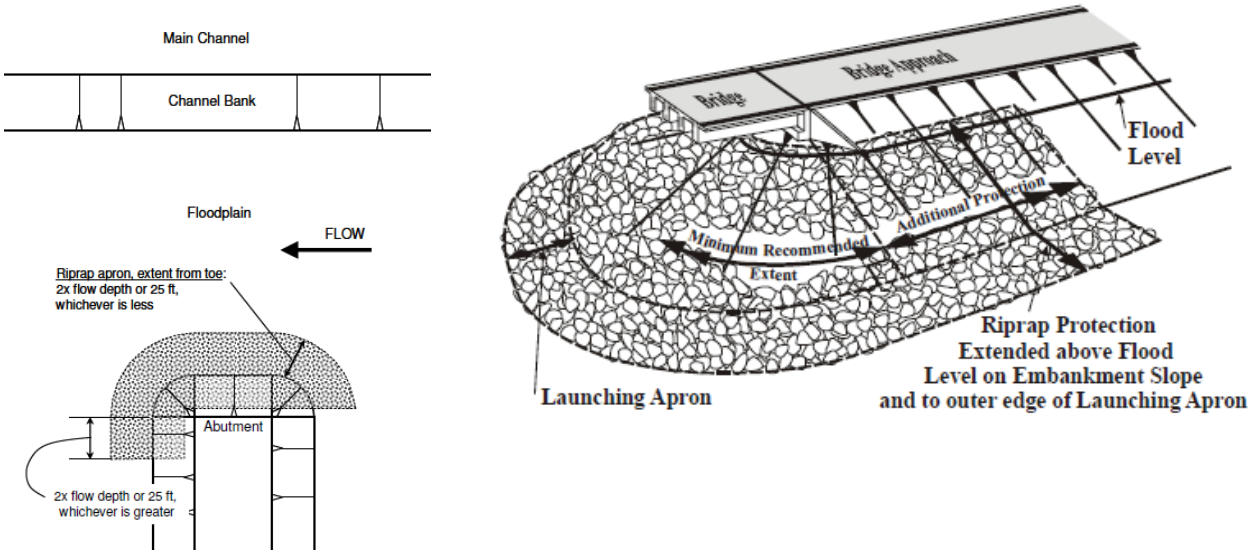
Natte sectie vaarweg	A_c	32.15 m²
Gemiddelde waterspiegeldaling tussen schip en oever	Δh	0.18 m
Verhouding B_w/L_s	B_w/L_s	0.48
Oppervlakte natte kanaaldwarsdoorsnede tussen scheepsas en oever bij uit de as varen	A'_c	11.86 m²
Extreme waterspiegeldaling naast oever	$\widehat{\Delta h}$	0.23 m
Golfhoogte van de haalgolf	**z_{max}**	**0.34 m**
Maximale stroomsnelheid in de haalgolf	**u_{max}**	**0.27 m/s**
Scheepsafhankelijke coëfficiënt	α_1	0.46
Froudegetal	F_h	0.38
Golfhoogte van de interferentiepieken van secundaire golven	**H_i**	**0.03 m**
Gemiddelde golflengte van de interferentiepiek	**L_{wi}**	**1.39 m**
Gemiddelde golfperiode van de interferentiepiek	**T_i**	**0.93 s**

4 Dimensionering oeverbescherming en bodembescherming

4.1 Methodologie

NHI (2009) en Ettema *et al.*, (2006) (zie ook Figuur 5) vermelden dat naast een oeverbescherming ter plaatse van de brugpijler ook een teenbestorting dient aangebracht te worden. Dit betekent dat ter plaatse van de oeverbescherming ook een bodembescherming dient te worden voorzien. Voor de breedte van deze teenbestorting wordt een zone aanbevolen met een lengte gelijk aan 2 maal de waterdiepte.

Figuur 5 – Aanbevolen zone voor aanbrengen oeverbescherming naast brugpijler

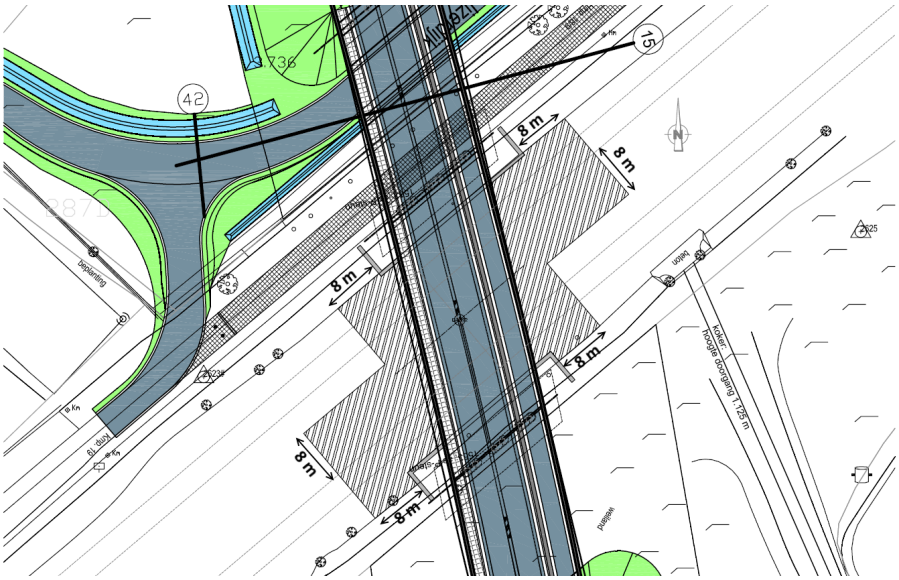


Links: uit National Highway Institute, (2009); rechts: uit Ettema *et al.*, (2006)

Bij een maximale waterstand gelijk aan + 4.76 mTAW en een bodempeil gelijk aan + 0.95 mTAW bedraagt de waterdiepte (in wasregime) 3.81 m. Hieruit volgt dat ter plaatse van de brugpijler een teenbestorting dient voorzien te worden met een breedte van minimaal 2 x 3.81 m = 7.62 m. Om die reden wordt voorgesteld om naast een oeverbescherming ook een teenbestorting (bodembescherming) te voorzien met een breedte van ca. 8.0 m.

De nieuwe brug kruist de Ijzer onder een hoek. Rekening houdend met de hierboven vermelde afmetingen geeft de gearceerde zone in Figuur 6 een voorstelling van de minimaal aan te brengen zone met oever- en bodembescherming. Dit is echter de minimale zone. Uit praktische overwegingen kan door de opdrachtgever er ook voor gekozen worden om een grotere zone met bodembescherming aan te brengen.

Figuur 6 – Minimale zone met te voorziene oever- en bodembescherming



Voor de bepaling van de diameter van de breuksteenbekleding dient bijgevolg zowel een dimensionering van de benodigde breuksteen op de oever als op de bodem uitgevoerd te worden. De dimensionering van de breuksteen op de oever is uitgevoerd in 4.2, de dimensionering van de breuksteen op de bodem in 4.3.

De benodigde breuksteendiameter wordt 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:

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

met:

-	D_{n50}	Nominale breuksteendiameter	[m]
-	Δ	Relatieve dichtheid van de stenen ($\Delta = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}$)	[-]
-	ρ_s	Dichtheid breuksteen (= 2650 kg/m³)	[kg/m³]
-	ρ_w	Dichtheid water (= 1000 kg/m³)	[kg/m³]
-	u_b	Stroomsnelheid boven de bodem	[m/s]
-	h	Waterdiepte	[m]
-	r	Turbulentie-intensiteit	[-]
-	g	Valversnelling (= 9.81 m/s²)	[m/s²]

Voor de turbulentie-intensiteit r worden volgende waarden toegepast:

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

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/m³) [kg/m³]
- ρ_w Dichtheid water (= 1000 kg/m³) [kg/m³]
- K_T Turbulentiefactor $K_T = \left((1 + 3\,r)/1.3\right)^2$ [-]
- r Turbulentie-intensiteit [-]
- K_h Diepte – (of snelheidsprofiel) factor [-]

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

- h Waterdiepte [m]
- K_s Hellingfactor [-]

$K_S = \sin(\theta - \alpha) \,/\, \sin\theta$ voor een stroming die een talud op of afloopt

$K_S = \cos\alpha \sqrt{1 - \frac{tan^2\,\alpha}{tan^2\,\theta}}$ voor een stroming parallel aan een talud

- α helling talud (0 ° voor de bodem; 33.7° voor oever) [°]
- Θ Hoek van inwendige wrijving van de stenen (= 40°) [°]
- Ψ Kritische schuifspanningsparameter (= 0.035 voor breuksteen) [-]
- Φ Stabiliteitsfactor voor stroming (= 1.00) [-]
- u_{cr} Dieptegemiddelde stroomsnelheid [m/s]

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.

Aangezien uit paragraaf 3.5 volgt dat de golfhoogte van scheepsgolven verwaarloosbaar klein is, worden hier geen formuleringen vermeld voor de dimensionering van breuksteen onderhevig aan golfklap ten gevolge van scheepsgolven.

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} ($M_{50} = \rho_S \left(D_{n50}\right)^3$; met ρ_s=2650 kg/m³). Op basis van het berekende gemiddeld breuksteengewicht wordt een breuksteensortering geselecteerd uit Tabel 4 in paragraaf 2.4.

4.2 Oeverbescherming

De breuksteen aanwezig op de taluds van de Ijzer ter plaatse van de brugpijler is onderhevig aan volgende belastingen:

- Stroming ten gevolge van waterafvoer: hiervoor wordt enkel de stroomsnelheid gelijk aan 0.99 m/s in het maximaal scenario beschouwd.
- Stroming ten gevolge van de boegschroef: 2.31 m/s.
- Maximale stroomsnelheid in de haalgolf: 0.27 m/s.
- Secundaire scheepsgolven: golfhoogte gelijk aan 0.03 m en golfperiode gelijk aan 0.93 s.

De maximale stroomsnelheid in de haalgolf is beduidend kleiner dan de stroomsnelheid ten gevolge van de boegschroef. Daarnaast is de golfhoogte van de secundaire golven verwaarloosbaar klein. Om die reden worden deze beide belastingen niet beschouwd voor de dimensionering van de breuksteen. Voor stroming ten gevolge van waterafvoer en de stroming ten gevolge van de boegschroef wordt de diameter van de te voorziene breuksteen bepaald aan de hand van de formulering volgens Pilarczyk. Tabel 11 geeft de resultaten van deze dimensionering.

Tabel 11 – Dimensionering oeverbekleding.

		Waterafvoer	**Boegschroef**
U	**m/s**	**0.99**	**2.31**
Ψ	**-**	0.035	0.035
ϕ	**-**	1.0	1.0
K_t	**-**	1.0	2.5
Bodempeil	**mTAW**	0.95	0.95
Waterpeil	**mTAW**	4.76	3.08
Waterdiepte	**m**	3.81	2.13
α	**°**	33.7	33.7
Δ	**-**	1.65	1.65
D_{n50}	**m**	**0.02**	**2.49**
M_{50}	**kg**	**< 1**	**40767**

Uit Tabel 11 volgt dat een exceptioneel grote breuksteendiameter benodigd is om te kunnen weerstaan aan de stroming ten gevolge van de boegschroef. Bijgevolg kan (losse) breuksteen hier niet toegepast worden. Wel kan de weerstand tegen stroming en daarmee de stabiliteit van (losse) breuksteen sterk worden vergroot door het toepassen van grouting. 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 er geen formules of aanbevelingen bekend zijn bij de auteurs van dit rapport 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 (zie Tabel 4). Tabel 12 geeft een overzicht van het mediaan breuksteengewicht M_{50}, de mediaan breuksteendiameter D_{n50} en de minimale laagdikte voor het aanbrengen van deze sorteringen.

Tabel 12 - Geselecteerde breuksteensortering vòòr grouting

Sortering	M_{50} [kg]	D_{n50} [m]	Laagdikte [m]
5 – 40 kg	14 - 28	0.17-0.22	0.44 m
10 – 60 kg	27 - 47	0.22-0.26	0.52 m

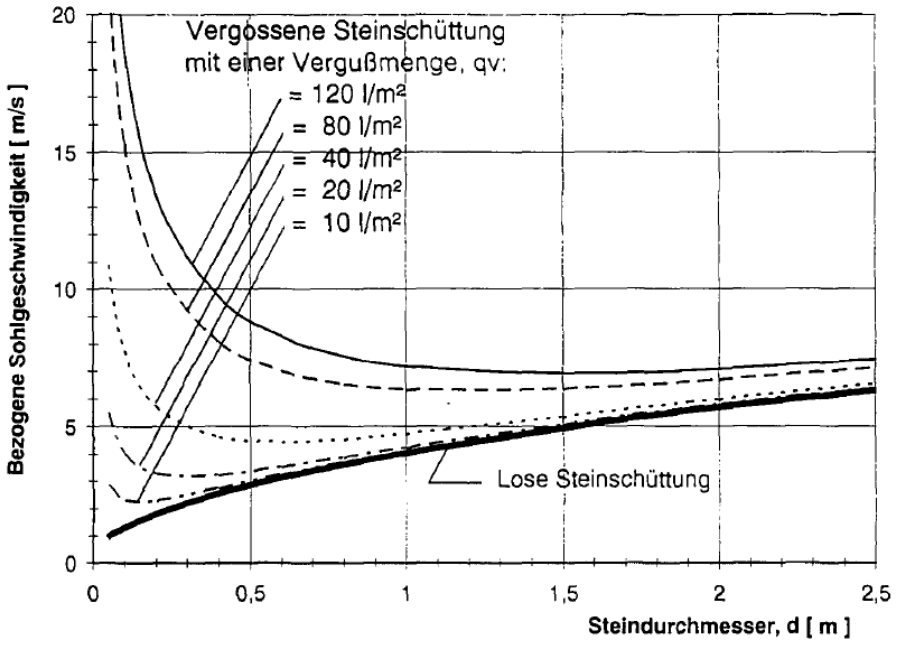
Het standaardbestek 260 voor de waterbouw voorziet twee soorten van grouting:

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

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

Figuur 7 uit Römisch (2000) geeft het verband tussen de maximaal toelaatbare stroomsnelheid boven (met beton) gepenetreerde breeksteen en de breuksteendiameter.

Figuur 7 – Verband tussen maximaal toegelaten stroomsnelheid en breuksteendiameter voor (met beton) gepenetreerde breuksteen.



Bron: Römisch (2000).

Uit Figuur 7 volgt dat breuksteen met diameters tussen 0.20 m en 0.30 m 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.

Om die redenen wordt voorgesteld om op de taluds van de Ijzer ter plaatse van de brug een breuksteensortering 10-60 kg te voorzien dewelke gepenetreerd wordt met beton.

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/m²]
- 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.

In dit advies wordt enkel volledige penetratie 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 breuksteen met sortering 5 - 40 kg.

Aangezien breuksteen gepenetreerd met colloïdaal beton een starre bekleding betreft dient aan de uiteinden van deze bekleding een meer flexibele overgangszone voorzien te worden. Deze flexibele overgangszone zorgt ervoor dat de bekleding een mogelijke erosiekuil, die aan de uiteinden ontstaat, kan volgen en verhindert breken van de bekleding uit gepenetreerde breuksteen. Voor deze overgangszone wordt voorgesteld om een zone met lengte 3.0 m te voorzien uit breuksteen 10-60 kg, dewelke niet gepenetreerd wordt. Deze zone behoort tot de in paragraaf 4.1 vermelde zone met lengte 8.0 m opwaarts en afwaarts van de brug waarin een oeverbescherming dient aangebracht te worden.

4.3 Bodembescherming

De breuksteen aanwezig op bodem van de Ijzer ter plaatse van de brugpijler is onderhevig aan volgende belastingen:

- Stroming ten gevolge van waterafvoer: hiervoor wordt enkel de stroomsnelheid gelijk aan 0.99 m/s in het maximaal scenario beschouwd.
- Stroming ten gevolge van de hoofdschroef: 2.36 m/s
- Retourstroming van het varend schip: 0.93 m/s

Voor deze hydraulische belastingen wordt de diameter van de te voorziene breuksteen bepaald aan de hand van de formulering volgens Pilarczyk voor stroming ten gevolge van waterafvoer (Tabel 13) en aan de hand van de Shields-formulering aangepast voor stralen voor de retourstroming en de stroming ten gevolge van de hoofdschroef. Tabel 11 geeft de resultaten van deze dimensionering.

Tabel 13 – Dimensionering bodembekleding aan de hand van de formulering volgens Pilarczyk

		Waterafvoer
U	**m/s**	**0.99**
Ψ	-	0.035
ϕ	-	1.0
K_t	-	1.0
Bodempeil	**mTAW**	0.95
Waterpeil	**mTAW**	4.76
Waterdiepte	**m**	3.81
α	**°**	0
Δ	-	1.65
D_{n50}	**m**	**< 0.01**
M_{50}	**kg**	**< 1**

Tabel 14 – Dimensionering bodembekleding aan de hand van de Shields formulering aangepast voor stralen

		Retourstroming	**Hoofdschroef**
U	**m/s**	**0.75**	**2.36**
r	-	0.25	0.40
Δ	-	1.65	1.65
D_{n50}	**m**	**< 0.01**	**0.37**
M_{50}	**kg**	**< 1**	**137**

Uit deze tabellen volgt een benodigd breuksteengewicht van 137 kg om te kunnen weerstaan aan de stroming ten gevolge van de hoofdschroef. Voor dit breuksteengewicht volgt uit Tabel 4 in 2.4 dat een breuksteensortering 40-200 kg nodig is als bodembescherming. Aangezien als oeverbescherming reeds een breuksteensortering 10-60 kg gepenetreerd met beton voorgesteld wordt, zou deze (omwille van constructieve en financiële overwegingen) ook op de bodem doorgetrokken kunnen worden (inclusief overgangszone, zoals in 4.2). Een gepenetreerde breuksteen kan namelijk ook weerstaan aan de hydraulische belastingen die op de bodem aangrijpen.

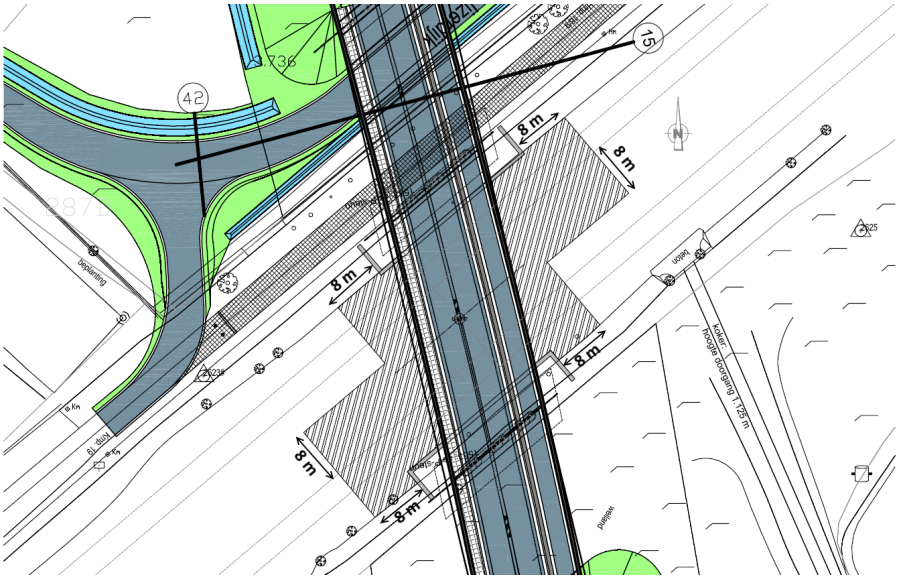
5 Conclusies

Door Afdeling Expertise Beton en Staal (EBS) wordt het bouwkundig ontwerp opgemaakt voor een nieuwe brug over de Ijzer te Diksmuide. Ter plaatse van de brug hebben de oevers uit het typeprofiel van de Ijzer een taludhelling 6/4 zonder aanwezigheid van een oeverbescherming. Echter de huidige oevers van de Ijzer op deze locatie hebben een talud 8/4, wat laat vermoeden dat het profiel 6/4 op deze locatie niet stabiel is.

EBS (contactpersoon: Ruth Reynders) wil bij het ontwerp van de nieuwe brug naast de brugpijler opnieuw een taludhelling 6/4 voorzien, maar nu met een oeverbescherming om deze te stabiliseren. Hierbij vraagt EBS aan het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) advies met betrekking tot de toe te passen oeverbescherming om deze taluds te stabiliseren.

Uit de literatuur volgt dat ter plaatse van een brugpijler tegelijk met de oeverbescherming ook een teenbestorting op de bodem van de rivier dient aangebracht te worden als bodembescherming. Voor de breedte van deze teenbestorting wordt een zone aanbevolen met een lengte gelijk aan 2 maal de waterdiepte. Bij een maximale waterdiepte gelijk aan 3.81 m bedraagt de breedte van de aan te brengen teenbestorting ca. 8.0 m. Aan de hand van deze waarde wordt voor de nieuwe brug de gearceerde zone uit Figuur 6 voorgesteld als (theoretisch) minimale zone met te voorziene oever- en bodembescherming. Uit deze figuur volgt dat onder de brug zelf de volledige bodem voorzien dient te worden van een breuksteenbekleding. Om praktische uitvoeringstechnische redenen is het mogelijk dat door de opdrachtgever een grotere zone met oever- en bodembescherming voorzien wordt.

Figuur 8 – Minimale zone met te voorziene oever- en bodembescherming



Alvorens de dimensionering van deze oever- en bodembescherming uit te voeren zijn de hydraulische belastingen op de oever en bodem bepaald. Deze bestaan uit stroming ten gevolge van waterafvoer, de stroming aan de bodem ten gevolge van retourstroming van scheepvaart (CEMT-klasse I), de stroming aan de bodem en gevolge van de hoofdschroef en de boegschroef van scheepvaart en de golven van passerende schepen.

De oeverbescherming is onderhevig aan stroming ten gevolge van waterafvoer, stroming ten gevolge van de boegschroef en scheepsgolven. Hierbij is de stroming ten gevolge van de boegschroef maatgevend. Uit de dimensionering van de oeverbescherming volgt dat losse breuksteen niet kan toegepast worden om te weerstaan aan vooral de hoge stroomsnelheden ten gevolge van de boegschroef. Om die reden wordt voor

de taluds een gegroute breuksteensortering 10-60 kg (laagdikte: 0.52 m) voorgesteld, gepenetreerd met gesloten colloïdaal beton.

De bodembescherming is onderhevig aan stroming ten gevolge van waterafvoer, retourstroming van scheepvaart en de stroming ten gevolge van de hoofdschroef van de scheepvaart. Hierbij is stroming ten gevolge van de hoofdschroef maatgevend. Om te weerstaan aan deze belastingen volstaat een breuksteensortering 40-200 kg (laagdikte: 0.74 m). De opdrachtgever kan omwille van constructieve en financiële overwegingen ook opteren om de gegroute breuksteensortering 10-60 kg (laagdikte: 0.52 m) gepenetreerd met gesloten colloïdaal beton die voor de taluds onder de brugpijler wordt voorgesteld, door te trekken op de bodem van de Ijzer ter plaatse van de nieuwe brug.

Hierbij wordt opgemerkt dat een breuksteenbekleding gepenetreerd met colloïdaal beton een starre bekleding betreft. Om die reden dient aan de uiteinden van deze bekleding een meer flexibele overgangszone (bijvoorbeeld uit niet-gepenetreerde breuksteen) voorzien te worden. Deze flexibele overgangszone zorgt ervoor dat de bekleding een mogelijke erosiekuil, die aan de uiteinden kan ontstaan, kan volgen en beperken. Op deze manier wordt voorkomen dat de bekleding uit gepenetreerde breuksteen zou breken ten gevolge van deze erosiekuil. Voor deze overgangszone wordt voorgesteld om een zone met lengte 3.0 m te voorzien uit breuksteen 10-60 kg, dewelke niet gepenetreerd wordt met beton. Deze zone behoort tot de in Figuur 6 gearceerde zone met minimaal te voorziene oever- en bodembescherming opwaarts en afwaarts van de brug.

Daarnaast wordt nog het volgende opgemerkt en/of aanbevolen:

a) Voor de penetratie van breuksteen is in deze studie enkel colloïdaal beton voorgesteld, aangezien de penetratie in praktijk onder water zal aangebracht worden. Hierbij is penetratie met open colloïdaal beton of penetratie met gesloten colloïdaal beton mogelijk. Ervaring met penetratie van breuksteen met open colloïdaal beton in Duitsland (pers. comm. Bundesanstalt für Wasserbau) leert echter dat deze uitvoering niet kan weerstaan aan hoge stroomsnelheden ten gevolge van scheepvaart en aan vorstinvloeden. Om die reden wordt penetratie van breuksteen met open colloïdaal beton niet aangeraden.
b) Bij gepenetreerde breuksteen dient een voldoende hoeveelheid colloïdaal beton toegepast te worden, zodat een volledige penetratie bekomen wordt. De benodigde hoeveelheid kan hierbij meer bedragen dan de 150 l/m² vermeld in het standaardbestek 260 voor de waterbouw. Uit ervaringen met penetratie van breuksteen bij 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.
c) Algemeen wordt aanbevolen om voldoende controles te voorzien met betrekking tot het uitvoeren van de bodembescherming, o.a. door het inzetten van duikers om de penetratie te controleren en eventueel door het registreren van de coördinaten van de kraan tijdens het aanbrengen van het colloïdaal beton met behulp van GPS. Daarnaast is het aanbevolen om na aanleg van de bodembescherming regelmatig een monitoring van de bodembescherming uit te voeren.

6 Referenties

Beem, R.C.A.; Boogaard, A.; Glerum, A.; de Graaf, M.A.; Henneberque, S.D.; Hiddinga, P.H.; Kranenburg, D.; van der Meer, M.T.J.; Nagtegaal, G.; Van der Paverd, M.; Smink, L.M.C.; Vrijburcht, A.; Weijers, J. (2000). Ontwerp van schutsluizen: deel 2. Bouwdienst Rijkswaterstaat: Utrecht. ISBN 90-369-3306-4

Belgisch Instituut voor Normalisatie (BIN). (2002). NBN EN 13383-1. Waterbouwsteen – Deel 1: Specificatie.: Brussel, Belgium

Bundesanstalt für Wasserbau. (2008). Code of practice Use of Cementitious and Bituminious Materials for Grouting Armourstone on Waterways (MAV): Karlsruhe

CIRIA; CUR. (1991). Manual on the use of rock in coastal and shoreline engineering. *CUR-Publicatie*, 154: Gouda. ISBN 0-86017-326-7

CIRIA; CUR. (2007). Manual on the use of rock in hydraulic engineering (2nd edition)

De Rouck, J. (S.d.). Rivieren, kanalen en sluizen. Partim: rivieren en kanalen [CURSUS]. Universiteit Gent. Faculteit Ingenieurswetenschappen: Gent

Ettema, R.; Tatsuaki, N.; Muste, M. (2006). An illustrated guide for monitoring and protecting bridge waterways against scour. *Project TR-515*. IOWA Highway Research Board

Geerts, S.; Verwerft, B.; Vantorre, M.; Delefortrie, G.; Mostaert, F. (2011). Modelproeven voorspelling manoeuvreergedrag binnenvaart: deelrapport A.I - Achtergrondstudie binnenvaart: binnenvaartuigen en binnenvaartwegen. *WL Rapporten*, 809_01. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

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

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

Rijkswaterstaat Ministerie van Infrastructuur en Milieu. (2011). Richtlijnen Vaarwegen 2011. RVW 2011

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

Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW). (2002). Technisch rapport asfalt voor waterkeren. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW): Delft. ISBN 90-369-5519-X. 340 pp.

Vantorre, M.; Verwerft, B. (2009). VERBETEREN VAN HET ENERGIERENDEMENT VAN BEPAALDE BINNENSCHEPEN. Universiteit Gent. Faculteit Ingenieurswetenschappen: Gent

Waterloopkundig Laboratorium. (1997). Dipro 3.02n Gebruikershandleiding

DEPARTEMENT **MOBILITEIT & OPENBARE WERKEN**
Waterbouwkundig Laboratorium

Berchemlei 115, 2140 Antwerpen
T +32 (0)3 224 60 35
F +32 (0)3 224 60 36
waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be
www.waterbouwkundiglaboratorium.be