



Vlaanderen
is wetenschap

23_105_1

WL rapporten

Brug over de IJzer te Diksmuide

Aanpassing ontwerp oever- en bodembescherming

DEPARTEMENT
MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

Brug over de IJzer te Diksmuide

Aanpassing ontwerp oever- en bodembescherming

Verelst, K.; Visser, K.P.

Juridische kennisgeving

Het Waterbouwkundig Laboratorium is van mening dat de informatie en standpunten in dit rapport onderbouwd worden door de op het moment van schrijven beschikbare gegevens en kennis.
De standpunten in deze publicatie zijn deze van het Waterbouwkundig Laboratorium en geven niet noodzakelijk de mening weer van de Vlaamse overheid of één van haar instellingen.
Het Waterbouwkundig Laboratorium noch iedere persoon of bedrijf optredend namens het Waterbouwkundig Laboratorium is aansprakelijk voor het gebruik dat gemaakt wordt van de informatie uit dit rapport of voor verlies of schade die eruit voortvloeit.

Copyright en wijze van citeren

© Vlaamse overheid, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Waterbouwkundig Laboratorium 2024
D/2024/3241/086

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Verelst, K.; Visser, K.P. (2024). Brug over de IJzer te Diksmuide: Aanpassing ontwerp oever- en bodembescherming. Versie 4.0. WL Rapporten, 23_105_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.:	WL2024R23_105_1
Trefwoorden (3-5):	IJzer, brugpijler, breuksteen, dimensionering		
Kennisdomeinen:	Waterbouwkundige constructies > Brugpijlers > Literatuur- en desktoponderzoek Waterbouwkundige constructies > Erosiebescherming> Breuksteen >Literatuur- en desktoponderzoek Waterbouwkundige constructies > Erosiebescherming> Gepenetreerde breuksteen >Literatuur- en desktoponderzoek		
Tekst (p.):	15	Bijlagen (p.):	/
Vertrouwelijk:	<input checked="" type="checkbox"/> Nee	<input checked="" type="checkbox"/> Online beschikbaar	

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

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Visser, K.P.	Getekend door:Klaas Visser (Signature) Getekend op:2024-08-21 15:03:47 +02:0 Reden:Ik keur dit document goed   Vlaamse overheid
Projectleider:	Verelst, K.	Getekend door:Kristof Verelst (Signature) Getekend op:2024-07-22 15:59:00 +02:0 Reden:Ik keur dit document goed   Vlaamse overheid

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Bellafkih, K.	Getekend door:Abdelkarim Bellafkih (Sig) Getekend op:2024-07-23 10:26:23 +02:0 Reden:Ik keur dit document goed   Vlaamse overheid
-----------------	---------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Abstract

In 2018 heeft het Waterbouwkundig Laboratorium in opdracht van afdeling Expertise Beton en Staal het ontwerp van de bodem- en oeverbescherming rond de pijlers van een nieuw aan te leggen brug over de IJzer te Diksmuide uitgevoerd. Vanwege nieuwe ruimtelijke randvoorwaarden, de huidige taludhelling 6/4 aan linkeroever en 8/4 aan rechteroever en het huidige bodempeil van de IJzer op +0.09 mTAW blijven behouden, en de gewijzigde maatgevende belastingen is deze dimensionering opnieuw uitgevoerd en werd het ontwerp aangepast.

Op basis van de resultaten van de dimensionering is voor de taluds van beide oevers minimaal een breuksteensortering 15-120 kg nodig om te kunnen weerstaan aan de maatgevende hydraulische belastingen. Vanuit constructief en/of financieel oogpunt kunnen als alternatief ook de breuksteensorteringen 5-40 kg of 10-60 kg gepenetreerd met colloïdaal beton worden toegepast. Voorgesteld wordt om één van deze erosiebeschermingen te voorzien op de beide oevers onder het normale waterpeil. Aangezien een teenbestorting nodig blijft bij toepassing van een oeverbekleding ter plaatse van brugpijlers wordt voorgesteld om deze oeverbescherming ook op de bodem tussen de beide oevers te voorzien.

Daarnaast volgt dat de voorstelde bekleding van riettegels boven het normaalpeil kan weerstaan aan de stroming ten gevolge van waterafvoer in de maximale toestand. Deze riettegels kunnen dus als erosiebescherming worden toegepast op beide oevers in de zone tussen een peil iets lager dan het normale waterpeil van de IJzer en kruinpeil van de oever.

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	IV
Lijst van de tabellen.....	V
Lijst van de figuren	VI
1 Inleiding	1
2 Update hydraulische belasting	3
2.1 Stroming ten gevolge van waterafvoer.....	3
2.2 Stroming ten gevolge van hoofdschroef.....	5
2.3 Stroming ten gevolge van boegschroef	6
3 Dimensionering oeverbescherming en bodembescherming	8
3.1 Oeverbescherming uit breuksteen	8
3.2 Bodembescherming uit breuksteen.....	9
3.3 Oeverbescherming uit riettegels.....	10
4 Conclusie.....	13
5 Referenties	15

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Beschouwde breuksteensorteringen	2
Tabel 2 – Dieptegemiddelde stroomsnelheid ter plaatse van de brug	5
Tabel 3 – Berekening stroomsnelheid aan bodem ten gevolge van hoofdschroef.....	5
Tabel 4 – Berekening stroomsnelheid aan bodem ten gevolge van boegschroef	7
Tabel 5 – Dimensionering oeverbekleding	8
Tabel 6 – Dimensionering bodembescherming uit breuksteen aan de hand van de formulering volgens Pilarczyk.....	9
Tabel 7 – Dimensionering bodembescherming uit breuksteen aan de hand van de Shields formulering aangepast voor stralen	9
Tabel 8 – Dimensionering blokkenmat aan de hand van de formulering volgens Pilarczyk	12

Lijst van de figuren

Figuur 1 – Voorstel aanpassing oeverprofiel onder brug over de IJzer te Diksmuide (Expertise Beton en Staal, 2023); paars: dwarsprofiel IJzer uit het initiële ontwerp; blauw: aanpassing dwarsprofiel volgens het behoud van het huidige profiel	1
Figuur 2 – Variatie van waterpeil en debiet te Keiem tussen 24/10/2023 en 23/11/2023 (Bron: www.waterinfo.be)	4
Figuur 3 – Variatie van waterpeil te Diksmuide tussen 24/10/2023 en 23/11/2023 (Bron: www.waterinfo.be)	4
Figuur 4 – Dwarsprofiel IJzer in maximale toestand	5
Figuur 5 – Bepaling afstand tussen schip en oever voor een schip dat aan linkerkzijde van de doorvaartopening vaart (groene rechthoek) en een schip dat aan rechterzijde van de doorvaartopening vaart (rode rechthoek)	6
Figuur 6 – Riettegels (links) en doorgroeistenen of grasdallen (rechts)	10
Figuur 7 – Maximaal toegelaten stroomsnelheid voor grasbekleding en versterkte grasmatten	11

1 Inleiding

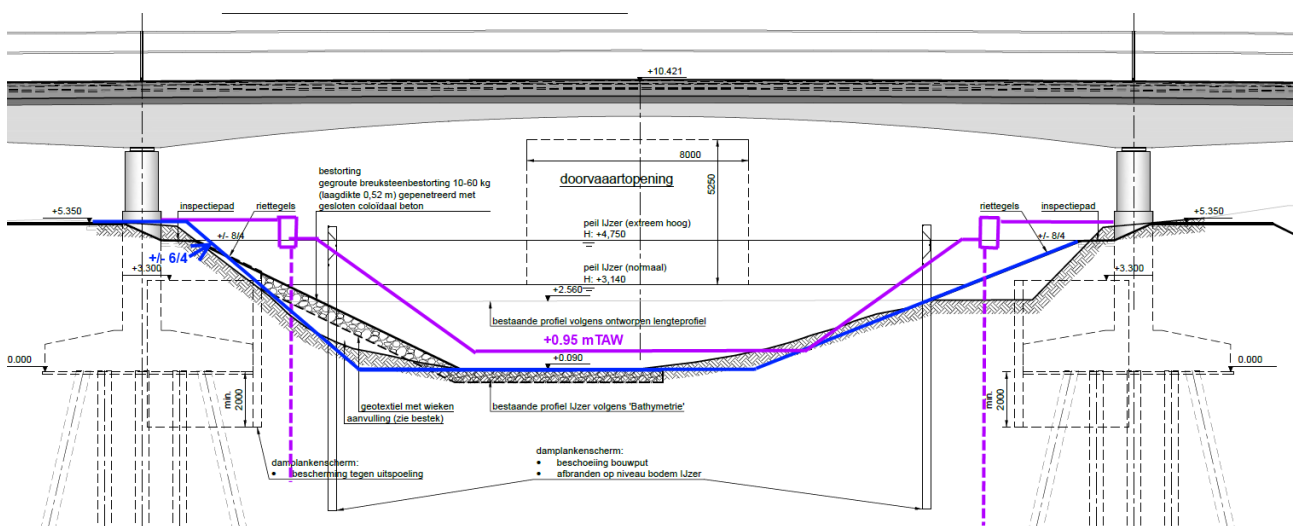
In opdracht van Afdeling Expertise Beton en Staal (EBS; contactpersoon: Ruth Reynders) heeft het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) in 2018 een ontwerp van de oever- en bodembescherming voor een nieuwe brug over de IJzer te Diksmuide uitgevoerd. Hierbij werd voorzien om onder de brug het originele bodempeil van de IJzer op +0.95 mTAW te herstellen, de originele taludhellingen van 6/4 aan beide oevers van de IJzer te herstellen en deze te stabiliseren met een oeverbescherming. Het ontwerp van de oever- en bodembescherming door WL werd gerapporteerd in Verelst *et al.* (2018). Hiernaar zal in het vervolg van dit rapport verwezen worden met “initieel ontwerp (van oever- en bodembescherming)”.

In dit initiële ontwerp werd voorgesteld om op de beide oevers een breuksteensortering 10-60 kg gepenetreerd met gesloten colloïdaal beton te voorzien. Voor de bodembescherming volstond een breuksteensortering 40-200 kg, waarbij werd aangegeven dat uit constructieve en financiële overwegingen ook geopteerd kon worden om de oeverbescherming voor de beide taluds onder de brugpijler door te trekken op de bodem van de IJzer ter plaatse van de nieuwe brug.

Bij het verdere ontwerp van de brug is gebleken dat het huidige dwarsprofiel van de IJzer niet al te veel aangepast mag worden. Om die reden werd door EBS het volgende voorgesteld (Figuur 1):

- Het huidige bodempeil van de IJzer op +0.090 mTAW blijft behouden.
- Onder het normaal waterpeil wordt enkel de linkeroever van de rivier met taludhelling 6/4 versterkt met breuksteen gepenetreerd met colloïdaal beton.
- De rechteroever van de IJzer heeft een flauwere taludhelling (8/4) en wordt onder het normaal waterpeil niet versterkt.
- Boven het normaal waterpeil worden op de beide oevers riettegels voorzien.

Bij Figuur 1 wordt opgemerkt dat het oorspronkelijke plan EBS (2023) een taludhelling 8/4 voorziet aan beide oevers van de IJzer. Op een overleg tussen WL en EBS dd. 20/11/2023 heeft EBS vermeldt dat ook aan linkeroever de taludsteilheid van 6/4 dient te worden toegepast (zie blauwe lijn in Figuur 1).



Figuur 1 – Voorstel aanpassing oeverprofiel onder brug over de IJzer te Diksmuide (Expertise Beton en Staal, 2023); paars: dwarsprofiel IJzer uit het initiële ontwerp; blauw: aanpassing dwarsprofiel volgens het behoud van het huidige profiel

EBS vraagt met betrekking tot dit ontwerp het volgende:

1. Is dit een aanvaardbaar ontwerp?
2. Hoe ver moet de breuksteensortering gepenetreerd met colloïdaal beton doorlopen in het dwarsprofiel van de IJzer?
3. In Verelst *et al.* (2018) is voorgesteld om in de lengterichting een overgangszone van 3 m te voorzien met breuksteen die niet gepenetreerd is met colloïdaal beton. Dient deze ook in dwarsrichting voorzien te worden?

Om deze vragen te beantwoorden wordt in hoofdstuk 2 vooreerst een update van de optredende hydraulische belastingen uitgevoerd. Enerzijds beïnvloedt de wijziging van de hellingen van het dwarsprofiel en de wijziging van de bodemligging onder de brug de maatgevende hydraulische belastingen. Anderzijds zijn tijdens de recente watersnood van november 2023 beduidend hogere debieten te Keiem en hogere waterstanden te Diksmuide opgemeten dan beschouwd voor de initiële dimensionering van de oever- en bodembescherming.

Daarna wordt in hoofdstuk 3 op basis van deze geüpdatete hydraulische belastingen een gewijzigde oever- en bodembescherming bepaald. In dit hoofdstuk wordt ook nagegaan of de riettegels die voorgesteld worden als oeverbescherming voor het gedeelte van beide oevers boven het normaal waterpeil mogelijk zijn.

Hoofdstuk 4 vat de conclusies van dit rapport samen.

Hierbij wordt het volgende opgemerkt:

- 1) Dit rapport beschrijft enkel de wijzigingen aan de hydraulische belasting en de wijzigingen aan de dimensionering van de oever- en bodembescherming. De formuleringen voor de bepaling van de hydraulische belasting en formuleringen voor de dimensionering van de oever- en bodembescherming zijn reeds beschreven in Verelst *et al.* (2018). Deze formuleringen worden niet herhaald in dit rapport. Daarnaast wordt de dimensionering van de oever- en bodembescherming enkel uitgevoerd voor de maatgevende hydraulische belastingen en niet voor alle tijdens het initieel ontwerp van de oever- en bodembescherming beschouwde hydraulische belastingen.
- 2) Voor de leesbaarheid van dit rapport wordt het overzicht van de beschouwde klassen voor breuksteen uit paragraaf 2.4 in Verelst *et al.* (2018) wel overgenomen in Tabel 1.

Tabel 1 – Beschouwde breuksteensorteringen

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

Bron: NBN EN 13383 (BIN, 2002);

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

2 Update hydraulische belasting

Tijdens de initiële dimensionering van de oever- en bodembescherming in 2018 zijn volgende hydraulische belastingen beschouwd:

- 1) Stroming ten gevolge van waterafvoer
- 2) Stroming ten gevolge van retourstroming scheepvaart
- 3) Stroming ten gevolge van hoofdschroef scheepvaart
- 4) Stroming ten gevolge van boegschroef scheepvaart
- 5) Stroomsnelheid ten gevolge van scheepgolven
- 6) Golfhoogte van scheepgolven

Uit deze initiële dimensionering volgde dat stroming ten gevolge van retourstroming van scheepvaart, stroomsnelheid ten gevolge van scheepgolven en golfhoogte ten gevolge van scheepgolven geen maatgevende belastingen waren. Om die reden wordt in dit hoofdstuk enkel een update uitgevoerd van de stroming ten gevolge van waterafvoer (paragraaf 2.1), de stroming ten gevolge van de hoofdschroef (paragraaf 2.2) en de stroming ten gevolge van de boegschroef (paragraaf 2.3).

2.1 Stroming ten gevolge van waterafvoer

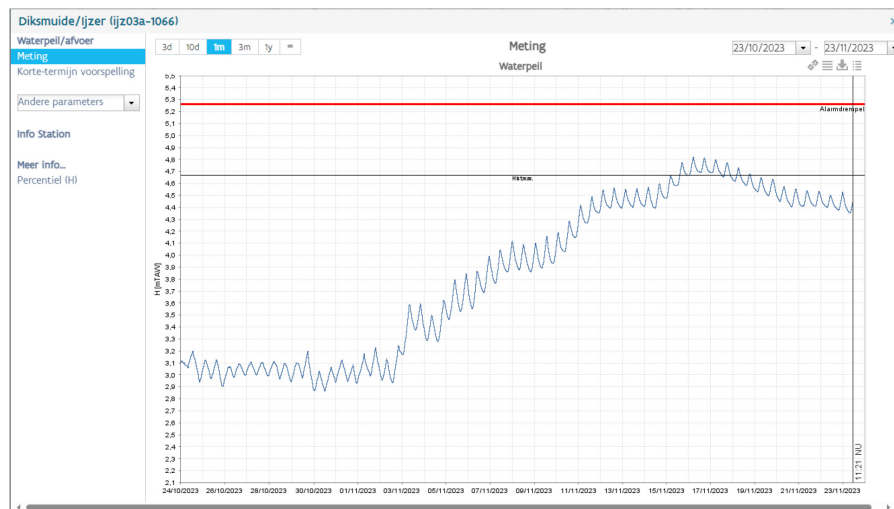
Bij de dimensionering van de initiële oever- en bodembescherming werden volgende scenario's van waterstanden en debieten beschouwd:

- 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. Dit debiet betreft het maximaal gemeten debiet te Keiem.

Het gemiddelde scenario wordt niet gewijzigd voor de dimensionering van de oever- en de bodembescherming in dit rapport. In november 2023 heeft in het IJzerbekken echter een watersnood plaatsgevonden, waarbij hogere waterstanden en debieten werden opgemeten als toegepast in het beschouwde maximale scenario. De variatie in de tijd van het waterpeil en debiet te Keiem tussen 24/10/2023 en 23/11/2023 is grafisch voorgesteld in Figuur 2, de variatie in de tijd van het waterpeil te Diksmuide is voor deze periode grafisch weergegeven in Figuur 3. Uit deze figuren volgt dat zowel het debiet te Keiem als het waterpeil te Diksmuide tijdens deze periode de vorige historisch maximale waarden hebben overschreden. Het maximale debiet te Keiem bedroeg 101.7 m³/s en het maximale waterpeil te Diksmuide bedroeg +4.82 mTAW. Deze waarden zullen daarom beschouwd worden als waterstand en debiet in het maximale scenario bij de dimensionering van de oever- en bodembescherming voor de nieuwe brug over de IJzer voor het gewijzigde ontwerp.

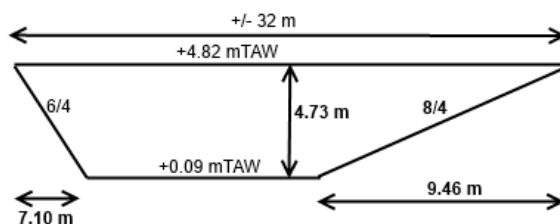


Figuur 2 – Variatie van waterpeil en debiet te Keiem tussen 24/10/2023 en 23/11/2023 (Bron: www.waterinfo.be)



Figuur 3 – Variatie van waterpeil te Diksmuide tussen 24/10/2023 en 23/11/2023 (Bron: www.waterinfo.be)

Figuur 4 geeft een voorstelling van de afmetingen van het dwarsprofiel van de IJzer ter plaatse van de nieuwe brug. Op basis van deze afmetingen wordt een natte sectie gelijk aan 99.4 m² in het maximale scenario berekend. Bij een debiet van 101.7 m³/s geeft deze natte sectie aanleiding tot een dieptegemiddelde stroomsnelheid gelijk aan 1.02 m/s, wat slechts beperkt hoger is dan de stroomsnelheid van 0.99 m/s in het maximale scenario uit de dimensionering van de initiële oever- en bodembescherming in 2018. Ondanks het beduidend hogere debiet in het nieuwe maximale scenario, zorgt de toename van de natte sectie in vergelijking met de natte sectie uit het initiële ontwerp (zie Figuur 1 in hoofdstuk 1) er voor dat de dieptegemiddelde stroomsnelheid slechts beperkt toeneemt. Tabel 2 geeft een samenvatting van de voor de dimensionering van oever- en bodembescherming beschouwde dieptegemiddelde stroomsnelheid.



Figuur 4 – Dwarsprofiel IJzer in maximale toestand

Tabel 2 – Dieptegemiddelde stroomsnelheid ter plaatse van de brug

	Maximaal scenario
Waterstand	+4.82 mTAW
Debiet	101.7 m ³ /s
Natte sectie	99.4 m ²
Dieptegemiddelde stroomsnelheid	1.02 m/s

2.2 Stroming ten gevolge van hoofdschroef

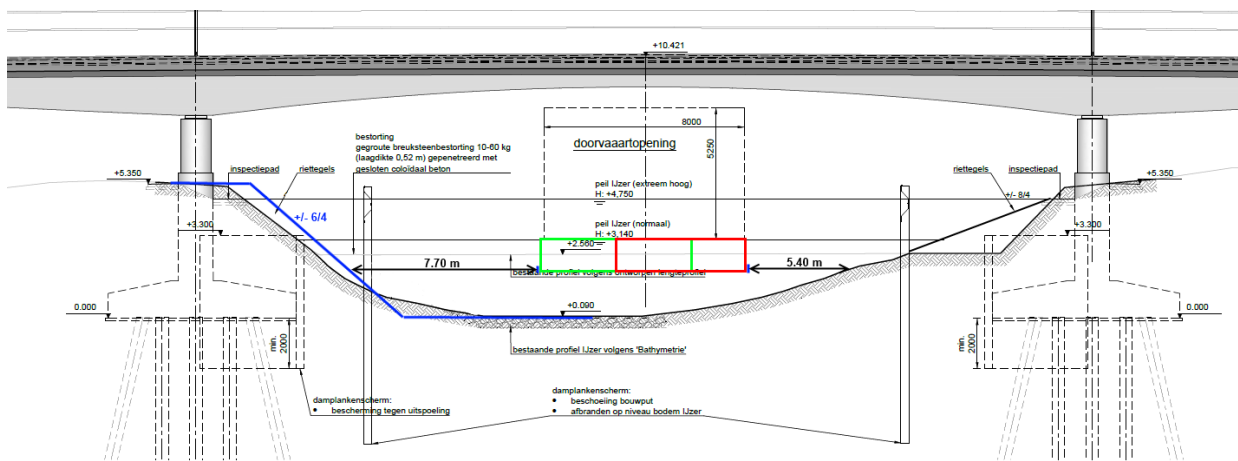
In vergelijking met de initiële dimensionering van de oever- en bodembescherming blijft het huidige bodempeil van +0.09 mTAW ter plaatse van de nieuwe brug behouden. Dit heeft tot gevolg dat verticale afstand tussen de as van de schroef en de bodem toeneemt, waardoor de maximale waarde van de stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de hoofdschroef zal afnemen. Tabel 3 geeft de berekening van de stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de hoofdschroef. Op deze wijze wordt een maximale waarde voor de stroomsnelheid boven de bodem berekend die gelijk is aan 1.30 m/s. Deze waarde is beduidend lager dan de stroomsnelheid boven de bodem van 2.36 m/s uit het initiële ontwerp.

Tabel 3 – 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
Waterdiepte	H	2.99 m
Verticale afstand van de as van de schroef tot de bodem	d_p	1.91 m
Horizontale afstand van de schroef tot de plaats met maximale stroomsnelheid aan de bodem	x_{bp}	3.29 m
Maximale stroomsnelheid boven de bodem	u_{bp}	1.30 m

2.3 Strooming ten gevolge van boegschroef

In het gewijzigde ontwerp van de oevers van de IJzer onder de nieuwe brug blijft de huidige taludhelling 6/4 aan linkeroever en de taludhelling 8/4 aan rechteroever behouden. Hierbij zijn de oevers verder verwijderd van de beide zijkanten van de doorvaartopening in vergelijking met het initiële ontwerp. Indien een schip aan de linkerszijde van de doorvaartopening vaart (zie groene rechthoek in Figuur 5) bedraagt de afstand tussen schip en oever +/- 7.70 m en indien het schip aan de rechterzijde van de doorvaartopening vaart (zie rode rechthoek in Figuur 5) bedraagt de afstand tussen schip en oever +/- 5.40 m. Dit is groter dan de afstand van 3.35 m uit het initiële ontwerp, waardoor de stroomsnelheid tegen de oever ook lager zal zijn dan in het initiële ontwerp.



Figuur 5 – Bepaling afstand tussen schip en oever voor een schip dat aan linkerszijde van de doorvaartopening vaart (groene rechthoek) en een schip dat aan rechterzijde van de doorvaartopening vaart (rode rechthoek)

Tabel 4 geeft de berekening van de stroomsnelheid aan de bodem ten gevolge van de boegschroef bij het in rekening brengen van deze grotere afstanden tussen schip en oever. Hierbij is ook de taludhelling 6/4 aan linkeroever en de taludhelling 8/4 aan rechteroever in rekening gebracht. Op deze wijze wordt een stroomsnelheid aan de bodem berekend gelijk aan 1.00 m/s voor de toestand waarbij het schip aan linkerszijde van de doorvaartopening vaart en een stroomsnelheid aan de bodem gelijk aan 1.50 m/s voor de toestand waarbij het schip aan de rechterzijde van de doorvaartopening vaart. Deze waarden zijn beduidend lager dan de stroomsnelheid boven de bodem van 2.31 m/s uit het initiële ontwerp.

Tabel 4 – Berekening stroomsnelheid aan bodem ten gevolge van boegschroef

		Schip vaart aan linkerzijde doorvaartopening	Schip vaart aan rechterzijde doorvaartopening
Geïnstalleerd motorvermogen	P_{motor}	120 kW	120 kW
Vermogen geleverd door de schroef	$P_{schroef}$	120 kW	120 kW
Echte diameter schroef	D_0	0.60 m	0.60 m
Effectieve diameter van de schroef	D_p	0.60 m	0.60 m
Stroomsnelheid juist achter de schroef	v_p	7.18 m/s	7.18 m/s
Afstand langs as van jet tussen het talud en de uitstroomopening van de boegschroef	L	7.70 m	5.40 m
Helling oever	α	33.7° (6/4)	26.6° (8/4)
Parameter	K	6.84	3.85
X-coördinaat van de locatie op de helling waar de maximale stroomsnelheid berekend met behulp van de formulering van vrije uitstroming na een propeller zich voordoet	x_{vmax}	7.21 m	4.84 m
Maximale stroomsnelheid aan de bodem	v_{bp}	1.00 m/s	1.50 m/s

3 Dimensionering oeverbescherming en bodembescherming

3.1 Oeverbescherming uit breuksteen

Analoog aan de initiële dimensionering wordt de dimensionering van de oeverbescherming in het gewijzigde ontwerp uitgevoerd aan de hand van de formulering volgens Pilarczyk op basis van de stroming ten gevolge van waterafvoer en op basis van de stroming aan de bodem ten gevolge van de boegschroef. De resultaten van deze dimensionering op basis van de in hoofdstuk 2 gewijzigde hydraulische belastingen worden gegeven in Tabel 5. Uit deze tabel volgt dat om te weerstaan aan deze belastingen op beide oevers een erosiebescherming uit breuksteen nodig is. Het maximaal mediaan benodigde breuksteengewicht bedraagt 74 kg. Voor dit breuksteengewicht volgt uit Tabel 1 in hoofdstuk 1 dat een breuksteensortering 15-120 kg nodig is als oeverbescherming. De benodigde dikte voor deze oeverbescherming, namelijk 0.62 m is groter dan de dikte van 0.52 m van de breuksteen 10-60 kg gepenetreerd met colloïdaal beton uit het initiële ontwerp. Alternatief kan ook breuksteen 10-60 kg gepenetreerd met colloïdaal beton voorzien worden als oeverbescherming, aangezien deze ook kan weerstaan aan de op de oever optredende hydraulische belastingen.

Tabel 5 – Dimensionering oeverbekleding

		Waterafvoer		Boegschroef	
		Linkeroever	Rechteroever	Linkeroever	Rechteroever
U	m/s	1.02	1.02	1.00	1.50
Ψ	-	0.035	0.035	0.035	0.035
φ	-	1.0	1.0	1.0	1.0
K_t	-	1.0	1.0	2.5	2.5
Bodempeil	mTAW	0.09	0.09	0.09	0.09
Waterpeil	mTAW	4.82	4.82	3.08	3.08
Waterdiepte	m	4.73	4.73	2.13	2.13
α	°	33.7° (6/4)	26.6° (8/4)	33.7° (6/4)	26.6° (8/4)
Δ	-	1.65	1.65	1.65	1.65
D_{n50}	m	0.02	0.01	0.28	0.30
M₅₀	kg	< 1	< 1	59	74

3.2 Bodembescherming uit breuksteen

De als bodembescherming te voorziene breuksteen wordt, analoog als bij de initiële dimensionering van de bodembescherming bepaald aan de hand van de formulering volgens Pilarczyk voor stroming ten gevolge van waterafvoer en aan de hand van de Shields-formulering aangepast voor stralen voor de stroming ten gevolge van de hoofdschroef. De resultaten van deze dimensionering op basis van de in hoofdstuk 2 gewijzigde hydraulische belastingen worden gegeven in Tabel 6 en Tabel 7.

Tabel 6 – Dimensionering bodembescherming uit breuksteen aan de hand van de formulering volgens Pilarczyk

		Waterafvoer
U	m/s	1.02
ψ	-	0.035
ϕ	-	1.0
K_t	-	1.0
Bodempeil	mTAW	0.09
Waterpeil	mTAW	4.82
Waterdiepte	m	4.73
α	°	0
Δ	-	1.65
D_{n50}	m	< 0.01
M_{50}	kg	< 1

Tabel 7 – Dimensionering bodembescherming uit breuksteen aan de hand van de Shields formulering aangepast voor stralen

		Hoofdschroef
U	m/s	1.30
r	-	0.40
Δ	-	1.65
D_{n50}	m	0.05
M_{50}	kg	< 1

Uit deze tabellen volgt een benodigd breuksteengewicht lager dan 1 kg om te kunnen weerstaan aan deze beide hydraulische belastingen. In theorie is bijgevolg geen bodembescherming nodig. Voorgesteld wordt om de oeverbescherming die aan de beide oevers wordt voorzien op de bodem van de IJzer door te trekken, zodat deze kan dienen als teenbestorting voor de oeverbescherming. Deze teenbestorting blijft namelijk wel benodigd bij toepassing van een oeverbekleding ter plaatse van brugpijlers (zie initieel ontwerp van de oever- en bodembescherming).

3.3 Oeverbescherming uit riettegels

In het aangepaste ontwerp worden aan beide oevers boven het normaal waterpeil riettegels voorzien. Figuur 6 links geeft een voorstelling van een riettegel. Om in te schatten of riettegels kunnen weerstaan aan de optredende belastingen worden deze als doorgroeisteen of grasdal beschouwd. Hierbij wordt opgemerkt dat het kleiner aantal openingen in een riettegel in vergelijking met een grasdal (zie rechts in Figuur 6) maakt dat deze vermoedelijk eerder als steenzetting kan beschouwd worden dan als een grasdal.



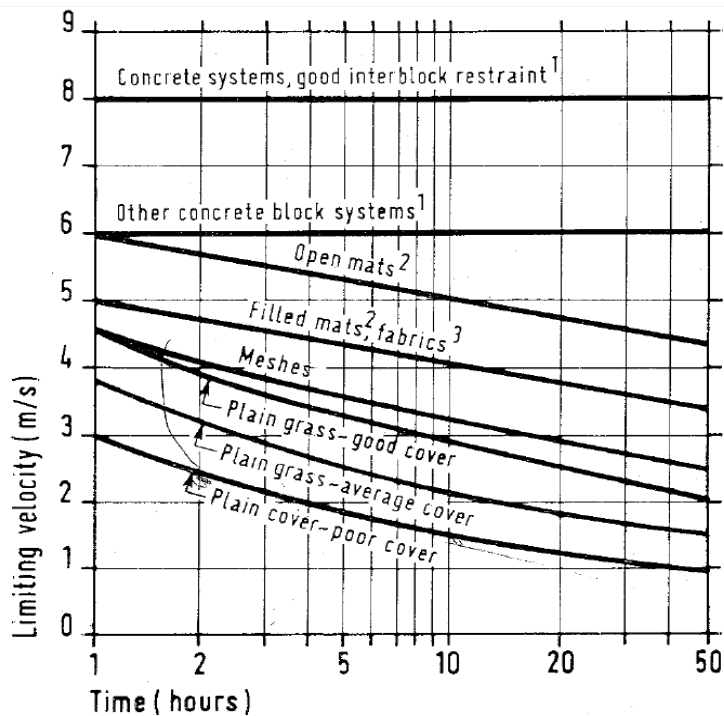
Figuur 6 – Riettegel (links) en doorgroeistenen of grasdallen (rechts)

Wat doorgroeistenen betreft vermeldt het Technisch Rapport Steenzettingen (TAW, 2003b) dat proeven in Engeland hebben uitgewezen dat een bekleding met doorgroeistenen een grotere sterkte heeft dan een grasbekleding, maar dat de aanwezigheid van de beton de horizontale wortelstructuur van het gras beperkt. Hierdoor zal de initiële schade aan de grasmat onder invloed van stroming zich sneller voordoen. De handreiking steenzettingen (Deltares, 2015) vermeldt dat aangenomen wordt dat doorgroeistenen even stabiel zijn dan een grasbekleding.

Wat ontwerp betreft vermeldt het Technisch Rapport Steenzettingen (TAW, 2003b) dat de technische toepasbaarheid van doorgroeistenen dient bepaald te worden op basis van de rekenregels voor een grasbekleding, waarbij een goede grasbekleding mag beschouwd worden. In het achtergrondrapport bij het Technisch Rapport Steenzettingen (TAW, 2003a) wordt hiervoor verwezen naar onderzoek in Engeland dat gerapporteerd is in Hewlett *et al.* (1987). Figuur 7 uit Hewlett *et al.* (1987) geeft een voorstelling van de maximaal toegelaten stroomsnelheid voor grasmatten en versterkte grasmatten, bepaald op basis van experimenten op schaal 1:1. Uit deze figuur volgt dat een goed verankerde met beton versterkte grasmatten kan weerstaan aan stroomsnelheden tot 8 m/s. Een niet verankerde met beton versterkte grasmatten kan weerstaan aan stroomsnelheden tot 6 m/s. De resultaten van de experimenten in de bijlage van Hewlett *et al.* (1987) tonen aan dat met beton versterkte grasmatten zeker kunnen weerstaan aan stroomsnelheden tot 4 m/s. Vanaf hogere stroomsnelheden kan erosie optreden, voornamelijk erosie van de bodem onder de betontegels. Deze stroomsnelheid komt overeen met de waarden uit Hewlett *et al.* (1987) die tijdens terreinmetingen opgemeten zijn en waarbij erosie is opgetreden bij 3 à 4 m/s, wat juist hoger is dan de maximaal toegelaten stroomsnelheid van een gewone grasmatten van 2 à 3 m/s.

Hieruit volgt bijgevolg dat doorgroeitegels zeker kunnen weerstaan aan stroomsnelheden tot 3 à 4 m/s en mogelijks tot iets hogere waarden tot maximaal 6 m/s.

Figuur 7 – Maximaal toegelaten stroomsnelheid voor grasbekleding en versterkte grasmatten



Voor ontwerp van blokkenmatten vermeldt de handreiking steenzettingen (Deltares, 2015) volgende formulering voor dimensionering onderhevig aan langsstroming:

$$\Delta D \geq 0.44 \frac{u^2}{g}$$

Met:

- D	Dikte toplaag	[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	Stroomsnelheid	[m/s]
- g	Valversnelling (=9.81 m/s ²)	[m/s ²]

Het toepassing van deze formulering bij een stroomsnelheid van 1.02 m/s ten gevolge van waterafvoer in het maximale scenario geeft een dikte van de blokkenmat die groter moet zijn dan 0.01 m. Alternatief kan voor ontwerp van een blokkenmat ook de formulering volgens Pilarczyk toegepast worden met een waarde voor $\psi = 0.070$ en een waarde voor $\phi = 0.50$ (voor een continue toplaag). Tabel 8 geeft de resultaten van de dimensionering van een blokkenmat aan de hand van de formulering volgens Pilarczyk. Uit deze tabel volgt een minimale benodigde dikte van 0.02 m.

De dikte van riettegels bedraagt 0.15 m. Op basis van de dimensionering van de dikte van de riettegels als blokkenmatten is dit ruim voldoende om te weerstaan aan de stroming ten gevolge van waterafvoer. Indien de riettegels beschouwd worden als doorgroei tegels volgt dat deze kunnen weerstaan aan stroomsnelheden tot 3 à 4 m/s en mogelijks tot iets hogere waarden van 6 m/s. Dit is beduidend hoger dan de stroomsnelheid in de IJzer ten gevolge van waterafvoer in het maximale scenario.

Tabel 8 – Dimensionering blokkenmat aan de hand van de formulering volgens Pilarczyk

		Waterafvoer
U	m/s	1.02
ψ	-	0.070
ϕ	-	0.5
K_t	-	1.0
Bodempeil	mTAW	0.09
Waterpeil	mTAW	4.82
Waterdiepte	m	73
α	°	33.7° (6/4)
K_s	-	0.53
K_H	-	1.61
Δ	-	1.65
D_{n50}	m	0.02

4 Conclusie

In opdracht van Afdeling Expertise Beton en Staal (EBS; contactpersoon: Ruth Reynders) heeft het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) in 2018 een ontwerp van de oever- en bodembescherming voor een nieuwe brug over de IJzer te Diksmuide uitgevoerd. Hierbij werd voorzien om onder de brug het originele bodempeil van de IJzer op +0.95 mTAW en de originele taludhellingen van 6/4 van de IJzer te herstellen en deze te stabiliseren met een oeverbescherming. Het ontwerp van de bodembescherming door WL werd gerapporteerd in Verelst *et al.* (2018). In het ontwerp van WL werd voorgesteld om op de beide oevers een breuksteensortering 10-60 kg gepenetreerd met gesloten colloïdaal beton te voorzien. Voor de bodembescherming volstond een breuksteensortering 40-200 kg, maar uit constructieve en financiële overwegingen kon ook geselecteerd worden om de oeverbescherming voor de taluds onder de brugpijler door te trekken op de bodem van de IJzer ter plaatse van de nieuwe brug.

Bij het verdere ontwerp van de brug is gebleken dat het huidige dwarsprofiel van de IJzer niet al te veel aangepast mag worden. Om die reden werd door EBS het volgende voorgesteld:

- Het huidige bodempeil van de IJzer blijft behouden op +0.090 mTAW.
- Het gedeelte van de linkeroever onder het normaal waterpeil wordt verstevigd met breuksteen gepenetreerd met colloïdaal beton. De taludhelling van de linkeroever blijft behouden op 6/4.
- De huidige taludhelling van de rechteroever blijft behouden op 8/4, en wordt niet verstevigd.
- Boven het normaal waterpeil worden op de beide oevers riettegels voorzien. Op de niet verstevigde rechteroever lopen de riettegels echter door tot het peil +2.56 mTAW, wat beperkt lager is dan het normale waterpeil.

EBS vraagt met betrekking tot dit ontwerp aan WL het volgende:

1. Is dit een aanvaardbaar ontwerp?
2. Hoe ver moet de breuksteensortering gepenetreerd met colloïdaal beton doorlopen in het dwarsprofiel van de IJzer?
3. In Verelst *et al.* (2018) is voorgesteld om, bij toepassing gepenetreerde breuksteen met colloïdaal beton, in de lengterichting een overgangszone van 3 m te voorzien met breuksteen die niet gepenetreerd is. Dient deze ook in dwarsrichting voorzien te worden?

Om deze vragen te beantwoorden is vooreerst een update van de optredende hydraulische belastingen uitgevoerd. Tijdens de recente watersnood van november 2023 werden beduidend hogere debieten te Keiem en hogere waterstanden te Diksmuide opgemeten dan beschouwd voor de initiële dimensionering van de oever- en bodembescherming. Deze debieten en waterstanden zijn beschouwd in het nieuwe maximale scenario. Echter het huidige dwarsprofiel van de IJzer onder de nieuwe brug is beduidend groter dan het profiel uit het initiële ontwerp. Ondanks het beduidend hogere debiet in het nieuwe maximale scenario, zorgt de toename van de natte sectie er voor dat de dieptegemiddelde stroomsnelheid slechts beperkt toeneemt van 0.99 m/s naar 1.02 m/s.

Het behouden van het huidige profiel van de IJzer zorgt, in vergelijking met het initiële ontwerp, voor een lager bodempeil en een grotere afstand tussen de zijkant van de doorvaartopening en de oever. Wat de belasting op de bodem en de oever ten gevolge van hoofdschroef en boegschroef van het schip betreft geeft dit aanleiding tot een verlaging van de stroomsnelheid op de bodem ten gevolge van de hoofdschroef van 2.36 m/s naar 1.30 m/s en tot een verlaging van de stroomsnelheid aan de oever ten gevolge van de boegschroef van 2.31 m/s naar 1.50 m/s.

Uit de dimensionering van de oeverbescherming voor beide oevers onderhevig aan stroming ten gevolge van waterafvoer en stroming ten gevolge van de boegschroef volgt dat een breuksteensortering 15-120 kg nodig is om te weerstaan aan deze hydraulische belastingen. De benodigde dikte voor deze oeverbescherming, namelijk 0.62 m is beperkt groter dan de dikte van 0.52 m van de breuksteensortering 10-60 kg gepenetreerd

met colloïdaal beton uit het initiële ontwerp. Aangezien de breuksteensorteringen 5-40 kg of 10-60 kg gepenetreerd met colloïdaal beton ook kunnen weerstaan aan de op de oever optredende hydraulische belastingen, kunnen deze vanuit constructief en/of financieel oogpunt ook worden overwogen als oeverbescherming. Voorgesteld wordt om op de beide oevers één van deze oeverbeschermingen te voorzien.

Uit de dimensionering van de bodembescherming onderhevig aan stroming ten gevolge van waterafvoer en stroming ten gevolge van de hoofdschroef volgt dat in theorie geen breuksteen nodig is. Voorgesteld wordt om de oeverbescherming die aan de beide oevers wordt voorzien ook op de bodem van de IJzer door te trekken, zodat deze kan dienen als teenbestorting voor de oeverbescherming. Deze teenbestorting blijft namelijk wel nodig bij toepassing van een oeverbekleding ter plaatse van brugpijlers (zie initieel ontwerp van de oever- en bodembescherming). Aangezien voor de beide oevers een oeverbescherming wordt voorzien, wordt aangeraden om de volledige bodem tussen de beide oevers te voorzien van een bodembescherming.

Wat betreft de uitgestrektheid van de bodembescherming en de oeverbescherming opwaarts en afwaarts van de brugpijler wordt voorgesteld om de zone van 8 m opwaarts tot 8 m afwaarts van de damplanken van de bouwkuip van de brugpijler te voorzien van erosiebescherming. Dit is dezelfde zone als voorzien werd in het initiële ontwerp van de oever- en bodembescherming.

Boven het normale waterpeil wordt in het aangepaste ontwerp voorgesteld om aan beide oevers riettegels te voorzien. Om na te gaan of deze riettegels kunnen weerstaan aan de stroming ten gevolge van waterafvoer in de maximale toestand, is een dimensionering van de riettegels als blokkenmatten uitgevoerd. Uit deze dimensionering volgt dat de dikte van 0.15 m van riettegels ruim voldoende is om te weerstaan aan de stroming ten gevolge van waterafvoer in de maximale toestand. Riettegels kunnen ook beschouwd worden als doorgroei tegels. In dit geval geldt dat doorgroei tegels kunnen weerstaan aan stroomsnelheden tot 3 à 4 m/s en mogelijks tot iets hogere waarden van 6 m/s. Dit is beduidend hoger dan de stroomsnelheid in de IJzer ten gevolge van waterafvoer. Bijgevolg kan besloten worden dat riettegels kunnen weerstaan aan de stroming ten gevolge van waterafvoer in de maximale toestand. Aangezien de stroomsnelheden waaraan riettegels kunnen weerstaan beduidend groter zijn dan de stroomsnelheden ten gevolge van boegschroef tegen beide oevers, kan omwille van esthetische redenen er voor geadviseerd worden om de riettegels aan de beide oevers tot een peil lager iets dan het normaal waterpeil aan te brengen. Om esthetische redenen zouden de riettegels bijvoorbeeld voorzien kunnen worden tussen een peil iets lager dan het normale waterpeil van de IJzer en het kruinpeil van de oever.

Hieruit volgen de volgende antwoorden op de vragen van EBS vraagt met betrekking tot aangepaste ontwerp van de bodembescherming:

1. Is dit een aanvaardbaar ontwerp?

Er worden in dit rapport een aantal wijzigingen aan dit aangepaste ontwerp voorgesteld, namelijk het voorzien van een oeverbekleding op beide oevers en een bodembescherming tussen de beide oevers. Een oeverbescherming op beide oevers is nodig omdat in de huidige toestand geen brug aanwezig is en schepen in het midden van de IJzer varen zonder gedwongen te worden om binnen een doorvaartvenster te varen. In het ontwerp met brug zullen schepen die, zowel aan de linker- als aan de rechteroever, aan de zijkant van het doorvaartvenster varen, de boegschroef gebruiken om meer naar het midden van het doorvaartvenster te manoeuvreren. Hierdoor kunnen de beide oevers onder de brug belast worden door de stroming ten gevolge van de hoofdschroef.

2. Hoe ver moet de breuksteensortering gepenetreerd met colloïdaal beton doorlopen in het dwarsprofiel van de IJzer?

Aangezien op de beide oevers een oeverbescherming wordt voorzien en de bodembescherming dient als teenbestorting voor deze oeverbescherming, wordt voorgesteld om de volledige bodem onder de brug tussen de beide oevers te voorzien van een bodembescherming.

3. In Verelst *et al.* (2018) is voorgesteld om, bij toepassing gepenetreerde breuksteen met colloïdaal beton, in de lengterichting een overgangszone van 3 m te voorzien met breuksteen die niet gepenetreerd is. Dient deze ook in dwarsrichting voorzien te worden?

Gezien het antwoord op de vorige vraag is deze vraag niet meer relevant.

5 Referenties

- Belgisch Instituut voor Normalisatie (BIN).** (2002). NBN EN 13383-1. Waterbouwsteen – Deel 1: Specificatie.: Brussel, Belgium
- Deltares.** (2015). Handreiking Dijkbekledingen. Deel 2: Steenzettingen.
- Expertise Beton en Staal.** (2023). Verbinding tussen N35 en N369 ter ontlasting van doortocht N35 Diksmuide. Brug in de N35f over IJzer te Diksmuide. Algemene zichten. Plan ABS00385-001 dd 31-10-2023.
- Hewlett, H.W.; Boorman, L.A.; Bramley, M.E.** (1987). Design of reinforced grass waterways. CIRIA
- Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW).** (2003a). Technisch rapport steenzettingen. Achtergronden. Rapport DWW-2003-097
- Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW).** (2003b). Technisch rapport steenzettingen. Ontwerp. Rapport DWW-2003-097
- 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. Available at: <http://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=301706>

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