



Vlaanderen
is wetenschap



24_037_1
WL rapporten

Vispassage op de Dender te Aalst

Hydraulische ontwerp

DEPARTEMENT
MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

Vispassage op de Dender te Aalst

Hydraulisch ontwerp

Visser, K.P.; Vercruysse, J.

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 2025
D/2025/3241/413

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Visser, K.P.; Vercruysse, J. (2025). Vispassage op de Dender te Aalst: Hydraulisch ontwerp. Versie 4.0. WL Rapporten, 24_037_1. Waterbouwkundig Laboratorium, Antwerpen.

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

Documentidentificatie

Opdrachtgever:	De Vlaamse Waterweg afdeling Regio West	Ref.:	WL2025R24_037_1
Keywords (3-5):	Vispassages; Vertical slot; Dender		
Kennisdomeinen:	Vispassages > Vertical slot		
Tekst (p.):	32	Bijlagen (p.):	5
Vertrouwelijk:	☒ Nee	☒ Online beschikbaar	

Auteur(s):	Visser, K.P.
------------	--------------

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Vercruysse, J.	Getekend door: Jeroen Vercruysse (Signa) Getekend op: 2025-12-15 15:29:02 +01:0 Reden: Ik keur dit document goed  
Projectleider:	Visser, K.P.	Getekend door: Klaas Visser (Signature) Getekend op: 2025-12-15 11:06:47 +01:0 Reden: Ik keur dit document goed  

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Bellafkih, K.	Getekend door: Bellafkih Abdelkarim Getekend op: 2025-12-15 10:59:05 +01:0 Reden: Ik keur dit document goed  
-----------------	---------------	---

Abstract

De Vlaamse Waterweg afdeling Regio West (DVW) voorziet om de stuwsluiscomplexen op het Vlaamse deel van de Dender te vernieuwen. Aangezien de huidige stuwsluiscomplexen knelpunten voor vismigratie vormen wordt bij elk van de te vernieuwen complexen tevens een nieuwe vispassage aangelegd. DVW heeft aan het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) gevraagd om het hydraulisch ontwerp voor deze nieuwe vispassages in samenwerking met het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek (INBO) uit te werken.

Het onderhavige rapport beschrijft de dimensionering en ruimtelijke inpassing van de vispassage te Aalst. Het ontwerp bestaat uit een vertical slotpassage met 20 bekkens, een opwaartse instroom met afsluitconstructie en monitoringszone, een afwaartse inbreng van een toegevoegd debiet en een loodrechte monding op circa 30 m afwaarts van de as van de stuwkleppen.

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	IV
Lijst van de tabellen.....	VI
Lijst van de figuren	VII
1 Inleiding	1
1.1 Achtergrond	1
1.2 Doelstelling.....	2
1.3 Leeswijzer.....	2
2 Uitgangspunten	3
2.1 Ruimtelijke randvoorwaarden	3
2.1.1 Stuwen	3
2.1.2 Locatie en beschikbare ruimte	5
2.2 Hydraulische randvoorwaarden.....	7
2.2.1 Streef- en alarmpeilen	7
2.2.2 Meetlocaties en histogrammen.....	7
2.2.3 Debieten	8
2.2.4 Waterpeilen	9
2.3 Ontwerpcriteria.....	10
2.3.1 Werkingsperiode.....	10
2.3.2 Passeerbaarheid	11
2.3.3 Attractiviteit (monding)	12
3 Dimensionering vispassage	15
3.1 Vispassagetype.....	15
3.2 Bekkens en slotwanden	16
3.3 Debiet.....	19
3.4 Bodemsubstraat.....	20
4 Ruimtelijke inpassing.....	22
5 Instroom	24
6 Toegevoegd debiet	26
7 Moning	29
8 Erosiebescherming	31
9 Referenties	32

Bijlage 1	Controle waterstandfluctuatie	B1
	Maatgevende scenario's.....	B1
	Toetsingscriteria	B1
	Verval en stroomsnelheid.....	B2
	Energie dissipatie bekkens	B4

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Streef- en alarmpeilen te Aalst	7
Tabel 2 – Histogram gemeten waterstanden debiet.....	8
Tabel 3 – Maatgevende debieten.....	8
Tabel 4 – Maatgevende waterpeilfluctuaties tijdens periode optimale werking	9
Tabel 5 – Biologische ontwerpcriteria passeerbaarheid vispassage	12
Tabel 6 – Dimensionering bekkens en slotwanden.....	16
Tabel 7 – Slotwandhoogtes en bodemhoogtes in de sloten*	19
Tabel 8 – Maatgevende scenario's waterstandfluctuatie bij normale werking	B2

Lijst van de figuren

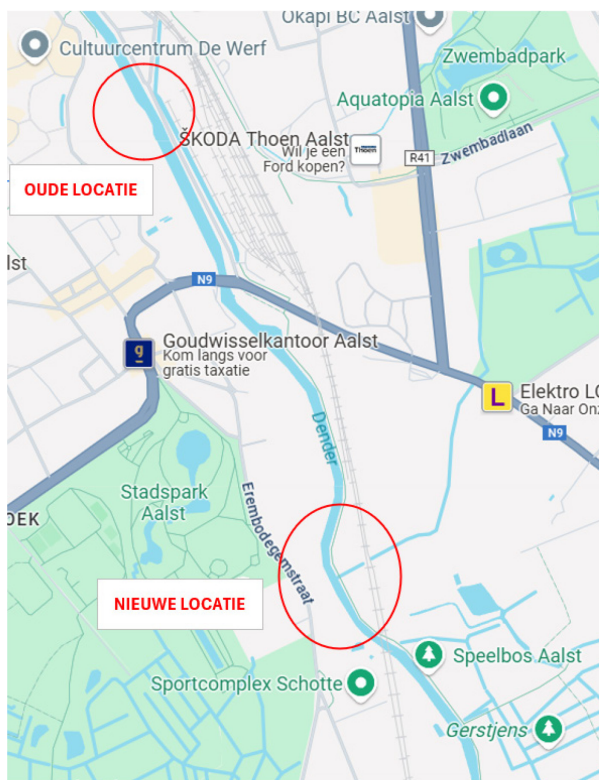
Figuur 1 – Oude locatie en nieuwe locatie stuwsluiscomplex op de Dender te Aalst	1
Figuur 2 – Balgstuwontwerp voor de nieuwe stuwen op de Dender	3
Figuur 3 – Huidig ontwerp nieuwe stuwen Aalst met maatgevende parameters	4
Figuur 4 – Luchtfoto nieuw aangelegde stuwen en sluis de Aalst	5
Figuur 5 – Grondplan ontwerp vispassage te Aalst uit de vergunningsaanvraag	6
Figuur 6 – Enkele doelsoorten (Foto's: VILDA, Rollin Verlinde en Yves Adams*)	10
Figuur 7 – Relatie migratielimietlijn en monding vispassage	12
Figuur 8 – Zone ligging migratielimietlijn bij normale werking (tot $Q_{10\%}$)	14
Figuur 9 – Maatgevende parameters dimensionering bekken en slotwanden (naar: Larinier, 2002)	16
Figuur 10 – Dwarsdoorsnede B-B'' bekkenontwerp (nr. 17) met slotwanden en bekleding	17
Figuur 11 – Voorbeeld op de Regge te Overwater (NL) van een vertical slot-vispassage geïntegreerd in een nevengeul. Links: overzicht ligging (Foto: Waterschap Regge en Dinkel) Rechts: Detailopname van een slot (Foto: OVB). Overgenomen uit AMINAL (2005)	18
Figuur 12 – Schematisch lengteprofiel met maatgevende hoogtes	19
Figuur 13 – Debiet door de vispassage bij fluctuatie in het opwaartse waterpeil	20
Figuur 14 – Voorbeeld toepassing rolstenen in de vispassage te Sint-Baafs-Vijve	21
Figuur 15 – Ruimtelijke inpassing en lengteprofiel hydraulisch ontwerp vispassage	22
Figuur 16 – Niet weerhouden voorkeurs ontwerp	23
Figuur 17 – Tracé eventuele toekomstige aanpassing naar een parallelle monding	23
Figuur 18 – Dimensionering instroom (maatvoering in meters en mTAW)	24
Figuur 19 – Voorbeelden van drijvende drijfvuil werende constructies	25
Figuur 20 – Dimensionering toegevoegd debiet (maatvoering in meters en mTAW)	26
Figuur 21 – Voorbeeld voorkeur uitvoering wanden toegevoegd debiet	28
Figuur 22 – Dimensionering monding en het mondingskanaal (maatvoering in meters en mTAW)	29
Figuur 23 – Locatie en type erosiebescherming	31
Figuur 24 – Hydraulisch verval over elk slot bij de maatgevende waterstandscenario's	B3
Figuur 25 – Gemiddelde stroomsnelheid in elk slot bij de maatgevende waterstandscenario's	B3
Figuur 26 – Energie dissipatie per bekken bij de maatgevende waterstandscenario's	B5

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

De Vlaamse Waterweg afdeling Regio West (DVW) voorziet om de stuwsluiscplexen op het Vlaamse deel van de Dender te vernieuwen. Aangezien de huidige stuwsluiscplexen knelpunten vormen voor vismigratie, wordt bij elk van de te vernieuwen complexen tevens een nieuwe vispassage aangelegd.

Het stuwsluiscplex te Aalst is één van de complexen die vernieuwd zal worden. Het vernieuwde stuwsluiscplex wordt in het geval van Aalst vanwege ruimtegebrek ter plaatse van de oude locatie circa 1 kilometer opwaarts aangelegd (zie Figuur 1). De nieuwe stuwen en sluis werden inmiddels al aangelegd op de nieuwe locatie, zie luchtfoto rechtsonder in Figuur 1.



bron: Google-Maps



OUDE LOCATIE



NIEUWE LOCATIE

Figuur 1 – Oude locatie en nieuwe locatie stuwsluiscplex op de Dender te Aalst

Voor de vergunningsaanvraag (ingediend in 2014) werd in 2009 een ontwerp voor de nieuwe vispassage uitgewerkt. Daarbij werd toen gekozen voor een semi-natuurlijke nevengeul. Mede vanwege toenemende droogte in de afgelopen jaren bleek echter dat dit ontwerp mogelijk een vrij hoog basis debiet heeft waardoor deze vaker zal moeten sluiten met oog op peilbeheer. Daarnaast bleek uit ervaringen met soortelijke ontwerpen op de Bovenschelde dat dit type sterk erosie gevoelig is (Verelst *et al.*, 2014).

Om deze redenen werd door het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) in samenwerking met het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek (INBO) een algemene studie uitgevoerd naar het meest optimale ontwerp voor vispassages op het Vlaamse deel van de Dender uitgaande van deze 'nieuwe' hydraulische condities en ervaringen, zie Visser *et al.* (2024).

Uit deze studie bleek dat in het geval van regenrivieren met een relatief lage basisafvoer zoals de Dender beter gewerkt wordt met vertical slotpassages en een toegevoegd debiet. Daarnaast bleek uit die studie en ook uit andere internationale studies dat parallelle mondingen dicht aan het knelpunt met oog op effectiviteit de voorkeur hebben boven loodrechte mondingen.

DVW heeft daarom aan het WL gevraagd om in samenwerking met INBO het hydraulisch ontwerp voor de vispassages te Aalst aan te passen op basis van deze nieuwe inzichten. Een belangrijk knelpunt daarbij vormt echter de bestaande vergunning. Deze vergunning laat namelijk niet toe om alle gewenste aanpassingen door te voeren. Het uitvoerbaar houden van de bestaande vergunning is een belangrijke randvoorwaarde voor DVW, om de afwerking van de vispassage en overige projectonderdelen niet afhankelijk te maken van de onzekerheden die een nieuwe vergunningsaanvraag met zich meebrengen. Uitgaande van de vergunningscriteria wordt daarom gestreefd naar een ontwerp dat zo veel mogelijk is afgestemd op het voorkeursontwerp dat ook op de andere locaties langs de Dender toegepast wordt.

1.2 Doelstelling

Het onderhavig rapport beschrijft het aangepaste hydraulische ontwerp met bijbehorende hydraulische randvoorwaarden en ontwerpcriteria voor de nieuwe vispassage te Aalst. Uitgaande van de criteria uit de bestaande vergunning wordt het oorspronkelijke ontwerp hierbij zo veel mogelijk afgestemd op het voorkeursontwerp uit de algemene hydraulische studie (Visser *et al.*, 2024).

Dit hydraulische ontwerp dient als uitgangspunt voor de uitwerking van het bouwkundig ontwerp door een studiebureau. Het bouwkundig ontwerp vormt daarmee dus geen onderdeel van de onderhavige studie, maar de bouwkundige randvoorwaarden en mogelijkheden werden tijdens de studie wel op hoofdlijnen overlegd en afgetoetst.

1.3 Leeswijzer

Na deze inleiding worden in hoofdstuk 2 eerst de uitgangspunten (randvoorwaarden en ontwerpcriteria) opgesomd en toegelicht zoals toegepast in de ontwerpstudie.

Hoofdstuk 3 beschrijft vervolgens de dimensionering van de vispassage zelf, namelijk de bekkens, sloten en het bodemsubstraat op basis van de uitgangspunten. De ruimtelijke inpassing wordt gegeven in hoofdstuk 4.

Vervolgens worden enkele bijzondere onderdelen uit het ontwerp in meer detail toegelicht:

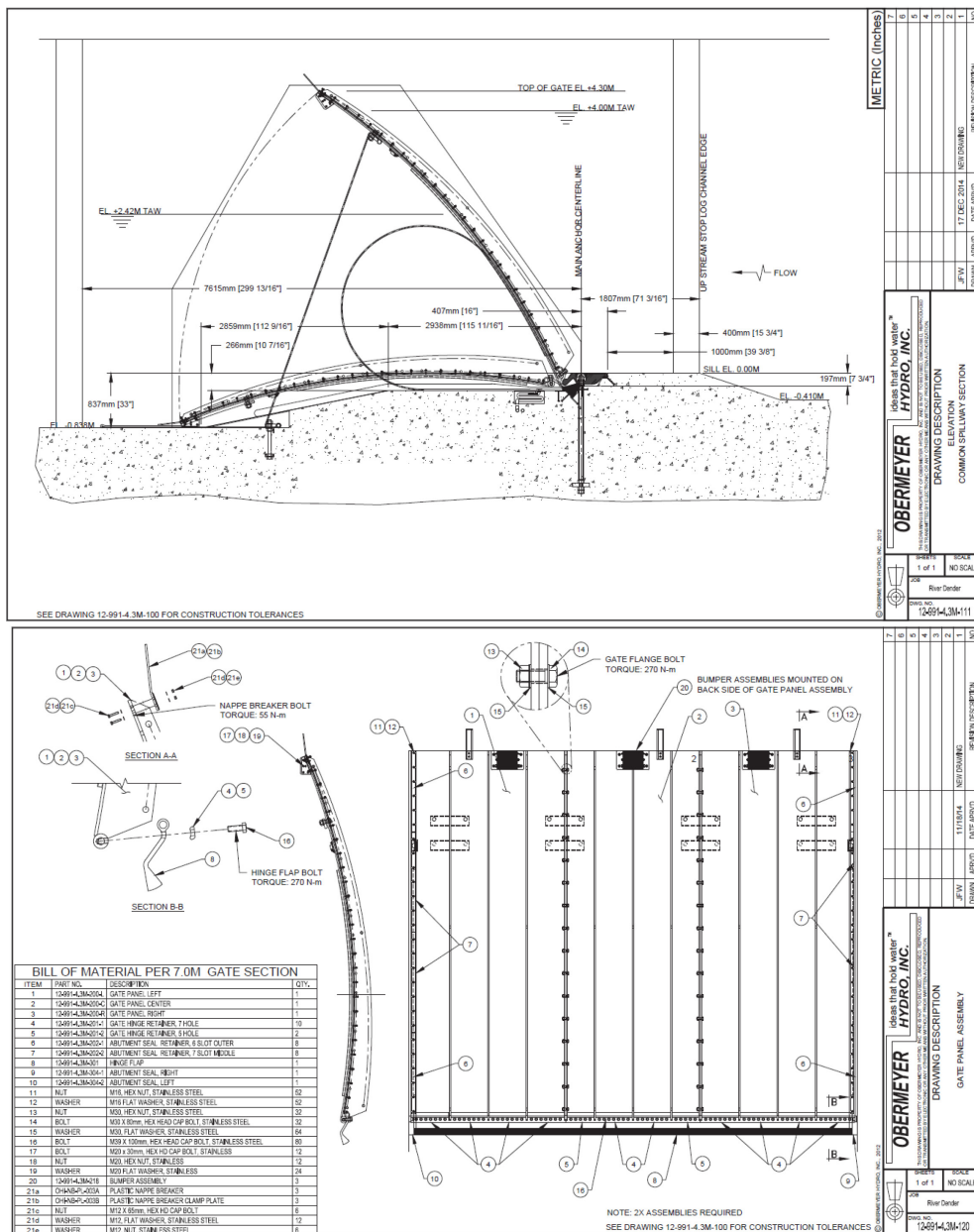
- Instroom (hoofdstuk 5);
- Toegevoegd debiet (hoofdstuk 6);
- Monding (hoofdstuk 7);
- Erosiebescherming (hoofdstuk 8).

2 Uitgangspunten

2.1 Ruimtelijke randvoorwaarden

2.1.1 Stuwen

Voor het ontwerp van de nieuwe stuw op de stuwsluiscomplexen langs de Dender voorziet DVW een zelfde ontwerp bestaande uit balgstuwen (zie Figuur 2).



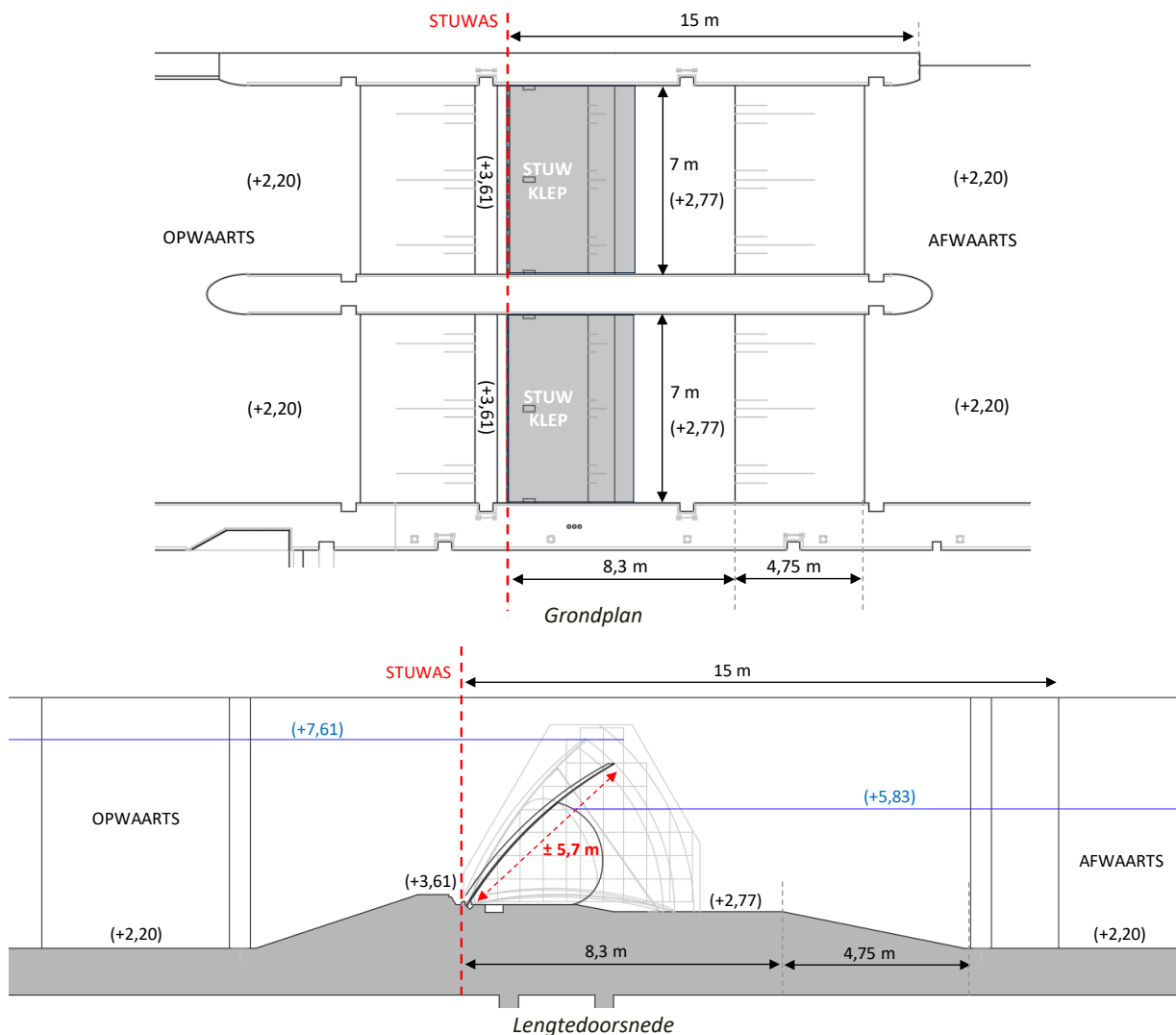
Figuur 2 – Balgstuwontwerp voor de nieuwe stuw op de Dender

Voor locatie Aalst worden twee stuwen direct naast elkaar voorzien. De stuwen bestaan uit een licht gebogen klep met daaronder (afwaarts) een balg. Op de punt van de klep bevinden zich zogenaamde 'nappe breakers' met een lengte van 0,30 m om te zorgen voor beluchting bij lagere afvoeren.

Figuur 3 toont een schematische weergave van het grondplan en het lengteprofiel van de stuwen te Aalst met aanduiding van de maatgevende dimensies die relevant zijn voor het ontwerp van de vispassage.

De volgende maatgevende parameters worden onderscheiden:

- Kleplengte = circa 5,7 m (merk op dat klep gebold is; lengte is hier een rechte lijn tussen de as van de klep en de punt van de klep);
- Klepbreedte = 7,0 m;
- Af- en opwaartse bodemhoogte: 2,20 mTAW (NB: opwaarts van de stuwen loopt het bodempeil terug op naar een hoogte van circa 3,6 mTAW, wat overeenkomt met een waterdiepte van circa 4 m bij streefpeil);
- Hoogte betonnen drempel ter plaatse van de as van de klep = 3,61 mTAW;
- Hoogte betonvloer ter plaatse van het midden plateau = 2,77 mTAW.



Figuur 3 – Huidig ontwerp nieuwe stuwen Aalst met maatgevende parameters

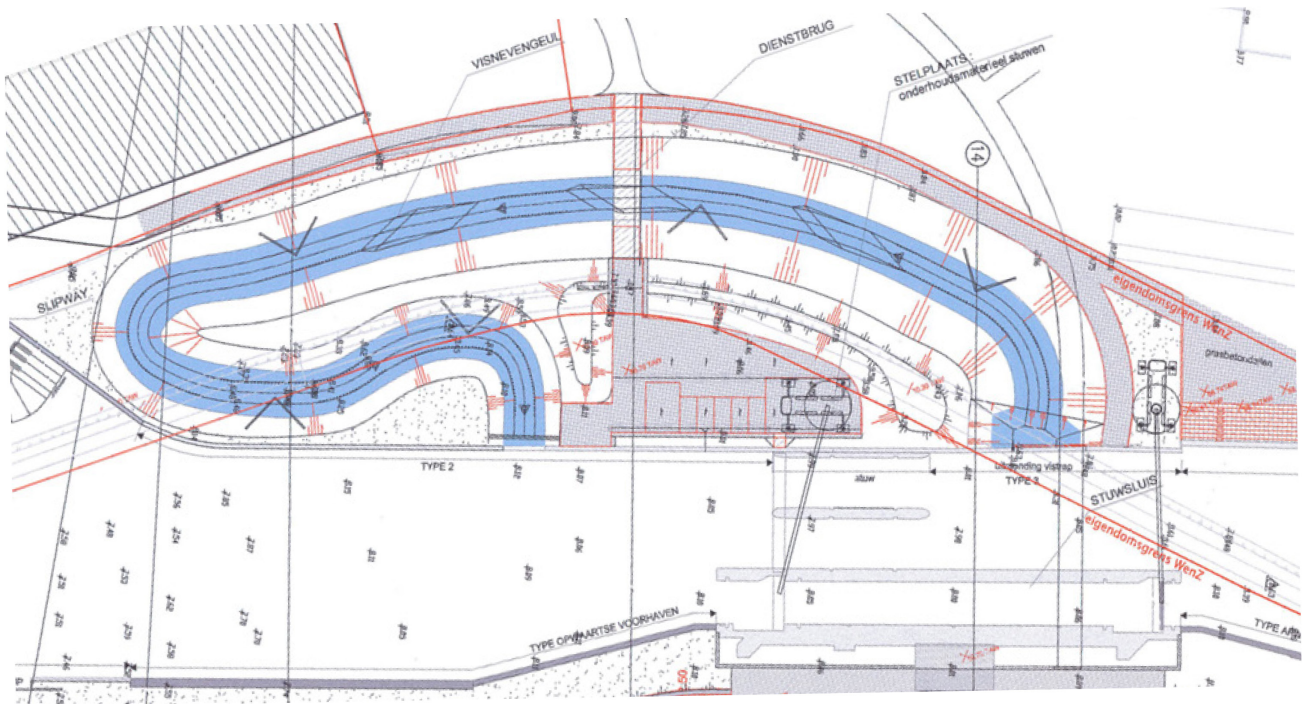
De nieuwe stuwen sluis zijn al aangelegd, Figuur 4 toont een luchtfoto uit Google Earth. De vispassage zal ingepast worden in het ‘zandige’ gebied ten westen van de stuwen.



Figuur 4 – Luchtfoto nieuw aangelegde stuwen en sluis de Aalst

2.1.2 Locatie en beschikbare ruimte

Figuur 5 toont het ontwerp voor de vispassage te Aalst zoals in de vergunningsaanvraag uit 2014. Dit betrof een semi-natuurlijke nevengeul met loodrechte monding en knijp. Zoals aangegeven in de inleiding dient dit ontwerp aangepast te worden op basis van de nieuwe inzichten die ten grondslag lagen aan het algemene ontwerp voor vispassages op de Dender. De voorgestelde aanpassingen dienen bij voorkeur binnen het tracé van de vergunningsaanvraag te blijven. Dit betekent dat een parallelle monding naast de stuwen niet mogelijk is. Ook kan het bodempeil van de instroom daardoor niet geleidelijk aangesloten worden op het bodempeil van het opwaarts pand. Vooral het niet kunnen toepassen van een parallelle monding en ook de relatief grotere afstand van de monding tot het knelpunt (de stuwen) kunnen mogelijk de effectiviteit van de vispassage nadelig beïnvloeden. Hoe groot dit effect is zal moeten blijken uit monitoring na aanleg. DVW heeft daarom gevraagd om in het ontwerp ruimte te voorzien om eventueel in een latere fase alsnog een parallelle monding te kunnen inpassen, zie verder in hoofdstuk 4 “Ruimtelijke inpassing”.



2.2 Hydraulische randvoorwaarden

2.2.1 Streef- en alarmpeilen

Tabel 1 toont de toegepaste streef- en alarmpeilen voor het vernieuwde stuwsluiscomplex te Aalst.

Tabel 1 – Streef- en alarmpeilen te Aalst

Omschrijving	Waarde en eenheid
Opwaarts alarmpeil-HIC	8,25 mTAW
Opwaarts waakpeil-HIC	8,17 mTAW
Opwaarts prewaakpeil-HIC	8,09 mTAW
Hoog ABBA-alarm opwaarts peil	8,04 mTAW
Opwaarts streefpeil	7,61 mTAW
Laag ABBA-alarm opwaarts peil	7,48 mTAW
Afwaarts streefpeil	5,83 mTAW
Totaal verval bij streefpeilen	1,78 m

2.2.2 Meetlocaties en histogrammen

Voor de analyse van de waterstanden en debieten werden de meetposten uit het meetnet gebruikt, deze zijn te raadplegen via www.waterinfo.vlaanderen.be.

Bij schrijven van dit rapport, medio 2025 waren de nieuwe stuwen al gerealiseerd en werden de meetposten voor waterstanden al verplaatst naar de nieuwe locatie. Aangezien voor deze nieuwe posten de meetreeksen nog niet lang genoeg waren, werden voor de hydraulische analyse van de waterstanden de meetreeksen gebruikt van de DVW-meetposten ter plaatse van de stuwen op de oude locatie (meetreeks van 2012 t.e.m. 2021). Deze werden ook toegepast in de algemene hydraulische studie (Visser et al., 2024), maar zijn nu als meetposten niet meer zichtbaar op waterinfo.

Met oog op het rivierdebiet is de meetpost te Erembodegem maatgevend aangezien deze zich net opwaarts van Aalst bevindt. Op het Vlaamse deel van de Dender bevinden zich er ook een debiet meetpost helemaal opwaarts ter hoogte van Overboelare, en één meetpost helemaal afwaarts ter hoogte van Dendermonde. Deze posten worden ter info ook meegenomen in de overzichten. Ook deze debietmeetposten zijn raadpleegbaar via waterinfo.

De historische meetreeksen voor elk van de bovengenoemde posten werden al geanalyseerd in de algemene hydraulische studie voor de vispassages op de Dender (Visser *et al.*, 2024). Tabel 2 toont een histogram (percentage overschrijdingskansen) voor de beschikbare meetperiodes van de DVW-meetposten voor de waterstanden en de HIC-meetposten voor de debieten. Merk op dat dit historische meetgegevens van de huidige stuwen betreffen en niet van de toekomstige nieuwe stuwen. Mogelijk kan de nieuwe stuwregeling zorgen voor relatief minder grote waterpeilschommelingen. Ook kan klimaatverandering een invloed hebben op het voorkomen van wassen en of lagere afvoer in drogere periodes. Toch wordt verwacht dat deze historische reeksen een goed uitgangspunt vormen (lees: robuust maar niet te conservatief) voor het bepalen van de hydraulische randvoorwaarden.

Tabel 2 – Histogram gemeten waterstanden debiet

locatie	OVERBOELARE	OVERBOELARE	EREMBODEGEM	AALST	AALST	DENDERMONDE
meetpost	den12a	den12a	den06a	OW403-opw	OW403-afw	den02a
begin reeks	29/12/2000	1/01/2012	14/12/2012	1/01/2012	1/01/2012	1/01/2012
einde reeks	31/12/2021	31/12/2021	31/12/2021	31/12/2021	31/12/2021	31/12/2021
periode	20j	10j	9j	10j	10j	10j
percentiel	OB-Q (full)	OB-Q	EB-Q (full)	AA-Ho (10j)	AA-Ha (10j)	DM-Q (10j)
0,01%	113,57	76,91	88,71	8,05	6,89	141,9
0,10%	73,48	69,84	85,24	8	6,82	120,25
1,00%	42,19	44,64	66,52	7,9	6,54	74,78
5,00%	19,47	20,14	33,31	7,81	6,15	40,11
10,00%	13	13,6	22,63	7,77	6,06	28,35
20,00%	7,56	8,05	13,79	7,74	6	17,36
25,00%	6,14	6,48	11,45	7,73	5,98	14,07
30,00%	5,2	5,38	9,54	7,72	5,97	11,74
40,00%	3,88	3,95	6,97	7,7	5,95	8,51
50,00%	2,88	2,92	5,26	7,68	5,94	6,26
60,00%	2,16	2,19	4,03	7,66	5,93	4,55
70,00%	1,66	1,67	2,9	7,64	5,91	2,92
75,00%	1,48	1,48	2,61	7,62	5,91	2,21
80,00%	1,32	1,29	2,13	7,6	5,9	1,34
90,00%	0,99	0,87	1,38	7,53	5,87	-1,3
95,00%	0,75	0,62	0,76	7,46	5,85	-4,35
99,00%	0,4	0,32	-0,76	7,32	5,79	-28,44

2.2.3 Debieten

Tabel 3 geeft een overzicht van de maatgevende debieten die volgden uit Tabel 2 en de analyse van de meetreeksen in de algemene hydraulische studie (Visser et al., 2024).

Tabel 3 – Maatgevende debieten

Parameter	Waarde	Omschrijving
$Q_{90\%-zomer}$	0,9 m ³ /s	Ondergrens periode optimale werking; van belang voor maximaal toelaatbaar vispassagedebiet met oog op openingspercentage
$Q_{90\%-jaar}$	1,1 m ³ /s	
$Q_{50\%-jaar}$	5 m ³ /s	Mediaandebiet
$Q_{10\%-jaar}$	23 m ³ /s	Bovengrens periode optimale werking; van belang voor minimaal benodigde lokstroom in bovengrenssituatie
Q_{mw}	40 – 70 m ³ /s	Middelgrote wassen (circa 1 tot 3x per jaar)
Q_{max}	114 m ³ /s	Hoogste gemeten afvoer te Overboelare tijdens de bemeten periode 2001 t.e.m. 2021 in november 2010

Merk op dat ten aanzien van het 90-percentiel-debiet ($Q_{90\%}$) in Tabel 3 een onderscheid wordt gemaakt tussen de waarde op basis van het jaargemiddelde en de waarde op basis van de zomermaanden. De percentielen uit de histogrammen in Tabel 2 zijn gebaseerd op basis van jaargemiddelden. Uit de algemene hydraulische studie bleek echter dat deze percentielen in de zomermaanden duidelijk lager kunnen liggen, en in de wintermaanden hoger. Met oog op het risico van sluiting van de vispassage vanwege peilbeheer werd er daarom voor gekozen om voor het maximaal toelaatbare basisdebiet voor de vispassage uit te gaan van de $Q_{90\%}$ -waarden van de zomermaanden.

2.2.4 Waterpeilen

De stuwen op de Dender regelen de opwaartse waterstanden continu naar het opgestelde streefpeil (SP). Zoals eerder aangegeven zijn de beschikbare meetgegevens van de op- en afwaartse waterstand het gevolg van de huidige stuwen en stuwregeling. Toch wordt verwacht dat deze historische reeksen een goed uitgangspunt vormen (lees: robuust maar niet te conservatief) voor het bepalen van de hydraulische randvoorwaarden voor de vispassage in het geval van de nieuwe stuwen.

Tabel 4 geeft een overzicht van de maatgevende waterpeilfluctuaties voor het ontwerp van de vispassages op de Dender op basis van de analyse van de historische reeksen zoals uitgevoerd in de algemene hydraulische studie (Visser *et al.*, 2024).

Tabel 4 – Maatgevende waterpeilfluctuaties tijdens periode optimale werking

Omschrijving	Toe-/afname t.o.v. streefpeil
Toename opwaartse waterstand	+0,20 tot 0,30 m
Afname opwaartse waterstand	-0,20 m
Toename afwaartse waterstand	+0,50 tot 1,0 m
Afname afwaartse waterstand	-0,20 m

Naast de afzonderlijke fluctuaties van de op- en afwaartse waterstand dient ook rekening te worden gehouden met combinatie van de twee, namelijk de fluctuatie in het totale verval. Uit de algemene hydraulische studie bleek dat de kans op een toename van het verval veel lager ligt dan de kans op een afname. Dit wordt verklaard door het feit dat de afwaartse waterstand (veel) sneller toeneemt bij een verhoging van de afvoer dan de opwaartse waterstand. De grootste kans op een toename van het verval wordt vooral veroorzaakt door een (uitzonderlijke) afname van de afwaartse waterstand. Voor locatie Aalst werd vastgesteld dat een toename van het verval met meer dan 0,24 m minder dan circa 1% van de tijd voorkomt.

Afwaartse waterstanden lager dan 0,20 m onder streefpeil komen maar zeer zelden voor. Een extreme val van de afwaartse waterstand (bijv. door een defect aan de stuwen) kan echter wel leiden tot ongewenst hoge stroomsnelheden in de vispassage. Er wordt daarom geadviseerd om een sluitingsvoorwaarde op te nemen in de automatisch regeling van de afsluitconstructie bij afwaartse waterpeilen lager dan 0,50 m onder streefpeil.

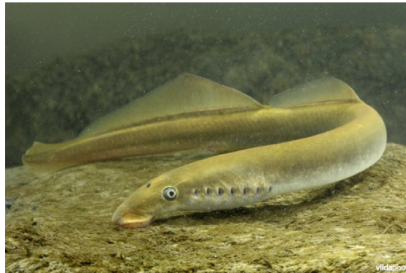
Naast de gekozen dimensionering voor de vispassage bepaalt de opwaartse waterstand het debiet door de vispassage. Aangezien de stuwen de opwaartse waterstand regelen naar een streefpeil is het debiet door de vispassage relatief onafhankelijk van de afvoer op de rivier.

2.3 Ontwerpcriteria

Deze paragraaf geeft de ontwerpcriteria op basis van de doelsoorten uit het Denderbekken, zoals toegepast in het hydraulisch ontwerp voor de vispassage. Voor een overzicht van alle doelsoorten en de onderbouwing van de ontwerpcriteria wordt verwezen naar de algemene hydraulische studie voor de vispassages van de Dender uit Visser *et al.* (2024). Figuur 6 toont enkele van de doelsoorten.



Kleine modderkruiper



Rivierprik



*Driedoornige stekelbaars**



Zeeprik



Blankvoorn



Riviergrondel



Europese meerval



Paling



Baars

Figuur 6 – Enkele doelsoorten (Foto's: VILDA, Rollin Verlinde en Yves Adams*)

2.3.1 Werkingsperiode

Uit onderzoek naar het migratiegedrag van de doelsoorten blijkt dat het van belang is dat in principe gestreefd dient te worden naar een 100% werkingspercentage (i.e. het jaar rond). De soorten en de verschillende levensstadia van die soorten die leven in verschillende delen van het stroomgebied van een rivier zullen namelijk op verschillende momenten in het jaar migreren waarbij ook verschillen optreden in duur en omvang van deze migraties.

Vanwege andere randvoorwaarden (zoals bijv. peilbeheer t.b.v. scheepvaart) is het daarentegen niet altijd mogelijk om een 100% werkingspercentage te halen. Voor het minimale percentage van de tijd waarbij de vispassage dient te kunnen werken wordt daarom het “ Q_{30d} - Q_{330d} -criterium” toegepast. Dit debietcriterium stelt dat de vispassage optimaal dient te kunnen werken tussen:

- een rivierdebiet dat 90% van de tijd (=circa 330 dagen per jaar) wordt overschreden,
- en een rivierdebiet dat 10% van de tijd (= circa 30 dagen van het jaar) wordt overschreden.

Dit komt overeen met een minimaal percentage van 80% van het jaar. In dit rapport wordt voor de genoemde boven- en ondergrens de percentage-notatie “ $Q_{10\%}$ - $Q_{90\%}$ ” gebruikt (in plaats van de dag-notatie “ Q_{30d} - Q_{330d} ”).

Naast de invloed van het debiet wordt het werkingspercentage van vispassages in stuwpanden tevens bepaald door de (automatische) regeling van de opwaartse afsluitconstructie met het oog op peilbeheer voor o.a. de scheepvaart. Dit betekent dat naast het debietcriterium ook afzonderlijk rekening dient te worden gehouden met de invloed van waterstandsfluctuaties en instellingen voor automatische regeling op de werkingspercentages. Voorwaarden voor automatische sluiting worden daarbij best niet binnen de dagelijkse waterstandsfluctuaties gekozen.

Met oog op het criterium voor waterpeilfluctuaties onder normale omstandigheden werd op basis van de analyse van de historische metingen op de Dender als richtlijn bepaald dat de vispassage optimaal dient te kunnen werken bij:

- Op- en afwaartse waterpeilen die minder dan circa 1 % van de tijd worden over- of onderschreden.

Hierbij wordt opgemerkt dat er onder dagelijkse omstandigheden meer fluctuatie is in het afwaartse waterpeil dan in het opwaartse waterpeil. Dit wordt veroorzaakt door het verhang dat in het stuwpand ontstaat gegeven een bepaalde afvoer en verschil per locatie. Voor de stijging van het afwaartse waterpeil moet voor bepaalde locaties daarom eerder uitgegaan worden van een richtlijn van 1 tot 10% stijging van het waterpeil.

In stuwpanden bepalen de waterstandsfluctuaties en instellingen voor automatische regeling vooral de openingspercentages en de passeerbaarheid van de vispassage. Het debietcriterium is bepalend voor het nodige lokstroomdebiet (attractiviteit bij bovengrens $Q_{10\%}$) en deels ook van invloed op het maximale vispassagedebiet aangezien dit het openingspercentage van de vispassage bij lage afvoer ($Q_{90\%}$) mee bepaalt.

De effectiviteit van een vispassage wordt bepaald door zowel de attractiviteit als de passeerbaarheid van de vispassage. De passeerbaarheid geeft aan hoe vlot vissen de vispassage kunnen opzwemmen en in stroomopwaartse richting passeren. Met attractiviteit wordt de ‘vindbaarheid’ van de vispassage bedoeld, waarbij zowel de locatie van de monding als de lokstroom een belangrijke rol spelen.

2.3.2 Passeerbaarheid

De passeerbaarheid van de vispassage wordt voornamelijk bepaald door de volgende factoren:

- Maximale stroomsnelheden;
- Minimale doorzwemdieptes en -breedtes;
- Maximale energie/turbulentie (per bekken).

Voor elk van deze factoren kunnen verschillende typen van de doelsoorten bepalend zijn. Tabel 5 geeft het overzicht van de verschillende ontwerpcriteria voor passeerbaarheid zoals bepaald op basis van de doelsoorten in de algemene hydraulische studie.

Tabel 5 – Biologische ontwerpcriteria passeerbaarheid vispassage

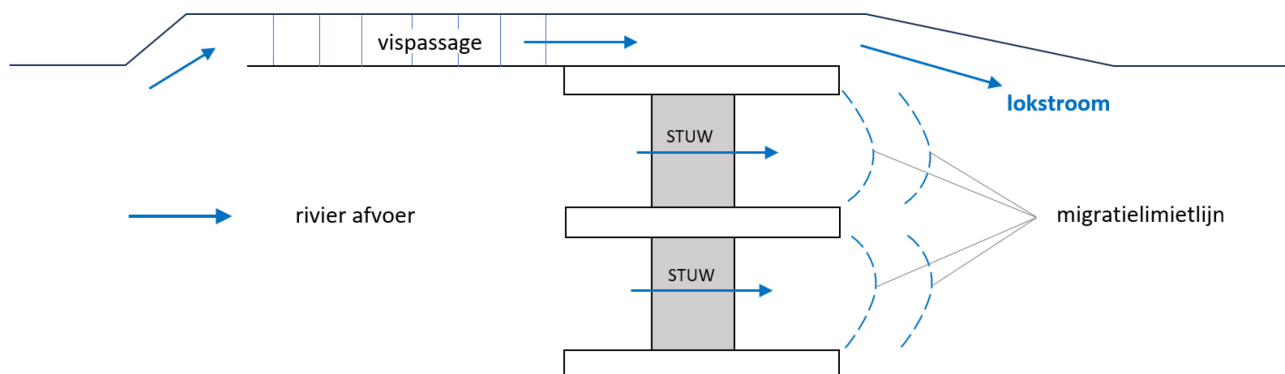
Omschrijving	parameter	Waarde en eenheid
Maximale stroomsnelheid over korte afstand (slot/drempel)	$V_{\max_sprint}$	1 - 1,5 m/s
Maximale stroomsnelheid over langere afstand	$V_{\max_kruis}$	0,5 m/s
Minimale lokale doorzwembreedte over korte afstand (slot)	$b_{\min}$	0,50 m
Minimale doorzwemdiepte over korte afstand (drempel)	$d_{\min}$	0,50 m
Minimale doorzwemdiepte over langere afstand in bekens	$Y_{\min-b}$	1 - 1,5 m
Maximaal toelaatbare energiedissipatie per volume-eenheid	$E_{\max}$	100 W/m ³

2.3.3 Attractiviteit (monding)

De attractiviteit van een vispassage is een zeer belangrijk aspect met het oog op de effectiviteit: wanneer vissen de vispassage niet kunnen vinden speelt de passeerbaarheid verder namelijk geen rol meer. De attractiviteit wordt gedefinieerd als de mate waarin vissen de passage kunnen vinden tijdens hun stroomopwaartse migratie. Hierbij spelen naast de lokstroom en het lokstroomdebiet ook de locatie en oriëntatie van de monding ten opzichte van de zogenaamde migratielimietlijn een belangrijke rol.

De locatie van de monding dient net afwaarts van de zgn. migratielimietlijn te worden gekozen. Dit is de grens van het gebied waarin de turbulentie of stroomsnelheden voor de vis te hoog zijn om nog te kunnen optrekken (Figuur 7). Vanaf deze lijn zoekt de vis naar een alternatieve trekroute. Bij heel lage afvoer kan de constructie zelf (bijv. een stuw of een dam) ook de migratielimietlijn vormen.

Als de monding van de vispassage te ver afwaarts van de migratielimietlijn gelegen is, bestaat het risico dat vissen de ingang niet vinden en zich nabij de migratielimietlijn (net afwaarts van het knelpunt) blijven verzamelen.



Figuur 7 – Relatie migratielimietlijn en monding vispassage

Gezien het verschil in sprintsnelheid is de ligging van de migratielimietlijn verschillend per vissoort. Voor een gegeven stuw is deze ligging tevens afhankelijk van het debiet, het afwaarts waterpeil en de toegepaste stuwregeling (overstort, onderstroming of een combinatie). Aangezien de ligging van de migratielimietlijn varieert met de grootte van het debiet over de stuwen kan eerder gesproken worden van een migratielimietzone.

De boven- en ondergrenzen van deze zone worden verbonden met het debietcriterium voor optimale werking zoals beschreven in paragraaf 2.3.1, het zogenaamde $Q_{10\%}$ - $Q_{90\%}$ -criterium. Aangezien de locatie van de migratielimietlijn daarmee niet constant is, vormt de locatie en oriëntatie van de monding een belangrijk aandachtspunt.

Met oog op het ontwerp van de monding en het lokstroomdebiet werden in de algemene hydraulische studie de volgende criteria en richtlijnen vastgesteld:

- De monding dient zo dicht mogelijk aan het migratieknelpunt (migratielimietlijn/-zone) te worden ingepast.
- De oriëntatie van de uitstroom dient zo parallel mogelijk aan de hoofdstroom te zijn (niet scherper dan 30° tot 45°).
- Binnen de minimale werkingsperiode (afvoer $< Q_{10\%}$) dient de vispassage goed bereikbaar te zijn. De monding mag daarbij niet worden 'afgeschermd' door te hoge turbulentie of recirculatieneren ten gevolge van de watersprong afwaarts van de stuwen.
- Binnen de minimale werkingsperiode (afvoer $< Q_{10\%}$) moet een duidelijke lokstroom 'zichtbaar' (lees: voelbaar voor vissen) zijn vanuit de monding naar afwaartse stroomrichting tot voorbij de turbulente zone van de stuwen.
- Voor het grootste deel van de optimale werkingsperiode (afvoer $< Q_{10\%}$) dient gestreefd te worden naar een zo hoog mogelijke verhouding tussen het lokstroomdebiet (Q_{lok}) en het stuwdebiet (Q_{stuw}). Streefwaarden: $Q_{lok}/Q_{stuw} > 0,5$ en minimaal 0,1 tijdens periode van optimale werking. (richtlijn voor kleine en middelgrote waterlopen).
- De minimale grootte van het maximaal benodigde lokstroomdebiet wordt bepaald door het debiet benodigd voor een voldoende sterke en voelbare lokstroom bij het bovengrensscenario van $Q_{10\%}$.
- Het ontwerp van de monding dient binnen de minimale werkingsperiode te voldoen aan de criteria voor passeerbaarheid uit Tabel 5 (denk daarbij aan maximale stroomsnelheden, minimale dimensies en maximaal toelaatbare turbulentie).
- De bodem van de vispassagemonding is gelijk aan deze van het afwaartse pand. Opwaarts in de vispassage kan deze geleidelijk oplopen tot bijv. het niveau van het meest afwaartse bekken (richtlijn maximaal bodemverhang circa 1:10 tot max. 1:5).
- Net als in de vispassage zelf mogen er in de bodem geen verticale opstaande randen over de gehele breedte van doorstroomsectie worden toegepast (vooral in opwaartse migratierichting).

Vanuit de ruimtelijke randvoorwaarden uit de huidige vergunning (zie paragraaf 2.1.2) is een parallelle monding niet mogelijk. De huidige locatie en loodrechte monding dient daarom behouden te blijven. Dit betekent dat de vispassage mogelijk minder goed vindbaar zal zijn, vooral bij normale en lagere afvoeren.

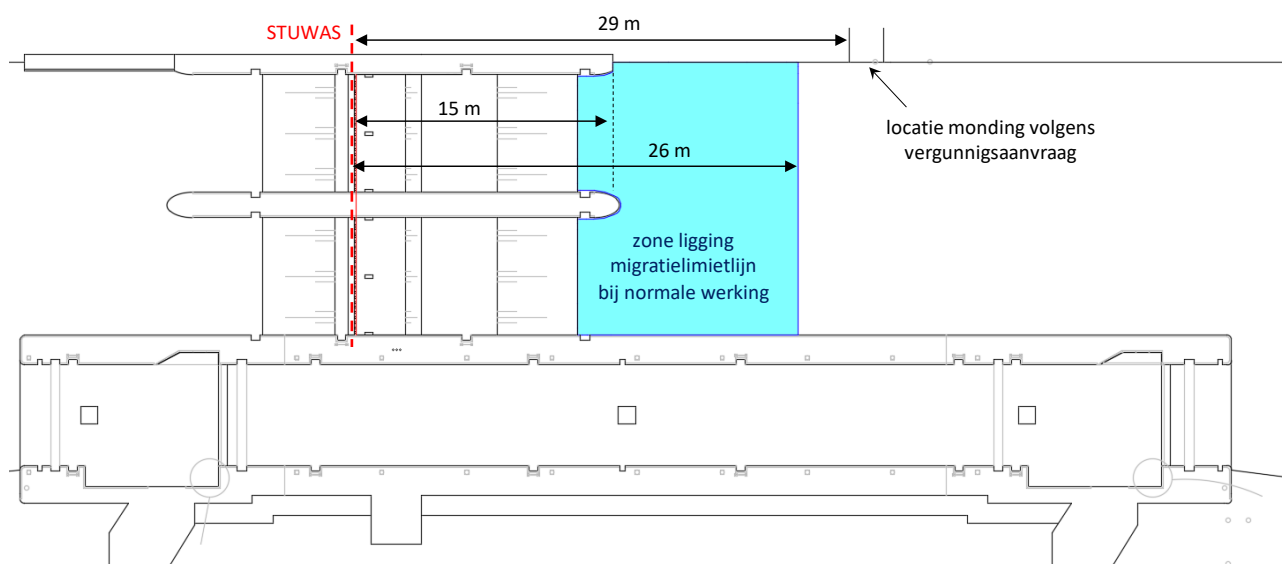
In de algemene hydraulische studie werd met behulp van literatuurformules bepaald dat de watersprong afwaarts van de stuwen in geval van Aalst in het bovengrensscenario $Q_{10\%}$ kan reiken tot circa 26 meter uit de stuw assen (zie Figuur 39 in Visser *et al.*, 2024). Bij lagere en normale afvoeren reikt de watersprong zone echter minder ver en zouden vissen ook tot aan de stuwen kunnen zwemmen. Het merendeel van de tijd zal de migratielimietlijn zich bevinden op circa 15 m uit de stuwassen.

Figuur 8 toont het zoekgebied voor de optimale ligging van de vispassage monding (= vispassage ingang) op basis van de ligging van de migratielimietlijn bij normale werking. Hieruit blijkt dat de locatie voor de vispassage monding vanuit de vergunning voor een groot deel van de tijd te ver van het knelpunt afligt.

Hoe groot het effect hiervan is op de vindbaarheid is op dit moment niet te zeggen aangezien er nog geen concreet onderzoek met vissen werd gedaan naar dit vraagstuk. Ook bleek uit de algemene studie dat er in dit kader kennishiaten bestaan met betrekking tot de stroompatronen en lengtes van sterk verdrongen watersprongen bij stuwoverstort. De toegepaste formules voor de berekening van de waterspronglengte zijn namelijk niet opgesteld voor situaties van stuwoverstort maar voor situaties van stuwonderstroom.

Gezien deze onzekerheden en de randvoorwaarde om binnen de bestaande vergunning te werken zal de locatie van de uitstroom van de vispassage volgens het plan uit de vergunningsaanvraag worden toegepast. Wel heeft DVW gevraagd om het ontwerp van de vispassage zo uit te voeren dat een eventuele latere aanpassing naar een parallelle monding mogelijk blijft indien nodig, zie verder in hoofdstuk 4 “Ruimtelijke inpassing”.

Het wordt dan ook sterk aanbevolen om vismonitoring uit te voeren na aanleg. Ook wordt aanbevolen om de kennishiaten rond het verschil in efficiëntie tussen loodrechte en parallelle monding en de kennishiaten rond verdrongen watersprongen bij stuwoverstort zo spoedig mogelijk te onderzoeken aangezien dit hoogstwaarschijnlijk een grote invloed heeft op de efficiëntie van vispassages.



Figuur 8 – Zone ligging migratielimietlijn bij normale werking (tot $Q_{10\%}$)

3 Dimensionering vispassage

3.1 Vispassagetype

Uit de algemene hydraulische studie voor vispassages op de Dender (zie Visser *et al.*, 2024) bleek dat de beschikbare afvoer op de Dender sterk bepalend is voor het haalbare en meest wenselijke type vispassage. De Dender heeft een relatief hoge kans op periodes met zeer lage afvoeren ($Q < 1,0 \text{ m}^3/\text{s}$). Deze kansen worden nog eens verhoogd door de toename van drogere periodes in de afgelopen jaren. Hierdoor is het van belang om het basisdebiet voor de vispassages zo laag mogelijk te houden om zo een relatief hoog sluitingspercentage te voorkomen. De vispassages krijgen namelijk alle een automatisch gestuurde opwaartse afsluiter met het oog op het peilbeheer. Deze afsluiter zal automatisch sluiten wanneer het opwaartse waterpeil te laag wordt door een te lage afvoer op de rivier. Hoe hoger het basisdebiet van de vispassage, hoe sneller de vispassage dus zal sluiten bij lage afvoerdebieten op de Dender.

Om te zorgen voor een optimale verhouding tussen passeerbaarheidscriteria en een zo hoog mogelijk openingspercentage werd daarom gekozen voor een vertical slotpassage. Een vertical slot heeft namelijk een relatief beperkt basisdebiet bij gelijke toepassing van de passeerbaarheidscriteria. Het is een relatief technisch ontwerp, maar bij toepassing van een laag verval per slotwand, voldoende slotbreedte en een bodemsubstraat met gladde rolstenen is dit met oog op passeerbaarheid een goed alternatief ten opzichte van een meer 'natuurlijk' type zoals V-vormige bekkentrappen. Zeker aangezien deze laatste ook zo goed als volledig bekleed zou moeten worden met erosievoorkomende materialen (zoals steenbestorting) waardoor sterk op de natuurlijkheid zou worden ingeboet. Bijkomend geeft een vertical slot tevens passagemogelijkheid over de volledige diepte van de waterkolom en is dit type minder gevoelig aan peilschommelingen als een bekkentrap.

Wel moet er gewezen worden op een ogenschijnlijke tegenstrijdigheid met de criteria voor een optimale attractiviteit en dan vooral het realiseren van een voldoende sterke lokstroom. Het kiezen voor een lager basisdebiet zorgt namelijk wel voor een hoger openingspercentage maar bij hogere afvoeren kan dit leiden tot een te zwakke lokstroom ten opzichte van het debiet over de stuwen. Dit wordt echter opgelost door de toepassing van een toegevoegd debiet. Het principe van een toegevoegd debiet gaat uit van het inbrengen van een (regelbaar) extra debiet net opwaarts van de monding om zo de lokstroom te versterken. Dit ontwerp wordt beschreven in hoofdstuk 6.

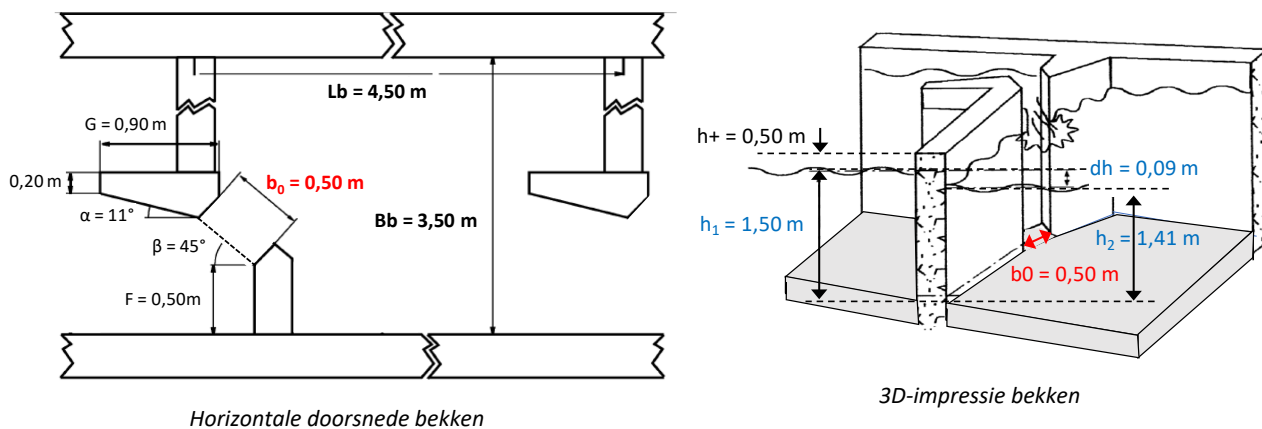
3.2 Bekkens en slotwanden

Er werd gekozen voor een vertical slotpassage. Het algemeen ontwerp voor de slotwanden en de bekken van dit type passage volgen uit de algemene hydraulische studie (Visser *et al.*, 2024) en worden opgesomd in Tabel 6 hieronder. Figuur 9 geeft tevens een schematische weergave van deze maatgevende parameters.

Tabel 6 – Dimensionering bekken en slotwanden

parameter	omschrijving*	aantal / waarde	eenheid
N	Aantal sloten	20	[-]
dh	Verval per bekken (/slot)	0,089	[m]
h_1	Opwaartse waterdiepte vlak voor het slot bij streefpeilen	1,50	[m]
h_2	Afwartse waterdiepte vlak na het slot bij streefpeilen	1,42	[m]
b_0	Slotbreedte	0,50	[m]
L	Bekkenlengte (h.o.h. van slotwand tot slotwand)	4,50	[m]
B	Bekkenbreedte (binnenzijde zijwand tot binnenzijde zijwand)	3,50	[m]
S_0	Gemiddeld bodemverhang (= $dh/L = 0,092/4,5 = 0,0204$)	$\approx 2\%$	[-]
F	Lengte kleine slotwand	0,50	[m]
G	Lengte haak van grote slotwand	0,90	[m]
β	Hoek van slotopening (t.o.v. stroomrichting)	45	[°]
h+	Overhoogte opwaartse slotwanden bij opwaarts streefpeil	0,50	[m]

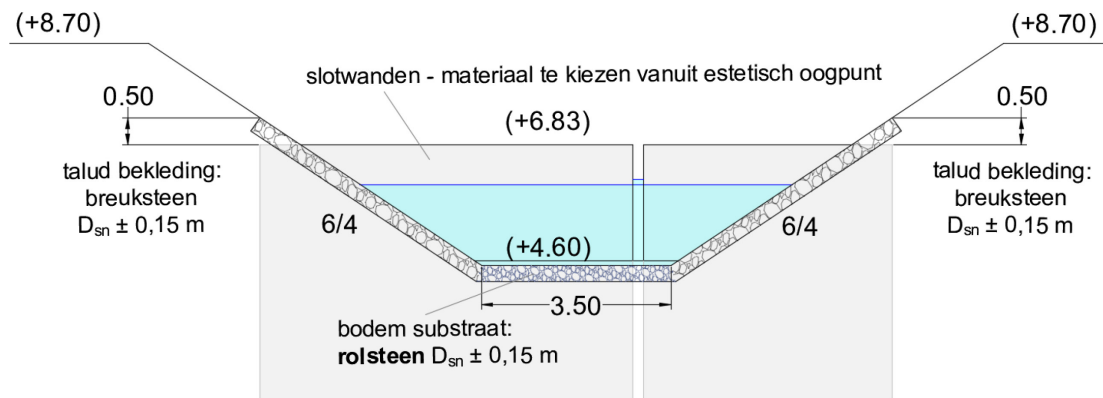
* Blauwe waarden zijn hydraulische waarden bij streefpeilen en kunnen dus variëren bij waterpeilfluctuaties.
Zwarte waarden zijn fysieke waarden van het constructief ontwerp.



Figuur 9 – Maatgevende parameters dimensionering bekken en slotwanden (naar: Larinier, 2002)

Merk op dat in de schematische voorbeelden in Figuur 9 wordt uitgegaan van rechtopstaande zijwanden (U-vormig dwarsprofiel), terwijl in de vispassage te Aalst een trapeziumvormig dwarsprofiel met zijtaluds zal worden toegepast. In het hydraulisch ontwerp wordt uitgegaan van een taludsteilheid van 6/4 en een bodembreedte van 3,5 m, zie Figuur 10. Als bodemsubstraat wordt een rolstenenbekleding toegepast met een nominale steendiameter van circa 0,15 m.

De zijtalud worden bekleed met breuksteen met een zelfde nominale steendiameter en laagdikte. Merk op dat op de taluds is gekozen voor breuksteen in plaats van rolsteen met oog op stabiliteit van de bekleding. De rolstenenbekleding op de bodem heeft naast erosiebescherming namelijk ook een functie als bodemsubstraat, zie verder in paragraaf 3.4.



Figuur 10 – Dwarsdoorsnede B-B'' bekkenontwerp (nr. 17) met slotwanden en bekleding

Merk tevens op dat de breedte van de bekken van 3,5 m geldt van taludteen tot taludteen, terwijl de bekkenlengte van 4,5 m een hart-op-hart afstand betreft tussen de slotwanden. Het materiaal voor de slotwanden kan in principe gekozen worden in het bouwkundig ontwerp, dit met oog op een zo natuurlijk mogelijk aanzicht. Figuur 11 geeft een voorbeeld doormiddel van toepassing van betonnen paaltjes, maar wanden uit duurzaam hout kunnen eventueel ook een optie zijn. Bij toepassing van paaltjes is het echter wel van belang dat deze zo dicht mogelijk tegen elkaar worden geplaatst. De wanden hoeven niet volledig waterdicht te zijn, maar openingen/ spleten worden best voorkomen omdat dit anders het basisdebiet te veel zou verhogen en het stroompatroon in de bekken zou verstoren. Vanuit dat oogpunt blijven volledig dichte wanden de voorkeur houden.

Om het totale hydraulische verval bij streefpeilen van 1,78 m te verdelen over vervallen van 0,09 m per bekken/slot zijn 20 slotenwanden/ bekkens nodig. Uitgaande van een bekkenlengte van 4,5 m geeft dit een bodemverhang van 2% ($= dh/Lb = 0,09/4,5$).



Figuur 11 – Voorbeeld op de Regge te Overwater (NL) van een vertical slot-vispassage geïntegreerd in een nevengeul.
 Links: overzicht ligging (Foto: Waterschap Regge en Dinkel) Rechts: Detailopname van een slot (Foto: OVB).
 Overgenomen uit AMINAL (2005)

Tabel 7 geeft een overzicht van de bodempelen in de sloten, de waterdiepte opwaarts van elk slot bij streefpeilen en de hoogte van de slotwanden. Figuur 12 geeft tevens een schematisch lengteprofiel van de gehele vispassage.

De overhoogte van de slotwanden aan opwaartse zijde is gekozen op 0,50 m boven de waterhoogte bij opwaarts streefpeil. Op basis van de historische metingen wordt verwacht dat een stijging van het opwaartse waterpeil met meer dan 0,30 m minder dan circa 1% voor zal komen.

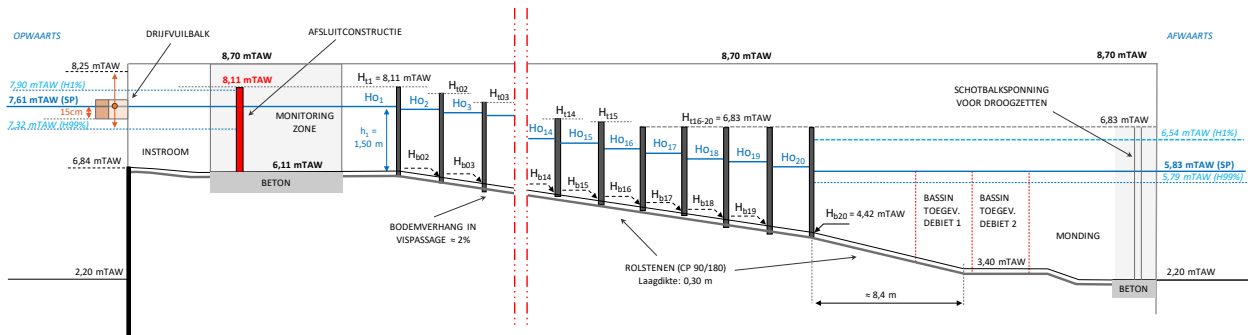
Merk op dat de hoogte van de slotwanden van op- naar afwaarts steeds afneemt met het bodemverval van 2% (= 0,09 m per slotwand) tot en met slotwand 15. Vanaf slotwand 16 dient de minimaal vereiste overhoogte van 1,0 m boven afwaarts streefpeil te worden aangehouden (= 6,83 mTAW). Dit geeft voldoende buffer met oog op de waarde die circa 1% van de tijd wordt overschreden voor deze locatie op basis van de historische metingen van $Ha_{1\%} = 6,54$ mTAW.

Tabel 7 – Slotwandhoogtes en bodemhoogtes in de sloten*

N	slotnummer	[-]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
H _{tN}	hoogte slotwand	[mTAW]	8,11	8,02	7,93	7,84	7,75	7,67	7,58	7,49	7,40	7,31
H _{o_N}	waterpeil opw slot	[mTAW]	7,61	7,52	7,43	7,34	7,25	7,17	7,08	6,99	6,90	6,81
H _{bN}	bodemhoogte in slot	[mTAW]	6,11	6,02	5,93	5,84	5,75	5,67	5,58	5,49	5,40	5,31

N	slotnummer	[-]	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
H _{tN}	hoogte slotwand	[mTAW]	7,22	7,13	7,04	6,95	6,86	6,83	6,83	6,83	6,83	6,83
H _{o_N}	waterpeil opw slot	[mTAW]	6,72	6,63	6,54	6,45	6,36	6,27	6,19	6,10	6,01	5,92
H _{bN}	bodemhoogte in slot	[mTAW]	5,22	5,13	5,04	4,95	4,86	4,77	4,69	4,60	4,51	4,42

* Blauwe waarden zijn hydraulische waarden bij streefpeilen en kunnen dus variëren bij waterpeilfluctuaties.
Zwarte waarden zijn fysieke waarden van het constructief ontwerp.



Figuur 12 – Schematisch lengteprofiel met maatgevende hoogtes

3.3 Debiet

Het debiet doorheen een vertical slot-vispassage kan berekend worden door middel van de volgende formule (Larinier, 2002):

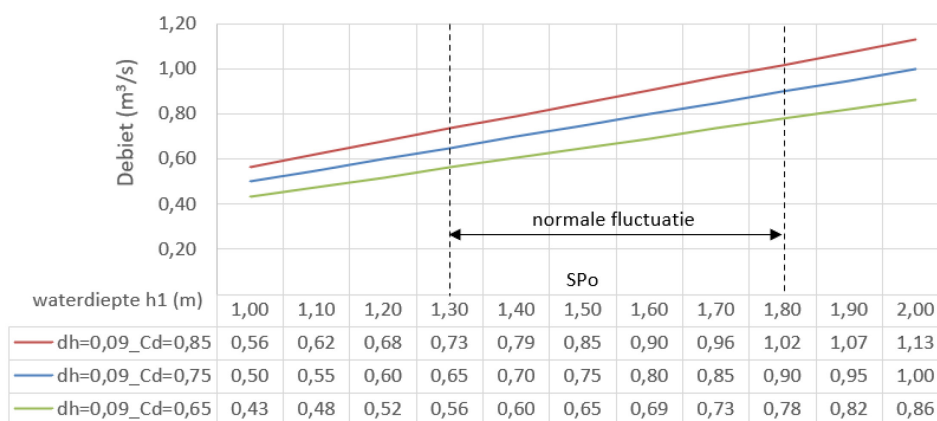
$$Q_{slot} = C_d \cdot b_0 \cdot h_1 \cdot \sqrt{2g \cdot dh} \quad [1]$$

Met:

Q _{slot}	=	Debiet door vertical slot-vispassage	[m ³ /s]
V _{gem}	=	Gemiddelde stroomsnelheid door het slot	[m/s]
C _d	=	Debietscoëfficiënt (0,65 tot 0,85)	[-]
b ₀	=	Slotbreedte	[m]
h ₁	=	Waterhoogte opwaarts van het slot	[m]
h ₂	=	Waterhoogte afwaarts van het slot	[m]

Met behulp van bovenstaande formule wordt voor het ontwerp van de nieuwe vispassage te Aalst een basisdebiet bij op- en afwaarts streefpeil berekend tussen 0,7 en 0,9 m³/s (afhankelijk van de werkelijke debietcoëfficiënt) (zie Figuur 13). Bij een daling van het opwaartse waterpeil tot 0,20 m onder streefpeil opwaarts (SPo) zakt het debiet naar circa 0,6 tot 0,7 m³/s. Bij een stijging van het opwaartse waterpeil tot 0,20 a 0,30 m boven opwaarts streefpeil zal het debiet stijgen tot circa 1 m³/s.

Uit de hydraulische studie bleek dat fluctuatie in het afwaartse waterpeil een verwaarloosbaar klein effect heeft op het verval over de opwaartse sloten en daarmee ook een verwaarloosbaar klein effect op het debiet door de vispassage. Het debiet wordt bij normale peilfluctuaties dus voornamelijk bepaald door de fluctuatie in het opwaartse waterpeil.



Figuur 13 – Debiet door de vispassage bij fluctuatie in het opwaartse waterpeil

3.4 Bodemsubstraat

Technische visdoorgangen (zoals vertical slot-vispassages) dienen voorzien te worden van een bodemsubstraat met voldoende ruwheid. Door de grotere bodemruwheid wordt de stroomsnelheid aan de bodem namelijk aanzienlijk verlaagd wat ervoor zorgt dat kleinere vissoorten die over de bodem migreren (benthische vissoorten) alsook de jonge levensstadia van verschillende vissoorten de visdoorgang in stroomopwaartse richting kunnen passeren. De stenen creëren microhabitats waar vissen kunnen rusten en schuilen (schuilhabitat) en faciliteren ook de migratie van bijvoorbeeld jonge palingen ('glasalen' en 'elvers'). Daarnaast is deze ruwheid niet alleen een meerwaarde voor vissen maar ook voor macrozoöbenthos of ongewervelde bodemdiertjes (bv. vlokreeftjes) omdat deze diertjes zich tussen de stenen door in stroomopwaartse richting kunnen bewegen.

Voor het bodemsubstraat in de vispassage van Aalst wordt een sortering voorgesteld met een nominale steendiameter (D_{n50}) van circa 0,15 m, waarbij steendiameters in de gehele sortering variëren van circa 0,05 tot 0,25 m. De doelstelling hier is verruwing van de bodem met oog op aan de bodemmigrerende soorten, het is daarom van belang om een sortering te kiezen die ook voldoende stenen bevat in de bovenrange van de steendiameter (groter dan 0,15 m).

Ook wordt hierbij nadrukkelijk opgemerkt dat met oog op steentype rolstenen (bijv. Maaskeien/Rijnkeien, zie Figuur 14) dienen te worden gebruikt en niet de relatief 'scherpe' breuksteensortering zoals in de waterbouw meestal wordt toegepast vanuit oogpunt erosiebescherming.

De bijbehorende laagdikte met oog op voldoende pakking tegen erosie is afhankelijk van de gekozen sortering en wordt meestal verbonden aan minimaal 2x de nominale steendiameter (D_{n50}). In dit geval dient dus te worden uitgegaan van een laagdikte van minimaal 0,30 m. Onder de rolstenen wordt best een geotextiel toegepast om uitspoeling tegen te gaan.



Figuur 14 – Voorbeeld toepassing rolstenen in de vispassage te Sint-Baafs-Vijve

Het substraat dient de bodem van de vispassage volledig (m.a.w. het volledige traject) te bedekken, dus ook ter hoogte van de slots. Dit betekent dat het substraat moet worden doorgetrokken in de slots. Het uit te graven grondprofiel dient dus ook de laagdikte van het substraat dieper te worden aangelegd. Het grondpeil van dit bodemprofiel komt dan dus op de waterdiepte (h_1) + laagdikte substraat (d_s) onder het waterpeil bij streefpeilen te liggen. Uiteraard mogen grotere stenen de slots niet blokkeren omdat anders de migratie van kleine vissen en macrozoöbenthos wordt belemmerd.

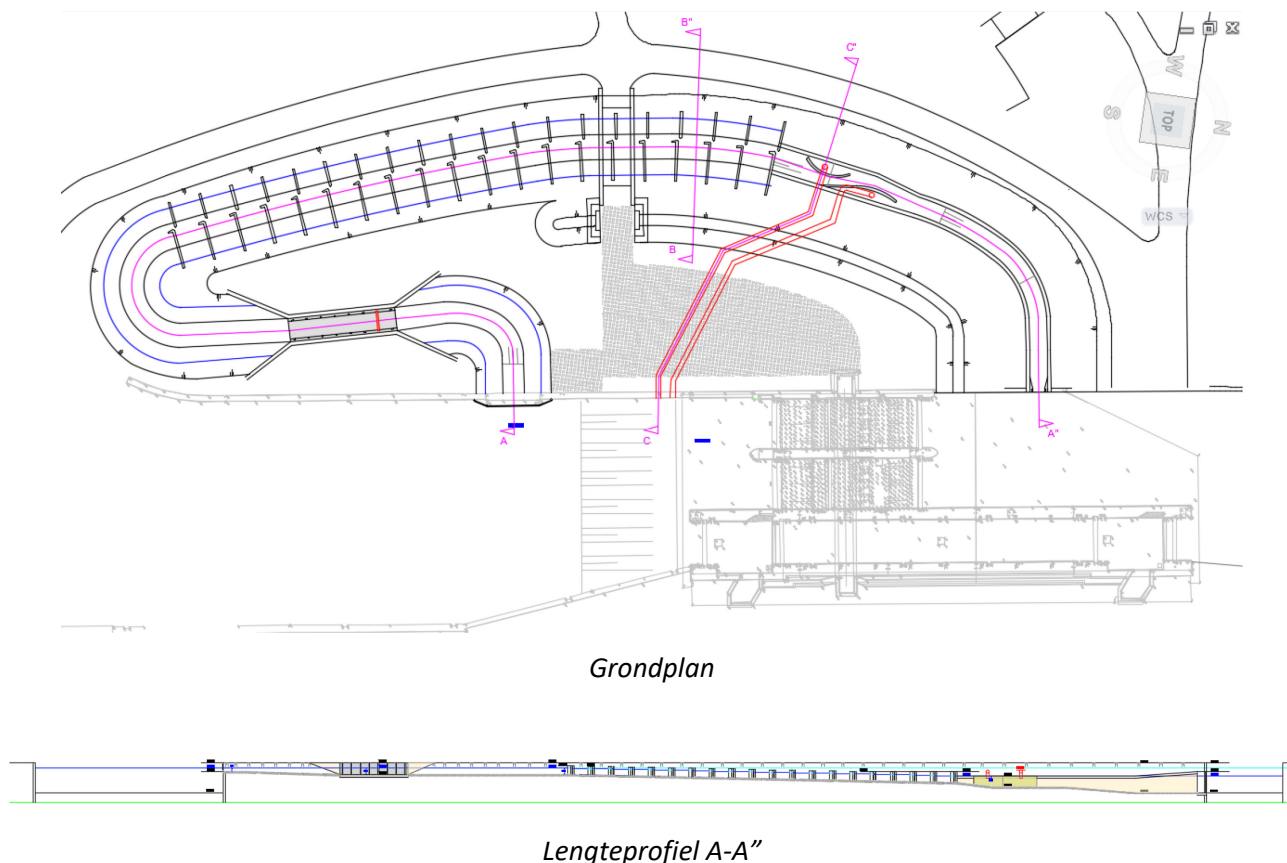
Eventuele slibafzetting in de luwere delen hoeft niet als ongunstig beschouwd te worden omdat dit juist zorgt voor nog meer variatie in microhabitats. Door de relatief grotere stroomsnelheden door de slots en in het centrum van de bekkens wordt verwacht dat er altijd delen in het bekken met voldoende ruwheid zullen blijven.

Er kunnen echter locaties in het traject van de vispassage zijn waar geen doorlopend substraat mogelijk is. Zo is ter plaatse van afsluitconstructies bijvoorbeeld een betonnen vloerplaat nodig over minimaal 1-2 m om afsluiting te kunnen garanderen en blokkade door stenen te kunnen voorkomen. Daarnaast is een losse steenbekleding ook niet wenselijk ter plaatse van een monitoringzone aangezien hier fuiken moeten kunnen worden geplaatst. Op deze locaties zijn de stroomsnelheden echter veel lager dan in de slots en de bekkens waardoor de noodzaak van bodemverruwing hier minder is.

In de algemene studie werd vastgesteld dat het voorgestelde bodemsubstraat aan alle maatgevende condities kan weerstaan tegen de daarbij optredende stroomsnelheden. Wel wordt aanbevolen om een veiligheidsmaatregel op te nemen in de automatische regeling van de opwaartse afsluitschuif. Deze veiligheidsmaatregel bestaat uit het opnemen van een voorwaarde voor automatische sluiting in het geval dat de afwaartse waterstand lager gaat dan 0,50 m onder afwaarts streefpeil.

4 Ruimtelijke inpassing

Figuur 15 toont het voorstel voor de ruimtelijke inpassing van het hydraulische ontwerp, zoals verder uitgewerkt kan worden in het bouwkundig ontwerp. Het betreft een vertical slotpassage met 20 sloten, een opwaartse instroom met afsluitconstructie en monitoringszone, een afwaartse inbreng van een toegevoegd debiet en een loodrechte monding met sponningen voor het kunnen droogzetten van de vispassage.



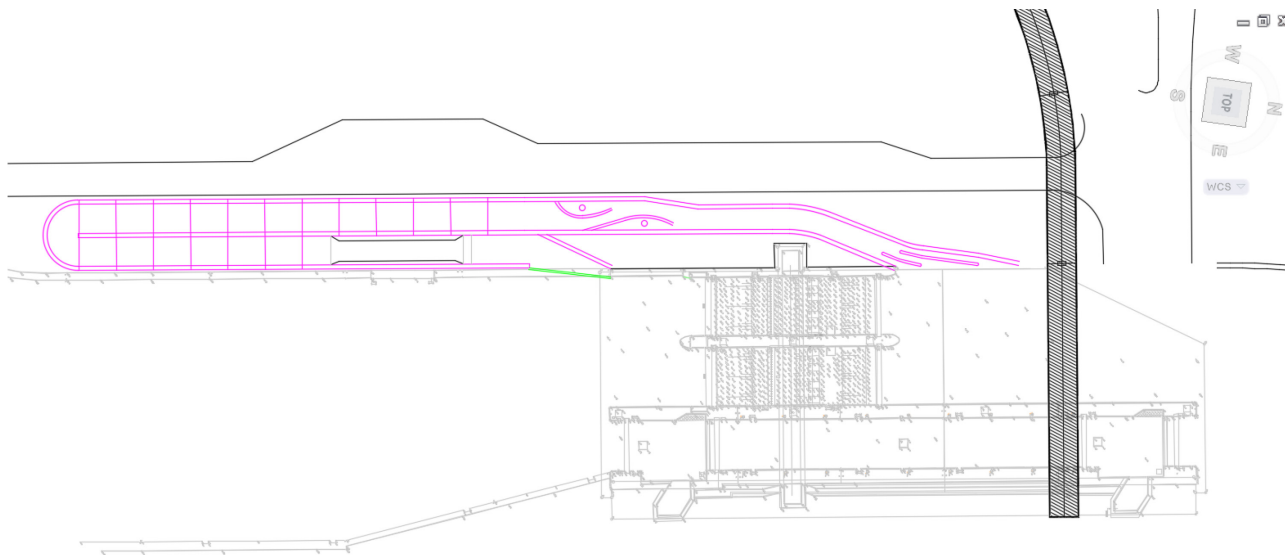
Figuur 15 – Ruimtelijke inpassing en lengteprofiel hydraulisch ontwerp vispassage

In dit ruimtelijke ontwerp kunnen vijf onderdelen worden onderscheiden, die verder beschreven worden in de andere hoofdstukken van dit rapport:

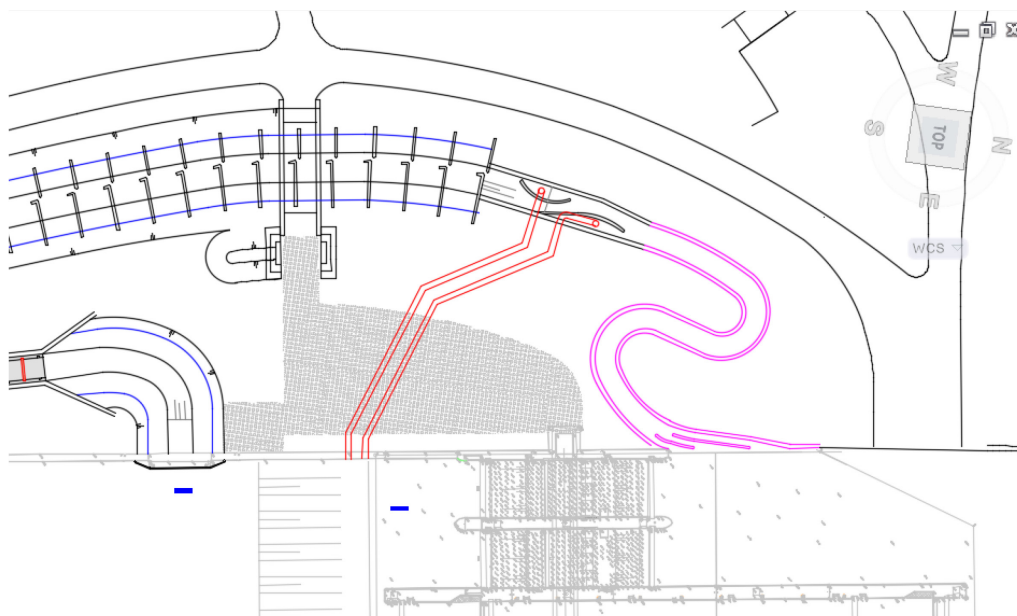
- Opwaartse instroom met drijfvuilbalk, afsluitconstructie en monitoringszone (hoofdstuk 5);
- Bekkens, slotwanden en tussenwand van de vispassage zelf (hoofdstuk 3);
- Inbreng van het toegevoegd debiet in het mondingskanaal (hoofdstuk 6);
- Mondingskanaal en de monding zelf (hoofdstuk 7);
- Erosiebescherming (hoofdstuk 8).

Bij deze ruimtelijke inpassing wordt opgemerkt dat deze vooral bepaald werd door de voorwaarde dat het tracé uit de bestaande vergunning niet aangepast kon worden, zie ruimtelijke randvoorwaarden in paragraaf 2.1.2.

Figuur 16 toont de ruimtelijke inpassing wanneer de ontwerpcriteria van de hydraulische studie toegepast worden. Deze inpassing zou echter een nieuwe vergunningsaanvraag vereisen, waardoor DVW hiervan heeft afgezien. Wel heeft DVW gevraagd om in het ontwerp te voorzien dat een eventuele aanpassing naar een meer parallelle monding in de toekomst mogelijk blijft, mocht dit blijken uit monitoring na aanleg. Figuur 17 geeft een schetsontwerp voor deze eventuele latere aanpassing van de uitstroom en monding.



Figuur 16 – Niet weerhouden voorkeurs ontwerp

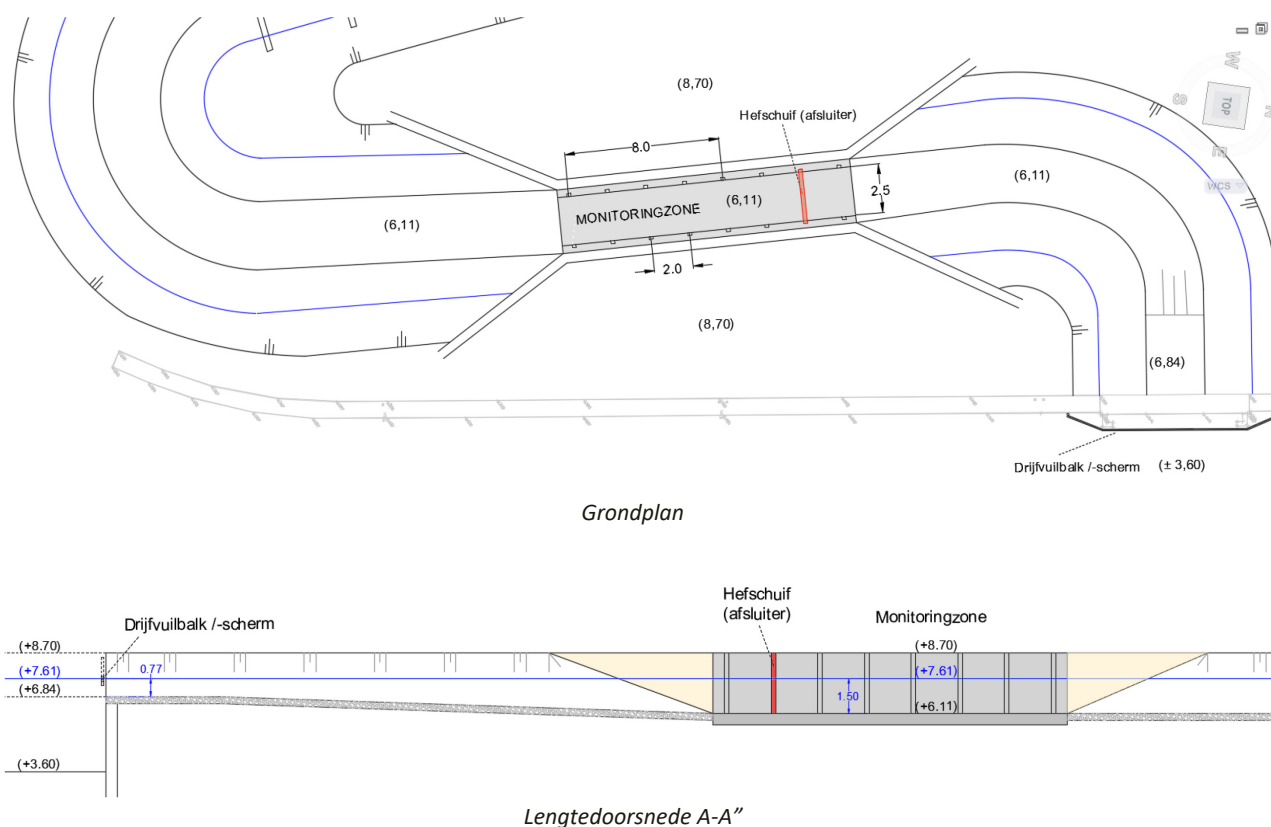


Figuur 17 – Tracé eventuele toekomstige aanpassing naar een parallelle monding

5 Instroom

Figuur 18 toont de dimensionering van de instroom. Voor de onderbouwing bij dit ontwerp wordt verwezen naar de hydraulische studie voor de vispassages op de Dender (Visser *et al.*, 2024). In de instroom worden sponningen voorzien voor de plaatsing van schotbalken, een afsluitconstructie en de plaatsing van monitoringsapparatuur. Daarom wordt voorgesteld om in deze zone betonnen wanden te voorzien waarin deze sponningen kunnen worden gerealiseerd. Vanuit het oogpunt van uniforme toepassing is nu een hart-op-hart afstand van 2 m tussen de sponningen voorgesteld. Voor de sponningdimensies kan worden vertrokken van een breedte van 0,20 m en een diepte van 0,15 m, maar deze waarden dienen bevestigd te worden in het bouwkundig ontwerp. Deze dimensies worden best ook afgestemd met de uitvoering op de andere locaties langs de Dender. Voor beheer en monitoring wordt namelijk best uniforme dimensies toegepast. De minimale lengte van 8 m voor de monitoringszone wordt bepaald door de lengte benodigd voor de toepassing van fuiken.

Aangezien zowel voor de waterdichtheid van de afsluitconstructie als voor de plaatsing van de monitoringsapparatuur een gladde bodem vereist is, wordt voorgesteld om ook de vloer van de instroom ter plaatse van de afsluitconstructie en monitoringszone in beton uit te voeren.

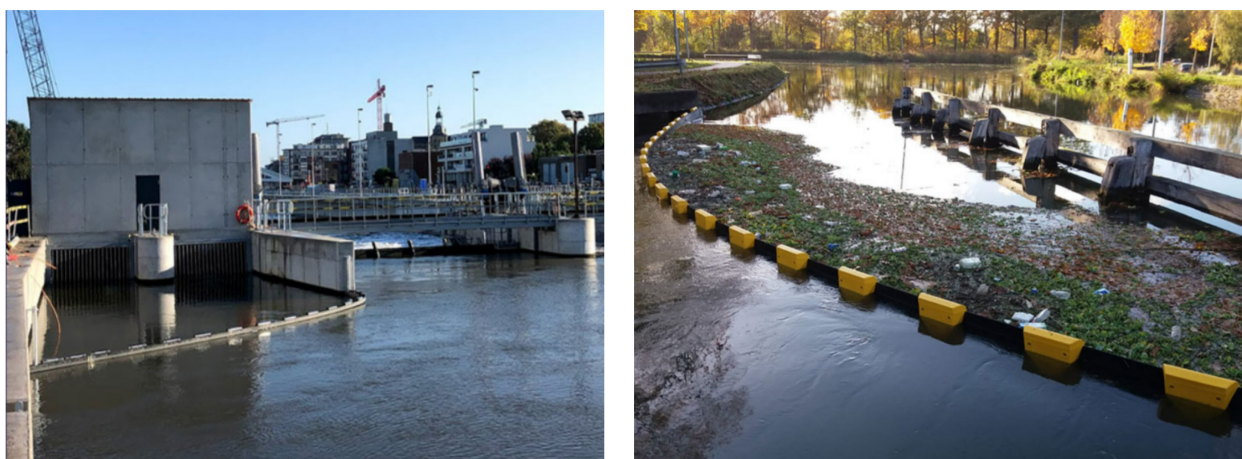


Figuur 18 – Dimensionering instroom (maatvoering in meters en mTAW)

Aan op- en afwaartse zijde van de betonnen vloer dient het (rolstenen) bodemsubstraat goed aan te sluiten zodat er geen opstaande randen ontstaan in het bodemverloop. De sortering en laagdikte (minimaal 0,30 m) van dit bodemsubstraat zijn beschreven in paragraaf 3.4.

Met het oog op zowel de op- als afwaartse migratie door de vispassage wordt het bodempeil van de instroom idealiter geleidelijk en best zo flauw mogelijk (zeker niet steiler dan 1:2) aangesloten op het bodempeil van het opwaarts pand (DWA, 2014). Dit is echter in deze ontwerpfase niet meer mogelijk aangezien het een nieuwe vergunningsaanvraag zou vergen vanwege de aanpassing in tracé.

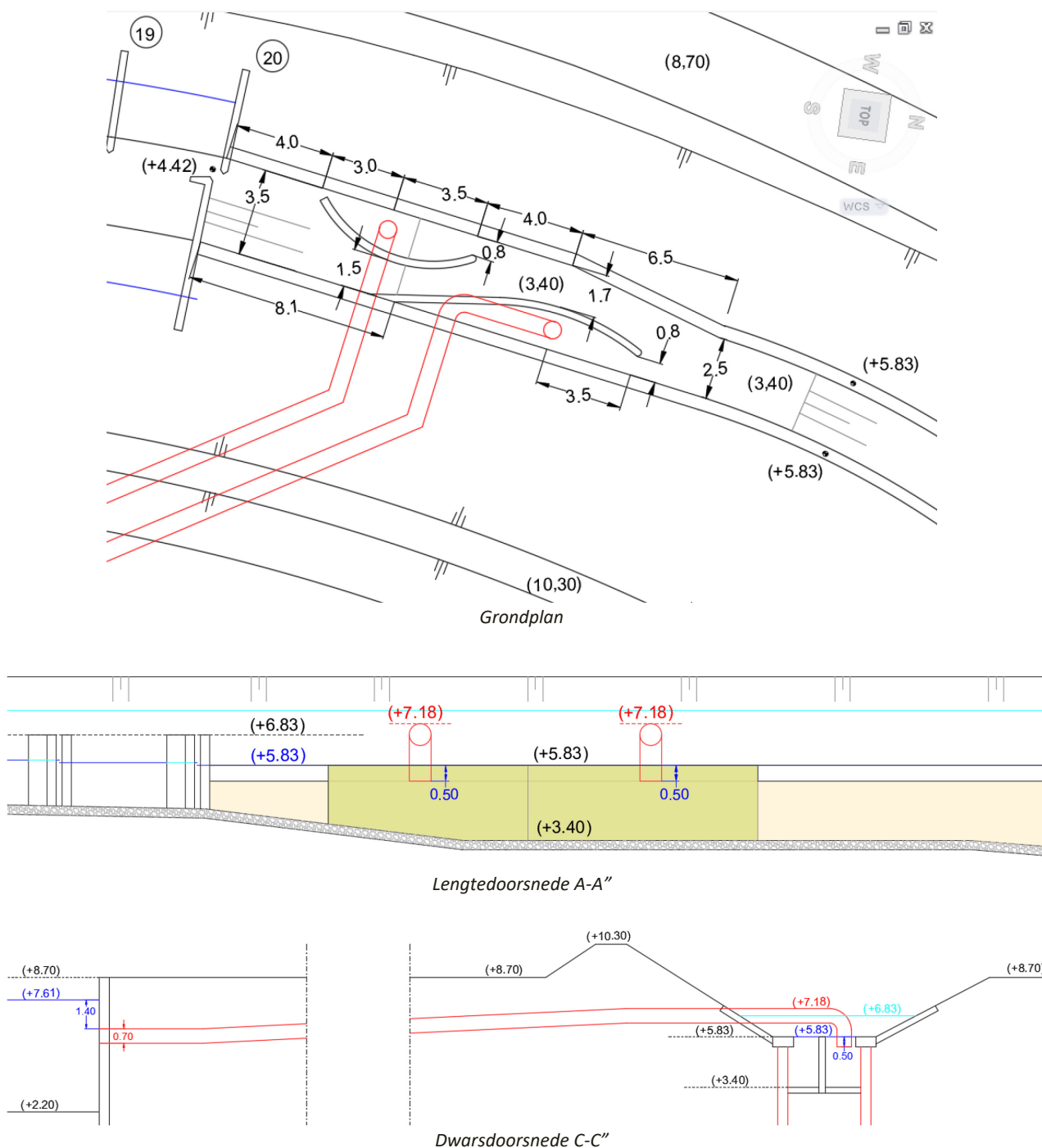
Om te voorkomen dat drijfvuil accumuleert in de vispassage en bijvoorbeeld de sloten van de vispassage zou kunnen blokkeren, dient aan opwaartse zijde een drijfvuilbalk/ -scherm te worden voorzien. Voor een optimale werking wordt geadviseerd een drijvend scherm (of drijvende balk) toe te passen, welke tot 0,15 m onder het optredende waterpeil vuil dient te kunnen afleiden (Coenen *et al.*, 2013). Zie voorbeelden in Figuur 19. Het is daarbij van belang dat het scherm helemaal aan de opwaartse zijde van de instroom en zo parallel mogelijk aan de stuwgeul wordt toegepast. Op deze wijze blijft het drijfvuil namelijk niet hangen in de instroom maar wordt het verder geleid langs de stuwen en de rivier. De drijfvuilconstructie dient mee te kunnen bewegen met opwaartse waterpeilen van 20 cm onder streefpeil (=7,41 mTAW) tot minimaal het alarmpeil van 8,25 mTAW.



Figuur 19 – Voorbeelden van drijvende drijfvuil werende constructies

6 Toegevoegd debiet

Figuur 20 toont de dimensionering van de bassins en buizen van het toegevoegd debiet. Voor de onderbouwing bij dit ontwerp wordt verwezen naar Visser *et al.* (2024).



Figuur 20 – Dimensionering toegevoegd debiet (maatvoering in meters en mTAW)

Het mondingskanaal, dat loopt van het meest afwaartse slot tot en met de monding, wordt uitgevoerd met verticale zijwanden (waarschijnlijk damwanden) die reiken tot een hoogte van het afwaartse streefpeil (5,83 mTAW). Vanaf deze hoogte beginnen de zijtaluds die met een steilheid van minimaal 6/4 doorlopen tot op het maaiveldpeil.

De buizen hebben een binnendiameter van 0,7 m en dienen een debiet te kunnen inlaten tot minimaal 1,5 m³/s per buis in het bovengrensscenario. Het materiaal van de buizen dient bepaald te worden in het bouwkundig ontwerp. Ook dient in elke buis een regelschuif te worden voorzien die continu en automatisch aangestuurd kan worden op basis van sturingsvoorwaarden. Merk op, deze regelschuiven werden nog niet ingetekend in Figuur 20. Wel werd een voorstel voor de sturingsvoorwaarden gedaan in de algemene hydraulische studie, zie Visser *et al.* (2024).

De beide regelschuiven dienen continu in stand te kunnen variëren. In de voorgestelde regeling worden per schuif maximaal 5 standen gebruikt: volledig gesloten en 4 instelbare openingen. De automatische regeling gebeurt op basis van het debiet over de stuw¹ en heeft tot doel een zo groot mogelijke verhouding van de lokstroom (debiet vispassage plus toegevoegd debiet) ten opzichte van het debiet over de stuw te realiseren.

Er is gekozen voor een systeem met een variabel aantal instelbare schuifstanden om een uniforme aanpak voor alle vispassages te realiseren, waarbij de beheerder toch de flexibiliteit heeft om een specifieke instelling te kiezen voor een bepaalde vispassage, indien gewenst.

Om voldoende buislengte voor inpassing van de schuiven te voorzien wordt er in Figuur 20 voor de afwaartse buis een verlenging in stroomrichting voorgesteld. Verwacht wordt namelijk dat de lengte tussen de neerwaartse knik en de damwand tussen vispassage en stuwgeul in het geval van een directe doorsteek te kort zal zijn. Deze aanpassing vergt, naast wat extra buislengte, wel een extra hoekstuk. Uit de hydraulische studie bleek echter dat de ladingsverliezen ten gevolge van deze extra knik en lengte klein genoeg zijn om nog altijd de vereiste 1,5 m³/s per buis te kunnen realiseren in het bovengrensscenario.

De wanden van het bassin reiken tot aan het afwaartse streefpeil (5,83 mTAW) en zullen onder normale omstandigheden dus overstromen. Merk op dat het opwaartse bassin twee uitstroomopeningen heeft: één opwaarts met een breedte van 0,3 m en één afwaarts met een breedte van 0,8 m. Het afwaartse bassin heeft alleen een afwaartse uitstroomopening met ook weer een breedte van 0,8 m. Deze afmetingen volgen uit een numerieke modelstudie (zie Visser *et al.*, 2024) en zijn dus van belang voor een goede hydraulische werking.

Voor het materiaal van de wanden wordt voorgesteld om de dezelfde uitvoering toe te passen als op een al uitgevoerde voorbeeldlocatie in de Elbe te Geesthacht in Duitsland (zie Figuur 21). De exacte materialen zijn op het moment van het schrijven van dit rapport niet gekend. Wel kunnen de volgende algemene vaststellingen worden gedaan:

- De wanden bestaan uit H-profielen met daartussen gladde (flexibele/gebogen?) platen, en afsluitende topligger.
- De H-profielen dienen verankerd te zijn in de bodem. Met oog op stabiliteit kunnen H-profielen ook door middel van druk- en trekankers worden verbonden aan de damwand (zie Figuur 21). De noodzaak, dikte en hoogte van dergelijke ankerstaven dienen echter bepaald te worden in het bouwkundige ontwerp.
- Aangezien het materiaal niet gekend is, is ook de (benodigde) dikte van de wanden momenteel niet gekend. Ook dit dient bepaald te worden in het bouwkundige ontwerp. In Figuur 20 werden de wanden ingetekend met een dikte van 0,3 m. Bij een andere dikte dient de binnenzijde van de bassinwanden op dezelfde plaats te blijven en ook de hoogte van de wand en de breedte van de uitstroomopeningen dienen behouden te blijven.

¹ Dit debiet wordt continu berekend op basis van het opwaartse waterpeil en de stand van de stuwen.



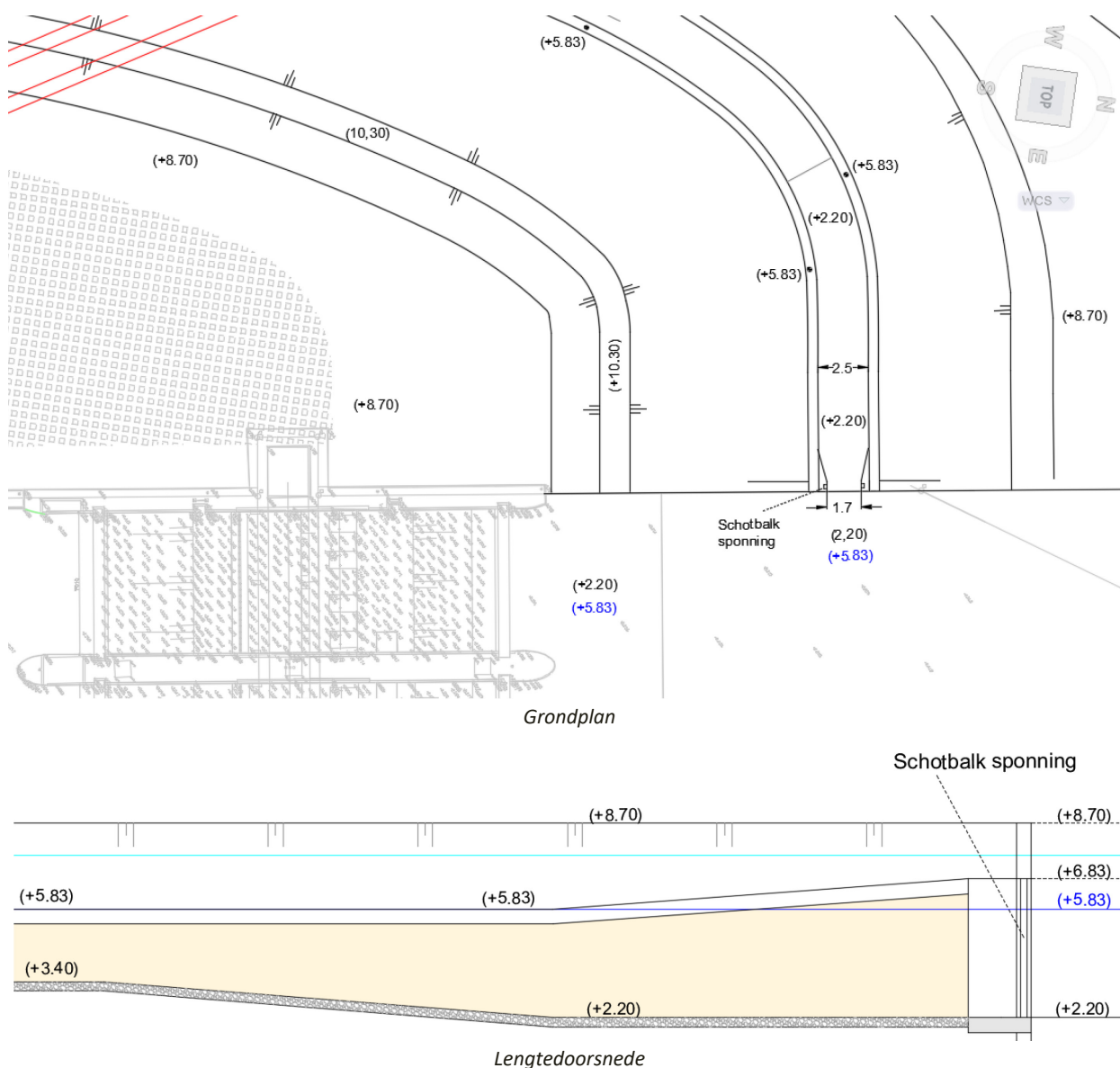
Figuur 21 – Voorbeeld voorkeur uitvoering wanden toegevoegd debiet

Vervolgens wordt opgemerkt dat de rolstenen op de bodem van de bassins gefixeerd dienen te worden, aangezien het water uit de buizen met hoge snelheid de bodem zal raken. Indien bouwkundig gewenst kan hier ook een betonnen vloer worden voorzien, maar dan dient het bodempeil behouden te blijven en ook goed aan te sluiten op het rolstenen bodemsubstraat na de uitstroom uit de bassins (m.a.w. er mogen geen opstaande randen ontstaan).

Ten slotte wordt opgemerkt dat de doorsteek van de buizen nu voldoende diep is gekozen om aan opwaartse zijde de aanzuiging van lucht en/of drijfvuil te voorkomen; bovenkant binnenzijde buis op 6,21 mTAW geeft een waterdekking van 2x de buisdiameter.

7 Monding

Figuur 22 toont de dimensionering van de monding. Het mondingskanaal heeft een breedte van 2,5 m en ter hoogte van de monding een bodemhoogte gelijk aan dat van het afwaartse pand (2,20 mTAW). Het mondingskanaal, dat loopt van het meest afwaartse slot tot en met de monding, wordt uitgevoerd met verticale zijwanden (waarschijnlijk damwanden) die reiken tot een hoogte van het afwaartse streefpeil (5,83 mTAW). Vanaf deze hoogte beginnen de zijtaluds die met een steilheid van minimaal 6/4 doorlopen tot op het maaiveldpeil.



Figuur 22 – Dimensionering monding en het mondingskanaal (maatvoering in meters en mTAW)

Ter plaatse van de monding wordt een schotbalksponning voorzien die de vispassage kan afsluiten tot een peil van 6,83 mTAW. Deze schotbalksponning dient om de vispassage droog te kunnen zetten voor inspectie en onderhoudswerken. Om deze sponning te kunnen realiseren zal het mondingskanaal waarschijnlijk versmald moeten worden tot een breedte van 1,7 m.

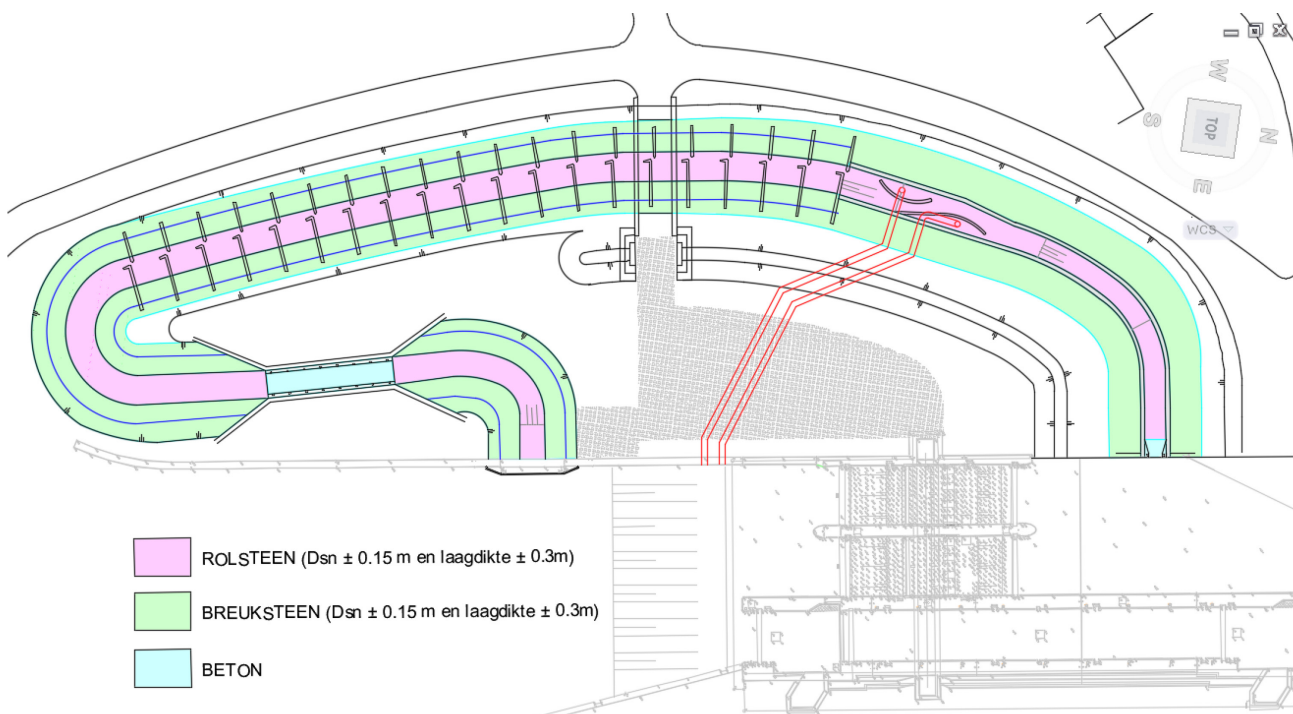
8 Erosiebescherming

In de vispassage dient op de bodem en taluds bekleding te worden voorzien als erosiebescherming. Zoals aangegeven in paragraaf 3.4 wordt op de bodem langs zo goed als het volledige traject een rolstenen bodemsubstraat voorzien met een nominale steendiameter van circa 0,15 m en een laagdikte van minimaal 0,30 m (bijvoorbeeld standaard sortering 90/180 mm). Enkel ter plaatse van de monitoringszone, opwaartse afsluiter en afwaartse schotbalk spanning wordt een betonnen bodem voorzien.

Op taluds wordt een breuksteen bekleding voorzien met nominale steendiameter van circa 0,15 m en een laagdikte van minimaal 0,30 m (bijvoorbeeld standaard sortering 90/180 mm). Op de taluds wordt gekozen voor breuksteen in plaats van rolstenen met oog op stabiliteit. De gladdere rolstenen op de bodem zijn nodig vanuit het oogpunt van de migratie van doelsoorten. De taluds hebben een minimale steilheid van 6/4. De breuksteen bekleding wordt doorgetrokken tot minimaal 50 cm boven de slotwanden. Aan opwaartse zijde betekent dit dat de breuksteen bekleding dient te worden doorgetrokken tot het maaiveldpeil (=kruinpeil). Figuur 23 geeft een ruimtelijke inpassing van de verschillende soorten bekleding.

Tenslotte wordt opgemerkt dat het rolstenen bodemsubstraat gefixeerd dient te worden te worden doormiddel van grouting op de volgende plaatsen:

- In de bassins van het toegevoegd debiet; deze grouting wordt best tot 2 m na de uitstroomopeningen doorgetrokken.
- In de sloten van de vispassage; deze grouting wordt best doorgetrokken tot 1 m afwaarts van het slot. NB: hierbij dienen de rolstenen wel enigszins te blijven uitsteken uit de grouting zodat de nodige ruwheid van het bodemsubstraat behouden blijft.



Figuur 23 – Locatie en type erosiebescherming

9 Referenties

AMINAL (2005). Vismigratie – Een handboek voor herstel in Vlaanderen en Nederland. Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap: Brussel. ISBN 9080324566. 205 pp.

Coenen, J.; Antheunisse, M.; Beekman, J.; Beers, M. (2013). Handreiking vispassages in Noord-Brabant. Waterschap Aa en Maas: [S.l.]

DWA. (2014). M509 Fischaufstiegsanlagen und fischpassierbare Bauwerke - Gestaltung, Bemessung, Qualitätssicherung. ISBN 9783942964913. 336 pp.

Larinier, M., (2002). Pool Fishways, Pre-barrages and Natural Bypass Channels – Bull. Fr. Pêche Piscic. 364 suppl., 54-82. FAO. Boves, France.

Verelst, K.; Visser, K.P.; Viaene, P.; Peeters, P.; Mostaert, F. (2014). Erosieproblematiek stuwsluis Asper: Deelrapport 2 – erosieproblematiek visnevengeul. Versie 4.0. WL Rapporten, 13_045. Waterbouwkundig Laboratorium Antwerpen, België.

Visser, K.P.; Buysse, D.; Goormans, T.; Viaene, P. (2024). Vispassages op de Dender: Hydraulische studie algemeen ontwerp. Versie 3.0. WL Rapporten, 14_0128_2. Waterbouwkundig Laboratorium, Antwerpen.

Bijlage 1 Controle waterstandfluctuatie

In paragraaf 2.3.2 van dit rapport werden passeerbaarheidscriteria aangeven voor de periode van optimale werking. De periode van optimale werking wordt in stuwpanden gedefinieerd door de maatgevende fluctuatie in het op- en afwaartse waterpeil. In deze bijlage worden de passeerbaarheidscriteria gecontroleerd voor het voorkeurs ontwerp uit hoofdstuk 3 bij de maatgevende waterpeilfluctuaties.

Maatgevende scenario's

In de algemene hydraulische studie werd vastgesteld dat de nieuwe vispassages op de Dender optimaal dienen te kunnen werken bij peilfluctuaties van +/- 0,20 m in het opwaartse waterpeil en -0,20 m en +0,5 m in het afwaartse waterpeil.

Daarbij werd opgemerkt dat de vispassage ook hogere waterpeilen vanuit het oogpunt van vismigratie best open blijft aangezien er in deze situaties geen risico is op schade (verval over vispassage neemt juist af; en drijfvuil wordt afgeleid via een opwaartse drijfvuil balk). Om een idee te krijgen van de stroomsnelheden door de vispassage bij verhoogde waterpeilen worden ook situaties mee genomen in de berekeningen bij waterstanden die minder dan 1% van de tijd worden over schreden (toename opwaarts peil tot 0,30 m boven streefpeil, en toename afwaarts peil tot 1,0 m boven streefpeil).

Risico op schade kan optreden bij extreme toename van het verval, aangezien dan ook de stroomsnelheden in de vispassage (sterk) toenemen. In het geval van een technisch ontwerp zoals een vertical slot vispassage met zijwanden bestaande uit damplanken en betonnen vloer is dit risico zeer gering. Wel kan bij te hoge stroomsnelheden het bodemsubstraat eventueel wegspoelen. Meestal worden extreme vervallen veroorzaakt door het (plots) wegzakken van het afwaartse waterpeil. Bij toename van het opwaartse peil neemt het afwaartse waterpeil namelijk altijd sneller toe waardoor het verval juist afneemt. Voor het meest extreme maatgevende verval wordt een combinatie van opwaarts streefpeil bij een val van de afwaartse waterstand met 0,50 m ten opzichte van streefpeil toegepast. Dit scenario zal worden meegenomen om de meest extreme belasting van het bodemsubstraat te kunnen bepalen.

Tabel 8 geeft een overzicht van de maatgevende waterstand scenario's.

Toetsingscriteria

In paragraaf 2.3.2 werden de criteria gegeven voor optimale passeerbaarheid voor de doelsoorten. In het geval van vertical slots spelen de minimale doorzwembreedte en de minimale doorzwemdiepte bij peilfluctuaties geen bepalende rol. De slotbreedte wordt namelijk logischerwijze niet beïnvloed door peilfluctuaties. Deze werd breed genoeg gekozen voor de doelsoorten (Visser *et al.*, 2024). Ook de waterdiepte speelt geen bepalende rol aangezien er vanuit andere criteria voldoende waterdiepte in de sloten is gekozen dat gestelde criteria nooit onder- of overschreden worden.

Wel dient er gecontroleerd te worden op maximale stroomsnelheden in de sloten en toelaatbare energiedissipatie per bekken. Scenario N0 t/m N4 (zie Tabel 8) betreffen de situaties waarbij de vispassage optimaal moet kunnen werken. Voor deze scenario's worden daarom de volgende ontwerpcriteria gecontroleerd:

- Stroomsnelheid $\rightarrow V_g < 1 - 1,5 \text{ m/s}$ (idealiter zo laag mogelijk binnen deze range);
- Energiedissipatie per bekken $\rightarrow E < 100 \text{ W m}^3/\text{s}$.

De andere scenario's (E1 t/m E3) dienen eerder voor het bepalen van de hydraulische belastingen onder extremere omstandigheden en/of de mate van passeerbaarheid onder extreme(re) omstandigheden.

Tabel 8 – Maatgevende scenario's waterstandfluctuatie bij normale werking

scenario	Opwaarts waterpeil (mTAW)	Verskil t.o.v. streefpeil (m)	Afwaarts waterpeil (mTAW)	Verskil t.o.v. streefpeil (m)	Verval (m)	Verskil t.o.v. verval bij streefpeil (m)	Omschrijving
N0	7,61	0,00	5,83	0,00	1,78	0,00	Streefpeilen
N1	7,61	0,00	5,63	- 0,20	1,98	+ 0,20	Laag afwaarts peil
N2	7,81	+ 0,20	5,83	0,00	1,98	+ 0,20	Hoog opwaarts peil
N3	7,61	0,00	6,33	+ 0,50	1,28	- 0,50	Hoog afwaarts peil
N4	7,41	- 0,20	5,83	0,00	1,68	- 0,20	Laag op- en afwaarts peil
E1	7,61	+0,00	5,33	- 0,50	2,28	+ 0,50	Extreem verval (door val afwaartse waterstand)
E2	7,91	+ 0,30	5,83	0,00	2,30	+ 0,30	Sterk verhoogd opwaarts peil
E3	7,61	0,00	6,83	+ 1,00	1,00	- 1,00	Sterk verhoogd afwaarts peil

Verval en stroomsnelheid

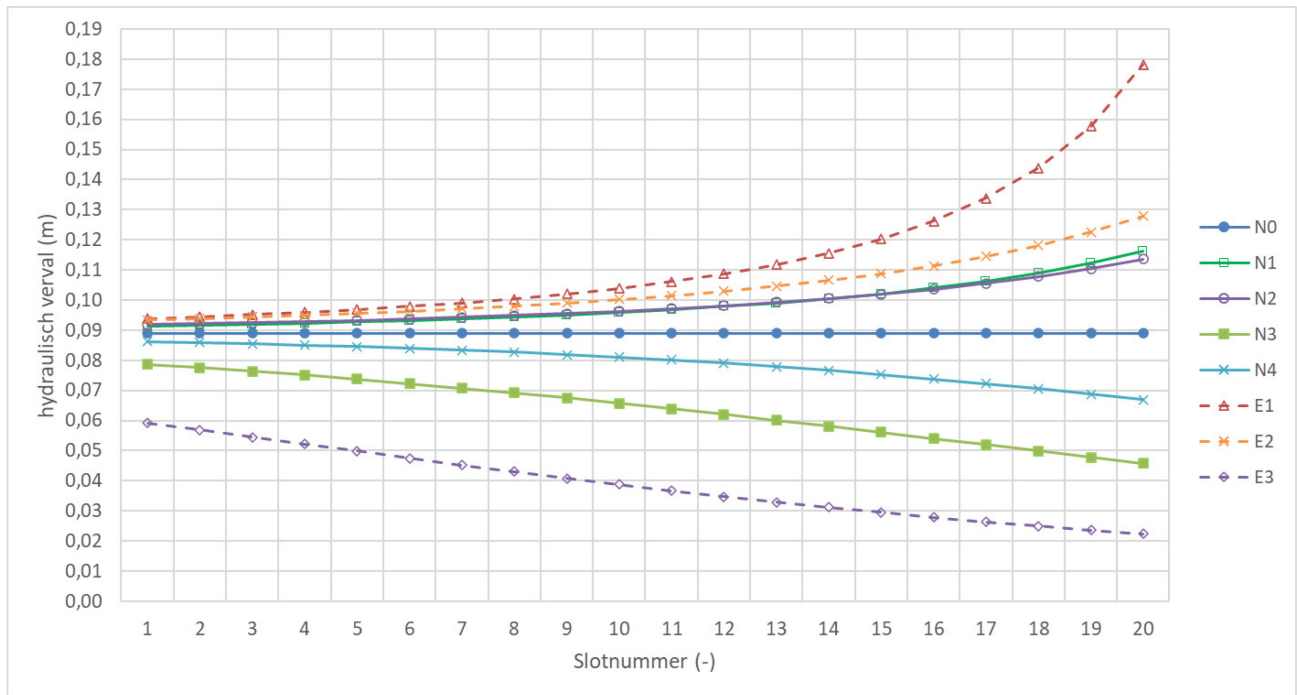
De gemiddelde stroomsnelheid doorheen een vertical slot kan berekend worden door middel van de volgende formule (Larinier, 2002):

$$V_g = C_d \cdot \sqrt{2g \cdot dh_w} \quad [2]$$

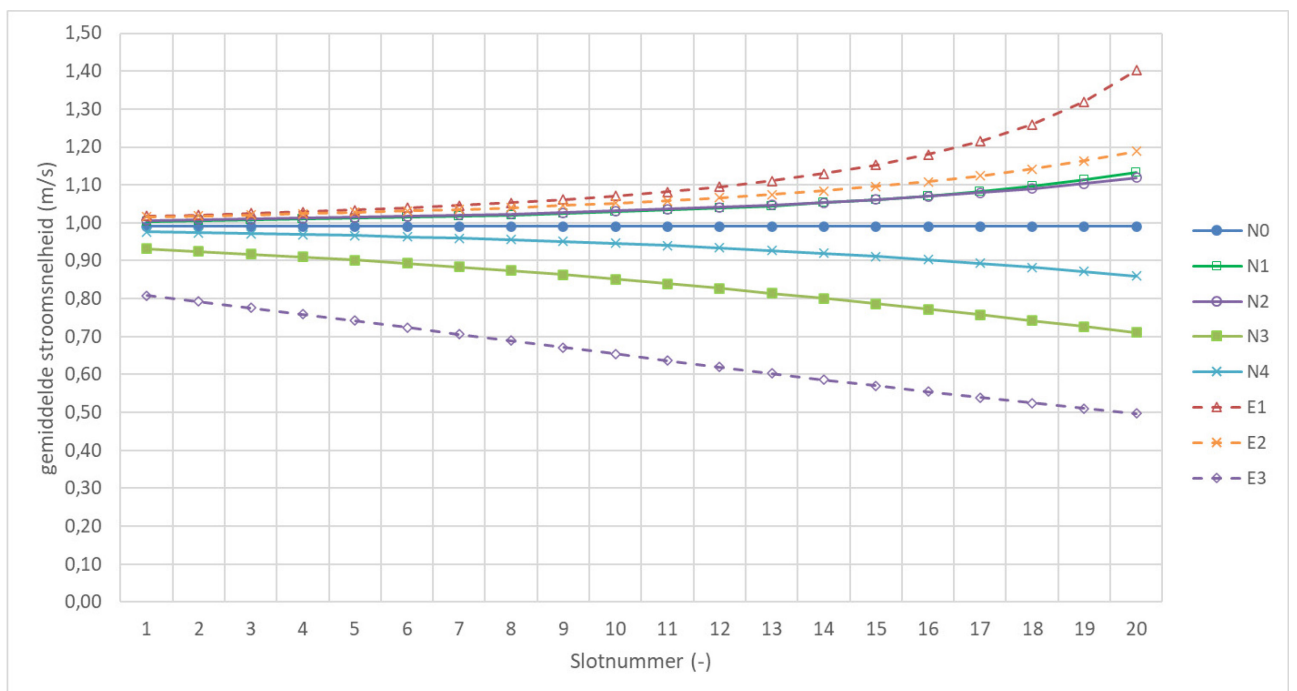
Met:

V_g	=	Gemiddelde stroomsnelheid door het slot	[m/s]
C_d	=	Debietscoëfficiënt (0,65 tot 0,85)	[-]
dh_w	=	Hydraulisch verval over het slot (= $h_1 - h_2$)	[m]
h_1	=	Waterhoogte opwaarts van het slot	[m]
h_2	=	Waterhoogte afwaarts van het slot	[m]

Voor elk van de maatgevende scenario's worden per slot de op- en afwaartse waterstand en waterhoogte op een iteratieve wijze bepaald met behulp van de debietformule uit paragraaf 3.3. Voor elk van de sloten kan vervolgens met bovenstaande formule de gemiddelde stroomsnelheid in het slot worden bepaald op basis van de berekende op- en afwaartse waterdiepte. Merk op dat de werkelijke debietcoëfficiënt (C_d) nog niet gekend is, daarom wordt in de berekening uitgegaan van de gemiddelde waarde: $C_d = 0,75$. Werkelijke stroomsnelheden kunnen dus circa 10% lager of hoger liggen.



Figuur 24 – Hydraulisch verval over elk slot bij de maatgevende waterstandscenario's



Figuur 25 – Gemiddelde stroomsnelheid in elk slot bij de maatgevende waterstandscenario's

Bij op- en afwaarts streefpeil (N0) ligt de gemiddelde stroomsnelheid op circa 1 m/s. Binnen de range voor normale werking (N1 t/m N4) kunnen stroomsnelheden toenemen tot circa 1,2 m/s en dalen tot circa 0,5 m/s. Dit betekent dat onder normale omstandigheden de stroomsnelheden altijd onder de maximale sprintsnelheid van 1,5 m/s blijven, en er ook nog enige bufferruimte is met oog op de onzekerheid ten aanzien van de debietcoëfficiënt.

Energie dissipatie bekken

Ook dient gecontroleerd te worden of de bekken voldoende volume hebben om de energie na elk slot te kunnen dissiperen zonder de maximale energie per bekken te overschrijden. Bij een te klein volume bestaat het risico dat een doorgaande stroming gevormd wordt tussen de sloten. In de literatuur wordt dit gecontroleerd door de hoeveelheid te dissiperen energie te delen door het bekkenvolume. In Larinier (2002) wordt hiervoor volgende formule gegeven:

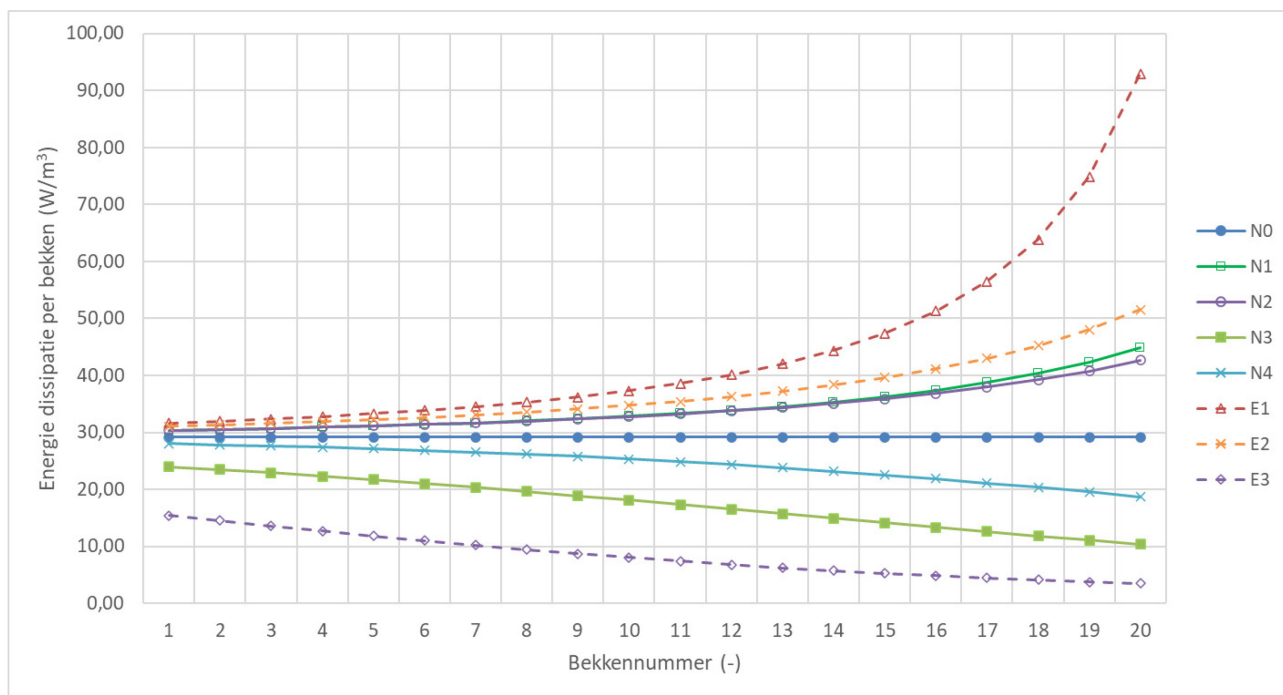
$$E = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot dh_w}{L_b \cdot B_b \cdot y_b} \quad [3]$$

Met:

E =	Volumetrische energiedissipatie per bekken	[W/m ³]
ρ =	Dichtheid zoetwater (998)	[kg/m ³]
g =	Valversnelling (9,81)	[m/s ²]
Q =	Debiet	[m ³ /s]
dh _w =	Hydraulisch verval over het slot	[m]
L _b =	Bekkenlengte	[m]
B _b =	Bekkenbreedte	[m]
y _b =	Waterdiepte in het bekken	[m]

Bij deze berekening wordt opgemerkt dat voor de waterdiepte h₂ wordt gebruikt, dit is de waterdiepte net afwaarts van het slot (y_b = h₂). Dit is een conservatieve aanname aangezien de diepte in het bekken geleidelijk toeneemt tot opwaarts van het volgende slot terug de waterdiepte (h₁) wordt bereikt omwille van het bodemverhang. Figuur 26 toont de resultaten voor elk van de maatgevende scenario's.

Bij streefpeilen wordt de volumetrische gedissipeerde energie per bekken berekend op E ≈ 29 W/m³, wat aanmerkelijk lager is dan het ontwerpcriterium van E < 100 W/m³. Ook bij normale waterpeilfluctuaties (N1 t/m N4) en zelfs bij extremere fluctuaties (E1 t/m E3) blijft de energie onder het ontwerpcriterium.



Figuur 26 – Energie dissipatie per bekken bij de maatgevende waterstandscenario's

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