



Vlaanderen
is wetenschap



14_128_3
WL rapporten

Vispassage op de Dender te Denderleeuw

Hydraulische ontwerp

DEPARTEMENT
MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

Vispassage op de Dender te Denderleeuw

Hydraulisch ontwerp

Visser, K.P.; Buysse, D.; Viaene, 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/2025/3241/010

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Visser, K.P.; Buysse, D.; Viaene, P. (2024). Vispassage op de Dender te Denderleeuw: Hydraulisch ontwerp. Versie 4.0. WL Rapporten, 14_128_3. Waterbouwkundig Laboratorium, Antwerpen.

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

Documentidentificatie

Opdrachtgever:	De Vlaamse Waterweg afdeling Regio West	Ref.:	WL2024R14_128_3
Keywords (3-5):	Vispassages; Vertical slot; Dender		
Kennisdomeinen:	Vispassages > Vertical Slot		
Tekst (p.):	31	Bijlagen (p.):	5
Vertrouwelijk:	<input checked="" type="checkbox"/> Nee	<input checked="" type="checkbox"/> Online beschikbaar	

Auteur(s):	Visser, K.P.; Buysse, D.
------------	--------------------------

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Viaene, P.	Getekend door: Peter Viaene (Signature) Getekend op: 2025-02-13 11:16:03 +01:0 Reden: Ik keur dit document goed  
Projectleider:	Visser, K.P.	Getekend door: Klaas Visser (Signature) Getekend op: 2025-02-11 10:51:16 +01:0 Reden: Ik keur dit document goed  

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Bellafkih, K.	Getekend door: Abdelkarim Bellafkih (Sig) Getekend op: 2025-02-11 11:16:46 +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 Denderleeuw. Het ontwerp bestaat uit een vertical slotpassage met 30 bekkens, een opwaartse instroom met afsluitconstructie en monitoringszone, een afwaartse inbreng van een toegevoegd debiet en een parallelle monding met geleidingswanden.

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 Ontwerpcriteria.....	3
2.1.1 Werkingsperiode.....	4
2.1.2 Passeerbaarheid	4
2.1.3 Attractiviteit (monding)	5
2.2 Hydraulische randvoorwaarden.....	7
2.2.1 Streef- en alarmpeilen	7
2.2.2 Meetlocaties en histogrammen.....	7
2.2.3 Debieten	9
2.2.4 Waterpeilen	10
2.3 Ruimtelijke randvoorwaarden	11
2.3.1 Streef- en bodempeilen	11
2.3.2 Stuwen	11
2.3.3 Locatie en beschikbare ruimte	14
3 Dimensionering vispassage	15
3.1 Vispassagetype.....	15
3.2 Bekkens en slotwanden	15
3.3 Tussenwand	18
3.4 Debiet.....	18
3.5 Bodemsubstraat.....	20
4 Ruimtelijke inpassing.....	22
5 Instroom	24
6 Toegevoegd debiet	26
7 Monding	29

8	Referenties	31
Bijlage 1	Controle waterstandfluctuatie	B1
	Maatgevende scenario's.....	B1
	Toetsingscriteria	B1
	Verval en stroomsnelheid.....	B2
	Energie dissipatie bekens	B4

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Biologische ontwerpcriteria passeerbaarheid vispassage	5
Tabel 2 – Streef- en alarmpeilen te Denderleeuw	7
Tabel 3 – Histogram gemeten waterstanden en (geïnterpoleerd) debiet	9
Tabel 4 – Maatgevende debieten.....	9
Tabel 5 – Maatgevende waterpeilfluctuaties tijdens periode optimale werking	10
Tabel 6 – Dimensionering bekkens en slotwanden.....	16
Tabel 7 – Slotwandhoogtes en bodemhoogtes in de sloten*	17
Tabel 8 – Maatgevende scenario's waterstandfluctuatie bij normale werking	B2

Lijst van de figuren

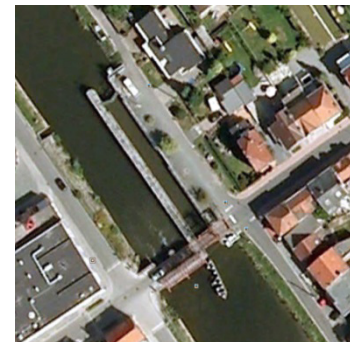
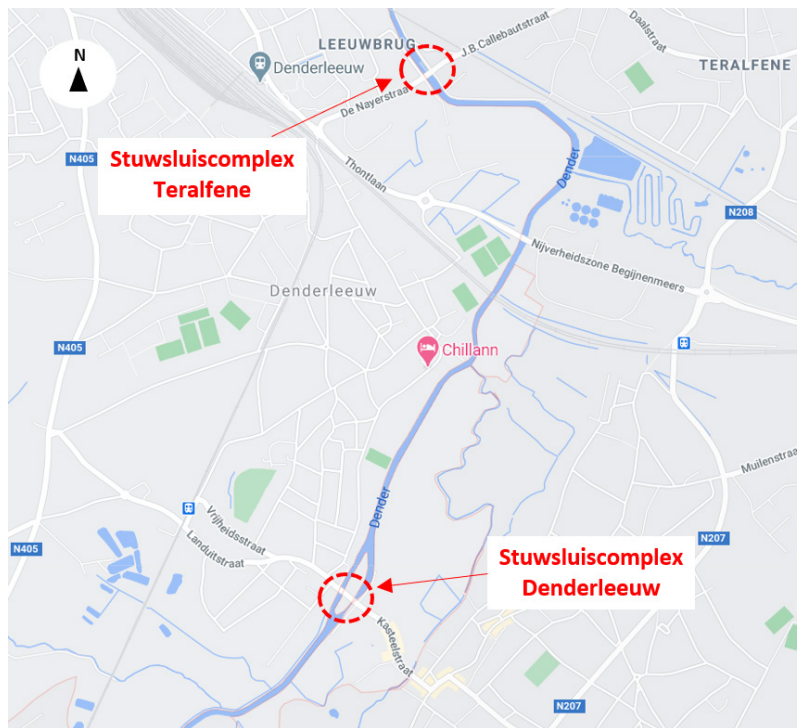
Figuur 1 – Huidige stuwsluscomplexen op de Dender te Denderleeuw (onder) en Teralfene (boven).....	1
Figuur 2 – Enkele doelsoorten (Foto's: VILDA, Rollin Verlinde en Yves Adams*)	3
Figuur 3 – Relatie migratielinielijnen en monding vispassage	5
Figuur 4 – Drie waterstandmeetposten te Denderleeuw op www.waterinfo.be	8
Figuur 5 – Balgstuwontwerp voor de nieuwe stuwen op de Dender	12
Figuur 6 – Huidig ontwerp nieuwe stuwen Denderleeuw met maatgevende parameters	13
Figuur 7 – Luchtfoto huidige stuwsluscomplex op de Dender te Denderleeuw	14
Figuur 8 – Maatgevende parameters dimensionering bekken en slotwanden (naar: Larinier, 2002)	16
Figuur 9 – Schematisch lengteprofiel met maatgevende hoogtes.....	17
Figuur 10 – Debiet door de vispassage bij fluctuatie in het opwaartse waterpeil.....	19
Figuur 11 – Invloed fluctuatie in afwaartse waterpeil op het debiet door de vispassage	19
Figuur 12 – Voorbeeld toepassing rolstenen in de vispassage te Sint-Baafs-Vijve	20
Figuur 13 – Ruimtelijke inpassing hydraulisch ontwerp vispassage.....	22
Figuur 14 – Zoom-in ruimtelijke inpassing nieuwe stuwen en afwaarts gedeelte vispassage.....	23
Figuur 15 – Dimensionering instroom (maatvoering in meters en mTAW)	24
Figuur 16 – Dimensionering toegevoegd debiet (maatvoering in meters en mTAW)	26
Figuur 17 – Voorbeeld voorkeur uitvoering wanden toegevoegd debiet.....	28
Figuur 18 – Voorbeeld neerwaarts gebogen opwaarts opzetstuk voor voldoende waterdekking.....	28
Figuur 19 – Dimensionering mondingskanaal en geleidingswanden (maatvoering in meters en mTAW)	29
Figuur 20 – Hydraulisch verval over elk slot bij de maatgevende waterstandscenario's	B3
Figuur 21 – Gemiddelde stroomsnelheid in elk slot bij de maatgevende waterstandscenario's	B3
Figuur 22 – 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 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. In een overkoepelende studie werden de ontwerpcriteria, hydraulische randvoorwaarden en het algemeen ontwerp voor de nieuwe vispassages op de Dender onderzocht, zie Visser *et al.* (2024).

Het stuwsluiscplex te Denderleeuw is een van de complexen die vernieuwd zullen worden en waar een vispassage wordt voorzien (zie Figuur 1). Het stuwsluiscplex te Teralfene, dat het eerste complex is afwaarts van Denderleeuw, zal komen te vervallen waardoor het verval over de stuwen te Denderleeuw zal toenemen.



Teralfene



Denderleeuw

Figuur 1 – Huidige stuwsluiscplexen op de Dender te Denderleeuw (onder) en Teralfene (boven)

1.2 Doelstelling

Het onderhavig rapport geeft het hydraulische ontwerp met bijbehorende hydraulische randvoorwaarden en ontwerpcriteria voor de nieuwe vispassage te Denderleeuw. Hierbij wordt vertrokken van het algemene hydraulische ontwerp zoals bepaald in Visser et al. (2024). Het hydraulisch ontwerp voor de vispassage te Denderleeuw 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. Op basis van de hydraulische studie werd gekozen voor een vertical slotpassage met parallelle monding en toegevoegd debiet.

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

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

2 Uitgangspunten

Dit hoofdstuk geeft de uitgangspunten, randvoorwaarden en ontwerpcriteria zoals toegepast bij het hydraulisch ontwerp van de vispassage.

2.1 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 in Visser *et al.* (2024). Figuur 2 toont enkele van de doelsoorten.



Kleine modderkruiper



Rivierprik



*Driedoornige stekelbaars**



Zeeprik



Blankvoorn



Riviergrondel



Europese meerval



Paling



Baars

Figuur 2 – Enkele doelsoorten (Foto's: VILDA, Rollin Verlinde en Yves Adams*)

2.1.1 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) beschikbaar is of 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 verschilt 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.

2.1.2 Passeerbaarheid

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

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

Voor elk van deze factoren kunnen verschillende typen van de doelsoorten bepalend zijn. Tabel 1 geeft het overzicht van de verschillende ontwerpcriteria voor passeerbaarheid zoals bepaald op basis van de doelsoorten in de algemene hydraulische studie.

Tabel 1 – Biologische ontwerpcriteria passeerbaarheid vispassage

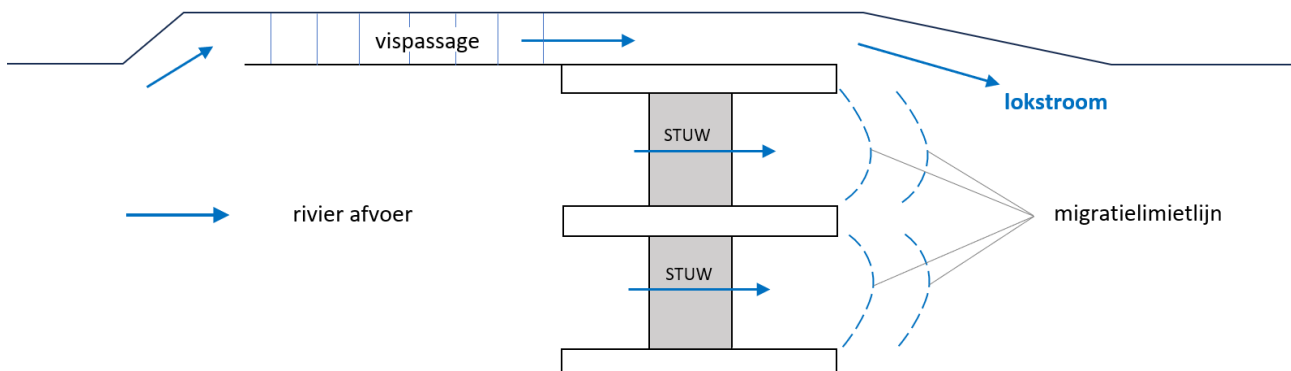
Omschrijving	parameter	Waarde en eenheid
Maximale stroomsnelheid over korte afstand (slot/drempel)	V_{\max_sprint}	1 - 1,5 m/s
Maximale stroomsnelheid over langere afstand	V_{\max_kruis}	0,5 m/s
Minimale lokale doorzembreedte over korte afstand (slot)	b_{\min}	0,50 m
Minimale doorzembdiepte over korte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

2.1.3 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 migratielinielij een belangrijke rol.

De locatie van de monding dient net afwaarts van de zgn. migratielinielij 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 3). 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 migratielinielij vormen.

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



Figuur 3 – Relatie migratielinielij 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 2.1.1, 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 1 (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).

Op basis van deze criteria en richtlijnen werd in de algemene hydraulische studie een optimaal uniform ontwerp voorgesteld voor de parallelle monding van de vispassages op de Dender. Dit uniforme ontwerp wordt verder toegelicht en toegepast op het ontwerp voor de monding van de vispassage te Denderleeuw in hoofdstuk 7.

2.2 Hydraulische randvoorwaarden

2.2.1 Streef- en alarmpeilen

Tabel 2 toont de toegepaste streef- en alarmpeilen voor het vernieuwde stuwsluisc omplex te Denderleeuw. Hierbij wordt opgemerkt dat voor het finale ontwerp van de vispassage wordt uitgegaan van het verwijderen van de afwaartse stuwen te Teralfene (afwaarts streefpeil 7,61 mTAW). Dit betekent dat het afwaartse streefpeil in Denderleeuw verlaagt met 0,56 m waardoor het totale verval bij streefpeilen toeneemt van 2,20 m naar 2,76 m. Afhankelijk van de fasering van de werken kan er ook een tijdelijke situatie optreden waarbij de stuwen te Teralfene nog in werking zijn. Ook met dit tijdelijke scenario wordt rekening gehouden in het ontwerp. Het afwaartse streefpeil en het verval bij streefpeilen in deze tijdelijke situatie zijn aangeduid met een asterisk in de Tabel.

Tabel 2 – Streef- en alarmpeilen te Denderleeuw

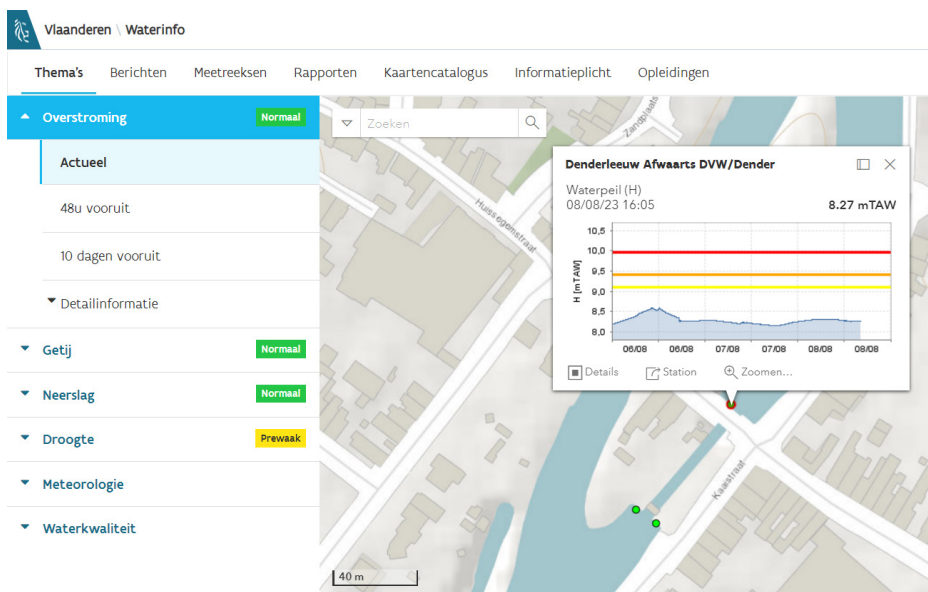
Omschrijving	Waarde en eenheid
Opwaarts alarmpeil-HIC	10,90 mTAW
Opwaarts waakpeil-HIC	10,85 mTAW
Opwaarts prewaakpeil-HIC	10,80 mTAW
Hoog ABBA-alarm opwaarts peil	10,80 mTAW
Opwaarts streefpeil	10,37 mTAW
Laag ABBA-alarm opwaarts peil	10,24 mTAW
Afwaarts streefpeil (tussentijds)*	8,17 mTAW
Totaal verval bij streefpeilen (tussentijds)*	2,20 m
Afwaarts streefpeil	7,61 mTAW
Totaal verval bij streefpeilen	2,76 m

* betreft de tijdelijke situatie waarbij de stuwen te Teralfene nog in werking zijn.

2.2.2 Meetlocaties en histogrammen

De waterpeilen ter plaatse van het stuwsluisc omplex te Denderleeuw worden in de huidige situatie op drie locaties gemeten (twee punten opwaarts en één punt afwaarts). De meetresultaten van deze posten zijn raad te plegen via www.waterinfo.be (zie Figuur 3). Hierbij wordt opgemerkt dat dit twee types meetstations betreft, namelijk één HIC-metpost van het opwaartse waterpeil en twee DVW-metposten. Enkel de meetgegevens van de HIC-metposten zijn gevalideerd, voor de meetgegevens van de DVW-posten zijn alleen de zgn. 'spikes' verwijderd (lees: fysisch onrealistische waarden). De reeksen van de DVW-metposten gaan echter wel verder terug in de tijd.

Met oog op het rivierdebiet zijn er twee meetposten van belang: één opwaarts te Overboelare (meest opwaartse meetpost in Vlaamse deel van de Dender) en te Erembodegem (net opwaarts van Aalst). Ook voor deze twee meetposten zijn de resultaten raadpleegbaar via waterinfo. Het betreft HIC-metposten en de metingen zijn dus gevalideerd.



Figuur 4 – Drie waterstandmeetposten te Denderleeuw op www.waterinfo.be

De historische meetreeksen voor elk van de bovengenoemde posten werden geanalyseerd in de algemene hydraulische studie (Visser *et al.*, 2024). Tabel 3 toont een histogram (percentage overschrijdingskans) voor de beschikbare meetperiodes van de DVW-metposten voor de waterstanden en de HIC-metposten voor de debieten. Voor de waterstanden werd de HIC-metpost niet opgenomen aangezien deze een kleinere meetperiode omvat en uit een vergelijking tijdens de analyse bleek dat de maatgevende percentiel-waarden voor deze ontwerpstudie goed overeenkwamen voor de beschikbare periode van beide types.

Daarnaast werd in de algemene hydraulische studie ook het debiet ter plaatse van elk van de stuwsluiscomplexen geschat door middel van interpolatie tussen de op- en afwaartse meetposten op basis van afstroomoppervlak. Het op deze wijze bepaalde histogram voor de debieten te Denderleeuw is ook opgenomen in Tabel 3.

Merk wel 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 van de nieuwe stuwen.

Tabel 3 – Histogram gemeten waterstanden en (geïnterpoleerd) debiet

locatie	OVERBOELARE	OVERBOELARE	DENDERLEEUV	DENDERLEEUV	DENDERLEEUV	TERALFENE	TERALFENE	EREMBOD
meetpost	den12a	den12a	interpolatie	OW405-opw	OW405-afw	OW404-opw	OW404-afw	den06a
begin reeks	29/12/2000	1/01/2012	nvt	31/01/1995	31/01/1995	1/01/2012	1/01/2012	14/12/2012
einde reeks	31/12/2021	31/12/2021	nvt	31/12/2021	31/12/2021	31/12/2021	31/12/2021	31/12/2021
periode	20j	10j	10j	10j	10j	10j	10j	9j
percentiel	OB-Q (full)	OB- Q	DL-Q	DL-Ho	DL-Ha	TF-Ho	TF-Ha	EB-Q (full)
0,01%	113,57	76,91	82,81	10,86	10,1	9,3	9,54	88,71
0,10%	73,48	69,84	77,54	10,77	9,96	9,22	9,45	85,24
1,00%	42,19	44,64	55,58	10,68	9,38	8,77	9,01	66,52
5,00%	19,47	20,14	26,73	10,6	8,7	8,08	8,58	33,31
10,00%	13	13,6	18,12	10,56	8,57	7,92	8,49	22,63
20,00%	7,56	8,05	10,92	10,52	8,48	7,81	8,42	13,79
25,00%	6,14	6,48	8,97	10,51	8,45	7,79	8,39	11,45
30,00%	5,2	5,38	7,46	10,5	8,43	7,77	8,37	9,54
40,00%	3,88	3,95	5,46	10,47	8,39	7,75	8,34	6,97
50,00%	2,88	2,92	4,09	10,45	8,36	7,73	8,31	5,26
60,00%	2,16	2,19	3,11	10,42	8,32	7,71	8,28	4,03
70,00%	1,66	1,67	2,29	10,4	8,29	7,68	8,25	2,9
75,00%	1,48	1,48	2,05	10,39	8,27	7,67	8,23	2,61
80,00%	1,32	1,29	1,71	10,38	8,26	7,65	8,22	2,13
90,00%	0,99	0,87	1,13	10,34	8,22	7,58	8,18	1,38
95,00%	0,75	0,62	0,69	10,3	8,18	7,51	8,15	0,76
99,00%	0,4	0,32	-0,22	10,17	8,12	7,36	8,04	-0,76

2.2.3 Debieten

Tabel 4 geeft een overzicht van de maatgevende debieten die volgden uit Tabel 3 en de analyse van de meetreeksen in de algemene hydraulische studie (Visser et al., 2024).

Tabel 4 – Maatgevende debieten

Parameter	Waarde	Omschrijving
$Q_{90\%-zomer}$	0,7 – 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	
$Q_{50\%-jaar}$	4,1 m ³ /s	Mediaandebiet
$Q_{10\%-jaar}$	18,1 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 4 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 3 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 5 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 5 – 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 opwaartse waterstand	+0,50 tot 1,0 m
Afname opwaartse 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 Denderleeuw werd vastgesteld dat een toename van het verval met meer dan 0,45 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.

In de tijdelijke situatie waarbij de stuwen te Teralfene nog actief blijven, ligt het afwaarts streefpeil circa 0,56 m hoger. Deze verhoging valt binnen de range in het afwaartse waterpeil waarbinnen deze studie rekening wordt gehouden. Op deze wijze wordt dus ook deze tijdelijke situatie meegenomen in de ontwerpstudie.

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 de debiet door de vispassage relatief onafhankelijk van de afvoer op de rivier.

2.3 Ruimtelijke randvoorwaarden

2.3.1 Streef- en bodempeilen

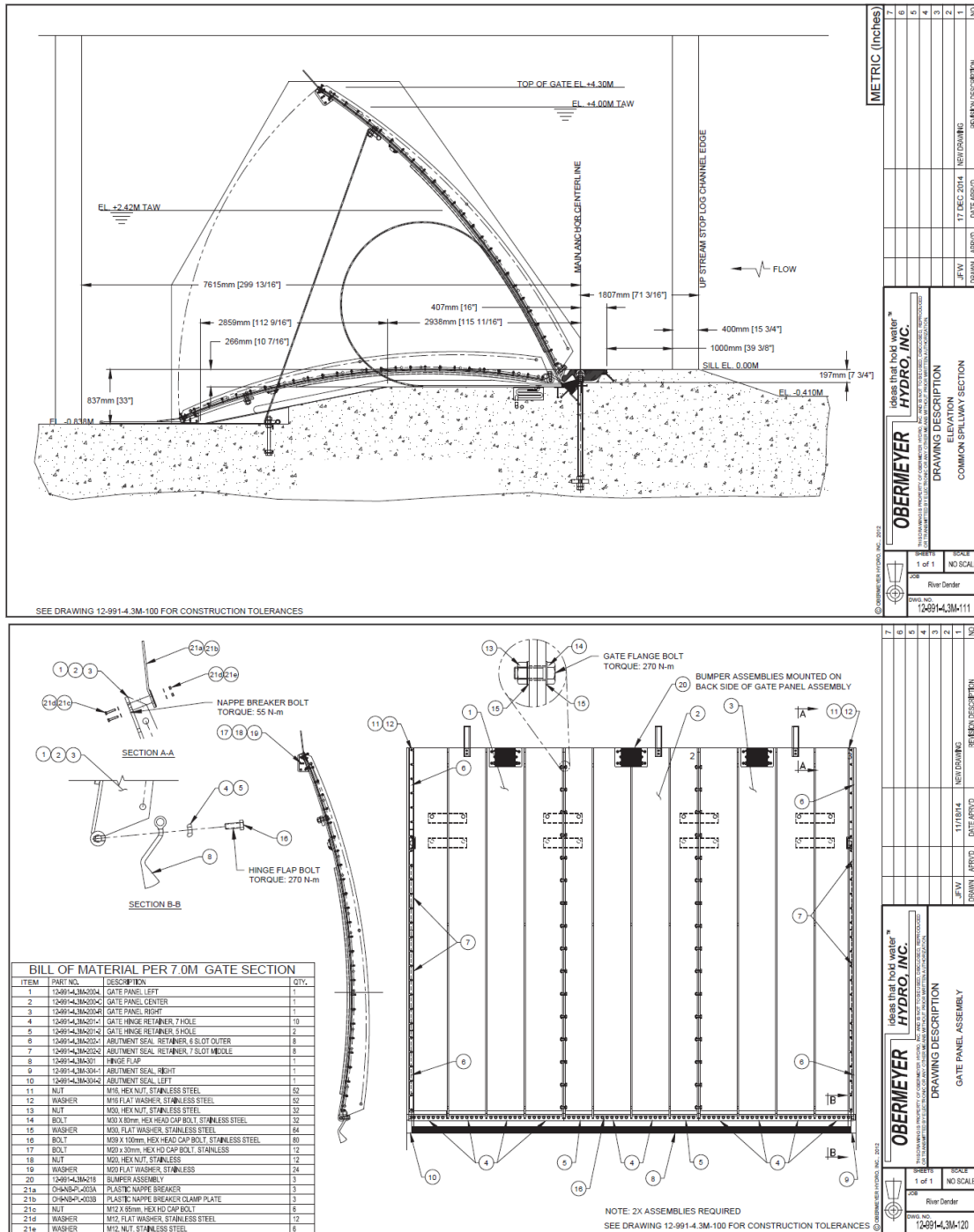
Voor het ontwerp van de nieuwe vispassage te Denderleeuw dient rekening te worden gehouden met twee ontwerpscenario's: één waarin de stuwen te Teralfene volledig verdwijnen (finale ontwerptoestand) en één waarin de stuwen te Teralfene tijdelijk nog aanwezig zijn. Het afschaffen van de stuwsluit te Teralfene kan namelijk pas worden uitgevoerd na aanpassingswerken aan het pand Denderleeuw-Teralfene en de sluis te Denderleeuw. Bijgevolg kan een fasering van de werken ervoor zorgen dat de vispassage in dienst wordt genomen op een ogenblik dat de stuwsluit te Teralfene nog niet is afgeschaft en dus het peil in het pand Denderleeuw – Teralfene nog niet is verlaagd (zie 2.2.1).

Mede vanwege het wegvallen van de stuwen te Teralfene worden in het deelproject 'Aanpassingswerken aan het pand Denderleeuw-Teralfene' ook baggerwerken voorzien. Uit metingen van DVW blijkt dat de huidige diepte van de stuwgeul ter hoogte van het stuweiland afwaarts van de stuwen circa 5,50 tot 5,70 mTAW bedraagt. Door middel van de baggerwerken is het de bedoeling om de minimale vaardiepte van 2,40 m voor de scheepvaart te behouden. Uitgaande van het streefpeil van 7,61 mTAW in het finale scenario (vervallen Teralfene) wordt voor de bodemhoogte afwaarts van de stuwen een diepte van 5,21 mTAW toegepast in de ontwerptoestand.

De vispassage wordt ontworpen voor de condities bij het uiteindelijk streefpeil van 7,61 mTAW afwaarts, daarbij wordt ook de werking in tussentijdse fase bij streefpeil van 8,17 mTAW gecontroleerd. Het opwaarts streefpeil is 10,37 mTAW.

2.3.2 Stuwen

Voor het ontwerp van de nieuwe stuwen op de stuwsluitcomplexen langs de Dender voorziet DVW een zelfde ontwerp bestaande uit balgstuwen (zie Figuur 5). Voor locatie Denderleeuw worden twee stuwen voorzien met elk een breedte van 7 m. 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.



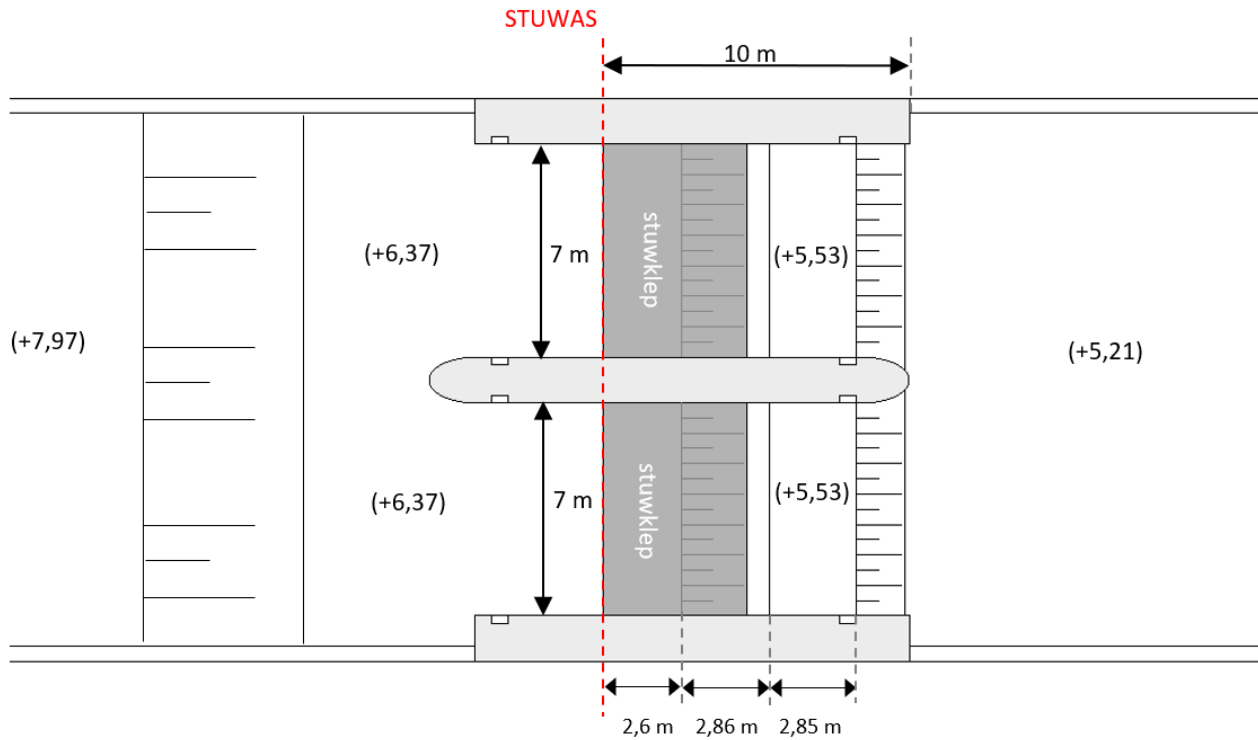
Figuur 5 – Balgstuwontwerp voor de nieuwe stuw op de Dender

Figuur 6 toont een schematische weergave van het grondplan en het lengteprofiel van de stuw te Denderleeuw met aanduiding van de maatgevende dimensies die relevant zijn voor het ontwerp van de vispassage te Denderleeuw.

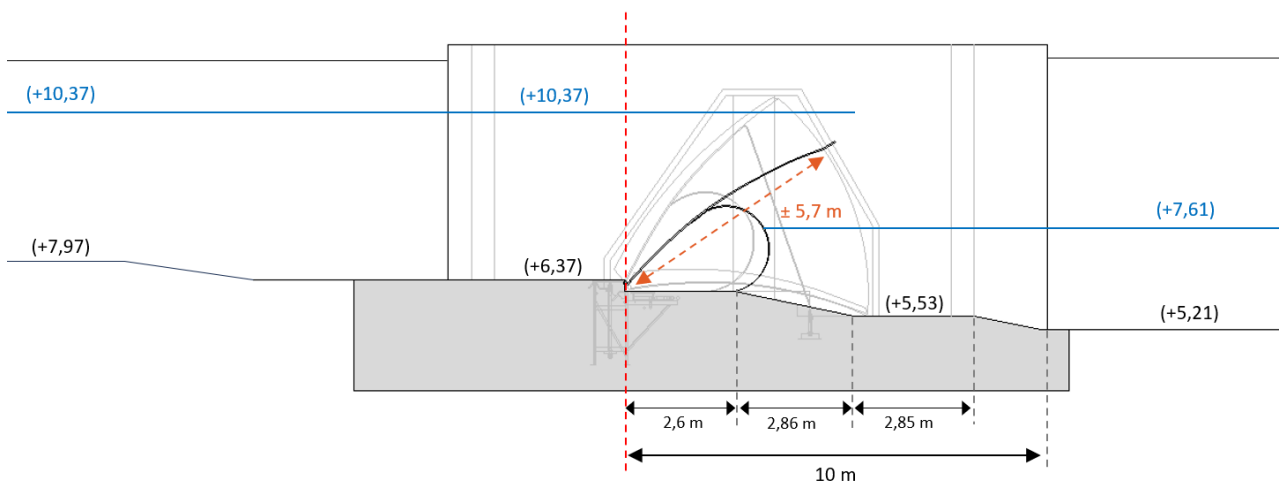
De volgende maatgevende parameters worden onderscheiden:

- 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 m;
- Lengte stuwmuur afwaarts van stuwas = 10 m;
- Afwaartse bodemhoogte: 5,21 mTAW;
- Hoogte beton ter plaatse van de as van de klep = 6,37 mTAW;
- Gemiddelde opwaartse bodemhoogte opwaarts van stuw = 7,97 mTAW.



Grondplan



Lengtedoorsnede

Figuur 6 – Huidig ontwerp nieuwe stuwen Denderleeuw met maatgevende parameters

2.3.3 Locatie en beschikbare ruimte

Figuur 7 toont een luchtfoto van het huidige stuwsluiscomplex op de Dender te Denderleeuw. Aanvankelijk was het de bedoeling van DVW om de stuwen te vernieuwen en de sluis alleen te renoveren en te verdiepen. Verdiepen is nodig vanwege de peilverlaging die afwaarts ontstaat door de verwijdering van de stuwen te Teralfene. De benodigde diepgang voor de scheepvaart is 2,40 m bij streefpeil. Dit betekende dat de nieuwe stuwen (en dus ook de vispassage) op de linkertak rond het stuweiland ingepast diende te worden. In 2016 werden in een verkennende studie inpassingen voor de nieuwe vispassage (en stuw) langs deze linker tak onderzocht (Visser *et al.*, 2016).

Uit de verdere studie bleek echter dat de hoogte van de brug bepalend is voor de inpassing van de nieuwe stuwen. Om te zorgen dat water niet tegen de brug zou stromen bij verhoogde peilen tijdens wascondities kunnen de nieuwe stuwen namelijk alleen opwaarts van deze brug worden ingepast. In Figuur 7 is de door DVW bepaalde locatie voor de nieuwe stuwen aangeduid met een wit gestreept kader. Dit betekent tevens dat de enige mogelijke locatie voor realisatie van de nieuwe vispassage op de linkeroever opwaarts van de nieuwe stuwen is, zie blauw gestreepte strook.



Figuur 7 – Luchtfoto huidige stuwsluiscomplex op de Dender te Denderleeuw

3 Dimensionering vispassage

3.1 Vispassagetype

Uit de ruimtelijke voorstudie bleek dat de linkeroever opwaarts van de bestaande brug de enige mogelijke locatie is voor de inpassing van de nieuwe de vispassage (zie 2.3.3). Op deze locatie is de beschikbare ruimte vooral beperkt in breedte vanwege de daar aanwezige privétuinen en afwateringsgracht. In 2017 werden enkele mogelijke vispassagetypes voor inpassing onderzocht (Visser *et al.*, 2017). Uit deze studie bleek dat de beschikbare breedte de mogelijkheden voor meer natuurlijke vispassagetypes zoals een semi-natuurlijke nevengeul of een V-vormige bekkentrap bemoeilijkt. Er moet behoorlijk worden ingeboet op het natuurlijke karakter van deze types om deze nog inpasbaar te maken. Een nevengeul zou ook dermate lang moeten worden dat dit een grote impact zou hebben op privégronden.

Ook bleek uit de daarna uitgevoerde algemene hydraulische studie voor vispassages op de Dender (zie Visser *et al.*, 2024) dat de beschikbare afvoer op de Dender sterk bepalend is voor het haalbare en meest wenselijke type vispassage. Uit deze studie bleek namelijk dat de Dender een relatief hoge kans heeft op periodes met zeer lage afvoeren ($Q < 1,0 \text{ m}^3/\text{s}$). Deze kansen worden nog eens verhoogd door de huidige en toekomstige effecten van klimaatverandering. 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.

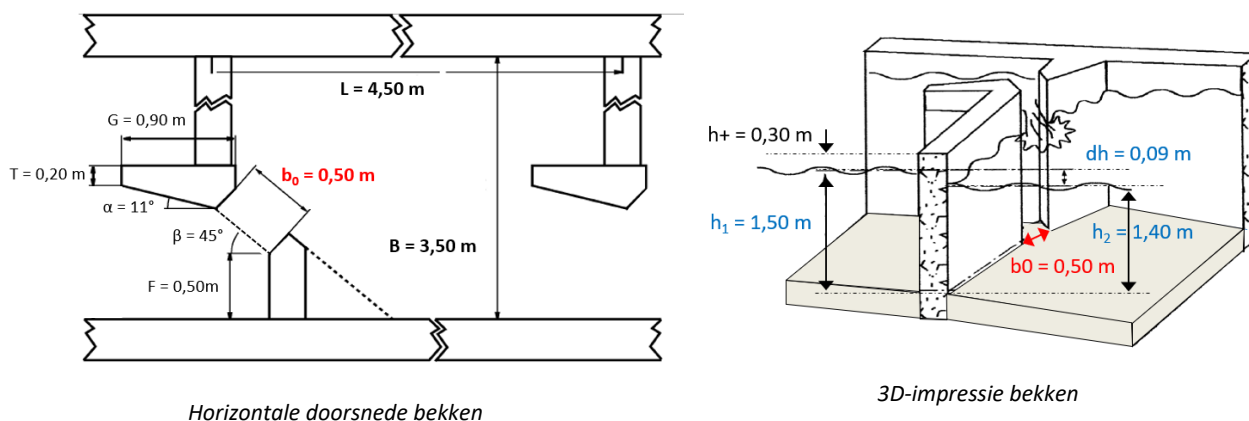
3.2 Bekkens en slotwanden

Er werd gekozen voor een vertical slotpassage. Het algemeen ontwerp voor de slotwanden en de bekkens van dit type passage volgen uit de algemene hydraulische studie (Visser *et al.*, 2024) en worden opgesomd in Tabel 6 hieronder. Figuur 8 geeft tevens een schematische weergave van deze maatgevende parameters.

Tabel 6 – Dimensionering bekken en slotwanden

parameter	omschrijving*	aantal / waarde	eenheid
N	Aantal sloten	30	[-]
dh	Verval per bekken (/slot)	0,092	[m]
h_1	Opwaartse waterdiepte vlak voor het slot bij streefpeilen	1,50	[m]
h_2	Afwaartse 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	Gemiddelde bodemverhang (= $dh/L = 0,092/4,5 = 0,0204$)	≈ 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 schotwand boven opwaarts streefpeil	0,30	[m]

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



Figuur 8 – Maatgevende parameters dimensionering bekken en slotwanden (naar: Larinier, 2002)

Merk op, de breedte van de bekken van 3,5 m geldt van binnenzijde zijwand tot binnenzijde zijwand, terwijl de bekkenlengte een hart-op-hart afstand betreft tussen de slotwanden.

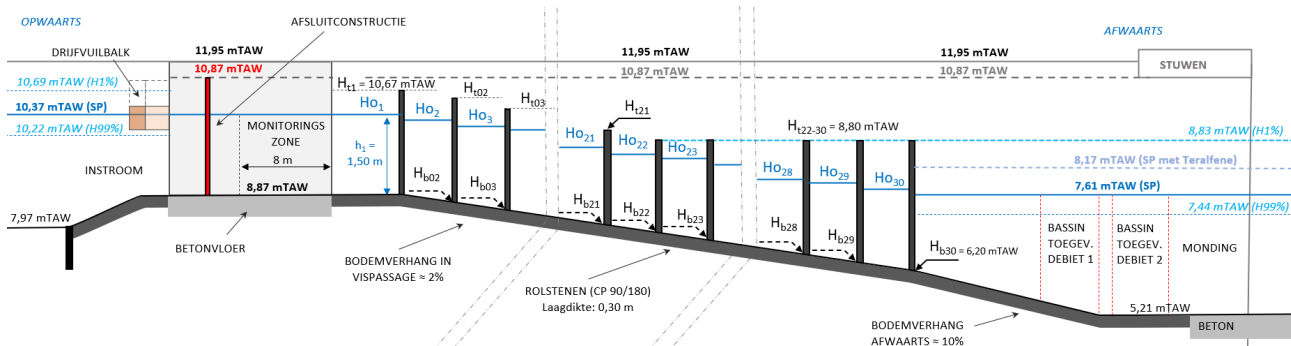
Om het totale hydraulische verval bij streefpeilen van 2,76 m te verdelen over vervallen van 0,09 m per bekken zijn 30 sloten nodig. Uitgaande van een bekkenlengte van 4,5 m geeft dit een bodemverhang van 2% (= $dh/L_b = 0,09/4,5$).

Tabel 7 geeft een overzicht van de bodempeilen in de sloten, de waterdiepte opwaarts van elk slot bij streefpeilen en de hoogte van de slotwanden. Figuur 9 geeft tevens een schematisch lengteprofiel van de gehele vispassage.

Tabel 7 – Slotwandhoogtes en bodemhoogtes in de sloten*

N	Slotwand nr	[-]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ht	hoogte slotwand	[mTAW]	10,67	10,58	10,49	10,39	10,30	10,21	10,12	10,03	9,93	9,84
Ho	waterpeil opw slot	[mTAW]	10,37	10,28	10,19	10,09	10,00	9,91	9,82	9,73	9,63	9,54
Hb	hoogte slotbodem	[mTAW]	8,87	8,78	8,69	8,59	8,50	8,41	8,32	8,23	8,13	8,04
N	Slotwand nr	[-]	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ht	hoogte slotwand	[mTAW]	9,75	9,66	9,57	9,47	9,38	9,29	9,20	9,11	9,01	8,92
Ho	waterpeil opw slot	[mTAW]	9,45	9,36	9,27	9,17	9,08	8,99	8,90	8,81	8,71	8,62
Hb	hoogte slotbodem	[mTAW]	7,95	7,86	7,77	7,67	7,58	7,49	7,40	7,31	7,21	7,12
N	Slotwand nr	[-]	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Ht	hoogte slotwand	[mTAW]	8,83	8,80	8,80	8,80	8,80	8,80	8,80	8,80	8,80	8,80
Ho	waterpeil opw slot	[mTAW]	8,53	8,44	8,35	8,25	8,16	8,07	7,98	7,89	7,79	7,70
Hb	hoogte slotbodem	[mTAW]	7,03	6,94	6,85	6,75	6,66	6,57	6,48	6,39	6,29	6,20

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



Figuur 9 – Schematisch lengteprofiel met maatgevende hoogtes

De overhoogte van de slotwanden aan opwaartse zijde is gekozen op minimaal 0,30 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 21. Vanaf slotwand 22 dient de minimaal vereiste overhoogte van minimaal 1,0 m boven afwaarts waterpeil te worden aangehouden. In het geval van Denderleeuw werd uitgegaan van een overhoogte van 1,19 m boven streefpeil (= 8,80 mTAW) om zo ook iets meer overhoogte te behouden in de tussentijdse situatie waarbij de stuwen te Teralfene nog aanwezig zijn. Dit komt tevens goed overeen met de waarde die circa 1% van de tijd wordt overschreden voor deze locatie op basis van de historische metingen.

In het verloop van de bodem van de vispassage in Figuur 9 worden vijf zones onderscheiden:

1. Geleidelijke aansluiting van de bodem van het opwaartse pand (7,97 mTAW) op de (betonnen) bodem van de instroom (8,87 mTAW), dit verloop is best zo flauw mogelijk en in ieder geval niet steiler dan 1:2;
2. Horizontale (betonnen) instroom met bodemhoogte 8,87 mTAW;
3. Bekkens met een bodemverhang van 2%, dit verhang loopt van slotwand 1 tot slotwand 30 (merk op: dit is een doorlopende bodem, m.a.w. geen 'trappen', zie beschrijving bodemsubstraat in 3.5);
4. Geleidelijke overgang van zone (3) met de bekkens naar zone (5) van het mondingskanaal, deze zone heeft een verhang van circa 8-10% (of flauwer).
5. Mondingskanaal met horizontale bodem op hetzelfde peil als de bodem van het afwaartse pand, namelijk 5,21 mTAW.

Het huidige hoofdstuk richt zich vooral op de zone (3) met de bekkens. De overige zones zullen verder beschreven worden in de hoofdstukken 4 tot en met 7.

3.3 Tussenwand

De vispassage wordt in de linkeroever van de Dender opwaarts van de stuwen voorzien, waarbij een (dam)wand de scheiding vormt tussen de vispassage en de Dender. In principe kan deze tussenwand even hoog worden uitgevoerd als de daar aanwezige oeverhoogte (circa 11,50 mTAW), maar indien vanuit andere randvoorwaarden een lagere hoogte gewenst is, wordt best een minimale overhoogte van 0,50 m boven streefpeil aangehouden (zie stippellijn op 10,87 mTAW in Figuur 9). Op basis van de historische metingen wordt namelijk verwacht dat waterstanden hoger dan 10,87 mTAW minder dan 0,1% van de tijd voorkomen. In dergelijke gevallen is het afwaarts waterpeil ook al dusdanig gestegen dat het verval over het stuwcomplex (en daarmee ook de vispassage) zeer klein is geworden, en ook de stuwen zo goed als volledig zijn neergelaten.

3.4 Debiet

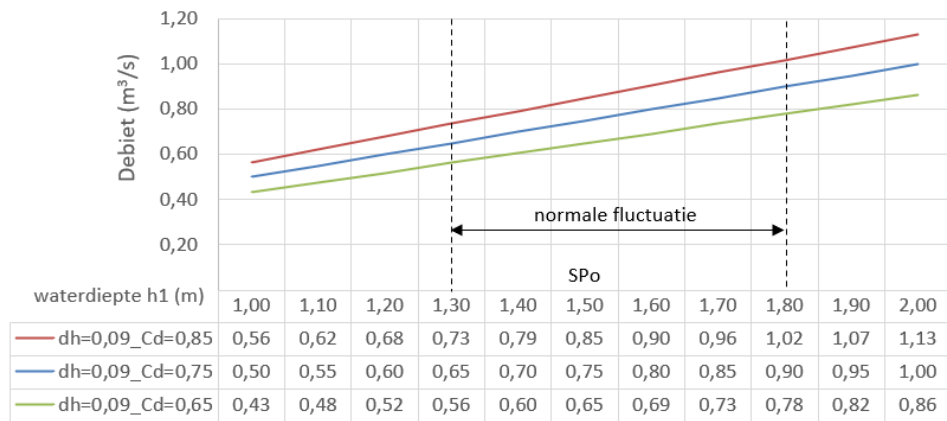
Het debiet doorheen een vertical slot-vispassage kan berekend worden door middel van de volgende formule (Larinier, 2002):

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

Met:

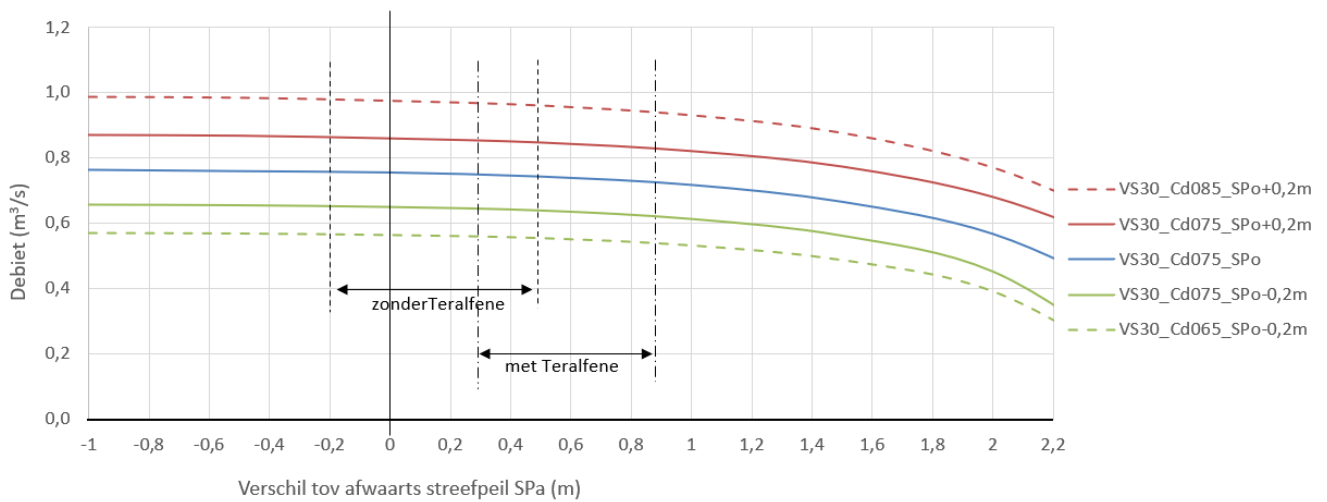
Q_{slot}	=	Debiet door vertical slot-vispassage	[m ³ /s]
V_{gem}	=	Gemiddelde stroomsnelheid door het slot	[m/s]
C_d	=	Debietscoëfficiënt (0,65 tot 0,85)	[-]
b_0	=	Slotbreedte	[m]
h_1	=	Waterhoogte opwaarts van het slot	[m]
h_2	=	Waterhoogte afwaarts van het slot	[m]

Met behulp van bovenstaande formule wordt voor het ontwerp van de nieuwe vispassage te Denderleeuw een basisdebiet bij op- en afwaarts streefpeil berekend tussen 0,7 en 0,9 m³/s (afhankelijk van de werkelijke debietcoëfficiënt) (zie Figuur 10). Bij een daling van het opwaartse waterpeil tot 0,20 m onder opwaarts streefpeil (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.



Figuur 10 – Debiet door de vispassage bij fluctuatie in het opwaartse waterpeil

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 (zie Figuur 11). Het debiet wordt dus voornamelijk bepaald door de fluctuatie in het opwaartse waterpeil.



Figuur 11 – Invloed fluctuatie in afwaartse waterpeil op het debiet door de vispassage

3.5 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 bodemdierjes (bv. vlokreeftjes) omdat deze diertjes zich tussen de stenen door in stroomopwaartse richting kunnen bewegen.

Voor het bodemsubstraat in de vispassage van Denderleeuw 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 12) dienen te worden gebruikt en niet de relatief 'scherpe' breuksteensortering zoals in de waterbouw meestal 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 deze toepassing is dit echter niet vereist aangezien het bodemsubstraat niet wordt toegepast als erosiewerende maatregel. Uit de bouwkundige verkenning bleek dat er namelijk onder het substraat een betonnen vloer zal worden aangelegd. In de hydraulische studie wordt uitgegaan van een laagdikte van circa 0,30 m.



Figuur 12 – 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. Een eventueel onderliggende (betonnen) vloer dient in dat geval dus ook de laagdikte van het substraat dieper te worden aangelegd. Het vloerpeil van deze onderliggende vloer 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.

Zoals al eerder aangegeven heeft het bodemsubstraat geen erosiewerende doelstelling, maar is het wel van belang dat deze niet kan wegspoelen onder extreme condities. In de algemene studie werd vastgesteld dat de voorgestelde bekleding 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.

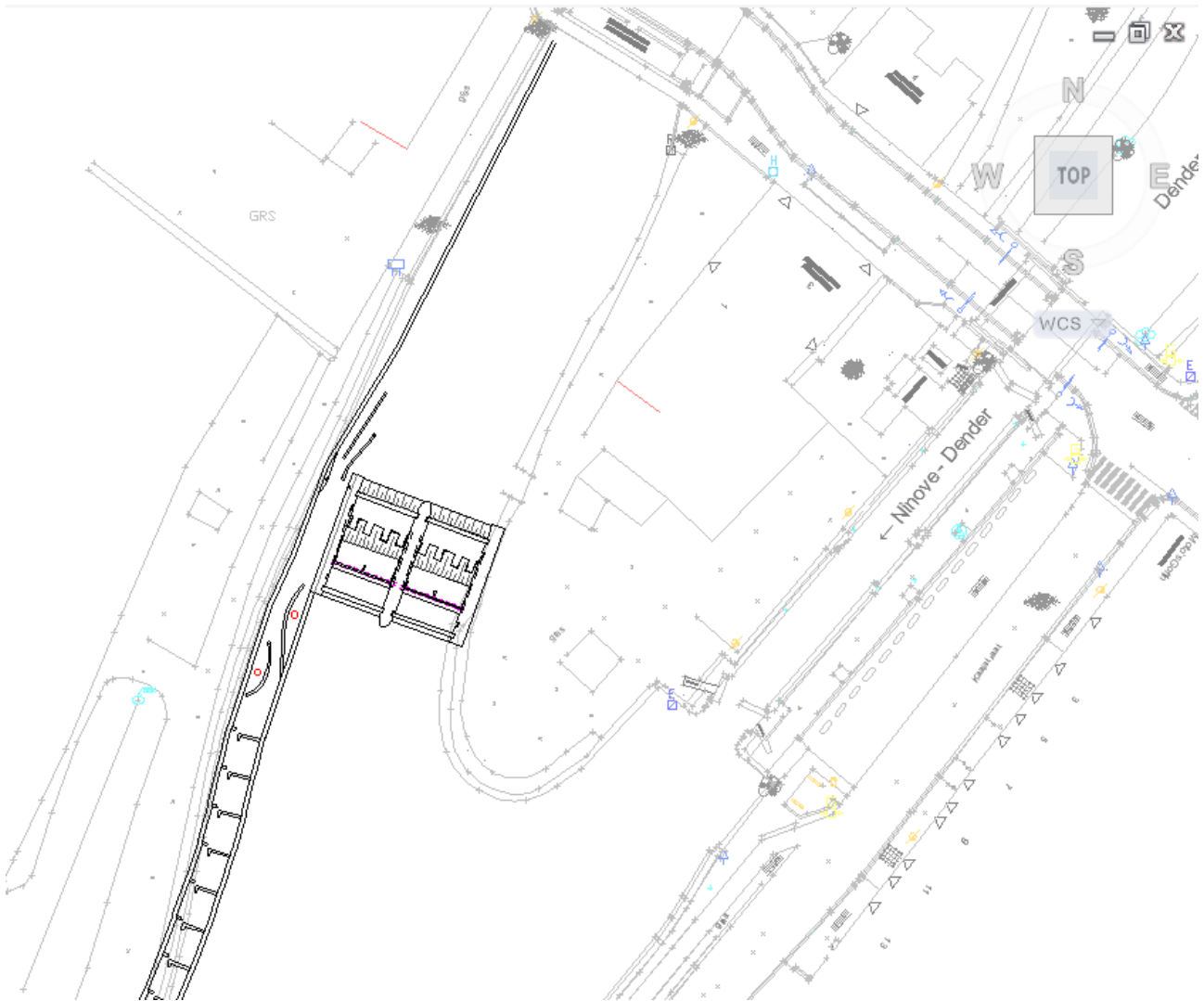
4 Ruimtelijke inpassing

Figuur 13 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 30 sloten, een opwaartse instroom met afsluitconstructie en monitoringszone, een afwaartse inbreng van een toegevoegd debiet en een parallelle monding met geleidingswanden.



Figuur 13 – Ruimtelijke inpassing hydraulisch ontwerp vispassage

De vispassage is ingepast in de linkeroever opwaarts van de nieuwe stuwen. Naast de vispassage bevindt zich in de huidige situatie een afwateringsgracht die ook in de nieuwe situatie dient te worden behouden. Figuur 14 geeft een zoom-in (zonder luchtfoto) van de inpassing van de stuwen en het afwaartse gedeelte van de vispassage.



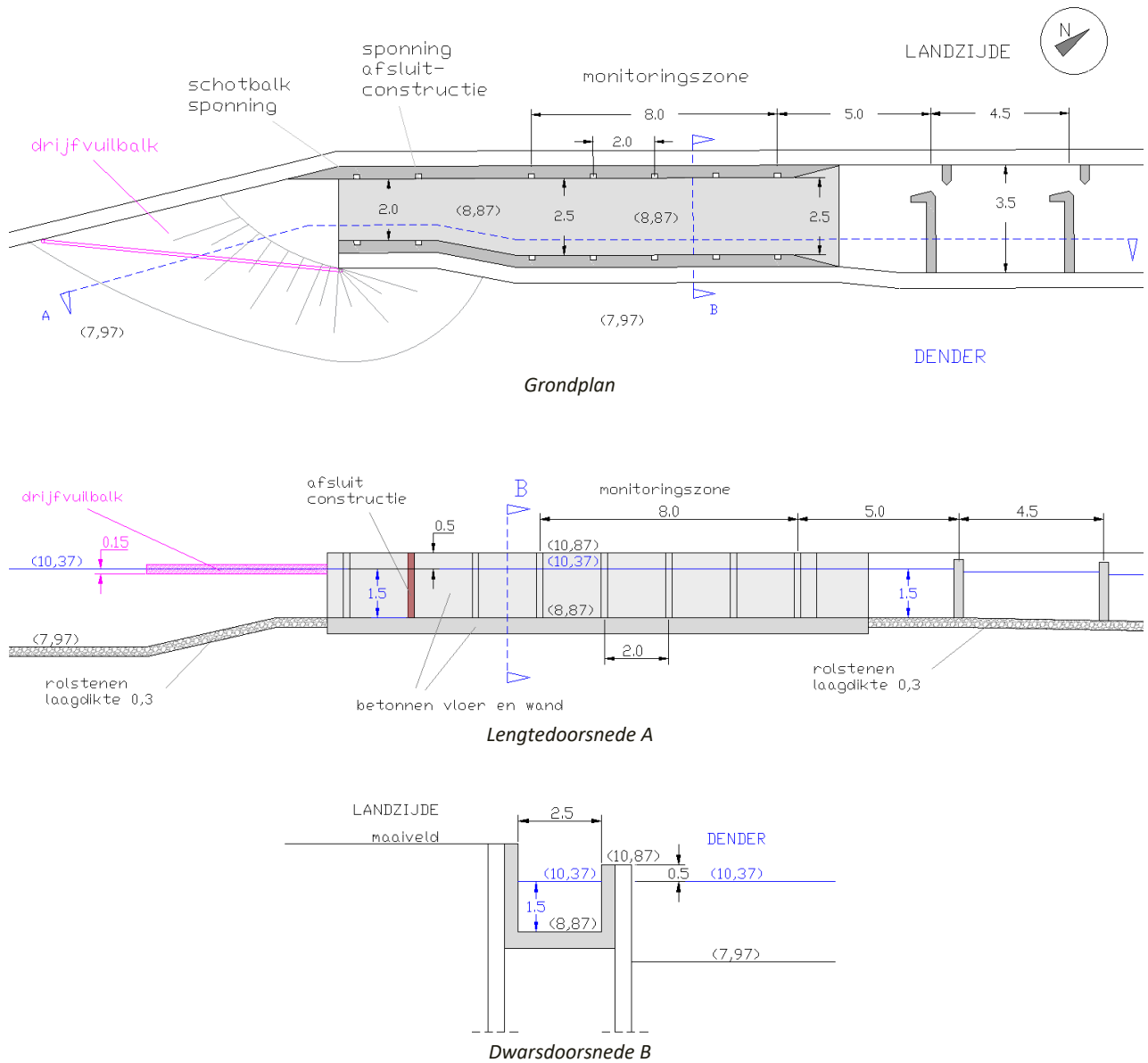
Figuur 14 – Zoom-in ruimtelijke inpassing nieuwe stuwen en afwaarts gedeelte vispassage

In het ruimtelijke ontwerp kunnen vier 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).

5 Instroom

Figuur 15 toont de dimensionering van de instroom. Voor de onderbouwing bij dit ontwerp wordt verwezen naar Visser *et al.* (2024).



Figuur 15 – Dimensionering instroom (maatvoering in meters en mTAW)

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. 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. Waarschijnlijk zullen vanuit bouwkundig oogpunt damplanken worden toegepast als zijwanden van de vispassage en dus ook ter plaatse van de instroom. In dat geval vormen de voorgestelde betonnen muren en vloer als het ware een betonnen 'U-bak' tussen de damwandplanken (zie doorsnede B-B" in Figuur 15).

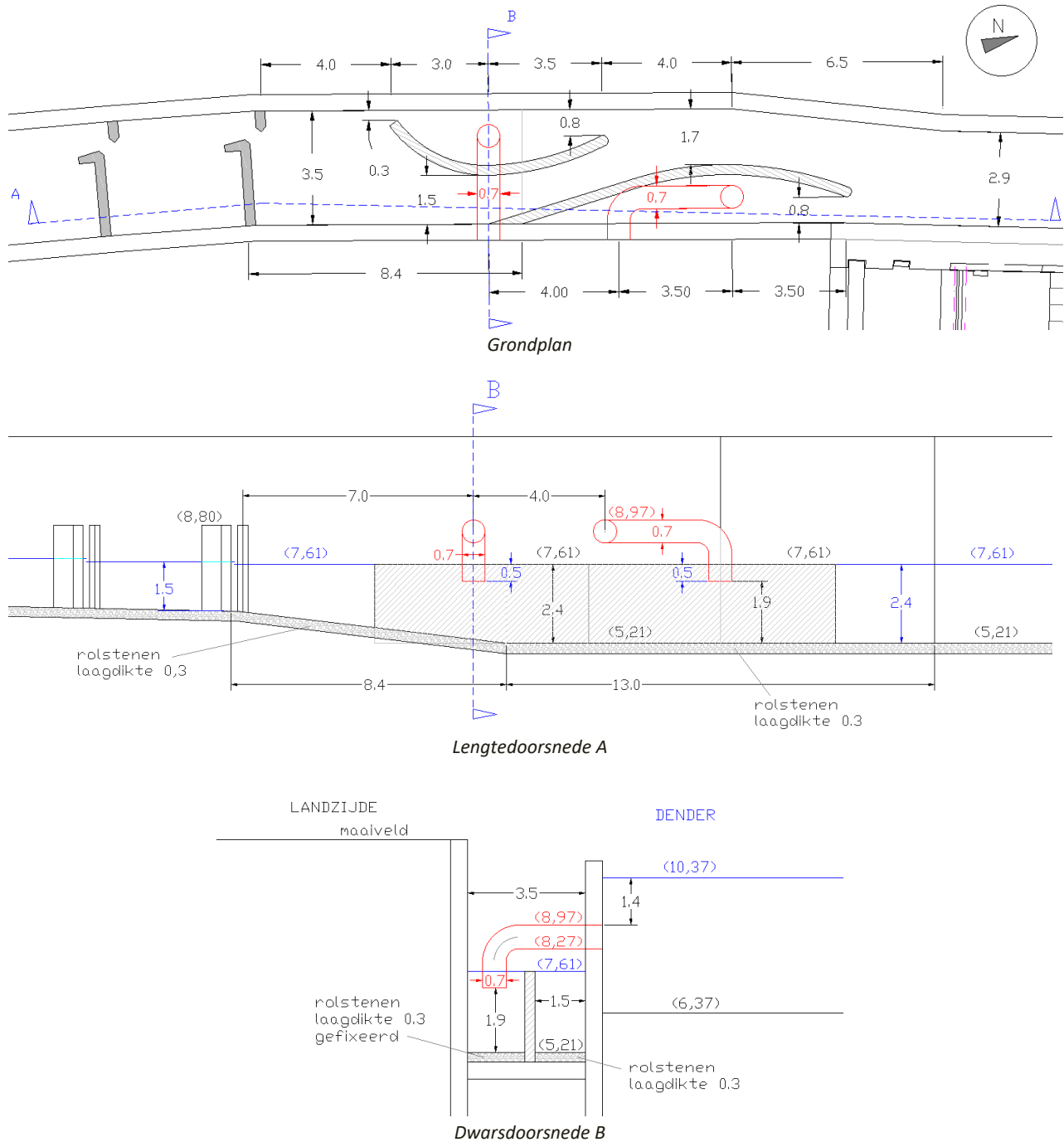
Aan op- en afwaartse zijde van de betonnen vloer dient het (rolstenen) bodemsubstraat goed aan te sluiten zodat er geen opstaande randen ontstaan in het bodemverloop. De sortering en laagdikte (circa 0,3 m) van dit bodemsubstraat zijn beschreven in paragraaf 3.5.

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. De oeverwand die de instroom verbindt met de stuwgeul dient onder een hoek van circa 1:4 (of flauwer) te verlopen om zo een goede hydraulische aanstroom te realiseren en ook de geleidelijke bodemovergang mogelijk te maken.

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 toe te passen dat tot 0,15 m onder het optredende waterpeil vuil dient te kunnen afleiden (Coenen *et al.*, 2013). 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.

6 Toegevoegd debiet

Figuur 16 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 16 – Dimensionering toegevoegd debiet (maatvoering in meters en mTAW)

De buizen hebben een binnendiameter van 0,7 m en dienen een debiet te kunnen inlaten tot minimaal $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ per buis in het bovengrensscenario. Het materiaal van de buizen dient bepaald te worden in het bouwkundig ontwerp. Ook dient in elke buis een regelschuiw te worden voorzien die continu en automatisch aangestuurd kan worden op basis van sturingsvoorwaarden. Merk op, deze regelschuiwen werden nog niet ingetekend in Figuur 16. Wel werd een voorstel voor de sturingsvoorwaarden gedaan in de algemene hydraulische studie, zie Visser *et al.* (2024).

De beide regelschuiwen dienen continu in stand te kunnen variëren. In de voorgestelde regeling worden per schuiw 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 schuiwstanden 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 de veiligheid en de flexibiliteit te verhogen, dient ook de mogelijkheid voorzien te worden om het toegevoegd debiet af te sluiten in functie van het waterpeil opwaarts de stuw.

Om voldoende buislengte voor inpassing van de schuiwen te voorzien wordt er in Figuur 16 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 $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ per buis te kunnen realiseren in het bovengrensscenario.

De wanden van het bassin reiken tot aan het streefpeil 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.

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 17). 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 kunnen via onderflens vastgemaakt worden in de betonnen bodem (merk op: dus onder rolstenen laag).
- Met oog op stabiliteit kunnen H-profielen ook door middel van druk- en trekankers worden verbonden aan de damwand (zie Figuur 17). 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 16 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.

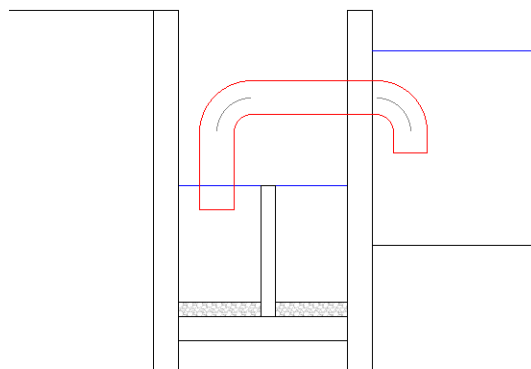
¹ Dit debiet wordt continu berekend op basis van het opwaartse waterpeil en de stand van de stuwen.



Figuur 17 – 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 8,97 mTAW geeft een waterdekking van 2x de buisdiameter. Wanneer het vanuit het oogpunt van bijv. de bereikbaarheid van de schuiven wenselijk is om de buizen hoger te plaatsen, kan er ook gewerkt worden met een neerwaarts hoekstuk aan opwaartse zijde (zie Visser *et al.* (2024) en Figuur 18 hieronder).



Figuur 18 – Voorbeeld neerwaarts gebogen opwaarts opzetstuk voor voldoende waterdekking

De top van de geleidingswanden moeten voldoende hoog liggen om ook bij toename van de afwaartse waterstand voor voldoende geleiding en afscherming te zorgen. De top van de wanden is op basis van de historische metingen gekozen op 8,80 mTAW. Dit is voldoende hoog om ook in de tussentijdse situatie (waarbij de stuwen te Terafene nog aanwezig zijn), te zorgen voor voldoende geleiding tijdens de periode van optimale werking.

De geknikte opwaartse geleidingswand dient 1 m door te lopen in de monding zelf om er voor te zorgen dat negatieve effecten van de stuwoverstort bij hogere afvoeren niet doorwerken in het mondingskanaal. De knikken in de linkeroeverwand liggen op 2 m afwaarts van het einde van de stuwmuur en vervolgens op 25 m uit de stuwassen.

Door het einde van de stuwmuur fictief te verbinden aan de afwaartse knik in de linker oeverwand ontstaat de groene stippellijn in Figuur 19. Deze lijn wordt mede gebruikt voor het bepalen van het einde van de geleidingswanden. Het einde van de eerste wand ligt op het punt waar de 15 m lijn, gerekend uit de stuwas, de stippellijn kruist. Voor de tweede meest afwaartse wand is dit op 20 m uit de stuwas. Deze afstanden zijn bepaald op basis van de maatgevende waterspronglengtes afwaarts van de stuwen tijdens de periode van optimale werking (Visser *et al.*, 2024).

De geleidingswanden zijn nu ingetekend met een dikte van 0,3 m, maar deze dikte is eigenlijk afhankelijk van het materiaal. Er wordt daarom voorgesteld om deze wanden uit het zelfde materiaal te ontwerpen als de bassinwanden van het toegevoegd debiet (zie hoofdstuk 6). Dit betreffen H-profielen met daartussen flexibele en/of gekromde gladde platen. De wanden zijn best zo dun mogelijk om voldoende doorzwevruimte voor de vissen te behouden. De minimale breedte tussen de geleidingswanden aan opwaartse zijde is gekozen op 0,7 m. De absolute ondergrens is minimaal 0,5 m volgens de ontwerpcriteria, maar het heeft hier duidelijk de voorkeur om niet te ontwerpen op de absolute ondergrens. Bij een andere dikte van de wanden dient de centerlijn, lengte en hoogte van de wanden te worden behouden.

De bodemhoogte van het volledige lokstroomkanaal dient gelijk te zijn aan de bodemhoogte van het afwaartse pand, namelijk 5,21 mTAW. Bij aansluitingen tussen verschillende materialen (bijv. tussen de rolstenen en een betonnen bodem) mogen geen opstaande randen ontstaan. Dit zou de migratie van bodemmigrerende soorten namelijk bemoeilijken.

Tenslotte wordt opgemerkt dat het mondingskanaal iets breder is dan in het voorkeursontwerp van de algemene studie (Visser *et al.*, 2024), namelijk 2,9 m in plaats van 2,5 m. Dit komt door de bouwkundige vereisten voor de inpassing van de afwaartse sponning voor het kunnen droogzetten van de vispassage. In het bouwkundig ontwerp wordt namelijk voorzien om zowel de zijwanden van de vispassage als ook die van de stuwen aan buitenzijde uit te voeren in damplanken. De rechter sponning kan in dat geval worden ingepast in een buik van de damplank aan de stuwen. Aangezien niet zeker is of er ook een buik in de overstaande linkeroever van het mondingskanaal (voor bijbehorende overstaande sponning) kan worden gerealiseerd, werd vanuit het bouwkundig ontwerp voorgesteld om hier een betonnen muurtje te voorzien met een dikte van 0,4 m waarin dan op de gewenste locatie de overstaande sponning kan worden ingepast. Om de minimale breedte van 2,5 m in de monding te behouden moeten de damwandplanken van het mondingskanaal daarom 0,4 m verder uit elkaar worden geplaatst en ontstaat een breedte in het mondingskanaal van 2,9 m. Dit heeft geen nadelige effecten op de hydraulische werking en kan dus zo worden uitgevoerd.

8 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.

Visser, Klaas Pieter; Buysse, David; Viaene, Peter (2016). Ontwerpcriteria en bouwstenen voor inpassing nieuwe vispassage op de Dender te Denderleeuw. WL-Memo's, WL2016M14_128_4. Waterbouwkundig Laboratorium, Antwerpen.

Visser, Klaas Pieter; Buysse, David; Viaene, Peter; Coeck, Johan (2017). Verdere inpassing opwaartse varianten nieuwe vispassage op de Dender te Denderleeuw. WL-Memo's, WL2017M14_128_5. Waterbouwkundig Laboratorium, Antwerpen.

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 2.1.2 van dit rapport werden passeerbaarheidscriteria aangeven voor de periode van optimale werking. De periode van optimale werking wordt in stuwpannen 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 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 overschreden (toename opwaartse 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 2.1.2 werden de criteria gegeven voor optimale passeerbaarheid voor de doelsoorten. In het geval van vertical slots spelen de minimale doorzweembreedte en de minimale doorzweembreedte 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 $\rightarrow V_g < 1 - 1,5$ m/s (idealiter zo laag mogelijk binnen deze range);
- Energiedissipatie per bekken $\rightarrow E < 100$ W m³/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	10,37	0,00	7,61	0,00	2,76	0,00	Streefpeilen
N1	10,37	0,00	7,41	-0,20	2,46	+0,20	Laag afwaarts peil
N2	10,67	+0,20	7,61	0,00	2,20	+0,20	Hoog opwaarts peil
N3	10,37	0,00	8,11	+0,56	1,50	-0,56	Hoog afwaarts peil = Tijdelijk hoger afwaarts streefpeil bij behoud Teralfene
N4	10,17	-0,20	1,41	0,00	1,80	-0,20	Laag op- en afwaarts peil
E1	10,37	+0,00	7,11	-0,50	1,76	+0,50	Extreem verval (door val afwaartse waterstand)
E2	10,67	+0,30	7,41	0,00	2,30	+0,30	Sterk verhoogd opwaarts peil
E3	10,37	0,00	2,41	+1,00	1,00	-1,00	Sterk verhoogd afwaarts peil

Verval en stroomsnelheid

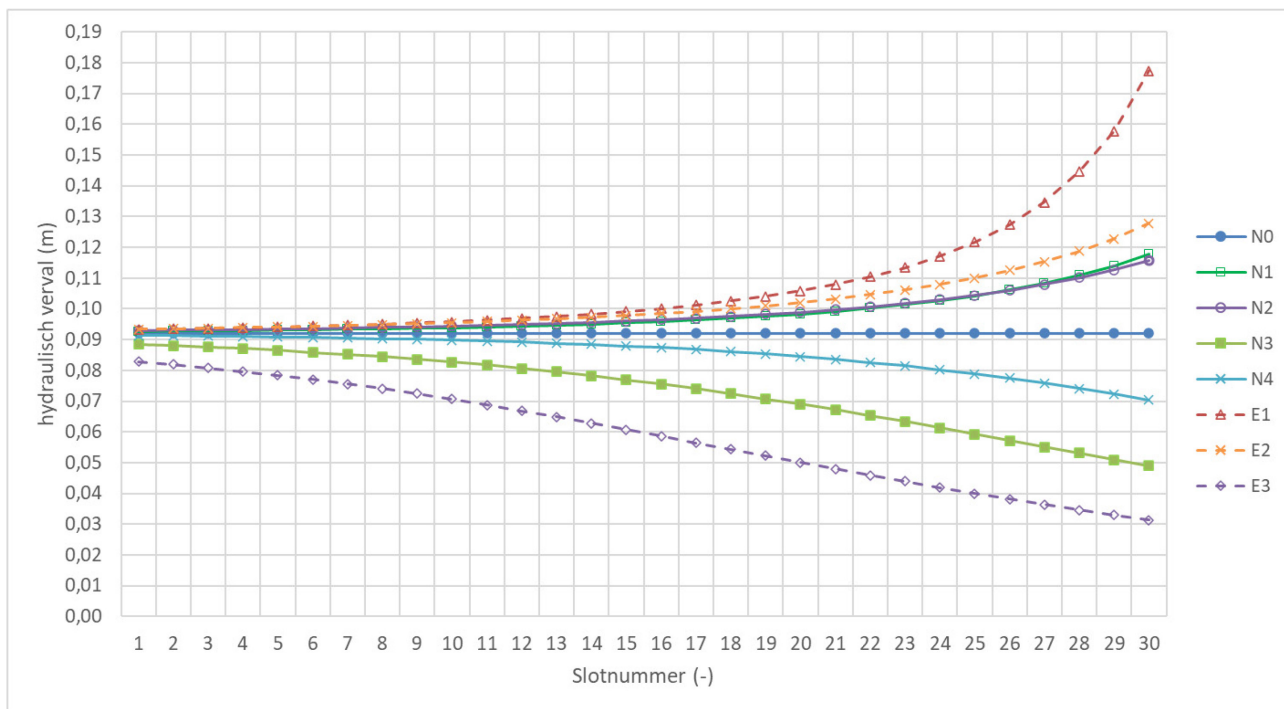
De gemiddelde stroomsnelheid doorheen een vertical slot kan berekend worden door middel van de volgende formule (Larinier, 2002):

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

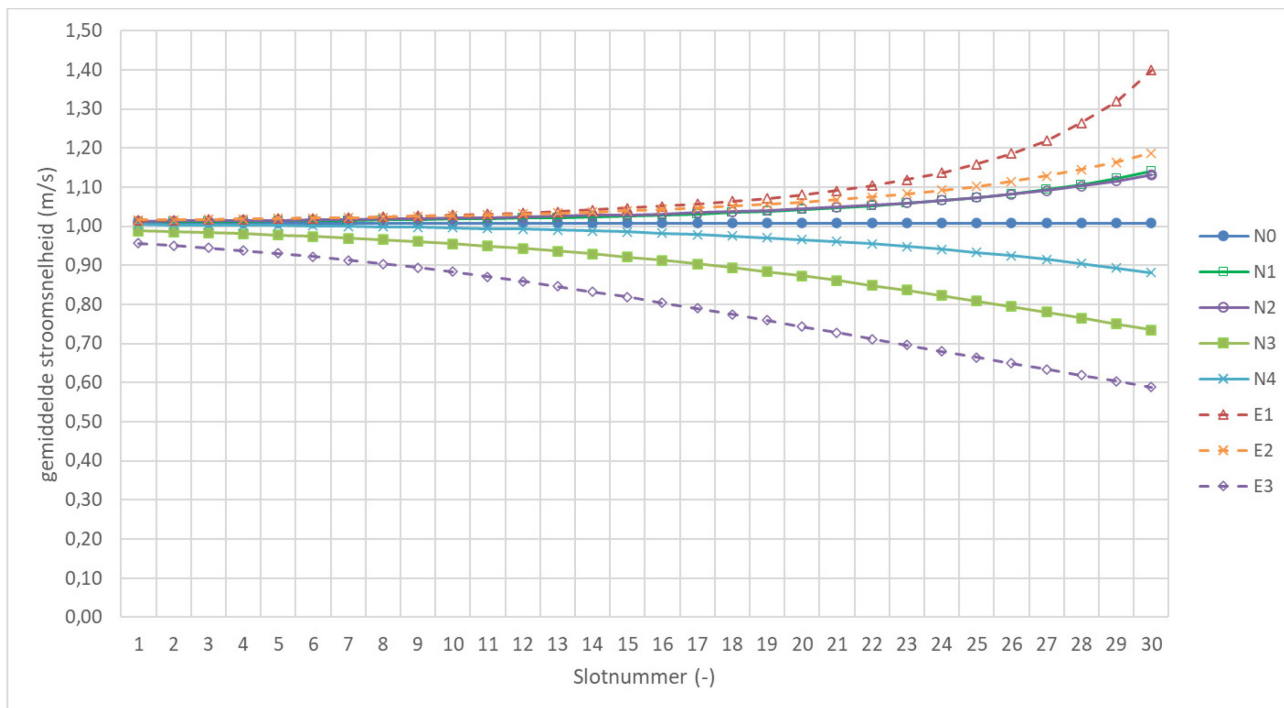
Met:

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 3.4. 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 20 – Hydraulisch verval over elk slot bij de maatgevende waterstandscenario's



Figuur 21 – 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 0,7 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:

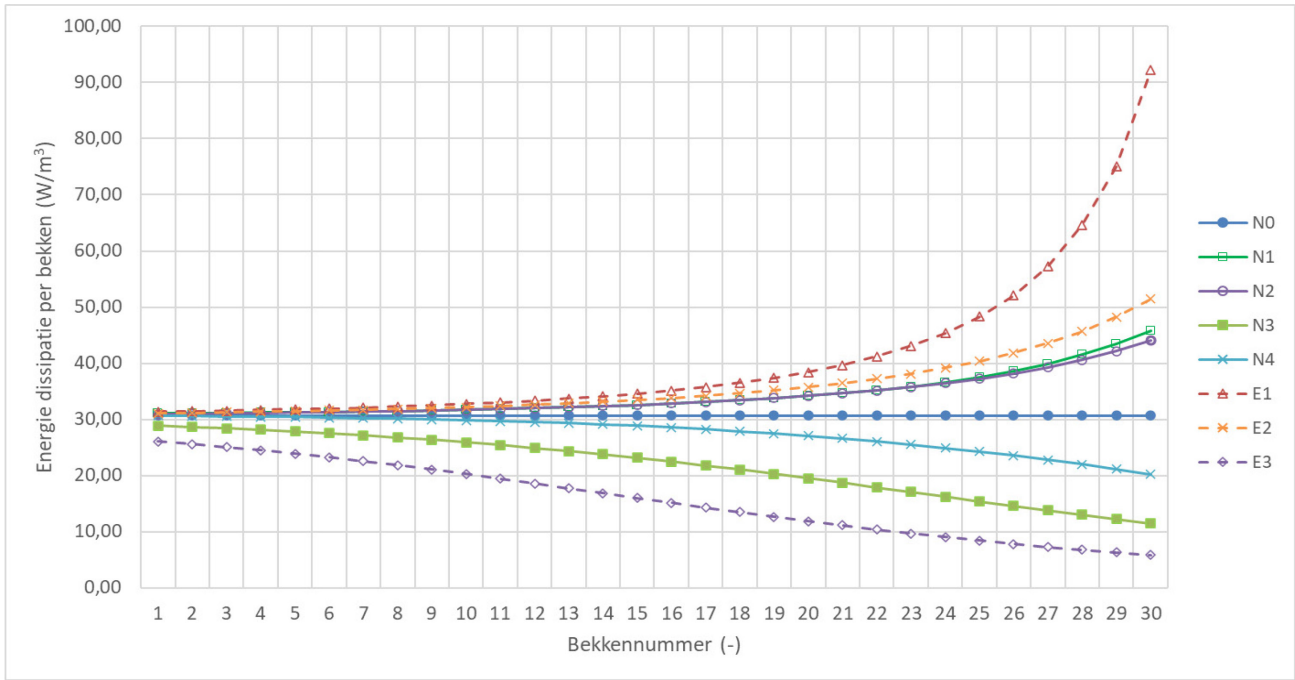
$$E = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot dh_w}{L_b \cdot B_b \cdot y_b} \quad [3]$$

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 22 toont de resultaten voor elk van de maatgevende scenario's.

Bij streefpeilen wordt de volumetrische gedissipeerde energie per bekken berekend op E ≈ 31 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 22 – 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