



**Vlaanderen**  
is wetenschap



14\_128\_2  
WL rapporten

## Vispassages op de Dender

Hydraulische studie algemeen ontwerp

DEPARTEMENT  
MOBILITEIT &  
OPENBARE  
WERKEN

[waterbouwkundiglaboratorium.be](http://waterbouwkundiglaboratorium.be)

# Vispassages op de Dender

## Hydraulische studie algemeen ontwerp

Visser, K.P.; Buysse, D.; Goormans, T.; 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/2025/3241/009

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

**Visser, K.P.; Buysse, D.; Goormans, T.; Viaene, P.** (2024). Vispassages op de Dender: Hydraulische studie algemeen ontwerp. Versie 4.0. WL Rapporten, 14\_128\_2. Waterbouwkundig Laboratorium, Antwerpen.

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

### Documentidentificatie

Oprachtgever:	De Vlaamse Waterweg afdeling Regio West	Ref.:	WL2024R14_128_2
Keywords (3-5):	Fish Passage; Vertical Slot; Attraction Flow; Dender		
Kennisdomeinen:	Fish passages > Vertical Slot Fish passages > Entrance and Attraction Flow		
Tekst (p.):	153	Bijlagen (p.):	21
Vertrouwelijk:	<input checked="" type="checkbox"/> Nee	<input checked="" type="checkbox"/> Online beschikbaar	

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

### Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Viaene, P.	Getekend door: Peter Viaene (Signature) Getekend op: 2025-02-13 11:17:14 +01:0 Reden: ik keur dit document goed  
Projectleider:	Visser, K.P.	Getekend door: Klaas Visser (Signature) Getekend op: 2025-02-11 10:49:29 +01:0 Reden: ik keur dit document goed  

### Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Bellafkih, K.	Getekend door: Abdelkarim Bellafkih (Sign) Getekend op: 2025-02-11 11:14:54 +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 momenteel vismigratieknelpunten vormen, voorziet DVW bij de vernieuwing direct ook de aanleg van vispassages rond deze complexen. In samenwerking met het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek (INBO) heeft het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) een studie uitgevoerd naar het hydraulisch ontwerp voor deze vispassages.

Om een zo optimaal mogelijke passeerbaarheid en een zo hoog mogelijk openingspercentage te realiseren, werd op basis van de studie gekozen voor vertical slotvispassages met laag verval, rolstenen bodemsubstraat en optimale slotdimensies. Dit type vispassage is beter bestand tegen de relatief lage afvoeren die de Dender onder normale – en vooral ook onder drogere – omstandigheden kent. Door de toepassing van een parallelle monding met toegevoegd debiet wordt de attractiviteit (vindbaarheid) versterkt en het openingspercentage verhoogd. Voor de parallelle monding werd een algemeen ontwerp opgesteld dat door middel van relatieve parameters ook vertaald kan worden naar andere locaties. Tenslotte werd een voorstel gedaan voor de regelvoorwaarden voor zowel de opwaartse afsluitconstructie van de vispassage als voor de regelschuiven van het toegevoegd debiet in automatische bediening.

# Inhoudstafel

Abstract	III	
Inhoudstafel	IV	
Lijst van de tabellen	VIII	
Lijst van de figuren	X	
1	Inleiding	1
1.1	Achtergrond	1
1.2	Doelstelling	3
1.3	Leeswijzer	3
2	Ontwerpcriteria	4
2.1	Doelsoorten	4
2.2	Periode optimale werking	6
2.3	Passeerbaarheid	8
2.3.1	Maximale stroomsnelheden	8
2.3.2	Minimale doorzwendieptes en -breedtes	9
2.3.3	Maximale energiedissipatie en turbulentie	11
2.3.4	Samenvatting criteria passeerbaarheid	11
2.4	Attractiviteit (monding)	12
2.4.1	Migratielimietlijn/-zone	12
2.4.2	Locatie en oriëntatie	12
2.4.3	Lokstroomdebiet	14
2.4.4	Samenvatting criteria en richtlijnen attractiviteit	16
3	Hydraulische randvoorwaarden	17
3.1	Streefpeilen en vervallen	17
3.2	Meetposten	18
3.3	Histogrammen	19
3.4	Debieten	21
3.5	Waterstanden	24
3.6	Fluctuatie in verval	27
4	Vispassage	29
4.1	Mogelijke types	29
4.2	Bepaling basisdebiet	30
4.2.1	Randvoorwaarden	30

4.2.2	Nevengeul.....	32
4.2.3	Bekkentrap .....	35
4.2.4	Vertical slot.....	39
4.3	Keuze type .....	40
4.4	Uitwerking voorkeursvariant.....	43
4.4.1	Dimensionering .....	43
4.4.2	Invloed waterpeilfluctuatie .....	45
4.4.3	Bodemsubstraat .....	51
5	Monding en lokstroom.....	55
5.1	Inleiding .....	55
5.2	Stuwontwerp .....	56
5.3	Watersprong en migratielinielijntje .....	58
5.3.1	Watersprongtypes.....	58
5.3.2	Rekenmethode .....	60
5.3.3	Randvoorwaarden .....	63
5.3.4	Resultaten .....	64
5.4	Locatie en vormgeving.....	70
5.4.1	Vertrekpunt (basisvariant) .....	70
5.4.2	Variantenstudie .....	76
5.4.3	Kennishiaat .....	82
5.4.4	Resultaten .....	83
5.5	Lokstroomdebiet .....	85
5.6	Voorkeursontwerp.....	88
5.6.1	Algemeen.....	88
5.6.2	Terugbuigende oever .....	88
5.6.3	Recht doorlopende oever.....	91
6	Toegevoegd debiet.....	93
6.1	Inleiding .....	93
6.2	Randvoorwaarden .....	96
6.3	Variantenstudie .....	96
6.3.1	Boveninlaat vanaf tussenvloer .....	96
6.3.2	Één bassin met twee buizen.....	96
6.3.3	Twee (alternerende) bassins met elk één buis.....	98
6.3.4	Optimalisatie ontwerp wanden alternerende bassins .....	104
6.3.5	Mogelijke combinatie met energiewinning .....	108
6.4	Dimensionering buizen .....	109

6.4.1	Diameter .....	109
6.4.2	Buishoogte.....	114
6.5	Voorkeursontwerp.....	117
7	Instroom.....	119
7.1	Inleiding .....	119
7.2	Dimensionering .....	121
7.3	Drijfvuilbalk.....	121
7.4	Afsluitconstructie.....	122
7.4.1	Doelstelling en type.....	122
7.4.2	Breedte .....	123
7.4.3	Sluitingsvoorwaarden.....	123
7.4.4	Hoogte .....	123
7.4.5	Sponningen voor droogzetten.....	124
7.5	Monitoringszone .....	124
7.6	Controle stroomsnelheid en verval .....	125
7.6.1	Doelstelling.....	125
7.6.2	Hydraulische randvoorwaarden .....	126
7.6.3	Berekeningsmethode .....	126
7.6.4	Resultaten .....	128
8	Automatische regeling .....	131
8.1	Inleiding .....	131
8.2	Afsluitconstructie vispassage .....	131
8.2.1	Principe.....	131
8.2.2	Sturingsregels .....	132
8.2.3	Voorstel initiële waarden .....	133
8.3	Regelconstructie toegevoegd debiet.....	134
8.3.1	Principe.....	134
8.3.2	Sturingsregels.....	134
8.3.3	Voorstel initiële waarden .....	135
8.3.4	Verhouding lokstroom- en stuwdebiet .....	136
8.4	Eenheden en formaten.....	137
9	Samenvatting .....	138
9.1	Ontwerpcriteria .....	138
9.1.1	Periode optimale werking .....	138
9.1.2	Passeerbaarheid .....	139
9.1.3	Attractiviteit .....	139

9.2	Hydraulische randvoorwaarden .....	140
9.2.1	Debiten .....	140
9.2.2	Waterstanden.....	140
9.3	Voorkeursvariant vispassage .....	141
9.4	Monding en toegevoegd debiet .....	143
9.4.1	Algemeen.....	143
9.4.2	Dimensionering monding .....	144
9.4.3	Dimensionering toegevoegd debiet .....	145
9.5	Instroom .....	147
9.6	Automatische sturing .....	148
9.6.1	Algemeen.....	148
9.6.2	Afsluitconstructie van de vispassage.....	149
9.6.3	Regelschuiven van het toegevoegde debiet .....	149
9.7	Aanbevelingen .....	149
	Referenties .....	150
	Bijlage A – Ladingsverliezen in de instroom.....	B1
	A.1 – Verhanglijn .....	B1
	A.2 – Geleidelijke verbreding .....	B2
	A.3 – Sponningen.....	B4
	A.4 – Geleidelijke verhoging gecombineerd met versmalling.....	B5
	A.5 – Stroming onder druk .....	B6
	Bijlage B – Minimale breedte afsluitconstructie .....	B7
	Bijlage C – Ladingsverliescoëfficiënten buizen .....	B15
	Diagram 6.1 – Bocht .....	B15
	Diagram 6.19 – Opeenvolgende bochten in twee perpendiculaire vlakken .....	B18
	Bijlage D – Schaalmodel .....	B19
	Inleiding .....	B19
	Geometrie model .....	B20
	Stuwgeul en stuwen .....	B20
	Toevoeging parallelle monding vispassage .....	B21



## Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Overzicht vissoorten gevangen tussen 2010 en 2019 in het Vlaamse deel van de Dender .....	4
Tabel 2 – Potentiële vissoorten waarvoor vrije vismigratie in het Scheldebekken in de toekomst belangrijk geacht wordt .....	6
Tabel 3 – Beperkt overzicht van vastgestelde periodes van stroomopwaartse paaimigratie voor enkele doelsoorten .....	7
Tabel 4 – Biologische ontwerpcriteria passeerbaarheid vispassage .....	11
Tabel 5 – Overzicht stuwsluiscomplexen op de Dender met bijhorende streefpeilen en verval bij streefpeil .....	17
Tabel 6 – Overzicht meetposten waterstand en/of debiet op het Vlaamse deel van de Dender .....	18
Tabel 7 – Histogram gemeten debiet en opwaartse waterstanden.....	19
Tabel 8 – Histogram gemeten afwaartse waterstanden in m TAW .....	20
Tabel 9 – Vergelijking metingen opwaarts waterpeil t.p.v. de HIC- en DVW-metposten voor de afgelopen 10 jaar.....	20
Tabel 10 – Histogram debietmeetposten Dender .....	21
Tabel 11 – Historgram debiet per locatie op basis van interpolatie en afstroomoppervlak .....	22
Tabel 12 – Maandpercentielen o.b.v. lopend 7-daagsgemiddelde voor de gehele beschikbare periode .....	23
Tabel 13 – Maatgevende debieten.....	24
Tabel 14 – Histogram* toename of afname verval ten opzichte van verval bij streefpeilen (in meter) .....	27
Tabel 15 – Algemene voor- en nadelen van de onderzochte vispassagetypes.....	30
Tabel 16 – Indicatie debiet nevengeul bij fluctuatie van het opwaarts waterpeil, voor een bodembreedte van 2 m, taludhelling = 8:4 .....	33
Tabel 17 (vervolg) – Indicatie debiet nevengeul bij fluctuatie van het opwaarts waterpeil, voor een bodembreedte van 2 m, taludhelling = 8:4 .....	34
Tabel 18 – Indicatie debiet bekkentrap met driehoekige V-vormige drempels bij fluctuaties van het opwaartse waterpeil, voor drempelhoogte $p_1 = 0,5$ m, dwarstalud = 1:7 en verval per bekken $dh = 10$ cm.....	37
Tabel 19 – Indicatie debiet vertical slot-vispassage bij fluctuatie van het opwaartse waterpeil, voor een slotbreedte $b_0 = 0,5$ m en verval per bekken $dh = 0,09$ m .....	40
Tabel 20 – Schatting vispassagedebieten en risico op sluiting.....	41
Tabel 21 – Maatgevende scenario's waterpeilfluctuatie bij normale werking .....	46
Tabel 22 – Overzicht resultaten maatgevende parameters bij de maatgevende waterstandscenario's .....	50
Tabel 23 – Op- en afwaartse bodempeilen en waterdieptes bij streefpeilen (zie ook Figuur 35).....	57
Tabel 24 – Hydraulische randvoorwaarden watersprongberekeningen.....	64
Tabel 25 – Hydraulische randvoorwaarden watersprongberekening bovengrensscenario per locatie .....	64
Tabel 26 – Resultaten watersprongberekeningen .....	67

Tabel 27 – Resultaten watersprongberekening per locatie bij het bovengrensdebiet ( $Q_{10}$ ) en op- en afwaarts streefpeil.....	68
Tabel 28 – Mogelijke verhouding lokstroomdebiet ( $Q_m$ ) ten opzichte van stuwdebiet ( $Q_s$ ) met overschrijdingskans bij bepaalde maximaal haalbare waarden voor het lokstroomdebiet .....	87
Tabel 29 – Geometrie van de beschouwde configuraties voor de buizen van het toegevoegd debiet.....	112
Tabel 30 – Ladingsverliescoëfficiënten van de buizen van de beschouwde configuraties .....	113
Tabel 31 – Beschouwde hydraulische combinaties voor controle stroomsnelheden en vervallen in de instroom .....	126
Tabel 32 – Berekende ladingsverliezen ( $\Delta F$ ) en stroomsnelheden ( $U$ ) doorheen de instroom, voor verschillende hydraulische combinaties binnen de normale werkingsperiode .....	129
Tabel 33 – Berekende ladingsverliezen ( $\Delta F$ ) en stroomsnelheden ( $U$ ) doorheen de instroom, voor het maximaal toelaatbaar debiet .....	130
Tabel 34 – Voorstel initiële waarden vispassage bij openen op basis van debiet en sluiten op basis van waterpeil.....	133
Tabel 35 – Voorstel initiële waarden toegevoegd debiet bij (toekomstige) gedempte debietschommelingen .....	136
Tabel 36 – Verhouding lokstroom ten opzichte van debiet over de stuwen bij bepaalde schuifstanden voor het toegevoegd debiet .....	137
Tabel 37 – Biologische ontwerpcriteria passeerbaarheid vispassage .....	139
Tabel 38 – Maatgevende debieten.....	140
Tabel 39 – Maatgevende waterstandfluctuaties tijdens periode van optimale en suboptimale werking ...	141
Tabel 40 – Dimensionering vertical slot-vispassage* .....	142
Tabel 41 – Visualisering berekening Vergelijking van Bresse .....	B1
Tabel 42 – Resultaten waterhoogtes en stroomsnelheden rondom afsluitconstructie voor een breedte van de instroom $B = 2,5$ m, voor verschillende hydraulische combinaties binnen de normale werkingsperiode ...	B14

## Lijst van de figuren

Figuur 1 – Het Denderbekken met de daarin aanwezige stuwsluiscomplexen (Bron: Vanderkimpfen <i>et al.</i> , 2023).....	1
Figuur 2 – Luchtfoto's huidige (te vernieuwen) stuwsluiscomplexen op de Dender .....	2
Figuur 3 – Prioriteitenkaart vismigratie Vlaanderen .....	3
Figuur 4 – Foto's van enkele doelsoorten .....	5
Figuur 5 - Europese meervallen van anderhalve meter en meer (links) en snoeken van één meter of langer (rechts) zijn geen uitzondering meer in het Scheldestroomgebied. Foto's: INBO, vismigratie-onderzoek. ....	10
Figuur 6 – Relatie migratielinielij en monding vispassage .....	12
Figuur 7 – Voorbeelden inpassing vispassagemonding in toonaangevende internationale publicaties .....	13
Figuur 8 – Voorbeelden van goede en slechte locaties voor de vispassagemonding (Bron: AMINAL, 2005). ....	14
Figuur 9 – Visuele weergave op- en afwaartse streefpeilen stuwsluiscomplexen.....	17
Figuur 10 – Voorbeeld beschikbare meetposten op waterinfo ter plaatse van het stuwsluiscomplex te Denderleeuw .....	19
Figuur 11 – Afwijking (in meter) ten opzichte van streefpeilen voor maatgevende percentielen opwaartse (links) en afwaartse (rechts) waterpeilen.....	25
Figuur 12 – Lengteprofielen van waterstanden bij constante afvoer uit Mike11-simulaties van het nieuwe stuwontwerp (Bron: Vanderkimpfen <i>et al.</i> , 2023).....	26
Figuur 13 – Enkele doelsoorten (foto's: Rollin Verlinde/Vilda).....	31
Figuur 14 – Indicatie debiet nevengeul op basis van fluctuaties in opwaarts waterpeil, voor een bodembreedte $b = 2$ m en dwarstalud = 8:4. De waterhoogte bij streefdiepte = 0,7 m .....	34
Figuur 15 – Schematische weergave driehoekige V-vormige overlaat met maatgevende parameters (Bos, 1989).....	35
Figuur 16 – Indicatie debiet bekkentrap met driehoekige V-vormige drempels bij fluctuaties van het opwaartse waterpeil, voor drempelhoogte $p_1 = 0,5$ m, dwarstalud = 1:7 en verval per bekken $dh = 10$ cm. De opwaartse waterhoogte bij streefpeil = 0,7 m .....	37
Figuur 17 – Indicatie debiet bekkentrap met driehoekige V-vormige drempels bij fluctuaties van het opwaartse waterpeil, voor drempelhoogte $p_1 = 0,5$ m, debietscoëfficiënt $Cd.Cv = 0,7$ en verval per bekken $dh = 10$ cm. De opwaartse waterhoogte bij streefpeil = 0,7 m .....	38
Figuur 18 – Schets alternatief drempelontwerpen bekkentrap.....	38
Figuur 19 – Schematische weergave slotwand met maatgevende parameters .....	39
Figuur 20 – Indicatie debiet vertical slot-vispassage bij fluctuaties van het opwaartse waterpeil, voor een slotbreedte $b_0 = 0,5$ m en verval per bekken $dh = 0,09$ m. De opwaartse waterhoogte bij streefpeil bedraagt 1,5 m .....	40
Figuur 21 – 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) .....	42
Figuur 22 – Maatgevende parameters voor dimensionering van bekkens en sloten .....	43

Figuur 23 – Invloed van vooral de bekkenbreedte op het stromingstype in vertical slot bekkens (Musall <i>et al.</i> , 2014).....	44
Figuur 24 – Debiet door de vispassage bij variatie in opwaartse waterdiepte .....	47
Figuur 25 – Invloed afwaartse waterdiepte op het debiet door de vispassage bij een verval per slot van $dh = 0,09$ m en $h_1 = 1,5$ m bij opwaarts streefpeil ( $SP_o$ ) .....	48
Figuur 26 – Invloed afwaartse waterdiepte op het debiet door de vispassage bij een groter totaal verval (groter aantal sloten) bij een verval per slot van $dh = 0,09$ m en $h_1 = 1,5$ m bij opwaarts streefpeil ( $SP_o$ ) ....	48
Figuur 27 – Hydraulisch verval over elk slot bij de maatgevende waterstandscenario's .....	49
Figuur 28 – Gemiddelde stroomsnelheid in elk slot bij de maatgevende waterstandscenario's .....	49
Figuur 29 – Energie dissipatie per bekken bij de maatgevende waterstandscenario's .....	50
Figuur 30 – Voorbeeld aanpak bodemsubstraat met vullaag en stoorstenen .....	51
Figuur 31 – Voorbeeld rolstenen sorteringen (bron: grind.be).....	52
Figuur 32 – Voorbeeld toepassing rolstenen 90/130 mm voor in vispassage Sint-Baafs-Vijve .....	52
Figuur 33 – Schetsmatig grondplan stuwen en vispassage met vertrekpunt voor ontwerp parallelle vispassagemonding .....	55
Figuur 34 – Balgstuwontwerp voor de nieuwe stuwen op de Dender (Obermeyer, 2012).....	56
Figuur 35 – Schematisch lengteprofiel stuwen met maatgevende parameters .....	57
Figuur 36 – Schematisch grondplan stuwen met maatgevende parameters .....	58
Figuur 37 – Stromingstypes bij de 'archetype' van een beluchte 'vertical drop structure' volgens Rand (1955) .....	59
Figuur 38 – Maatgevende parameters berekening watersprong .....	60
Figuur 39 – Berekend einde van de watersprong ( $L_{wE}$ ) en roller ( $L_{rE}$ ) bij de beschouwde debieten en afwaartse waterdieptes.....	65
Figuur 40 – Indicatie zoekgebied toegang(en) parallelle monding op basis van berekening einde roller.....	69
Figuur 41 – Basisvariant (vertrekpunt) parallelle monding met enkele maatgevende parameters .....	71
Figuur 42 – Resultaten schaalmodelstudie basisvariant parallelle monding bij een lokstroomdebiet van $2 \text{ m}^3/\text{s}$ .....	72
Figuur 43 – Voorbeelden om negatieve recirculatieneren ter plaatse van de monding te voorkomen.....	73
Figuur 44 – Schematische weergave stroompatroon in onderste deel van de waterkolom bij de basisvarianten .....	74
Figuur 45 – Schematische lengtedoorsnede watersprong bij stuwoverstort .....	74
Figuur 46 – Mogelijke stuwregeling voor optimalisatie vindbaarheid vispassage op middelgrote waterlopen .....	75
Figuur 47 – Mogelijke stuwregeling (links: goed; rechts: slecht) voor optimalisatie van de vindbaarheid en attractiviteit van vispassage op grote rivieren .....	75
Figuur 48 – Voorbeelden inpassing van een vispassage t.o.v. een schuin georiënteerde overlaat (Bron: DWA, 2014).....	76
Figuur 49 – Resultaten schaalmodelstudie varianten A1 en A2: één geleidingswand in verlengde van stuwmuur en vroeg terugbuigende oever .....	77

Figuur 50 – Resultaten schaalmodelstudie varianten B2 en A3: één geleidingswand startende vanuit mondingskanaal bij verschillende oeverlijnen .....	78
Figuur 51 – Resultaten schaalmodelstudie variant A4: twee geleidingswanden en vroeg maar flauw terugbuigende oeverlijn .....	80
Figuur 52 – Resultaten schaalmodelstudie variant A5: drie geleidingswanden en vroeg maar flauw terugbuigende oeverlijn .....	81
Figuur 53 – Verschillende stroompatronen in de watersprong bij verschillende afwaartse waterdieptes (boven = 2 m; onder = 2,4 m) .....	82
Figuur 54 – Stromingstypen bij een beluchte overlaat (Vischer & Hager, 1995) .....	83
Figuur 55 – Schematische weergave verhouding lokstroom ten opzichte van stuwstroom .....	85
Figuur 56 – Stroomsnelheden in het mondingskanaal bij verschillende combinaties van debiet en beschikbare breedte .....	87
Figuur 57 – Voorkeursontwerp en dimensionering parallelle monding bij terugbuigende oever.....	89
Figuur 58 – Voorkeursontwerp met relatieve dimensionering parallelle monding bij terugbuigende oever	89
Figuur 59 – Voorkeursontwerp bij recht doorlopende oever .....	92
Figuur 60 – Relatief voorkeursontwerp bij recht doorlopende oever .....	92
Figuur 61 – Concept van het toegevoegd debiet om een voldoende attractieve lokstroom te creëren.....	93
Figuur 62 – Voorbeeld principe inbreng toegevoegd debiet zoals toegepast in verschillende vertical slot-vispassages in Frankrijk en Wallonië (bron: Larinier, 2002a) .....	94
Figuur 63 – Voorbeeld inbreng toegevoegd debiet in de dubbelslot vispassage op de Elbe te Geesthacht, Duitsland.....	94
Figuur 64 – Voorbeeld inbreng toegevoegd debiet in de vertical slot-vispassage te Doesburg, Nederland (Boven: grondplan; linksonder: #1; rechtsonder: #2; bron: Redeker & de Bruijne, 2018) .....	95
Figuur 65 – Vormgeving variant met inbreng volledige toegevoegde debiet in één bassin zonder roosters	97
Figuur 66 – Resultaten simulatie inbreng toegevoegd debiet in één bassin via twee buizen .....	98
Figuur 67 – Vormgeving variant met inbreng in twee alternerende bassins met één buis per bassin.....	99
Figuur 68 – Resultaten variant met twee alternerende bassins en één buis per bassin .....	100
Figuur 69 – Resultaten twee alternerende bassins met afwaartse vernauwing mondingskanaal en debiet per buis 2 m <sup>3</sup> /s.....	101
Figuur 70 – Resultaten twee alternerende bassins met afwaartse vernauwing mondingskanaal en debiet per buis 1 m <sup>3</sup> /s.....	102
Figuur 71 – 3D-weergave resultaten met twee alternerende bassins (boven: 2 m <sup>3</sup> /s per buis; beneden: 1 m <sup>3</sup> /s) .....	103
Figuur 72 – Dimensionering voorkeursontwerp toegevoegd debiet en vormgeving in CFD-model.....	105
Figuur 73 – Resultaten stroomsnelheden en stromingspatronen voorkeursvariant inbreng toegevoegd debiet .....	106
Figuur 74 – Resultaten turbulentie (energie per volume) voorkeursvariant inbreng toegevoegd debiet...	107
Figuur 75 – Schematische weergave migratiecorridor bij voorkeursontwerp voor inbreng toegevoegd debiet .....	107
Figuur 76 – Schetsontwerp met instroom turbines/ toegevoegd debiet in de instroom van de vispassage	109

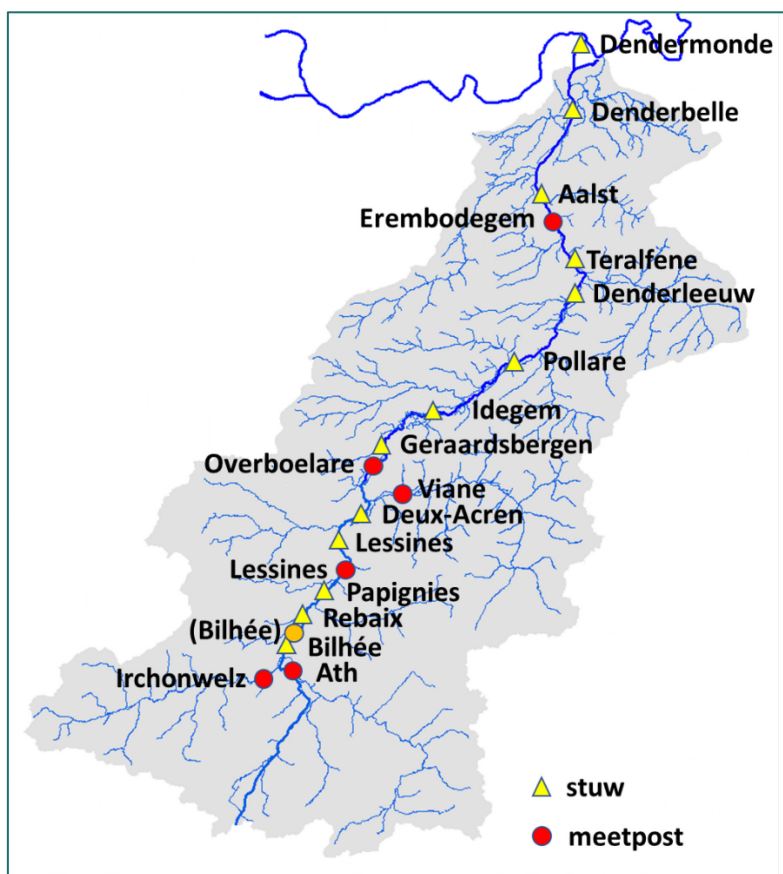
Figuur 77 – Buisconfiguraties voor berekening benodigde buisdiameter .....	111
Figuur 78 – Gerealiseerde toegevoegde debieten voor de beschouwde configuraties en vervallen (buisdiameters in mm) .....	114
Figuur 79 – Definitieschets waterdekking ( $h_d$ ) boven instroomopening met hydraulische diameter ( $D$ ) en stroomsnelheid ( $V$ ) .....	115
Figuur 80 – Relatieve waterdekking boven een instroomopening als functie van het Froude-getal .....	116
Figuur 81 – Voorbeeld neerwaarts gebogen opwaarts opzetstuk ten behoeve van voldoende waterdekking .....	116
Figuur 82 – Voorkeursontwerp voor de inbreng van het toegevoegd debiet.....	117
Figuur 83 – Algemeen ontwerp instroom vispassages.....	119
Figuur 84 – Alternatieve inpassing instroom zo dicht mogelijk aan de stuwen.....	120
Figuur 85 – Voorbeelden van drijvende drijfvuil werende constructies .....	122
Figuur 86 – Schetsen afsluitconstructie met en zonder kopbalk .....	124
Figuur 87 – Grondplan ontwerp monitoringszone .....	125
Figuur 88 – Langsdoorsnede instroomconstructie met verdeling in onderdelen voor de berekening van de ladingsverliezen .....	127
Figuur 89 – Enkele doelsoorten, v.l.n.r.: rivierprik, blankvoorn, kleine modderkruiper, paling (Foto's: Rollin Verlinde/Vilda).....	138
Figuur 90 – Dimensionering bekkens en slotwanden vertical slot-vispassage .....	143
Figuur 91 – Voorkeursontwerp parallelle monding met toegevoegd debiet.....	144
Figuur 92 – Dimensionering voorkeursontwerp monding in geval van een terugbuigende oever .....	145
Figuur 93 – Dimensionering voorkeursontwerp monding in geval van een recht doorlopende oever .....	145
Figuur 94 – Dimensionering voorkeursvariant inbreng toegevoegd debiet .....	146
Figuur 95 – Schematische weergave migratiecorridor bij voorkeursontwerp voor inbreng toegevoegd debiet .....	146
Figuur 96 – Algemeen ontwerp instroom vispassages.....	147
Figuur 97 – Specifieke energiehogte i.f.v. de waterhoogte voor twee verschillende dwarssecties bij een constant debiet. Sectie 1 is 3,5 m breed, sectie 2 is 2,5 m breed. ....	B3
Figuur 98 – Verhanglijjn bij geleidelijke verbreding en subkritische stroming (Bron: Berlamont, 2004) .....	B3
Figuur 99 – Betekenis symbolen voor de berekening van het ladingsverlies van een sponning (overgenomen uit Lencastre, 1996).....	B4
Figuur 100 – Berekening van het peilverschil voor en na de opgaande helling aan de hand van de specifieke energiehogte; $Q = 5,3 \text{ m}^3/\text{s}$ , $h = 1,7 \text{ m}$ .....	B5
Figuur 101 – Definitieschets van stroming door een lokale vernauwing ( <i>volgens Tracy &amp; Carter (1955)</i> , overgenomen uit Chow (1959)). (a) bovenaanzicht; (b) zijaanzicht; (c) zijaanzicht, aangepast in de veronderstelling van geen wrijvingsverliezen. ....	B7
Figuur 102 – Verhanglijjn ter hoogte van een plaatselijke vernauwing bij een hydraulisch zwakke helling (Bron: Berlamont, 2004).....	B8
Figuur 103 – Specifieke energiehogte i.f.v. de waterhoogte bij een lokale vernauwing ( $q' > q$ ). Nummering gebaseerd op Berlamont (2004).....	B9

Figuur 104 – Coëfficiënten en aanpassingsfactoren voor vernauwing type I met verticale oevers (Overgenomen uit: Chow, 1959) .....	B11
Figuur 105 – Vormfactoren ter berekening van het ladingsverlies ter hoogte van een vernauwing type I (overgenomen uit: Chow, 1959).....	B12
Figuur 106 – Effect van kanaalfRICTIE op de backwater ratio voor standaard vernauwingen. ....	B12
Figuur 107 – Effect van de geometrie van de vernauwing op de backwater ratio. ....	B13
Figuur 108 – Proeftank A in Hal 2 van het Waterbouwkundig Laboratorium .....	B19
Figuur 109 – Dimensionering schaalmodel .....	B20
Figuur 110 – Dimensionering schaalmodel met parallelle vispassagemonding.....	B21

# 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. De Dender betreft een vaarweg CEMT klasse I tussen Geraardsbergen (grens met Wallonië) en de sluis te Aalst, een klasse II tussen Aalst en de Ooiebrug in Dendermonde, en klasse IV tussen de Ooiebrug en de monding in de Zeeschelde. Figuur 1 toont het Denderbekken en de daarin gelegen stuwsluiscplexen. In het Vlaamse deel van de Dender bevinden zich momenteel acht stuwsluiscplexen, waarvan het meest opwaartse Geraardsbergen is en het meest afwaartse Dendermonde. Van deze acht complexen voorziet DVW de vernieuwing van de stuwen op zes locaties, namelijk te Geraardsbergen, Idegem, Pollare, Denderleeuw, Aalst en Denderbelle. Figuur 2 toont luchtfoto's van deze zes complexen. Hierbij wordt opgemerkt dat het nieuwe stuwsluiscplex van Aalst op een volledig nieuwe locatie zal worden ingepast, de overige complexen worden vernieuwd op nagenoeg dezelfde locatie. Het complex te Teralfene zal verdwijnen en te Dendermonde blijven de huidige stuwen behouden.



Figuur 1 – Het Denderbekken met de daarin aanwezige stuwsluiscplexen (Bron: Vanderkimpen *et al.*, 2023)





Geraardsbergen



Idegem



Pollare



Denderleeuw



Aalst



Denderbelle

Figuur 2 – Luchtfoto's huidige (te vernieuwen) stuwsluiscomplexen op de Dender

Algemeen kan gesteld worden dat de relatie tussen de rivier en de vallei in de Dender verdwenen is door een gebrek aan natuurlijke dynamiek door de aanleg van de stuwsluizen en de aanleg en ophoging van dijken. Samen met het ruimtebeslag in de vallei was dit medeoorzaak voor de teloorgang van de natuurlijke kombergingsfunctie van de vallei (Vermeersch *et al.*, 2004).

Momenteel vormen deze stuwsluiscomplexen knelpunten voor vismigratie. Met oog op het herstel van vrije vismigratie in Vlaanderen werd een prioriteitenkaart opgesteld, met daarop de belangrijkste waterlopen voor het visbestand (Figuur 3). Bij het opstellen van deze kaart werd rekening gehouden met de aanbevelingen van het Palingbeheerplan, de verspreiding van de Habitatrichtlijnsoorten en de stroomminnende soorten waarvoor in Vlaanderen een soortherstelprogramma is uitgewerkt.

De Dender en een aantal van haar zijlopen staan gekarteerd als prioriteit 2, wat wil zeggen dat deze knelpunten vóór 2027 dienen te worden opgelost.

DVW voorziet daarom bij elk van de te vernieuwen complexen tevens de aanleg van een vispassage. 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. De vispasseerbaarheid van het complex te Dendermonde zal in een later stadium worden onderzocht.



Figuur 3 – Prioriteitenkaart vismigratie Vlaanderen

## 1.2 Doelstelling

Het onderhavig rapport geeft de ontwerpcriteria en hydraulische randvoorwaarden die kunnen worden toegepast bij de ontwerpstudie van de vispassages bij elk van de te vernieuwen stuwsluiscomplexen op de Dender. Daarnaast wordt op basis van een hydraulische voorstudie voor elk van de hoofdonderdelen van de vispassages (instroom, bekken, monding en toegevoegd debiet) een algemeen ontwerp voorgesteld als vertrekpunt voor het ontwerp en de ruimtelijke inpassing op elk van de afzonderlijke locaties.

De uitwerking en ruimtelijke inpassing op elk van de locaties vormt geen onderdeel van dit rapport maar zal per locatie uitgewerkt worden in een deelrapport.

## 1.3 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 beschrijft de ontwerpcriteria op basis van de doelsoorten en hoofdstuk 3 geeft vervolgens de hydraulische randvoorwaarden voor o.a. de periode van optimale werking op basis van historische metingen. Uitgaande van de ontwerpcriteria en hydraulische randvoorwaarden wordt in hoofdstuk 4 de studie t.a.v. het meest optimale vispassagetype beschreven, waarbij de voorkeursvariant verder is uitgewerkt. Hoofdstuk 5 en 6 beschrijven respectievelijk de ontwerpstudie voor de parallelle monding en het toegevoegd debiet om de lokstroom te kunnen versterken. Het ontwerp voor de instroom met afsluitconstructie en monitoringszone wordt beschreven in hoofdstuk 7. Aangezien een automatisch gestuurde afsluitconstructie en een automatische regeling van het toegevoegd debiet voorzien zal worden, wordt in hoofdstuk 8 een voorstel gedaan voor de sturingsvoorwaarden in de automatische bediening. De samenvattende conclusies van de voornoemde onderdelen worden tenslotte opgesomd in hoofdstuk 9.

## 2 Ontwerpcriteria

### 2.1 Doelsoorten

Tabel 1 geeft een overzicht van de vissoorten die tussen 2010 en 2019 werden gevangen in het Vlaamse deel van de Dender. Rivierherstelmaatregelen, zoals de bouw van vispassages op de Dender en haar zijlopen (vb. de Mark, de Molenbeek en de Bellebeek) zijn belangrijk voor deze vissoorten (*i.e.* diadrome en potamodrome vissoorten).

Tabel 1 – Overzicht vissoorten gevangen tussen 2010 en 2019 in het Vlaamse deel van de Dender

Nederlandse naam*	Wetenschappelijke naam	Status** (rode lijst)	Migratietype	Positie waterkolom	Sprintsnelheid (m/s)***
alver	<i>Alburnus alburnus</i>	BiG	regionaal	pelagisch	nb
baars	<i>Perca fluviatilis</i>	NiG	lokaal / regionaal	pelagisch/demersaal	1,5
bermpje	<i>Barbatula barbatula</i>	NiG	lokaal	bentisch	1,5
bittervoorn	<i>Rhodeus sericeus</i>	NiG	lokaal	pelagisch/demersaal	nb
blankvoorn	<i>Rutilus rutilus</i>	NiG	lokaal / regionaal	pelagisch	2,1-4,5
bot	<i>Platichthys flesus</i>	NiG	amfidroom	bentisch	nb
brasem	<i>Abramis brama</i>	NiG	lokaal / regionaal	pelagisch/demersaal	0,9-1
driedoornige stekelbaars	<i>Gasterosteus aculeatus</i>	NiG	anadroom / lokaal	pelagisch/demersaal	1,5
Europese meerval	<i>Silurus glanis</i>	NiG	lokaal/regionaal****	demersaal	nb
giebel	<i>Carassius gibelio</i>	UIT	Lokaal	pelagisch/demersaal	2-2,2
karper	<i>Cyprinus carpio</i>	UIT	lokaal / regionaal	pelagisch/demersaal	0,6-1,7
kolblei	<i>Blicca bjoerkna</i>	NiG	lokaal	pelagisch/demersaal	nb
paling	<i>Anguilla anguilla</i>	B	katadroom	pelagisch	0,5-1
pos	<i>Gymnocephalus cernua</i>	NiG	lokaal	demersaal	1,3
rietvoorn	<i>Scardinius erythrophthalmus</i>	NiG	lokaal	pelagisch	1,7
riviergrondel	<i>Gobio gobio</i>	NiG	lokaal	pelagisch/demersaal	0,6-2
snoek	<i>Esox lucius</i>	NiG	lokaal / regionaal	pelagisch/demersaal	3-6,9
snoekbaars	<i>Sander lucioperca</i>	UIT	lokaal / regionaal	pelagisch/demersaal	1,5-1,8
tiendoornige stekelbaars	<i>Pungitius pungitius</i>	NiG	lokaal / regionaal	pelagisch/demersaal	nb
vetje	<i>Leucaspisus delineatus</i>	BiG	lokaal	pelagisch	nb
winde	<i>Leuciscus idus</i>	K	lokaal / regionaal	pelagisch	nb
zeelt	<i>Tinca tinca</i>	NiG	lokaal	pelagisch/demersaal	nb

\*Bron lijst en gegevens: (<https://vis.inbo.be/>) aangevuld met de waarneming van rivierprik in 2008 (Stevens *et al.* 2009).

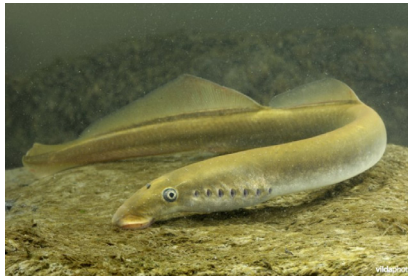
\*\* NiG = Momenteel niet in gevaar; BiG = Bijna in gevaar; UIT = Uitheems; K = Kwetsbaar; EB = Ernstig bedreigd; B = Bedreigd (Verreycken *et al.*, 2012; AMINAL, 2005).

\*\*\*Bron sprintsnelheden: (AMINAL, 2005), nb = niet bekend bij auteurs.

\*\*\*\*Omvangrijke migraties van Europese meervallen werden vastgesteld tussen verschillende rivieren (Pauwels *et al.*, 2014)



*Kleine modderkruiper*



*Rivierprik*



*Driedoornige stekelbaars\**



*Zeeprik*



*Blankvoorn*



*Riviergrondel*



*Europese meerval*



*Paling*



*Baars*

Figuur 4 – Foto's van enkele doelsoorten

Foto's: Rollin Verlinde/Vilda, \* Yves Adams/Vilda

Naast meer algemene soorten worden in het stroomgebied van de Dender onder andere ook minstens zes stroomminnende vissoorten waargenomen: serpeling (*Leuciscus leuciscus*), winde (*Leuciscus idus*), bempje (*Barbatula barbatula*), beekprik (*Lampetra planeri*), rivierdonderpad (*Cottus gobio*) en kopvoorn (*Squalius cephalus*) (VIS databank; Hop, 2012). Serpeling, winde en bempje werden al aangetroffen in de Mark (Buysse *et al.*, 2011). Daarnaast heeft de Mark vermoedelijk ook potentieel voor beekprik, rivierdonderpad en kopvoorn. Of de Dender en de Mark ook potentie hebben voor rivierprik (*Lampetra fluviatilis*) zal blijken in de toekomst na het wegwerken van vismigratieknelpunten in de Dender. De historische bronnen zijn onvoldoende gedetailleerd, wel staat vast dat rivierprik algemeen voorkwam in het Scheldebekken (Vrielynck *et al.*, 2003).

Naast deze nog/reeds aanwezige vissoorten dient, met oog op de doelsoorten, ook rekening te worden gehouden met vissoorten die (door menselijke invloed) momenteel zijn verdwenen of nog slechts zeer uitzonderlijk voorkomen, maar die bij herstelmaatregelen zich opnieuw kunnen vestigen en/of het resultaat kunnen zijn van herintroductieprogramma's. Tabel 2 geeft een overzicht van deze gewenste vissoorten voor herstel.

De ontwerpcriteria voor de vispassage zullen worden opgesteld op basis van de vissoorten uit zowel Tabel 1 als Tabel 2; deze vissoorten vormen daarmee de doelsoorten.

Tabel 2 – Potentiële vissoorten waarvoor vrije vismigratie in het Scheldebekken in de toekomst belangrijk geacht wordt

Nederlandse naam	Wetenschappelijke naam	Migratietype*	Positie waterkolom	Sprintsnelheid (m/s)*
Europese steur	<i>Acipenser sturio</i>	anadroom	demersaal	nb
elft	<i>Alosa alosa</i>	anadroom	pelagisch	nb
kopvoorn	<i>Squalius cephalus</i>	lokaal / tegionaal	pelagisch/demersaal	0,5-3,8
rivierprik**	<i>Lampetra fluviatilis</i>	diadroom	pelagisch	1-1,3
serpeling***	<i>Leuciscus leuciscus</i>	lokaal / regionaal	pelagisch/demersaal	2,4
zeeprik	<i>Petromyzon marinus</i>	anadroom	pelagisch	1,2

\*Bron migratietype en sprintsnelheden: (AMINAL, 2005) en voor rivierprik (Kemp *et al.*, 2011), nb = niet bekend bij auteurs.

\*\* Rivierprik trekt vanuit de Zeeschelde o.a. tot in de Bovenschelde, de Leie, de Dijle, de Kleine Nete, ... (Buysse *et al.*, 2004; Baeyens *et al.*, 2017)

\*\*\* Er is een serpelingpopulatie aanwezig in de Marke t.h.v. de monding in de Dender (Buysse *et al.*, 2011).

## 2.2 Periode optimale werking

Uit onderzoek naar het migratiegedrag van de doelsoorten blijkt dat het van belang is om in principe te streven naar een werkingspercentage van 100% (*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 (Lucas & Baras, 2001). Tabel 3 geeft een overzicht van het migratiegedrag van veel voorkomende en gewenste vissoorten in Vlaanderen. Zowel doelsoorten als andere soorten zijn in de tabel opgenomen, omdat immers niet alleen doelsoorten zullen gebruik maken van de vispassage.

Niet enkel (seizoensgebonden) paaimigratie maar ook de stroomopwaartse ‘feeding’-migratie en migratie naar overwinteringsgebieden van juveniele en subadulte vissen kan heel omvangrijk zijn (Prchalová *et al.*, 2011; Buysse *et al.*, 2004). Daarenboven migreren een aantal soorten vooral overdag (vb. blankvoorn, baars en karper) terwijl andere soorten vooral tijdens de schemering en/of nacht actief worden (vb. paling) (Buysse *et al.*, 2009). Vismigratie moet dus 24 uur per dag en het jaar rond mogelijk zijn om de verschillende vissoorten de kans te geven stroomopwaarts te migreren (Buysse & Coeck, 2014).

Vanwege andere randvoorwaarden (zoals bijv. peilbeheer t.b.v. scheepvaart) is het daarentegen niet altijd mogelijk om een werkingspercentage van 100% te halen. Voor het minimale percentage van de tijd waarbij de vispassage optimaal dient te kunnen werken wordt daarom vaak het “ $Q_{30d}$ - $Q_{330d}$ -criterium” (Schwevers, 2006; Dumont, 2006) 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 deze studie wordt voor de genoemde boven- en ondergrens de percentage-notatie “ $Q_{10\%}$ - $Q_{90\%}$ ” gebruikt (in plaats van de dag-notatie “ $Q_{30d}$ - $Q_{330d}$ ”):

- $Q_{90\%}$  → 90% (= circa 330 dagen) van het jaar is het debiet groter;
- $Q_{10\%}$  → 10% (= circa 30 dagen) van het jaar is het debiet groter.

Tabel 3 – Beperkt overzicht van vastgestelde periodes van stroomopwaartse paaimigratie voor enkele doelsoorten

Vissoort (levensstadium)	Migratieperiode (stroomopwaarts)												Referenties
	jan	feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec	
alver													Coenen et al. 2013 en referenties daarin
alver (juveniel en subadult)													Prchalová et al. 2006
baars													Coenen et al. 2013 en referenties daarin
beekprik													Coenen et al. 2013 en referenties daarin
bermpje													Coenen et al. 2013 en referenties daarin
bittervoorn													Coenen et al. 2013 en referenties daarin
blankvoorn													Buyse et al. 2002; Baeyens et al. 2006; Coenen et al. 2013 en referenties daarin
blankvoorn (juveniel en subadult)													Prchalová et al. 2006; Buyse et al. 2002
bot (juveniel)													Buyse et al. 2002
driedoornige stekelbaars													Buyse et al. 2002 & 2003
karper													Coenen et al. 2013 en referenties daarin
kleine modderkruiper													Coenen et al. 2013 en referenties daarin
kolblei													Buyse et al. 2002; Coenen et al. 2013 en referenties daarin
kolblei (juveniel)													Buyse et al. 2002
kopvoorn													Buyse et al. 2006b & 2006c; Coeck et al. 2000;
paling (glasaal)													Mouton et al. 2011 & 2014; Buyse et al. 2012 + niet gepubliceerde data
paling (elver)													Depuydt 2011
paling (gele aal)													Buyse et al. 2009
kwabaal													Dillen et al. 2005
pos													Coenen et al. 2013 en referenties daarin
rietvoorn													Coenen et al. 2013 en referenties daarin
rivierdonderpad													Vandelannoote et al. 1998; Knaepkens et al. 2004
riviergrondel													Coenen et al. 2013 en referenties daarin
rivierprik													Stevens et al. 2009; Buyse et al. 2004; Maes & Ollevier 2005; Coenen et al. 2013
serpeling													Dillen et al. 2006
serpeling (juveniel en subadult)													Prchalová et al. 2006
snoek													Coenen et al. 2013 en referenties daarin
snoekbaars													Coenen et al. 2013 en referenties daarin
spiering													Buyse et al. 2002; Stevens et al. 2009 en referenties daarin
tiendoornige stekelbaars													Coenen et al. 2013 en referenties daarin
vetje													Coenen et al. 2013 en referenties daarin
winde													Coenen et al. 2013 en referenties daarin
zeelt													Coenen et al. 2013 en referenties daarin
zeeprik													Pauwels et al. (in progress); Stevens et al. 2009 en referenties daarin

Migratie adulten (■) en migratie van juvenielen en subadulten (■). Bron: (Buyse & Coeck, 2014)

Naast de invloed van het debiet wordt het werkingspercentage van vispassages in stuwpanden tevens bepaald door de (automatische) waterpeilregeling voor scheepvaart, het zgn. **waterpeilcriterium**. Bij een vrij afstromende rivier of waterloop zijn waterstanden meestal direct gekoppeld aan het optredende debiet.

In stuwpanden echter wordt door middel van stuwregeling gestreefd naar een vast waterpeil (het streefpeil), waardoor er geen direct verband meer is tussen waterstand en debiet. Met andere woorden verschillende debieten kunnen optreden bij eenzelfde waterpeil. Onder normale omstandigheden zijn de waterstandsfluctuaties in dit geval relatief gering. Enkel bij zeer hoge afvoercondities (bijv. een was) stijgt het waterpeil mee met het toenemende debiet, wanneer de stuwen volledig 'open staan' en het debiet nog verder toeneemt.

Vanuit het oogpunt van peilbeheer worden vispassages in stuwpanden voorzien van een opwaartse afsluitconstructie met automatische regeling. De voorwaarde voor automatische sluiting wordt daarbij meestal gekoppeld aan een overschrijding van een opgelegde minimale waterstand (in kader van minimaal vereiste diepte voor scheepvaart) en de vispassage wordt automatisch terug geopend als er weer voldoende debiet beschikbaar is om het waterpeil te kunnen handhaven.

Daarnaast kan er vanuit het oogpunt van veiligheid of om erosie te voorkomen (vooral bij nevengeulen) ook een voorwaarde voor sluiting worden opgelegd bij een overschrijding van een te hoog waterpeil en/of het optreden van een te groot verval over de vispassage. Uit de evaluatie van bestaande vispassages op de Bovenschelde bleek dat de invloed van de instellingen van de afsluitschuif (en in tweede instantie ook de stuwregeling) op het openingspercentage van de vispassage relatief groot is (Visser *et al.*, 2013).

Bovenstaande 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, omdat anders de vispassage te vaak zal sluiten.

In stuwpannen bepalen de waterstandsfluctuaties en instellingen voor automatische regeling vooral de openingspercentages en daarmee de passeerbaarheid van de vispassage. Het debietcriterium is bepalend voor het nodige lokstroomdebiet (attractiviteit tot de bovengrens  $Q_{10\%}$ ) en is daarnaast ook deels van invloed op het maximale vispassagedebiet aangezien dit het openingspercentage van de vispassage bij lage afvoer bepaalt. Bij dit laatste speelt de ondergrens  $Q_{90\%}$  een bepalende rol.

Zeker binnen deze minimale periode van optimale werking moet de effectiviteit van de vispassage zo hoog mogelijk zijn. De effectiviteit van een vispassage wordt bepaald door zowel de attractiviteit als de passeerbaarheid van de vispassage. Met attractiviteit wordt de vindbaarheid van de vispassage bedoeld, waarbij zowel de locatie van de monding als de sterkte van de lokstroom een belangrijke rol spelen. Dit aspect speelt een hoofdrol in de effectiviteit: wanneer vissen de vispassage niet kunnen vinden, speelt de passeerbaarheid verder namelijk geen rol meer. De passeerbaarheid geeft aan hoe vlot vissen de vispassage kunnen opzwemmen en in stroomopwaartse richting passeren. Deze twee aspecten worden in de volgende paragrafen toegelicht.

## 2.3 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. Ontwerpcriteria worden best zo gekozen dat de passage voor elk van de doelsoorten optimaal passeerbaar is, een zgn. effectieve 'multi-species vismigratiefaciliteit' (Foulds & Lucas, 2013).

### 2.3.1 Maximale stroomsnelheden

Een belangrijk criterium voor de passeerbaarheid van een vispassage is de (maximale) stroomsnelheid waar vissen tegenop moeten zwemmen. In principe kunnen er vier snelheidsklassen worden onderscheiden (AMINAL, 2005): kruissnelheid, verhoogde snelheid, sprintsnelheid en maximale snelheid. De laatste is bij het ontwerp van vispassages echter niet van toepassing aangezien een vis deze snelheid enkel kan bereiken bij een explosieve krachtsinspanning.

De kruissnelheid is de snelheid die een vis langdurig kan aanhouden (> 200 minuten) zonder uitgeput te raken. De verhoogde snelheid kan enige tijd worden volgehouden (> 15 seconden), bijvoorbeeld om een moeilijker traject te passeren. De sprintsnelheid is slechts van korte duur (< 15 seconden) en kan worden aangewend om bijvoorbeeld een hindernis te nemen. Voor de ontwerpcriteria worden in principe steeds de kruissnelheid en sprintsnelheid gebruikt voor de beoordeling van een bepaald ontwerp, maar voor korte trajecten kan ook een verhoogde snelheid toegepast worden in de beoordeling.

Logischerwijze zijn de waarden voor de kruis- en sprintsnelheid verschillend per vissoort. In Tabel 1 en Tabel 2 is een overzicht gegeven van respectievelijk in de Dender reeds voorkomende en in het Scheldebekken gewenste vissoorten met indicatie van vastgestelde sprintsnelheden (niet voor alle soorten gekend).

Op basis van deze empirisch bepaalde richtlijnen voor de doelsoorten in het Scheldebekken en richtlijnen uit de literatuur voor laaglandrivieren (Coenen *et al.*, 2013; AMINAL, 2005; Riemersma, 1994) wordt gekozen om de volgende criteria voor maximale stroomsnelheden te hanteren bij het ontwerp van de vispassages:

- Maximale stroomsnelheid over korte afstand/korte duur (sprintsnelheid): 1 - 1,5 m/s;
- Maximale stroomsnelheid over langere afstand/langere duur (kruissnelheid): 0,5 m/s.

Met oog op peil- en/of debietfluctuaties is het van belang om de bovengrenzen van de maximale sprintsnelheden van doelsoorten niet als ontwerpstroomsnelheid (bij streefpeilen) voor de vispassages te kiezen, zodat er nog marge is bij hogere waterpeilen. Bovendien kost het passeren van veel opeenvolgende drempels of doorzwemopeningen, en op grotere schaal van verschillende opeenvolgende vispassages langsheen de rivier, veel energie. Hierdoor kan het zijn dat een vis aan het einde van de vispassage, of na het passeren van een aantal vispassages, niet meer in staat is om zijn maximale sprintsnelheid te halen. Tenslotte komen hoge stroomsnelheden van nature niet voor in het 'laagland-deel' van rivieren als de Dender.

### 2.3.2 Minimale doorzwemdieptes en -breedtes

Naast stroomsnelheden spelen vervolgens ook minimale doorzwemdieptes en -breedtes een belangrijke rol ten aanzien van de passeerbaarheid van een passage. DWA (2014) geeft de volgende richtlijnen voor het bepalen van de minimaal benodigde dimensies op basis van vissoorten:

- Minimale breedte = 3 x de karakteristieke dikte van de vissoort;
- Minimale diepte = 2,5 x de karakteristieke hoogte van de vissoort.

Uitgaande van de grootste doelsoorten geeft dit een minimaal vereiste breedte van circa 0,40 m (karper) tot 0,70 m (Europese meerval, zie ook Figuur 5), en voor Europese steur zelfs 1,1 m. Voor de minimale waterdiepte geeft dit circa 0,60 m (karper) tot 0,65 m (Europese meerval), en voor Europese steur zelfs 1,3 m.

Daarnaast moet echter ook rekening worden gehouden met de volgende aspecten:

- Voor zowel breedte als diepte wordt onderscheid gemaakt tussen minimale dimensies op korte afstand (bijv. ter hoogte van een drempel of een slot) en de gemiddelde diepte over langere afstand (bijv. de bekkens of instroom- en instroomkanalen);
- Wanneer een vispassage zich op een relatief grote waterloop bevindt wordt de gemiddelde diepte van de vispassage best ook niet veel ondieper gekozen dan de hoofdloop. Dit zowel met oog op de migratie-impuls (voortzetting hoofdloop) als met oog op tegengaan van predatie (zichtdiepte).
- Sommige soorten migreren in groepen waardoor breedtes en dieptes best niet alleen op enkelingen worden gekozen;

Uitgaande van het bovenstaande werden daarom de volgende ontwerpcriteria vastgesteld voor een middelgrote waterloop als de Dender:

- minimale breedte over korte afstand (slot): 0,50 m;
- minimale diepte over korte afstand (drempel): 0,50 m;
- minimale diepte over langere afstand in nevengeulen: 0,5-1 m;
- minimale diepte over langere afstand in bekkenpassages: 1-1,5 m.



Bij deze criteria wordt bewust niet de grens van toelaatbaarheid van de doelsoorten opgezocht maar wordt, zoals eerder aangegeven, ingezet op een effectieve ‘multi-species vismigratiefaciliteit’, waarbij zowel kleine vissoorten, zoals driedoornige stekelbaars, als potentieel zeer grote vissoorten, zoals Europese meerval, door eventuele slots of over eventuele drempels moeten kunnen passeren. Merk wel op dat de Europese steur als uitzonderlijk grootste doelsoort met oog op de minimaal benodigde dimensies buiten beschouwing is gelaten. Deze soort is momenteel niet aanwezig in de Dender noch in het Scheldebekken en het is ook niet duidelijk hoe snel deze soort terug kan keren<sup>1</sup>. Gezien de relatief beperkte afvoer op de Dender zouden minimale dimensies met oog op de Steur leiden tot een dusdanig groot basisdebiet dat dit ten koste zou gaan van het openingspercentage (zie verder onder de hoofdstukken 3 en 4 met betrekking tot hydraulische randvoorwaarden ten opzichte van het basisdebiet van de vispassage). Voorgestelde minimale dimensies betekenen echter niet dat deze helemaal niet passeerbaar zal zijn voor de Europese steur; kleinere exemplaren kunnen passeren.

Met oog op de minimale diepte over langere afstand wordt een kleinere waarde gehanteerd voor nevengeulen omdat er in dit type minder grote verschillen zijn tussen zones met hoge en (zeer) lage stroomsnelheden (cf. ‘kleinere waterlopen’; AMINAL, 2005; Coenen *et al.*, 2013). Meestal is ook de volledige breedte stroomvoierend (m.a.w. geen vernauwingen en/of drempels). Bij bekkenpassages moeten vissen daarentegen steeds een drempel of slot passeren tegen verhoogde snelheid, waardoor rustzones met zeer lage stroomsnelheden nodig zijn. Zones met grotere dieptes zorgen voor lagere stroomsnelheden. Ook kan de grotere diepte predatie tegengaan in deze zones met relatief lage stroomsnelheden.

De minimale breedte over langere afstand is meestal niet de beperkende factor en wordt bepaald op basis van de dimensies van de sloten/drempels en/of het beschikbare debiet.



Figuur 5 - Europese meervallen van anderhalve meter en meer (links) en snoeken van één meter of langer (rechts) zijn geen uitzondering meer in het Scheldestroomgebied. Foto's: INBO, vismigratie-onderzoek.

<sup>1</sup> Dit zal vermoedelijk moeten gebeuren via een herintroductieprogramma zoals dat ook in Nederland wordt geïnitieerd. In 2012 keerde de Europese steur voor het eerst terug in de Nederlandse rivieren na meer dan 50 jaar afwezigheid dankzij herintroductie. 47 steuren werden in mei van dat jaar losgelaten in de Nieuwe Maas bij Rotterdam en in de Waal bij Nijmegen (<https://www.ravon.nl/Soorten/Soortinformatie/europese-steur>). In 2020 werd het actieplan 2020-2030 voor het herstel van de Europese steur in de Rijn gelanceerd. In juni 2023 werden steuren in de Biesbosch uitgezet (<https://www.naturetoday.com/intl/nl/nature-reports/message/?msg=30829>).

### 2.3.3 Maximale energiedissipatie en turbulentie

Bij bekkenpassages wordt bij elke bekkenovergang energie doorgegeven naar het afwaartse bekken en daar deels gedissipeerd. Dissipatie van de energie leidt tot een bepaalde mate van turbulentie. De wijze waarop deze energie in de bekken terug gedissipeerd wordt en de mate van turbulentie die hierbij ontstaat, speelt een belangrijke rol in de passeerbaarheid.

Om te beoordelen of de bekken voldoende volume hebben voor de nodige dissipatie, wordt in de literatuur de relatie tussen de te dissiperen energie (evenredig met debiet en verval) en het volume van het bekken beschouwd (Larinier, 2002b). De maximaal toelaatbare energiedissipatie per volume-eenheid/bekken ( $E_{max}$ ) wordt in de literatuur gekoppeld aan drie categorieën van doelsoorten (AMINAL, 2005):

- $< 200 \text{ W/m}^3$  voor zalmachtigen;
- $< 150 \text{ W/m}^3$  voor elft, fint en karperachtigen;
- $< 100 \text{ W/m}^3$  voor snoek en snoekbaars.

Aangezien een aantal doelsoorten in het Scheldebekken zich in de categorie 'snoek en snoekbaars' bevinden, is er gekozen voor een  $E_{max}$  van  $100 \text{ W/m}^3$ .

Naast energiedissipatie worden de benodigde bekkenvolumes (en dan vooral de bekkenlengtes) bepaald door specifieke eisen van doelsoorten, bijvoorbeeld uitgaande van de lengte van vissen. Maar ook het aantal sloten kan de nood aan rustbekkens (met grotere lengtes) vergroten.

Ten slotte dienen complexe stroompatronen, zoals hoog turbulente zones (wit water), sterke schuifspanningen en/of circulatieneren met te hoge snelheden, te worden voorkomen om de hoofdstroom of vispassage-ingang niet te verstoren. Vanuit dit oogpunt worden, indien mogelijk, ook best geen (scherpe) bochten toegepast. Locaties in de vispassage met complexe stroompatronen kunnen namelijk punten zijn waar vissen gedesoriënteerd raken en terugkeren. Zo wordt als richtlijn voor knikken in zijwanden van de vispassage een maximale hoek van circa 1:4 voorgesteld.

### 2.3.4 Samenvatting criteria passeerbaarheid

Tabel 4 geeft een samenvatting van de ontwerpcriteria met betrekking tot de passeerbaarheid zoals zal worden toegepast bij het ontwerp van de vispassages op een middelgrote waterloop als de Dender.

Tabel 4 – 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 doorzwemdiepte over korte afstand (drempel)	$d_{min}$	0,50 m
Minimale doorzwemdiepte over langere afstand in nevengeulen	$Y_{min-g}$	0,5 - 1 m
Minimale doorzwemdiepte over langere afstand in bekken	$Y_{min-b}$	1 - 1,5 m
Maximaal toelaatbare energiedissipatie per volume-eenheid	$E_{max}$	$100 \text{ W/m}^3$

## 2.4 Attractiviteit (monding)

De attractiviteit van een vispassage is een zeer belangrijk aspect met oog op de effectiviteit ervan en 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 migratielimitlijn een belangrijke rol.

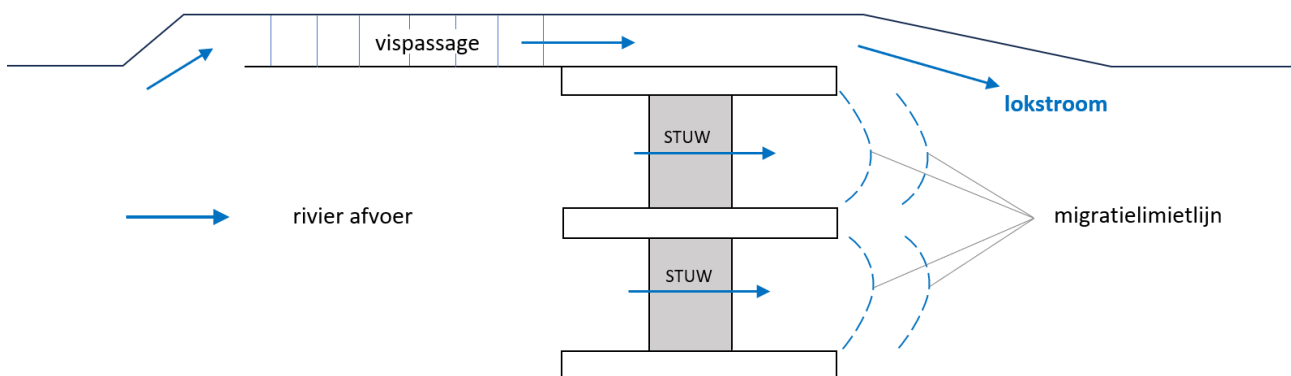
### 2.4.1 Migratielimitlijn/-zone

De locatie van de monding dient net afwaarts van de zgn. migratielimitlijn 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 6). 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 migratielimitlijn vormen.

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

Gezien het verschil in sprintsnelheid is de ligging van de migratielimitlijn 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 migratielimitlijn varieert met de grootte van het debiet over de stuwen kan eerder gesproken worden van een migratielimitzone.

De boven- en ondergrenzen van deze zone worden verbonden met het debietcriterium voor optimale werking zoals beschreven in paragraaf 2.2, het zogenaamde  $Q_{10\%}$ - $Q_{90\%}$ -criterium. Aangezien de locatie van de migratielimitlijn daarmee niet constant is, vormt de locatie en oriëntatie van de monding een belangrijk aandachtspunt.



Figuur 6 – Relatie migratielimitlijn en monding vispassage

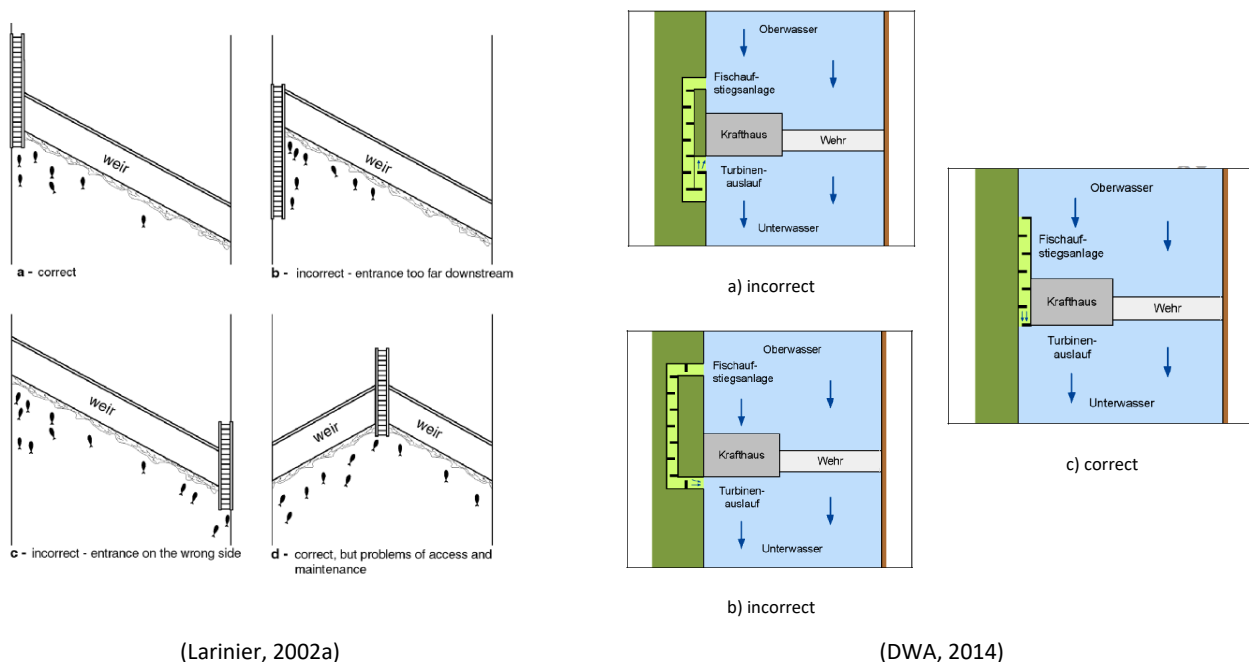
### 2.4.2 Locatie en oriëntatie

Voor de afweging van de meest optimale locatie en oriëntatie van de monding en lokstroom spelen de volgende uitgangspunten een belangrijke rol:

- Migrerende vissen zijn *niet geneigd om af te wijken van de hoofdstroomrichting*. Het heeft daarom duidelijk de voorkeur om de uitstroom van de vispassagemonding zo parallel mogelijk aan de hoofdstroom te realiseren (DWA, 2014; Larinier, 2002a). Voor de toepassing van een uitstroomhoek geeft DWA (2014) een richtlijn voor een maximale hoek ten opzichte van de hoofdloop van 30° tot maximaal 45°.

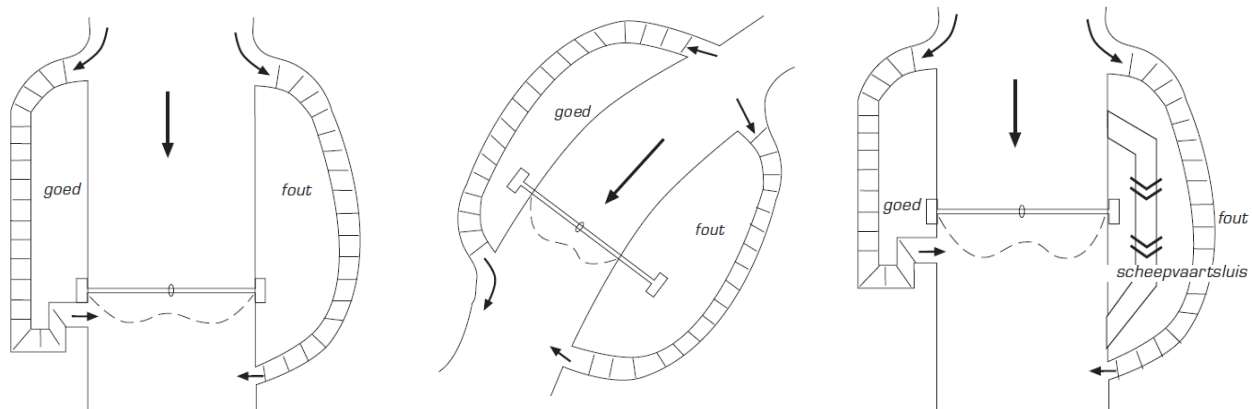
- Vissen zoeken meestal naar het meest opwaartse ontsnappingspunt. De monding ligt dus best zo dicht mogelijk aan het migratieknelpunt. Wanneer de monding te ver stroomafwaarts gelegen is, kan het zijn dat vissen deze voorbijzwemmen en onder het knelpunt blijven zoeken.
- Veel vissoorten migreren voornamelijk langs de bodem. De bodem van de vispassagemonding wordt daarom best minimaal gelijk met het afwaartse bodempeil geplaatst en opstaande verticale randen over de gehele breedte moeten worden voorkomen. In geval van benodigde overgang in bodempeilen wordt als richtlijn een maximale bodemhelling van circa 1:5 tot 1:10 voorgesteld.
- Aangezien de stroomsnelheid in het midden van de stroom meestal hoger is dan aan de oevers heeft de migratielijmietlijn meestal een zekere bolling. Vissen kunnen hierdoor de stuw vaak dichter naderen aan de oevers en zullen zich daar dan ook verzamelen.
- Turbulentie (zoals bij overstort aan stuwen) kan aan de ene kant zorgen voor een aantrekkende werking (als zijnde de hoofdstroom), maar kan ook zorgen voor niet-passeerbare stromingscondities, ‘witwater’ (luchtbellen) en/of verwarrende recirculatieneren wanneer de monding zich te dicht bij de turbulente zone bevindt.

Naast de bovengenoemde uitgangspunten voor optimale locatie en oriëntatie dient de monding logischerwijze ook optimaal passeerbaar te blijven, met andere woorden er dient op deze locaties ook te worden voldaan aan de ontwerpcriteria uit Tabel 4. Echter, waar in de vispassage zelf wordt gestreefd naar zo laag mogelijke (maar toch voelbare) stroomsnelheden, is het voor de attractiviteit van de monding wel wenselijk om lokaal (bij de uitstroom) de stroomsnelheden iets te verhogen (door bijv. een knijp in hoofdstroomrichting toe te passen). De stroomsnelheden mogen daarbij natuurlijk niet hoger worden dan de sprintsnelheden van de doelsoorten (circa 1 tot max 1,5 m/s). Idealiter ontstaan ook geen complexe stroompatronen (zoals recirculatieneren). Figuur 7 toont voorbeelden van correcte en incorrecte inpassing van vispassagemondingen in toonaangevende internationale publicaties.



Figuur 7 – Voorbeelden inpassing vispassagemonding in toonaangevende internationale publicaties

Ook de buiging van de waterloop en de aanwezigheid van andere constructies (zoals sluizen, turbines, ...) kunnen een rol spelen bij de keuze van de juiste locatie voor de vispassagemonding (Figuur 8). Indien de vispassage wordt aangelegd ter plaatse van een al bestaand migratieknelpunt kan de kennis met betrekking tot verzamelplekken van vissen ook helpen in de keuze voor een optimale locatie (Larinier, 2002a).



Figuur 8 – Voorbeelden van goede en slechte locaties voor de vispassagemonding (Bron: AMINAL, 2005)

Zoals blijkt uit de internationale publicaties hebben parallelle mondingen zo dicht mogelijk opwaarts aan het knelpunt duidelijk de voorkeur. Indien een parallelle monding echter niet mogelijk blijkt, wordt bij loodrechte mondingen soms geopteerd om een knijp ter plaatse van de monding toe te passen (AMINAL, 2005; Meersschaut *et al.*, 1998). Deze knijp dient om een iets sterkere lokstroom te creëren die mogelijk over een grotere breedte van de waterloop voelbaar is. Hierbij mogen stroomsnelheden ter plaatse van de knijp logischerwijze niet hoger worden dan de sprintsnelheid van de doelsoorten. Naast de minder optimale hoek ten opzichte van de hoofdloop kan het toepassen van knijpconstructies echter ook zorgen voor recirculatieneren aan weerszijden van de monding die mogelijk weer afstotend of verwarrend kunnen zijn voor bepaalde vissoorten. Ook werd hierboven uitgelegd dat de ligging van de migratielinietlijn varieert met het debiet over de stuwen. Een loodrechte monding kan niet inspelen op deze variabele ligging. Loodrechte mondingen worden daarom enkel toegepast wanneer een parallelle monding niet mogelijk blijkt.

Aangezien de nieuwe vispassages langs de Dender worden aangelegd in kader van de vernieuwing van de stuwen is het mogelijk om een parallelle monding te voorzien. Zoals aangegeven in de vorige paragraaf is de ligging van de migratielinietlijn bij stuwen niet constant. Het is daarom van belang om de interactie met de turbulente zone van de watersprong net afwaarts van de stuwen te onderzoeken. In hoofdstuk 5 wordt daarom op basis van de bovengenoemde ontwerpcriteria gezocht naar een zo optimaal mogelijk ontwerp voor een parallelle monding naast de nieuwe stuwen.

### 2.4.3 Lokstroomdebiet

Naast de locatie en oriëntatie van de monding speelt ook het lokstroomdebiet een belangrijke rol voor een goede attractiviteit. Daarbij geldt dat, wanneer de maximale stroomsnelheden met oog op passeerbaarheid worden gerespecteerd, algemeen gesteld kan worden dat voor een optimale attractiviteit best gezocht wordt naar een zo groot mogelijk lokstroomdebiet.

Voor kleine en middelgrote waterlopen is het soms mogelijk om meer dan 50% van de afvoer via de vispassage te laten lopen. Dit heeft duidelijk de voorkeur aangezien de vispassage hiermee als het ware (terug) de hoofdloop wordt (AMINAL, 2005). Maar, zeker bij relatief grotere rivieren, moet ook rekening worden gehouden met de haalbaarheid vanuit andere criteria zoals bijv. kostenoverwegingen (grootte van de vispassage), andere waterverbruikers (zoals sluizen of turbines) en de beschikbare ruimte. Uiteraard mogen de bovengrenzen voor passeerbaarheid ook niet overschreden worden.

Het handboek vismigratie (AMINAL, 2005) geeft aan dat er in principe geen algemeen criterium kan worden gesteld voor het benodigde of meest optimale lokstroomdebiet, maar dat dit geval per geval moet worden bekeken. Hierbij speelt, zoals gezegd, de grootte van de waterloop een belangrijke rol. Bij grotere rivieren wordt vaak een ontwerpdebiet voorgesteld dat minimaal 10-15% van de waterafvoer betreft en 0,5 tot 1,5% van de hoogste waterafvoer.

Het vraagstuk van het benodigde lokstroomdebiet richt zich bij waterlopen met een relatief hogere afvoer in principe eigenlijk niet op een theoretisch percentage van de totale afvoer, maar eerder op het creëren van een lokstroom die goed voelbaar is ten opzichte van de nabijgelegen hoofdstroom en/of de turbulentie afwaarts van de nabijgelegen overstort<sup>2</sup>. Daarbij speelt de locatie, vormgeving en oriëntatie van de monding natuurlijk een bepalende rol (zie paragraaf 2.4.2).

In het geval van de vispassages op de Dender wordt de monding direct naast en parallel aan de stuwen ingepast. In dit geval speelt vooral de interactie met de turbulente watersprongzone afwaarts van de stuwen een belangrijke rol (zie blauw gestippelde lijnen in Figuur 6). Zoals eerder aangegeven varieert de lengte van de zone met het debiet over de stuwen, waardoor bij hogere afvoer de monding zou kunnen worden afgeschermd door de turbulentie van de stuwoverstort (watersprong met eventuele recirculatieneren). In deze studie wordt daarom gezocht naar een optimaal ontwerp voor de parallelle monding (hoofdstuk 5). Eén van de aspecten die hierbij een belangrijke rol speelt is de grootte van het lokstroomdebiet.

Met oog op een optimaal lokstroomdebiet worden de volgende twee hoofddoelstellingen nagestreefd:

- Zorgen dat de lokstroom vanuit de vispassage voor een zo groot mogelijk deel van de optimale werkingsperiode groter is dan het debiet over de stuwen ( $Q_{lok} > 50\%$  van de afvoer). Zodat de vispassage bij lagere/normale afvoeren als het ware de hoofdstroom kan worden.
- Bij hogere afvoeren (binnen de optimale werkingsperiode) zorgen voor een zo optimaal mogelijke concurrentie met de hoofdstroom, door bijv. de negatieve effecten van de turbulente zone afwaarts van de stuwen buiten de monding en lokstroom te houden. Dit aspect zal worden onderzocht door middel van 3D-modelstudies (zie verder in hoofdstuk 5). Als richtlijn/vertrekpunt voor de ondergrens wordt gesteld dat de lokstroom tijdens de periode van optimale werking minimaal zo groot moet zijn als 10% van het debiet over de stuwen.

Hoewel een zo hoog mogelijk lokstroomdebiet een grote meerwaarde is voor de attractiviteit van de vispassage moet echter wel opgemerkt dat een te hoog vispassagedebiet aan de andere kant kan zorgen voor een te hoog sluitingspercentage van de vispassage. Wanneer het vispassagedebiet namelijk te hoog wordt gekozen in verhouding tot de afvoer in drogere periodes zal de opwaartse afsluitconstructie automatisch sluiten met oog op peilbeheer. Vanuit dat oogpunt wordt het vispassagedebiet best zo laag mogelijk gekozen en in ieder geval niet hoger dan de  $Q_{90\%}$ -waarde (ondergrens debietcriterium periode optimale werking, zie paragraaf 2.2), terwijl het lokstroomdebiet in situaties van hogere afvoer sterk genoeg moet zijn (maatgevende waarde in deze situatie is de bovengrens van debietcriterium voor optimale werking, namelijk de  $Q_{10\%}$ -waarde).

Deze ogenschijnlijke tegenstrijdigheid tussen een zo laag mogelijk vispassagedebiet en een zo hoog mogelijk lokstroomdebiet kan worden opgelost door de toepassing van een toegevoegd debiet. Dit is een regelbaar debiet dat net na de vispassage en net voor de monding kan worden ingebracht via een soort bypass. Dit deel van het lokstroomdebiet stroomt dan niet via de vispassage waardoor dimensies voor de vispassage klein gehouden kunnen worden en het risico op sluiting bij lagere afvoeren wordt beperkt. Bij hogere afvoer kan het toegevoegd debiet echter wel worden ingezet voor de versterking van de lokstroom. Dit principe wordt verder uitwerkt in hoofdstuk 6.

<sup>2</sup> Vanuit dit oogpunt kan het bij vervolgonderzoek misschien een meerwaarde zijn om een richtlijn te onderzoeken waarbij eerder een relatie gezocht wordt met het overstortdebiet per strekkende meter:  $q = Q/b$  ( $m^2/s$ ). In principe richt het vraagstuk van een optimale lokstroom zich vooral op de verhouding in momentum tussen de twee stromen.

#### 2.4.4 Samenvatting criteria en richtlijnen attractiviteit

Met oog op het ontwerp van de monding en het lokstroomdebiet worden de volgende criteria en richtlijnen toegepast:

- 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 4 (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).

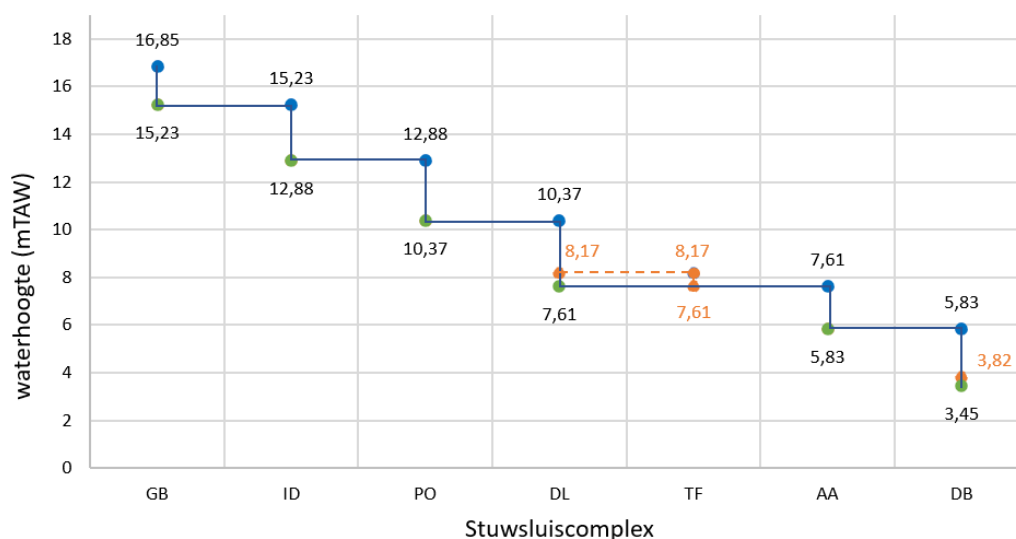
## 3 Hydraulische randvoorwaarden

### 3.1 Streefpeilen en vervallen

Tabel 5 toont de op- en afwaartse streefpeilen en het bijhorende verval voor elk van de (huidige) stuwsluiscplexen langs het Vlaamse deel van de Dender. Figuur 9 geeft een visualisatie van deze peilen. Bij de vernieuwingen van de stuwsluiscplexen is door De Vlaamse Waterweg nv besloten om complex Teralfene te verwijderen en het relatief kleine verval (0,56 m) toe te voegen aan het opwaartse complex te Denderleeuw. Daarnaast wordt opgemerkt dat het streefpeil in het pand tussen Denderbelle en Dendermonde in de toekomst mogelijk verlaagd wordt met 0,37 m.

Tabel 5 – Overzicht stuwsluiscplexen op de Dender met bijhorende streefpeilen en verval bij streefpeil

Stuwsluiscplex	Afk.	Opwaarts streefpeil [m TAW]	Afwaarts streefpeil [m TAW]	Verval [m]
Geraardsbergen	GB	16,85	15,23	1,62
Idegem	ID	15,23	12,88	2,35
Pollare	PO	12,88	10,37	2,51
Denderleeuw	DL	10,37	7,61 (8,17)	2,76 (2,20)
(Teralfene)	(TF)	(8,17)	(7,61)	(0,56)
Aalst	AA	7,61	5,83	1,78
Denderbelle	DB	5,83	3,45 (3,82)	2,38 (2,01)
Dendermonde	DM	3,45 (3,82)	Tij Schelde	variabel



Figuur 9 – Visuele weergave op- en afwaartse streefpeilen stuwsluiscplexen



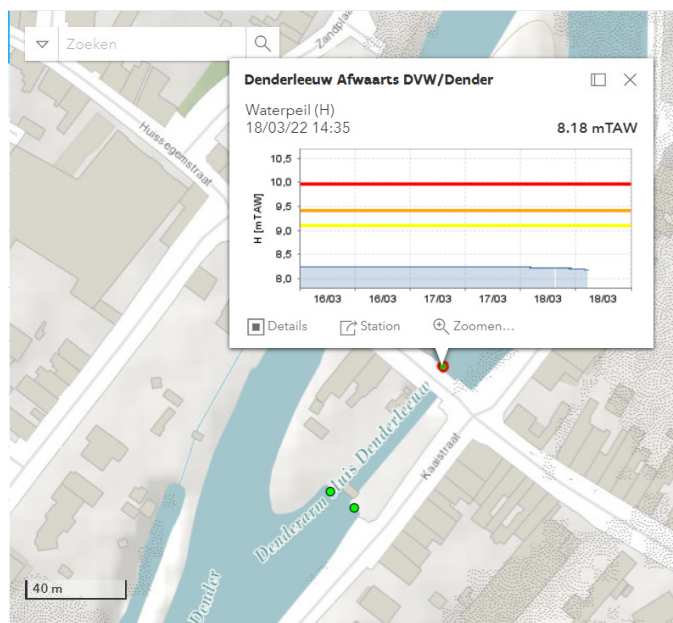
## 3.2 Meetposten

Tabel 6 geeft een overzicht van de meetposten langs de Dender waarvoor meetgegevens beschikbaar zijn voor waterpeil en/of debiet. Er worden daarbij twee types posten onderscheiden: HIC-meetposten en DVW-meetposten (voorheen EMT-meetposten). De gegevens van beide types posten zijn beschikbaar op [waterinfo.be](http://waterinfo.be). De gegevens van de DVW-meetposten bevinden zich ook in de (interne) databank ABBA (hiervoor is echter een login vereist). Merk op dat enkel de meetgegevens van de HIC-meetposten gevalideerd zijn, voor de meetgegevens van de DVW-posten zijn alleen de zgn. ‘spikes’ verwijderd (lees: fysisch onrealistische waarden). De reeksen van de DVW-meetposten gaan echter wel verder terug in de tijd.

Naast drie locaties waar debietmetingen (samen met lokale waterstand) worden gemeten (namelijk van opwaarts naar afwaarts te Overboelare, Erembodegem en Dendermonde), zijn ter plaatse van elk stuwsluiscomplex steeds drie metingen beschikbaar, namelijk de op- en afwaartse waterstand van de DVW-meetposten en een (tweede) opwaartse waterstand van de HIC-meetpost (enkel voor locatie Teralfene zijn alleen de DVW-meetposten beschikbaar). Figuur 10 toont een voorbeeld van deze drie metingen ter plaatse van Denderleeuw, zoals beschikbaar op [waterinfo.be](http://waterinfo.be).

Tabel 6 – Overzicht meetposten waterstand en/of debiet op het Vlaamse deel van de Dender

locatie	op- of afwaarts	parameter	ID	begin metingen
Overboelare (OB)	nvt	waterpeil	den12a-1066	23/09/2001
	nvt	debiet	<a href="#">den12a-1066</a>	<a href="#">29/12/2000</a>
Geraardsbergen	opwaarts	waterpeil	den11e-1066	25/09/2014
	opwaarts	waterpeil	OW408-OPW-1073	30/04/1996
	afwaarts	waterpeil	OW408-AFW-1073	30/04/1996
Idegem	opwaarts	waterpeil	den10e-1066	25/09/2014
	opwaarts	waterpeil	OW407-OPW-1073	30/04/1996
	afwaarts	waterpeil	OW407-AFW-1073	30/04/1996
Pollare	opwaarts	waterpeil	den09e-1066	3/10/2014
	opwaarts	waterpeil	OW406-OPW-1073	30/04/1996
	afwaarts	waterpeil	OW406-AFW-1073	30/04/1996
Denderleeuw	opwaarts	waterpeil	den08c-1066	3/10/2014
	opwaarts	waterpeil	OW405-OPW-1073	31/01/1995
	afwaarts	waterpeil	OW405-AFW-1073	31/01/1995
Teralfene	opwaarts	waterpeil	OW404-OPW-1073	31/01/1995
	afwaarts	waterpeil	OW404-AFW-1073	31/01/1995
Erembodegem (EB)	nvt	waterpeil	den06a-1066	14/12/2012
	nvt	debiet	<a href="#">den06a-1066</a>	<a href="#">14/12/2012</a>
Aalst	opwaarts	waterpeil	den05e-1066	3/10/2014
	opwaarts	waterpeil	OW403-OPW-1073	30/04/1996
	afwaarts	waterpeil	OW403-AFW-1073	30/04/1996
Denderbelle	opwaarts	waterpeil	den03e-1066	28/12/1988
	opwaarts	waterpeil	OW402-OPW-1073	31/01/1995
	afwaarts	waterpeil	OW402-AFW-1073	31/01/1995
Dendermonde (DM)	nvt	waterpeil	den02a-1066	17/11/2005
	nvt	debiet	<a href="#">den02a-1066</a>	1/01/1971
	opwaarts	waterpeil	OW401-OPW-1073	2/05/1996
	afwaarts	waterpeil	OW401-AFW-1073	30/04/1996



Figuur 10 – Voorbeeld beschikbare meetposten op waterinfo ter plaatse van het stuwsluisc omplex te Denderleeuw

### 3.3 Histogrammen

Tabel 7 toont een histogram (percentage overschrijdingskans) van het gemeten debiet van de HIC-debietposten en de gemeten opwaartse waterstanden voor de DVW-meetposten, zoals opgesomd in Tabel 6. Tabel 8 geeft tevens de bijhorende afwaartse waterstanden van de DVW-meetposten.

Tabel 7 – Histogram gemeten debiet en opwaartse waterstanden

	OVERBOELARE	GERAARDSB	IDEGEM	POLLARE	DENDERLEEUEW	TERALFENE	EREMBOD	AALST	DENDERBELLE	DENDERMON	DENDERMON
meetpost	den12a	OW408-opw	OW407-opw	OW406-opw	OW405-opw	OW404-opw	den06a	OW403-opw	OW402-opw	den02a	OW401-opw
begin reeks	29/12/2000	30/04/1996	30/04/1996	30/04/1996	31/01/1995	31/01/1995	14/12/2012	30/04/1996	31/01/1995	1/01/1971	2/05/1996
einde reeks	31/12/2021	31/12/2021	31/12/2021	31/12/2021	31/12/2021	31/12/2021	31/12/2021	31/12/2021	31/12/2021	31/12/2021	31/12/2021
percentiel	OB-Q	GB-Ho	ID-Ho	PO-Ho	DL-Ho	TF-Ho	EB-Q	AA-Ho	DB-Ho	DM-Q	DM-Ho
0,01%	113,57	18,24	15,66	14,00	10,87	9,93	88,71	8,15	6,61	141,90	6,43
0,10%	73,48	17,68	15,56	13,23	10,80	9,63	85,24	8,04	6,34	120,14	6,15
1,00%	42,19	17,14	15,47	13,12	10,69	9,08	66,52	7,93	6,19	74,72	5,41
5,00%	19,47	17,03	15,40	13,04	10,61	8,61	33,31	7,84	6,10	40,08	4,69
10,00%	13,00	16,99	15,36	13,00	10,57	8,52	22,63	7,80	6,06	28,32	4,40
20,00%	7,56	16,95	15,32	12,96	10,53	8,44	13,79	7,76	6,02	17,29	4,17
30,00%	5,20	16,92	15,30	12,93	10,50	8,40	9,54	7,73	6,00	11,71	4,07
40,00%	3,88	16,90	15,27	12,91	10,48	8,37	6,97	7,71	5,99	8,50	4,01
50,00%	2,88	16,88	15,25	12,89	10,46	8,34	5,26	7,69	5,97	6,25	3,96
60,00%	2,16	16,86	15,23	12,87	10,44	8,31	4,03	7,67	5,96	4,55	3,93
70,00%	1,66	16,83	15,21	12,85	10,42	8,28	2,90	7,65	5,94	2,95	3,89
80,00%	1,32	16,80	15,19	12,83	10,39	8,25	2,13	7,62	5,92	1,34	3,86
90,00%	0,99	16,76	15,15	12,79	10,35	8,20	1,38	7,57	5,87	-1,25	3,83
95,00%	0,75	16,72	15,11	12,77	10,32	8,17	0,76	7,52	5,82	-4,26	3,81
99,00%	0,40	16,64	15,01	12,70	10,22	8,09	-0,76	7,39	5,57	-28,28	3,71

Tabel 8 – Histogram gemeten afwaartse waterstanden in m TAW

	GERAARDSB	IDEGEM	POLLARE	DENDERLEEUW	TERALFENE	AALST	DENDERBELLE
meetpost	OW408-afw	OW407-afw	OW406-afw	OW405-afw	OW404-afw	OW403-afw	OW402-afw
begin reeks	30/04/1996	30/04/1996	30/04/1996	31/01/1995	31/01/1995	30/04/1996	31/01/1995
einde reeks	31/12/2021	31/12/2021	31/12/2021	31/12/2021	31/12/2021	31/12/2021	31/12/2021
percentiel	GB-Ha	ID-Ha	PO-Ha	DL-Ha	TF-Ha	AA-Ha	DB-Ha
0,01%	17,91	14,81	12,61	11,99	9,76	7,14	
0,10%	17,17	14,72	12,13	10,06	9,40	6,88	
1,00%	16,28	14,07	11,54	9,39	8,83	6,56	5,62
5,00%	15,61	13,32	10,84	8,69	8,11	6,17	4,81
10,00%	15,47	13,15	10,69	8,56	7,94	6,08	4,50
20,00%	15,37	13,06	10,59	8,47	7,83	6,01	4,23
30,00%	15,33	13,02	10,55	8,42	7,78	5,98	4,12
40,00%	15,30	12,98	10,51	8,38	7,76	5,96	4,05
50,00%	15,27	12,96	10,48	8,36	7,73	5,94	4,01
60,00%	15,25	12,93	10,45	8,33	7,71	5,92	3,97
70,00%	15,23	12,90	10,43	8,30	7,68	5,91	3,94
80,00%	15,20	12,87	10,40	8,26	7,66	5,88	3,91
90,00%	15,17	12,83	10,36	8,22	7,61	5,85	3,86
95,00%	15,13	12,80	10,32	8,19	7,55	5,82	3,82
99,00%	15,05	12,75	10,26	8,12	7,44	5,70	3,74

Zoals opgemerkt in de vorige paragraaf zijn de meetgegevens van de DVW-metposten niet gevalideerd, maar voor deze posten zijn wel relatief langere meetperiodes beschikbaar. Daarnaast geeft het gebruik van deze posten ook de mogelijkheid tot het bepalen van het verval aangezien zowel het op- als afwaartse waterpeil beschikbaar is. Uit een vergelijking met de (wel gevalideerde) meetgegevens van de HIC-metposten van het opwaartse waterpeil voor nagenoeg dezelfde periode blijkt dat de histogrammen zeer goed overeenkomen, zie Tabel 9 hieronder. Enkel met de meest extreme waarden uit de histogrammen (< 1% en > 99%) van de DVW meetposten moet voorzichtiger worden omgegaan aangezien deze beïnvloed kunnen zijn door het ontbreken van de validatie.

Tabel 9 – Vergelijking metingen opwaarts waterpeil t.p.v. de HIC- en DVW-metposten voor de afgelopen 10 jaar

	GERAARDSB	GERAARDSB	IDEGEM	IDEGEM	POLLARE	POLLARE	D-LEEUW	D-LEEUW	AALST	AALST	DENDERBELLE	DENDERBELLE
meetpost	den11e	OW408-opw	den10e	OW407-opw	den09e	OW406-opw	den08c	OW405-opw	den05e	OW403-opw	den03e	OW402-opw
begin reeks	25/09/2014	1/01/2012	25/09/2014	1/01/2012	3/10/2014	1/01/2012	3/10/2014	31/01/1995	3/10/2014	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	31/12/2021	31/12/2021	31/12/2021	31/12/2021	31/12/2021	31/12/2021
percentiel	GB-Ho (hic)	GB-Ho (10j)	ID-Ho (hic)	ID-Ho (10j)	PO-Ho (hic)	PO-Ho (10j)	DL-Ho (hic)	DL-Ho (10j)	AA-Ho (hic)	AA-Ho (10j)	DB-Ho (hic-10j)	DB-Ho (10j)
0,01%	17,68	17,66	15,61	15,61	13,26	13,23	10,86	10,86	8,03	8,05	6,55	6,51
0,10%	17,48	17,45	15,56	15,55	13,22	13,19	10,78	10,77	7,98	8,00	6,33	6,31
1,00%	17,13	17,12	15,46	15,46	13,13	13,11	10,67	10,68	7,87	7,90	6,18	6,17
5,00%	17,02	17,02	15,38	15,40	13,05	13,04	10,59	10,60	7,79	7,81	6,09	6,08
10,00%	16,98	16,98	15,34	15,36	13,02	13,01	10,55	10,56	7,76	7,77	6,06	6,05
20,00%	16,94	16,95	15,31	15,33	12,98	12,97	10,51	10,52	7,73	7,74	6,02	6,02
30,00%	16,91	16,92	15,28	15,30	12,94	12,94	10,48	10,50	7,71	7,72	6,00	6,00
40,00%	16,88	16,90	15,25	15,28	12,92	12,91	10,46	10,47	7,68	7,70	5,99	5,99
50,00%	16,86	16,88	15,23	15,26	12,89	12,89	10,44	10,45	7,66	7,68	5,98	5,98
60,00%	16,84	16,85	15,21	15,24	12,87	12,87	10,41	10,42	7,64	7,66	5,96	5,96
70,00%	16,81	16,83	15,19	15,22	12,85	12,85	10,38	10,40	7,61	7,64	5,95	5,95
80,00%	16,77	16,79	15,16	15,20	12,82	12,82	10,36	10,38	7,56	7,60	5,93	5,94
90,00%	16,73	16,75	15,12	15,15	12,78	12,79	10,32	10,34	7,47	7,53	5,91	5,91
95,00%	16,69	16,71	15,08	15,11	12,75	12,76	10,28	10,30	7,42	7,46	5,87	5,88
99,00%	16,61	16,63	14,98	15,02	12,68	12,68	10,13	10,17	7,28	7,32	5,73	5,73
99,90%	16,49	16,52	14,87	14,91	12,57	12,58	10,01	10,06	7,23	7,26	5,24	5,24
99,99%	16,39	16,44	14,74	14,78	11,92	11,94	9,74	10,01	7,15	7,18	5,04	5,00

Merk op dat deze histogrammen gebaseerd zijn op de historische meetgegevens van de huidige situatie (huidige stuwen) en dus geen modelsimulatie betreft van de situatie met de toekomstige nieuwe stuwen. Mogelijk kan de nieuwe stuwregeling zorgen voor een fijnere peilregeling. Ook kan klimaatverandering een invloed hebben op de frequentie van voorkomen van wassen en 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 bij het ontwerp voor de nieuwe vispassages (zie paragrafen 3.4 en 3.5 hierna).

### 3.4 Debieten

Tabel 10 geeft het histogram van de drie debietmeetposten langs de Dender. Hierbij wordt het volgende opgemerkt:

- De meetpost te Erembodegem werd pas eind 2012 gerealiseerd, waardoor de beschikbare reeks voor deze locatie korter is. Om te kunnen vergelijken met Overboelare is voor Overboelare ook een histogram opgesteld voor de afgelopen 10 jaar. Dit geeft tevens een inzicht in het verschil van de volledige reeks voor Overboelare met de reeks van de afgelopen 10 jaar. De laagste debieten ( $Q_{99\%}$ - $Q_{90\%}$ ) liggen de afgelopen 10 jaar lager dan wanneer de volledige reeks beschouwd wordt, wat een indicatie kan zijn van de toenemende droogte. Dit aspect is echter niet verder onderzocht maar onderstreept wel het belang om het vispassagedebiet zo laag mogelijk te houden zodat de passage zo lang mogelijk open kan gehouden worden.
- De reeks van Dendermonde is afwijkend ten opzicht van de andere twee meetposten omdat deze zich bevindt in het meest afwaartse pand (tussen Denderbelle en Dendermonde) waar de afvoer naar de Schelde enkele uren per dag wordt beperkt door hoogtij op de Schelde. Hierbij kan ook terugstroom ontstaan, wat de negatieve waarden bij de lagere percentielen verklaart.

Tabel 10 – Histogram debietmeetposten Dender

locatie	OVERBOELARE	OVERBOELARE	EREMBOD	DENDERMON
meetpost	den12a	den12a	den06a	den02a
begin reeks	29/12/2000	1/01/2012	14/12/2012	1/01/1971
einde reeks	31/12/2021	31/12/2021	31/12/2021	31/12/2021
periode:	21j	10j	9j	50j
percentiel	OB-Q	OB-Q (10j)	EB-Q	DM-Q
0,01%	113,57	76,91	88,71	141,9
0,10%	73,48	69,84	85,24	120,14
1,00%	42,19	44,64	66,52	74,72
5,00%	19,47	20,14	33,31	40,08
10,00%	13	13,6	<b>22,63</b>	28,32
20,00%	7,56	8,05	13,79	17,29
25,00%	6,14	6,48	11,45	14,04
30,00%	5,2	5,38	9,54	11,71
40,00%	3,88	3,95	6,97	8,5
50,00%	2,88	2,92	5,26	6,25
60,00%	2,16	2,19	4,03	4,55
70,00%	1,66	1,67	2,9	2,95
75,00%	1,48	1,48	2,61	2,21
80,00%	1,32	1,29	2,13	1,34
90,00%	<b>0,99</b>	0,87	1,38	-1,25
95,00%	0,75	0,62	0,76	-4,26
99,00%	0,4	0,32	-0,76	-28,28

De Dender is een regenrivier. Onder normale omstandigheden is de afvoer relatief laag. De mediane afvoer ( $Q_{50\%}$ ) varieert tussen 3 m<sup>3</sup>/s te Overboelare en 5 m<sup>3</sup>/s te Erembodegem. Bij hevige regenval kan het debiet echter sterk toenemen. De grootste toename in de bemeten periode te Overboelare (2001 t.e.m. 2021) was in november 2010, toen werd er tijdens een was een piekafvoer van circa 114 m<sup>3</sup>/s gemeten te Overboelare. Kijken we naar middelgrote wassen dan liggen die meestal tussen de circa 40 à 70 m<sup>3</sup>/s. Gemiddeld komen deze één tot drie keer per jaar voor.

Ter plaatse van de stuwsluiscomplex worden geen debieten opgemeten, maar deze kunnen wel via interpolatie en op basis van afstroomoppervlak worden benaderd. Tabel 11 geeft een schatting van het debiet op basis van de drie meetlocaties en een factor bepaald op basis van afstroomoppervlak. Dit geïnterpoleerde debiet werd steeds bepaald met behulp van de volgende formule:  $Q_{locatie} = Q_{opwaartse\ meetpost} + factor \times (Q_{afwaartse\ meetpost} - Q_{opwaartse\ meetpost})$ . Locaties Geraardsbergen en Aalst liggen dusdanig dicht aan de opwaartse meetpost dat voor deze locaties gewoon de opwaartse meetpost gebruikt kan worden.

Tabel 11 – Histogram debiet per locatie op basis van interpolatie en afstroomoppervlak

Factor:		0	0,1	0,3	0,5		0	0,7	
locatie	OVERBOELARE	GERAARDSB.	IDEGEM	POLLARE	DENDERLEEUV	EREMBOD	AALST	DENDERBELLE	DENDERMON
meetpost	den12a	interpolatie	interpolatie	interpolatie	interpolatie	den06a	interpolatie	interpolatie	den02a
begin reeks	1/01/2012	nvt	nvt	nvt	nvt	14/12/2012	nvt	nvt	1/01/2012
einde reeks	31/12/2021	nvt	nvt	nvt	nvt	31/12/2021	nvt	nvt	31/12/2021
periode:	10j	10j	10j	10j	10j	9j	10j	10j	10j
percentiel	OB-Q	GB-Q	ID-Q	PO-Q	DL-Q	EB-Q	AA-Q	DB-Q	DM-Q
0,01%	76,91	76,91	78,09	80,45	82,81	88,71	88,71	125,94	141,9
0,10%	69,84	69,84	71,38	74,46	77,54	85,24	85,24	109,75	120,25
1,00%	44,64	44,64	46,83	51,20	55,58	66,52	66,52	72,30	74,78
5,00%	20,14	20,14	21,46	24,09	26,73	33,31	33,31	38,07	40,11
10,00%	13,6	13,60	14,50	16,31	18,12	22,63	22,63	26,63	28,35
20,00%	8,05	8,05	8,62	9,77	10,92	13,79	13,79	16,29	17,36
25,00%	6,48	6,48	6,98	7,97	8,97	11,45	11,45	13,28	14,07
30,00%	5,38	5,38	5,80	6,63	7,46	9,54	9,54	11,08	11,74
40,00%	3,95	3,95	4,25	4,86	5,46	6,97	6,97	8,05	8,51
50,00%	2,92	2,92	3,15	3,62	4,09	5,26	5,26	5,96	6,26
60,00%	2,19	2,19	2,37	2,74	3,11	4,03	4,03	4,39	4,55
70,00%	1,67	1,67	1,79	2,04	2,29	2,9	2,90	2,91	2,92
75,00%	1,48	1,48	1,59	1,82	2,05	2,61	2,61	2,33	2,21
80,00%	1,29	1,29	1,37	1,54	1,71	2,13	2,13	1,58	1,34
90,00%	0,87	0,87	0,92	1,02	1,13	1,38	1,38	-0,50	-1,3
95,00%	0,62	0,62	0,63	0,66	0,69	0,76	0,76	-2,82	-4,35
99,00%	0,32	0,32	0,21	0,00	-0,22	-0,76	-0,76	-20,14	-28,44

Zoals aangegeven in paragraaf 2.2 vormen de  $Q_{10\%}$ - en de  $Q_{90\%}$ -waarden de boven- en ondergrenzen met oog op de optimale werkingsperiode voor de vispassage. De mediaan ( $Q_{50\%}$ ) geeft een idee van de meest voorkomende afvoer.

De  $Q_{90\%}$  is vooral van belang voor het risico op sluiten van de vispassage bij de lage afvoer. Aan de opwaartse zijde van de vispassages wordt namelijk altijd een automatische afsluiter voorzien met oog op het peilbeheer voor scheepvaart. Daarom wordt het vispassagedebiet best lager dan deze 90%-waarde gekozen om sluiting voor meer dan 10% van de tijd te voorkomen. Voor de meer opwaarts gelegen vispassages (zoals Geraardsbergen) wordt het vispassagedebiet op basis van de volledige meetreeks van Overboelare daarom best niet groter dan circa 1 m<sup>3</sup>/s, terwijl voor de meest afwaartse vispassages (zoals Denderbelle) een vispassagedebiet tot 1,4 m<sup>3</sup>/s zou kunnen worden toegelaten.

Hierbij wordt echter opgemerkt dat de percentielwaarden uit Tabel 10 uitgaan van jaargemiddelde percentielen. Deze waarden zullen in de zomermaanden lager liggen dan in de wintermaanden. Tabel 12 geeft een overzicht van de percentielen per maand op basis van het lopende zevendaags gemiddelde over de volledig beschikbare periode voor de posten Overboelare en Erembodegem. Hieruit kan worden opgemaakt dat de 10%-waarde te Overboelare in zomermaanden kan terugvallen tot circa 0,7 m<sup>3</sup>/s en te Erembodegem tot 0,9 m<sup>3</sup>/s.

Tabel 12 – Maandpercentielen o.b.v. lopend 7-daagsgemiddelde voor de gehele beschikbare periode

Maand	Debiet Overboelare (m <sup>3</sup> /s)					Maand	Debiet Erembodegem (m <sup>3</sup> /s)				
	Periode 2001 t/m 2020						Periode 2013 t/m 2020				
	99%	95%	90%	85%	aantal		99%	95%	90%	85%	aantal
1	1,64	2,81	3,45	4,16	620	1	3,82	4,89	5,95	6,81	248
2	3,06	4,04	4,58	5,19	565	2	6,81	8,16	9,09	10,04	226
3	3,15	3,62	3,92	4,23	620	3	5,92	6,5	7,2	7,8	248
4	1,78	1,94	2,13	2,3	600	4	3,08	3,53	3,73	4,09	240
5	0,96	1,27	1,47	1,59	620	5	1,88	2,52	3,01	3,13	248
6	0,75	0,97	1,08	1,17	600	6	1,64	1,77	1,9	2,03	240
7	0,57	0,7	0,83	0,93	620	7	1,29	1,34	1,4	1,43	248
8	0,5	0,6	<b>0,73</b>	0,85	620	8	0,78	1,02	1,23	1,35	248
9	0,46	0,55	0,79	0,96	600	9	0,7	0,79	<b>0,94</b>	1,03	240
10	0,65	0,78	1,06	1,16	620	10	-0,3	0,92	1,12	1,4	248
11	0,96	1,25	1,34	1,43	600	11	1,03	1,56	2,04	2,4	240
12	1,62	2,19	2,49	2,94	623	12	3,21	4,08	4,67	5,08	266

De Q<sub>10%</sub> uit Tabel 10 (bovengrens optimale werking) is vooral van belang voor de bepaling van het benodigde lokstroomdebiet in de bovengrenssituatie. Zoals aangegeven in paragraaf 2.4.3 wordt met oog op een optimale lokstroom best gestreefd naar een zo groot mogelijke verhouding tussen het lokstroomdebiet en het debiet over de stuwen. Uit Tabel 10 blijkt dat de Q<sub>10%</sub> van opwaarts (Overboelare) naar afwaarts (Erembodegem) toeneemt van 13 tot 23 m<sup>3</sup>/s. Hierbij wordt opgemerkt dat de waarden uit het histogram te Dendermonde beïnvloed worden door het al dan niet kunnen afwateren vanwege het tij op de Schelde en de terugstroom die hierbij kan optreden. Daarom wordt (voor Aalst en Denderbelle) eerder uitgegaan van de waarden te Erembodegem, maar wordt rekening gehouden dat deze iets hoger kunnen liggen op basis van de metingen te Dendermonde.

Uit de vergelijking tussen de 10-jarige reeks en de volledige reeks te Overboelare blijkt dat de waarden voor Q<sub>10%</sub> en Q<sub>90%</sub> iets extremer zijn geworden in de afgelopen 10 jaar. Dit onderschrijft nogmaals dat het vispassagedebiet best niet te hoog wordt gekozen, terwijl anderzijds voor het lokstroomdebiet bij de bovengrenssituatie best gestreefd wordt naar een zo hoog mogelijke waarde.

Tabel 13 geeft tenslotte een overzicht van de maatgevende debieten die worden toegepast bij het vispassage-ontwerp in deze studie.

Tabel 13 – Maatgevende debieten

Parameter	Waarde	Omschrijving
$Q_{90\%-zomer}$	0,7 – 0,9 m <sup>3</sup> /s*	Ondergrens periode optimale werking; van belang voor maximaal toelaatbaar vispassagedebiet met oog op openingspercentage
$Q_{90\%-jaar}$	1 – 1,4 m <sup>3</sup> /s*	
$Q_{50\%-jaar}$	3 – 5 m <sup>3</sup> /s*	Mediaandebiet
$Q_{10\%-jaar}$	13 – 25 m <sup>3</sup> /s*	Bovengrens periode optimale werking; van belang voor minimaal benodigde lokstroom in bovengrenssituatie
$Q_{mw}$	40 – 70 m <sup>3</sup> /s	Middelgrote wassen (circa 1 tot 3x per jaar)
$Q_{max}$	114 m <sup>3</sup> /s	Hoogste gemeten afvoer te Overboelare tijdens de bemeten periode 2001 t.e.m. 2021 in november 2010

\* De eerste waarde uit deze range geeft het debiet te Overboelare, de tweede te Erembodegem.

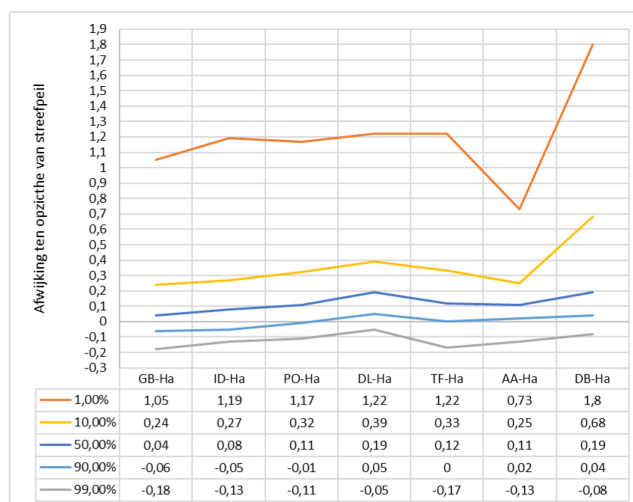
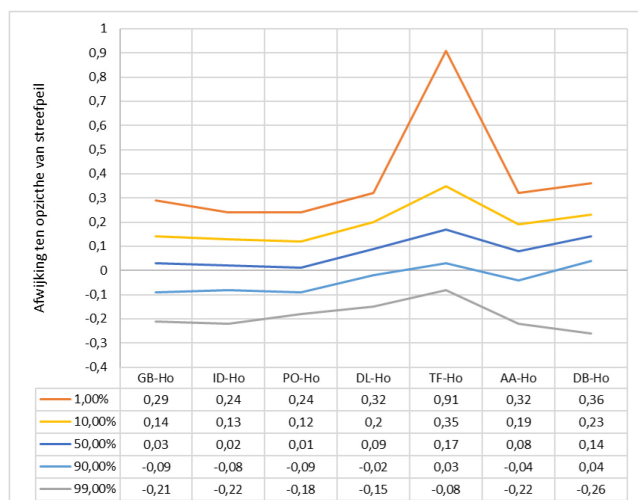
### 3.5 Waterstanden

Om een beeld te krijgen van de dagelijkse waterstandsfluctuaties waarmee rekening dient te worden gehouden in het ontwerp voor de nieuwe vispassages worden de waterstandsmetingen geanalyseerd.

Figuur 11 geeft een visuele weergave van de afwijking ten opzichte van streefpeil (zie Tabel 5) voor maatgevende percentielen van de op- en afwaartse waterstanden uit het histogram in Tabel 7.

Wanneer Teralfene buiten beschouwing wordt gelaten (dit complex vervalt) kan het volgende worden opgemaakt uit deze figuur met oog op de opwaartse waterpeilen:

- Mediaan opwaarts waterpeil ( $H_{0,50\%}$ ) lag voor alle locaties boven streefpeil; voor de drie meest opwaartse locaties minder dan +3 cm, voor Denderleeuw en Aalst respectievelijk +9 cm en +8 cm, en voor Denderbelle op +14 cm.
- De toename van de opwaartse waterstand met een overschrijdingskans van 10% lag op circa 0,13 tot 0,23 m.
- De toename van de opwaartse waterstand met een overschrijdingskans van 1% lag op circa 0,24 tot 0,36 m.
- De afname van het opwaartse waterpeil met een onderschrijdingskans van 1% (dus een overschrijding van 99% in de figuur) ligt tussen de -0,15 en -0,26 m.



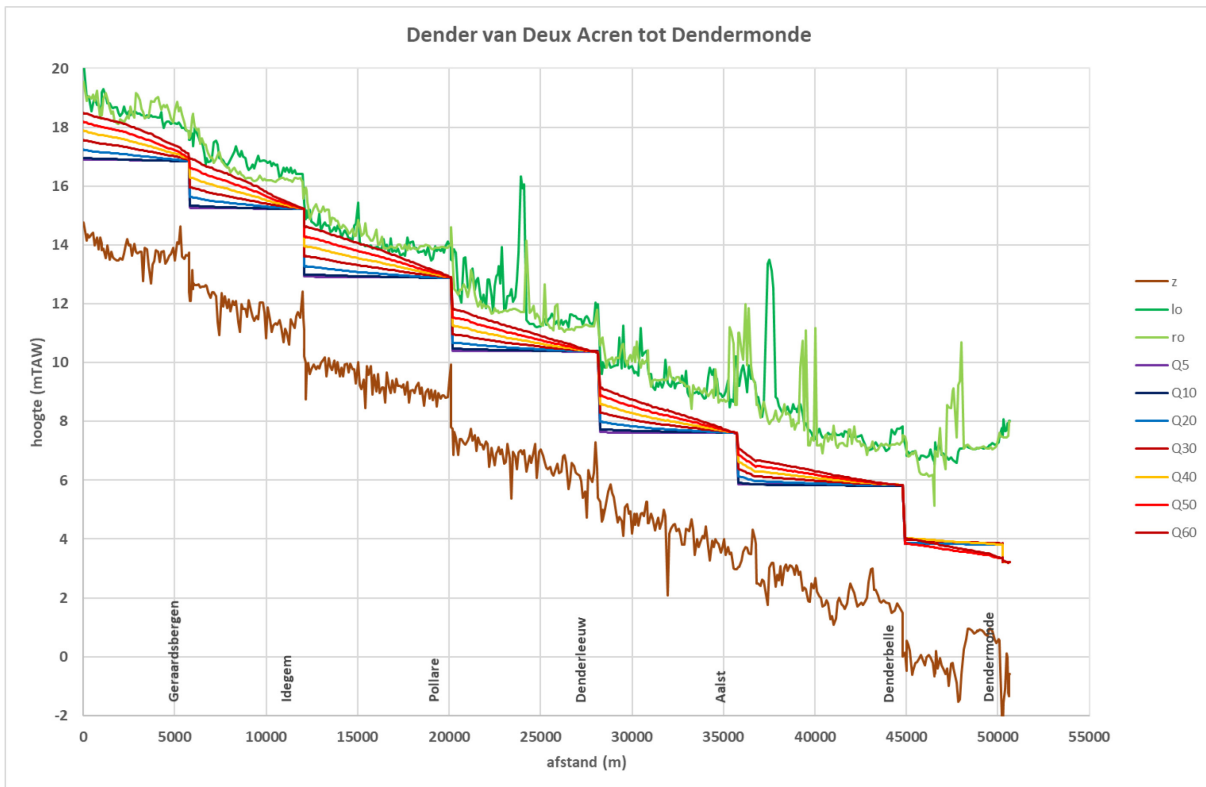
Figuur 11 – Afwijking (in meter) ten opzichte van streefpeilen voor maatgevende percentielen opwaartse (links) en afwaartse (rechts) waterpeilen

Kijken we naar het afwaartse waterpeil dan vormt Denderbelle een uitzondering. Zoals al aangegeven in de voorgaande paragraaf komt dit doordat er enkele uren per dag niet kan worden afgewaterd vanuit de Dender naar de Schelde vanwege hoogtij op de Schelde. Het pand tussen Denderbelle en Dendermonde werkt in die situaties als een soort bufferbekken (en het naastgelegen Denderbellebroek als een GOG), waarbij waterstanden dus relatief sterk kunnen toenemen. De invloed van vooral deze relatief grote afwaartse peilfluctuaties te Denderbelle wordt daarom best afzonderlijk bekeken bij het ontwerp van de vispassage zelf.

Hierbij wordt opgemerkt dat Denderbelle ook met oog op het opwaarts waterpeil licht verschilde met de andere locaties. De stijging was relatief iets groter, maar vooral de mogelijke afname van het opwaarts peil is lager dan op andere locaties (zelfs tot onder laagwaterpeil). Dit is het gevolg van het uitvoeren van het zogenaamde "tijmanoeuvre". Dit manoeuvre houdt in dat de stuwen in Denderbelle volledig geopend worden wanneer de afvoer in Erembodegem meer dan 50 m<sup>3</sup>/s bedraagt en het waterpeil afwaarts de stuwen gestegen is tot meer dan 5,2 m TAW. De stuwen worden pas opnieuw gedeeltelijk gesloten wanneer er in Dendermonde geloosd kan worden en het waterpeil opwaarts de stuwen gedaald is tot minder dan 5,5 m TAW.

Wanneer we Denderbelle buiten beschouwing laten dan lag een toename van het afwaartse waterpeil met een overschrijdingskans van 10% tussen circa 0,24 en 0,39 m en een toename met een overschrijdingskans van 1% tussen circa 1,05 en 1,22 m. Hieruit blijkt dat het afwaarts peil sneller en sterker toeneemt dan het opwaartse waterpeil. Dit wordt verklaard door het toenemende verhang in de stuwpanen bij de toename van de afvoer op de Dender. Figuur 12 geeft lengteprofielen van de waterstanden bepaald door middel van simulaties bij constante afvoeren van 5, 10, 20, 30, 40, 50 en 60 m<sup>3</sup>/s in de situatie van de nieuwe stuwen. Hierin is de sterkere toename van het afwaarts waterpeil per locatie zichtbaar.





Figuur 12 – Lengteprofielen van waterstanden bij constante afvoer uit Mike11-simulaties van het nieuwe stuwwontwerp (Bron: Vanderkimpfen *et al.*, 2023)

De afname van het afwaartse waterpeil met een overschrijdingskans van 1% (dus een overschrijding van 99% in Figuur 11) ligt tussen de -0,05 en -0,18 m en komt dan weer redelijk overeen met de fluctuatie in het opwaartse waterpeil.

Het doel van deze analyse is de bepaling van de waterstandsfluctuaties waarmee rekening dient te worden gehouden in het ontwerp van de vispassages. Met oog op de periode van optimale werking werd uitgegaan van het debietcriterium: optimale werking tussen debieten die meer dan 90% van de tijd worden overschreden en minder dan 10% van de tijd worden overschreden. Voor het criterium van waterstandsfluctuaties tijdens optimale werking wordt uitgegaan van waterstanden die minder dan 10% van de tijd worden overschreden en minder dan 1% van de tijd worden onderschreden. Daarbij de volgende opmerkingen:

- Maatgevende fluctuaties worden gebaseerd op percentielen uit Figuur 11.
- Gezocht wordt naar een algemene range en dus niet de fluctuatierange per locatie.
- De percentielen uit Figuur 11 zijn bekomen met historische meetreeksen bij de huidige stuwwerking. Er wordt vanuit gegaan dat de nieuwe stuwten zullen zorgen voor iets lagere fluctuatie voor de opwaartse waterstanden.

Op deze wijze worden voor de periode van optimale werking de volgende algemene peilfluctuaties ten opzichte van de streefpeilen meegenomen in deze hydraulische studie:

- Maximale toename opwaarts waterpeil: +0,20 m;
- Maximale afname opwaarts waterpeil: -0,20 m;
- Maximale toename afwaarts waterpeil: +0,50 m;
- Maximale afname afwaarts waterpeil: -0,20 m.

Logischerwijze kunnen waterstanden tijdens bepaalde (extreme) events meer toenemen of afnemen. In dat geval is optimale werking niet meer vereist, maar dient gecontroleerd te worden of er geen risico is op schade en/of andere negatieve effecten. Indien dit wel het geval is wordt de vispassage best (automatisch) gesloten (door bijv. een regelwaarde op te nemen in het script voor automatische sturing, zie hoofdstuk 8). Dit is echter afhankelijk van het type vispassage en de locatie en wordt daarom best verder bekeken in het afzonderlijke deelrapport voor de betreffende locatie.

In het geval van vertical slot-vispassages wordt echter verwacht dat bij sterkere toename van het op- en/of afwaartse waterpeil de vispassage open kan blijven omdat het risico op schade in dit type vispassages gering is (verval wordt dan ook juist kleiner). Daarnaast voorkomt de opwaartse drijfvuilbalk dat de eventueel hogere drijfvuillast in de vispassage geraakt (zie paragraaf 7.3). Daarom wordt voorgesteld om bij de ontwerpberekeningen op de afzonderlijke locaties ook scenario's op te nemen met een stijging van het opwaartse waterpeil tot 0,30 m en met een toename van het afwaartse waterpeil tot 1 m (hogere stijgingen van deze peilen komen minder dan circa 1% van de tijd voor).

### 3.6 Fluctuatie in verval

Naast de afzonderlijke fluctuaties van het op- en afwaartse waterpeil dient ook rekening te worden gehouden met combinatie van de twee, namelijk de fluctuatie in het totale verval. Ook hierbij wordt weer onderscheid gemaakt tussen toename van verval tijdens normale werking (optimale werkingsperiode) en extreme events (mogelijke maximale toename van het verval).

Tabel 14 geeft een overzicht van het verval per locatie bij streefpeilen en enkele maatgevende percentielen voor toe- of afname van het verval ten opzichte van het verval bij op- en afwaarts streefpeil. Merk op dat dit een toename betreft in verval ten opzichte van de waarde bij streefpeilen en (nog) niets zegt over de op- of afwaartse waterpeilen waarbij dit verval optreedt. Deze toe- en afnames werden bepaald op basis van de metingen van het op- en afwaartse waterpeil van de DVW-meetposten. Daarbij werd eerst het verval voor elk tijdstip berekend en vervolgens werd een histogram opgesteld van deze afgeleide verval-reeks.

Tabel 14 – Histogram\* toename of afname verval ten opzichte van verval bij streefpeilen (in meter)

Locatie	GB	ID	PO	DL	AA	DB
Opwaarts streefpeil	16,85	15,23	12,88	10,37	7,61	5,83
Afwaarts streefpeil	15,23	12,88	10,37	7,61	5,83	3,45
<b>Verval bij streefpeilen</b>	<b>1,62</b>	<b>2,35</b>	<b>2,51</b>	<b>2,76</b>	<b>1,78</b>	<b>2,38</b>
Histogram afwijking (%):						
1%	0,22	0,18	0,19	0,43	0,24	0,27
10%	0,09	0,08	0,05	0,01	0,07	0,12
50%	-0,01	-0,05	-0,1	-0,1	-0,03	-0,06
90%	-0,23	-0,28	-0,29	-0,36	-0,17	-0,57

\* Histogram bepaald op basis van de DVW meetposten van het op- en afwaartse peil (zie OW-posten in Tabel 6) voor de periode van begin metingen t.e.m. 2018.

Het eerste wat opgemaakt kan worden uit Tabel 14 is dat het verval vaker afneemt dan toeneemt (vergelijk  $H_{10\%}$  met  $H_{90\%}$ ). Dit wordt verklaard door het feit dat bij toename van de afvoer het afwaartse waterpeil meestal sneller stijgt dan het opwaartse waterpeil vanwege de toename van het verhang in de stuwpannen zelf (zie Figuur 12).

Vervolgens kan worden opgemaakt dat een toename van het verval met een overschrijdingskans van 1% op 0,18 tot 0,43 m ligt. Het gaat hier om indicatieve waarden aangezien de hiervoor gebruikte meetreeksen van de DVW-posten niet gevalideerd zijn.

Met oog op de periode van optimale werking van de vispassage wordt aangenomen dat het verval onder normale omstandigheden kan toenemen met 0,20 m ten opzichte van het verval bij op- en afwaarts streefpeil en tot circa 0,5 m kan afnemen. In lijn met de voorgaande paragraaf ten aanzien van de scenario's voor maatgevende toe- of afnames van de op- en afwaartse waterstanden wordt voorgesteld om bij de ontwerpberoeeningen op de afzonderlijke locaties ook scenario's op te nemen met een stijging van het verval tot 0,30 m en een afname van het verval tot 1 m (grotere toe- of afnames komen minder dan circa 1% van de tijd voor).

Extreme (en vaak kortstondige) toenames van het verval worden meestal veroorzaakt door de val van de afwaartse waterstand. Deze maximale vervallen zijn van belang voor het bepalen van het risico op schade, aangezien op dat moment de hoogste stroomsnelheden kunnen optreden in de vispassage. De meest extreme toenames van het verval dienen per locatie te worden achterhaald op basis van de beschikbare meetreeksen en worden daarom in de aparte deelstudies/deelrapporten voor de betreffende locaties bepaald.

## 4 Vispassage

De meest optimale oplossing vanuit oogpunt vismigratie is het verwijderen van het knelpunt zelf uit de waterloop. In 'free flowing' of vrij afstromende rivieren met natuurlijkere dimensies zullen de stroomsnelheden hoger zijn dan in de geherkalibreerde, verbrede en verstuwde rivieren. Stroomsnelheid is een belangrijke prikkel of stimulus tijdens de stroomopwaartse migratie van vissen. Vrij afstromende rivieren zorgen ook voor het belangrijk herstel van sedimenttransport en dus voor hydromorfologisch herstel en zijn daarom ook gunstiger voor het herstel van aquatische flora en fauna. Vooral de migratie van echte trekvissen (= diadrome vissen) – die tussen de Noordzee en de rivieren migreren en omgekeerd (vb. paling, bot, enz.) – kan negatief beïnvloed worden in verstuwde rivieren door een verminderde stroomsnelheid. Bot en paling worden reeds regelmatig gevangen op de Dender. Bot trekt voorlopig op tot in Dendermonde, paling wordt langsheen de volledige Dender gevangen tot in Geraardsbergen.

Met oog op andere randvoorwaarden en belangen heeft DVW er voor gekozen om enkel in Teralfene de stuw te verwijderen. Op alle andere locaties blijven de bestaande stuwsluizen behouden en worden voorzien van een vispassage naast de stuwen.

### 4.1 Mogelijke types

Voor de nieuwe vispassages op de Dender worden de volgende types overwogen:

- Nevengeul (semi-natuurlijk);
- Bekkentrap (V-vormige drempels);
- Vertical slot.

Tabel 15 geeft een overzicht van de algemene voor- en of nadelen van elk type (deels op basis van AMINAL, 2005).

Voor elk van de bovengenoemde types kan in principe een ontwerp worden voorgesteld dat voldoet aan de passeerbaarheidscriteria, maar bij middelgrote regenrivieren als de Dender dient ook rekening gehouden te worden met de verhouding tussen de beschikbare afvoer op de rivier en het basisdebiet door de vispassage. Aan opwaartse zijde van de vispassage wordt namelijk een automatisch gestuurde afsluitconstructie voorzien. Deze afsluitconstructie zal op basis van metingen automatisch sluiten wanneer een te laag opwaarts waterpeil wordt gemeten, met het oog op o.a. scheepvaart. Merk daarbij op dat klimaatverandering het risico op het vaker voorkomen van (extreem) drogere periodes met zeer lage afvoeren mogelijk nog zal versterken.

Met oog op het maximaal toelaatbare basisdebiet van de vispassage speelt de ondergrens voor de periode van optimale werking daarom een belangrijke rol (zie 2.2). Het basisdebiet wordt vanuit het bovengenoemde oogpunt best zo laag mogelijk gehouden en is in ieder geval niet hoger dan de  $Q_{90\%}$ -waarde bij streefpeilen. In het geval van de Dender is de  $Q_{90\%}$  op jaarbasis circa 1 tot 1,4 m<sup>3</sup>/s en kan in de zomermaanden terugvallen naar circa 0,7 tot 0,9 m<sup>3</sup>/s (zie Tabel 13).

In de volgende paragrafen wordt voor de drie voorgestelde types daarom onderzocht hoe groot het basisdebiet van de vispassage zal zijn uitgaande van gelijke passeerbaarheidscriteria.

Tabel 15 – Algemene voor- en nadelen van de onderzochte vispassagetypes

Type	Voordelen	Nadelen
Semi-natuurlijke nevengeul	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ meest natuurlijke oplossing</li> <li>+ gevarieerd stroompatroon</li> <li>+ meerwaarde voor stroomminnende planten en dieren</li> <li>+ eenvoudig (en dus goedkoper) uit te voeren</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- groot ruimtebeslag</li> <li>- gevoelig voor peilfluctuaties</li> <li>- groot basisdebiet</li> <li>- gevoelig voor erosie</li> </ul>
Bekkentrap met V-vormige drempels	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ natuurlijk ogende oplossing</li> <li>+ gevarieerd stroompatroon</li> <li>+ kan een ecologische meerwaarde vormen</li> <li>+ bekkens vormen rustzones</li> <li>+ bij lage debieten of sluiten blijft er water in de bekkens</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- gevoelig voor peilfluctuaties</li> <li>- groot basisdebiet</li> <li>- drempels kunnen voor bodemdieren en slechte zwemmers een hindernis blijven</li> <li>- nauwkeurige aanleg van de stenen (!) drempels nodig</li> </ul>
Vertical slot	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ relatief laag basisdebiet</li> <li>+ weinig gevoelig aan peilfluctuaties</li> <li>+ relatief weinig ruimtebeslag</li> <li>+ migratie mogelijk over de gehele waterkolom</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- meer technische oplossing</li> <li>- gevoeliger voor verstopping door drijfvuil</li> <li>- minder ecologische meerwaarde in passage zelf</li> <li>- complexere (en dus duurdere) uitvoering</li> </ul>

## 4.2 Bepaling basisdebiet

### 4.2.1 Randvoorwaarden

De passerbaarheidscriteria bestaan uit de volgende minimale dimensies (voor de toelichting bij deze criteria wordt verwezen naar paragraaf 2.3):

- minimale breedte over korte afstand: 0,50 m;
- minimale diepte over korte afstand: 0,50 m;
- minimale diepte over langere afstand in nevengeulen (cf. ‘kleinere waterlopen’): 0,5-1 m;
- minimale diepte over langere afstand in bekkenpassages: 1-1,5 m.

Voor de nevengeul geldt dat de gemiddelde snelheid over de volledige lengte van de passage niet hoger mag komen dan 0,5 m/s (kruissnelheid). Voor de bekkenpassages (bekkentrap en vertical slot) geldt dat de gemiddelde stroomsnelheid boven de drempels of in de sloten niet hoger mag komen dan 1 tot 1,5 m/s (sprintsnelheid).

De maximale stroomsnelheid wordt bij bekkenpassages bepaald door het verval per bekken ( $dh$ ). Deze maximale stroomsnelheid ten gevolge van een verval kan als volgt berekend worden (Larinier, 2002b):

$$V_{max} = \sqrt{2g \cdot dh} \quad [1]$$

Met:

$V_{max}$ =	Maximale stroomsnelheid in de sectie	[m/s]
$g$ =	Valversnelling (9,81)	[m/s <sup>2</sup> ]
$dh$ =	Verval over de drempel ( $dh = h_1 - h_2$ )	[m]

Op basis van deze formule zou het maximaal toelaatbare verval per bekken tussen de circa 5 à 11 cm liggen. Hierbij wordt opgemerkt dat dit een schatting is zonder rekening te houden met energieverliezen (opgenomen in de debietscoëfficiënt) ten gevolge van de vormgeving en ruwheid van de drempel of het slot. Daarnaast wordt bij het toelaatbare verval per bekken best rekening gehouden met de invloed van peilfluctuaties en wordt dus best niet de bovengrens van het toelaatbare verval (bij streefpeilen) gezocht. Coenen *et al.* (2013) adviseren een maximaal verval van 8 cm. Naar passeerbaarheid toe geniet de laagste waarde uiteraard de voorkeur. Echter het benodigd aantal bekkens ( $N$ ) om het verval over een stuwsluiscomplex te overwinnen is dan het grootst waardoor de vispassages ook relatief lang worden (wat de kostprijs doet stijgen). Gekozen wordt daarom te zoeken naar een optimum tussen de twee criteria.

Om in deze studie de hydraulische vergelijking tussen een bekkentrap en vertical slot te kunnen maken, wordt rekening gehouden met het verschil in stroomsnelheidsverdeling. Een bekkentrap heeft in verhouding namelijk meer delen in de dwarssectie waar stroomsnelheden lager liggen dan de gemiddelde stroomsnelheid (vooral aan de ondiepe zijanten), wat zich in de berekeningen vertaalt in een lagere debietscoëfficiënt. Het verval per bekken mag daarom groter zijn dan voor een vertical slot-vispassage. Voor het vergelijk in deze studie worden de volgende vervallen per bekken en per vispassage type toegepast:

- bekkentrap: **dh = 10 cm**;
- vertical slot: **dh = 9 cm**.



Rivierprik



Driedoornige stekelbaars

Figuur 13 – Enkele doelsoorten (foto's: Rollin Verlinde/Vilda)

#### 4.2.2 Nevengeul

Het debiet door een nevengeul en bijhorende stroomsnelheid wordt hier bepaald door een eenparige beweging te veronderstellen, *i.e.* het hydraulisch verhang is gelijk aan het bodemverhang. Het debiet door de nevengeul kan dan berekend worden aan de hand van een wrijvingsformule, bv. de formule van Manning:

$$Q = \frac{1}{n} \cdot A \cdot R^{2/3} \cdot \sqrt{S_0} \quad [2]$$

Met:

Q	=	Debiet door nevengeul	[m <sup>3</sup> /s]
A	=	Natte oppervlakte	[m <sup>2</sup> ]
R	=	Hydraulische straal	[m]
S <sub>0</sub>	=	Langshelling (bodemverhang)	[m/m]
n	=	Manning-coëfficiënt	[s/m <sup>1/3</sup> ]

De Manning-coëfficiënt is een maat voor de ruwheid van de geul, hoe hoger de ruwheid hoe kleiner het debiet, of hoe groter het (hydraulisch) verhang moet zijn om een bepaald debiet door de geul te transporteren. De coëfficiënt geeft een soort equivalente ruwheid weer van de geul, rekening houdend met bochten, lokale oneffenheden in de bodem, versmallingen en verbredingen etc. Bij de keuze van een geschikte waarde moet dus niet enkel naar het bodemmateriaal gekeken worden maar naar de geul in zijn geheel. De waarden voor de Manning-coëfficiënt in AMINAL (2005), overgenomen uit Chow (1959), zijn 0,075 à 0,15 s/m<sup>1/3</sup>, wat volgens de gehanteerde tabel enkel optreedt voor een situatie met “heel veel kruidachtige vegetatie, grote diepten of vloedgeulen met zware bebossing en kreupelhout”. De gemiddelde waarde voor deze situatie wordt door Chow (1959) gelegd op 0,10 s/m<sup>1/3</sup>. Op basis van schaalmodelproeven van nevengeulen vonden Meersschant *et al.* (1998), een bereik van n = 0,06 à 0,10 s/m<sup>1/3</sup>. Dit bereik wordt geschikt geacht voor deze eerste inschatting.

Naast de ruwheid is ook de lengte van de nevengeul ook van belang. Een langere nevengeul resulteert in een flauwere langshelling S<sub>0</sub> en dus een lager debiet. Hierbij worden de waarden voor de langshelling S<sub>0</sub> = 2,5‰, 5‰ en 10‰ genomen, wat voor een verval van 1 m overeenkomt met een lengte van de nevengeul van respectievelijk 400 m, 200 m, en 100 m.

Ten slotte moet een keuze gemaakt worden voor de dwarsdoorsnede. Na enkele eerste berekeningen, werd een trapeziumvormige doorsnede met een bodembreedte b = 2 m en taludhellingen 8:4 als geschikt bevonden om de vergelijking te maken met de andere voorgestelde types. Een smallere bodembreedte is in theorie mogelijk, maar men moet er rekening mee houden dat, om de hierboven vermelde ruwheid te kunnen bekomen, ruwheidselementen zoals stoorstenen, rivierhout of vegetatie noodzakelijk zijn. Die ruwheidselementen inbrengen in een smalle nevengeul is praktisch niet mogelijk. Voor een hoofdmigratieroute is een bodembreedte van 2 m al relatief smal.

De minimale waterdiepte in de nevengeul moet voldoen aan de voorwaarden voor langere afstand, opgesteld in paragraaf 4.2.1, zijnde 0,5-1 m. Voor de berekeningen hier wordt een waterdiepte h = 0,7 m vooropgesteld, wat leidt tot de ondergrens van de minimale diepte bij een peildaling van 20 cm.

Tabel 16 geeft een indicatie van de debieten bij verschillende langshellingen en ruwheden, bij een fluctuatie van de waterdiepte van +/- 0,30 m. Omwille van de lengte van de nevengeul zullen waterpeilfluctuaties op en afwaarts zich niet over de hele geul doorzetten, maar zal er zich een ander type verhanglijnen instellen. De hoogte van eenparige beweging zal normaal gezien wel bereikt worden naar het opwaartse einde toe (in de veronderstelling van subkritische stroming en afwaarts bepaalde verhanglijnen). Voor de eenvoud wordt hier abstractie gemaakt van deze effecten en wordt een peilfluctuatie doorvertaald in een dieptefluctuatie, net als bij de andere types. Figuur 14 geeft een indicatie van de mogelijke invloed van de variatie in ruwheid en langshelling.

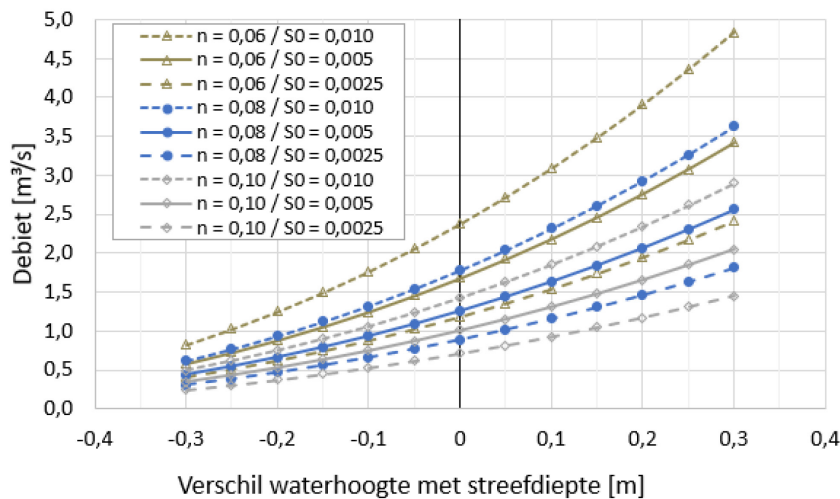
Tabel 16 – Indicatie debiet nevengeul bij fluctuatie van het opwaarts waterpeil, voor een bodembreedte van 2 m, taludhelling = 8:4

<b>S<sub>0</sub> = 2,5‰</b>												
	<b>beschrijving</b>	<b>eenh.</b>	<b>symp.</b>									
	verschil t.o.v. streefpeil	[m]	<b>dH<sub>o</sub></b>	<b>-0,30</b>	<b>-0,20</b>	<b>-0,10</b>	<b>-0,05</b>	<b>0,00</b>	<b>0,05</b>	<b>0,10</b>	<b>0,20</b>	<b>0,30</b>
	waterdiepte	[m]		0,40	0,50	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,90	1,00
<b>n</b> <b>[s/m<sup>1/3</sup>]</b>												
<b>0,10</b>	debiet	[m <sup>3</sup> /s]	Q	0,25	0,38	0,53	0,62	0,71	0,82	0,93	1,17	1,45
	gem. stroomsnelheid	[m/s]	V <sub>g</sub>	0,22	0,25	0,28	0,29	0,30	0,31	0,32	0,34	0,36
<b>0,08</b>	debiet	[m <sup>3</sup> /s]	Q	0,31	0,47	0,66	0,77	0,89	1,02	1,16	1,47	1,81
	gem. stroomsnelheid	[m/s]	V <sub>g</sub>	0,28	0,31	0,34	0,36	0,37	0,39	0,40	0,43	0,45
<b>0,06</b>	debiet	[m <sup>3</sup> /s]	Q	0,41	0,63	0,88	1,03	1,19	1,36	1,54	1,95	2,42
	gem. stroomsnelheid	[m/s]	V <sub>g</sub>	0,37	0,42	0,46	0,48	0,50	0,52	0,54	0,57	0,60
<b>S<sub>0</sub> = 5,0‰</b>												
	<b>beschrijving</b>	<b>eenh.</b>	<b>symp.</b>									
	verschil t.o.v. streefpeil	[m]	<b>dH<sub>o</sub></b>	<b>-0,30</b>	<b>-0,20</b>	<b>-0,10</b>	<b>-0,05</b>	<b>0,00</b>	<b>0,05</b>	<b>0,10</b>	<b>0,20</b>	<b>0,30</b>
	waterdiepte	[m]		0,40	0,50	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,90	1,00
<b>n</b> <b>[s/m<sup>1/3</sup>]</b>												
<b>0,10</b>	debiet	[m <sup>3</sup> /s]	Q	0,35	0,53	0,75	0,87	1,01	1,15	1,31	1,66	2,05
	gem. stroomsnelheid	[m/s]	V <sub>g</sub>	0,31	0,35	0,39	0,41	0,42	0,44	0,46	0,48	0,51
<b>0,08</b>	debiet	[m <sup>3</sup> /s]	Q	0,44	0,66	0,94	1,09	1,26	1,44	1,64	2,07	2,57
	gem. stroomsnelheid	[m/s]	V <sub>g</sub>	0,39	0,44	0,49	0,51	0,53	0,55	0,57	0,61	0,64
<b>0,06</b>	debiet	[m <sup>3</sup> /s]	Q	0,59	0,88	1,25	1,46	1,68	1,92	2,18	2,76	3,42
	gem. stroomsnelheid	[m/s]	V <sub>g</sub>	0,52	0,59	0,62	0,68	0,71	0,73	0,76	0,81	0,86



Tabel 17 (vervolg) – Indicatie debiet nevengeul bij fluctuatie van het opwaarts waterpeil, voor een bodembreedte van 2 m, taludhelling = 8:4

S <sub>0</sub> = 10,0‰												
	beschrijving	eenh.	symp.									
	verschil t.o.v. streefpeil	[m]	dH <sub>o</sub>	-0,30	-0,20	-0,10	-0,05	0,00	0,05	0,10	0,20	0,30
	waterdiepte	[m]		0,40	0,50	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,90	1,00
<b>n</b> [s/m <sup>1/3</sup> ]												
<b>0,10</b>	debiet	[m <sup>3</sup> /s]	Q	0,50	0,75	1,06	1,24	1,43	1,63	1,85	2,34	2,90
	gem. stroomsnelheid	[m/s]	V <sub>g</sub>	0,44	0,50	0,55	0,58	0,60	0,62	0,64	0,69	0,73
<b>0,08</b>	debiet	[m <sup>3</sup> /s]	Q	0,62	0,94	1,32	1,54	1,78	2,04	2,32	2,93	3,63
	gem. stroomsnelheid	[m/s]	V <sub>g</sub>	0,55	0,63	0,69	0,72	0,75	0,78	0,80	0,86	0,91
<b>0,06</b>	debiet	[m <sup>3</sup> /s]	Q	0,83	1,25	1,77	2,06	2,38	2,72	3,09	3,91	4,84
	gem. stroomsnelheid	[m/s]	V <sub>g</sub>	0,74	0,83	0,92	0,96	1,00	1,04	1,07	1,14	1,21



Figuur 14 – Indicatie debiet nevengeul op basis van fluctuaties in opwaarts waterpeil, voor een bodembreedte b = 2 m en dwarsstalud = 8:4. De waterhoogte bij streefdiepte = 0,7 m

Bij streefpeil wordt het basisdebiet geschat tussen 0,7 à 2,5 m<sup>3</sup>/s, afhankelijk van de langshelling en de uiteindelijke ruwheid. De vispassage dient optimaal te kunnen werken bij een peilfluctuatie van +/- 0,20 m. Bij een peildaling tot 20 cm onder streefpeil zakt het basisdebiet naar circa 0,4 tot 1,3 m<sup>3</sup>/s en bij een peilstijging tot 20 cm boven streefpeil stijgt het debiet tot circa 1,2 tot 3,9 m<sup>3</sup>/s. Het vispassagedebiet varieert dus sterk binnen de verwachte operationele omstandigheden.

Uit de resultaten kan bovendien geconcludeerd worden dat de stroomsnelheid in veel gevallen groter wordt dan de maximale stroomsnelheid voor langere afstand (i.c. 0,5 m/s, zie paragraaf 2.3.1). Bij een langshelling van 10‰ wordt de stroomsnelheid zelfs bij elke beschouwde waterdiepte overschreden (buiten de daling van 30 cm, maar dan is de geul in principe te ondiep). Zelfs bij een langshelling van 5‰ is de snelheid in de meeste gevallen te groot. Enkel bij een helling van 2,5‰ en de grootste beschouwde ruwheid blijven de stroomsnelheden onder de limietwaarde.

### 4.2.3 Bekkentrap

Het meest toegepaste type bekkentrap is met V-vormige drempels. Vaak worden deze uitgevoerd in breuksteen, waardoor deze niet alleen in dwarsrichting een V-vorm hebben, maar ook in stroomrichting een driehoekig overlaatvorm met op- en afwaarts talud. Dit type drempels worden in deze studie 'driehoekige V-vormige overlaten' genoemd. Figuur 15 toont de geometrische vorm van dit type. Het debiet over een driehoekige V-vormige drempel en de gemiddelde stroomsnelheden die daarbij optreden in de overlaat kunnen berekend worden door middel van de volgende formules (Bos, 1989):

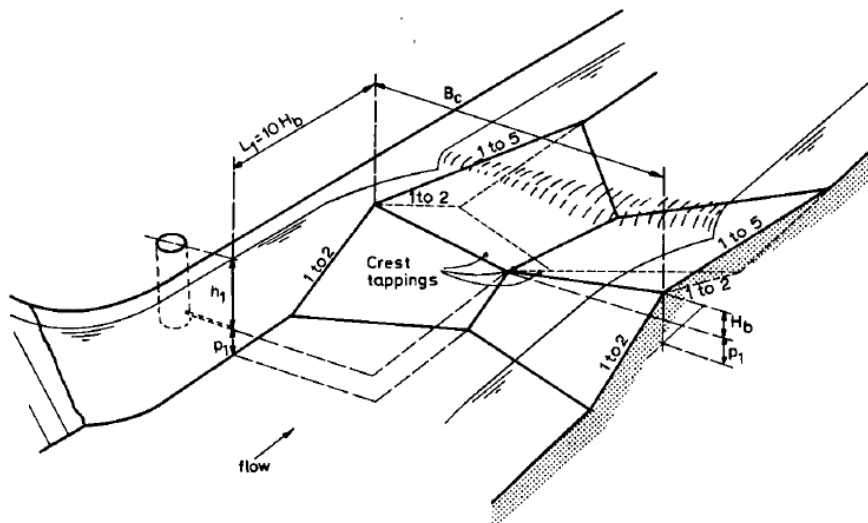
$$Q_o = \frac{4}{15} \cdot C_d \cdot C_v \cdot f \cdot \frac{B_c}{H_b} \cdot \sqrt{2g} \cdot h_e^{2.5} \quad [3]$$

$$V_{gem} = \frac{Q_{flat}}{\frac{B_c}{H_b} \cdot h_e} \quad [4]$$

Met:

$Q_o$	=	Debiet verdrongen driehoekige V-vormige overlaat	[m <sup>3</sup> /s]
$V_{gem}$	=	Gemiddelde stroomsnelheid over de overlaat	[m/s]
$C_d \cdot C_v$	=	Product van debiets- en snelheidscoëfficiënt	[-]
$f$	=	Reductiefactor voor verdrinking	[-]
$B_c$	=	Breedte van de driehoek	[m]
$H_b$	=	Hoogte van de driehoek ter plaatse van de drempel (t.o.v. midden V)	[m]
$h_e$	=	Effectieve waterhoogte ter plaatse van de drempel (t.o.v. midden V)	[m]

De debiets- en snelheidscoëfficiënten zijn vooral afhankelijk van het waterpeilverschil opwaarts en afwaarts van de overlaat, de waterdiepte boven de drempel, de geometrische vorm (zowel in dwars- als in langsrichting), en materiaal van de overlaat. Bos (1989) geeft een aantal curves die de variatie van de coëfficiënten weergeeft in functie van de geometrie en de verdrinkingsgraad (verhouding van afwaartse en opwaartse waterhoogte). Dit resulteert in een waarde voor  $C_d \cdot C_v$  van rond de 0,7. Uit de resultaten van een meetcampagne op de vispassage van Kerkhove (Bovenschede) bleek de waarde voor de coëfficiënt  $C_d \cdot C_v$  op die locatie te schommelen tussen 0,6 à 0,7 (Visser *et al.*, 2022). Om de invloed van deze factor mee te nemen worden ook berekeningen uitgevoerd bij 0,6 en 0,8.



Figuur 15 – Schematische weergave driehoekige V-vormige overlaat met maatgevende parameters (Bos, 1989)

Bos (1989) geeft eveneens grafieken voor de reductiefactor voor verdrinking van een driehoekige V-vormige overlaat. Meer algemeen verwijst Ackers *et al.* (1978) echter naar de Villemonte-vergelijking (1947), waarbij de reductiefactor weergegeven wordt als verhouding tussen debiet bij volkomen en onvolkomen overlaat:

$$Q_s = Q_v \left[ 1 - \left( \frac{h_2}{h_1} \right)^m \right]^{0,385} \quad [5]$$

Met:

$Q_s$	=	Debiet (onvolkomen overlaat)	[m <sup>3</sup> /s]
$Q_v$	=	Vrij afstromend debiet (volkomen overlaat)	[m <sup>3</sup> /s]
$h_1$	=	Waterhoogte opwaarts van de drempel (t.o.v. drempelpeil in midden V)	[m]
$h_2$	=	Waterhoogte afwaarts van de drempel (gemeten t.o.v. drempelpeil in midden V)	[m]
$m$	=	Exponent voor invloed geometrie (rechthoekig = 1.5; driehoekig = 2.5)	[-]

In principe is formule [5] enkel afgeleid voor scherpe overlaten en tot een verdrinkingsgraad  $S = h_2/h_1 = 0,9$  (Villemonte, 1947). Bovendien is het onzeker of de exponent 0,385 ook voor driehoekige V-vormige drempels kan gebruikt worden. Echter invullen van enkele typerende waarden voor de verdrinkingsgraad (0,8 à 0,9) geeft in dit geval waarden voor  $f = 0,5$  à  $0,7$ , wat overeenstemt met de range aan waarden in de grafiek van Bos (1989). De formule van Villemonte wordt dus als voldoende nauwkeurig beschouwd voor de hier uitgevoerde berekeningen.

De drempelvorm wordt bepaald door de het vispassagedebiet in relatie tot de benodigde doorzweemdiepte en -breedte. Uit theoretisch en experimenteel onderzoek blijkt dat het dwarstalud van een V-vormige drempel bij gemiddeld tot grotere ontwerpafvoeren 1:7 moet bedragen, wat de meest gunstige stromingscondities oplevert (Boiten, 1989; Van Poucke *et al.*, 1994). Wanneer het debiet kleiner wordt dan 0,15 m<sup>3</sup>/s, moet een steilere dwarshelling gekozen worden, maar aangezien het hier een vispassage in een hoofdwaterloop betreft, wordt een helling 1:7 en een minimale waterdiepte van 0,5 m in het diepste punt van de V aangehouden. Coenen *et al.* (2013) bevelen een verspringing van het diepste punt van de 'V' in opeenvolgende drempels aan, om zo een meer natuurlijk stromingspatroon te verkrijgen. Deze aanbeveling wordt hier gevolgd wat resulteert in een asymmetrische V-vorm met dwarshellingen 1:4 en 1:10.

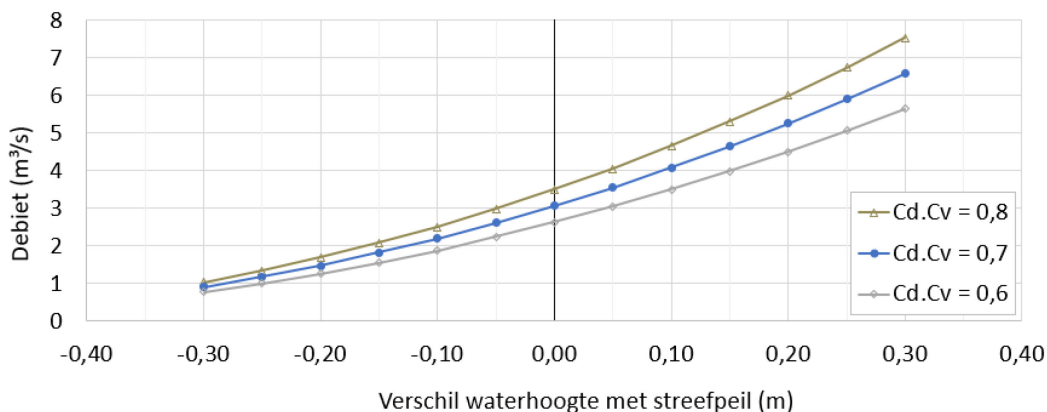
Zoals eerder aangegeven dient de minimale waterdiepte over een drempel 0,50 m te zijn om dezelfde passeerbaarheidscriteria toe te passen bij alle vispassage types. Rekening houdend met peilfluctuaties van 20 cm ten opzichte van waterdiepte bij streefpeil (positief en negatief) geeft dit een waterdiepte boven de drempel bij streefpeilen van  $h_1 = 0,70$  m. Daarnaast is een waterdiepte in de bekkens van 1-1,5 m gewenst en bij eventuele sluiting dient minimaal 0,5 m water in de bekkens te blijven staan zodat vissen niet sterven. Dit resulteert in een drempelhoogte (= diepste punt V t.o.v. de bekkenbodem aan opwaartse kant) van  $p_1 = 0,5$  m geeft. Bij streefpeilsituaties bedraagt de waterdiepte in de bekkens dan 1,2 m. De langshelling van de drempel aan opwaartse zijde wordt op 1:2 gelegd, aan afwaartse zijde op 1:2-1:5 waarbij flauwere hellingen in minder turbulentie resulteren.

Tabel 18 geeft een indicatie van de variatie van het debiet bij toepassing van formules [3] en [5] bij een fluctuatie van het opwaartse waterpeil van +/- 0,30 m, gegeven de bovengenoemde dimensionering. Figuur 16 geeft tevens een indicatie van de mogelijke invloed van de variatie in debietscoëfficiënt.

Bij streefpeil wordt het basisdebiet geschat tussen 2,6 en 3,5 m<sup>3</sup>/s. De vispassage dient optimaal te kunnen werken bij een peilfluctuatie van +/- 0,20 m. Bij een peildaling tot 0,20 m onder streefpeil zakt het basisdebiet naar circa 1,3 tot 1,7 m<sup>3</sup>/s. Bij een peilstijging tot 0,20 m boven streefpeil stijgt het debiet tot circa 4,5 tot 6 m<sup>3</sup>/s. Het vispassagedebiet varieert dus relatief sterk binnen de verwachte operationele omstandigheden.

Tabel 18 – Indicatie debiet bekkentrap met driehoekige V-vormige drempels bij fluctuaties van het opwaartse waterpeil, voor drempelhoogte  $p_1 = 0,5$  m, dwarslud = 1:7 en verval per bekken  $dh = 10$  cm

	beschrijving	eenh.	symp.									
	verschil t.o.v. streefpeil	[m]	$dh_0$	-0,30	-0,20	-0,10	-0,05	0,00	0,05	0,10	0,20	0,30
	opwaartse waterdiepte t.o.v. V	[m]	$h_1$	0,40	0,50	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,90	1,00
	afwaartse waterdiepte t.o.v. V	[m]	$h_2$	0,30	0,40	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,80	0,90
	verdrinkingsgraad	[-]	S	0,75	0,80	0,83	0,85	0,86	0,87	0,88	0,89	0,90
$C_d \cdot C_v$ [-]												
0,60	debiet	[m <sup>3</sup> /s]	Q	0,78	1,26	1,88	2,23	2,62	3,04	3,50	4,51	5,65
	gem. stroomsnelheid	[m/s]	$V_{gem}$	0,69	0,72	0,75	0,76	0,76	0,77	0,78	0,79	0,81
0,70	debiet	[m <sup>3</sup> /s]	Q	0,91	1,48	2,19	2,61	3,06	3,55	4,08	5,26	6,59
	gem. stroomsnelheid	[m/s]	$V_{gem}$	0,81	0,84	0,86	0,87	0,88	0,90	0,91	0,93	0,94
0,80	debiet	[m <sup>3</sup> /s]	Q	1,04	1,69	2,51	2,98	3,50	4,06	4,66	6,01	7,53
	gem. stroomsnelheid	[m/s]	$V_{gem}$	0,92	0,96	0,99	1,01	1,02	1,03	1,04	1,06	1,08

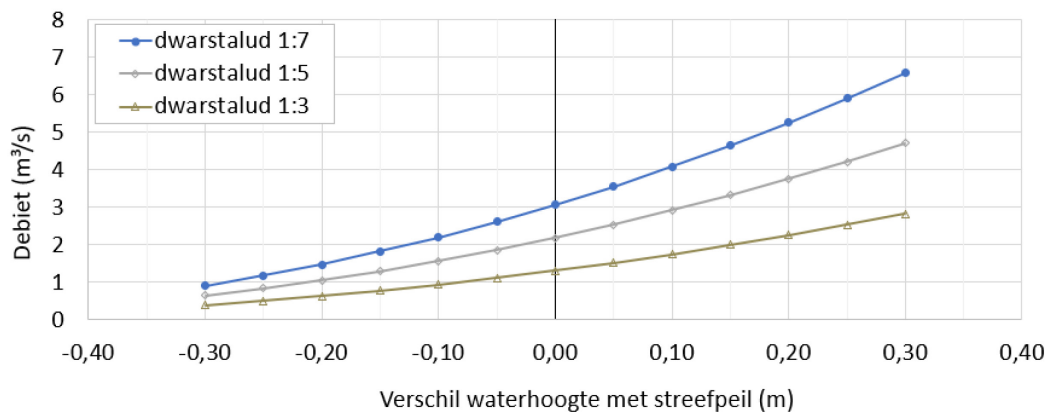

 Figuur 16 – Indicatie debiet bekkentrap met driehoekige V-vormige drempels bij fluctuaties van het opwaartse waterpeil, voor drempelhoogte  $p_1 = 0,5$  m, dwarslud = 1:7 en verval per bekken  $dh = 10$  cm. De opwaartse waterhoogte bij streefpeil = 0,7 m

Uit de resultaten blijkt dat een V-vormige bekkentrap met een helling van 1:7 en een minimale doorzweemdpte van 0,5 m leidt tot relatief hoge vispassagedebieten. Om dit basisdebiet (enigszins) te verlagen zou kunnen worden gedacht aan (een combinatie van) de volgende aanpassingen:

- Kiezen voor een lager ontwerpcriterium voor minimale doorzweemdpte;
- Steilere drempelhelling (V-vorm) toepassen;
- Aanpassen/verruwen drempelontwerp.

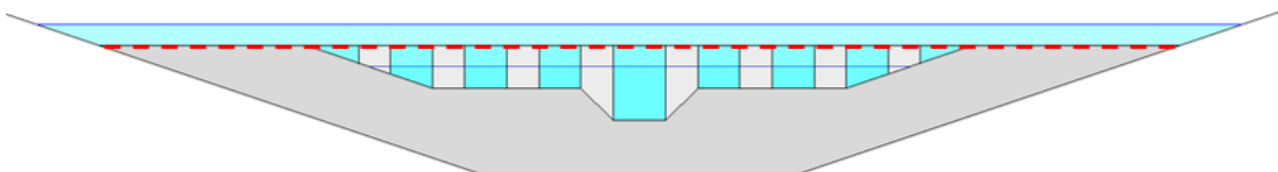
In kleinere waterlopen wordt een minimale diepte van 0,20 m voorgesteld (AMINAL 2005, Coenen *et al.*, 2013). Uitgaande van de rekenregels uit DWA (2014) is voor de grootste doelsoorten op de Dender echter een minimale doorzwemdiepte van 0,5 m vereist over korte afstand. De diepte boven de drempel bij streefpeil verlagen naar deze waarde zou betekenen dat de passeerbaarheid voor grotere soorten in het gedrang komt bij peildalingen. Een ander ontwerpcriterium toepassen dan voor de overige vispassagetypes zou bovendien geen correcte vergelijking geven. Met andere woorden er kan geen lager ontwerpcriterium voor de minimale doorzwemdiepte worden toegepast.

Figuur 17 toont de invloed op het vispassagedebiet bij het toepassen van een steiler dwarstalud (1:5 en 1:3) uitgaande van dezelfde opwaartse waterdiepte als toegepast bij de eerdere berekeningen bij de standaardwaarde voor het dwarstalud van 1:7 en een gemiddelde debietcoëfficiënt  $C_d.C_v$  van 0,7. Hieruit blijkt dat bij een dwarstalud van 1:3 het debiet bij streefpeil wel kan gereduceerd worden tot 1,31 m<sup>3</sup>/s, maar dat het nog steeds kan oplopen tot 2 m<sup>3</sup>/s wanneer het opwaarts waterpeil met 0,20 m zou stijgen.



Figuur 17 – Indicatie debiet bekkentrap met driehoekige V-vormige drempels bij fluctuaties van het opwaartse waterpeil, voor drempelhoogte  $p_1 = 0,5$  m, debietscoëfficiënt  $C_d.C_v = 0,7$  en verval per bekken  $dh = 10$  cm. De opwaartse waterhoogte bij streefpeil = 0,7 m

Ten slotte kan ook overwogen worden om het drempelontwerp aan te passen, door bijv. de drempelvorm te wijzigen en/of het toepassen van een slot of sloten (zie schets in Figuur 18). Wanneer de ontwerpcriteria ten aanzien van minimale doorzwemdiepte (en breedte) worden toegepast, blijkt echter dat er al minimaal één slot aanwezig zal moeten zijn met een diepte bij streefpeil van 0,70 m (en een breedte van 0,50 m). Wanneer we vervolgens vergelijken met de natte sectie van een vertical slot-vispassage in paragraaf 4.2.4 (die een slotdiepte van 1,5 m heeft) dan blijkt dat er nog maar weinig natte sectie overblijft om het ondieper stuk (of de ondiepere sloten) aan weerszijden van de drempel te voorzien. Met andere woorden zowel het hoofdslot als de zijsloten zouden suboptimale passeerbaarheid bieden, en het zou in dat geval beter zijn om al het water door één slot te sturen. Daarnaast is het toepassen van meerdere ondiepere sloten relatief gevoelig voor opstopping. Het aanpassen van het drempelontwerp wordt dan ook als weinig kansrijk gezien.



Figuur 18 – Schets alternatief drempelontwerpen bekkentrap

## 4.2.4 Vertical slot

Het debiet doorheen een vertical slot-vispassage en de gemiddelde stroomsnelheid die daarbij optreedt in de sloten kunnen berekend worden door middel van de volgende formules (Larinier, 2002b):

$$Q_{slot} = C_d \cdot b_0 \cdot h_1 \cdot \sqrt{2g \cdot dh} \quad [6]$$

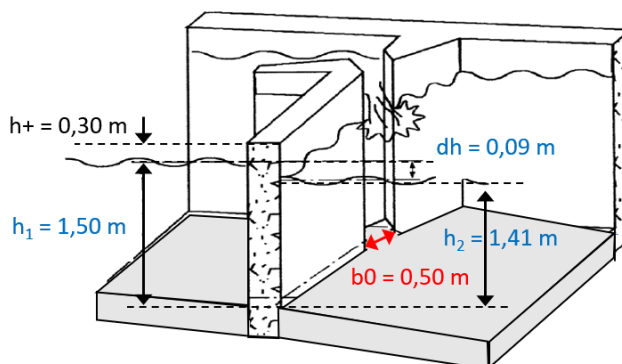
$$V_{gem} = C_d \cdot \sqrt{2g \cdot dh} = C_d \cdot V_{max} \quad [7]$$

Met:

$Q_{slot}$	=	Debiet door vertical slot-vispassage	$[m^3/s]$
$V_{gem}$	=	Gemiddelde stroomsnelheid door het slot	$[m/s]$
$C_d$	=	Debietscoëfficiënt	$[-]$
$b_0$	=	Slotbreedte	$[m]$
$h_1$	=	Waterhoogte opwaarts van het slot	$[m]$
$h_2$	=	Waterhoogte afwaarts van het slot	$[m]$

Op basis van eerder onderzoek wordt voor de debietscoëfficiënt een bereik gegeven van 0,85 tot 0,65 (Armstrong *et al.*, 2010; Larinier, 2002b). Deze range wordt vooral bepaald door de vormgeving van het slot: 0,85 voor een 'glad' rond slot en 0,65 voor een 'ruw' hoekig slot. Ook de configuratie van het slot (hoek en plaats) kunnen de debietscoëfficiënt beïnvloeden. In de berekeningen wordt uitgegaan van de gemiddelde waarde van 0,75, maar om een inschatting te maken van de invloed van de debietcoëfficiënt worden ook de vermelde ondergrens en bovengrens gehanteerd.

Op basis van het criterium voor minimale breedte, wordt de slotbreedte gekozen op  $b_0 = 0,50$  m. De slotdiepte bij streefpeil wordt gekozen aan de bovengrens van de minimale bekkendiepte van  $h_1 = 1,5$  m. Zie Figuur 19 voor een schetsmatige weergave van de maatgevende parameters.



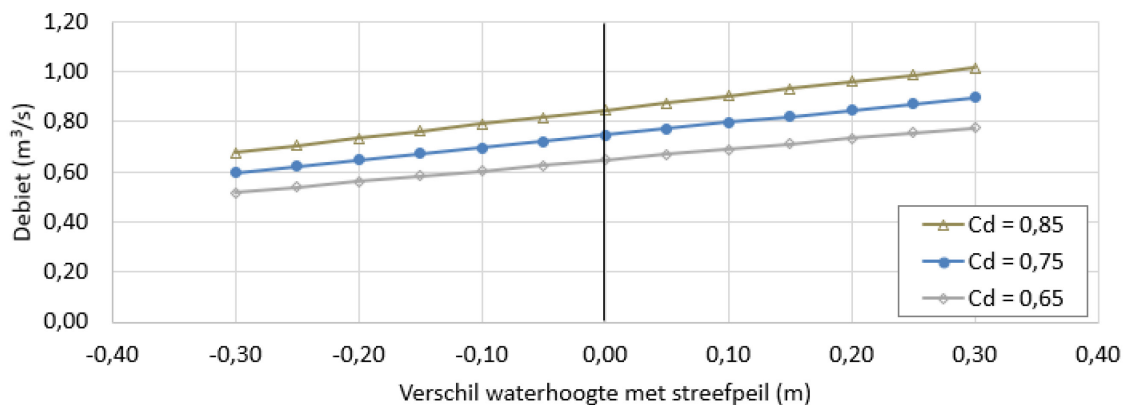
Figuur 19 – Schematische weergave slotwand met maatgevende parameters

Tabel 19 geeft een indicatie van de variatie van het debiet bij toepassing van formule [6] bij een fluctuatie van het opwaartse waterpeil van +/- 0,30 m, gegeven de bovengenoemde dimensionering. Figuur 20 geeft tevens een indicatie van de mogelijke invloed van de variatie in debietscoëfficiënt.

Bij streefpeil wordt het basisdebiet geschat tussen 0,7 en 0,9 m<sup>3</sup>/s. Bij een peildaling tot 0,20 m onder streefpeil zakt het basisdebiet naar circa 0,6 tot 0,7 m<sup>3</sup>/s, en bij een peilstijging tot 0,20 m boven streefpeil stijgt het debiet tot circa 0,7 tot 1 m<sup>3</sup>/s. Het vispassagedebiet varieert dus slechts beperkt binnen de verwachte operationele omstandigheden.

Tabel 19 – Indicatie debiet vertical slot-vispassage bij fluctuatie van het opwaartse waterpeil, voor een slotbreedte  $b_0 = 0,5$  m en verval per bekken  $dh = 0,09$  m

	beschrijving	eenh.	symp.									
	verschil t.o.v. streefpeil	[m]	$dH_0$	-0,30	-0,20	-0,10	-0,05	0,00	0,05	0,10	0,20	0,30
	opwaartse waterdiepte	[m]	$h_1$	1,20	1,30	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,70	1,80
$C_d$ [-]												
0,65	debiet	[m <sup>3</sup> /s]	Q	0,52	0,56	0,60	0,63	0,65	0,67	0,69	0,73	0,78
	gem. stroomsnelheid	[m/s]	$V_g$	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86
0,75	debiet	[m <sup>3</sup> /s]	Q	0,60	0,65	0,70	0,72	0,75	0,77	0,80	0,85	0,90
	gem. stroomsnelheid	[m/s]	$V_g$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
0,85	debiet	[m <sup>3</sup> /s]	Q	0,68	0,73	0,79	0,82	0,85	0,88	0,90	0,96	1,02
	gem. stroomsnelheid	[m/s]	$V_g$	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13


 Figuur 20 – Indicatie debiet vertical slot-vispassage bij fluctuaties van het opwaartse waterpeil, voor een slotbreedte  $b_0 = 0,5$  m en verval per bekken  $dh = 0,09$  m. De opwaartse waterhoogte bij streefpeil bedraagt 1,5 m

### 4.3 Keuze type

Vlaanderen werd in 2017, 2018 en 2019 geconfronteerd met langdurige periodes van droogte. Hierdoor zagen enkele gouverneurs zich genoodzaakt om maatregelen te nemen en beperkingen op watercaptatie vanuit waterlopen op te leggen. De *“Uitwerking van een reactief afwegingskader voor prioritair watergebruik tijdens waterschaarste (VMM 2021)”* was hiervan het gevolg en werd opgemaakt in opdracht van de Vlaamse Overheid om tijdens periodes van waterschaarste weloverwogen beslissingen te kunnen nemen bij volgende twee droogteniveaus:

- Droogteniveau 1: Het watersysteem komt mogelijk onder druk met gevaar op waterschaarste voor een of meerdere sectoren en/of aan het watersysteem indien geen voorzorgsmaatregelen worden genomen. Dit niveau komt overeen met de fase “alarm”.
- Droogteniveau 2: Het watersysteem bereikt een kritiek niveau, waarbij er zich effectief waterschaarste voordoet voor een of meerdere sectoren. Dit niveau komt overeen met de fase “crisis”.

Het doel van de opdracht was om een afwegingskader op te maken dat toelaat om tijdens periodes van waterschaarste weloverwogen beslissingen te nemen. Een belangrijk luik hierbij is de afweging of en wanneer er maatregelen nodig zijn om te lage debieten en peilen in bevaarbare en onbevaarbare waterlopen te voorkomen in functie van de ecologische doelstellingen.

Het advies van INBO (INBO.A.4183) geeft voor het aspect ‘aquatische ecologie’ een beschrijving van de indicatoren met de criteria en (gebiedsgerichte) drempelwaarden voor een droogteniveau 1 en 2 en de wijze van berekening op basis van beschikbare data (meetgegevens). De in het advies voorgestelde drempelwaarden voor de grote rivieren zijn gebaseerd op het maatgevende vispassagedebiet en een zo hoog mogelijk openingspercentage door de ingebruikname van een zeker buffervolume. Door het streven naar een 100% werkingspercentage van de vispassages wordt met oog op een goede ecologische werking ook een minimale continue stroming op gestuwde rivieren gerealiseerd. Voor de peilgereguleerde gestuwde rivieren met een lager basisdebiet, zoals de Dender, wordt een  $Q_{90\%}$  als ‘hands off’ debiet voorgesteld plus de ingebruikname van het aanwezige buffervolume (Buysse *et al.*, 2021).

Voor de vispassages op de Dender heeft een vertical slot-vispassage daarom de voorkeur boven de andere types. Dit type heeft namelijk een duidelijk lager basisdebiet bij dezelfde criteria voor goede passeerbaarheid (zie Tabel 20), waardoor deze langer open kan blijven bij lage afvoeren. De vispassages krijgen namelijk allemaal een automatisch gestuurde opwaartse afsluiter. Deze afsluiter zal automatisch sluiten wanneer het opwaartse waterpeil te laag wordt bij een te lage afvoer op de rivier. Hoe hoger het basisdebiet van de vispassage, hoe sneller de vispassage in deze gevallen zal sluiten.

De Dender is een regenrivier met een relatief laag mediaan debiet voor een hoofdwaterloop ( $Q_{50\%} \approx 3 \text{ m}^3/\text{s}$ ), en een relatief hoge kans op zeer lage afvoeren ( $Q < 1 \text{ m}^3/\text{s}$ ), zie paragraaf 3.4. Met oog op de effecten van klimaatsverandering mag verwacht worden dat drogere periodes met zeer lage afvoer vaker zullen voorkomen, waardoor in het specifieke geval van de Dender een vertical slot een robuuster en meer ‘bedrijfszeker’ ontwerp is.

Tabel 20 – Schatting vispassagedebieten en risico op sluiting

Type	Debiet bij streefpeil ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Debiet bij 0,20 m daling ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Beschikbaarheid debiet doorheen tijd* (%)
Semi-natuurlijke nevengeul	0,7 à 2,5	0,4 à 1,3	80 à 95
Bekkentrap met V-vormige drempels	2,6 à 3,5	1,3 à 1,7	70 à 80
Vertical slot	0,7 à 0,9	0,6 à 0,7	95

\* Op basis van histogram historische meetreeks (zie ook Tabel 10)

Vanuit oogpunt natuurlijkheid en secundaire doelstellingen met oog op creëren van aanvullend habitat zou een semi-natuurlijke nevengeul de voorkeur hebben, maar onder normale omstandigheden is het basisdebiet van een nevengeul met voldoende breedte relatief hoog waardoor het openingspercentage lager zou zijn als de vertical slot-vispassage. Daarnaast blijkt uit ervaringen met nevengeulen op de Bovenschelde dat het risico op (ernstige) erosie relatief groot is (de vispassage te Asper is op dit moment al langere tijd gesloten vanwege ernstige erosie). Om een echte meerwaarde te kunnen zijn voor aanvullend habitat en ook het risico op erosie te verlagen zou een relatief flauw bodemverhang nodig zijn en daarmee ook zeer grote lengtes en ruimtebeslag. Maar zelfs bij een laag bodemverhang wordt nog verwacht dat erosiewerende maatregelen nodig zullen zijn op bepaalde plaatsen, zeker in bochten en/of vernauwingen/verruwingen. Om deze redenen wordt het type nevengeul niet weerhouden.



Na de nevengeul zou een bekkentrap de voorkeur hebben vanuit het oogpunt natuurlijkheid. Maar ook hier geldt dat het basisdebiet in verhouding tot vertical slot-vispassage relatief groot is waardoor het openingspercentage lager zou worden. Daarnaast is de echte ecologische meerwaarde afhankelijk van de beschikbare ruimte, en dan vooral de beschikbare bekkenlengtes. Ter plaatse van de drempels en ook over enige afstand daarna zijn namelijk erosiewerende middelen (zoals breuksteen) benodigd. Wanneer beschikbare bekkenlengtes beperkt zijn, neemt de ecologische meerwaarde daarmee (sterk) af.

Aangezien de Dender een hoofdmigratieroute is voor vissen in het Scheldestroomgebied wordt er ter plaatse van de stuwsluiscomplexen daarom eerder ingezet op een optimale passeerbaarheid en een zo hoog mogelijk openingspercentage (m.a.w. ‘snel van A naar B’ voor een zo groot mogelijk percentage van de tijd en voor zoveel mogelijk vissoorten). Dit maakt dat een vertical slot-vispassage de voorkeur heeft boven de andere types.

Een vertical slot-vispassage heeft ook het voordeel van passagemogelijkheid over de volledige diepte van de waterkolom en is minder gevoelig aan peilschommelingen als een bekkentrap. Wanneer gekozen wordt voor een relatief glad bodemsubstraat (rolstenen/ kiezels) speelt ook de meer technische uitvoering een veel minder grote rol met oog op de ‘natuurlijkheid’ van de onderwaterbodem. Uit zeer uitvoerige monitoring over meerdere jaren van een vertical slot-vispassage op de Elbe te Geesthacht (Duitsland) met soortgelijk ontwerp (relatief laag verval per bekken ( $dh < 0,10$  m), voldoende brede sloten en een glad bodemsubstraat) bleek dat vertical slot-vispassages zeer goed passeerbaar zijn voor alle doelsoorten die ook op de Dender van toepassing zijn (Adam & Bader, 2015).

Indien het natuurlijk aanzicht van de vispassage op bepaalde locaties een belangrijke ruimtelijke voorwaarde zou zijn, kan ook overwogen worden om de oevers van de vertical slot-vispassage als een oeverhelling zoals in een ‘normale’ waterloop uit te voeren, zie voorbeeld in Figuur 21. In een dergelijk ontwerp werkt de vispassage hydraulisch gezien als een vertical slot, maar heeft de aanblik van een bekkentrap.



---

Figuur 21 – 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)

---

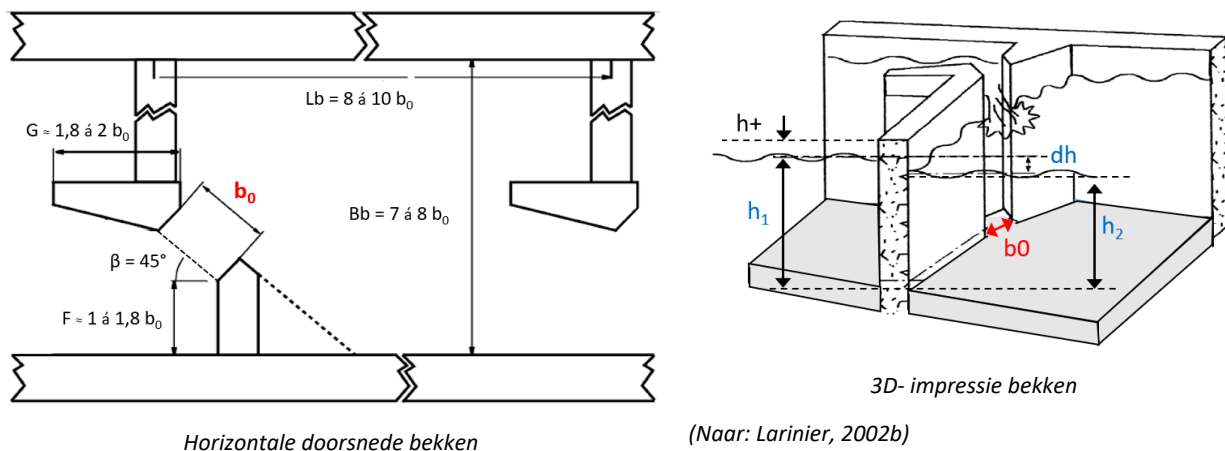
Tenslotte moet hierbij wel gewezen worden op een ogenschijnlijke tegenstrijdigheid met de criteria voor een goede attractiviteit en dan vooral het realiseren van een voldoende sterke lokstroom. Het realiseren van een lager basisdebiet zorgt namelijk wel voor een hoger openingspercentage maar bij hogere afvoeren kan dit leiden tot een te zwakke lokstroom ten opzichte van het debiet over de stuwen. Deze ogenschijnlijke tegenstrijdigheid wordt echter opgelost door de toepassing van een regelbaar 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. De benodigde grootte van het lokstroomdebiet (en daarmee het toegevoegd debiet) wordt uitgewerkt in het volgende hoofdstuk "Monding en lokstroom". Voor het ontwerp en de wijze van inbreng van het toegevoegd debiet wordt verwezen naar hoofdstuk 6.

## 4.4 Uitwerking voorkeursvariant

### 4.4.1 Dimensionering

In de vorige paragraaf bleek dat een vertical slot-vispassage de voorkeur heeft op de Dender. In deze paragraaf wordt de concrete dimensionering van dit voorkeurstype beschreven.

Figuur 22 geeft een schematisch voorbeeld van het ontwerp van de bekken en wanden van een vertical slot-vispassage. Het ontwerp van de slotwanden en bekkendimensies worden gebaseerd op resultaten van eerder uitgevoerd onderzoek uit Larinier (2002b) en Rajaratnam *et al.* (1991). In Figuur 22 zijn ook de maatgevende parameters voor het ontwerp weergegeven.



Figuur 22 – Maatgevende parameters voor dimensionering van bekken en sloten

De meest optimale slotbreedte volgt uit de minimaal benodigde breedte voor de doelsoorten op korte afstand (zie paragraaf 2.3.2), dit geeft een slotbreedte  $b_0 = 0,50 \text{ m}$ . De meest optimale slotdiepte volgt uit het optimum tussen een zo laag mogelijk debiet met oog op risico voor hoog sluitingspercentage en toch een zo groot mogelijk diepte met oog op passeerbaarheid en voorkomen predatie. Er wordt gekozen voor een slotdiepte bij streefpeil van  $h_1 = 1,5 \text{ m}$ .

Zoals aangegeven in paragraaf 4.2.1 ligt het maximaal toelaatbare verval per bekken tussen de circa 5 à 11 cm (zonder rekening te houden met energieverliezen). Aangezien een vertical slot relatief minder locaties in het doorzwemvenster heeft met stroomsnelheden lager dan de gemiddelde stroomsnelheid (lees: relatief hoge Cd-waarde,

zie Formule [17]), wordt met oog op toelaatbare stroomsnelheden het verval best niet te hoog gekozen. Ook dient rekening te worden gehouden met de effecten van peilfluctuaties (zie volgende paragraaf). Er wordt daarom voorgesteld om een verval per bekken van **dh = 0,09 m** toe te passen.

De minimaal benodigde bekkenlengte ( $L_b$ ) en bekkenbreedte ( $B_b$ ) kunnen vervolgens worden afgeleid uit de gekozen slotbreedte ( $b_0$ ) volgens de volgende vuistregels (Larinier, 2002; Rajaratnam *et al.*, 1991):

$$L_b = C_L \cdot b_0 \quad [8]$$

$$B_b = C_B \cdot b_0 \quad [9]$$

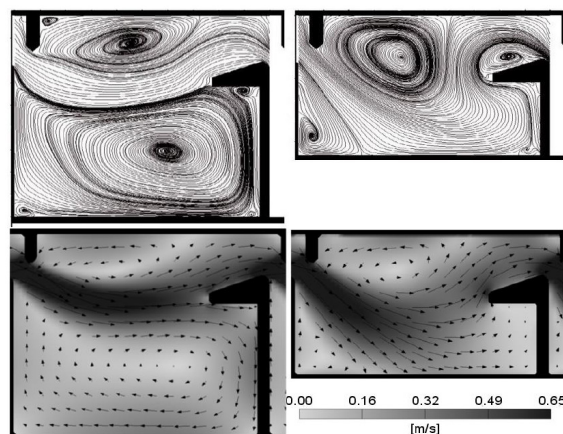
Met:

$L_b$ =	Lengte bekken (hart-op-hart afstand)	[m]
$B_b$ =	Breedte bekken (binnenmaat, van muur tot muur)	[m]
$b_0$ =	Slotbreedte	[m]
$C_L$ =	Lengtefactor (8-10) bepaald op basis van experimenten en praktijkervaringen (zie onder)	[-]
$C_B$ =	Breedte factor (7-8) bepaald op basis van experimenten en praktijkervaringen (zie onder)	[-]

De lengte- en breedtefactoren ( $C_L$  en  $C_B$ ) werden door Rajaratnam *et al.* (1991) en Larinier (2002b) bepaald op basis van experimenten en ervaringen met in de praktijk uitgevoerde ontwerpen. Meestal betreffen dit vertical slot-vispassages met een relatief groot verval ( $dh =$  circa 0,20-0,30 m) die zijn ontworpen voor de relatief sterke zwemmers (bijv. zalm en forel).

Op basis van deze vuistregels en een slotbreedte van  $b_0 = 0,50$  m wordt voor de bekkenlengte  $L_b$  een bereik van 4 tot 5 m berekend en voor de bekkenbreedte  $B_b$  een bereik van 3,5 tot 4 m. Gekozen wordt voor een bekkenlengte  **$L_b = 4,5$  m** en een bekkenbreedte  **$B_b = 3,5$  m**.

Uit eerder onderzoek blijkt dat de verhouding tussen o.a. de bekkenbreedte en de slotbreedte bepalend kan zijn voor het stromingstype in de bekkens (Musall *et al.*, 2014). Figuur 23 toont twee stromingstypen waaruit de invloed van de bekkenbreedte op het stromingspatroon blijkt. Links in de figuur is een meer stabiel stromingspatroon te zien bij voldoende bekkenbreedte, terwijl rechts een zeer turbulente stroming ontstaat bij een (te) kleine bekkenbreedte. Hoewel het turbulente stromingstype een hogere energiedissipatie heeft, heeft het meer stabiele stromingstype bij voldoende bekkenbreedte vooral voor de zwakkere zwemmers duidelijk de voorkeur. Door niet lager te gaan dan de ondergrens van de gestelde richtlijn voor de minimale breedte uit bovenstaande formule wordt verwacht dat het stabiele stromingspatroon wordt bekomen.



Figuur 23 – Invloed van vooral de bekkenbreedte op het stromingstype in vertical slot bekkens (Musall *et al.*, 2014)

Vervolgens 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 (2002b) wordt hiervoor volgende formule gegeven:

$$E = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot dh}{L_b \cdot B_b \cdot y_b} \quad [10]$$

Met:

E =	Volumetrische energiedissipatie per bekken	[W/m <sup>3</sup> ]
$\rho$ =	Dichtheid zoetwater (998)	[kg/m <sup>3</sup> ]
g =	Valversnelling (9,81)	[m/s <sup>2</sup> ]
Q =	Debiet	[m <sup>3</sup> /s]
dh =	Verval over het slot	[m]
L <sub>b</sub> =	Bekkenlengte	[m]
B <sub>b</sub> =	Bekkenbreedte	[m]
y <sub>b</sub> =	Waterdiepte in het bekken	[m]

Bij streefpeilen wordt de volumetrische gedissipeerde energie per bekken berekend op  $E \approx 30 \text{ W/m}^3$ , wat aanmerkelijk lager is dan het ontwerpcriterium van  $E < 100 \text{ W/m}^3$ . Deze waarde dient echter ook gecontroleerd te worden bij peilfluctuaties (zie volgende paragraaf). Bij deze berekening wordt opgemerkt dat voor de waterdiepte  $h_2$  wordt gebruikt, dit is de waterdiepte net afwaarts van het slot ( $y_b = h_2 = 1,40 \text{ m}$ ). Dit is een conservatieve aanname aangezien de diepte in het bekken geleidelijk toeneemt tot opwaarts van het volgende slot terug de waterdiepte  $h_1 (= 1,50 \text{ m})$  wordt bereikt omwille van het bodemverhang.

Om te voorkomen dat tijdens de normale werking van de vertical slot-vispassage water over de slotwanden stroomt en zo het verwachte stroompatroon verstoort, moeten de slotwanden uitgevoerd worden met een bepaalde overhoogte (zie  $h_+$  in Figuur 22). Op basis van de analyse van historische metingen van de op- en afwaartse waterstanden (zie paragraaf 3.5), wordt bepaald dat de overhoogte van de wanden aan opwaartse zijde minimaal 0,30 m dient te zijn. Verwacht wordt dat stijgingen van het opwaartse waterpeil met meer dan 0,30 m namelijk minder dan circa 1% van de tijd zullen voorkomen. Zoals aangegeven in diezelfde paragraaf komen stijgingen van het afwaartse waterpeil door het verhang in de stuwpannen relatief vaker voor. Voor de afwaartse wanden wordt daarom als uitgangspunt voorgesteld om een minimale overhoogte ( $h_+$ ) van 1 m boven afwaarts streefpeil aan te houden (ook deze waarde heeft een overschrijdingskans van minder dan circa 1%). Aangezien de grootte van dit effect per locatie kan verschillen wordt dit verder uitgewerkt in de deelrapporten voor het ontwerp voor elk van de locaties.

De bodem van de vispassage wordt uitgevoerd als een doorlopende bodem met een verhang van  $dh/L_b = 0,09\text{m}/4,5\text{m} = 0,02 (= 2\%)$ . Er bevinden zich dus geen 'drempels' tussen de bekken. Het bodemsubstraat loopt door de sloten door onder het voornoemde verhang, zie verder in paragraaf 4.4.3.

#### 4.4.2 Invloed waterpeilfluctuatie

In paragraaf 3.5 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 van -0,20 m tot +0,50 m in het afwaartse waterpeil.

Daarbij moet de vispassage ook bij hogere waterpeilen vanuit het oogpunt van vismigratie best open blijven aangezien er in deze situaties geen risico is op schade. Om een idee te krijgen van het debiet en de stroomsnelheden door de vispassage bij verhoogde peilen worden ook situaties meegenomen in de berekeningen bij waterstanden die minder dan 1% van de tijd worden overschreden: toename opwaarts waterpeil ( $H_o$ ) tot 0,30 m boven streefpeil, en toename van het afwaartse waterpeil ( $H_a$ ) tot 1 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 (bijv. met zijwanden bestaande uit damplanken en een betonnen vloer), richt dit risico zich enkel op het wegspoelen van het bodemsubstraat (zie verder in 4.4.3). Meestal worden extreme vervallen veroorzaakt door het (plots) wegzakken van het afwaartse waterpeil. Bij toename van het opwaartse peil (met meer dan 0,30 m) neemt het afwaartse waterpeil namelijk altijd sneller toe waardoor het verval juist afneemt. Als maatgevende uitzonderlijke daling van de afwaartse waterstand wordt in deze studie uitgegaan van een daling van 50 cm ten opzichte van streefpeil.

Het totale verval en dus het aantal benodigde sloten verschilt per locatie (zie Tabel 5 en Tabel 14). In deze verkennende studie wordt daarom een fictieve vertical slot-vispassage met 22 sloten onderzocht, wat bij een verval per slot van 0,09 m een totaal verval geeft van circa 2 m (= benadering van het gemiddelde over alle locaties). De waterdiepte opwaarts van de sloten bij streefpeilen (ontwerpscenario) werd gekozen op  $h_1 = 1,5$  m.

Tabel 21 geeft een overzicht van de maatgevende waterstandscenario's die werden onderzocht. De hydraulische werking bij elk van deze scenario's werd via iteratieve berekeningen bepaald met behulp van Formules [6], [7] en [10].

Tabel 21 – Maatgevende scenario's waterpeilfluctuatie bij normale werking

Scenario	Waterdiepte ( $h_1$ ) voor opwaarts slot (m)	Verschil opwaartse waterstand t.o.v. streefpeil (m)	Waterdiepte ( $h_2$ ) na afwaarts slot (m)	Verschil afwaartse waterstand t.o.v. streefpeil (m)	Totaal verval (m)	Verschil met verval bij streefpeilen (m)
N0	1,50	0,00	1,41	0,00	2,00	0,00
N1	1,50	0,00	1,21	- 0,20	2,20	+ 0,20
N2	1,70	+ 0,20	1,41	0,00	2,20	+ 0,20
N3	1,50	0,00	1,91	+ 0,50	1,50	- 0,50
N4	1,30	- 0,20	1,41	0,00	1,80	- 0,20
E1	1,50	0,00	0,91	- 0,50	2,50	+ 0,50
E2	1,80	+ 0,30	1,41	0,00	2,30	+ 0,30
E3	1,50	0,00	2,41	+ 1,00	1,00	- 1,00

Scenario N0 t.e.m. N4 betreffen de situaties waarbij de vispassage optimaal moet kunnen werken. Voor deze scenario's worden daarom de volgende ontwerpcriteria gecontroleerd (zie ook 2.3):

- $V_g < 1,5$  m/s
- $E < 100$  W m<sup>3</sup>/s

Aan de andere ontwerpcriteria met oog op dimensionering ( $h_{min}$  en  $b_{min}$ ) werd al voldaan door de keuze van de slot- en bekkendimensies. De minimale doorzweembreedte ( $b_{min}$ ) wordt niet beïnvloed door de waterpeilfluctuaties. In geval van een vertical slot zal de waterdiepte ook altijd voldoende blijven ( $> h_{min}$ ) omdat hier met oog op de range in waterpeilfluctuaties altijd voldoende bufferruimte is.

De extreme scenario's E1 t.e.m. E3 worden niet getoetst aan de ontwerpcriteria voor passeerbaarheid, maar dienen enkel voor het bepalen van de hydraulische belastingen onder deze extremere omstandigheden en om een idee te geven van de mate van passeerbaarheid onder deze extreme(re) omstandigheden.

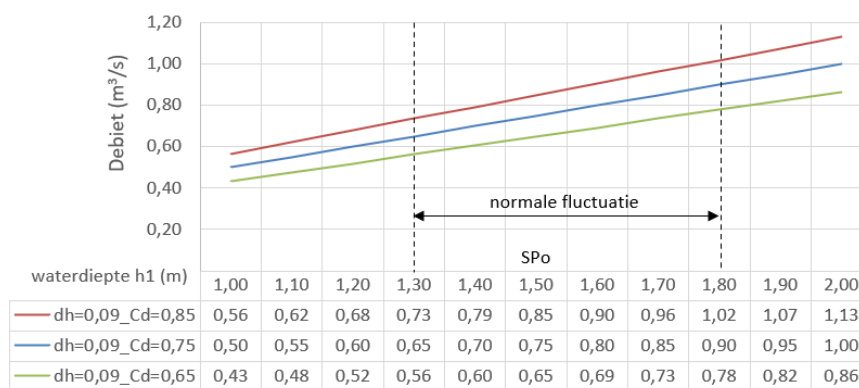
#### 4.4.2.1 Debiet

Figuur 24 en Figuur 25 tonen de invloed van waterpeilfluctuatie op het debiet door de vispassage. Hieruit valt op te maken dat het debiet vooral wordt bepaald door de opwaartse waterstand (en de werkelijke landingsverliezen, zie verderop). De invloed van de afwaartse waterstand wordt pas significant wanneer het totale verval kleiner wordt dan circa 1 m. Dit betekent dat de invloed van het afwaartse peil onder normale omstandigheden kleiner wordt bij vispassages met een groter totaal verval en dus meer sloten. Figuur 26 illustreert dit effect en geeft het debiet weer van het theoretische voorbeeld van 22 sloten (VS22) naast het debiet voor locatie Denderleeuw met 30 sloten (VS30). Merk op dat beide aantallen uitgaan van een verval per slot van circa 0,09 m en een waterdiepte opwaarts van het slot bij streefpeil van  $h_1 = 1,5$  m.

Figuur 24 toont de relatie tussen debiet en waterdiepte in het slot. Zoals hiervoor al opgemerkt wordt in het voorkeursontwerp uitgegaan van een waterdiepte opwaarts van het slot ( $h_1$ ) van 1,5 m bij opwaarts streefpeil ( $SP_o$ ).

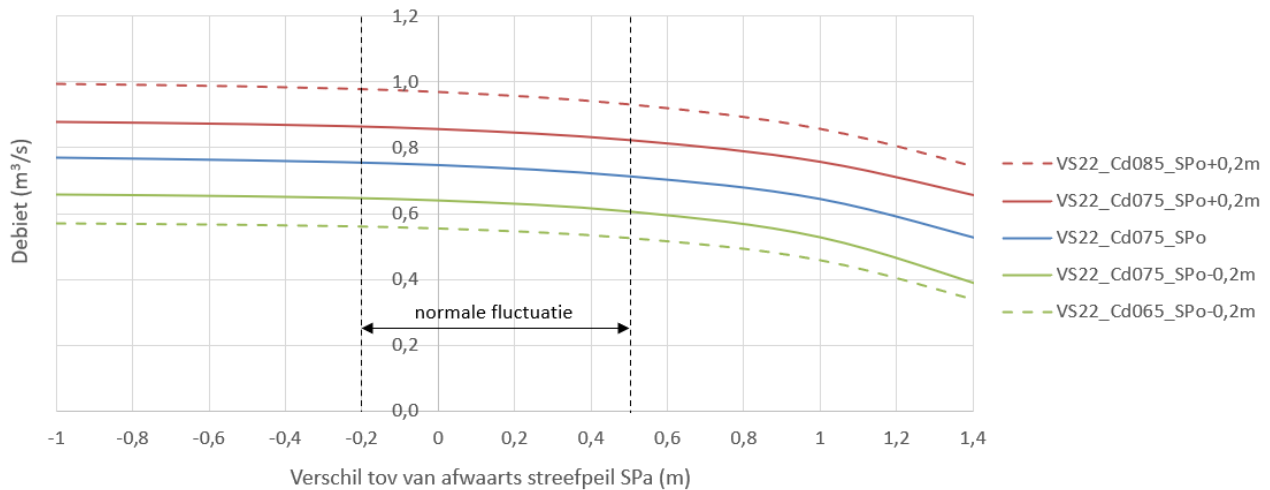
Naast het opwaartse waterpeil hebben ook de werkelijke ladingsverliezen en contractie ten gevolge van 'slotruwheid' en slotdimensies een relatief grote invloed op het werkelijke debiet door de vispassage. De slotruwheid en slotdimensies kunnen namelijk leiden tot ladingsverliezen (lees: energieverliezen ten gevolge van wrijving en turbulentie) en tot contractie van de stroom wat leidt tot een lager doorstroomdebiet (zie  $C_d$  coëfficiënt in Formule [6]). De precieze ladingsverliezen en contractie zijn nog niet gekend, waardoor nu wordt uitgegaan van een gemiddelde waarde van  $C_d = 0,75$ . Om een idee te geven van de invloed van deze  $C_d$  waarde zijn daarom in Figuur 24 (en Figuur 25) ook de berekende debieten bij  $C_d = 0,65$  en  $C_d = 0,85$  gegeven (dit zijn de boven- en ondergrenzen op basis van slotruwheid volgens Larinier (2002b)).

Bij een gemiddelde  $C_d$  waarde van 0,75, een ontwerpverval per slot van 0,09 m en een opwaartse slotdiepte bij streefpeil (SP) van  $h_1 = 1,5$  m kan het debiet door de vispassage tijdens normale dagelijkse peilschommelingen (periode optimale werking) fluctueren van circa 0,65 tot 0,85 m<sup>3</sup>/s.

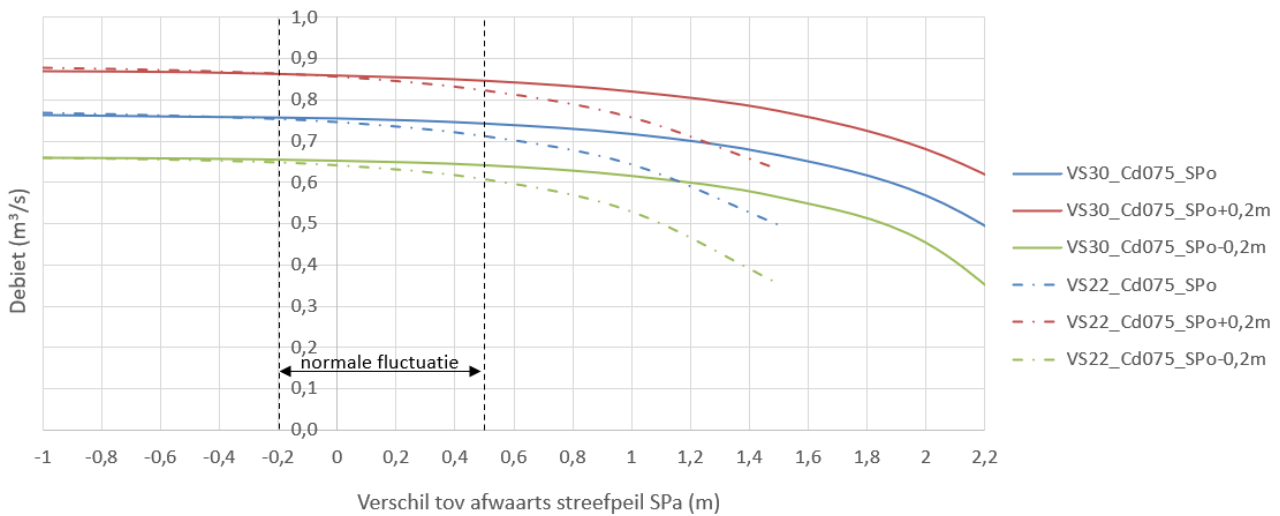


Figuur 24 – Debiet door de vispassage bij variatie in opwaartse waterdiepte

Figuur 25 toont de invloed van variatie in afwaartse waterdiepte in combinatie met normale peilfluctuatie in het opwaartse pand ( $SP_o \pm 0,20$  m). Met zwarte stippellijnen is de range aangegeven van normale peilschommelingen binnen de periode van optimale werking. Figuur 26 toont tevens de invloed van het afwaarts waterpeil bij groter totaal verval en dus meer sloten.



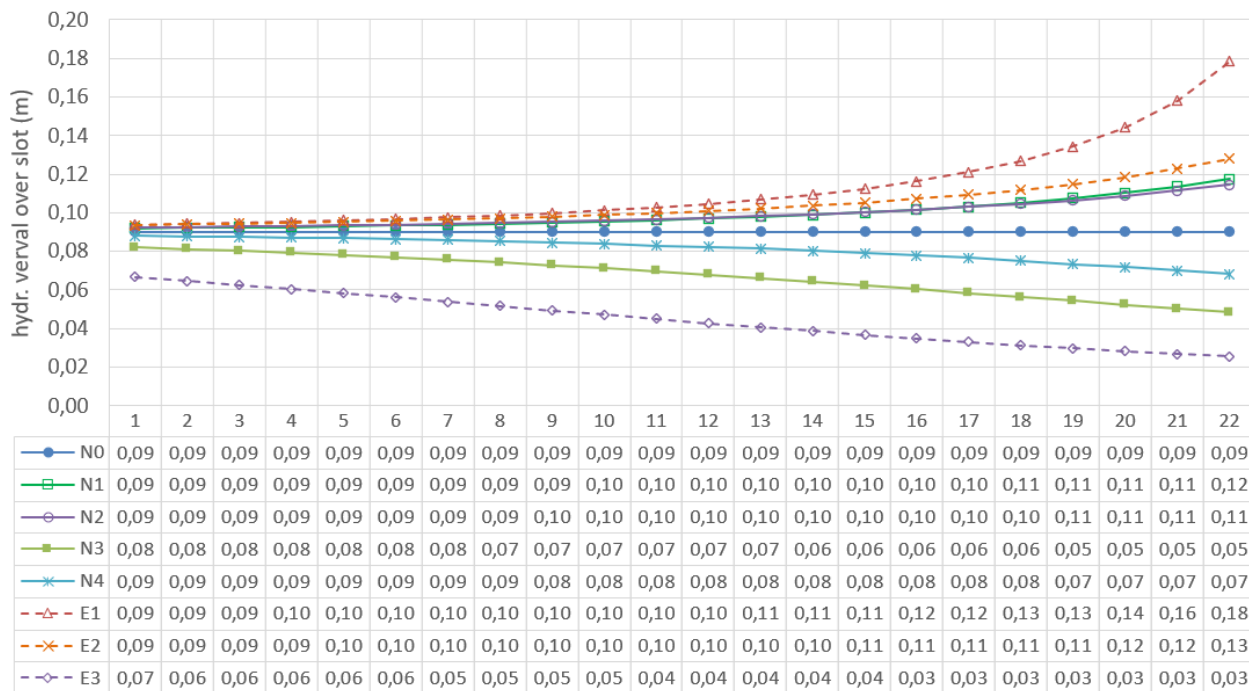
Figuur 25 – Invloed afwaartse waterdiepte op het debiet door de vispassage bij een verval per slot van  $dh = 0,09$  m en  $h_1 = 1,5$  m bij opwaarts streefpeil ( $SP_o$ )



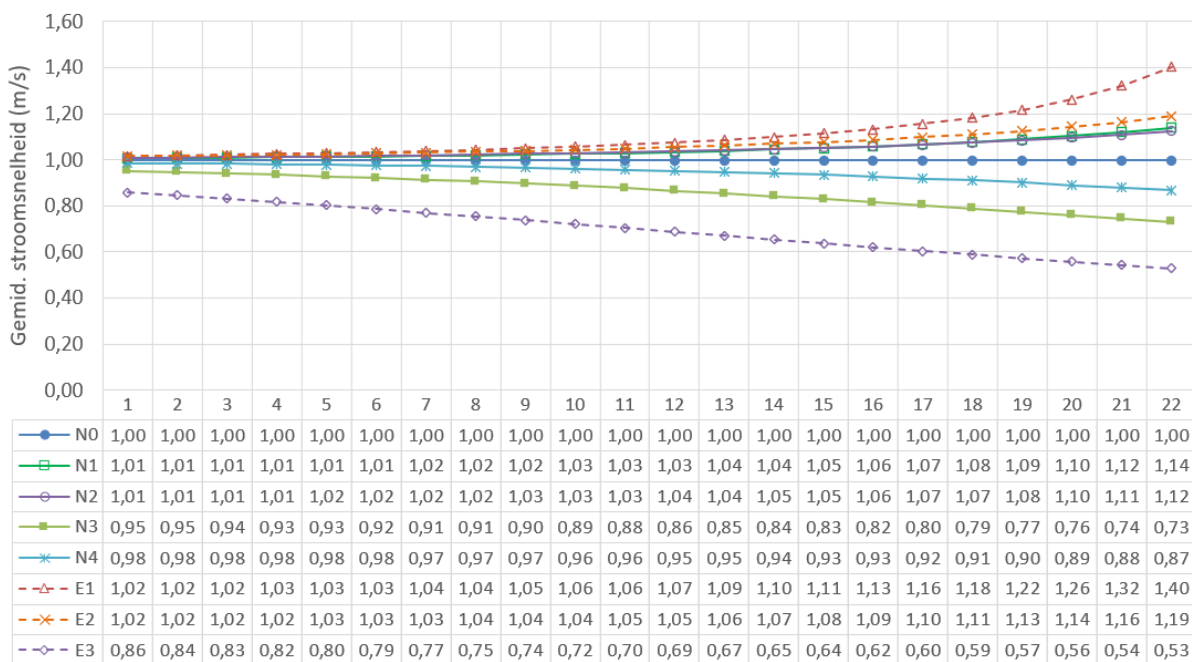
Figuur 26 – Invloed afwaartse waterdiepte op het debiet door de vispassage bij een groter totaal verval (groter aantal sloten) bij een verval per slot van  $dh = 0,09$  m en  $h_1 = 1,5$  m bij opwaarts streefpeil ( $SP_o$ )

#### 4.4.2.2 Stroomsnelheid en verval per slot

Figuur 27 en Figuur 28 tonen respectievelijk de berekende vervallen en gemiddelde stroomsnelheden per slot voor alle maatgevende scenario's. Hieruit blijkt dat de grootste effecten van de waterpeilfluctuaties altijd optreden in de meest afwaartse sloten. Zoals ook al te zien was in de resultaten voor het debiet, zijn effecten op de opwaartse sloten pas significant bij sterkere afnames van het totale verval. In alle scenario's blijft de gemiddelde stroomsnelheid in de sloten onder de 1,5 m/s. Merk wel op dat deze bij een Cd-waarde van 0,75 zijn uitgerekend. Bij hogere Cd-waarden kunnen gemiddelde stroomsnelheden tot circa 10% hoger liggen ( $Cd = 0,85$ ).



Figuur 27 – Hydraulisch verval over elk slot bij de maatgevende waterstandscenario's

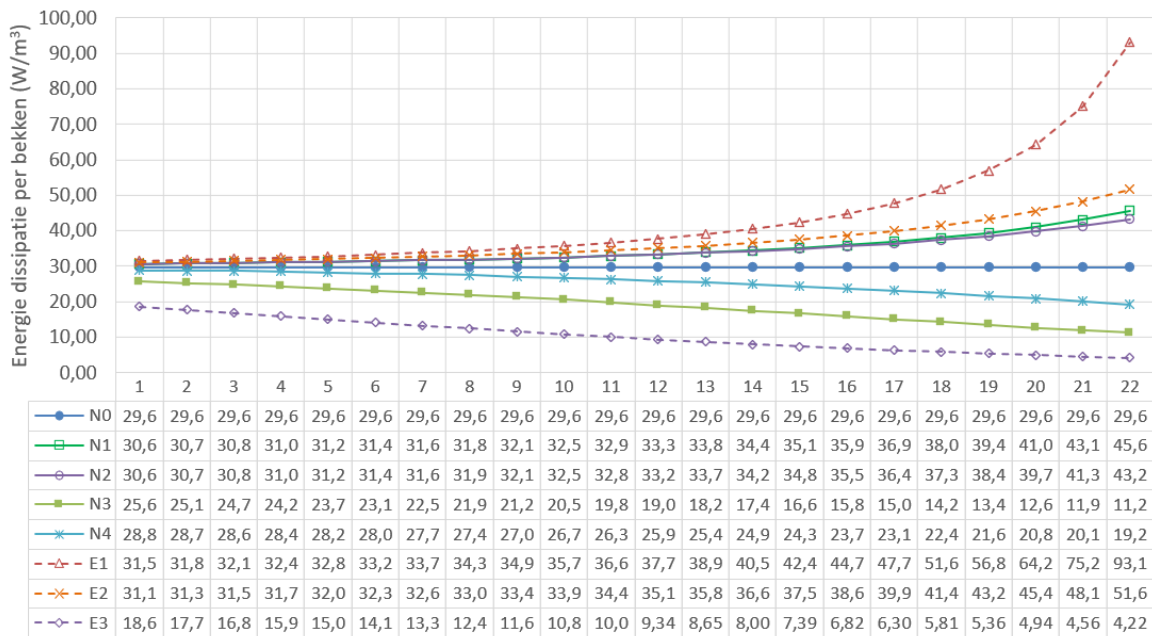


Figuur 28 – Gemiddelde stroomsnelheid in elk slot bij de maatgevende waterstandscenario's



#### 4.4.2.3 Energiedissipatie per volume-eenheid

Figuur 29 toont de resultaten voor de energie per bekken bij elk van de maatgevende waterstandscenario's. In alle scenario's blijft de toelaatbare energie per bekken onder het criterium van 100 W/m<sup>3</sup>.



Figuur 29 – Energie dissipatie per bekken bij de maatgevende waterstandscenario's

#### 4.4.2.4 Samenvatting per scenario

Tabel 22 geeft een overzicht van de resultaten voor enkele bepalende parameters bij elk van de waterstandscenario's. Zoals al bleek uit voorgaande paragrafen voldoen alle maatgevende parameters aan de gestelde ontwerpcriteria.

Tabel 22 – Overzicht resultaten maatgevende parameters bij de maatgevende waterstandscenario's

Scenario	Totaal verval (dH) [m]	Debiet (m <sup>3</sup> /s)	Waterdiepte (h1) voor opwaarts slot [m]	Gemiddelde snelheid (Vg) in opwaarts slot [m/s]	Energie opwaarts bekken [W/m <sup>3</sup> ]	Waterdiepte (h2) na afwaarts slot [m]	Gemiddelde snelheid (Vg) in afwaarts slot [m/s]	Energie opwaarts bekken [W/m <sup>3</sup> ]
N0	2,0	0,747	1,50	1,00	29,6	1,41	1,00	29,6
N1	2,2	0,756	1,50	1,01	30,6	1,21	1,14	45,6
N2	2,2	0,856	1,70	1,01	30,6	1,41	1,12	43,2
N3	1,5	0,713	1,50	0,95	25,6	1,91	0,73	11,2
N4	1,8	0,641	1,30	0,98	28,8	1,41	0,87	19,2
E1	2,50	0,764	1,50	1,02	31,5	0,91	1,40	93,1

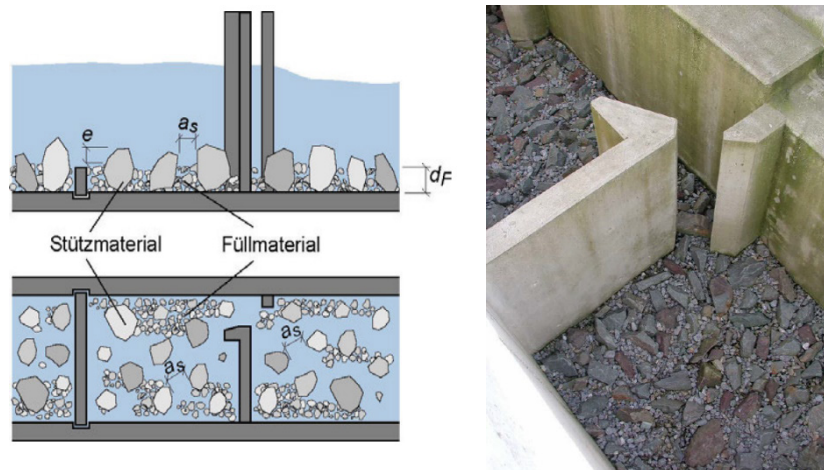
E2	2,30	0,914	1,80	1,02	31,1	1,41	1,19	51,6
E3	1,00	0,645	1,50	0,86	18,6	2,41	0,53	4,22

#### 4.4.3 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' of 'elvers'). Daarnaast is deze ruwheid niet alleen een meerwaarde voor vissen maar ook voor macrozoöbenthos of ongewervelde bodemdierpjes (bv. vlokreeftjes) omdat deze diertjes zich tussen de stenen door in stroomopwaartse richting kunnen bewegen.

Een dergelijk bodemsubstraat kan bestaan uit stoorstenen met een relatief grotere diameter aangevuld met een vullaag met relatief kleinere steendiameters daarrond en/of onder. Hierbij dient wel rekening te worden gehouden met voldoende afstand tussen de grotere stoorstenen, voldoende lage stroomsnelheden (tussen de stoorstenen) en voldoende waterdiepte boven de vullaag. DWA (2014) geeft richtlijnen voor optimale steendiameters, afstanden en laagdikte bij een dergelijke aanpak.

In geval van vispassages in relatief grotere waterlopen (zoals de Dender) kan ook gekozen worden voor één sortering met voldoende range aan steendiameters. Deze aanpak wordt dan ook gekozen voor het bodemsubstraat in de vispassages op de Dender.

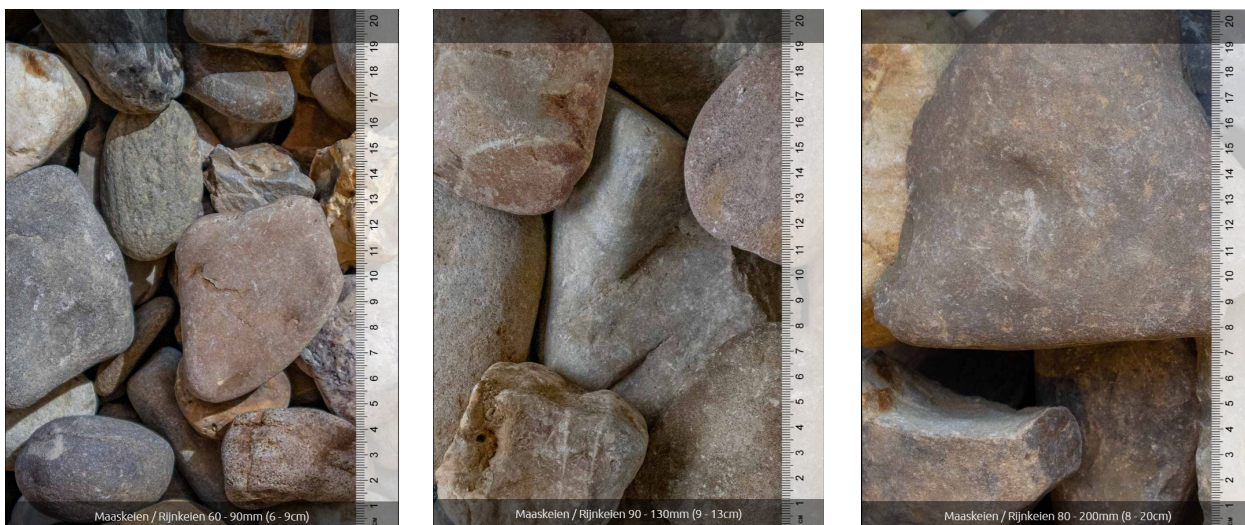


Bron: DWA (2014)

Figuur 30 – Voorbeeld aanpak bodemsubstraat met vullaag en stoorstenen

Voor het bodemsubstraat 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 31 en Figuur 32) dienen te worden gebruikt en niet de relatief ‘scherpe’ breuksteensortering zoals in de waterbouw meestal toegepast vanuit oogpunt erosiebescherming.



Figuur 31 – Voorbeeld rolstenen sorteringen (bron: grind.be)

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 32 – Voorbeeld toepassing rolstenen 90/130 mm voor in vispassage 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 op de luwere delen in de bekkens vormt op zich geen probleem aangezien dit zorgt voor nog meer variatie in microhabitats en kan dus ook een meerwaarde zijn. Door de relatief grotere stroomsnelheden door de slots en in het centrum van de bekkens wordt tevens 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 als in de slots en bekkens waardoor de noodzaak van bodemverruwing ook minder is.

Hoewel het substraat niet ingezet wordt als erosiewerende maatregel zal wel gecontroleerd moeten worden aan welke stroomsnelheden deze kan weerstaan. Onder normale omstandigheden zal dit geen probleem vormen aangezien de vispassage dan ook passeerbaar moet zijn voor vissen, en extreem hoge stroomsnelheden dus ook niet voor mogen komen. Echter bij events waarbij het verval (voor korte tijd) zeer hoog wordt kunnen relatief hoge stroomsnelheden ontstaan in vooral de meest afwaartse sloten. Dit risico ontstaat vooral bij de val van de afwaartse waterstand.

Met behulp van onderstaande formule kan de relatie tussen gemiddelde stroomsnelheid ( $v_g$ ) en benodigde nominale steendiameter ( $D_{n50}$ ) worden gelegd:

$$\Delta D_{n50} = 0.035 \frac{\Phi}{\Psi} \frac{K_T K_H}{K_S} \frac{v_g^2}{2g} \quad [11]$$

Met:

-	$D_{n50}$	Nominale diameter steensortering	[m]
-	$\Delta$	Specifieke dichtheid; $\Delta = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}$	[-]
-	$\rho_s$	Dichtheid steen (= 2650 kg/m <sup>3</sup> )	[kg/m <sup>3</sup> ]
-	$\rho_w$	Dichtheid water (= 1000 kg/m <sup>3</sup> )	[kg/m <sup>3</sup> ]
-	$K_T$	Turbulentiefactor (= 1, of 1,5 (verhoogd), of 2,0 (hoog)	[-]
-	$K_h$	Diepte- (of snelheidsprofiel) factor	[-]
-	$K_S$	Hellingfactor. Voor stroming die een dijktalud oploopt: $K_S = \frac{\sin(\theta + \alpha)}{\sin(\theta)}$	[-]
-	$\Psi$	Kritische schuifspanningsparameter	[-]
-	$\Phi$	Stabiliteitsfactor voor stroming	[-]
-	$v_g$	Stroomsnelheid	[m/s]
-	$g$	Valversnelling (= 9.81 m/s <sup>2</sup> )	[m/s <sup>2</sup> ]
-	$h$	Waterdiepte	[m]
-	$\theta$	Hoek van inwendige wrijving van breuksteen	[rad]
-	$\alpha$	Taludhelling	[rad]

Bij conservatieve toepassing van de bovenstaande formule van Pilarczyk (namelijk met turbulentiefactor van  $KT = 2$ ) volgt dat de gekozen sortering (nominale steendiameter  $D_{n50}$  van circa 15 cm) stroomsnelheden tot circa 1,8 m/s kan weerstaan. Om ook rekening te houden met de onzekerheid ten aanzien van de werkelijke ruwheidscoëfficiënt van de sloten wordt op basis van de resultaten voor waterpeilfluctuaties uit de voorgaande paragraaf (zie scenario E1) daarom geadviseerd om in het automatische regelscript voor de vispassage een sluitingsvoorwaarde op te nemen bij afwaartse waterstanden lager dan 0,50 m onder het afwaartse streefpeil. Dit om eventuele schade aan het bodemsubstraat te voorkomen in het geval van een dergelijk extreem event. Zie verder in paragraaf 8.2.

## 5 Monding en lokstroom

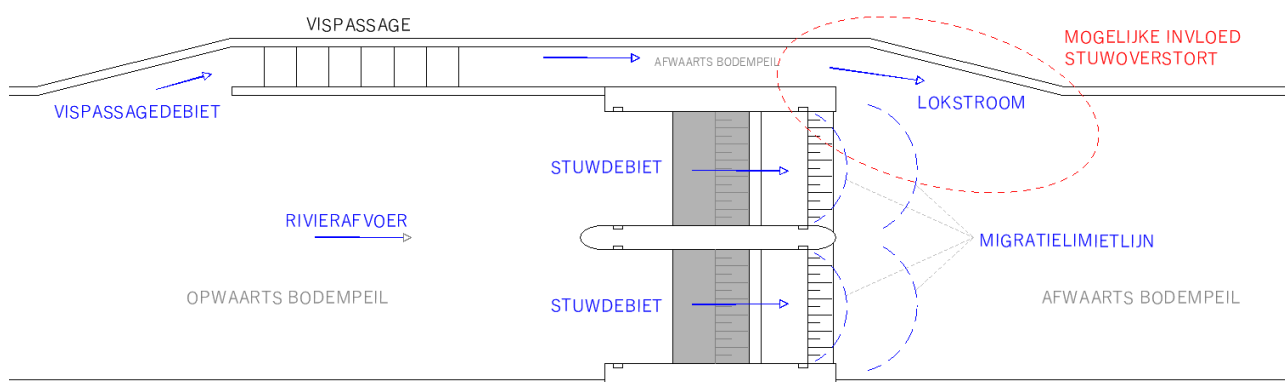
### 5.1 Inleiding

Een heel belangrijk aspect met oog op de effectiviteit van een vispassage is de vindbaarheid. Een vispassage kan goed passeerbaar zijn, maar als deze niet gevonden wordt is het knelpunt alsnog niet opgelost. In paragraaf 2.4 werden de ontwerpcriteria voor een optimale attractiviteit beschreven. Op hoofdlijnen richten deze criteria zich op een monding die zo dicht mogelijk aan het knelpunt bevindt met een zo sterk en parallel mogelijke lokstroom. In het geval van de Dendervispassages worden ook de stuwen vernieuwd, waardoor de vispassagemonding direct naast en parallel aan de stuwen ingepast kan worden, zie Figuur 33.

De volgende aspecten zijn bepalend voor bereiken van deze criteria:

- Ligging van de migratielinietlijn;
- Locatie en vormgeving monding;
- Grootte lokstroomdebiet.

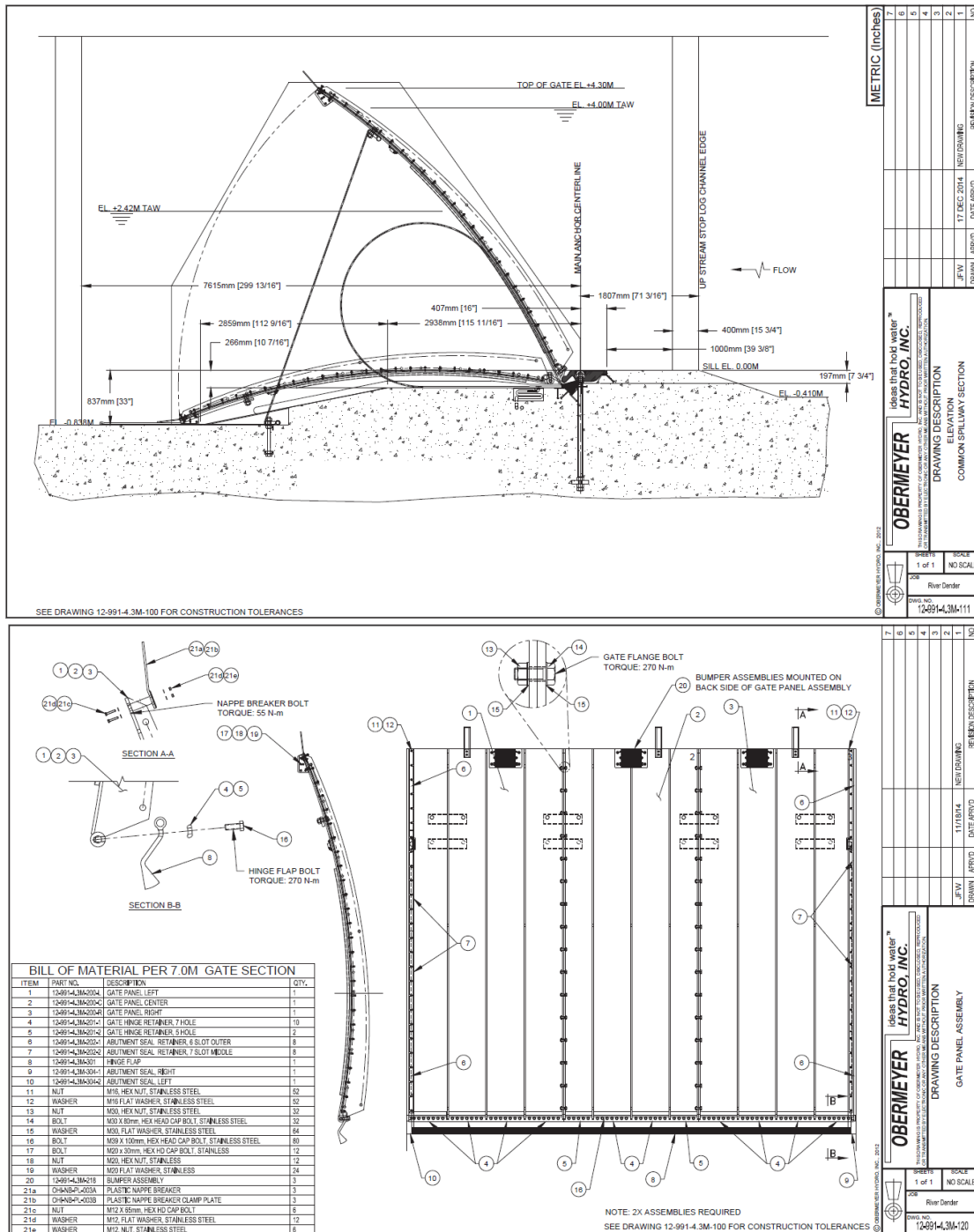
Elk van deze aspecten zullen worden onderzocht en besproken in dit hoofdstuk. De ligging van de migratielinietlijn wordt bepaald door de ligging van het einde van de watersprong afwaarts de stuwen. In paragraaf 5.2 wordt eerst het ontwerp van de stuwen besproken, waarna in paragraaf 5.3 de ligging van de watersprong wordt berekend op basis van literatuurformules bij maatgevende stuwoverstorten. Het einde van deze watersprong kan namelijk gelijk gesteld worden aan de ligging van de migratielinietlijn. Modelonderzoek naar de optimale locatie en vormgeving van de monding wordt behandeld in paragraaf 0 en de invloed en mogelijkheden ten aanzien van de grootte van het toegevoegd debiet in paragraaf 0. Tenslotte wordt op basis van de resultaten uit de voorgaande paragrafen het meest optimale algemene ontwerp voor de monding van de nieuwe vispassages op de Dender beschreven in paragraaf 5.6.



Figuur 33 – Schetsmatig grondplan stuwen en vispassage met vertrekpunt voor ontwerp parallelle vispassagemonding

## 5.2 Stuwontwerp

Voor het ontwerp van alle nieuwe stuwen voorziet DVW een zelfde ontwerp bestaande uit balgstuwen (Figuur 34). Per locatie worden twee stuwen voorzien met elk een breedte van 7 m. Enkel te Denderbelle krijgen de stuwen een breedte van 7,5 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 34 – Balgstuwontwerp voor de nieuwe stuwen op de Dender (Obermeyer, 2012)

Figuur 35 toont een schematisch lengteprofiel van de stuwen met aanduiding van de maatgevende dimensies relevant voor onderhavige studie. Wanneer er een rechte lijn wordt getrokken tussen de as van de klep en de punt van de klep heeft deze een lengte van circa 5,7 m (zie rode maatvoering).

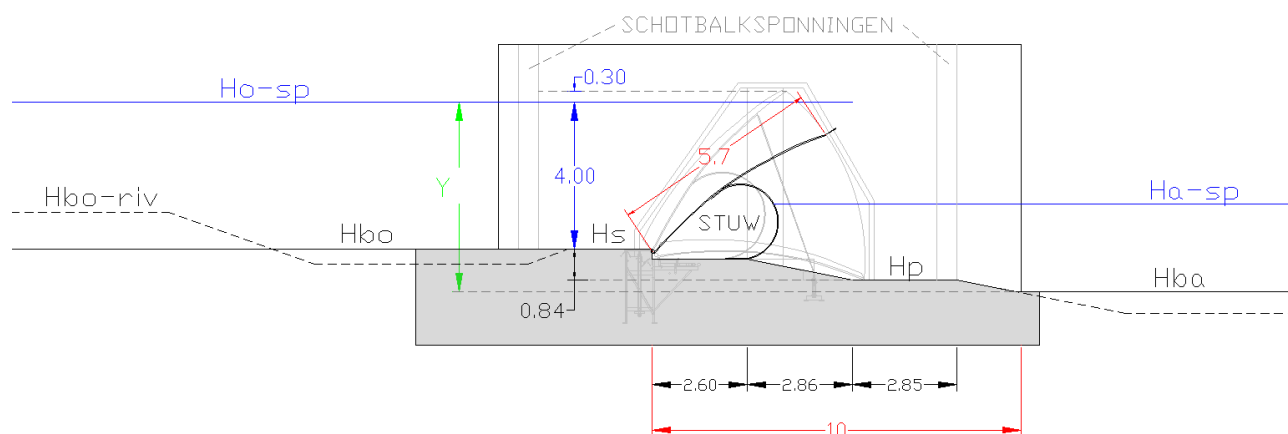
Op alle locaties worden de volgende twee relatieve standaardpeilen toegepast:

- Het betonpeil net opwaarts van de stuwas ligt 4 meter onder het opwaartse streefpeil (zie blauwe maatvoering en parameter  $H_s$ ). In de hoogste stand kan de stuw een peil keren tot 0,30 m boven streefpeil.
- In volledig neergelaten stand rust de tip van de klep op een afwaarts plateau dat 0,84 m lager ligt dan het betonpeil ter plaatse van de stuwas (zie parameter  $H_p$ ).

De op- en afwaartse waterdiepten kunnen verschillen per locatie. Tabel 23 geeft een overzicht van de maatgevende peilen per locatie en de daaraan verbonden waterdieptes bij streefpeil.

Tabel 23 – Op- en afwaartse bodempeilen en waterdieptes bij streefpeilen (zie ook Figuur 35)

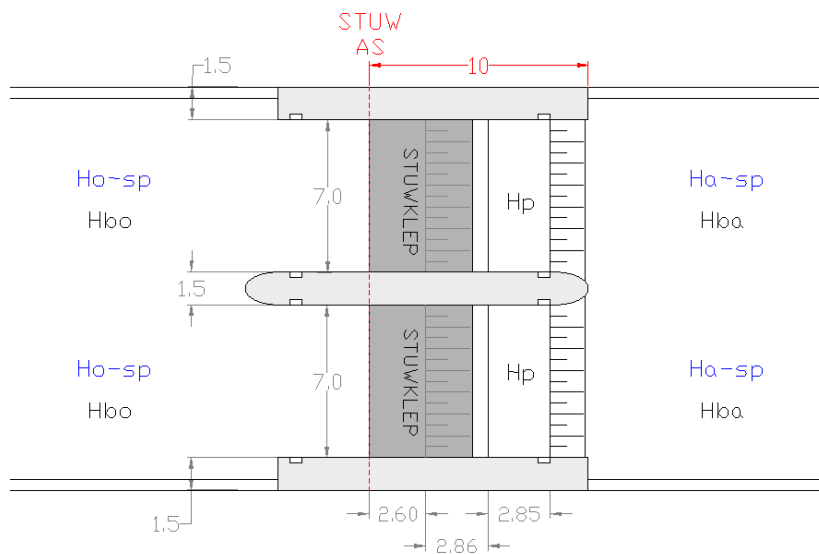
Omschrijving	Parameter	Eenheid	GB	ID	PO	DL	AA	DB
Opwaarts streefpeil	Ho-sp	[mTAW]	16,85	15,23	12,88	10,37	7,61	5,83
Afwaarts streefpeil	Ha-sp	[mTAW]	15,23	12,88	10,37	7,61	5,83	3,45
Verval bij streefpeil	dH-sp	[m]	1,62	2,35	2,51	2,76	1,78	2,38
Opwaarts bodempeil Dender	Hbo-riv	[mTAW]	14		9,8	7,97	3,6	1,53
Opwaartse waterdiepte	do-riv	[m]	2,85		3,08	2,4	4,01	4,30
Opwaarts bodempeil	Hbo	[mTAW]	12,45	11,23	8,88	6,37	2,2	0,44
Betonpeil opwaarts stuwas	Hs	[mTAW]	12,85	11,63	8,88	6,37	3,61	0,83
Waterdiepte boven stuwas	ds	[m]	4,00	3,60	4,00	4,00	4,00	5,00
Betonpeil afwaarts plateau	Hp	[mTAW]	12,01	10,79	8,04	5,53	2,77	0,17
Waterdiepte boven plateau	dp	[m]	3,22	2,09	2,33	2,08	3,06	3,28
<b>Afwaarts bodempeil</b>	<b>Hba</b>	<b>[mTAW]</b>	<b>12,20</b>	<b>10,48</b>	<b>7,97</b>	<b>5,21</b>	<b>2,20</b>	<b>0,14</b>
<b>Afwaartse waterdiepte</b>	<b>da</b>	<b>[m]</b>	<b>3,03</b>	<b>2,40</b>	<b>2,40</b>	<b>2,40</b>	<b>3,63</b>	<b>3,31</b>
Valhoogte tov opw streefpeil	Y	[m]	4,65	4,75	4,91	5,16	5,41	5,69



Figuur 35 – Schematisch lengteprofiel stuwen met maatgevende parameters



Bij (zeer) lage afvoeren is het van belang dat een toegang naar de vispassage zich zo ver mogelijk opwaarts en dus zo dicht mogelijk aan de stuwen bevindt. Hierbij speelt niet alleen de lengte van de mogelijke watersprong in deze situaties een rol, maar ook de minimaal benodigde lengte van de zijmuren van de stuwen. Vanuit oogpunt beheer dienen de (platgelegde) stuwen drooggezet te kunnen worden. Hiervoor worden in de stuwmuur op- en afwaarts van de stuwen sponningen voorzien (zie ook lichtgrijze lijnen in Figuur 35). Tevens wordt er aan afwaartse zijde van de afwaartse sponningen ook een loopbrug voorzien. DVW heeft daarom aangegeven dat de zijmuren van de stuwen vanuit bouwkundig oogpunt een minimale lengte moeten hebben van 10 m uit de stuwassen (zie rode maatvoering in Figuur 35 en Figuur 36). Dit vormt fysiek dan ook het meest opwaartse punt voor de start van de monding. Hierbij wordt opgemerkt dat dit door andere ruimtelijke randvoorwaarden licht kan verschillen per locatie (van circa 10 tot 12 m). Met oog op een optimale vindbaarheid van de vispassagemonding wordt deze lengte echter best zo kort mogelijk gehouden.



Figuur 36 – Schematisch grondplan stuwen met maatgevende parameters

## 5.3 Watersprong en migratielimietlijn

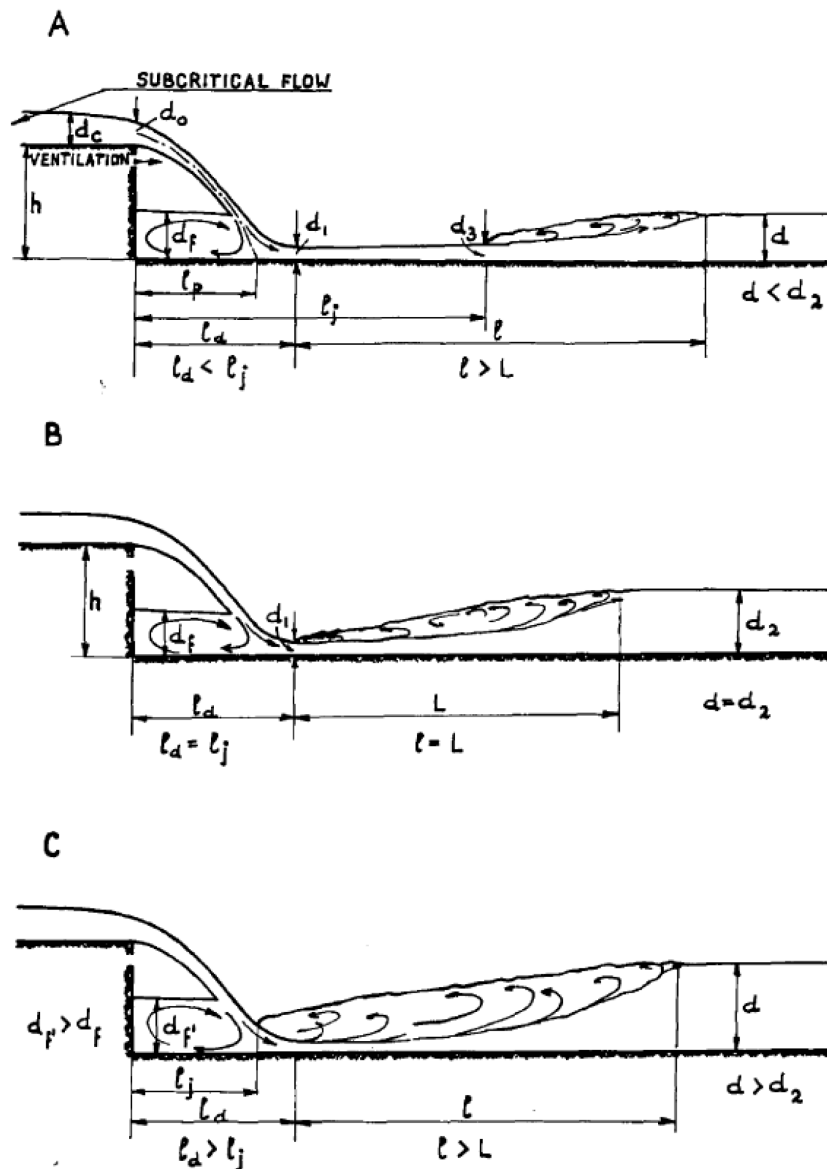
### 5.3.1 Watersprongtypes

Een stuw werkt hydraulisch gezien als een overlaat of 'vertical drop structure'. Rand (1955) onderscheidde drie stromingstypes voor een watersprong bij een beluchte volkomen overlaat ('vertical drop structure') (Figuur 37).

Stromingstype 'B' uit Figuur 37 kan gezien worden als het grensscenario tussen de types A en C. Dit is namelijk het scenario waarbij de afwaartse waterdiepte gelijk is aan de 'grensdiepte' na sprong ( $d = d_2$ ). De grensdiepte na sprong ' $d_2$ ' (of in het Engels 'sequent depth') is de afwaartse waterdiepte die zorgt voor een krachtenbalans in de watersprong in het geval dat de watersprong direct begint op de plaats waar de vallende straal de bodem raakt ( $L_j = L_d$ ). In dat geval is de vallende straal niet verdrongen en is er afwaarts van het punt waar de straal de bodem raakt geen superkritische zone met schietend water aanwezig (zie o.a. Berlamont (2004) voor meer informatie).

Bij type 'A' is de afwaartse waterdiepte kleiner dan de overeenkomende diepte na sprong ( $d < d_2$ ), men spreekt in dat geval van een 'schietsende/ vrije watersprong'. Doordat  $d < d_2$  zal er eerst nog superkritische stroming optreden tot het moment dat de waterhoogte  $d_3$  bereikt is, die zorgt voor een krachtenbalans overeenkomend met de afwaartse waterdiepte ( $d$ ). De watersprong begint hierbij op enige afstand afwaarts van waar de vallende straal de bodem raakt ( $L_j > L_d$ ). De waterhoogte  $d_1$  is echter wel dezelfde als in type 'B'. De waterhoogte onder de overstortende laag ( $d_f$ ) is ook gelijk aan de waarde bij type 'B'.

Bij type 'C' ten slotte is de afwaartse waterdiepte groter dan de overeenkomende waterdiepte na sprong ( $d > d_2$ ), waardoor men in dit geval spreekt van een 'verdrongen watersprong'. De sprong begint voor het einde van de vallende straal ( $L_j < L_d$ ). De waterhoogte onder de (nog steeds beluchte) overstortende laag ( $d_f$ ) is groter dan bij de andere types ( $d_f' > d_f$ ). Merk op dat de waterhoogte  $d_1$  bij type 'C' in Figuur 37 niet meer wordt vermeld. Rand (1955) geeft ook geen formule voor de berekening van  $d_1$  in dit geval.



Figuur 37 – Stromingstypes bij de 'archetype' van een beluchte 'vertical drop structure' volgens Rand (1955)

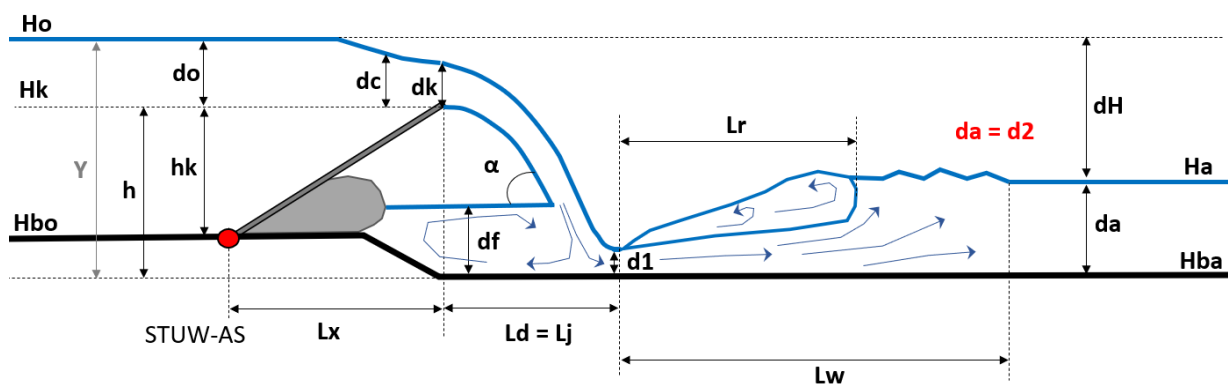
5.3.2 Rekenmethode

Met oog op de berekeningen worden de stuwen en de watersprong geschematiseerd zoals getoond in Figuur 38. Bij overstort ontstaat er afwaarts van de stuw een vallende straal ( $L_d$ ) en een zeer turbulente ‘roller’ ( $L_r$ ) met hoge stroomsnelheden aan de bodem (superkritische stroming) en aan het oppervlak een terugstroom naar de vallende straal. Na de zone van de roller is er een overgangszone met relatief veel luchtbellen naar een normale ‘rustige’ stroming. De zone van de roller plus deze overgangszone wordt de zone van de watersprong genoemd ( $L_w$ ). Afhankelijk van de verhouding tussen het overstortende debiet en de afwaartse waterstand kan er een vrije of verdrongen watersprong optreden, zie voorgaande paragraaf.

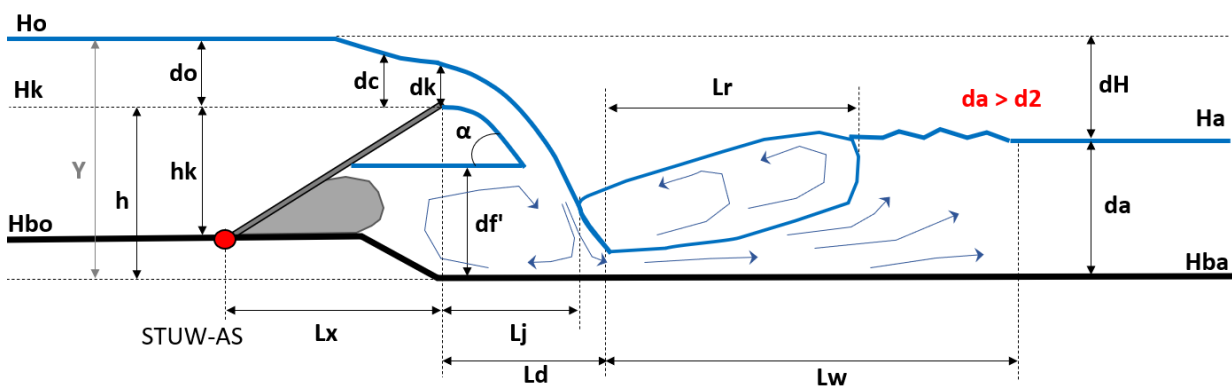
Aangenomen wordt dat de **migratielimietlijn** zich bevindt in de zone tussen einde roller en einde watersprong (zone  $L_w-L_r$ ). Afhankelijk van de doelsoort (sterke/zwakke zwemmer; reactie op turbulentie) kan de effectieve limietlijn dichter tegen of verder van de roller (einde  $L_r$ ) liggen. Aangezien het debiet over de stuwen kan variëren, varieert de locatie en lengte van de watersprong en dus ook de ligging van de migratielimietlijn.

Het einde van de roller ( $L_r$ ) en het einde van de watersprong ( $L_w$ ) worden berekend met behulp van literatuurformules. Afstanden worden daarbij steeds berekend ten opzichte van de stuwas.

Merk op dat de stuwgeulbodem op een vereenvoudigde manier is geschematiseerd. In werkelijkheid is er nog een tussenplateau aanwezig (zie  $H_p$  in Figuur 35).



Type B: grens tussen vrije en verdrongen watersprong



Type C: verdrongen watersprong

Figuur 38 – Maatgevende parameters berekening watersprong

Het debiet over een vrije overlaat (zoals een stuw) kan berekend worden aan de hand van volgende formule:

$$Q_s = C_s \cdot B_s \cdot (H_o - H_k)^{3/2} \quad (\text{Baker, 2015}) \quad [12]$$

Met:

•	$Q_s$	Debiet bij vrije overlaat (stuw)	[m <sup>3</sup> /s]
•	$C_s$	Debietscoëfficiënt stuwklep, waarbij $C_s = 1,822 + 0,0386 \cdot h_k$	[-]
•	$h_k$	Hoogte stuwklep ten opzichte van de stuwas	[m]
•	$B_s$	Breedte overlaat (stuw)	[m]
•	$H_o$	Hoogte opwaarts waterpeil	[mTAW]
•	$H_k$	Hoogte kruinpeil overlaat	[mTAW]

De afstand van de punt van de stuwklep ten opzichte van de stuwas in stroomrichting is:

$$L_x = \sqrt{(L_k^2 - h_k^2)} \quad [13]$$

Met:

•	$L_x$	Afstand punt van de stuwklep ten opzichte van de stuwas in stroomrichting	[m]
•	$L_k$	Stuwkleplengte (= 5,7)	[m]
•	$h_k$	hoogte stuwklep ten opzichte van de stuwas	[m]

De lengte van een beluchte vallende straal kan worden berekend met de formule van Chanson:

$$\frac{L_d}{h} = 2.171 \left( \frac{h_c}{h} \right)^{0.525} \quad (\text{Chanson, 2002}) \quad [14]$$

Met:

•	$L_d$	Lengte vallende straal (gemeten vanaf kleppunt tot waterdiepte $d_1$ , zie Figuur 38)	[m]
•	$h_c$	Kritische waterhoogte ( $h_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$ )	[m]
•	$q$	Debiet per strekkende meter ( $Q / B_s$ ) over de overlaat	[m <sup>2</sup> /s]
•	$Q$	Debiet bij vrije overlaat	[m <sup>3</sup> /s]
•	$B_s$	Breedte overlaat	[m]
•	$g$	Valversnelling (9,81)	[m/s <sup>2</sup> ]
•	$h$	Valhoogte	[m]

De waterdiepte ( $d_1$ ) voor de sprong wordt bepaald met de formulering van Rand:

$$\frac{d_1}{h} = 0.54 \cdot \left( \frac{h_c}{h} \right)^{1.275} \quad (\text{Rand, 1955}) \quad [15]$$

De formule voor de berekening van de grensdiepte ( $d_2$ ) na de sprong<sup>3</sup> is gelijkaardig:

$$\frac{d_2}{h} = 1.66 \cdot \left( \frac{h_c}{h} \right)^{0.81} \quad (\text{Rand, 1955}) \quad [16]$$

Met:

•	$d_1$	Waterdiepte voor de sprong	[m]
•	$d_2$	Grensdiepte na sprong	[m]

<sup>3</sup> De 'grensdiepte' na sprong ( $d_2$ ) is de afwaartse waterdiepte die zorgt voor een krachtenbalans in de watersprong in het geval dat de watersprong direct begint op de plaats waar de vallende straal de bodem raakt ( $L_j = L_d$ ). In dat geval is de vallende straal niet verdrongen, en is er afwaarts van het punt waar de straal de bodem raakt geen superkritische zone met schietend water aanwezig (zie o.a. Berlamont (2004) voor meer informatie).

Bélanger leidde volgende formule af voor de berekening van de grensdiepte:

$$d_2 = d_1 \cdot \frac{1}{2} \cdot \left( \sqrt{1 + 8 \cdot Fr_1^2} - 1 \right) \quad (\text{Bélanger, 1828}) \quad [17]$$

Met:

- $Fr_1$  Froude getal vóór sprong  $Fr_1 = \frac{q/d_1}{\sqrt{g \cdot d_1}}$  [-]
- $q$  Debiet per eenheidsbreedte ( $Q / B_a$ ) in de afwaartse stuwgeul [ $m^2/s$ ]
- $B_a$  Breedte van de afwaartse stuwgeul [m]

Indien de *watersprong niet verdrongen* is ( $d_a \leq d_2$ ), kan de lengte van de watersprong berekend worden aan de hand van volgende formuleringen:

$$L_w = 6 \cdot (d_2 - d_1) \quad (\text{Rand, 1955}) \quad [18]$$

$$\frac{L_w}{d_1} = 10 \cdot \alpha_j \cdot \tanh\left(\frac{Fr_1 - 1}{\alpha_j}\right) \quad (\text{Vischer \& Hager, 1995}) \quad [19]$$

Met:

- $L_w$  Lengte vrije watersprong [m]
- $\alpha_j$  Coëfficiënt (= 22) [-]

De lengte van de roller ( $L_r$ ) is de lengte waarbinnen relatief grote stroomsnelheden aan de bodem en een terugstroom aan het wateroppervlak plaatsvinden (zie ook Figuur 38).

De lengte van de roller bij een *niet-verdrongen* watersprong kan bepaald worden met de volgende formules:

$$\frac{L_r}{d_1} = 8 \cdot \left[ \left( \frac{d_c}{d_1} \right)^{3/2} - 1,5 \right] \quad (\text{Chanson, 2002}) \quad [20]$$

$$\frac{L_r}{d_1} = -12 + 8 \cdot \alpha_r \cdot \tanh\left(\frac{Fr_1}{\alpha_r}\right) \quad (\text{Hager et al., 1990}) \quad [21]$$

Met:

- $L_r$  Lengte roller binnen watersprong [m]
- $\alpha_r$  Coëfficiënt afh. van de verhouding waterhoogte/breedte  
 $\alpha_r = 20$  voor  $d_1/B_s < 0,1$  en  $\alpha_r = 12,5$  voor  $0,1 \leq d_1/B_s \leq 0,7$  [-]

Indien de *watersprong verdrongen* is ( $d_a > d_2$ ), kan de lengte van de verdrongen watersprong ( $L_w$ ) worden berekend aan de hand van volgende formulering:

$$\frac{L_w}{d_2} = 6,1 + 4,9 \cdot S_j \quad (\text{Vischer \& Hager, 1995}) \quad [22]$$

Met:

- $L_w$  Lengte verdrongen watersprong [m]
- $S_j$  Verdrinkingsgraad  $S_j = (d_a/d_2) - 1$  voor  $S_j > 0$  [-]
- $d_a$  Waterdiepte afwaarts pand [m]

Wu & Rajaratnam (1995) geven een gelijkaardige formule voor de berekening van de lengte van de roller van een verdrongen watersprong:

$$\frac{L_r}{d_2} = 6 + 4,14 \cdot S_j \quad (\text{Wu \& Rajaratnam, 1995}) \quad [23]$$

### 5.3.3 Randvoorwaarden

Vanuit de ontwerpcriteria dient de vispassage optimaal te kunnen werken bij rivierafvoeren tot een debiet dat minder dan 10% wordt overschreden (de zgn.  $Q_{10\%}$ , zie paragraaf 2.2). In principe is er ook een ondergrens waarde ( $Q_{90\%}$ ) maar deze is eerder van belang voor het bepalen van het maximaal toelaatbare vispassagedebiet om een hoog sluitingspercentage bij lage afvoeren te voorkomen. Merk ook op dat de vispassage bij afvoeren hoger dan de  $Q_{10\%}$  open kan blijven. Misschien is de attractiviteit en passeerbaarheid in deze omstandigheden voor sommige soorten minder optimaal, de vispassage kan altijd nog dienst doen als migratieweg.

Op basis van de metingen werd vastgesteld dat de  $Q_{10\%}$  tussen circa 13 en 25 m<sup>3</sup>/s ligt, afhankelijk van de locatie langs de Dender, zie paragraaf 3.4. Voor het bepalen van de ligging van de watersprongzone in de periode voor optimale werking worden daarom berekeningen uitgevoerd voor stuwdebieten tot 30 m<sup>3</sup>/s. De kans van voorkomen voor een bepaald debiet kan steeds worden geschat door het debiet te vergelijken met het histogram uit Tabel 10. Merk op dat ook rekening zou kunnen worden gehouden met het deel van de afvoer dat via de vispassage zou gaan, door het lokstroomdebiet af te trekken van de totale afvoer. Op deze wijze wordt dan het werkelijke debiet bekomen dat in de betreffende situatie over de stuwen zou gaan.

De afwaartse bodemhoogte ( $H_{ba}$ ) en het totale hydraulische verval bij streefpeilen ( $dH_s$ ) verschillen per locatie, waardoor ook de valhoogte ( $h$ ) en de afwaartse waterdiepte ( $d_a$ ) per locatie verschillen (zie Tabel 23 en Figuur 35). Voor de locatie-overkoepelende watersprongberekeningen wordt daarom gekozen voor het toepassen van de bodemhoogte ten opzichte van de stuwwassen zoals op locatie Denderleeuw (zie Tabel 23). Deze locatie benadert namelijk goed de gemiddelde valhoogte tussen opwaarts streefpeil en afwaarts bodempeil ( $Y_{DL} = 5,16$  m), terwijl de gemiddelde valhoogte over alle locaties  $Y_{gem} = 5,10$  m is. Verwacht wordt dat de effecten van de kleine verschillen in werkelijke valhoogte per locatie klein genoeg zijn om algemene conclusies te kunnen trekken die van nut zijn voor alle locaties.

Aangezien verwacht wordt dat het verschil in afwaartse waterdiepte ( $d_a$ ) wel bepalend is voor de watersprongdimensies worden bij de voornoemde valhoogte  $Y_{DL} = 5,16$  m verschillende afwaartse waterdieptes toegepast in de berekeningen. Uit Tabel 23 kan worden opgemaakt dat de afwaartse waterdiepte bij streefpeil tussen de verschillende locaties varieert van 2,4 m tot 3,63 m. Daarnaast beïnvloeden ook waterpeilfluctuaties de afwaartse waterdiepte. In paragraaf 3.5 werd bepaald dat het afwaartse waterpeil tijdens periode van optimale werking tot 0,20 m kan dalen of tot 0,50 m kan stijgen ten opzichte van streefpeil<sup>4</sup>. Daarom werden berekeningen uitgevoerd bij afwaartse waterdieptes tussen 2 en 4 m, steeds in stappen van 0,5 m.

Om de resultaten te kunnen vergelijken met de waterspronglengtes bij grensdiepte (zie type B in paragraaf 5.3.1) worden ook berekeningen uitgevoerd bij een afwaartse waterdiepte gelijk aan de grensdiepte ( $d_a = d_2$ ).

Hoewel waterpeilfluctuaties ook het opwaartse waterpeil beïnvloeden (en daarmee (licht) de valhoogte  $Y$ ) wordt verwacht dat de invloed hiervan bij hetzelfde overstortdebiet gering zal zijn. Daarom worden met oog op het opwaartse waterpeil enkel berekeningen uitgevoerd bij streefpeil, m.a.w. een opwaartse waterdiepte van 4 m boven de stuwwassen, zie ook Figuur 35.

Tabel 24 geeft een overzicht van de hydraulische randvoorwaarden/scenario's die werden toegepast in de locatie-overkoepelende watersprongberekeningen. Hierbij wordt opgemerkt dat (zoals eerder vermeld) in de berekeningen geen rekening wordt gehouden met het tussenplateau net afwaarts van de stuwen. De valhoogte is dus conservatief bepaald ten opzichte van het afwaartse bodempeil. Vergelijk hiervoor de waarde  $H_p$  uit Figuur 35 met de vereenvoudigde configuratie zoals toegepast in de berekeningen in Figuur 38.

<sup>4</sup> Merk op dat stijging van het afwaartse waterpeil in principe optreedt bij hogere afvoeren, vanwege de toename van het verhang in het betreffende pand.

Tabel 24 – Hydraulische randvoorwaarden watersprongberekeningen

Debiet over de stuw [m <sup>3</sup> /s]	Afwaartse waterdiepte [m]
30	Bij $d_a = 2,0 - 2,5 - 3,0 - 3,5 - 4,0$ en bij $d_a = d_2$
25	
20	
15	
10	
5	
3	
1	
0,5	

Aangezien voor elk van de afzonderlijke locaties de afwaartse waterdiepte gekend is en ook het bovengrensdebiet ( $Q_{10\%}$ ) via interpolatie benaderd kon worden (zie Tabel 11), zijn naast de algemene berekeningen ook berekeningen uitgevoerd voor elke locatie afzonderlijk bij de bovengrenssituatie ( $Q_{10\%}$ ) en afwaarts streefpeil. Dit geeft voor elk van de locaties een indicatie van de verst mogelijke ligging van het einde van de watersprong tijdens de periode van optimale werking.

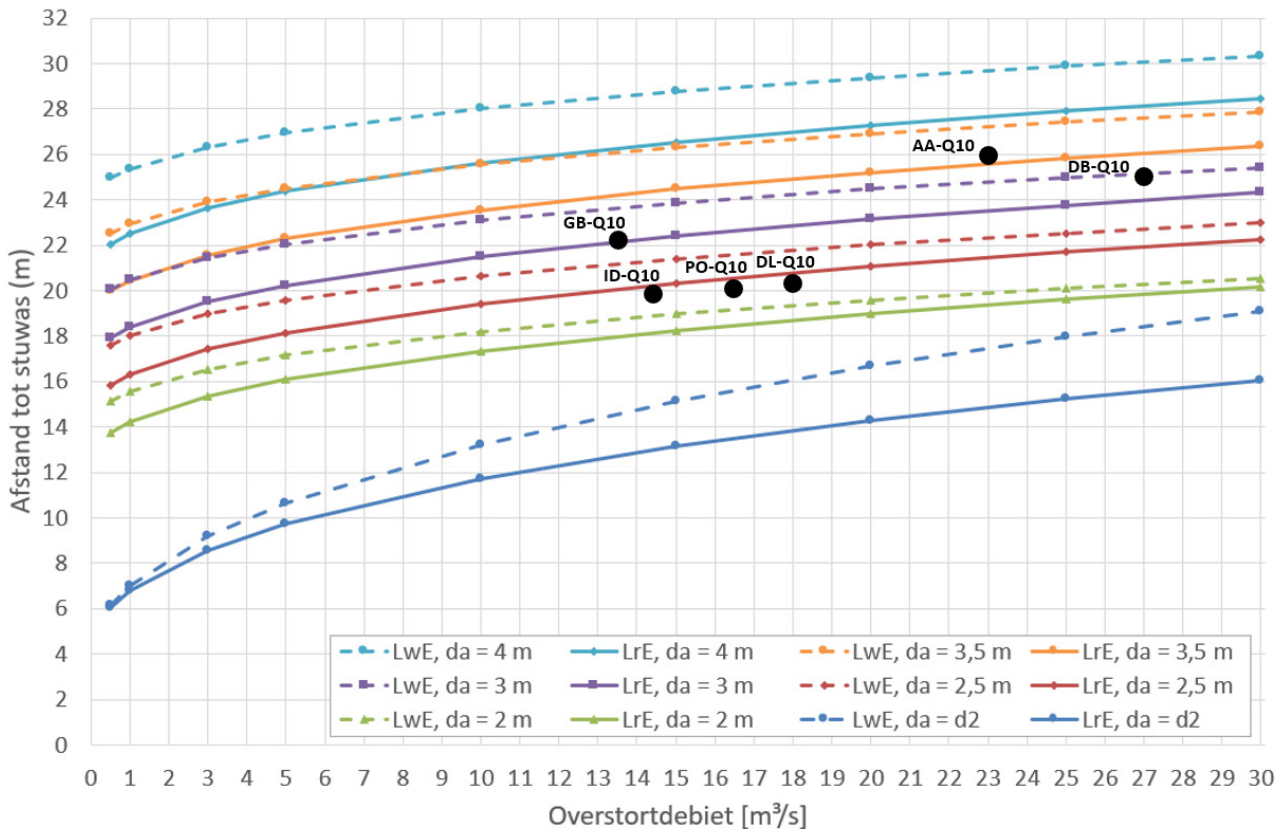
Tabel 25 geeft de hydraulische randvoorwaarden voor het bovengrensscenario ( $Q_{10\%}$ ) voor elk van de locaties.

Tabel 25 – Hydraulische randvoorwaarden watersprongberekening bovengrensscenario per locatie

Omschrijving	Parameter	Eenheid	GB	ID	PO	DL	AA	DB
Opwaarts streefpeil	Ho-sp	[mTAW]	16,85	15,23	12,88	10,37	7,61	5,83
Afwaarts streefpeil	Ha-sp	[mTAW]	15,23	12,88	10,37	7,61	5,83	3,45
Afwaarts bodempeil	Hba	[mTAW]	12,20	10,48	7,97	5,21	2,20	0,14
<b>Afwaartse waterdiepte</b>	<b>da</b>	<b>[m]</b>	<b>3,03</b>	<b>2,40</b>	<b>2,40</b>	<b>2,40</b>	<b>3,63</b>	<b>3,31</b>
Valhoogte tov opw streefpeil	Y	[m]	4,65	4,75	4,91	5,16	5,41	5,69
<b>Debiet</b>	<b>Q10%</b>	<b>[m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>13,60</b>	<b>14,50</b>	<b>16,31</b>	<b>18,12</b>	<b>22,63</b>	<b>26,63</b>

#### 5.3.4 Resultaten

Figuur 39 toont de resultaten van de locatie-overkoepelende berekening van het einde van de watersprong en roller binnen de afvoerrange van de periode van optimale werking (m.a.w. tot 30 m<sup>3</sup>/s) bij verschillende afwaartse waterdieptes. Tabel 26 toont de resultaten voor de bijhorende maatgevende parameters. Daarnaast geeft Tabel 27 de resultaten voor elk van de afzonderlijke locaties bij de bovengrensafvoer van de periode voor optimale werking en op- en afwaarts streefpeil. Het einde van de roller t.o.v. de stuwas wordt voor deze resultaten ook visueel weergegeven met de zwarte stippen in Figuur 39.



Figuur 39 – Berekend einde van de watersprong ( $L_{wE}$ ) en roller ( $L_{rE}$ ) bij de beschouwde debieten en afwaartse waterdieptes

De donkerblauwe grafiek in Figuur 39 geeft de theoretische grenssituatie tussen verdrongen en vrije watersprong weer (zie Type B in paragraaf 5.3.1). De vijf maatgevende scenario's voor het afwaartse waterpeil zijn weergegeven in de andere kleuren. De grafieken in de volle lijnen tonen steeds het einde van de roller t.o.v. de stuwas ( $L_{rE}$ ), en de grafieken in stippellijn het einde van de watersprong t.o.v. de stuwas ( $L_{wE}$ ).

Het eerste wat opgemerkt kan worden in de resultaten is dat alle maatgevende scenario's zich bevinden in het stromingstype van een verdrongen watersprong (zie type C in paragraaf 5.3.1).

Vervolgens kan worden vastgesteld dat het einde van de roller niet veel verschilt van het einde van de watersprong in het geval van de verdrongen watersprong. Dit kon echter al opgemaakt worden uit het feit dat deze formules maar beperkt verschillen.

Maar wat met oog op deze studie vooral opvalt is dat de invloed van het debiet op de lengte van de watersprong relatief klein is, terwijl de invloed van de afwaartse waterdiepte relatief groot is. De vraag is alleen of dit in werkelijkheid ook zo is of dat dit veroorzaakt wordt door de grenzen van de toepasbaarheid van de betreffende formule voor een verdrongen watersprong. Het einde van de roller bij een debiet van slechts  $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$  wordt bijvoorbeeld berekend op een afstand van 14 tot 22 m uit de stuwen, wat een onrealistisch lange afstand lijkt.



Hierbij wordt opgemerkt dat de formules voor de berekening van de lengte van de verdrongen watersprong en roller (zie Formules [22] en [23]) de enige rekenmethodes uit de literatuur zijn die bekend zijn bij de auteurs. Er worden op basis van de resultaten echter twee onzekerheden bij de toepassing van deze formules<sup>5</sup> geconstateerd:

- De toepasbaarheid van de formules met oog op de grootte van de *verdrinkingsgraad*  $S_f$  is nog onduidelijk, mogelijk is deze methode voor een bepaalde verhouding tussen debiet en afwaartse waterdiepte ( $d_1/d_2$ ), niet meer geldig;
- De formules werden destijds opgesteld voor een verdrongen watersprong bij onderstroom onder een schuif. Het is niet geweten of de formules onveranderd mogen worden toegepast voor een verdrongen watersprong bij een 'drop structure'. Daarbij kan  $d_1$  *namelijk niet meer als een 'gekende' parameter* beschouwd worden, maar is deze (allicht) afhankelijk van de mate van dissipatie in de afwaartse waterkolom (Egea, 2015).

Vanuit het oogpunt van waterbouwkundig onderzoek wordt daarom sterk **aanbevolen om de rekenmethodiek voor verdrongen watersprongen te valideren en/of te optimaliseren** met behulp van schaalmodelonderzoek en/of terreinmetingen.

Met oog op de bepaling van de migratielimietlijn moet waarschijnlijk ook onderscheid gemaakt worden tussen enerzijds vrije en beperkt verdrongen watersprongen en anderzijds sterk verdrongen watersprongen. In het geval van vrije en licht verdrongen watersprongen kan de migratielimietlijn gelijk gekozen worden aan het einde van de roller (en/of watersprong), maar in het geval van sterk verdrongen watersprongen kunnen stroomsnelheden en turbulentie in het afwaartse deel van de 'watersprong' mogelijk laag genoeg zijn voor vissen om wel langs te kunnen passeren. In een vrije watersprong worden superkritische hoge stroomsnelheden op relatief korte afstand 'omgezet' naar lagere subkritische stroomsnelheden. In sterk verdrongen watersprongen is deze energiedissipatie minder 'efficiënt' en wordt het 'omzetten' van deze hogere stroomsnelheden over een langere afstand uitgespreid.

Daarnaast is het, voor het bepalen van de meeste optimale locatie van de monding, ook van belang om te kijken naar de verhouding in momentum van de twee stromen in kwestie, namelijk de stroming afwaarts van de stuwen ten opzichte van de uitstroom van de vispassage zelf. Mogelijk kan deze laatste door het toekennen van een voldoende groot lokstroomdebiet en een optimale vormgeving van de uitstroom (mond) voldoende concurreren met de turbulente uitstroom van de stuwen. Hierdoor zou er een sterke lokstroom gerealiseerd kunnen worden welke de negatieve effecten van de turbulentie afwaarts van de stuwen buiten deze lokstroom houdt en zo reikt tot voorbij de turbulente zone van de stuwoverstort. Dit laatste zal besproken worden in de variantenstudie in de volgende paragraaf.

---

<sup>5</sup> Momenteel wordt voorzien om deze onzekerheden/vragen in een vervolgstudie te onderzoeken door middel van schaalmodelproeven en numerieke modellering, dit kan dus niet meer in de onderhavige studie worden ondervangen.

Tabel 26 – Resultaten watersprongberekeningen

omschrijving	eenheid	parameter	Overstortdebiet [m³/s]								
			0,5	1,0	3,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0
Afwaartse waterdiepte	[m]	da	0,20	0,29	0,53	0,69	1,00	1,24	1,43	1,61	1,77
Hoogte stuwklep	[m]	hk	3,93	3,89	3,77	3,68	3,49	3,33	3,19	3,05	2,93
Waterdiepte boven klep (Ho-Hk)	[m]	do	0,07	0,11	0,23	0,32	0,51	0,67	0,81	0,95	1,07
Debietscoëfficiënt klep	[-]	Cs	1,97	1,97	1,97	1,96	1,96	1,95	1,94	1,94	1,94
Overstortdebiet per strekende meter	[m²/s]	q	0,04	0,07	0,21	0,36	0,71	1,07	1,43	1,79	2,14
Kritische waterhoogte	[m]	dc	0,05	0,08	0,17	0,24	0,37	0,49	0,59	0,69	0,78
Valhoogte	[m]	h	3,93	3,89	3,77	3,68	3,49	3,33	3,19	3,05	2,93
Dropfactor (Rand; Chanson)	[-]	dc/h	0,01	0,02	0,03	0,05	0,08	0,11	0,14	0,16	0,19
Lengte vallende straal (Chanson)	[m]	Ld	0,98	1,25	1,81	2,15	2,69	3,04	3,31	3,53	3,71
Waterdiepte voor watersprong (Rand)	[m]	d1	0,01	0,01	0,04	0,06	0,10	0,14	0,18	0,23	0,27
Stroomsnelheid voor watersprong	[m/s]	v1	4,64	5,14	6,02	6,46	7,09	7,46	7,72	7,92	8,07
Froudegetal voor watersprong	[-]	Fr1	16,88	13,90	10,18	8,77	7,13	6,29	5,73	5,32	5,00
Toegevoegde waterhoogte na sprong (Rand)	[m]	d2	0,20	0,29	0,53	0,69	1,00	1,24	1,44	1,61	1,77
<b>Vrije watersprong (da = d2)</b>											
Lengte roller (Hager)	[m]	Lr	0,75	1,17	2,25	2,99	4,31	5,27	6,04	6,68	7,22
Lengte roller (Chanson)	[m]	Lr	0,95	1,38	2,47	3,22	4,54	5,50	6,26	6,90	7,44
<b>Einde roller t.o.v. stuwas (Chanson)</b>	<b>[m]</b>	<b>LrE</b>	<b>6,06</b>	<b>6,79</b>	<b>8,56</b>	<b>9,72</b>	<b>11,73</b>	<b>13,17</b>	<b>14,31</b>	<b>15,24</b>	<b>16,04</b>
Lengte vrije watersprong (Rand)	[m]	Lw	1,17	1,68	2,96	3,83	5,40	6,56	7,51	8,31	9,01
Lengte vrije watersprong (Hager)	[m]	Lw	1,05	1,61	3,09	4,13	6,02	7,45	8,62	9,63	10,51
<b>Einde vrije watersprong t.o.v. stuwas (Hager)</b>	<b>[m]</b>	<b>LwE</b>	<b>6,16</b>	<b>7,03</b>	<b>9,18</b>	<b>10,63</b>	<b>13,22</b>	<b>15,12</b>	<b>16,66</b>	<b>17,97</b>	<b>19,11</b>
<b>da = 2,0 m</b>											
Verdrinkingsgraad watersprong (Rajaratnam)	[-]	Sj	8,90	5,82	2,79	1,88	1,00	0,62	0,39	0,24	0,13
Lengte roller (Wu & Rajaratnam)	[m]	Lr	8,66	8,83	9,26	9,57	10,14	10,58	10,95	11,28	11,57
<b>Einde roller t.o.v. stuwas</b>	<b>[m]</b>	<b>LrE</b>	<b>13,77</b>	<b>14,24</b>	<b>15,35</b>	<b>16,07</b>	<b>17,33</b>	<b>18,25</b>	<b>18,99</b>	<b>19,62</b>	<b>20,17</b>
Lengte verdrongen watersprong (Rajaratnam)	[m]	Lws	10,04	10,15	10,43	10,63	11,00	11,28	11,52	11,73	11,92
<b>Einde verdrongen watersprong t.o.v. stuwas</b>	<b>[m]</b>	<b>LwsE</b>	<b>15,15</b>	<b>15,57</b>	<b>16,52</b>	<b>17,13</b>	<b>18,19</b>	<b>18,96</b>	<b>19,56</b>	<b>20,08</b>	<b>20,52</b>
<b>da = 2,5 m</b>											
Verdrinkingsgraad watersprong (Rajaratnam)	[-]	Sj	11,38	7,53	3,73	2,61	1,50	1,02	0,74	0,55	0,41
Lengte roller (Wu & Rajaratnam)	[m]	Lr	10,73	10,90	11,33	11,64	12,21	12,65	13,02	13,35	13,64
<b>Einde roller t.o.v. stuwas</b>	<b>[m]</b>	<b>LrE</b>	<b>15,84</b>	<b>16,31</b>	<b>17,42</b>	<b>18,14</b>	<b>19,40</b>	<b>20,32</b>	<b>21,06</b>	<b>21,69</b>	<b>22,24</b>
Lengte verdrongen watersprong (Rajaratnam)	[m]	Lws	12,49	12,60	12,88	13,08	13,45	13,73	13,97	14,18	14,37
<b>Einde verdrongen watersprong t.o.v. stuwas</b>	<b>[m]</b>	<b>LwsE</b>	<b>17,60</b>	<b>18,02</b>	<b>18,97</b>	<b>19,58</b>	<b>20,64</b>	<b>21,41</b>	<b>22,01</b>	<b>22,53</b>	<b>22,97</b>
<b>da = 3,0 m</b>											
Verdrinkingsgraad watersprong (Rajaratnam)	[-]	Sj	13,86	9,23	4,68	3,33	2,00	1,42	1,09	0,86	0,70
Lengte roller (Wu & Rajaratnam)	[m]	Lr	12,80	12,97	13,40	13,71	14,28	14,72	15,09	15,42	15,71
<b>Einde roller t.o.v. stuwas</b>	<b>[m]</b>	<b>LrE</b>	<b>17,91</b>	<b>18,38</b>	<b>19,49</b>	<b>20,21</b>	<b>21,47</b>	<b>22,39</b>	<b>23,13</b>	<b>23,76</b>	<b>24,31</b>
Lengte verdrongen watersprong (Rajaratnam)	[m]	Lws	14,94	15,05	15,33	15,53	15,90	16,18	16,42	16,63	16,82
<b>Einde verdrongen watersprong t.o.v. stuwas</b>	<b>[m]</b>	<b>LwsE</b>	<b>20,05</b>	<b>20,47</b>	<b>21,42</b>	<b>22,03</b>	<b>23,09</b>	<b>23,86</b>	<b>24,46</b>	<b>24,98</b>	<b>25,42</b>
<b>da = 3,5 m</b>											
Verdrinkingsgraad watersprong (Rajaratnam)	[-]	Sj	16,33	10,94	5,63	4,05	2,50	1,83	1,44	1,17	0,98
Lengte roller (Wu & Rajaratnam)	[m]	Lr	14,87	15,04	15,47	15,78	16,35	16,79	17,16	17,49	17,78
<b>Einde roller t.o.v. stuwas</b>	<b>[m]</b>	<b>LrE</b>	<b>19,98</b>	<b>20,45</b>	<b>21,56</b>	<b>22,28</b>	<b>23,54</b>	<b>24,46</b>	<b>25,20</b>	<b>25,83</b>	<b>26,38</b>
Lengte verdrongen watersprong (Rajaratnam)	[m]	Lws	17,39	17,50	17,78	17,98	18,35	18,63	18,87	19,08	19,27
<b>Einde verdrongen watersprong t.o.v. stuwas</b>	<b>[m]</b>	<b>LwsE</b>	<b>22,50</b>	<b>22,92</b>	<b>23,87</b>	<b>24,48</b>	<b>25,54</b>	<b>26,31</b>	<b>26,91</b>	<b>27,43</b>	<b>27,87</b>
<b>da = 4,0 m</b>											
Verdrinkingsgraad watersprong (Rajaratnam)	[-]	Sj	18,81	12,65	6,57	4,77	3,00	2,23	1,78	1,48	1,26
Lengte roller (Wu & Rajaratnam)	[m]	Lr	16,94	17,11	17,54	17,85	18,42	18,86	19,23	19,56	19,85
<b>Einde roller t.o.v. stuwas</b>	<b>[m]</b>	<b>LrE</b>	<b>22,05</b>	<b>22,52</b>	<b>23,63</b>	<b>24,35</b>	<b>25,61</b>	<b>26,53</b>	<b>27,27</b>	<b>27,90</b>	<b>28,45</b>
Lengte verdrongen watersprong (Rajaratnam)	[m]	Lws	19,84	19,95	20,23	20,43	20,80	21,08	21,32	21,53	21,72
<b>Einde verdrongen watersprong t.o.v. stuwas</b>	<b>[m]</b>	<b>LwsE</b>	<b>24,96</b>	<b>25,37</b>	<b>26,32</b>	<b>26,93</b>	<b>27,99</b>	<b>28,76</b>	<b>29,36</b>	<b>29,88</b>	<b>30,32</b>

Tabel 27 – Resultaten watersprongberekening per locatie bij het bovengrensdebiet ( $Q_{10}$ ) en op- en afwaarts streefpeil

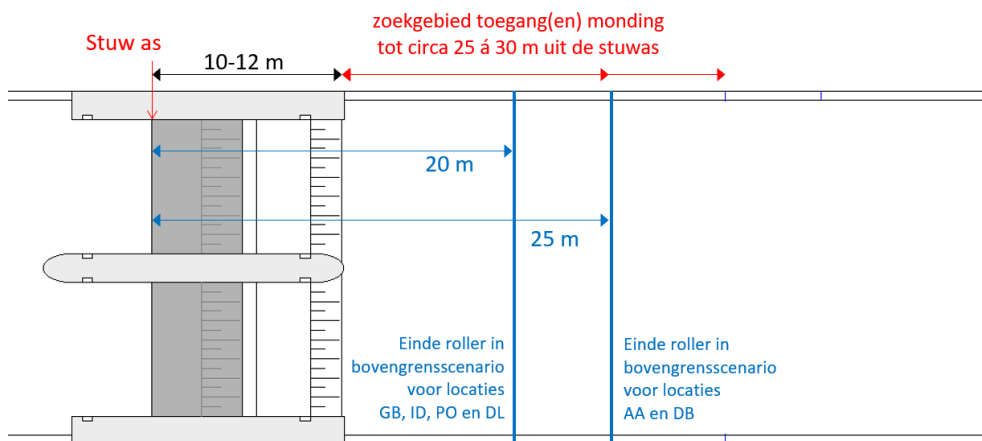
Omschrijving	eenheid	param.	GB-Q10	ID-Q10	PO-Q10	DL-Q10	AA-Q10	DB-Q10
Opwaarts waterpeil	mTAW	Ho	16,85	15,23	12,88	10,37	7,61	5,83
Afwaarts waterpeil	mTAW	Ha	15,23	12,88	10,37	7,61	5,83	3,45
Afwaarts bodempeil	mTAW	Hba	12,20	10,48	7,97	5,21	2,20	0,14
Breedte stuwklep(pen)	m	Bk	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00	15,00
Peilhoogte stuwklepas(sen)	mTAW	Hs	12,85	11,63	8,88	6,37	3,61	1,53
Peilhoogte stuwklep(pen)	mTAW	Hk	16,22	14,57	12,17	9,61	6,73	4,89
Relatieve hoogte klep tov as	m	hk	3,37	2,94	3,29	3,24	3,12	3,36
Waterhoogte opw boven klep	m	h1	0,63	0,66	0,71	0,76	0,88	0,94
Debietcoefficient klep	-	Ck	1,95	1,94	1,95	1,95	1,94	1,95
<b>Overstort debiet (volkomen overlaat)</b>	<b>m<sup>3</sup>/s</b>	<b>Qvrij</b>	<b>13,60</b>	<b>14,50</b>	<b>16,31</b>	<b>18,12</b>	<b>22,63</b>	<b>26,63</b>
Overstort debiet per strekende meter	m <sup>2</sup> /s	q	0,97	1,04	1,16	1,29	1,62	1,78
Kritische waterhoogte	m	dc	0,46	0,48	0,52	0,55	0,64	0,68
Valhoogte	m	h	4,02	4,09	4,20	4,40	4,53	4,75
Dropfactor (Rand; Chanson)	-	dc/h	0,11	0,12	0,12	0,13	0,14	0,14
Lengte klep	m	Lk	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70
Relatieve kleplengte in stroomrichting	m	Lkx	4,60	4,88	4,65	4,69	4,77	4,60
Lengte vallende straal (Chanson)	m	Ld	2,79	2,88	3,04	3,22	3,53	3,73
Waterdiepte voor watersprong (Rand)	m	d1	0,14	0,14	0,16	0,17	0,20	0,22
Stroomsnelheid voor watersprong	m/s	v1	7,14	7,24	7,42	7,63	7,96	8,18
Froudegetal voor watersprong	-	Fr1	6,17	6,11	5,98	5,92	5,63	5,60
Waterdiepte na watersprong (Rand)	m	d2	1,15	1,19	1,28	1,36	1,55	1,64
<b>Afwaartse waterdiepte</b>	<b>m</b>	<b>da</b>	<b>3,03</b>	<b>2,40</b>	<b>2,40</b>	<b>2,40</b>	<b>3,63</b>	<b>3,31</b>
Verdrinkingsgraad watersprong	-	Sj	1,64	1,01	0,88	0,76	1,35	1,01
Lengte roller verdrongen watersprong	m	Lrs	14,68	12,16	12,31	12,47	17,91	16,76
Lengte verdrongen watersprong	m	Lws	16,23	13,19	13,29	13,40	19,64	18,19
<b>Einde roller verdrongen watersprong</b>	<b>m</b>	<b>Lwsr-E</b>	<b>22,07</b>	<b>19,92</b>	<b>20,00</b>	<b>20,39</b>	<b>26,21</b>	<b>25,09</b>
Einde verdrongen watersprong	m	Lws-E	23,61	20,95	20,98	21,31	27,95	26,52

Op basis van de resultaten van de literatuurberekeningen kan het volgende worden vastgesteld voor de stuwsuiscomplexen op de Dender (zie ook de zwarte punten in Figuur 39):

- Voor locaties ID, PO en DL (alle met een afwaartse waterdiepte van 2,4 m bij streefpeil) ligt het einde van de turbulente watersprongzone op circa 20 m uit de stuwassen in de bovengrenssituatie voor optimale werking ( $Q_{10\%}$ ).
- Voor locaties AA en DB (beide met een afwaartse waterdiepte van circa 3,5 m bij streefpeil) ligt het einde van de turbulente watersprongzone op circa 25 m uit de stuwassen in de bovengrenssituatie voor optimale werking ( $Q_{10\%}$ ).
- Locatie GB wijkt qua resultaten af van de andere locaties vanwege de combinatie van een relatief grotere afwaartse waterdiepte (circa 3 m bij streefpeil) en een relatief lager bovengrensdebiet (meest opwaarts gelegen). Daarom wordt voorgesteld om deze locatie wat betreft de schatting van het einde van de watersprongzone te scharen onder locaties ID, PO en DL.
- Zoals eerder aangegeven gaven de resultaten bij de lagere overstortdebieten in combinatie met de relatief grotere afwaartse waterdiepte (lees: hoge waarde voor de verdrinkingsgraad  $S_j > 2$ , zie Tabel 26), allicht onrealistische resultaten. Verwacht wordt dat voor de bepaling van de migratielimietlijn in het ondergrensscenario van optimale werking daarom best wordt uitgegaan van de stuwen zelf als migratielimietlijn. Dit betekent dat het einde van de stuwmuur (op circa 10 tot 12 m uit de stuwas) als ondergrens kunnen worden aangehouden.

Figuur 40 toont de zoekgebieden voor de locatie van de parallelle monding op basis van de bovenstaande vaststellingen. Merk op dat de berekende lijn van het einde van de roller in de figuur steeds het bovengrensscenario betreft en dat bij lagere debieten de migratielimietlijn dichter aan de stuwen zal liggen.

Voor het ontwerp worden er best toegangen voorzien tussen het einde van de stuwmuur (op circa 10 m uit de stuwassen, zie paragraaf 5.2) en het berekende einde van de roller op de betreffende locatie. Merk ook op dat de meest afwaartse ingang naar de vispassage iets verder afwaarts dient te liggen dan het einde van de migratielimietlijn in het bovengrensscenario. Nu is daar conservatief een afstand van circa 5 m aangehouden. De rode pijlen geven het zoekgebied voor de twee locatiegroepen.



Figuur 40 – Indicatie zoekgebied toegang(en) parallelle monding op basis van berekening einde roller

## 5.4 Locatie en vormgeving

Zoals vermeld wordt aangenomen dat de migratielimietlijn in het geval van de stuwen op de Dender gelijk gesteld kan worden aan het einde van de watersprongzone afwaarts van de stuwen. Aangezien de ligging en lengte van de watersprong varieert met de grootte van het debiet over de stuwen, varieert ook de ligging van de migratielimietlijn en kan er dus eerder gesproken worden van een migratielimietzone. De op- en afwaartse grenzen van deze zone worden bepaald door de volgende twee zaken (zie Figuur 40 ook voorgaande paragraaf):

- Opwaartse grens wordt gelijk gesteld aan de stuwen. Bij zeer lage afvoeren kunnen vissen tot aan de stuw zwemmen. De eerste mogelijke ingang naar de monding wordt daarom best gekozen aan het einde van de zijwanden van de stuwen. Afhankelijk van de locatie ligt deze op circa 10 tot 12 meter uit de stuwassen.
- Afwaarts grens wordt gelijk gesteld aan het einde van de watersprongzone die minder dan 10% van de tijd wordt overschreden ( $Q_{10\%}$ ). Deze ligging werd (voor elk van de locaties) bepaald in de voorgaande paragraaf, en ligt voor locaties GB, ID, PO en DL op circa 20 m uit de stuwassen en voor locaties AA en DB op circa 25 m uit de stuwassen.

De toegang naar de vispassage (=mondning) dient in deze zone voorzien te worden. Waarbij voorgesteld wordt om per locatie het begin van de meest afwaartse mondingsopening altijd de laten beginnen op circa 5 m vanaf de verste migratielimietlijn.

In het geval van de Dendervispassages kan de uitstroom van de nieuwe vispassages direct naast de stuwen worden voorzien waardoor een zo parallel mogelijke uitstroom gerealiseerd kan worden. Echter dient hierbij onderzocht te worden of de lokstroom bij de verschillende overstortdebieten (en dus waterspronglengtes) tijdens de periode van optimale werking verstoord wordt door de turbulentie van de stuwoverstort. In de volgende paragrafen worden de resultaten van een (schaalmodel)studie beschreven waarbij gezocht werd naar het meest optimale ontwerp voor de monding gegeven de bovenstaande uitgangspunten en de ontwerpcriteria uit paragraaf 2.4.4.

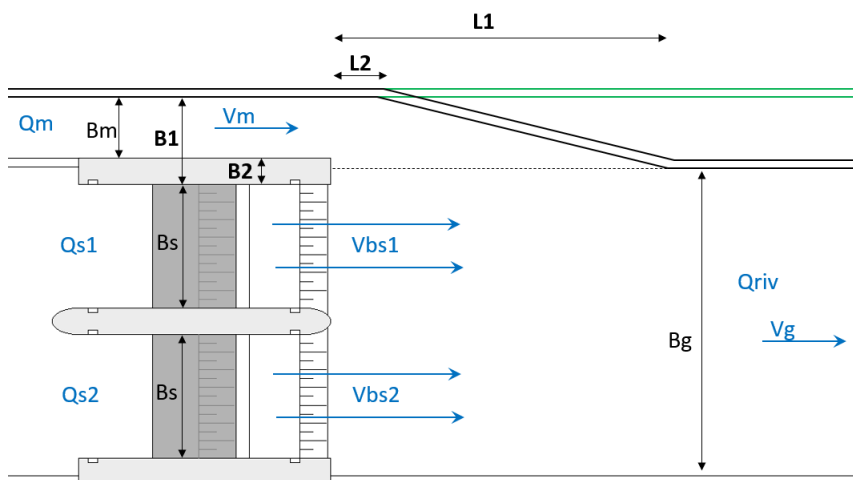
Hierbij wordt eerst gekeken naar de stroompatronen bij een parallelle monding zonder verdere maatregelen (zoals bijv. geleidingswanden). Dit is de zogenaamde basisvariant die het vertrekpunt vormt. Vervolgens wordt in een variantenstudie gezocht naar het meest optimale 'algemene' ontwerp voor de parallelle monding van de toekomstige vispassages op de Dender. Met 'algemeen ontwerp' wordt een vormgeving bedoeld die toepasbaar is op alle locaties en kan dienen als vertrekpunt voor de ruimtelijke inpassing op elk van de locaties.

### 5.4.1 Vertrekpunt (basisvariant)

Als vertrekpunt voor de studie wordt uitgegaan van een vrije uitstroom voor de vispassage zonder verdere maatregelen (als bijv. geleidingswanden). Figuur 41 toont de dimensionering van deze basisvariant. Hierbij kunnen twee hoofdtypen worden onderscheiden:

- Parallele monding met terugbuigende oeverwand naar een stuwgeulbreedte gelijk aan de stuwen + dikte tussenmuur stuwen (zie zwarte oeverlijnen in Figuur 41);
- Parallele monding zonder terugbuigende oeverwand, de stuwgeulbreedte is daarbij gelijk aan de stuwen + dikte tussenmuur + de breedte van de uitstroom van de vispassage (zie groene oeverlijnen in Figuur 41). Merk op dat onder dit type ook situaties kunnen vallen waarbij de oeverwand relatief ver afwaarts van de stuwen terugbuigt naar de normale stuwgeulbreedte.

Het deel van de monding naast de stuwen en afwaarts van de vispassagebekkens wordt het mondingskanaal genoemd.



Figuur 41 – Basisvariant (vertrekpunt) parallelle monding met enkele maatgevende parameters

In Figuur 41 zijn enkele maatgevende parameters aangeduid:

- $Q_m$  = lokstroomdebiet [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
- $Q_{s1}$  en  $Q_{s2}$  = debiet over respectievelijk stuw 1 en stuw 2 [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
- $Q_{riv}$  = totale afvoer op de rivier [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
- $B_1$  = relatieve breedte uitstroom monding tov stuwstroom [m]
- $B_2$  = breedte stuwmuur/ kortste afstand tussen monding en stuwstroom [m]
- $B_m$  = breedte uitstroom monding [m]
- $B_g$  = breedte afwaartse stuwgeul [m]
- $V_m$  = gemiddelde stroomsnelheid in mondingskanaal =  $Q_m / (B_m \cdot d_a)$  [m/s]
- $V_g$  = gemiddelde stroomsnelheid in de afwaartse stuwgeul =  $Q_{riv} / (B_g \cdot d_a)$  [m/s]
- $L_1$  = lengte parallelle monding [m]
- $L_2$  = lengte begin terug buiging naar stuwgeuloever [m]

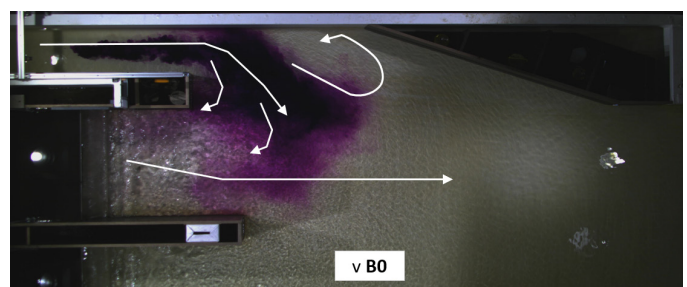
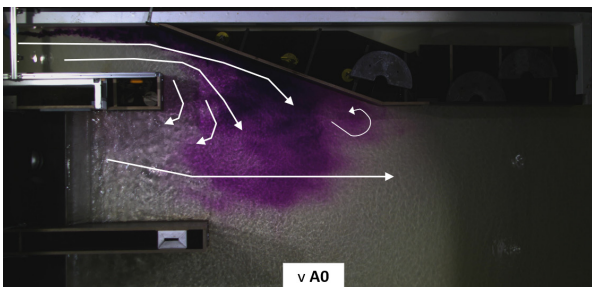
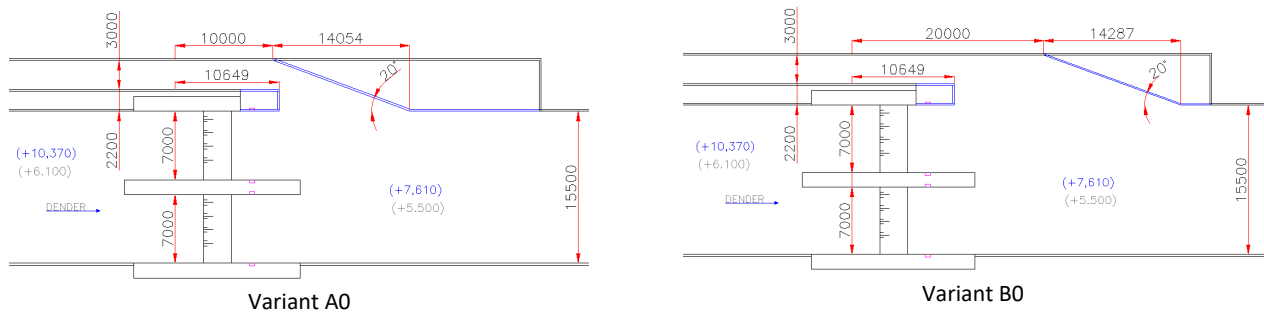
In 2016 werden enkele verkennende schaalmodelproeven uitgevoerd voor het ontwerp van de parallelle monding van de vispassage te Denderleeuw (schaal 1:10). In Bijlage D – Schaalmodel is een korte beschrijving van het schaalmodel gegeven.

Figuur 42 toont het grondplan van het (basis)model, luchtfoto's van het schaalmodel en de waargenomen stroompatronen bij twee maatgevende hydraulische scenario's. Deze twee scenario's betreffen het bovengrensscenario voor optimale werking ( $Q_{10\%}$ ) en het mediane scenario ( $Q_{50\%}$ ). Voor locatie Denderleeuw werden deze bepaald op:

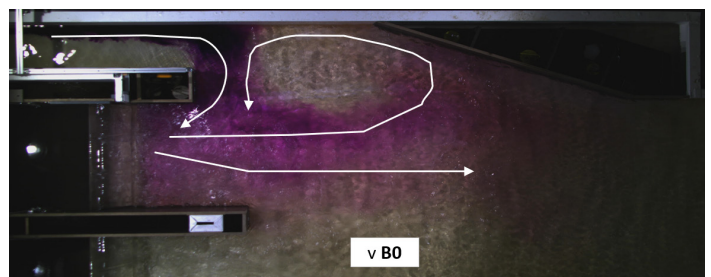
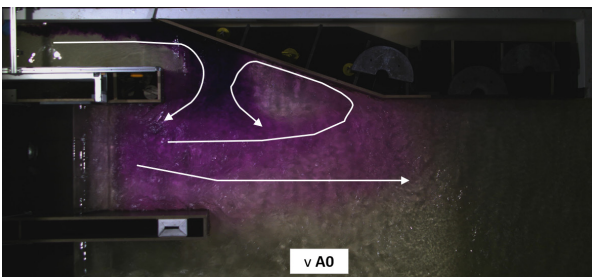
- Scenario  $Q_{10\%} \rightarrow Q_{st} = Q_{s1} + Q_{s2} = 15,8 \text{ m}^3/\text{s} \rightarrow$  klepstand stuw op 9,68 mTAW ( $h_1 = 0,69 \text{ m}$ );
- Scenario  $Q_{50\%} \rightarrow Q_{st} = Q_{s1} + Q_{s2} = 3,3 \text{ m}^3/\text{s} \rightarrow$  klepstand stuw op 10,13 mTAW ( $h_1 = 0,24 \text{ m}$ ).

Het vispassagedebiet werd in beide scenario's gekozen op  $Q_m = 2 \text{ m}^3/\text{s}$  en de uitstroom had een breedte van 3 m, wat een gemiddelde stroomsnelheid in het mondingskanaal van 0,3 m/s gaf. In beide scenario's werd het opwaarts streefpeil (10,37 mTAW) en afwaarts streefpeil (7,61 mTAW) toegepast. Tijdens de uitvoering van deze proeven werd in het ontwerp van de stuwen te Denderleeuw nog gekozen voor het (huidige) bodempeil van 5,50 mTAW, waardoor er bij afwaarts streefpeil van 7,61 mTAW een waterdiepte ontstaat van circa 2,1 m. Het uiteindelijke bodempeil voor de nieuwe situatie werd lager gekozen op 5,21 mTAW, vanwege de standaard minimale diepte van 2,4 m voor scheepvaart op de Dender opwaarts van Aalst.

In geval van basisvariant A0 buigt de oeverwand afwaarts van de monding direct terug af naar de ‘normale’ stuwgeulbreedte. Dit punt wordt bereikt op een afstand van circa 24 m uit de stuwassen. In geval van basisvariant B0 buigt de oeverwand pas op een afstand van 20 m uit de stuwassen (= circa 10 m afwaarts van de monding) terug af naar de normale stuwgeulbreedte die in dit geval dan bereikt wordt op een afstand van circa 34 m uit de stuwassen. Deze variant kan daarom beschouwd worden als de ‘groene’ geometrie uit Figuur 41.



$$Q_{st} = 3,3 \text{ m}^3/\text{s} (Q_{50\%}) \text{ en } Q_m = 2 \text{ m}^3/\text{s}$$



$$Q_{st} = 15,8 \text{ m}^3/\text{s} (Q_{10\%}) \text{ en } Q_m = 2 \text{ m}^3/\text{s}$$

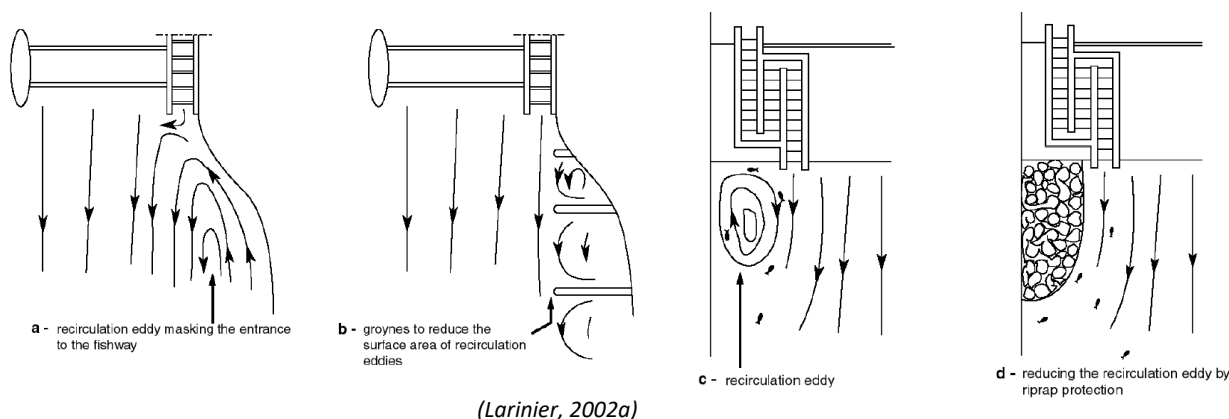
Figuur 42 – Resultaten schaalmodelstudie basisvariant parallelle monding bij een lokstroomdebiet van 2 m<sup>3</sup>/s

Uit de resultaten van Figuur 42 kan het volgende opgemaakt worden:

- Bij het bovengrens scenario ( $Q_{10\%}$ ) ontstaat bij beide varianten een grote zijdelingse neer die de ingang naar de vispassage volledig afschermt. Het volledige lokstroomdebiet wordt daarbij in de watersprong ‘gezogen’.
- Bij het mediane scenario ( $Q_{50\%}$ ) ontstaat dezelfde neer bij variant B0, alleen nu in een iets kleinere omvang.

Zoals aangegeven in paragraaf 2.3.4 (criteria en richtlijnen attractiviteit) is het van belang om verwarrende stroompatronen, zoals recirculatieneren die de monding afschermt, te voorkomen, zeker als ze zich voordoen over de volledige ingang naar de vispassage.

Figuur 43 toont enkele mogelijke maatregelen uit Larinier (2002a) om dergelijke neren te voorkomen. Het stroompatroon zoals geobserveerd in de schaalmodelresultaten van Figuur 42 lijkt overeen te komen met het linker voorbeeld in de figuur (zie 'a'). Maar uit de voorgestelde oplossingsmaatregel blijkt echter dat ervan uitgegaan wordt dat dit stroompatroon veroorzaakt wordt door de abrupte verwijding links naast de vispassage uitstroom (kijkend in stroomrichting). Een dergelijke verwijding is bij de basisvarianten uit de schaalmodelstudie niet aanwezig.

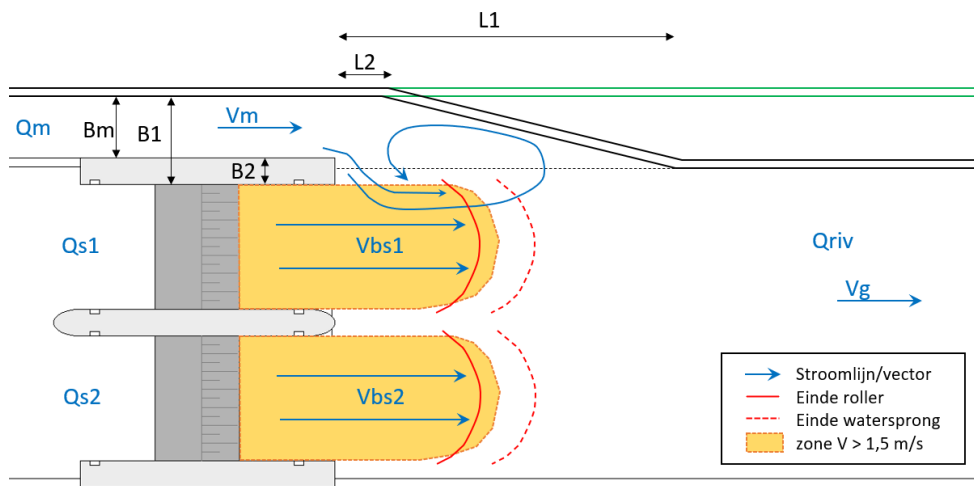


Figuur 43 – Voorbeelden om negatieve recirculatieneren ter plaatse van de monding te voorkomen

Figuur 44 geeft een schematisch beeld van het algemene stroompatroon bij de basisvarianten zoals waargenomen in de schaalmodelproeven. Dit algemene stroompatroon lijkt vooral veroorzaakt te worden door de volgende aspecten:

- De uitstroom van de vispassage zelf vormt een soort abrupte verwijding ten opzichte van de hoofdstroom van de stuwen met relatief hogere stroomsnelheden (aan de bodem). De mate van verwijding wordt vooral bepaald door de parameters  $B_1$  (en  $B_2$ ),  $L_1$  en  $L_2$ ;
- De lokstroom uit de vispassage is niet sterk genoeg om deze recirculatieneren als het ware weg te duwen. M.a.w. het momentum verbonden aan de gemiddelde stroomsnelheid vanuit de vispassage is te laag in verhouding tot het momentum in de stuwgeul welke verbonden is aan de gemiddelde stroomsnelheid vanuit de stuwen. De sterkte van de lokstroom ( $V_m$ ) wordt vooral bepaald door de grootte van het lokstroomdebiet ( $Q_m$ ) in combinatie met de natte doorstroomsectie van het mondingskanaal (vooral bepaald door de breedte  $B_m$ ).
- Mogelijk wordt dit effect (aan het wateroppervlak) nog versterkt doordat er bij een watersprong in het bovenste deel van de waterkolom een terugstroom ontstaat naar de vallende straal (de zgn. roller), zie ook stroomtype C in Figuur 37.

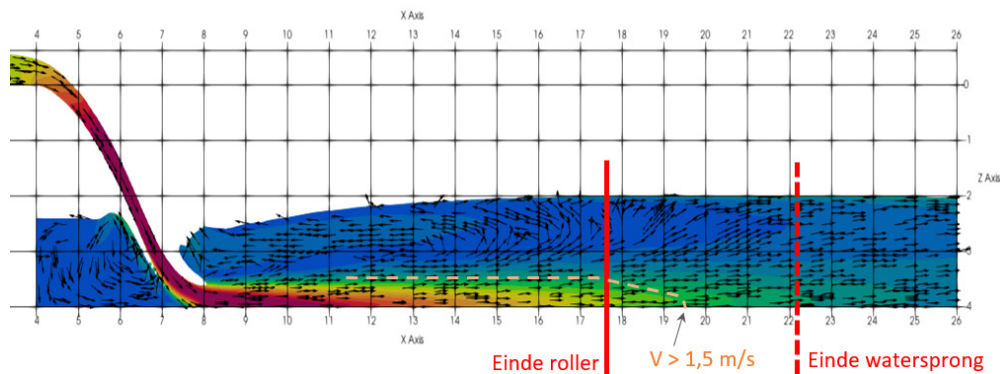




Figuur 44 – Schematische weergave stroompatroon in onderste deel van de waterkolom bij de basisvarianten

Bij bovengenoemde punten dient ook zeker rekening te worden gehouden met het 3D-beeld van dit stroompatroon. Zoals in het derde punt al werd aangegeven is er ter plaatse van de watersprong (over een bepaalde afstand) sprake van een terugstroom aan het wateroppervlak. In Figuur 45 werd daarom een schetsmatige lengte doorsnede toegevoegd. Met oog op de migratielinielij zijn drie maatgevende lijnen aangeduid die ook terugkomen in het bovenaanzicht in Figuur 44:

- Einde roller (rode lijn);
- Einde watersprong (rode stippellijn);
- Maximale sprintsnelheid (oranje stippellijn).

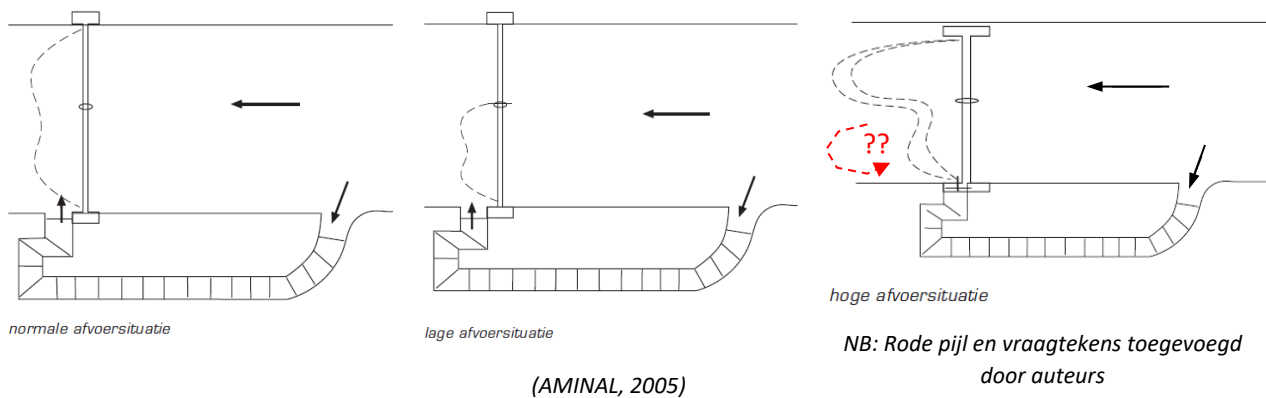


Figuur 45 – Schematische lengtedoorsnede watersprong bij stuwoverstort

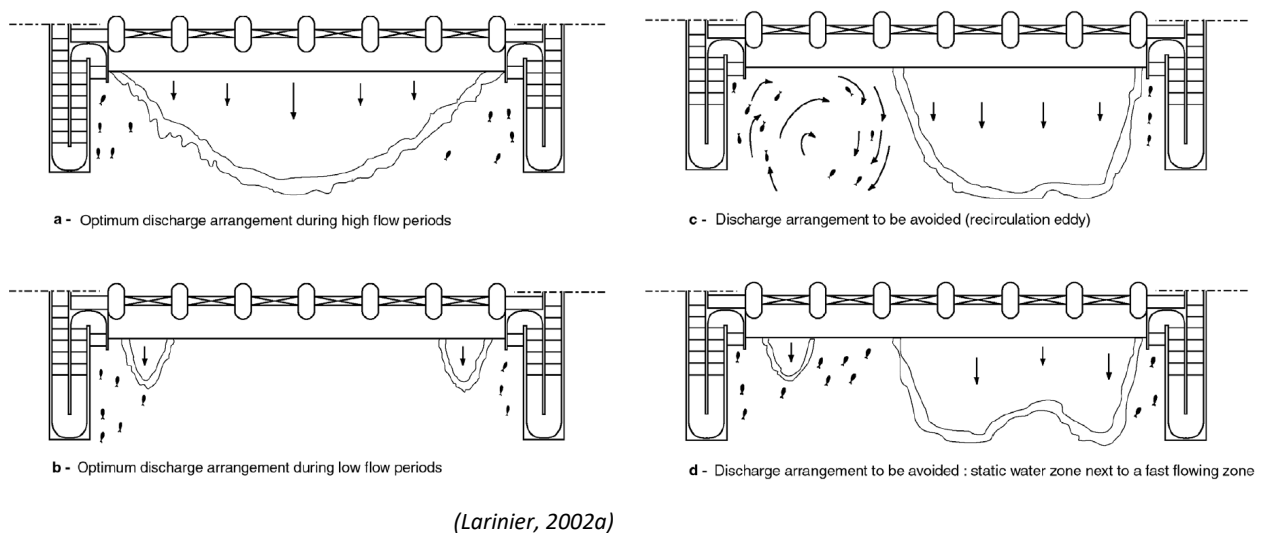
Om de recirculatieneer voor de monding te voorkomen kan o.a. aan de volgende maatregelen worden gedacht:

1. Toepassing van geleidingswanden;
2. Verhogen lokstroomdebiet (mits rekening wordt gehouden met maximaal toelaatbare snelheden);
3. Versmallen breedte monding/ mondingsopeningen → verbonden aan debiet;
4. Optimaliseren lengte ( $L_1$ ) waarover de oeverwand terugbuigt naar stuwgeulbreedte (alleen van toepassing van de 'A-varianten', m.a.w. varianten die terugbuigen ten opzichte van de oeverlijn (zie zwarte vs groene lijnen in Figuur 44);

Er wordt opgemerkt dat er ook een aanvullende maatregel kan worden voorgesteld die zich richt op het aanpassen van de stuwregeling om zo de sterkte van de stroming en turbulentie afwaarts van de stuw net naast de vispassagemonding te doen afnemen. Larinier (2002a) en AMINAL (2005) geven enkele voorbeelden van de inzet van stuwregeling voor het verbeteren van de vindbaarheid van de vispassage (zie Figuur 46 en Figuur 47). Het voorbeeld rechts in Figuur 47 zou een oplossingsmaatregel en/of mitigerende maatregel kunnen zijn om de recirculatieneer voor de vispassage bij verhoogde afvoeren te voorkomen. Deze maatregel werd echter (nog) niet verder onderzocht aangezien het vanuit het stuwbeheer de voorkeur heeft om de synchrone stuwregeling te behouden. Ook bestaat het risico dat er alsnog een recirculatieneer zou ontstaan ten gevolge van een te groot verschil tussen de twee stuwstromen (zie toegevoegde rode stroomlijn in Figuur 47).

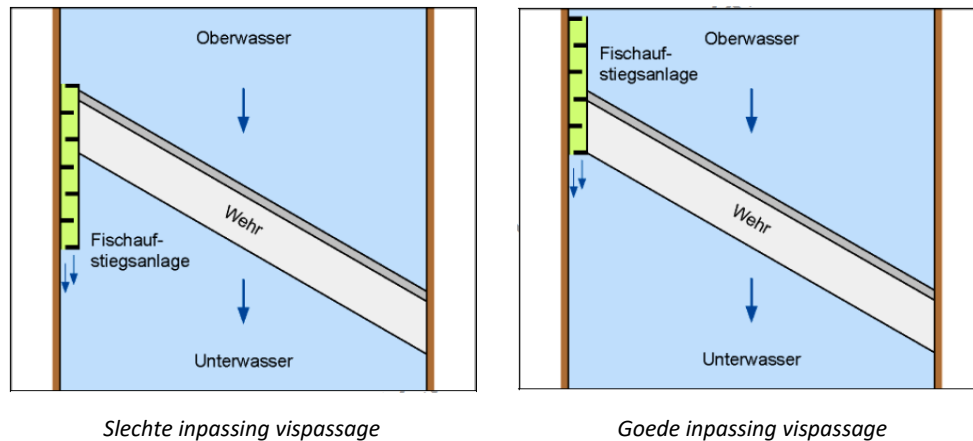


Figuur 46 – Mogelijke stuwregeling voor optimalisatie vindbaarheid vispassage op middelgrote waterlopen



Figuur 47 – Mogelijke stuwregeling (links: goed; rechts: slecht) voor optimalisatie van de vindbaarheid en attractiviteit van vispassage op grote rivieren

Bij bredere rivieren kan ook geopteerd worden om de stuwen of overlaten fysiek schuin in de rivier te plaatsen zodat deze een natuurlijke geleiding naar de vispassage vormen, zie voorbeeld in Figuur 48 (tevens ook een voorbeeld van goede en slechte inpassing vispassagemonding). Dit is voor de stuwsluiscomplexen op de Dender echter geen optie.



Figuur 48 – Voorbeelden inpassing van een vispassage t.o.v. een schuin georiënteerde overlaat (Bron: DWA, 2014)

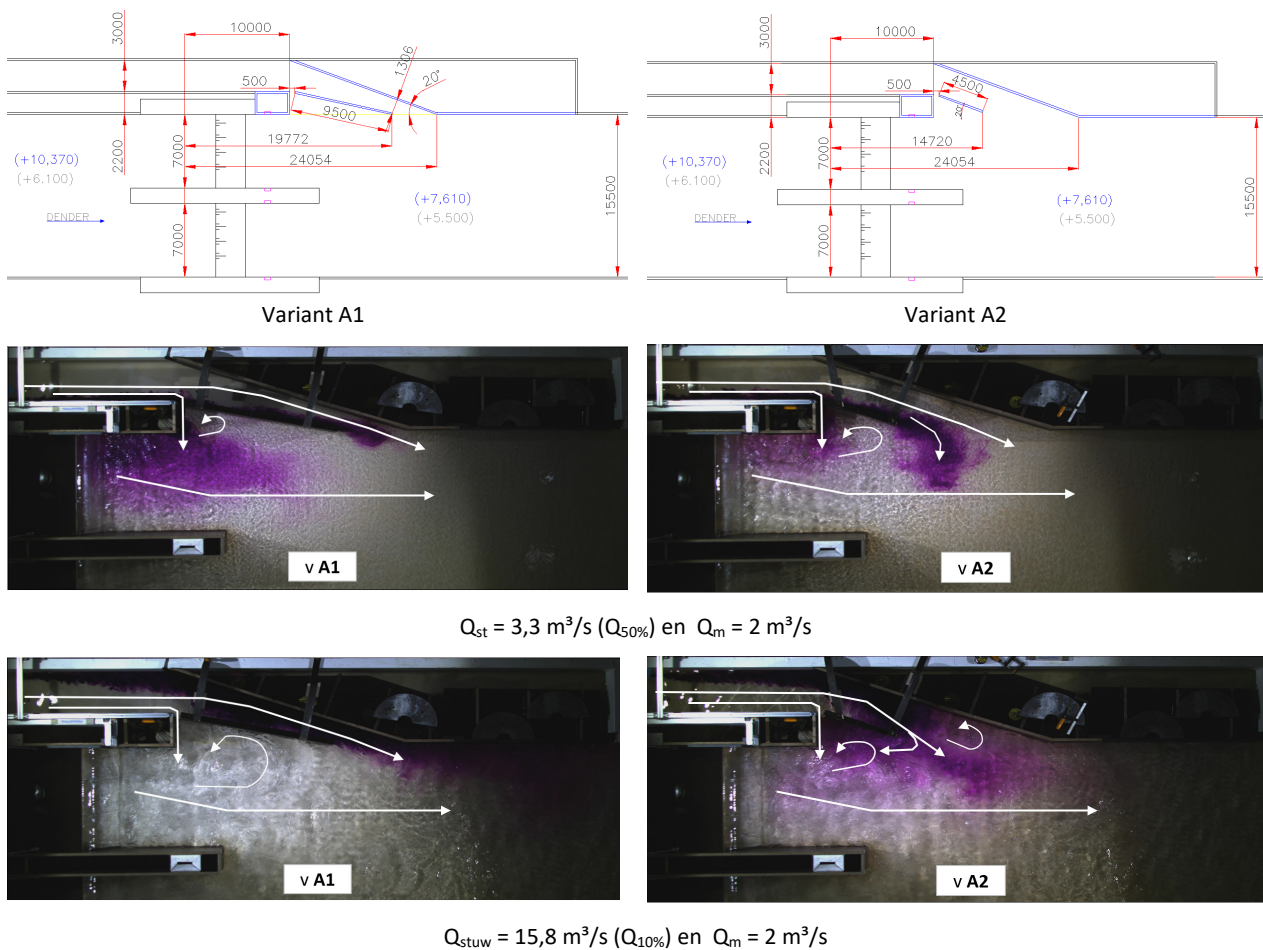
#### 5.4.2 Variantenstudie

In de voorgaande paragraaf werden de resultaten beschreven van het ontwerp van een parallelle monding zonder aanvullende maatregelen, de zgn. basisvariant(en). Hieruit bleek dat in deze situaties een recirculatieneer ontstaat die in situaties van hogere afvoer de volledige monding afschermt. Dit is nefast voor de vindbaarheid en daarmee de effectiviteit van de vispassage. In deze paragraaf worden daarom enkele varianten onderzocht op basis van de mogelijke maatregelen zoals opgesomd in de voorgaande paragraaf. Hierbij worden steeds de volgende doelstellingen nagestreefd:

- Voorkomen van de (grote) recirculatieneer: de lokstroom dient rechtlijnig en in stroomrichting te kunnen aansluiten op de hoofdstroom afwaarts van de turbulente zone van de stuwoverstort;
- Binnen de range van optimale werking zo veel mogelijk toegangen naar de vispassage realiseren (en minimaal één), zodat de vispassage in de periode van optimale werking bij elk debiet over de stuwen bereikt kan worden (bovengrens is daarbij het  $Q_{10\%}$ -scenario).
- Zeker bij gemiddelde en lagere afvoeren ( $< Q_{50\%}$ ) dient er zo dicht mogelijk aan de stuwen (m.a.w. zo ver mogelijk opwaarts) een toegang beschikbaar te zijn zodat vissen niet moeten terugzwemmen om een ingang te vinden.
- Aangezien de grootte van het lokstroomdebiet in verhouding tot het stuwdebiet een zeer grote rol speelt met oog op de vindbaarheid, wordt gezocht naar een zo groot mogelijk debiet waarbij nog voldaan kan worden aan de maximaal toelaatbare stroomsnelheden in het mondingskanaal ( $V_m < 0,6$  tot  $0,7$  m/s).

Figuur 49 t.e.m. Figuur 52 tonen enkele varianten die zijn onderzocht in de schaalmodelstudie. Hierbij wordt opgemerkt dat, net als bij de basisvarianten, ook bij deze varianten een afwaartse waterdiepte ( $d_a$ ) van circa 2,1 m werd toegepast (m.a.w. een bodempeil van 5,50 mTAW en een afwaarts streefpeil van 7,61 mTAW). Aangezien de bodemhoogte in de monding volgens de ontwerpcriteria gelijk dient te zijn aan het afwaarts bodempeil, werd het afwaarts bodempeil ook doorgetrokken in het volledige mondingskanaal.

Figuur 49 toont twee varianten met één enkele geleidingswand in het verlengde van de stuwmuur en een terugbuigende linkeroever. Deze varianten (A1 en A2) gaan uit van twee openingen (toegangen) naar de vispassage: één zo dicht mogelijk aan de stuw en één op een zo ver mogelijke afstand om ook bij hogere afvoeren nog een toegang naar de vispassage te kunnen realiseren. Bij beide varianten heeft de opwaartse opening een breedte van 0,5 m (= minimale breedte op korte afstand). De opwaartse punt van de geleidingswand werd bij beide varianten in het verlengde van de stuwmuur geplaatst. Dit betekent dat de geleidingswand zich niet in de (directe) uitstroom van de vispassage bevindt. Het verschil tussen de twee varianten zit in de lengte (en hoek) van de geleidingswand, wat de afstand van de verste opening ten opzichte van de stuw bepaalt. De breedte van de monding (3 m) en het lokstroomdebiet ( $2 \text{ m}^3/\text{s}$ ) zijn gelijk gebleven t.o.v. de basisvariant (zie 5.4.1). Ook de terug buiging van de linker oeverwand is in beide varianten gelijk en ligt op circa 24 m uit de stuwassen en onder een hoek van  $20^\circ$ .



Figuur 49 – Resultaten schaalmodelstudie varianten A1 en A2: één geleidingswand in verlengde van stuwmuur en vroeg terugbuigende oever

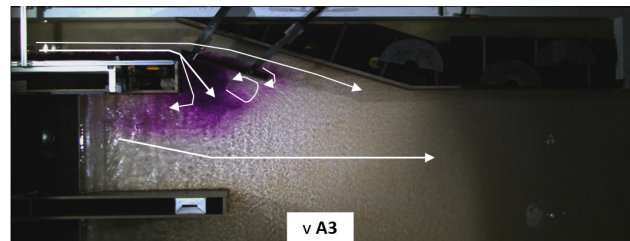
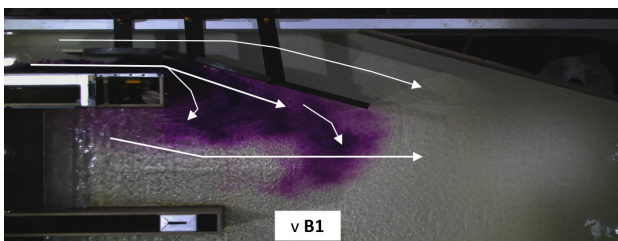
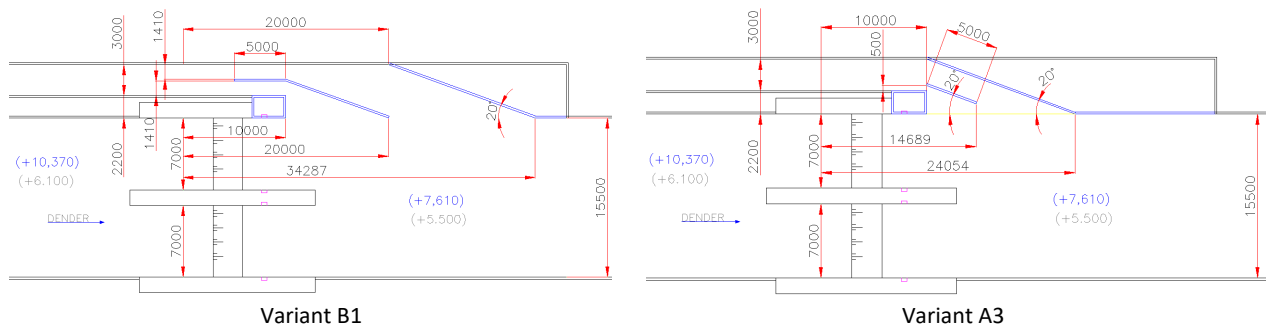
Uit de resultaten van variant A1 en A2 blijkt het volgende:

Bij beide varianten gaat een deel van het lokstroomdebiet door de opwaartse opening vanwege het aanzuigende effect van de relatief hoge stroomsnelheid van de stuwstroom. De lokstroom door deze opening staat haaks op de hoofdstroom, wat minder optimaal is om afwijkende stroompatronen t.o.v. de hoofdstroom te voorkomen. Bij vervolgvarianten is het beter om de geleidingswand een stuk in de uitstroom van de vispassage te starten, zodat de stroming uit deze openingen meer parallel wordt aan de hoofdstroom en zo ook bij lagere stuwafoeren een lokstroom kan realiseren.

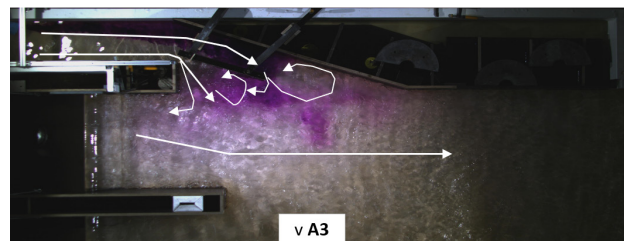
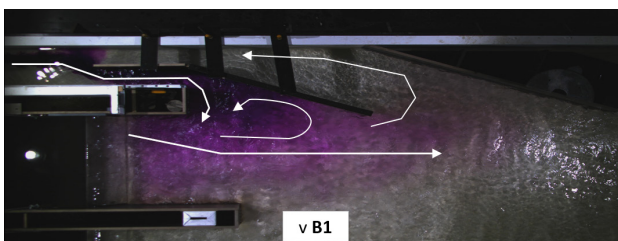
De tweede opening (ingang voor bij hogere afvoer) ligt in geval van A1 ver genoeg afwaarts (= 20 m uit stuwwassen) om buiten de invloedzone van stuwoverstort bij de bovengrens van optimale werking ( $Q_{10\%}$ ) te vallen, waardoor deze ook een relatief goede lokstroom kan realiseren. In geval van variant A2 blijkt de wand te kort en ligt de afwaartse uitstroomopening nog in de invloedzone van de stuwoverstort waardoor geen goede lokstroom gerealiseerd kan worden.

Hoewel bij variant A1 een relatief goede lokstroom wordt geconstateerd uit beide openingen, bevinden deze openingen zich relatief ver uit elkaar. Hierdoor zullen vissen bij afvoeren tussen de  $Q_{10\%}$  en  $Q_{50\%}$  geen optimale toegang vinden en zullen dus moeten terugzwemmen naar de afwaartse opening. Er wordt daarom best onderzocht of ook tussengelegen openingen mogelijk zijn.

Figuur 50 toont twee varianten met één geleidingswand die steeds in de vispassagemonding start. Bij variant B1 loopt deze geleidingswand iets door in opwaartse richting in het mondingskanaal. Ook buigt de linker oeverlijn op een afstand van 20 m uit de stuwwassen terug naar de stuwgeulbreedte (valt daarmee onder type B wat betreft vertrekpunt parallelle monding, zie groene lijnen in Figuur 41). De geleidingswand eindigt op 20 m uit de stuwwassen. Variant A3 is gelijkend aan variant A2, alleen start de geleidingswand nu in de uitstroom van de monding en heeft een hoek van  $20^\circ$  (gelijk aan de terugbuigende oeverlijn). Het einde van de geleidingswand bevindt zich, net als bij A2, op circa 15 m uit de stuwwassen.



$$Q_{st} = 3,3 \text{ m}^3/\text{s} (Q_{50\%}) \text{ en } Q_m = 2 \text{ m}^3/\text{s}$$



$$Q_{stuw} = 15,8 \text{ m}^3/\text{s} (Q_{10\%}) \text{ en } Q_m = 2 \text{ m}^3/\text{s}$$

Figuur 50 – Resultaten schaalmodelstudie varianten B2 en A3: één geleidingswand startende vanuit mondingskanaal bij verschillende oeverlijnen

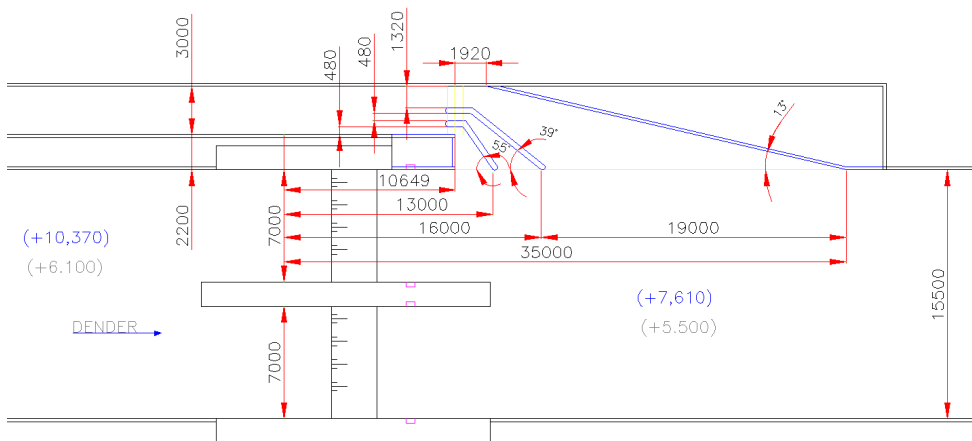
Uit de resultaten van beide varianten blijkt dat het starten van de geleidingswand in de monding zelf betere resultaten geeft voor de meest opwaartse monding net naast de stuwen, zeker bij variant B1. Uit resultaten van variant B1 blijkt wel dat combinatie van een iets bredere opwaartse opening (deze is nu 1,4 m in plaats van 0,5 m bij voorgaande varianten) en vooral de later terugbuigende linkeroever er bij het  $Q_{10\%}$ -scenario toe leidt dat het volledige lokstroomdebiet door de opwaartse mondingsopening wordt 'gezogen'. Hierdoor ontstaat er zelfs een terugstroom in het afwaartse deel van het mondingskanaal. In geval van variant A3 buigt de linkeroever al wel eerder terug en is de opwaartse opening smaller (terug 0,5 m) waardoor er bij deze variant wel nog een lokstroom aanwezig is in het afwaartse deel van het mondingskanaal. Alleen is de geleidingswand nog altijd te kort waardoor de mondingsopening nog in het invloedgebied van de stuwoverstort ligt en er terug een recirculatieneer voor deze mondingsopening ontstaat. Bij de volgende varianten werd daarom doorgewerkt op het principe van de geleidingswanden uit variant B1, maar dan met een eerder terugbuigende linkeroever en de inzet van meerdere geleidingswanden.

Figuur 51 toont variant A4 met twee geleidingswanden, een direct terugbuigende linkeroever maar met een relatief flauw verloop ( $13^\circ$ ) en een relatief brede afwaartse uitstroomopening. De twee (opwaartse) openingen tussen de geleidingswanden hebben een breedte van 0,5 m, de linker opening naast de geleidingswanden heeft een breedte van 1,3 m. De opwaartse geleidingswand eindigt op 13 m uit de stuwassen en de afwaartse wand op 16 m uit de stuwassen. Om ook de invloed van de grootte van het lokstroomdebiet te onderzoeken werd elk van de twee maatgevende afvoerscenario's beproefd bij een lokstroomdebiet van zowel 2 als 4  $m^3/s$ .

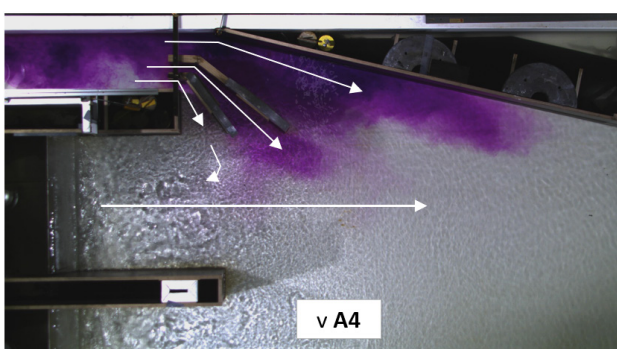
Uit de resultaten voor variant A4 blijkt dat dit ontwerp goed werkt bij het  $Q_{50\%}$ -scenario, zowel bij een lokstroomdebiet van 2 als 4  $m^3/s$ . Bij een lokstroomdebiet van 2  $m^3/s$  ontstaat in het bovengrensscenario echter terug een recirculatieneer voor de (brede) afwaartse uitstroomopening. Deze wordt vooral veroorzaakt door het flauwe verloop van de linkeroever waardoor de relatieve verwijding langer doorzet. Daarnaast zorgt de bredere uitstroom voor een verlaging van de stroomsnelheid en waardoor de lokstroom niet sterk genoeg is om de recirculatieneer te voorkomen. Ook blijkt het einde van de tweede geleidingswand (op 16 m uit de stuwassen) niet ver genoeg stroomafwaarts te liggen om buiten de invloedzone van de stuwoverstort te blijven.

Figuur 52 toont de resultaten voor variant A5. Dit ontwerp is gelijk aan A4, maar nu met een bijkomende geleidingswand die tot 20 m uit de stuwassen reikt. Deze derde wand creëert vier opwaartse openingen in de monding met elk een breedte van circa 0,5 m. Ook deze variant werd bij de maatgevende scenario's beproefd met een lokstroomdebiet van 2 en 4  $m^3/s$ .

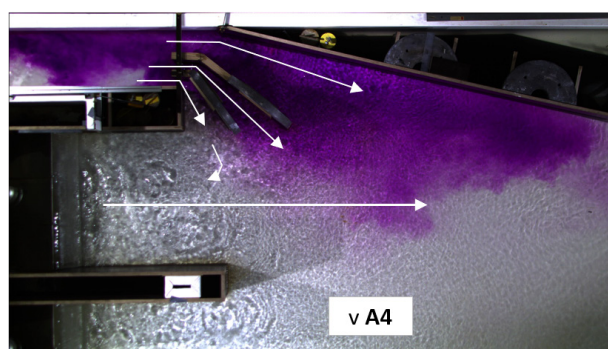
Uit de resultaten voor variant A5 bij het  $Q_{10\%}$ -scenario blijkt echter dat de derde geleidingswand in het geval van een lokstroomdebiet van 2  $m^3/s$  geen verbetering geeft, maar eerder een verslechtering. Het lokstroomdebiet 'verdwijnt' namelijk volledig door de 3 openingen aan stuwzijde waardoor er niets van het lokstroomdebiet via het buitenste kanaal (rechter opening gezien in stroomrichting) kan stromen. Er ontstaat daar zelfs een lichte terugstroom. Bij een lokstroomdebiet van 4  $m^3/s$  stroomt er wel water door het buitenste kanaal, maar door de relatieve verbreding vanwege de flauw weglappende oeverwand nemen stroomsnelheden weer dusdanig af dat een zeer langzaam stromende recirculatieneer ontstaat.



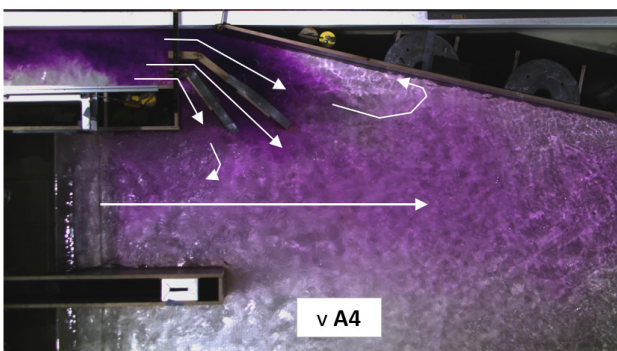
Variant A4



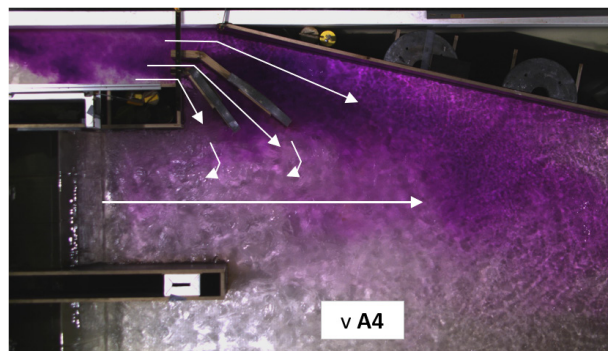
$Q_{st} = 3,3 \text{ m}^3/\text{s} (Q_{50\%})$  en  $Q_m = 2 \text{ m}^3/\text{s}$



$Q_{st} = 3,3 \text{ m}^3/\text{s} (Q_{50\%})$  en  $Q_m = 4 \text{ m}^3/\text{s}$

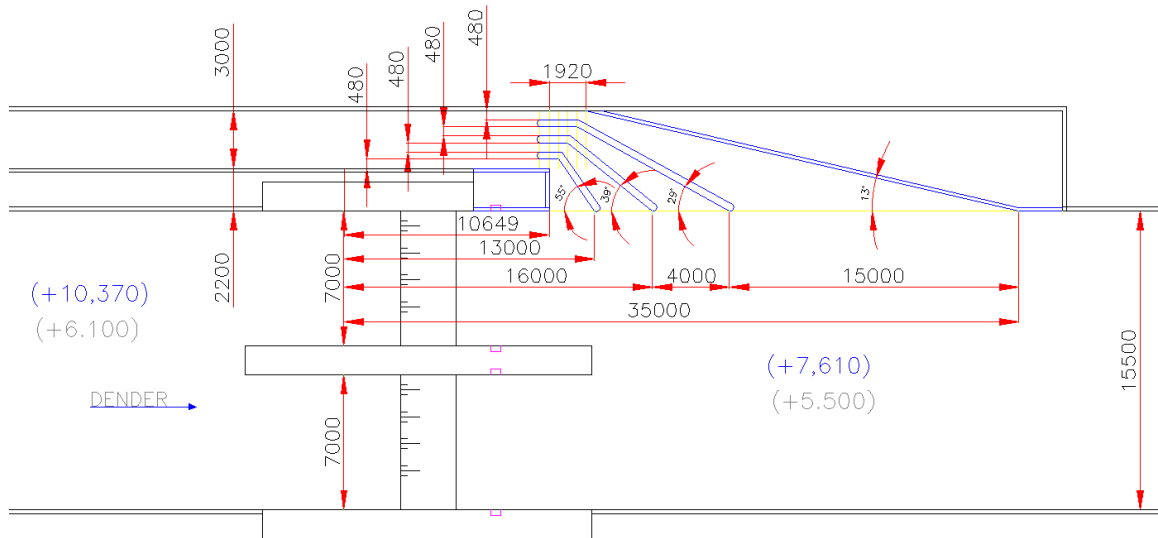


$Q_{stuw} = 15,8 \text{ m}^3/\text{s} (Q_{10\%})$  en  $Q_m = 2 \text{ m}^3/\text{s}$

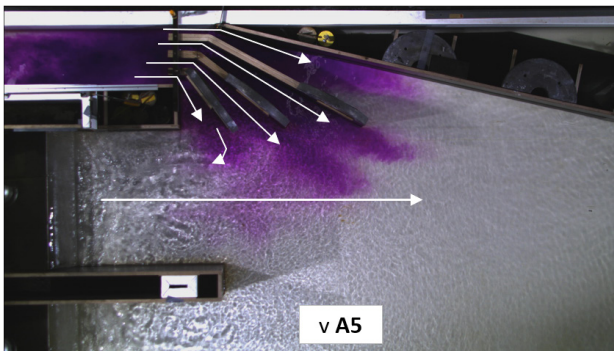


$Q_{stuw} = 15,8 \text{ m}^3/\text{s} (Q_{10\%})$  en  $Q_m = 4 \text{ m}^3/\text{s}$

Figuur 51 – Resultaten schaalmodelstudie variant A4: twee geleidingswanden en vroeg maar flauw terugbuigende oeverlijn

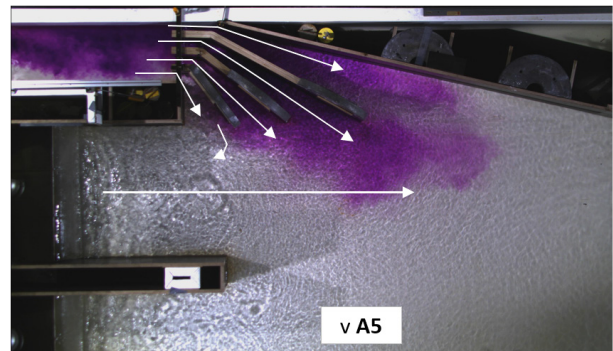


Variant A5



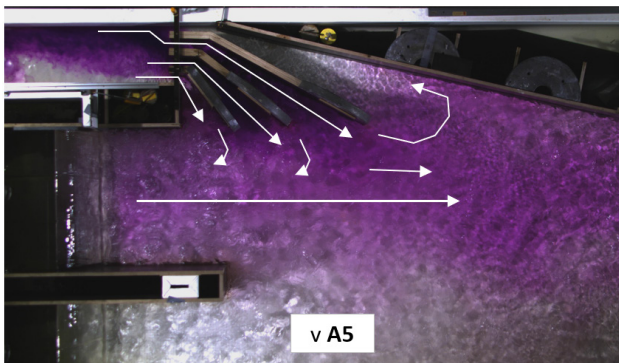
v A5

$Q_{st} = 3,3 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $Q_{50\%}$ ) en  $Q_m = 2 \text{ m}^3/\text{s}$



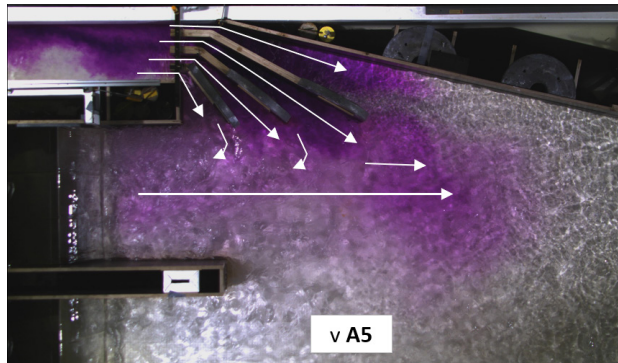
v A5

$Q_{st} = 3,3 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $Q_{50\%}$ ) en  $Q_m = 4 \text{ m}^3/\text{s}$



v A5

$Q_{stuw} = 15,8 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $Q_{10\%}$ ) en  $Q_m = 2 \text{ m}^3/\text{s}$



v A5

$Q_{stuw} = 15,8 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $Q_{10\%}$ ) en  $Q_m = 4 \text{ m}^3/\text{s}$

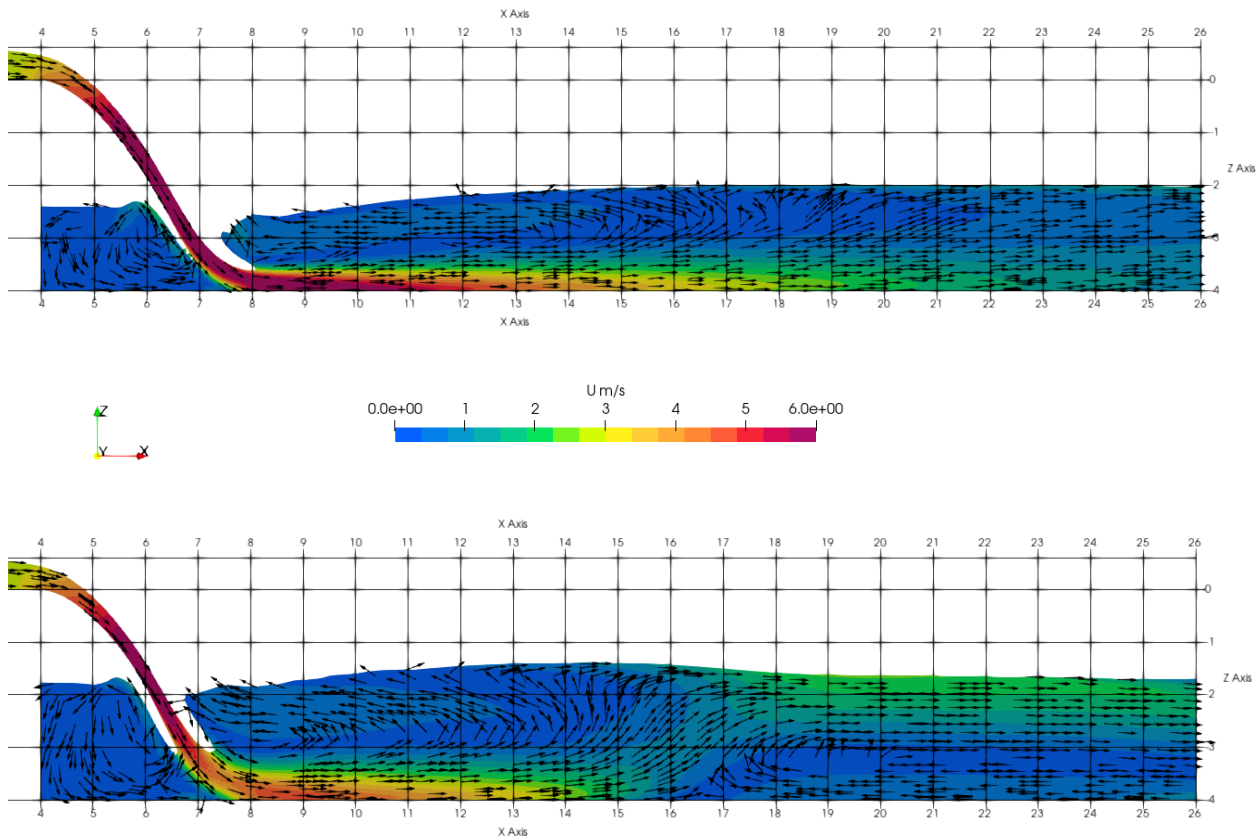
Figuur 52 – Resultaten schaalmodelstudie variant A5: drie geleidingswanden en vroeg maar flauw terugbuigende oeverlijn



### 5.4.3 Kennishiaat

Na variant A5 was het schaalmodel niet langer beschikbaar. Tevens werd door DVW besloten om een grotere minimale afwaartse waterdiepte bij streefpeil toe te passen (namelijk 2,4 m in plaats van 2,1 m). Daarom werd de studie voortgezet door middel numerieke CFD-simulaties met de software OpenFoam (Lopez Castaño *et al.*, 2023).

Uit de resultaten van de eerste CFD-simulaties bleek echter dat er in deze numerieke modellering vanaf een bepaalde waterdiepte of beter gezegd, een bepaalde verhouding tussen overstortdebiet en afwaartse waterdiepte, een ander stroompatroon ontstaat afwaarts van de watersprong (zie Figuur 53).



Figuur 53 – Verschillende stroompatronen in de watersprong bij verschillende afwaartse waterdieptes (boven = 2 m; onder = 2,4 m)

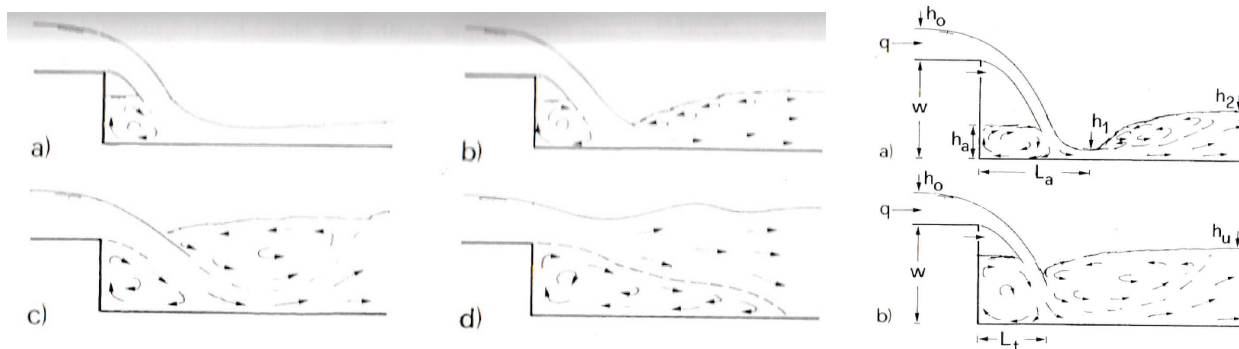
Vanaf een diepte van meer dan 2 m wordt er een tweede recirculatiezone waargenomen afwaarts van de watersprong. Hierbij ‘schiet’ de laag met relatief hogere stroomsnelheden naar het wateroppervlak, terwijl deze in de watersprong normaal aan de bodem blijft en langzaam terug uitspreidt over de diepte. Dit stroompatroon zorgt er tevens voor dat er over een relatief grote afstand een terugstroom aan de bodem ontstaat.

Dit stroompatroon wordt niet teruggevonden in de literatuur. Meestal worden er vier stroomtypen onderscheiden op basis van verdrinkingsgraad (zie voorbeeld in Figuur 54), maar geen daarvan heeft een terugstroom aan de bodem afwaarts van de watersprong. Het scenario van de stuwen op de Dender tijdens de periode van optimale werking komt overeen met stroomtype ‘b’ uit Figuur 54.

Op dit moment is dus niet duidelijk of dit een realistisch stroompatroon is dat ook in werkelijkheid zal optreden, of dat dit een modelmatig effect is. Om dit te kunnen bepalen zijn schaalmodelproeven (of terrein metingen) nodig. Het voorgaande schaalmodel was niet geschikt voor dergelijk onderzoek. Hierdoor kunnen verdere varianten op dit moment niet onderzocht worden door middel van CFD (of schaalmodelonderzoek).

Deze kennishiaat heeft ook overlap met de eerdere vastgestelde hiaat met betrekking tot de rekenmethodes voor het bepalen van de lengte van een (sterk) verdrongen watersprong (zie 5.3.4). Een onderzoeksproject ten aanzien van (sterk verdrongen) watersprongen wordt momenteel overwogen. Hierbij kunnen schaalmodelproeven (en/of terreinmetingen) van stuwoverstort worden uitgevoerd om zo de CFD-simulaties en ook de literatuurformules te valideren (en zo nodig te kalibreren).

Dit vervolgonderzoek zal hoogstwaarschijnlijk niet meer op tijd gerealiseerd kunnen worden voor de vispassages van de Dender. Op basis van de huidige resultaten en kennis wordt echter verwacht dat een conservatief en robuust ontwerp voor de monding kan worden voorgesteld, dat rekening houdt met de gekende onzekerheden. In de volgende paragraaf worden de huidige resultaten en daaraan verbonden conclusies besproken. In paragraaf 5.6 tenslotte wordt het voorstel voor het (conservatieve) voorkeursontwerp beschreven.



Figuur 54 – Stroomingstypen bij een beluchte overlaat (Vischer & Hager, 1995)

#### 5.4.4 Resultaten

Hoewel de variantenstudie niet volledig kon worden afgerond, kunnen wel de volgende algemene vaststellingen worden gedaan:

- Zonder bijkomende maatregelen ontstaat er (in het bovengrensscenario) een recirculatieneer voor de monding van de parallelle uitstroom van de vispassage die de vindbaarheid van de vispassage sterk nadelig beïnvloedt. Er zijn dus aanvullende maatregelen nodig (zoals bijv. geleidings- en/of afschermingswanden).
- Het creëren van een optimale lokstroom in geval van een parallelle monding richt zich op de verhouding in momentum tussen enerzijds de turbulente stroming afwaarts van de stuwen en anderzijds de uitstroom van de vispassage. Hierbij dient de uitstroom van de vispassage sterk genoeg te zijn om te kunnen concurreren met de stroming afwaarts van de ernaast gelegen stuw. Dit richt zich enerzijds op het buitenhouden van de turbulentie van de watersprong en anderzijds op het creëren van een doorgaande lokstroom die tot afwaarts van de turbulente zone reikt.

- Door het toepassen van geleidingswanden kan enerzijds de negatieve invloed van de turbulente watersprongzone afwaarts van de stuwen buiten de monding worden gehouden en anderzijds de stroomsnelheden in de uitstroomopeningen van de monding hoog genoeg maken om te kunnen concurreren met de (turbulente) stroming afwaarts van de stuwen. Daarnaast voorkomen deze wanden het ontstaan van een recirculatieneer door abrupte verwijding van de stuwstroom na de stuwmuur.
- Om recirculatieneren te voorkomen wordt de oever aan vispassagezijde best direct na de zoekzone voor de monding terug gebogen naar de normale stuwgeulbreedte. Zo blijven stroomsnelheden in de lokstroom namelijk hoog genoeg om te kunnen concurreren met de (turbulente) stuwstroom en wordt de recirculatieneer die kan optreden voor de monding voorkomen.
- In de mondingszone worden best twee geleidingswanden toegepast die zorgen voor drie toegangen naar de vispassage. De meest opwaartse opening ligt best zo dicht mogelijk aan de stuwmuur, de meest afwaartse dient voorbij de migratielimitlijn in het bovengrens scenario ( $Q_{10\%}$ ) te liggen.
- De optimale verhouding tussen lokstroomdebiet en de breedte van het lokstroomkanaal wordt in het bovengrensscenario voor optimale werking gevonden bij een lokstroomdebiet van  $4 \text{ m}^3/\text{s}$  en een breedte voor het mondingskanaal van 2,5 m. Bij een combinatie met twee geleidingswanden bleek dit debiet te kunnen zorgen voor goede lokstroom in het bovengrensscenario en ook het ontstaan van een recirculatieneer voor de mondingsopening(en) te kunnen voorkomen. Deze combinatie zorgt tevens voor een voldoende sterke lokstroom in alle mondingsopeningen terwijl de gemiddelde stroomsnelheid in het mondingskanaal niet hoger wordt dan  $0,7 \text{ m/s}$ .
- Gegeven het voorkeursontwerp met twee geleidingswanden en een lokstroomkanaal van 2,5 m breed, is  $4 \text{ m}^3/\text{s}$  daarmee het minimaal benodigde maximale lokstroomdebiet. ‘Minimaal’ benodigd betekent dat dit debiet minimaal nodig is om in het bovengrensscenario een goede lokstroom te realiseren; en ‘maximaal’ omdat dit het grootste debiet is dat nodig is binnen de periode van maximale werking. Bij andere dan het bovengrensscenario mag (of dient) het debiet kleiner te zijn. Dit vanwege het risico op sluiting van de vispassage met het oog op peilbeheer, zie hiervoor de toepassing van het regelbare toegevoegde debiet in hoofdstuk 6.
- Deze combinatie van een lokstroomdebiet (tot  $4 \text{ m}^3/\text{s}$ ) en de voorkeursconfiguratie van twee geleidingswanden zorgt er tevens voor dat het niet meer vereist is om de oever direct na de monding weer terug te buigen naar de ‘normale’ breedte van de stuwgeul. Hierdoor wordt een ‘recht doorlopende’ oever ook mogelijk voor locaties waar dit ruimtelijk gezien nodig of wenselijk is (zie verder in paragraaf 5.6.3).
- Indien gewenst kan vanuit andere randvoorwaarden ook een groter maximaal lokstroomdebiet worden toegepast aangezien dit ook de attractiviteit van de vispassage verder zou versterken. Hier dient de breedte van het mondingskanaal (en de locatie van de geleidingswanden) echter wel op aangepast te worden, zodat stroomsnelheden niet hoger gaan dan toegelaten stroomsnelheden voor de doelsoorten. Dit wordt verder uitgewerkt in de volgende paragraaf.

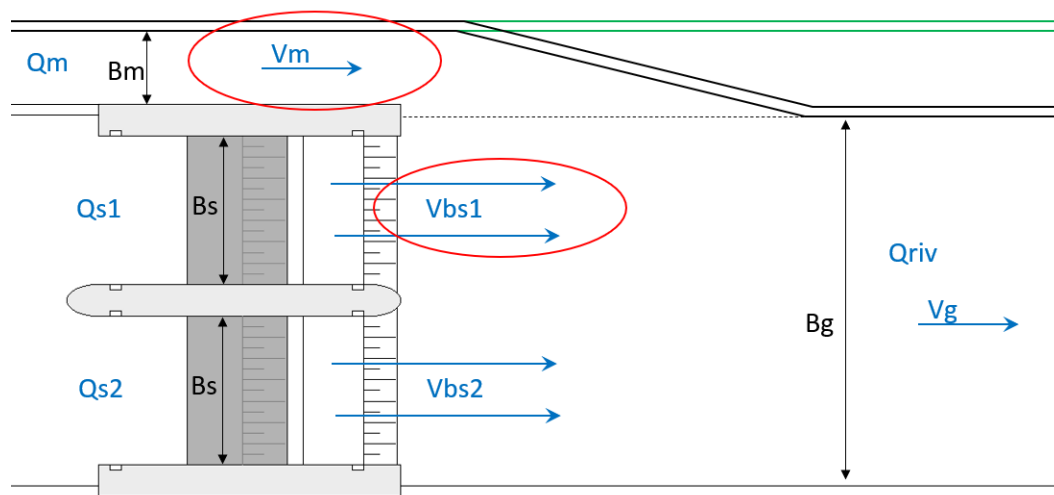
## 5.5 Lokstroomdebiet

Naast de vormgeving en locatie van de monding speelt ook de grootte van het lokstroomdebiet een belangrijke rol met betrekking tot de attractiviteit (vindbaarheid) van de vispassage(monding). Hierbij worden twee hoofdaspecten/doelstellingen onderscheiden:

- Door het lokstroomdebiet een grotere verhouding te geven ten opzichte van het debiet over de stuwen fungeert de vispassage langer als de hoofdstroom wat de vindbaarheid sterk verbetert.
- Door het verhogen van het lokstroomdebiet kunnen negatieve effecten van de watersprong beter gemitigeerd worden (zie voorgaande paragraaf);

Voor het eerste aspect speelt vooral de verhouding tussen het lokstroomdebiet ( $Q_m$ ) en het stuwdebiet ( $Q_s$ ) een belangrijke rol ( $Q_m/Q_s$ ). Door het lokstroomdebiet zo hoog mogelijk te kiezen ( $Q_m/Q_s > 0,5$ ) kan de vindbaarheid van de vispassage aanzienlijk worden verbeterd.

In het geval van het tweede aspect gaat het vooral om de verhouding in momentum tussen de stroming afwaarts van de stuwen en de stroming uit de parallelle monding. Dit richt zich dus niet (alleen) op de verhouding tussen het lokstroomdebiet ( $Q_m$ ) en het volledige debiet over de stuwen ( $Q_s$ ), maar vooral (ook) op de verhouding tussen gemiddelde stroomsnelheden vanuit het mondingskanaal ( $V_m$ ) en de stroomsnelheden afwaarts van de stuw naast de vispassage ( $V_{bs1}$ ), zie Figuur 55. Al eerder werd aangegeven dat de afvoerdeling over de stuwen hierbij eventueel geoptimaliseerd zou kunnen worden (zie rechts in Figuur 46). In het geval van de stuwsluiscomplexen op de Dender wordt ervan uitgegaan dat de stuwen zowel fysiek als in afvoerregeling altijd parallel (zullen) staan, maar een optimalisatie in deze verdeling kan de vindbaarheid van de vispassage verder verbeteren.



Figuur 55 – Schematische weergave verhouding lokstroom ten opzichte van stuwstroom

Uit de variantenstudie in de voorgaande paragraaf bleek dat voor de parallelle monding van de vispassages op de Dender een minimaal benodigd maximaal lokstroomdebiet van  $4 \text{ m}^3/\text{s}$  benodigd is om ook bij de hogere afvoeren binnen de periode van optimale werking ( $Q_{10\%}$ ) een voldoende sterke lokstroom te behouden.

Door de toepassing van het toegevoegd debiet is het mogelijk om een hoger lokstroomdebiet (dan de minimaal benodigde  $4 \text{ m}^3/\text{s}$ ) te realiseren, waardoor de vindbaarheid van de vispassage verder versterkt zou worden zonder te leiden tot een lager openingspercentage van de vispassage. Daarbij zou er ook eventueel een win-win met energiewinning onderzocht kunnen worden wanneer het toegevoegd debiet wordt gecombineerd met kleine waterkrachtcentrale(s) of turbine(s), zie verder in paragraaf 6.3.5. Hierbij wordt wel nadrukkelijk opgemerkt dat dit geen negatieve effecten mag hebben op zowel de op- als afwaartse migratie en dat bij inzet van turbines dit altijd beproefde visveilige systemen moet betreffen.

Tabel 28 geeft op basis van het histogram van de debietsmetingen te Erembodegem (bij wijze van voorbeeld) de verhouding tussen het lokstroomdebiet ( $Q_m$ ) en het stuwdebiet ( $Q_s$ ) dat gehaald zou kunnen worden gegeven een maximaal haalbaar lokstroomdebiet. Hierbij wordt opgemerkt dat dit enkel bedoeld is om de grootteorde van de mogelijke verhouding weer te geven. Er is namelijk (nog) geen rekening gehouden met de invloed van de te kiezen regeling van het toegevoegde debiet ten opzichte van de stuwen en het werkelijke debiet voor elk van de afzonderlijke locaties. Voor de mogelijke regeling tussen stuwen en vispassage wordt verwezen naar paragraaf 8.3 waar een voorstel is uitgewerkt voor een regeling waarbij het toegevoegd debiet mee opbouwt met het debiet over de stuwen, zodat de stuwen bij alle afvoeren blijven instaan voor de peilregeling.

In Tabel 28 is met donkergroen aangeduid welke percentages van de tijd de volledige rivierafvoer via de vispassage zou kunnen lopen. Met lichtblauw is vervolgens aangeduid welke percentages van de tijd de lokstroom groter is dan het stuwdebiet. Met licht oranje is tevens aangeduid wanneer de verhouding van het lokstroomdebiet ten opzichte van het stuwdebiet lager wordt dan 10%, wat meestal als criterium wordt gebruikt als absolute ondergrens voor een nog attractieve lokstroom.

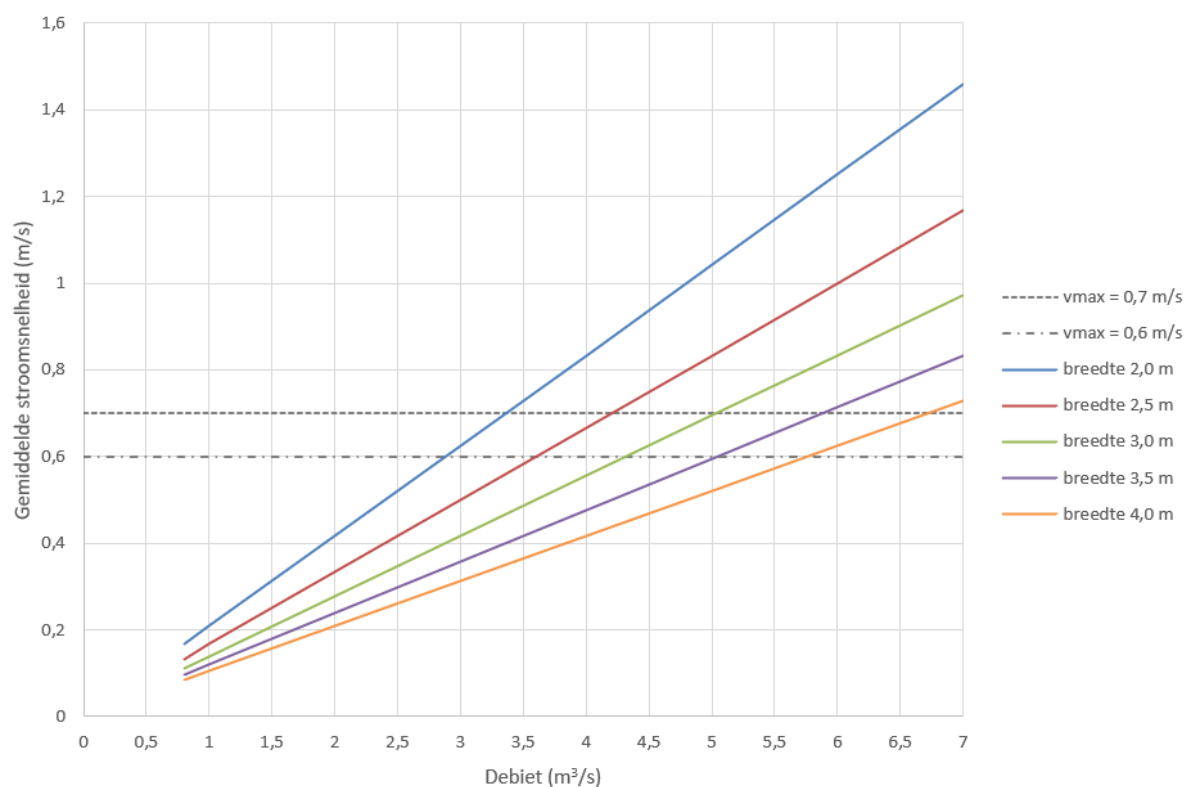
Bij het verhogen van het lokstroomdebiet dient echter wel altijd gecontroleerd te worden of stroomsnelheden in het mondingskanaal en in de mondingsopeningen niet te hoog worden waardoor deze niet meer passeerbaar zouden zijn voor de doelsoorten. Hierbij is de gemiddelde stroomsnelheid in het mondingskanaal bepalend. Uitgaande van een diepte van 2,4 m bij streefpeilen wordt de stroomsnelheid bij een gegeven lokstroomdebiet vooral bepaald door de breedte van het mondingskanaal.

Figuur 56 geeft de gemiddelde stroomsnelheden in het mondingskanaal bij verschillende combinaties van het lokstroomdebiet en breedte van het mondingskanaal. Aangezien het mondingskanaal niet geldt als korte hindernis (maatlat sprintsnelheid van  $1 \text{ m/s}$ ) en ook niet als een lange afstand (kruissnelheid van  $0,5 \text{ m/s}$ ), wordt met oog op passeerbaarheid gesteld dat gemiddelde stroomsnelheden hier best niet hoger gaan dan circa  $0,6$  tot  $0,7 \text{ m/s}$  (zie gestreepte lijnen in Figuur 56).

Wanneer er gekozen zou worden voor een hoger lokstroomdebiet dan de voorgestelde  $4 \text{ m}^3/\text{s}$ , dan kan het voorkeursontwerp voor de monding hier relatief eenvoudig op worden aangepast (zie volgende paragraaf).

Tabel 28 – Mogelijke verhouding lokstroomdebiet ( $Q_m$ ) ten opzichte van stuwdebiet ( $Q_s$ ) met overschrijdingskans bij bepaalde maximaal haalbare waarden voor het lokstroomdebiet

Overschrijdingskans (%)	Afvoer op rivier ( $m^3/s$ )	Verhouding $Q_m/Q_s$ bij verschillende maximaal haalbare waarde voor $Q_m$ ( $m^3/s$ )					
		2	3	4	5	6	7
1%	66,52	0,03	0,05	0,06	0,08	0,10	0,12
5%	33,31	0,06	0,10	0,14	0,18	0,22	0,27
10%	22,63	0,10	0,15	0,21	0,28	0,36	0,45
20%	13,79	0,17	0,28	0,41	0,57	0,77	1,03
25%	11,45	0,21	0,36	0,54	0,78	1,10	1,57
30%	9,54	0,27	0,46	0,72	1,10	1,69	2,76
40%	6,97	0,40	0,76	1,35	2,54	6,19	volledig $Q_m$
50%	5,26	0,61	1,33	3,17	19,23	volledig $Q_m$	volledig $Q_m$
60%	4,03	0,99	2,91	volledig $Q_m$	volledig $Q_m$	volledig $Q_m$	volledig $Q_m$
70%	2,9	2,22	volledig $Q_m$	volledig $Q_m$	volledig $Q_m$	volledig $Q_m$	volledig $Q_m$
75%	2,61	3,28	volledig $Q_m$	volledig $Q_m$	volledig $Q_m$	volledig $Q_m$	volledig $Q_m$
80%	2,13	15,38	volledig $Q_m$	volledig $Q_m$	volledig $Q_m$	volledig $Q_m$	volledig $Q_m$
90%	1,38	volledig $Q_m$	volledig $Q_m$	volledig $Q_m$	volledig $Q_m$	volledig $Q_m$	volledig $Q_m$
95%	0,76	volledig $Q_m$	volledig $Q_m$	volledig $Q_m$	volledig $Q_m$	volledig $Q_m$	volledig $Q_m$



Figuur 56 – Stroomsnelheden in het mondingskanaal bij verschillende combinaties van debiet en beschikbare breedte

## 5.6 Voorkeursontwerp

### 5.6.1 Algemeen

Met oog op het voorkeursontwerp voor de parallelle monding wordt onderscheid gemaakt tussen de ruimtelijke situatie waarbij de oever aan de mondingskant terugbuigt naar de normale stuwgeulbreedte en een recht doorlopende oever zonder terugbuiging. Zie ook ruimtelijke configuraties A en B in Figuur 41.

Deze voorkeursontwerpen kunnen op alle locaties langs de Dender worden toegepast. Op basis van de afwaartse geleidingswand en de lengte van de monding zijn twee locatiegroepen te onderscheiden:

1. Geraardsbergen (GB), Idegem (ID), Pollare (PO) en Denderleeuw (DL);
2. Aalst (AA) en Denderbelle (DB).

Het onderscheid tussen deze twee groepen bestaat enkel uit een verschil in lengte van de meest afwaartse geleidingswand en daarmee de lengte waarover de monding gelegen is. Dit zijn de enige twee parameters/dimensies waar in de figuren twee waarden voor worden gegeven. De laagste waarde geldt dan steeds voor de eerste groep en de hoogste waarde voor de tweede groep.

Dit onderscheid wordt gemaakt vanwege een iets langere watersprongzone door de combinatie van een hoger overstortdebiet over de stuwen met een relatief grotere afwaartse waterdiepte in geval van Aalst en Denderbelle (zie paragraaf 5.3.4). Merk op dat de meeste afstanden in stroomrichting worden gegeven ten opzichte van de stuwwassen.

Voor beide groepen en configuraties gelden de volgende maatgevende hoogtewaarden:

- De bodemhoogte in de monding en het mondingskanaal is horizontaal en gelijk aan het afwaartse bodempeil.
- De toppen van de geleidingswanden dienen tevens tot 1 m boven het afwaartse streefpeil te reiken.

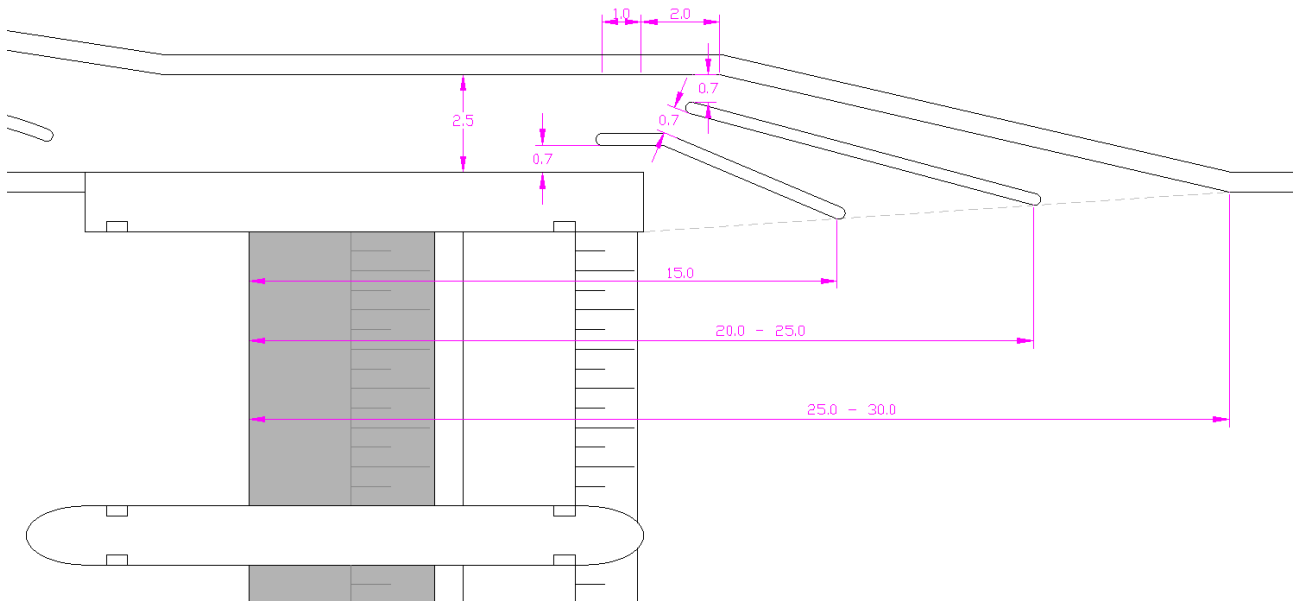
### 5.6.2 Terugbuigende oever

Figuur 57 toont het voorkeursontwerp met dimensionering voor de parallelle monding met terugbuigende oever naar de normale stuwgeulbreedte op basis van de resultaten van deze studie.

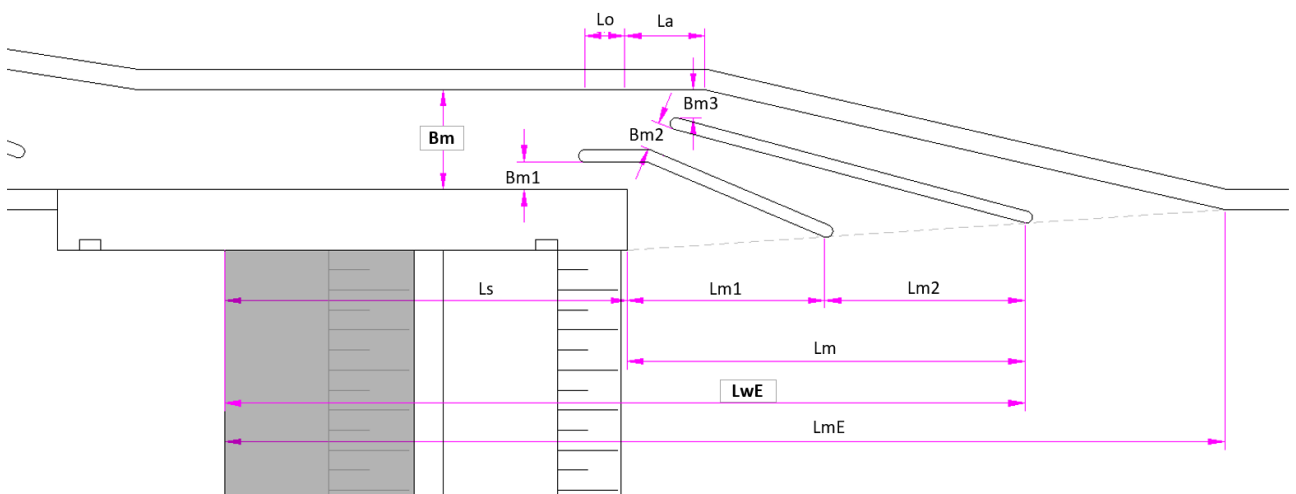
In principe kan het ontwerp uit Figuur 58 ook vertaald worden naar een relatief ontwerp waarbij de meeste maatgevende parameters relatief worden gemaakt aan enkele sleutelparmeters. Figuur 58 toont een dergelijk relatief ontwerp met verschaalbare parameters. De twee sleutelparameters waar de andere uit voortvloeien zijn:

- $L_{wE}$ : het einde van de watersprongzone afwaarts van de stuwmuur in het bovengrensscenario voor optimale werking (het zgn.  $Q_{10\%}$ -scenario);
- $B_m$ : de benodigde breedte van het lokstroomkanaal op basis van het gekozen maximale lokstroomdebiet en de afwaartse waterdiepte.

Hierbij wordt de relatieve dimensionering in stroomrichting gekoppeld aan de parameter  $L_{wE}$ , terwijl de dimensionering in de breedte gekoppeld wordt aan de parameter  $B_m$ .



Figuur 57 – Voorkeursontwerp en dimensionering parallelle monding bij terugbuigende oever



Figuur 58 – Voorkeursontwerp met relatieve dimensionering parallelle monding bij terugbuigende oever

De maatgevende parameters in **stroomrichting** in het relatieve ontwerp zijn gekoppeld aan  $L_{wE}$  en kunnen worden bepaald via de volgende richtlijnen:

- Het einde van de watersprongzone gezien uit de stuwassen ( $L_{wE}$ ) wordt bepaald uit de combinatie van het hoogste maatgevende afvoerdebiet (de  $Q_{10\%}$ -waarde) en de afwaartse waterdiepte ( $d_a$ ). Zie hiervoor de rekenmethode in paragraaf 5.3. Deze afstand komt overeen met de verst gelegen migratielimietlijn binnen de periode van optimale werking.



- Lengte  $L_s$  is de minimaal benodigde lengte van de stuwanden gezien uit de stuwwassen volgens de bouwkundige randvoorwaarden. Voor de Dendervispassages bleek de minimaal haalbare lengte circa 10 m. Op sommige locaties kan dit vanuit andere ruimtelijke randvoorwaarden enigszins afwijken (tot circa 12 m). Het is echter van belang om deze afstand zo kort mogelijk te houden.
- Vervolgens kan lengte  $L_m$  worden bepaald door de lengte van de stuwmuur af te trekken van de lengte tot het einde van de watersprongzone in het bovengrensscenario ( $Q_{10\%}$ ), beide gerekend vanuit de stuwas ( $L_m = L_{wE} - L_s$ ).
- Lengte  $L_{m1}$  en  $L_{m2}$  geven een gelijke verdeling van de mondingslengte  $L_m$ . M.a.w.  $L_{m1}$  en  $L_{m2}$  creëren twee gelijkverdeelde toegangen naar de vispassage. Voor het bepalen van het einde van de wanden wordt een fictieve verbindinglijn getrokken van de binnen zijde van de stuwmuur tot het einde van de monding (zie stippellijn).
- Lengte  $L_{mE}$  is gelijk aan  $L_{wE} + 5$  m. De extra afstand van 5 m werd gekozen om bij het bovengrensscenario  $Q_{10\%}$  nog voldoende lengte afwaarts van de watersprongzone (migratielinielij) te houden als toegang naar de vispassage. Aan de andere kant wordt deze openingsbreedte ook best niet te groot gekozen, aangezien dit risico's kan geven op het ontstaan van een recirculatieneer door te sterke afname van de stroomsnelheden uit deze mondingsopening.
- Lengte  $L_o$  is van belang voor het 'buiten houden' van nadelige effecten van de watersprong, vooral bij hogere overstortdebieten. Voldoende lengte voorkomt namelijk, samen met een niet te grote doorstroombreedte (zie  $B_{m1}$  verderop onder de behandeling van de breedte parameters), dat het volledige lokstroomdebiet door deze opening wordt gezogen. Bij lagere overstortdebieten zorgt deze lengte tevens voor voldoende lokstroomdebiet door deze opening. Met oog op passeerbaarheid wordt  $L_o$  best ook weer niet te lang gekozen. In geval van de Dendervispassages bleek een lengte van  $L_o = 1$  m het meest optimaal, bij een openingsbreedte  $B_{m1}$  van 0,70 m.
- Lengte  $L_a$  is de afstand afwaarts van de stuwmuur van waarna de oeverwand terug afbuigt naar de normale stuwgeulbreedte. Deze afstand is verbonden aan de mondingsopeningen  $B_{m2}$  en  $B_{m3}$  (zie verder onder breedte-parameters). Wanneer deze mondingsopeningen bepaald zijn, buigt de oever afwaarts hiervan best zo spoedig mogelijk terug af, om zo het lokstroomkanaal niet te breed te maken waardoor stroomsnelheden hoog genoeg blijven voor een goede attractiviteit en het voorkomen van recirculatieneren. Ook houdt dit de hoek van de oeverwand zo flauw mogelijk. In het geval van de Dendervispassage bleek een lengte  $L_a$  van 2 m het meest optimaal. Hierbij wordt opgemerkt dat ook een ontwerp met een niet-terugbuigende oever mogelijk is bij voldoende lokstroomdebiet (zie verder in de volgende paragraaf).
- De hoeken van de oeverwand en de geleidingswanden volgen uit de voorgenoemde lengtewaarden. Daarbij dient echter wel altijd gecontroleerd te worden dat ze niet scherper worden dan 30 tot maximaal 45 graden (DWA, 2014). Anders worden de lengtematen  $L_m$  en  $L_{mE}$  hier best op aangepast.

Voor de parameters in **breedterichting** in het relatieve ontwerp (gekoppeld aan  $B_m$ ) gelden tevens de volgende richtlijnen:

- Breedte  $B_m$  wordt bepaald door de combinatie van het gekozen maximale lokstroomdebiet ( $Q_{lok}$ ) en de waterdiepte in lokstroomkanaal ( $d_a$ ) binnen de periode van optimale werking. Als vuistregel geldt dat stroomsnelheden in het lokstroomkanaal bij het maximale lokstroomdebiet niet hoger mogen gaan dan circa 0,7 m/s. In het geval van de Dendervispassages bleek een breedte van 2,5 m het meest optimaal, uitgaande van het maximale lokstroomdebiet van  $4 \text{ m}^3/\text{s}$ . Deze breedte wordt best ook niet te ruim gekozen aangezien dat bij lagere waarden van het lokstroomdebiet (in geval van een automatisch geregeld toegevoegd debiet) dan relatief lage stroomsnelheden in het lokstroomkanaal geeft wat minder goed is voor de attractiviteit (vindbaarheid) van de vispassage(monding).

- Breedte  $B_{m1}$  is in principe onafhankelijk van de gekozen  $B_m$ . Deze waarde is namelijk het optimum tussen een minimaal wenselijke breedte vanuit oogpunt passeerbaarheid doelsoorten en een maximale breedte die verhindert dat het volledige lokstroomdebiet in de watersprong wordt gezogen bij hogere debieten over de stuwen. In geval van de Dendervispassages bleek een breedte van 0,7 m het meest optimaal, uitgaande van een lengte  $L_a$  van circa 1 m (zie eerder in deze paragraaf onder relatieve parameters in lengterichting).
- Openingen  $B_{m2}$  en  $B_{m3}$  worden min of meer gelijk verdeeld over de nog beschikbare breedte van het mondingskanaal bij de gekozen waarden voor  $B_m$  en  $B_{m1}$ . Hoewel de openingen gelijk zijn zorgt de vormgeving van het ontwerp dat er iets meer van het resterende lokstroomdebiet door de buitenste opening ( $B_{m3}$ ) zal gaan. Opening  $B_{m2}$  staat namelijk schuin op de stroomrichting. Dit is bewust zo gedaan omdat het buitenste lokstroomkanaal voldoende debiet dient te houden bij het maatgevende bovengrensscenario. In dat geval wordt dit buitenste kanaal namelijk waarschijnlijk de enige passeerbare weg naar de vispassage voor sommige doelsoorten.
- Merk op dat in het ontwerp in Figuur 57 en Figuur 58 werd uitgegaan van een dikte voor de geleidingswanden van 0,30 m. Deze waarden kunnen in het bouwkundig ontwerp op basis van beschikbare materialen worden geoptimaliseerd, maar blijven hydraulisch gezien best zo smal mogelijk. Ook dient altijd gecontroleerd te worden dat de doorzwemopeningen tussen de geleidingswanden niet smaller worden dan het criterium van minimale doorzwembreedte met oog op de doelsoorten. In het geval van de Dendervispassages is deze minimale breedte 0,50 m (ontwerpcriterium minimale breedte op korte afstand), maar als optimale waarde wordt 0,70 m toegepast. In het geval van een andere wanddikte wordt best de centerlijn van de geleidingswanden behouden.

NB: deze relatieve parameters maken het ook mogelijk om een hoger lokstroomdebiet te kiezen wanneer dat vanuit andere randvoorwaarden mogelijk of zelfs wenselijk is. Zoals eerder aangegeven is een groter lokstroomdebiet enkel positief voor de attractiviteit (vindbaarheid) van de vispassage, op voorwaarde dat de maximaal toelaatbare stroomsnelheden voor de doelsoorten niet worden overschreden.

### 5.6.3 Recht doorlopende oever

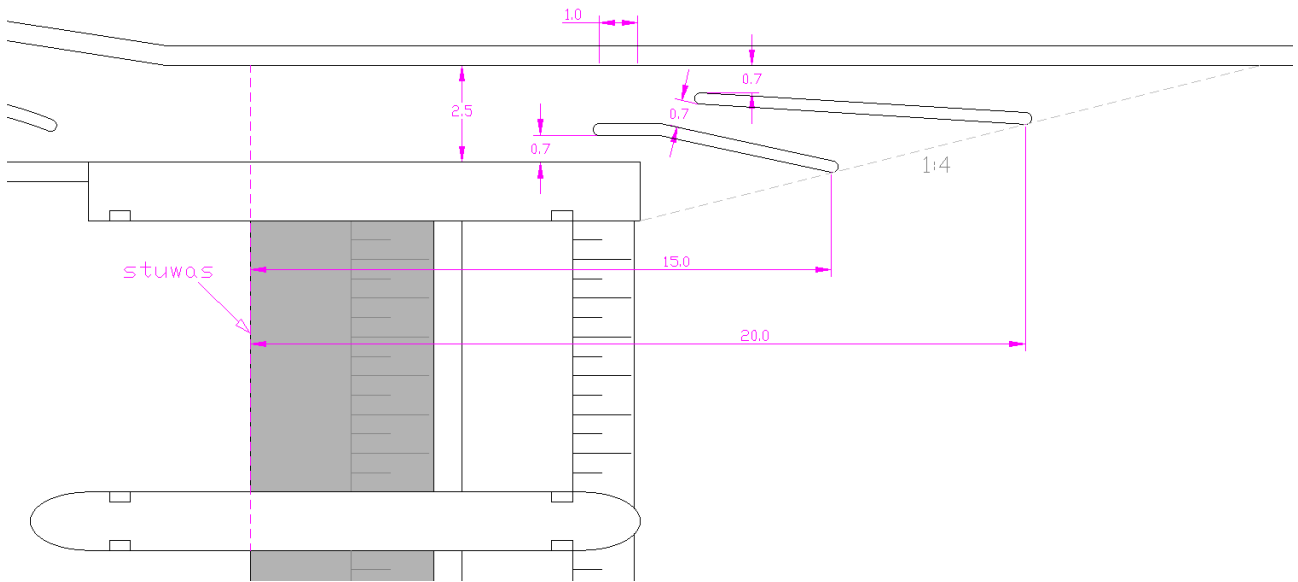
Op sommige locaties kunnen ruimtelijke randvoorwaarden er voor zorgen dat er niet gewerkt kan worden met een terugbuigende oeverlijn. Figuur 59 en Figuur 60 tonen daarom respectievelijk het absolute en relatieve voorkeursontwerp voor de situatie van een niet-terugbuigende oever. Zo goed als alle parameters blijven hierbij gelijk aan het ontwerp met de terugbuigende oever, alleen de locatie (in dwarsrichting) van het afwaartse einde van de geleidingswanden en daarmee de hoek van de geleidingswanden wijzigen vanwege de ligging van de oeverwand.

Voor de bepaling van het einde en de oriëntatie van de geleidingswanden worden de volgende richtlijnen gevolgd:

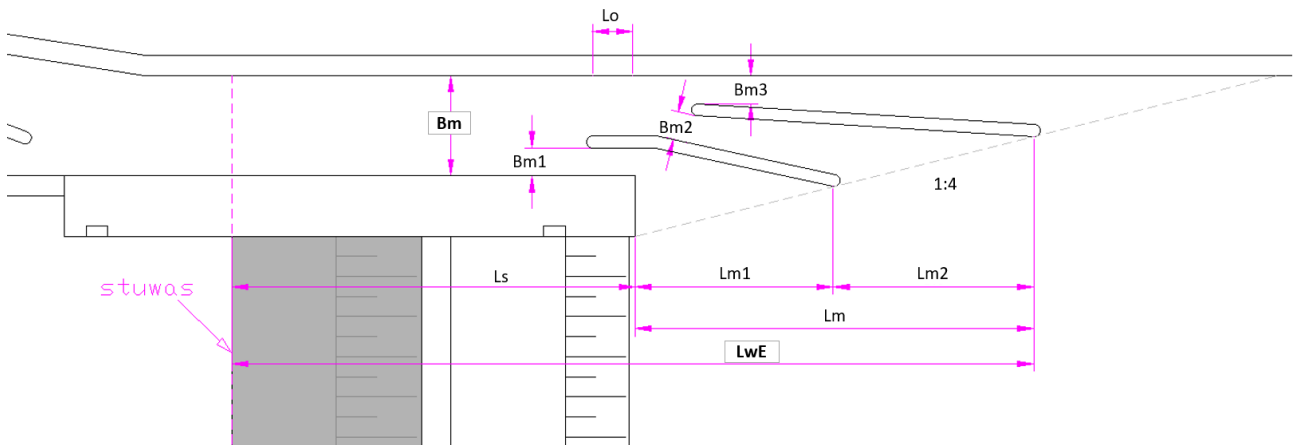
- Er wordt een fictieve lijn getrokken tussen de stuwmuur en de oeverwand van 1:4. Deze geleidelijke verwijding wordt toegepast om loslatingseffecten net afwaarts van de stuwmuur te voorkomen.
- Op het punt waar de lengtelijnen  $L_{m1}$  en  $L_{m2}$  deze fictieve lijnen snijden ligt het eindpunt van de geleidingswanden.
- Logischer wijze is de parameter  $L_a$  niet meer van toepassing.

De breedte van openingen  $B_{m2}$  en  $B_{m3}$  kan gelijk blijven aan het ontwerp bij de terugbuigende oever (namelijk een breedte van 0,7 m), maar er kan ook gekozen worden om deze openingen iets groter te kiezen waardoor het begin van de niet geknikte geleidingswand meer afwaarts start (bijv. openingen van 0,8 m). Echter worden deze openingen best ook weer niet te breed gekozen, anders verliest de lokstroom door deze openingen te veel in kracht.

Ook wordt opgemerkt dat er in Figuur 59 alleen een dimensionering is gegeven voor de eerste locatiegroep (GB, ID, PO en DL) aangezien een mogelijke recht doorlopende oever te Aalst en Denderbelle geen optie is.



Figuur 59 – Voorkeursontwerp bij recht doorlopende oever



Figuur 60 – Relatief voorkeursontwerp bij recht doorlopende oever

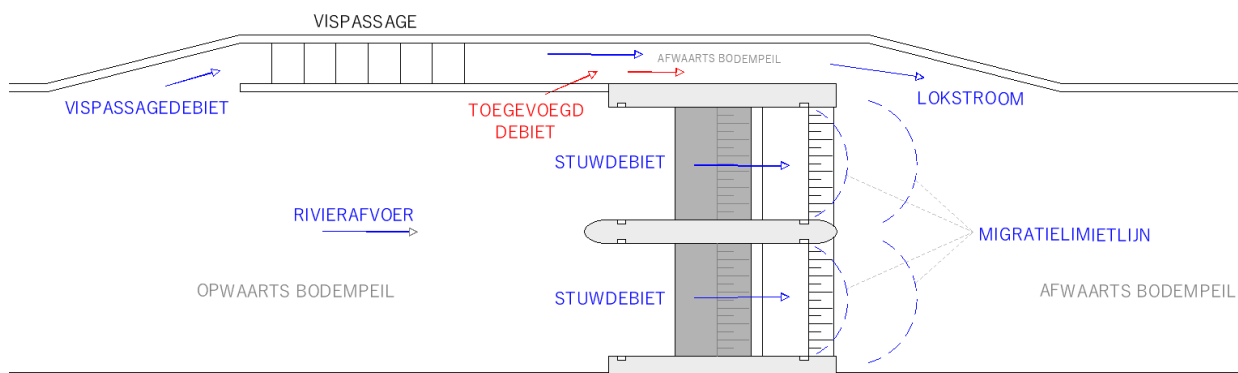
## 6 Toegevoegd debiet

### 6.1 Inleiding

Om het risico op sluiting van de vispassage bij lagere afvoeren op de Dender zo veel mogelijk te beperken, werd er voor gekozen om het basisdebiet van de vispassage zo laag mogelijk te houden, zie hoofdstuk 4. Aan de andere kant blijft een zo groot mogelijk lokstroomdebiet in situaties met gewone of verhoogde afvoer ook van belang. Deze ogenschijnlijke tegenstrijdigheid wordt opgelost door de toepassing van een zogenaamd 'toegevoegd debiet'.

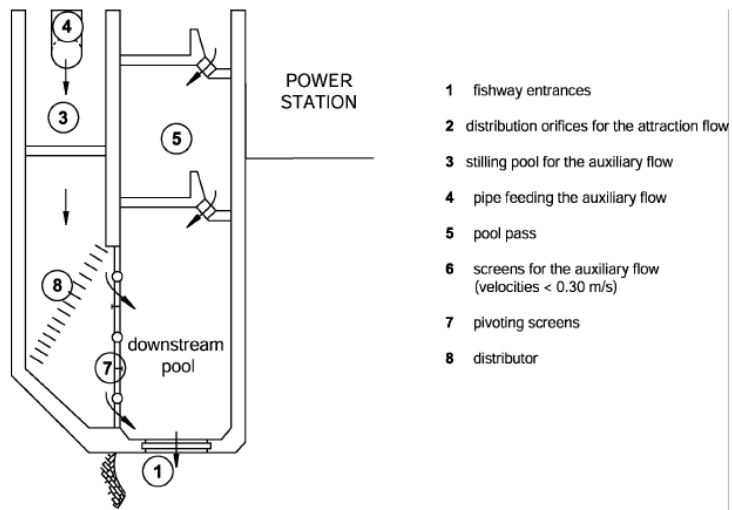
Het principe van een toegevoegd debiet gaat uit van het inbrengen van een extra debiet net opwaarts van de monding om zo de lokstroom te versterken. Op deze wijze kan het vispassagedebiet relatief laag worden gehouden terwijl de lokstroom versterkt kan worden door middel van het regelbare toegevoegde debiet bij hogere afvoeren. In het geval van de vispassages op de Dender wordt de inbreng van het toegevoegd debiet voorzien net opwaarts van de monding en net afwaarts van de vispassagebekkens (zie rode tekst en pijlen in Figuur 61).

In dit hoofdstuk wordt de manier en de uitvoering van de inbreng van het toegevoegd debiet in de nieuwe vispassages op de Dender onderzocht. Hierbij is het van belang dat deze inbreng de hoofdstroming (de zgn. migratiecorridor) in de vispassage niet verstoort. De grootte van het toegevoegd debiet dient tevens (in stappen) mee te kunnen opbouwen met het debiet over de stuwen. Voor het uiteindelijke ontwerp is daarom in hoofdstuk 8 een voorstel uitgewerkt met voorwaarden voor een automatische sturing.



Figuur 61 – Concept van het toegevoegd debiet om een voldoende attractieve lokstroom te creëren

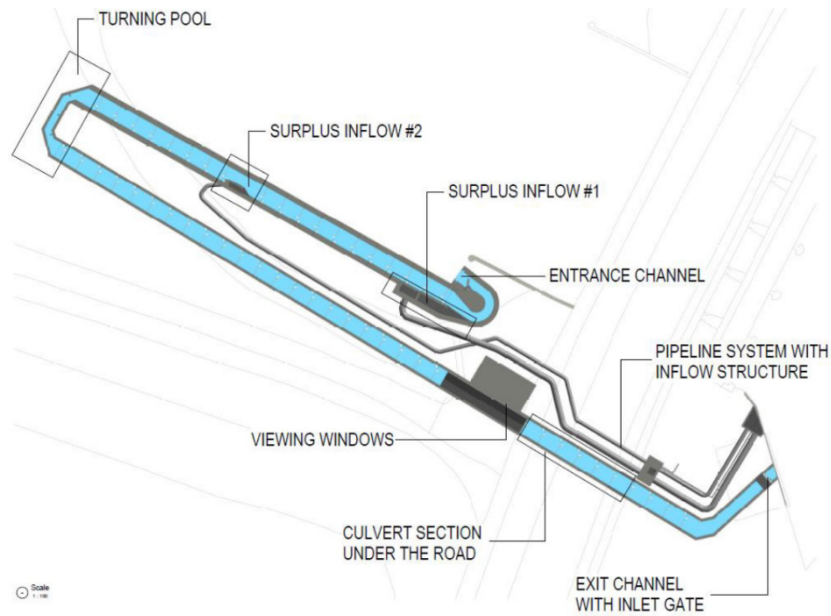
Een toegevoegd debiet wordt meestal net opwaarts van de monding ingelaten om zo de lokstroom naar de vispassage te versterken (Larinier, 2002a). In geval van sterke fluctuatie van het afwaartse waterpeil (bijv. sterke toename door getij) kan in sommige situaties ook toegevoegd debiet worden ingebracht in bepaalde bekkens of locaties in de vispassage om zo ook de hoofdstroom in de vispassage zelf attractief genoeg te houden (Oberle *et al.* 2012; Redeker & de Bruijne, 2018). Dit laatste is in het geval van de Dendervispassages niet van toepassing. Figuur 62, Figuur 64 en Figuur 63 tonen enkele praktijkvoorbeelden van principes voor de inbreng van toegevoegd debiet.



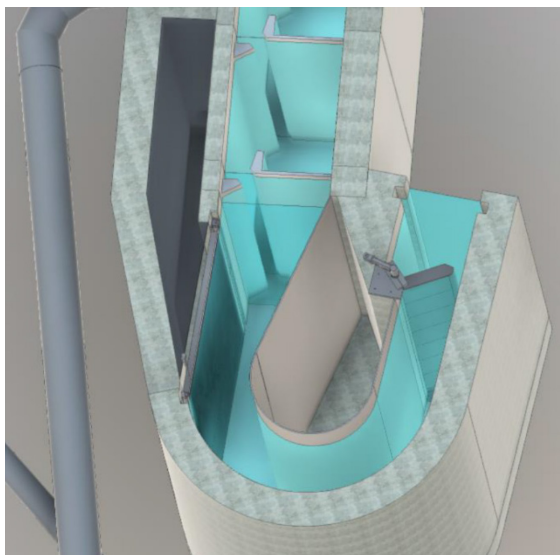
Figuur 62 – Voorbeeld principe inbreng toegevoegd debiet zoals toegepast in verschillende vertical slot-vispassages in Frankrijk en Wallonië (bron: Larinier, 2002a)



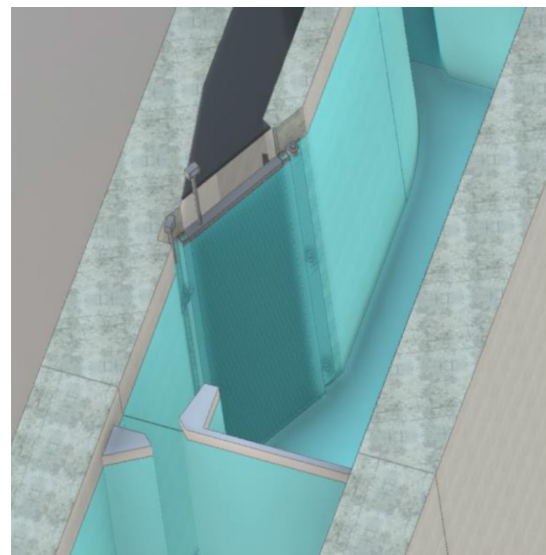
Figuur 63 – Voorbeeld inbreng toegevoegd debiet in de dubbelslot vispassage op de Elbe te Geesthacht, Duitsland



grondplan



Inflow #1



Inflow #2

Figuur 64 – Voorbeeld inbreng toegevoegd debiet in de vertical slot-vispassage te Doesburg, Nederland (Boven: grondplan; linksonder: #1; rechtsonder: #2; bron: Redeker & de Bruijne, 2018)

De bovenstaande voorbeelden gaan allemaal uit van een zijdelingse instroom in de vispassage. In het voorbeeld uit Figuur 62 (vispassages Frankrijk en Wallonië) stroomt het toegevoegd debiet via een parallel kanaal, terwijl in de voorbeelden in Figuur 63 (vispassage Geesthacht) en in Figuur 64 (vispassage Doesburg) gewerkt wordt met een buizensysteem en een dissipatie-bassin. In de voorbeeldvispassages te Doesburg en in Frankrijk wordt aan het einde van het bassin een rooster ('screen') toegepast om te zorgen dat vissen niet het bassin(kanaal) inzwemmen. In het voorbeeld van Geesthacht werd dat niet gedaan.

## 6.2 Randvoorwaarden

Uit de studie van het mondingsontwerp in hoofdstuk 5 bleek dat een maximaal lokstroomdebiet van circa  $4 \text{ m}^3/\text{s}$  benodigd is om een voldoende sterke lokstroom te creëren. Uitgaande van een vispassagedebiet van circa  $0,8 \text{ m}^3/\text{s}$  (zie 4.4.2.1) zou dan een maximaal benodigd toegevoegd debiet van circa  $3 \text{ m}^3/\text{s}$  nodig zijn.

Voor de inpassing van het toegevoegd debiet is de maximaal beschikbare ruimte van belang. Op sommige locaties (bijv. te Denderleeuw) is de beschikbare breedte voor inpassing van de vispassage beperkt. Met oog op het meest optimale vispassagetype wordt uitgegaan van een vertical slot-vispassage (zie hoofdstuk 4). Bij een slotbreedte van  $0,5 \text{ m}$  zou een dergelijke vispassage een breedte hebben van  $3,5 \text{ m}$ . Als meest kritische ruimtelijke randvoorwaarde wordt er daarom van uitgegaan dat de inbreng van het toegevoegd debiet gerealiseerd dient te worden binnen een beschikbare breedte van maximaal  $3,5 \text{ m}$ . Op locaties waar meer ruimte beschikbaar is (en eventueel ook een groter lokstroomdebiet mogelijk is), kan een ruimere inpassing worden uitgewerkt.

Zoals al aangegeven in de inleidende paragraaf mag de inbreng van het toegevoegd debiet de hoofdmigratieroute door de vispassage niet verstoren. Circulatieneren en/of hoge turbulentie mogen de hoofdstroom in de vispassage dus niet verstoren. Ook mogen stroomsnelheden in deze hoofdmigratieroute met oog op passeerbaarheid niet te groot worden (zie ontwerpcriteria in 2.3.1).

Tenslotte speelt naast de beschikbare breedte ook de waterdiepte een bepalende rol bij de stroomsnelheden die zullen optreden bij een gegeven debiet. De kleinste waterdiepte geldt voor de locaties Denderleeuw, Pollare en Idegem, met een waterdiepte bij streefpeil van  $2,4 \text{ m}$ . Deze meest kritische waterdiepte zal daarom ook toegepast worden in de ontwerpstudie voor inbreng van het toegevoegd debiet.

## 6.3 Variantenstudie

Door middel van verschillende CFD-studies met behulp van de software OpenFoam werden variantenstudies uitgevoerd (Badano *et al.*, 2019; Lopez Castaño *et al.*, 2023; Alemi *et al.*, 2024).

### 6.3.1 Boveninlaat vanaf tussenvloer

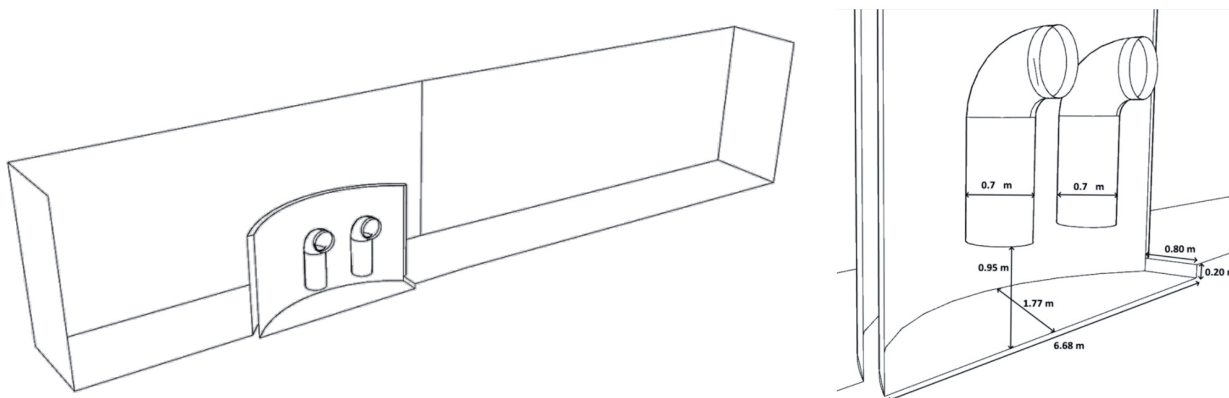
Eerst werd onderzocht of een boveninlaat via een tussenvloer met regelschuif een alternatief kon zijn voor de zijdelingse inlaten uit de praktijkvoorbeelden in de voorgaande paragraaf. Dit bleek echter te leiden tot zeer complexe stromingspatronen met hoge stroomsnelheden (soortgelijk aan een watersprong) waardoor deze piste werd verlaten (Lopez Castaño *et al.*, 2023).

### 6.3.2 Één bassin met twee buizen

Aangezien het vanuit oogpunt van beheer de voorkeur heeft om zo min mogelijk roosters toe te passen werden tevens varianten onderzocht in lijn met het praktijkvoorbeeld van Geesthacht (zie Figuur 63). Figuur 65 toont de vormgeving van een variant met twee buizen in één bassin.

Aan de opwaartse rand werd een vispassagedebiet opgelegd van  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  (wat een afronding is van het berekende vispassagedebiet uit 4.4.2.1). Aangezien de studie zich richtte op de samenvloeiing afwaarts van het bassin werd het meest afwaartse slot (aanvankelijk) niet gemodelleerd en werd het vispassagedebiet over de volle breedte uniform ingelaten. De twee buizen werden fysiek opgenomen in het model, maar de rand voor het inlaten van het toegevoegd debiet werd aan het einde van de buizen gekozen. De buizen hebben elk een binnendiameter van  $0,7 \text{ m}$  en kregen elk een inlaatdebiet van  $2 \text{ m}^3/\text{s}$ , wat een totaal toegevoegd debiet van  $4 \text{ m}^3/\text{s}$  gaf. De breedte van de uitstroom uit het ronde bassin van het toevoegd debiet is  $0,8 \text{ m}$  en het nauwste gedeelte in het kanaal ter plaatse van de ronding van het bassin is  $1,5 \text{ m}$ .

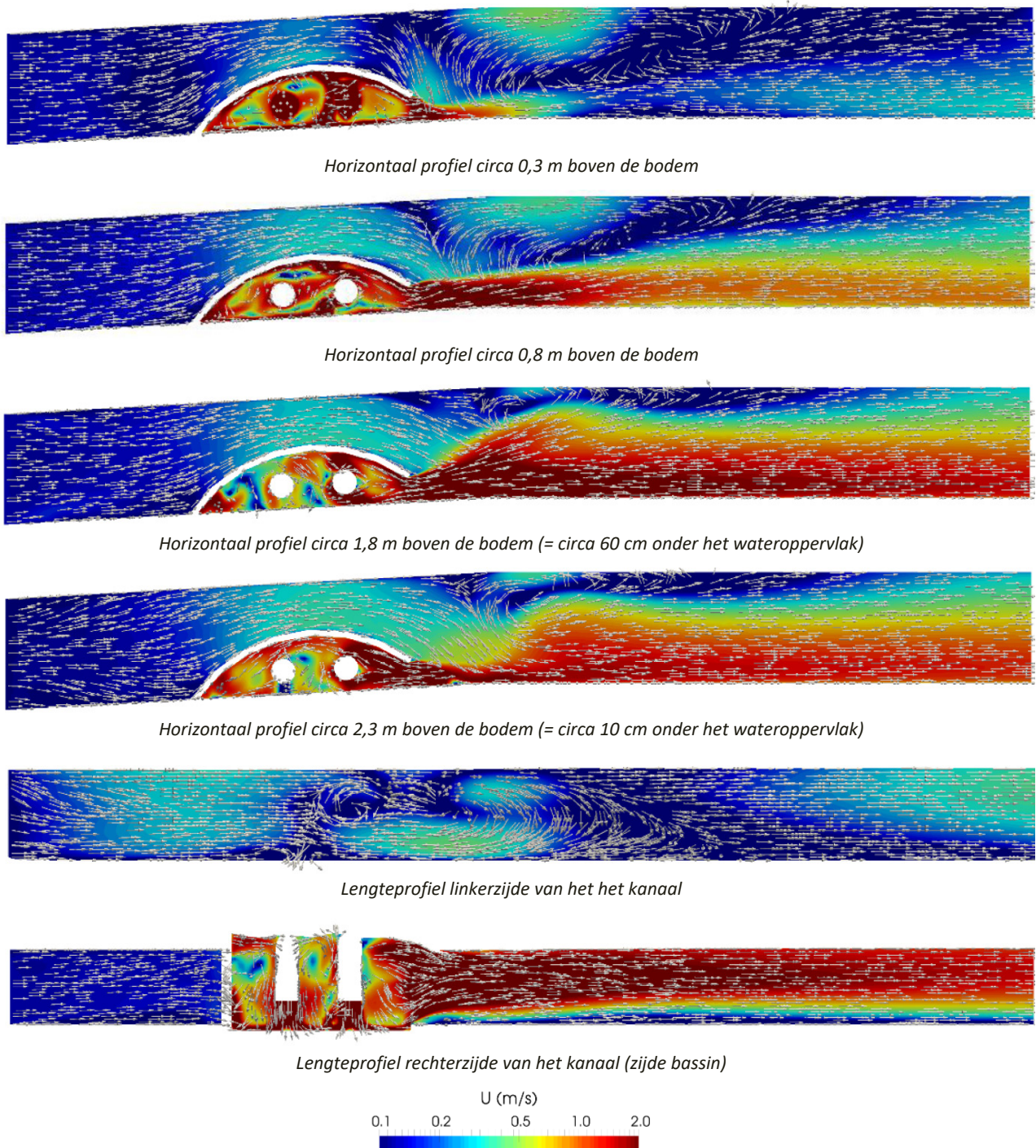
Aangezien locatie Denderleeuw werd genomen als voorbeeld, bevindt de horizontale bodem van het mondingskanaal zich op 5,21 mTAW en het wateroppervlak ligt rond de 7,61 mTAW, wat een waterdiepte van 2,4 m geeft. Figuur 66 toont de resultaten van de stromingspatronen op verschillende hoogtes in de waterkolom.



Figuur 65 – Vormgeving variant met inbreng volledige toegevoegde debiet in één bassin zonder roosters

Het eerste wat uit de resultaten van Figuur 66 kan worden opgemaakt is dat het verschil in momentum tussen de twee stromen duidelijk te groot is. Waar de stroom uit de vispassage een debiet heeft van  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  (over een breedte van circa 1,5 tot 2,5 m), heeft het toegevoegd debiet namelijk een grootte van  $4 \text{ m}^3/\text{s}$  (over een breedte van 0,8 m). Dit zorgt voor een groot verschil in stroomsnelheid tussen de uitstroom uit het bassin en de stroming in de vispassage, wat vervolgens een grote zijneer veroorzaakt over de volledige breedte van de vispassage en zo de migratiecorridor doorbreekt. Dit is een zeer onwenselijk stroompatroon voor een vlotte vismigratie. In aanvullende simulaties is een poging gedaan om dit stroompatroon te corrigeren met behulp van geleidingswanden, maar dit bleek niet mogelijk (Badano *et al.*, 2019). Dit was niet het geval in de vispassage te Geesthacht aangezien de ratio tussen de twee stromen daar veel lager ligt. Het debiet via de vispassage is daar zelfs groter dan het toegevoegd debiet uit het bassin.



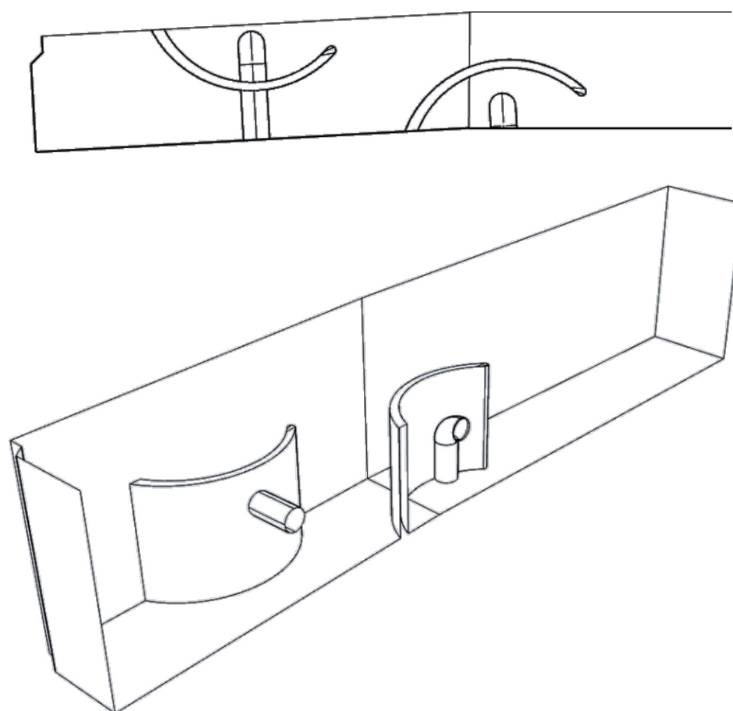


Figuur 66 – Resultaten simulatie inbreng toegevoegd debiet in één bassin via twee buizen

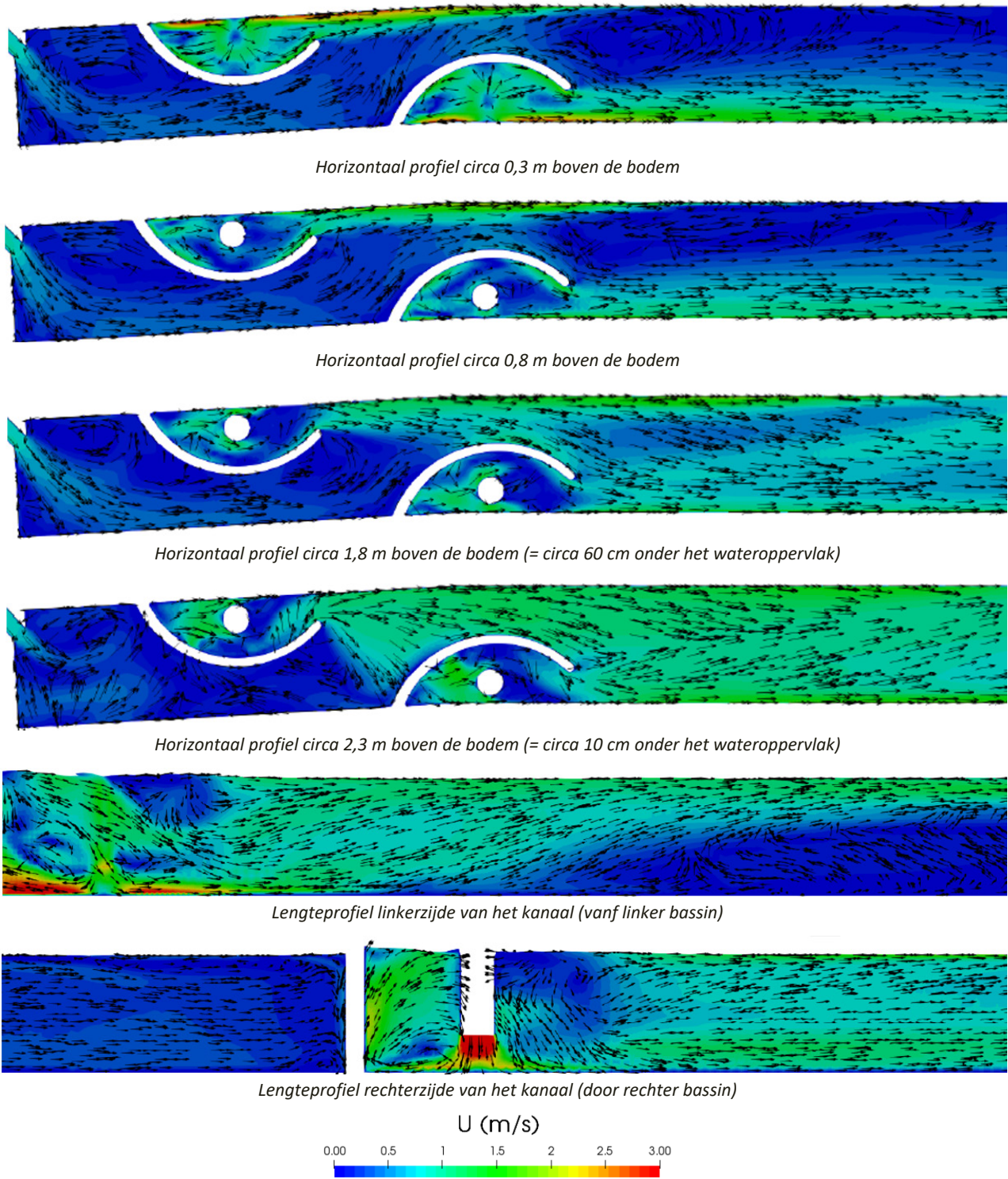
### 6.3.3 Twee (alternerende) bassins met elk één buis

Op basis van de resultaten met één bassin werd een nieuwe variant uitgewerkt met twee bassins (inlaatpunten), die alternerend in het kanaal werden geplaatst, zie Figuur 67 (Lopez Castaño *et al.*, 2023). Dit zorgt ervoor dat de ratio tussen de samenvloeiende stromen op beide punten kleiner wordt, waardoor het risico op het ontstaan van loslatingseffecten en complexe stroompatronen kleiner is. De diameter van de buizen (0,7 m) en het debiet per buis (2 m<sup>3</sup>/s) zijn gelijk aan de voorgaande variant met één bassin. Voor de inlaat van het vispassagedebiet werd het meest afwaartse slot nu wel opgenomen in het model.

De uitstroomopeningen van het bassin (0,8 m) en de nauwste punten tussen de bassins en de zijwanden (1,5 m) zijn eveneens gelijk aan de voorgaande variant met één bassin. Figuur 68 toont de resultaten van de simulatie met de twee alternerende bassins.



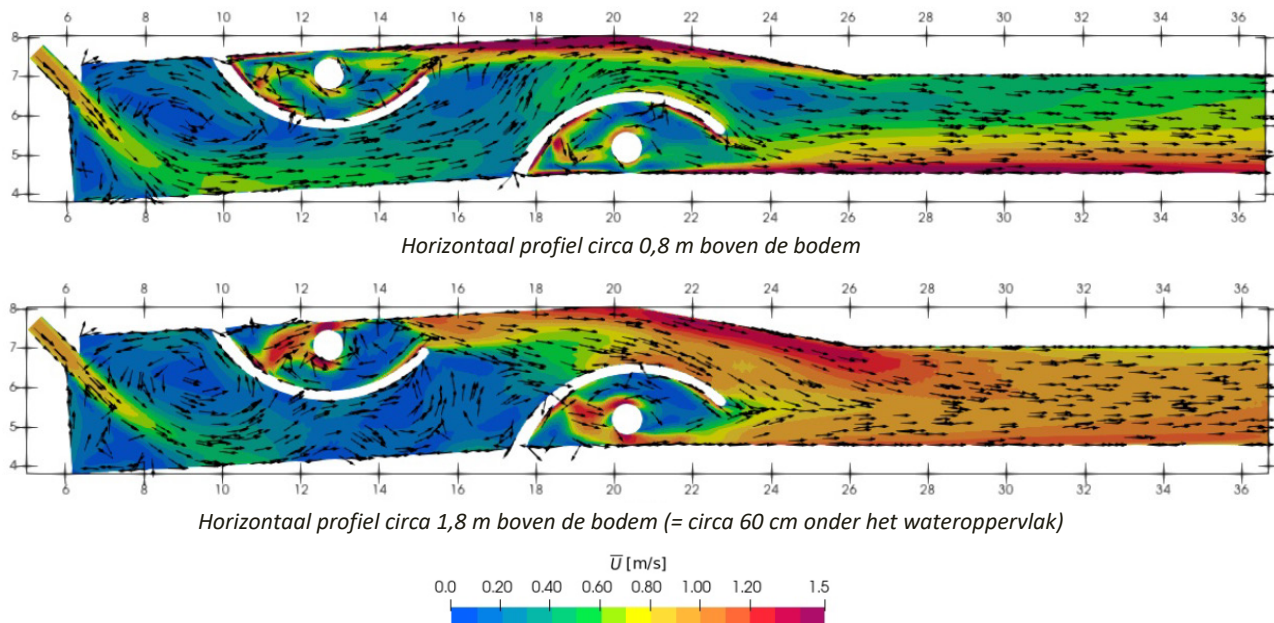
Figuur 67 – Vormgeving variant met inbreng in twee alternerende bassins met één buis per bassin



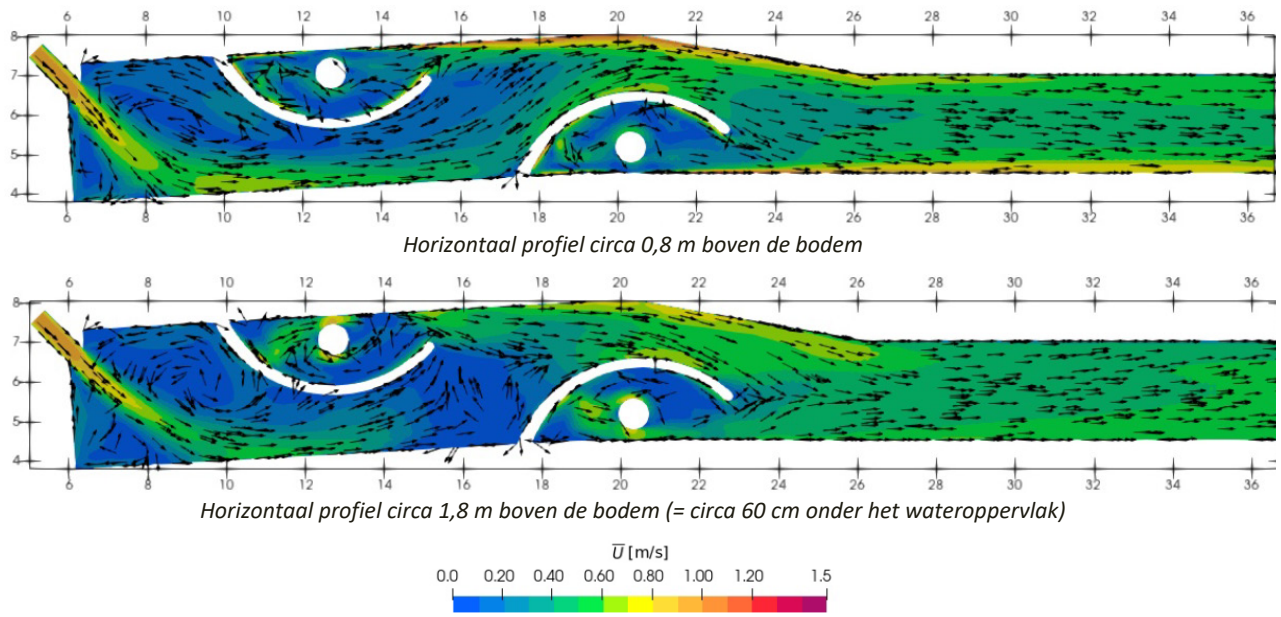
Figuur 68 – Resultaten variant met twee alternerende bassins en één buis per bassin

Uit Figuur 68 blijkt dat het stroompatroon al is verbeterd en stroomsnelheden zeker aan de bodem laag genoeg liggen om passeerbaar te zijn. Maar afwaarts van het afwaartse bassin ontstaat terug een recirculatiezone in de onderzijde van de waterkolom (zie hoogte 0,3 m en 0,8 m boven de bodem). Ook ontstaan er terugstroomeffecten aan de bodem in het afwaartse deel van het kanaal (zie lengteprofiel aan linkerkzijde van het kanaal).

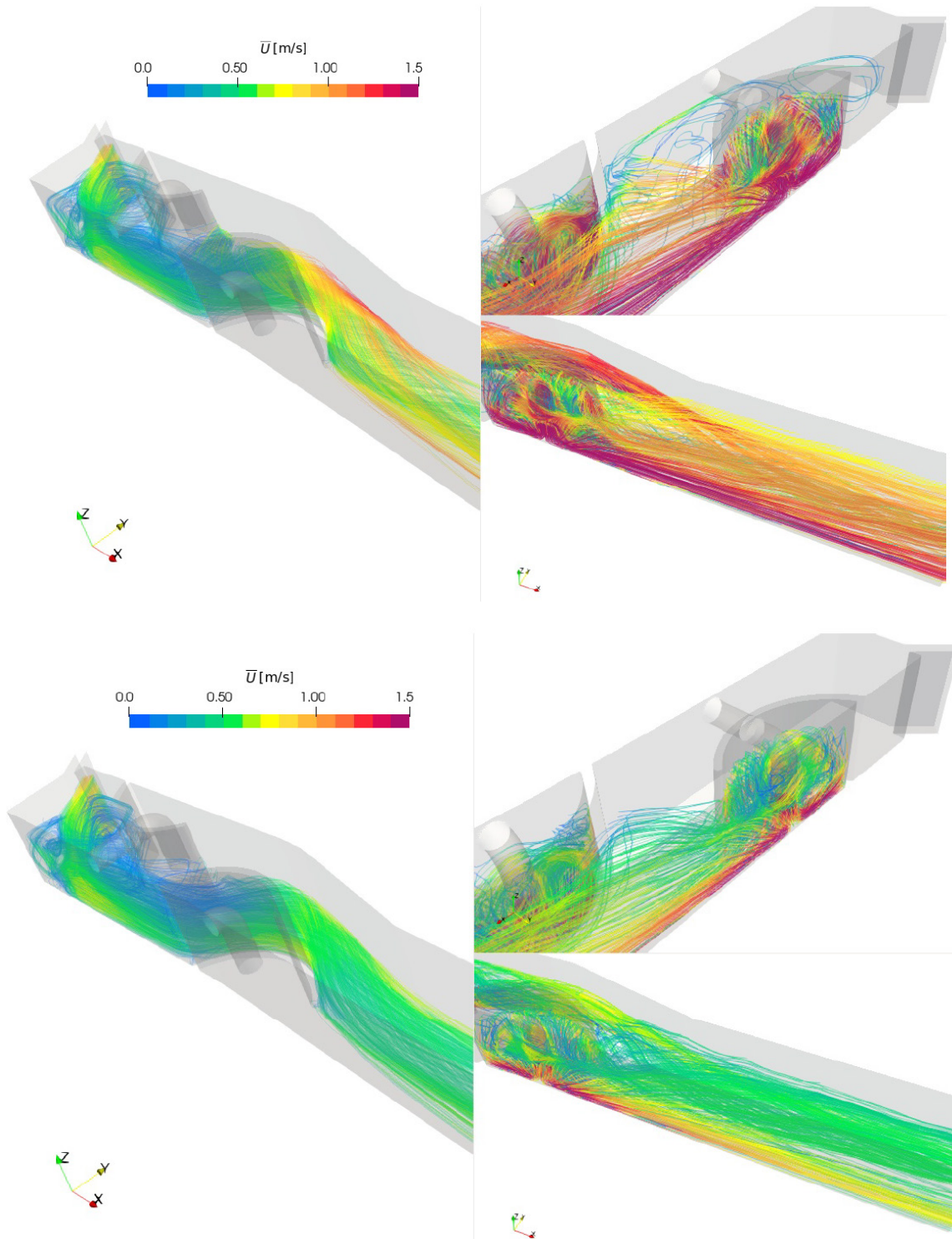
Daarom werd het ontwerp verder geoptimaliseerd met een vernauwing in het kanaal afwaarts van het afwaartse bassin van 3,5 m naar 2,5 m. Ook werd de invloed van de grootte van het toegevoegd debiet onderzocht. In voorgaande simulaties lag deze iets hoger dan nodig (namelijk  $4 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Daarom werd in de volgende stap zowel een simulatie met een debiet van  $2 \text{ m}^3/\text{s}$  per buis (totaal  $4 \text{ m}^3/\text{s}$ ) als  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  per buis (totaal  $2 \text{ m}^3/\text{s}$ ) uitgevoerd. Figuur 69 en Figuur 70 tonen de resultaten van deze aanvullende simulaties door middel van horizontale en longitudinale snelheidsprofielen. Figuur 71 geeft tevens een 3D-beeld van de resultaten met behulp van stroomlijnen.



Figuur 69 – Resultaten twee alternerende bassins met afwaartse vernauwing mondingskanaal en debiet per buis  $2 \text{ m}^3/\text{s}$



Figuur 70 – Resultaten twee alternerende bassins met afwaartse vernauwing mondingskanaal en debiet per buis 1 m<sup>3</sup>/s



Figuur 71 – 3D-weergave resultaten met twee alternerende bassins (boven: 2 m³/s per buis; beneden: 1 m³/s)

In Figuur 69, Figuur 70 en Figuur 71 is te zien dat de recirculatiezone net afwaarts van het afwaartse bassin door toepassing van de vernauwing inderdaad wordt voorkomen, wat betekent dat dit ontwerp zorgt voor een goed stroompatroon dat de migratiecorridor niet verstoort.

Wel zijn stroomsnelheden in het afwaartse vernauwde deel van het mondingskanaal te hoog in geval van een debiet per buis van  $2 \text{ m}^3/\text{s}$ , Figuur 69. Bij  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  per buis voldoen de stroomsnelheden in het afwaartse deel van het kanaal wel aan de maatlat van  $0,7 \text{ m/s}$ . In principe is een debiet van  $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$  per buis voldoende voor het toegevoegd debiet, aangezien dit samen met het vispassagedebiet zorgt voor het vereiste maximale lokstroomdebiet van  $4 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $= 1 + 1,5 + 1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ ). In vervolgsimulaties werd daarom een debiet per buis van  $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$  onderzocht, waarbij tevens werd gekeken naar mogelijke verdere optimalisatie van dit voorkeursontwerp.

#### 6.3.4 Optimalisatie ontwerp wanden alternerende bassins

Voor de verdere optimalisatie van het voorkeursontwerp met twee (alternerende) bassins werden de volgende zaken door middel van simulaties onderzocht:

- De stroomlijning van bassinwanden;
- De hoogte van de bassinwanden;
- Meerdere uitstroomopeningen;
- En ook een variant met de bassins aan dezelfde zijde van het mondingskanaal.

Aangezien nog niet bekend is hoeveel lucht er mogelijk via de buizen wordt aangezogen, werden elk van de varianten beproefd voor buizen met een debiet van elk  $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$  zonder en met (10%) lucht. Merk op dat ook in de situatie met lucht het 'waterdebiet'  $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$  blijft. Om een zo volledig mogelijk stroombeeld te verkrijgen werden tevens de drie afwaartse sloten van de vispassage opgenomen in het model.

Voor de resultaten van de verschillende varianten wordt verwezen naar Alemi *et al.* (2024). Figuur 72 toont het uiteindelijke voorkeursontwerp dat volgde uit de studie. Hierbij zijn de bassinwanden (ten opzichte van de voorkeursvariant uit de voorgaande paragraaf) meer gestroomlijnd, zijn de wanden tot streefpeil verlaagd (m.a.w. deze kunnen overstromen) en werd er in het opwaartse bassin een tweede opwaartse uitstroomopening voorzien met een sleufbreedte van  $0,3 \text{ m}$ .

Figuur 73 toont de resultaten voor stroompatronen en stroomsnelheden op verschillende hoogtes in de waterkolom. Ook de maximaal toelaatbare turbulentie (energie per volume-eenheid) werd gecontroleerd. Deze resultaten zijn weergegeven in Figuur 74. Merk op dat alleen de resultaten zonder beluchting hier worden weergegeven. Uit de resultaten bleek dat beluchting geen compleet ander stroombeeld gaf, maar er wel voor zorgde dat stroomsnelheden vooral in de bovenkant van de waterkolom toenamen waardoor de stroming op sommige plaatsen geneigd is om meer naar boven toe af te buigen.

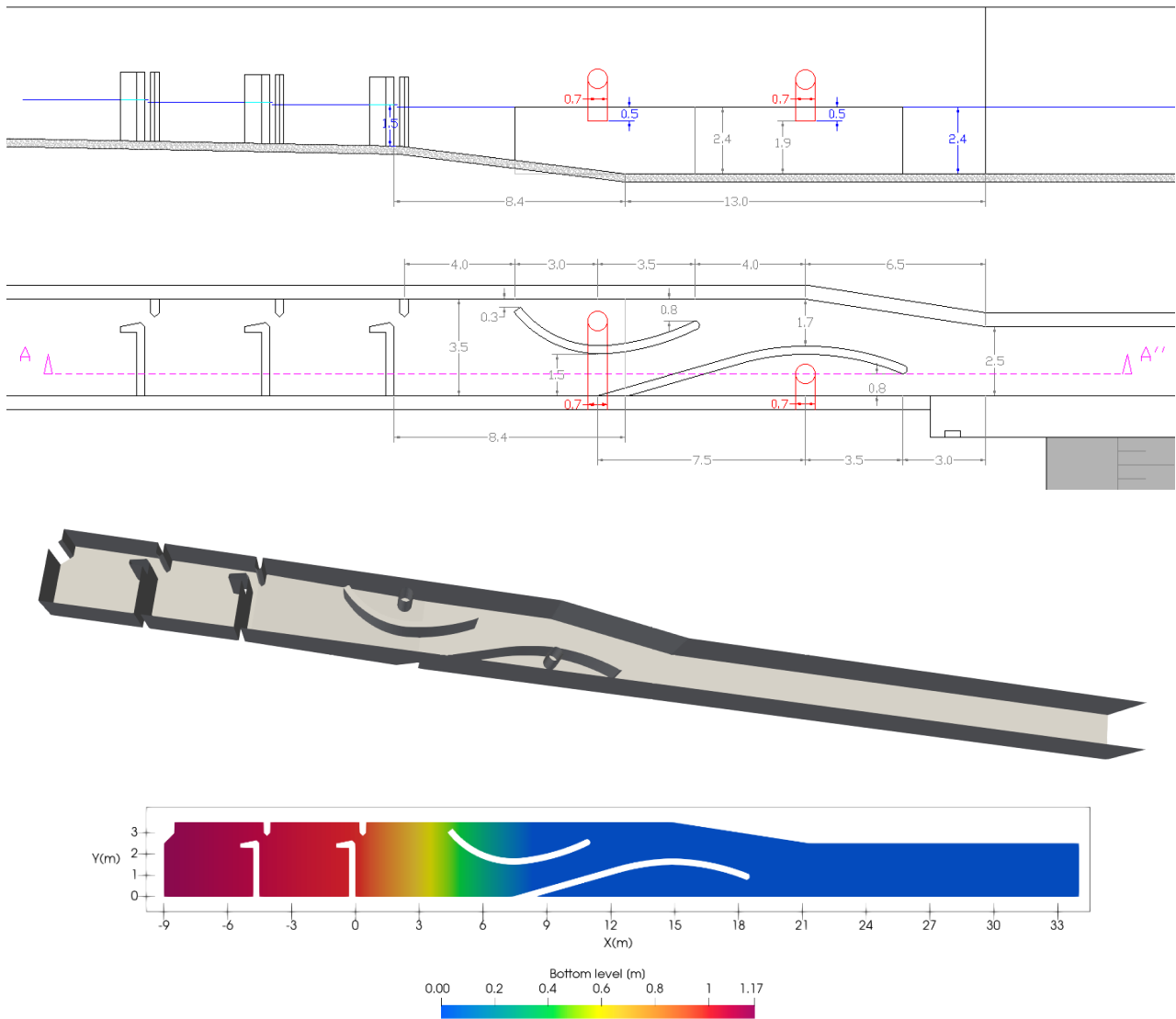
Uit de resultaten van Figuur 73 en Figuur 74 kan opgemaakt worden dat een goede migratiecorridor ontstaat over de volledige lengte van de het mondingskanaal waarbij stroomsnelheden onder de maatlat van  $0,7 \text{ m/s}$  blijven en er geen recirculatieneren optreden die de migratiecorridor verstoren. Figuur 75 geeft een schematisch beeld van wat wordt gezien als de migratiecorridor en het algemene stroompatroon dat werd bepaald op basis van de simulaties.

Doordat water uit de bassins ook over de wanden kan stromen, nemen stroomsnelheden in de uitstroomopeningen af, wat ten goede komt aan de verhouding in momentum en vermindert het risico op het ontstaan van recirculatieneren ter plaatse van deze samenstroming.

De tweede opwaartse opening in het opwaartse bassin zorgt dat een deel van het toegevoegd debiet ook al kan samenstromen met het vispassagedebiet nog voor de samenstroming ter plaatse van de afwaartse opening in het bassin. Ook dit komt de momentumbalans op die locatie ten goede en versterkt ook de lokstroom naar vispassage naast het opwaartse bassin. Een bijkomend voordeel is dat deze tweede opening het ook mogelijk maakt voor vissen, die eventueel in het bassin zwemmen bij lagere debieten, om toch door te kunnen zwemmen naar de vispassage zonder te moeten terugkeren.

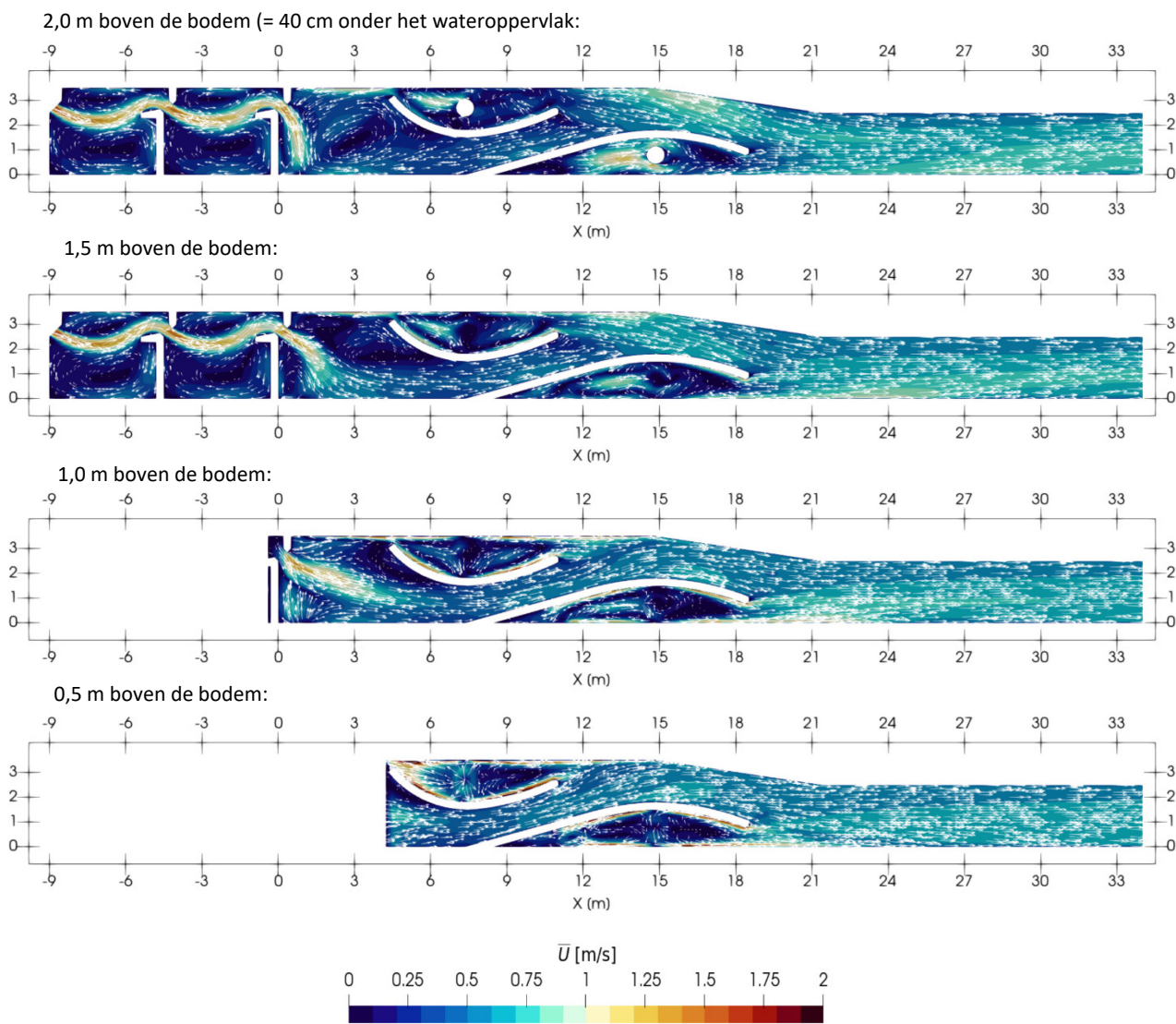
Uit Figuur 74 kan tenslotte worden opgemaakt dat de turbulentie in de dissipatiebassins de migratiecorridor niet verstoort. De maatlat van  $100 \text{ W/m}^3$  wordt buiten de bassins en in de migratiecorridor niet overschreden.

Lengteprofiel A - A''

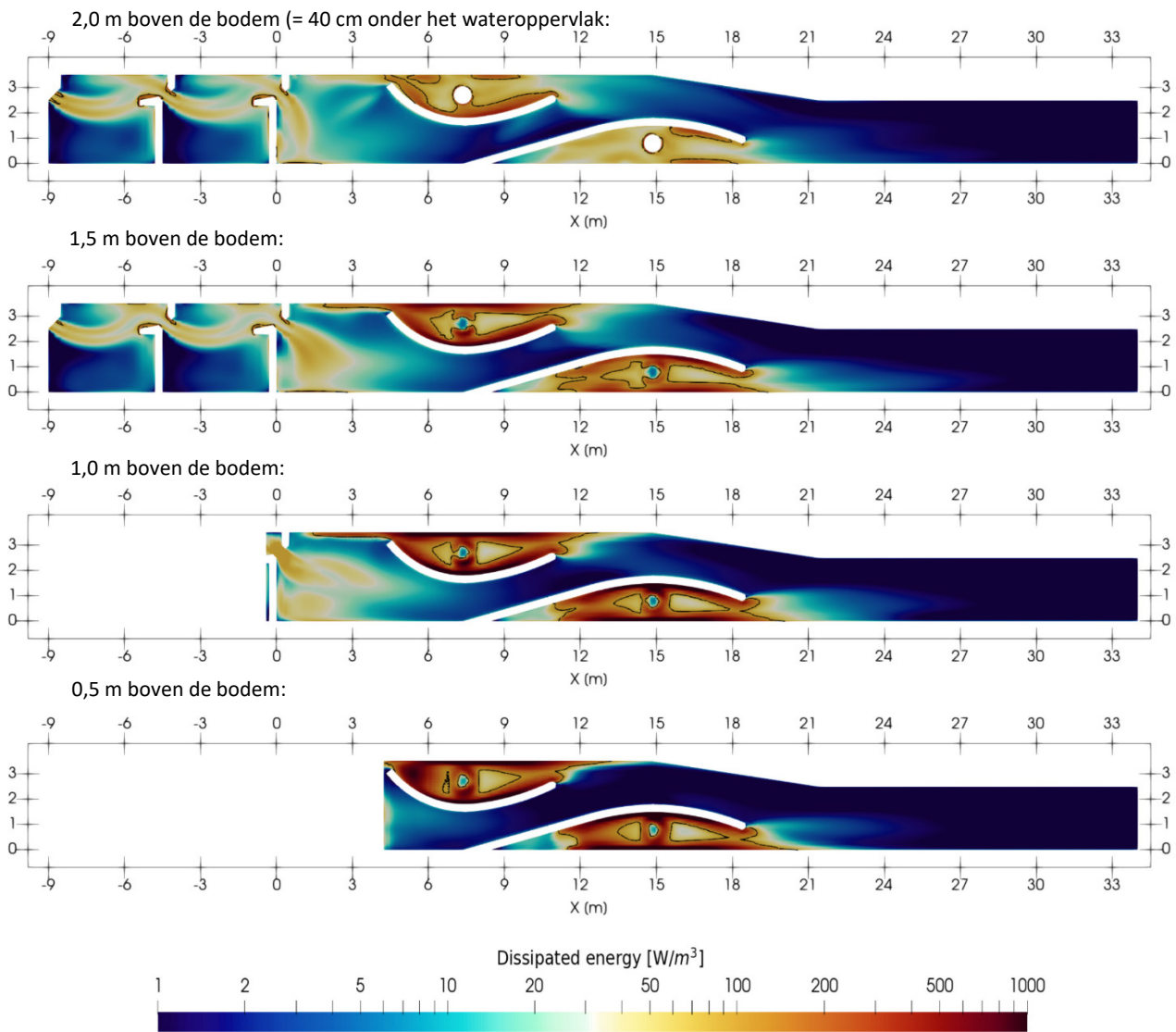


Figuur 72 – Dimensionering voorkeursontwerp toegevoegd debiet en vormgeving in CFD-model

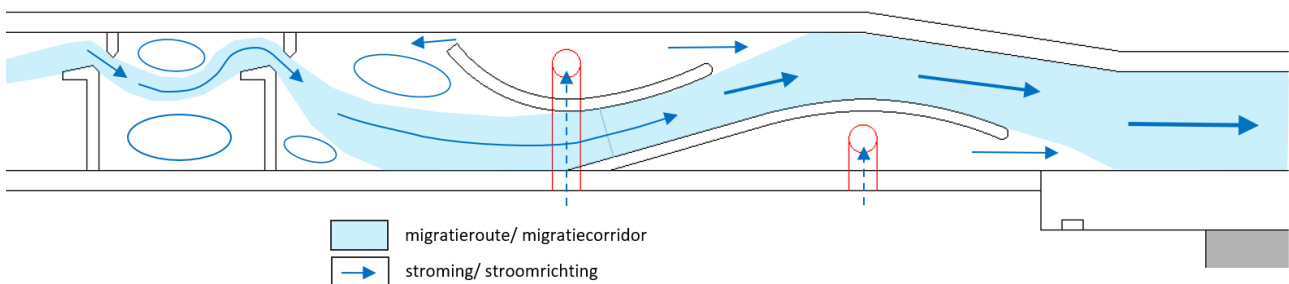




Figuur 73 – Resultaten stroomsnelheden en stromingspatronen voorkeursvariant inbreng toegevoegd debiet



Figuur 74 – Resultaten turbulentie (energie per volume) voorkeursvariant inbreng toegevoegd debiet



Figuur 75 – Schematische weergave migratiecorridor bij voorkeursontwerp voor inbreng toegevoegd debiet

### 6.3.5 Mogelijke combinatie met energiewinning

Aangezien er momenteel turbines bestaan die ingezet kunnen worden bij relatief kleinere vervallen en debieten, kan er gezocht worden naar een win-win tussen energiewinning en het verder versterken van de lokstroom via het toegevoegd debiet. Hierbij zijn echter twee belangrijke voorwaarden:

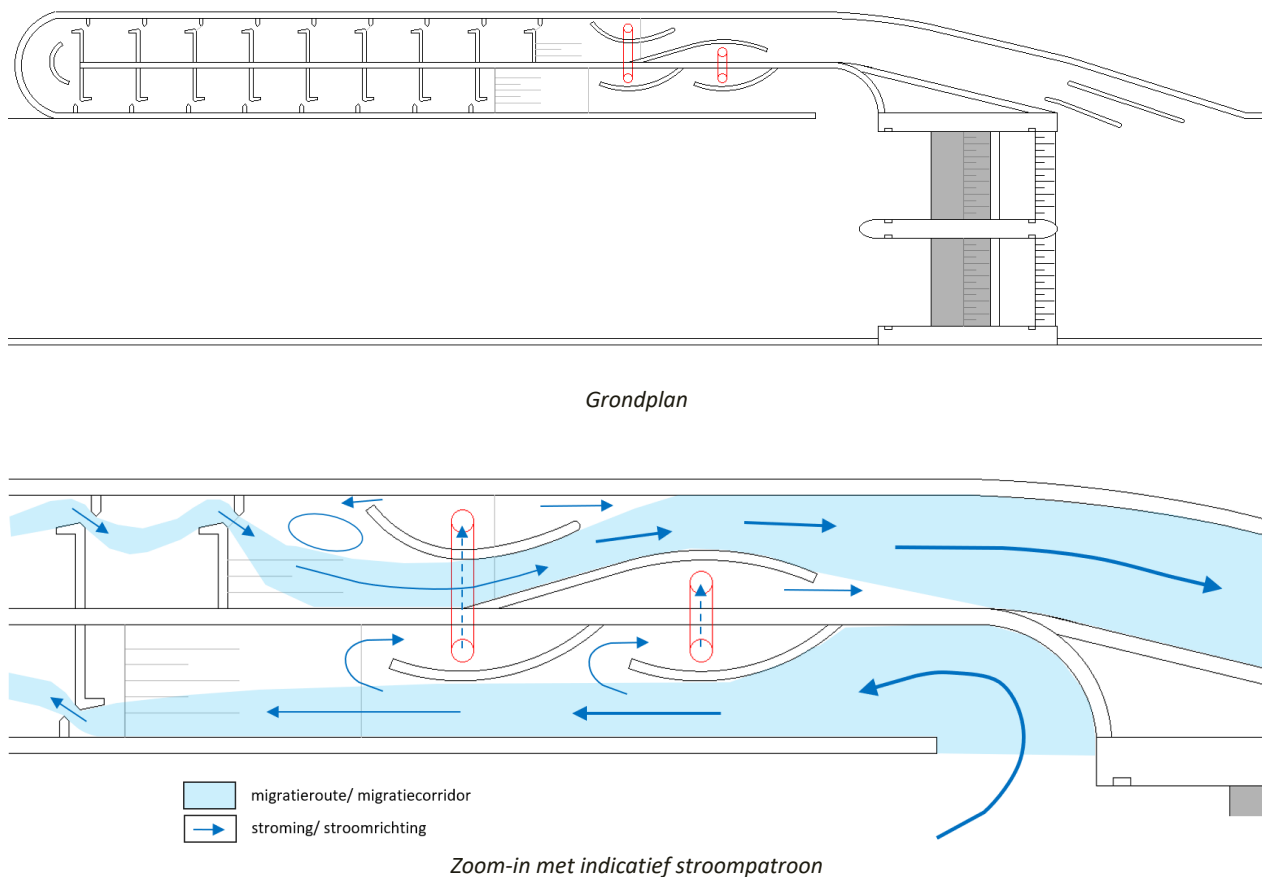
- om de stroomafwaartse vismigratie niet negatief te beïnvloeden moeten de turbines aantoonbaar visveilig zijn;
- en de inpassing van de turbines mag passeerbaarheid en de attractiviteit in de migratiecorridor niet negatief beïnvloeden (zie variantenstudie in voorgaande paragrafen).

De ‘win’ van energiewinning is op zich duidelijk; de ‘win’ voor vismigratie zit in het feit dat hierdoor het maximale lokstroomdebiet verhoogd kan worden. Hierbij dient dan wel altijd rekening te worden gehouden met de maximaal toelaatbare stroomsnelheden in de monding en het mondingskanaal (zie ook 0). De breedte van het mondingskanaal en het ontwerp van de monding kunnen echter relatief eenvoudig worden aangepast aan een hoger lokstroomdebiet (zie Figuur 58 en Figuur 60 en bijbehorende toelichting), mits de ruimtelijke randvoorwaarden dit toelaten natuurlijk.

Naast deze mogelijke win-win wordt wel benadrukt dat de visveiligheid van dergelijke turbines een zeer belangrijk aandachtspunt is. In principe is dit voor stroomopwaartse vismigratie in het huidige ontwerp geen probleem aangezien de stroom van het toegevoegd debiet geen opwaartse migratieweg is (vissen kunnen niet tegen de zeer hoge stroomsnelheden uit de buizen of turbine opzwemmen). Het toegevoegd debiet is daar enkel bedoeld als versterking van de lokstroom. Wanneer het toegevoegd debiet door toepassing van turbines echter wordt verhoogd (en daarmee het aandeel over de stuwen wordt verlaagd) bestaat wel de kans dat de turbines voor afwaartse migratie de hoofdroute worden onder dagelijkse omstandigheden. Zeker in dat kader zal de visveiligheid van dergelijke turbines moeten worden onderzocht en aangetoond. Eventueel zullen aan opwaartse kant dan roosters moeten worden voorzien om de vissen uit de turbines te weren. In dat geval zal waarschijnlijk rooster reiniging (al dan niet automatisch gestuurd) nodig zijn.

Een eventueel andere, aanvullende optie kan zijn om te onderzoeken of het turbinedebiet ook ingezet kan worden als ‘lokstroom’ naar de vispassage voor afwaartse migratie. In het huidige ontwerp bevindt de instroom zich relatief ver opwaarts van de stuwen, aangezien er van wordt uitgegaan dat afwaartse migratie over de stuwen plaatsvindt (zie volgend hoofdstuk). Maar wanneer de instroom van de vispassage net opwaarts van de stuwen geplaatst zou worden, dan kan de intake van het turbinedebiet eventueel in deze instroom geplaatst worden (in plaats van in de stuwgeul). Dit zou er dan namelijk voor kunnen zorgen dat de hoofdstroom via de instroom van de vispassage loopt en vissen zo naar de vispassage worden gelokt. Figuur 76 toont een schetsmatig voorbeeld van dit alternatieve ontwerp. Hierbij wordt wel opgemerkt dat dit ontwerp nog niet verder onderzocht is geweest. Onder andere de volgende aspecten dienen nog bekeken te worden:

- Instroom mag ook weer niet te dicht aan de stuwen zitten anders zouden opwaarts migrerende vissen bij hoger stuwdebiet terug over de stuwen worden gespoeld.
- De intake van het toegevoegd debiet moet zo gesitueerd worden dat vissen zo min mogelijk geneigd zijn om via deze intake te migreren. In Figuur 76 is een eerste voorzet gedaan door de intakes steeds ‘af te schermen’ in stroomrichting. Ook zouden deze alsnog kunnen worden afgeschermd met roosters maar dat zou mogelijk wel tot meer onderhoud kunnen leiden.
- Er zal waarschijnlijk ook een voorziening helemaal opwaarts in de instroom moeten worden opgenomen om de vispassage en de intake van de turbines droog te kunnen zetten (schotbalken). De afsluitconstructie van de vispassage wordt waarschijnlijk best afwaarts van de intake gesitueerd omdat deze anders over een relatief grote diepte (en breedte) moet kunnen keren.



Figuur 76 – Schetsontwerp met instroom turbines/ toegevoegd debiet in de instroom van de vispassage

## 6.4 Dimensionering buizen

In deze paragraaf worden de benodigde buisdiameter en doorsteekhoogte voor de buizen van het toegevoegd debiet bepaald zoals toegepast in de variantenstudie uit voorgaande paragraaf.

### 6.4.1 Diameter

De stroming door de buizen geschiedt onder druk waardoor de relatie tussen het debiet door de buizen ( $Q_{toe}$ ) en totale hydraulische verval ( $dH$ ) beschreven kan worden door sommatie van de algemene en bijzondere ladingsverliezen. Uitgaande van een ronde buis kan de benodigde diameter worden berekend met behulp van de volgende formules (Nortier & de Koning, 1996):

$$Q_{toe} = \left( \frac{2g \cdot A^2 \cdot dH}{\xi_{tot}} \right)^{1/2} = \left( \frac{2g \cdot A^2 \cdot dH}{\xi_i + \xi_u + \xi_k + \xi_r + \xi_b + \xi_s + \frac{f \cdot l}{D}} \right)^{1/2} \quad [24]$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} \approx -2.0 \log \left[ \frac{\varepsilon/D}{3.7} - \frac{5.02}{Re} \log \left( \frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{13}{Re} \right) \right] \quad [25]$$

Met:

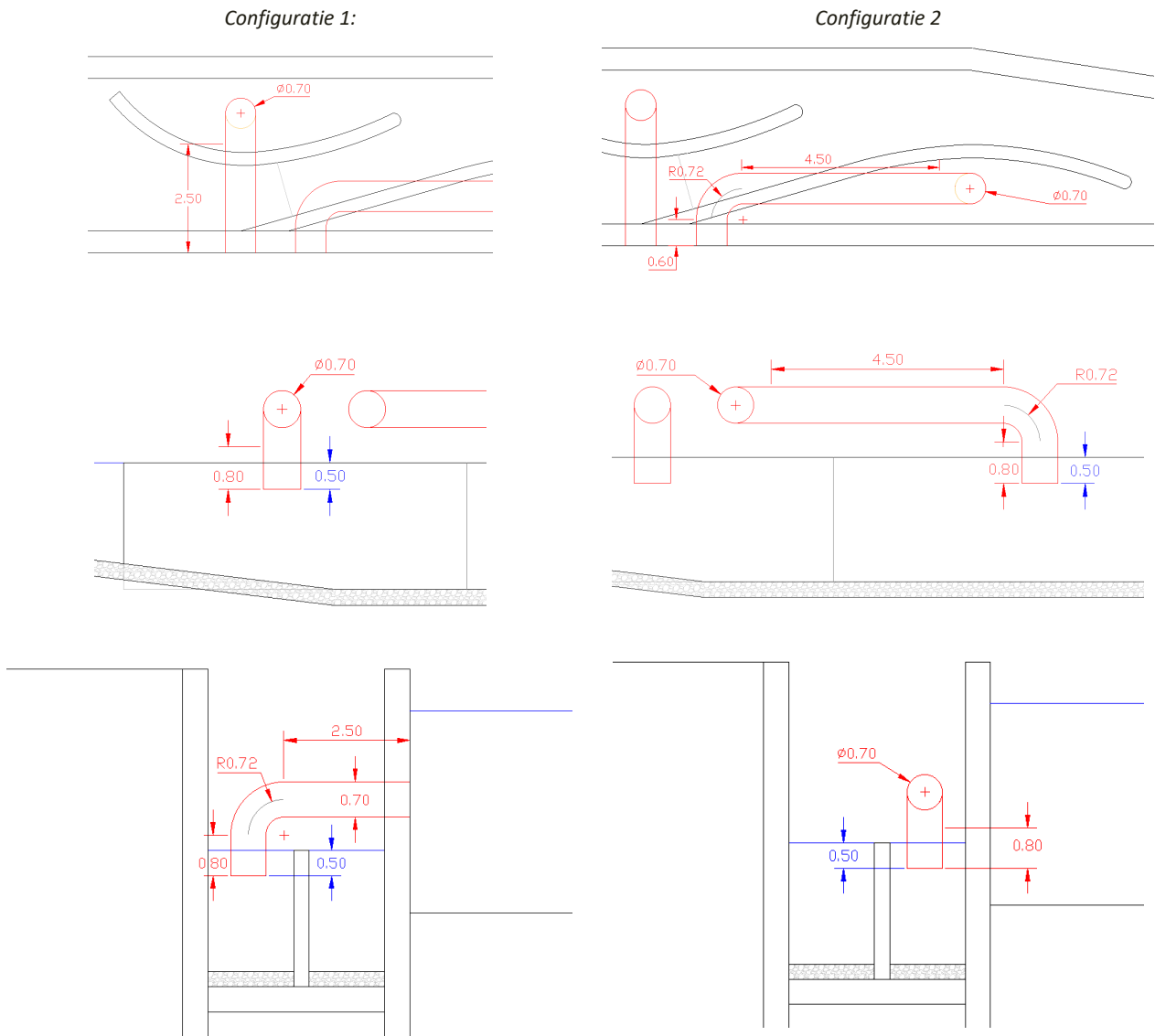
$Q_{toe}$ =	Toegevoegd debiet	[m <sup>3</sup> /s]
$g$ =	Valversnelling (9,81)	[m/s <sup>2</sup> ]
$A$ =	Oppervlak natte dwarssectie	[m <sup>2</sup> ]
$dH$ =	Hydraulisch verval	[m]
$\xi_{tot}$ =	Coëfficiënt totaal aan verliezen	[-]
$\xi_i$ =	Coëfficiënt intredeverlies	[-]
$\xi_u$ =	Coëfficiënt uittredeverlies	[-]
$\xi_k$ =	Coëfficiënt verlies t.g.v. schuif	[-]
$\xi_r$ =	Coëfficiënt verlies t.g.v. rooster	[-]
$\xi_b$ =	Coëfficiënt verlies t.g.v. bochten	[-]
$\xi_s$ =	Coëfficiënt verlies t.g.v. splitsing	[-]
$f$ =	Wrijvingsfactor (Darcy-Weisbach)	[-]
$l$ =	Lengte buis	[m]
$D$ =	Diameter buis	[m]
$\varepsilon$ =	Wandruwheid (0,1 mm voor gelast staal)	[m]
$Re$ =	Reynoldsgetal	[-]

Het totaal benodigde toegevoegde debiet werd bepaald op 3 m<sup>3</sup>/s, wat bij twee buizen een debiet van 1,5 m<sup>3</sup>/s per buis betekent. Het verval waarbij dit debiet moet kunnen toegevoegd worden is voor elk stuwsluiscomplex op de Dender echter verschillend. Bij streefpeilen varieert het verval, afhankelijk van het complex, van 1,62 m tot 2,76 m (zie Tabel 5). Een mogelijke toe- en afname van respectievelijk 0,2 m en 0,5 m kan optreden in de periode van optimale werking (zie 3.6), het verval voor controle op optimale werking dat beschouwd wordt is dan ook van 1,12 m tot 2,96 m. Daarnaast kan het verval soms (minder dan ca. 1% van de tijd) toenemen met 0,3 m of afnemen met circa 1 m.

De ladingsverliescoëfficiënten van de verschillende componenten dienen zo nauwkeurig mogelijk te worden ingeschat, maar deze zijn afhankelijk van de configuratie van de buizen. Deze configuratie kan locatie-afhankelijk zijn; een aantal parameters zal dus kunnen variëren (lengte, aantal bochten). Om de invloed van de configuratie enigszins in beeld te brengen worden twee configuraties voor de buizen doorgerekend (zie ook Figuur 77):

- Configuratie 1 is een buis horizontaal door de scheidingswand met afwaarts van de scheidingswand een schuifafsluiter. Vervolgens komt een neerwaartse bocht van 90° ter hoogte van het bassin die doorloopt in een verticaal stuk dat uitmondt onder water in het bassin.
- Configuratie 2 gaat eveneens horizontaal door de scheidingswand, maar maakt vervolgens eerst een zijwaartse bocht van 90°, waarna een recht stuk volgt met daarin een schuifafsluiter. Daarna volgt terug de neerwaartse bocht van 90° ter hoogte van het bassin die doorloopt in een verticaal stuk dat weer uitmondt onder water in het bassin. Deze tweede configuratie kan bijv. worden toegepast als de lengte van de buis tussen de scheidingswand en de neerwaartse bocht van 90° niet voldoende is voor de inpassing van de afsluiter, of als er op een andere locatie door de scheidingswand moet worden gestoken.

Tabel 29 geeft een overzicht van de onderdelen van de twee beschouwde configuraties met oog op de berekening van de ladingsverliezen. De bochtstraal en draaiingshoek worden voor alle bochten in de configuraties gelijk genomen.



Figuur 77 – Buisconfiguraties voor berekening benodigde buisdiameter

Tabel 29 – Geometrie van de beschouwde configuraties voor de buizen van het toegevoegd debiet

Configuratie 1			
Component	Lengte [m]	Bochtstraal [m]	Draaiingshoek [°]
recht stuk door scheidingswand + schuif	2,50	-	-
bocht neerwaarts	1,13	0,72	90
recht stuk tot uitlaat	0,80	-	-
<b>TOTAAL</b>	<b>4,43</b>		
Configuratie 2			
Component	Lengte [m]	Bochtstraal [m]	Draaiingshoek [°]
recht stuk door scheidingswand	0,60	-	-
bocht zijwaarts	1,13	0,72	90
recht stuk + schuif	4,50	-	-
bocht neerwaarts	1,13	0,72	90
recht stuk tot uitlaat	0,80	-	-
<b>TOTAAL</b>	<b>8,16</b>		

Verder worden nog volgende zaken vooropgesteld bij de berekeningen:

- Er wordt geen opwaarts vuilrooster beschouwd;
- Er wordt aangenomen dat een volledig openstaande schuif geen ladingsverlies veroorzaakt ( $\xi_k = 0$ );
- De wandruwheid wordt gelijk genomen aan de waarde voor gelast staal uit Nortier & de Koning (1996), zijnde  $\varepsilon = 0,1$  mm.
- De coëfficiënt voor de bochten is afhankelijk van de precieze configuratie: bochten die kort op elkaar volgen en die *in perpendiculaire vlakken* liggen, geven samen een ander ladingsverlies dan de afzonderlijke delen. Idelchik (2007) geeft diagrammen voor verschillende configuraties, de gebruikte diagrammen zijn terug te vinden in Bijlage C – Ladingsverliescoëfficiënten .

Tabel 30 geeft de gebruikte waarden weer voor de verschillende componenten. De waarden zijn gebaseerd op Nortier & de Koning (1996) en Idelchik (2007). Daabij wordt  $f \cdot l/D = \xi_w$  gesteld. De bijzondere ladingsverliezen overheersen, met de inlaat en uitlaat de grootste bijdrage. Ook neemt de ladingsverliescoëfficiënt van de opeenvolgende bochten toe met toenemende diameter. Reden hiervoor is omdat de bochtstraal R constant wordt gehouden (= 0,72 m), waardoor R/D afneemt en de ladingsverliescoëfficiënt dus toeneemt (bocht wordt meer gedrongen).

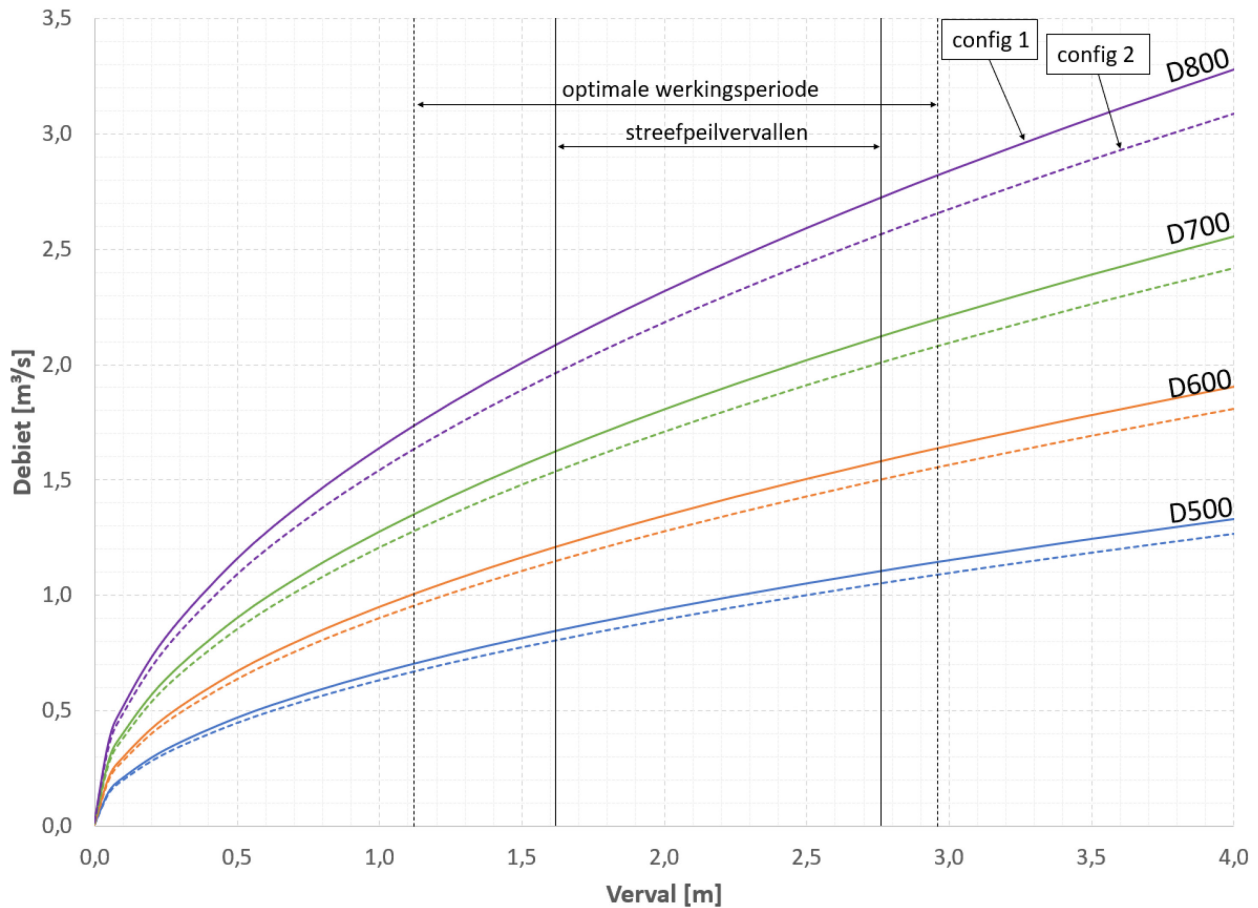
Tabel 30 – Ladingsverliescoëfficiënten van de buizen van de beschouwde configuraties

Configuratie 1										
Component	Lengte [m]	ε [mm]	D = 0,50 m		D = 0,60 m		D = 0,70 m		D = 0,80 m	
			ξ <sub>w</sub> [-]	ξ [-]	ξ <sub>w</sub> [-]	ξ [-]	ξ <sub>w</sub> [-]	ξ [-]	ξ <sub>w</sub> [-]	ξ [-]
inlaat	-	-	-	0,5	-	0,5	-	0,5	-	0,5
recht stuk door scheidingswand (zonder schuif)	2,50	0,1	0,073	-	0,059	-	0,049	-	0,042	-
schuif	-	-	-	0	-	0	-	0	-	0
bocht neerwaarts	1,13	0,1	0,033	0,084	0,027	0,133	0,022	0,196	0,019	0,273
recht stuk tot uitlaat	0,80	0,1	0,023	-	0,019	-	0,016	-	0,013	-
uitlaat	-	-	-	1,0	-	1,0	-	1,0	-	1,0
<b>Subtotaal</b>			<b>0,129</b>	<b>1,584</b>	<b>0,105</b>	<b>1,633</b>	<b>0,087</b>	<b>1,696</b>	<b>0,074</b>	<b>1,773</b>
<b>TOTAAL</b>	<b>4,43</b>		<b>1,713</b>		<b>1,738</b>		<b>1,783</b>		<b>1,847</b>	
Configuratie 2										
Component	Lengte [m]	ε [mm]	D = 0,50 m		D = 0,60 m		D = 0,70 m		D = 0,80 m	
			ξ <sub>w</sub> [-]	ξ [-]	ξ <sub>w</sub> [-]	ξ [-]	ξ <sub>w</sub> [-]	ξ [-]	ξ <sub>w</sub> [-]	ξ [-]
inlaat	-	-	-	0,5	-	0,5	-	0,5	-	0,5
recht stuk door scheidingswand	0,60	0,1	0,018	-	0,014	-	0,012	-	0,010	-
bocht zijwaarts	1,13	0,1	0,033	0,156	0,027	0,235	0,022	0,329	0,019	0,446
recht stuk (zonder schuif)	4,50	0,1	0,132		0,106		0,088		0,075	
bocht neerwaarts	1,13	0,1	0,033		0,027		0,022		0,019	
schuif	-	-	-	0	-	0	-	0	-	0
recht stuk tot uitlaat	0,80	0,01	0,023	-	0,019	-	0,016	-	0,013	-
uitlaat	-	-	-	1,0	-	1,0	-	1,0	-	1,0
<b>Subtotaal</b>			<b>0,239</b>	<b>1,656</b>	<b>0,193</b>	<b>1,735</b>	<b>0,160</b>	<b>1,829</b>	<b>0,136</b>	<b>1,946</b>
<b>TOTAAL</b>	<b>8,16</b>		<b>1,895</b>		<b>1,928</b>		<b>1,989</b>		<b>2,082</b>	

Figuur 78 toont de resultaten voor de debietscapaciteit van verschillende buisdiameters op basis van formule [24] en de ladingsverliescoëfficiënten uit Tabel 30 voor een range aan hydraulische vervallen. Hieruit blijkt dat bij de ondergrens van het interval van de streefpeilervallen (zijnde 1,62 m) het maximaal benodigd toegevoegd debiet van 1,5 m<sup>3</sup>/s kan geleverd worden met een diameter van 0,70 m, door beide configuraties. Bij de ondergrens van de optimale werkingsperiode (1,12 m) valt het debiet terug op ongeveer 1,3 m<sup>3</sup>/s. Deze terugval wordt aanvaardbaar geacht, wetende dat deze ondergrens zich niet op alle locaties voordoet en slechts gedurende een beperkt deel van de optimale werkingsperiode. De diameter van de buizen van het toegevoegd debiet wordt dus gekozen op 0,70 m.

Ook kan uit de resultaten opgemaakt worden dat de 'extra' bocht en iets grotere buis lengte maar een geringe invloed hebben op de debietscapaciteit en dus benodigde buisdiameter.





Figuur 78 – Gerealiseerde toegevoegde debieten voor de beschouwde configuraties en vervallen (buisdiameters in mm)

### 6.4.2 Buishoogte

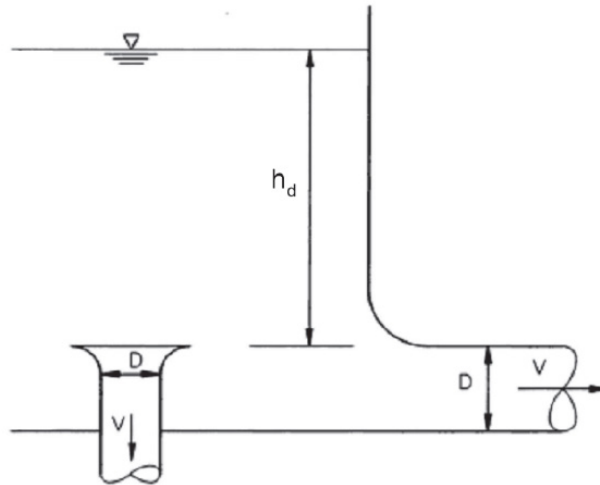
Voor de doorsteekhoogte van de buizen door de stuwgeulwand zal per locatie een optimum moeten worden gevonden tussen aan de ene kant een voldoende diepe ligging ten opzichte van het opwaartse waterpeil om aanzuiging van vuil en lucht te voorkomen en aan de andere kant een hoogte die ervoor zorgt dat de buizen (en dus ook regelschuif) zich aan afwaartse zijde van de wand (met oog op beheer) nog boven het afwaartse waterpeil bevinden.

Voor het voorkomen van aanzuiging van lucht (en drijfvuil) worden in de literatuur criteria geven voor drempelwaarden voor de minimaal benodigde relatieve waterdekking ( $h_d/D$ ) (zie Figuur 79). Deze drempelwaarde wordt daarbij meestal bepaald door de stroomsnelheid en het daarbij horende Froude-getal:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{(g \cdot D)}} \quad [26]$$

Met:

Fr =	Froude-getal	[-]
V =	Stroomsnelheid	[m/s]
g =	Valversnelling (9,81)	[m/s <sup>2</sup> ]
D =	Diameter koker	[m]



Bron: ASCE, 1995 (links: verticale instroom; rechts: horizontale instroom)

Figuur 79 – Definitieschets waterdekking ( $h_d$ ) boven instroomopening met hydraulische diameter (D) en stroomsnelheid (V)

In Figuur 80 worden empirische resultaten weergegeven voor horizontale (en verticale) inlaten met en zonder problemen op het vlak van wervelvorming. De resultaten worden door middel van symbolen voorgesteld in een grafiek met op de horizontale as het Froude-getal en op de verticale as de relatieve waterdekking. Bij deze figuur worden twee zaken opgemerkt. Ten eerste worden in Figuur 80 ook een tweetal criteria uit de literatuur voorgesteld met volle lijnen. Deze volgen de formule:

$$\frac{h_d}{D} \geq a + b \cdot Fr \quad [27]$$

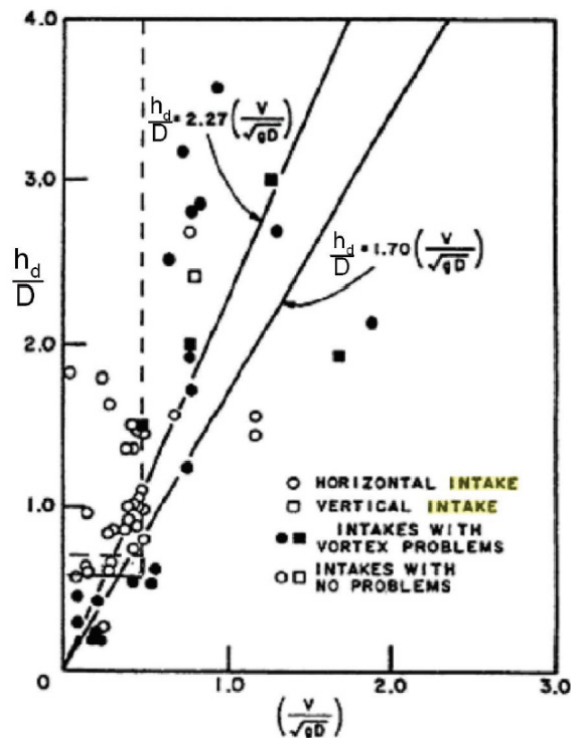
Met:

hd	Waterdekking	[m]
D =	Diameter koker	[m]
a =	Parameter	[-]
b =	Parameter	[-]
Fr	Froude-getal	[-]

In ASCE (1995) worden  $a = 0$  en  $b = 1.7$  of  $b = 2.27$  toegepast. Merk op dat in andere literatuur soms net iets andere waarden worden toegepast voor a en b, die daarmee indicatief zijn.

Ten tweede is in Figuur 80 ook een gebied te zien dat afgebakend wordt door een stippellijn. Binnen dit gebied wordt verwacht dat er op basis van de empirische resultaten een relatief veilig ontwerp wordt bekomen ten aanzien van het voorkomen van luchtaanzuiging. Dit gebied wordt gedefinieerd door twee criteria die gelijktijdig vervuld moeten zijn:

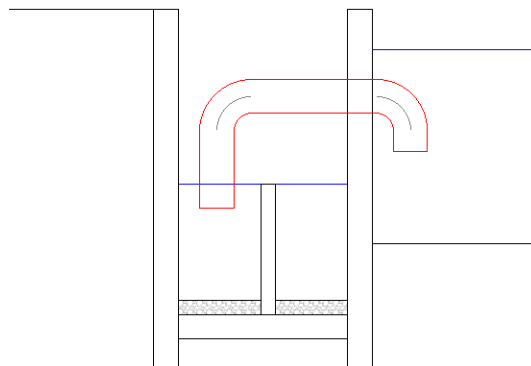
- $Fr \leq 0,5$  en
- $h_d/D \geq 0,7$ .



Bron: ASCE, 1995

Figuur 80 – Relatieve waterdekking boven een instroomopening als functie van het Froude-getal

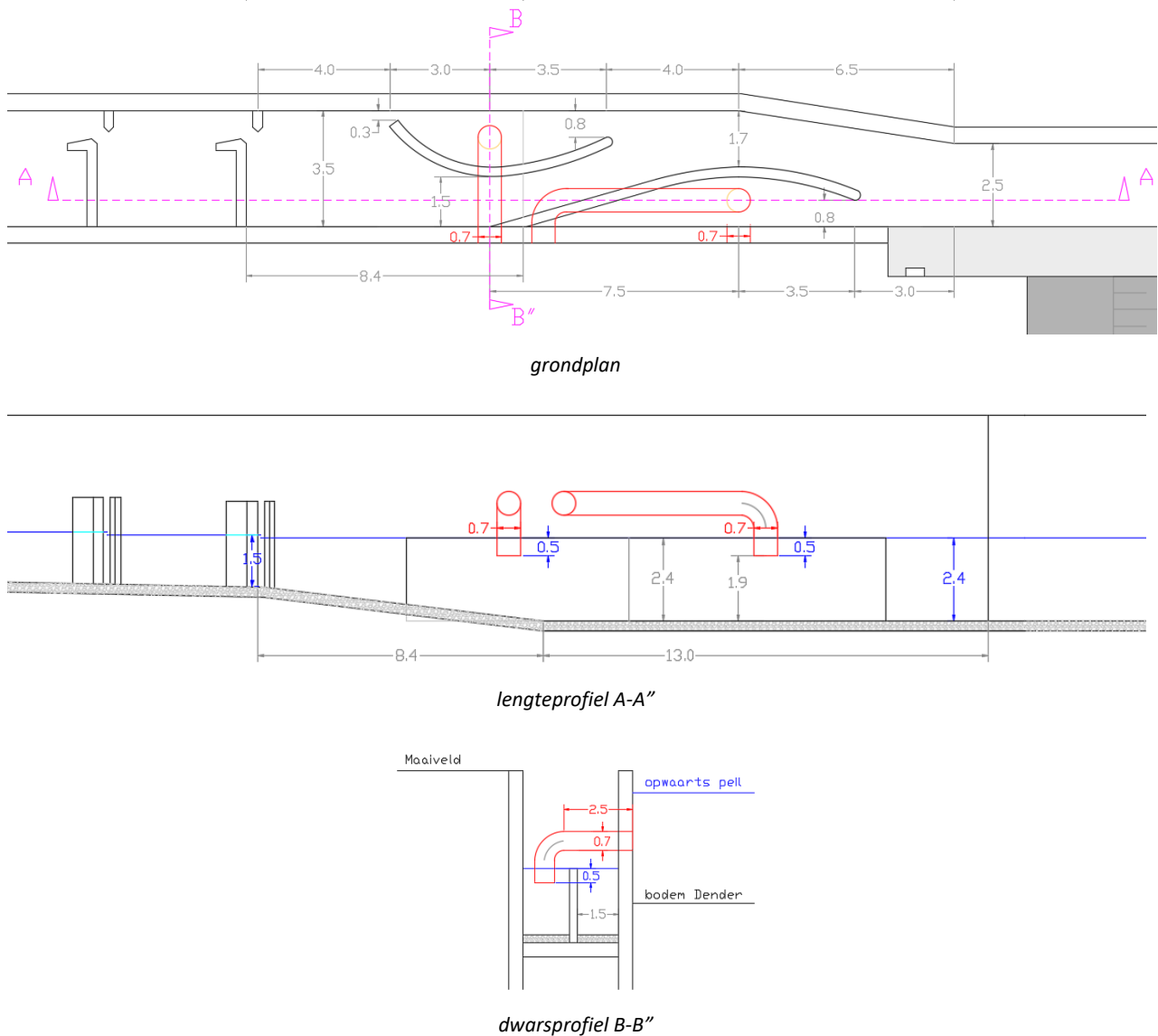
Op basis van de debieten uit Figuur 78 wordt duidelijk dat een Froude-getal  $< 0,5$  niet haalbaar is voor de gegeven randvoorwaarden. De relatieve waterdekking zal dus groter moeten zijn dan  $0,7$ . Op basis van de lineaire relaties in Figuur 80 en een diameter  $D = 0,70$  m is in principe een waterdekking van  $1,5$  à  $2$  m nodig. Dit zou voor enkele sites echter betekenen dat de buizen ook aan afwaartse zijde in de vispassage onder water uitkomen waardoor de schuiven in deze buizen minder goed bereikbaar worden. Per site wordt daarom best de meest optimale inpassing gekozen op basis van beide randvoorwaarden. De praktijk zal ook moeten uitwijzen hoe groot het probleem van luchtaanzuiging werkelijk is. Eventueel kan ook overwogen worden om een neerwaarts gericht opzetstuk te voorzien (zie Figuur 81), zodat de waterdekking relatief gezien toeneemt. De ladingsverliezen zullen dan iets toenemen, maar uit resultaten in de voorgaande paragraaf bleek dat deze invloed relatief gering is.



Figuur 81 – Voorbeeld neerwaarts gebogen opwaarts opzetstuk ten behoeve van voldoende waterdekking

## 6.5 Voorkeursontwerp

Figuur 82 toont het voorkeursontwerp voor het toegevoegd debiet met bijbehorende dimensionering. Dit ontwerp bestaat uit twee buizen met elk een diameter van 0,7 m (binnenmaat) die verbonden zijn aan het opwaartse pand. Via deze twee buizen wordt het toegevoegd debiet ingelaten in twee alternerende bassins tussen de vispassagebekkens en het mondingskanaal.



Figuur 82 – Voorkeursontwerp voor de inbreng van het toegevoegd debiet

De hoogte waarop de buizen door de wand tussen vispassage en stuwplaat doorsteken (zie dwarsprofiel B-B”), dient te worden bepaald per vispassagelocatie aangezien deze afhankelijk is van een optimum tussen een zo laag mogelijke inpassing van de instroom van de buis aan opwaartse zijde (met oog op voorkomen lucht- en vuilaanzuiging) en een zo hoog mogelijke inpassing aan afwaartse zijde met oog op beheer regelscherven. Aan afwaartse zijde dient de buis door te lopen tot 50 cm onder het afwaartse streefpeil zodat de uitstroom altijd onder water blijft tijdens werking.

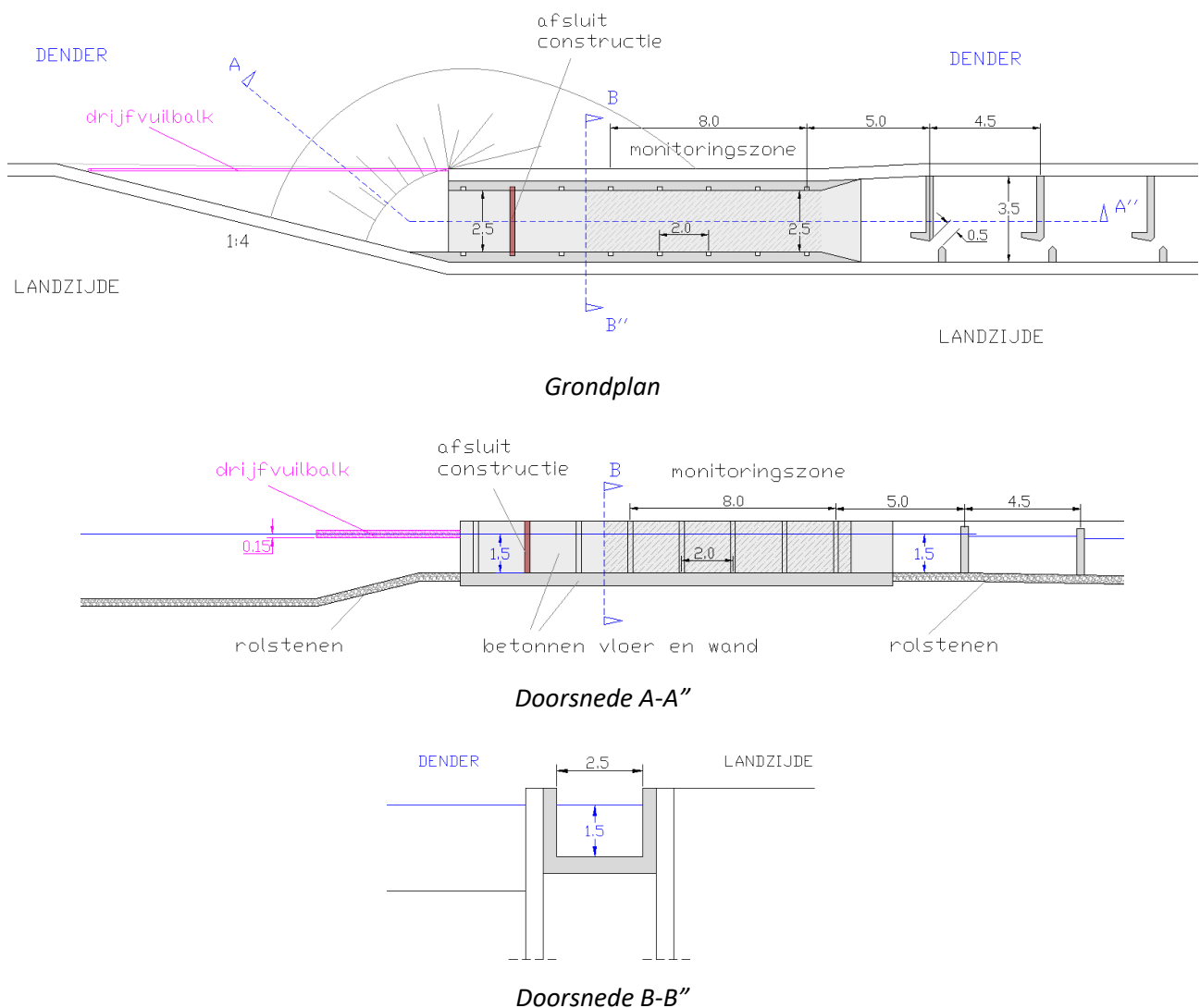
De wanden van de bassins waarin de buizen uitkomen dienen zo glad mogelijk en zo gestroomlijnd mogelijk te worden uitgevoerd, zie praktijkvoorbeeld voor uitvoering in Figuur 63. De bovenkant van de wanden reiken tot afwaartse streefpeil. De wanden moeten namelijk kunnen overstromen als er water in het bassin wordt ingelaten. Het afwaartse bassin heeft één opening (sleuf) van 80 cm breed aan afwaartse zijde. Het opwaartse bassin heeft twee openingen: aan afwaartse zijde 80 cm en aan opwaartse zijde 30 cm. De doorstroom breedtes naast de bassins dient minimaal 1,5 m te zijn.

In elk van de buizen dient een regelscherv te worden ingepast. Aangezien het type en dimensies nog niet gekend zijn, zijn deze nog niet ingetekend in Figuur 82. Deze dienen te worden gekozen in het bouwkundige ontwerp, en dienen het debiet door de buizen te kunnen regelen op basis van het debiet over de stuwen. Deze stuwdebieten worden steeds bepaald door meting van de stuwklephoogte en het opwaartse waterpeil. Naast gesloten stand worden er 4 openingsstanden voorzien. De scherven worden parallel geschakeld en moeten samen bij de grootste openingsstand 3 m<sup>3</sup>/s toegevoegd debiet kunnen inbrengen (= 1,5 m<sup>3</sup>/s per buis). In hoofdstuk 8 worden de voorziene standen en sturingsvoorwaarden verder toegelicht.

# 7 Instroom

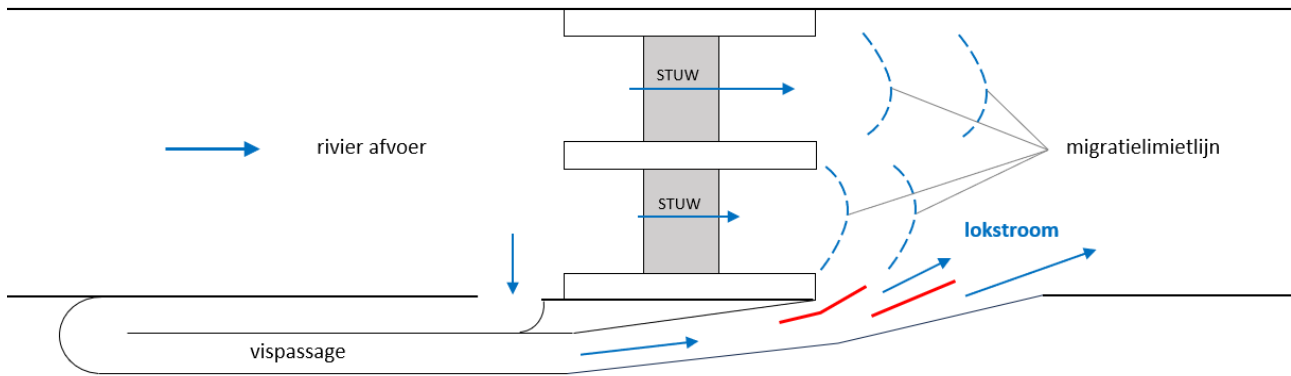
## 7.1 Inleiding

Dit hoofdstuk beschrijft het voorstel voor een uniform ontwerp van de instroom voor de nieuwe vispassages op de Dender. Figuur 83 geeft het grondplan en twee maatgevende doorsnedes van dit voorstel. Dit ontwerp is gecombineerd met een vertical slot-vispassage (voorkeursontwerp, zie hoofdstuk 4), maar de vormgeving hiervan is (net als de monding en het toegevoegd debiet) in principe onafhankelijk van het vispassagetype. Bij de toepassing van een ander type dient echter wel altijd gecontroleerd te worden of de dimensionering (vooral breedte en diepte) niet leidt tot te hoge stroomsnelheden (en vervallen) bij maatgevende vispassagedebieten.



Figuur 83 – Algemeen ontwerp instroom vispassages

Voor de ruimtelijke inpassing van de instroom werd ervan uitgegaan dat de vispassage niet als hoofdweg voor afwaartse migratie moet kunnen dienen, waardoor deze verder opwaarts ingepast kan worden en de vispassage dus zo min mogelijk bochten hoeft te krijgen (rechtlijnige inpassing). Wanneer de vispassage echter ook als hoofdweg voor afwaartse migratie wordt ingezet, dan wordt de instroom best zo dicht mogelijk aan de stuwen gekozen, zie Figuur 84. In het huidige voorkeursontwerp wordt ervan uitgegaan dat de hoofdroute voor afwaartse migratie via de stuwen verloopt<sup>6</sup>.



Figuur 84 – Alternatieve inpassing instroom zo dicht mogelijk aan de stuwen

De volgende onderdelen van de instroom worden verder uitgewerkt in de volgende paragrafen:

- Dimensionering (7.2);
- Drijfvuilbalk (7.3);
- Afsluitconstructie (7.4);
- Monitoringszone (7.5).

In paragraaf 7.6 wordt ten slotte de controle van stroomsnelheden en vervallen in elk van de onderdelen beschreven in geval van de maatgevende hydraulische scenario's.

<sup>6</sup> Hierbij wordt opgemerkt dat de effecten van stuwen op de afwaartse migratie momenteel niet goed gekend zijn.

## 7.2 Dimensionering

De diepte van de instroom werd gelijk gekozen aan de slotdiepte in de vispassage bij streefpeilen. Bij een opwaarts streefpeil heeft de instroom dus een diepte van 1,5 m. De minimaal benodigde breedte van de vispassage wordt in eerste instantie bepaald door de maximaal toelaatbare stroomsnelheden die optreden tijdens optimale (en normale) stroomcondities. Hierbij wordt gesteld dat stroomsnelheden niet hoger mogen gaan dan de kruissnelheid van de doelsoorten (0,5 m/s). Daarnaast kunnen ook beheer- en monitoringsvereisten een bepalende rol spelen (bijv. voor toepassing uniforme breedtes met betrekking tot schotbalken, schuiven en frames). Met het oog op dit laatste werd gekozen voor een breedte van 2,5 m. Uit de berekeningen van de (lokale) stroomsnelheden en ladingsverliezen is dit vanuit passeerbaarheidscriteria ruim voldoende.

In de instroom worden sponningen voorzien voor de plaatsing van schotbalken voor droogzetten, een afsluitconstructie (zie 7.4) en de plaatsing van monitoringsapparatuur (zie 7.5). Daarom wordt voorgesteld om in deze zone betonnen wanden te voorzien waarin deze sponningen kunnen worden gerealiseerd. Vanuit oogpunt van uniforme toepassing is nu een hart-op-hart afstand van 2 m voorgesteld. Als vertrekpunt 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.

Aangezien zowel voor de waterdichtheid van de afsluitconstructie als voor de plaatsing van de monitoringsapparatuur een effen en gladde bodem benodigd 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 ook damplanken worden toegepast 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 83). Aan op- en afwaartse zijde van de betonnen vloer dient het (rolstenen) bodemsubstraat goed aan te sluiten zodat geen opstaande randen ontstaan in het bodemverloop. De sortering en laagdikte van dit bodemsubstraat zijn beschreven in 4.4.3.

Met het oog op zowel de op- als afwaartse migratie door de vispassage dient het bodempeil van de instroom geleidelijk en best zo flauw mogelijk (en niet steiler dan 1:2) aangesloten te worden op het bodempeil van het opwaarts pand (DWA, 2014). Bij toepassing van een geleidelijke overgang zullen ladingsverliezen ter plaatse van de drijfvuilbalk tevens ook lager komen te liggen door de relatief grotere waterdiepte onder de balk, wat een positief effect heeft op de hydraulische werking van de vispassage. De oeverwand die de instroom verbindt met de stuwgeul dient onder een hoek van circa 1:4 te verlopen om zo een goede hydraulische aanstroom te realiseren en ook de geleidelijke bodemovergang mogelijk te maken.

## 7.3 Drijfvuilbalk

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 te worden voorzien. Voor een optimale werking wordt geadviseerd dat de drijfvuilbalk tot 0,15 m onder het optredende waterpeil vuil dient te kunnen afleiden (Coenen *et al.*, 2013).

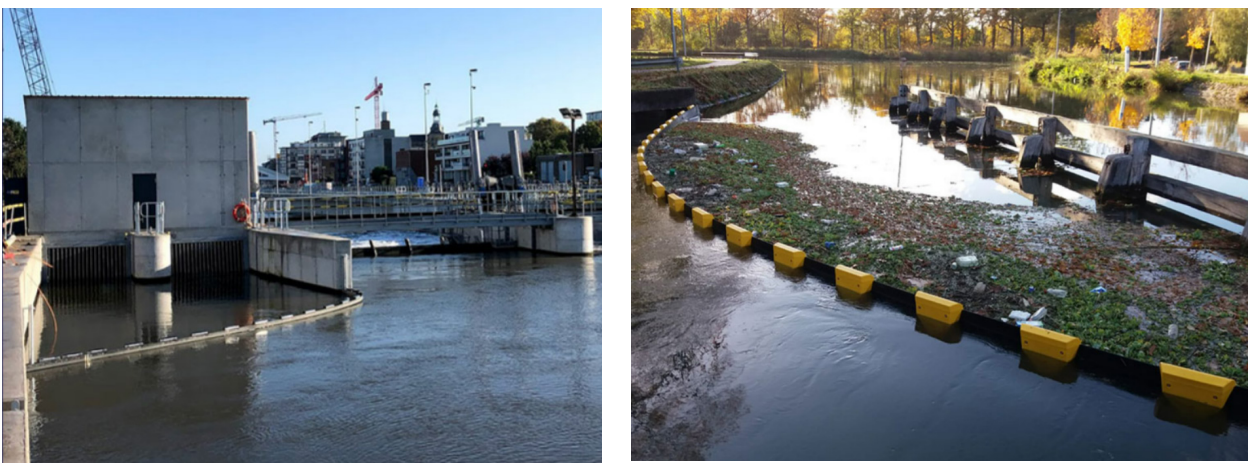
Ook dient de drijfvuilbalk over de volledige range van waterstandfluctuaties drijfvuil te kunnen weren. Dit betekent dat deze moet kunnen werken van waterpeilen van 0,20 m onder opwaarts streefpeil (bij lagere waterstanden wordt de vispassage gesloten) tot het maximaal hoogwater dat kan optreden op de betreffende locatie.

Daarbij is het van groot belang dat de drijfvuilbalk 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. Bij toepassing van de drijfvuilbalk iets afwaarts in de instroom zou deze namelijk werken als vuilvang en dus veel onderhoud vergen. De balk wordt ook best zo glad mogelijk uitgevoerd zodat er geen vuil achter blijft hangen.



Voor de uitvoering zijn er twee opties: drijvend of vast. Hierbij heeft de drijvende uitvoering in principe de voorkeur aangezien bij waterstandstoename ook de waterdiepte onder de drijfvuilbalk kan toenemen. Bij een vaste uitvoering kunnen stroomsnelheden onder de drijfvuilbalk toenemen bij stijging van het opwaartse waterpeil. In principe is de doorstroomopening onder de drijfvuilbalk in geval van de Dendervispassages ook in het geval van een vaste uitvoering groot genoeg om stroomsnelheden niet te hoog te laten worden met oog op passeerbaarheid (zie 7.6). Een mogelijk (visueel) nadeel van een vaste balk is dat deze boven water over een relatief grote hoogte doorgetrokken zal moeten worden om ook bij extreem hoge opwaartse waterpeilen nog drijfvuil te kunnen weren. De drijvende drijfvuilbalk dient met oog hierop wel in staat te zijn om tot dezelfde vereiste hoogte mee te kunnen stijgen. Tegenwoordig zijn er echter drijvende constructies die langs een (ronde) paal over de gewenste hoogtes mee kunnen stijgen. Figuur 85 toont enkele voorbeelden van dergelijke systemen.

Merk tenslotte op dat zweefvuil wel onder de drijfvuilbalk door kan raken, maar gezien de relatief kleinere grootte van zweefvuil (ten opzichte van drijfvuil) wordt het risico op verstopping door zweefvuil klein geacht.



Figuur 85 – Voorbeelden van drijvende drijfvuil werende constructies

## 7.4 Afsluitconstructie

### 7.4.1 Doelstelling en type

In de instroom dient een automatisch geregelde afsluitconstructie te worden voorzien. Deze dient in eerste instantie voor het waterpeilbeheer met oog op o.a. de scheepvaart, maar maakt het ook mogelijk om de vispassage te kunnen afsluiten voor onderhoud of ander beheer.

Met oog op het type afsluitconstructie wordt een hefschuif voorgesteld, aangezien dit het meest optimale en meest toegepaste type is in dergelijke condities. Indien nodig kan in het bouwkundig ontwerp voor bepaalde locaties een ander type worden toegepast, mits de minimaal benodigde natte sectie en minimaal benodigde hoogte (keerhoogte) gehandhaafd blijven, zie volgende paragrafen.

#### 7.4.2 Breedte

Vanuit praktisch oogpunt werd de breedte van de natte sectie ter plaatse van de afsluitconstructie in het ontwerp uit Figuur 83 gelijk gekozen aan de breedte van de instroom zelf, namelijk breedte = 2,5 m. Op deze wijze heeft een openstaande afsluitconstructie hydraulisch gezien geen invloed.

Mocht het vanuit ander randvoorwaarden (bouwkundig/ruimtelijk) toch nodig zijn om een smallere breedte toe te passen, dan wordt, uitgaande van een waterdiepte bij streefpeil van 1,5 m, een minimale natte breedte van 1,5 m vereist (zie *Bijlage B – Minimale breedte afsluitconstructie*).

Bij deze minimale breedte liggen stroomsnelheden ter plaatse van de vernauwing nog onder de maatlat van 0,5 m/s (=kruissnelheid doelsoorten) en zijn ladingsverliezen (opstuwning) verwaarloosbaar. Aangezien het hier gaat op een lokale vernauwing zou ook getoetst kunnen worden aan de sprintsnelheid van 1 m/s, maar aangezien vissen al een volledige vispassage met stroomversnellingen zijn gepasseerd wordt aanbevolen om toch te toetsen op kruissnelheid.

#### 7.4.3 Sluitingsvoorwaarden

Om optimaal te werken moet de afsluitconstructie minstens open blijven bij normale variaties in het opwaartse waterpeil tijdens de periode van optimale werking. Dit is bij waterpeilfluctuaties in het opwaarts pand van circa +0,30 m tot -0,20 m t.o.v. streefpeil. In het geval van vertical slot-vispassages wordt aanbevolen om de vispassage ook bij hogere waterpeilen open te houden zodat er dan toch ook nog (suboptimale) passage mogelijk blijft. Het risico op schade bij hogere opwaartse waterstanden is namelijk zeer beperkt gezien de technische uitvoering van de vispassage en de afname van het totale verval bij stijging van het opwaartse waterpeil hoger dan circa 0,30 m (in dat laatste geval stijgt het afwaartse waterpeil namelijk altijd sneller dan het opwaartse waterpeil). Door toepassing van de opwaartse drijfvuilbalk wordt ook het risico op de hogere drijfvuillast bij hoogwater of was-situaties voorkomen.

Bij opwaartse waterstanden lager dan 0,20 m onder streefpeil dient de vispassage te worden gesloten vanuit het oogpunt van voldoende diepgang voor de scheepvaart en het vasthouden van voldoende watervolume in de panden. Dergelijke situaties treden eigenlijk alleen op bij zeer lage afvoeren en zouden uitzonderlijk moeten zijn.

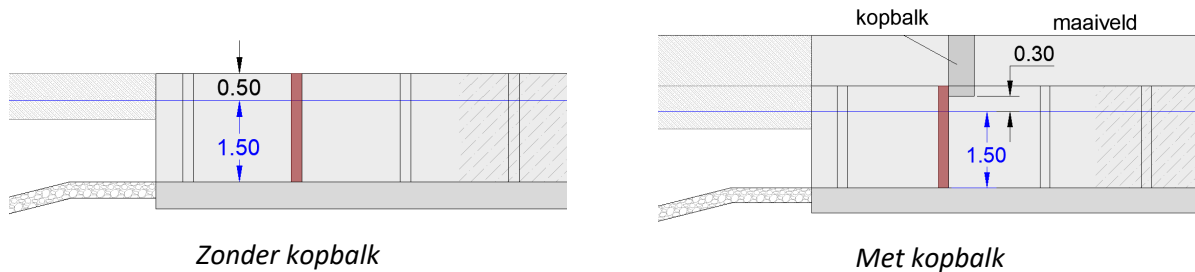
Uit de controleberekeningen van maximale stroomsnelheden bij val van de afwaartse waterstand (=extreme toename van het totale verval) bleek dat de vispassage best ook gesloten wordt bij afwaartse waterstanden lager dan 0,50 m onder afwaarts streefpeil (zie 4.4.3). Hogere afwaartse peilen vormen geen risico op schade in de vispassage aangezien het verval dan ook (sterk) afneemt.

#### 7.4.4 Hoogte

Wanneer de afsluitconstructie enkel ingezet moet kunnen worden om te lage opwaartse waterpeilen te vermijden of voor onderhoud, dan hoeft de afsluitconstructie in principe geen waterpeilen te kunnen keren tot maaiveldhoogte maar enkel tot (licht) verhoogde waterstanden onder normale condities. Hierbij wordt wel nadrukkelijk vermeld dat de vispassage zich hierbij niet (deels) in lager gelegen achterland mag bevinden want dan kunnen keerhoogtes tot maaiveld wel vereist zijn.

Wanneer ervan uitgegaan wordt dat de afsluitconstructie enkel dient voor sluiting bij te lage afvoeren en/of onderhoud, dan kunnen opwaartse waterstanden die minder dan 1% van de tijd worden overschreden worden toegepast voor de bepaling van de vereiste keerhoogte. Uit de analyse van historische metingen in paragraaf 3.5 bleek dat een overschrijdingskans van 1% voor het opwaartse waterpeil voor de verschillende locaties tussen circa 0,24 tot 0,36 m ligt (zie ook Figuur 11). Er wordt daarom geadviseerd om de (minimale) keerhoogte van de afsluitconstructie op elk van de locaties op 0,50 m boven streefpeil te kiezen.

Mocht het toch nodig zijn om een hogere keerhoogte (bijv. tot maaiveld) te realiseren, dan hoeft dat niet te gebeuren door het verhogen van de schuif zelf. Eventueel kan dan gewerkt worden met een kopbalk boven de afsluitschuif (zie Figuur 86). In dat geval wordt geadviseerd om de onderkant van deze balk minimaal 0,30 m boven streefpeil in te passen. Hierdoor blijft er bij normale waterpeilfluctuaties altijd voldoende ruimte tussen de balk en het vrije wateroppervlak.



Figuur 86 – Schetsen afsluitconstructie met en zonder kopbalk

#### 7.4.5 Sponningen voor droogzetten

Om de afsluitconstructie voor beheer en onderhoud droog te kunnen zetten, worden aan op- en afwaartse zijde van deze hefschuif schotbalksponningen voorzien. Aan afwaartse zijde zijn schotbalken niet strikt noodzakelijk aangezien het streefpeil in het afwaartse pand op alle locaties lager uitkomt dan de bodem van de instroomconstructie. Het kleinste verval is namelijk een verval van 1,6 m (te Geraardsbergen), wat groter is dan de waterdiepte van 1,5 m ter plaatse van de instroom. Toch wordt ook de afwaartse sponning (zeker in geval van Geraardsbergen) best wel voorzien om (onvoorziene) waterstandsfluctuaties in het afwaartse pand te kunnen opvangen.

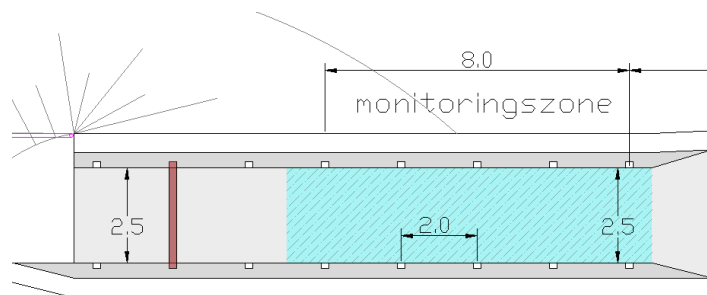
De afstand tussen deze 'droogzet'-sponningen en de sponning voor de afsluitconstructie (in geval van hefschuif) wordt in het voorstel gelijk gekozen aan de afstand tussen de sponningen in de monitoringszone (zie 7.5), namelijk hart-op-hart 2,0 m. Deze afstand en ook de sponningbreedte en -diepte dienen (o.a. met oog op beheer) echter verder uitgewerkt en gevalideerd te worden in het bouwkundig ontwerp.

## 7.5 Monitoringszone

In de opwaartse instroom wordt net afwaarts van de afsluitconstructie een zone voorzien voor monitoring. Figuur 87 zoomt in op deze monitoringszone (zie met streepjes gearceerde blauwe vlak). Deze monitoringzone bestaat uit een rechte bak met betonnen vloer en zijwanden, met een breedte van 2,5 m en een waterdiepte bij streefpeil van 1,5 m. De monitoringzone heeft best een gladde en effen vloer (dus zonder scherpe bodembekleding of steenbestorting) in functie van een eenvoudige plaatsing van monitoringsmateriaal op de bodem (zoals een frame voor een camera, een vangconstructie of een ander meettoestel) en om eventuele schade aan kwetsbaar materiaal (zoals fuiken) te voorkomen. In de zijwanden dienen sponningen te worden voorzien voor de bevestiging van frames en monitoringsmateriaal.

De minimale lengte voor de monitoringszone wordt bepaald door de toe te passen fuiklengte. Hiervoor geldt een nodige lengte van 8,0 m. Daarom worden 5 sets van sponningen voorzien om de 2,0 m (hart-op-hart). Op deze wijze ontstaat de minimaal benodigde afstand van 8,0 m tussen de op- en afwaartse sponning van de monitoringszone (ook weer hart-op-hart). Door een gelijke afstand tussen de sponningen (2,0 m) en een gelijke breedte (2,5 m) te kiezen, is standaardisatie en uitwisseling tussen locaties mogelijk.

Om dezelfde reden wordt ook gekozen om dezelfde sponningdiepte en -breedte toe te passen als nodig voor de schotbalken voor het droogzetten van de afsluitconstructie, namelijk sponningdiepte 0,15 m en sponningbreedte 0,20 m (zie 0).



Figuur 87 – Grondplan ontwerp monitoringszone

Voor de plaatsing van meet- en monitoringsapparatuur kunnen op deze wijze standaardframes worden toegepast. Zo kan bijvoorbeeld in het geval van fuiken in één van de afwaartse sponningen een frame worden geplaatst waaraan de keel van de fuik is bevestigd. Gelijktijdig kan dan in één van de opwaartse sponningen een frame worden geplaatst met de aanhechtingspunten (palen) waarop de fuik kan worden opgespannen. In een ander voorbeeld kunnen frames met bijvoorbeeld boxen voor cameramonitoring worden geplaatst.

Naast de monitoringszone is een zone met een breedte van circa 4 m nodig als werkzone, welke samen kan vallen met de benodigde werkweg langs de vispassages. Wanneer de vispassage enkel wordt afgescheiden van de stuwgeul door een tussenwand (bestaande uit damplanken), dan wordt er op deze wand best een kesp voorzien met loopruimte van minimaal circa 1,0 m om ook vanaf de andere zijde van de vispassage bij de sponningen te kunnen komen. Indien nodig wordt in dat geval best ook een leuning voorzien aan de waterzijde van deze loopzone. Tenslotte worden er best mogelijkheden voorzien om één of meer ladders te kunnen inhangen in de monitoringszone om deze te kunnen betreden bij het plaatsen/verwijderen van monitoringsapparatuur en/of het legen van fuiken.

## 7.6 Controle stroomsnelheid en verval

### 7.6.1 Doelstelling

In deze paragraaf worden de stroomsnelheden en vervallen gecontroleerd voor elk van de onderdelen uit het voorkeursontwerp van de instroom zoals weergegeven in Figuur 83 bij maatgevende hydraulische scenario's.

Een (plotse) vernauwing, verwijding of verruwing van de stroom kan zorgen voor een verval in waterstand, waarbij ook een lokale toename (of afname) van de stroomsnelheid zal optreden. In het geval van de vispassages kan dit tevens leiden tot een lager waterpeil ter plaatse van het opwaartse slot en zo ook mee het debiet door de vispassage beïnvloeden. Bij de berekeningen van de vervallen en stroomsnelheden wordt ook een inschatting gemaakt van de ladingsverliezen die bij elk van de onderdelen kunnen optreden. Landingsverliezen zijn energieverliezen die optreden ten gevolge van contractie, verwijding of wrijving van de stroom.

Verwacht wordt dat vooral de invloed op de stroomsnelheid maatgevend zal zijn. Er wordt gecontroleerd op maximaal toelaatbare stroomsnelheden ( $U$  in m/s) met oog op passeerbaarheid<sup>7</sup>, waarbij gesteld wordt dat stroomsnelheden niet hoger mogen worden dan 0,5 m/s (= kruissnelheid doelsoorten). In principe zouden stroomsnelheden op zeer korte afstand ook getoetst kunnen worden aan de sprintsnelheid. Aangezien vissen echter aan de instroom arriveren na een hele vispassage te hebben doorzwommen, worden hogere stroomsnelheden in de instroom best zo veel mogelijk vermeden.

Zoals vermeld is de lokale toename van de stroomsnelheid gekoppeld aan de toename van het lokale verval. Daarom worden ook de berekende vervallen per onderdeel ( $\Delta F$  in cm) gegeven. Dit geeft de mogelijkheid om te controleren of nog voldaan kan worden aan de minimaal vereiste waterdiepte (> 1,0 m). Aangezien er relatief veel bufferruimte in diepte aanwezig is (dit is eigen aan vertical slot-passages), en ook stroomsnelheden niet hoger dan 0,5 m/s mogen gaan, wordt echter verwacht dat hier altijd aan voldaan zal worden.

### 7.6.2 Hydraulische randvoorwaarden

De onderzochte scenario's zijn een combinatie van waterpeilen en debieten bij normale werking (dagdagelijkse condities). Voor opwaartse waterpeilen zijn dit fluctuaties van +/-0,20 m ten opzichte van streefpeil. Uit de waterpeilen volgt het bijbehorende vispassagedebiet van het voorkeursontwerp (vertical slot). Bij streefpeil werd een waterdiepte van 1,5 m gekozen (gelijk aan de waterdiepte in de sloten bij open afwaarts streefpeil).

Daarnaast wordt ook een scenario bij het maximaal toelaatbare debiet op basis van de maximaal toelaatbare gemiddelde stroomsnelheid van 0,5 m/s meegenomen. Dit laatste om in het geval van de keuze voor een ander type of andere slotdimensies een idee te geven vanaf welk debiet een grotere breedte en/of diepte voor de instroom benodigd zouden zijn. Aangezien grotere debieten zullen optreden bij hogere waterstanden wordt dit fictieve scenario berekend bij een waterdiepte van 1,7 m (= streefpeil +0,20 m). Tabel 31 geeft een overzicht van de onderzochte combinaties.

Tabel 31 – Beschouwde hydraulische combinaties voor controle stroomsnelheden en vervallen in de instroom

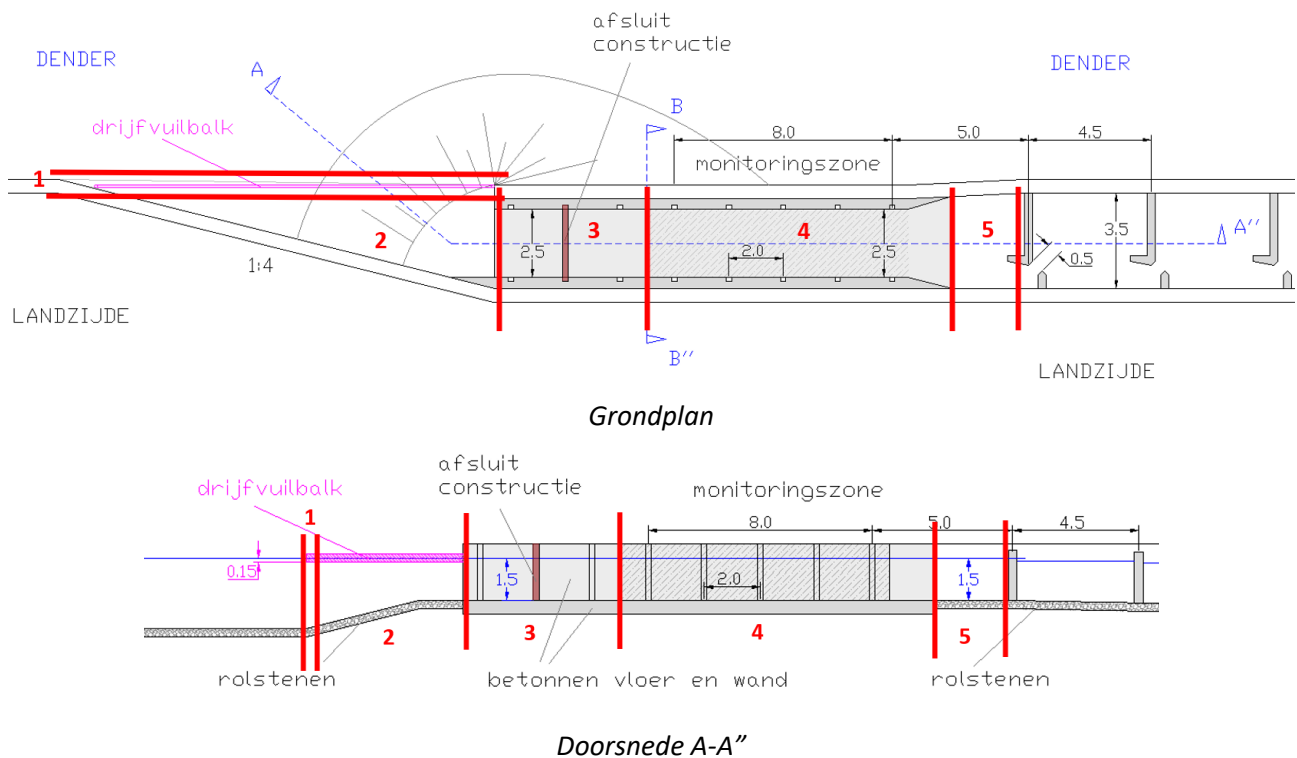
Opwaarts waterpeil [m]	Beoogde waterdiepte [m]	Debiet vertical slot [m <sup>3</sup> /s]
Streefpeil - 0,20	1,3	0,65
Streefpeil	1,5	0,75
Streefpeil + 0,20	1,7	0,85
		2,1 (max. toelaatbaar)

### 7.6.3 Berekeningsmethode

Voor het bepalen van de stroomsnelheden, vervallen en ladingsverliezen zal de verhanglijn over de gehele instroom worden berekend. *Bijlage A – Ladingsverliezen* bevat de berekening van ladingsverliezen in prismatische kanalen en overgangssecties. Voor de berekeningen wordt de instroom verdeeld in verschillende onderdelen (zie Figuur 88):

<sup>7</sup> De stroomsnelheid mag in principe ook niet te laag worden, terugzwemgedrag moet immers vermeden worden. Het is echter moeilijk om hier in dit geval een ondergrens op te plakken; in de Dender zijn de stroomsnelheden immers ook relatief laag bij normale afvoeren. Aangezien de vissen zich tevens al helemaal opwaarts in de passage bevinden, wordt de kans op terugzwemmen als zeer klein gezien. Er wordt dus geen minimale stroomsnelheid vooropgesteld, al blijft het wel een criterium waarop bij bepaalde ontwerpsituaties rekening mee moet worden gehouden.

0. Opwaarts pand Dender
1. Drijfvuilbalk (vast of drijvend)
2. Instroomhelling
3. Zone afsluitconstructie
4. Monitoringszone
5. Aansluiting op eerste slot



Figuur 88 – Langdoorsnede instroomconstructie met verdeling in onderdelen voor de berekening van de ladingsverliezen

In de praktijk zal de instroomconstructie een subkritische stroming kennen. De berekening zal dus van stroomafwaarts naar stroomopwaarts gebeuren (van 5 naar 1), waarbij het ladingsverlies (en bijhorende opstuwing) van elk afwaarts onderdeel als afwaartse randvoorwaarde geldt voor het stroomopwaarts gelegen onderdeel. Hierbij kan ervan uitgegaan worden dat het eerste vertical slot als controlesectie optreedt, met andere woorden dat de respectieve  $Q$ - $h$ -relatie als afwaartse randvoorwaarde voor deel 5 opgelegd kan worden.

In deel 5 (deel tussen monitoringszone en eerste slot) wordt de verhanglijn berekend volgens de vergelijking van Bresse, ook al gaat het om een beperkte afstand (zie Bijlage A.1 – Verhanglijn).

In deel 4 (monitoringszone) wordt het effect van de geleidelijke verbreding gecontroleerd aan de hand van de specifieke energiehoogte voor en na de verbreding. Daaruit blijkt dat deze nagenoeg gelijk is, waardoor ook het ladingsverlies verwaarloosbaar is (zie Bijlage A.2 – Geleidelijke verbreding). Het ladingsverlies wordt verder berekend volgens de vergelijking van Bresse. Daarbovenop wordt het ladingsverlies van de sponningen (5 sets), hoewel zeer beperkt, meegerekend (zie Bijlage A.3 – Sponningen).

Deel 3 (zone afsluitconstructie) is eigenlijk een doorzetting van deel 4 (aangezien wordt uitgegaan van een volledig geopende afsluitconstructie), dus de algemene wrijvingsverliezen en sponningen worden op dezelfde manier berekend.

De plotse vernauwing tussen deel 2 en deel 3 wordt begroot door een lokaal ladingsverlies met ladingsverliescoëfficiënt  $\xi = 0,1$  (volgens Formica, overgenomen uit Berlamont (2004)).

Het totale ladingsverlies in deel 2 (instroomhelling) werd initieel ook berekend door middel van de vergelijking van Bresse voor de oplopende helling. Hierdoor werden onrealistisch hoge waarden voor het waterpeilverschil gevonden. Bij deze resultaten kan opgemerkt worden dat de instroming vanuit de Dender, onder een bepaalde hoek, gecombineerd met de opgaande helling en versmalling van het kanaal, (te) sterk geschematiseerd wordt wanneer de vergelijking van Bresse voor prismatische kanalen (in dit geval met tegenhelling) wordt toegepast. In realiteit treedt een complex stromingspatroon op, met een lateraal instromend debiet in een geleidelijk vernauwend en opgaand kanaal. Daarom werd een tweede methode toegepast om het peilverschil tussen de Dender en het begin van de afsluitconstructie te begroten, nl. door te kijken naar de specifieke energiehogte in beide secties (zie Bijlage A.4 – Geleidelijke verhoging gecombineerd met versmalling). Omdat zulke overgangsecties doorgaans worden beschouwd via de specifieke energiecurves werd de tweede methode gevolgd in de verdere berekeningen. Hierbij kan opgemerkt worden dat ook deze tweede methode een eendimensionale schematisatie blijft.

De drijfvuilbalk (deel 1) ten slotte wordt berekend als een stroming onder druk (zie Bijlage A.5 – Stroming onder druk). Omwille van de grote doorstroomoppervlakte onder de balk in vergelijking met de beschouwde debieten, is het berekende ladingsverlies echter quasi nul.

#### 7.6.4 Resultaten

Tabel 32 toont de resultaten voor de verschillende hydraulische scenario's overeenstemmend met de debieten voor het voorkeursontwerp voor de vispassage (vertical slot-vispassage).

Het eerste wat opgemerkt kan worden is dat vervallen en stroomsnelheden in de gehele instroom ruim onder de toetsingscriteria blijven ( $U < 0,5$  m/s en  $h > 1,0$  m). Stroomsnelheden liggen tussen de 0,07 en 0,20 m/s, afhankelijk van de opwaartse waterstand en locatie in de instroom. Het totale verval over de instroom is minder dan 1 cm, wat ervoor zorgt dat de waterdiepte over de gehele instroom altijd groter dan 1,3 m blijft.

Verder treedt er geen zichtbaar verschil op tussen een vaste of drijvende balk. Dit komt omdat de opening onder de drijfvuilbalk ruim is in verhouding tot de vispassagedebieten horende bij de voorgestelde vertical slot-vispassage. Uit testberekeningen bij een instroomconstructie zonder deze opgaande helling en hogere debieten (circa 2 m<sup>3</sup>/s) bleken vervallen op te lopen tot enkele centimeters, met bijhorende hogere stroomsnelheden, zeker bij een vaste balk. De resultaten van het voorgestelde ontwerp voor de Dendervispassages tonen aan dat een instroomhelling zoals hier toegepast niet alleen gunstig is om afwaartse migratie te bevorderen, maar ook om de hydraulische invloed van een (vaste) drijfvuilbalk te beperken.

Aangezien de lokale vervallen over de onderdelen van de instroom zeer beperkt zijn, is ook de invloed op het vispassagedebiet verwaarloosbaar klein. Dit betekent dat het vispassagedebiet bepaald kan worden uit enkel de Q-h-relatie van de vertical slots.

Tabel 32 – Berekende ladingsverliezen ( $\Delta F$ ) en stroomsnelheden ( $U$ ) doorheen de instroom, voor verschillende hydraulische combinaties binnen de normale werkingsperiode

Drijf- vuil- balk	Verskil met streefpeil	Beoogde water- diepte instroom  [m]	Beoogd debiet vertical slot  [m <sup>3</sup> /s]	Werkelijk debiet  [m <sup>3</sup> /s]		Drijfvuilbalk	Instroomhelling	Afsluit + monitoring	Aansluiting met 1ste slot	Totaal
Drijvend	-20 cm	1,3	0,65	0,65	$\Delta F$ [cm]	0,0	0,2	0,0	0,0	0,2
					$U$ [m/s]	0,07	0,14	0,20	0,14	/
	0 cm	1,5	0,75	0,75	$\Delta F$ [cm]	0,0	0,02	0,0	0,0	0,2
					$U$ [m/s]	0,08	0,14	0,20	0,14	/
	+20 cm	1,7	0,85	0,85	$\Delta F$ [cm]	0,0	0,2	0,0	0,0	0,2
					$U$ [m/s]	0,08	0,14	0,20	0,14	/
Vast	-20 cm	1,3	0,65	0,65	$\Delta F$ [cm]	0,0	0,2	0,0	0,0	0,2
					$U$ [m/s]	0,07	0,14	0,20	0,14	/
	0 cm	1,5	0,75	0,75	$\Delta F$ [cm]	0,0	0,2	0,0	0,0	0,2
					$U$ [m/s]	0,09	0,14	0,20	0,14	/
	+20 cm	1,7	0,85	0,85	$\Delta F$ [cm]	0,0	0,2	0,0	0,0	0,2
					$U$ [m/s]	0,10	0,14	0,20	0,14	/

Tabel 33 toont de vervallen en stroomsnelheden per onderdeel bij een debiet van 2,1 m<sup>3</sup>/s. Dit is het debiet dat leidt tot de maximaal toelaatbare gemiddelde stroomsnelheid in de maatgevende sectie van de instroom, namelijk de betonnen U-bak ter plaatse van de afsluitconstructie en monitoringszone. Uit de resultaten blijkt dat de grootste vervallen optreden ter plaatse van de instroomhelling (deel 2; 1,2 cm), vervolgens ter plaatse van de zones van de betonnen bak van de afsluitconstructie en monitoringszone (delen 3 en 4; 0,2 cm), dan ter plaatse van het deel met de aansluiting naar het opwaartse slot (deel 5; 0,1 cm) en ten slotte geen waarneembaar effect ter plaatse van de drijfvuilbalk (deel 1).

Merk op dat in deze berekeningen steeds werd uitgegaan van een openstaande afsluitconstructie met dezelfde breedte als de instroom zelf. Voor de invloed van een eventuele vernauwing ter plaatse van de afsluitconstructie wordt verwezen naar *Bijlage B – Minimale breedte afsluitconstructie*.



Tabel 33 – Berekende ladingsverliezen ( $\Delta F$ ) en stroomsnelheden (U) doorheen de instroom, voor het maximaal toelaatbaar debiet

Drijf- vuil- balk	Vershil met streef- peil	Beoogde water- diepte instroom  [m]	Toe- gepast maximaal debiet  [m <sup>3</sup> /s]		Drijfvuilbalk	Instroomhelling	Afsluit + monitoring	Aansluiting met 1ste slot	Totaal
Drijvend	+20 cm	1,7	2,1	$\Delta F$ [cm]	0,0	1,2	0,2	0,1	1,5
				U [m/s]	0,21	0,36	0,50	0,36	/
Vast	+20 cm	1,7	2,1	$\Delta F$ [cm]	0,0	1,2	0,2	0,1	1,5
				U [m/s]	0,24	0,36	0,50	0,36	/

## 8 Automatische regeling

### 8.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt een voorstel gedaan voor de automatische sturing van de beweegbare onderdelen van de vispassage met toegevoegd debiet. Deze is gebaseerd op de sturing die eerder werd voorgesteld en geïmplementeerd voor nieuwe vispassages op de Bovenschelde en Leie (Vanderkimpen *et al.*, 2019 en 2020).

Dit voorstel werd beproefd in een afzonderlijke numerieke modelstudie (Vanderkimpen *et al.*, 2023), waarbij ook de interactie met de stuwregeling werd bekeken. Uit deze studie volgde dat de voorgestelde sturing aan de verwachtingen voldoet.

De beschrijving van de voorgestelde voorwaarden in dit rapport worden met oog op waterpeilen steeds relatief gegeven ten opzichte van streefpeilen. Per locatie zal later echter een aparte memo worden opgesteld met de absolute waarden die gelden voor de betreffende locatie. Deze memo's kunnen vervolgens worden toegepast voor de verdere softwarematige implementatie bij de bouw van de vispassage. Dit rapport heeft dus eerder tot doel een algemeen beeld te geven van de sturingsvoorwaarden.

De vispassages op de Dender worden uitgerust met de volgende (groepen van) beweegbare onderdelen waarvoor een automatische regeling benodigd is:

1. opwaartse afsluitconstructie (hefschuif) om de vispassage te kunnen sluiten met het oog op peilbeheer en/of onderhoud,
2. twee regelschuiven om de grootte van het toegevoegd debiet door elk van de buizen afwaarts in de vispassage te kunnen regelen.

### 8.2 Afsluitconstructie vispassage

#### 8.2.1 Principe

De opwaartse hefschuif van de vispassage heeft slechts twee standen: volledig open of volledig dicht. Deze schuif moet zowel manueel als automatisch bediend kunnen worden. De automatische regeling gebeurt op basis van het waterpeil opwaarts en afwaarts van de stuw en het debiet over de stuw. De regeling dient voorzien te worden van een keuzeschakelaar: openen en sluiten hefschuif manueel of automatisch.

In eerste instantie wordt een automatische sturing voorgesteld die uitgaat van openen op basis van het debiet over de stuw en sluiten op basis van het waterpeil opwaarts (en afwaarts) van de stuw. Door een flexibele implementatie kan de mogelijkheid tot het overschakelen op een ander type sturing (bijv. openen op basis van waterpeil opwaarts van de stuw) grotendeels behouden blijven.

Om schade aan de vispassage te voorkomen kan het voor sommige vispassagetypes (zoals bijv. nevengeulen en bekkentrappen) van belang zijn dat deze afgesloten kunnen worden wanneer het debiet doorheen de vispassage te groot dreigt te worden. Aangezien het debiet doorheen de vispassage niet berekend wordt en dit vooral afhankelijk is van het opwaartse waterpeil, wordt voorgesteld om deze beveiliging te koppelen aan de meting van het waterpeil opwaarts van de stuw, m.aw. de toevoeging van een sluitingsvoorwaarde op basis van (te hoog) opwaarts waterpeil. Aan de andere kant kan de val van de afwaartse waterstand ook zorgen voor relatief hoge stroomsnelheden in vooral de afwaartse sloten. Daarom wordt geadviseerd om ook een sluitingsvoorwaarde op te nemen in geval van te lage afwaartse waterstand.

### 8.2.2 Sturingsregels

Bij automatische werking (keuzeschakelaar op “automatisch”) wordt de vispassage geopend en gesloten op basis van het waterpeil opwaarts of afwaarts van de stuw en/of het debiet over de stuw volgens de volgende sturingsregels:

1. **VOLLEDIG SLUITEN 1** als alarmpeilvlotter (hoogwateralarm OF laagwateralarm) geactiveerd worden<sup>8</sup>
2. **VOLLEDIG SLUITEN 2** als schakelaar op automatisch en waterpeil opwaarts stuw groter dan **instelbaar peil 3** gedurende meer dan **instelbare tijd 3**
3. **VOLLEDIG SLUITEN 3** als schakelaar op automatisch en waterpeil afwaarts stuw kleiner dan **instelbaar peil 4** gedurende meer dan **instelbare tijd 4**
4. **VOLLEDIG SLUITEN 4** als schakelaar op automatisch en waterpeil opwaarts stuw kleiner dan **instelbaar peil 1** gedurende meer dan **instelbare tijd 1** OF debiet over stuw kleiner dan **instelbaar debiet 1** gedurende meer dan **instelbare tijd 1**
5. **VOLLEDIG OPENEN** als schakelaar op automatisch en waterpeil opwaarts stuw groter dan **instelbaar peil 2** gedurende **instelbare tijd 2** EN debiet over stuw groter dan of gelijk aan **instelbaar debiet 2** gedurende meer dan **instelbare tijd 2**

Het onderscheid tussen de instelbare peilen 1 en 2 en de instelbare debieten 1 en 2 en de toepassing van een minimale instelbare tijd 1 of 2 is bedoeld om frequent openen en sluiten te voorkomen.

De regels 1, 2 en 3 zijn veiligheidsregels en zijn gedeeltelijk redundant. De regels 4 en 5 beschrijven de werking van de schuif van de vispassage onder normale omstandigheden.

De eerste regel zorgt ervoor dat de vispassage altijd sluit wanneer het waterpeil opwaarts van de stuw te hoog of te laag wordt, ongeacht of de hefschuif manueel of automatisch bediend wordt. Indien een beveiliging tegen hoge debieten niet nodig geacht wordt (bv. omdat de kans op schade aan een betonnen vertical slot-vispassage klein is), dan volstaat een sluiting op basis van een laagwateralarm.

De tweede regel laat toe een extra beveiliging tegen hoge debieten te voorzien. De derde regel laat toe een extra beveiliging te voorzien tegen hoge stroomsnelheden in vooral de afwaartse sloten bij de val van de afwaartse waterstand. Indien een dergelijke beveiligingen niet nodig geacht worden (bv. omdat de vispassage reeds gesloten wordt door activering van de hoog- of laagwateralarmvlotter nog voor kritieke waarden worden overschreden), dan kan ze uitgeschakeld worden door een artificieel hoge/ lage waarde voor het instelbaar peil (bv +/- 99.99 mTAW) in te voeren.

De vierde regel laat toe de vispassage te sluiten op basis van een waterpeil of een debiet:

- Wanneer voor waterpeil en debiet realistische waarden opgegeven worden, dan zal de vispassage sluiten wanneer aan één van beide voorwaarden voldaan is.
- Wanneer het debiet gelijk gesteld wordt aan een realistische waarde en het waterpeil gelijk gesteld wordt aan een zeer lage waarde (bv. drempelpeil van de vispassage), dan zal de waterpeilvoorwaarde nooit vervuld zijn en zal de vispassage sluiten op basis van het debiet.
- Wanneer het debiet gelijk gesteld wordt aan  $0 \text{ m}^3/\text{s}$  en het waterpeil gelijk gesteld wordt aan een realistische waarde, dan zal de debietvoorwaarde nooit vervuld zijn en zal de vispassage sluiten op basis van het waterpeil.

<sup>8</sup> Per locatie moet nog wel worden bekeken hoe de hoogte van de vlotter zich relateren tot de voorgestelde waarden in de andere sturingsregels. De vlotterhoogtes mogen zich niet binnen de dagelijkse waterstandfluctuaties bevinden. Idealiter sluit de vertical slotpassage ook niet bij verhoogde peilen aangezien er geen risico is op schade.

De vijfde regel laat toe de vispassage te openen op basis van een combinatie van een waterpeil en een debiet:

- Wanneer voor waterpeil en debiet realistische waarden opgegeven worden, dan zal de vispassage openen wanneer aan beide voorwaarden tegelijk voldaan is.
- Wanneer het debiet gelijk gesteld wordt aan een realistische waarde en het waterpeil gelijk gesteld wordt aan een zeer lage waarde (bv. drempelpeil van de vispassage), dan zal de waterpeilvoorwaarde altijd vervuld zijn en zal de vispassage openen op basis van het debiet.
- Wanneer het debiet gelijk gesteld wordt aan 0 m<sup>3</sup>/s en het waterpeil gelijk gesteld wordt aan een realistische waarde, dan zal de debietvoorwaarde altijd vervuld zijn en zal de vispassage openen op basis van het waterpeil.

Bij de bovenstaande regels wordt het volgende opgemerkt:

- De regels gaan uit van de veronderstelling dat de PLC de regels in de genoemde volgorde evalueert. Van zodra aan een set voorwaarden voldaan is, worden de bijhorende instructies uitgevoerd en wordt de cyclus hervat (m.a.w. als aan de voorwaarden van regel 2 voldaan is, dan wordt regel 2 toegepast en worden regels 3, 4 en 5 niet meer geëvalueerd).
- De regels gaan uit van de veronderstelling dat de formule voor het berekenen van het debiet over de stuw geen negatieve waarden kan produceren.

### 8.2.3 Voorstel initiële waarden

Tabel 34 geeft een voorstel voor beginwaarden van de instelbare parameters. De gele velden tonen de door de gebruiker in te voeren waarden.

Tabel 34 – Voorstel initiële waarden vispassage bij openen op basis van debiet en sluiten op basis van waterpeil

Vispassage	debiet stuw (m <sup>3</sup> /s)	peil opw (mTAW)	peil afw (mTAW)	schuifstand
continu sluiten				volledig dicht
alarmvlotter				
peil 3	nvt	> 99.99	< streefpeil - 0.5	
continu openen				volledig open
peil 2 en debiet 2	≥ 0.8	> bodem vispassage	nvt	
rust				
peil 1 of debiet 1	< -999.9	streefpeil - 0.2	nvt	
continu sluiten				volledig dicht

Bij een vertical slot is de kans op schade erg klein (zie 7.4.3), daarom wordt voorgesteld om voorwaarde 'volledig sluiten 2' dan ook uit te schakelen door de grenswaarde te vervangen door 99.99 mTAW (i.p.v. bijv. 'streefpeil + 0,2 m'). Aangezien het risico op wegspoelen van het bodemsubstraat wel aanwezig is bij extreme val van de afwaartse waterstand wordt voorwaarde 'sluiten 3' wel geactiveerd vanaf afwaartse waterpeilen lager dan 0,5 m onder streefpeil.

De vispassage zal openen als het debiet over de stuw groter dan of gelijk is aan 0,8 m<sup>3</sup>/s en het opwaarts waterpeil meer dan het bodempeil van de instroom van de vispassage bedraagt. De waterpeilvoorwaarde zal bijna altijd vervuld zijn.

De vispassage zal sluiten als het opwaarts waterpeil minder 0,20 m onder het opwaarts streefpeil bedraagt of het debiet over de stuw minder dan -999,9 m<sup>3</sup>/s bedraagt. De debietvoorwaarde is onvervulbaar en heeft bijgevolg geen invloed.

## 8.3 Regelconstructie toegevoegd debiet

### 8.3.1 Principe

De beide regelconstructies voor het toegevoegd debiet worden uitgerust met een hefschuif waarvan de stand continu kan variëren. In de voorgestelde regeling worden per schuif maximaal 5 standen gebruikt: volledig gesloten en 4 instelbare openingen. De bewegingssnelheid van de hefschuiven moet toelaten ze volledig te openen of te sluiten op enkele minuten tijd.

De automatische regeling gebeurt op basis van het debiet over de stuw en heeft tot doel een optimale verhouding tussen het debiet over de stuw en de lokstroom (debiet vispassage plus toegevoegd debiet) te behouden (zie ook 8.3.4). De regeling dient voorzien te worden van een keuzeschakelaar: openen en sluiten hefschuif manueel of automatisch.

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 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.

### 8.3.2 Sturingsregels

Bij automatische werking (keuzeschakelaar op “automatisch”) worden de schuiven van het toegevoegd debiet geopend en gesloten volgens de volgende sturingsregels:

1. **VOLLEDIG SLUITEN 1** als alarmpeilvlotter (hoogwateralarm OF laagwateralarm) geactiveerd worden<sup>9</sup>
2. **VOLLEDIG SLUITEN 2** als vispassage gesloten is
3. **VOLLEDIG SLUITEN 3** als waterpeil opwaarts stuw kleiner dan **instelbaar peil 1** gedurende meer dan **instelbare tijd 2**
4. **OPENEN TOT INSTELBARE SCHUIFSTAND 1** als schuifstand kleiner dan **instelbare schuifstand 1** en debiet over stuw groter dan **instelbaar debiet 1+** gedurende meer dan **instelbare tijd 1**
5. **OPENEN TOT INSTELBARE SCHUIFSTAND 2** als schuifstand kleiner dan **instelbare schuifstand 2** en debiet over stuw groter dan **instelbaar debiet 2+** gedurende meer dan **instelbare tijd 1**
6. **OPENEN TOT INSTELBARE SCHUIFSTAND 3** als schuifstand kleiner dan **instelbare schuifstand 3** en debiet over stuw groter dan **instelbaar debiet 3+** gedurende meer dan **instelbare tijd 1**
7. **OPENEN TOT INSTELBARE SCHUIFSTAND 4** als schuifstand kleiner dan **instelbare schuifstand 4** en debiet over stuw groter dan **instelbaar debiet 4+** gedurende meer dan **instelbare tijd 1**
8. **SLUITEN TOT INSTELBARE SCHUIFSTAND 3** als schuifstand groter dan **instelbare schuifstand 3** en debiet over stuw kleiner dan **instelbaar debiet 4-** gedurende meer dan **instelbare tijd 1**
9. **SLUITEN TOT INSTELBARE SCHUIFSTAND 2** als schuifstand groter dan **instelbare schuifstand 2** en debiet over stuw kleiner dan **instelbaar debiet 3-** gedurende meer dan **instelbare tijd 1**
10. **SLUITEN TOT INSTELBARE SCHUIFSTAND 1** als schuifstand groter dan **instelbare schuifstand 1** en debiet over stuw kleiner dan **instelbaar debiet 2-** gedurende meer dan **instelbare tijd 1**

<sup>9</sup> Per locatie moet nog wel worden bekeken hoe de hoogte van de vlotter zich relateren tot de voorgestelde waarden in de andere sturingsregels. De vlotterhoogtes mogen zich niet binnen de dagelijkse waterstandfluctuaties bevinden.

11. **VOLLEDIG SLUITEN 4** als schuifstand groter dan 0 en debiet over stuw kleiner dan **instelbaar debiet 1**- gedurende meer dan **instelbare tijd 1**

Het onderscheid tussen de instelbare debieten "n+" en "n-" en de toepassing van een minimale instelbare tijd 1 of 2 is bedoeld om frequent openen en sluiten te voorkomen.

De regels 1 t.e.m. 3 zijn veiligheidsregels en zijn gedeeltelijk redundant. De regels 4 t.e.m. 11 beschrijven de werking van de schuif van het toegevoegd debiet onder normale omstandigheden, d.w.z. als de vispassage geopend is en het waterpeil opwaarts van de stuw rond het streefpeil ligt.

De eerste regel zorgt ervoor dat de schuif van het toegevoegd debiet altijd sluit wanneer het waterpeil opwaarts van de stuw te hoog of te laag wordt (indien gewenst, zie voetnoot bij voorwaarde 1). Indien een beveiliging tegen hoge debieten niet nodig geacht wordt (bv. omdat de kans op schade aan de leiding van het toegevoegd debiet klein is), dan volstaat een sluiting op basis van een laagwateralarm.

De tweede regel zorgt ervoor dat er geen nutteloos toegevoegd debiet geleverd wordt als de vispassage om één of andere reden automatisch of manueel gesloten werd.

De derde regel zorgt ervoor dat de schuif van het toegevoegd debiet altijd sluit wanneer het waterpeil opwaarts van de stuw te laag wordt, ongeacht alle andere variabelen.

De vierde t.e.m. de zevende regel beschrijven de trapsgewijze toename van het toegevoegd debiet in functie van het debiet over de stuw, wanneer de vispassage geopend is.

De achtste t.e.m. de elfde regel beschrijven de trapsgewijze afbouw van het toegevoegd debiet in functie van het debiet over de stuw, wanneer de vispassage geopend is.

Bij de bovenstaande regels wordt het volgende opgemerkt:

- De regels gaan uit van de veronderstelling dat de PLC de regels in de genoemde volgorde evalueert. Van zodra aan een set voorwaarden voldaan is, worden de bijhorende instructies uitgevoerd en wordt de cyclus hervat (m.a.w. als aan de voorwaarden van regel 2 voldaan is, dan wordt regel 2 toegepast en worden regels 3 t.e.m. 11 niet meer geëvalueerd).
- De regels gaan uit van de veronderstelling dat de formules voor het berekenen van het debiet over de stuw geen negatieve waarden kan produceren.

### 8.3.3 Voorstel initiële waarden

Tabel 35 geeft een voorstel voor beginwaarden van de instelbare parameters. De gele velden tonen de door de gebruiker in te voeren waarden.

Tabel 35 – Voorstel initiële waarden toegevoegd debiet bij (toekomstige) gedempte debietschommelingen

	debiet stuw (m <sup>3</sup> /s)	opwaarts waterpeil (mTAW)	schuifstand (cm)	toegevoegd debiet* (m <sup>3</sup> /s)
continu naar stand 4			Te bepalen per locatie	3
debiet 4+	> 3,1			
debiet 4-	< 2,1			
continu naar stand 3			Te bepalen per locatie	2
debiet 3+	> 2,1			
debiet 3-	< 1,1			
continu naar stand 2			Te bepalen per locatie	1
debiet 2+	> 1,1			
debiet 2-	< 0,6			
continu naar stand 1			Te bepalen per locatie	0,5
debiet 1+	> 0,6			
debiet 1- of peil 1	< 0,5	< streefpeil – 0,2		
Continu sluiten				0

\* NB: dit is het totaal debiet over twee buizen; bij twee buizen is het per buis dus de helft. Per locatie zal per buis bij elke gewenste debiet een bijbehorende schuifstand bepaald dienen te worden.

#### 8.3.4 Verhouding lokstroom- en stuwdebiet

De gekozen regelingsvoorwaarden en voorstelde initiële waarden voor de regeling en grootte van het toegevoegd debiet zijn zo gekozen dat deze zorgen voor een zo optimaal mogelijke verhouding van het lokstroomdebiet ten opzichte van het debiet over de stuwen. Tabel 36 geeft een overzicht van deze verhouding bij de voorgestelde regelstappen.

Hieruit blijkt dat bij deze regeling de lokstroom zo goed als altijd groter is dan het debiet over de stuwen bij rivierafvoeren tot 7,6 m<sup>3</sup>/s (= 2x maximale lokstroomdebiet), enkel bij terugschakelen van stand 4 naar 3 en van 3 naar 2 duikt de verhouding 'lok/stuw' net onder de waarde van 1. Bij opbouw van toegevoegd debiet wordt de verhouding zelfs groter dan 2, wat een heel grote meerwaarde is voor de vindbaarheid van de vispassage.

Wanneer het debiet op de rivier verder toeneemt en het toegevoegde debiet in de maximale stand 4 staat (= lokstroom van 3,8 m<sup>3</sup>/s) dan kan in de bovengrenssituatie van de Q<sub>10%</sub> nog een verhouding worden gehaald van 0,18 tot 0,41 afhankelijk van de locatie langs de Dender (zie ook Tabel 10 en Tabel 13). Dit ligt nog ruim boven de richtlijn van een minimale verhouding van 0,10 in bovengrenssituaties.

Tabel 36 – Verhouding lokstroom ten opzichte van debiet over de stuwen bij bepaalde schuifstanden voor het toegevoegd debiet

Sturingsregel	voorwaarde (als:)			reactie (dan:)		waarden voor en na regeling						
	Schuifstand (-)	Stuwdebiet (m <sup>3</sup> /s)	Toeg. debiet (m <sup>3</sup> /s)	Vispas. debiet (m <sup>3</sup> /s)	lokstroom voor (m <sup>3</sup> /s)	lokstroom na (m <sup>3</sup> /s)	stuwdebiet voor (m <sup>3</sup> /s)	stuwdebiet na (m <sup>3</sup> /s)	lok/stuw voor (-)	lok/stuw na (-)	Totaal rivier (m <sup>3</sup> /s)	
Openen naar Stand 1	< 1 >	0,6	0,5	0,8	0,8	1,3	0,6	0,1	1,33	13,00	1,4	
Openen naar Stand 2	< 2 >	1,1	1,0	0,8	1,3	1,8	1,1	0,6	1,18	3,00	2,4	
Openen naar Stand 3	< 3 >	2,1	2,0	0,8	1,8	2,8	2,1	1,1	0,86	2,55	3,9	
Openen naar Stand 4	< 4 >	3,1	<b>3,0</b>	0,8	2,8	<b>3,8</b>	3,1	2,1	0,90	1,81	5,9	
Sluiten naar Stand 3	> 3 <	2,1	2,0	0,8	3,8	2,8	2,1	3,1	1,81	0,90	5,9	
Sluiten naar Stand 2	> 2 <	1,1	1,0	0,8	2,8	1,8	1,1	2,1	2,55	0,86	3,9	
Sluiten naar Stand 1	> 1 <	0,5	0,5	0,8	1,8	1,3	0,5	1,0	3,60	1,30	2,3	
Sluiten 4	> 0 <	0,1	0,0	0,8	1,3	0,8	0,1	0,6	13,00	1,33	1,4	
<b>Bij bovengrens:</b>												
In stand 4	4	9,2	3,0	0,8		3,8				0,41	13	
In stand 4	4	21,2	3,0	0,8		3,8				0,18	25	

## 8.4 Eenheden en formaten

Aangezien de opwaartse peilen waarbij de vispassage of het toegevoegd debiet gesloten moeten worden overeenstemmen met een absoluut minimum (om minimale diepgang voor scheepvaart te verzekeren), wordt voorgesteld om ze te definiëren als een absoluut peil (in mTAW). Het uitdrukken van de afwaartse peilen als een relatief peil t.o.v. het opwaartse streefpeil lijkt erg verwarrend en bijgevolg ongewenst. De peilen dienen instelbaar te zijn met een nauwkeurigheid van 1 cm (formaat xx.xx mTAW of ± xxx cm t.o.v. streefpeil).

De debieten dienen instelbaar te zijn met een nauwkeurigheid van 0.1 m<sup>3</sup>/s (formaat ±xxx.x m<sup>3</sup>/s).

De tijd dient instelbaar te zijn met een nauwkeurigheid van 1 minuut (formaat xxx min).



## 9 Samenvatting

De Vlaamse Waterweg afdeling Regio West (DVW) voorziet om de stuwsluiscomplexen op het Vlaamse deel van de Dender te vernieuwen. Op elk van deze locaties wordt tevens een nieuwe vispassage voorzien om zo deze migratieknelpunten op te lossen. Het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) heeft in samenwerking met het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek (INBO) een ontwerpstudie uitgevoerd voor het algemene ontwerp van deze nieuwe vispassages. In dit hoofdstuk worden de algemene conclusies van deze studie opgesomd.

### 9.1 Ontwerpcriteria

#### 9.1.1 Periode optimale werking

In hoofdstuk 2 van dit rapport zijn de doelsoorten en de daaraan verbonden ontwerpcriteria beschreven (zie enkele van deze doelsoorten in Figuur 89). Met oog op de doelsoorten dient gestreefd te worden naar een werkingspercentage van 100%, aangezien de range aan vissoorten een migratienood door het heel jaar impliceert. Omdat dit vanuit andere randvoorwaarden niet altijd mogelijk is, wordt gesteld dat de vispassage in ieder geval optimaal dient te kunnen werken bij afvoeren op de rivier die meer dan 90% en minder dan 10% worden overschreden, de zogenaamde  $Q_{90\%}$ -ondergrenswaarde en  $Q_{10\%}$ -bovengrenswaarde voor optimale werking.



Figuur 89 – Enkele doelsoorten, v.l.n.r.: rivierprik, blankvoorn, kleine modderkruiper, paling (Foto's: Rollin Verlinde/Vilda)

De effectiviteit van een openstaande vispassage wordt bepaald door zowel de attractiviteit als de passeerbaarheid van de vispassage. Met attractiviteit wordt de vindbaarheid van de vispassage bedoeld, waarbij zowel de locatie van de monding als de sterkte van de lokstroom een belangrijke rol spelen. Dit laatste aspect speelt een hoofdrol in de effectiviteit: wanneer vissen de vispassage niet kunnen vinden speelt de passeerbaarheid verder namelijk geen rol meer. De passeerbaarheid geeft vervolgens aan hoe vlot vissen de vispassage kunnen inzwemmen en in stroomopwaartse richting passeren.

### 9.1.2 Passeerbaarheid

Tabel 37 geeft een samenvatting van de ontwerpcriteria met betrekking tot de passeerbaarheid zoals toegepast bij het ontwerp van de vispassages op de Dender.

Tabel 37 – 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 doorzweembreedte over korte afstand (slot)	$b_{\min}$	0,50 m
Minimale doorzwemdiëpte over korte afstand (drempel)	$d_{\min}$	0,50 m
Minimale doorzwemdiëpte over langere afstand in nevengeulen	$Y_{\min-g}$	0,5 - 1 m
Minimale doorzwemdiëpte over langere afstand in bekkens	$Y_{\min-b}$	1 - 1,5 m
Maximaal toelaatbare energiedissipatie per volume-eenheid	$E_{\max}$	100 W/m <sup>3</sup>

### 9.1.3 Attractiviteit

Met oog op de attractiviteit geldt dat de monding zo dicht mogelijk aan het migratieknelpunt dient te worden voorzien en een uitstroom heeft die zo parallel mogelijk aan de hoofdstroom is. Ook dient minimaal binnen de periode van optimale werking een goed voelbare lokstroom gerealiseerd te worden die tot voorbij de turbulente zone van de stuwen reikt.

De meest optimale locatie voor de vispassagemonding wordt bepaald door de ligging van de migratielinielij. Deze kan echter verschillen per vissoort. Voor een gegeven stuw is de ligging tevens afhankelijk van het debiet, het afwaarts waterpeil en de toegepaste stuwregeling (overstort, onderstroming of een combinatie). Er wordt daarom best eerder gesproken van een migratielinielijzone. De boven- en ondergrenzen van deze zone worden verbonden met het debietcriterium voor de periode van optimale werking, het zogenaamde  $Q_{10\%}$ - $Q_{90\%}$ -criterium. Voor de (theoretische) bepaling van de ligging van de migratielinielij binnen deze zone wordt deze gelijk gesteld aan het einde van (de roller van) de watersprong.

Naast de locatie en oriëntatie van de monding speelt ook de grootte van het lokstroomdebiet een belangrijke rol voor de vindbaarheid. Er wordt daarom gestreefd naar een zo hoog mogelijk lokstroomdebiet in verhouding tot het stuwdebiet. Idealiter is het lokstroomdebiet groter dan het stuwdebiet bij normale en lage afvoer ( $Q_{lok}/Q_{stuw} > 0,5$ ). Bij hogere afvoeren tijdens de periode van optimale werking is het lokstroomdebiet altijd groter dan 10% van het stuwdebiet ( $Q_{lok}/Q_{stuw} > 0,1$ ).

Voor een gedetailleerd overzicht van alle (onderliggende) criteria voor attractiviteit wordt verwezen naar paragraaf 2.4.4.

## 9.2 Hydraulische randvoorwaarden

### 9.2.1 Debieten

De Dender is een regenrivier waarbij de afvoer onder normale omstandigheden relatief laag ligt, terwijl de afvoer bij regenval kortstondig en soms sterk kan toenemen. Tabel 38 geeft een overzicht van de maatgevende debieten die werden vastgesteld op basis van de analyse van de historische metingen. Hierbij wordt opgemerkt dat vooral de debietmeetposten Overboelare en te Erembodegem langs het Vlaamse deel van de Dender van belang zijn voor deze studie. Bij de asterisk in de tabel geeft de eerste waarde steeds het resultaat weer op basis van de meetreeks te Overboelare (meest opwaarts) en de tweede te Erembodegem (op 2/3 van het Vlaamse deel van de Dender, gezien vanaf de grens met Wallonië). Op basis van deze meetposten en de meetpost te Dendermonde werden maatgevende debieten voor elk van de stuwsluiscomplexen geïnterpoleerd op basis van afstroomoppervlak.

Een belangrijke conclusie uit deze debietanalyse is dat de  $Q_{90\%}$ -waarde voor de Dender relatief laag ligt voor de grootte van de waterloop. In de zomermaanden kan deze zelfs dalen tot 0,7 à 0,9 m<sup>3</sup>/s. Dit bleek een belangrijk gegeven voor de keuze van het type vispassages, zie verder onder 9.3.

Tabel 38 – Maatgevende debieten

Parameter	Waarde	Omschrijving
$Q_{90\%-zomer}$	0,7 – 0,9 m <sup>3</sup> /s*	Ondergrens periode optimale werking; van belang voor maximaal toelaatbaar vispassagedebiet met oog op openingspercentage
$Q_{90\%-jaar}$	1 – 1,4 m <sup>3</sup> /s*	
$Q_{50\%-jaar}$	3 – 5 m <sup>3</sup> /s*	Mediaandebiet
$Q_{10\%-jaar}$	13 – 25 m <sup>3</sup> /s*	Bovengrens periode optimale werking; van belang voor minimaal benodigde lokstroom in bovengrenssituatie
$Q_{mw}$	40 – 70 m <sup>3</sup> /s	Middelgrote wassen (circa 1 tot 3x per jaar)
$Q_{max}$	114 m <sup>3</sup> /s	Hoogste gemeten afvoer te Overboelare tijdens de bemeten periode 2001 t.e.m. 2021 in november 2010

\* De eerste waarde uit deze range geeft het debiet te Overboelare, de tweede te Erembodegem.

### 9.2.2 Waterstanden

Door de aanwezigheid van de stuwsluiscomplexen is de Dender een gestuwde rivier. Dit betekent dat de stuwen de opwaartse waterstanden in de stuwpannen continu regelen naar een bepaald streefpeil (SP). Dit gegeven is ook bepalend voor de maatgevende waterstanden voor het ontwerp van de vispassages. Tabel 39 geeft een overzicht van de maatgevende waterstandfluctuaties in de op- en afwaartse panden zoals bepaald op basis van de historische metingen ter plaatse van de verschillende stuwsluiscomplexen.

Met het oog op waterpeilbeheer (voor o.a. de scheepvaart) wordt aan opwaartse zijde een afsluitconstructie voorzien om de vispassage te kunnen sluiten bij waterpeilen lager dan 0,20 m onder streefpeil (dit komt alleen voor bij zeer lage afvoeren). Voor de stijging van het opwaartse waterpeil onder normale omstandigheden wordt een toename van 0,20 tot 0,30 m boven streefpeil aangehouden. Waterstanden hoger dan 0,20 m boven streefpeil komen minder dan circa 10% van de tijd voor, en waterstanden hoger dan 0,30 m minder dan circa 1% van de tijd.

Tabel 39 – Maatgevende waterstandfluctuaties tijdens periode van optimale en suboptimale 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

De afwaartse waterstand fluctueert iets sterker als de opwaartse waterstand. Dit wordt vooral veroorzaakt door het verhang dat ontstaat in de stuwpanden. Dit verhang is afhankelijk van de afvoercapaciteit van het rivierpand en van de grootte van de afvoer. Dit vertaalt zich vooral in grotere stijgingen ten opzichte van streefpeil: circa 0,5 m (minder dan circa 10% van de tijd overschreden) tot circa 1,0 m (minder dan circa 1% van de tijd overschreden).

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. Bij toename van het afwaarts waterpeil neemt het hydraulische verval over de vispassage juist af.

Het debiet door de vispassage wordt, naast de gekozen dimensionering voor de vispassage, vooral bepaald door de hoogte van de opwaartse waterstand. Merk hierbij op dat in het geval van stuwpanden het debiet door de vispassage in principe onafhankelijk is van de afvoer op de rivier, aangezien de stuwen de opwaartse waterstand regelen naar een ingesteld streefpeil.

### 9.3 Voorkeursvariant vispassage

Drie mogelijke vispassagetypen werden onderzocht: semi-natuurlijke nevengeulen, V-vormige bekkentrappen en vertical slot-vispassages. Uit de studie bleek dat de relatief beperkte afvoer op de Dender in normale en vooral drogere perioden bepalend is voor het meest optimale type. Aangezien een vertical slot-vispassage een duidelijk lager basisdebiet heeft in vergelijking met de andere twee types kan deze een hoger openingspercentage halen bij dezelfde passeerbaarheidscriteria, en heeft daardoor dus de voorkeur. Zeker met het oog op het vaker kunnen voorkomen van (langere) drogere periodes vanwege klimaatsverandering geeft dit een robuuster ontwerp. Daarnaast zouden voor nevengeulen en bekkentrappen (ook) relatief veel erosie werende maatregelen nodig zijn waardoor sterk op het meer natuurlijkere karakter zou moeten worden ingeboet.

Aangezien de Dender een hoofdmigratieroute is voor vissen in het Scheldestroomgebied wordt daarom voorgesteld om ter plaatse van de stuwsluiscomplexen eerder in te zetten op een optimale passeerbaarheid en een zo hoog mogelijk openingspercentage. Met andere woorden 'snel van A naar B' voor een zo groot mogelijk percentage van de tijd en voor zoveel mogelijk vissoorten. Dit maakt dat een vertical slot-vispassage de voorkeur heeft boven de andere types.

Een vertical slot-vispassage geeft daarnaast ook passagemogelijkheid over de volledige diepte van de waterkolom en is minder gevoelig aan peilschommelingen als bijvoorbeeld een bekkentrap.

Wanneer gekozen wordt voor een relatief glad bodemsubstraat (rolstenen/ kiezels), voldoende slotbreedte en een laag verval per bekken speelt ook de meer technische uitvoering van dit type een veel minder grote rol met oog op de ‘natuurlijkheid’ van de onderwaterbodem. Uit zeer uitvoerige monitoring over meerdere jaren van een vertical slot-vispassage op de Elbe te Geesthacht (Duitsland) met soortgelijk ontwerp bleek dat vertical slot-vispassages zeer goed passeerbaar zijn voor alle doelsoorten die ook op de Dender van toepassing zijn.

Tabel 40 geeft een samenvatting van de dimensionering van het voorkeursontwerp voor de nieuwe vispassages op de Dender en Figuur 90 geeft een schematisch voorbeeld van het bekken- en slotontwerp met maatgevende parameters.

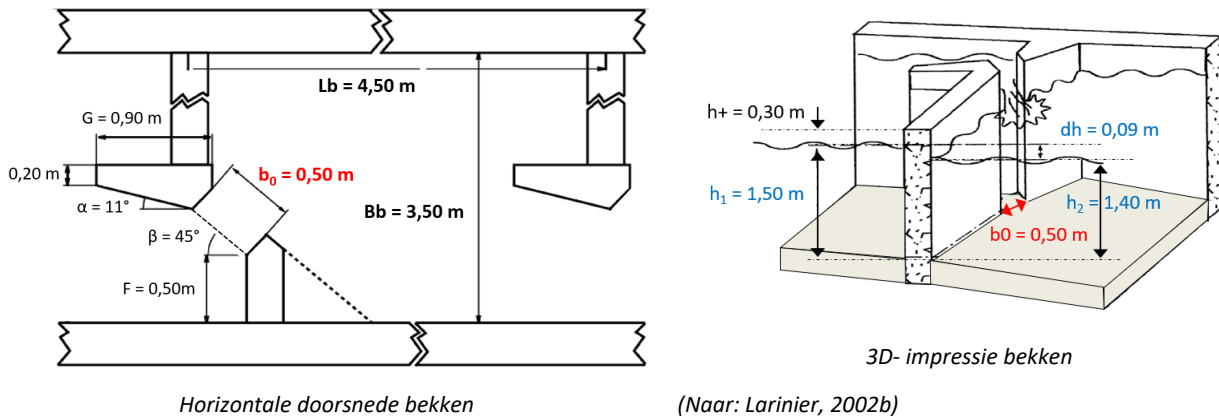
Tabel 40 – Dimensionering vertical slot-vispassage\*

parameter	omschrijving (zie ook Figuur 90)	aantal / waarde	eenheid
dh	Verval per bekken	<b>0,09</b>	[m]
$h_1$	Opwaartse waterdiepte vlak voor het slot bij streefpeilen	1,50	[m]
$h_2$	Afwaartse waterdiepte vlak na het slot bij streefpeilen	1,41	[m]
S	Verdrinkingsgraad bij streefpeilen (= $h_2 / h_1$ )	0,94	[m/m]
$b_0$	Slotbreedte	<b>0,50</b>	[m]
Lb	Bekkenlengte (h.o.h. van slotwand tot slotwand)	4,50	[m]
Bb	Bekkenbreedte (binnenzijde zijwand tot binnenzijde zijwand)	3,50	[m]
$S_0$	Gemiddelde bodemverhang (= $dh/Lb = 0,09/4,5 = 0,02$ )	≈ 2%	[-]
Sd	Laagdikte rolstenen bodemsubstraat	≈ 0,3	[m]
$D_{n50}$	Nominale diameter rolstenen bodemsubstraat	≈ 0,15	[m]
F	Lengte kleine slotwand	0,50	[m]
G	Lengte haak van grote slotwand	0,90	[m]
$\beta$	Hoek van slotopening (t.o.v. stroomrichting)	45	[°]
$Q_{vis}$	Range vispassagedebiet bij normale waterpeilfluctuatie (en $C_d = 0,75$ )	0,65 – 0,85	[m <sup>3</sup> /s]
$V_g$	Gemiddelde stroomsnelheid in slot bij streefpeilen (en $C_d = 0,75$ )	1,0	[m/s]
E	Energie per bekken bij streefpeilen (en $C_d = 0,75$ )	30	[W/m <sup>3</sup> ]

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

Merk op dat voor het verval per bekken (dh) 0,09 m wordt voorgesteld als optimum tussen een zo laag mogelijk verval en een zo kort mogelijk vispassage. Op locaties waar het vanuit ruimtelijke en/of andere criteria mogelijk is een lager verval (bijv. 0,08 m) toe te passen, is dit zeker een meerwaarde. Bij streefpeilen vertaalt dit verval per bekken zich in een zelfde hydraulisch verval (= opwaartse waterstand minus afwaartse waterstand). Bij peilfluctuatie kan het hydraulische verval per slot iets toe- of afnemen, dit effect is het grootste bij de meest afwaartse sloten.

Merk ook op dat het verval per bekken niet een effectieve drempel betreft. Met andere woorden de bodem in de vispassage is een doorlopende bodem onder verhang. Dit verhang wordt bepaald door de keuze van het verval per bekken (dh) in combinatie met de bekkenlengte (Lb). In dit geval is het bodem verhang in de vispassage 2% (=  $dh/Lb$ ). Het bodemsubstraat loopt onder dit verhang ook door de verschillende sloten.



Figuur 90 – Dimensionering bekken en slotwanden vertical slot-vispassage

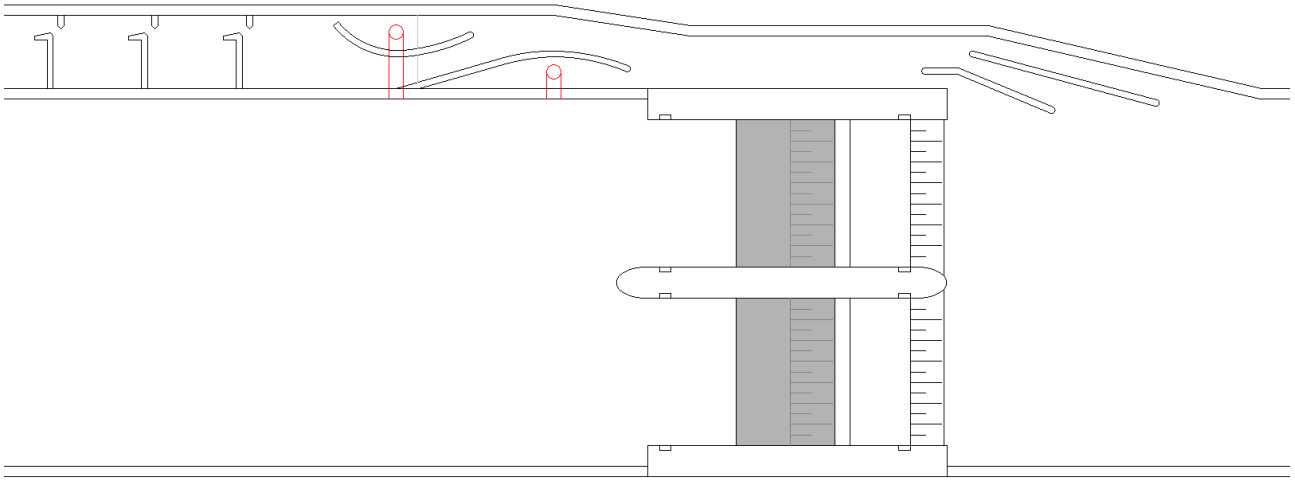
## 9.4 Monding en toegevoegd debiet

### 9.4.1 Algemeen

Uit de ontwerpcriteria blijkt dat een parallelle monding zo dicht mogelijk aan het knelpunt de voorkeur heeft met het oog op optimale attractiviteit (vindbaarheid). In het geval van een parallelle monding direct naast de stuwen en zonder verdere maatregelen (zoals bijv. geleidingswanden) blijkt echter dat bij hogere afvoeren over stuwen een grote recirculatieneer voor de monding ontstaat die de toegang naar de vispassage afschermt. Deze recirculatieneer wordt vooral veroorzaakt door een te groot verschil in momentum tussen de stuwstroom en de uitstroom van de vispassage. Het lokstroomdebiet zou onrealistisch groot gekozen moeten worden om in de bovengrenssituatie tot de gewenste verhouding te komen. Het is daarom nodig om enkele geleidingswanden te plaatsen die de vorming van deze recirculatieneer voorkomen en zo ook bij verschillende afvoeren over de stuwen voldoende toegang(en) naar de vispassage creëren.

Op basis van schaalmodelproeven werd vastgesteld dat bij het maatgevende bovengrensdebiet over de stuwen ( $Q_{10\%}$ ) een minimaal lokstroomdebiet benodigd is van  $4 \text{ m}^3/\text{s}$ . In principe is het vereiste lokstroomdebiet hiermee in strijd met het zo laag mogelijk gekozen basisdebiet voor de vispassage vanuit het oogpunt van een zo hoog mogelijk openingspercentage (zie voorgaande paragraaf). Deze ogenschijnlijke tegenstrijdigheid 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 op één of meerdere plaatsen in de vispassage. In het geval van de vispassages op de Dender wordt dit toegevoegd debiet ingebracht net opwaarts van de monding.

Figuur 91 toont het voorkeursontwerp voor de parallelle monding en de inbreng van het toegevoegd debiet op basis van de hydraulische studie. Het kanaal tussen de inbreng van het toegevoegd debiet en de monding wordt het mondingskanaal genoemd. Merk op dat ook een uitvoering mogelijk is waarbij de linker stuwgeuloever afwaarts van de stuwen niet 'terugbuigt' naar de normale stuwgeulbreedte maar rechtdoor blijft lopen, zie hiervoor ook de volgende paragraaf met de beschrijving van de dimensionering.



Figuur 91 – Voorkeursontwerp parallelle monding met toegevoegd debiet

#### 9.4.2 Dimensionering monding

Bij het voorkeursontwerp voor de parallelle monding wordt onderscheid gemaakt tussen een ruimtelijke situatie waarbij de oever aan de mondingskant terugbuigt naar de 'normale' stuwgeulbreedte en een situatie van een recht doorlopende oever zonder terugbuiging. Figuur 92 geeft de dimensionering van het voorkeursontwerp voor een terugbuigende oever en Figuur 93 toont de dimensionering in geval van een rechtdoorlopende oever.

Met oog op de afwaartse geleidingswand en de lengte van de monding wordt daarbij onderscheid gemaakt tussen twee (locatie)groepen:

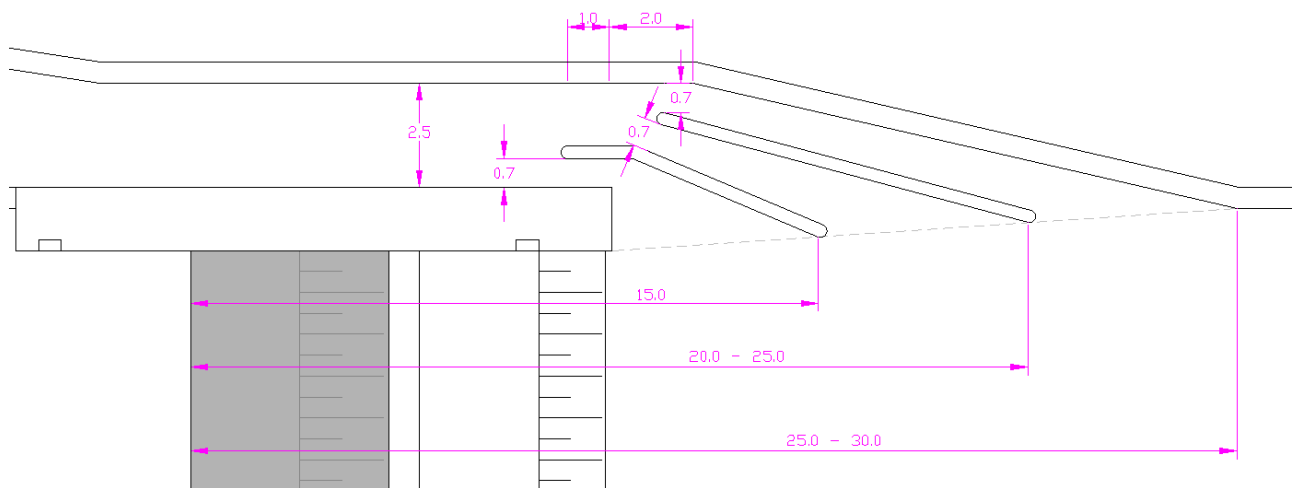
1. Geraardsbergen (GB), Idegem (ID), Pollare (PO) en Denderleeuw (DL);
2. Aalst (AA) en Denderbelle (DB).

Dit onderscheid wordt gemaakt vanwege een iets langere watersprongzone door de combinatie van een hoger overstort debiet over de stuwen met een relatief grotere afwaartse waterdiepte in geval van groep 2 (Aalst en Denderbelle). De laagste waarden in de figuren zijn daarom van toepassing op de eerste groep, de hoogste waarden op de tweede groep. Aangezien een recht doorlopende oever enkel een optie is voor locaties uit groep 1, zijn hiervoor geen twee waarden gegeven voor de lengte van de afwaartse geleidingswand.

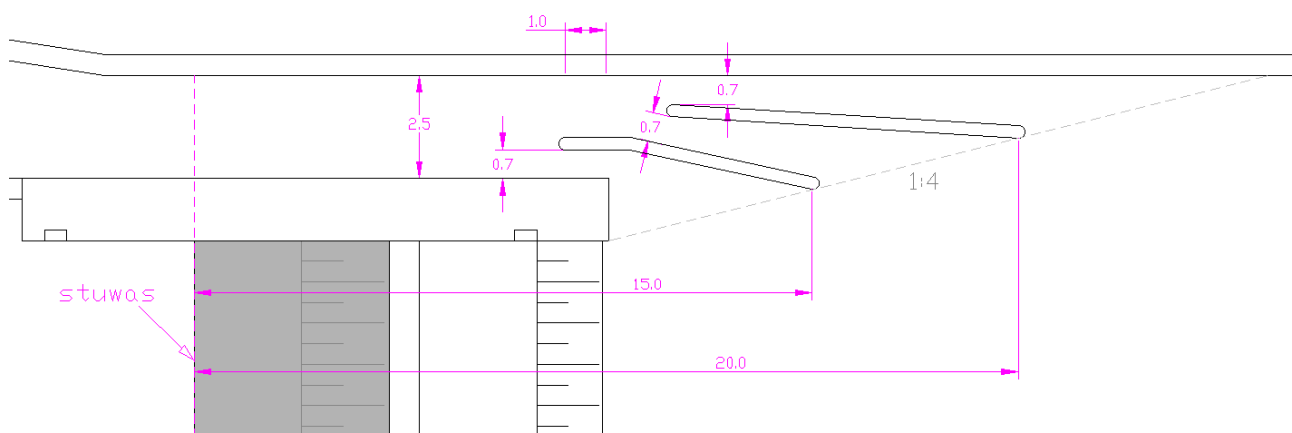
Voor beide groepen en configuraties gelden tenslotte de volgende maatgevende hoogtewaarden:

- De bodemhoogte in de monding en het mondingskanaal is horizontaal en gelijk aan het afwaartse bodempeil.
- De toppen van de geleidingswanden dienen tot 1,0 m boven het afwaartse streefpeil te reiken.

Om dit ontwerp ook op andere locaties (dan de Dender) bruikbaar te maken werd in het rapport ook een relatief ontwerp voorgesteld waarbij de verschillende parameters van dit ontwerp 'vertaald' kunnen worden op basis van twee basisparameters (waterspronglengtes en lokstroomdebieten) die bepaald kunnen worden aan de hand van de betreffende hydraulische randvoorwaarden (zie 5.6).



Figuur 92 – Dimensionering voorkeursontwerp monding in geval van een terugbuigende oever

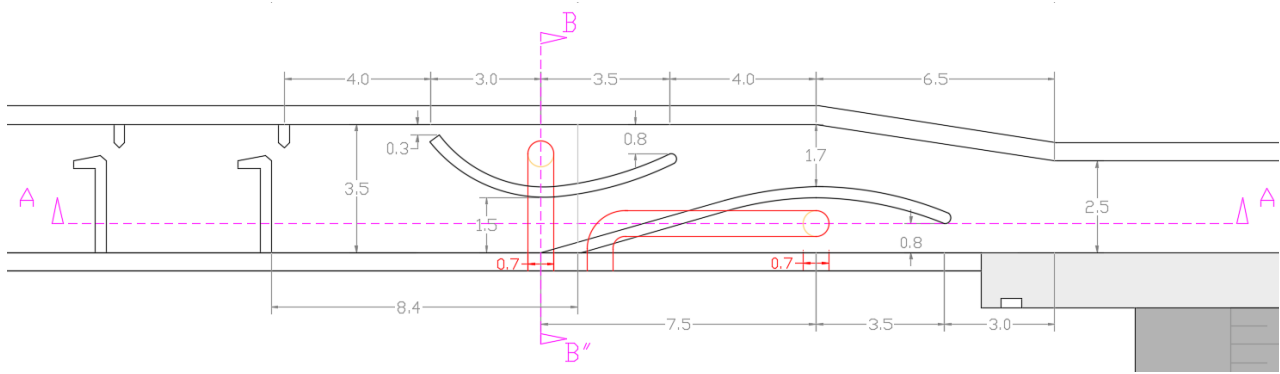


Figuur 93 – Dimensionering voorkeursontwerp monding in geval van een recht doorlopende oever

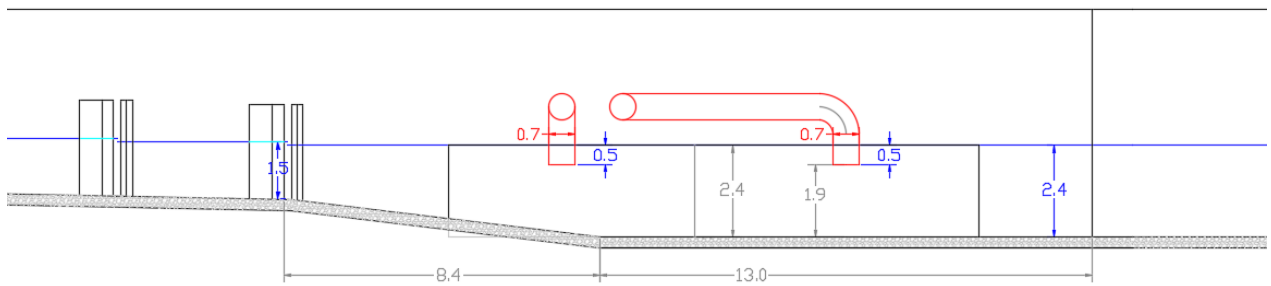
### 9.4.3 Dimensionering toegevoegd debiet

Figuur 94 toont het ontwerp voor de inbreng van het toegevoegd debiet. De buizen hebben een binnendiameter van 0,70 m en krijgen elk een automatisch gestuurde regelschuiw om de grootte van het debiet te kunnen regelen. Bij deze buisdiameter kan op elk van de locaties het minimaal vereiste debiet van 1,5 m<sup>3</sup>/s per buis in het bovengrensscenario gerealiseerd worden. Uit de numerieke simulaties bleek dat dit ontwerp zorgt voor een optimale migratiecorridor in het lokstroomkanaal waarbij stroomsnelheden en mate van turbulente kunnen voldoen aan de ontwerpcriteria. Figuur 95 geeft een schematische weergave van de vastgestelde migratiecorridor en stroompatronen op basis van de numerieke simulaties.

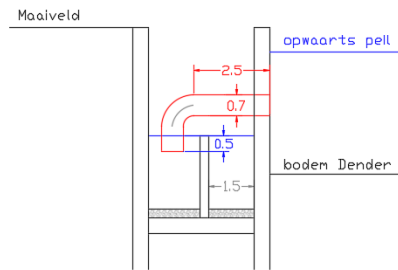




grondplan

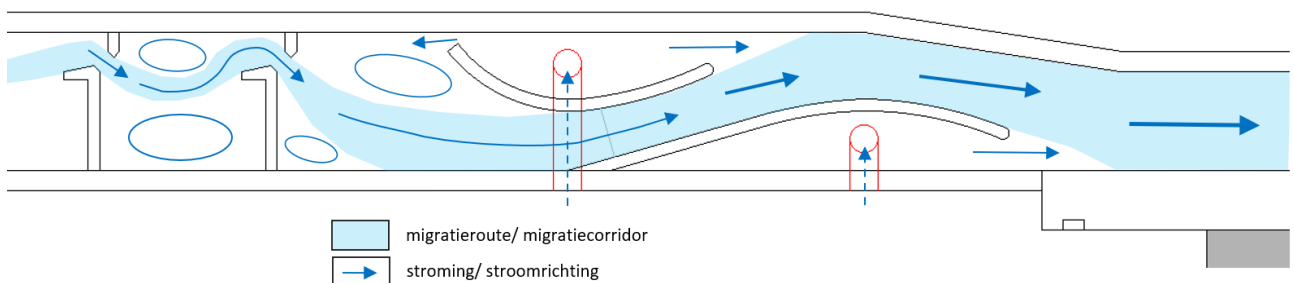


lengteprofiel A-A''



dwarsprofiel B-B''

Figuur 94 – Dimensionering voorkeursvariant inbreng toegevoegd debiet



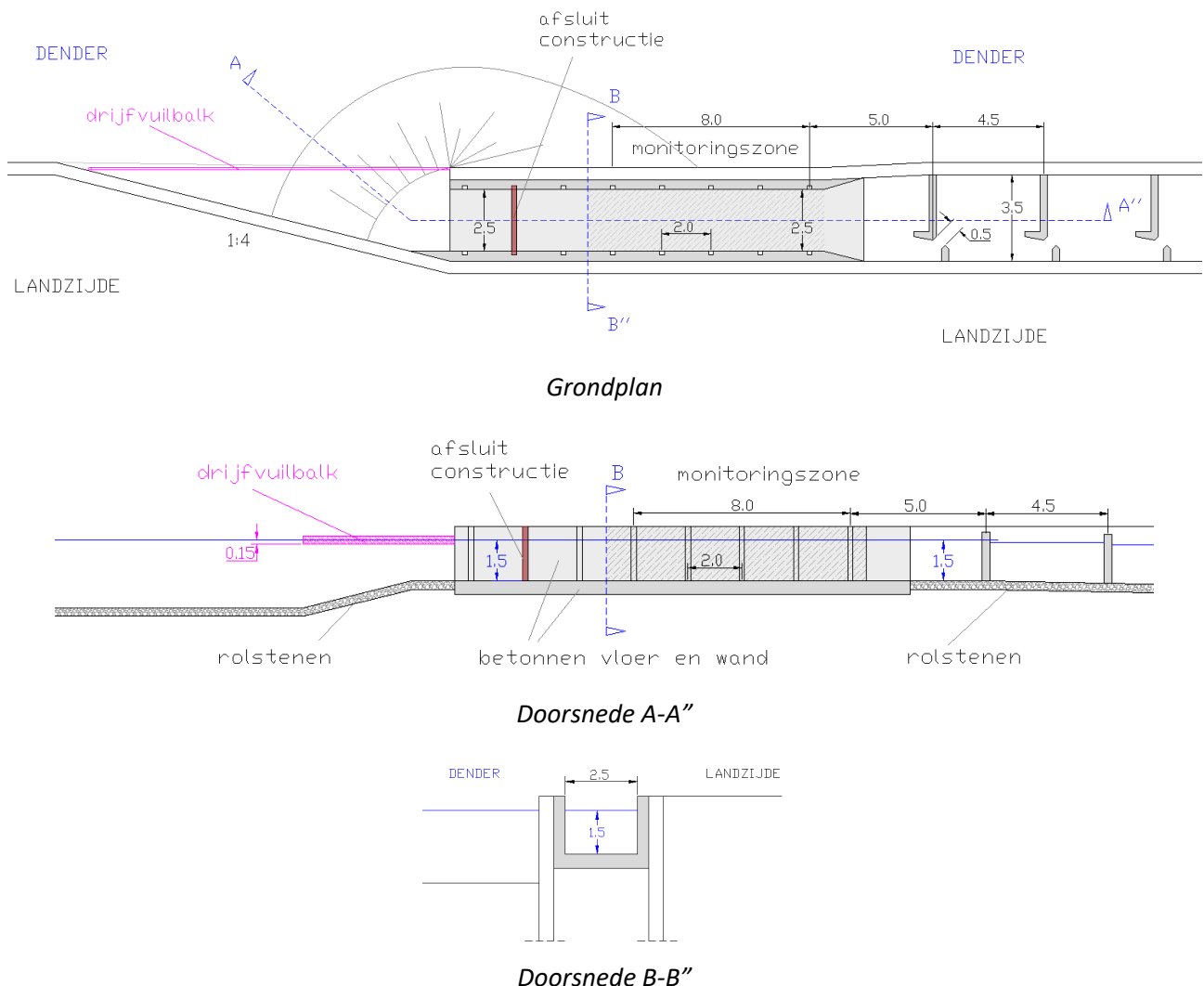
Figuur 95 – Schematische weergave migratiecorridor bij voorkeursontwerp voor inbreng toegevoegd debiet

Afhankelijk van het (optredende) verval zullen in een later stadium per locatie schuifstanden berekend worden voor de verschillende gewenste groottes van het toegevoegd debiet per regelstand. De grootte van het toegevoegd debiet wordt geregeld door een automatische sturing op basis van het debiet over de stuwen (zie verder in paragraaf 9.6.3). Hierbij wordt ernaar gestreefd om het toegevoegd debiet zo snel mogelijk te laten opbouwen met het debiet over de stuwen zodat er een zo hoog mogelijke verhouding tussen lokstroomdebiet en het stuwdebiet wordt gerealiseerd.

## 9.5 Instroom

Figuur 96 toont het grondplan en twee maatgevende doorsnedes voor het voorkeursontwerp van de instroom voor de nieuwe vispassages op de Dender. De instroom bevat de volgende onderdelen:

- Opwaartse drijfvuilbalk/scherm;
- Afsluitconstructie (hefschuif);
- Monitoringszone.



Figuur 96 – Algemeen ontwerp instroom vispassages

Met oog op de ruimtelijke inpassing wordt opgemerkt dat er van uit wordt gegaan dat de vispassage niet als hoofdweg voor afwaartse migratie moet kunnen dienen. Dit betekent dat de instroom van de vispassage dus ook verder opwaarts van de stuwen ingepast kan worden en de vispassage dus zo min mogelijk bochten hoeft te krijgen (rechtlijnige inpassing). Wanneer de vispassage wel dient als hoofdweg voor afwaartse migratie wordt de instroom logischer wijze best zo dicht mogelijk aan de stuwen gekozen.

De diepte van de instroom werd gelijk gekozen aan de slotdiepte bij streefpeilen (waterdiepte 1,5 m). Met oog op de uitwisselbaarheid van beheer- en monitoringsonderdelen (zoals schotbalken, schuiven en frames) wordt een uniforme breedte van de instroom voorgesteld van 2,5 m.

In de instroom worden sponningen voorzien voor de plaatsing van schotbalken, een afsluitconstructie en de plaatsing van monitoringsapparatuur. Vanuit oogpunt uniforme toepassing is nu een hart-op-hart afstand van 2,0 m tussen elk van de sponningsets voorgesteld. De minimale lengte voor de monitoringszone wordt bepaald door de toe te passen fuiklengte. Hiervoor geldt een lengte van 8,0 m. Binnen deze lengte worden 5 sets sponningen toegepast, steeds om de 2,0 m.

Om te voorkomen dat drijfvuil accumuleert in de vispassage en bijvoorbeeld de sloten van de vispassage zou kunnen blokkeren, dient aan opwaartse zijde een drijfvuilconstructie (balk of scherm) te worden voorzien. Voor een optimale werking wordt een drijvend scherm geadviseerd dat tot 0,15 m onder het optredende waterpeil dient te kunnen afleiden. Het is daarbij van belang dat dit drijvende scherm helemaal aan de opwaartse zijde van de instroom en zo parallel mogelijk aan de stuwgeul wordt ingepast. Op deze wijze blijft het drijfvuil namelijk niet hangen in de instroom maar wordt het verder geleid langs de stuwen en de rivier.

In de instroom dient tenslotte ook een automatisch geregelde afsluitconstructie te worden voorzien. Deze is in eerste instantie vereist voor het waterpeilbeheer met oog op o.a. de scheepvaart, maar dient ook om de vispassage te kunnen afsluiten voor onderhoud of andere beheerwerken. Met het oog op het type afsluitconstructie wordt een hefschuif voorgesteld, aangezien dit het meest optimale en meest toegepaste type is in dergelijke condities. Indien nodig kan in het bouwkundig ontwerp voor bepaalde locaties een ander type worden toegepast, mits de hydraulische randvoorwaarden gehandhaafd blijven.

Vanuit praktisch oogpunt is de breedte van de natte sectie ter plaatse van de afsluitconstructie in het voorbeeldontwerp uit Figuur 96 gelijk gekozen aan de breedte van de instroom zelf, namelijk breedte = 2,5 m. Op deze wijze heeft een openstaande afsluitconstructie hydraulisch gezien geen invloed. Mocht het vanuit andere randvoorwaarden (bouwkundig, financieel) toch nodig zijn om een smallere breedte toe te passen dan wordt (uitgaande van een waterdiepte bij streefpeil van 1,5 m) een minimale natte breedte van 1,5 m vereist.

## 9.6 Automatische sturing

### 9.6.1 Algemeen

De vispassages op de Dender worden uitgerust met twee typen beweegbare onderdelen waarvoor een automatische regeling benodigd is:

1. Een opwaartse afsluitconstructie (hefschuif) om de vispassage te kunnen sluiten met het oog op peilbeheer en/of onderhoud,
2. En twee regelschuiven om de grootte van het toegevoegd debiet door elk van de buizen afwaarts in de vispassage te kunnen regelen.

In hoofdstuk 8 van dit rapport is een voorstel uitgewerkt voor de sturingsvoorwaarden met instelbare parameters voor elk van de twee typen. In de volgende twee paragrafen volgt een korte omschrijving van de voorgestelde algemene werkingsprincipes.

### 9.6.2 Afsluitconstructie van de vispassage

De opwaartse hefschuif van de vispassage heeft twee standen: volledig open of volledig dicht. Deze schuif moet zowel manueel als automatisch bediend kunnen worden. De automatische regeling gebeurt op basis van het waterpeil opwaarts en afwaarts van de stuw en het debiet over de stuw.

In eerste instantie wordt een automatische sturing voorgesteld die uitgaat van openen op basis van het debiet over de stuw en sluiten op basis van het waterpeil opwaarts (en afwaarts) van de stuw. Door een flexibele implementatie kan de mogelijkheid tot het overschakelen op een ander type sturing (bijv. openen op basis van waterpeil opwaarts van de stuw) grotendeels behouden blijven.

### 9.6.3 Regelschuiven van het toegevoegd debiet

De beide regelconstructies voor het toegevoegd debiet worden uitgerust met een hefschuif waarvan de stand continu kan 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 stuwen en heeft tot doel een optimale verhouding tussen het debiet over de stuwen en de lokstroom (debiet vispassage plus toegevoegd debiet) te behouden.

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 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.

## 9.7 Aanbevelingen

Tijdens deze studie werden enkele belangrijke kennishiaten vastgesteld met betrekking tot (sterk) verdrongen watersprongen bij (beluchte) overlaten:

- Er bleken geen bruikbare literatuurformules te bestaan voor het bepalen van de lengte van de roller en de watersprong bij sterk verdrongen situaties in geval van stuwoverstort (zie 5.3.4). Dit is echter van groot belang voor het kunnen bepalen van de ligging van de migratielimietlijn/migratielimietzone.
- Ook het simuleren van sterk verdrongen watersprongen bij 'vertical drop structures' (stuwen) in CFD bleek niet met zekerheid te kunnen worden uitgevoerd. Vanaf een bepaalde verdrinkingsgraad ontstaat er een onverwacht stroompatroon afwaarts van de stuwen (zie 0). Dergelijke stroompatronen konden niet terug gevonden worden in de literatuur.

Er wordt daarom aanbevolen om een vervolgonderzoek te doen waarbij de concrete stroompatronen gevisualiseerd en bemeten kunnen worden. Dit zou kunnen door middel van schaalmodelonderzoek en/of terreinmetingen. Deze resultaten zouden dan vervolgens gebruikt kunnen worden voor het valideren of kalibreren van zowel de CFD-modellen als de literatuurformules.

Dergelijk onderzoek zal waarschijnlijk niet meer op tijd gerealiseerd kunnen worden voor de vispassages van de Dender. In het voorkeursontwerp werd daarom rekening gehouden met deze onzekerheden door een conservatief ontwerp voor de monding voor te stellen op basis van de resultaten uit de eerdere schaalmodelproeven. Voor vervolgstudies is het echter van groot belang dat deze kennishiaten worden opgevuld, niet alleen voor het ontwerp van vispassagemondingen, maar ook met oog op het verstaan van de hydraulische stroompatronen bij stuwen en afwaartse erosiebescherming in het algemeen.

## Referenties

- Ackers, P.; White, W.R.; Perkins, J.A.; Harrison, A.J.M. (1978). Weirs and flumes for flow measurement, John Wiley & Sons: Chichester, ISBN 0-471-99637-8, xix, 327 pp.
- Adam, B., Bader, S. (2015). Der Doppelschlitzpass am Elbewehr Geesthacht – Bilanz des Fischaufstiegs über Europas grösste Fischaufstiegsanlage nach fünf Jahren. Institut für angewandte Ökologie. Im auftrag der Vattenfall Europe Generation AG.
- Alemi, M.; Visser, K.P.; Verelst, K.; Van Hoydonck, W.; Lopez Castano, S. (2024). Design inlet added discharge fish passages: Variant study in CFD. Version 1.0 (concept). FH Reports, 23\_051\_1. Flanders Hydraulics, Antwerp.
- AMINAL (2005). Vismigratie – Een handboek voor herstel in Vlaanderen en Nederland. Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap: Brussel. ISBN 9080324566. 205 pp.
- Armstrong, G.; Apahamian, M.; Fewings, G.; Gough, P.; Reader, N.; Varallo, P. (2010). Environment Agency Fish Pass Manual. GeoJournal: 369
- ASCE (1995). Guidelines for design of intakes for hydroelectric plants. Committee on Hydropower Intakes of the Energy Division of the American society of Civil Engineers.
- Badano, N.; Breugem, A.; Decrop, B. (2019). CFD-modellering vispassage Denderleeuw. techreport. IMDC
- Baker, G.Q. (2015) Static Gate Stability Analysis River Dender (12-991) – 4.3 m Gate Common Design. 25 February, 2015 rev 4. Obermeyer Hydro, Inc.
- Baeyens, R., Buysse, D., Demaerteire, N., Pieters, S., Robberechts, K., Gelaude, E., Pauwels, I., Vandamme, L., Vermeersch, S., Van Wichelen, J., Coeck, J.(2017). Evaluatie van de vismigratie door de visdoorgangen van de Kleine Nete in Grobbendonk en Kasterlee. Rapporten van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek 2017 (40). Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, Brussel.
- Bélanger, J.B. (1828). Essai sur la Solution Numérique de quelques Problèmes Relatifs au Mouvement Permanent des Eaux Courantes.
- Berlamont, J. (2004). Aanvullingen van Hydraulica – Theorie van de verhanglijnen: De permanente, turbulente stroming in open kanalen met vaste bodem. Cursustekst KU Leuven. L. Wouters, 6de uitgave.
- Bos M.G. (1989). Discharge measurement structures – Third revised edition. Publication 20, International Institute for Land Reclamation and Improvement/ILRI, Wageningen, Nederland. ISBN 90-70754-15-0
- Boiten W. (1989). De V-vormige vistrap: optimalisatie van het hydraulisch ontwerp. Waterloopkundig Laboratorium WL, Delft.
- Buysse D., Martens S., Baeyens R., Coeck J. (2004). Onderzoek naar de migratie van vissen tussen Boven-Zeeschelde en Bovenschelde. Rapport Instituut voor Natuurbehoud, 2004.02. Instituut voor Natuurbehoud, Brussel.
- Buysse D., Baeyens R., Martens S. & Coeck J.(2009). Evaluatie van de V-vormige bekkenvistrap aan de Voorste Luysmolen in de Abeek in Bocholt . Rapporten van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek 2009 (INBO.R.2009.33). Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, Brussel.
- Buysse D., Mouton A., Gelaude E., Baeyens R., Martens S., Jacobs Y., Stevens M., Van den Neucker T., Coeck J. (2011). Onderzoek naar de visfauna in de Marke (Denderbekken) vóór het uitvoeren van herinrichtingsmaatregelen - Vastlegging nultoestand - afweging herstelscenario's. Rapporten van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek 2011 (INBO.R.2011.58). Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, Brussel.

- Buysse, D., Coeck, J., (2014). Advies over het concept van temporele vismigratie om vismigratieknelpunten te saneren. Adviezen van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, INBO.A.3016.
- Buysse, D., Van Wichelen, J., Van Braeckel, A., Vermeersch, S., Breine, J., Van Ryckegem, G., Van den Bergh, E., & Coeck, J. (2021). Advies over de ecologische kwetsbaarheid van bevaarbare waterlopen bij droogte. (Adviezen van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek; Nr. INBO.A.4183). Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek.
- Carlier, M. (1972). *Hydraulique Générale et appliquée*. Collection de la Direction des Études et Recherches d'Électricité de France, 14. Editions Eyrolles, Parijs, Frankrijk. ISSN 0399-4198.
- Chanson, H. (2002). *The hydraulics of stepped chutes and spillways*. Swets & Zeitlinger: Lisse. ISBN 90-5809-352-2
- Chow, V.T. (1959). *Open-Channel Hydraulics*. The Blackburn Press, Caldwell, New Jersey, VSA. Herdruk van de editie uit 1959, McGraw Hill Book Company, Inc. ISBN-10: 1-932846-18-2, ISBN-13: 978-1-932846-18-8.
- Coenen, J.; Antheunisse, M.; Beekman, J.; Beers, M. (2013). *Handreiking vispassages in Noord-Brabant*. Waterschap Aa en Maas: [S.l.]
- Dumont, U., (2006). *Hydraulische und geometrische Dimensionierung von Fischaufstiegsanlagen*. In: *Durchgängigkeit von Gewässern für die aquatische Fauna*. Internationales DWA-Symposium zur Wasserwirtschaft. 03-04 April 2006. p. 24:30
- DWA. (2014). *M509 Fischaufstiegsanlagen und fischpassierbare Bauwerke - Gestaltung, Bemessung, Qualitätssicherung*. ISBN 9783942964913. 336 pp.
- Egea, M.L. (2015) *Experimental and Numerical Modelling of Submerged Hydraulic Jumps at Low-Head Dams*. Master Thesis, Department of Civil Engineering, University of Ottawa.
- Foulds, W.L.; Lucas, M.C. (2013). Extreme inefficiency of two conventional, technical fishways used by European river lamprey (*Lampetra fluviatilis*). *Ecological Engineering*, 58: 423-433.
- Hager, W.H.; Bremen, R.; Kawagoshi, N. (1990). Classical hydraulic jump: length of roller. *J. Hydraul. Res.* 28(5): 591-608.
- Hop, J. (2012). *Onderzoek naar het visbestand in enkele grote prioritaire viswateren in het Vlaamse Gewest: Dender*. Rapport ATKB 20110500/002, Pp. 20.
- Idelchik I.E. (2007) *Handbook of Hydraulic Resistance*. ISBN 13: 9788179921180.
- Kemp, P.; Russon, I.; Vowles, A.; Lucas, M., (2011). The influence of discharge and temperature on the ability of upstream migrant adult river lamprey (*Lampetra fluviatilis*) to pass experimental overshot and undershot weirs. Published online 3 March 2010 in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com) DOI: 10.1002/rra.1364.
- Larinier, M., (2002a). *Location of Fishways – Bull. Fr. Pêche Piscic.* 364 suppl., 39-53. FAO. Boves, France.
- Larinier, M., (2002b). *Pool Fishways, Pre-barrages and Natural Bypass Channels – Bull. Fr. Pêche Piscic.* 364 suppl., 54-82. FAO. Boves, France.
- Lencastre, A. (1996). *Hydraulique générale*. Editions Eyrolles, Paris. ISBN : 2-212-01894-0.
- Lopez Castaño, S.; van Hoydonck, W.; Visser, K.P.; Verelst, K. (2023 in prep.). *CFD modelling of added discharge for the fish passage of Denderleeuw: Study of alternatives for inlet*. Version 1.0. FHR Reports, 18\_135\_1. Flanders Hydraulics Research: Antwerp
- Lucas, M. C., Baras, E., (2001). *Migration of freshwater fishes*. Blackwell Science Ltd., Oxford. 440 pp.
- Meersschaut, Y., Verbiest, H., De Charleroy, D., (1998). *Ontwerp van vistrappen en nevengeulen als vispassages voor de stuwen te Asper, Oudenaarde en Kerkhove*. Deel 1 – tekst en tabellen. Deel 2 – figuren. Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, afdeling Waterbouwkundig Laboratorium en Hydrologisch Onderzoek en Instituut voor Bosbouw en Wildbeheer, Antwerpen, België.

- Musall, M., Oberle, P., Henning, M., Weichert, R., Nestmann, F. (2014) Analysen zu Strömungsmustern in technischen Fischaufstiegsanlagen. 37. Dresdner Wasserbaukolloquium 2014 "Simulationsverfahren und Modelle für Wasserbau und Wasserwirtschaft", p. 353-362.
- Nortier, I.W.; de Koning, P. (1996). Toegepast vloeistofmechanica – hydraulica voor waterbouwkundigen. Noordhoff Uitgevers B.V. Zevende druk. ISBN 9789040103186.
- Oberle, P.; Musall, M.; Riesterer, J.; Nestmann, F. (2012) Numerische Modelluntersuchungen im Rahmen der Planung der Fischaufstiegsanlage Geesthacht. WASSERWIRTSCHAFT april, 2012.
- Pauwels I.S., Buysse D., Mouton A.M., De Maerteleire N., Pieters S., Robberechts K., Gelaude E. & Coeck J. (2014). Evaluatie van vismigratie in de Demer in Diest. Evaluatie van de Grote Steunbeer als potentieel knelpunt en de Zwarte Beek als alternatieve route voor vismigratie. Rapporten van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek 2014 (INBO.R.2016.7009776). Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, Brussel.
- Prchalová, M.; Horky, P.; Slavik, O.; Vetesnik, L.; Halacka, K. (2011). Fish occurrence in the fishpass on the lowland section of the River Elbe, Czech Republic, with respect to water temperature, water flow and fish size. Folia Zoologica 60(2): 104-114.
- Rajaratnam, N.; Katopodis, C.; Solanki, S. (1991). New designs for vertical slot fishways. CAN. J. CIV. ENG. 19: 402–414
- Rand, W. (1955). Flow geometry at straight drop spillways. Proc. Am. Soc. Civ. Eng. 81: 1–13
- Redeker, M.; de Bruijne, W. (2018) Vispassage Doesburg – Rapportage definitief ontwerp en uitvoeringsontwerp. CDM Smith Consult GmbH, in opdracht van Waterschap Rijn en IJssel.
- Riemersma, P. (1994). Biologische aspecten bij het ontwerp van vispassages. vismigratie, visgeleiding en vispassages Ned. – Lezingen en posterpresentaties van Stud. Vismigratie, Jaarbeurs Utr. 15 december 1993. Redactie J.P. Raat.
- Schwevers, U. (2006). Allgemeine Anforderungen an Fischaufstiegsanlagen. In: Durchgängigkeit von Gewässern für die aquatische Fauna. Int. DWA-Symposium zur Wasserwirtschaft 03-04 April: 24–30
- Stevens, M.; Van den Neucker, T.; Mouton, A.; Buysse, D.; Martens, S.; Baeyens, R.; Jacobs, Y.; Gelaude, E.; Coeck, J. (2009). Onderzoek naar de trekvissoorten in het stroomgebied van de Schelde. Rapporten van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek 2009 (INBO.R.2009.9). Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, Brussel.
- Vanderkimpen, P.; Visser, K. P.; Viaene, P. (2019). Voorstel sturing vispassage Kerkhove. Versie 3.0. WL Memo's, 16\_045\_3. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.
- Vanderkimpen, P.; Visser, K. P.; Viaene, P. (2020). Voorstel sturing vispassage Sint-Baafs-Vijve. Versie 3.0. WL Memo's, 15\_036\_4. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.
- Vanderkimpen, P.; Pereira, F.; Visser, K.P.; Viaene, P. (2023). Slim stuwen – fase 3: Sturing stuwen en vispassages Dender. Versie 4.0. WL Rapporten, 19\_013\_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- Van Poucke, L., Verdonck, P., Verhoeven, R., & GODERIS, W. (n.d.). XXX. Hydraulic design of V-shaped fish-ladders. Pianc, Bulletin 1994, nr. 85, - November 1994, pp. 53-60.
- Vermeersch, S., De Knijf, G. & Decler, K., 2004. Exploring ecological vision for the Dender. Report of the Institute of Nature Conservation 2004.07. Brussels.
- Verreycken H, Van Thuyne G, Belpaire C, Breine J, Buysse D, Coeck J, Mouton A, Stevens M, Van den Neucker T, De Bruyn L & Maes D (2012). De IUCN Rode Lijst van de zoetwatervissen in Vlaanderen. Rapporten van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek 2012 (23). Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, Brussel.
- Villemonthe, J.R. (1947). Submerged weir discharge studies. *Engineering News Record*, 866-869.
- Vischer, D.L.; Hager, W.H. (Eds.). (1995). Energy dissipators. Hydraulic Structures Design Manual: Hydraulic Design Considerations, 9. A.A. Balkema: Rotterdam. ISBN 90-54109-198-9.

Visser, K.P.; Viaene, P.; Mouton, A.; Coeck, J.; Peeters, P.; Mostaert, F. (2013). Advies schuifbeheer nevengeul Oudenaarde: Analyse hydrologische gegevens en schuifregeling. WL Rapporten, 13\_018\_1. Waterbouwkundig Laboratorium & Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, Antwerpen, België.

Visser, Klaas Pieter; Goormans, Toon; Vereecken, Hans (2022). Debietmeting en Q-h-relatie V-vormige bekkentrap te Kerkhove. WL-Memo's, WL2022M21\_041\_1, Versie 2.0. Waterbouwkundig Laboratorium, Antwerpen.

VMM (2021). Uitwerking van een reactief afwegingskader voor prioritair watergebruik tijdens waterschaarste. Tussentijds syntheserapport. VMM/S004X/201119/2.0.

Vrielynck S.; Belpaire C.; Stabel A.; Breine J. & Quataert P. (2003). De visbestanden in Vlaanderen anno 1840-1950. Een historische schets van de referentietoestand van onze waterlopen aan de hand van de visstand, ingevoerd in een databank en vergeleken met de actuele toestand. Instituut voor Bosbouw en Wildbeheer, IBW.Wb.V.R.2002.89, pp. 271.

Wu S.; Rajaratnam N. (1995). Free jumps, submerged jumps and wall jets. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 33, No. 2, pp. 197-212.



# Bijlage A – Ladingsverliezen in de instroom

## A.1 – Verhanglijn

Om het energieverlies ('ladingsverlies') te berekenen in de instroom wordt gebruik gemaakt van de vergelijking van Bresse (Berlamont, 2004). Deze vergelijking beschrijft het verloop van de verhanglijn in een prismatisch kanaal met constant debiet, dus het hydraulisch verhang. De vergelijking van Bresse wordt numeriek geïntegreerd, waarbij voor een gekozen  $\Delta h$  [m] de overeenstemmende langsafstand  $\Delta s$  [m] berekend wordt, volgens onderstaande formules:

$$s_{i+1} = s_i + \Delta s; \quad \Delta s = \frac{2 \cdot \Delta h}{\varphi_i + \varphi_{i+1}}$$

$$\varphi = \frac{S_0 - n^2 \cdot \frac{P^{4/3}}{A^{10/3}} \cdot Q^2}{\sqrt{1 - S_0^2 \cdot \frac{Q^2 \cdot B}{g \cdot A^3}}}$$

s	= coördinaat volgens de langsas. s = 0 m is stroomopwaarts	[m]
i, i+1	= indices voor posities i en i+1	[-]
A	= natte sectie	[m <sup>2</sup> ]
P	= natte omtrek	[m]
B	= bovenbreedte	[m]
Q	= debiet	[m <sup>3</sup> /s]
S <sub>0</sub>	= langshelling, negatief bij tegenhelling	[m/m]
n	= ruwheidscoëfficiënt van Manning	[sm <sup>-1/3</sup> ]

Met deze formules worden voor een gekozen stapgrootte ( $\Delta h$ ) de waarden berekend om zo in een volgende stap  $i$  de waterhoogte te berekenen. Dit wordt geïllustreerd in Tabel 41.

Tabel 41 – Visualisering berekening Vergelijking van Bresse

i [-]	s <sub>i</sub> [m]	h <sub>i</sub> [m]	A <sub>i</sub> [m <sup>2</sup> ]	P <sub>i</sub> [m]	B <sub>i</sub> [m]	φ <sub>i</sub> [-]	Δs <sub>i</sub> [m]
0	s <sub>0</sub>	h <sub>0</sub>	A <sub>0</sub>	P <sub>0</sub>	B <sub>0</sub>	φ <sub>0</sub>	Δs <sub>0</sub>
1	s <sub>1</sub>	h <sub>1</sub>	A <sub>1</sub>	P <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	φ <sub>1</sub>	Δs <sub>1</sub>
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
N	s <sub>N</sub>	h <sub>N</sub>	A <sub>N</sub>	P <sub>N</sub>	B <sub>N</sub>	φ <sub>N</sub>	Δs <sub>N</sub>

## A.2 – Geleidelijke verbreding

Het energieverlies in overgangssecties kan bepaald worden door een specifieke energiecurve op te stellen gebaseerd op de bewegingsvergelijking voor de twee verschillende secties waartussen de overgang plaats vindt:

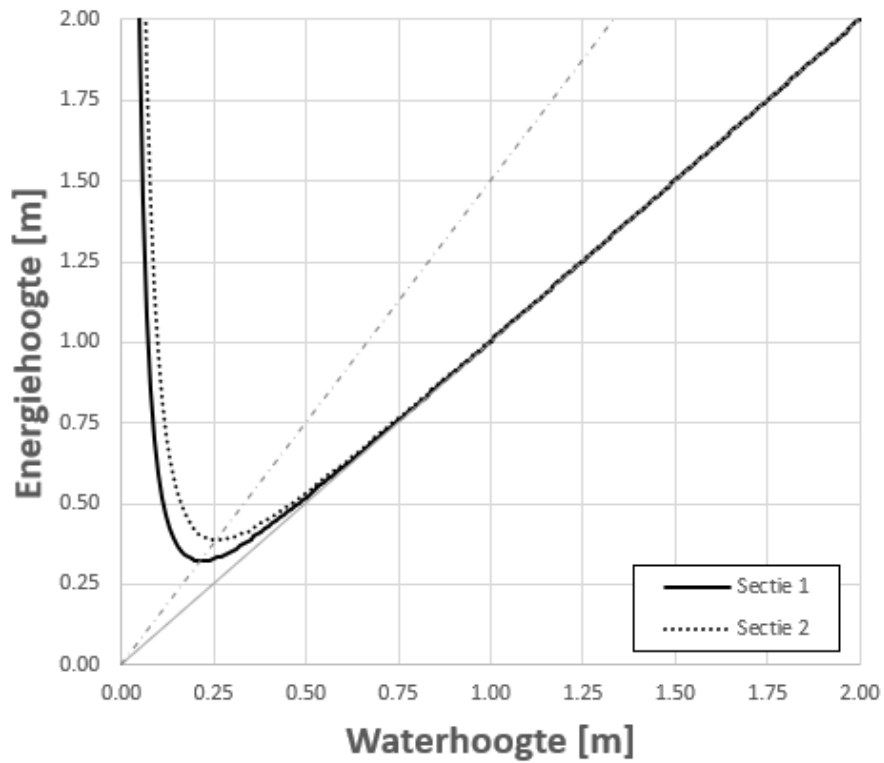
$$U = Q/A$$

$$E = h + \frac{U^2}{2g}$$

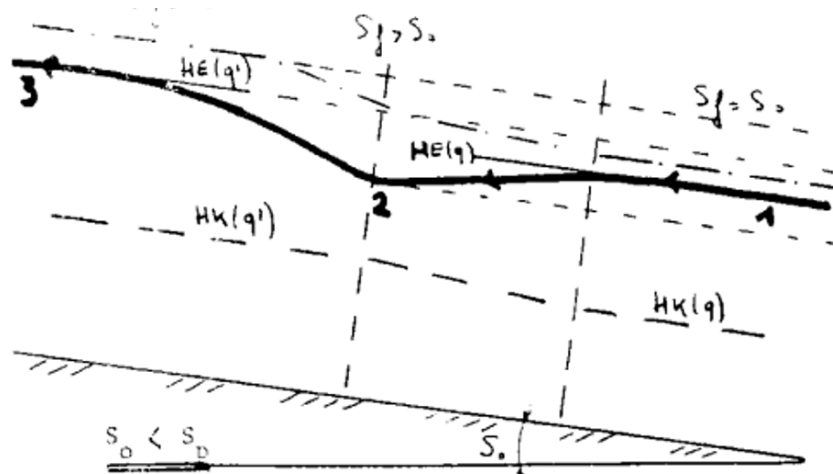
A	=	natte sectie	[m <sup>2</sup> ]
Q	=	debiet	[m <sup>3</sup> /s]
U	=	gemiddelde stroomsnelheid	[m/s]
E	=	specifieke energiehoogte	[m]

Met behulp van bovenstaande formules kan de specifieke energiecurve van beide secties opgesteld worden, waaruit de specifieke energiehoogtes afgelezen kunnen worden (Figuur 97) Afhankelijk van het stromingsregime bevindt de energetische toestand zich rechts (subkritische stroming) of links (superkritische stroming) op de curve. De overgang van de ene naar de andere sectie betekent dan de overgang van de ene naar de andere curve. Voor meer informatie kan verwezen worden naar enkele werken over stroming in open kanalen: Chow (1959), Carlier (1972), Nortier & de Koning (1996), Berlamont (2004). Het uiteindelijke effect op de verhanglijn wordt gevisualiseerd in Figuur 98.

Wanneer de curves dicht op elkaar liggen, zoals het geval in Figuur 97, zeker voor de beschouwde waterhoogtes van 1,3 – 1,5 – 1,7 m, zijn de energetische toestanden quasi gelijk aan mekaar, en treden er bijgevolg ook nauwelijks (tot geen) ladingsverliezen op. De reden hiervoor is het lage debiet in verhouding tot de dimensies van de instroom, en dus lage optredende stroomsnelheden.



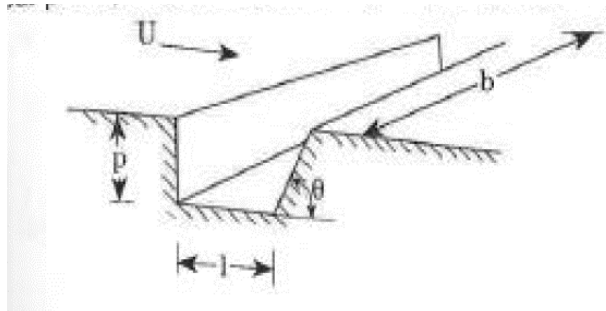
Figuur 97 – Specifieke energiehoogte i.f.v. de waterhoogte voor twee verschillende dwarssecties bij een constant debiet. Sectie 1 is 3,5 m breed, sectie 2 is 2,5 m breed.



Figuur 98 – Verhanglijn bij geleidelijke verbreding en subkritische stroming (Bron: Berlamont, 2004)

## A.3 – Sponningen

Sponningen die worden berekend in deze studie zijn gleuven in een betonnen zijwand. Het ladingsverlies dat optreedt door de sponningen wordt veroorzaakt door de lokale versmalling en verbreding die ter hoogte van de sponning plaats vindt. Deze ladingsverliezen zijn te berekenen met formules zoals beschreven door Lencastre (1996). Hoewel deze formules in principe zijn afgeleid voor horizontale gleuven, wordt aangenomen dat ze een voldoende nauwkeurige inschatting geven voor verticale sponningen. Figuur 99 toont de betekenis van de symbolen.



Figuur 99 – Betekenis symbolen voor de berekening van het ladingsverlies van een sponning (overgenomen uit Lencastre, 1996)

De gebruikte formules zijn (per sponning):

$$\eta = (S + \frac{1}{4} \cdot l \cdot b) / S \quad \text{als } \frac{l}{p} < 4, \text{ anders } \eta = (S + p \cdot b) / S$$

$$\xi_s = \left( \frac{\eta^{1,8} - 1}{1,43 \cdot \eta^{-1,8} + 1} \right)^2 \cdot \sin \theta$$

$$\Delta F = \xi_s \cdot \frac{U^2}{2g}$$

Waarin:

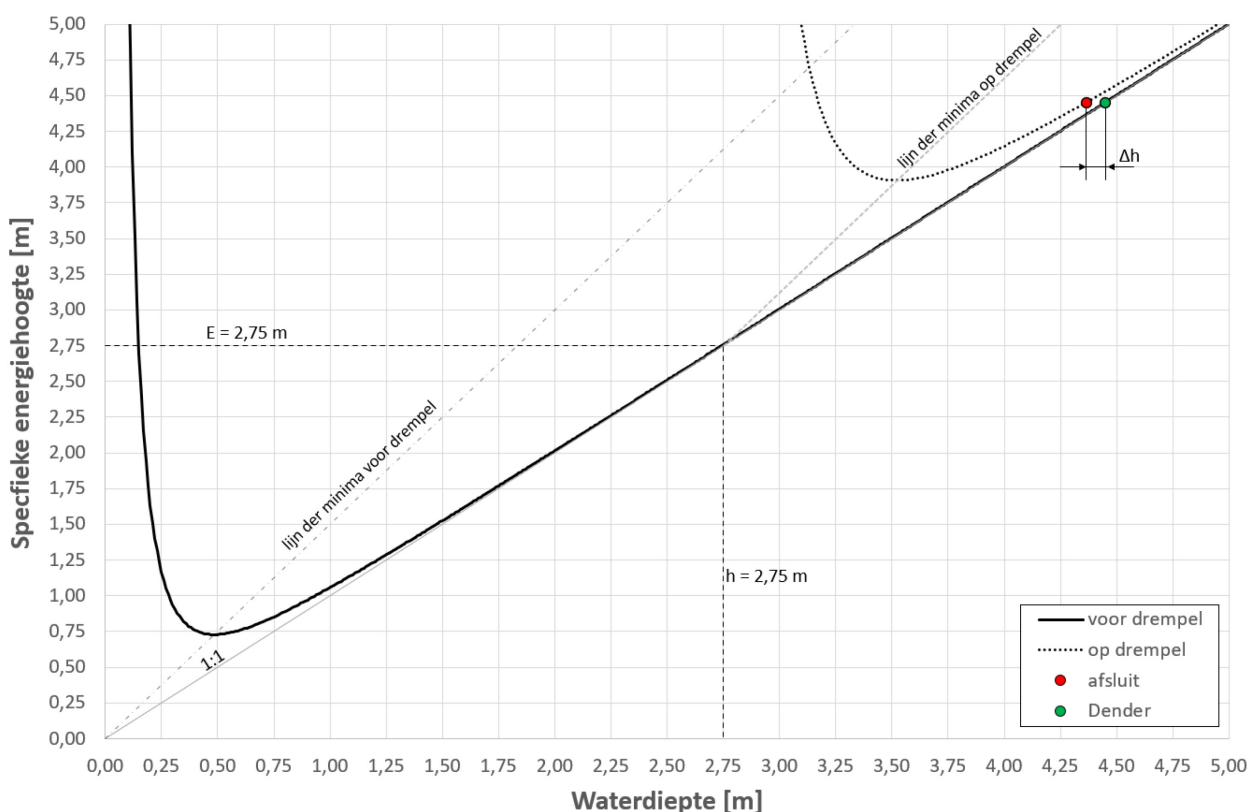
S	=	natte oppervlakte	[m <sup>2</sup> ]
p	=	sponningdiepte in de zijmuur	[m]
l	=	sponningbreedte	[m]
b	=	hoogte waarover sponning in de waterkolom aanwezig is	[m]
		Bij sponningen aan weerszijden (hier het geval) wordt voor de parameter b de totale lengte gebruikt waarover de sponning loopt.	
θ	=	hoek van de sponning	[rad]
η	=	'sponningfactor'	[-]
		maat voor het relatieve belang van de sponning t.o.v. de nominale doorstroomoppervlakte	
ξ <sub>s</sub>	=	ladingsverliescoëfficiënt	[-]
U	=	gemiddelde stroomsnelheid	[m/s]
ΔF	=	ladingsverlies t.g.v. de sponning	[m]

Bij een waterdiepte van 1,5 m, een breedte van de monitoringzone van 2,5 m, en voor een sponningdiepte van 15 cm en een sponningbreedte van 20 cm, wordt  $\xi_s = 0,00098$  (per sponning). Voor 8 sponningen wordt dit nog steeds maar 0,0079. De sponningen veroorzaken dus een verwaarloosbaar ladingsverlies bij een stroomsnelheid van 0,5 m/s (grootteorde 10E-2 mm). De waterdiepte heeft geen significant effect op dit resultaat.

## A.4 – Geleidelijke verhoging gecombineerd met versmalling

De instroom vanuit de Dender is een combinatie van een opgaande helling (verhoging) en een versmalling. Hoewel hier geen (of nauwelijks) ladingsverliezen bij optreden kan dit wel tot peilverschillen leiden. Dit wordt in volgende paragraaf geïllustreerd.

Hierbij wordt de specifieke energiehogte van een brede sectie ( $b = 5$  m, begin van de instroom) vergeleken met een smallere ( $b = 2,5$  m) sectie die 2,75 m hoger ligt (d.i. het verschil in bodempeil in Figuur 83), waarbij er van wordt uitgegaan dat de energieniveaus gelijk blijven; volgens Berlamont (2004) is het ladingsverlies bij een verticale contractie immers verwaarloosbaar. Aangezien hier een opgaande helling is voorzien, is deze aanname zeker verdedigbaar (zie ook Carlier (1972)). Figuur 100 toont de situatie voor  $Q = 5,3$  m<sup>3</sup>/s en  $h = 1,7$  m. Zo'n hoog debiet kan in principe niet voorkomen bij de vertical slot-vispassage zoals nu ontworpen – om de methode te verduidelijken wordt alleszins wel met deze waarde hier verder gewerkt. De 'lijn der minima' van 'op drempel' (hier de opgaande helling) wordt bekomen door de oorspronkelijke lijn der minima ('voor drempel') te verschuiven over een afstand gelijk aan de drempelhoogte. Omdat ook de breedte afneemt van 5 m naar 2,5 m, neemt het debiet per eenheidsbreedte  $q$  [m<sup>2</sup>/s] ook toe naar  $q'$ , wat nog een bijkomende verschuiving betekent langs de nieuwe 'lijn der minima'. Het energieniveau vóór de opgaande helling ('Dender') en ter hoogte van het begin van de afsluitconstructie ('afsluit') zijn gelijk (verondersteld), maar de locaties liggen op een andere curve. Het peilverschil  $\Delta h$  [m] is dan het verschil volgens de x-as tussen de twee curves, voor het overeenstemmende energieniveau (in dit geval 4,53 m). Voor de situatie in Figuur 100 levert dit een peilverschil van 7,6 cm op.



Figuur 100 – Berekening van het peilverschil voor en na de opgaande helling aan de hand van de specifieke energiehogte;  $Q = 5,3$  m<sup>3</sup>/s,  $h = 1,7$  m

## A.5 – Stroming onder druk

Bij stroming onder druk is het debiet  $Q$  [m<sup>3</sup>/s] afhankelijk van het waterpeilverschil  $\Delta h$  [m] en de hydraulische weerstand. Volgens de formulering in Berlamont (2004):

$$Q = \sqrt{\frac{\Delta h}{\sum_{i=1}^n K'_i \cdot \xi_i + \sum_{j=1}^m K_j \cdot L_j}}$$

Waarin:

$K'_i$	=	$\frac{1}{2 \cdot g \cdot A^2}$	geometrische factor van element $i$ ter omrekening van het debiet naar gemiddelde snelheid	[s <sup>2</sup> /m <sup>5</sup> ]
$\xi_i$	=		ladingsverliescoëfficiënt van element $i$	[-]
$K_j$	=	$\frac{n^2}{A^2 \cdot R^{4/3}}$	een factor die de hydraulische weerstand van element $j$ uitdrukt	[s <sup>2</sup> /m <sup>6</sup> ]
$n$	=		ruwheidscoëfficiënt van Manning	[sm <sup>-1/3</sup> ]
$L_j$	=		de lengte van element $j$ in het systeem	[m]

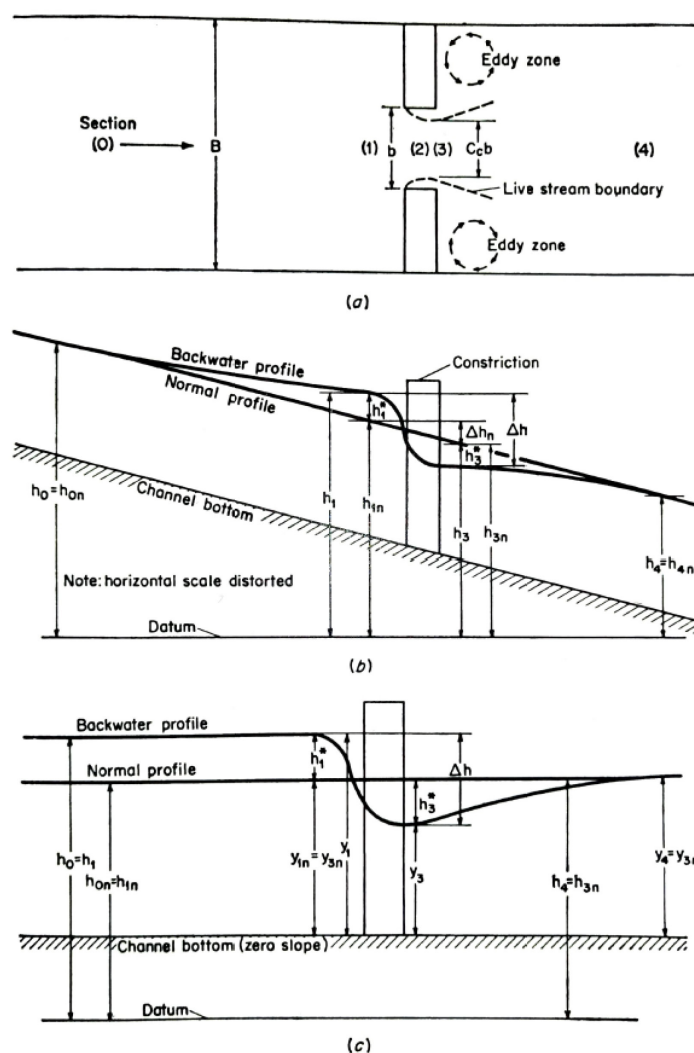
De ladingsverliescoëfficiënt van de intrede wordt ingeschat aan de hand van Idelchik (2007), Diagram 3.3 (schuine intrede vanuit een langstroom), en leidt tot  $\xi_{in} = 0,12$ . Het ladingsverlies t.g.v. de uitrede wordt ingeschat op  $\xi_{uit} = 0,01$ . De breedte onder de drijfvuilbalk wordt op 3,5 m gezet, dit is conservatief want afhankelijk van de plaatsing wordt de opening onder de balk breder. De hoogte onder de drijfvuilbalk hangt af van de opstelling. Bij een vaste balk is deze constant, en wordt deze voor de berekeningen op 2,5 m gezet. Bij een drijvende balk, die 15 cm onder water wordt voorzien, wordt de hoogte aangepast in functie van de beschouwde hydraulische condities (streefpeil +/- 20 cm).

Voor de stroming onder de drijfvuilbalk, wordt een Manning-coëfficiënt overeenstemmend met beton genomen,  $n = 0,017 \text{ sm}^{-1/3}$ . Voor de lengte wordt een (conservatieve) waarde  $L = 0,5 \text{ m}$  aangenomen.

Omwille van de zeer ruime sectie en het beperkte debiet, wordt bekomen dat het ladingsverlies verwaarloosbaar klein is (grootteorde 10E-5 mm!). Zelfs als de ladingsverliescoëfficiënten een factor 100 groter zouden worden ingeschat (wat onrealistisch hoog zou zijn voor zulke configuratie) blijft het ladingsverlies kleiner dan 10E-3 mm. Pas bij zeer hoge waarden van het debiet (grootteorde 4,5 m<sup>3</sup>/s) wordt een ladingsverlies van 1 mm bekomen.

## Bijlage B – Minimale breedte afsluitconstructie

Een versmalde afsluitconstructie leidt tot constrictie van de stroomlijnen, met als gevolg een verhoging van de stroomsnelheid en bijhorende waterpeildaling afwaarts, zoals geïllustreerd in Figuur 101. De figuur toont de situatie voor subkritische stroming, wat relevant is voor de in deze studie beschouwde waterdieptes. De getoonde verhanglijn is van een type M1, die, mits een voldoende lang pand opwaarts, terug naar de hoogte van eenparige beweging convergeert. Omdat in het geval van de instroomconstructies op de Dender de bodem horizontaal ligt (langshelling nul), kan dit type verhanglijn niet optreden (enkel type A2 mogelijk), en zal de opstuwung zich verder doorzetten naar opwaarts, waar de nieuwe verhanglijn moet aansluiten op het waterpeil in de Dender.



Figuur 101 – Definitieschets van stroming door een lokale vernauwing (volgens Tracy & Carter (1955), overgenomen uit Chow (1959)). (a) bovenaanzicht; (b) zijaanzicht; (c) zijaanzicht, aangepast in de veronderstelling van geen wrijvingsverliezen.

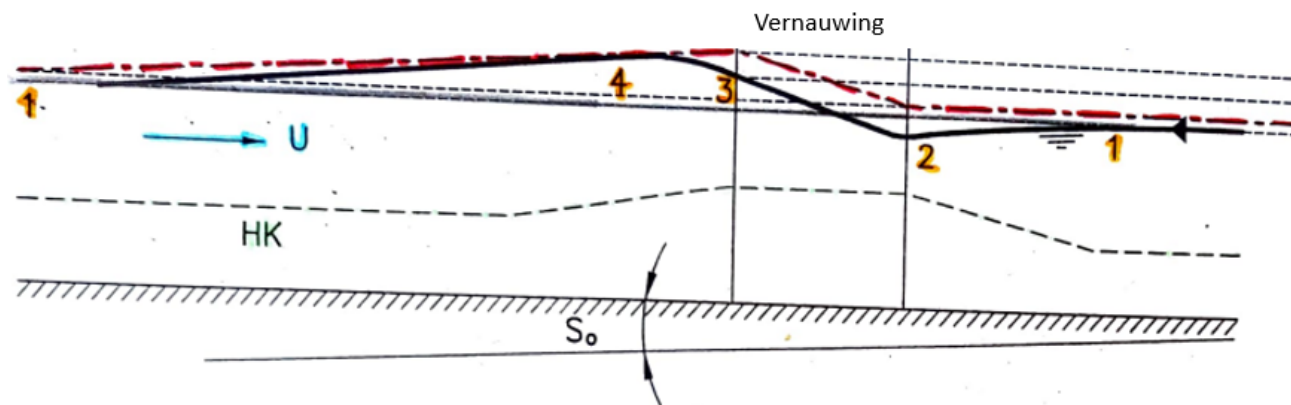
### Uitgangspunten

Om de minimaal toelaatbare breedte van de afsluitconstructie te bepalen wordt de verhanglijn langsheen de vernauwing berekend, door de specifieke energiehoogte in de verschillende punten op- en afwaarts van de vernauwing te berekenen, voor verschillende breedtes (0,5 m – 1,0 m – 1,5 m – 2,0 m) van de vernauwing en bij verschillende waterdieptes en debieten. Er wordt vooropgesteld dat de overgang onder een hoek 1:4 gebeurt, voor alle breedtes. Voor de waterdiepte worden de streefpeilcondities beschouwd en een peilstijging en -daling van 20 cm (zie §3.5), *i.e.* 1,3 m – 1,5 m – 1,7 m. Bij elke waterdiepte wordt het overeenstemmend debiet beschouwd voor een vertical slot-vispassage (met een debietcoëfficiënt van  $C_d = 0,75$ ), zijnde  $0,65 \text{ m}^3/\text{s}$  –  $0,75 \text{ m}^3/\text{s}$  –  $0,85 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Net als voor de gehele instroom wordt ook hier het criterium gesteld dat stroomsnelheden niet hoger mogen gaan dan de kruissnelheid van de doelsoorten (0,5 m/s).

### Rekenmethode

Deze methodiek is een uitbreiding op de theorie toegelicht in Bijlage A.2 – Geleidelijke verbreding. Voor meer informatie kan verwezen worden naar Berlamont (2004), zie ook Figuur 102.

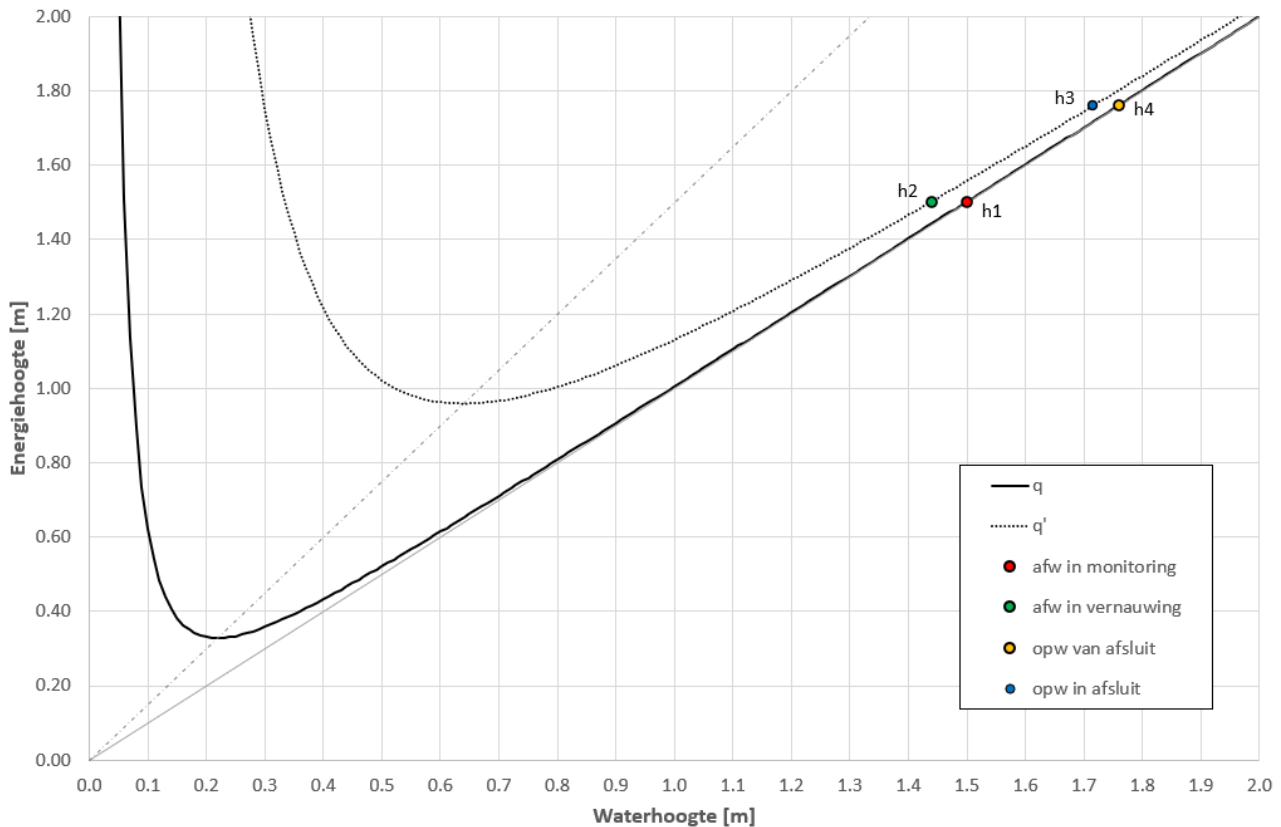


Figuur 102 – Verhanglijn ter hoogte van een plaatselijke vernauwing bij een hydraulisch zwakke helling (Bron: Berlamont, 2004)

Allereerst worden twee specifieke energielijnen afhankelijk van de waterhoogte (E-h-lijnen) berekend (zie Bijlage A.2 – Geleidelijke verbreding). Eén specifieke energielijn voor de waterstand in de vernauwing en één specifieke energielijn voor de waterstand buiten de vernauwing (voor en na de vernauwing zijn de breedtes gelijk).

Zo kan Figuur 103 worden opgesteld (gebruikte waarden voor afmetingen en debiet zijn zodanig gekozen dat de figuur visueel verduidelijkend is) waaruit de E-h-lijnen geplott kunnen worden. De nummering in de figuur komt overeen met de locaties in Figuur 102.





Figuur 103 – Specifieke energiehoogte i.f.v. de waterhoogte bij een lokale vernauwing ( $q' > q$ ).  
Nummering gebaseerd op Berlamont (2004)

De  $h_1$  is de gewenste benedenstroomse waterhoogte bij het eerste slot. Deze komt overeen met 1,5 m. Gebruikmakend van de bovenstaande berekening kan de energiehoogte ( $E_1$ ) behorend bij de waterhoogte bepaald worden.

Er wordt doorgaans aangenomen dat het ladingsverlies dat optreedt tussen punt 1 en 2 verwaarloosbaar is (Chow, 1959; Carlier, 1972; Berlamont, 2004), waardoor de parameters in punt 2 ( $h_2$ ,  $E_2 = E_1$ ) kunnen bepaald worden. Door de waarde die optreedt bij  $E_1$  ( $h = 1,5$  m) op te zoeken in de tabel bij  $E_2$  kan de bijhorende waterhoogte ( $h_2$ ), natte oppervlakte ( $A_2$ ) en stroomsnelheid ( $U_2$ ) op locatie 2 afgelezen worden. Op deze locatie zal de waterstand het laagst zijn en de stroomsnelheid het hoogst.

Om de energiehoogte en waterstand in punt 4 te bepalen, is het optredende ladingsverlies nodig. Dit wordt ingeschat met behulp van literatuurformules uit Chow (1959), door toepassing van onderstaande formules (zie Figuur 101 voor definities):

$$y = h_1 - h_2$$

$$m = 1 - \frac{b_1}{b_2}$$

$$C = C' K_\phi K_\theta$$

$$b_{ratio;ka} = b_{ratio} \cdot k_a$$

$$h_4 = h_1 + \frac{b_{ratio;ka} \cdot y}{1 - b_{ratio;ka}}$$

$h_n$	=	waterhoogte op locatie n (zie Figuur 102)	[m]
$b_n$	=	breedte op locatie n	[m]
$y$	=	hoogteverschil	[m]
$m$	=	contractiecoëfficiënt	[-]
$C'$	=	debietscoëfficiënt standaardsituatie (Figuur 104a)	[-]
$K_F$	=	correctiefactor voor Froude-getal (Figuur 105b)	[-]
$K_w$	=	correctiefactor voor vellingkant (Figuur 105c)	[-]
$C$	=	gecorrigeerde debietscoëfficiënt	[-]
$b_{ratio}$	=	'backwater ratio' $h_1^*/\Delta h$ (Figuur 106, $n = 0,015 \text{ sm}^{-1/3}$ )	[-]
$k_a$	=	vormfactor voor effect van geometrie op opstuwing (Figuur 107)	[-]

De energieverliezen en de bijhorende parameters zijn afhankelijk van de vorm van de vernauwing. Er wordt vertrokken van een vernauwing type I volgens Chow (1959). Daarnaast wordt de lengte van de vernauwing (L) gelijk aan 0,5 m genomen, en de loodrechte hoek op de constructie ( $\theta$ ) 76 graden. Met behulp van bovenstaande formules en verwijzingen naar de grafieken kan de waterhoogte op locatie 4 bepaald worden. Vooral de bepaling van de juiste factoren en coëfficiënten is hier van belang aangezien deze de waterhoogte meermaals beïnvloeden. Bij het berekenen van de waterhoogte op locatie 4 ( $h_4$ ), zullen de waarden voor 'y' en 'm' veranderen voor verschillende groottes van vernauwing wegens variërende hoogtes en breedtes wat leidt tot andere factoren. Zichtbaar zal zijn dat de factoren naar 1 convergeren bij "ruimere" vernauwingen aangezien de contractie en dus het effect van de vernauwing ook afneemt.

Nu de waterhoogte op locatie 4 berekend kan worden, kan ook het verschil in specifieke energiehogte tussen locatie 1 en 4 bepaald worden ( $h_1^*$  in Figuur 101).

Om de waterstand in punt 3 te bepalen kan net zoals tussen punt 1 en 2 worden aangenomen dat geen energieverlies optreedt tussen punt 3 en 4 (Chow, 1959; Carlier, 1972; Berlamont, 2004). Door de waarde die optreedt bij  $E_4$  op te zoeken in de tabel bij de energiehogtes t.p.v. de vernauwing kan de bijhorende waterhoogte ( $h_3$ ), natte oppervlakte ( $A_3$ ) en stroomsnelheid ( $U_3$ ) op locatie 3 afgelezen worden. Deze waarden zijn niet relevant voor de inschatting van de opstuwing, maar ter volledigheid toegelicht.

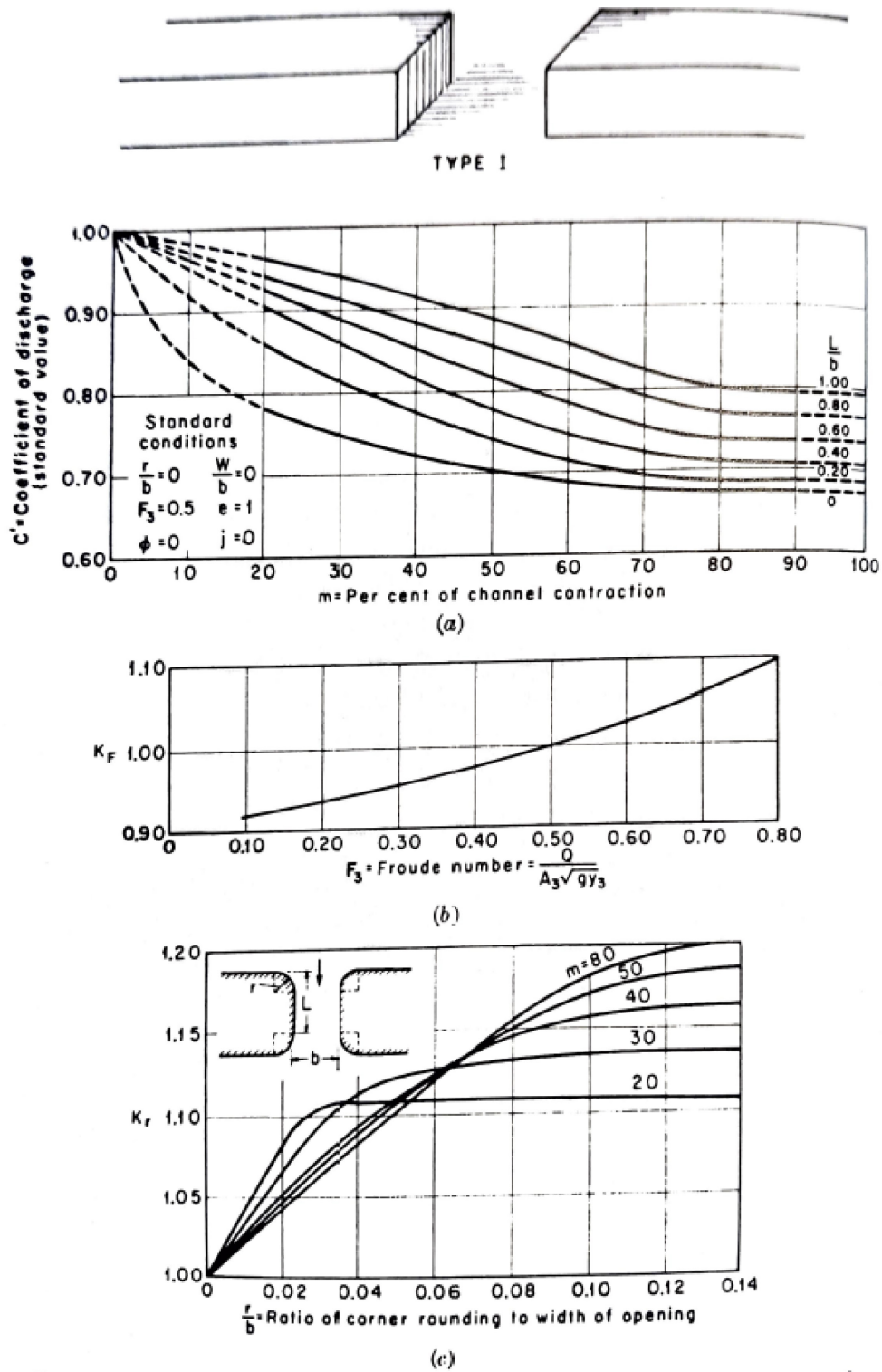


FIG. 17-16. Discharge coefficient for constriction of type I opening, vertical embankments ( $E = 0$ ) and vertical abutments. (U.S. Geological Survey [12].) (a) Base curve for coefficient of discharge; (b) variation of discharge coefficient with Froude number; (c) variation of discharge coefficient with entrance rounding.

Figuur 104 – Coëfficiënten en aanpassingsfactoren voor vernauwing type I met verticale oevers (Overgenomen uit: Chow, 1959)

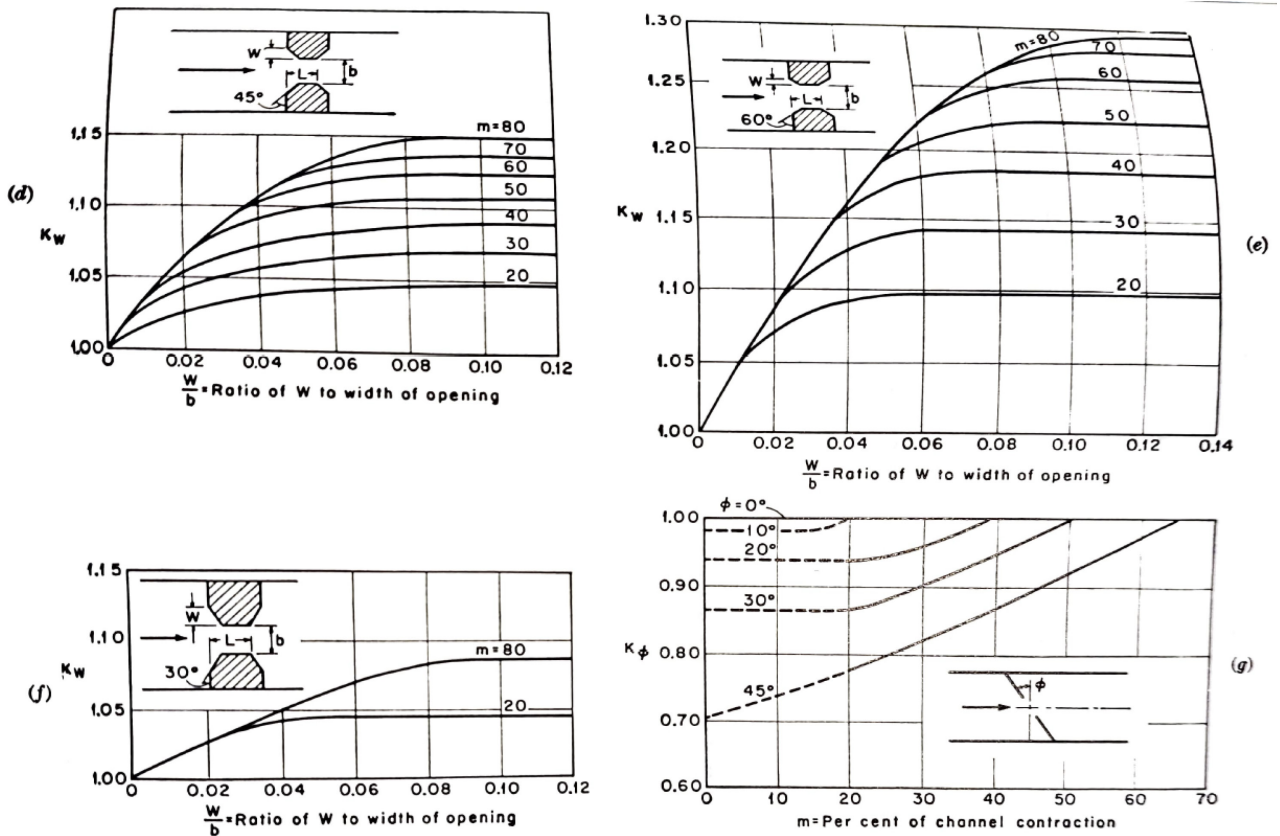
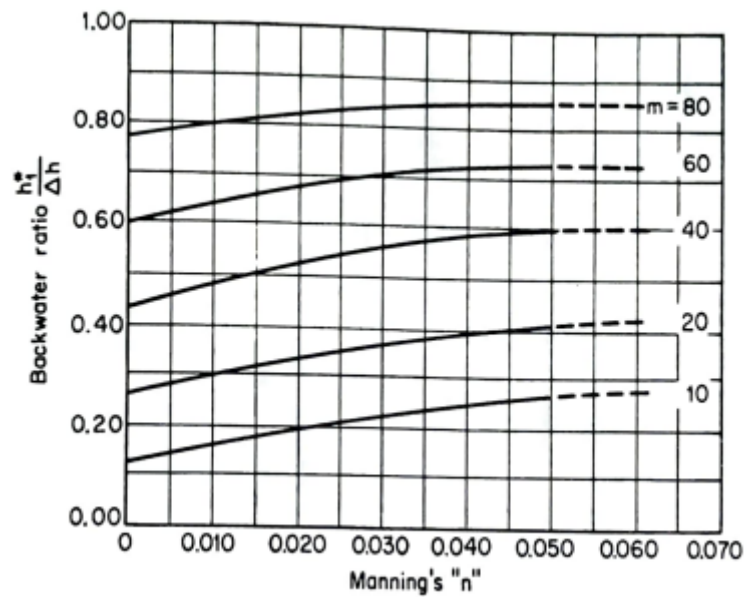
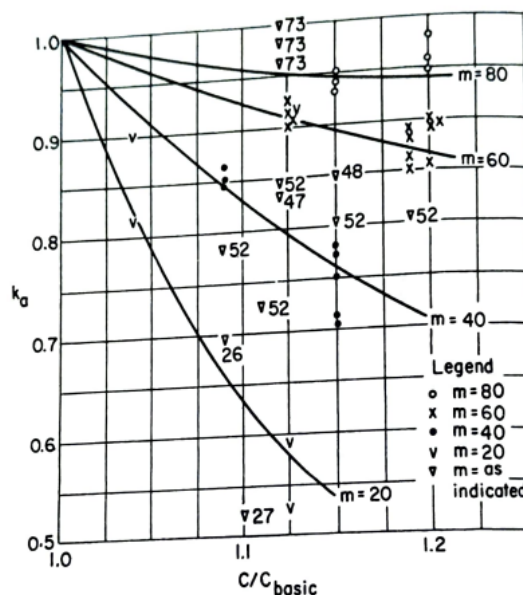


FIG. 17-16 (Continued). (d) Variation of discharge coefficient with length of 45° wing walls or chamfers; (e) variation of discharge coefficient with length of 60° wing walls; (f) variation of discharge coefficient with length of 30° wing walls; (g) variation of discharge coefficient with angularity.

Figuur 105 – Vormfactoren ter berekening van het ladingsverlies ter hoogte van een vernauwing type I (overgenomen uit: Chow, 1959)



Figuur 106 – Effect van kanaalfrictie op de backwater ratio voor standaard vernauwingen.



Figuur 107 – Effect van de geometrie van de vernauwing op de backwater ratio.

### Resultaten

Tabel 42 toont de resultaten voor de verschillende hydraulische scenario's overeenstemmend met de debieten voor het voorkeursontwerp voor de vispassage. De hierbij gebruikte symbolen zijn overgenomen uit Figuur 101. De minimale waterdiepte wordt in alle gevallen gehaald. Bij een vernauwing van 0,5 m en 1,0 m is de stroomsnelheid in alle beschouwde gevallen groter dan de vooropgestelde waarde van 0,5 m/s.

Verder volgt uit de berekeningen dat een vernauwing tot 1,5 m aanvaardbaar zou zijn. Hierbij geldt wel de voorwaarde dat de vleugelmuren van de vernauwing onder een hoek van 1:4 worden geplaatst.

Ten slotte kan opgemerkt worden dat de opstuwingshoogte bij een vernauwing van 0,5 m niet dezelfde waarde heeft als het slotverval. Het verschil is waarschijnlijk te verklaren door het feit dat: (i) de geometrie verschillend is (ii) een andere berekeningsmethode wordt gebruikt omwille van het bestudeerde fenomeen, (iii) de gebruikte grafieken gebaseerd zijn op onderzoek uit 1953, terwijl de aanbevelingen van Larinier dateren van 2002, en (iv) de relatief grote onzekerheid die gepaard gaat met het aflezen (en extrapoleren) in de grafieken. Dit aspect is niet verder onderzocht.

Tabel 42 – Resultaten waterhoogtes en stroomsnelheden rondom afsluitconstructie voor een breedte van de instroom B = 2,5 m, voor verschillende hydraulische combinaties binnen de normale werkingsperiode

Waterhoogte instroom (h0) [m]	Debiet(Q) [m³/s]	Parameter	Breedte afsluitconstructie [m]			
			0,5	1,0	1,5	2,0
1,3	0,65	Minimale diepte (y3) [m]	1,25	1,29	1,30	1,30
		Opstuwning h <sub>1</sub> * [m]	0,17	0,01	0,00	0,00
		Maximale stroomsnelheid (U2) [m/s]	1,04	0,50	0,33	0,25
1,5	0,75	Minimale diepte (y3) [m]	1,45	1,49	1,50	1,50
		Opstuwning h <sub>1</sub> * [m]	0,17	0,01	0,00	0,00
		Maximale stroomsnelheid (U2) [m/s]	1,04	0,50	0,33	0,25
1,7	0,85	Minimale diepte (y3) [m]	1,65	1,69	1,70	1,70
		Opstuwning h <sub>1</sub> * [m]	0,17	0,01	0,00	0,00
		Maximale stroomsnelheid (U2) [m/s]	1,03	0,50	0,33	0,25

# Bijlage C – Ladingsverliescoëfficiënten buizen

Bron: Idelchik (2007)

## Diagram 6.1 – Bocht

Diagram 6.1

Bends at  $\frac{R_0}{D_0} \left( \frac{R_0}{b_0} \right) < 3.0$  and  $0 < \delta \leq 180^\circ$ ,  $\frac{l_0}{D_h} \geq 10^{*1.17,31,61,64,77,78,91}$

$D_h = D_0$

$D_h = \frac{2a_0b_0}{a_0+b_0}$

1) Smooth walls ( $\Delta = 0$ ) and  $Re = w_0 D_h / \nu \geq 2 \times 10^5$ ;

$$\zeta \equiv \frac{\Delta p}{\rho w_0^2 / 2} = \zeta_{loc} + \zeta_{fr} = \zeta_{loc} + 0.0175 \delta \lambda \frac{R_0}{D_h},$$

$\zeta_{loc} = A_1 B_1 C_1$ ,

$A_1 = f(\delta)$ , see graph a or, tentatively, the corresponding formulas:

$\delta$ , deg	$\leq 70$	90	$\geq 100$
$A_1$	$0.9 \sin \delta$	1.0	$0.7 + 0.35 \frac{\delta}{90^\circ}$

$B_1 = f(R_0/D_0)$  or  $f(R_0/b_0)$ , see graphs b and c or, tentatively, the corresponding formulas:

$\frac{R_0}{D_0} \left( \frac{R_0}{b_0} \right)$	$0.21(R_0/D_0)^{-2.5}$	$0.21(\sqrt{R_0/D_0})^{-0.5}$
$B_1$	$0.21(R_0/D_0)^{-2.5}$	$0.21(\sqrt{R_0/D_0})^{-0.5}$

$C_1 = f(a_0/b_0)$ , see graph d for a circular or square cross section  $C_1 = 1.0$  or, tentatively:

$a_0/b_0$	$\leq 4$	$\geq 4$
$C_1$	$0.85 + \frac{0.125}{a_0/b_0}$	

$$\zeta_{fr} = 0.0175 \delta \lambda \frac{R_0}{D_h}.$$

2. Rough walls ( $\Delta > 0$ ) and  $Re \geq 10^4$ ;

$$\zeta = k_\Delta k_{Re} \zeta_{loc} + 0.0175 \delta \lambda \frac{R_0}{D_h},$$

$k = f(\Delta = \Delta/D_h)$ , see the tables;  $k_{Re} = f(Re)$ , see graph e or, tentatively:

$R_0/D_0(R_0/b_0)$	0.50 – 0.55	$\geq 0.55$ to 0.70	$> 0.70$
$k_{Re}$	$1 + 4400/Re$	$5.45/Re^{0.131}$	$1.3 - 0.29 \ln(Re \times 10^{-5})$

$\lambda = f(Re \text{ and } \Delta)$ , see Diagrams 2.2 through 2.6; at  $\lambda = 0.02$ ,  $\zeta_{fr} = 0.00035 \delta (R_0/D_h)$ .

3)  $3 \times 10^3 < Re < 10^4$ ,

$$\zeta = \frac{A_2}{Re} + \zeta_{qu} + \zeta_{fr},$$

where for  $A_2$ , see the table (tentatively);  $\zeta_{qu}$  is determined as  $\zeta_{loc}$  at  $Re > 2 \times 10^5$ .

$R_0/D_0(R_0/b_0)$	0–0.05	>0.05–0.20	>0.2–0.5	>0.5–1.5	>1.5–2.0
$A_2 \times 10^{-3}$	4.0	6.0	4.0–2.0	1.0	0.6

\*From here onward  $l_0/D_h = 0$  means that an elbow (turn) is installed directly behind a smooth collector, while  $l_0/D_h > 0$  means that it is installed downstream of a straight section (insert) behind the collector.

Flow with Changes of the Stream Direction

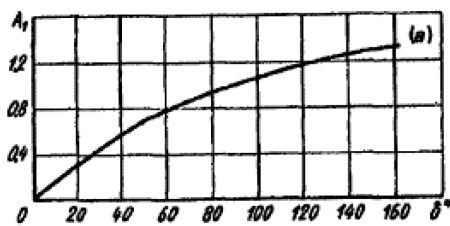
Bends at  $\frac{R_0}{D_0} \left( \frac{R_0}{b_0} \right) < 3.0$  and  $0 < \delta \leq 180^\circ$ ,  $\frac{l_0}{D_h} \geq 10^{*1,17,31,61,64,77,78,91}$

Diagram 6.1

Values of  $k_\Delta$

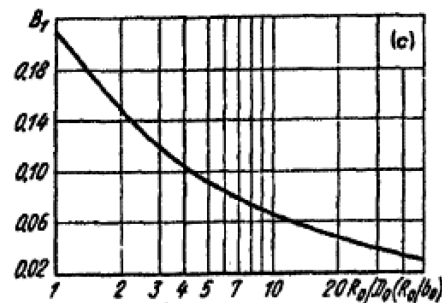
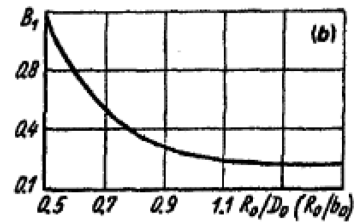
$R_0/D_0$ ( $R_0/b_0$ )	Re				
	$3 \times 10^3 - 4 \times 10^4$	$> 4 \times 10^4$	$3 \times 10^3 - 4 \times 10^4$	$> 4 \times 10^4 - 2 \times 10^5$	$> 2 \times 10^5$
0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
0-0.001	1.0	$1 + 0.5 \times 10^{-3} \bar{\Delta}$	1.0	$\lambda_\Delta / \lambda_{sm}$	$1 + \bar{\Delta} \times 10^3$
>0.001	1.0	-1.5	1.0	-2.0	-2.0

where for  $\lambda_{sm}$ , see  $\lambda$  of commercially smooth tubes at the given Re in Diagrams 2.5 and 2.6; for  $\lambda_\Delta$ , see  $\lambda$  of rough tubes ( $\Delta > 0$ ) at the given Re and  $\Delta$  in Diagrams 2.2 through 2.6.



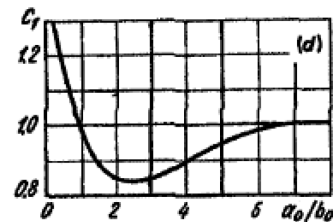
$\delta$ , deg	0	20	30	45	60	
$A_1$	0	0.31	0.45	0.60	0.78	
$\delta$ , deg	75	90	110	130	150	180
$A_1$	0.90	1.00	1.13	1.20	1.28	1.40

$R_0/D_0 (R_0/b_0)$	$B_1$			
	1.18	0.77	0.51	0.37
$R_0/D_0 (R_0/b_0)$	$B_1$			
	0.28	0.21	0.19	0.17



$R_0/D_0 (R_0/b_0)$	$B_1$				
	0.15	0.11	0.09	0.07	0.07
$R_0/D_0 (R_0/b_0)$	$B_1$				
	0.15	0.11	>40		

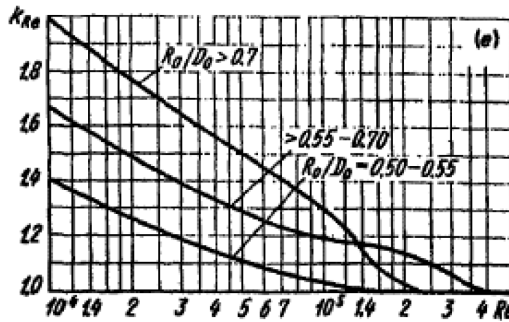
$a_0/b_0$	0.25	0.50	0.75	1.0	1.5	2.0
$C_1$	1.30	1.17	1.09	1.00	0.90	0.85
$a_0/b_0$	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0
$C_1$	0.85	0.90	0.95	0.98	1.00	1.00





Bends at  $\frac{R_0}{D_0} \left( \frac{R_0}{b_0} \right) < 3.0$  and  $0 < \delta \leq 180^\circ$ ,  $\frac{l_0}{D_h} \geq 10^{*1,17,31,61,64,77,78,91}$

Diagram 6.1



Values of  $k_{Re}$

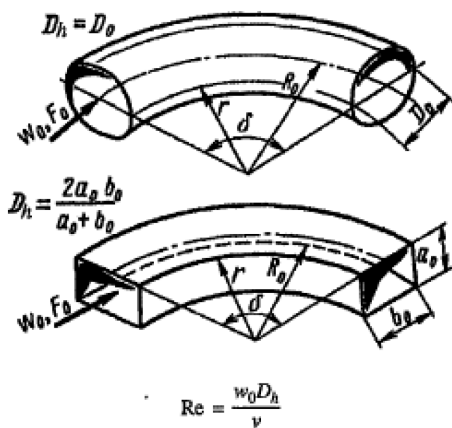
$R_0/D_0$ ( $R_0/b_0$ )	0.1	0.14	0.2	0.3	0.4	0.6
0.5-0.55	1.40	1.33	1.26	1.19	1.14	1.09
>0.55-0.70	1.67	1.58	1.49	1.40	1.34	1.26
>0.70	2.00	1.89	1.77	1.64	1.56	1.46

$R_0/D_0$ ( $R_0/b_0$ )	0.8	1.0	1.4	2.0	3.0	4.0
0.5-0.55	1.06	1.04	1.0	1.0	1.0	1.0
>0.55-0.70	1.21	1.19	1.17	1.14	1.06	1.0
>0.70	1.38	1.30	1.15	1.02	1.0	1.0

Tubes and channels (smooth), smoothly curved ( $\frac{R_0}{D_0} \geq 3$ ) with any angle of the turn (coils);  $^{3,4,12,24,28,51,79,84} \frac{l_0}{D_0} \geq 10$

Diagram 6.2



1. Circular cross section

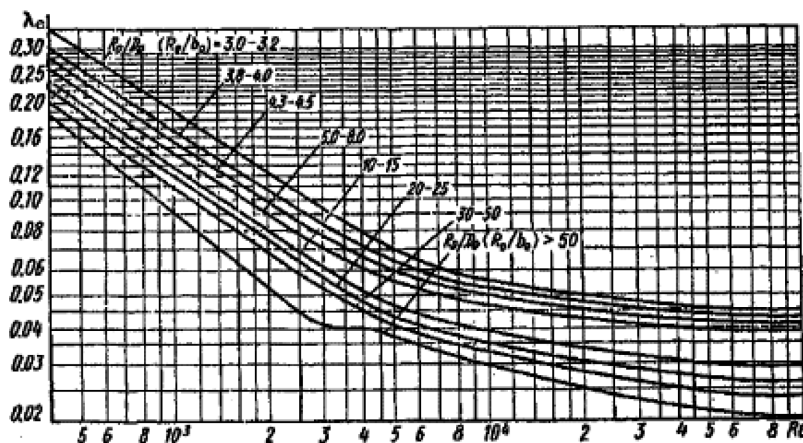
$$\zeta \equiv \frac{\Delta p}{\rho w_0^2 / 2} = 0.0175 \lambda_{el} \delta \frac{R_0}{D_h}$$

where  $\lambda_{el} = f(Re, R_0/D_0)$ , see curves, or for a circular cross section:

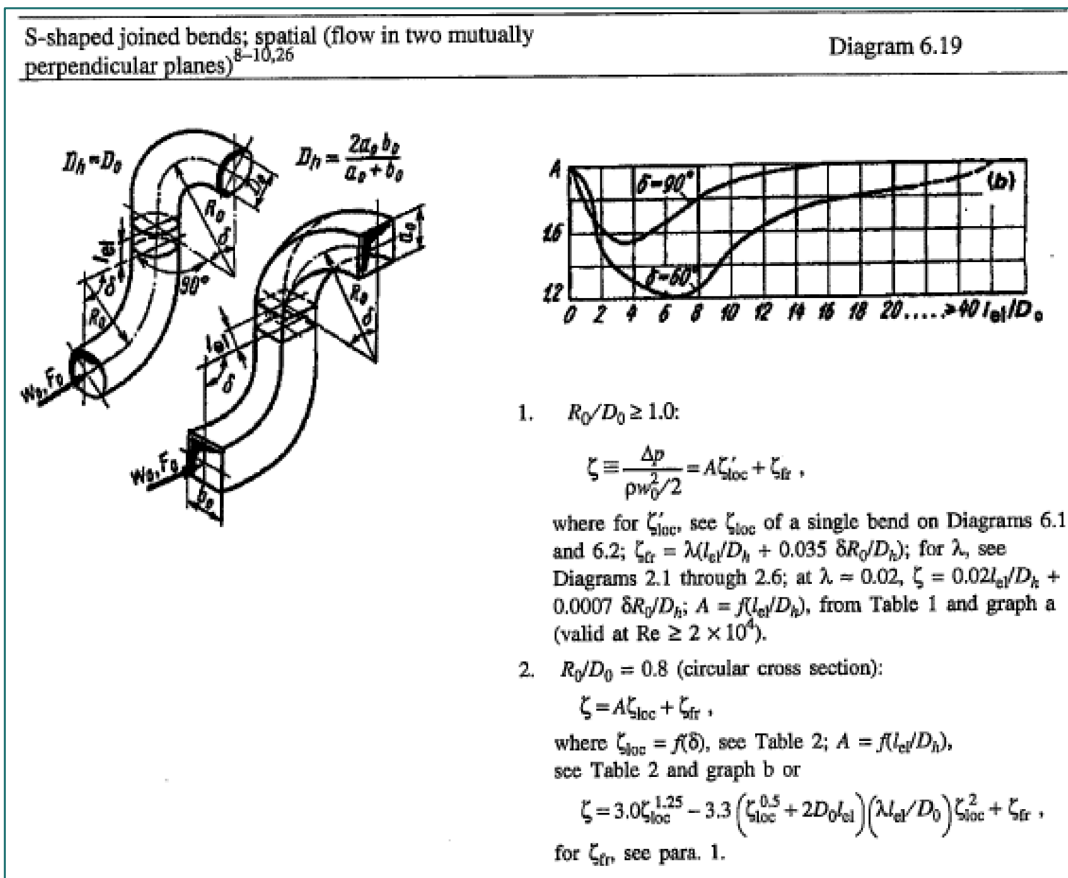
$$\text{at } 50 < Re \sqrt{\frac{D_0}{2R_0}} < 600 \quad \lambda_{el} = \frac{20}{Re^{0.65}} \left( \frac{D_0}{2R_0} \right)^{0.175}$$

$$\text{at } 600 < Re \sqrt{\frac{D_0}{2R_0}} < 1400 \quad \lambda_{el} = \frac{10.4}{Re^{0.55}} \left( \frac{D_0}{2R_0} \right)^{0.225}$$

$$\text{at } 1400 < Re \sqrt{\frac{D_0}{2R_0}} < 5000 \quad \lambda_{el} = \frac{5}{Re^{0.45}} \left( \frac{D_0}{2R_0} \right)^{0.275}$$



## Diagram 6.19 – Opeenvolgende bochten in twee perpendiculaire vlakken



### 1. Values of A

$\delta$ , deg	$l_{el}/D_h$												
	0	1	2	3	4	6	8	10	12	14	20	25	40
60	2.0	1.90	1.50	1.35	1.30	1.20	1.25	1.50	1.63	1.73	1.85	1.95	2.0
90	2.0	1.80	1.60	1.55	1.55	1.65	1.80	1.90	1.93	1.98	2.0	2.0	2.0

## Bijlage D – Schaalmodel

### Inleiding

Voor het onderzoek naar een parallelle monding voor de vispassage van Denderleeuw werd in 2015 een schaalmodel gebouwd in proeftank A (hal 2) van het Waterbouwkundig Laboratorium (zie Figuur 108). Deze proeftank heeft de volgende dimensies:

- Lengte: 19 meter;
- Breedte: 4.8 meter;
- Hoogte: 1.6 meter
- Maximale waterdiepte opwaarts: 1.45 meter
- Regelbare kantelstuw afwaarts met een maximale hoogte: 0.60m.



Figuur 108 – Proeftank A in Hal 2 van het Waterbouwkundig Laboratorium

Er werd gekozen voor een schaalfactor 10. Dit bleek namelijk de grootst mogelijke schaal die nog inpasbaar is in de proeftank. Een zo groot mogelijke schaal geeft meer mogelijkheden voor het bemeten van stroomsnelheden en verkleint de kans op eventuele schaafeffecten. De volgende omrekenwaarden volgen uit de Froude-schaalwetten bij schaal 1/10:

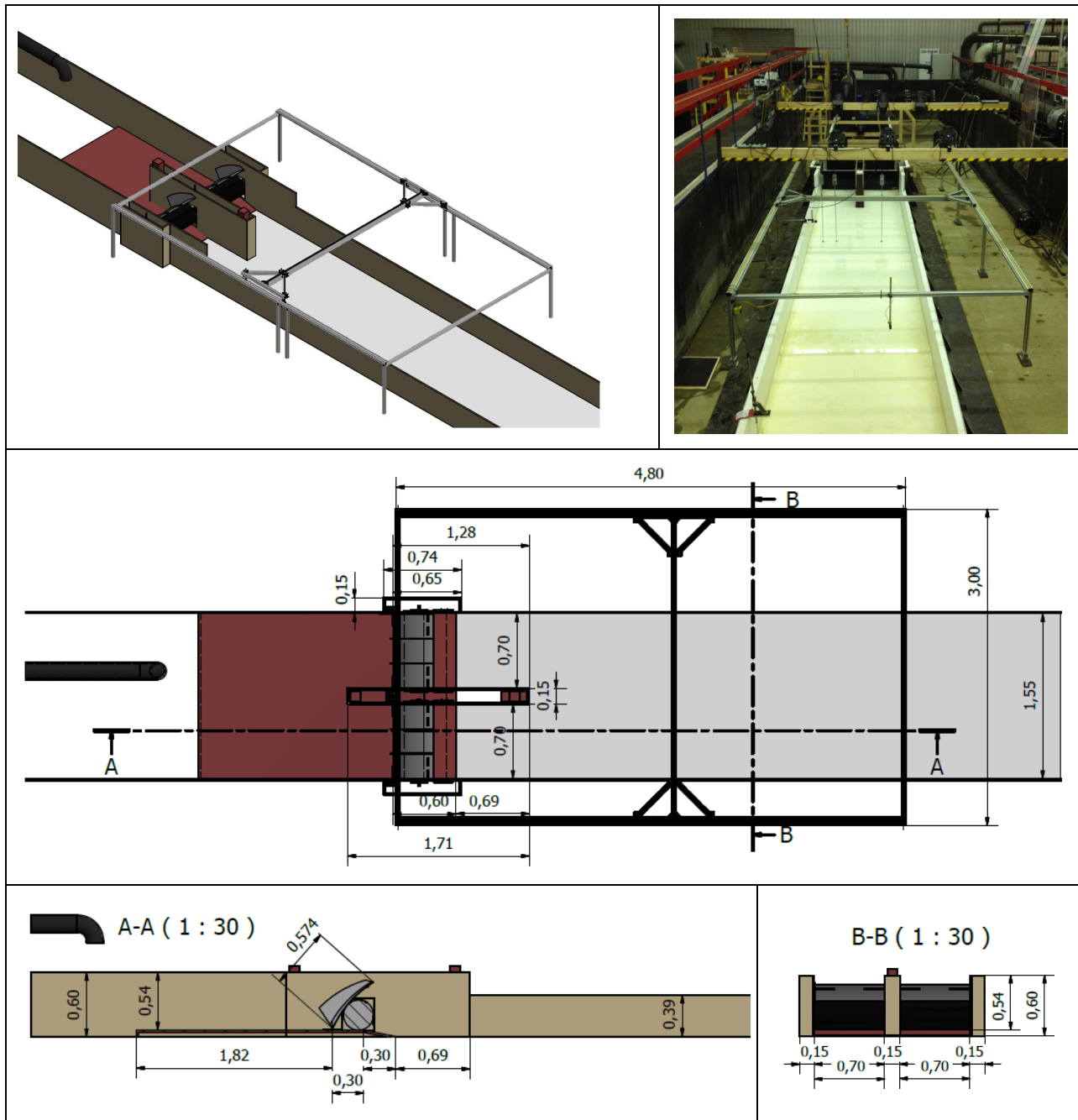
$$\alpha_b = \alpha_h = \alpha_l = 10 \quad (1)$$

$$\alpha_v = \sqrt{\alpha_b} = \sqrt{15} = 3.16 \quad (2)$$

$$\alpha_q = \alpha_v \cdot \alpha_b \cdot \alpha_h = 15 \cdot 15 \cdot 3.87 = 316.23 \quad (3)$$

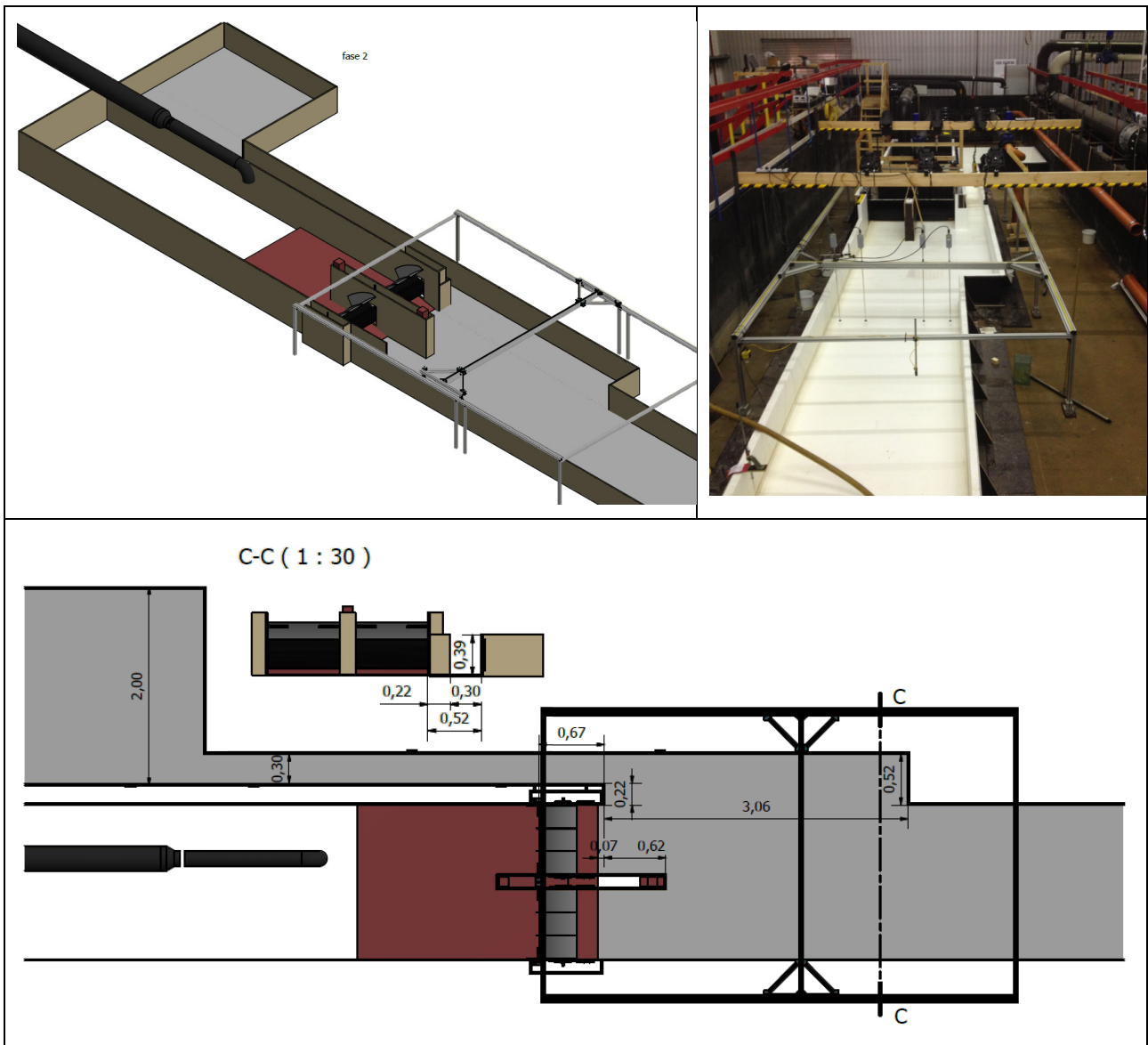
# Geometrie model

## Stuwgeul en stuwen



Figuur 109 – Dimensionering schaalmodel

Toevoeging parallelle monding vispassage



Figuur 110 – Dimensionering schaalmodel met parallelle vispassagemonding

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](mailto:waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be)

[www.waterbouwkundiglaboratorium.be](http://www.waterbouwkundiglaboratorium.be)