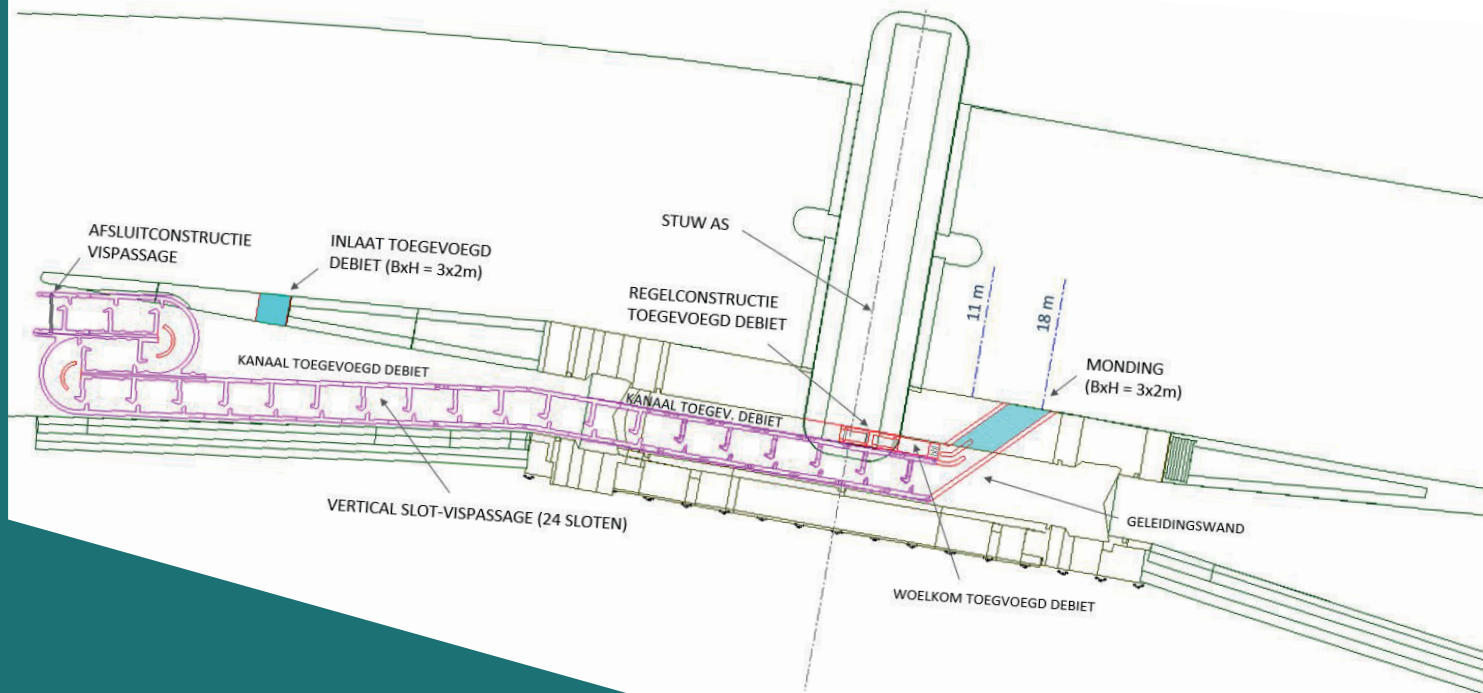




Vlaanderen  
is wetenschap



15\_036\_2  
WL rapporten

## Vispassage op de Leie te Sint-Baafs-Vijve

Hydraulisch ontwerp

DEPARTEMENT  
MOBILITEIT &  
OPENBARE  
WERKEN

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

# Vispassage op de Leie te Sint-Baafs-Vijve

## Hydraulisch ontwerp

Visser, K.P.; Verelst, K.; Vercruysse, J.; Buysse, D.; Vanderkimpen, P.; Viaene, P.; Mostaert, F.

### 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 2020  
D/2020/3241/301

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

**Visser, K.P.; Verelst, K.; Vercruyse, J.; Buysse, D.; Vanderkimpfen, P.; Viaene, P.; Mostaert, F. (2020).** Vispassage op de Leie te Sint-Baafs-Vijve: Hydraulisch ontwerp. Versie 6.0. WL Rapporten, 15\_036\_2. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

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

### Documentidentificatie

Oprachtgever:	De Vlaamse Waterweg afdeling Bovenschelde	Ref.:	WL2020R15_036_2
Keywords (3-5):	Fish passage; Vertical Slot; Additional Flow; Fish Migration; Leie		
Kennisdomeinen	Fish passages > Vertical Slot > Literature & Desktop Study Fish passages > Entrance and Attraction Flow > Numerical Modelling		
Tekst (p.):	83	Bijlagen (p.):	10
Vertrouwelijk:	<input checked="" type="checkbox"/> Nee	<input checked="" type="checkbox"/> Online beschikbaar	

Auteur(s):	Visser, K.P.; Verelst, K.; Vercruyse, J.; Buysse, D.; Vanderkimpfen, P.
------------	---

### Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Viaene, P.	Getekend door: Peter Viaene (Signature) Getekend op: 2021-02-11 11:31:08 +01:0 Reden: ik keur dit document goed  <i>Peter Viaene</i>
Projectleider:	Visser, K.P.	Getekend door: Klaas Visser (Signature) Getekend op: 2021-02-04 10:33:08 +01:0 Reden: ik keur dit document goed  <i>Klaas Visser</i>

### Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Mostaert, F.	Getekend door: Frank Mostaert (Signature) Getekend op: 2021-02-04 09:00:27 +01:0 Reden: ik keur dit document goed  <i>Frank Mostaert</i>
-----------------	--------------	--



# Abstract

De locatie voor de nieuwe vispassage te Sint-Baafs-Vijve werd vastgelegd in de project-MER. Vanwege de gewijzigde beschikbare ruimte vroeg De Vlaamse Waterweg (DVW) aan het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) om in samenwerking met het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek (INBO) het bestaande ontwerp te reviseren en indien nodig aan te passen op basis van aanvullende ontwerpberekeningen.

Gezien de beperkte ruimte was een bekkentrap niet meer mogelijk en werd, uitgaande van de bouwkundige randvoorwaarden, gekozen voor een vertical slotpassage met 24 sloten wat een verval per slot/bekken van 0,10 m betekent. Op basis van een slotbreedte van 0,50 m en ruimtelijke randvoorwaarden volgde een bekkenlengte van 4,5 m en een bekkenbreedte van 3,2 m. De passeerbaarheid van het ontwerp werd gecontroleerd voor waterstandsfluctuaties die minder dan 5% van de tijd worden overschreden (circa +/- 0,20 m ten opzichte van het streefpeil). Ook werden maximale stroomsnelheden gecontroleerd bij extreme omstandigheden van sterk verhoogd verval en/of sterk verhoogde opwaartse waterstanden. Bij streefpeilen is het theoretisch verval 2,39 m over de vispassage en stuw. Het grootste verval in de onderzochte periode was 2,77 m. Bij streefpeilen heeft de vispassage een debiet van circa 0,9 m<sup>3</sup>/s, wat op basis van maatgevende peilfluctuaties voor de normale werkingsperiode met circa 0,1 m<sup>3</sup>/s kan fluctueren. Om de vispassage ingepast te krijgen in de oude sluis zijn twee bochten van 180° nodig en kan er geen monitoringsruimte worden voorzien.

Er werd ook gekozen voor de toepassing van een regelbaar toegevoegd debiet van 0 tot circa 4 m<sup>3</sup>/s. Dit zorgt ervoor dat de vispassage langer open kan blijven bij lagere afvoer (in bijv. drogere periodes), terwijl er in periodes van hogere afvoer nog een voldoende groot lokstroomdebiet gerealiseerd kan worden. Gezien de relatief grote debietschommelingen op de Leie (twee keer per dag van 0 tot circa 60 m<sup>3</sup>/s) in de huidige situatie zorgt de toepassing van het toegevoegd debiet ook in de dagelijkse omstandigheden voor een groter openingspercentage.

Aangezien de relatief dikke sluismuur aan afwaartse zijde niet volledig verwijderd kon worden tot de meest optimale locatie voor de vispassagemonding wordt op die locatie een schuine mondingsopening (van 45°) door deze muur voorzien van 3 m breed en 2 meter hoog. Het detailontwerp van de mondingsopening en de uitstroom van het toegevoegd debiet werden door middel van een CFD-modelstudie uitgewerkt. Aan opwaartse zijde is een opening door de oude sluismuur nodig voor het inlaten van het toegevoegd debiet. Het toegevoegd debiet stroomt via een parallel kanaal tot net na het laatste bekken en wordt geregeld door middel van een hefschuif aan afwaartse zijde van het kanaal.

De automatische regeling van zowel de opwaartse afsluitconstructie als het toegevoegd debiet zijn belangrijk voor de effectiviteit van de vispassage (lees: openingspercentage en attractiviteit) en zijn daarom onderzocht door middel van modelsimulaties met een Mike11-stromingsmodel van de Leie. Op basis hiervan werd een eerste voorstel gedaan voor de instellingen van een automatische regeling.



# Inhoudstafel

Abstract .....	III
Inhoudstafel.....	IV
Lijst van de tabellen.....	VI
Lijst van de figuren .....	VIII
1 Inleiding .....	1
1.1 Achtergrond.....	1
1.2 Doelstelling.....	2
1.3 Leeswijzer .....	2
2 Randvoorwaarden & ontwerpcriteria .....	3
2.1 Ruimtelijke randvoorwaarden.....	3
2.2 Ontwerpcriteria .....	5
2.2.1 Doelsoorten .....	5
2.2.2 Periode optimale werking .....	7
2.2.3 Passeerbaarheid .....	9
2.2.4 Attractiviteit (monding).....	12
2.3 Hydraulische randvoorwaarden .....	14
2.3.1 Streefpeilen en alarmpeilen .....	14
2.3.2 Histogram debiet en op- en afwaartse waterstanden .....	15
2.3.3 Waterpeilfluctuaties en maatgevend verval .....	16
2.3.4 Debiet vispassage en lokstroom.....	19
2.4 Voorwaarden uit de bouwkundige voorstudie.....	21
3 Algemeen ontwerp.....	24
3.1 Ruimtelijke inpassing.....	24
3.2 Bekkens en sloten.....	25
3.3 Bodemsubstraat .....	27
3.4 Instroom en afsluitconstructie .....	29
3.5 Bochten.....	30
3.6 Monding en toegevoegd debiet .....	31
3.7 Regelconstructie toegevoegd debiet.....	34
4 Dimensionering vispassage .....	37
4.1 Bekkens en vispassagedebiet .....	37
4.2 Beoordeling invloed waterpeilfluctuaties .....	41

4.2.1	Maximale stroomsnelheden.....	44
4.2.2	Maximale energie/turbulentie per bekken .....	46
5	Toegevoegd debiet .....	48
5.1	Opwaartse inlaat .....	48
5.2	Afwaartse regelconstructie .....	48
6	Monding .....	52
6.1	Watersprong en migratielimietlijn .....	52
6.2	Locatie en oriëntatie monding .....	57
6.3	Detailontwerp via CFD-modellering .....	60
7	Instellingen voor automatische regeling.....	68
7.1	Verkennde simulaties .....	68
7.2	Afsluitconstructie vispassage .....	74
7.2.1	Principe .....	74
7.2.2	Voorstel sturingsregels.....	74
7.2.3	Voorstel initiële waarden .....	75
7.3	Regelconstructie toegevoegd debiet.....	77
7.3.1	Principe .....	77
7.3.2	Voorstel sturingsregels.....	77
7.3.3	Voorstel initiële waarden .....	78
7.4	Algemene opmerkingen en aanbevelingen bij de scripts .....	80
	Referenties .....	81
	Bijlagen .....	B1
	Bijlage A: Rekenmethodes.....	B2
	Overstort en watersprong .....	B2
	Onderstroom en watersprong.....	B3
	Lengte watersprong en roller .....	B4
	Woelkom .....	B6
	Bijlage B: Resultaten watersprong berekeningen stuwen .....	B7

## Lijst van de tabellen

Tabel 1 - Overzicht van de vissoorten die in de Leie werden gevangen tussen 2007 en 2018.....	6
Tabel 2 - Potentiële vissoorten waarvoor vrije vismigratie in het Scheldebekken in de toekomst belangrijk geacht wordt .....	7
Tabel 3 – Beperkt overzicht van vastgestelde periodes van stroomopwaartse paaimigratie voor enkele doelsoorten .....	8
Tabel 4 – Biologische ontwerpcriteria passeerbaarheid vispassage .....	12
Tabel 5 – Histogram historische metingen op- en afwaarts waterpeil te SBV en debiet te Menen.....	15
Tabel 6 – Histogram hydraulisch verval voor de periode 2010 - 2018.....	17
Tabel 7 – Scenario’s waterstandsfluctuaties voor ontwerpberekeningen.....	18
Tabel 8 – Maatgevende debieten op de Leie te Menen voor bepaling ontwerpdebiet vispassage .....	20
Tabel 9 – Ontwerpwaarden vertical slotpassage .....	26
Tabel 10 – Hoogtes slotbodem en op- afwaartse waterpeilen per slot bij streefpeil.....	26
Tabel 11 – Indicatie vispassagedebiet op basis van fluctuatie in opwaarts waterpeil.....	38
Tabel 12 – Resultaten Scenario 1a: Ho = 8,00 mTAW, Ha = 5,61 mTAW en Qvis = 0,88 m <sup>3</sup> /s.....	41
Tabel 13 - Resultaten Scenario 1b: Ho = 8,00 mTAW, Ha = 5,83 mTAW en Qvis = 0,87 m <sup>3</sup> /s.....	41
Tabel 14 – Resultaten Scenario 2a: Ho = 8,10 mTAW, Ha = 5,61 mTAW en Qvis = 0,93 m <sup>3</sup> /s.....	42
Tabel 15 – Resultaten Scenario 2b: Ho = 8,10 mTAW, Ha = 5,83 mTAW en Qvis = 0,93 m <sup>3</sup> /s.....	42
Tabel 16 – Resultaten Scenario 3a: Ho = 8,20 mTAW, Ha = 5,61 mTAW en Qvis = 0,99 m <sup>3</sup> /s.....	42
Tabel 17 – Resultaten Scenario 3b: Ho = 8,20 mTAW, Ha = 5,83 mTAW en Qvis = 0,98 m <sup>3</sup> /s.....	42
Tabel 18 – Resultaten Scenario 4: Ho = 7,80 mTAW, Ha = 5,61 mTAW en Qvis = 0,78 m <sup>3</sup> /s.....	43
Tabel 19 – Resultaten Scenario 5: Ho = 8,00 mTAW, Ha = 5,51 mTAW en Qvis = 0,88 m <sup>3</sup> /s.....	43
Tabel 20 – Resultaten Scenario 6: Ho = 8,00 mTAW, Ha = 5,41 mTAW en Qvis = 0,89 m <sup>3</sup> /s.....	43
Tabel 21 – Resultaten Scenario 7: Ho = 8,10 mTAW, Ha = 6,27 mTAW en Qvis = 0,89 m <sup>3</sup> /s.....	43
Tabel 22 – Resultaten Scenario E1: Ho = 7,98 mTAW, Ha = 5,21 mTAW en Qvis = 0,88 m <sup>3</sup> /s.....	44
Tabel 23 – Resultaten Scenario E2: Ho = 8,42 mTAW, Ha = 5,72 mTAW en Qvis = 1,10 m <sup>3</sup> /s.....	44
Tabel 24 – Resultaten indicatie verval over inlaatopening bij scenario 1, Q = 4 m <sup>3</sup> /s en Cd = 0,61.....	48
Tabel 25 – Resultaten lengte watersprong bij maatgevende scenario’s en hefhoogte 1,08 m.....	49
Tabel 26 – Resultaten lengte watersprong afwaarts van de stuwen bij maatgevende scenario’s.....	55
Tabel 27 – Resultaten numerieke simulaties voor automatische regeling op basis van huidig gemeten debiet .....	70
Tabel 28 – Resultaten numerieke simulaties voor automatische regeling op basis van gedempt debiet (*)	71
Tabel 29 – Voorstel initiële waarden vispassage bij openen en sluiten op basis van waterpeil.....	76
Tabel 30 – Voorstel initiële waarden vispassage bij openen op basis van debiet en sluiten op basis van waterpeil.....	76

Tabel 31 – Voorstel initiële waarden toegevoegd debiet bij (huidige) relatief grote debietschommelingen 79

Tabel 32 – Voorstel initiële waarden toegevoegd debiet bij (toekomstige) gedempte debietschommelingen ..... 79

Tabel 33 – Resultaten watersprong bij stuw overstort en ondergrens Q90% voor kwartiergemiddelde waarde ..... B7

Tabel 34 – Resultaten watersprong bij stuw overstort en ondergrens Q90% voor daggemiddelde waarde . B8

Tabel 35 – Resultaten debiet en watersprong bij stuw overstort en volledig neergelaten stuwkleppen ..... B9

Tabel 36 – Resultaten watersprong bij onderstroom in de bovengrenssituatie Q10% ..... B10

# Lijst van de figuren

Figuur 1 – Schematisch overzicht van de werken op de Leie te Sint-Baafs-Vijve .....	1
Figuur 2 – Zoeklocatie en ruimtelijke beperkingen voor de nieuwe vispassage.....	3
Figuur 3 – Indeling en bodempeilen beschikbare ruimte.....	4
Figuur 4 – Langsdoorsnede sluiscolk / beschikbare ruimte .....	4
Figuur 5 – Geometrie stuwgeul – lengteprofiel en bovenaanzicht .....	5
Figuur 6 – Europese meerval (lengte bijna 1,5 m) gevangen in de vispassage in de Dijle te Rotselaar in juni 2020.....	10
Figuur 7 – Relatie migratielinielijne en monding vispassage .....	12
Figuur 8 – Correcte en incorrecte inpassing vispassage monding .....	13
Figuur 9 – Weergave metingen opwaarts waterpeil voor de periode 2010 tot heden op Waterinfo.....	14
Figuur 10 – Voorbeeld huidige en relatief sterke schommelingen in debiet te Menen .....	16
Figuur 11 – Visualisatie maatgevende en extreme scenario’s op- en afwaartse waterstanden.....	18
Figuur 12 – Aanvankelijk voorstel ontwerp met 27 sloten voor overleg bouwkundige mogelijkheden .....	22
Figuur 13 – Kritiek punt ten aanzien van maximaal mogelijke bekkendiepte .....	22
Figuur 14 – Aanpassing ontwerp op basis van bouwkundige randvoorwaarden .....	23
Figuur 15 – Opwaartse grens beschikbare ruimte vanuit bouwkundig ontwerp.....	23
Figuur 16 – Ruimtelijke inpassing ontwerp vertical slotvispassage in de oude sluis te Sint-Baafs-Vijve.....	24
Figuur 17 – Ontwerp en dimensionering bekkens en sloten vispassage .....	25
Figuur 18 – Praktijkvoorbeelden toepassing bodemsubstraat in vertical slotpassages .....	27
Figuur 19 – Richtlijn meest optimale locaties voor plaatsing stoorstenen .....	28
Figuur 20 – Minimale helling bodemsubstraat bij uitstroom vispassage.....	29
Figuur 21 – Locatie afsluitconstructie .....	29
Figuur 22 – Schetsmatige weergave van stroompatronen in de bochten .....	30
Figuur 23 – Kanaal toegevoegd debiet met opwaartse inlaat en afwaartse regelconstructie .....	31
Figuur 24 – Detailontwerp monding en inbreng toegevoegd debiet.....	32
Figuur 25 – Aandachtspunt aansluiting vloerpeil opening op dissipatieblokken in achterliggende vloer in stuwgeul .....	33
Figuur 26 – Inpassing regelconstructie toegevoegd debiet .....	35
Figuur 27 – Stabiele en onstabiele vormen voor de punt van de hefschuif.....	36
Figuur 28 – Maatgevende parameters ontwerp vertical slotpassage .....	37
Figuur 29 - Indicatie vispassagedebiet op basis van fluctuatie in opwaarts waterpeil .....	38
Figuur 30 – Invloed van vooral de bekkenbreedte op het stromingstype in vertical slot bekkens .....	39

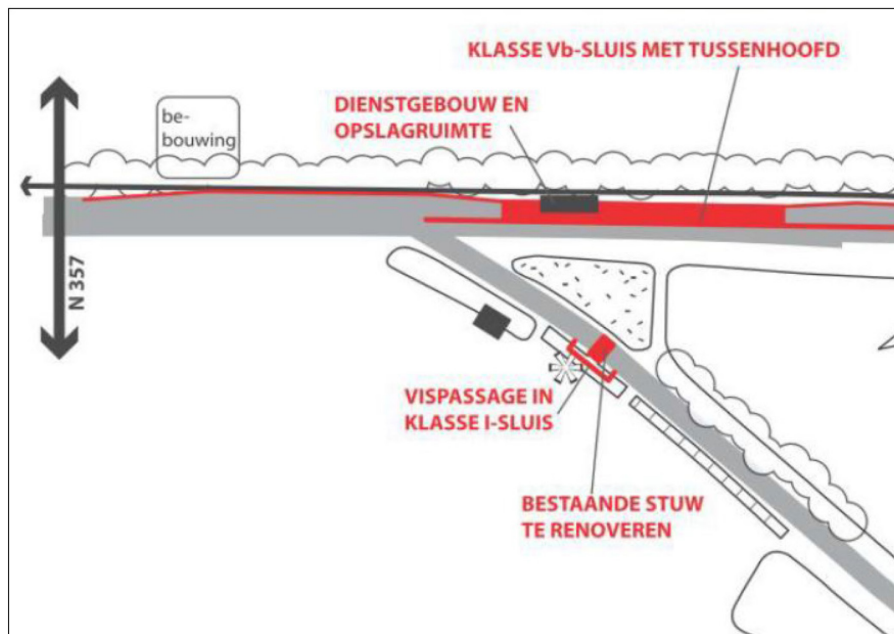
Figuur 31 – Resultaten invloed peilfluctuatie op de gemiddelde stroomsnelheden ( $V_g$ ) bij de maatgevende scenario's.....	45
Figuur 32 – Resultaten invloed peilfluctuatie op de gemiddelde stroomsnelheden ( $V_g$ ) bij de aanvullende en extreme scenario's .....	45
Figuur 33 – Resultaten invloed peilfluctuatie op de energie per bekken bij de maatgevende scenario's .....	47
Figuur 34 – Resultaten invloed peilfluctuatie op de energie per bekken bij de aanvullende en extreme scenario's.....	47
Figuur 35 – Maatgevende parameters onderstroom en woelkom .....	49
Figuur 36 – Resultaten lengte watersprong ( $L_w$ ), lengte roller ( $L_r$ ) en lengte woelkom ( $L_{wk}$ ) bij $Q_t = 3$ en $4 \text{ m}^3/\text{s}$ .....	50
Figuur 37 – Indicatie relatie hoogte hefschuif ( $h_s$ ) en debiet onder schuif ( $Q_t$ ) bij vier maatgevende scenario's .....	51
Figuur 38 – Watersprong bij overstort (boven) en onderstroom (onder) .....	52
Figuur 39 – Schetsen dimensionering hefstuwen met kleppen te Sint-Baafs-Vijve.....	53
Figuur 40 – Berekende zones einde roller (zone 2) en einde watersprong (zone 3) .....	56
Figuur 41 – Zoekgebied optimale locatie monding .....	57
Figuur 42 – Schaalmodelstudie ontwerp parallelle monding vispassage te Denderleeuw.....	58
Figuur 43 – Varianten studie ontwerp monding .....	59
Figuur 44 – Vertrekpunt detailontwerp monding voor de CFD-studie .....	61
Figuur 45 – Resultaten CFD-simulatie vertrekpunt detailontwerp monding .....	62
Figuur 46 – Geoptimaliseerd detailontwerp van de monding op basis van de CFD-simulaties.....	64
Figuur 47 – Resultaten CFD-simulatie met geoptimaliseerd detailontwerp monding en onderstroom bij stuwen .....	66
Figuur 48 – Finaal detailontwerp monding op basis van de CFD-studie .....	67
Figuur 49 – Gemeten en gedempt debiet te Menen als opwaartse randvoorwaarde .....	69
Figuur 50 – Voorbeeld resultaten scenario S1 .....	72
Figuur 51 – Voorbeeld resultaten scenario S2 .....	72
Figuur 52 – Visualisatie parameters rekenmethode overstort en watersprong.....	B2
Figuur 53 – Visualisatie parameters rekenmethode onderstroom en watersprong.....	B3
Figuur 54 – USBR type III woelkom .....	B6

# 1 Inleiding

## 1.1 Achtergrond

In het kader van het globale Seine-Schelde project, waarbij de Leie zal uitgebouwd worden tot een Europese hoofdvaaras voor schepen CEMT-klasse Vb, dient te Sint-Baafs-Vijve een nieuwe CEMT-klasse Vb sluis gebouwd te worden. Met de vernieuwing van de sluis wenst De Vlaamse Waterweg (DVW) tevens een oplossing te voorzien voor het vismigratieknelpunt dat het huidige stuwsluiscomplex vormt. Figuur 1 toont een overzicht van de geplande werken.

Figuur 1 – Schematisch overzicht van de werken op de Leie te Sint-Baafs-Vijve



(Bron: Grontmij, 2013b)

De bestaande stuw op de Oude Leiearm blijft behouden, waardoor de hoofdafvoer via de Oude Leiearm zal blijven lopen. De stuw wordt wel gerenoveerd. Naast de stuw bevindt zich een kleinere (klasse I) sluis die niet meer operationeel is.

De voorkeurslocatie voor de nieuwe vispassage werd in het kader van het opstellen van de project-MER onderzocht door het studiebureau Grontmij. In een verantwoordingsnota werd gekozen voor de inpassing van de vispassage in de kleinere (klasse I) sluis naast de huidige stuwen (Grontmij, 2013b). Hierbij speelde voornamelijk de inrichting van de bedrijventerreinen op het stuweiland een sturende rol. Deze locatie werd daarom voor de vispassage vastgelegd in de project-MER (Grontmij, 2013c).

In het voorontwerp werden twee varianten uitgewerkt: een vertical slotpassage (Grontmij, 2012) en een V-vormige breukstenen bekkentrap (Grontmij, 2013a). Vanuit het oogpunt van de algemene richtlijn voor de keuze van de meest natuurlijke oplossing van het migratieknelpunt (Kroes & Monden, 2005) werd de V-vormige bekkentrap aanvankelijk verkozen als voorkeursvariant en voorgesteld als werkhypothese in de project-MER (Grontmij, 2013c).

Mede vanwege gewijzigde ruimtelijke randvoorwaarden heeft DVW in 2015 echter aan het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) gevraagd om in samenwerking met het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek (INBO) het voorontwerp van de vispassage zoals uitgewerkt door Grontmij te reviseren en indien nodig het ontwerp aan te passen op basis van bijkomende berekeningen. Een eerste verkenning van deze revisie werd gerapporteerd in (Visser *et al.*, 2016). Op basis van deze verkenning bleek dat een inpassing van een V-vormige bekkentrap volgens de ontwerpcriteria niet (meer) mogelijk was in de beperkte(re) ruimte. Er werd daarom het volgende voorgesteld:

- Toepassing van een vertical slotpassage met een zo klein mogelijk verval per slot;
- Toepassing van een toegevoegd debiet om voldoende lokstroom te realiseren en het risico op sluiten vanwege schommeling in waterpeil en debiet op de rivier te beperken.

## 1.2 Doelstelling

Het onderhavige rapport beschrijft het gereviseerde hydraulische voorontwerp volgens bovenstaande punten en behandelt de onderliggende ontwerpberekeningen. Dit hydraulisch ontwerp dient als finaal voorontwerp voor verdere bouwkundige uitwerking in kader van de vergunningsaanvraag en voor het opmaken van het bestek. Het bouwkundig ontwerp wordt in opdracht van DVW uitgewerkt door het studie bureau Tractebel en vormt geen onderdeel van dit rapport. Wel werden de bouwkundige mogelijkheden op hoofdlijnen overlegd en afgecheckt tijdens de uitwerking van het hydraulische ontwerp.

## 1.3 Leeswijzer

De randvoorwaarden voor het ontwerp worden samengevat in hoofdstuk 2. Hierbij worden ook genomen keuzes uit de voorstudie toegelicht.

In hoofdstuk 3 wordt het geselecteerde ontwerp op hoofdlijnen besproken en vormt daarmee een soort samenvatting van het ontwerp met de belangrijkste ontwerpwaarden.

De onderliggende berekeningen voor het detailontwerp van de bekkens, het toegevoegd debiet en de monding worden vervolgens beschreven in respectievelijk de hoofdstukken 4, 5 en 6.

De resultaten van de simulaties voor automatische regeling van de opwaartse afsluitconstructie en het toegevoegd debiet worden beschreven in hoofdstuk 7. Daarbij wordt ook een eerste voorstel gegeven voor instellingen voor een automatische regeling.



## 2 Randvoorwaarden & ontwerpcriteria

### 2.1 Ruimtelijke randvoorwaarden

De locatie voor de vispassage in de klasse I sluis werd vastgelegd in de project-MER (Grontmij 2013c). Deze locatie (Figuur 2 - rood omcirkelde gebied) werd vooral gekozen omdat hierdoor de oude sluis (die momenteel buiten werking is) een nieuwe functie krijgt waardoor er geen bijkomend ruimtebeslag is en er mede daardoor geen impact is op het bedrijventerrein D'Hooie of op de bereikbaarheid van de stuwen vanaf het eiland.

In de loop van de studie is echter gebleken dat de realisatie van een goed werkende vispassage in de oude sluis ruimtelijk en bouwkundig gezien niet eenvoudig is. Om de monding op de juiste locatie te kunnen realiseren is namelijk een doorsteek door een circa 4-5 m dikke oude sluismuur noodzakelijk. Daarnaast bleek uitvoering 'in den droge' niet mogelijk en moet daardoor met afzinkbare prefab U-bakken worden gewerkt. Vanwege deze uitvoeringstechnische en ruimtelijke beperkingen moest in het ontwerp vaak de grenzen opgezocht worden van een efficiënt vispassage ontwerp. Daarom werd voorgesteld om toch een inpassing op linkeroever te onderzoeken aangezien de ruimtelijke impact op het bedrijventerrein en bereikbaarheid van de stuw door middel van een vertical slotpassage (grotendeels uitgevoerd in de oever) relatief gering kunnen zijn. Na overleg met DVW bleek echter dat een inpassing op linkeroever niet (meer) mogelijk is aangezien de zoeklocatie al is vastgelegd in de project-MER, waarbij de verschillende belangen van de verschillende partijen al werden afgewogen.

Een belangrijke ruimtelijke randvoorwaarde ter plaatse van de oude sluis op rechteroever zijn de opwaarts gelegen aanlegsteigers voor pleziervaart (Figuur 2 - blauwe lijn). Deze aanlegplaatsen dienen te worden gehandhaafd en zorgen voor een opwaartse grens aan de beschikbare ruimte voor de vispassage. Aanvankelijk konden een deel van de steigers naar opwaarts worden geplaatst, maar in een later stadium bleek dit niet meer mogelijk (dit is één van de redenen waarom het oorspronkelijke voorontwerp Grontmij (2013a) voor de vispassage moest worden gereviseerd).

Figuur 2 – Zoeklocatie en ruimtelijke beperkingen voor de nieuwe vispassage

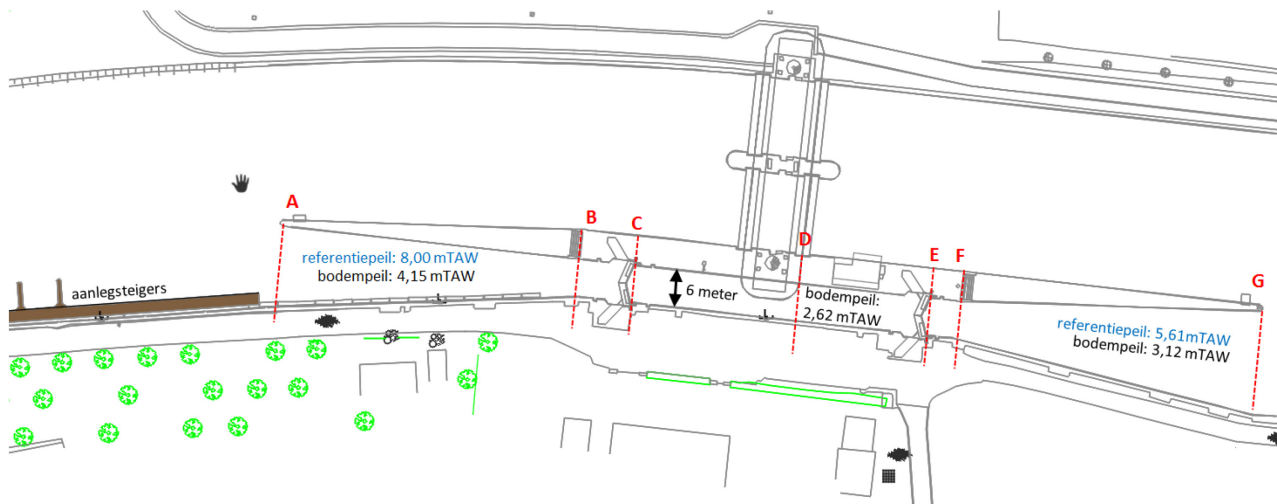


Andere belangrijke ruimtelijke randvoorwaarden vormen de breedte van de sluiscolk en de op- en afwaartse bodempeilen (zie ook Figuur 3 en Figuur 4):

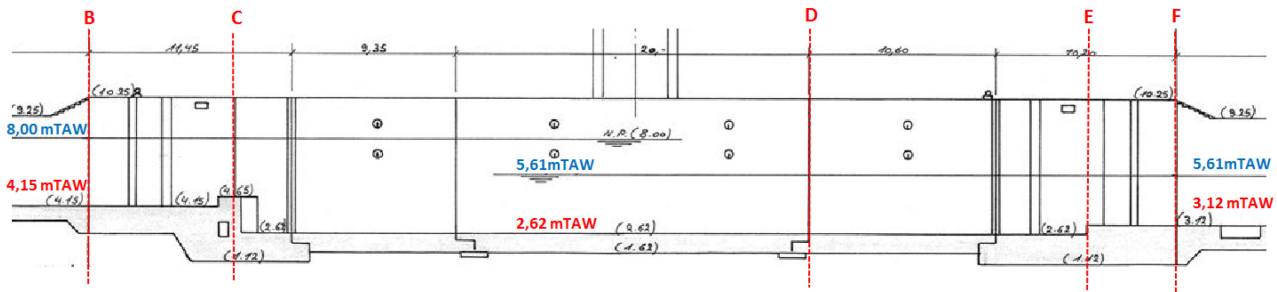
- Breedte sluiscolk = 6 m (tussen B en F);
- Opwaarts betonnen bodempeil = 4,15 mTAW (tussen A en C);
- Betonnen bodempeil sluis = 2,62 mTAW (tussen C en E);
- Afwaarts betonnen bodempeil = 3,12 mTAW (tussen E en G).

Naast deze ruimtelijke criteria wordt er vanuit landschappelijk historisch standpunt gezocht naar een ontwerp dat het aanzicht van de huidige sluis zo veel mogelijk behoudt. Dit mag echter niet ten koste gaan van de effectiviteit van de vispassage (hoofddoelstelling).

Figuur 3 – Indeling en bodempeilen beschikbare ruimte



Figuur 4 – Langdoorsnede sluiscolk / beschikbare ruimte



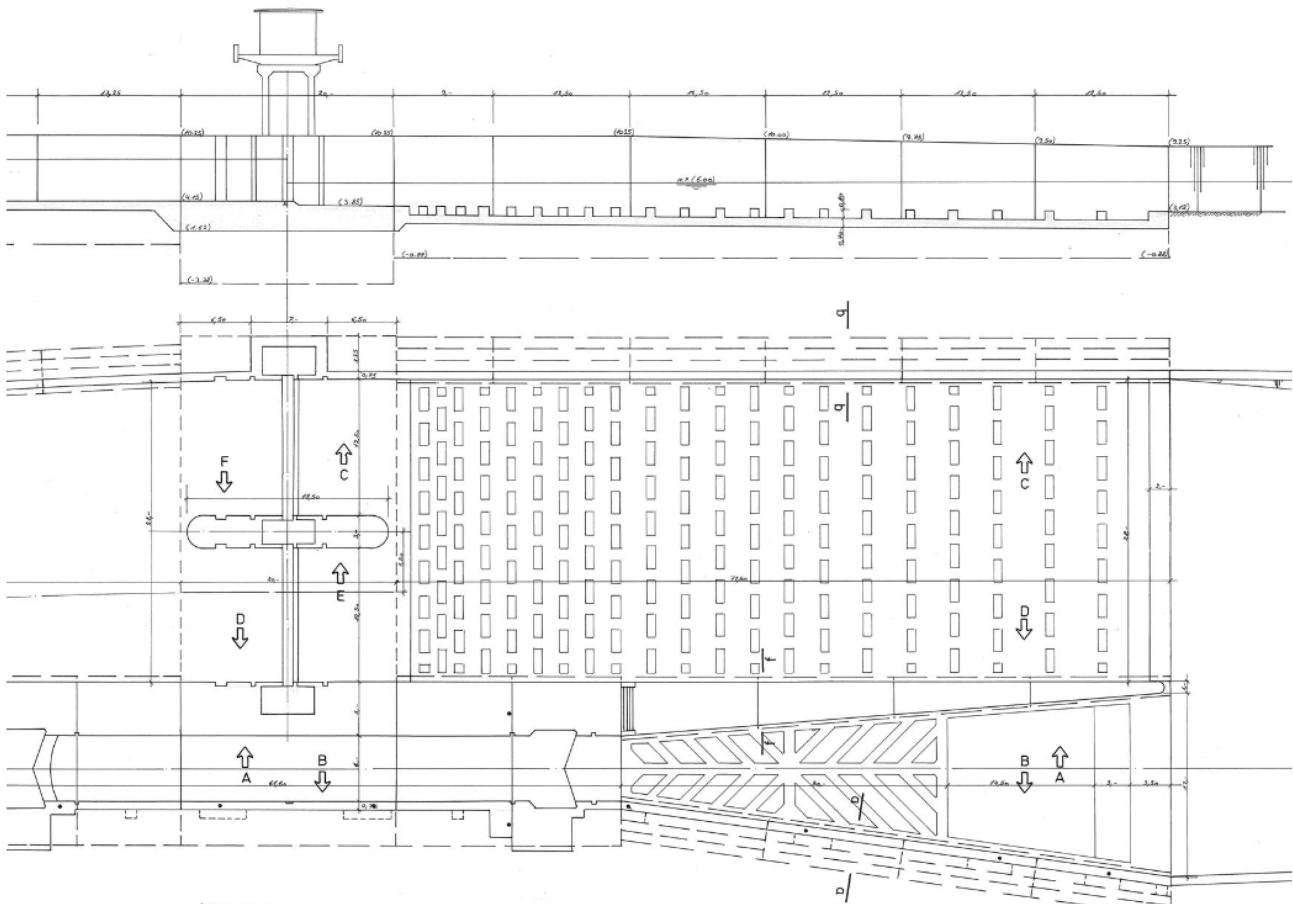
De inrichting van de nieuwe vispassage mag de afvoercapaciteit van de stuwgeul niet negatief beïnvloeden. M.a.w. de minimale dwarssectie van de stuwgeul dient ten allen tijde vrij te blijven.

Een bovenaanzicht en doorsnede van de stuw wordt gegeven in Figuur 5. Bemerkt hierin dat de bodem van de stuwgeul over een lengte van 68 m verruwd is. De bodem van de stuwgeul is over deze zone met 0,80 m verdiept. In deze verdiepte zone worden dissipatiebalken met hoogte 0,80 m in dwarse rijen geplaatst. De balken zijn geschrant geplaatst en de afstand tussen twee rijen neemt toe met de afstand tot de stuw. De breedte van de stuwgeul is constant. Wel neemt het bodempeil over de zone met de verruwde bodem af van 3,85 mTAW tot 3,12 mTAW.

Bemerkt dat bij heffen van de stuwen bodemnabije stroming ontstaat. Door de verruwde bodem zal de dissipatie te Sint-Baafs-Vijve sneller gebeuren dan bij een gladde bodem. De bodemnabije stroming zal ten gevolge van deze verruwing zeer turbulent zijn, alsook zal de berekende lengte voor de watersprong slechts een benadering zijn. Voor het ontwerp van de stuw en de knik in de bodem onder de stuw werd schaalmodelonderzoek uitgevoerd door WL (Lamoen, 1947, 1952). Dit onderzoek focuste op de stuw zelf.

De bodem afwaarts de stuwen was hier vlak en na ca. 8,35 m nam de dwarssectie sterk toe in breedte. WL heeft geen weet van een bron waarin het hydraulisch ontwerp van de verruwde bodem beschreven wordt.

Figuur 5 – Geometrie stuwgeul – lengteprofiel en bovenaanzicht



Bron: DVW, plan nr. 01-2-510-004-01/02 (sluis) en nr. 02-2-510-004-01/02 (stuw)

## 2.2 Ontwerpcriteria

### 2.2.1 Doelsoorten

Tabel 1 geeft een overzicht van in de Leie gevangen vissoorten. Rivierherstelmaatregelen, zoals de bouw van vispassages op de Leie zijn belangrijk voor alle vissoorten (i.e. diadrome en potamodrome vissoorten).

Tabel 1 - Overzicht van de vissoorten die in de Leie werden gevangen tussen 2007 en 2018

Nederlandse naam*	Wetenschappelijke naam	Status** (rode lijst)	Migratietype	Sprintsnelheid (m/s)***
alver	<i>Alburnus alburnus</i>	BiG	Regionaal	nb
baars	<i>Perca fluviatilis</i>	NiG	Lokaal / Regionaal	1,5
bermpje	<i>Barbatula barbatula</i>	NiG	Lokaal	1,5
bittervoorn	<i>Rhodeus sericeus</i>	NiG	Lokaal	nb
blankvoorn	<i>Rutilus rutilus</i>	NiG	Lokaal / Regionaal	2,1-4,5
blauwbandgrondel	<i>Pseudorasbora parva</i>	UIT	Lokaal	nb
bot	<i>Platichthys flesus</i>	NiG	Diadroom	nb
brasem	<i>Abramis brama</i>	NiG	Lokaal / Regionaal	0,9-1
driedoornige stekelbaars	<i>Gasterosteus aculeatus</i>	NiG	Diadroom / Lokaal	1,5
Europese meerval	<i>Silurus glanis</i>	NiG	Lokaal / Regionaal****	nb
giebel	<i>Carassius gibelio</i>	UIT	Lokaal	2-2,2
karper	<i>Cyprinus carpio</i>	UIT	Lokaal / Regionaal	0,6-1,7
kolblei	<i>Blicca bjoerkna</i>	NiG	Lokaal	nb
kleine modderkruiper	<i>Cobitis taenia</i>	BiG	Lokaal	nb
paling	<i>Anguilla anguilla</i>	B	Diadroom	0,5-1
pos	<i>Gymnocephalus cernuus</i>	NiG	Lokaal	1,3
regenboogforel	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	UIT	Regionaal	8,0
rietvoorn	<i>Scardinius erythrophthalmus</i>	NiG	Lokaal	1,7
riviergrondel	<i>Gobio gobio</i>	NiG	Lokaal	0,6-2
rivierprik	<i>Lampetra fluviatilis</i>	K	Diadroom	1-1,3
snoek	<i>Esox lucius</i>	NiG	Lokaal / Regionaal	3-6,9
snoekbaars	<i>Sander lucioperca</i>	UIT	Lokaal / Regionaal	1,5-1,8
tiendoornige stekelbaars	<i>Pungitius pungitius</i>	NiG	Lokaal / Regionaal	nb
vetje	<i>Leucaspis delineatus</i>	BiG	Lokaal	nb
winde	<i>Leuciscus idus</i>	K	Lokaal / Regionaal	nb
zeelt	<i>Tinca tinca</i>	NiG	Lokaal	nb
zonnebaars	<i>Lepomis gibbosus</i>	UIT	Lokaal	nb

\*Bron lijst en gegevens: (<https://vis.inbo.be/>) aangevuld met de waarneming van kleine modderkruiper in 2007 (Van Thuyne & Breine, 2008) en rivierprik in 2008 (Stevens *et al.* 2009); Rivierprik trekt vanuit de Zeeschelde o.a. tot in de Bovenschelde, de Leie, de Dijle, de Kleine Nete, ... (Buysse D., mondelinge mededeling).

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

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

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

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 zijn opgesteld op basis van de vissoorten uit zowel Tabel 1 als Tabel 2, en 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*	Sprintsnelheid (m/s)*
Atlantische steur	<i>Acipenser sturio</i>	Anadroom	nb
Elft	<i>Alosa alosa</i>	Anadroom	nb
Kopvoorn	<i>Squalius cephalus</i>	Lokaal / Regionaal	0,5-3,8
Serpeling	<i>Leuciscus leuciscus</i>	Lokaal / Regionaal	2,4
Zeeprik	<i>Petromyzon marinus</i>	Anadroom	1,2

\*Bron migratietype en sprintsnelheden: (Kroes & Monden, 2005) , nb = niet bekend bij auteurs.

### 2.2.2 Periode optimale werking

Uit onderzoek naar het migratiegedrag van de doelsoorten blijkt dat het van belang is dat in principe gestreefd dient te worden naar een 100% werkingspercentage (i.e. het jaar rond). De soorten 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.

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.*, 2003). 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). 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 100% werkingspercentage te halen. Voor het minimale percentage van de tijd waarbij de vispassage dient te kunnen werken wordt daarom vaak het "Q<sub>30d</sub>-Q<sub>330d</sub>-criterium" toegepast (Schwevers, 2006; Dumont, 2006). Dit **debietscriterium** 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<sub>10%</sub>-Q<sub>90%</sub>" gebruikt (in plaats van de dag-notatie "Q<sub>30d</sub>-Q<sub>330d</sub>"):

- Q<sub>90%</sub> → 90% (= circa 330 dagen) van het jaar is het debiet groter;
- Q<sub>10%</sub> → 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) peilregeling** voor scheepvaart. Bij een vrij afstromende rivier of waterloop zijn waterstanden meestal direct gekoppeld aan het optredende debiet. In stuwpanden wordt door middel van stuwregeling echter gestreefd naar een vast waterpeil (het streefpeil), waardoor er geen direct verband is tussen waterstand en debiet. Met andere woorden verschillende debieten kunnen optreden bij een zelfde waterpeil. Onder normale omstandigheden zijn de waterstandfluctuaties in dit geval relatief gering en enkel bij zeer hoge afvoercondities (bijv. een was) stijgt het waterpeil mee met het toenemende debiet.

Vanuit het oogpunt van peilbeheer worden vispassages in stuwpanden tevens voorzien van een opwaartse afsluitconstructie met automatische regeling. De voorwaarde voor automatische sluiting wordt daarbij meestal gekoppeld aan een onderschrijding 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 afsluitschuij (en in tweede instantie ook de stuwregeling) op het openingspercentage van de vispassage relatief groot is (Visser *et al.*, 2013).

Het 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.

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

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

### 2.2.3 Passeerbaarheid

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

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

#### Maximale stroomsnelheden

Een belangrijk criterium voor de passeerbaarheid van een vispassage is de (maximale) stroomsnelheid waar vissen tegenop moeten zwemmen. Daarbij wordt in eerste instantie onderscheid gemaakt tussen twee zwemsnelheden van de vissen: de kruissnelheid en de sprintsnelheid. Tevens wordt in Kroes & Monden (2005) gesproken van een 'verhoogde snelheid' die ligt tussen de sprint- en kruissnelheid. De kruissnelheid is de snelheid die een vis langdurig kan aanhouden (> 200 minuten) zonder uitgeput te raken (Kroes & Monden, 2005). 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 (tot circa 30 m) kan ook een verhoogde snelheid toegepast worden in de beoordeling. Logischerwijs zijn de waarden voor de kruis- en sprintsnelheid verschillend per vissoort/doelsoort.

In Tabel 1 en Tabel 2 is een overzicht gegeven van respectievelijk in de Leie reeds voorkomende en in het Scheldebekken gewenste vissoorten met indicatie van vastgestelde sprintsnelheden (niet voor alle soorten gekend). De doelstelling is dat alle vissoorten kunnen passeren en dat de ontwerpcriteria zo gekozen worden dat er een 'effectieve multi-species migratiefaciliteit' gerealiseerd wordt (Foulds & Lucas, 2013).

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

- 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.



Merk op dat deze criteria voor stroomsnelheden gekoppeld zijn aan het verval per bekken en de stroomsnelheidsverdeling ter plaatse van de hindernis (te beoordelen per vispassagetype). Afhankelijk van de energieverliezen (ruwheid) per hindernis en de dimensionering van de natte sectie kan de gemiddelde stroomsnelheid bij een zelfde verval verschillen (bijv. verschillend bij een slot of een drempel). Voor een vertical slotpassage wordt gesteld dat het toelaatbare fysieke verval per bekken/slot voor laaglandrivieren ligt tussen de 8 en 10 cm. Uitgaande van deze toelaatbare range bij ontwerpcondities (lees: bij streefpeilen) wordt voor de verschillende sloten steeds gecontroleerd dat gemiddelde stroomsnelheden bij peilfluctuaties niet hoger gaan dan 1,0 m/s tot maximaal 1,5 m/s.

Met oog op peil- en/of debietfluctuaties is het dus van belang om de bovengrenzen van de maximale sprintsnelheden van doelsoorten niet als ontwerpstroomsnelheid (bij streefpeilen) voor de vispassages te kiezen. Daarnaast kost het passeren van veel opeenvolgende drempels of doorzwemopeningen en van verschillende opeenvolgende vispassages veel energie. Hierdoor is een vis aan het einde van de vispassage of na het passeren van een aantal vispassages niet meer in staat om zijn maximale sprintsnelheid te halen. Tenslotte komen hoge stroomsnelheden van nature niet voor in het laaglanddeel van rivieren als de Schelde en de Leie.

#### Minimale doorzwemdieptes en -breedtes

Naast stroomsnelheden spelen vervolgens ook minimale doorzwemdieptes en –breedtes een belangrijke rol ten aanzien van de passeerbaarheid van de passage. Uitgaande van de afmetingen die de grootste doelsoorten kunnen aannemen, dit zijn de Europese meerval (Tabel 1; zie ook foto in Figuur 6) en de Europese steur (Tabel 2) die beiden tot meer dan 2 m lang en een omvangrijke dikte kunnen uitgroeien, wordt er voor een robuust ontwerp en in overleg met het INBO de volgende ondergrens waarden vastgelegd:

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

---

Figuur 6 – Europese meerval (lengte bijna 1,5 m) gevangen in de vispassage in de Dijle te Rotselaar in juni 2020

---



Bron: INBO



In het geval van een vertical slotpassage wordt de slotbreedte logischerwijs bepaald door de minimale doorzweembreedte op korte afstand. Om te zorgen voor een robuust ontwerp met oog op mogelijk herstel van grotere vissoorten als de meerval en steur wordt gekozen voor een minimale slotbreedte van 0,50 m op de grotere waterlopen in Vlaanderen.

De minimale diepte over langere afstand geldt in dit geval vooral voor de bekkens en daarmee ook de slotdiepte. Deze diepte wordt vooral bepaald door het tegengaan van predatie (zichtdiepte) en door de verhouding tot de waterdiepte in de hoofdloop (niet te ondiep in vergelijking met de rivier zelf).

#### Maximale energie en turbulentie per bekken

Bij bekkenpassages wordt bij elke bekkenovergang energie doorgeven naar het afwaartse bekken. Deze toegevoegde energie is evenredig met het debiet en verval per bekkenovergang. Dissipatie van energie leidt tot een bepaalde mate van turbulentie. De wijze waarop deze energie in de bekkens terug gedissipeerd wordt en de mate van turbulentie die hierbij ontstaat speelt een belangrijke rol in de passeerbaarheid.

Om te beoordelen of de bekkens voldoende volume voor de benodigde dissipatie hebben, wordt in de literatuur de relatie tussen de energie van de stroming tot het volume van het bekken beschouwd (Larinier, 2002b). De maximaal toelaatbare verhouding van de toegevoegde energie per bekkenovergang tot het bekkenvolume (= toelaatbare energie per bekken  $E_{max}$ ) wordt in de literatuur gekoppeld aan drie categorieën van doelsoorten (Kroes & Monden, 2005):

- < 200 W/m<sup>3</sup> voor zalmachtigen;
- < 150 W/m<sup>3</sup> voor elft, fint en karperachtigen;
- < 100 W/m<sup>3</sup> voor snoek en snoekbaars.

Aangezien een aantal doelsoorten in het Scheldebekken zich in de categorie ‘snoek en snoekbaars’ bevinden en de vispassage ontworpen moet worden als een ‘effectieve multi-species migratiefaciliteit’ (Foulds & Lucas, 2013), is er in overleg met het INBO gekozen voor een maximaal toelaatbare turbulentie van 100 W/m<sup>3</sup>.

Naast energiedemping worden bekkenvolumes (en dan vooral lengtes) 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.

Tenslotte dienen complexe stroompatronen (hoge turbulente (wit water) en/of circulatieneren met te hoge snelheden) worden voorkomen. Vanuit dit oogpunt worden indien mogelijk ook best geen – of anders zo min mogelijk – (scherpe) bochten toegepast. Locaties in de vispassage waar stromingspatronen te complex zijn, zijn mogelijke punten waarop vissen terugkeren (bleek onder andere uit schriftelijke communicatie met Dr. Alexander Haro, Research ecologist and fish behavior expert bij de USGS<sup>1</sup>).

#### Samenvatting criteria passeerbaarheid

Tabel 4 geeft een samenvatting van de ontwerpcriteria met betrekking tot de passeerbaarheid zoals toegepast bij het ontwerp van de vispassage.

<sup>1</sup> Zie ook <https://www.usgs.gov/staff-profiles/alexander-haro>.

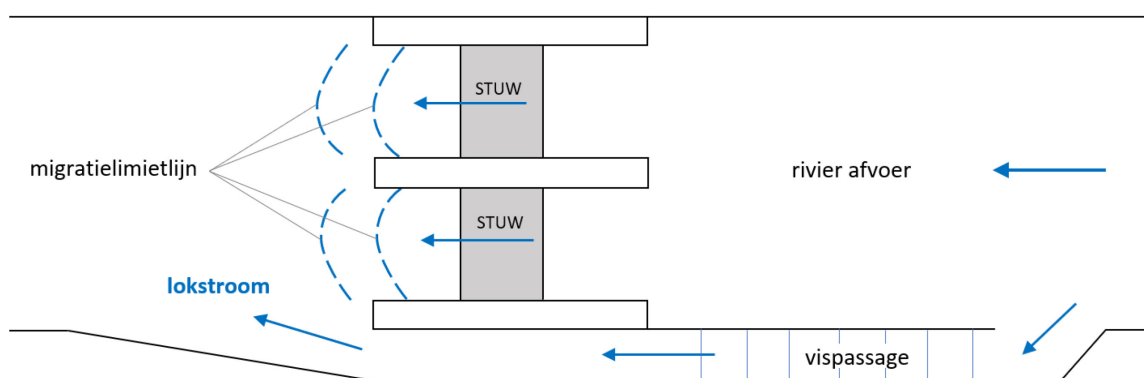
Tabel 4 – Biologische ontwerpcriteria passeerbaarheid vispassage

Omschrijving	parameter	Waarde en eenheid
Maximale stroomsnelheid over korte afstand (slot/ drempel)	Vmax_sprint	1-1,5 m/s
Maximale stroomsnelheid over langere afstand (bekkens)	Vmax_kruis	0,5 m/s
Minimale lokale doorzweembreedte over korte afstand (slot)	bmin	0,50 m
Minimale doorzweembreedte over korte afstand (drempel)	dmin	0,50 m
Minimale doorzweembreedte over langere afstand (bekkens)	dbmin	1 – 1,5 m
Maximaal toelaatbare turbulentie	E <sub>max</sub>	100 W/m <sup>3</sup>

### 2.2.4 Attractiviteit (mondig)

De attractiviteit van de vispassage wordt gedefinieerd als de mate waarin vissen de passage kunnen vinden tijdens hun stroomopwaartse migratiebeweging. Hierbij speelt naast het lokstroomdebiet ook de locatie en oriëntatie van de monding en lokstroom ten opzichte van de zogenaamde migratielimietlijn een belangrijke rol. De migratielimietlijn (Figuur 7) is de grens van het gebied waarin de turbulenties of stroomsnelheden voor de vis te hoog zijn om nog te kunnen optrekken. Vanaf deze lijn zoekt de vis naar een alternatieve trekroute.

Figuur 7 – Relatie migratielimietlijn en monding vispassage



naar: Kroes & Monden, 2005

De ligging van de migratielimietlijn kan voor een gegeven stuw verschillen in de tijd aangezien deze afhankelijk is van het debiet, het afwaarts waterpeil en de toegepaste stuwregeling (overstort, onderstroming of een combinatie). Daarnaast kan de ligging verschillen per vissoort aangezien de sprintsnelheid verschilt. Vaak heeft de migratielimietlijn meestal ook een zekere bolling aangezien de stroomsnelheid in het midden van de stroom meestal hoger is dan aan de oevers. Vissen kunnen hierdoor de stuw vaak dichter naderen aan de oevers en zullen zich daar dan ook verzamelen.

Aangezien de ligging van de limietlijn varieert met de grootte van het debiet over de stuwen kan eerder gesproken worden van een 'migratielimietzone'. De monding wordt idealiter best net in en net afwaarts van deze zone gekozen. De boven- en ondergrenzen van deze zone zijn verbonden met het debietcriterium voor optimale werking zoals beschreven in paragraaf 2.2.2, het zogenaamde  $Q_{10\%}$ - $Q_{90\%}$ -criterium. Wanneer de monding van de vispassage te ver stroomafwaarts van het migratieknelpunt gelegen is, bestaat het risico dat vissen de ingang niet vinden en zich nabij de migratielimietzone (net afwaarts van het knelpunt) blijven verzamelen.

Met oog op de oriëntering van de monding bestaan er twee typen:

- **Parallele monding:** een uitstroom die parallel is aan de hoofdstroom en logischerwijs best direct naast het knelpunt (migratielimietzone) ligt (= meest opwaartse ontsnappingspunt);
- **Loodrechte monding:** een uitstroom die loodrecht (90°) of onder een hoek op de hoofdstroom staat om een lokstroom over een zo breed mogelijk deel van de hoofdstroom te realiseren.

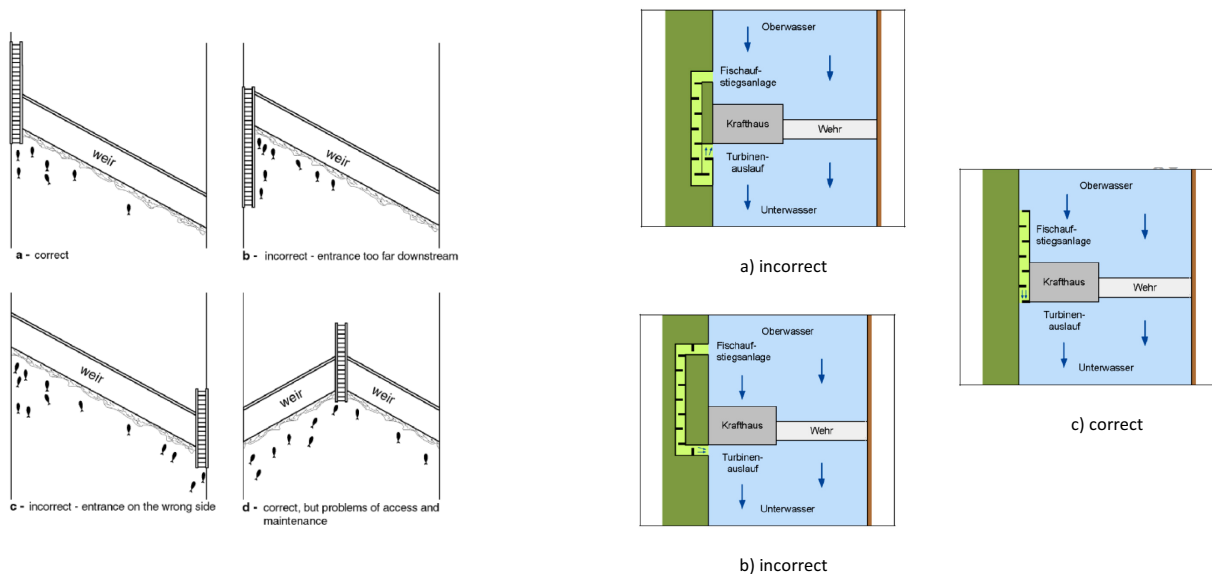
Vanuit praktijkervaring, toonaangevende internationale publicaties en overleg met internationale experts (o.a. Dr. Alexander Haro, Research ecologist and fish behavior expert bij de USGS, en Dr. Beate Adam, Institut für angewandte Ökologie<sup>2</sup>) wordt duidelijk de voorkeur gegeven aan parallelle mondingen (DWA, 2014; Larinier, 2002a). Figuur 8 toont voorbeelden van correcte en incorrecte inpassing van vispassagemondingen in toonaangevende internationale publicaties.

Het ontwerp van de parallelle monding gaat uit van het principe dat vissen zoeken naar het meest opwaarts gelegen ontsnappingspunt en niet geneigd zijn om af te wijken van de hoofdstroomrichting (schriftelijke communicatie met Dr. Beate Adam). Daarnaast kunnen zijdelingse stromingen leiden tot complexe en daarmee verwarrende stromingspatronen. Ook is het moeilijk om met een loodrechte monding de volledige migratielimietzone te bereiken.

Loodrechte mondingen kunnen echter wel als een soort ‘back-up’ optie worden toegepast, voor het geval een parallelle monding (ruimtelijk gezien) niet mogelijk is en/of de monding relatief veraf gelegen is van het migratieknelpunt (stuw). Hierbij wordt de stroom dan enigszins geknepen en wordt het lokstroomdebiet zo gekozen dat de lokstroom over zo goed als de volledige breedte van de hoofdstroom voelbaar is (Kroes & Monden, 2005; Meersschant *et al.*, 1998).

DWA (2014) geeft voor mondingsvarianten gelegen tussen parallel en loodrecht een richtlijn voor de maximale hoek van de monding ten opzichte van de hoofdloop van 30° tot maximaal 45°. Voor de grootte van het benodigde lokstroomdebiet wordt verwezen naar paragraaf 2.3.4.

Figuur 8 – Correcte en incorrecte inpassing vispassage monding



(Larinier, 2002a)

(DWA, 2014)

<sup>2</sup> Zie ook <http://www.ethohydraulik.de/index.html>

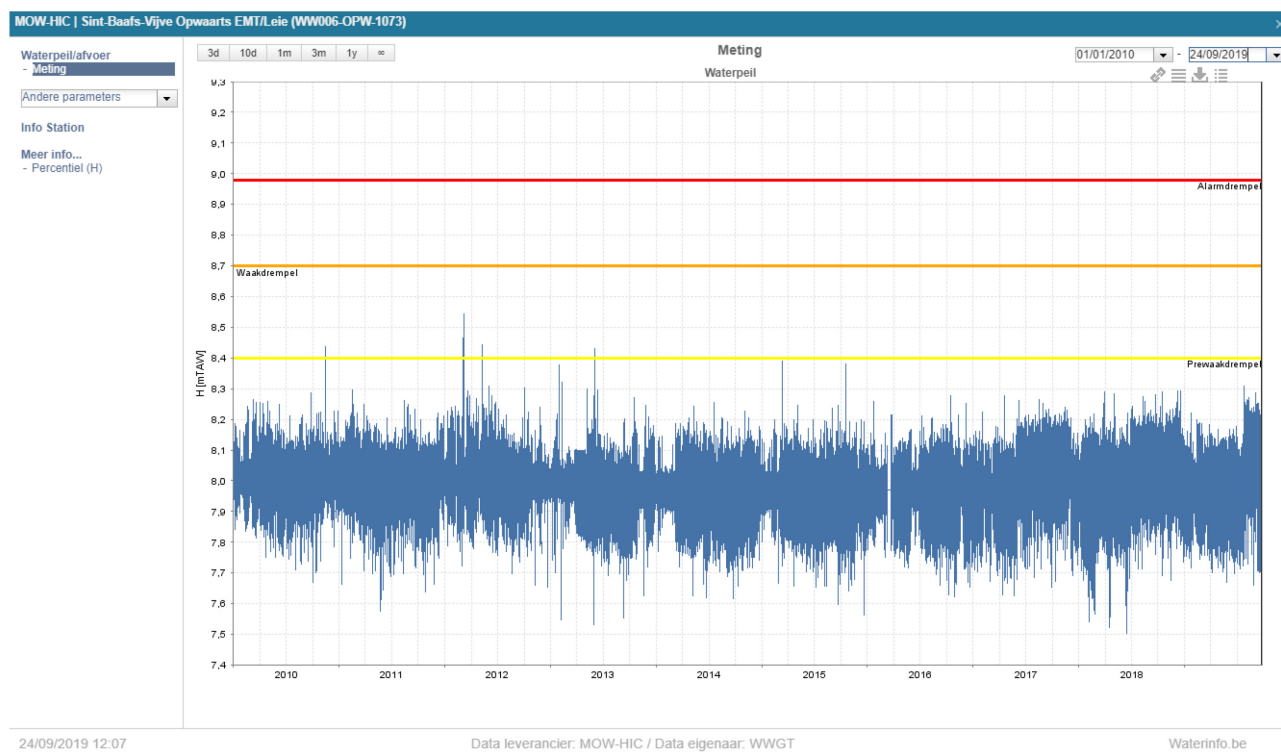
## 2.3 Hydraulische randvoorwaarden

### 2.3.1 Streefpeilen en alarmpeilen

De hydraulische randvoorwaarden ten aanzien van het op- en afwaartse peil van het stuwsluis-complex te Sint-Baafs-Vijve zijn door DVW vastgesteld op (zie ook Figuur 9):

- Opwaarts streefpeil: 8,00 mTAW
- Afwaarts streefpeil: 5,61 mTAW
- Totaal verval bij streefpeilen: 2,39 m
- Prewaakdrempel: 8,40 mTAW
- Waakdrempel: 8,70 mTAW
- Alarmdrempel: 8,98 mTAW
- Opwaarts laagwater-alarmpeil: 7,75 mTAW

Figuur 9 – Weergave metingen opwaarts waterpeil voor de periode 2010 tot heden op Waterinfo



### 2.3.2 Histogram debiet en op- en afwaartse waterstanden

Tabel 5 toont een histogram (percentage overschrijdingskans) van de gemeten op- en afwaartse waterstanden te Sint-Baafs-Vijve en het gemeten debiet te Menen (opwaarts Sint-Baafs-Vijve) op basis van metingen over de volledige beschikbare meetperiode voor elke meetpost.

Tabel 5 – Histogram historische metingen op- en afwaarts waterpeil te SBV en debiet te Menen

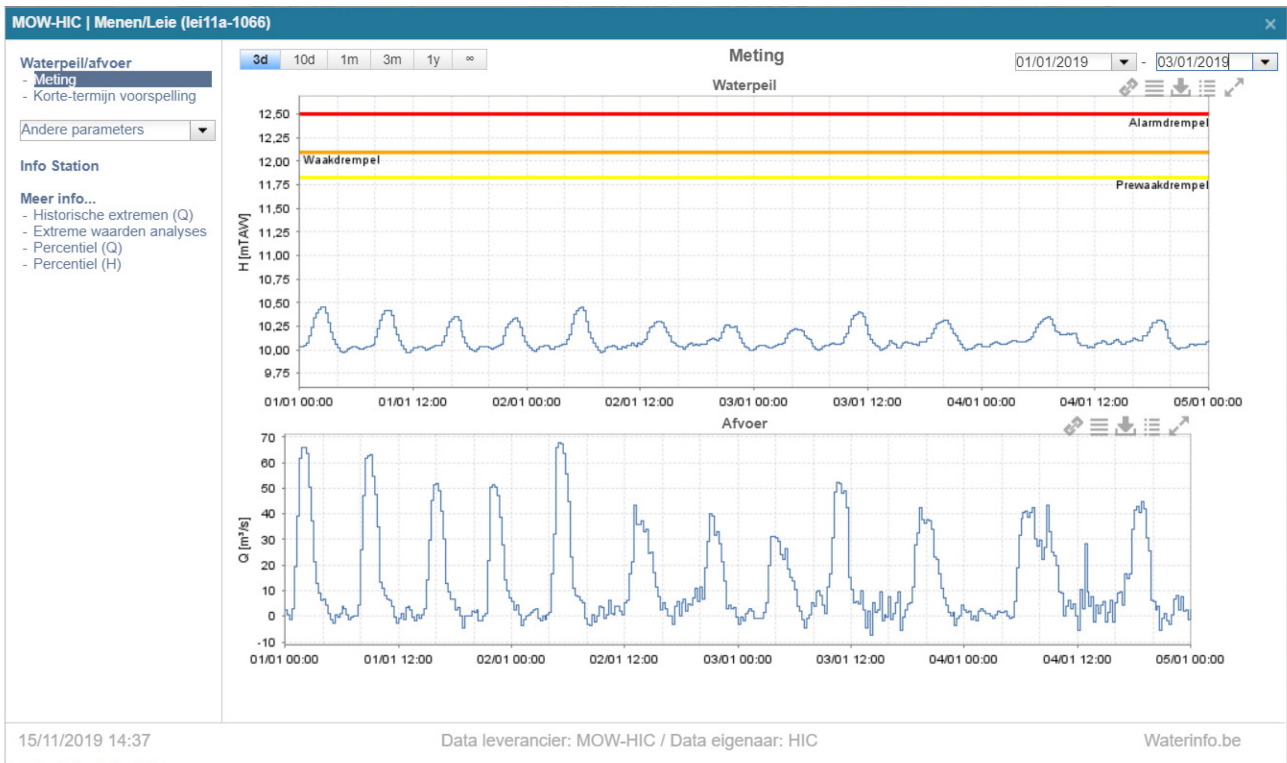
Meetlocatie:	Debiet Menen (m <sup>3</sup> /s)			Opwaarts waterpeil	Afwaarts waterpeil
	lei11a-1066			WW006-OPW-1073	WW006-AFW-1073
Frequentie:	15 min	60 min	Dag	5 min	5 min
Begin reeks:	1/01/2007	1/01/2007	1/01/2007	31/01/1995	31/01/1995
Einde reeks:	31/12/2018	31/12/2018	31/12/2018	31/12/2018	31/12/2018
Percentage	Q_15min	Q_60min	Q_dag	Ho (mTAW)	Ha (mTAW)
0,1%	174,80	174,48	165,26	8,19	8,44
1%	120,26	120,01	115,74	<b>8,10</b>	7,41
5%	77,95	77,28	71,00	8,04	6,58
10%	<b>60,80</b>	60,22	52,81	8,02	6,27
20%	44,47	43,68	36,44	8,00	6,07
30%	33,72	33,57	28,60	7,98	5,97
40%	26,49	26,21	23,52	7,97	5,89
50%	<b>19,79</b>	19,69	19,69	7,96	<b>5,83</b>
60%	13,36	13,62	16,52	7,95	5,79
70%	7,80	8,24	13,74	7,94	5,75
80%	4,12	4,22	10,67	7,92	5,72
90%	<b>1,35</b>	1,86	<b>8,02</b>	7,88	5,69
95%	-0,09	0,82	6,47	7,85	5,67
99%	-2,23	-0,55	5,02	<b>7,79</b>	<b>5,62</b>
99,9%	-5,30	-1,60	3,88	7,69	5,57

Bij het histogram uit Tabel 5 wordt het volgende opgemerkt:

- Voor het debiet te Menen zijn drie frequentiereksen gegeven, namelijk de kwartiergemiddelde waarde (werkelijk gemeten waarde), de uurgemiddelde waarden en daggemiddelde waarden (beide laatste zijn afgeleid van de gemeten kwartierreeks). Dit is gedaan om de invloed van de huidige en relatief grote debietschommelingen te Menen op vooral de ondergrens waarde (Q<sub>90%</sub>) te laten zien. Merk op dat de daggemiddelde waarde circa 8 m<sup>3</sup>/s is, terwijl de kwartiergemiddelde waarde nog circa 1,4 m<sup>3</sup>/s is.
- Deze schommelingen worden waarschijnlijk veroorzaakt door peilregeling opwaarts Menen en hebben een relatief grote invloed op het waterpeil en daarmee alle automatische regelconstructies (o.a. de stuwen). Dit zogenaamde “zaagtand-effect” in de afvoer zorgt er voor dat het debiet over de stuwen te Harelbeke en Sint-Baafs-Vijve circa drie maal per dag opbouwt en afbouwt van 0 tot circa 60 m<sup>3</sup>/s. Zie voorbeeld van dit zaagtand-effect in Figuur 10. De op- en afbouw van het debiet gebeurt meestal binnen circa 3 uur, waarna het debiet gedurende 3 uur zeer laag of zo goed als nul blijft.
- Het gemiddelde afwaartse peil (Ha<sub>50%</sub> = 5,83 mTAW) ligt circa 20 cm hoger als het streefpeil van 5,61 mTAW. Waterstanden lager als streefpeil komen tevens minder dan 1 % van de tijd voor.

- Met blauwe arcering zijn maatgevende waarden aangeduid voor het bepalen van de hydraulische randvoorwaarden. De vetgedrukte waarden zijn daarbij het meest sturend. De maatgevende hydraulische randvoorwaarden worden verder uitgewerkt in de paragrafen 2.3.3 (waterpeilfluctuatie) en 2.3.4 (debiet).

Figuur 10 – Voorbeeld huidige en relatief sterke schommelingen in debiet te Menen



### 2.3.3 Waterpeilfluctuaties en maatgevend verval

Voor de ontwerpberekeningen is naast de afzonderlijke op- en afwaartse peilen ook steeds het verval  $dH$  (m.a.w. de combinatie van op- en afwaarts peil) van belang. Daarom zijn de hoogfrequente meetgegevens van op- en afwaarts waterpeil en het bijbehorende verval voor de periode 2010 - 2018 geanalyseerd. De hoogfrequente data betreft de 5-minuutregistraties van het op- en afwaartse waterpeil van dezelfde meetposten uit Tabel 5.

Tabel 6 toont het histogram van het hydraulisch verval ( $dH = H_o - H_a$ ) voor de periode 2010-2018 in klassen van 5 cm. In Tabel 6 worden voor diezelfde klassen ter info ook de percentages van voorkomen gegeven van het op- en afwaarts peil in dezelfde periode, maar hierbij wordt wel opgemerkt dat deze peilen niet één op één gecombineerd kunnen worden met het percentage van voorkomen van het verval. M.a.w. het zijn drie afzonderlijke histogrammen. Een zelfde verval kan bestaan uit een combinatie een verschillende op- en afwaartse peilen.

Tabel 6 – Histogram hydraulisch verval voor de periode 2010 - 2018

verschil		dH	Cum		Ho	Cum		Ha	Cum
[m]		[m]	[%]		[mTAW]	[%]		[mTAW]	[%]
0,30		2,69	0,000		8,30	0,06		5,91	37,3
0,25		2,64	0,001		8,25	0,09		5,86	43,7
0,20		2,59	0,004		8,20	0,15		5,81	52,1
0,15		2,54	0,019		8,15	0,34		5,76	64,3
0,10		2,49	0,11		8,10	1,35		5,71	80,4
0,05		2,44	0,56		8,05	5,53		5,66	93,3
0,00		2,39	1,74		8,00	22,88		5,61	98,7
-0,05		2,34	4,46		7,95	62,38		5,56	99,8
-0,10		2,29	9,67		7,90	83,67		5,51	99,98
-0,15		2,24	18,43		7,85	93,94		5,46	100,00
-0,20		2,19	31,71		7,80	98,41		5,41	100,00
-0,25		2,14	44,16		7,75	99,60		5,36	100,00
-0,30		2,09	54,94		7,70	99,90		5,31	100,00

Uit de analyse en de histogrammen uit Tabel 5 en Tabel 6 wordt het volgende afgeleid:

- Het verval (dH) is minder dan 2% van de tijd groter dan het verval bij streefpeilen (Tabel 6). Dit wordt vooral veroorzaakt doordat de gemiddelde waterstand in het afwaartse pand circa 20 cm hoger ligt als streefpeil.
- Verhoging van het opwaarts waterpeil (Ho) met meer dan 10 cm komt minder dan 1% van de tijd voor (zie Ho<sub>1%</sub> in Tabel 5).
- Verlaging van het opwaarts peil (Ho) met meer dan 20 cm komt minder dan 1% van de tijd voor (zie Ho<sub>99%</sub> in Tabel 5). Deze waarde is van belang voor de instellingen voor de automatische regeling van de opwaartse afsluitconstructie van de vispassage en daarmee het openingspercentage.
- De toename van het afwaartse waterpeil (Ha) t.o.v. het streefpeil is logischerwijze hoger, aangezien bij verhoogde afvoer en/of wascondities het waterpeil in het afwaartse pand eerst zal toenemen (= afname verval over stuw) en pas daarna zal het opwaartse waterpeil meestijgen. Ha<sub>10%</sub> ligt met 6,27 mTAW dan ook 0,66 m boven streefpeil en Ha<sub>1%</sub> ligt met 7,41 mTAW zelfs 1,8 m boven het streefpeil (Tabel 5).
- Met oog op uitzonderlijke/ extreme situaties werden de volgende meest kritische combinaties in de onderzochte periode gevonden:
  - Het maximale verval (dH<sub>max</sub>) was 2,77 m (op 10/01/2018) en trad op bij een opwaarts waterpeil ongeveer gelijk aan streefpeil (7,98 mTAW) en een sterk verlaagd afwaarts waterpeil (5,21 mTAW).
  - Het meest extreme verval bij een verhoogd opwaarts peil was een combinatie van een opwaarts peil van 8,42 mTAW (= 4 cm boven prewaakdrempel) en een verval van 2,70 m.
  - Het meest extreme verval bij verhoogd afwaarts waterpeil was een combinatie van een afwaarts waterpeil van 5,85 mTAW en een verval van 2,59 m. Dit laatste wordt echter niet weerhouden voor verdere berekeningen aangezien het grootste verval bij de hoogste opwaartse waterstand meer maatgevend is.
  - Bij opwaartse waterpeilen hoger dan circa 8,45 mTAW steeg het afwaartse waterpeil sneller dan het opwaartse waterpeil waardoor het verhang afnam totdat het afwaarts waterpeil nagenoeg gelijk werd aan het opwaartse waterpeil (wascondities).

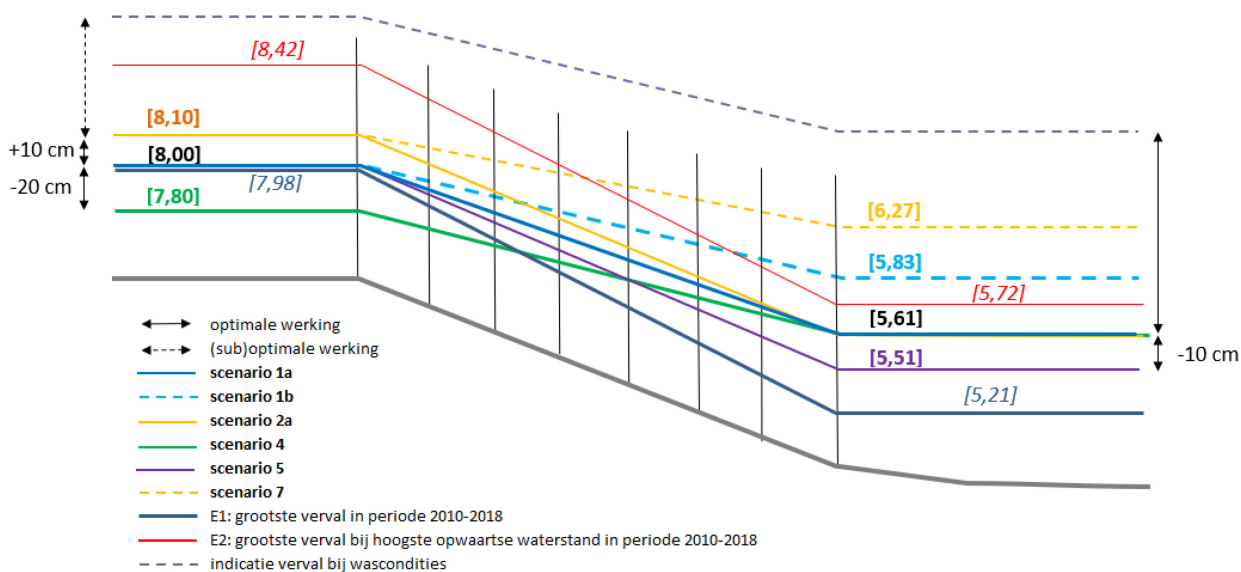


Op basis van bovenstaande constatering zijn maatgevende scenario's voor waterstandfluctuaties afgeleid die zullen worden toegepast bij de ontwerpberekeningen (Tabel 7). Ter verduidelijking geeft Figuur 11 tevens een visualisatie van enkele van deze scenario's.

Tabel 7 – Scenario's waterstandsfluctuaties voor ontwerpberekeningen

Scenario	Opwaarts peil		Afwaarts peil		Verval		Beschrijving
	Ho [mTAW]	Ho+/- [m]	Ha [mTAW]	Ho+/- [m]	dH [mTAW]	dH+/- [m]	
1a	8,00	0,00	5,61	0,00	2,39	0,00	Op- en afwaarts streefpeil
1b	8,00	0,00	5,83	0,22	2,17	-0,22	Opw. streefpeil en gemiddeld afw. peil (Ha <sub>50%</sub> )
2a	8,10	0,10	5,61	0,00	2,49	0,10	Verhoogd opw peil (Ho <sub>1%</sub> ) en afw. streefpeil
2b	8,10	0,10	5,83	0,22	2,27	-0,12	Verhoogd opw peil (Ho <sub>1%</sub> ) en gemid. afw. peil (Ha <sub>50%</sub> )
3a	8,20	0,20	5,61	0,00	2,59	0,20	Uitz. hoog opw peil (Ho <sub>0,1%</sub> ) en afw. streefpeil
3b	8,20	0,20	5,83	0,22	2,37	-0,02	Uitz. hoog opw peil (Ho <sub>0,1%</sub> ) en gemid. afw. peil (Ha <sub>50%</sub> )
4	7,80	-0,20	5,61	0,00	2,19	-0,20	Laag opw. peil (Ho <sub>99%</sub> ) en afw. streefpeil
5	8,00	0,00	5,51	-0,10	2,49	0,10	Opw. streefpeil en laag afw. peil (<Ha <sub>99,9%</sub> )
6	8,00	0,00	5,41	-0,20	2,59	0,20	Opw. streefpeil en uitzonderlijk laag afw. peil
7	8,10	0,10	6,27	0,66	1,83	-0,56	Verhoogd opw peil (Ho <sub>1%</sub> ) en verhoogd afw. peil (Ha <sub>10%</sub> )
E1	7,98	-0,02	5,21	-0,40	2,77	0,38	Grootste verval in periode 2010-2018 (vond plaats op 10/01/2018)
E2	8,42	0,42	5,72	0,11	2,70	0,31	Grootste verval in combinatie met hoogste opwaarts peil in periode 2010-2018 (vond plaats op 10/05/2012)

Figuur 11 – Visualisatie maatgevende en extreme scenario's op- en afwaartse waterstanden





Afhankelijk van het type berekening (bijv. ontwerp vispassage of bepaling lengte watersprong) zijn bepaalde scenario's maatgevend. Daarbij worden drie typen scenario's onderscheiden:

- Maatgevende scenario's voor optimale passeerbaarheid van de vispassage in de minimaal vereiste periode. Wanneer binnen deze scenario's voldaan kan worden aan de ontwerpcriteria uit Tabel 4 zou de vispassage op basis van de historische waterstanden voor meer dan 98% van de tijd goed passeerbaar zijn. Dit betreft scenario's 1, 2, 4, 5 en 7.
- Aanvullende scenario's voor robuust ontwerp. Door rekening te houden met fluctuaties van +/- 0,20 m ten opzichte van streefpeil wordt het ontwerp robuuster en minder gevoelig aan eventuele aanpassing (of herstel) van streefpeilen. Dit betreft scenario's 3 en 6.
- Extreme scenario's in uitzonderlijke situaties (kans op voorkomen kleiner dan 2%) voor controle van het risico op schade en bepalen van de mate van passeerbaarheid bij suboptimale condities (hoogste vervallen tijdens onderzochte periode). Dit betreft scenario's E1 en E2.

Merk op dat voor scenario's 1, 2 en 3 in Tabel 7 ook steeds een b-variant is opgenomen om het effect van het structureel hogere afwaartse peil te kunnen bepalen.

Met het oog op de automatische regeling van de opwaartse afsluitconstructie en een zo hoog mogelijk openingspercentage wordt voor het opwaarts waterpeil een maximale daling tot 20 cm onder streefpeil voorgesteld. Deze waarde is ook zo toegepast in verkennende simulaties voor de toekomstige stuw- en hefschuifregeling op de Leie ( zie hoofdstuk 7). Deze waarde dient echter nog wel afgestemd te worden met de minimale vereiste waterdiepte voor de scheepvaart en is verbonden aan het toe te passen vispassagedebiet. In periodes van lage afvoer kan het toelaten van deze daling er namelijk voor zorgen dat er voldoende buffervolume in het opwaartse pand aanwezig is om sluiting van de vispassage te voorkomen. Dit wordt verder toegelicht in paragraaf 2.3.4 en 7.1.

#### 2.3.4 Debiet vispassage en lokstroom

Ten aanzien van het ontwerpdebiet voor de vispassage (het lokstroomdebiet) worden de volgende ontwerprichtlijnen toegepast:

- de vispassage dient minimaal te kunnen werken bij een rivierdebiet dat meer dan 90% van de tijd en minder dan 10% van de tijd wordt overschreden, zie het 'debiet-criterium' met betrekking tot de minimale periode van optimale werking in paragraaf 2.2.2;
- voor de range van het lokstroomdebiet wordt best gestreefd naar een zo groot mogelijk debiet tussen circa 10% van het gemiddelde debiet ( $Q_{50\%}$ ) en circa 10% van het hoogste maatgevende debiet ( $Q_{10\%}$ ), naar richtlijnen uit Kroes & Monden (2005);
- met oog op een zo hoog mogelijk openingspercentage wordt het vispassagedebiet best zo laag mogelijk gekozen, om ook in periodes met lagere afvoer op de rivier toch open te kunnen blijven.

Tabel 8 toont de  $Q_{90\%}$ -,  $Q_{50\%}$ - en de  $Q_{10\%}$ -waarden voor het debiet op de Leie in Meneu zoals afgeleid uit het histogram in Tabel 5. Vanwege de aanwezigheid van het zogenoemde 'zaagtand-effect' in de afvoer op de Leie (zie ook 2.3.2) worden daarbij zowel de daggemiddelde als kwartiergemiddelde waarden gegeven. Dit verschil speelt namelijk vooral bij de lagere afvoer ( $Q_{90\%}$ ) een belangrijke rol bij de bepaling van het meest optimale vispassagedebiet om een zo hoog mogelijk openingspercentages van de vispassage te kunnen realiseren. Voor de bepaling van de maximaal benodigde lokstroom kan worden uitgegaan van de daggemiddelde waarden.

Tabel 8 – Maatgevende debieten op de Leie te Menen voor bepaling ontwerpdebiet vispassage

Omschrijving	parameter	Kwartiergemiddelde	Daggemiddelde
Debiet dat 30 dagen per jaar wordt overschreden [m <sup>3</sup> /s]	Q <sub>10%</sub>	60,80	52,81
Debiet dat de helft van het jaar wordt overschreden [m <sup>3</sup> /s]	Q <sub>50%</sub>	19,79	19,69
Debiet dat 330 dagen per jaar wordt overschreden [m <sup>3</sup> /s]	Q <sub>90%</sub>	1,35	8,02

De boven- en ondergrens voor de range van het nodige lokstroomdebiet worden vervolgens bepaald uit de daggemiddelde waarden van Q<sub>10%</sub> en Q<sub>50%</sub>:

- $Q_{lok_{min}} = 19,79/10 \approx 2 \text{ m}^3/\text{s}$
- $Q_{lok_{max}} = 52,81/10 \approx 5 \text{ m}^3/\text{s}$

Hierbij wordt opgemerkt dat deze range eerder een voor dit type rivier gekozen richtlijn betreft en niet een absoluut criterium. De haalbaarheid van dergelijke richtlijnen is namelijk afhankelijk van de grootte van de rivier en ook de oriëntering van de monding zelf. In het geval van rivieren met een zeer grote afvoer (zoals bijv. de Maas en de Rijn) zijn deze percentages logischerwijze niet haalbaar. In principe wordt een optimaal lokstroomdebiet voor elke afzonderlijke inpassing van de monding tevens ook best gevalideerd door middel van een numerieke of schaalmodelstudie (zeker in geval van loodrechte mondingen met knijpconstructies). Aangezien dit niet voor elke ontwerpstudie mogelijk is, dienen de boven- en ondergrenzen als goede handvaten om op basis van expert judgement en andere ontwerpcriteria een zo optimaal mogelijk lokstroomdebiet te kunnen bepalen. Aangezien de attractiviteit (= de vindbaarheid) van de vispassage een zeer belangrijke invloed heeft op de daadwerkelijke effectiviteit van de vispassage wordt het lokstroomdebiet best zo hoog mogelijk gekozen zonder dat de criteria voor maximale stroomsnelheden worden overschreden.

Aan de andere kant wordt het debiet over de vispassage best zo laag mogelijk gekozen om vroege sluiting bij lagere afvoer op de rivier te voorkomen (zie derde ontwerprichtlijn hierboven). De twee en derde ontwerprichtlijn ten aanzien van het debiet lijken daarmee in conflict met elkaar.

Om deze ogenschijnlijke tegenstrijdigheid op te lossen wordt er voor gekozen om te werken met een zogenaamd toegevoegd debiet. Bij dit principe stroomt een (groot) deel van het totale lokstroomdebiet via een bypass om de vispassage heen en wordt pas ingelaten (toegevoegd) net afwaarts van het laatste vispassagebekken en net opwaarts van de monding. In de ons omringende streken (bv. in Frankrijk, Duitsland en Wallonië) wordt dit principe al concreet toegepast bij vooral vertical slotpassages aangezien dergelijke ontwerpen niet toelaten om voldoende debiet over de vispassage zelf te laten stromen (Larinier, 2002a; DWA, 2014).

Mogelijke voordelen van het concept van toegevoegd debiet zijn daarmee:

- Een beperkt basisdebiet over de vispassage zelf laat toe om de vispassage ook bij lagere afvoerdebieten in bedrijf te houden;
- Het regelbare toegevoegde debiet laat tevens toe om voor een groter bereik van afvoerdebieten een voldoende grote lokstroom te creëren;
- Eventuele beperking van de afmetingen van de vispassage zelf in overeenstemming met het relatief kleinere basisdebiet over de vispassage zelf;

- Het regelbare toegevoegde debiet kan in sommige gevallen zelfs toelaten om het opwaarts peil in de waterweg te regelen waardoor er minder beroep moet gedaan worden op de stuwen (een zgn. fijnregeling).

In geval van vispassages op de Leie kan de toepassing van een toegevoegd debiet niet alleen een meerwaarde zijn in droge periodes met lage afvoer maar kan er ook voor zorgen dat de vispassage bij gewone dagelijkse afvoer niet twee à drie keer per dag zal sluiten door het eerder genoemde 'zaagtand-effect' in de afvoer op de Leie. In de huidige omstandigheden gaat het debiet over de stuwen te Sint-Baafs-Vijve en Harelbeke namelijk twee à drie keer per dag naar nul (lees: volledig opgetrokken stuwen), om enkele uren later terug toe te nemen tot circa 60 m<sup>3</sup>/s (de gemiddelde basisafvoer ligt dan eigenlijk rond de 20 à 30 m<sup>3</sup>/s).

Vanuit het principe van de toepassing van een toegevoegd debiet en de doelstelling om de vispassage ook bij lagere afvoeren zo lang mogelijk open te houden wordt dus best gezocht naar een zo klein mogelijk basisdebiet over de vispassage zelf. Vanuit het debietcriterium voor de periode van optimale werking vormt de Q<sub>90%</sub> waarde daarbij het vertrekpunt.

Aangezien de regeling van de opwaartse afsluitconstructie zal gebeuren op basis van minuutregistraties van het opwaartse waterpeil, wordt er voor gekozen om voor de richtlijn voor het vispassagedebiet uit te gaan van de Q<sub>90%</sub>-waarde op basis van de kwartiergemiddelde meetwaarden. In Tabel 8 kan afgelezen worden dat het vispassagedebiet daarmee best niet groter wordt gekozen dan maximaal 1,35 m<sup>3</sup>/s.

De waarde van 1,35 m<sup>3</sup>/s is gekoppeld aan de 90% overschrijdingskans, wat betekent dat 10% van de tijd debieten lager kunnen zijn. Door het vispassagedebiet zo laag mogelijk te kiezen kan het zijn dat het buffervolume in het opwaartse pand groot genoeg is om de vispassage ook tijdens (korte) periodes van lage(re) afvoer open te houden (bijv. tijdens de dalen in het dagelijkse zaagtandeffect). De grootte van het buffervolume is daarbij gekoppeld aan de sluitingsvoorwaarde voor de automatische regeling van de opwaartse afsluitconstructie van de vispassage. In de voorgaande paragraaf werd deze voorwaarde voorgesteld op 20 cm daling ten opzicht van streefpeil. Deze voorwaarden en instellingen werden verder onderzocht in een verkennende modelstudie voor de automatische regeling (Vanderkimpfen *et al.*, 2018). De resultaten van die verkenning worden besproken in hoofdstuk 7.

## 2.4 Voorwaarden uit de bouwkundige voorstudie

Uit de revisie van het oorspronkelijk ontwerp (Visser *et al.*, 2016) bleek dat een V-vormige bekkentrap binnen de verkleinde beschikbare ruimte niet meer mogelijk was. Er werd daarom gekozen voor een vertical slotpassage met toepassing van een toegevoegd debiet.

Om te kunnen voldoen aan de ontwerpcriteria voor maximale stroomsnelheden voor de doelsoorten (Tabel 4) bij fluctuerende op- en afwaartse waterpeilen geldt een optimaal verval van 0,09 m per slot/bekken voor een vertical slotpassage<sup>3</sup>. Daarom werd aanvankelijk een ontwerp voorgesteld met 27 sloten (= 26 bekkens) als input voor de verkenning van de bouwkundige mogelijkheden (Visser *et al.*, 2018a) (Figuur 12). Dit ontwerp betrof een vertical slotpassage met slotbreedte van 0,50 m en bijbehorende bekkendimensies van L<sub>b</sub> x B<sub>b</sub> = 4,5 m x 3,2 m.

Aan de linkerzijde van de vispassage werd tevens een kanaal voor het toegevoegd debiet voorzien met aan opwaartse zijde een inlaat en aan afwaartse zijde een regelconstructie. Een mogelijke locatie en configuratie voor de monding werd theoretisch bepaald op basis van de ligging van de watersprong en de migratielimietzone afwaarts van de stuwen. Gezien de complexe stroomsituatie en de nodige doorsteek door de relatief dikke sluismuur bleken 3D-model berekeningen nodig voor de verdere uitwerking van de monding.

<sup>3</sup> Dit ligt iets lager dan het optimale verval bij V-vormige bekkentrappen (namelijk 0,10 m) omdat de gemiddelde stroomsnelheden in sloten iets hoger liggen dan over V-vormige drempels.

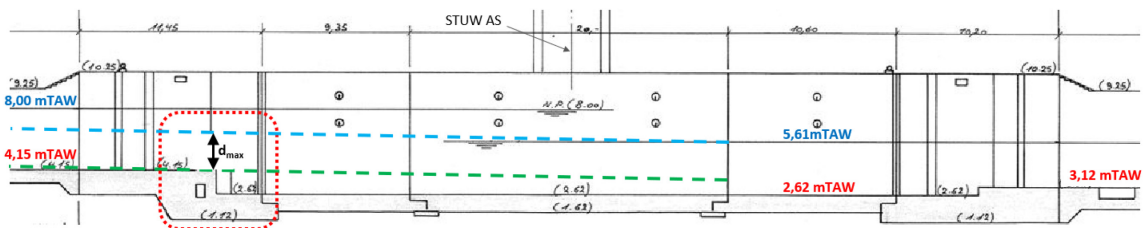
Figuur 12 – Aanvankelijk voorstel ontwerp met 27 sloten voor overleg bouwkundige mogelijkheden



Bron: Visser et al., 2018a

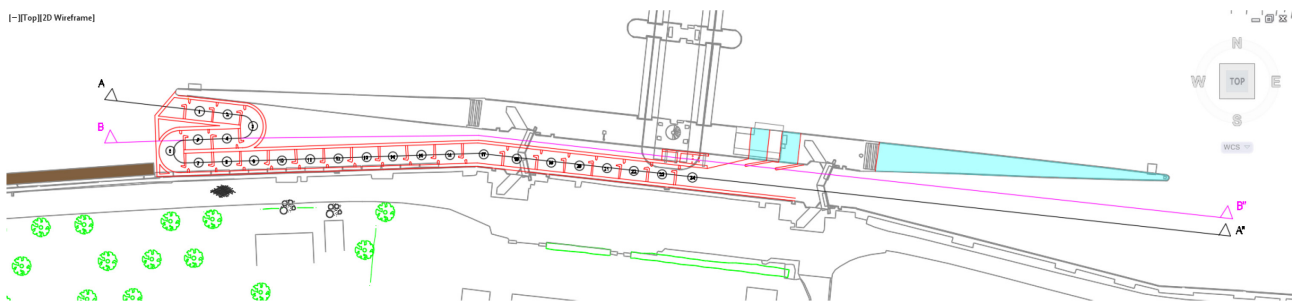
Met oog op de gewenste waterdiepte in de bekkens werd, uitgaande van de biologische ontwerpcriteria (zie 2.2.3) en de beschikbare ruimte, gezocht naar de grootst mogelijke diepte in de range van 1,5 tot 2 m. Hierbij bleek de drempel ter plaatse van het opwaartse sluishoofd bepalend (zie ook Figuur 13). Het huidige betonnen bodempeil opwaarts van de sluiscolk ligt op 4,15 mTAW en de drempel zelf ligt op 4,65 mTAW. Uit de bouwkundige voorstudie door het studiebureau bleek dat de drempel verwijderd kon worden waardoor het opwaarts bodempeil maatgevend werd. Bij de waterdiepte en een bodemverhang in de vispassage van circa 2,2% ( $= dh/L_b = 0,10 \text{ m}/4,5 \text{ m}$ ) is een maximale waterdiepte van  $h_1 = 1,8 \text{ m}$  bij streefpeilen mogelijk. Merk op dat waterdiepte in de bekkens daarbij gelijk is aan de natte slotdiepte ( $h_1$ ).

Figuur 13 – Kritiek punt ten aanzien van maximaal mogelijke bekkendiepte



De toegepaste muurdiktes van het bekkenontwerp uit Figuur 12 waren 0,30 m. Uit overleggen met het studiebureau bleek echter dat voor de bekkenwanden vanuit bouwkundig oogpunt grotere diktes nodig waren waardoor het tracé met de twee bochten niet meer inpasbaar was tussen de sluiswanden. Dit betekende dat, uitgaande van de benodigde bekkendimensies bij een slotbreedte van 0,50 m, maximaal 24 sloten mogelijk waren. Het verval per slot werd daarmee circa 0,10 m. Tevens werd er met het oog op het afleiden van drijfvuil gekozen om de instroom van de vispassage aan de kant van de muur tussen sluis en stuwgeul te plaatsen in plaats van aan de oever. Figuur 14 toont het aangepaste ontwerp met 24 sloten zoals gerapporteerd in Visser et al. (2018b).

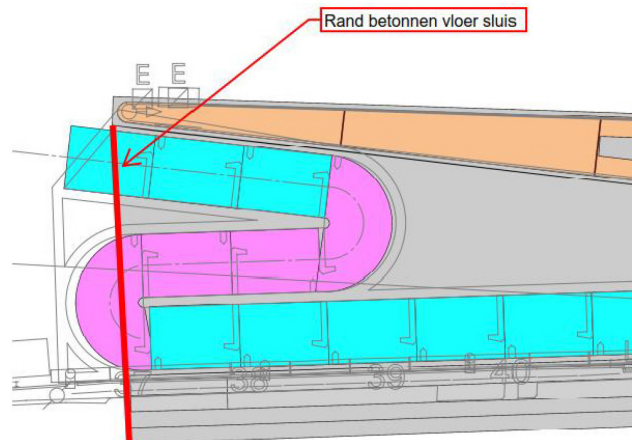
Figuur 14 – Aanpassing ontwerp op basis van bouwkundige randvoorwaarden



Bron: Visser et al., 2018b

Uit de verdere uitwerking van het bouwkundig ontwerp bleek vervolgens dat tijdens uitvoeringswerken de sluis niet (volledig) drooggezet kan worden waardoor gewerkt zal moeten worden met afzinkbare prefab U-bakken (Tractebel, 2018). Dit betekende dat de betonnen vloer van de huidige sluis de uiterste opwaartse grens vormt voor de uitvoering (zie Figuur 15), waardoor de beschikbare ruimte aan opwaartse zijde verder afneemt. Door de toepassing van afzinkbare U-bakken neemt ook de relatieve muurdikte verder toe aangezien de bakken in het opwaartse gedeelte met de bochten naast elkaar geplaatst moeten worden. Als gevolg hiervan was er minder ruimte beschikbaar voor de bekken aan opwaartse zijde waardoor het gehele ontwerp verder afwaarts moest worden geschoven.

Figuur 15 – Opwaartse grens beschikbare ruimte vanuit bouwkundig ontwerp



Bron: (Tractebel, 2018)

Aangezien de bekken van de vispassage verder afwaarts moesten worden geschoven kwamen deze dichterbij de zoeklocatie voor de monding te liggen, waardoor het stroompatroon nabij de monding steeds complexer werd.

Al deze beperkingen zorgden ervoor dat het oorspronkelijke ontwerp sterk moest worden bijgestuurd.

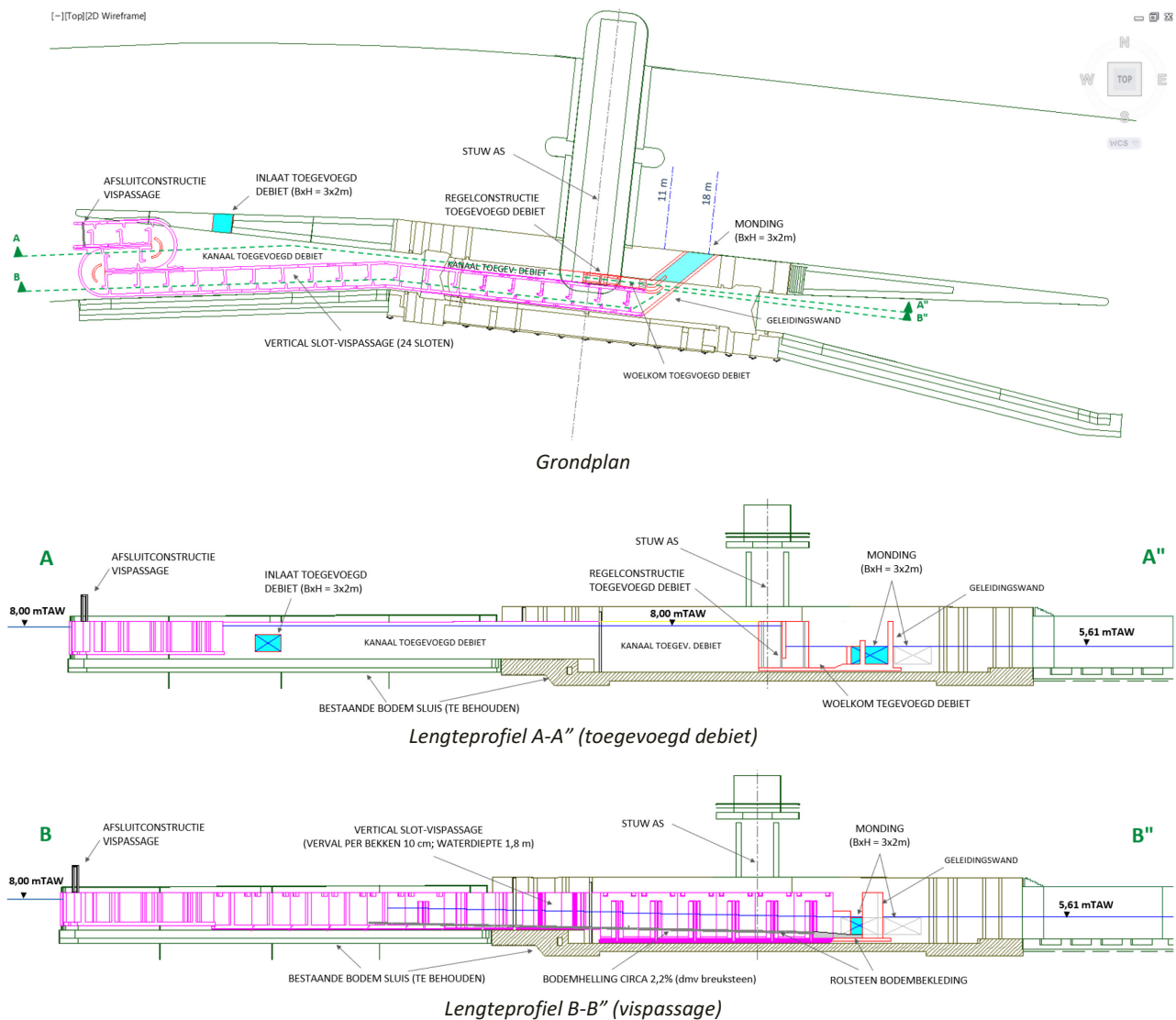
### 3 Algemeen ontwerp

In dit hoofdstuk wordt het finale hydraulische ontwerp en dimensionering van de vertical slot vispassage met 24 sloten en een toegevoegd debiet op hoofdlijnen beschreven. Voor de onderliggende berekeningen en dimensionering van de bekken, het toegevoegd debiet en de monding wordt verwezen naar respectievelijk de hoofdstukken 4, 5 en 6.

#### 3.1 Ruimtelijke inpassing

Figuur 16 toont de ruimtelijke inpassing van het finale ontwerp met twee bijbehorende lengteprofielen (één van de vispassage en één van het kanaal voor het toegevoegd debiet). De verschillende onderdelen worden vervolgens in de andere paragrafen van dit hoofdstuk beschreven.

Figuur 16 – Ruimtelijke inpassing ontwerp vertical slotvispassage in de oude sluis te Sint-Baafs-Vijve



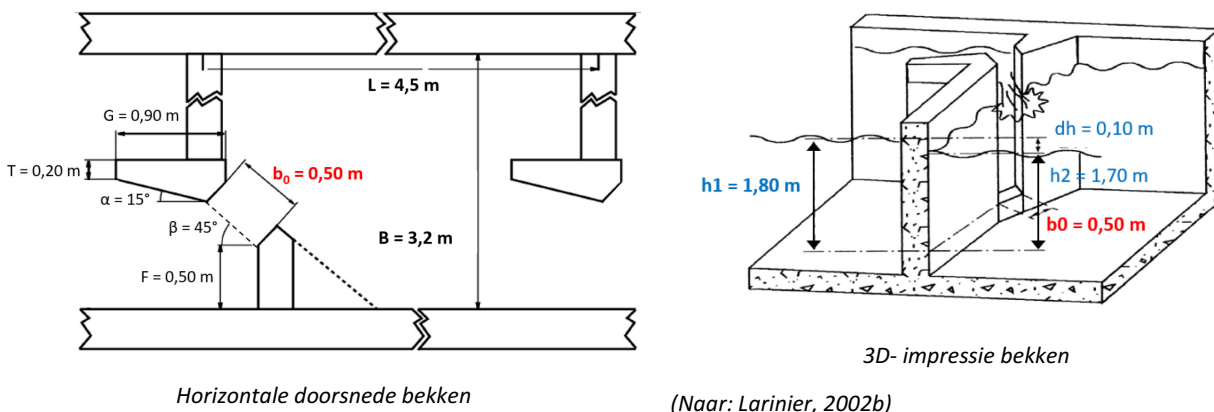


## 3.2 Bekkens en sloten

De vormgeving en geometrie van de bekkens wordt ontworpen volgens Larinier (2002b) aangezien dit het meest gangbare ontwerp is bij al gerealiseerde vispassages (Figuur 17).

Met oog op de doelsoorten wordt daarbij gekozen voor een slotbreedte van 0,50 m. Dit is een optimum tussen een zo groot mogelijke slotbreedte om ook de grotere vissoorten (vb. Europese meerval, karper, Atlantische steur) te kunnen laten passeren en een niet te groot slot vanuit het oogpunt van beperken vispassagedebiet en benodigde bekkenafmetingen. Uitgaande van de slotbreedte van 0,50 m en de beschikbare ruimte volgt een bekkenlengte  $L_b = 4,5$  m en een bekkenbreedte  $B_b = 3,2$  m. Uit de voorstudie (zie voorgaande paragraaf) blijkt dat  $h_1 = 1,8$  m de meest optimale slotdiepte is, gegeven de beschikbare ruimte en richtlijnen voor minimale waterdiepte.

Figuur 17 – Ontwerp en dimensionering bekkens en sloten vispassage



Om te voorkomen dat het water tijdens de werking van de vertical slotpassage over de slotwanden stroomt en zo het verwachte stroompatroon verstoort, moeten de slotwanden best uitgevoerd worden met een bepaalde overhoogte. Voor de minimaal benodigde overhoogte van de slotwanden (= hoogte van de slotwanden boven waterstand bij streefpeil) geldt het volgende:

- Uit het histogram in Tabel 5 kan worden afgeleid dat opwaartse waterstanden hoger dan 0,30 m boven streefpeil slechts zeer uitzonderlijk voorkomen (minder dan 0,1% van de tijd). Dit betekent dat de meest opwaartse slotwand best een minimale hoogte heeft van 8,30 mTAW. Om echter ook onder extreme omstandigheden (zie bijv. scenario E1 in Tabel 7) nog een 'normaal' stroompatroon door de sloten te bekomen kan ook een overhoogte van 0,50 m worden overwogen. Het meest opwaartse slot heeft dan een hoogte van 8,50 mTAW. De afwaartse slotwanden kunnen vervolgens steeds met het gekozen verval per slot van  $dh = 0,10$  m in hoogte afnemen.
- Om bij stijging van het afwaartse peil ook het normale stromingspatroon door de sloten te kunnen behouden zijn de afwaartse slotwanden best niet lager dan de  $H_{1\%}$ -waarde van het afwaartse waterpeil. Uit het histogram in Tabel 5 in paragraaf 2.3.2 kan worden afgeleid dat de afwaartse slotwanden daarmee een minimale hoogte dienen te hebben van 7,40 mTAW. Op deze wijze heeft de vispassage het optimale stroompatroon voor 99% van de tijd.
- De 'kerende' zijwanden aan opwaartse zijde en tussen de vispassage en het parallelle kanaal voor toegevoegd debiet hebben best een minimale hoogte van 8,50 mTAW. Het alarmpeil voor het opwaartse pand is 8,98 mTAW, maar uit de analyse van de metingen uit periode 2010-2018 blijkt dat bij afwaartse waterstanden hoger dan 8,50 mTAW het afwaartse waterpeil in alle gevallen nagenoeg gelijk was aan het opwaartse peil (zie ook 3.4 ten aanzien van keerhoogte afsluitconstructie).

De dimensionering en hydraulische waarden bij streefpeil voor het ontwerp van de vertical slotpassage worden samengevat in Tabel 9 en Tabel 10. Voor de onderliggende ontwerpberekeningen wordt verwezen naar hoofdstuk 4. NB: sloten en bekken worden steeds genummerd van stroomopwaarts naar stroomafwaarts, m.a.w. het meest opwaartse slot is nr 1.

Tabel 9 – Ontwerpwaarden vertical slotpassage

parameter	omschrijving (zie ook Figuur 17)	aantal / waarde*	eenheid
$H_{o_s}$	Opwaarts streefpeil	8,00	[mTAW]
$H_{a_s}$	Afwaarts streefpeil	5,61	[mTAW]
$dH_s$	Totale verval bij streefpeilen (= $H_o - H_a$ )	2,39	[m]
N	Aantal sloten	24	[-]
dh	Verval per slot	<b>0,10</b>	[m]
$h_1$	Opwaartse waterdiepte vlak voor het slot bij streefpeilen	1,80	[m]
$h_2$	Afwaartse waterdiepte vlak na het slot bij streefpeilen	1,70	[m]
S	Verdrinkingsgraad bij streefpeilen (= $h_2 / h_1$ )	0,94	[m/m]
$b_0$	Slotbreedte	<b>0,50</b>	[m]
$L_b$	Bekkenlengte (h.o.h. van slotwand tot slotwand)	4,50	[m]
$B_b$	Bekkenbreedte (binnenzijde zijwand tot binnenzijde zijwand)	3,20	[m]
$S_0$	Gemiddelde bodemverhang (= $dh/L_b = 0,10/4,5 = 0,022$ )	≈ 2%	[-]
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	[°]
$Q_{vis}$	Vispassagedebiet bij streefpeilen (en $C_d = 0,7$ )	0,88	[m <sup>3</sup> /s]
$V_g$	Gemiddelde stroomsnelheid in slot bij streefpeilen (en $C_d = 0,7$ )	0,98	[m/s]
E	Energie per bekken bij streefpeilen	35,1	[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.

Tabel 10 – Hoogtes slotbodem en op- afwaartse waterpeilen per slot bij streefpeil

N	Slot/bekken nr	[-]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$H_{b0}$	hoogte slotbodem	[mTAW]	6,20	6,10	6,00	5,90	5,80	5,70	5,60	5,50	5,40	5,30	5,20	5,10
$H_1$	waterpeil opw slot	[mTAW]	8,00	7,90	7,80	7,70	7,60	7,50	7,40	7,30	7,20	7,10	7,00	6,90
$H_2$	waterpeil afw slot	[mTAW]	7,90	7,80	7,70	7,60	7,50	7,40	7,30	7,20	7,10	7,00	6,90	6,81
N	Slot/bekken nr	[-]	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$H_{b0}$	hoogte slotbodem	[mTAW]	5,01	4,91	4,81	4,71	4,61	4,51	4,41	4,31	4,21	4,11	4,01	3,91
$H_1$	waterpeil opw slot	[mTAW]	6,81	6,71	6,61	6,51	6,41	6,31	6,21	6,11	6,01	5,91	5,81	5,71
$H_2$	waterpeil afw slot	[mTAW]	6,71	6,61	6,51	6,41	6,31	6,21	6,11	6,01	5,91	5,81	5,71	5,61

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



### 3.3 Bodemsubstraat

Technische visdoorgangen zoals vertical slotpassages dienen, net als verruwde vishellingen, uitgerust te worden met een doorlopende ruwe bodembedekking (DWA, 2014; Coenen *et al.*, 2013; Kroes & Monden, 2005). Vanwege de onderliggende betonnen vloer is dit substraat in geval van de vispassage te Sint-Baafs-Vijve logischerwijze niet nodig als erosiebescherming.

Door de grotere bodemruwheid wordt de stroomsnelheid aan de bodem aanzienlijk verlaagd wat ervoor zorgt dat kleinere vissoorten die over de bodem migreren (i.e. 'benthische vissoorten') alsook de jonge levensstadia van verschillende vissoorten de visdoorgang in stroomopwaartse richting kunnen passeren. De (grotere) stenen creëren ook microhabitats waar vissen kunnen rusten en schuilen (i.e. 'schuilhabitat') en faciliteren ook de migratie van bijvoorbeeld jonge palingen (i.e. 'glasalen' en 'elvers') en macrozoobenthos omdat deze dieren zich tussen de stenen door in stroomopwaartse richting bewegen.

Het DWA (2014) geeft twee alternatieven voor het bodemsubstraat in vertical slotpassages:

- Een substraat bestaande uit relatief grotere stoorstenen met daarrond kleinere vulstenen (zie de linker en middelste foto in Figuur 18);
- Een substraat bestaande uit één stortsteen sortering met een relatief grotere steendiameter dan gebruikt bij de vulstenen uit het eerste alternatief (zie de rechter foto in Figuur 18).

Beide hebben tot doel voldoende variatie in ruwheidshoogte te realiseren.

Figuur 18 – Praktijkvoorbeelden toepassing bodemsubstraat in vertical slotpassages



Redeker in DWA, 2014



DWVK, 2002



Hufgard in DWA, 2014

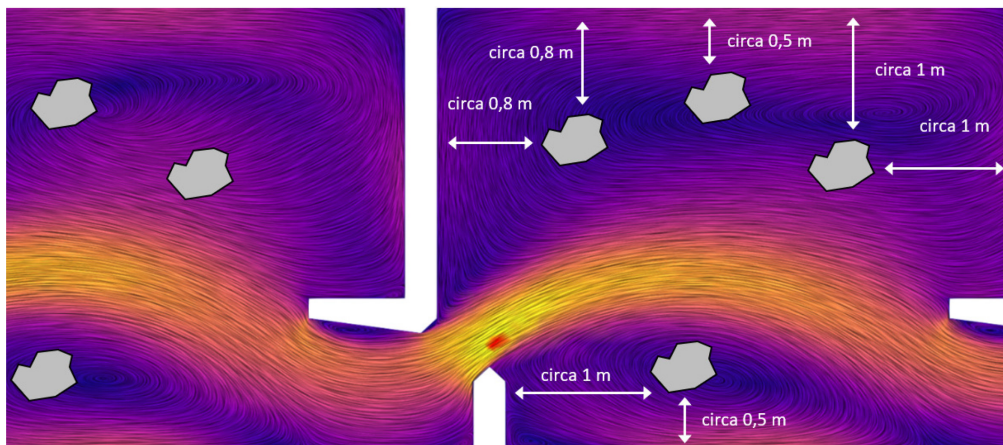
Met oog op de toepassing van stoorstenen kan tevens een onderscheid gemaakt worden tussen het gemiddelde stroompatroon in een nevengeul en het stroompatroon in een vertical slotpassage. Terwijl de stroming in nevengeulen over de gehele breedte meestal relatief rechtlijnig en in stroomrichting verloopt, wordt het stroompatroon in vertical slot passages gekenmerkt door een meanderende smalle hoofdstroom met aan weerszijden dissipatie-neren met relatief lagere stroomsnelheden. Dit betekent dat de toepassing van stoorsteen ook een iets andere invalshoek kan hebben in het geval van vertical slotpassages.

Aangezien de vispassage te Sint-Baafs-Vijve een relatief grote vertical slotpassage betreft, is het mogelijk om voor het tweede alternatief uit het handboek DWA (2014) te kiezen, namelijk één doorlopende sortering met een relatief grotere steendiameter. Hierdoor is het in principe niet nodig om ook stoorstenen toe te passen. Toch heeft het een ecologische meerwaarde om op enkele locaties in het bekken stoorstenen te plaatsen als schuil- en rustzone voor ook grotere vissoorten. Deze stoorstenen kunnen in dit geval op enkele plaatsen bovenop en/of licht verzonken in de eerder genoemde doorgaande laag stortstenen worden geplaatst en hebben een relatief grote diameter. De stoorstenen worden echter best niet geplaatst in het gedeelte van de meanderende smalle hoofdstroom om deze doorgaande hoofdstroom niet te verstoren.

Op basis van het bovenstaande worden de volgende ontwerprichtlijnen gegeven voor het bodemsubstraat in de vispassage van Sint-Baafs-Vijve:

- Doorgaande bodemlaag: steendiameter 5 – 15 cm → bijv. sortering CP 90/180;
  - Minimale laagdikte: 30 cm;
  - Dient uit rolstenen te bestaan.
- Stoorstenen: steengrootte 30 – 45 cm → te selecteren uit een beschikbare sortering;
  - Aantal stoorstenen per bekken: 4 à 5;
  - Mogen ook breukstenen zijn, niet plat maar eerder rond;
  - Plaatsingsdichtheid: minimaal 30 cm uit elkaar;
  - Zie richtlijn meest optimale locaties in Figuur 19.

Figuur 19 – Richtlijn meest optimale locaties voor plaatsing stoorstenen



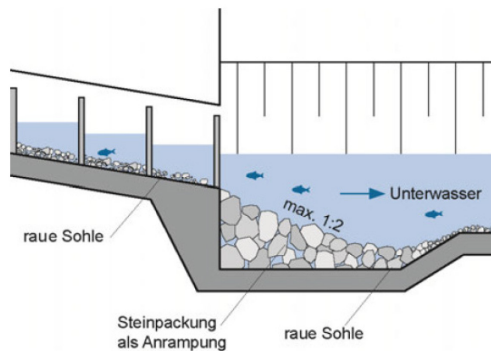
In principe bedekt het substraat de bodem van de vispassage volledig (m.a.w. het volledige traject), dus ook in de sloten dient de bodembedekking met rolstenen door te lopen met een minimale laagdikte van 30 cm. Uiteraard mogen grotere stenen de sloten niet blokkeren omdat anders de migratie van kleine vissen en macrozoobenthos wordt belemmerd.

Mocht er slibafzetting plaatsvinden op de luwere delen in de bekken dan is dit op zich geen probleem aangezien dit zorgt voor nog meer variatie in microhabitats en vanuit dat oogpunt dus ook een meerwaarde kan zijn. Door de relatief grotere stroomsnelheden door de sloten en in het centrum van de bekken 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 blokkering door stenen te kunnen voorkomen. Daarnaast is een breuksteen bodembekleding ook niet wenselijk ter plaatse van een monitoringzone aangezien hier fuiken moeten kunnen worden geplaatst (vanwege de beperkte beschikbare ruimte is een monitoringslocatie te Sint-Baafs-Vijve niet mogelijk). Op voorgenoemde locaties zijn de stroomsnelheden echter veel lager dan in de sloten en bekken waardoor de noodzaak van bodemverruwing ook minder is.

Aan afwaartse zijde dient het bodemverhang tussen vispassage en afwaarts bodempeil voldoende flauw te zijn: maximaal 1:2 maar best veel flauwer (zie Figuur 20). Idealiter wordt dit (met oog op afwaartse migratie) ook aan opwaartse zijde zo gedaan, maar voor de situaties waarbij de vispassage vooral ontworpen wordt voor opwaartse migratie is dit minder van belang.

Figuur 20 – Minimale helling bodemsubstraat bij uitstroom vispassage

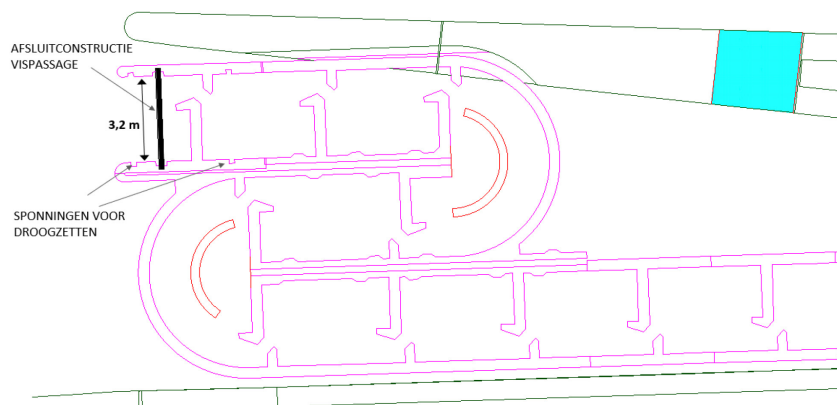


Bron: DWA, 2014

### 3.4 Instroom en afsluitconstructie

Aan opwaartse zijde van de vispassage wordt een afsluitconstructie voorzien die de vispassage enkel in uitzonderlijke situaties (bij noodgeval, bij beheer en onderhoud of bij te lage afvoer op de rivier) automatisch en/of manueel kan afsluiten. Deze constructie dient dus niet als regelmechanisme maar enkel om de vispassage volledig open of volledig dicht te kunnen zetten. Voor de bepaling van voorwaarden voor automatische regeling wordt verwezen naar hoofdstuk 7.

Figuur 21 – Locatie afsluitconstructie



Figuur 21 toont de locatie van de afsluitconstructie en vormgeving van de instroom van de vispassage. Vanuit hydraulisch oogpunt werd de minimale natte breedte ter plaatse van de hefschuif berekend op 2 m. Deze relatieve vernauwing zou ter plaatse van de afsluitconstructie en instroom slechts een verwaarloosbaar verval geven van minder dan 0,01 m en daardoor het vispassagedebiet niet beïnvloeden. Vanuit bouwkundig oogpunt zou dit de constructie echter onnodig complexer maken waardoor de natte breedte gelijk werd gehouden aan de breedte van de bekkens, namelijk 3,2 m.

Voor de maximaal te keren hoogte voor de afsluitschuif wordt 8,50 mTAW voorgesteld (= 50 cm boven streefpeil). Uit het histogram ten aanzien van gemeten opwaarts gemeten waterpeil in Tabel 5 blijkt dat deze waterstand minder als 0,01% van de tijd wordt overschreden. Uit de analyse van gemeten waterstanden uit de periode 2010 t.e.m. 2018 bleek tevens dat bij opwaartse waterstanden hoger dan 8,50 mTAW de

afwaartse waterstand in alle gevallen nagenoeg gelijk was geworden aan de opwaartse waterstand en er dus geen noemenswaardig verval meer aanwezig is over stuw en vispassage (m.a.w. wascondities bij volledig opgetrokken stuw en 'verdronken' vispassage).

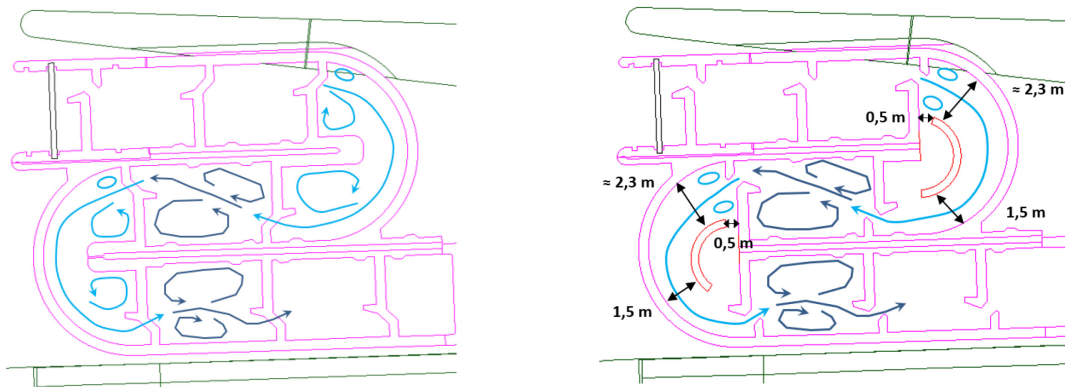
Vanwege de zeer beperkte ruimte ter plaatse van de instroom is het niet mogelijk een zone voor vismonitoring te voorzien in functie van de evaluatie van de effectiviteit van de vispassage. In nieuwe ontwerpen wordt over een lengte van circa 10 m meestal een zone voorzien voor plaatsing van bijv. fuiken en/of vangkooi. INBO zal daarom in een later stadium de mogelijkheden voor het plaatsen van bijv. een kleinere vangkooi onderzoeken of er kan/moet gekozen worden voor het gebruik van andere onderzoeksmethodes (vb. telemetrie).

Tenslotte is het van belang dat er in het bouwkundig ontwerp een constructie wordt voorzien die verhindert dat (groter) drijfvuil in de vispassage komt. De sloten van de vispassage zijn namelijk relatief gevoelig voor verstopping. Mogelijk kan een (drijf)balk aan opwaartse zijde worden voorzien die circa het bovenste 1/3 van de waterkolom afschermt. Merk op dat de gekozen constructie tegen drijfvuil logischerwijze niet de passeerbaarheid van de vispassage negatief mag beïnvloeden. Circa de onderste 2/3 van de waterkolom dient vrij te blijven voor migratie. Idealiter wordt de constructie ook zo geconfigureerd dat drijfvuil niet blijft 'hangen' voor de vispassage, maar dat dit verder afgeleid wordt in stroomrichting van de rivier.

### 3.5 Bochten

Om de vispassage ingepast te krijgen in de beschikbare ruimte moeten aan opwaartse zijde twee bochten worden toegepast. Om complexe stroompatronen in deze bochten te voorkomen, zijn de op- en afwaartse sloten hierbij steeds in de buitenbocht geplaatst en wordt voorgesteld om half cirkelvormige geleidingswanden toe te passen op een afstand van circa 2,3 tot 1,5 m van de buitenmuur (zie rechts in Figuur 22).

Figuur 22 – Schetsmatige weergave van stroompatronen in de bochten



Het studiebureau heeft daarbij de vraag gesteld of de verlenging van de tussenwand in plaats van de geleidingswanden hier ook kan volstaan. Figuur 22 toont de twee bouwkundige uitvoeringen met daarin schetsmatig de te verwachten stroompatronen. Hierbij wordt opgemerkt dat deze niet volgen uit een simulatie, maar puur een inschatting zijn op basis van expert judgement.

De stroompatronen zijn overlegd geweest met INBO, waaruit volgde dat beide toepassingen in principe goed zijn, maar dat er vanuit het oogpunt van vismigratie wel een voorkeur is voor de toepassing van de cirkelvormige schermen (rechts in Figuur 22). Deze geven namelijk een eenduidiger stroompatroon (minder neren). Bij complexe stroompatronen in bochten bestaat er namelijk risico op terugkeergedrag bij vissen.

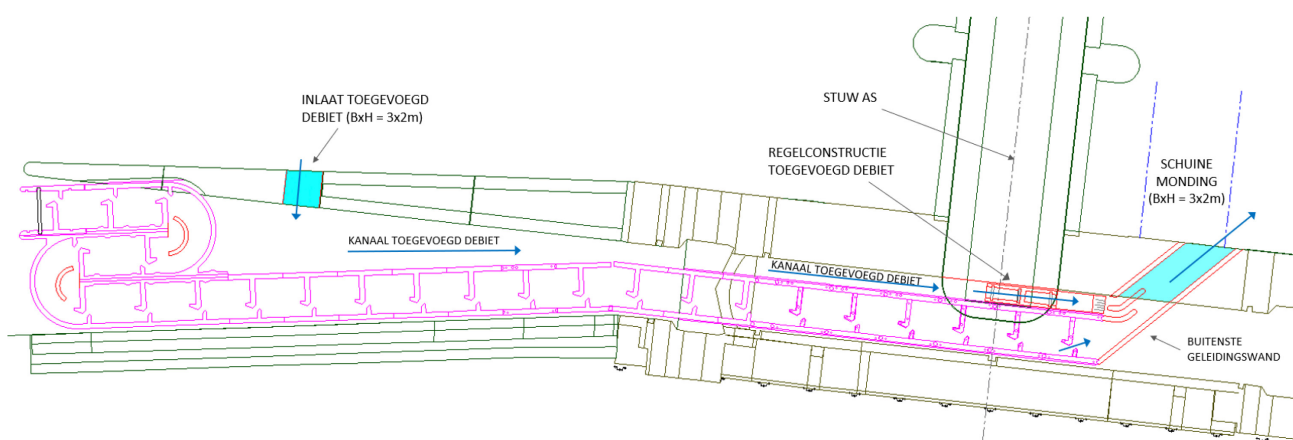


Wanneer deze wanden zo glad mogelijk worden uitgevoerd zijn er naast deze hydraulische uitgangspunten geen verdere vereisten vanuit het oogpunt van vismigratie. Materiaal en wanddiktes kunnen dus volgen uit het bouwkundig ontwerp.

### 3.6 Monding en toegevoegd debiet

Zoals aangegeven in paragraaf 2.3.4 wordt naast het vispassagedebiet een toegevoegd debiet toegepast om ook bij hogere afvoer voldoende lokstroom te kunnen realiseren. Om dit toegevoegd debiet te kunnen inlaten is een parallel kanaal nodig en een regelconstructie. Figuur 23 toont de inpassing van dit kanaal met opwaartse inlaat en afwaartse regelconstructie.

Figuur 23 – Kanaal toegevoegd debiet met opwaartse inlaat en afwaartse regelconstructie



Aangezien de vispassage aan opwaartse zijde de volledige breedte van de sluis opvult, dient een opening te worden voorzien voor het inlaten van het toegevoegd debiet. De mogelijkheden voor de locatie van deze inlaat werden onderzocht (Visser *et al.*, 2018b), waarbij de afweging werd gemaakt tussen een inlaat onder de meest opwaartse bekkens of een opening door de huidige sluismuur. Op basis van deze verkenning werd besloten dat een opening door de huidige sluismuur het meest optimaal is vanuit zowel uitvoeringstechnisch als hydraulisch oogpunt. Aangezien zowel de vispassage als de prefab U-bakken dienen te worden afgezonken zijn onderdoorgangen namelijk moeilijk uitvoerbaar. Ook in geval van verstopping zijn deze moeilijk bereikbaar. Dit betekent dat het kanaal voor het toegevoegd debiet links naast de vispassage (zie Figuur 23) dient te worden uitgevoerd en het toegevoegd debiet aan afwaartse zijde dan ook links naast het laatste bekken van de vispassage wordt ingelaten.

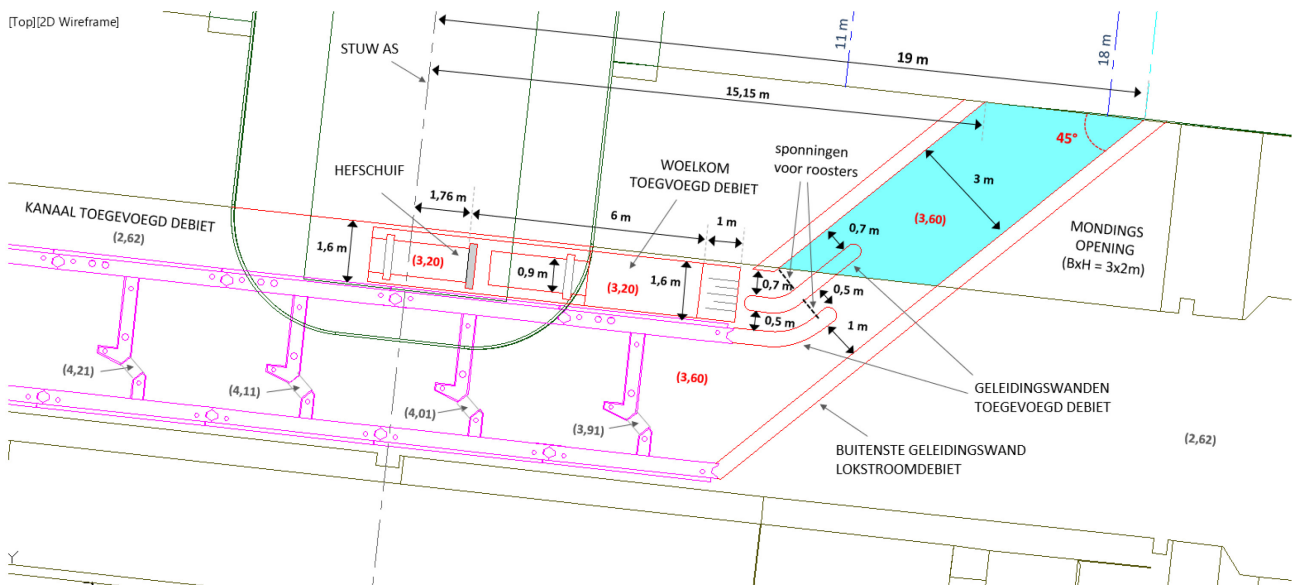
De locatie voor de inlaatopening aan opwaartse zijde zoals aangegeven in Figuur 23 is indicatief. Mits het handhaven van de minimale dimensies ( $B \times H = 2 \times 3$  m, zie berekening in hoofdstuk 5) kan deze opening ook meer afwaarts (of meer opwaarts) door de sluismuur worden gekozen. Aan opwaartse zijde mag de opening echter niet te dicht aan de constructie van de vispassage zelf komen om geen invloed te hebben op de stroming. Daarom wordt de opening best niet dichterbij dan 3 m van de bochtmuur van de vispassage geplaatst. Daarnaast dient ook de hoogte van de opening te worden behouden.

De regelconstructie voor het toegevoegd debiet dient zo ver mogelijk aan de afwaartse zijde van het kanaal te worden geplaatst (= zo dicht mogelijk aan het afwaartse einde van de zijwand van de vispassage), aangezien wordt vertrokken van een ontwerp zonder roosters. Dit om te voorkomen dat vissen bij een lager toegevoegd debiet ongewenst het kanaal van het toegevoegd debiet te ver kunnen inzwemmen (i.p.v. de vispassage) doordat stroomsnelheden hier laag genoeg worden om te kunnen passeren. Aan de andere kant mogen er bij een hogere afvoer geen te grote stroomsnelheden en/of turbulenties ontstaan ter plaatse van de mondingsopening in de stuwmuur.

Toch worden er afwaarts van de regelconstructie wel spouwen voorzien voor fijnmazige roosters om in het geval dat blijkt dat vissen toch te vaak het kanaal van het toegevoegd debiet opzwellen een oplossing te kunnen bieden. Plaatsing van dergelijke roosters zou het namelijk voor vissen fysiek onmogelijk maken om het kanaal van het toegevoegd debiet in te zwemmen (Larinier, 2002a). In principe had de regelconstructie in dat geval ook aan opwaartse zijde of op een andere locatie in het kanaal geplaatst kunnen worden. Maar vanwege mogelijk verstoppingsrisico door drijfvuil en de daaruit voortvloeiende beheersspanning werd de optie van het fijnmazig rooster eerder als terugvaloptie weerhouden en blijft een zo afwaarts mogelijke inpassing van de regelconstructie nodig.

De monding bestaat uit een schuine doorsteek door de wand tussen de oude sluis en stuwgeul. Tevens worden aan het begin van de monding geleidingswanden voorzien om complexe stroompatronen ten gevolge van het toegevoegd debiet te voorkomen. Figuur 24 toont het detailontwerp van de monding en de inbreng van het toegevoegd debiet.

Figuur 24 – Detailontwerp monding en inbreng toegevoegd debiet



Uit ontwerpberekeningen (zie hoofdstuk 6) bleek dat de migratielimietzone zich tijdens de periode voor optimale werking bevindt tussen de 11 m en 18 m uit de stuwassen. Aangezien de monding zich best net in en net afwaarts van deze zone bevindt, werd voor de meest optimale locatie voor de monding een zoekzone geselecteerd tussen de 12 en 20 m uit de stuwassen.

Op deze locatie bevindt zich aan de rechteroever (vastgelegde locatie volgens project-MER) echter een relatief brede (massieve) muur van 4 m à 5 m dik tussen de sluis en de stuwgeul, waardoor het uitvoeringstechnisch niet eenvoudig bleek om op deze locatie een monding te realiseren. Uit de bouwkundige verkenning door het studiebureau bleek tevens dat deze muur niet verwijderd kan worden vanwege risico op opbarsten van de stuwgeulvloer.

Wel kunnen er openingen (kokers) door deze muur worden voorzien van maximaal 3 meter breed en 2 meter hoog (natte sectie). Gekozen werd daarom voor een schuine doorsteek (van 45°) door de sluismuur waarbij de verste zijwand van de uitstroom(koker) zich bevindt op 19 m uit de stuwassen. Het bodempeil van de doorsteek (koker) bevindt zich op +3,60 mTAW. Het volledige lokstroomdebiet (= vispassagedebiet + toegevoegd debiet) wordt door een afwaartse geleidingswand over de volledige breedte van de sluiscolk naar de koker door de sluismuur (= mondingsopening) geleid, zie Figuur 23. Vanwege de beperkte ruimte konden de bekkens en de regelconstructie niet verder opwaarts geplaatst worden.

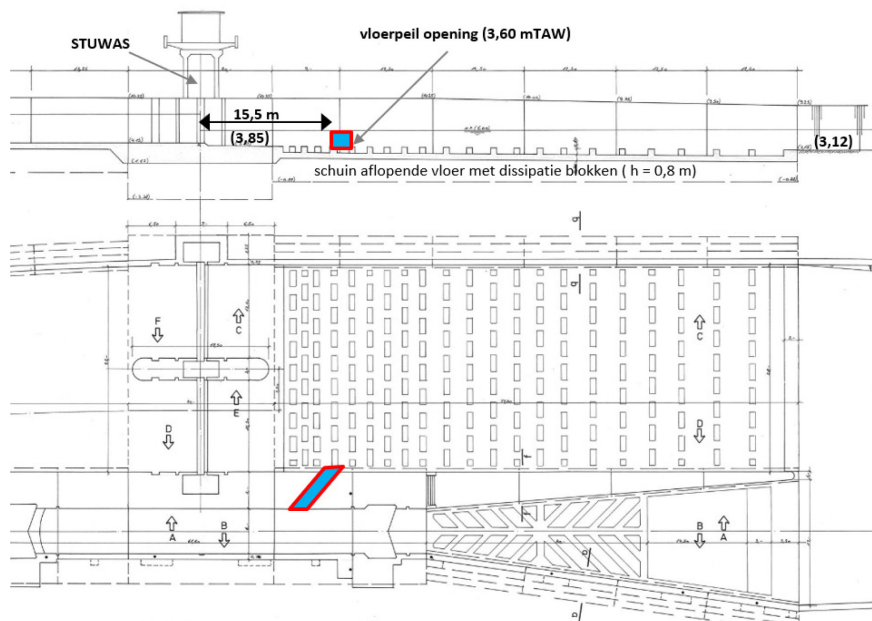
Gezien de complexe configuratie van de schuine monding en de inbreng van het toegevoegd debiet over een relatief korte afstand naast de grote variatie in debietsverhoudingen over zowel de stuwen als het toegevoegd debiet, was een validatie van detailontwerp door middel van 3D (CFD)simulaties noodzakelijk (zie 6.3).

Uit deze simulaties bleek dat twee geleidingswanden in de 45° bocht van de monding nodig zijn om de hogere stroomsnelheden van het toegevoegd debiet naar de monding af te buigen. Deze wanden zorgen ervoor dat de toegang naar de monding niet wordt afgeschermd door negatieve neren ten gevolge van loslatings-effecten. De simulaties bevestigden tevens dat de uitstroomblocatie op een goede positie is gekozen ten opzichte van de watersprong afwaarts van de stuwen (m.a.w. in en net afwaarts van de migratielimietzone).

#### Aandachtspunt vloerpeil mondingsopening

In de verdere uitwerking van het bouwkundig ontwerp dient rekening gehouden te worden met de aansluiting van het vloerpeil van de mondingsopening op de bodem in de stuwgeul met relatief hoge dissipatieblokken (Figuur 25). Het vloerpeil loopt hier geleidelijk af van +3,85 mTAW tot +3,12 mTAW net na de dissipatieblokken. Het is van groot belang dat het vloerpeil van de mondingsopening door de sluismuur direct aansluit op het afwaartse bodempeil ter plaatse van daar aanwezige dissipatieblokken.

Figuur 25 – Aandachtspunt aansluiting vloerpeil opening op dissipatieblokken in achterliggende vloer in stuwgeul



Uit de bouwkundige verkenning werd daarom besloten dat voor de hoogte van de opening door de sluismuur wordt uitgegaan van een bodemhoogte van +3,60 mTAW (wat ongeveer gelijk is aan de hoogte van de dissipatieblokken ter plaatse). Om er voor te zorgen dat er ook een geleidelijke overgang naar de monding mogelijk is tussen de blokken zullen deze over een gegeven afstand en onder helling (flauwer dan 1:2) worden aangestort (opgevuld) met onderwaterbeton.

Hierbij wordt opgemerkt dat er bij het schrijven van dit rapport niet met zekerheid kan worden vastgesteld dat de dissipatieblokken daadwerkelijk uitgevoerd zijn. Dit dient tijdens uitvoering werken te worden vastgesteld.

Voor de werking van de vispassage is een geleidelijke aansluiting tussen de bodem van de monding en stuwgeul van groot belang. Verticale drempels in de bodem zouden de toegankelijkheid en/of vindbaarheid namelijk zeer sterk negatief kunnen beïnvloeden.

### 3.7 Regelconstructie toegevoegd debiet

Zoals aangegeven in paragraaf 2.3.4 wordt voor het optimale lokstroomdebiet gezocht naar een zo groot mogelijk debiet in de range van 2 tot 5 m<sup>3</sup>/s. Hierbij wordt benadrukt dat een goede vindbaarheid (attractiviteit) één van de meest bepalende factoren is voor de effectiviteit van de vispassage. Naast de locatie en oriëntatie van de monding is een zo groot mogelijk lokstroomdebiet een belangrijke meerwaarde. Uitgaande van een vispassagedebiet van circa 1 m<sup>3</sup>/s (zie 4.1) is een lokstroomdebiet nodig van circa 1 tot 4 m<sup>3</sup>/s.

Voor de bepaling van het type regelconstructie is in een verkennende fase een afweging gemaakt tussen een hefschuif of stuwklep (Visser *et al.*, 2018c). Een stuwklep heeft het voordeel dat drijfvuil niet kan blijven hangen in het opwaartse pand van het kanaal maar weg kan spoelen over de stuw. Aan de andere kant heeft een stuwklep een relatief groter ruimtebeslag en door de wisselende lengte van de vallende straal ook een relatief grotere zone voor de ligging van de migratielimietlijn (= einde watersprong ten opzichte van de stuw).

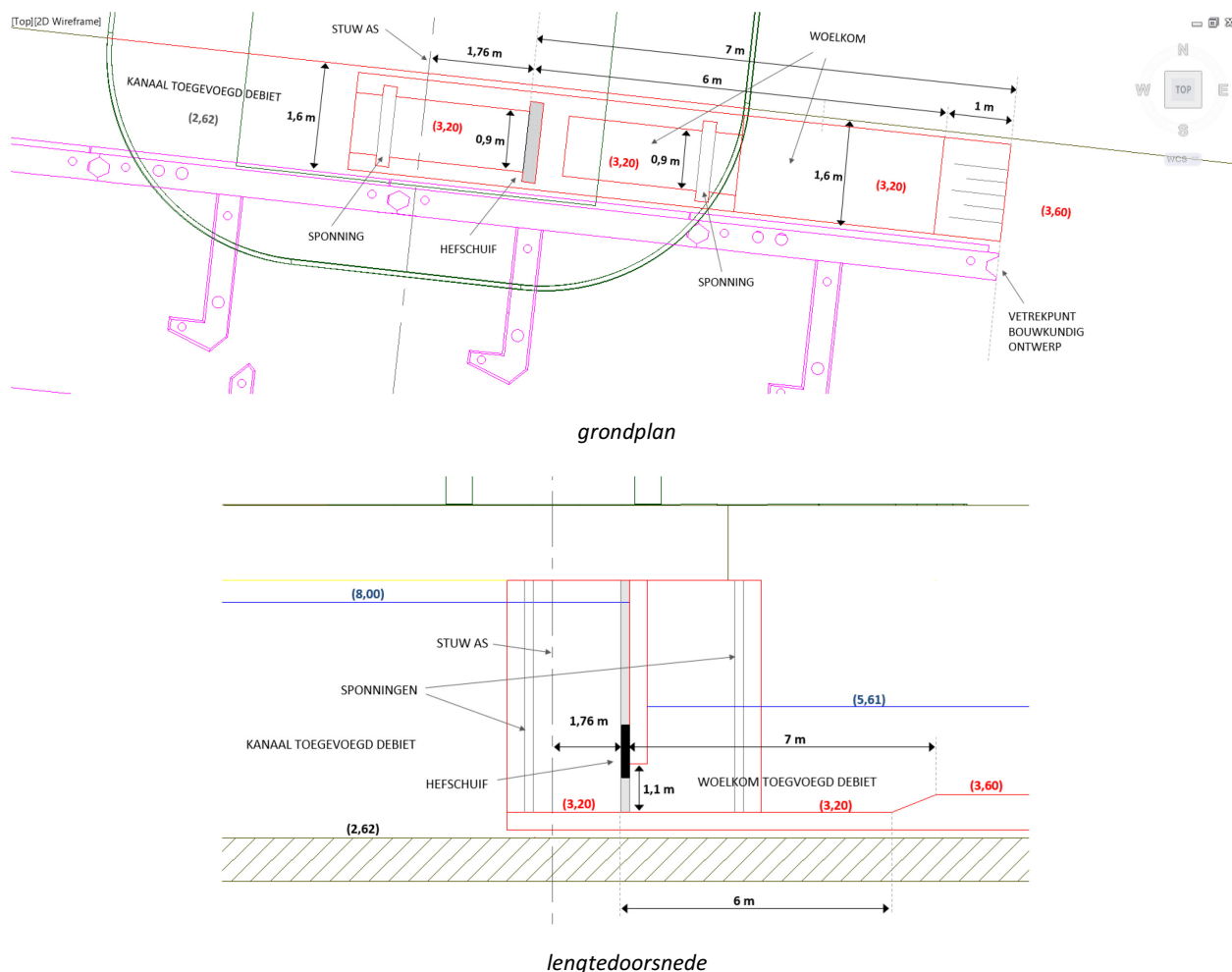
Er is gekozen voor een hefschuif aangezien dit het meest gangbare constructietype is voor dergelijke situaties. Daarnaast zou er een relatief lange stuwklep nodig zijn geweest om, uitgaande van de relatief smalle doorgang ter plaatse van de regelconstructie (0,90 m), het maximaal benodigde debiet van 4 m<sup>3</sup>/s te kunnen doorlaten. Aangezien voorkomen dient te worden dat vissen (bij lagere afvoer) het kanaal van het toegevoegd debiet in zwemmen was de relatief kleinere zone voor de mogelijke ligging van de migratielimietlijn (= een meer gefixeerde watersprong) in het geval van een hefschuif tevens een pluspunt. Tenslotte kan het risico op opstapeling van drijfvuil opwaarts van de hefschuif in het kanaal ook sterk worden verkleind door de opwaartse inlaat van het kanaal voor het toegevoegd debiet relatief diep onder water uit te voeren.

Figuur 26 toont de optimale inpassing voor de regelconstructie op basis van ontwerpberekeningen (zie verder hieronder). Merk op dat dit een hydraulisch voorstel is en dat het bouwkundige ontwerp nog verder moet worden uitgewerkt door het studiebureau. Voor de onderliggende ontwerpberekeningen wordt verwezen naar hoofdstuk 5.

Zoals eerder vermeld wordt de vispassage opgebouwd uit afzinkbare U-bakken. Voor het kanaal opwaarts van de regelconstructie dienen geen constructieve (prefab) elementen ingebracht te worden waardoor de overblijvende breedte tussen vispassage en oude sluismuur ca. 1,6 m bedraagt. De huidige bodemhoogte van de sluiscolk (+2,62 mTAW) kan daar ook behouden blijven. De regelconstructie (hefschuif) dient wel als afzinkbare U-bak te worden uitgevoerd. Uit eerste bouwkundig berekeningen door het studiebureau volgde dat er bij toepassing van een afzinkbare U-bak nog een maximale natte doorstroombreedte van 0,90 m beschikbaar blijft in het kanaal (Figuur 26). De reductie ten opzichte van de breedte van het kanaal (van 1,6 m) is enerzijds te wijten aan de betonnen wanden van de afzinkbak met sponningen voor de schuif en anderzijds aan de ruimte die tussen huidige sluismuur en afzinkbakken bewaard moet worden voor plaatsing.



Figuur 26 – Inpassing regelconstructie toegevoegd debiet

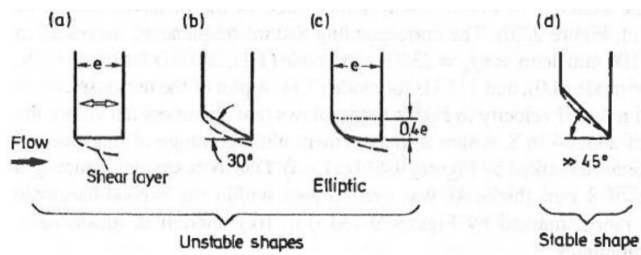


Het bodempeil ter hoogte van de hefschuif bedraagt 3,20 mTAW. Opwaarts van de afsluitconstructie kan in het kanaal het huidige bodempeil van de sluiscolk op 2,60 mTAW worden behouden. Afwaarts van de hefschuif blijft het bodempeil op 3,20 mTAW tot 6 m na de schuif waarna door middel van een drempel met helling circa 1:2,5 aansluit op het afwaarts bodempeil van 3,60 mTAW (= drempelhoogte van 0,40 m en helling lengte 1 m). Tussen hefschuif ontstaat zo een woelkom van totaal 7 m voor het dissiperen van het toegevoegd debiet. Om het kanaal waar vissen in kunnen zwemmen zo kort mogelijk te houden wordt de afwaartse zijde gelijk gekozen met het einde van de zijwand van het laatste prefab bekken (zie 'vertrekpunt bouwkundig ontwerp' in Figuur 26).

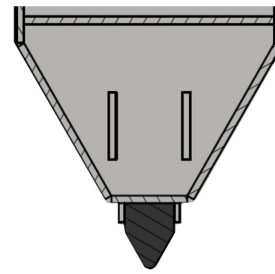
Opwaarts en afwaarts van de schuif zijn schotbalkspinningen voorzien voor het afsluiten van de schuif voor onderhoud. De inpassing van deze spinningen is indicatief en vormen een onderdeel van het verdere bouwkundig ontwerp. De locatie van de afwaartse spinning is wel van invloed op de minimale lengte van de muren van de U-bak. Vanuit het oogpunt van energiedissipatie zijn deze best niet langer dan nodig zodat terug de volledige breedte (1,6 m) beschikbaar is voor de dissipatie. In het huidige voorstel is een afwaartse lengte voor de muren aangehouden van 3 m (om 2 m werkruimte afwaarts van de schuif te houden bij plaatsing schotbalken).

Om het risico op trillingen bij vooral de lagere klepstanden zo laag mogelijk te houden, wordt de punt van de klep best zo 'scherp' mogelijk ontworpen (Figuur 27 - links). In de praktijk wordt de punt vaak gecombineerd met een rubberen strip om een (te groot) lekdebet te voorkomen (Figuur 27 - rechts).

Figuur 27 – Stabiele en onstabiele vormen voor de punt van de hefschuif



(Naudascher & Rockwell, 2005)



Schets combinatie rubberen afsluiting en 'scherpe' kleppunt

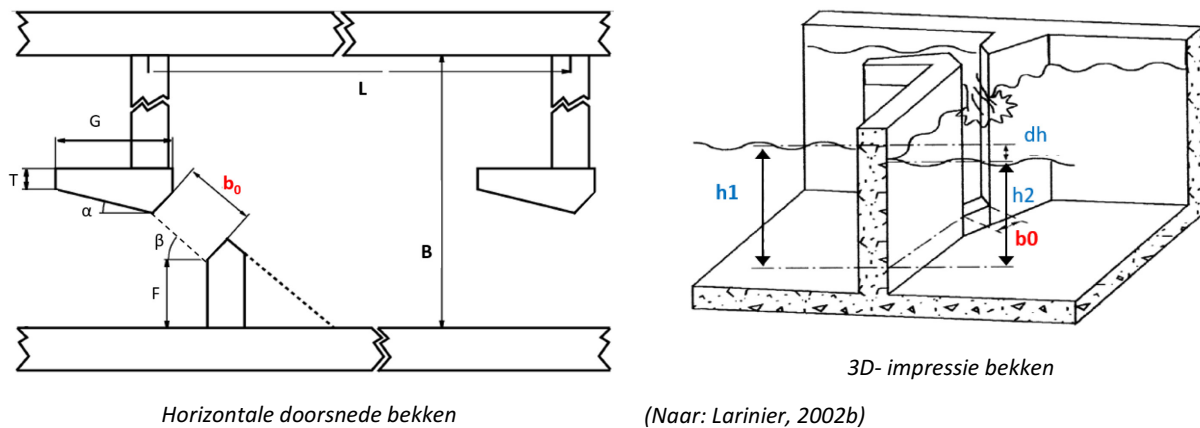
De hefschuif dient automatisch geregeld te kunnen worden op basis van het debiet over de stuwen en het opwaartse waterpeil. In hoofdstuk 7 is hiervoor een voorstel uitgewerkt op basis van 1D-modellering van de Leie.

## 4 Dimensionering vispassage

### 4.1 Bekkens en vispassagedebiet

Zoals beschreven in hoofdstuk 3 werd op basis van de beschikbare ruimte gekozen voor een vertical slotpassage met 24 sloten. Uitgaande van een totaal verval bij streefpeilen van 2,39 m is het verval per bekken daarmee 0,10 m ( $dh = 2,39 \text{ m}/24 \text{ sloten} = 0,0996 \text{ m}$ ). De slotbreedte ( $b_0$ ) is 0,50 m en slotdiepte ( $h_1$ ) bij streefpeilen is 1,8 m.

Figuur 28 – Maatgevende parameters ontwerp vertical slotpassage



Het debiet doorheen de vispassage en de gemiddelde stroomsnelheid kunnen worden berekend door middel van de volgende formules (Larinier, 2002b):

$$Q_{vis} = C_d * b_0 * h_1 * \sqrt{2g * dh} \quad (1)$$

$$V_g = C_d * \sqrt{2g * dh} \quad (2)$$

Met:

$Q_{vis}$ =	Debiet door vertical slotpassage	[m <sup>3</sup> /s]
$V_g$ =	Gemiddelde stroomsnelheid door het slot	[m <sup>3</sup> /s]
$C_d$ =	Debietscoëfficiënt	[-]
$b_0$ =	Slotbreedte	[m]
$h_1$ =	Waterhoogte opwaarts van het slot	[m]
$g$ =	Valversnelling (9,81)	[m/s <sup>2</sup> ]
$dh$ =	Verval over het slot ( $dh=h_1-h_2$ )	[m]
$h_2$ =	Waterhoogte afwaarts van het slot	[m]

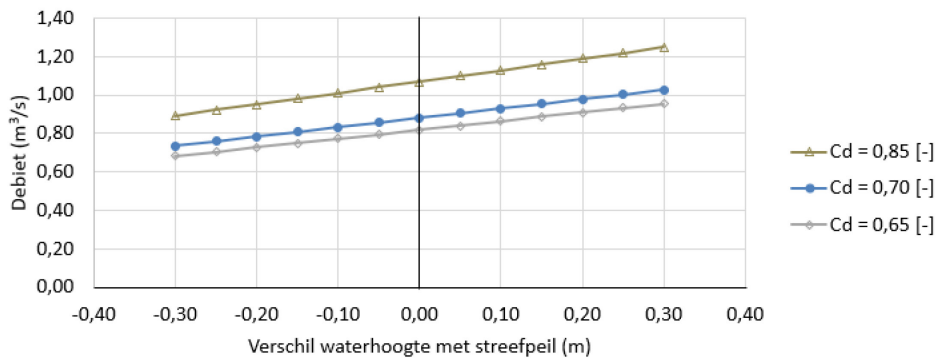
Voor de debietcoëfficiënt wordt in de literatuur een bereik gegeven van 0,65 tot 0,85 (Armstrong *et al.*, 2010; Larinier, 2002b). Deze range wordt vooral bepaald door de vormgeving van het slot: 0,85 voor een 'glad' rond slot, en 0,65 voor een 'ruw' hoekig slot. Ook de configuratie van het slot (hoek en plaats) kunnen de debietcoëfficiënt beïnvloeden. Het onderhavig ontwerp volgt het meest gangbare slotontwerp dat eerder hoekig is (Figuur 17). Daarom wordt gekozen voor een debietcoëfficiënt van  $C_d = 0,7$ .

Op basis van een slotbreedte van  $b_0 = 0,5$  m en een  $C_d$  van 0,7 wordt bij een opwaartse waterdiepte (= natte slotdiepte) van  $h_1 = 1,8$  m een debiet van  $0,88 \text{ m}^3/\text{s}$  bij streefpeilen berekend. Bij relatief kleine peilfluctuaties ( $<0,30$  m) wordt het debiet vooral bepaald door het opwaartse waterpeil. Tabel 11 en Figuur 29 geven een schatting van de debietvariatie bij een fluctuerend opwaarts waterpeil ( $\pm 0,30$  m) en geven tevens een schatting van de mogelijke invloed van de range van de debietcoëfficiënt.

Tabel 11 – Indicatie vispassagedebiet op basis van fluctuatie in opwaarts waterpeil

Cd [-]	beschrijving	eenheid	symp.									
nvt	verschil tov streefpeil	[m]	dHo	-0,30	-0,20	-0,10	-0,05	0,00	0,05	0,10	0,20	0,30
	opwaartse waterdiepte	[m]	h1	1,50	1,60	1,70	1,75	1,80	1,85	1,90	2,00	2,10
0,65	debiet	[m <sup>3</sup> /s]	Q	0,68	0,73	0,77	0,79	0,82	0,84	0,86	0,91	0,95
	gemid. stroomsnelheid	[m/s]	vg	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91
0,70	debiet	[m <sup>3</sup> /s]	Q	0,73	0,78	0,83	0,86	0,88	0,91	0,93	0,98	1,03
	gemid. stroomsnelheid	[m/s]	vg	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
0,85	debiet	[m <sup>3</sup> /s]	Q	0,89	0,95	1,01	1,04	1,07	1,10	1,13	1,19	1,25
	gemid. stroomsnelheid	[m/s]	vg	1,19	1,19	1,19	1,19	1,19	1,19	1,19	1,19	1,19

Figuur 29 - Indicatie vispassagedebiet op basis van fluctuatie in opwaarts waterpeil



Op basis van eerder uitgevoerd onderzoek kunnen de bekkenlengte ( $L_b$ ) en bekkenbreedte ( $B_b$ ) worden afgeleid uit de gekozen slotbreedte ( $b_0$ ) volgens de volgende vuistregels (Larinier, 2002b; Rajaratnam *et al.*, 1991):

$$L_b = C_L * b_0 \quad (3)$$

$$B_b = C_B * b_0 \quad (4)$$

Met:

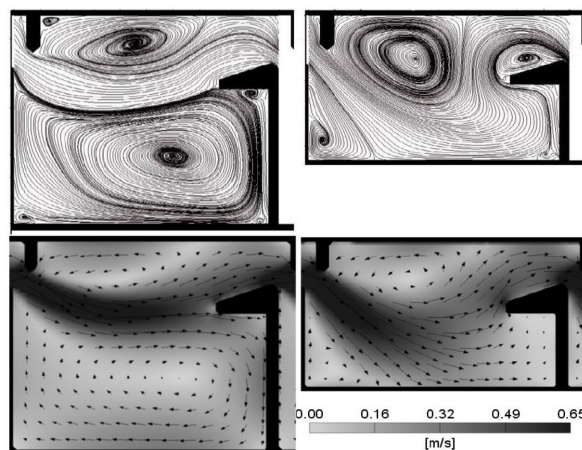
$L_b$ =	Lengte bekken (hart-op-hart afstand)	[m]
$B_b$ =	Breedte bekken (binnenmaat, van muur tot muur)	[m]
$b_0$ =	Slotbreedte	[m]
$C_L$ =	Lengtefactor (8-10) bepaald op basis van experimenten en praktijkervaringen (zie onder)	[-]
$C_B$ =	Breedte factor (6-8) bepaald op basis van experimenten en praktijkervaringen (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 betreft dit vertical slot passages die zijn ontworpen voor de relatief sterke zwemmers (bijv. zalm en forel) waardoor deze ook een relatief groot verval ( $dh = \text{circa } 0,20\text{-}0,30 \text{ m}$ ) toe lieten.

Op basis van deze vuistregels en een slotbreedte van  $b_0 = 0,50 \text{ m}$  wordt voor de bekkenlengte  $L_b$  een bereik van 4 tot 5 m berekend en voor de bekkenbreedte  $B_b$  een bereik van 3 tot 4 m. Uitgaande van de beschikbare ruimte werd gekozen voor een bekkenlengte  $L_b = 4,5 \text{ m}$  en een bekkenbreedte  $B_b = 3,2 \text{ m}$ .

Uit eerder onderzoek blijkt vooral de verhouding tussen de bekkenbreedte en de slotbreedte bepalend is voor het stromingstype in de bekken (Musall *et al.*, 2014). Figuur 30 toont twee stromingstypen waaruit de invloed van de bekkenbreedte op het stromingspatroon blijkt. Links in de figuur is een duidelijk doorgaande hoofdstroom te zien bij voldoende bekkenbreedte, terwijl de hoofdstroom in het rechter plaatje bij een (te) kleine bekkenbreedte tegen de zijwand en de dwarswand botst. Hoewel het rechter stromingstype een hogere energiedissipatie heeft, heeft het meer rechtlijnige stromingstype bij voldoende bekkenbreedte met oog op vismigratie 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 rechtlijnige stromingspatroon wordt bekomen.

Figuur 30 – Invloed van vooral de bekkenbreedte op het stromingstype in vertical slot bekken



Bron: Musall *et al.*, 2014

Vervolgens dient gecontroleerd te worden of de bekken voldoende volume hebben om de toegevoegde energie na elk slot terug te kunnen dissiperen (zie ook 2.2.3). 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:

$$E = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot dh}{L_b \cdot B_b \cdot y_b} \quad (5)$$

Met:

$E =$	Energie per bekken	$[\text{W}/\text{m}^3]$
$\rho =$	Dichtheid zoetwater (998)	$[\text{kg}/\text{m}^3]$
$g =$	Valversnelling (9,81)	$[\text{m}/\text{s}^2]$
$Q =$	Debiet	$[\text{m}^3/\text{s}]$
$dh =$	Verval over het slot	$[\text{m}]$
$L_b =$	Bekkenlengte	$[\text{m}]$
$B_b =$	Bekkenbreedte	$[\text{m}]$
$y_b =$	Waterdiepte in het bekken	$[\text{m}]$

Bij streefpeilen wordt de energiewaarde per bekken berekend op  $E = 35,1 \text{ W/m}^3$ , 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 ( $y_b = h_2 = 1,70\text{m}$ ). Dit is een conservatieve aanname aangezien de diepte in het bekken geleidelijk toeneemt tot opwaarts van het volgende slot terug de waterdiepte  $h_1 (=1,80\text{m})$  wordt bereikt.

## 4.2 Beoordeling invloed waterpeilfluctuaties

De passeerbaarheid van het ontwerp uit paragraaf 4.1 werd beoordeeld bij de maatgevende scenario's voor peilfluctuaties uit Tabel 7. De scenario's zijn daarbij steeds iteratief berekend met behulp van de formules uit paragraaf 4.1. De beoordeling van de verschillende ontwerpen gebeurt volgens drie typen waterstandscenario's zoals beschreven in paragraaf 2.3.3, waarbij steeds waarbij steeds de ontwerpcriteria uit Tabel 4 in paragraaf 2.2.3 werden gecontroleerd.

De minimale doorzweembreedte en doorzweembreedte voldeden logischer wijze in alle scenario's. De minimale doorzweembreedte ( $b_{\min} > 0,50$  m) wordt namelijk bepaald door de slotbreedte, en deze is onafhankelijk van de waterstandfluctuaties. Ook aan minimale doorzweembreedte ( $d_{\min} > 0,50$  m) werd ruim voldaan aangezien de slotdiepte gelijk is aan de bekkendiepte, en de bekkendiepte uitgaat van de minimale diepte over grotere afstand ( $d_{\min} > 1 - 1,5$  m) en voldoende diep werd gekozen in vergelijking met de diepte in de rivier zelf ( $d = 1,8$  m).

Tabel 12 t.e.m. Tabel 21 geven een totaaloverzicht van de resultaten per scenario. Merk op dat sloten en bekkens steeds worden genummerd van stroomopwaarts naar stroomafwaarts, m.a.w. het meest opwaartse slot is nr 1. De invloed van de waterstandfluctuaties werd steeds gecontroleerd ten aanzien de volgende ontwerpcriteria:

- Maximale stroomsnelheid  $< 1 - 1,5$  m/s  $\rightarrow$  gemiddelde stroomsnelheden tussen 1 en 1,5 m/s kleuren oranje en maximale/ gemiddelde stroomsnelheden hoger dan 1,5 m/s kleuren rood in de Tabelresultaten;
- Maximale energie per bekken  $< 100$  W/m<sup>3</sup>  $\rightarrow$  overschrijdingen van het criterium kleuren rood in de Tabelresultaten.

Na de tabellen worden de resultaten per criterium kort besproken in paragraaf 4.2.1 (stroomsnelheid) en paragraaf 4.2.2 (energie per bekken).

Tabel 12 – Resultaten Scenario 1a: Ho = 8,00 mTAW, Ha = 5,61 mTAW en Qvis = 0,88 m<sup>3</sup>/s

N	Slot/bekken nr	[-]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
H1	waterpeil opw slot	[mTAW]	8,00	7,90	7,80	7,70	7,60	7,50	7,40	7,30	7,20	7,10	7,00	6,90	6,81	6,71	6,61	6,51	6,41	6,31	6,21	6,11	6,01	5,91	5,81	5,71
H2	waterpeil afw slot	[mTAW]	7,90	7,80	7,70	7,60	7,50	7,40	7,30	7,20	7,10	7,00	6,90	6,81	6,71	6,61	6,51	6,41	6,31	6,21	6,11	6,01	5,91	5,81	5,71	5,61
Hb0	hoogte slotbodem	[mTAW]	6,20	6,10	6,00	5,90	5,80	5,70	5,60	5,50	5,40	5,30	5,20	5,10	5,01	4,91	4,81	4,71	4,61	4,51	4,41	4,31	4,21	4,11	4,01	3,91
dhw	hydr. verval over slot	[m]	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
h1	waterhoogte opw slot	[m]	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80
h2	waterhoogte afw slot	[m]	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70
S	verdrinkingsgraad	[-]	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94
E	energie-inhoud bekken	[W/m <sup>3</sup> ]	35,1	35,1	35,1	35,1	35,1	35,1	35,1	35,1	35,1	35,1	35,1	35,1	35,1	35,1	35,1	35,1	35,1	35,1	35,1	35,1	35,1	35,1	35,1	35,1
vm	max.snelheid in slot	[m/s]	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40
vg	gem.snelheid in slot	[m/s]	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
vb	gem.snelheid in bekken	[m/s]	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16

Tabel 13 - Resultaten Scenario 1b: Ho = 8,00 mTAW, Ha = 5,83 mTAW en Qvis = 0,87 m<sup>3</sup>/s

N	Slot/bekken nr	[-]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
H1	waterpeil opw slot	[mTAW]	8,00	7,90	7,81	7,71	7,61	7,52	7,42	7,33	7,23	7,14	7,05	6,95	6,86	6,77	6,68	6,59	6,50	6,41	6,32	6,24	6,15	6,07	5,99	5,91
H2	waterpeil afw slot	[mTAW]	7,90	7,81	7,71	7,61	7,52	7,42	7,33	7,23	7,14	7,05	6,95	6,86	6,77	6,68	6,59	6,50	6,41	6,32	6,24	6,15	6,07	5,99	5,91	5,83
Hb0	hoogte slotbodem	[mTAW]	6,20	6,10	6,00	5,90	5,80	5,70	5,60	5,50	5,40	5,30	5,20	5,10	5,01	4,91	4,81	4,71	4,61	4,51	4,41	4,31	4,21	4,11	4,01	3,91
dhw	hydr. verval over slot	[m]	0,097	0,097	0,097	0,096	0,096	0,095	0,095	0,095	0,094	0,094	0,093	0,092	0,092	0,091	0,090	0,089	0,088	0,087	0,086	0,084	0,083	0,082	0,080	0,079
h1	waterhoogte opw slot	[m]	1,80	1,80	1,81	1,81	1,82	1,82	1,82	1,83	1,83	1,84	1,85	1,85	1,86	1,87	1,88	1,89	1,90	1,92	1,93	1,95	1,96	1,96	1,98	2,00
h2	waterhoogte afw slot	[m]	1,70	1,71	1,71	1,71	1,72	1,72	1,73	1,74	1,74	1,75	1,76	1,76	1,77	1,78	1,79	1,80	1,82	1,83	1,85	1,86	1,88	1,90	1,92	1,92
S	verdrinkingsgraad	[-]	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
E	energie-inhoud bekken	[W/m <sup>3</sup> ]	33,7	33,6	33,4	33,2	33,0	32,8	32,6	32,3	32,1	31,8	31,4	31,1	30,7	30,3	29,8	29,3	28,8	28,3	27,7	27,1	26,4	25,7	25,0	24,2
vm	max stroomsnelheid in as	[m/s]	1,38	1,38	1,38	1,37	1,37	1,37	1,37	1,36	1,36	1,35	1,35	1,35	1,34	1,33	1,33	1,32	1,31	1,31	1,30	1,29	1,28	1,27	1,25	1,24
vg	gem.snelheid door slot	[m/s]	0,97	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,95	0,95	0,95	0,94	0,94	0,93	0,93	0,92	0,92	0,92	0,91	0,91	0,90	0,89	0,89	0,88	0,87
vb	gem.snelheid in bekken	[m/s]	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,14	0,14	0,14







Tabel 22 – Resultaten Scenario E1: Ho = 7,98 mTAW, Ha = 5,21 mTAW en Qvis = 0,88 m³/s

N	Slot/bekken nr	[-]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
H1	waterpeil opw slot	[mTAW]	7,98	7,88	7,77	7,67	7,57	7,46	7,36	7,25	7,15	7,04	6,93	6,83	6,72	6,61	6,49	6,38	6,27	6,15	6,03	5,90	5,78	5,64	5,51	5,36	
H2	waterpeil afw slot	[mTAW]	7,88	7,77	7,67	7,57	7,46	7,36	7,25	7,15	7,04	6,93	6,83	6,72	6,61	6,49	6,38	6,27	6,15	6,03	5,90	5,78	5,64	5,51	5,36	5,21	
Hb0	hoogte slotbodem	[mTAW]	6,20	6,10	6,00	5,90	5,80	5,70	5,60	5,50	5,40	5,30	5,20	5,10	5,01	4,91	4,81	4,71	4,61	4,51	4,41	4,31	4,21	4,11	4,01	3,91	
dhw	hydr. verval over slot	[m]	0,102	0,103	0,103	0,103	0,104	0,104	0,105	0,106	0,106	0,107	0,108	0,109	0,111	0,112	0,114	0,116	0,118	0,120	0,123	0,127	0,132	0,137	0,144	0,153	
h1	waterhoogte opw slot	[m]	1,78	1,78	1,77	1,77	1,77	1,76	1,76	1,75	1,74	1,74	1,73	1,72	1,71	1,70	1,69	1,67	1,66	1,64	1,62	1,60	1,57	1,54	1,50	1,45	
h2	waterhoogte afw slot	[m]	1,68	1,67	1,67	1,67	1,66	1,66	1,65	1,65	1,64	1,63	1,62	1,61	1,60	1,59	1,57	1,56	1,54	1,52	1,50	1,47	1,44	1,40	1,35	1,30	
S	verdrinkingsgraad	[-]	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,92	0,92	0,92	0,91	0,90	0,89	
E	energie-inhoud bekken	[W/m³]	36,6	36,8	37,0	37,3	37,5	37,8	38,2	38,5	39,0	39,5	40,0	40,7	41,4	42,3	43,3	44,5	45,8	47,5	49,5	52,0	55,0	58,9	63,9	70,7	
vm	max.snelheid in slot	[m/s]	1,42	1,42	1,42	1,42	1,43	1,43	1,44	1,44	1,45	1,45	1,46	1,46	1,47	1,48	1,49	1,51	1,52	1,54	1,56	1,58	1,61	1,64	1,68	1,73	
vg	gem.snelheid in slot	[m/s]	0,99	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,01	1,01	1,01	1,02	1,02	1,03	1,03	1,04	1,05	1,05	1,06	1,08	1,09	1,11	1,13	1,15	1,18	1,21
vb	gem.snelheid in bekken	[m/s]	0,16	0,16	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,19	0,19	0,20	0,20	0,21	

Tabel 23 – Resultaten Scenario E2: Ho = 8,42 mTAW, Ha = 5,72 mTAW en Qvis = 1,10 m³/s

N	Slot/bekken nr	[-]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
H1	waterpeil opw slot	[mTAW]	8,42	8,32	8,21	8,11	8,01	7,90	7,80	7,69	7,59	7,48	7,37	7,26	7,15	7,04	6,93	6,82	6,71	6,59	6,47	6,36	6,23	6,11	5,98	5,85
H2	waterpeil afw slot	[mTAW]	8,32	8,21	8,11	8,01	7,90	7,80	7,69	7,59	7,48	7,37	7,26	7,15	7,04	6,93	6,82	6,71	6,59	6,47	6,36	6,23	6,11	5,98	5,85	5,72
Hb0	hoogte slotbodem	[mTAW]	6,20	6,10	6,00	5,90	5,80	5,70	5,60	5,50	5,40	5,30	5,20	5,10	5,01	4,91	4,81	4,71	4,61	4,51	4,41	4,31	4,21	4,11	4,01	3,91
dhw	hydr. verval over slot	[m]	0,103	0,103	0,104	0,104	0,104	0,105	0,105	0,106	0,107	0,107	0,108	0,109	0,110	0,111	0,112	0,114	0,115	0,117	0,119	0,121	0,124	0,127	0,130	0,134
h1	waterhoogte opw slot	[m]	2,22	2,22	2,21	2,21	2,20	2,20	2,19	2,19	2,18	2,18	2,17	2,16	2,15	2,14	2,13	2,11	2,10	2,08	2,07	2,05	2,03	2,00	1,98	1,94
h2	waterhoogte afw slot	[m]	2,12	2,11	2,11	2,11	2,10	2,09	2,09	2,08	2,08	2,07	2,06	2,05	2,04	2,03	2,01	2,00	1,99	1,97	1,95	1,93	1,90	1,88	1,85	1,81
S	verdrinkingsgraad	[-]	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,94	0,94	0,94	0,94	0,93	0,93	
E	energie-inhoud bekken	[W/m³]	36,5	36,7	36,9	37,1	37,3	37,6	37,9	38,2	38,6	39,1	39,5	40,0	40,6	41,2	41,9	42,7	43,6	44,6	45,8	47,2	48,8	50,7	53,0	55,7
vm	max.snelheid in slot	[m/s]	1,42	1,42	1,43	1,43	1,43	1,43	1,44	1,44	1,45	1,45	1,46	1,46	1,47	1,48	1,48	1,49	1,50	1,51	1,53	1,54	1,56	1,58	1,60	1,62
vg	gem.snelheid in slot	[m/s]	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,01	1,01	1,01	1,02	1,02	1,02	1,03	1,03	1,04	1,05	1,05	1,06	1,07	1,08	1,09	1,10	1,12	1,14
vb	gem.snelheid in bekken	[m/s]	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,19	0,19

#### 4.2.1 Maximale stroomsnelheden

Ten aanzien van stroomsnelheden werden steeds drie waarden berekend:

- Maximale stroomsnelheid:  $V_m = \sqrt{2g \cdot dh}$
- Gemiddelde stroomsnelheid in het slot:  $V_g = C_d \cdot V_m = \frac{Q_{vis}}{(b_0 \cdot h_1)}$
- Gemiddelde stroomsnelheid in het bekken:  $V_b = \frac{Q_{vis}}{(B_b \cdot h_1)}$

Het eerste wat opgemerkt kan worden in de resultaten is dat wordt bevestigd dat vertical slotpassages (in vergelijking met bijv. bekkentrappen) relatief goed bestand zijn tegen waterpeilfluctuaties. Al bij de debietberekening bleek dat de invloed van peilfluctuatie op het debiet relatief gering is (zie Tabel 11). Bij een variatie in opwaarts waterpeil van -0,20 m tot + 0,40 m varieerde het debiet slechts van respectievelijk 0,78 m³/s tot 1,11 m³/s.

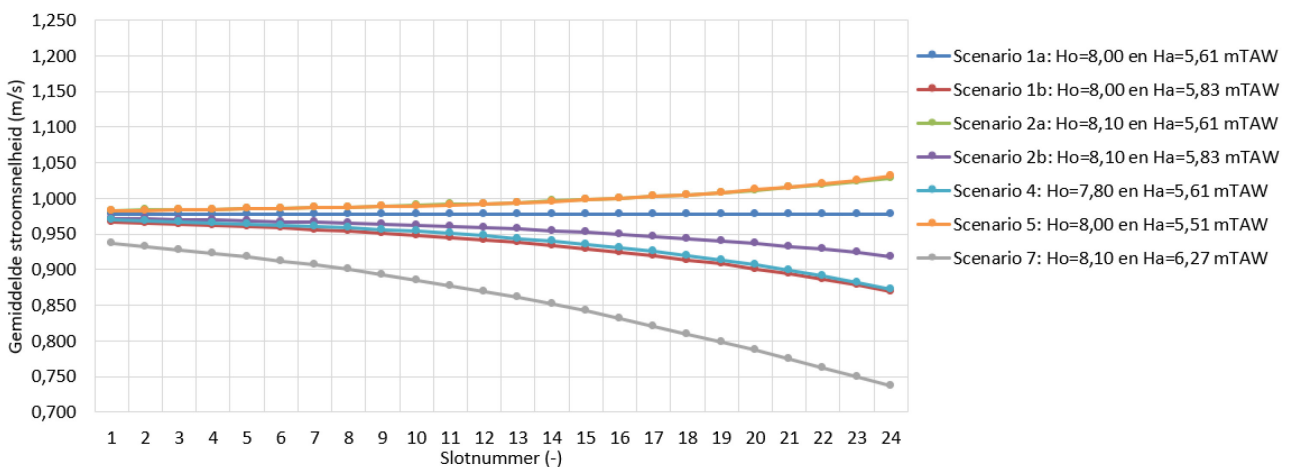
Ook de invloed van peilfluctuaties op de stroomsnelheden is relatief gering, maar doordat vanuit ruimtelijke beperkingen een relatief hoger verval per slot nodig was (dh = 0,10 m i.p.v. oorspronkelijk dh = 0,09 m), liggen stroomsnelheden wel relatief dicht tegen het criterium voor maximale sprintsnelheden (V < 1 – 1,5 m/s).

De gemiddelde stroomsnelheid in de bekkens geeft ‘slechts’ een zeer grove indicatie aangezien in de bekkens circulatieneren ontstaan (zie Figuur 30) waardoor deze door middel van 1D-berekeningen eigenlijk niet bepaald kan worden. Bij vertical slots dienen de circulatieneren in de bekkens eerder als rust plaats. Om deze reden en omdat de berekende gemiddelde stroomsnelheden in de bekkens voor alle scenario’s lager zijn dan het criterium van maximaal 0,5 m/s, worden deze niet verder besproken.

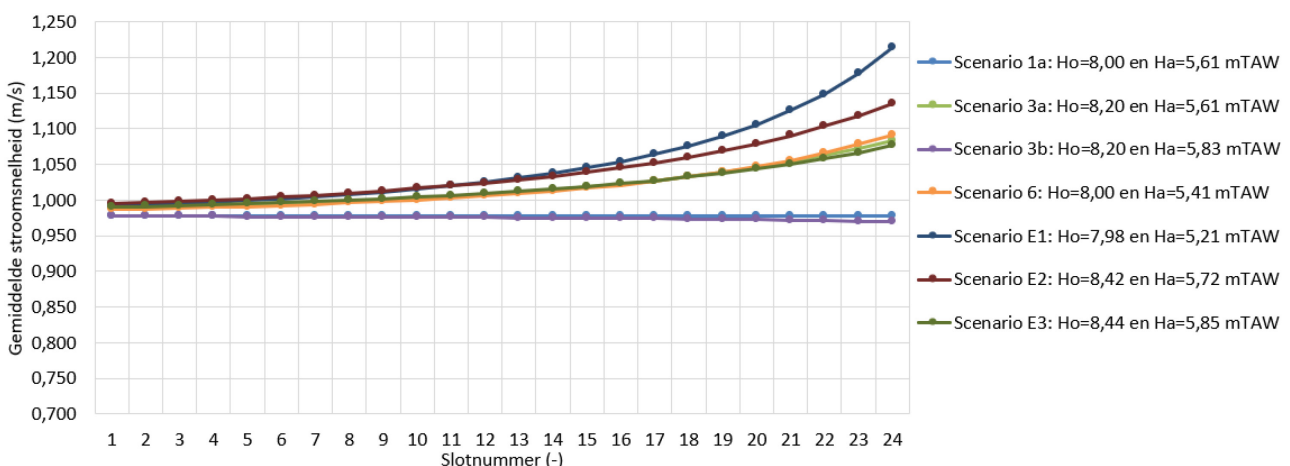
De gemiddelde stroomsnelheid bij streefpeilen (scenario 1a) is 0,98 m/s, wat overeenkomt met de ondergrens voor het criterium voor de maximale sprintsnelheid (1 – 1,5 m/s), terwijl de maximale stroomsnelheid met 1,4 m/s slechts 0,1 m/s onder de bovengrens van de maximale sprintsnelheid ligt. Dit betekent dat een lichte variatie in op- en/of afwaarts waterpeil de gemiddelde stroomsnelheden al in de ‘oranje zone’ (1 tot 1,5 m/s) en de maximale stroomsnelheden zelfs in de ‘rode zone’ (> 1,5 m/s) kan brengen. Bij toename van het verval (door toename opwaarts peil en/of afname van het afwaarts peil) nemen de stroomsnelheden vooral toe in de meest afwaartse sloten, waarbij de hoogste stroomsnelheden optreden in het laatste slot.

Figuur 31 geeft de gemiddelde stroomsnelheden ( $V_g$ ) bij de maatgevende scenario's en Figuur 32 geeft de gemiddelde stroomsnelheden ( $V_g$ ) bij de aanvullende en extreme scenario's. Merk op dat scenario 2a daarbij wat betreft de resultaten nagenoeg gelijk is aan scenario 5 waardoor deze grafieken zo goed als op elkaar vallen. Daarnaast wordt opgemerkt dat deze stroomsnelheden berekend zijn bij een debiet coëfficiënt  $C_d = 0,7$  m/s (zie ook paragraaf 4.1). Mogelijk kunnen stroomsnelheden in werkelijkheid dus nog iets hoger of lager liggen.

Figuur 31 – Resultaten invloed peilfluctuatie op de gemiddelde stroomsnelheden ( $V_g$ ) bij de maatgevende scenario's



Figuur 32 – Resultaten invloed peilfluctuatie op de gemiddelde stroomsnelheden ( $V_g$ ) bij de aanvullende en extreme scenario's





Uit de maatgevende scenario's (Figuur 31) kan het volgende worden afgeleid:

- Stroomsnelheden nemen enkel toe bij scenario's 2a en 5 (vanwege toename van het verhang). De gemiddelde stroomsnelheid in het laatste slot neemt toe tot maximaal 1,05 m/s, wat net in de 'oranje' zone is. Bij huidige peilregeling zal in de praktijk het scenario 2b echter veel meer voorkomen als 2a (zie ook histogram in Tabel 5; in de huidige regeling komen waterstanden lager dan 5,61 mTAW minder dan 1% van de tijd voor). Door de hogere afwaartse waterstand in scenario 2b zijn de stroomsnelheden bij een toename van het opwaartse peil met 0,10 m (scenario 2b) lager, namelijk 0,92 m/s. Merk op dat dit verschil eigenlijk ook relatief gering is.
- Bij de scenario's met een verhang kleiner dan het verhang bij streefpeil (scenario's 1b, 2b, 4 en 7), ligt de stroomsnelheid in de afwaartse sloten lager (laagste waarde bij scenario 7 is 0,73 m/s). Dit is vanuit oogpunt attractiviteit wel nog hoog genoeg (> 0,5 m/s).
- Eigen aan een vertical slot is dat het verval en daarmee de stroomsnelheid in de meest opwaartse sloten maar heel gering wordt beïnvloed door peilfluctuaties en dus nagenoeg gelijk blijven aan de waarden uit het ontwerpscenario (0,98 m/s). Enkel bij sterk verhoogde afwaartse peilen (scenario 7) neemt ook de stroomsnelheid in het opwaartse slot iets meer af (0,94 m/s), maar dus eigenlijk nog maar zeer gering.

Uit de aanvullende en extreme scenario's (Figuur 32) kan het volgende worden afgeleid:

- Bij de aanvullende scenario's 3 en 6 neemt de gemiddelde stroomsnelheid in het laatste slot toe tot circa 1,1 m/s. In de huidige situatie komen deze scenario's minder als 2% van de tijd voor en blijkt tevens uit scenario 3b dat de hogere afwaartse waterstand er voor zorgt dat, net als bij scenario 2, de gemiddelde stroomsnelheden onder de 1 m/s blijven.
- Bij de extreme scenario's nemen gemiddelde stroomsnelheden in het laatste slot toe tot maximaal 1,22 m/s wat nog steeds onder de bovengrens ligt van maximale sprintsnelheden tot 1,5 m/s. De maximale stroomsnelheden in het slot liggen echter wel hoger dan 1,5 m/s (Tabel 22 en Tabel 23).

Algemeen wordt geconcludeerd dat het ontwerp voldoet aan de ontwerpcriteria voor maximale stroomsnelheden binnen de minimaal vereiste werkingsperiode (meer dan 98% van de tijd) en door de relatief hoger afwaartse waterstand ook voor de aanvullende scenario's met sterk verhoogde opwaartse waterpeilen (meer robuust ontwerp).

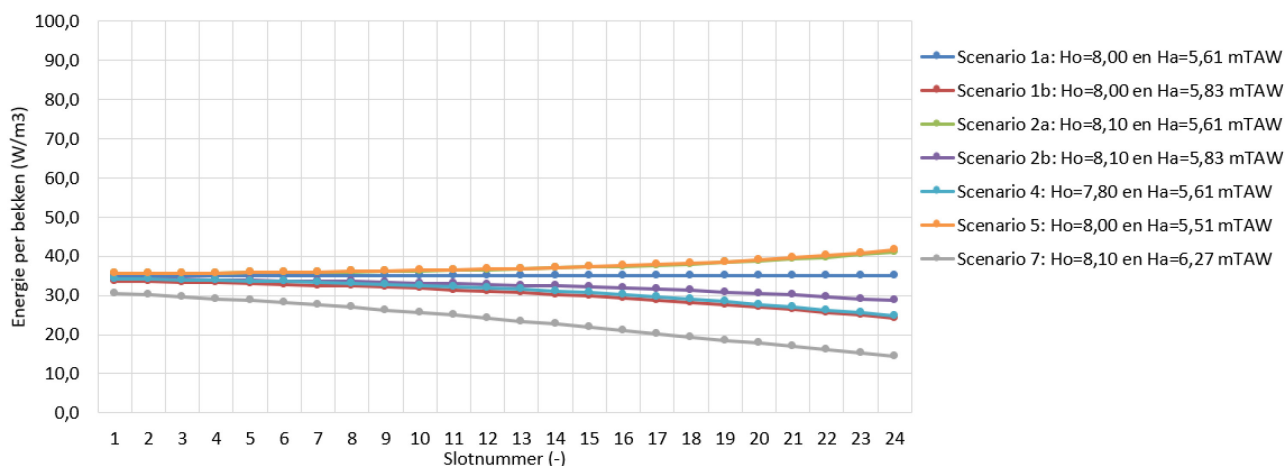
Door het relatief hogere verval per drempel (0,10 m i.p.v. de aanvankelijk gekozen 0,09 m) liggen de maximale en gemiddelde stroomsnelheden per slot met het oog op de zwakkere zwemmers relatief dicht tegen de maximale sprintsnelheden voor deze soorten (de grenzen van een efficiënt ontwerp worden opgezocht). Doordat vertical slotpassages goed bestand zijn tegen peilfluctuaties is de passage voor sterkere zwemmers in principe zelfs nog passeerbaar bij de extreme scenario's (welke minder dan 2% van de tijd voorkomen). Stroomsnelheden blijven onder deze extreme condities (verval tot 2,77 m) tevens laag genoeg dat, op basis van expert judgement verwacht wordt, dat er geen risico is op schade aan de vispassage (bijv. wegspoelen breuksteen over de betonnen bodem).

#### 4.2.2 Maximale energie/turbulentie per bekken

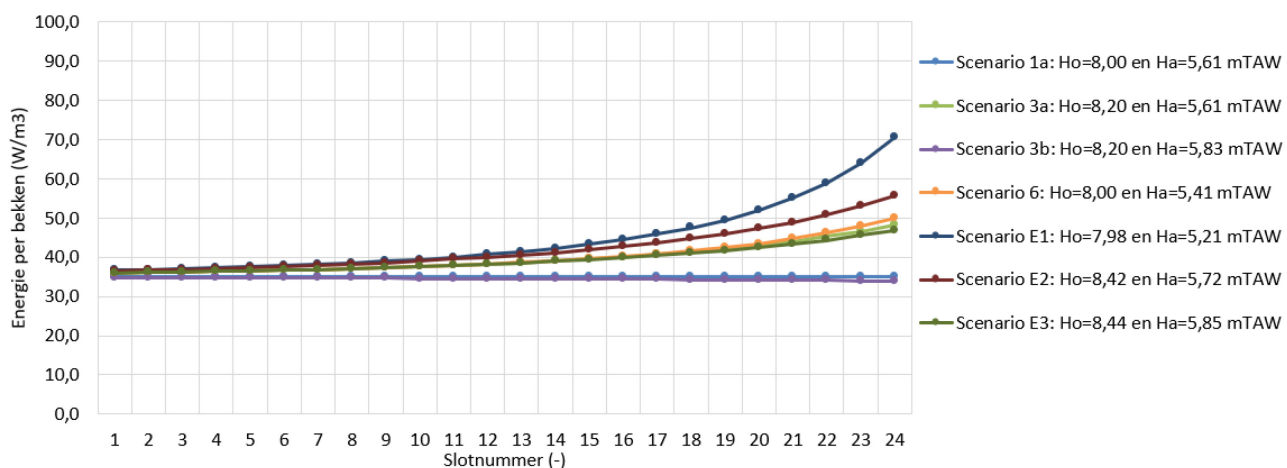
Het criterium voor maximale energie per bekken ( $E < 100 \text{ W/m}^3$ ) wordt bij alle scenario's ruim gehaald. Figuur 33 toont de energie per bekken voor de maatgevende scenario's (minimaal vereiste werkingsperiode) en Figuur 34 toont de energie per bekken voor aanvullende en extreme scenario's. Hieruit blijkt dat zelfs bij de extreme scenario's de maximaal toelaatbare energie per bekken niet wordt overschreden. Dit komt vooral doordat het vereiste verval per bekken relatief klein is in verhouding tot het bekkenvolume.

Merk ook op dat, net als bij de stroomsnelheden, de grafiek van scenario 2a wat betreft de resultaten voor energie per bekken nagenoeg gelijk is aan scenario 5 waardoor deze grafieken zo goed als op elkaar vallen.

Figuur 33 – Resultaten invloed peilfluctuatie op de energie per bekken bij de maatgevende scenario's



Figuur 34 – Resultaten invloed peilfluctuatie op de energie per bekken bij de aanvullende en extreme scenario's



## 5 Toegevoegd debiet

Uitgaande van een vispassagedebiet van circa  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  (zie 4.1) is een maximaal lokstroomdebiet nodig van  $4 \text{ m}^3/\text{s}$ . In de paragrafen 3.6 en 3.7 werd het ontwerp beschreven van het kanaal van het toegevoegd debiet met opwaartse inlaat opening en afwaartse regelconstructie (zie ook Figuur 23 tot en met Figuur 26) om dit toegevoegde debiet te kunnen inlaten. Het onderhavig hoofdstuk beschrijft de onderliggende berekeningen van de opwaartse inlaat en de afwaartse regelconstructie.

### 5.1 Opwaartse inlaat

Het verval over de inlaatopening kan worden bepaald met formule 10 uit Bijlage A. Het maximale toegevoegde debiet is  $4 \text{ m}^3/\text{s}$  (zie paragraaf 3.7). Voor de debietcoëfficiënt werd de theoretische waarde  $C_d = 0,61$  aangehouden. Bij de  $C_d$ -waarde wordt opgemerkt dat dit een grove benadering is op basis van theoretische waarden voor een opening met smalle rand (Bos, 1989). Dit geeft voor dit doeleinde een goede en conservatieve indicatie voor de contractie van de stroming en de energieverliezen in deze relatief korte koker door de sluiswand. Tabel 24 toont het resultaat bij een aantal verschillende combinaties van lengte en breedte.

Om zo min mogelijk effect te hebben op het toegevoegd debiet en daarmee de regelconstructie wordt het verval best zo laag mogelijk gekozen. Uit verkennende bouwkundige berekeningen door het studiebureau bleek dat openingen door de huidige sluiswand niet groter mogen zijn als  $B \times H = 3 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ . Op basis van de resultaten uit Tabel 24 blijkt dat deze maximale dimensies een acceptabel verval geven ( $< 10 \text{ cm}$ ) bij het maximum debiet. Daarom wordt gekozen voor één opening met dimensies  $B \times H = 3 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ .

Tabel 24 – Resultaten indicatie verval over inlaatopening bij scenario 1,  $Q = 4 \text{ m}^3/\text{s}$  en  $C_d = 0,61$

omschrijving	eenheid	syb							
waterpeil opwaarts inlaat	[mTAW]	$H_{o1}$	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00
waterpeil afwaarts inlaat	[mTAW]	$H_{a1}$	5,81	7,45	7,86	7,94	7,97	7,98	7,99
verval over inlaat	[m]	$dH_1$	2,19	0,55	0,14	0,06	0,03	0,02	0,01
breedte inlaat	[m]	$b_i$	1,00	2,00	2,00	3,00	3,00	4,00	4,00
hoogte inlaat	[m]	$h_i$	1,00	1,00	2,00	2,00	3,00	3,00	4,00
debiet door inlaat	[ $\text{m}^3/\text{s}$ ]	$Q_s$	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00

### 5.2 Afwaartse regelconstructie

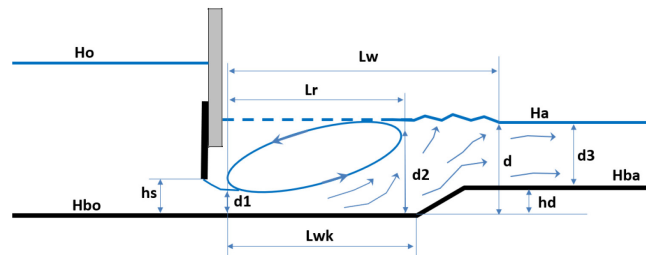
De benodigde bodemhoogte onder de hefschuif van de afwaartse regelconstructie en de minimale woelkomlengte werden bepaald bij elk van de scenario's voor waterpeilfluctuatie uit Tabel 7 met behulp van de rekenmethode uit Bijlage A. Hierbij werd steeds de hefschuifhoogte toegepast die bij scenario 1a (= open afwaarts streefpeil) zorgt voor een debiet van  $4 \text{ m}^3/\text{s}$ , aangezien er wordt van uitgegaan dat in de praktijk steeds zal worden geregeld op een hefstand en niet op een (berekend) debiet per verval. Dit betekent dat het debiet per scenario varieert rond de  $4 \text{ m}^3/\text{s}$ . Voor de minimale bodemhoogte werd het criterium gebruikt dat onder de maatgevende scenario's voor optimale werking (scenario 1, 2, 4 en 5) een verdronken watersprong dient te ontstaan ( $d_2 < d_a$ ). Vanaf een bodemhoogte van 3,2 mTAW kon worden voldaan aan dit criterium. Tabel 25 toont de resultaten voor de maatgevende parameters van de watersprong bij een bodemhoogte van 3,2 mTAW (zie Bijlage A voor de rekenmethode).



Tabel 25 – Resultaten lengte watersprong bij maatgevende scenario's en hefhoogte 1,08 m

omschrijving	eenheid	symp	scenario											
			1a	1b	2a	2b	3a	3b	4	5	6	7	E1	E2
Waterpeil afwaarts inlaat	[mTAW]	Ho <sub>1</sub>	8,00	8,00	8,10	8,10	8,20	8,20	7,80	8,00	8,00	8,10	7,98	8,42
Waterpeil opwaarts inlaat	[mTAW]	Ha <sub>1</sub>	7,94	7,94	8,04	8,04	8,13	8,14	7,74	7,94	7,93	8,05	7,91	8,35
Totaal verval over inlaat	[m]	dH <sub>1</sub>	0,06	0,06	0,06	0,06	0,07	0,06	0,06	0,06	0,07	0,05	0,07	0,07
breedte inlaat	[m]	bi	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
hoogte inlaat	[m]	hi	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Waterpeil opwaarts schuif	[mTAW]	Ho <sub>2</sub>	7,94	7,94	8,04	8,04	8,13	8,14	7,74	7,94	7,93	8,05	7,91	8,35
Waterpeil afwaarts schuif	[mTAW]	Ha <sub>2</sub>	5,61	5,83	5,61	5,83	5,61	5,83	5,61	5,51	5,41	6,27	5,21	5,72
Totaal verval over schuif	[m]	dH <sub>2</sub>	2,33	2,11	2,43	2,21	2,52	2,31	2,13	2,43	2,52	1,78	2,70	2,63
Afwaartse bodempeil	[mTAW]	Hba	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20
breedte schuif	[m]	b <sub>s</sub>	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
hoogte schuif boven bodem	[m]	h <sub>s</sub>	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08
Toegevoegd debiet	[m <sup>3</sup> /s]	Qt	4,00	3,81	4,08	3,90	4,16	3,98	3,83	4,08	4,16	3,50	4,31	4,25
Waterdiepte voor watersprong	[m]	d <sub>1</sub>	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66
Stroomsnelh. voor watersprong	[m/s]	v <sub>1</sub>	6,76	6,44	6,90	6,59	7,04	6,73	6,47	6,90	7,04	5,92	7,28	7,19
Froudegetal voor watersprong	[-]	Fr <sub>1</sub>	2,66	2,54	2,72	2,59	2,77	2,65	2,55	2,72	2,77	2,33	2,87	2,83
Waterdiepte na watersprong	[m]	d <sub>2</sub>	2,17	2,05	2,22	2,11	2,27	2,16	2,06	2,22	2,27	1,86	2,36	2,32
Afwaartse waterdiepte	[m]	d	2,41	2,63	2,41	2,63	2,41	2,63	2,41	2,31	2,21	3,07	2,01	2,52
Verdrinkingsgraad watersprong	[-]	S <sub>j</sub>	0,11	0,28	0,09	0,25	0,06	0,22	0,17	0,04	-0,03	0,65	-0,15	0,09
Type watersprong	[-]		verdr	verdr	verdr	verdr	verdr	verdr	verdr	verdr	vrije	verdr	vrije	verdr
Einde watersprong tov hefschuif	[m]	Lw	14,41	15,35	14,47	15,41	14,53	15,48	14,28	13,98	11,62	17,28	12,24	15,13
Lengte roller (Chanson)	[m]	Lr	6,11	5,45	6,40	5,75	6,68	6,05	5,51	6,40	6,68	4,36	7,18	6,99
Lengte roller (Hager)	[m]	Lr	5,90	5,27	6,18	5,56	6,45	5,85	5,33	6,18	6,45	4,22	6,92	6,74
Gekozen factor obv Fr1	st	Cwk	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
Lengte woelkom	[m]	Lwk	4,77	4,51	4,88	4,63	4,99	4,75	4,54	4,88	4,99	4,10	5,18	5,11
Indicatie hoogte einddrempel	[m]	hed	0,78	0,77	0,78	0,78	0,78	0,78	0,77	0,78	0,78	0,77	0,78	0,78
Breedte afwaarts kanaal	[m]	bk	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60
Gem. snelheid in kanaal	[m/s]	vg <sub>ka</sub>	1,04	0,91	1,06	0,93	1,08	0,95	0,99	1,10	1,18	0,71	1,34	1,05
Gekozen hoogte drempel	[m]	hd	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
Gem. snelheid boven drempel	[m/s]	vg <sub>d</sub>	1,24	1,07	1,27	1,09	1,29	1,12	1,19	1,34	1,44	0,82	1,67	1,25

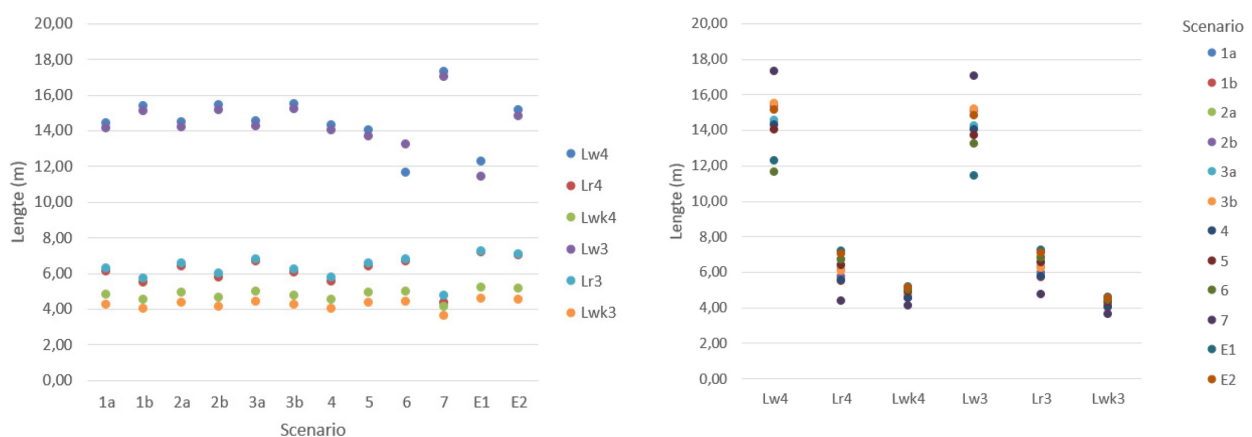
Figuur 35 – Maatgevende parameters onderstroom en woelkom



Hieruit kan worden opgemaakt dat enkel bij de meer uitzonderlijke scenario's 6 en E1 een vrije watersprong kan ontstaan. Uit de factor  $S_j$  kan worden afgeleid dat ook deze scenario's (zeker 6) nog steeds dicht tegen een verdronken watersprong aan zitten. Tevens komen deze scenario's ook maar zeer uitzonderlijk voor (<1% van de tijd) en buiten de periode voor optimale werking. Ook volgt uit de berekeningen dat de roller in beide scenario's binnen het gedeelte van de betonnen woelkom blijft (zie verder en Figuur 26). Merk op dat er met oog op de einddrempel voor gekozen is om deze aan te sluiten op het afwaarts bodempeil (drempelhoogte 0,40 m) en deze niet door te trekken tot de vereiste 0,80 m uit de berekeningen. Dit omdat de lengte van de woelkom al voldoet aan de berekende roller lengte en daarmee niet gekozen is voor de kortere woelkomlengte  $L_{wk}$ , waar de berekening van de einddrempel aan verbonden is (zie rekenmethodes in bijlage A).

Ten aanzien van de nodige afstand tussen de hefschuif en het afwaartse einde van de muur tussen de vispassage en het kanaal voor het toegevoegd debiet wordt vooral de rollerlengte en tevens de woelkomlengte beschouwd. Daarnaast is de waterspronglengte van belang om de afstand tussen de hefschuif en de mondingsopening (koker door de sluismuur) te evalueren. Figuur 36 geeft twee visualisaties van de resultaten voor deze drie parameters. Ter vergelijking zijn ook de resultaten bij een debiet van  $Q_t = 3 \text{ m}^3/\text{s}$  weergegeven.

Figuur 36 – Resultaten lengte watersprong (Lw), lengte roller (Lr) en lengte woelkom (Lwk) bij  $Q_t = 3$  en  $4 \text{ m}^3/\text{s}$



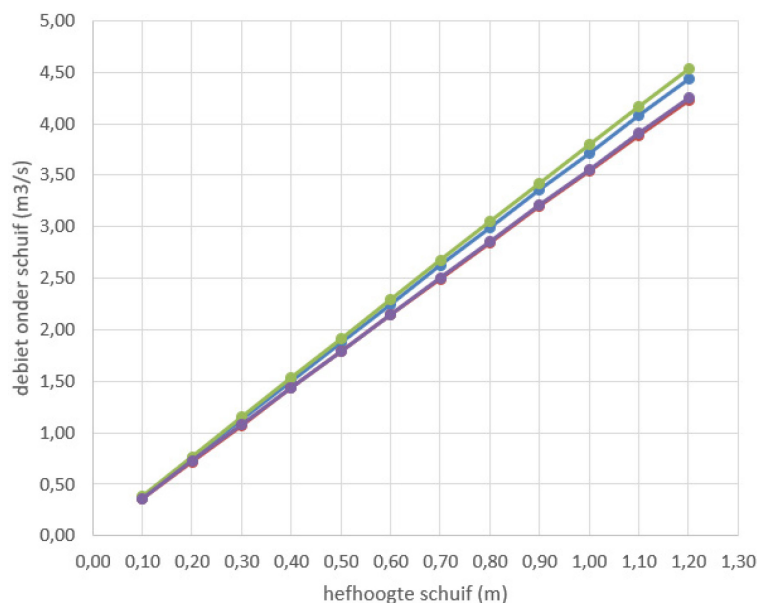
Op basis van deze resultaten wordt gekozen voor een woelkomlengte van 7 m (bovenkant woelkom, zie ook Figuur 26), waarbij de betonnen einddrempel over een afstand van 1 meter wordt doorgetrokken tot afwaarts bodempeil. Het einde van de watersprong ligt in de maatgevende situaties op 14 tot 16 m afwaarts van de hefschuif en daarmee ter hoogte van het begin van de mondingsopening. Idealiter zou het einde van de watersprong net opwaarts van de mondingsopening eindigen, maar aangezien vooral de roller met de hogere stroomsnelheden maatgevend is voor passeerbaarheid wordt verwacht dat dit geen negatief effect zal hebben op de passeerbaarheid van de monding. Daarnaast zullen ook geleidingswanden worden voorzien om de stroming uit het kanaal van het toegevoegd debiet af te buigen naar de mondingskoker (zie verder in paragraaf 6.3 ten aanzien van het ontwerp van de monding). Het verder opwaarts plaatsen van de hefschuif zou er namelijk weer voor kunnen zorgen dat vissen, wanneer er geen roosters worden toegepast (uitgangspunt), bij lagere toegevoegde debieten het parallel kanaal in zwemmen, wat best zo veel mogelijk voorkomen wordt.

In principe kan de lengte van de roller en watersprong worden verkort door de toepassing van dissipatieblokken (Figuur 54 in Bijlage A). Deze invloed is dan ook onderzocht in Visser *et al.* (2018c). Vanuit oogpunt van vismigratie werd er echter afgezien van toepassing van dissipatieblokken aangezien deze in het geval van mogelijke afwaartse migratie door het kanaal van het toegevoegd debiet zullen leiden tot een hogere mortaliteit. De relatief geringe invloed van de inkorting van de watersprong weegt in dit geval niet op tegen het negatieve effect op de mogelijkheden voor afwaartse migratie.

Figuur 37 toont de berekende relatie tussen de hefschuifhoogte en het daarbij optredende onderstroomdebiet voor scenario 1a, 1b, 2a en 4 (maatgevende scenario's voor de dagelijks omstandigheden). Hierbij wordt opgemerkt dat voor de debietcoëfficiënt een relatief conservatieve waarde is aangehouden van  $C_d = 0,61$ . In werkelijkheid wordt deze vooral bepaald door de verhouding tussen waterdrukhoogte en de hoogte van de opening, en door het ontwerp van de kleppunt. Op basis van de verhouding tussen drukhoogte en openingshoogte wordt verwacht dat de  $C_d$ -waarde eerder tussen 0,65 en 0,68 zal liggen (Nortier & de Koning, 1996). Toch is conservatief een waarde gelijk aan 0,61 toegepast. Bij het toepassen van deze waarde wordt namelijk een voldoende openingsgrootte bekomen om zeker het maximaal benodigde debiet van 4 m<sup>3</sup>/s te kunnen behalen. Na realisatie van de constructie kan dan een preciezere verhouding tussen openingshoogte van de hefschuif en het debiet worden vastgesteld aan de hand van metingen.

Op basis van de berekeningen wordt 1,1 m gekozen als hoogte van de doorstroomopening van de afwaartse regelconstructie.

Figuur 37 – Indicatie relatie hoogte hefschuif ( $h_s$ ) en debiet onder schuif ( $Q_t$ ) bij vier maatgevende scenario's



## 6 Monding

Zoals beschreven in paragraaf 0 speelt de locatie en oriëntatie van de monding een belangrijke rol in de attractiviteit (vindbaarheid) en daarmee de effectiviteit van de vispassage. Wanneer opwaarts migrerende vissen aan een migratieknelpunt komen (zoals bijv. een stuw), zwemmen ze tot het gebied waarin de turbulenties of stroomsnelheden voor de vissen te hoog zijn om nog te kunnen optrekken. Vanaf deze migratielimietlijn zoekt de vis naar een alternatieve trekroute.

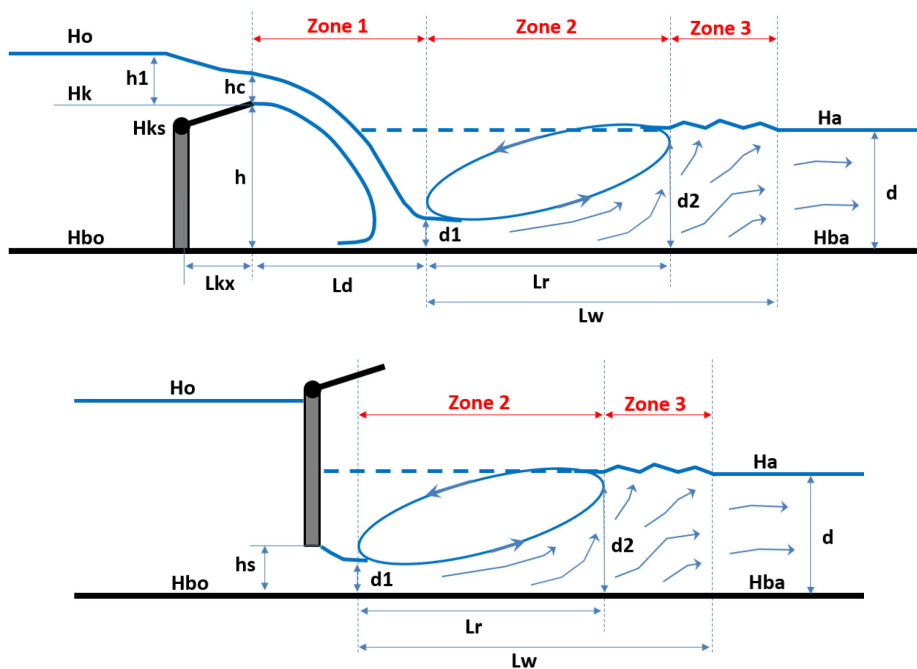
### 6.1 Watersprong en migratielimietlijn

Aangezien de locatie van de migratielimietlijn afhankelijk is van het debiet over de stuwen is de ligging niet constant en kan men dus eerder spreken van een migratielimietzone (zie 0).

Wanneer water over de stuw stort, ontstaat er afwaarts van de stuw een vallende straal en een zeer turbulente watersprong met hoge stroomsnelheden aan de bodem (superkritische stroming) en aan het oppervlak een terugstroom naar de vallende straal (zie boven aan in Figuur 38).

Vrije watersprongen worden in principe vanuit het oogpunt van mogelijke erosie best voorkomen en komen in de maatgevende scenario's voor de (optimale) werking van de vispassage te Sint-Baafs-Vijve (tussen  $Q_{90\%}$  en  $Q_{10\%}$ ) niet voor. In de maatgevende situaties voor de vispassage is er dus altijd sprake van een verdrongen watersprong.

Figuur 38 – Watersprong bij overstort (boven) en onderstroom (onder)



Om de locatie van de migratielimietzone te kunnen bepalen worden ten aanzien van de watersprong 3 zones onderscheiden:

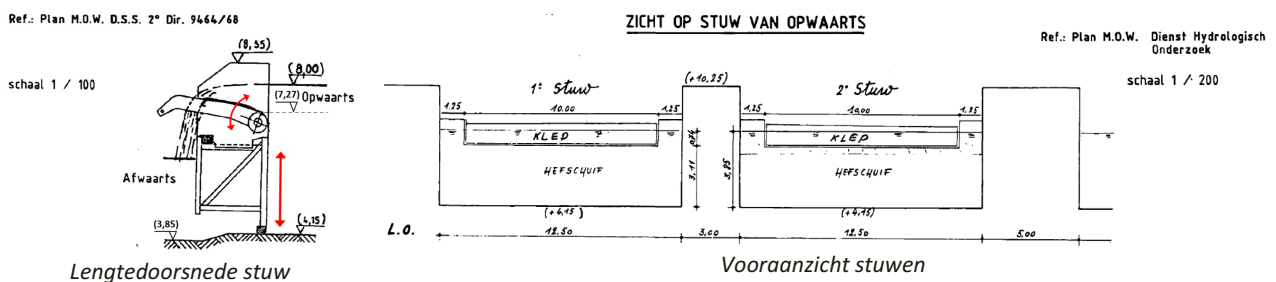
1. Zone van de vallende straal ( $L_d$ ): bevindt zich tussen de punt van de klep en het punt waar de vallende straal de bodem raakt en overgaat in een horizontale stroom met hoge stroomsnelheden ( $d_1$ ). In het geval van een vrije watersprong zou je deze zone kunnen opdelen in een zone 1a met vallende straal, en een zone 1b met schietend water voordat de daadwerkelijke watersprong begint;
2. Zone van de zgn. 'roller' ( $L_r$ ): loopt van einde vallende straal (punt  $d_1$ ) tot waar de evenwichtsdiepte voor de watersprong wordt bereikt ( $d_2$ ). In deze zone treden hoge stroomsnelheden aan de bodem op en terugstroom aan het oppervlak.
3. Zone einde watersprong ( $L_w - L_r$ ): loopt van einde roller (punt  $d_2$ ) tot waar terug een min om meer rechtlijnige stroming met gemiddelde stroomsnelheden ontstaat (einde  $L_w$ )

In principe is zone 3 is gelijk aan de migratielimietzone. Afhankelijk van de doelsoort (sterke/zwakke zwemmer; reactie op turbulentie) kan de effectieve limietlijn echter dichter tegen of verder af van de roller (zone 2) liggen.

De stuw te Sint Baafs Vijve kan naast een overstort ook een onderstroom hebben aangezien dit een hefstuw met klep betreft (zie Figuur 39 en onderaan Figuur 38). Dit stuwtype heeft aan de bovenzijde een klep voor de regeling van het waterpeil bij normale (relatief lagere) afvoer. In het geval van de stuw te Sint-Baafs-Vijve bevindt de bovenkant van het scharnier van deze klep zich op een hoogte van 7,27 mTAW (De Laet *et al.*, 1988). Bij relatief hogere afvoeren wordt de gehele stuw (schuif + klep) geheven waardoor er een onderstroom ontstaat. In geval van een was kan de stuw zelfs geheel boven water worden geheven.

Ook in het geval van een onderstroom kunnen dezelfde zones worden onderscheiden als bij overstort (Figuur 38 – onderaan). Enkel komt zone 1 bij een onderstroom nagenoeg te vervallen in situaties van een verdrinken watersprong.

Figuur 39 – Schetsen dimensionering hefstuwen met kleppen te Sint-Baafs-Vijve



Bron: De Laet *et al.* (1988)

Op basis van de rekenmethodes in Bijlage A kan de ligging van het einde van de roller en de watersprong (en daarmee de ligging van de migratielimietzone) bepaald worden bij de maatgevende combinaties van debiet en op- en afwaartse waterstanden voor zowel overstort als onderstroom. Voor het maatgevende debiet zijn de boven- en ondergrenzen ( $Q_{90\%}$  en  $Q_{10\%}$ ) volgens het debietcriterium voor optimale werking van toepassing (zie 2.3.4). Het debiet op de Leie kent op het moment relatief grote dagelijkse schommelingen waarbij het twee a drie keer per dag opbouwt en afbouwt tussen  $0 \text{ m}^3/\text{s}$  en circa  $30\text{-}60 \text{ m}^3/\text{s}$  (zie paragraaf 2.3.2).

De berekeningen worden daarom uitgevoerd voor de volgende maatgevende debieten (zie ook Tabel 8):

- Ondergrens op basis van kwartiergemiddelde waarde:  $Q_{90\%} \approx 1,35 \text{ m}^3/\text{s}$
- Ondergrens op basis van daggemiddelde waarde:  $Q_{90\%} \approx 8 \text{ m}^3/\text{s}$
- Bovengrens op basis van kwartiergemiddelde waarde:  $Q_{10\%} \approx 60 \text{ m}^3/\text{s}$

Voor de ondergrens wordt ook de daggemiddelde waarde opgenomen aangezien dit een goede benadering is van de ondergrens voor de migratielimietzone in geval dat de schommelingen in het debiet (in de nabije toekomst) kunnen worden verholpen.

De bovengenoemde debieten kunnen in de dagelijkse omstandigheden optreden bij verschillende waterstanden met een bijbehorende kans op voorkomen. Voor elk van deze debieten zijn daarom berekeningen uitgevoerd voor de maatgevende en aanvullende scenario's voor waterstandsfluctuatie uit Tabel 7. De extreme scenario's zijn in dit geval niet van toepassing aangezien het gaat om de ligging van de migratielimietzone tijdens de minimale periode voor optimale werking (> 98% van de tijd) en niet in uitzonderlijke situaties (< 2% van de tijd).

Tevens werd in de berekeningen onderscheid gemaakt tussen overstort over de stuwklep en onderstroom bij het heffen van de gehele stuw (zie Figuur 38). Uit verkennende berekeningen bleek dat bij een volledig naar beneden gelaten stuwklep ( $H_k = 7,27 \text{ mTAW}$ ) een maximaal overstortdebiet gehaald kan worden van circa 20-30  $\text{m}^3/\text{s}$  (afhankelijk van opwaartse waterstand). Dit betekent dat berekeningen bij de bovengrens van  $Q_{10\%}$  (=circa 60  $\text{m}^3/\text{s}$ ) enkel uitgevoerd kunnen worden bij onderstroom. Wel dient daarnaast ook de situatie van een volledig neergelaten stuwklep te worden geëvalueerd aangezien deze situatie mogelijk maatgevender kan zijn voor de maximale lengte van de watersprong dan de situatie van onderstroom bij debiet 60  $\text{m}^3/\text{s}$  (=bovengrens  $Q_{10\%}$ ).

Bij de berekeningen van de watersprong bij overstort en onderstroom gelden tevens de volgende uitgangspunten:

- In geval van de toepassing van de maatgevende debieten op de rivier zou(den) in principe het vispassagedebiet (en eventueel ook het toegevoegde debiet) nog van het maatgevende debiet op de rivier afgetrokken kunnen worden. Aangezien de grootte van het toegevoegd debiet kan verschillen, worden vanuit een conservatieve benadering geen vispassagedebieten afgetrokken van de beschikbare afvoer op de rivier.
- Voor het afwaartse bodempeil wordt +3,85 mTAW toegepast. Na circa 10 m afwaarts van de stuwen neemt dit peil in werkelijkheid over een afstand van circa 70 m af tot +3,12 mTAW waarbij verdiepte drempels worden toegepast met hoogte van 0,8 m (zie ook Figuur 5). In principe zou de grotere waterdiepte en de drempels de lengte van de watersprong kunnen beperken. In de berekeningen wordt echter conservatief een bodempeil van 3,85 mTAW aangehouden.
- Uit de ontwerpplannen van de stuw en De Laet *et al.* (1988) worden de volgende klep- en schuifdimensies afgeleid (Figuur 39):
  - breedte stuwkleppen  $b_k = 2 \times 10 = 20 \text{ m}$ , kleplengte  $L_k = 1,4 \text{ m}$ , debietcoëfficiënt kleppen  $C_k = 1,86$  (theoretische aanname);
  - breedte hefschuiven  $b_s = 2 \times 12,5 = 25 \text{ m}$ , debietcoëfficiënt schuiven  $C_s = 0,61$  (theoretische aanname).

In Bijlage B zijn de volledige resultaten per debiet en voor alle waterstandscenario's opgenomen:

- Tabel 33: Overstort bij  $Q = 1,35 \text{ m}^3/\text{s}$  = ondergrens  $Q_{90\%}$  bij huidige debiet schommelingen.
- Tabel 34: Overstort bij  $Q = 8 \text{ m}^3/\text{s}$  = ondergrens  $Q_{90\%}$  - daggemiddelde.
- Tabel 35: Overstort bij volledig neergelaten stuwkleppen = maximaal overstort debiet.
- Tabel 36: Onderstroom bij  $Q = 60 \text{ m}^3/\text{s}$  = bovengrens  $Q_{10\%}$  bij huidige debietschommelingen.

Uit deze resultaten blijkt dat het scenario 1b een goede indicatie geeft van de ligging van de migratielimietzone onder normale omstandigheden, en scenario 7 een goede indicatie geeft van de ligging bij verhoogd afwaarts waterpeil (=maatgevend voor maximale lengte watersprong). In Tabel 26 zijn de resultaten voor deze scenario's daarom samengevat voor elk van de maatgevende debieten.

Tabel 26 – Resultaten lengte watersprong afwaarts van de stuwen bij maatgevende scenario's

omschrijving	eenheid	symp	1b	1b	1b	1b	7	7	7	7
Opwaarts waterpeil	[mTAW]	$H_o$	8,00	8,00	8,00	8,00	8,10	8,10	8,10	8,10
Afwaarts waterpeil	[mTAW]	$H_a$	5,83	5,83	5,83	5,83	6,27	6,27	6,27	6,27
Totaal verval	[m]	$dH$	2,17	2,17	2,17	2,17	1,83	1,83	1,83	1,83
<b>Type stroom (overstort/ onderstroom)</b>			<b>over</b>	<b>over</b>	<b>over</b>	<b>onder</b>	<b>over</b>	<b>over</b>	<b>over</b>	<b>onder</b>
Klephoogte/ hoogte onderkant schuif	[mTAW]	$H_k, H_s$	7,89	7,64	7,28	3,80	7,99	7,74	7,28	3,86
breedte kleppen /schuiven	[m]	$b_k, b_s$	20	20	20	25	20	20	20	25
Waterdiepte boven klep/onder schuif	[m]	$h_1, h_s$	0,11	0,36	0,72	0,60	0,11	0,36	0,82	0,66
Debietcoëfficiënt klep/schuif	[-]	$C_d$	1,86	1,86	1,86	0,61	1,86	1,86	1,86	0,61
<b>Debiet stuw</b>	<b>[m<sup>3</sup>/s]</b>	<b><math>Q_s</math></b>	<b>1,35</b>	<b>8,00</b>	<b>22,73</b>	<b>60,00</b>	<b>1,35</b>	<b>8,00</b>	<b>27,62</b>	<b>60,00</b>
Relatieve kleplengte in stroomrichting	[m]	$L_{kx}$	1,26	1,35	1,40	nvt	1,20	1,32	1,40	nvt
<b>Lengte vallende straal (Chanson)</b>	<b>[m]</b>	<b><math>L_d</math></b>	<b>1,10</b>	<b>1,99</b>	<b>2,73</b>	<b>nvt</b>	<b>1,11</b>	<b>2,01</b>	<b>2,93</b>	<b>nvt</b>
Waterdiepte voor watersprong (Rand)	[m]	$d_1$	0,01	0,07	0,16	0,37	0,01	0,06	0,19	0,40
Stroomsnelheid voor watersprong	[m/s]	$v_1$	4,79	6,15	6,99	6,52	4,82	6,19	7,20	5,99
Froudegetal voor watersprong	[-]	$Fr_1$	12,88	7,69	5,54	3,44	13,01	7,77	5,25	3,02
Waterdiepte na watersprong (Rand)	[m]	$d_2$	0,27	0,70	1,21	1,61	0,27	0,71	1,35	1,52
Afwaartse waterdiepte	[m]	$d$	1,98	1,98	1,98	1,98	2,42	2,42	2,42	2,42
Gem. stroomsnelheid in afw stuwgeul	[m/s]	$v_g$	0,03	0,20	0,57	1,21	0,03	0,17	0,57	0,99
Verdrinkingsgraad watersprong (Rajar)	[-]	$S_j$	6,26	1,81	0,63	0,23	7,84	2,42	0,79	0,59
Type watersprong (vrij/verdrongen)			verdr	verdr	verdr	verdr	verdr	verdr	verdr	verdr
Lengte roller (Hager)	[m]	$L_r$	1,11	3,04	5,07	5,60	1,11	3,05	5,57	4,81
Lengte roller (Chanson)	[m]	$L_r$	1,28	3,22	5,25	5,69	1,29	3,24	5,75	4,88
<b>Einde roller (Hager)</b>	<b>[m]</b>		<b>3,47</b>	<b>6,38</b>	<b>9,20</b>	<b>5,60</b>	<b>3,43</b>	<b>6,39</b>	<b>9,90</b>	<b>4,81</b>
<b>Einde roller (Chanson)</b>	<b>[m]</b>		<b>3,64</b>	<b>6,56</b>	<b>9,38</b>	<b>5,69</b>	<b>3,60</b>	<b>6,58</b>	<b>10,08</b>	<b>4,88</b>
Lengte watersprong	[m]	$L_w$	10,03	10,55	11,16	11,64	12,19	12,71	13,48	13,69
<b>Einde watersprong tov stuwas</b>	<b>[m]</b>		<b>12,38</b>	<b>13,89</b>	<b>15,29</b>	<b>11,64</b>	<b>14,50</b>	<b>16,04</b>	<b>17,80</b>	<b>13,69</b>

Uit de resultaten van alle tabellen uit bijlage B en de samenvatting daarvan in Tabel 26 wordt het volgende afgeleid:

- Situatie van overstort bij volledig neergelaten kleppen (zie  $H_k = 7,28$  mTAW) blijkt meest kritisch (i.p.v. de bovengrenssituatie van de onderstroom met het hogere debiet  $Q_{10\%}$ ) aangezien bij onderstroom de vallengte niet meespeelt maar de watersprong direct afwaarts van de stuw ontstaat.
- Scenario 7 is steeds meest kritisch met het oog op de lengte van de watersprong omdat bij een grotere waterdiepte de lengte voor een verdrongen watersprong toeneemt (dissiperende werking van de watersprong wordt kleiner). In deze situatie zijn stroomsnelheden in zone 3 echter wel duidelijk lager juist vanwege de grotere waterdiepte (zie Tabellen in bijlage B). Ook zijn deze verhoogde waterstanden meer uitzonderlijk (< 10% van de tijd), waardoor scenario 1b meer representatief is voor de dagelijkse omstandigheden.



- Bij scenario's 5 en 6 (verlaagde afwaartse waterstand) wordt er bij onderstroom een vrije watersprong berekend (zie Tabel 36 in bijlage B). In de huidige situatie doen deze scenario's zich vanwege de relatief hoge afwaartste waterstand niet voor.

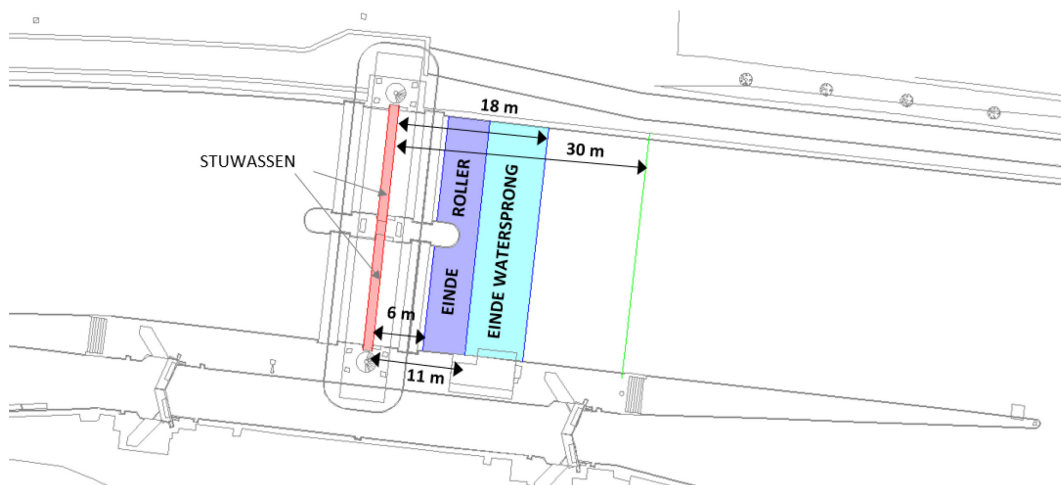
Voor de bepaling van de ligging van de zone 'einde roller' en de zone 'einde watersprong' worden vanuit conservatief oogpunt de resultaten van het daggemiddelde debiet ( $Q = 8 \text{ m}^3/\text{s}$ ) gebruikt voor een grove bepaling van de ondergrens. De bovengrens wordt bepaald door het kwartiergemiddelde debiet ( $Q = 60 \text{ m}^3/\text{s}$ ). De volgende grenzen voor deze zones worden vastgesteld:

- Zone 'einde roller' (einde zone 2) ligt op 6 – 11 m uit de stuwas;
- Zone 'einde watersprong' (einde zone 3) ligt op 11 – 18 m uit de stuwas.

Figuur 40 toont de ligging van deze zones in het Autocad grondplan voor de stuwen. Vanuit oogpunt van de zwakkere zwemmers wordt de zone 'einde watersprong' gelijk gesteld met de migratielimietzone.

Bij de ligging van de zones wordt opgemerkt dat deze bepaald zijn op basis van debieten met een bepaald percentage van voorkomen (de  $Q_{10\%}$ - en de  $Q_{90\%}$ -grenzen/criteria). Door de dagelijkse schommelingen in het debiet te Menen, bouwt het debiet over de stuwen te SBV in de huidige situatie echter twee à drie keer per dag van  $0 \text{ m}^3/\text{s}$  tot circa  $60 \text{ m}^3/\text{s}$  op en terug af. Dit betekent dat het einde van de watersprong en daarmee de migratielimietlijn ook twee à drie keer per dag verschuift van circa 11 tot 18 m uit de stuwassen. Ter referentie is met de groene lijn in Figuur 40 tevens het einde van de dikkere muur van de sluiscolk aangegeven.

Figuur 40 – Berekende zones einde roller (zone 2) en einde watersprong (zone 3)



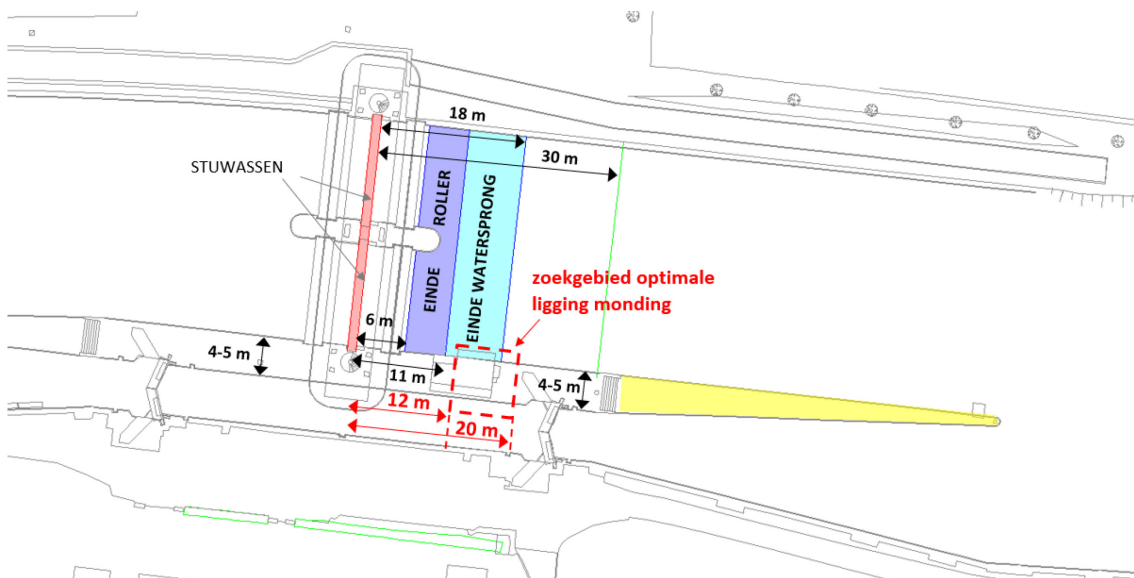
*De migratielimietzone is gelijk aan de zone 'einde watersprong' (zone 3)*

## 6.2 Locatie en oriëntatie monding

Zoals aangegeven in paragraaf 0 is de meeste optimale locatie voor de monding zo dicht mogelijk tegen het migratiekelpunt. In het geval van een stuw is dit net in en net afwaarts van de zone van het einde van de watersprong (=migratielimietzone, zie voorgaande paragraaf). In het geval van Sint-Baafs-Vijve bevindt de meest optimale locatie voor de monding zich daarmee tussen de 12 en 20 m uit de stuwassen (zie met rood gemarkeerde stippellijn in Figuur 41).

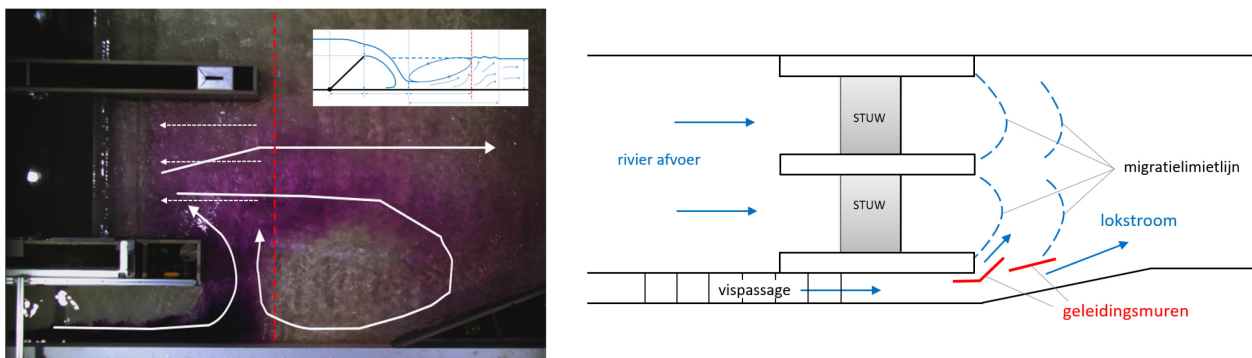
Aan de rechteroever (vastgelegde locatie volgens project-MER) bevindt zich op deze afstand uit de stuwen echter een relatief brede (massieve) muur van 4-5 m dik tussen de stuwgeul en de sluis, waardoor het uitvoeringstechnisch niet eenvoudig is om op deze locatie een monding te realiseren (Figuur 41). Aangezien de Leie op het punt van de stuwen een bocht maakt heeft de linkeroever met oog op de richtlijnen uit de literatuur tevens de voorkeur boven de rechteroever aangezien de linkeroever de 'buitenbocht' vormt (DWA, 2014; Kroes & Monden, 2005; Larinier, 2002a). De linkeroever is echter geen mogelijkheid meer aangezien de voorkeurslocatie is vastgelegd in de project-MER (zie 2.1).

Figuur 41 – Zoekgebied optimale locatie monding



Met oog op de attractiviteit van de vispassage is een parallelle monding prioritair boven een loodrechte monding (zie 0). Uit een schaalmodelstudie ten aanzien van een zo ver mogelijk opwaarts gelegen parallelle monding voor een vispassage op de Dender te Denderleeuw bleek dat daarbij wel rekening gehouden moet worden met de invloed van de watersprong afwaarts van de stuwen (Visser *et al.*, 2020 (in prep)). Wanneer de monding zich namelijk in de watersprongzone bevindt, kunnen de hoge stroomsnelheid in de watersprong en de lichte daling van het waterpeil ter plaatse van de watersprong zorgen voor een sterke aanzuiging (zie links in Figuur 42). Daarbij kan de lokstroom volledig worden aangezogen en vervolgens opgenomen in de watersprong. Tevens zorgt de relatieve verwijding ter plaatse van de parallelle monding voor het ontstaan van een zij-neer die de toegang tot de vispassage kan afschermen. In de schaalmodelstudie werd daarom, door het toepassen van geleidingsmuren, gezocht naar een ontwerp voor een parallelle monding die zowel bij lage afvoer ( $Q_{90\%}$ ) als hoge afvoer ( $Q_{10\%}$ ) optimaal kan werken. Het grondplan rechts in Figuur 42 toont de meest optimale configuratie van een parallelle monding met toepassing van geleidingsmuren.

Figuur 42 – Schaalmodelstudie ontwerp parallelle monding vispassage te Denderleeuw



Bron: Visser et al., 2020 (in prep)

Uitgaande van het voornoemde toont Figuur 43 vier varianten voor de inpassing van de monding op de rechteroever.

Variante 1 toont een schetsmatige inpassing met oog op de meest optimale inpassing van een parallelle monding. De inpassing betekent dat de brede muur tussen sluis en stuwgeul minimaal van 11m tot circa 35 m uit de stuwen volledig wordt verwijderd en idealiter wordt ook de toegangsmuur naar de sluis mee verwijderd. Uit de bouwkundige verkenning door het studiebureau bleek echter dat het bredere deel nabij de stuwen niet verwijderd kan worden vanwege risico op opbarsten van de betonnen vloer daaronder. In Figuur 41 is met geel de maximale lengte aangegeven waarover deze muur wel eventueel kan worden verwijderd. Ook vanuit het oogpunt van erfgoed dient deze muur (en dan vooral het sluishoofd) zo veel mogelijk bewaard te blijven.

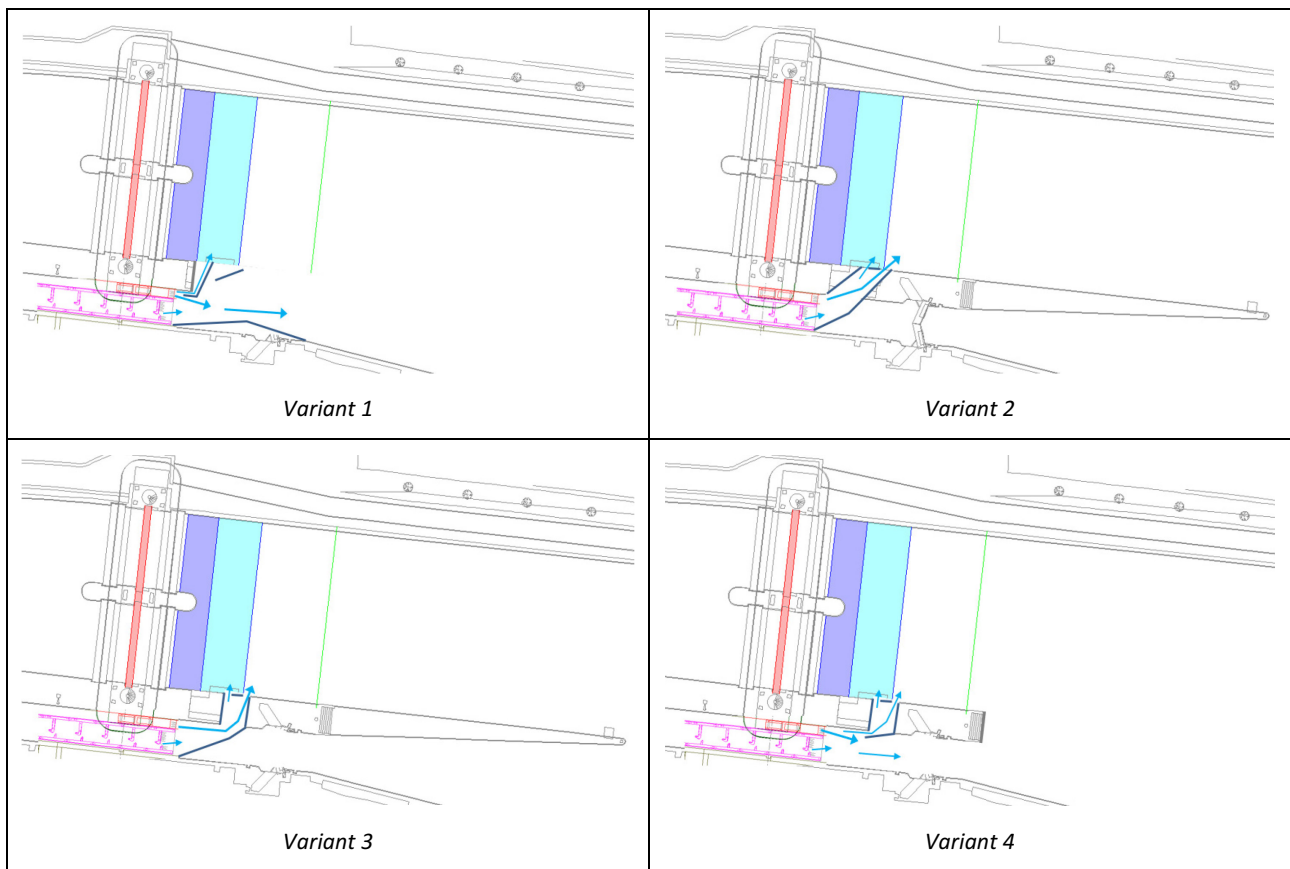
Bij verwijderen van het gele gedeelte zou het einde van de muur zich op circa 32 m uit de stuwen bevinden. INBO gaf echter aan dat de monding hiermee (nog) te ver van de migratielimietzone komt te liggen (die zich op circa 11 – 18 m uit de stuwen bevindt). Daarom werd door het studiebureau onderzocht of openingen in de muur (in plaats van compleet verwijderen) een mogelijkheid zijn. Uit deze bouwkundige verkenning bleek dat openingen met een maximale breedte van 3 m en een hoogte van 2 m mogelijk zijn.

Variante 2 in Figuur 43 toont een schuine opening ( $B \times H = 3 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ ) door de brede muur die uitmondt op de meest optimale locatie vanuit het oogpunt van de migratielimietzone. Vanuit hydraulisch en ecologisch oogpunt heeft deze inpassing de voorkeur boven een loodrechte doorsteek omdat hierbij minder complexe stroompatronen optreden en de stroming ook meer parallel is aan de hoofdstroom (hoek van circa  $45^\circ$ ). Om er voor te zorgen dat lokstroomdebiet tevens optimaal wordt ingezet ter plaatse van de migratielimietzone is een wand nodig over de breedte van de sluis die het volledige debiet naar de monding leidt.

Variante 3 is soortgelijk aan variante 2 alleen is dit een loodrechte opening ( $B \times H = 3 \times 2 \text{ m}$ ; hoek  $90^\circ$ ). Bij deze variante bestaat het risico op neren in de opening na de scherpe hoek van  $90^\circ$  aan vispassage zijde. Wel wordt het lokstroomdebiet hierbij (net als bij variante 2) volledig ingezet op de meest optimale locatie voor de monding.

Variante 4 is een combinatie van een parallelle monding en een loodrechte opening. Waarbij door middel van een geleidingsmuur een deel van het lokstroomdebiet naar de opening op de optimale mondinglocatie wordt geleid en de oude sluis over de volledige breedte beschikbaar blijft als parallelle monding. Voordeel van deze variante is dat er meerdere ingangen zijn naar de passage. Nadeel is dat het lokstroomdebiet niet optimaal wordt ingezet.

Figuur 43 – Varianten studie ontwerp monding



Bij alle varianten dient wat betreft stroompatronen ook rekening te worden gehouden met de inbreng van het toegevoegd debiet (zie hoofdstuk 5). In Figuur 43 zijn in elk van de varianten de regelconstructie aan het einde van het kanaal van het toegevoegd debiet (rode lijnen) en de afwaartse bekkens van de vispassage (magenta lijnen) weergegeven. Het toegevoegd debiet kan variëren van 0 tot 4 m<sup>3</sup>/s en kan dus tot 4 keer hoger zijn dan het vispassagedebiet van circa 1 m<sup>3</sup>/s.

Vanuit bouwkundig en ruimtelijk oogpunt kan het kanaal voor het toegevoegd debiet enkel aan de linkerszijde van de vispassage in de sluiskolk (= tussen vispassage en stuw) geplaatst worden omdat er aan opwaartse zijde een verbinding (opening) naar de opwaartse stuwgeul nodig is. Daarnaast bleken doorgangen onder de vispassagebekkens door vanuit bouwkundig - en onderhoudsoogpunt niet gewenst.

Deze inpassing voor de uitstroom van het toegevoegd debiet is voor de varianten 2 en 3 echter suboptimaal. Bij deze varianten zou de uitstroom beter aan de rechterszijde van de vispassage worden ingepast aangezien de sterkere stroom uit het kanaal van het toegevoegd debiet in dat geval niet de lokstroom uit de vispassage zelf kruist maar daarmee juist samenstroomt en zo een goede geleiding geeft naar het afwaartse slot van de vispassage. Merk op dat dit niet zo is ingetekend in Figuur 43 aangezien alleen inpassing aan linker zijde nog mogelijk bleek.

Voor varianten 1 en 4 is inpassing van de uitstroom van het toegevoegd debiet aan linkerszijde van de vispassage juist beter omdat zo een deel van het lokstroomdebiet afgeleid kan worden naar de mondingsopening door de sluismuur.

### Keuze voorkeursvariant voor detailontwerp

Tijdens een overleg met DVW, INBO en ANB werden de voor- en nadelen van de vier varianten besproken, waarna gekozen werd voor variant 2.

Variante 1 kon niet weerhouden worden omdat deze bouwkundig gezien niet realiseerbaar is. Hoewel variant 4 het voordeel heeft van meerdere toegangen tot de vispassage wordt het lokstroomdebiet hierbij niet optimaal ingezet op de juiste locatie (i.e. te ver stroomafwaarts t.o.v. de migratielimietzone). Aangezien een optimale inzet en locatie van het lokstroomdebiet volgens INBO duidelijk primieren boven de hoeveelheid ingangen, hebben varianten 2 en 3 de voorkeur. Bijkomend voordeel is dat hierdoor de afwaartse sluismuur niet verwijderd hoeft te worden, maar eerder een bijkomende ‘nuttige’ rol kan vervullen om opwaarts migrerende vissen eerst naar de stuwen en vervolgens in de vispassage monding te leiden. Ook zijn er op de bodem afwaarts van de sluis doorlopende drempels aanwezig die obstakels zouden kunnen vormen voor vissoorten die over de bodem migreren (Figuur 5). In de stuwgeul zijn dit afzonderlijke blokken waardoor migratie tussendoor de blokken mogelijk is.

Tenslotte heeft variant 2 de voorkeur boven variant 3 aangezien variant 2 minder risico's geeft op complexe stroompatronen vanwege loslatingseffecten en is de hoek tussen de hoofdstroom en de lokstroom minder groot (m.a.w. ‘meer parallel’; circa 45° i.p.v. 90°). Gezien de complexe configuratie van de schuine monding en de suboptimale inbreng van het toegevoegd debiet over een relatief korte afstand en de grote variatie in debietsverhoudingen, was een detailontwerp door middel van 3D (CFD-)simulaties noodzakelijk. De resultaten van deze modelstudie en daarmee het finale detailontwerp van de monding worden beschreven in de volgende paragraaf (6.3).

## 6.3 Detailontwerp via CFD-modellering

Deze paragraaf beschrijft de resultaten van de CFD-modelstudie voor het detailontwerp van de monding van de vispassage. De beschrijving in deze paragraaf heeft tot doel het finaal gekozen ontwerp op hoofdlijnen te beschrijven en te onderbouwen op basis van de belangrijkste resultaten van de CFD-simulaties. Dit betekent dat dus niet alle uitgevoerde simulaties (in detail) worden behandeld. Voor de volledige beschrijving en evaluatie van alle simulaties wordt verwezen naar Verelst *et al.* (2020).

De resultaten van de simulaties zijn steeds geëvalueerd/beoordeeld op basis van de volgende doelstellingen:

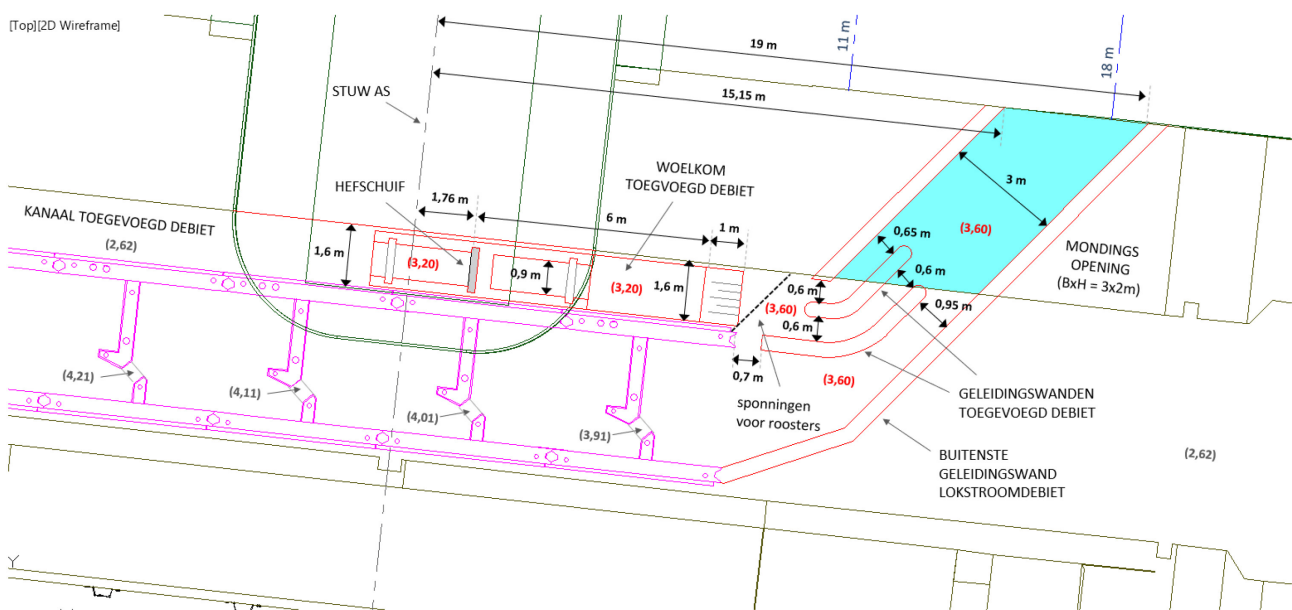
- Realiseren efficiënte lokstroom naar het meest afwaartse slot (= ingang) van de vispassage:
  - Met een efficiënte lokstroom wordt bedoeld dat over het gehele traject van de monding een passeerbare rechtlijnige stroom aanwezig is die leidt naar het meest afwaartse slot (stroomsnelheden lager dan 1,5 m/s);
  - Daarnaast dient voorkomen te worden dat de inbreng van het toegevoegd debiet leidt tot (complexe) neren en te hoge stroomsnelheden ter plaatse van de toegang naar de vispassage.
- Controle locatie monding en lokstroom:
  - Tijdens de maatgevende omstandigheden (debiet over stuwen lager dan Q10%, zie paragraaf 6.2) mag de monding niet volledig in de zone van de watersprong afwaarts van de stuwen liggen;
  - Idealiter is er in de stuwgeul ook een goed waarneembare lokstroom aanwezig die aansluit bij de hoofdstroom van vooral de rechter stuw.

Figuur 44 toont het detailontwerp van de monding zoals gebruikt is als vertrekpunt voor de CFD-studie. De uitgangspunten voor dit ontwerp waren de volgende:

- De inpassing van de bekkenwanden volgden uit de bouwkundige uitvoering (zie magenta lijnen).
- Op basis van de locatie van de bekkenwanden werd de regelconstructie van het toegevoegd debiet en bijbehorende woelkom zo ver mogelijk afwaarts in het kanaal geplaatst (zie 5.2).

- Sponningen voor eventuele roosters onder een hoek van 45° worden afwaarts van de woelkom van het toegevoegd debiet voorzien. Sponning voor de roosters en de roosters zelf werden niet beschouwd bij de CFD-modellering, aangezien deze hydraulisch het resultaat niet beïnvloeden en enkel de rekentijd van de simulaties beduidend zou doen toenemen.
- Geleidingswanden worden voorzien ter plaatse van de scherpe bocht van de monding om loslatings-effecten en daaruit voortkomende negatieve neren te voorkomen.
- In de rechter geleidingswand tussen de vispassage en het kanaal van het toegevoegd debiet wordt een opening voorzien van 0,7 m zodat vissen die bij een lager toegevoegd debiet in de zijkanaaltjes zwemmen toch een ontsnappingsmogelijkheid hebben naar het afwaartse slot van de vispassage.
- Vanuit de bouwkundige verkenning bleek dat de geleidingswanden een minimale dikte moeten hebben van 0,40 m.

Figuur 44 – Vertrekpunt detailontwerp monding voor de CFD-studie



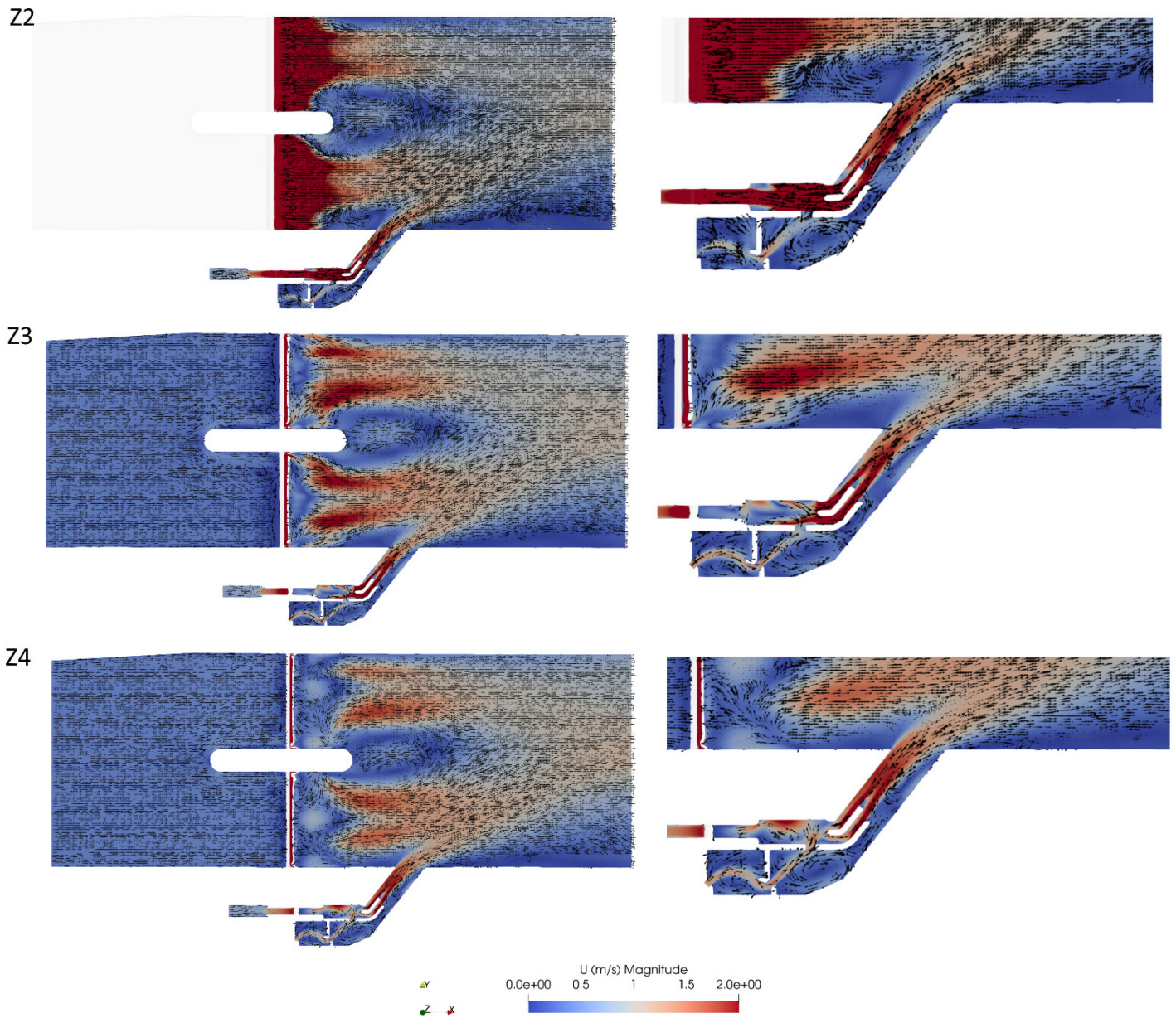
In de eerste simulatie met het ontwerp uit Figuur 44 (vertrekpunt) werden de volgende maatgevende hydraulische randvoorwaarden toegepast:

- Streefpeilen voor op- en afwaartse waterstanden, respectievelijk +8,00 mTAW en +5,61 mTAW;
- Stuwdebiet bij volledig neergelaten kleppen (klephoogte 7,27 mTAW; stuwdebiet circa 22 m<sup>3</sup>/s). Uit de watersprongberekeningen bleek dit namelijk het meest kritische scenario met oog op de lengte van de watersprong en daarmee de ligging van de migratielijn, zie paragraaf 6.1;
- Maximaal toegevoegd debiet van 4 m<sup>3</sup>/s;
- Vispassagedebiet van 1 m<sup>3</sup>/s.

Figuur 45 toont de resultaten uit de CFD-studie voor deze eerste simulatie.



Figuur 45 – Resultaten CFD-simulatie vertrekpunt detailontwerp monding



Z2 = 4,00 mTAW; Z3 = 4,50 mTAW; Z4 = 5,00 mTAW. Bodemhoogte monding = 3,60 mTAW  
Links: volledig model domein; rechts: detail ter plaatse van monding vispassage in afwaartse stuwgeul  
(Bron: Verelst *et al.*, 2020)



Uit de resultaten van Figuur 45 blijkt het volgende:

- De uitstroom van de monding ligt bij deze condities op een goede locatie. M.a.w. niet te dicht aan de stuwen en niet al te ver afwaarts van de watersprong. De lokstroom is ook goed zichtbaar en bundelt zich op een effectieve manier met de centrale stroming van de rechterstuw.
- Hierbij moet wel worden opgemerkt dat het stuwdebiet een stuk hoger lag als verwacht werd op basis van de berekeningen met behulp van de literatuurformules (namelijk circa  $39 \text{ m}^3/\text{s}$  i.p.v. circa  $22 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Dit is mogelijk het gevolg van de vereenvoudigde modellering van de stuwen. Daarom werden de stuwen in de vervolg simulaties meer in detail uitgewerkt in het model.
- De aanzuiging van de hogere stroomsnelheden van het toegevoegd debiet door de opening in de rechter geleidingswand zorgt ervoor dat circa  $\frac{3}{4}$  van het vispassagedebiet in het kanaal van het toegevoegd debiet wordt gezogen (dit is vooral visueel goed te zien op hoogte Z4 in Figuur 45).
- Doordat het vispassagedebiet bijna volledig wordt weggezogen naar het kanaal van het toegevoegd debiet is er ter plaatse van de samenvloeiing (lees: einde geleidingswanden) zo goed als geen lokstroom meer uit de toegang naar de vispassage zelf.
- Ook zorgt dit ervoor dat het stroomsnelheidsverschil tussen de stroming uit de vispassage en de stroming uit het kanaal van het toegevoegd debiet wordt versterkt. Het kleine debiet uit de vispassage opening wordt mede daardoor volledig in de stroom met hoge stroomsnelheden van het toegevoegd debiet gezogen.
- Dit zorgt er vervolgens voor dat er een lange neer ontstaat in de rechterzijde van de koker door de sluismuur (de mondingsopening). Deze neer bevindt zich zo goed als over de volledige lengte van de koker. Hoewel stroomsnelheden in deze neer zeer laag zijn (donkerblauwe kleur) is dit geen optimaal stroompatroon voor een goede lokstroom naar de vispassage opening.
- Stroomsnelheden tussen de geleidingswanden van het toegevoegd debiet zijn relatief hoog ( $> 2 \text{ m/s}$ ; dieprode kleur), waardoor er bij deze waarde van het toegevoegd debiet geen risico is dat vissen het kanaal van het toegevoegd debiet in zullen zwemmen.
- Voor de passeerbaarheid geldt dat stroming met snelheid lager dan  $1,5 \text{ m/s}$  (aangeduid met lichtrode en blauwe kleur in de figuur) goed passeerbaar zijn. De donkerrode ( $1,5 - 2 \text{ m/s}$ ) en dieprode kleur ( $> 2 \text{ m/s}$ ) wordt als niet passeerbaar beoordeeld.

Op basis van de resultaten van de simulatie met het ontwerp uit Figuur 44 (vertrekpunt) werden de volgende aanpassingen aan de geleidingswanden beproefd in de vervolg simulaties:

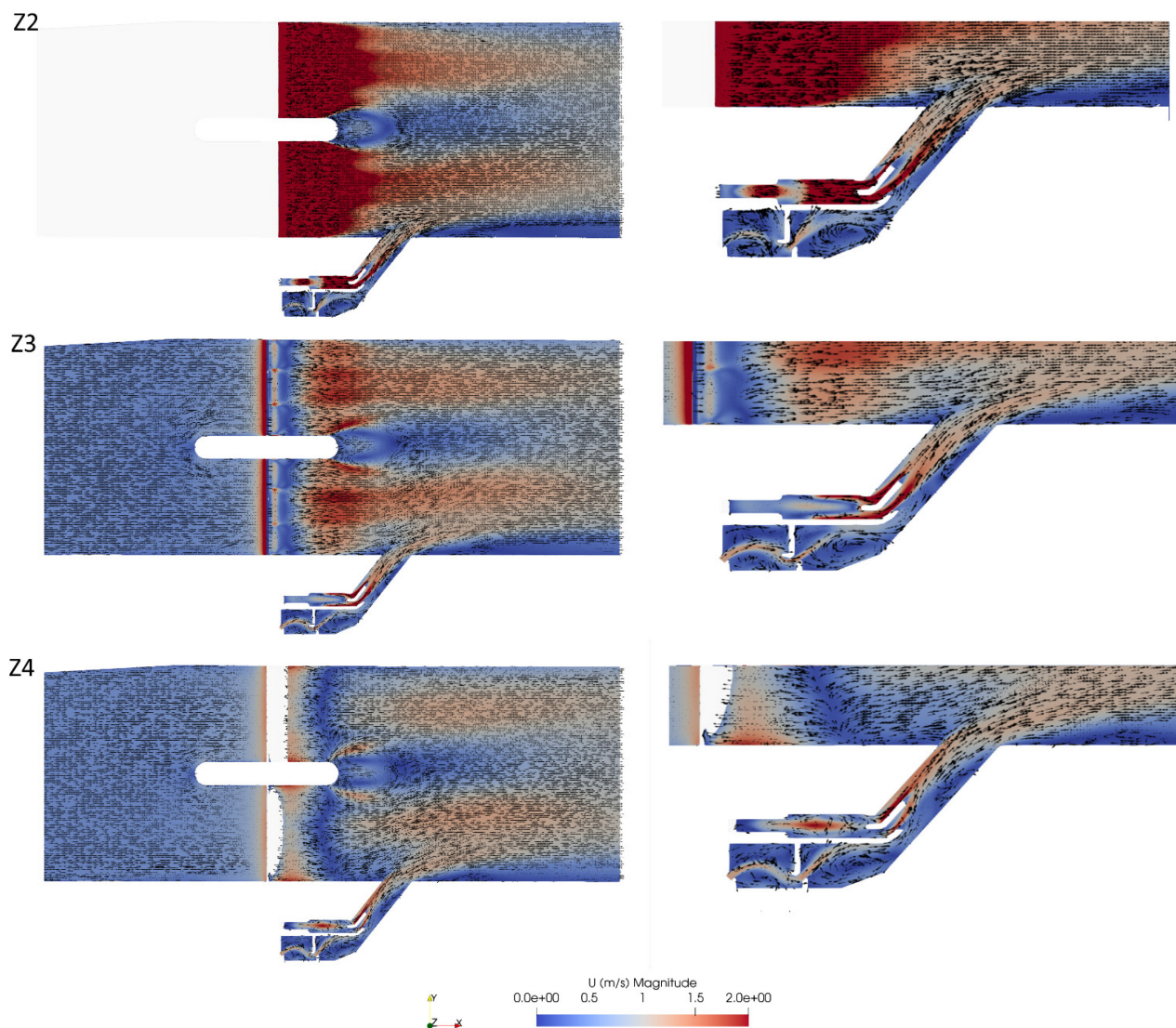
- De opening in de rechter geleidingswand tussen de vispassage en het kanaal van het toegevoegd debiet werd gesloten.
- Daarnaast werd de rechter geleidingswand aan afwaartse zijde ingekort tot net na de bocht.

Figuur 46 toont de geometrie op basis van deze aanpassingen.



- Het sluiten van de opening in de rechter geleidingswand tussen vispassage en kanaal van het toegevoegde debiet zorgt ervoor dat het volledige vispassagedebiet nu beschikbaar blijft voor de lokstroom naar de vispassage ter plaats van de samenvloeiing met het toegevoegd debiet aan het einde van de geleidingswanden.
- Het sluiten van deze opening en het inkorten van de rechter geleidingswand hebben het stromingspatroon ter plaatse van de samenvloeiing en in de koker door de sluiswand verbeterd, maar de lange neer aan de rechterzijde van de koker blijft toch nog (licht) aanwezig. Doordat stroomsnelheden in de linkerzijde van de koker lager zijn geworden is er echter een voldoende brede strook aanwezig waarlangs vissen naar de ingang van de vispassage kunnen geraken.
- Aan de bodem (zie Z2 in de figuur) is uit de rechter opening van het kanaal van het toegevoegd debiet (= middelste deel ter plaatse van de samenvloeiing) een 'pluim' te zien met relatief hoge stroomsnelheden ( $> 2$  m/s; dieprode kleur) waardoor de koker als het ware in twee 'passeerbare' delen wordt gesplitst. Dit is nadelig aangezien vissen die in het linkerdeel van de koker terecht komen moeilijk de ingang van de vispassage zullen vinden.
- Uit een (gelijktijdige) vierde simulatie met hetzelfde detailontwerp voor de geleidingswanden in de monding bleek dat er relatief lage stroomsnelheden voorkomen tussen de geleidingswanden bij lagere waarden voor het toegevoegd debiet (in dit geval  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Hoewel verwacht wordt dat het grootste deel van de tijd het volledige toegevoegde debiet ( $4 \text{ m}^3/\text{s}$ ) zal optreden, is het dus wel van belang om (sponningen voor) roosters te voorzien om te voorkomen dat vissen het kanaal van het toegevoegd debiet zullen inzwemmen bij lagere waarden van het toegevoegde debiet. In principe worden deze roosters best zo ver mogelijk afwaarts in de twee delen van het kanaal van het toegevoegd debiet geplaatst. Uit praktisch oogpunt dient er echter ook rekening te worden gehouden met de moeilijkere bereikbaarheid in de koker door de sluismuur. In Figuur 46 is daarom een voorstel gedaan voor mogelijke plaatsing van roosters (zie zwarte streeplijnen in de figuur).
- Ook werd vastgesteld dat door onbekende reden de koker onder een hoek van circa  $50^\circ$  door de sluismuur is komen te staan in de ontwerpplannen en daarmee ook in het grid van de CFD-simulaties. Volgens de richtlijnen uit het handboek DWA (2014) wordt met oog op een goede lokstroom best geen grotere hoek dan  $45^\circ$  toegepast. Een aanpassing van deze hoek terug naar  $45^\circ$  is daarom nodig en zal het stroompatroon ter plaatse van de samenvloeiing en koker verbeteren. Toch wordt niet verwacht dat dit de bovengenoemde pluim met hogere snelheden en de neer aan de rechterzijde van de koker volledig zal verhelpen. Hiervoor zijn nog verdere aanpassingen nodig aan de geleidingswanden van het kanaal van het toegevoegd debiet.

Figuur 47 – Resultaten CFD-simulatie met geoptimaliseerd detailontwerp monding en onderstroom bij stuwen



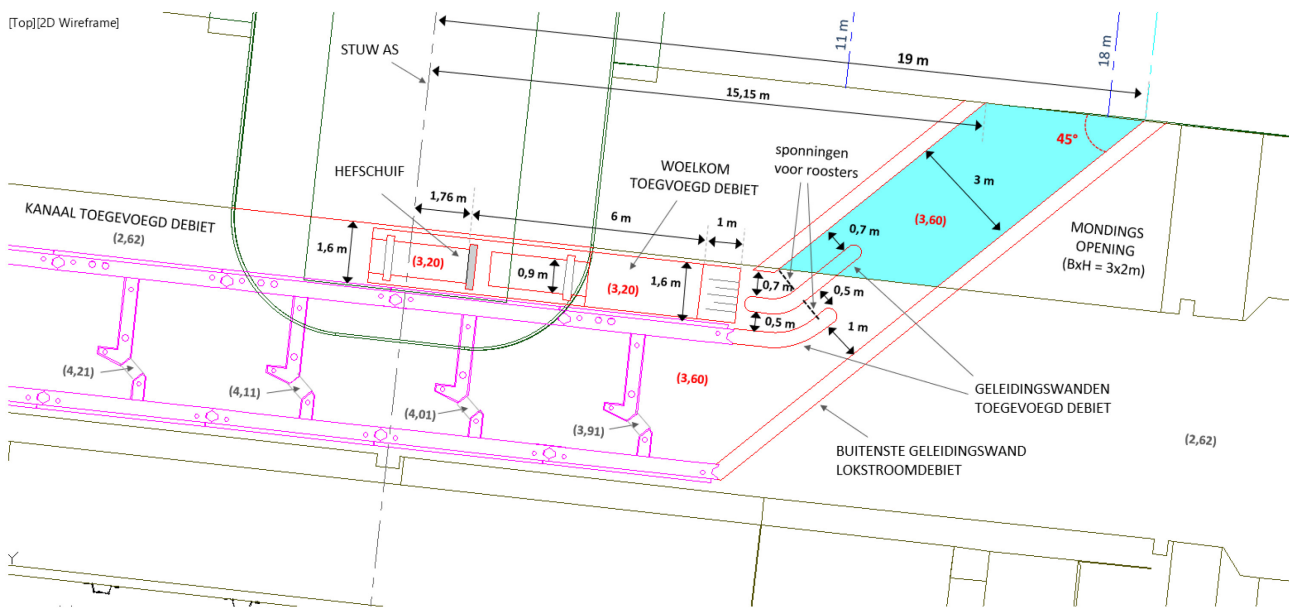
Z2 = 4,00 mTAW; Z3 = 4,50 mTAW; Z4 = 5,00 mTAW. Bodemhoogte monding = 3,60 mTAW  
 Links: volledig model domein; rechts: detail ter plaatse van monding vispassage in afwaartse stuwgeul  
 (Bron: Verelst *et al.*, 2020)

Op basis van bovengenoemde resultaten worden de volgende laatste aanpassingen voorgesteld om het detailontwerp van de monding te kunnen optimaliseren:

- De koker wordt (terug) onder een hoek van 45° door de sluismuur geplaatst;
- De verdeling tussen de twee delen van kanaal van het toegevoegd debiet wordt aangepast: het linkerdeel krijgt een breedte van 0,7 m en het rechterdeel een breedte van 0,5 m.

Figuur 48 toont het definitieve detailontwerp voor de monding op basis van de bovengenoemde aanpassingen. Gezien de beperkte tijd werd hiervoor geen nieuwe simulatie uitgevoerd, maar op basis van expert judgement en de uitkomsten van de eerdere simulaties kan besloten worden dat hiermee het meest optimale ontwerp is bereikt, gegeven de ruimtelijke en bouwkundige randvoorwaarden. Door de asymmetrische verdeling tussen de twee delen van het kanaal voor het toegevoegde debiet wordt verwacht dat de hogere stroomsnelheden aan de linkerzijde van de koker zullen liggen en de vissen via de rechterzijde naar de ingang van de vispassage kunnen zwemmen.

Figuur 48 – Finaal detailontwerp monding op basis van de CFD-studie





## 7 Instellingen voor automatische regeling

Zowel de opwaartse afsluitconstructie van de vispassage als de (afwaartse) regelconstructie van het toegevoegd debiet zullen automatisch en van op afstand regelbaar gemaakt worden.

Uit de evaluatie van bestaande vispassages op de Bovenschelde bleek dat de invloed van de instellingen voor automatische regeling van de afsluitschuif (en in tweede instantie ook die van de stuwregeling) op het openingspercentage van de vispassage relatief groot is (Visser *et al.*, 2013). Instellingen voor de afsluitschuif worden bij voorkeur zo gekozen dat deze buiten de dagelijkse waterstandfluctuaties vallen om zo onnodige sluiting en een te hoge activiteit van de schuif te voorkomen. Daarnaast bleek het ook van het belang om een 'duurfactor' te koppelen aan deze instellingen, zodat de vispassage niet onnodig zal sluiten bij zgn. 'spikes' in de metingen (lees: slechts enkele minuutregistraties met lage waarden die daarna snel weer terugkeren naar normaal peil). De toepassing van een toegevoegd debiet zorgt ervoor dat een kleiner vispassagedebiet kan worden toegepast waardoor de vispassage bij lagere afvoer op de rivier langer open kan blijven. Tevens maakt het regelbare toegevoegde debiet het mogelijk om ook bij hogere afvoer op de rivier een efficiënte lokstroom te kunnen realiseren.

### 7.1 Verkennende simulaties

Voor het bepalen van de meest optimale regelvoorwaarden werden verkennende numerieke studies met het softwarepakket Mike11 uitgevoerd voor de automatische regeling van de stuwsluiscomplexen op het Vlaamse deel van de Leie (Harelbeke en Sint-Baafs-Vijve). Eerst werden simulaties gedaan waarbij alleen te Sint-Baafs-Vijve een toegevoegd debiet werd toegepast (Vanderkimpfen *et al.*, 2018). Toen later werd besloten om ook te Harelbeke een toegevoegd debiet toe te passen werden aanvullende simulaties uitgevoerd (Vanderkimpfen *et al.*, 2020a). Merk op dat bij deze simulaties ook rekening werd gehouden met de turbines te Harelbeke, (toekomstige) schutverliezen door de nieuwe sluisen en met oppompen van water te Ooigem.

Eerst werd de bestaande toestand (S0) doorgerekend. De peilregeling gebeurde daarbij door de stuwen en de schutverliezen stemden overeen met de huidige schutverliezen (2,5 m<sup>3</sup>/s voor SBV). In de bestaande toestand zijn er nog geen vispassages of turbines. Daarna werden in Vanderkimpfen *et al.* (2018) vier toekomstige scenario's doorgerekend, waarbij de regeling van de vispassage en het toegevoegd debiet in Sint-Baafs-Vijve verschilt naargelang het scenario<sup>4</sup>:

- S1 = peilregeling door stuw + constant toegevoegd debiet
- S2 = peilregeling door stuw + variabel toegevoegd debiet
- S3 = peilregeling met variabel toegevoegd debiet bij lage debieten, peilregeling door stuw (beide kleppen samen) bij hoge debieten
- S4 = peilregeling met variabel toegevoegd debiet bij lage debieten, peilregeling door stuw (beide kleppen afzonderlijk) bij hoge debieten

Vervolgens werd nog een bijkomend scenario uitgevoerd waarbij zowel te Sint-Baafs-Vijve als Harelbeke een toegevoegd debiet werd toegepast (Vanderkimpfen *et al.*, 2020a):

- S5 = peilregeling door stuw + variabel toegevoegd debiet

---

<sup>4</sup> Merk op dat dit niet dezelfde scenario's zijn als de hydraulische scenario's ten aanzien van de waterpeilfluctuaties zoals beschreven in paragraaf 2.3.3. De scenario's uit de numerieke simulaties worden daarom steeds voorafgegaan door een 'S' (m.a.w. scenario S1, S2, enz.).

Bij dit vijfde scenario werd ook de invloed onderzocht van het openen van de vispassage op basis van debiet (variant S5q) of op basis van waterpeil (variant S5h).

De schutverliezen in de scenario's S1 t/m S5 stemden overeen met de toekomstige schutverliezen (4,0 m<sup>3</sup>/s voor Sint-Baafs-Vijve). De regeling voor de turbines te Harelbeke was in alle scenario's gelijk. Voor de verdere details van de instellingen voor regeling van zowel de afsluitconstructie als het toegevoegd debiet per scenario wordt verwezen naar Vanderkimpen *et al.* (2018 en 2020a).

Voor elk van de simulaties (scenario's) werden de volgende resultaten geëvalueerd:

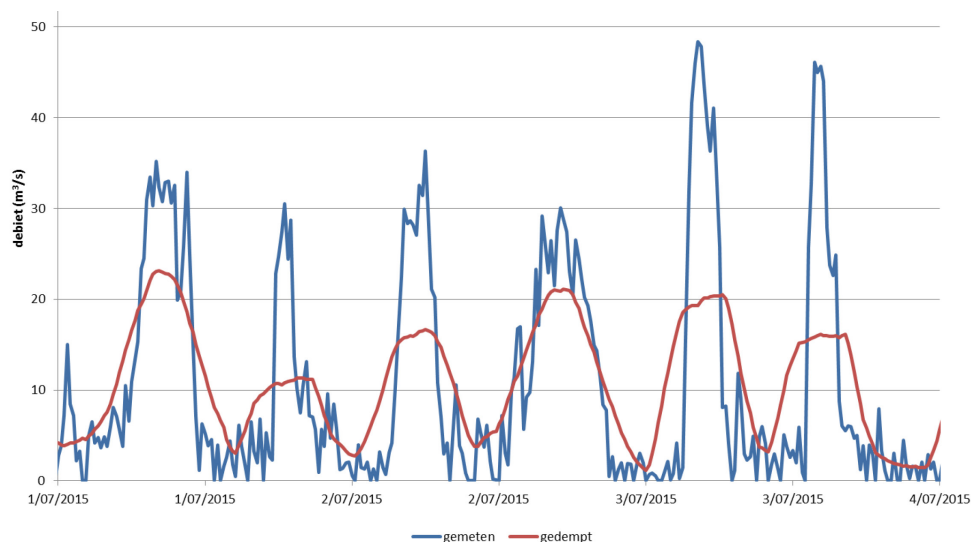
- vispassagedebiet: percentage open (%) en aantal bewegingen open/dicht (#)
- toegevoegd debiet: percentage open (%) en aantal keren dat het debiet wijzigt (#)
- stuwkleppen en hefschuiven: aantal bewegingen (#)
- opwaarts waterpeil:
  - NP% → % dat het opwaarts waterpeil minder dan 5 cm afwijkt van het streefpeil
  - LW% → % dat het opwaarts waterpeil lager is dan het laagwateralarmpeil (7,75 mTAW voor Sint-Baafs-Vijve)

Alle kengetallen werden berekend voor het volledige jaar en voor de zomerperiode. De zomer werd gedefinieerd als de periode van 1 april tot 1 oktober. De berekeningen werden uitgevoerd met een tijdstap van 1 minuut, maar de resultaten werden slechts om de 5 minuten opgeslagen. Het absolute aantal bewegingen van kleppen en hefschuiven is dus waarschijnlijk onderschat.

Alle scenario's werden doorgerekend voor een gemiddeld jaar (2015). De resultaten werden vergeleken aan de hand van een beperkt aantal figuren en tabellen.

In een tweede fase werden aanvullende berekeningen uitgevoerd om na te gaan wat er zou gebeuren indien de debietschommelingen te Menen gedempt zouden kunnen worden. De gedempte reeks werd aangemaakt door een bewegend gemiddelde over 6 uur toe te passen op de meetreeks. Figuur 49 toont het effect van deze ingreep voor een aantal droge dagen in juli 2015. Dankzij de uitmiddeling stijgt de 15-minutelijkse Q<sub>90%</sub> voor het volledige jaar 2015 van 0,75 m<sup>3</sup>/s naar 5,08 m<sup>3</sup>/s en die voor de zomer van 2015 van 0,12 m<sup>3</sup>/s naar 3,73 m<sup>3</sup>/s. De simulaties met het gedempte debiet worden aangegeven met een (\*).

Figuur 49 – Gemeten en gedempt debiet te Menen als opwaartse randvoorwaarde





In een derde fase werden voor het meest optimale scenario (S2) en later ook voor het bijkomende scenario (S5) controleberekeningen uitgevoerd voor een nat jaar (2016) en een droog jaar (2017). Deze controleberekeningen werden uitgevoerd met beide types opwaartse randvoorwaarden (gemeten en gedempt).

Tabel 27 en Tabel 28 tonen de jaarresultaten op basis van respectievelijk het gemeten en gedempt debiet te Menen voor elk van de scenario's. Merk op dat in dit rapport enkel de samenvatting van de jaarresultaten wordt beschreven met oog op de werking van de vispassage in Sint-Baafs-Vijve. Voor verdere detail info (bijv. de zomerwaarden en de resultaten voor Harelbeke) wordt verwezen naar Vanderkimpfen *et al.* (2018 en 2020a).

Tabel 27 – Resultaten numerieke simulaties voor automatische regeling op basis van huidig gemeten debiet

scenario	jaar	Opwaarts peil		Stuwen				Vispassage		Toegevoegd debiet	
		NP%	LW%	# hef1	# klep1	# hef2	# klep2	% open	# move	%open	# move
S0	2015	53	0	12234	18625	12234	18625	0	0	0	0
S1	2015	49	4	9781	15904	9781	15904	89	444	67	1193
S2	2015	54	2	9769	16113	9769	16113	94	252	44	2044
	2016	62	1	12128	18291	12128	18291	97	160	55	2100
	2017	42	11	7697	13044	7697	13044	81	316	32	1796
S3	2015	54	2	9704	16266	9704	16266	95	238	48	2062
S4	2015	49	2	9436	15461	9436	14565	92	312	49	2002
S5h	2015	50	1	10131	16454	10131	16454	94	246	45	3090
	2016	59	0	12495	18722	12495	18722	98	126	56	3074
	2017	39	10	8064	13406	8064	13406	82	248	33	2697
S5q	2015	51	1	10030	16400	10030	16400	91	232	45	3054
	2016	60	0	12445	18565	12445	18565	96	122	56	2982
	2017	40	9	8042	13435	8042	13435	75	206	33	2639

Tabel 28 – Resultaten numerieke simulaties voor automatische regeling op basis van gedempt debiet (\*)

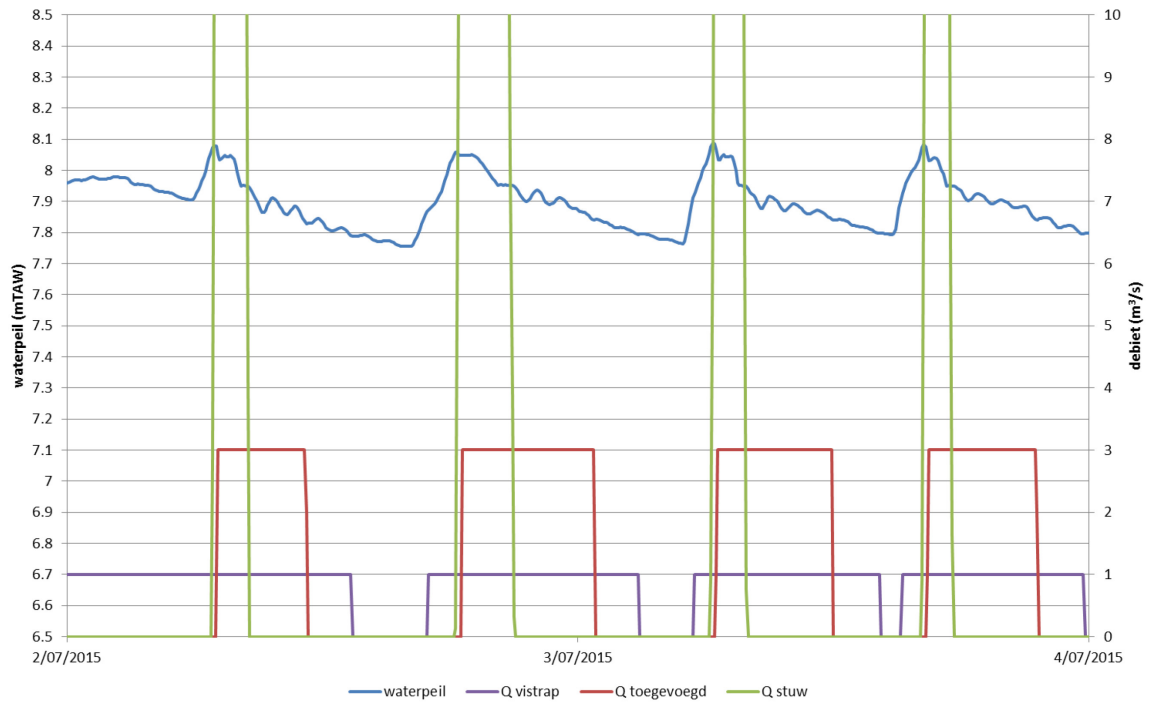
scenario	jaar	Opwaarts peil		Stuwen				Vispassage		Toegevoegd debiet	
		NP%	LW%	# hef1	# klep1	# hef2	# klep2	% open	# move	%open	# move
S0*	2015	77	0	5704	11683	5704	11683	0	0	0	0
S1*	2015	66	1	3756	9376	3756	9376	97	102	85	380
S2*	2015	87	0	3931	10047	3931	10047	99	46	62	1436
	2016	94	0	4770	10116	4770	10116	100	10	78	1311
	2017	74	8	2045	6752	2045	6752	88	150	50	1261
S3*	2015	87	0	3812	10513	3812	10513	99	44	68	1354
S4*	2015	82	0	3834	7939	3834	7977	99	52	68	1253
S5h*	2015	75	0	3669	10156	3669	10156	99	36	65	2486
	2016	86	0	4561	10500	4561	10500	100	8	79	2202
	2017	63	7	1970	7279	1970	7279	88	128	52	2032
S5q*	2015	75	0	3657	10189	3657	10189	98	34	65	2491
	2016	86	0	4544	10494	4544	10494	100	8	79	2209
	2017	64	7	1946	7315	1946	7315	82	98	53	2059

\* scenario's met een gedempt debiet

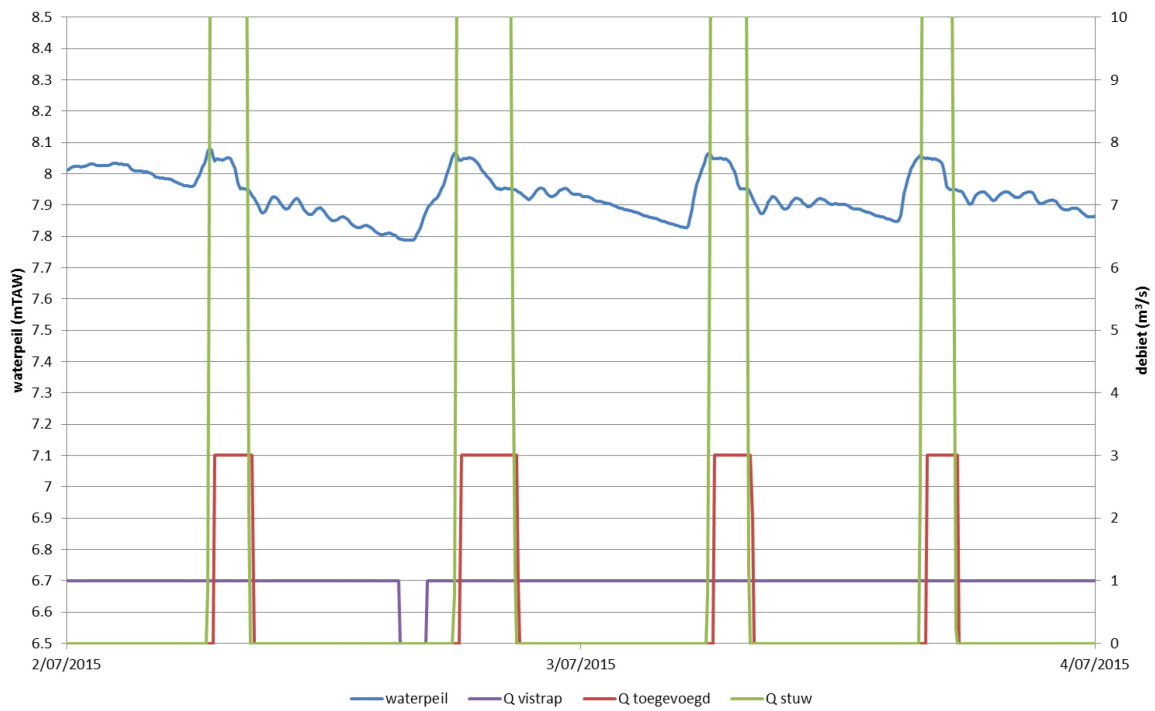
Op basis van deze verkennende simulaties werden de volgende conclusies getrokken:

- De combinatie van een vertical slotpassage met een laag vast debiet (1 m<sup>3</sup>/s) en een regelbaar toegevoegd debiet (0 – 4 m<sup>3</sup>/s) blijkt een succesvol concept te zijn. Door deze toepassing kan de vispassage langer open blijven in drogere periodes en/of periodes met lagere afvoer.
- Om de vispassage zo lang mogelijk open te kunnen houden, moet het toegevoegd debiet zo zuinig mogelijk ingezet worden (enkel bij debiet over de stuw). Dit kan het best gerealiseerd worden door het te sturen op basis van het debiet over de stuw (scenario S2). Dit effect is gevisualiseerd door de vergelijking van scenario S1 en S2 in Figuur 50 en Figuur 51. In het geval van S1 wordt het toegevoegd debiet nog lang opgehouden (sluiting op basis van verlaagd peil) zonder dat er water over de stuwen gaat. Hierdoor daalt het waterpeil opwaarts van de stuw sneller en moet uiteindelijk niet alleen het toegevoegd debiet maar ook de vispassage zelf afgesloten worden. Bij een opbouwend debiet over de stuwen blijft het wel van belang om het toegevoegd debiet hier zo snel mogelijk (en zo groot mogelijk) mee te laten opbouwen om voldoende lokstroom te kunnen realiseren.
- De debietschommelingen te Mene hebben een ongunstige impact op de werking van de vispassages en turbines in Harelbeke en Sint-Baafs-Vijve. Door toepassing van het toegevoegd debiet is de impact op de openingsgraad van de vispassage in Sint-Baafs-Vijve minder groot. Het dempen van de debietschommelingen verbetert de werking van vispassages en turbines.

Figuur 50 – Voorbeeld resultaten scenario S1



Figuur 51 – Voorbeeld resultaten scenario S2



- Het gebruik van het toegevoegd debiet voor het fijnregelen van het waterpeil van het pand Harelbeke – Sint-Baafs-Vijve (scenario S3 en S4) levert slechts beperkte voordelen op. De voordelen van fijnregeling zijn beperkt doordat de debieten op de Leie in verhouding relatief groot zijn en sterk schommelen. Omwille van de toename van de operationele risico's, wordt deze mogelijkheid niet weerhouden.
- De sturing van de vispassage en de turbines in Harelbeke heeft een invloed op de werking van de vispassage en het toegevoegd debiet in Sint-Baafs-Vijve. De sturingen van de installaties op beide sites moeten dus op elkaar afgestemd worden.
- De toekomstige watervoorziening van het pand Harelbeke – Sint-Baafs-Vijve en vooral de schutverliezen tijdens droogte zijn belangrijke aandachtspunten.
- De vervanging van de grote bekkentrap in Harelbeke (scenario S2) door een kleine bekkentrap met een toegevoegd debiet (scenario S5) leidt tot een duidelijke verbetering van de openingsgraad van de vispassage van Harelbeke. Deze verbetering is het meest uitgesproken tijdens het droge jaar 2017. De impact van deze vervanging op de openingsgraad van de vispassage van Sint-Baafs-Vijve is zeer beperkt. Dankzij het gebruik van een kleine bekkentrap met een kleiner ontwerpdebiet verhoogt ook de werkingsduur van de turbines in Harelbeke.
- Door de aanpassing van de vispassage in Harelbeke (scenario S5) vermindert de impact van een eventuele demping van de debietschommelingen op de Leie. De openingsgraad van de aangepaste vispassage is namelijk zeer hoog, zelfs met debietschommelingen. Het dempen van de debietschommelingen leidt vooral tot een verhoging van de werkingsduur van de turbines. In Sint-Baafs-Vijve zorgt het dempen van de debietschommelingen nog steeds voor een bescheiden verbetering van de openingsgraad van de vispassage. De opening van de vispassages op basis van waterpeil (scenario S5, variant h) of debiet (scenario S5, variant q) heeft slechts een beperkte invloed. In het droge jaar 2017 leidt een opening op basis van waterpeil tot een marginale verbetering van de openingsgraad van de vispassage van Harelbeke en een iets grotere verbetering van de openingsgraad van de vispassage van Sint-Baafs-Vijve.
- De aanpassing van de sturing van het toegevoegd debiet in Sint-Baafs-Vijve (scenario S5) leidt tot een toename van het aantal schuifbewegingen. Dit wordt veroorzaakt door twee factoren. Het aantal mogelijke schuifstanden werd verhoogd van 4 naar 5 (sluiting inbegrepen). In scenario S1 t.e.m. S4 werd een maximaal toegevoegd debiet van 3 m<sup>3</sup>/s toegepast, en in scenario S5 een maximaal toegevoegd debiet van 4 m<sup>3</sup>/s (finaal ontwerp). Bovendien werd de bewegingsvrijheid van de schuif beperkt. In eerdere analyses (scenario S2) kon de schuif in perioden met grote debietschommelingen onmiddellijk van de laagste naar de hoogste stand evolueren. In de aanvullende analyse (scenario S5) leidt de volgorde van de sturingsregels ertoe dat de schuif ook alle tussenliggende standen moet doorlopen. Deze toename kan vermeden worden door het aantal schuifstanden te beperken of de volgorde van de sturingsregels aan te passen.

Op basis van de verkennende simulatiestudies is een voorstel uitgewerkt voor de sturingsvoorwaarden van zowel de afsluitconstructie van de vispassage als de regelconstructie van het toegevoegd debiet (Vanderkimpen *et al.*, 2020b). Deze worden hierna beschreven in respectievelijk paragraaf 7.2 en paragraaf 7.3.

## 7.2 Afsluitconstructie vispassage

### 7.2.1 Principe

De vispassage wordt uitgerust met een opwaartse hefschuif met slechts 2 standen: volledig open of volledig dicht. Deze hefschuif moet zowel manueel als automatisch bediend kunnen worden (keuzeschakelaar: openen en sluiten hefschuif manueel of automatisch). De bewegingssnelheid van de hefschuif moet toelaten ze volledig te openen of te sluiten op maximaal enkele minuten tijd.

De automatische regeling gebeurt op basis van het waterpeil opwaarts van de stuw en het debiet over de stuw. Het voorgestelde algoritme laat toe om de hefschuif te openen op basis van een combinatie van waterpeil en debiet en te sluiten op basis van waterpeil of debiet. Er is gekozen voor een combinatie van waterstand en debiet 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.

Zolang er debietschommelingen optreden op de Leie, kan het nuttig zijn om de hefschuif te openen op basis van het waterpeil opwaarts van de stuw. Wanneer deze debietschommelingen niet langer optreden, dan valt een opening op basis van het debiet over de stuw te verkiezen.

Indien het waterpeil opwaarts van de stuw te laag zakt, dan moet de hefschuif sluiten om leegloop van het pand tussen Harelbeke en Sint-Baafs-Vijve te vermijden.

Om schade aan de vispassage te voorkomen, kan het voor sommige vispassagetypes (zoals bijv. nevengeulen) 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, dient de beveiliging noodgedwongen gebaseerd te worden op het waterpeil opwaarts van de stuw. In geval van de vertical slotpassage te Sint-Baafs-Vijve wordt verwacht dat er geen risico is op schade bij verhoogde waterpeilen (zie 4.2).

### 7.2.2 Voorstel sturingsregels

Op basis van bovenstaande principes en de resultaten van de simulaties (zie 7.1) worden de volgende sturingsregels voorgesteld:

1. **VOLLEDIG SLUITEN 1** als alarmpeilvlotter (hoogwateralarm OF laagwateralarm) geactiveerd worden
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 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**
4. **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 en 2 zijn veiligheidsregels en zijn gedeeltelijk redundant. De regels 3 en 4 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 passage klein is), dan volstaat een sluiting op basis van een laagwateralarm.

De tweede regel laat toe een extra beveiliging tegen hoge debieten te voorzien. Indien een dergelijke beveiliging niet nodig geacht wordt (bv. omdat de vispassage bij hoge waterstanden reeds gesloten wordt door activering van de hoogwateralarmvlotter nog voor het debiet doorheen de vispassage te groot wordt), dan kan ze uitgeschakeld worden door een artificieel hoge waarde voor het instelbaar peil (bv 99,99 mTAW) in te voeren. In geval van de vertical slotpassage te Sint-Baafs-Vijve kan een artificieel hoge waarde worden toegepast aangezien er bij hoogwater geen risico is op schade.

De derde 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  $0 \text{ m}^3/\text{s}$  (lees: debiet kleiner dan nul) en het waterpeil gelijk gesteld wordt aan een realistische waarde, dan zal de debietvoorwaarde nooit vervuld zijn (debiet kan niet kleiner worden dan nul) en zal de vispassage sluiten op basis van het waterpeil.

De vierde 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  $0 \text{ m}^3/\text{s}$  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 en 4 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.

### 7.2.3 Voorstel initiële waarden

In de onderstaande tabellen worden 2 sets parameters gegeven. In de eerste set (Tabel 29) wordt de vispassage geopend en gesloten op basis van het waterpeil opwaarts van de stuw. In de tweede set (Tabel 30) wordt de vispassage geopend op basis van het debiet over de stuw en gesloten op basis van het waterpeil opwaarts van de stuw. Voor de duurfactor (instelbare tijd 1, 2 en 3) wordt als initiële waarde 10 minuten voorgesteld.

Tabel 29 – Voorstel initiële waarden vispassage bij openen en sluiten op basis van waterpeil

Regel	Instelbare waarde(s)	Voorwaarde		Actie schuif
		debiet stuw (m <sup>3</sup> /s)	waterpeil (mTAW)	
Sluiten 1	vlotter*		< 7,75	volledig dicht
Sluiten 2	peil 3		> 99,99	volledig dicht
Sluiten 3	peil 1 <u>of</u> debiet 1	< 0	< 7,80	volledig dicht
Openen	peil 2 <u>en</u> debiet 2	≥ 0	> 7,85	volledig open

\* Deze voorwaarde is niet instelbaar. Ze wordt bepaald door de fysische positie van de alarmpeilvlotter.

Aangezien er geen risico is op schade bij hoogwater is de regel ‘sluiten 2’ uitgeschakeld door het invullen van een artificieel hoge waarde (99,99 mTAW).

De vispassage zal openen als het debiet over de stuw groter dan of gelijk is aan 0 m<sup>3</sup>/s en het opwaarts waterpeil meer dan 7,85 mTAW (= 15 cm onder het opwaarts streefpeil van 8,00 mTAW) bedraagt. De debietvoorwaarde is altijd vervuld en heeft bijgevolg geen invloed.

De vispassage zal sluiten als het waterpeil opwaarts van de stuw minder dan 7,80 mTAW bedraagt (= 20 cm onder het opwaarts streefpeil van 8,00 mTAW) of het debiet over de stuw minder dan 0 m<sup>3</sup>/s bedraagt. De debietvoorwaarde is onvervulbaar en heeft bijgevolg geen invloed.

Tabel 30 – Voorstel initiële waarden vispassage bij openen op basis van debiet en sluiten op basis van waterpeil

Regel	Instelbare waarde(s)	Voorwaarde		Actie schuif
		debiet stuw (m <sup>3</sup> /s)	waterpeil (mTAW)	
Sluiten 1	vlotter*		< 7,75	volledig dicht
Sluiten 2	peil 3		> 99,99	volledig dicht
Sluiten 3	peil 1 <u>of</u> debiet 1	< 0	< 7,80	volledig dicht
Openen	peil 2 <u>en</u> debiet 2	≥ 2	> 6,20	volledig open

\* Deze voorwaarde is niet instelbaar. Ze wordt bepaald door de fysische positie van de alarmpeilvlotter.

Bij de instellingen uit Tabel 30 zal de vispassage openen als het debiet over de stuw groter dan of gelijk is aan 2 m<sup>3</sup>/s en het opwaarts waterpeil meer dan 6,20 mTAW (= drempel van de vispassage) bedraagt. De waterpeilvoorwaarde zal bijna altijd vervuld zijn. De overige regels zijn gelijk aan de instellingen uit Tabel 29.



## 7.3 Regelconstructie toegevoegd debiet

### 7.3.1 Principe

De regelconstructie voor het toegevoegd debiet wordt uitgerust met een hefschuif waarvan de stand continu kan variëren. In de voorgestelde regeling worden maximaal 5 standen gebruikt: volledig gesloten en 4 instelbare openingen. Deze hefschuif moet zowel manueel als automatisch bediend kunnen worden (keuzeschakelaar: openen en sluiten hefschuif manueel of automatisch). De bewegingssnelheid van de hefschuif moet toelaten ze volledig te openen of te sluiten op maximaal 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. 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.

Op korte termijn beperken de snelle debietschommelingen op de Leie het nut van het gebruik van meerdere instelbare schuifstanden. Op langere termijn, als de debietschommelingen gedempt zijn, zou dit eventueel wel nuttig kunnen zijn. 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.

### 7.3.2 Voorstel sturingsregels

Op basis van bovenstaande principes en de resultaten van de simulaties (zie 7.1) worden de volgende sturingsregels voorgesteld:

1. **VOLLEDIG SLUITEN 1** als alarmpeilvlotter (hoogwateralarm OF laagwateralarm) geactiveerd worden
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**
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 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 (voor Sint-Baafs-Vijve is dit het geval).

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 formule voor het berekenen van het debiet over de stuw geen negatieve waarden kan produceren.

### 7.3.3 Voorstel initiële waarden

In de onderstaande tabellen worden 2 sets parameters gegeven. De eerste set (Tabel 31) gebruikt slechts 1 schuifstand en is bedoeld voor gebruik in aanwezigheid van debietschommelingen. De tweede set (Tabel 32) gebruikt alle beschikbare schuifstanden en is bedoeld voor gebruik nadat de debietschommelingen gedempt zijn. De gele velden tonen de door de gebruiker in te voeren waarden.

Tabel 31 – Voorstel initiële waarden toegevoegd debiet bij (huidige) relatief grote debietschommelingen

Toegevoegd debiet	debiet stuw (m <sup>3</sup> /s)	waterpeil (mTAW)	schuifstand (cm)	debiet (m <sup>3</sup> /s)
continu naar stand 4			112	4
debiet 4+	> 999			
debiet 4-	< 0			
continu naar stand 3			112	4
debiet 3+	> 999			
debiet 3-	< 0			
continu naar stand 2			112	4
debiet 2+	> 999			
debiet 2-	< 0			
continu naar stand 1			112	4
debiet 1+	> 8			
debiet 1- of peil 1	< 4	< 7.80		
continu sluiten			volledig dicht	0

Het toegevoegd debiet zal volledig ingeschakeld worden (4 m<sup>3</sup>/s) wanneer het debiet over de stuw meer dan 8 m<sup>3</sup>/s bedraagt.

Het toegevoegd debiet zal volledig uitgeschakeld worden (0 m<sup>3</sup>/s) wanneer het debiet over de stuw minder dan 4 m<sup>3</sup>/s bedraagt of wanneer het waterpeil opwaarts van de stuw minder dan 7.80 mTAW bedraagt (= 20 cm onder het opwaarts streefpeil van 8.00 mTAW).

Tabel 32 – Voorstel initiële waarden toegevoegd debiet bij (toekomstige) gedempte debietschommelingen

Toegevoegd debiet	debiet stuw (m <sup>3</sup> /s)	waterpeil (mTAW)	schuifstand (cm)	debiet (m <sup>3</sup> /s)
continu naar stand 4			112	4
debiet 4+	> 8			
debiet 4-	< 7			
continu naar stand 3			84	3
debiet 3+	> 6			
debiet 3-	< 5			
continu naar stand 2			56	2
debiet 2+	> 4			
debiet 2-	< 3			
continu naar stand 1			28	1
debiet 1+	> 2			
debiet 1- of peil 1	< 1	< 7.80		
continu sluiten (Q)			volledig dicht	0

Het toegevoegd debiet zal stapsgewijs toenemen tot 1, 2, 3 of 4 m<sup>3</sup>/s wanneer het debiet over de stuw respectievelijk meer dan 2, 4, 6 of 8 m<sup>3</sup>/s bedraagt.

Het toegevoegd debiet zal stapsgewijs afnemen tot 3, 2, 1 of 0 m<sup>3</sup>/s wanneer het debiet over de stuw respectievelijk minder dan 7, 5, 3 of 1 m<sup>3</sup>/s bedraagt.

Het toegevoegd debiet zal volledig uitgeschakeld worden (0 m<sup>3</sup>/s) wanneer het waterpeil opwaarts van de stuw minder dan 7.80 mTAW bedraagt (= 20 cm onder het opwaarts streefpeil van 8.00 mTAW).

## 7.4 Algemene opmerkingen en aanbevelingen bij de scripts

Bij zowel het voorgestelde script voor de afsluitconstructie (7.2) als die voor de regelconstructie (7.3) wordt het volgende opgemerkt/ aanbevolen:

- De vetgedrukte parameters zijn de effectieve voorwaarde voor regeling en dienen gemakkelijk aanpasbaar te zijn door de beheerder (via bijv. een besturingsscherm in het sluiswachtershuis), en dus niet 'hard' gecodeerd in een moeilijk toegankelijk software script. Momenteel is het voor de al bestaande stuwsluiscomplexen soms moeilijk om bepaalde regelvoorwaarden te kunnen achterhalen, laat staan om deze te kunnen optimaliseren. Aan de andere kant dient er wel voor gezorgd te worden dat deze waarden beveiligd zijn en niet zomaar aangepast kunnen worden door eenieder. Het bijhouden van wijzigingen (met reden) in een (automatisch en digitaal) logboek is hierbij noodzakelijk.
- Instelbare peilen worden best absoluut (in mTAW) in plaats van relatief (t.o.v. streefpeil) opgegeven aangezien deze meestal verbonden zijn aan voorwaarden die onafhankelijk zijn van streefpeil (bijv. minimale vaardiepte en risico's op schade/ erosie in de vispassage).
- Aangezien het toegevoegd debiet gecorreleerd is aan de openingsgraad van de hefschuif, wordt voorgesteld de schuifstanden wel als een relatieve stand t.o.v. de drempel (in cm) te definiëren.
- Ten aanzien van de nauwkeurigheid van de instelbare voorwaarden wordt het volgende voorgesteld:
  - De peilen dienen instelbaar te zijn met een nauwkeurigheid van 1 cm (formaat xx.xx mTAW).
  - De debieten dienen instelbaar te zijn met een nauwkeurigheid van 1 m<sup>3</sup>/s (formaat xxx m<sup>3</sup>/s).
  - De schuifstanden van het toegevoegd debiet dienen instelbaar te zijn met een nauwkeurigheid van 1 cm (formaat xxx cm).
  - De tijden dienen instelbaar te zijn met een nauwkeurigheid van 1 minuut (formaat xxx min).
- De bewegingssnelheid van de hefschuif van zowel afsluitconstructie van de vispassage als de regelconstructie van het toegevoegd debiet moet toelaten ze volledig te openen of te sluiten op maximaal enkele minuten tijd.

## Referenties

- Armstrong, G.; Apahamian, M.; Fewings, G.; Gough, P.; Reader, N.; Varallo, P. (2010). Environment Agency Fish Pass Manual. *GeoJournal*: 369
- Bélanger, J.B. (1828). *Essai sur la Solution Numérique de quelques Problèmes Relatifs au Mouvement Permanent des Eaux Courantes*.
- Buysse, D., Martens, S., Baeyens, R., Coeck, J., (2003). Onderzoek naar de migratie van vissen tussen Boven-Zeeschelde en Bovenschelde. Rapport Instituut voor Natuurbehoud 2004.02. 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.
- Chanson, H. (2002). *The hydraulics of stepped chutes and spillways*. Swets & Zeitlinger: Lisse. ISBN 90-5809-352-2
- Coenen, J.; Antheunisse, M.; Beekman, J.; Beers, M. (2013). *Handreiking vispassages in Noord-Brabant*. Waterschap Aa en Maas: [S.l.]
- De Laet, P.; Coen, I.; Verbist, F. (1988). Ijking van stuwen: stuw te St.Baafs-Vijve. *WL Rapporten*, 449\_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.
- 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.
- 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.
- Grontmij (2012) *Leie te Sint-Baafs-Vijve - Bouwen van een klasse Vb sluis - Voorontwerp Vertical-Slot vispassage*. Project 299167. Grontmij Belgium NV.
- Grontmij (2013a) *Leie te Sint-Baafs-Vijve - Bouwen van een klasse Vb sluis - Voorontwerp V-vormige bekkenpassage*. Project 299167. Grontmij Belgium NV.
- Grontmij (2013b) *Verantwoordingsnota projectvoorstel Seine-Schelde - Bouwen van een Vb-sluis op de Leie te Sint-Baafs-Vijve*. Versie 4.0. Project 299167. Grontmij Belgium NV.
- Grontmij (2013c) *Project MER Seine-Schelde - Bouwen van een Vb-sluis op de Leie te Sint-Baafs-Vijve*. Project 299167. Grontmij Belgium NV.
- Hager, W.H.; Bremen, R.; Kawagoshi, N. (1990). Classical hydraulic jump: length of roller. *J. Hydraul. Res.* 28(5): 591
- 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 overshoot and undershot weirs. Published online 3 March 2010 in Wiley Online Library ([wileyonlinelibrary.com](http://wileyonlinelibrary.com)) DOI: 10.1002/rra.1364.
- Kroes, M.; Monden, S. (2005). *Vismigratie – Een handboek voor herstel in Vlaanderen en Nederland*. Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap: Brussel. ISBN 9080324566. 205 pp.
- Lamoen, J. (1947). Modelonderzoek naar de krachten op de stuw (wip- en hefschuif) te Sint-Baafs-Vijve op de Leie, veroorzaakt door de waterbeweging. *WL Rapporten*, 80\_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

- Lamoen, J. (1952). Modelproeven voor de te bouwen stuw op de Leie te Vijve-St.-Baafs. WL Rapporten, 80\_2. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.
- 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.
- 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.
- Miller, D.S. (Ed.). (1994). Discharge characteristics. Hydraulic Structures Design Manual: Hydraulic Design Considerations, 8. Balkema: Rotterdam. ISBN 90-5410-180-6. 249 pp.
- 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.
- Naudascher, E.; Rockwell, D. (2005). Flow-induced vibrations – An engineering Guide. Dover Publications
- 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.
- Peterka, A.J. (1984). Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators. Engineering monograph (Washington), 25. U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Reclamation: Washington.
- 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
- 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. Organisatie ter Verbetering van de Binnenvisserij (OVb).
- 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.
- Thompson, P.L.; Kilgore, R.T. (2006). Hydraulic design of energy dissipators for culverts and channels. Hydraulic Engineering Circular, 14. U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration: Arlington. 287 pp. (2018). Overzicht wijzigingen vispassage. Memo E. Boone 22/11/2018, Antwerpen.
- Vanderkimpfen, P.; Visser, K. P.; Viaene, P. (2018). Scenario-analyse vispassage Sint-Baafs-Vijve. Versie 2.0. WL Memo's, 15\_036\_6. Waterbouwkundig Laboratorium, Antwerpen.

- Vanderkimpfen, P.; Visser, K. P.; Viaene, P. (2020a). Scenario-analyse vispassage Sint-Baafs-Vijve (aanvulling). Versie 2.0. WL Memo's, 15\_036\_6. Waterbouwkundig Laboratorium, Antwerpen.
- Vanderkimpfen, P.; Visser, K. P.; Viaene, P. (2020b). Voorstel sturing vispassage Sint-Baafs-Vijve. Versie 2.4. WL Memo's, 15\_036\_4. Waterbouwkundig Laboratorium, Antwerpen.
- Van Thuyne, G.; Breine, J. (2008). Visbestandopnames in Vlaamse beken en rivieren in het kader van het 'Meetnet Zoetwatervis' 2007. Rapporten van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek 2008 (INBO.R.2008.21). Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, Brussel.
- Verelst, K.; Castaño Lopez, S.; Van Hoydonck, W.; Visser, K.P.; Mostaert, F. (2020). CFD-modellering monding vispassage Sint-Baafs-Vijve. Versie 2.0. WL Rapporten, 19\_126\_1. Waterbouwkundig Laboratorium, Antwerpen.
- 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.
- 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, K.P.; Viaene, P.; Buysse, D.; Peeters, P.; Mostaert, F. (2016). Ontwerp vispassage op de Leie te Sint-Baafs-Vijve: bureaustudie hydraulisch voorontwerp. Versie 4.0. WL Rapporten, 15\_036\_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. IX, 48 + 2 p. bijlagen pp.
- Visser, K.P.; Buysse, D.; Viaene, P. (2018a) Hydraulisch ontwerp vispassage Sint-Baafs-Vijve inclusief monding. WL Memo's, 15\_036\_1, Waterbouwkundig Laboratorium, Antwerpen.
- Visser, K.P.; Buysse, D.; Viaene, P. (2018b) Hydraulisch ontwerp vispassage Sint-Baafs-Vijve – inlaat toegevoegd debiet. WL Memo's, 15\_036\_2, Waterbouwkundig Laboratorium, Antwerpen.
- Visser, K.P.; Buysse, D.; Viaene, P. (2018c) Hydraulisch ontwerp vispassage Sint-Baafs-Vijve – regelconstructie toegevoegd debiet. WL Memo's, 15\_036\_5, Waterbouwkundig Laboratorium, Antwerpen.
- Visser, K.P.; Viaene, P.; Buysse, D.; Peeters, P.; Mostaert, F. (2020; in prep.). Schaalmodelstudie monding vispassage te Denderleeuw. Versie 2.0. WL Rapporten, 14\_128\_1. Waterbouwkundig Laboratorium, Antwerpen.



# Bijlagen



De waterdiepte ( $d_1$ ) voor de sprong:

$$\frac{d_1}{h} = 0.54 \cdot \left(\frac{h_c}{h}\right)^{1.275} \quad (\text{Rand, 1955}) \quad (8)$$

En de corresponderende evenwichtsdiepte ( $d_2$ ) na de sprong:

$$\frac{d_2}{h} = 1.66 \cdot \left(\frac{h_c}{h}\right)^{0.81} \quad (\text{Rand, 1955}) \quad (9)$$

Met:

- $d_1$  Waterdiepte voor de watersprong [m]
- $d_2$  Evenwichtsdiepte na de watersprong [m]
- $h$  Valhoogte [m]
- $h_c$  Kritische waterhoogte ( $h_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$ ) [m]
- $g$  Valversnelling (= 9,81 m/s<sup>2</sup>) [m/s<sup>2</sup>]
- $q$  Debiet per strekkende meter ( $Q / B_o$ ) [m<sup>2</sup>/s]
- $Q$  Debiet bij vrije overlaat [m<sup>3</sup>/s]
- $B_o$  Breedte overlaat [m]
- $Fr_1$  Froude getal vóór sprong  $Fr_1 = \frac{q/d_1}{\sqrt{g \cdot d_1}}$  [-]

### Onderstroom en watersprong

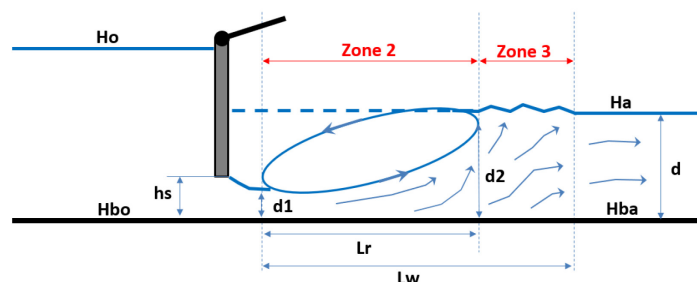
In het geval van een stuwonderstroom wordt het debiet berekend volgens de formule voor een afvoer door een opening (Nortier & de Koning, 1996):

$$Q = C_d \cdot B_s \cdot h_s \cdot \sqrt{(2g \cdot (H_o - H_a))} \quad (10)$$

Met:

- $Q$  Debiet bij onderstroom [m<sup>3</sup>/s]
- $C_d$  Debietcoëfficiënt [-]
- $B_s$  Breedte schuifopening [m]
- $h_s$  Hoogte schuifopening [m]
- $H_o$  Hoogte opwaarts waterpeil [mTAW]
- $H_a$  Hoogte afwaarts waterpeil [mTAW]

Figuur 53 – Visualisatie parameters rekenmethode onderstroom en watersprong



De waterdiepte ( $d_1$ ) voor de sprong en de corresponderende evenwichtsdiepte ( $d_2$ ) na de sprong:

$$d_1 = h_s \cdot C_d \quad (\text{Miller, 1994}) \quad (11)$$

$$d_2 = d_1 \cdot \frac{1}{2} \cdot \left( \sqrt{1 + 8 \cdot Fr_1^2} - 1 \right) \quad (\text{Bélanger, 1828}) \quad (12)$$

Met:

•	$h_s$	Openingshoogte onder schuif	[m]
•	$C_d$	Debietcoëfficiënt	[-]
•	$d_1$	Waterdiepte voor de watersprong	[m]
•	$d_2$	Evenwichtsdiepte na de watersprong	[m]
•	$Fr_1$	Froude getal vóór sprong $Fr_1 = \frac{q/d_1}{\sqrt{g \cdot d_1}}$	[-]
•	$g$	Valversnelling (= 9,81 m/s <sup>2</sup> )	[m/s <sup>2</sup> ]
•	$q$	Debiet per eenheidsbreedte ( $Q / B_s$ )	[m <sup>2</sup> /s]
•	$Q$	Debiet bij vrije overlaat	[m <sup>3</sup> /s]
•	$B_s$	Breedte schuifopening	[m]

### Lengte watersprong en roller

Afhankelijk van het overstortdebiet, de valdiepte ( $h$ ) en de afwaartse waterdiepte ( $d$ ) kan er een vrije of verdrongen watersprong ontstaan. Bij een vrije watersprong is de afwaartse waterdiepte ( $d$ ) ondieper dan de benodigde evenwichtsdiepte van de watersprong ( $d_2$ ) waardoor er opwaarts van de watersprong een zone met schietend water ontstaat (Froude > 1). In het geval van de verdrongen watersprong is de afwaartse waterdiepte wel groter dan de evenwichtsdiepte ( $d > d_2$ ) en reikt het afwaarts waterpeil tot aan de vallende straal/ opwaartse wand (zie blauwe stippellijn in Figuur 52 en Figuur 53).

De lengte van een verdrongen watersprong ( $L_w$ ) wordt zowel bij overstort als onderstroom berekend aan de hand van volgende formulering (Rajaratnam, 1965; Vischer & Hager, 1995):

$$\frac{L_w}{d_2} = 6.1 + 4.9 \cdot S_j \quad (\text{Rajaratnam, 1965}) \quad (13)$$

Met:

•	$L_w$	Lengte verdrongen watersprong	[m]
•	$d_2$	Evenwichtsdiepte na de watersprong	[m]
•	$S_j$	Factor verdrinkingsgraad $S_j = (d/d_2) - 1$ voor $S_j > 0$	[-]
•	$d$	Waterdiepte afwaarts pand	[m]

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

$$L_w = 6(d_2 - d_1) \quad (\text{Rand, 1955}) \quad (14)$$

$$\frac{L_w}{d_1} = 10 \cdot \alpha_j \cdot \tanh\left(\frac{Fr_1 - 1}{\alpha_j}\right) \quad (\text{Hager et al., 1990}) \quad (15)$$

Met:

- $L_w$  Lengte vrije watersprong [m]
- $d_1$  Waterdiepte voor de watersprong [m]
- $d_2$  Evenwichtsdiepte na de watersprong [m]
- $\alpha_j$  Coëfficiënt (= 22; voor  $4 \leq Fr_1 \leq 12$ ) [-]
- $Fr_1$  Froude getal vóór sprong  $Fr_1 = \frac{q/d_1}{\sqrt{g \cdot d_1}}$  [-]
- $g$  Valversnelling (= 9,81 m/s<sup>2</sup>) [m/s<sup>2</sup>]

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 52 en Figuur 53). De lengte van de roller kan bepaald worden met de volgende formules:

$$\frac{L_r}{d_1} = 8 \cdot \left( \left( \frac{d_c}{d_1} \right)^{3/2} - 1.5 \right) \quad (\text{Chanson, 2002}) \quad (16)$$

$$\frac{L_r}{d_1} = -12 + 8 \cdot \alpha_r \cdot \tanh\left(\frac{Fr_1}{\alpha_r}\right) \quad (\text{Hager et al., 1990}) \quad (17)$$

Met:

- $L_r$  Lengte roller binnen watersprong [m]
- $d_1$  Waterdiepte voor de watersprong [m]
- $h$  Valhoogte [m]
- $d_c$  Kritische waterhoogte ( $d_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$ ) [m]
- $g$  Valversnelling (= 9,81 m/s<sup>2</sup>) [m/s<sup>2</sup>]
- $q$  Debiet per eenheidsbreedte ( $Q / B_s$ ) [m<sup>2</sup>/s]
- $Q$  Debiet bij vrije overlaat [m<sup>3</sup>/s]
- $B_s$  Breedte schuifopening [m]
- $Fr_1$  Froude getal vóór sprong  $Fr_1 = \frac{q/d_1}{\sqrt{g \cdot d_1}}$  [-]

Woelkom

Op basis van de ontwerprichtlijnen voor een USBR type III woelkom uit (Thompson & Kilgore, 2006) en (Peterka, 1984) kan de lengte van de benodigde woelkom en hoogte van de einddrempel worden bepaald door middel van de volgende formules:

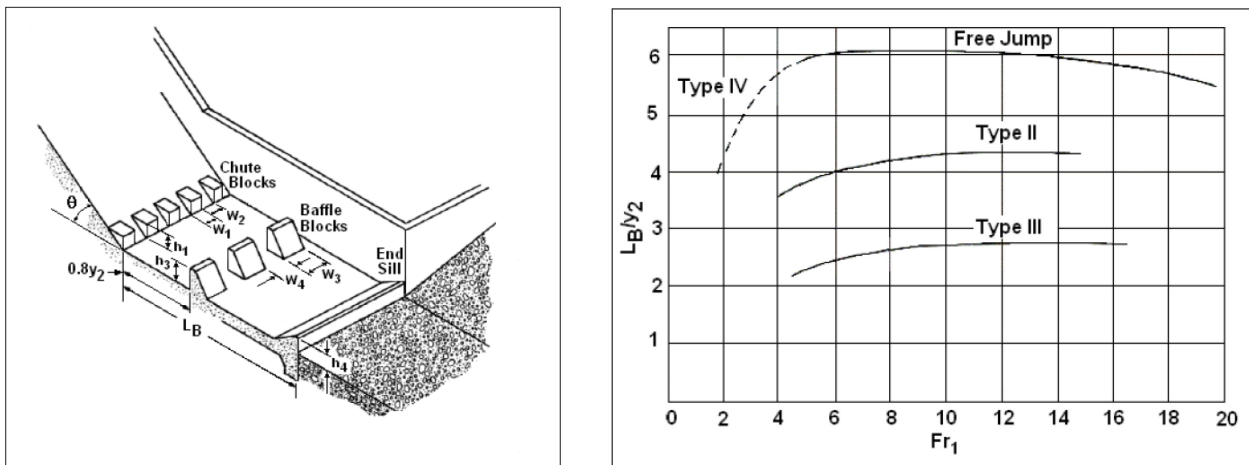
$$h_d = d_1 \cdot (0.168 \cdot Fr_1 + 0.58) \tag{18}$$

$$L_{wk} = C_{wk} \cdot d_2 \tag{19}$$

Met:

- $h_d$  Hoogte einddrempel [mTAW]
- $L_{wk}$  Lengte woelkom [mTAW]
- $C_{wk}$  Factor lengte woelkom (af te lezen op basis van  $Fr_1$  in Figuur 54) [-]
- $Fr_1$  Froude getal vóór sprong  $Fr_1 = \frac{q}{\sqrt{g \cdot d_1}}$  [-]
- $d_1$  Waterdiepte voor de watersprong [m]
- $d_2$  Evenwichtsdiepte na de watersprong [m]
- 

Figuur 54 – USBR type III woelkom



Bron: Thompson & Kilgore, 2006

## Bijlage B: Resultaten watersprong berekeningen stuwen

Tabel 33 – Resultaten watersprong bij stuw overstort en ondergrens Q90% voor kwartiergemiddelde waarde

omschrijving	eenheid	symp	1a	1b	2a	2b	3a	3b	4	5	6	7
Opwaarts waterpeil	[mTAW]	H <sub>o</sub>	8,00	8,00	8,10	8,10	8,20	8,20	7,80	8,00	8,00	8,10
Afwaarts waterpeil	[mTAW]	H <sub>a</sub>	5,61	5,83	5,61	5,83	5,61	5,83	5,61	5,51	5,41	6,27
Totaal verval	[m]	dH	2,39	2,17	2,49	2,27	2,59	2,37	2,19	2,49	2,59	1,83
Peilhoogte stuwklep(pen)	[mTAW]	H <sub>k</sub>	7,89	7,89	7,99	7,99	8,09	8,09	7,69	7,89	7,89	7,99
Waterhoogte opw boven klep	[m]	h <sub>1</sub>	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
<b>Debiet stuwen</b>	<b>[m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>Q<sub>s</sub></b>	<b>1,35</b>	<b>1,35</b>	<b>1,35</b>	<b>1,35</b>	<b>1,35</b>	<b>1,35</b>	<b>1,35</b>	<b>1,35</b>	<b>1,35</b>	<b>1,35</b>
Type stroom (overstort/ onderstroom)			over	over	over	over	over	over	over	over	over	over
Relatieve kleplengte in stroomrichting	[m]	L <sub>kx</sub>	1,26	1,26	1,20	1,20	1,13	1,13	1,34	1,26	1,26	1,20
<b>Lengte vallende straal</b>	<b>[m]</b>	<b>L<sub>d</sub></b>	<b>1,10</b>	<b>1,10</b>	<b>1,11</b>	<b>1,11</b>	<b>1,13</b>	<b>1,13</b>	<b>1,07</b>	<b>1,10</b>	<b>1,10</b>	<b>1,11</b>
Waterdiepte voor watersprong (Rand)	[m/s]	d <sub>1</sub>	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Stroomsnelheid voor watersprong	[-]	v <sub>1</sub>	4,79	4,79	4,82	4,82	4,85	4,85	4,72	4,79	4,79	4,82
Froudegetal voor watersprong	[m]	Fr <sub>1</sub>	12,88	12,88	13,01	13,01	13,14	13,14	12,61	12,88	12,88	13,01
Waterdiepte na watersprong (Rand)	[m]	d <sub>2</sub>	0,27	0,27	0,27	0,27	0,28	0,28	0,27	0,27	0,27	0,27
Afwaartse waterdiepte	[m/s]	d	1,76	1,98	1,76	1,98	1,76	1,98	1,76	1,66	1,56	2,42
Gem. stroomsnelheid in afw stuwgeul	[m/s]	v <sub>g</sub>	0,04	0,03	0,04	0,03	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,03
Verdrinkingsgraad watersprong	[-]	S <sub>j</sub>	5,46	6,26	5,43	6,23	5,40	6,20	5,52	5,09	4,72	7,84
Type watersprong (vrij/ verdrongen)			verdr	verdr	verdr	verdr	verdr	verdr	verdr	verdr	verdr	verdr
Lengte roller (Hager)	[m]	L <sub>r</sub>	1,11	1,11	1,11	1,11	1,12	1,12	1,11	1,11	1,11	1,11
Lengte roller (Chanson)	[m]	L <sub>r</sub>	1,28	1,28	1,29	1,29	1,30	1,30	1,27	1,28	1,28	1,29
<b>Einde roller tov stuwas (Hager)</b>	<b>[m]</b>		<b>3,47</b>	<b>3,47</b>	<b>3,43</b>	<b>3,43</b>	<b>3,38</b>	<b>3,38</b>	<b>3,52</b>	<b>3,47</b>	<b>3,47</b>	<b>3,43</b>
<b>Einde roller tov stuwas (Chanson)</b>	<b>[m]</b>		<b>3,64</b>	<b>3,64</b>	<b>3,60</b>	<b>3,60</b>	<b>3,56</b>	<b>3,56</b>	<b>3,68</b>	<b>3,64</b>	<b>3,64</b>	<b>3,60</b>
Lengte watersprong	[m]	L <sub>w</sub>	8,95	10,03	8,95	10,03	8,95	10,03	8,95	8,46	7,97	12,19
<b>Einde watersprong tov stuwas</b>	<b>[m]</b>		<b>11,31</b>	<b>12,38</b>	<b>11,27</b>	<b>12,34</b>	<b>11,21</b>	<b>12,29</b>	<b>11,36</b>	<b>10,82</b>	<b>10,33</b>	<b>14,50</b>



Tabel 34 – Resultaten watersprong bij stuw overstort en ondergrens Q90% voor daggemiddelde waarde

omschrijving	eenheid	symp	1a	1b	2a	2b	3a	3b	4	5	6	7
Opwaarts waterpeil	[mTAW]	H <sub>o</sub>	8,00	8,00	8,10	8,10	8,20	8,20	7,80	8,00	8,00	8,10
Afwaarts waterpeil	[mTAW]	H <sub>a</sub>	5,61	5,83	5,61	5,83	5,61	5,83	5,61	5,51	5,41	6,27
Totaal verval	[m]	dH	2,39	2,17	2,49	2,27	2,59	2,37	2,19	2,49	2,59	1,83
Peilhoogte stuwklep(pen)	[mTAW]	H <sub>k</sub>	7,64	7,64	7,74	7,74	7,84	7,84	7,44	7,64	7,64	7,74
Waterhoogte opw boven klep	[m]	h <sub>1</sub>	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36
<b>Debiet stuwen</b>	<b>[m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>Q<sub>s</sub></b>	<b>8,00</b>	<b>8,00</b>	<b>8,00</b>	<b>8,00</b>	<b>8,00</b>	<b>8,00</b>	<b>8,00</b>	<b>8,00</b>	<b>8,00</b>	<b>8,00</b>
Type stroom (overstort/ onderstroom)			over	over	over	over	over	over	over	over	over	over
Relatieve kleplengte in stroomrichting	[m]	L <sub>kx</sub>	1,35	1,35	1,32	1,32	1,28	1,28	1,39	1,35	1,35	1,32
<b>Lengte vallende straal</b>	<b>[m]</b>	<b>L<sub>d</sub></b>	<b>1,99</b>	<b>1,99</b>	<b>2,01</b>	<b>2,01</b>	<b>2,04</b>	<b>2,04</b>	<b>1,94</b>	<b>1,99</b>	<b>1,99</b>	<b>2,01</b>
Waterdiepte voor watersprong (Rand)	[m]	d <sub>1</sub>	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06	0,07	0,07	0,07	0,06
Stroomsnelheid voor watersprong	[m/s]	v <sub>1</sub>	6,15	6,15	6,19	6,19	6,23	6,23	6,05	6,15	6,15	6,19
Froudegetal voor watersprong	[-]	Fr <sub>1</sub>	7,69	7,69	7,77	7,77	7,85	7,85	7,52	7,69	7,69	7,77
Waterdiepte na watersprong (Rand)	[m]	d <sub>2</sub>	0,70	0,70	0,71	0,71	0,71	0,71	0,70	0,70	0,70	0,71
Afwaartse waterdiepte	[m]	d	1,76	1,98	1,76	1,98	1,76	1,98	1,76	1,66	1,56	2,42
Gem. stroomsnelheid in afw stuwgeul	[m/s]	v <sub>g</sub>	0,23	0,20	0,23	0,20	0,23	0,20	0,23	0,24	0,26	0,17
Verdrinkingsgraad watersprong	[-]	S <sub>j</sub>	1,50	1,81	1,49	1,80	1,48	1,79	1,53	1,36	1,22	2,42
Type watersprong (vrij/ verdrongen)			verdr	verdr	verdr	verdr	verdr	verdr	verdr	verdr	verdr	verdr
Lengte roller (Hager)	[m]	L <sub>r</sub>	3,04	3,04	3,05	3,05	3,07	3,07	3,00	3,04	3,04	3,05
Lengte roller (Chanson)	[m]	L <sub>r</sub>	3,22	3,22	3,24	3,24	3,26	3,26	3,18	3,22	3,22	3,24
<b>Einde roller tov stuwas (Hager)</b>	<b>[m]</b>		<b>6,38</b>	<b>6,38</b>	<b>6,39</b>	<b>6,39</b>	<b>6,38</b>	<b>6,38</b>	<b>6,33</b>	<b>6,38</b>	<b>6,38</b>	<b>6,39</b>
<b>Einde roller tov stuwas (Chanson)</b>	<b>[m]</b>		<b>6,56</b>	<b>6,56</b>	<b>6,58</b>	<b>6,58</b>	<b>6,58</b>	<b>6,58</b>	<b>6,51</b>	<b>6,56</b>	<b>6,56</b>	<b>6,58</b>
Lengte watersprong	[m]	L <sub>w</sub>	9,47	10,55	9,47	10,55	9,48	10,55	9,46	8,98	8,49	12,71
<b>Einde watersprong tov stuwas</b>	<b>[m]</b>		<b>12,81</b>	<b>13,89</b>	<b>12,81</b>	<b>13,88</b>	<b>12,79</b>	<b>13,87</b>	<b>12,79</b>	<b>12,32</b>	<b>11,83</b>	<b>16,04</b>

Tabel 35 – Resultaten debiet en watersprong bij stuw overstort en volledig neergelaten stuwkleppen

omschrijving	eenheid	symp	1a	1b	2a	2b	3a	3b	4	5	6	7
Opwaarts waterpeil	[mTAW]	H <sub>o</sub>	8,00	8,00	8,10	8,10	8,20	8,20	7,80	8,00	8,00	8,10
Afwaarts waterpeil	[mTAW]	H <sub>a</sub>	5,61	5,83	5,61	5,83	5,61	5,83	5,61	5,51	5,41	6,27
Totaal verval	[m]	dH	2,39	2,17	2,49	2,27	2,59	2,37	2,19	2,49	2,59	1,83
Peilhoogte stuwklep(pen)	[mTAW]	H <sub>k</sub>	7,28	7,28	7,28	7,28	7,28	7,28	7,28	7,28	7,28	7,28
Waterhoogte opw boven klep	[m]	h <sub>1</sub>	0,72	0,72	0,82	0,82	0,92	0,92	0,52	0,72	0,72	0,82
<b>Overstort debiet stuw</b>	<b>[m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>Q<sub>s</sub></b>	<b>22,73</b>	<b>22,73</b>	<b>27,62</b>	<b>27,62</b>	<b>32,83</b>	<b>32,83</b>	<b>13,95</b>	<b>22,73</b>	<b>22,73</b>	<b>27,62</b>
Type stroom (overstort/ onderstroom)			over	over	over	over	over	over	over	over	over	over
Relatieve kleplengte in stroomrichting	[m]	L <sub>kx</sub>	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40
<b>Lengte vallende straal</b>	<b>[m]</b>	<b>L<sub>d</sub></b>	<b>2,73</b>	<b>2,73</b>	<b>2,93</b>	<b>2,93</b>	<b>3,11</b>	<b>3,11</b>	<b>2,30</b>	<b>2,73</b>	<b>2,73</b>	<b>2,93</b>
Waterdiepte voor watersprong (Rand)	[m]	d <sub>1</sub>	0,16	0,16	0,19	0,19	0,22	0,22	0,11	0,16	0,16	0,19
Stroomsnelheid voor watersprong	[m/s]	v <sub>1</sub>	6,99	6,99	7,20	7,20	7,39	7,39	6,50	6,99	6,99	7,20
Froudegetal voor watersprong	[-]	Fr <sub>1</sub>	5,54	5,54	5,25	5,25	5,00	5,00	6,33	5,54	5,54	5,25
Waterdiepte na watersprong (Rand)	[m]	d <sub>2</sub>	1,21	1,21	1,35	1,35	1,48	1,48	0,93	1,21	1,21	1,35
Afwaartse waterdiepte	[m]	d	1,76	1,98	1,76	1,98	1,76	1,98	1,76	1,66	1,56	2,42
Gem. stroomsnelheid in afw stuwgeul	[m/s]	v <sub>g</sub>	0,65	0,57	0,78	0,70	0,93	0,83	0,40	0,68	0,73	0,57
Verdrinkingsgraad watersprong	[-]	S <sub>j</sub>	0,45	0,63	0,31	0,47	0,19	0,34	0,89	0,37	0,29	0,79
Type watersprong (vrij/ verdrongen)			verdr	verdr	verdr	verdr	verdr	verdr	verdr	verdr	verdr	verdr
Lengte roller (Hager)	[m]	L <sub>r</sub>	5,07	5,07	5,57	5,57	6,05	6,05	3,97	5,07	5,07	5,57
Lengte roller (Chanson)	[m]	L <sub>r</sub>	5,25	5,25	5,75	5,75	6,23	6,23	4,15	5,25	5,25	5,75
<b>Einde roller t.o.v. stuwas (Hager)</b>	<b>[m]</b>		<b>9,20</b>	<b>9,20</b>	<b>9,90</b>	<b>9,90</b>	<b>10,56</b>	<b>10,56</b>	<b>7,68</b>	<b>9,20</b>	<b>9,20</b>	<b>9,90</b>
<b>Einde roller t.o.v. stuwas (Chanson)</b>	<b>[m]</b>		<b>9,38</b>	<b>9,38</b>	<b>10,08</b>	<b>10,08</b>	<b>10,74</b>	<b>10,74</b>	<b>7,85</b>	<b>9,38</b>	<b>9,38</b>	<b>10,08</b>
Lengte verdrongen watersprong	[m]	L <sub>w</sub>	10,08	11,16	10,24	11,32	10,40	11,48	9,74	9,59	9,10	13,48
<b>Einde watersprong tov stuwas</b>	<b>[m]</b>		<b>14,21</b>	<b>15,29</b>	<b>14,57</b>	<b>15,65</b>	<b>14,91</b>	<b>15,99</b>	<b>13,45</b>	<b>13,72</b>	<b>13,23</b>	<b>17,80</b>

Tabel 36 – Resultaten watersprong bij onderstroom in de bovengrenssituatie Q10%

Omschrijving	eenheid	symp	1a	1b	2a	2b	3a	3b	4	5	6	7
Opwaarts waterpeil	[mTAW]	H <sub>o</sub>	8,00	8,00	8,10	8,10	8,20	8,20	7,80	8,00	8,00	8,10
Afwaarts waterpeil	[mTAW]	H <sub>a</sub>	5,61	5,83	5,61	5,83	5,61	5,83	5,61	5,51	5,41	6,27
Totaal verval	[m]	dH	2,39	2,17	2,49	2,27	2,59	2,37	2,19	2,49	2,59	1,83
Hoogte schuif boven drempelpeil	[m]	h <sub>s</sub>	0,57	0,60	0,56	0,59	0,55	0,58	0,60	0,56	0,55	0,66
<b>Debiet stuwen</b>	<b>[m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>Q<sub>s</sub></b>	<b>60,0</b>	<b>60,0</b>	<b>60,0</b>	<b>60,0</b>	<b>60,0</b>	<b>60,0</b>	<b>60,0</b>	<b>60,0</b>	<b>60,0</b>	<b>60,0</b>
Type stroom (overstort/ onderstroom)			onder	onder	onder	onder	onder	onder	onder	onder	onder	onder
Waterdiepte voor watersprong	[m]	d <sub>1</sub>	0,35	0,37	0,34	0,36	0,34	0,35	0,37	0,34	0,34	0,40
Stroomsnelheid voor watersprong	[m/s]	v <sub>1</sub>	6,85	6,52	6,99	6,67	7,13	6,82	6,55	6,99	7,13	5,99
Froudegetal voor watersprong	[-]	Fr <sub>1</sub>	3,69	3,44	3,81	3,55	3,92	3,67	3,46	3,81	3,92	3,02
Waterdiepte na watersprong (Bel.)	[m]	d <sub>2</sub>	1,66	1,61	1,69	1,64	1,71	1,66	1,62	1,69	1,71	1,52
Afwaartse waterdiepte	[m]	d	1,76	1,98	1,76	1,98	1,76	1,98	1,76	1,66	1,56	2,42
Gem. stroomsnelheid na watersprong	[m/s]	v <sub>g</sub>	1,36	1,21	1,36	1,21	1,36	1,21	1,36	1,45	1,54	0,99
Type watersprong	[-]		verdr	verdr	verdr	verdr	verdr	verdr	verdr	vrije	vrije	verdr
Verdrinkingsgraad watersprong	[-]	S <sub>j</sub>	0,06	0,23	0,04	0,21	0,03	0,19	0,09	-0,02	-0,09	0,59
Lengte roller (Chanson)	[m]	L <sub>r</sub>	6,15	5,69	6,34	5,91	6,52	6,11	5,74	6,34	6,52	4,88
Lengte roller (Hager)	[m]	L <sub>r</sub>	6,03	5,60	6,22	5,80	6,39	6,00	5,64	6,22	6,39	4,81
<b>Einde roller t.o.v. stuwas (Chanson)</b>	<b>[m]</b>		<b>6,15</b>	<b>5,69</b>	<b>6,34</b>	<b>5,91</b>	<b>6,52</b>	<b>6,11</b>	<b>5,74</b>	<b>6,34</b>	<b>6,52</b>	<b>4,88</b>
<b>Einde roller t.o.v. stuwas (Hager)</b>	<b>[m]</b>		<b>6,03</b>	<b>5,60</b>	<b>6,22</b>	<b>5,80</b>	<b>6,39</b>	<b>6,00</b>	<b>5,64</b>	<b>6,22</b>	<b>6,39</b>	<b>4,81</b>
Lengte watersprong	[m]	L <sub>w</sub>	10,62	11,64	10,65	11,67	10,67	11,69	10,56	9,59	9,78	13,69
<b>Einde watersprong t.o.v. stuwas</b>	<b>[m]</b>		<b>10,62</b>	<b>11,64</b>	<b>10,65</b>	<b>11,67</b>	<b>10,67</b>	<b>11,69</b>	<b>10,56</b>			<b>13,69</b>

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)