



Vlaanderen
is wetenschap



18_144_1
WL rapporten

Vertical slot vispassage op de Schelde te Merelbeke

Hydraulisch ontwerp

DEPARTEMENT
MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

Vertical slot vispassage op de Schelde te Merelbeke

Hydraulisch ontwerp

Visser, K.P.; Buysse, D.; Goormans, T.; Vanderkimpen, P.; Viaene, P.

Abstract

Het stuwsluiscomplex te Merelbeke is momenteel het belangrijkste knelpunt voor (vis)migratie op één van de hoofdassen van het Scheldebekken. Gezien vanuit de Zeeschelde (en daarmee de Noordzee) vormt deze locatie namelijk de hoofdtoegang van en naar zowel de Bovenschelde als de Leie, twee prioriteit 1 waterlopen in Vlaanderen vanuit het oogpunt vismigratie. De Vlaamse Waterweg afdeling regio West (DVW-ARW) voorziet daarom de aanleg van een vispassage rond dit stuwsluiscomplex. De nieuwe vispassage is gepland op de rechteroever tussen de stuwgeul en de R4.

Gekozen werd voor een dubbele vertical slotvispassage met toegevoegd debiet, naar voorbeeld van een al gerealiseerde en goed gemonitorde vispassage op de Elbe te Geesthacht (Duitsland). De vispassage bestaat uit 40 bekkens met een verval van circa 0,09 m per bekken bij het grootste verval (gemiddeld laagwater) onder normale tijcondities van circa 3,6 m. De slots hebben een breedte van 0,7 m en een minimale diepte van 1,3 m bij het grootste verval. De bekkens zijn 6 meter lang en 9 meter breed. Afhankelijk van de dagelijkse fluctuatie van het afwaartse en opwaartse waterpeil varieert het vispassagedebiet tussen circa 1,2 en 2,4 m³/s (en bij opwaarts streefpeil ligt deze tussen circa 1,5 en 2 m³/s).

Bij gemiddeld hoogwater neemt het totale verval over de vispassage af tot circa 0,7 m onder normale tijcondities, waardoor ook de vervallen per bekken afnemen van circa 0,09 tot 0,005 m. Om bij deze lagere vervallen toch voldoende lokstroom in de monding en ook in vispassage zelf te behouden wordt er in een aantal bekkens en in het mondingskanaal een toegevoegd debiet ingelaten via buizen. De grootte van dit toegevoegd debiet varieert met het afwaarts waterpeil (tij) door middel van schuiven die gekoppeld zijn aan vlotters. Ook worden automatisch afsluitbare schuiven op de buizen voorzien om deze te kunnen afsluiten met oog op peilbeheer bij te weinig beschikbare afvoer. Afhankelijk van het afwaartse waterpeil varieert het toegevoegd debiet in de bekkens van 0 tot circa 2 m³/s en in het mondingskanaal van circa 1 tot 2 m³/s.

Ter hoogte van de instroom worden een afsluitconstructie (hefschuif) en een monitoringzone voorzien. In de monitoringzone worden faciliteiten (zoals sponningen en verdieping) voorzien om fuiken, een vangkooi en/of andere monitoringsapparatuur te kunnen plaatsen. Ter plaatse van de monding wordt tevens krabbenvaal voorzien om de migratie van de Chinese wolhandkrab te voorkomen.

Zowel de opwaartse afsluitconstructie (hefschuif) als de schuiven van het toegevoegd debiet worden voorzien van een automatische aansturing op basis van metingen van het opwaartse waterpeil en het berekende debiet over de stuwen op basis van de stuwstanden. Regelvoorwaarden voor beide type schuiven werden voorgesteld.

Juridische kennisgeving

Het Waterbouwkundig Laboratorium is van mening dat de informatie en standpunten in dit rapport onderbouwd worden door de op het moment van schrijven beschikbare gegevens en kennis.

De standpunten in deze publicatie zijn deze van het Waterbouwkundig Laboratorium en geven niet noodzakelijk de mening weer van de Vlaamse overheid of één van haar instellingen.

Het Waterbouwkundig Laboratorium noch iedere persoon of bedrijf optredend namens het Waterbouwkundig Laboratorium is aansprakelijk voor het gebruik dat gemaakt wordt van de informatie uit dit rapport of voor verlies of schade die eruit voortvloeit.

Copyright en wijze van citeren

© Vlaamse overheid, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Waterbouwkundig Laboratorium 2024
D/2025/3241/017

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Visser, K.P.; Buysse, D.; Goormans, T.; Vanderkimpen, P.; Viaene, P. (2024). Vertical slot vispassage op de Schelde te Merelbeke: Hydraulisch ontwerp. Versie 4.0. WL Rapporten, 18_144_1. Waterbouwkundig Laboratorium, Antwerpen.

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

Documentidentificatie

Opdrachtgever:	De Vlaamse Waterweg – afdeling Regio West	Ref.:	WL2024R18_144_1
Trefwoorden (3-5):	Fish Passage; Vertical Slot; Additional Discharge; Tidal Barrier; River Scheldt		
Kennisdomeinen:	Waterbouwkundige constructies > Vispassages > Vertical slot > Literatuur- en desktoponderzoek Waterbouwkundige constructies > Vispassages > Vertical slot > Numerieke modellering		
Tekst (p.):	151	Bijlagen (p.):	15
Vertrouwelijk:	☒ Nee ☒ Online beschikbaar		

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

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Viaene, P.	Getekend door: Peter Viaene (Signature) Getekend op: 2025-03-17 12:12:12 +01:0 Reden: Ik keur dit document goed  
Projectleider:	Visser, K.P.	Getekend door: Klaas Visser (Signature) Getekend op: 2025-03-25 10:50:46 +01:0 Reden: Ik keur dit document goed  

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Bellafkih, K.	Getekend door: Abdelkarim Bellafkih (Sig) Getekend op: 2025-03-17 09:30:38 +01:0 Reden: Ik keur dit document goed  
-----------------	---------------	---

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	V
Lijst van de tabellen.....	IX
Lijst van de figuren	XI
1 Inleiding	1
1.1 Achtergronden.....	1
1.2 Doelstelling	1
1.3 Leeswijzer	2
2 Randvoorwaarden en ontwerpcriteria.....	3
2.1 Ruimtelijke randvoorwaarden.....	3
2.1.1 Locatie	3
2.1.2 Beschikbare ruimte.....	3
2.1.3 Stuwgeul en oevers	4
2.1.4 Stuwen	5
2.1.5 Schotbalkplatform en ondergrondse zijwanden	6
2.2 Ontwerpcriteria	8
2.2.1 Prioriteringskaart.....	8
2.2.2 Doelsoorten	9
2.2.3 Periode optimale werking	11
2.2.4 Passeerbaarheid	13
2.2.5 Attractiviteit (monding).....	16
2.3 Hydraulische randvoorwaarden	21
2.3.1 Waterbeheer Groot Pand	21
2.3.2 Relevante meetposten	23
2.3.3 Debieten	24
2.3.4 Waterstanden.....	30
3 Vispassage	35
3.1 Type en inpassing	35
3.2 Maatgevende parameters	39
3.3 Slotdimensies, verval en debiet.....	40
3.3.1 Verval per slot en aantal benodigde slots	40
3.3.2 Slotbreedte	40

3.3.3	Basisdebiet en slotdiepte	41
3.4	Bekkendimensies & energiedissipatie	44
3.4.1	Bekkenbreedte en bekkenlengte.....	44
3.4.2	Controle energiedissipatie.....	44
3.4.3	Controle stroompatronen (CFD).....	45
3.5	Bodemverhang, bodemhoogtes en hoogtes slotwanden	48
3.6	Invloed waterstandfluctuaties.....	49
3.6.1	Debiet bij normale werking	49
3.6.2	Waterstanden bij normale werking.....	49
3.6.3	Verval en stroomsnelheid bij normale werking	50
3.6.4	Energie per bekken bij normale werking.....	56
3.6.5	Belastingen onder extreme condities.....	57
3.7	Bodemsubstraat	59
4	Krabberval.....	61
5	Instroom	64
5.1	Dimensionering	64
5.2	Drijfvuilbalk(en)	65
5.3	Afsluitconstructie.....	67
5.4	Monitoringzone	69
5.4.1	Sponningen	69
5.4.2	Vangkooi	70
5.4.3	Sleuf krabberval	73
5.5	Controle energieverliezen	73
5.5.1	Criteria	73
5.5.2	Randvoorwaarden	73
5.5.3	Berekening.....	74
5.5.4	Resultaten.....	79
6	Toegevoegd debiet	81
6.1	Inleiding	81
6.2	Bekkens.....	81
6.2.1	Principe	81
6.2.2	Locaties en benodigd debiet	82
6.2.3	Controle stroompatronen (CFD).....	86
6.2.4	Buisdiameter.....	90
6.2.5	Buishoogte	94
6.2.6	Benodigde ladingsverliescoëfficiënt van de schuiven	96

6.3	Mondingskanaal	102
6.3.1	Principe	102
6.3.2	Benodigd debiet	103
6.3.3	Controle stroompatronen (CFD).....	105
6.3.4	Buisdiameter.....	107
6.3.5	Buishoogte.....	110
6.3.6	Benodigde ladingsverliescoëfficiënt van de schuiven	110
7	Monding	113
7.1	Inleiding	113
7.2	Randvoorwaarden en bepalende dimensies.....	113
7.2.1	Ruimtelijke inpassing.....	113
7.2.2	Stuwen en stuwgeul	114
7.3	Watersprong en migratielimietlijn	116
7.3.1	Randvoorwaarden	116
7.3.2	Rekenmethode	117
7.3.3	Resultaten.....	120
7.4	Locatie, orientatie en dimensionering.....	122
8	Automatische sturing	126
8.1	Inleiding	126
8.2	Afsluitconstructie vispassage	127
8.2.1	Principe	127
8.2.2	Sturingsregels bij automatische werking.....	127
8.2.3	Initiële waarden instelbare parameters	129
8.3	Afsluitschuiven toegevoegd debiet bekkens.....	130
8.3.1	Principe	130
8.3.2	Sturingsregels bij automatische werking.....	130
8.3.3	Initiële waarden instelbare parameters	131
8.4	Afsluitschuiven toegevoegd debiet afwaarts mondingskanaal.....	131
8.4.1	Principe	131
8.4.2	Sturingsregels bij automatische werking.....	132
8.4.3	Initiële waarden instelbare parameters	133
8.5	Eenheden en formaten.....	133
9	Samenvatting finaal ontwerp	134
9.1	Type, inpassing en optimale werking	134
9.2	Bekkens en slots	136
9.3	Bodemsubstraat	138

9.4	Instroom	138
9.5	Monding	140
9.6	Toegevoegd debiet	142
9.6.1	Bekkens	142
9.6.2	Mondingskanaal	144
9.7	Automatische sturing	146
9.8	Aanbevelingen	147
Referenties		148
Bijlage 1 – Schetsontwerp vangkooi		B1
Type profielen		B3
Aandachtspunten		B6
Bijlage 2 – Ladingsverliescoëfficiënten uit Idelchik (2007)		B8
Diagram 3.3 – Intrede		B8
Diagram 4.5 – Uittreneverlies na drijfvuilbalk		B9
Diagram 6.1 – Bocht		B10
Diagram 6.18 – Opeenvolgende bochten in hetzelfde vlak		B13
Diagram 6.19 – Opeenvolgende bochten in twee perpendiculaire vlakken		B14
Diagram 7.29 – Splitsing		B15

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Overzicht van de vissoorten die in de Bovenschelde en/of Leie werden gevangen tussen 2007 en 2018.....	10
Tabel 2 – Potentiële vissoorten waarvoor vrije vismigratie in het Scheldebekken in de toekomst belangrijk geacht wordt	11
Tabel 3 – Beperkt overzicht met vastgestelde periodes van stroomopwaartse paaïmigratie van adulten (■) en stroomopwaartse migratie van juvenielen en subadulten (■) voor enkele doelsoorten	12
Tabel 4 – Biologische ontwerpcriteria passeerbaarheid vispassage	16
Tabel 5 – Histogram zevendaags-gemiddelde debiet te Melle o.b.v. meetreeks met 5-minuutwaarden voor periode 1996 t.e.m. 2018	25
Tabel 6 – Debietpercentielen per maand o.b.v. zevendaags gemiddelde van de metingen te Melle uit periode 1996 t.e.m. 2019	26
Tabel 7 – Minimaal maandgemiddeld debiet voor behoud ecologie Zeeschelde	27
Tabel 8 – Maatgevende debieten te Merelbeke	29
Tabel 9 – Histogram waterpeilen meetposten.....	30
Tabel 10 – Maatgevende operationele opwaartse waterpeilen	30
Tabel 11 – Maatgevende afwaartse waterpeilen (in mTAW) op basis van metingen te Melle in periode 2010-2015.....	31
Tabel 12 – Maatgevende waterpeilen voor ontwerp vispassage.....	31
Tabel 13 – Scenario's maatgevende waterpeilen en vervallen	34
Tabel 14 – Maatgevende combinaties van hydraulische belastingen op de afsluitconstructie	68
Tabel 15 – Beschouwde hydraulische randvoorwaarden voor controle van de ladingsverliezen	74
Tabel 16 – Ladingsverliezen in de instroom en impact op de vispassage	80
Tabel 17 – Aantal en locatie inlaatpunten toegevoegd debiet in de bekkens	84
Tabel 18 – Hydraulische randvoorwaarden buizen per bekken.....	85
Tabel 19 – Overzicht CFD-simulaties voor de bekkens met en zonder toegevoegd debiet.....	86
Tabel 20 – Geometrie van de buizen voor toegevoegd debiet in de bekkens	92
Tabel 21 – Ladingsverliescoëfficiënten van de buizen naar de ontvangende bekkens.....	93
Tabel 22 – Gerealiseerde toegevoegde debieten per ontvangend bekken voor een hoog afwaarts waterpeil $H_a = 5,0$ m TAW	94
Tabel 23 – Gerealiseerde toegevoegde debieten per ontvangend bekken voor de beschouwde waterpeilen	101
Tabel 24 – Relatie inbreng toegevoegd debiet en stroomsnelheden in lokstroomkanaal	103
Tabel 25 – Hydraulische randvoorwaarden voor elk van de twee buizen van het toegevoegd debiet in het mondingskanaal	104
Tabel 26 – Geometrie van de buizen voor toegevoegd debiet naar het bassin van het mondingskanaal ...	108

Tabel 27 – Ladingsverliescoëfficiënten van de buizen naar het bassin van het mondingskanaal	109
Tabel 28 – Gerealiseerde toegevoegde debieten in het bassin van het mondingskanaal voor een hoog afwaarts waterpeil $H_a = 5,0$ m TAW.....	110
Tabel 29 – Gerealiseerde toegevoegde debieten naar het bassin van het mondingskanaal voor de beschouwde waterpeilen	112
Tabel 30 – Hydraulische randvoorwaarden watersprongberekeningen.....	116
Tabel 31 – Resultaten watersprongberekeningen	121
Tabel 32 – Voorstel initiële waarden voor automatische sturing vispassage	129
Tabel 33 – Voorstel initiële waarden voor automatische sturing afsluitschuiven toegevoegd debiet bekkens	131
Tabel 34 – Voorstel initiële waarden voor automatische sturing afsluitschuiven toegevoegd debiet afwaarts	133
Tabel 35 – Maatgevende waarden dimensionering hydraulisch ontwerp.....	137
Tabel 36 – Bodemhoogtes in de slots bij bodemverhang in bekkens van 1,5%.....	137

Lijst van de figuren

Figuur 1 – Stuwsuiscomplex Merelbeke	1
Figuur 2 – Enkele doelstoorten	2
Figuur 3 – Locaties stuwen te Merelbeke en Zwijnaarde	3
Figuur 4 – Locatie en beschikbare ruimte vispassage Merelbeke	4
Figuur 5 – Luchtfoto en zijaanzichten stuwen en schotbalkplatform te Merelbeke	5
Figuur 6 – Ontwerpplannen stuwen te Merelbeke	6
Figuur 7 – Asbuilt plan damplanken te Merelbeke	7
Figuur 8 – Prioriteringskaart waterlopen m.b.t. vismigratie	8
Figuur 9 – Foto's van enkele doelsoorten	9
Figuur 10 – Europese meervallen van anderhalve meter en meer (links) en snoeken van één meter of langer (rechts) zijn geen uitzondering meer in het Scheldestroomgebied. Foto's: INBO, vismigratie-onderzoek	15
Figuur 11 – Relatie migratielinielijne en monding vispassage	17
Figuur 12 – Correcte en incorrecte inpassing vispassagemonding in toonaangevende internationale publicaties	18
Figuur 13 – Indicatie afvoerverdeling in en rond het Groot Pand te Gent	21
Figuur 14 – Maandgemiddelde debieten voor meetposten rond Gent	22
Figuur 15 – Relevante meetposten voor stuwsuiscomplex Merelbeke	24
Figuur 16 – Debietpercentielen per maand te Melle met vergelijking P50-waarde droog jaar 2019	26
Figuur 17 – Schematische weergave maatgevende waterpeilen	32
Figuur 18 – Voorbeeld scenario met extreem hoog tij	33
Figuur 19 – Luchtfoto's van een dubbelslot vispassage op de Elbe te Geesthacht (Duitsland)	36
Figuur 20 – Eerste voorstel mogelijke inpassing dubbelslot vispassage met parallelle monding	36
Figuur 21 – Impressies beschikbare ruimte ter plaatse van de stuwen te Merelbeke (Bron: Google Earth) .	37
Figuur 22 – Alternatief tracé rond het schotbalk platform	37
Figuur 23 – Grondplan finaal hydraulische ontwerp vispassage te Merelbeke	38
Figuur 24 – 'Artist-impression' van de ruimtelijke inpassing (bron: DVW)	38
Figuur 25 – Schematische weergave van de maatgevende parameters voor het ontwerp van de bekkens en slots	39
Figuur 26 – Enkele doelsoorten	41
Figuur 27 – Relatie debiet (Q_{vis}) en slotdiepte (h_1) bij $H_o = 5,70$ mTAW, $H_a = 2,10$ mTAW en een slotbreedte van $bs = 0,7$ m	43
Figuur 28 – Relatie debiet (Q_{vis}) en afwaartse waterstand (H_a) bij $H_o = 5,70$ mTAW, $bs = 0,7$ m en $C_d = 0,8543$	
Figuur 29 – Invloed van vooral de bekkenbreedte op het stromingstype in vertical slot bekkens	45
Figuur 30 – Stroompatroon op circa 50 cm boven de bodem ter plaatse van bekken 7, 8 en 9 (slot 8 en 9)	47

Figuur 31 – Bodemhoogtes en slotwandhoogte	48
Figuur 32 – Invloed peilfluctuaties op debiet bij normale werking.....	49
Figuur 33 – Range aan waterstanden in de bekkens bij normale werking	50
Figuur 34 – Verval per slot bij variatie in afwaartse waterstand en opwaarts streefpeil 5,70 mTAW	50
Figuur 35 – Gemiddelde stroomsnelheid in het slot bij variatie in afwaartse waterstand en opwaarts streefpeil 5,70 mTAW	51
Figuur 36 – Gemiddelde stroomsnelheid in het slot bij maatgevende combinaties van op- en afwaartswaterpeil.....	51
Figuur 37 – Vergelijking gemiddelde stroomsnelheden bij slotdiepte van 1,3 en 1,8 m en $H_o = 5,70$ mTAW	52
Figuur 38 – CFD-resultaten stroming in het meest afwaartse bekken op circa 50 cm boven de bodem	53
Figuur 39 – CFD-resultaten dwarsprofielen stroming meest afwaartse slot en bekken bij variatie afwaartse waterstand.....	54
Figuur 40 – Vergelijking verval per bekken bij variatie in afwaartse waterstand	55
Figuur 41 – Vergelijking stroomsnelheden in de slots bij variatie in afwaartse waterstand	55
Figuur 42 – Energie per bekken (W/m^3) bij variatie in afwaarts waterpeil onder normale omstandigheden	56
Figuur 43 – Verval over de meest afwaartse slots bij extreem totaal verval	58
Figuur 44 – Stroomsnelheden in de meest afwaartse slots bij extreem totaal verval.....	58
Figuur 45 – Voorbeeld aanpak bodemsubstraat met vullaag en stoorstenen.....	59
Figuur 46 – Voorbeeld bodemsubstraat in de vispassage te Geesthacht	60
Figuur 47 – Locaties krabbenvallen in de vispassage te Merelbeke	61
Figuur 48 – Schets werkingsprincipe krabbenvall	62
Figuur 49 – Voorbeelden van krabbenvallen (links te Grobbendonk)	63
Figuur 50 – Bovenaanzicht en lengtedoorsnede instroom vispassage	64
Figuur 51 – Schematische lengtedoorsnede met maatgevende peilen, afsluitconstructie en voorzieningen tegen drijfvuil.....	66
Figuur 52 - Monitoringzone	69
Figuur 53 – Mogelijke vangkooi.....	71
Figuur 54 – Voorbeeld vangkooi op de Roer te Roermond (NL)	72
Figuur 55 – Indeling instroom in segmenten voor berekening ladingsverliezen	75
Figuur 56 – Schematisatie van de sponningen (Bron: Lencastre, 1996)	78
Figuur 57 – Locaties instroom van (toegevoegd) debiet in de vispassage	81
Figuur 58 – Foto's buizen toegevoegd debiet in de bekkens van de dubbelslot-vispassage te Geesthacht ..	82
Figuur 59 – Invloed inbreng toegevoegd debiet op stroomsnelheden in de slots bij $H_a = 5$ mTAW	83
Figuur 60 – Ruimtelijk overzicht inlaatpunten toegevoegd in de bekkens	84
Figuur 61 – Gemiddelde stroomsnelheden in de slots bij maatgevende scenario's toegevoegd debiet	85
Figuur 62 – Vergelijking stroomsnelheden in de slots bij variatie in afwaartse waterstand en toepassing toegevoegd debiet.....	87

Figuur 63 – Stroompatroon op kwartdiepte ter plaatse van bekken 18, 25, 32 en 39 bij inlaat toegevoegd debiet.....	88
Figuur 64 – Voorbeeld inpassing buizen en onderhoudsplatform in relatie tot de hoofdstroom in de vispassage.....	89
Figuur 65 – Buizen toegevoegd debiet bekken 12 (tussen slots 12 en 13)	91
Figuur 66 – Buizen toegevoegd debiet bekken 38 (tussen slots 38 en 39)	91
Figuur 67 – Definitieschets waterdekking (hd) boven instroomopening met hydraulische diameter (D) en stroomsnelheid (V)	94
Figuur 68 – Relatieve waterdekking boven een instroomopening als functie van het Froudegetal (Bron: ASCE, 1995).....	95
Figuur 69 – Gewenste relatie $H_b - Q_{b+}$ per bekken	96
Figuur 70 – Benodigde ladingsverliescoëfficiënt in functie van de waterstand voor elk van de ontvangende bekken.....	98
Figuur 71 – Benodigde ladingsverliescoëfficiënt in functie van de waterstand voor elk van de ontvangende bekken (detail)	98
Figuur 72 – Benodigde ladingsverliescoëfficiënt in functie van de waterstand voor elk van de ontvangende bekken (detail 2)	99
Figuur 73 – Ladingsverliescoëfficiënt in functie van de relatieve opening van de beschouwde schuif.....	100
Figuur 74 – Benodigde relatieve opening voor de beschouwde schuif in de buizen naar de bekken	101
Figuur 75 – Foto's buizen toegevoegd debiet in het mondingskanaal van de dubbelslot-vispassage te Geesthacht	102
Figuur 76 – Maatgevende locaties voor bepaling stroomsnelheden in lokstroomkanaal	103
Figuur 77 – Visualisatie 3D-model voor CFD-simulaties inbreng toevoegd debiet in lokstroomkanaal	105
Figuur 78 – Stroompatronen en -snelheden in het lokstroomkanaal bij inlaten toegevoegd debiet.....	106
Figuur 79 – Grondplan finaal ontwerp lokstroomkanaal	106
Figuur 80 – Buizen toegevoegd debiet mondingskanaal.....	108
Figuur 81 – Gewenste relatie $H_b - Q_{m+}$ voor het bassin van het mondingskanaal.....	110
Figuur 82 – Benodigde ladingsverliescoëfficiënt in functie van de waterstand in het bassin van het mondingskanaal	111
Figuur 83 – Benodigde relatieve opening voor de beschouwde schuif in de buizen naar het bassin naar het mondingskanaal	112
Figuur 84 – Luchtfoto met aanduiding belangrijkste maatvoering en aandachtspunten voor inpassing monding	114
Figuur 85 – Foto zij aanzicht huidige stuwten	114
Figuur 86 – Maatgevende dimensies stuwten.....	115
Figuur 87 – Typen watersprong en maatgevende parameters	117
Figuur 88 – Resultaten berekeningen einde watersprong* bij debietpercentielen binnen de afvoerrange van optimale werking.....	120
Figuur 89 – Meest optimale locatie en inpassing van de monding.....	123
Figuur 90 – Lengteprofiel monding	125

Figuur 91 – Bovenaanzicht finaal ontwerp mondingskanaal met aanduiding overwelling.....	125
Figuur 92 – Locaties beweegbare onderdelen waarvoor automatische regeling benodigd is	126
Figuur 93 – Hydraulisch ontwerp en ruimtelijke inpassing dubbel vertical slotvispassage te Merelbeke ...	134
Figuur 94 – Enkele doelsoorten (Foto's: Rollin Verlinde/Vilda)	135
Figuur 95 – Dimensionering hydraulisch ontwerp bekkens en slots.....	136
Figuur 96 – Dimensionering van de instroom met afsluitconstructie en monitoringzone	139
Figuur 97 – Dimensionering en ruimtelijke inpassing van de monding	140
Figuur 98 – Mondingskanaal met overwelling voor standplaat kraan en opslag schotbalken	141
Figuur 99 – Locaties inbreng toegevoegd debiet	142
Figuur 100 – Foto's buizensysteem voor inbreng toegevoegd in de bekkens uit de voorbeeldpassage te Geesthacht (Du).....	143
Figuur 101 – Hydraulisch ontwerp buizen voor toegevoegd debiet in de bekkens.....	144
Figuur 102 – Foto's buizensysteem voor inbreng toegevoegd in het mondingskanaal uit de voorbeeldpassage te Geesthacht (Du)	145
Figuur 103 – Buizen toegevoegd debiet mondingskanaal	146
Figuur 104 – Overzicht typeprofielen schetsontwerp vangkooi te Merelbeke.....	B1
Figuur 105 – Schetsmatige weergave technisch ontwerp vangkooi te Roermond	B2
Figuur 106 – Bovenaanzicht schetsontwerp vangkooi	B3
Figuur 107 – Lengtedoorsnede schetsontwerp vangkooi	B3
Figuur 108 – Dwarsdoorsnede/ vooraanzicht schetsontwerp vangkooi.....	B4
Figuur 109 – Zoom in lengtedoorsnede schetsontwerp vangkooi.....	B5
Figuur 110 – Zoom-in dwarsdoorsnede/ vooraanzicht schetsontwerp vangkooi.....	B5
Figuur 111 – 3D-impressie vangkooi met illustratie opwaartse borstels voor vuilreiniging.....	B7
Figuur 112 – Mogelijke toepassing van (harde) borstels voor geleiding en goede afsluiting vangkooi	B7

1 Inleiding

1.1 Achtergronden

Het oplossen van vismigratieknelpunten in Vlaanderen is vastgelegd in de Beneluxbeschikking voor vrije vismigratie (M (2009) 1). Het doel van de beschikking is het herstellen van de vrije vismigratie in de ecologisch belangrijke waterlopen in de Benelux. Voor het toepassen van de Benelux-beschikking in Vlaanderen is een prioriteitenkaart opgesteld. De vooropgestelde termijn voor het aanpakken van de knelpunten (verschillende deadlines in 2015, 2021 en 2027) is afgestemd op de Europese kaderrichtlijn Water.

Het stuwsluiscomplex te Merelbeke (zie Figuur 1) vormt momenteel het belangrijkste knelpunt voor (vis)migratie op één van de hoofdassen van het Scheldebekken. Gezien vanuit de Zeeschelde (en daarmee de Noordzee) vormt deze locatie namelijk de hoofdtoegang van en naar zowel de Bovenschelde als de Leie. Daarom werd voor het complex de hoogste saneringsprioriteit (*i.e.* prioriteit 1) opgelegd in de Beneluxbeschikking. De Vlaamse Waterweg afdeling regio West (DVW-ARW) voorziet daarom de aanleg van een vispassage rond dit stuwsluiscomplex. De nieuwe vispassage is gepland op de rechteroever tussen de stuwgeul en de R4.



Bron: Googlemaps

Figuur 1 – Stuwsluiscomplex Merelbeke

1.2 Doelstelling

Dit rapport beschrijft het hydraulisch ontwerp voor de nieuwe vispassage te Merelbeke en geeft daarmee de uitgangspunten en randvoorwaarden vanuit hydraulisch en ecologisch oogpunt voor de verdere bouwkundige uitwerking. Het bouwkundig ontwerp vormt geen onderdeel van deze studie. Wel zijn de bouwkundige randvoorwaarden en mogelijkheden (op hoofdlijnen) tijdens de studie steeds overlegd met het studiebureau dat - in opdracht van DVW-ARW - het bouwkundig ontwerp zal uitwerken.

1.3 Leeswijzer

Na de inleiding geeft hoofdstuk 2 een overzicht van alle randvoorwaarden en ontwerpcriteria. Dit hoofdstuk behandelt zowel de biologische ontwerpcriteria (doelsoorten, werkingsperiode, passeerbaarheid en attractiviteit) als de hydraulische en ruimtelijke randvoorwaarden (maatgevende waterpeilen, debieten en de beschikbare ruimte).

Vervolgens beschrijft hoofdstuk 3 het gekozen vispassagetype en het bekkenontwerp. Er werd gekozen voor een dubbelslot vispassage met toepassing van toegevoegd debiet, naar voorbeeld van een al gerealiseerde en goed gemonitorde vispassage op de Elbe te Geesthacht (Duitsland). Om te voorkomen dat invasieve soorten, zoals de Chinese wolhandkrab, de vispassage ook gebruiken om stroomopwaarts te migreren, wordt de mogelijkheid voorzien om krabbenvallen te plaatsen. Deze vallen worden besproken in hoofdstuk 4.

Hoofdstuk 5 beschrijft de instroom, die naast een automatisch gestuurde afsluitconstructie tevens een monitoringzone bevat voor de plaatsing van meet- en monitoringsapparatuur, en ook voorzieningen om drijfvuil buiten te houden.

De dimensionering van het toegevoegd debiet wordt beschreven in hoofdstuk 6. Om de attractiviteit in zowel de vispassage zelf als ter hoogte van de monding te behouden bij een sterk fluctuerend afwaartse waterpeil (vanwege het tij) wordt er in een vijftal bekkens en in het mondingskanaal extra debiet toegevoegd. Dit toegevoegde debiet bouwt mee op en af met het afwaartse waterpeil.

De locatie en het ontwerp van de monding worden beschreven in hoofdstuk 7. Uitgaande van de bouwkundige en ruimtelijke randvoorwaarden werd gestreefd naar een zo parallel mogelijke uitstroom en zo optimaal mogelijk gelegen monding ten opzichte van de migratielimietzone.

Zowel de opwaartse afsluitconstructie als de regelconstructies van het toegevoegd debiet worden met oog op peilbeheer voorzien van een automatische regeling. Hoofdstuk 8 beschrijft het algemene principe en de algemene voorwaarden voor deze automatische regeling.

Hoofdstuk 9 geeft tenslotte een samenvatting van het finale ontwerp en enkele aanbevelingen, mede met oog op de verdere bouwkundige uitwerking.



Rivierprik (foto: Rollin Verlinde/Vilda)



Driedoornige stekelbaars (foto: Yves Adams/Vilda)

Figuur 2 – Enkele doelsoorten

2 Randvoorwaarden en ontwerpcriteria

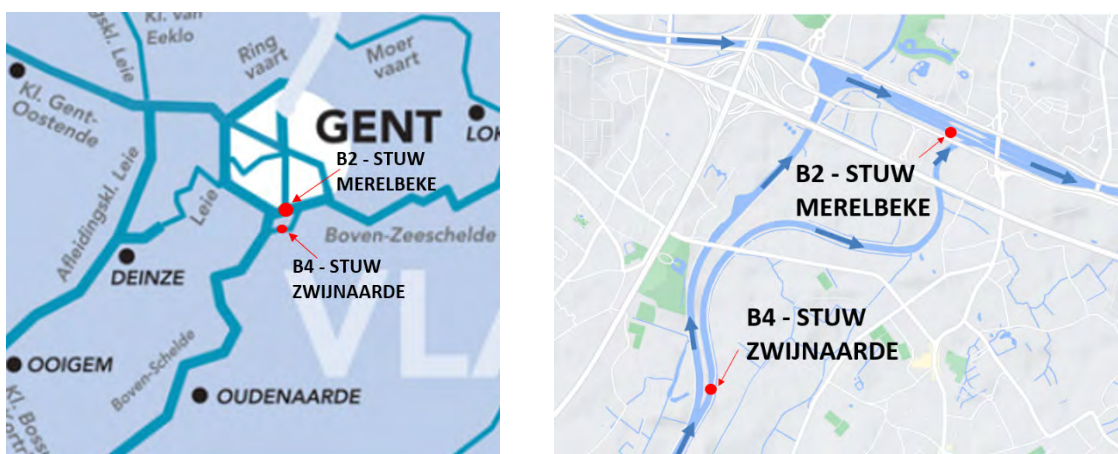
2.1 Ruimtelijke randvoorwaarden

2.1.1 Locatie

Voor de oplossing van het migratieknelpunt werd aanvankelijk gekeken naar twee mogelijke locaties (zie Figuur 3):

- Rond de B4-stuw te Zwijnaarde in de daar aanwezige Tijarm,
- Of rond de B2-stuw te Merelbeke waar zich ook de sluizen bevinden.

Aanvankelijk was er vanuit ruimtelijk en bouwkundig oogpunt eerst een voorkeur voor de inpassing rond de B4-stuw aangezien er op die locatie meer ruimte beschikbaar is voor de inpassing van een vispassage. De B4-stuw en de instroom van de tijarm bevinden zich echter dusdanig ver opwaarts in de Bovenschelde dat dit wel een goede migratiemogelijkheid geeft naar de Bovenschelde, maar niet naar de Leie. De kans dat opwaarts migrerende vissen via een vispassage op deze locatie ook de Leie zullen bereiken is namelijk klein. De hoofdstroomrichtingen op de betreffende locaties worden weergegeven rechts in Figuur 3. Een vispassage rond de B4 stuw is dus enkel een goede oplossing voor de Bovenschelde. Aangezien ook de Leie een prioriteit 1 waterloop is (zie verder in paragraaf 2.2.1), werd gekozen voor een vispassage rond de stuwen van Merelbeke.



Figuur 3 – Locaties stuwen te Merelbeke en Zwijnaarde

2.1.2 Beschikbare ruimte

Figuur 4 geeft een indicatie van de beschikbare ruimte voor de nieuwe vispassage te Merelbeke. De vispassage kan enkel ingepast worden op de rechteroever, aangezien de sluizen zich aan de linkerzijde van de stuwgeul bevinden. Op de rechteroever is de beschikbare ruimte in breedte beperkt door de aanwezigheid van de R4 autoweg, die zich op een grondlichaam bevindt. Onderaan het dijklichaam bevindt zich tevens een kleine afwateringsgracht. Bij de inpassing van de nieuwe vispassage dient altijd rekening te worden gehouden met de stabiliteit van het R4-grondlichaam.

Tussen de gracht aan de teen van het R4-grondlichaam en de stuwgeul is een strook beschikbaar van circa 20 meter breed met een gemiddelde maaiveldhoogte van circa 8 mTAW. De lengte van de beschikbare zone is circa 460 m opwaarts van de stuwen en circa 50 m afwaarts van de stuwen.



Figuur 4 – Locatie en beschikbare ruimte vispassage Merelbeke

2.1.3 Stuwgeul en oevers

De stuwgeul heeft een U-bakprofiel, met stalen damplanken als zijwanden. Uit bathymetrische opmetingen werd door het studiebureau Tractebel een bodempeil van circa 1,10 mTAW aan opwaartse zijde van de beschikbare ruimte (= begin stuwgeul) afgeleid, wat vervolgens geleidelijk afloopt tot circa 0,20 mTAW net opwaarts van de stuwen. Het bodempeil afwaarts van de stuwen ligt ook op 0,20 mTAW.

De rechteroever van de stuwgeul is uitgevoerd als een verankerde damwand met aan de bovenzijde een betonnen kesp. Bij de uitvoering en aanleg van de vispassage binnen de eerder genoemde beschikbare ruimte dient daarom een bouwkundige oplossing te worden gevonden voor de vervanging of verplaatsing van deze ankers. Daarbij dient de stabiliteit van het grondlichaam van de R4 logischer wijze altijd in acht genomen te worden. Dit wordt verder uitgewerkt in het bouwkundig ontwerp.

2.1.4 Stuwen

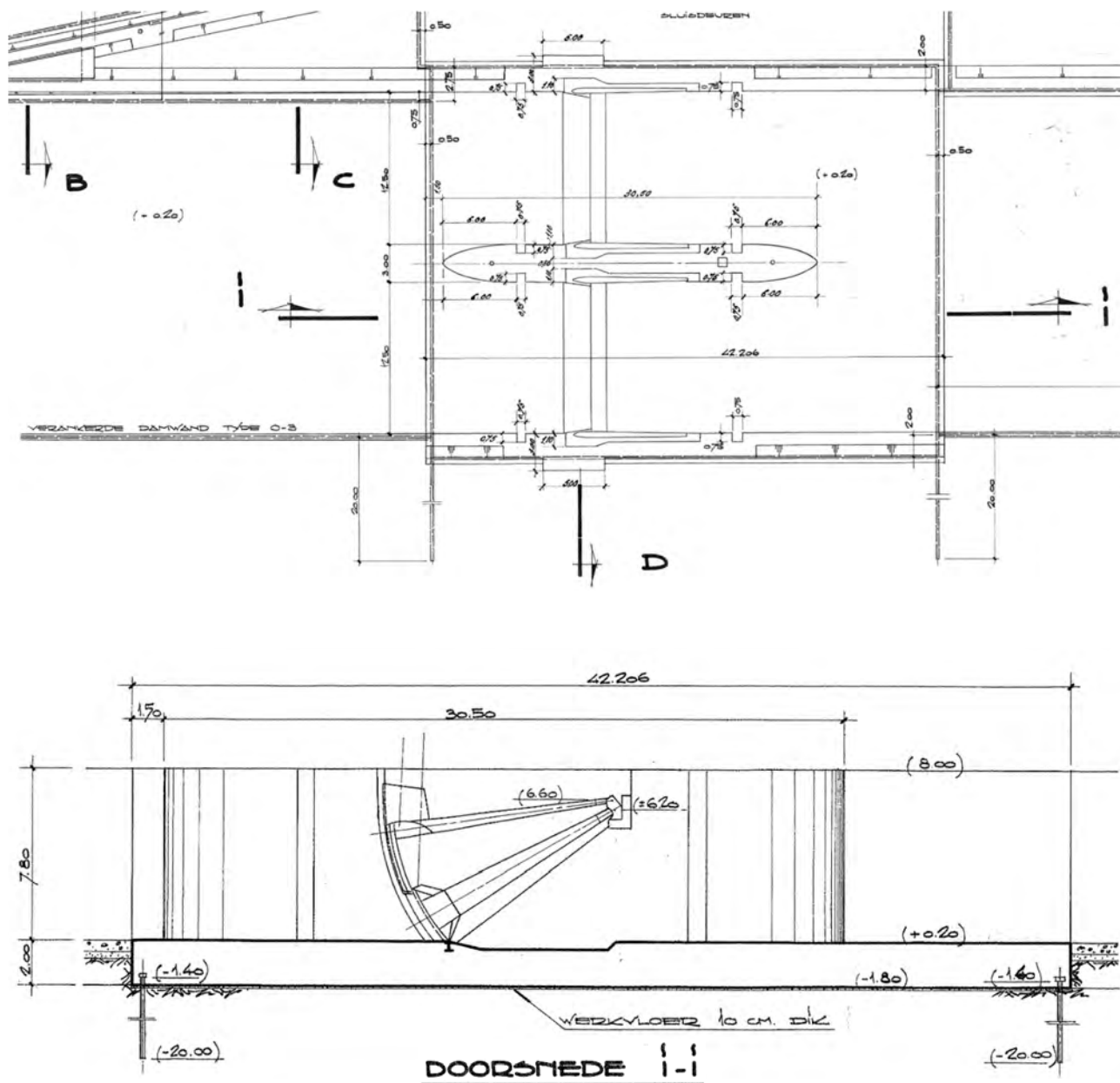
Figuur 5 toont een luchtfoto en twee zijaanzichten van de stuwen. Figuur 6 geeft het oorspronkelijke ontwerpplan met dimensionering voor deze stuwen. Er bevinden zich twee stuwen naast elkaar en elke stuw bestaat uit twee segmenten. Het bovenste segment dient voor peilregeling bij lage en normale afvoer. In laagste stand heeft het bovenste segment een kruinhoogte van 4,10 mTAW en in een hoogste stand 5,65 mTAW. In dat geval is er enkel sprake van stuwoverstort.

Bij hogere afvoeren kan het onderste segment (samen met het bovenste segment) worden geheven zodat (ook) een onderstroom ontstaat. Het betonnen bodempeil onder dit segment ligt op 0,20 mTAW. De beide segmenten kunnen maximaal geheven worden tot de onderkant van het onderste segment zich op 7,07 mTAW bevindt. Merk op dat er bij hefhoogtes tot circa 2,5 m boven het betonpeil zowel onderstroom als overstort optreedt. Bij heffen is het bovenste segment namelijk volledig neergelaten waardoor er ook nog water over het segment kan stromen.

Beide segmenten hebben een breedte van 12,50 m. De betonnen muur tussen de stuwen heeft een breedte van 3 m, wat de breedte van de stuwgeul op- en afwaarts van de stuwen circa 28 m maakt. Het betonnen bodempeil net op- en afwaarts van de stuwen bedraagt 0,20 mTAW. Er is wel ook een kleine en ondiepe woelkom aanwezig net afwaarts van de stuwen (de ontwerpplannen geven hiervoor geen dimensies).



Figuur 5 – Luchtfoto en zijaanzichten stuwen en schotbalkplatform te Merelbeke

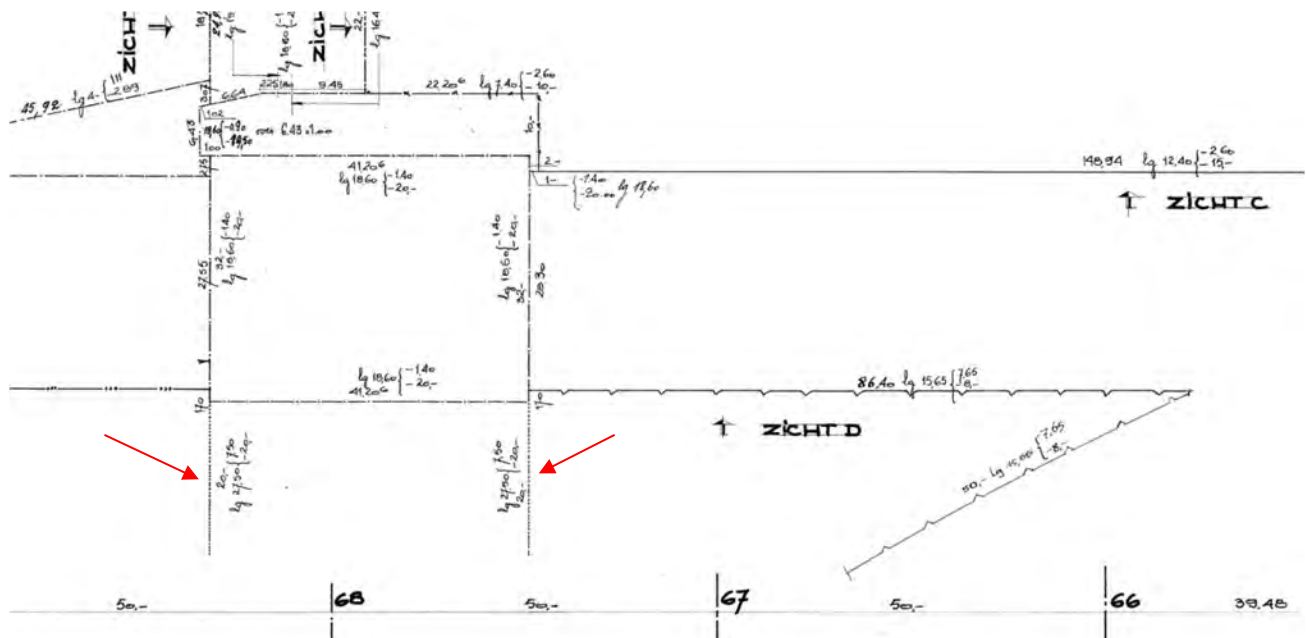


Figuur 6 – Ontwerpplannen stuwen te Merelbeke

2.1.5 Schotbalkplatform en ondergrondse zijwanden

Zoals te zien in Figuur 5 bevindt zich naast de stuwen een schotbalkplatform. Dit platform heeft een betonnen vloer op maaiveldniveau (circa 8 mTAW). Uit de ontwerpplannen in Figuur 6 en Figuur 7 kan tevens worden opgemaakt dat er onder de grond twee dwarswanden zijn aangelegd bestaande uit damplanken. Volgens de ontwerpplannen steken deze wanden tot circa 20 m in dwarsrichting uit in de oever en bevindt de onderzijde van deze wanden zich op een diepte van -20 mTAW.

Aanvankelijk had het voor DVW de voorkeur om het tracé voor de nieuwe vispassage rond het schotbalkplatform en deze ondergrondse zijwanden aan te leggen. Uit de ruimtelijke en geotechnische analyse door het studiebureau bleek echter dat de ruimte tussen het platform en de teen van het dijklichaam van de R4 te beperkt is (circa 2 tot 4 m) om een inpassing mogelijk te maken zonder dat dit invloed heeft op de stabiliteit van het grondlichaam van de R4. Daarom werd gekozen voor een tracé door deze zijwanden en onder het schotbalkplatform door (zie verder in paragraaf 3.1).



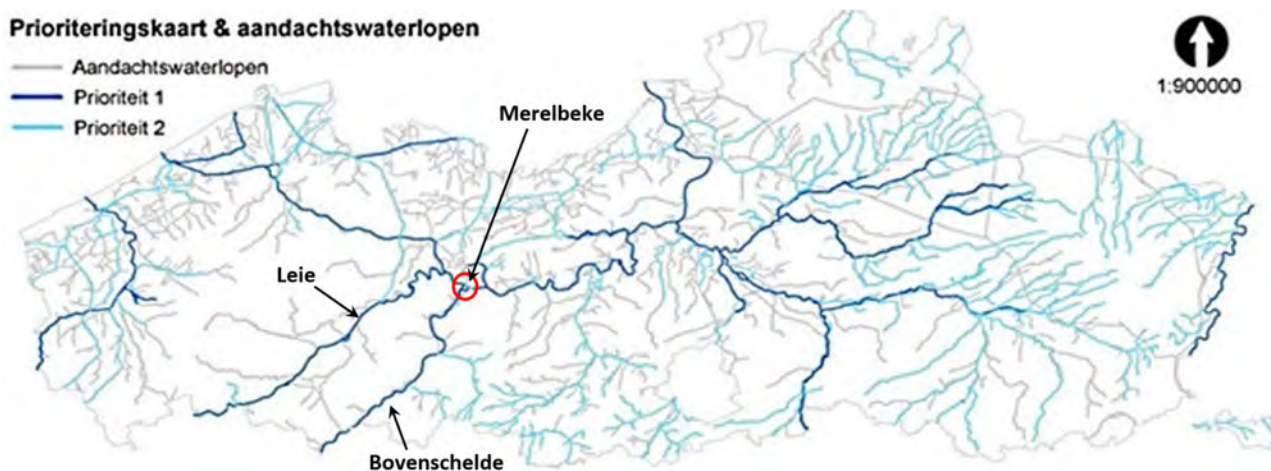
Figuur 7 – Asbuilt plan damplanken te Merelbeke

2.2 Ontwerpcriteria

2.2.1 Prioriteringskaart

Voor het herstel van vrije vismigratie in Vlaanderen is in kader van de Beneluxbeschikking voor vrije vismigratie (M (2009) 1) een prioriteitenkaart opgesteld (zie Figuur 8). Daarop staan de belangrijkste waterlopen voor het visbestand aangeduid die als eerste knelpuntvrij moeten worden gemaakt. Bij het opstellen van de prioriteitenkaart is rekening gehouden met de aanbevelingen van het Palingbeheerplan, de verspreiding van de Habitatrichtlijnsoorten (de beek- en rivierprik, de kleine en grote modderkruiper, de rivierdonderpad, de fint, de Atlantische zalm en de bittervoorn) en de stroomminnende soorten (de serpeling, de kopvoorn en de kwabaal) waarvoor in Vlaanderen een soortherstelprogramma is uitgewerkt. Het is belangrijk om waterlopen waarin deze doelsoorten voorkomen snel vrij te maken van migratieknelpunten. Zo kunnen deze zeldzame soorten hun leefgebied uitbreiden of hun voortplantingsgebieden terug bereiken (bron: <https://www.vmm.be/water/beheer-waterlopen/vismigratie/herstelplan-vlaanderen>).

Uit Figuur 8 is op te maken dat de locatie Merelbeke (zie rode cirkel) de belangrijkste toegang is vanuit de Zeeschelde (en daarmee de Noordzee) naar de Bovenschelde en Leie (beide prioriteit 1 waterlopen) en daarmee dus een zeer belangrijke locatie vormt voor rivierherstelmaatregelen in Vlaanderen.



Bron: <https://www.vmm.be/water/beheer-waterlopen/vismigratie/herstelplan-vlaanderen>

Figuur 8 – Prioriteringskaart waterlopen m.b.t. vismigratie

2.2.2 Doelsoorten

In de voorgaande paragraaf werden al enkele belangrijke doelsoorten genoemd met oog op de prioritering rivierherstelmaatregelen. Tabel 1 geeft een overzicht van in de Leie en de Bovenschelde gevangen vissoorten tussen 2007 en 2018.

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 zich bij herstelmaatregelen opnieuw kunnen vestigen en/of het resultaat kunnen zijn van herintroductieprogramma's. Tabel 2 geeft een overzicht van deze gewenste vissoorten voor herstel. De criteria voor het ontwerp van de vispassage zijn opgesteld op basis van de vissoorten uit zowel Tabel 1 als Tabel 2, en vormen daarmee de doelsoorten. Figuur 9 toont foto's van enkele van deze doelsoorten.



Kleine modderkruiper



Rivierprik



*driedoornige stekelbaars**



Zeeprik



Blankvoorn



Riviergrondel



Europese meerval



Paling



Atlantische steur

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

Figuur 9 – Foto's van enkele doelsoorten

Tabel 1 – Overzicht van de vissoorten die in de Bovenschelde en/of Leie werden gevangen tussen 2007 en 2018

Nederlandse naam ¹	Wetenschappelijke naam	Status ² (rode lijst)	Migratietype	Sprintsnelheid (m/s) ³
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 ⁴	nb
giebel	<i>Carassius gibelio</i>	UIT	Lokaal	2-2,2
graskarper	<i>Ctenopharyngodon idella</i>	UIT	nb	nb
karper	<i>Cyprinus carpio</i>	UIT	Lokaal / Regionaal	0,6-1,7
kolblei	<i>Blicca bjoerkna</i>	NiG	Lokaal	nb
kopvoorn	<i>Squalius cephalus</i>	BiG	Lokaal / Regionaal	0,5-3,8
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
spiering ⁵	<i>Osmerus eperlanus</i>	BiG	Diadroom	nb
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
zeeprik ⁶	<i>Petromyzon marinus</i>	EB	Anadroom	1,2
zonnebaars	<i>Lepomis gibbosus</i>	UIT	Lokaal	nb
zwartbekgrondel	<i>Neogobius melanostomus</i>	UIT	nb	nb

¹ 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, ... (Buyse D., schriftelijke mededeling).

² NiG = Momenteel niet in gevaar; BiG = Bijna in gevaar; UIT = Uittheems; K = Kwetsbaar; EB = Ernstig bedreigd; B = Bedreigd (Verreycken *et al.*, 2012; AMINAL, 2005).

³ Bron sprintsnelheden: (AMINAL, 2005) en voor rivierprik (Kemp *et al.*, 2011), nb = niet bekend bij auteurs.

⁴ Omvangrijke migraties van Europese meervallen werden vastgesteld tussen verschillende rivieren (Pauwels *et al.* 2014).

⁵ Onderzoek naar de migratie van vissen tussen Boven-Zeeschelde en Bovenschelde heeft aangetoond dat spiering tot aan de stuw in Merelbeke kan migreren tijdens het paaiseizoen (Buysse *et al.*, 2003)

⁶ Op 1 juni 2012 werd in de Bovenschelde in de visnevengeul te Asper eenmalig een zeeprik gevangen. Recente waarnemingen van zeeprik zijn zeer zeldzaam en deze waren nooit zo ver stroomopwaarts de Schelde als de waarneming in deze studie (Huysecom *et al.*, 2012).

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

Nederlandse naam	Wetenschappelijke naam	Migratietype ¹	Sprintsnelheid (m/s) ¹
Atlantische steur	<i>Acipenser sturio</i>	Anadroom	nb
Atlantische zalm	<i>Salmo salar</i>	Anadroom	4,1-8,8
elft ²	<i>Alosa alosa</i>	Anadroom	nb
serpeling	<i>Leuciscus leuciscus</i>	Lokaal / Regionaal	2,4
zeeforel	<i>Salmo trutta</i>	Anadroom	3,4-6,9

¹ Bron migratietype en sprintsnelheden: AMINAL (2005), nb = niet bekend bij auteurs.

² In de Bovenschelde in Kerkhove heeft het INBO in april 2020 voor het eerst in 100 jaar een elft gevonden (Buysse D., schriftelijke mededeling).

2.2.3 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 vispassage die het jaar rond goed werkt (*i.e.* een 100% werkingspercentage). 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).

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													Vandelannootte 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

Bron: (Buyse & Coeck 2014)

Tabel 3 – Beperkt overzicht met vastgestelde periodes van stroomopwaartse paaimigratie van volwassen (■) en stroomopwaartse migratie van juvenielen en subadulten (■) voor enkele doelsoorten

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_{30d} - Q_{330d} -criterium” toegepast (Schwevers, 2006; Dumont, 2006). Dit debietcriterium stelt dat de vispassage optimaal dient te kunnen werken tussen een rivierdebiet dat 90% van de tijd (=circa 330 dagen per jaar) beschikbaar is of wordt overschreden en een rivierdebiet dat 10% van de tijd (= circa 30 dagen van het jaar) wordt overschreden. Dit komt overeen met een minimaal percentage van 80% van het jaar. In deze studie wordt voor de genoemde boven- en ondergrens de percentage-notatie “ $Q_{10\%}$ - $Q_{90\%}$ ” gebruikt (in plaats van de dag-notatie “ Q_{30d} - Q_{330d} ”):

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

Naast de invloed van het optredende 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 afsluitschuif op het openingspercentage van de vispassage in de tijd relatief groot kunnen zijn (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 stuwpanden bepalen de waterstandsfluctuaties en instellingen voor automatische regeling vooral de openingspercentages en de passeerbaarheid van de vispassage. Het debietcriterium is bepalend voor het nodige lokstroomdebiet (attractiviteit bij bovengrens $Q_{10\%}$) en is 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 opzwemmen en in stroomopwaartse richting passeren. Met attractiviteit wordt de vindbaarheid van de vispassage bedoeld, waarbij zowel de locatie van de monding als de lokstroom een belangrijke rol spelen.

2.2.4 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 en minimale 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 AMINAL (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 (AMINAL, 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 wordt een overzicht gegeven van respectievelijk in de Leie en/of Bovenschelde 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; AMINAL, 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 slots steeds gecontroleerd dat gemiddelde stroomsnelheden bij peilfluctuaties binnen de optimale werkingsperiode niet hoger liggen 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. Ook komen hoge stroomsnelheden van nature niet voor in het laaglanddeel van rivieren als de Schelde en de Leie.

Aan de andere kant is het voor sommige soorten van belang dat stroomsnelheden in de hoofdstroom van de vispassage tijdens migratie ook weer niet te laag komen te liggen. Voor een goede migratie-impuls en een optimale vindbaarheid van de hoofdstroom is het daarom van belang dat tijdens de optimale werkingsperiode stroomsnelheden in deze hoofdstroom niet beneden de rheotactische¹ drempelwaarde van circa 0,2 – 0,3 m/s zakt (DWA, 2014).

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 10) en de Europese steur (Tabel 2) die beiden tot meer dan 2 m lang en een omvangrijke dikte kunnen uitgroeien – wordt gekozen voor een robuust ontwerp en – in overleg met het INBO – de volgende ondergrenswaarden:

- 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.

¹ Mate waarin de vis zich nog kan oriënteren op de stroming.

In het geval van een vertical slotpassage wordt de slotbreedte logischerwijs bepaald door de minimale doorzwembreedte 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 ingegeven 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).



Figuur 10 – Europese meervallen van anderhalve meter en meer (links) en snoeken van één meter of langer (rechts) zijn geen uitzondering meer in het Scheldestroomgebied. Foto's: INBO, vismigratie-onderzoek

Maximale energie en turbulentie per bekken

Bij bekkenpassages wordt bij elke bekkenovergang energie doorgegeven 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 (AMINAL, 2005):

- < 200 W/m³ voor zalmachtigen;
- < 150 W/m³ voor elft, fint en karperachtigen;
- < 100 W/m³ 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 $E_{\max}$ van 100 W/m³.

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 slots kan de nood aan rustbekkens (met grotere lengtes) en/of rustzones vergroten.

Over het gehele tracé van de vispassage dient een hoofdstroom aanwezig te zijn die bestaat uit een min of meer rechtlijnige doorgaande stroming (de zgn. 'migratiecorridor'). Voorkomen dient te worden dat complexe stroompatronen deze hoofdstroom en/of de lokstroom onderbreken of verstoren. Over het algemeen wordt verondersteld dat stromingen met aanzienlijke turbulentie (wit water), luchtbellens, hydraulische sprongen, opwelling en/of circulatieneren met te hoge snelheden dienen te worden vermeden (Larinier & Travade 2002). Evaluaties hebben bijvoorbeeld aangetoond dat de Amerikaanse elft (*American shad*) als het ware "gevangen" kan raken in grote circulatieneren van rustplaatsen en draaipeulen die de hoofdstroom onderbreken, wat resulteert in grote aantallen vissen die zich er ophopen (Haro and Castro-Santos, 2012). Locaties in de vispassage waar stromingspatronen te complex zijn, zijn dan ook mogelijke punten waarop vissen terugkeren (Sullivan, 2004 + Schriftelijke communicatie met Dr. Alexander Haro, Research ecologist and fish behavior expert bij de USGS²). Vanuit dit oogpunt worden dus best ook geen – of anders zo min mogelijk – (scherpe) bochten toegepast.

Merk op dat in de bekkens van vertical slotpassages recirculatieneren naast de hoofdstroom ontstaan ten gevolge van de plotse verwijding na het slot. Deze recirculatieneren verstoren de hoofdstroom (migratiecorridor) echter niet en dienen eerder als rustzones aangezien deze recirculatieneren over het algemeen zeer lage stroomsnelheden hebben.

Samenvatting criteria passeerbaarheid

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

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 stroomsnelheid in de doorgaande hoofdstroom	Vmin	0,2-0,3 m/s
Minimale lokale doorzwembreedte over korte afstand (slot)	bmin	0,50 m
Minimale doorzwemdiepte over korte afstand (drempel)	dmin	0,50 m
Minimale doorzwemdiepte over langere afstand (bekkens)	dbmin	1 – 1,5 m
Maximaal toelaatbare turbulentie	E _{max}	100 W/m ³

2.2.5 Attractiviteit (monding)

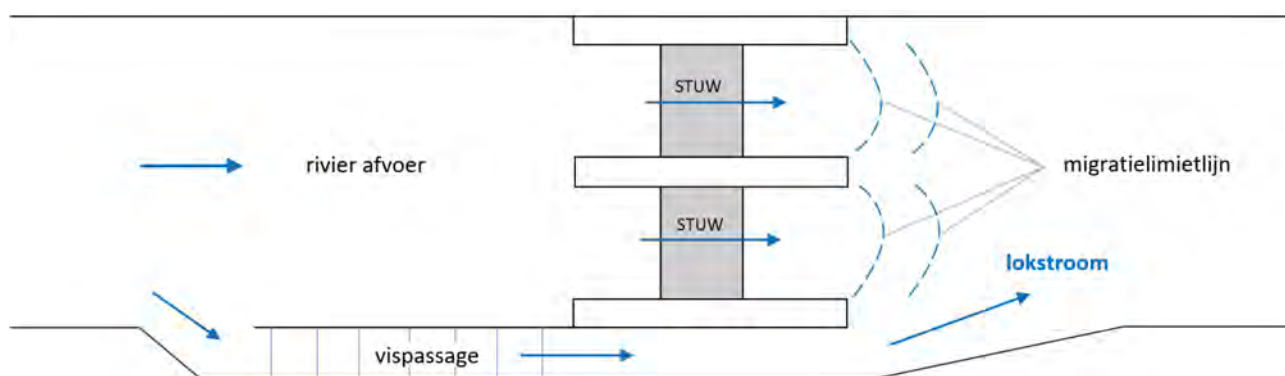
De attractiviteit van de vispassage wordt gedefinieerd als de mate waarin vissen de passage kunnen vinden tijdens hun stroomopwaartse migratiebeweging. Hierbij speelt naast het lokstroomdebiet ook de locatie en oriëntatie van de monding en lokstroom ten opzichte van de zogenaamde migratieliniëten een belangrijke rol.

² Zie ook <https://www.usgs.gov/staff-profiles/alexander-haro>.

Migratielimietlijn

De migratielimietlijn (Figuur 11) 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.

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.



Figuur 11 – Relatie migratielimietlijn en monding vispassage

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 afwaarts van deze zone gekozen. De boven- en ondergrenzen van deze zone zijn verbonden met het debietcriterium voor optimale werking zoals beschreven in paragraaf 2.2.3, 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.

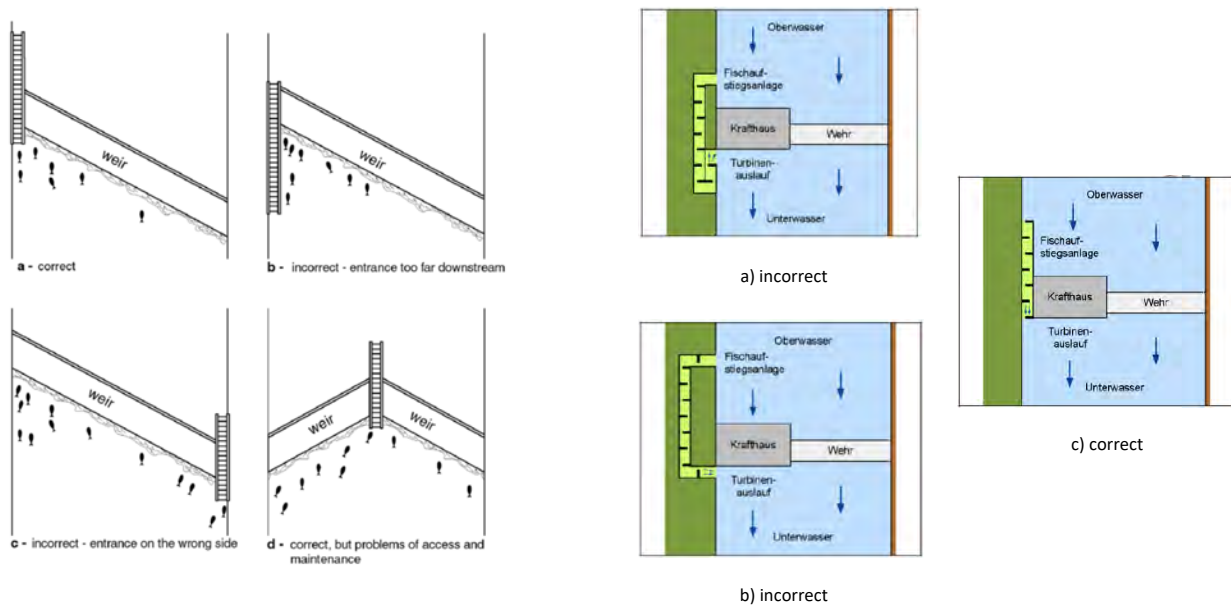
Locatie en oriëntatie

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

- Migrerende vissen zijn *niet geneigd om af te wijken van de hoofdstroomrichting*. Het heeft daarom duidelijk de voorkeur om de uitstroom van de vispassagemonding zo parallel mogelijk aan de hoofdstroom te realiseren (DWA, 2014; Larinier, 2002a). Voor de toepassing van een uitstroomhoek geeft DWA (2014) een richtlijn voor een maximale hoek ten opzichte van de hoofdloop van 30° tot maximaal 45°;
- Vissen *zoeken meestal naar het meest opwaartse ontsnappingspunt*. De monding ligt dus best zo dicht mogelijk aan het migratieknelpunt. Wanneer dit te ver stroomafwaarts gelegen is, kan het zijn dat vissen dit missen en onder het knelpunt blijven zoeken;

- Veel vissoorten migreren langs de bodem. De bodem van de vispassagemonding wordt daarom best minimaal gelijk met het afwaartse bodempeil geplaatst en opstaande verticale randen over de gehele breedte moeten worden voorkomen. In geval van benodigde overgang in bodempeilen wordt als richtlijn een maximale bodemhelling van circa 1:5 tot 1:10 voorgesteld;
- Aangezien de stroomsnelheid in het midden van de stroom meestal hoger is dan aan de oevers, heeft de migratielimietlijn meestal een zekere bolling. Vissen kunnen hierdoor de stuw vaak dichter naderen aan de oevers en zullen zich daar dan ook verzamelen;
- Turbulentie (zoals bij overstort stuwen) kan aan de ene kant zorgen voor een aantrekkende werking (als zijnde de hoofdstroom), maar kan ook zorgen voor niet passeerbare stromingscondities en/of verwarrende recirculatieneren wanneer de monding zich te dicht in de turbulente zone bevindt.

Figuur 12 toont voorbeelden van correcte en incorrecte inpassing van vispassagemondingen in toonaangevende internationale publicaties.



(Larinier, 2002a)

(DWA, 2014)

Figuur 12 – Correcte en incorrecte inpassing vispassagemonding in toonaangevende internationale publicaties

Naast de bovengenoemde uitgangspunten voor optimale locatie en oriëntatie dient de monding logischerwijze ook optimaal passeerbaar te blijven, met andere woorden er dient op deze locaties ook te worden voldaan aan de ontwerpcriteria uit Tabel 4. Echter, waar in de vispassage zelf wordt gestreefd naar zo laag mogelijke (maar toch voelbare) stroomsnelheden, is het voor de attractiviteit van de monding wel wenselijk om lokaal (bij de uitstroom) de stroomsnelheden iets te verhogen (door bijv. een 'knijp' in hoofdstroomrichting toe te passen). Merk wel op dat stroomsnelheden daarbij natuurlijk niet hoger mogen worden dan de sprintsnelheden van de doelsoorten (circa 1 tot max 1,5 m/s).

Lokstroomdebiet

Naast de locatie en oriëntatie van de monding speelt ook het lokstroomdebiet een belangrijke rol voor een goede attractiviteit. Vanuit het oogpunt van een optimale attractiviteit wordt idealiter een zo groot mogelijk deel van de afvoer via de vispassage geleid zonder dat stroomsnelheden natuurlijk hoger worden dan de toelaatbare snelheden voor de doelsoorten.

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

Het Nederlandse/Vlaamse handboek vismigratie (ANIMAL, 2005) geeft aan dat er in principe geen algemeen criterium kan worden gesteld voor het benodigde/meest optimale lokstroomdebiet, maar dat dit geval per geval moet worden bekeken. Hierbij speelt, zoals gezegd, de grootte van de waterloop een belangrijke rol. Bij grotere rivieren wordt vaak een ontwerpdebiet voorgesteld dat minimaal 10 – 15% is van de waterafvoer betreft, en/of 0,5 tot 1,5% van de hoogste waterafvoer. Coenen *et al.* (2013) stelt voor om voor het lokstroomdebiet uit te gaan van 5 tot 10% van de totale afvoer.

In principe richt het vraagstuk van het benodigde lokstroomdebiet zich bij waterlopen met een relatief hogere afvoer niet op een kwantitatief percentage, maar veel eerder op het creëren van een lokstroom die voldoende sterk is om te kunnen concurreren met de hoofdstroom van de meest nabijgelegen stuw. Hierbij speelt niet alleen de grootte van de afvoer op de hoofdloop een belangrijke rol maar ook de locatie, vormgeving en oriëntatie van de monding ten opzichte van het knelpunt en de hoofdstroom.

In het geval van de vispassage te Merelbeke zal de monding geplaatst worden in de huidige zijwand van de stuwgeul. De hoek zal bepaald worden door de ruimtelijke en bouwkundige randvoorwaarden, waarbij gezocht wordt naar een zo flauw mogelijke hoek (zie ook vorige paragraaf). De locatie in lengterichting zal afhangen van de bouwkundige randvoorwaarden (kunnen droogzetten stuwen) en van de ligging van de migratielinielij onder maatgevende omstandigheden. De maatgevende omstandigheden worden bepaald door de periode van optimale werking, waarbij dus ook voor de lokstroom geldt dat deze voldoende sterk (voelbaar) moet zijn bij afvoeren op de rivier lager dan de $Q_{10\%}$ waarde (de $Q_{90\%}$ is eerder van belang voor de keuze van het vispassagedebiet). Voor de grootte van het $Q_{10\%}$ - en $Q_{90\%}$ -debiet wordt verwezen naar paragraaf 2.3.3.

Tenslotte wordt opgemerkt dat het criterium voor een zo hoog mogelijk openingspercentage (dus een zo laag mogelijk vispassagedebiet) in strijd lijkt met het criterium voor een zo groot mogelijk lokstroomdebiet. Deze ogenschijnlijke tegenstrijdigheid wordt in het kader van de vispassage te Merelbeke echter opgelost door de toepassing van een toegevoegd debiet. Hierbij wordt het lokstroomdebiet verdeeld in een basisdebiet door de vispassage (dat afhankelijk is van de dimensionering van de vispassage) en in een regelbaar toegevoegd debiet dat meestal net afwaarts van het laatste bekken wordt ingelaten (zie verder in hoofdstuk 6).

Samenvatting criteria attractiviteit

Met oog op het ontwerp van de monding gelden de volgende criteria:

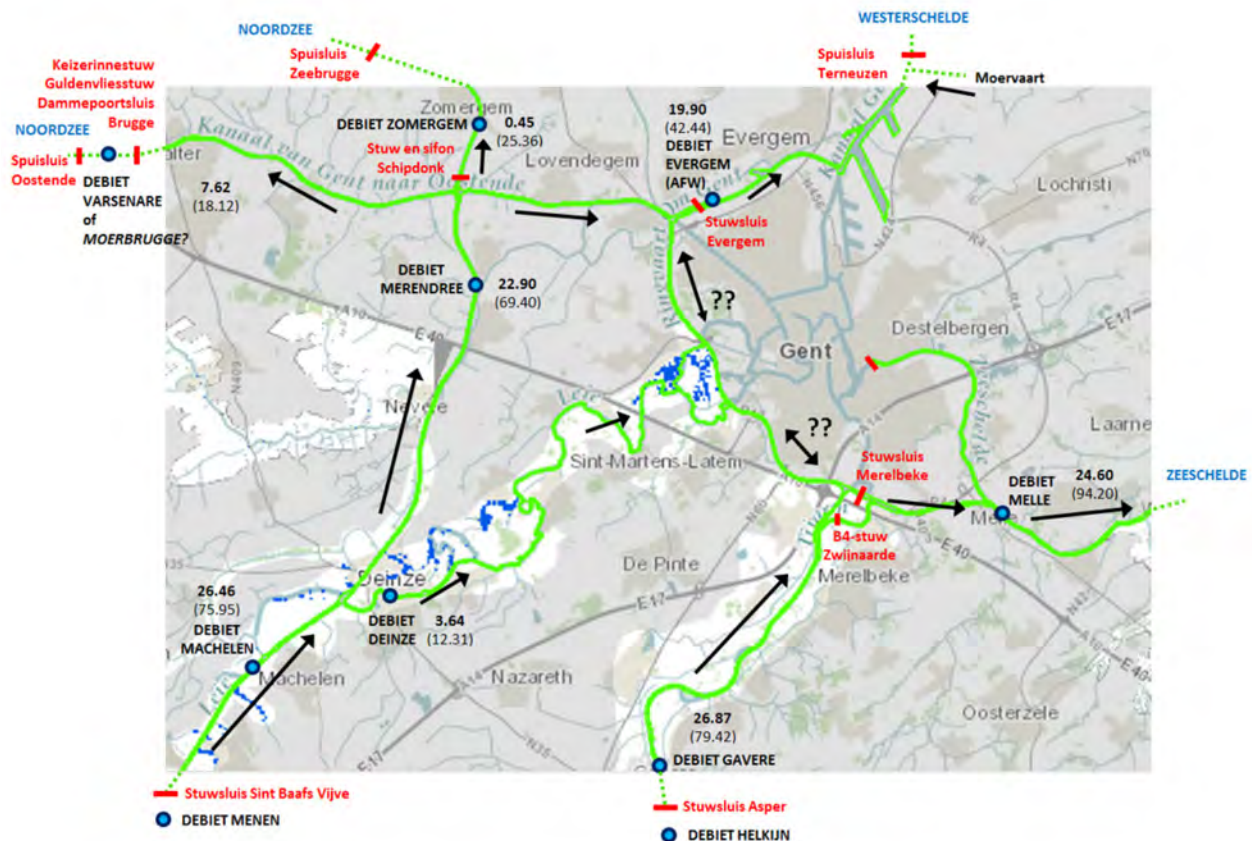
- De monding dient zo dicht mogelijk aan het migratieknelpunt (migratielinietlijn/-zone) te worden ingepast;
- De oriëntatie van de uitstroom dient zo parallel mogelijk aan de hoofdstroom te zijn. Geen hoeken groter dan 30-45°;
- De bodemhoogte van de vispassagemonding is gelijk aan de lokale bodemhoogte van het afwaartse pand. Opwaarts in de vispassage kan deze geleidelijk oplopen tot bijv. het niveau van het meest afwaarts bekken (richtlijn maximaal bodemverhang circa 1:10 tot max 1:5);
- Net als in de vispassage zelf mogen er in de bodem van de monding geen verticale opstaande randen over de gehele breedte van doorstroomsectie aanwezig zijn (vooral in opwaartse migratie richting);
- Binnen de minimale werkingsperiode (tussen $Q_{10\%}$ - $Q_{90\%}$ op de rivier) wordt gestreefd naar een zo groot mogelijk lokstroomdebiet in verhouding tot de hoofdafvoer over de stuwen. Als ondergrens wordt de richtlijn van minimaal 10% van de afvoer over de nabij gelegen stuw toegepast;
- Het minimaal benodigde lokstroomdebiet wordt daarbij bepaald door het debiet benodigd voor een voldoende sterke lokstroom bij het bovengrensscenario van $Q_{10\%}$. Een voldoende sterke lokstroom bestaat uit een duidelijk 'voelbare' en niet verstoorde stroom vanuit de monding naar afwaartse stroomrichting tot voorbij de turbulente zone van de stuwen;
- De monding mag (binnen de minimale werkingsperiode) niet worden 'afgeschermd' door te hoge turbulentie of recirculatieneren ten gevolge van de watersprong afwaarts van de stuwen;
- Het ontwerp van de monding dient binnen de minimale werkingsperiode te voldoen aan de criteria voor passeerbaarheid uit Tabel 4.

2.3 Hydraulische randvoorwaarden

2.3.1 Waterbeheer Groot Pand

Zoals aangegeven in paragraaf 2.2.1 vormt locatie Merelbeke de belangrijkste toegang voor stroomopwaarts migrerende vissoorten naar de Bovenschelde en Leie vanuit de Zeeschelde. Zowel de Bovenschelde als de Leie zijn gestuwde rivieren die beide uitmonden in het Groot Pand rond Gent, waarbij Merelbeke als het ware het meest afwaartse stuwsluiscomplex is. Hierna heeft de Zeeschelde via de Westerschelde een open verbinding met de Noordzee.

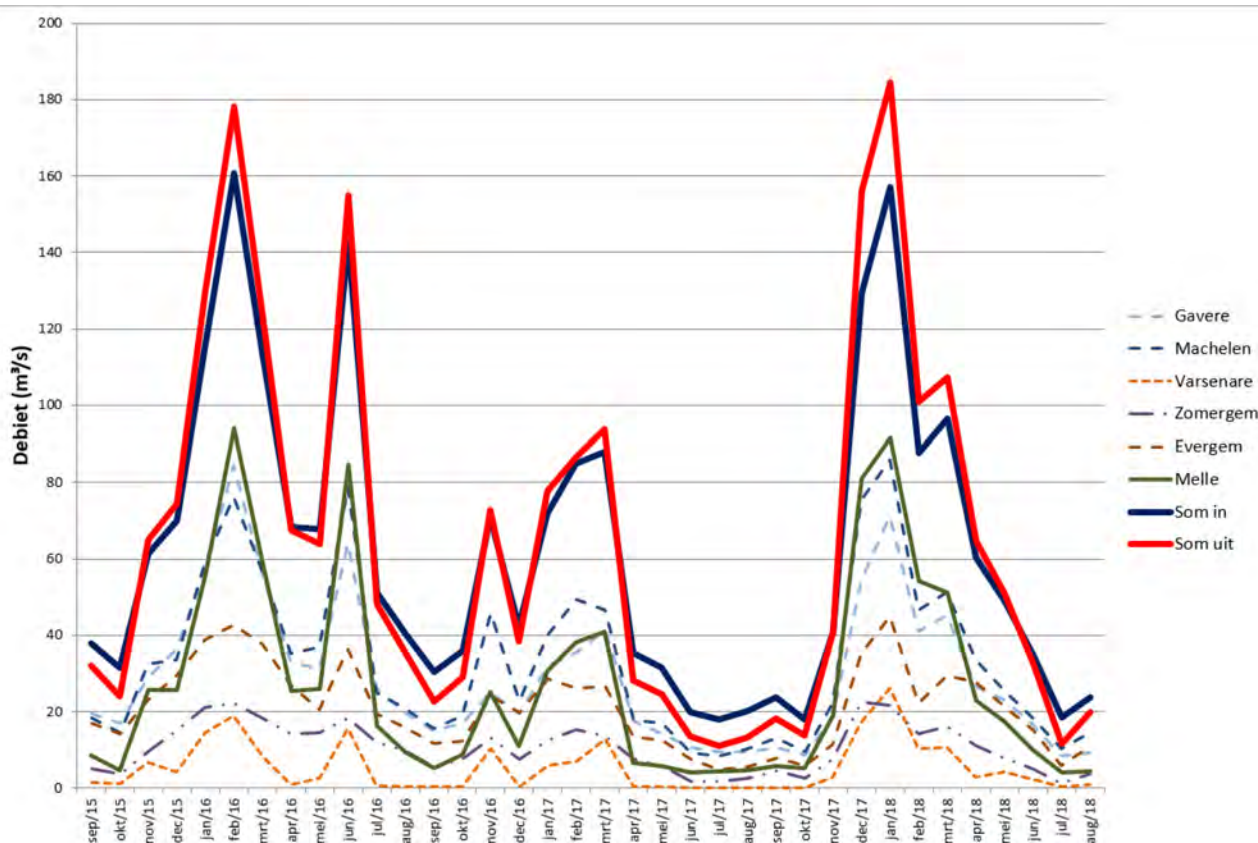
Figuur 13 toont het Groot Pand met de verschillende takken die daaraan verbonden zijn. Het Groot Pand vormt een uitgestrekt pand met min of meer het zelfde streefpeil. In principe zorgen de Bovenschelde en Leie voor de aanvoer van water naar het Groot Pand, die vervolgens verdeeld wordt over de afvoertakken Zeeschelde, Kanaal Gent-Terneuzen, Kanaal Gent-Oostende en het Afleidingskanaal van de Leie. De afvoerregeling over deze verschillende takken kan een grote invloed hebben op de werking van de nieuwe vispassage te Merelbeke aangezien de grootte van het debiet dat wordt afgeleid naar de Zeeschelde van groot belang is op de openingspercentages van de vispassage en de effectiviteit van de lokstroom naar deze prioriteit 1 waterlopen, zeker in drogere periodes.



Blauwe bollen: huidige meetposten voor debietmetingen; Rode lijnen: stuwen/ migratieknelpunten.
Vetgedrukte waarden: $Q_{50\%}$ op basis van metingen in periode 2007-2017; Waarden tussen haakjes: $Q_{10\%}$ van dezelfde periode.

Figuur 13 – Indicatie afvoerdeling in en rond het Groot Pand te Gent

In 2018 werd, mede naar aanleiding van twee opeenvolgende zeer droge zomers, een analyse gedaan van de grootte van de afvoer naar de Zeeschelde in de periode 2012 tot en met augustus 2018 (Boeckx, 2018) met het oog op de minimaal benodigde afvoer voor het behoud van de ecologie in het Zeeschelde-estuarium (de zgn. minimaal benodigde E-flows). Figuur 14 toont de maandgemiddelde debieten van een aantal debietmeetposten rond Gent voor de periode september 2015 t.e.m. augustus 2018. De debieten van Machelen en Gavere vormen samen het toestromende debiet van Leie en Bovenschelde richting Gent. De debieten van Zomergem, Varsenare, Evergem en Melle zijn samen min of meer de uitgaande debieten richting respectievelijk Afleidingskanaal, Kanaal Gent-Oostende, Kanaal Gent-Terneuzen en de Zeeschelde.



Bron: Boeckx, 2018

Figuur 14 – Maandgemiddelde debieten voor meetposten rond Gent

Uit Figuur 14 blijkt ten eerste dat het ingaand en uitgaand debiet min of meer gelijk zijn, wat ook te verwachten is. De afwijkingen werden als volgt verklaard:

- In de natte maanden is het uitgaande debiet hoger dan het ingaande gemeten in Machelen en Gavere. Dit is te wijten aan extra aanvoer tussen Machelen en Gavere en de metingen aan de uitgaande posten;
- In de droge maanden is de gemeten uitgaande afvoer lager dan de gemeten inkomende afvoer. Mogelijke verklaringen zijn: captaties tussen meetposten inkomende debiet en uitgaande debiet, verdamping en insijpeling naar de ondergrond.

Voor de afvoer vanuit het Groot Pand naar de Zeeschelde is de meetpost Melle van belang. Deze meetpost bevindt zich echter in het tijgebonden gebied waardoor de werkelijke afvoer enkel afgeleid kan worden uit een meerdaags gemiddelde. In paragraaf 2.3.2 worden de metingen van het debiet te Melle verder besproken. Uit de analyse van Boeckx (2018) bleek dat er bij droogte relatief lange perioden kunnen voordoen met relatief lage afvoeren naar de Zeeschelde ($Q < 3 \text{ m}^3/\text{s}$). Naast minimale debieten voor Eflows is het ook voor de optimale werking van de vispassage van belang dat er in drogere perioden voldoende debiet naar de Zeeschelde kan worden afgeleid. Een goede afstemming op de andere uitlaatpunten in het Groot Pand wordt dus geadviseerd.

De Werkinstructie Waterbeheer Groot Pand (versie D04 uit 2016) stelt dat in de huidige situatie het Groot Pand onder normale omstandigheden de volgende systematische afvoerregeling kent:

- Schutverliezen van de Dammepoortsluis in Brugge, van de sluiscomplexen van Evergem en Merelbeke. In mindere mate van het sluisje in Schipdonk en de Tolhuissluis, Sint-Jorissluis en Brusselsepoortsluis in Gent;
- Een afgesproken debiet van minimaal $13 \text{ m}^3/\text{s}$ (gemiddeld over twee maanden) via de stuw van Evergem, zoals geregeld in een protocol tussen België en Nederland;
- Een basisdebiet om doorstroming te hebben van het water in de Gentse binnenstad over de Tolhuisstuw en de Sint-Jorisstuw;
- De rest van het water wordt afgevoerd via de Keizerinnestuw in Brugge en de stuw van Merelbeke. Deze stuwen werken automatisch peilgestuurd en zorgen dat het Groot Pand haar normaalpeil nastreeft;
- Het normaalpeil van het Groot Pand bedraagt onder normale omstandigheden 5,70 mTAW, maar kan in anticipatie op een verwachte was worden verlaagd tot circa 5,60 m TAW. In de praktijk wordt tot 5,70 m TAW nagestreefd om een zekere reserve te behouden bij waterschaarste en om de diepgang ter hoogte van de afwaartse sluisdorpel in Asper te vrijwaren.

Tenslotte wordt opgemerkt dat de mogelijke stroomrichtingen en debietgrootte onder dagelijkse werking en zeer lage afvoer in het Groot Pand tussen Merelbeke en Evergem nog niet gekend zijn (zie zwarte peilen met vraagtekens in Figuur 13) aangezien op deze locaties nog geen debietmetingen werden gedaan. Voor de attractiviteit van de Leie met het oog op opwaarts migrerende vissen, en ook het waterbeheer in het Groot Pand, zou dit nuttige informatie kunnen geven. Intussen zijn er terreinverkenningen uitgevoerd om in de nabije toekomst een debietmeetpunt te voorzien tussen de mondingen van Bovenschelde en Toeristische Leie.

2.3.2 Relevante meetposten

Het opwaartse waterpeil te Merelbeke is een onderdeel van het Groot Pand rond Gent en heeft een streefpeil van 5,70 mTAW. Het afwaartse waterpeil bevindt zich in het tijgebonden deel van de Schelde en kent dus een sterk variërend waterpeil.

Figuur 15 toont de huidige meetposten (groene bollen) waarvoor historische meetreeksen beschikbaar zijn en die van belang zijn voor de stuwen en de nieuwe vispassage te Merelbeke. Ter hoogte van het stuwsluiscomplex zelf zijn er twee EMT-meetposten waarvoor meetreeksen beschikbaar zijn in ABBA en via Waterinfo.be: namelijk één voor het opwaartse waterpeil en één voor afwaartse waterpeil. Deze metingen worden niet gevalideerd, maar wel gefilterd op spikes (lees: niet realistische waarden). De locatie van de EMT-meter voor het opwaarts waterpeil bevindt zich tussen sluis 1 en sluis 2. Daarnaast bevinden er zich ook twee EMT-meters net opwaarts van de stuwen (zie de kleine witte kastjes op elk van de oevers net opwaarts van de stuwen in de luchtfoto uit Figuur 5). Deze twee meters worden hoogst waarschijnlijk gebruikt voor de aansturing van de stuwen. Meetreeksen van deze meters zijn echter niet beschikbaar, daarom wordt in deze memo de reeks van de meetpost tussen de twee sluizen (uit ABBA) gebruikt voor de analyse van het opwaartse waterpeil.

Aangezien de EMT-meetposten niet worden gevalideerd, worden ook de opwaartse meetpost ter hoogte van de E3-sluis in het Groot Pand en de afwaartse meetpost in de Zeeschelde te Melle meegenomen. Dit betreffen meetposten van het HIC, die wel gevalideerd worden. In Melle wordt naast de waterstand ook het debiet opgemeten. Deze post maakt deel uit van de meerjarige tij-analyse van de Zeeschelde.



Bron: www.waterinfo.be

Figuur 15 – Relevante meetposten voor stuwsluisc omplex Merelbeke

2.3.3 Debieten

Volgens de voorwaarde voor de minimale periode van optimale werking geldt dat de vispassage moet kunnen werken bij een afvoer op de rivier die tussen 10% en 90% van de tijd wordt overschreden (zie paragraaf 2.2.3), maar logischerwijze wordt gestreefd naar een 100% werking. De $Q_{90\%}$ -waarde is daarbij gekoppeld aan het maximale vispassagedebiet en de $Q_{10\%}$ -waarde is gekoppeld aan het minimaal benodigde lokstroomdebiet. Daarnaast geeft de $Q_{50\%}$ -waarde (mediaan) een indicatie voor het meest voorkomende debiet. Tabel 8 aan het einde van deze paragraaf geeft een opsomming van alle maatgevende waarden.

Maatgevende afvoeren

Aangezien er geen debietmetingen ter plaatse van de stuwen te Merelbeke beschikbaar zijn, wordt voor het rivierdebiet uitgegaan van het gemeten debiet te Melle (zie Figuur 15). Zoals eerder vermeld bevindt deze meetpost zich in de Boven-Zeeschelde die tijgebonden is. Daarom wordt voor de analyse van de voorkomende debieten gebruik gemaakt van het rollend gemiddelde over 7 dagen. Tabel 5 geeft het histogram op basis van dit rollende zevendaags gemiddelde debiet dat steeds bepaald werd op basis van de 5-minuutgemiddelde metingen.

Uit dit histogram worden met oog op de werkingsperiode de volgende maatgevende afvoeren afgeleid:

- $Q_{10\%} \approx 90 \text{ m}^3/\text{s}$;
- $Q_{50\%} \approx 25 \text{ m}^3/\text{s}$;
- $Q_{90\%} \approx 6 \text{ m}^3/\text{s}$.

Merk op dat bovengenoemde maatgevende afvoeren afgeronde waarden zijn van de resultaten uit Tabel 5, aangezien deze mate van precisie niet nodig is voor de verdere hydraulische analyse. Bij de percentielen wordt tevens opgemerkt dat dit percentielen op jaarbasis betreffen en gebaseerd zijn op de volledige beschikbare periode. Deze vormen een goed uitgangspunt voor de verdere hydraulische analyse van het benodigde lokstroomdebiet, maar voor de bepaling van het maximaal toelaatbare vispassagedebiet moet echter ook gekeken worden naar de verschillen gedurende het jaar (zie verder hieronder).

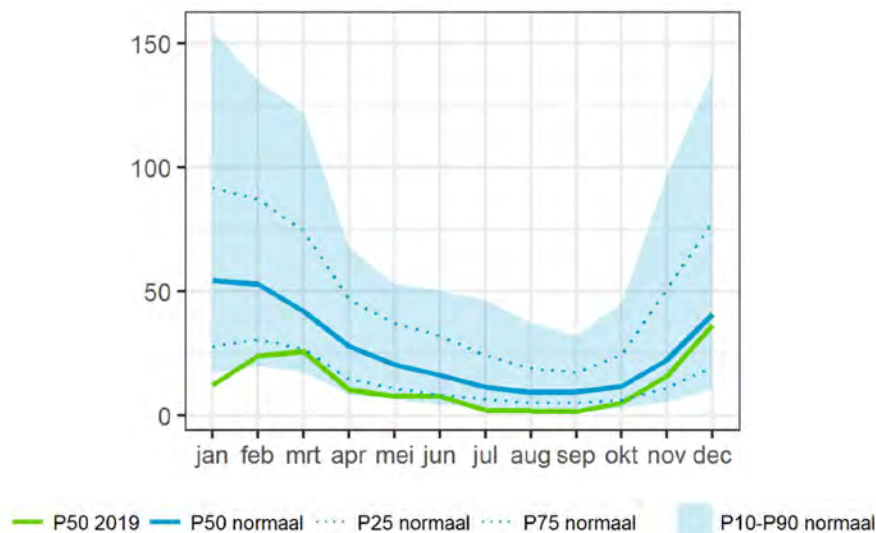
Tabel 5 – Histogram zevendaags-gemiddelde debiet te Melle o.b.v. meetreeks met 5-minuutwaarden voor periode 1996 t.e.m. 2018

Percentage	zevendaags gemiddelde debiet Melle (m ³ /s)
0,1%	264,72
1%	175,97
5%	114,08
10%	86,55
20%	58,46
30%	43,89
40%	32,79
50%	24,87
60%	18,82
70%	14,16
80%	9,88
90%	6,24
95%	4,42
99%	2,25
99,9%	0,73

Vispassagedebiet

Het maximaal toelaatbare vispassagedebiet is verbonden aan de $Q_{90\%}$ -waarde (ondergrens periode van optimale werking) vanwege het risico op automatische sluiting vanwege peilbeheer. Zoals hierboven al vermeldt is de $Q_{90\%}$ -waarde van 6 m³/s, zoals bepaald op basis van de histogram in Tabel 5, echter een percentielwaarde die geldt voor een volledig jaar en voor de volledig gemeten periode. In drogere jaren kunnen deze waarden (langdurig) lager liggen of in nattere jaren juist hoger. Ook verschillen deze waarden door het jaar heen en zijn vooral de zomermaanden (meestal september) bepalend voor de laagste waarden van de $Q_{90\%}$.

Figuur 16 toont de ontwikkeling van de maatgevende percentielen voor maandgemiddelden door het jaar heen op basis van de volledig beschikbare reeks. De boven- en ondergrenzen van de lichtblauwe band vormen daarbij de $Q_{10\%}$ en $Q_{90\%}$ waarden en met een dikke blauwe lijn zijn de $Q_{50\%}$ waarden aangeduid (op basis van de volledig beschikbare meetperiode 1996 t.e.m. 2018). Aangezien deze grafiek werd opgemaakt voor de analyse van het jaar 2019 zijn tevens met groen de $Q_{50\%}$ waarden voor dat jaar aangegeven (om te kunnen vergelijken met de percentielen op basis van de meerjarenreeks).



Bron: Vandenbruwaene et al., 2020

Figuur 16 – Debietpercentielen per maand te Melle met vergelijking P50-waarde droog jaar 2019

Uit Figuur 16 blijkt dat 2019 een uitzonderlijk droog jaar is geweest. Dit geldt ook voor de voorgaande twee jaren 2017 en 2018. Hoewel dit al drie jaar op rij het geval is, kan echter nog niet worden gesproken van een trendwijziging, maar blijkt wel dat hier zeker rekening mee moet worden gehouden bij het bepalen van het vispassagedebiet om te zorgen dat de vispassage niet te vaak zal moeten sluiten. Tabel 6 toont daarom de lagere percentielwaarden per maand voor de gehele beschikbare periode van het gemeten debiet te Melle (periode 1996 t.e.m. 2019). Hieruit blijkt dat de maand september meestal de droogste maand is en de $Q_{90\%}$ -waarde daarbij kan dalen tot $3,3 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tabel 6 – Debietpercentielen per maand o.b.v. zevendaags gemiddelde van de metingen te Melle uit periode 1996 t.e.m. 2019

	P1	P2	P5	P10	P15
Maand	Q99%	Q98%	Q95%	Q90%	Q85%
1	8,91	10,73	14,55	17,58	20,15
2	8,88	12,81	17,88	21,44	24,21
3	12,97	14,93	16,91	19,94	23,94
4	5,54	6,92	8,64	10,16	12,22
5	3,54	4,6	6,29	7,77	9,98
6	2,63	3,08	4,49	5,91	7,29
7	0,96	1,54	2,55	3,85	4,87
8	0,16	1,1	2,12	3,39	4,32
9	-0,3	0,06	1,7	3,33	4,27
10	1,6	2,43	3,26	4,5	5,59
11	2,65	3	4,71	7	9,01
12	6,38	7,23	9,86	13	15,73

Aangezien het netto zoetwaterdebiet in de Zeeschelde een cruciale rol speelt bij het functioneren van het ecosysteem van het Schelde-estuarium heeft de UA in 2018 een korte verkennende studie uitgevoerd naar minimaal benodigde debieten vanuit ecologisch oogpunt. Zeer bepalend is daarbij de invloed van debiet op zwevende stof (*Suspended Particulate Matter* - SPM) en de verzilting. Uit deze studie volgde dat een zevendaags gemiddelde afvoer van 2 m³/s het absolute minimum is vanuit dit oogpunt. Tijdens de periode van algenbloei (mei-oktober) is het echter aangewezen steeds te streven maandgemiddelde minima volgens Tabel 7 of meer (Maris *et al.*, 2018).

januari	35	m ³ /s
februari	35	m ³ /s
maart	35	m ³ /s
april	19	m ³ /s
mei	17	m ³ /s
juni	16	m ³ /s
juli	14	m ³ /s
augustus	12	m ³ /s
september	8	m ³ /s
oktober	12	m ³ /s
november	25	m ³ /s
december	35	m ³ /s

Bron: Maris *et al.*, 2018

Tabel 7 – Minimaal maandgemiddeld debiet voor behoud ecologie Zeeschelde

Met het oog op de 'Uitwerking van een reactief afwegingskader voor prioritair watergebruik tijdens waterschaarste' (waaronder o.a. watercaptatie uit de rivieren) stelt INBO voor om, mede op basis van Maris *et al.* (2018), een drempelwaarde van minimum 4 m³/s als het zevendaags gemiddelde voor de Zeeschelde toe te passen. De verhoging van de drempelwaarde van 2 naar 4 m³/s is mee gebaseerd op het voorzorgsprincipe. De duur van de droogte tijdens het laagwaterseizoen en de buffercapaciteit die nodig is zodat geen ecologische schade optreedt, kan namelijk niet voorspeld worden (Buysse *et al.*, 2021).

Bij het bovenstaande moet ook rekening worden gehouden met het feit dat het gemeten debiet te Melle in de huidige situatie niet alleen bestaat uit het debiet over de stuwen te Merelbeke maar dat hierin ook de volgende afvoeren in opgenomen zijn (zie ook Figuur 3):

- Schutverliezen sluizen Merelbeke;
- Tijarm van de B4-stuw te Zwijnaarde;
- Tijarm Heusden-Gentbrugge.

De afvoer van de Tijarm Heusden-Gentbrugge is te verwaarlozen, maar de schutverliezen sluizen Merelbeke en de afvoer van de Tijarm van de B4-stuw niet. Voor de vindbaarheid van de vispassage naast de stuwen te Merelbeke is het daarom van groot belang dat er onder dagelijkse omstandigheden geen water via de Tijarm te Zwijnaarde wordt gestuurd, en zeker niet tijdens de optimale werkingsperiode. Wanneer deze namelijk wordt ingezet, kan dat er toe leiden dat vissen de Tijarm opzwemmen en de vispassage dus niet vinden, waarna ze vast komen te zitten onder de B4-stuw aan opwaartse zijde van de Tijarm. Momenteel wordt de B4 stuw ingezet bij gemeten debieten op de Bovenschelde te Bossuit van meer dan 80 m³/s (Werkinstructie waterbeheersing Groot Pand, versie D04 uit 2016). Aangezien de B4-stuw pas wordt ingezet bij sterk verhoogde afvoeren heeft deze dus geen invloed op de bepaling van het maximaal toelaatbare vispassagedebiet.

Voor deze bepaling dient dan nog wel rekening te worden gehouden met de schutverliezen in vooral de drogere perioden. Michielsens *et al.* (2012) geeft een overzicht van berekende debieten op basis van de trafiekgegevens voor de periode 2005-2009. In deze periode lagen de schutverliezen tussen circa 0,6 tot 0,85 m³/s. Meer recente gegevens zijn op dit moment niet beschikbaar.

Rekening houdend met een Q90%-waarden van 3,3 m³/s in de zomermaanden en schutverliezen tot 0,85 m³/s wordt het *vispassagedebiet dus best niet hoger dan 2,5 m³/s* gekozen. Hoe lager het debiet onder deze waarde wordt gekozen, hoe kleiner het percentage van de tijd dat de vispassage zal moeten sluiten vanwege te lage afvoer op de rivier.

Merk op dat hierin ook het water- en peilbeheer en de buffercapaciteit in het Groot Pand een belangrijke rol spelen. Idealiter wordt er onderzocht of er in drogere perioden mogelijk meer water naar de Zeeschelde kan worden gestuurd dan momenteel het geval is (zie paragraaf 2.3.1). Het INBO stelt in haar 'Advies over de ecologische kwetsbaarheid van bevaarbare waterlopen bij droogte' drempelwaarden voor debiet of waterdiepte voor per waterlooptype en ecologische kwetsbaarheid. De drempelwaarden laten toe om specifiek per bevaarbare waterloop na te gaan of droogteniveau 1 (dreigende waterschaarste of toestand 1) of droogteniveau 2 (effectieve waterschaarste of toestand 2) zich voordoet. De ecologische relevantie van de droogteniveau 2-drempel werd daarbij telkens getoetst aan het minimum debiet dat nodig is voor het operationeel houden van de vispassages op de waterlopen (Buysse *et al.* 2021).

Voor de uiteindelijke keuze van het ontwerpdebiet van de vispassage wordt verwezen naar paragraaf 3.3.

Lokstroomdebiet

Het minimaal benodigde lokstroomdebiet wordt vooral bepaald door het minimaal benodigde debiet in het bovengrensscenario voor optimale werking (Q_{10%}) dat nog een voldoende sterke lokstroom kan realiseren. Dit is echter mee afhankelijk van de locatie en oriëntatie van de monding ten opzichte van de turbulente zone van de stuwoverstort (zie criteria in paragraaf 2.2.5). Idealiter wordt hiervoor een modelstudie uitgevoerd door middel van CFD-modellen. Als vertrekpunt voor een dergelijke studie kan de in paragraaf 2.2.5 gestelde richtlijn van 10% van de Q_{10%} over nabijgelegen stuw worden toegepast. Uitgaande van de totale Q_{10%} van 90 m³/s verdeeld over twee stuwen geeft deze richtlijn daarmee een *minimaal benodigd lokstroomdebiet* in het bovengrens scenario van $45/10 = 4,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

Merk tenslotte op dat de richtlijnen van een zo laag mogelijk vispassagedebiet en een zo hoog mogelijk lokstroomdebiet in tegenspraak lijken te zijn met elkaar. Deze ogenschijnlijke tegenspraak wordt echter opgelost door de toepassing van 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, zie verder in hoofdstuk 6.

Samenvatting maatgevende debieten

Tabel 8 geeft op basis van het bovenstaande de maatgevende debieten die zullen worden toegepast bij de verdere hydraulische studie van de vispassage.

Tabel 8 – Maatgevende debieten te Merelbeke

Omschrijving	parameter	waarde
Debiet bovengrens minimale periode optimale werking op jaarbasis	$Q_{10\%}$	90 m ³ /s
Mediaan debiet op jaarbasis	$Q_{50\%}$	25 m ³ /s
Debiet ondergrens minimale periode optimale werking op jaarbasis	$Q_{90\%}$	6 m ³ /s
Maximaal toelaatbaar vispassage debiet met oog op ondergrens minimale werkingsperiode	$Q_{vis-max}$	2,5 m ³ /s
Minimaal benodigd lokstroomdebiet vanuit oogpunt attractiviteit bij bovengrens minimale werkingsperiode.	$Q_{lok-min}$	4,5 m ³ /s

2.3.4 Waterstanden

Tabel 9 toont het histogram van de gemeten waterstanden voor zowel op- als afwaarts waterpeil te Merelbeke (EMT-meetposten), aangevuld met de meetpost 'Merelbeke 700m opwaarts' en de afwaartse meetpost te Melle (HIC-meetposten). Voor de locatie van deze meetposten wordt verwezen naar paragraaf 2.3.2.

Tabel 9 – Histogram waterpeilen meetposten

Post:	<i>rvg05a-1066</i>	<i>OW006-OPW-1073</i>	<i>OW006-AFW-1073</i>	<i>zes57a-1066</i>
Periode:	2014-2018	1995-2018	1995-2018	1996-2018
Cum %	Merelbeke 700m opwaarts	Opwaarts waterpeil Merelbeke	Afwaarts waterpeil Merelbeke	Waterpeil Melle
0,01	6,54	7,10	7,11	6,87
0,1	6,32	6,67	6,66	6,48
1	5,89	5,98	5,97	5,81
5	5,80	5,77	5,40	5,23
10	5,77	5,75	5,04	4,90
20	5,75	5,72	4,63	4,51
30	5,73	5,70	4,29	4,17
40	5,71	5,68	3,95	3,85
50	5,70	5,67	3,63	3,52
60	5,68	5,65	3,32	3,21
70	5,67	5,64	3,02	2,91
80	5,65	5,62	2,70	2,61
90	5,62	5,59	2,35	2,27
95	5,60	5,57	2,12	2,06
99	5,56	5,53	1,83	1,79
99,9	5,50	5,42	1,56	-

Tabel 10 en Tabel 11 geven de maatgevende waarden voor respectievelijk het opwaartse en het afwaartse waterpeil op basis van de historische metingen en het waterbeheer.

Tabel 10 – Maatgevende operationele opwaartse waterpeilen

Alarmpeil HIC/DVW	7,50 mTAW
Waakpeil HIC/DVW	6,80 mTAW
Prewaak HIC/DVW	6,30 mTAW
Sluiten keersluizen ter bescherming stad Gent	6,00 mTAW
Hoog-ABBA-alarm	5,90 mTAW
Huidig streefpeil	5,70 mTAW
Laag-ABBA-alarm	5,50 mTAW

Bron: Werkinstructie waterbeheersing Groot Pand (2016)

Tabel 11 – Maatgevende afwaartse waterpeilen (in mTAW) op basis van metingen te Melle in periode 2010-2015

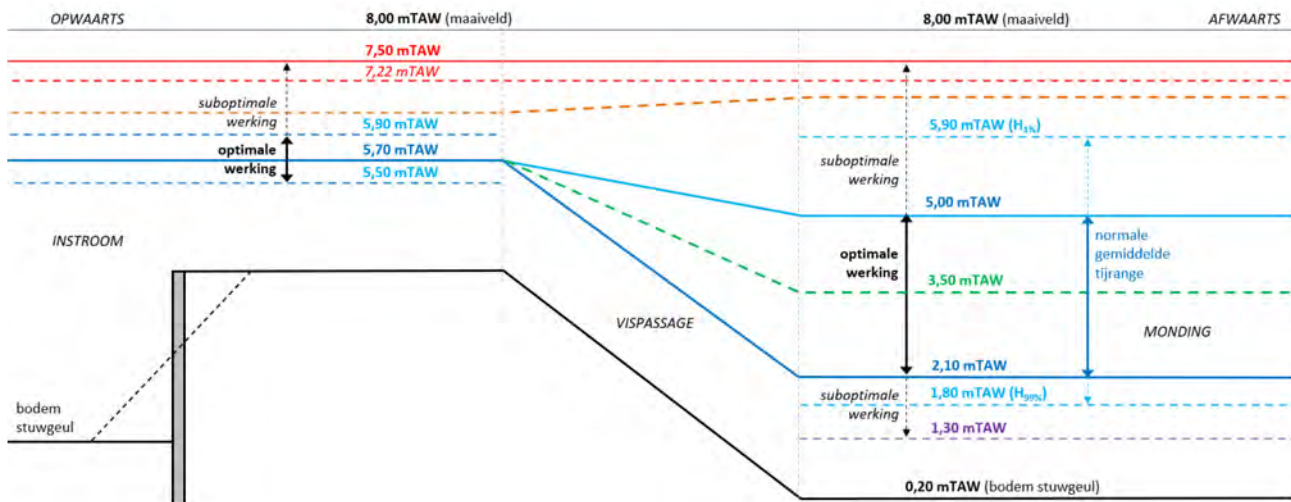
		jaar	zomer	winter	Uiterste waarde	Datum uiterste waarde
Gemiddeld Hoogwater	springtij	5,21	5,09	5,35	6,74	30/01/2013
	gemiddeld tij	5,06	4,95	5,17		
	doodtij	4,83	4,75	4,90		
Gemiddeld Laagwater	springtij	2,44	2,13	2,77	1,34	25/10/2011
	gemiddeld tij	2,39	2,09	2,69		
	doodtij	2,25	1,95	2,56		

Bron: Hertoghs et al., 2018

Op basis van de gegevens uit Tabel 9, Tabel 10 en Tabel 11 worden de maatgevende waterpeilen afgeleid voor het ontwerp van de vispassage. Tabel 12 geeft een opsomming van deze maatgevende waterpeilen en Figuur 17 toont een schematische weergave. Merk op dat voor sommige waarden een afronding en/of gemiddelde is toegepast op basis van de beschikbare gegevens. Tussen haakjes wordt dan steeds verwezen naar de betreffende bron(en).

Tabel 12 – Maatgevende waterpeilen voor ontwerp vispassage

locatie	waarde	omschrijving
opwaarts	7,50 mTAW	Alarmpeil (Tabel 10)
	7,22 mTAW	Hoogst gemeten waterpeil in periode 1995-2018 (31/12/2002 05:00u) (Cornet et al., 2019)
	5,90 mTAW	Maximaal opwaarts waterpeil onder dagelijkse omstandigheden Komt overeen met hoog-ABBA-alarm (Tabel 10) en heeft 1% overschrijdingskans (Tabel 9)
	5,50 mTAW	Minimaal opwaarts waterpeil onder dagelijkse omstandigheden Komt overeen met laag-ABBA-alarm (Tabel 10) en heeft 1% onderschrijdingskans (Tabel 9)
afwaarts	5,90 mTAW	Waterpeil dat minder dan 1% van de tijd wordt overschreden (Tabel 9) (afgeronde waarde)
	5,00 mTAW	Maximaal afwaarts waterpeil onder dagelijkse omstandigheden Komt overeen met gem. hoogwater op jaarbasis bij een gem. tij (Tabel 11) (afgeronde waarde)
	2,10 mTAW	Minimaal afwaarts waterpeil onder dagelijkse omstandigheden Komt overeen met gem. laagwater in de zomer bij gem. tij (Tabel 11) (afgeronde waarde)
	1,80 mTAW	Waterpeil dat minder dan 1% van de tijd wordt onderschreden (Tabel 9) (afgeronde waarde)
	1,30 mTAW	Laagst gemeten afwaartse waterpeil in bemeaten periode 2010-2015 (Tabel 11) (afgeronde waarde)



Figuur 17 – Schematische weergave maatgevende waterpeilen

Met oog op de maatgevende waterpeilen worden twee typen onderscheiden:

- Optimale werking → De boven en ondergrenzen van de op- en afwaartse waterpeilen onder normale omstandigheden waarbij de vispassage optimaal dient te kunnen werken;
- Extreme waarden → Extreme waterpeilen die worden gebruikt voor het bepalen van de maatgevende belastingen onder extreme omstandigheden.

Optimale werking

Voor de boven- en ondergrens waarbij de vispassage optimaal dient te kunnen werken werd gekozen voor de volgende waarden:

- Opwaartse waterpeilen tussen 5,50 mTAW en 5,90 mTAW
- Afwaartse waterpeilen tussen 2,10 mTAW en 5,00 mTAW

De ondergrens van het opwaartse waterpeil wordt gelijk gekozen aan het laag-ABBA-alarm (zie Tabel 10), en houdt zo ook rekeningen met mogelijke aanpassing van het streefpeil bij anticipatie op een verwachte was (zie paragraaf 2.3.1). Uit Tabel 9 kan worden afgeleid dat deze waarde minder dan circa 1% van de tijd wordt overschreden. De bovengrens van het opwaartse waterpeil wordt gelijk gekozen aan het ABBA-hoogwaterpeil en wordt minder dan 1% van de tijd overschreden (zie Tabel 9).

De ondergrens van het afwaartse waterpeil wordt gekozen op basis van het gemiddeld laagwater bij gemiddeld tij in de zomer. Deze waarde wordt best niet te hoog gekozen aangezien deze ook gebruikt zal worden voor het maatgevende verval per slot en het aantal slots. De bovengrens van het afwaartse waterpeil wordt gekozen op basis van het gemiddeld hoogwater bij gemiddeld tij.

Bij deze boven- en ondergrenzen wordt opgemerkt dat de vispassage vanuit hydraulisch en ecologisch oogpunt ook bij opwaartse waterstanden hoger dan 5,90 mTAW en afwaartse waterstanden hoger dan 5,00 mTAW idealiter open blijft zodat, afhankelijk van de vissoorten, ook in dit geval nog een suboptimale passage mogelijk blijft. In principe geldt dit ook voor afwaartse waterpeilen lager dan 2,10 mTAW. Hierbij moet echter gecontroleerd worden of de toename van de stroomsnelheden in de vispassage niet kan leiden tot schade of dat sluiting op basis van andere randvoorwaarden toch vereist is (zie verder onder 'Extreme waarden' hieronder). Voor het opwaartse waterpeil wordt aangenomen dat de vispassage zal moeten sluiten wanneer peilen lager gaan dan 5,50 mTAW met oog op peilbeheer voor o.a. de scheepvaart.

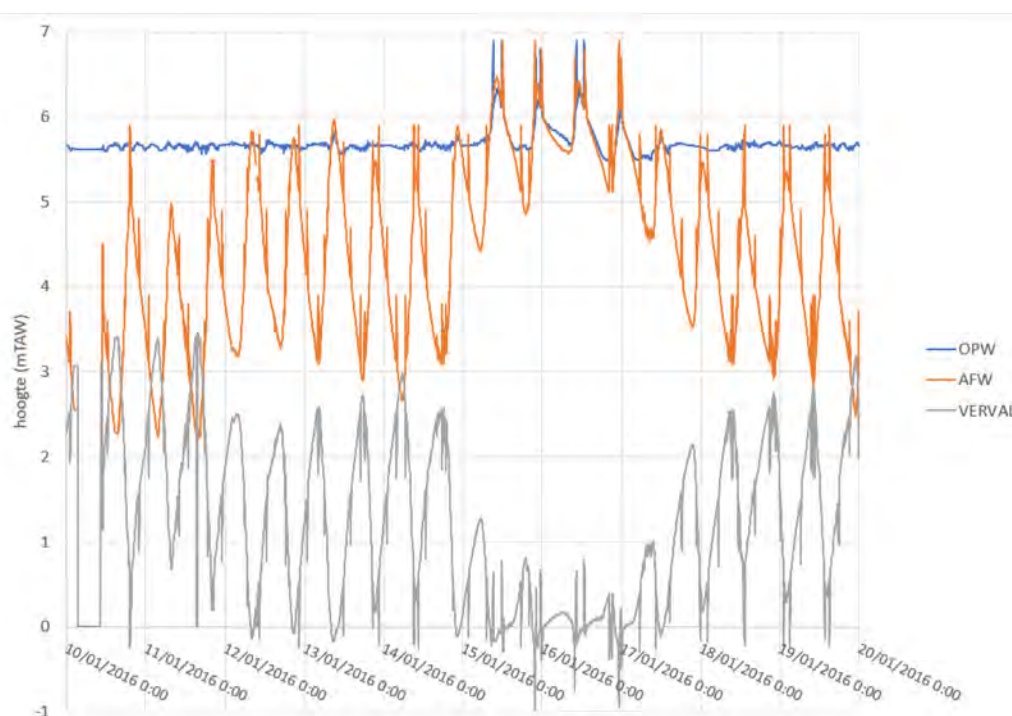
Extreme waarden

In de situaties dat het afwaartse waterpeil het opwaarts streefpeil nadert, zullen de stuwen waarschijnlijk volledig open zijn (lees: stuwsegmenten volledig boven water geheven) en is het verval over het stuwcomplex klein genoeg (of zelfs negatief) om ook voor de zwakkere zwemmers passeerbaar te zijn. Hoewel de stuwen in dat geval geen migratieknelpunt meer zijn, kan het vanuit oogpunt vismigratie toch een meerwaarde blijven om de vispassage open te houden.

De mogelijkheid voor het openhouden van de vispassage bij (sterk) verhoogde opwaartse waterpeilen wordt echter ook bepaald door het risico op schade en de eventuele verhoogde vuillast (drijf- en zweefvuil) bij was-condities en/of hoogtij-condities (zie verder in paragraaf 3.6.5 en 5.2).

Uit de analyse van de meetgegevens blijkt dat sterk verhoogde opwaartse peilen (> circa 5,90 mTAW) altijd worden veroorzaakt door een extreem hoog tij dat van afwaarts voor de waterpeilstijging zorgt (eventueel versterkt door een verhoogde bovenafvoer) (zie Figuur 18). Dit betekent dat opwaartse waterpeilen hoger dan circa 5,90 mTAW niet samengaan met een verhoogd verval over het stuwsluiscomplex en vispassage, waardoor stroomsnelheden in de vispassage niet hoger zijn dan onder dagelijkse omstandigheden.

De grootste vervallen over de vispassage (en daarmee de grootste stroomsnelheden) zullen dan ook ontstaan bij condities van sterk verlaagd afwaarts waterpeil, al dan niet in combinatie met een licht verhoogd opwaarts waterpeil. Als meest extreme afwaartse laagwaterpeil wordt 1,30 mTAW toegepast in deze studie, wat een conservatieve afronding is van de laagst gemeten waarde uit Tabel 11. Voor de bepaling van het bijbehorende verval en het verval onder normale omstandigheden wordt verwezen naar 'maatgevende scenario's' hieronder.



Figuur 18 – Voorbeeld scenario met extreem hoog tij

Maatgevende scenario's

Voor de maatgevende belastingen bij ontwerpberekeningen dient niet enkel te worden gekeken naar het afzonderlijk op- of afwaarts waterpeil, maar eerder de combinatie van de twee. Uitgaande van het opwaarts streefpeil (5,70 mTAW) en de ondergrens van het afwaartse waterpeil (2,10 mTAW) wordt het verval voor bepalen van het nodige aantal slots bepaald op $5,70 \text{ mTAW} - 2,10 \text{ mTAW} = 3,60 \text{ m}$. Onder normale omstandigheden kan dit verval toenemen tot 3,80 m op basis van toename opwaartse waterpeil ($= 5,90 \text{ mTAW} - 2,10 \text{ mTAW}$).

Zoals al eerder aangegeven is het verval bij opwaartse waterpeilen hoger dan 5,90 mTAW altijd kleiner dan onder normale omstandigheden aangezien verhoging van het opwaarts waterpeil dan wordt veroorzaakt door een sterke toename van het afwaartse waterpeil.

Hierdoor kunnen de meest extreme vervallen enkel ontstaan bij een uitzonderlijk laag afwaarts waterpeil tijdens normale opwaartse waterpeilen. Daarom wordt voor het meest extreme verval gekozen voor een conservatieve combinatie van het meest extreme afwaartse laagwaterpeil (1,30 mTAW) met het opwaartse streefpeil (5,70 mTAW). Het meeste extreme verval is daarmee $5,70 \text{ mTAW} - 1,30 \text{ mTAW} = 4,40 \text{ m}$.

Op basis van bovenstaande geeft Tabel 13 de geselecteerde maatgevende scenario's voor de verdere berekeningen in deze ontwerpstudie. Zie ook Figuur 17 voor de visualisatie van deze gekozen waterpeilen uit de scenario's.

Tabel 13 – Scenario's maatgevende waterpeilen en vervallen

Scenario	Opwaarts waterpeil (mTAW)*	Afwaarts waterpeil (mTAW)	Verval (m)	Omschrijving
S0	5,70	2,10	3,60	Opwaarts streefpeil en normaal laagtij (ontwerpscenario)
S1	5,70	3,50	2,20	Opwaarts streefpeil en gemiddeld tij
S2	5,70	5,00	0,70	Opwaarts streefpeil en normaal hoogtij
S3	5,70	1,80	3,90	Piek laagtij (H99%; minder dan 1% van de tijd lager) (opwaarts peil gekozen op streefpeil)
S4	5,70	1,30	4,40	Meest extreme verval bij laagtij in periode 2010-2015 (opwaarts peil gekozen op max. dagelijkse omstandigheden)

* Voor elk van de scenario's kan ook de eventuele invloed worden meegenomen van een afname of toename van het opwaartse waterpeil tot respectievelijk 5,50 mTAW en 5,90 mTAW.

3 Vispassage

3.1 Type en inpassing

Voor de vispassage werden drie typen overwogen:

- Semi-natuurlijke nevengeul;
- V-vormige bekkentrap;
- Vertical slot.

Gezien de beperkte beschikbare ruimte (vooral in breedte), het relatief grote verval en sterke afwaartse peilfluctuatie (tij) werden nevengeulen en bekkentrappen niet weerhouden als optimale typen. De meerwaarde van semi-natuurlijke nevengeulen of bekkentrappen ten opzichte van meer technische typen (als de vertical slot) ligt vooral in de mogelijke secundaire doelstelling van het creëren van (nieuw) habitat. Deze meerwaarde zal op deze locatie echter beperkt zijn aangezien zowel de nevengeul als de bekkentrappen sterk verstevigd zouden moeten worden met erosiewerende middelen zoals breuksteen. Daarnaast zou de toepassing van zijtaluds leiden tot zeer grote afwaartse breedtes. Ook is het bij hogere afwaartse peilen en dus een relatief grote waterdiepte (met veel verdronken afwaartse drempels in geval van de bekkentrap) lastiger om voldoende lokstroom over de volledige lengte van de vispassage te realiseren.

Voor dit belangrijke migratieknelpunt wordt de focus vooral gelegd op een zo optimaal mogelijke passeerbaarheid ('snel van A naar B') en bedrijfszekerheid (voldoende openingspercentage, behoud passeerbaarheidscriteria en zo min mogelijk risico op schade). Vertical slot passages lenen zich beter voor (sterk) fluctuerende waterpeilen en hebben ook een relatief laag basisdebiet waardoor dit type in drogere perioden langer open kan blijven. Op de Elbe te Geesthacht (Duitsland) is in 2010 onder nagenoeg soortgelijke hydraulische condities een dubbelslot vispassage van dit type gebouwd (Figuur 19). Deze vispassage werd over verschillende jaren goed gemonitord en bleek voor alle doelsoorten die ook op de Schelde van toepassing zijn zeer goed passeerbaar (Adam & Bader, 2015).

Het maximaal hydraulische verval bij gemiddeld laagtij te Geesthacht is circa 4,5 m. Ter vergelijking, het verval te Merelbeke bij deze condities is circa 3,6 m. Er werden te Geesthacht 49 bekkens voorzien wat een verval per slot van circa 0,09 m geeft. Op basis van de doelsoorten werden een slotbreedte van 1,2 m en een minimale slotdiepte van 1,7 m gekozen (Schwevers & Neumann, 2012). De bijhorende bekkendimensies werden bepaald op een bekkenlengte van 9 m en bekkenbreedte van 16 m, met een totale lengte van 550 m. Aan opwaartse zijde bevindt zich een monitoringsstation. Om ook bij hogere afwaartse waterpeilen voldoende lokstroom in de vispassage te behouden wordt in enkele bekkens en net afwaarts van het laatste bekken via buizen extra debiet ingelaten. De grootte van dit toegevoegd debiet wordt door vlotter en schuiven mechanisch geregeld op basis van het afwaartse waterpeil. Dit principe wordt verder toegelicht in hoofdstuk 6.



Bron: www.vattenfall.de/fischaufstieg

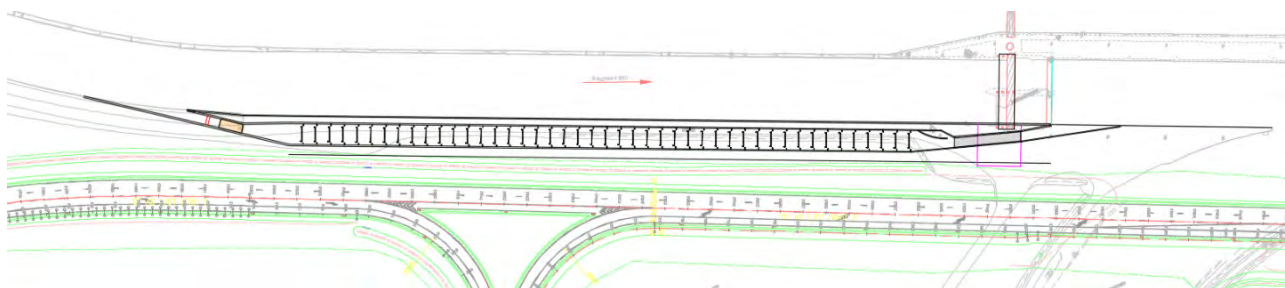


Bron: Schwevers & Neuman (2012)

Figuur 19 – Luchtfoto's van een dubbelslot vispassage op de Elbe te Geesthacht (Duitsland)

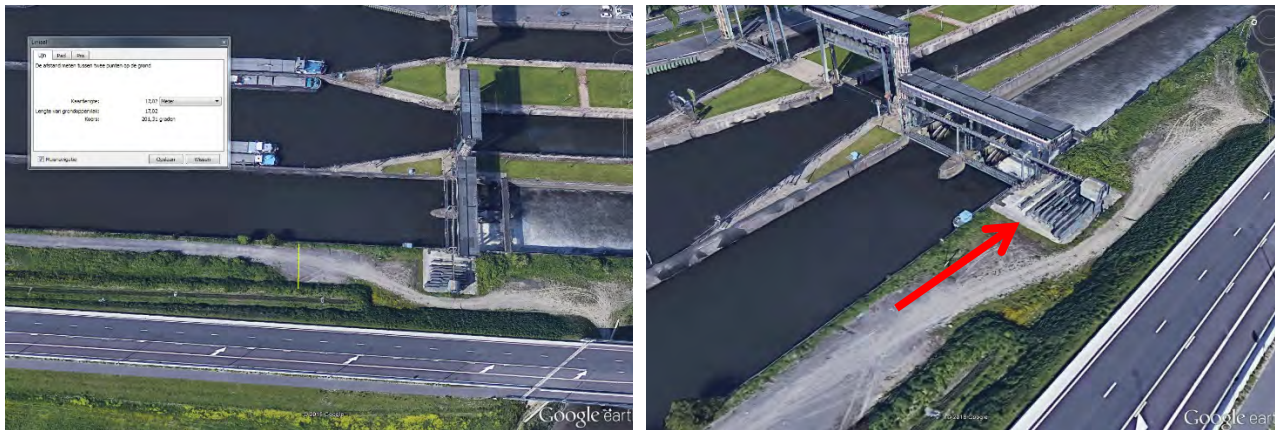
Aangezien de hydraulische condities en veel doelsoorten te Merelbeke overeenkomen met die te Geesthacht wordt er voor gekozen om dit type en ontwerp ook toe te passen op locatie Merelbeke. In de overige paragrafen van dit hoofdstuk wordt de dimensionering verder uitgewerkt. Op basis van de doelsoorten en beschikbare ruimte werd daarbij gekozen voor een slotbreedte van 0,7 m, een bekkenbreedte van 9 m en bekkenlengte van 6 m (zie volgende paragrafen). Het verval per bekken werd daarbij gelijk gehouden aan dat van Geesthacht (0,09 m), wat een totaal van 40 bekkens betekent op basis van het maatgevende hydraulische verval onder normale omstandigheden van 3,6 m.

Uitgaande van de beschikbare ruimte (Figuur 4) kan dit type zonder bochten worden ingepast tussen de bestaande stuwgeul en de R4. Merk op dat gestreefd werd naar een zo parallel mogelijke monding, waarbij de locatie werd bepaald op basis van de ligging van de migratielinietlijn onder maatgevende omstandigheden (zie verder in hoofdstuk 7). Figuur 20 toont het eerste voorstel voor ruimtelijke inpassing (Visser *et al.*, 2018a).



Figuur 20 – Eerste voorstel mogelijke inpassing dubbelslot vispassage met parallelle monding

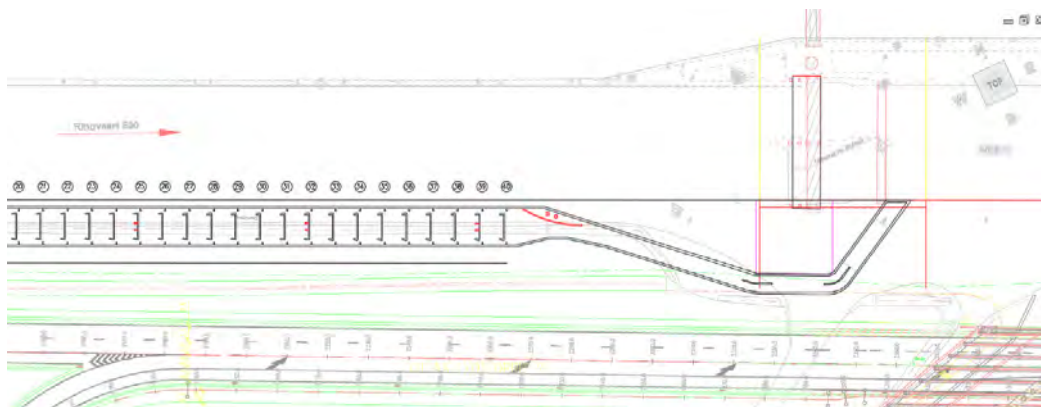
Vanwege het schotbalkplatform naast de stuwen (zie Figuur 21, en magenta kader in Figuur 20 en Figuur 22) en de daar in de ondergrond aanwezige dwarswanden (zie Figuur 7) gaf DVW echter aan dat een tracé rond het platform onderzocht diende te worden. Figuur 22 toont het alternatieve tracé rond het schotbalkplatform (Visser *et al.*, 2018b). Merk op dat er bij dit alternatief ook twee geleidingswanden nodig zijn in de twee scherpe hoeken in het tracé. Dergelijke wanden zijn nodig om loslatingseffecten en complexe stroming in deze scherpe bochten te voorkomen.



Geel: indicatie beschikbare breedte tussen stuwgeul en gracht R4

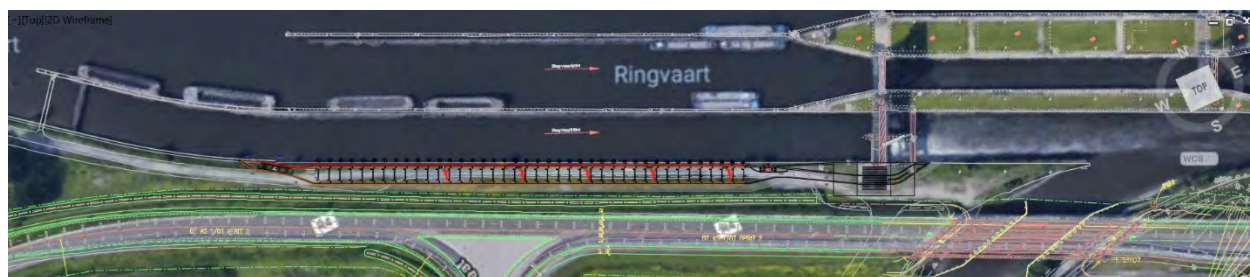
Rode pijl: werkplateau schotbalken

Figuur 21 – Impressies beschikbare ruimte ter plaatse van de stuwen te Merelbeke (Bron: Google Earth)



Figuur 22 – Alternatief tracé rond het schotbalk platform

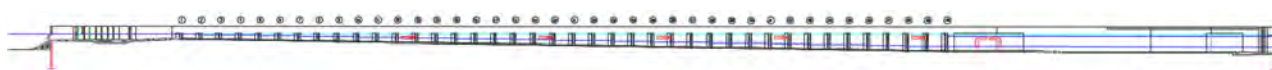
Uit de verdere bouwkundige analyse van deze alternatieve inpassing bleek echter dat de beschikbare ruimte tussen het schotbalkplatform en de R4 te beperkt was om bij inpassing van de vispassage geen negatieve impact te hebben op de stabiliteit van het grondlichaam van de R4. Ook dient ruimte te worden voorzien voor een doorgaande werkweg naast de vispassage tot rond het stuwsluiscomplex. Daarom werd beslist om alsnog te gaan voor een tracé onder het schotbalkplatform door. In samenwerking met het studiebureau werd het finale tracé uitgewerkt. Figuur 23 toont de uiteindelijke ruimtelijke inpassing voor de dubbelslotvispassage en Figuur 24 geeft een 'artist-impression' van het ontwerp. Bij de 'artist-impression' wordt wel opgemerkt dat dit geen weergave is van het finale ontwerp enkel een impressie van het type.



Luchtfoto met inpassing



grondplan



lengteprofiel

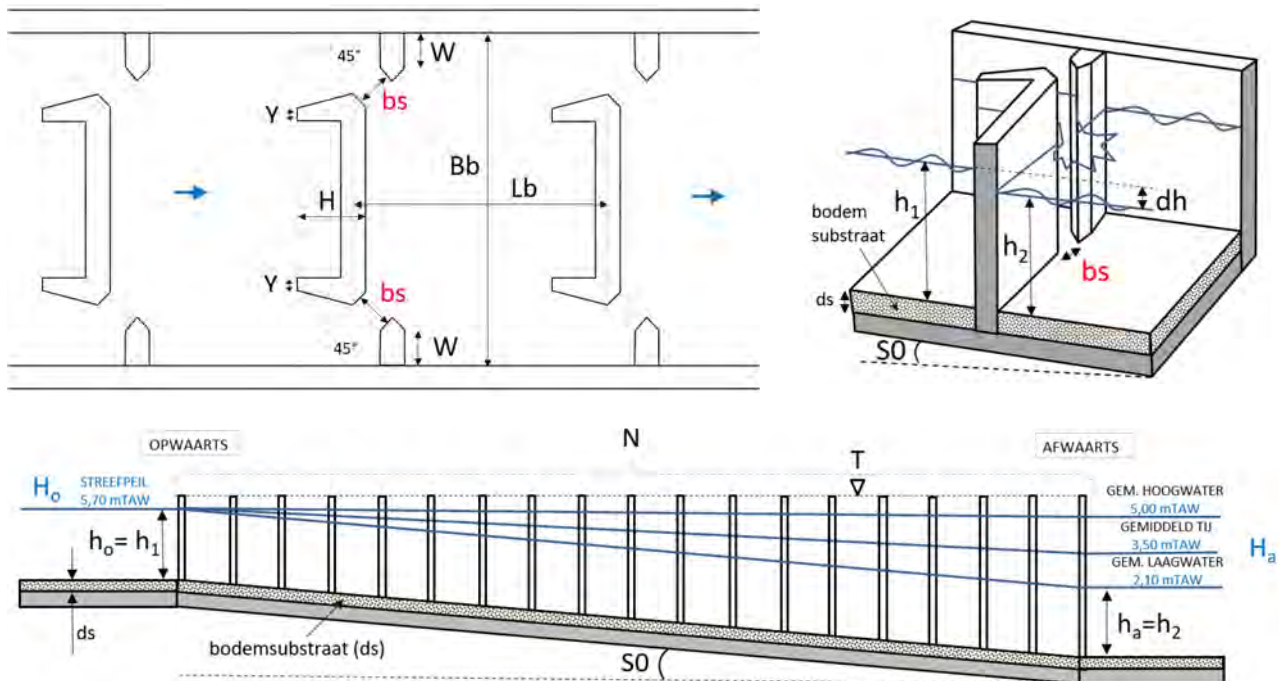
Figuur 23 – Grondplan finaal hydraulische ontwerp vispassage te Merelbeke



Figuur 24 – 'Artist-impression' van de ruimtelijke inpassing (bron: DVW)

3.2 Maatgevende parameters

Figuur 25 geeft een visuele weergave van de maatgevende parameters voor het ontwerp van de bekken en slotwanden van een dubbelslot vispassage.



Figuur 25 – Schematische weergave van de maatgevende parameters voor het ontwerp van de bekken en slots

Uit Figuur 25 kunnen de volgende algemene maatgevende parameters worden afgeleid:

- Totaal hydraulisch verval (m): $dh = \text{opwaarts waterpeil } (H_o) - \text{afwaarts waterpeil } (H_a)$;
 - o Maatgevend hydraulisch verval (m): $dh_m = \text{opwaarts streefpeil} - \text{gemiddeld laagwater}$;
- Hydraulisch verval over slot (m): $dh = h_1 - h_2$;
 - o Maatgevend verval over slot (m): $dh_m = dh / N$;
- Aantal bekken/ slots (-): $N = [dh_m / dh_m]$;
- Bodemverhang vispassage (-): $S_0 = dh_m / L_b$;
- Slotbreedte 'bs' in m;
- Hoogte slotwanden 'T' in mTAW;
- Dikte bodems substraat 'ds' in m.

De dimensionering van de parameters van de slotwanden en bekkendimensies worden meestal gekoppeld aan de slotbreedte (b_s). Voor de deze parameters worden op basis van Larinier (2002b) en Rajaratnam *et al.* (1992) de volgende vuistregels toegepast:

- Bekkenlengte: $L_b = 8 \text{ à } 10 \times b_s$;
- Bekkenbreedte: $B_b = \text{minimaal } 10 \times b_s$;
- Lengte kleine slotwand: $W = 1 \text{ à } 1,5 \times b_s$;
- Lengte haak grote slotwand: $H = 1,5 \text{ à } 2 \times b_s$;
- Breedte tip van de haak: $0,2 < Y < 0,5 \times b_s$;
- Hoek slot ten opzichte van zijwanden: circa 45° .

De bovengenoemde parameters zullen in de volgende paragrafen verder worden uitgewerkt. Daarbij wordt opgemerkt dat de slotbreedte, slotdiepte, bekkenbreedte en bekkenlengte niet alleen bepaald worden door de meest optimale stroompatronen en -snelheden maar ook door de grootte en kenmerken van de betreffende doelsoorten.

3.3 Slotdimensies, verval en debiet

Met oog op de passeerbaarheid zijn het (hydraulisch) verval per slot en de slotbreedtes de meest bepalende parameters. Samen met de slotdiepte en slotruwheid bepalen deze tevens het debiet door de vispassage. De slotbreedte en de doelsoorten zijn vervolgens bepalend voor de bekkendimensies (zie voorgaande paragraaf).

3.3.1 Verval per slot en aantal benodigde slots

Het maximaal toelaatbare verval over het slot (dh) wordt bepaald door de sprintsnelheden van de doelsoorten en in dit geval dan vooral die van de zwakkere zwemmers. In paragraaf 2.2.4 werd met oog op de doelsoorten gesteld dat sprintsnelheden niet hoger mogen gaan dan 1 tot 1,5 m/s. Daarbij wordt opgemerkt dat, met oog op peilen/of debietfluctuaties, het van belang is om de bovengrenzen van de maximale sprintsnelheden van doelsoorten niet als ontwerpstroomsnelheid (bij streefpeilen) voor de vispassages te kiezen. Aangezien de doelsoorten goed overeenkomen met de doelsoorten in de voorbeeldpassage uit Geesthacht (zie paragraaf 3.1), wordt gekozen voor **$dh = 0,09 \text{ m}$** . Afhankelijk van de werkelijke slotruwheid (C_d ; zie verderop) ligt de gemiddelde stroomsnelheid in het slot daarbij tussen de 0,9 en 1,1 m/s.

Uitgaande van $dh = 0,09 \text{ m}$ en een totaal maximum verval onder normale werkingscondities van 3,6 m (= 5,70 mTAW – 2,1 mTAW), zijn in totaal **$N = 40$** slots nodig.

3.3.2 Slotbreedte

Ook de nodige slotdimensies worden in eerste instantie bepaald door de doelsoorten en dan in dit geval vooral door de grotere soorten. In het ontwerp van de vispassage te Geesthacht op de Elbe werd voor de grootste doelsoort uitgegaan van de Atlantische steur met een karakteristieke breedte van 0,36 m en hoogte van 0,51 m (Schwevers & Neumann, 2012). Daarbij werd gesteld dat de slotbreedte minimaal 3 x de breedte van de doelsoort moet zijn (DWA, 2014), in dit geval $0,36 \times 3 = 1,08 \text{ m}$.

Zoals vermeld in paragraaf 2.2.2 is de Atlantische steur (zie rechts in Figuur 26) ook een doelsoort voor de Schelde. Deze soort is op dit moment echter niet meer aanwezig en het is ook niet zeker binnen welke termijn deze soort terug zal komen (met oog op een robuust ontwerp wordt hier binnen het mogelijke echter best wel rekening mee gehouden). De beschikbare ruimte voor de vispassage te Merelbeke is echter niet voldoende om de dubbelslot vispassage met deze slotdimensies in te passen. Na de Atlantische steur is de Europese meerval (zie links in Figuur 26) de tweede in grootte. Op basis van de voorgenoemde vuistregel uit DWA (2014) zou voor deze paragraaf een minimale slotbreedte van $0,24 \times 3 = 0,72 \text{ m}$ geven. In paragraaf 2.2.4 werd als absolute ondergrens voor de slotbreedte 0,5 m gegeven.

Uitgaande van de beschikbare ruimte te Merelbeke werd daarom gezocht naar de grootst mogelijke slotbreedte. Naast de benodigde fysieke breedte voor de grotere doelsoorten migreren bepaalde soorten ook in grote scholen (vb. elft (Kottelat & Freyhof, 2007), spiering (McAllister, 1984), e.a.), wat de meerwaarde van een zo breed mogelijk slot op deze locatie verder onderbouwt. Uiteindelijk wordt op basis van alle randvoorwaarden gekozen voor een slotbreedte van **bs = 0,7 m**. Opgemerkt dient te worden dat een slotbreedte van 0,7 m niet automatisch betekent dat stroomopwaartse migratie van een potentieel toekomstig optrekkende steurpopulatie verhinderd zou zijn.



Europese meerval



Atlantische steur

Figuur 26 – Enkele doelsoorten

Foto's: Rollin Verlinde/Vilda

3.3.3 Basisdebiet en slotdiepte

Voor de absolute ondergrens voor de slotdiepte werd voor de vispassage te Geesthacht uitgegaan van 2,5 x de hoogte van de grootste doelsoort (DWA, 2014), wat voor de Atlantische steur neer komt op $2,5 \times 0,51 = 1,28$ m. Uiteindelijk werd voor Geesthacht een minimale diepte van 1,7 m gekozen (Schwevers & Neumann, 2012). In paragraaf 2.2.4 werd voor de absolute ondergrens een diepte van 1 tot 1,5 m vooropgesteld, mede ook om het risico op predatie door vogels te minimaliseren en de vispassage niet te ondiep te maken ten opzichte van de hoofdloop.

In geval van de vispassage te Merelbeke is de invloed van de slotdimensies op het vispassagedebiet ook een belangrijk gegeven dat bij de ontwerpkeuze moet worden meegenomen. Zoals vermeld in paragraaf 2.3.3 wordt het vispassagedebiet namelijk best zo laag mogelijk gekozen om te zorgen dat de vispassage bij lagere afvoer op de rivier zo lang mogelijk open kan blijven. Aangezien de afvoer op de Elbe te Geesthacht vele malen groter is dan die op de Schelde speelde dit daar geen rol. Uitgaande van de gekozen slotbreedte van 0,7 m zal daarom met behulp van debietberekeningen de optimale slotdiepte (en daarmee ook bekkendiepte) voor de vispassage te Merelbeke worden bepaald.

Het debiet doorheen een vertical slotpassage en de bijhorende gemiddelde stroomsnelheid in de slots 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:

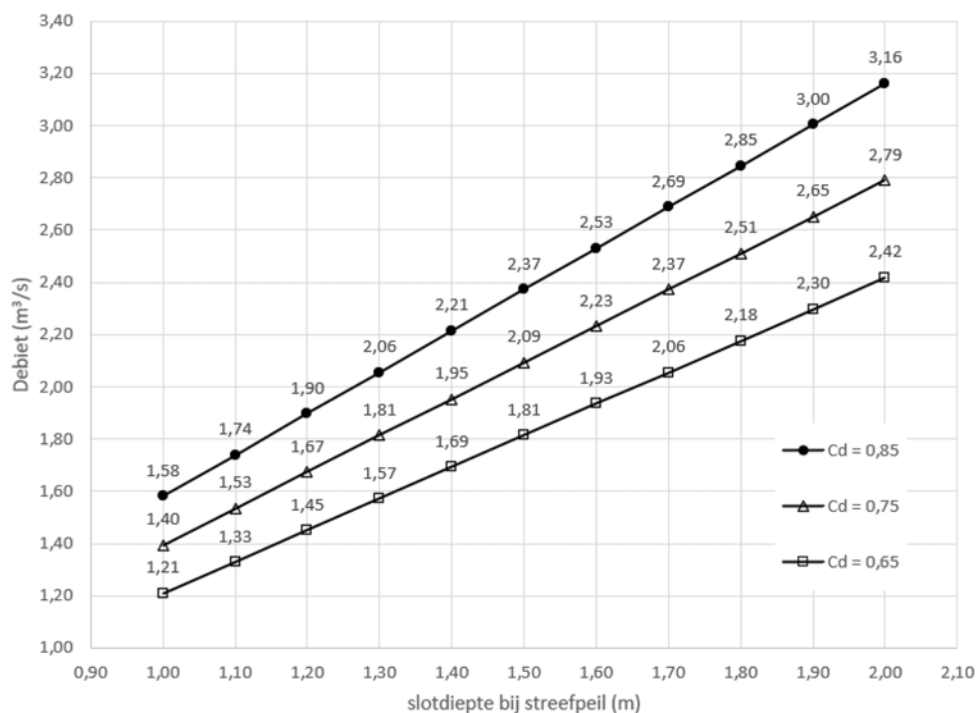
Q_{vis} =	Debiet door vertical slotpassage	[m ³ /s]
V_g =	Gemiddelde stroomsnelheid door het slot	[m ³ /s]
C_d =	Debietscoëfficiënt	[-]
b_0 =	Slotbreedte	[m]
h_1 =	Waterhoogte opwaarts van het slot	[m]
g =	Valversnelling (9,81)	[m/s ²]
dh =	Verval over het slot ($dh=h_1-h_2$)	[m]
h_2 =	Waterhoogte afwaarts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

Zoals te zien in bovenstaande formules wordt het debiet ook bepaald door de slotruwheid en contractie in het slot (zie debietscoëfficiënt C_d). Voor deze coëfficiënt 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. De configuratie van het slot (hoek en plaats) en de slotbreedte kunnen de debietscoëfficiënt echter ook beïnvloeden. Ondanks de keuze voor een standaard hoekig slotontwerp (zie Figuur 25) volgde uit CFD-simulaties (zie paragraaf 3.4.3) een relatief hoge waarde, namelijk een C_d van rond 0,86. Vermoed wordt echter dat de CFD-simulaties het debiet en daarmee ook stroomsnelheden enigszins overschatten (zie paragraaf 3.6). Aangezien de debietbeschikbaarheid een relatief grote rol speelt op de Schelde ter plaatse van Merelbeke (zie paragraaf 2.3.3) wordt voor de verdere berekeningen in deze studie een conservatieve waarde van $C_d = 0,85$ aangehouden. Verwacht wordt echter dat deze waarde ergens tussen de 0,75 en 0,85 zal liggen.

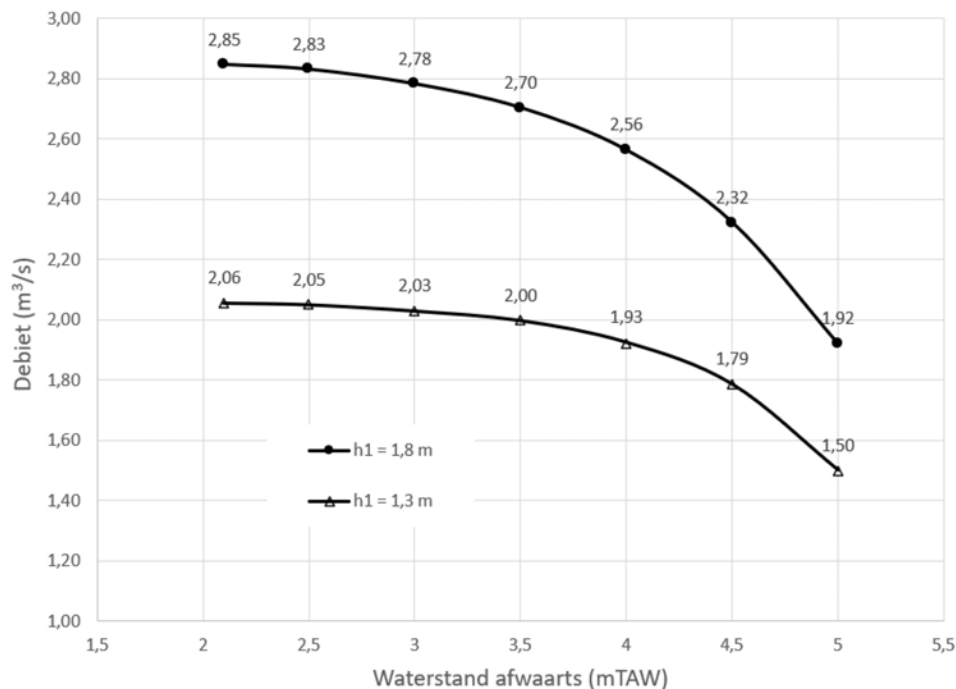
Op basis van $dh = 0,09$ m, $b_0 = 0,7$ m en $C_d = 0,85$ geeft Figuur 27 de relatie tussen de slotdiepte en het bijhorende vispassagedebiet voor de dubbelslotpassage bij variatie in opwaarts streefpeil. Om een idee te geven van de invloed van de debietscoëfficiënt is tevens de relatie gegeven bij $C_d = 0,75$ en $C_d = 0,65$.

In principe wordt het debiet ook beïnvloed door het afwaartse peil en daarmee het totale verval over de vispassage. Bij kleine peilvariaties (bijv. +/- 0,20 m) is deze invloed gering (orde grootte 0,1 m³/s). In geval van een afwaarts peil dat aan tij onderhevig is (zoals in Merelbeke), is deze invloed groter. Figuur 28 toont de invloed van het afwaarts waterpeil uitgaande van $H_o = 5,70$ mTAW (streefpeil), $b_s = 0,7$ m en $C_d = 0,85$ voor tweede slotdieptes, namelijk 1,8 m en 1,3 m.

Aanvankelijk werd in de studie gestart met een slotdiepte van 1,8 m, zoals ook voorgesteld te Sint-Baafs-Vijve (Visser *et al.*, 2020) en nagenoeg gelijk aan de slotdiepte te Geesthacht. Uit recente studies voor het opstellen van de ecologische drempels in kader van VRAG (Buysse *et al.*, 2021) bleek echter dat locatie Merelbeke mogelijk nog kritieker kan worden met oog op beschikbaar debiet dan al werd verwacht (zie ook paragraaf 2.3.3). Keuzes ten aanzien van het waterbeheer in het Groot Pand in droge periodes zullen ook van invloed zijn. Om te zorgen dat in de toekomst nog een zo hoog mogelijk openingspercentage gehaald kan worden, wordt ervoor gekozen om de slotdiepte te beperken tot een minimale diepte waarbij nog een goede passeerheid behouden blijft. Eerder in deze paragraaf werd de ondergrens voor de doelsoorten bepaald op 1,28 m.



Figuur 27 – Relatie debiet (Q_{vis}) en slotdiepte (h_1) bij $H_o = 5,70$ mTAW, $H_a = 2,10$ mTAW en een slotbreedte van $b_s = 0,7$ m



Figuur 28 – Relatie debiet (Q_{vis}) en afwaartse waterstand (H_a) bij $H_o = 5,70$ mTAW, $b_s = 0,7$ m en $C_d = 0,85$

Daarom wordt voor de slotdiepte een waarde van $h_1 = 1,3 \text{ m}$ gekozen. Deze diepte is nog diep genoeg voor de grootste doelsoort en zorgt tevens voor een zo klein mogelijk debiet zodat de kans op sluiting in drogere periode zo klein mogelijk wordt gehouden. Bij (maximale) fluctuatie van het opwaartse waterpeil onder dagelijkse omstandigheden tot circa 20 cm ten opzichte van streefpeil wordt de minimale waarde van 1,28 m niet meer gehaald, maar blijft wel boven de absolute ondergrens van 1 m. Merk ook op dat deze (minimale) dieptes ook enkel optreden in de meest opwaartse slots. Bij toename van het afwaartse waterpeil zal de waterdiepte in de (afwaartse) slots namelijk toenemen van 1,3 tot circa 4 m. De meest opwaartse slots en bekkens zullen daarbij wel steeds een waterdiepte behouden van circa 1,3 m.

3.4 Bekkendimensies & energiedissipatie

Zoals vermeld in paragraaf 3.3 zijn de benodigde bekkendimensies in eerste instantie vooral verbonden aan de gekozen slotbreedte en de benodigde energiedissipatie uitgaande van het optredende verval en debiet.

De lengte- en breedtefactoren zoals vermeld in paragraaf 3.1 werden door Rajaratnam *et al.* (1992) 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 ($dh = \text{circa } 0,20\text{-}0,30 \text{ m}$) toelieten. Op basis van deze vuistregels en een slotbreedte van $b_0 = 0,70 \text{ m}$ wordt voor de bekkenlengte L_b een bereik van minimaal 5,6 tot 7 m berekend en voor de bekkenbreedte B_b minimaal 7 m.

Voor de uiteindelijke keuze is het van belang ook de benodigde dimensies voor maatgevende doelsoorten, voldoende volume voor energiedissipatie en de controle van optimale stroompatronen mee in ogenschouw te nemen.

3.4.1 Bekkenbreedte en bekkenlengte

Met oog op de doelsoorten werd voor de vispassage van Geesthacht opnieuw uitgegaan van de Atlantische steur met een maatgevende lengte van 3 m. Volgens de vuistregel dat de bekkenlengte minimaal 3x de lengte van de maatgevende doelsoort moet zijn (DWA, 2014) werd daarom gekozen voor een bekken lengte van 9 m, en een bijhorende bekkenbreedte van 16 m. Zoals eerder aangeven zijn dergelijke dimensies niet haalbaar te Merelbeke. Uitgaande van de slotbreedte van 0,7 m werd daarom gekozen voor bekkenlengte **$L_b = 6 \text{ m}$** en voor een bekkenbreedte **$B_b = 9 \text{ m}$** . Bij de bekkenbreedte wordt opgemerkt dat dit de grootst haalbare breedte is uitgaande van de beschikbare ruimte en nog voldoende ruim boven de minimaal vereiste breedte volgens de vuistregel van Larinier (2002b), namelijk minimale bekkenbreedte is $10 \times 0,7 = 7 \text{ m}$. Tevens wordt opgemerkt dat deze ondergrens hier best niet wordt opgezocht aangezien er ook ruimte moet worden voorzien voor het inbrengen van het toegevoegde debiet (zie paragraaf 6.2).

3.4.2 Controle energiedissipatie

Vervolgens dient gecontroleerd te worden of de gekozen bekkendimensies zorgen voor voldoende volume om de toegevoegde energie na elk slot terug te kunnen dissiperen (zie ook 2.2.4). Bij een te klein volume bestaat het risico dat de turbulentie in de bekkens te hoog wordt waardoor vissen zullen terugkeren. In de literatuur wordt dit gecontroleerd door de hoeveelheid te dissiperen energie te delen door het bekkenvolume (Larinier, 2002b):

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

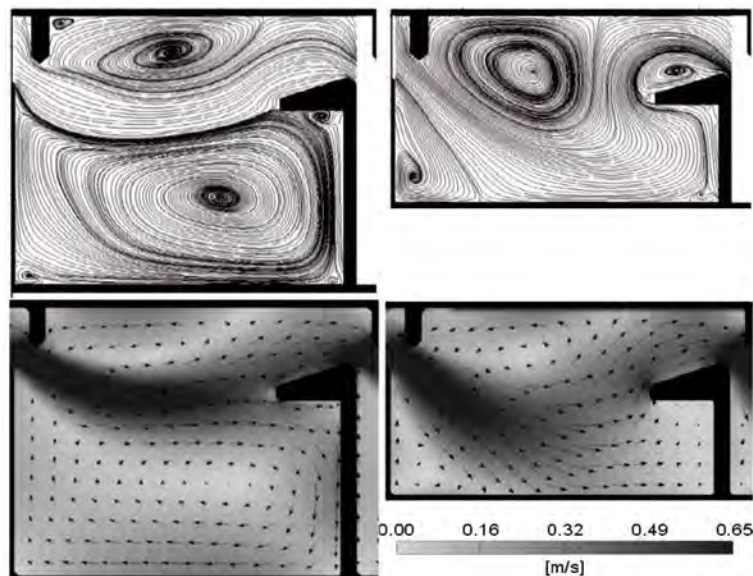
Met:

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

Bij het ontwerpscenario van een opwaarts streefpeil van 5,70 mTAW en afwaarts een gemiddeld laagwater van 2,10 mTAW (zie scenario S0 in Tabel 13) wordt een energiewaarde per bekken berekend op $E = 27,8 \text{ W/m}^3$, wat aanmerkelijk lager is dan het ontwerpcriterium van $E_{\max} = 100 \text{ W/m}^3$. Deze waarde dient echter ook gecontroleerd te worden bij peilfluctuaties (zie paragraaf 3.6). Bij deze berekening wordt opgemerkt dat voor de waterdiepte (y_b) de parameter h_2 wordt gebruikt, dit is de waterdiepte net afwaarts van het slot ($y_b = h_2 = 1,21\text{m}$). Dit is een conservatieve aanname aangezien de diepte in het bekken geleidelijk toeneemt tot opwaarts van het volgende slot terug de waterdiepte $h_1 (=1,30\text{m})$ wordt bereikt.

3.4.3 Controle stroompatronen (CFD)

Tenslotte dienen ook de stroompatronen in de bekkens gecontroleerd te worden bij deze dimensionering. Uit eerder onderzoek blijkt namelijk dat vooral de verhouding tussen de bekkenbreedte en de slotbreedte bepalend is voor het stromingstype in de bekkens (Musall *et al.*, 2014). Figuur 29 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 rechterplaatje 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 duidelijk de voorkeur met oog op vismigratie. Ook geeft dit stromingstype voldoende rustzones in de bekkens, vooral ter plaatse van de grotere 'rustig' draaiende neer naast de hoofdstroom.



Bron: Musall *et al.*, 2014

Figuur 29 – Invloed van vooral de bekkenbreedte op het stromingstype in vertical slot bekkens

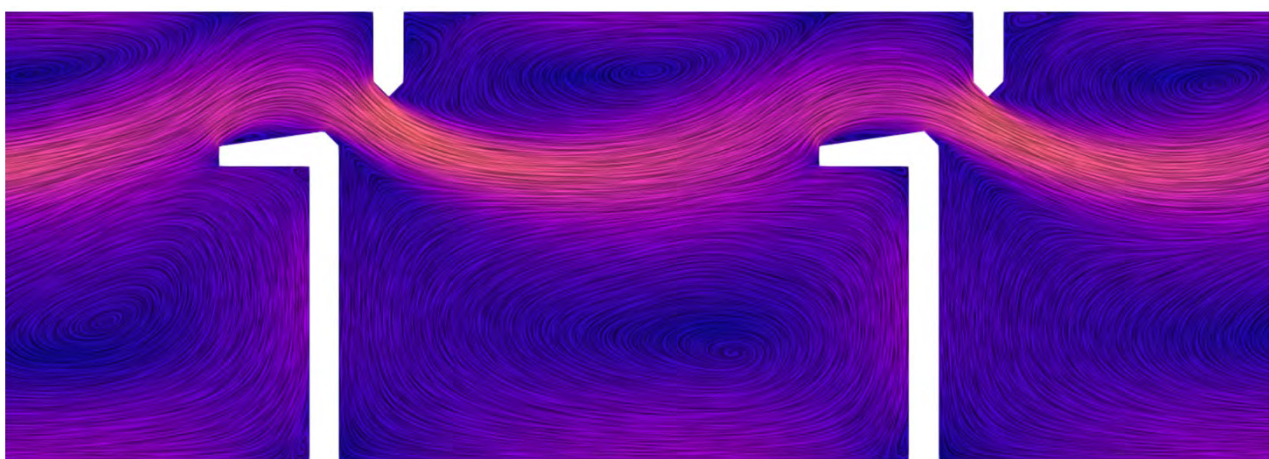
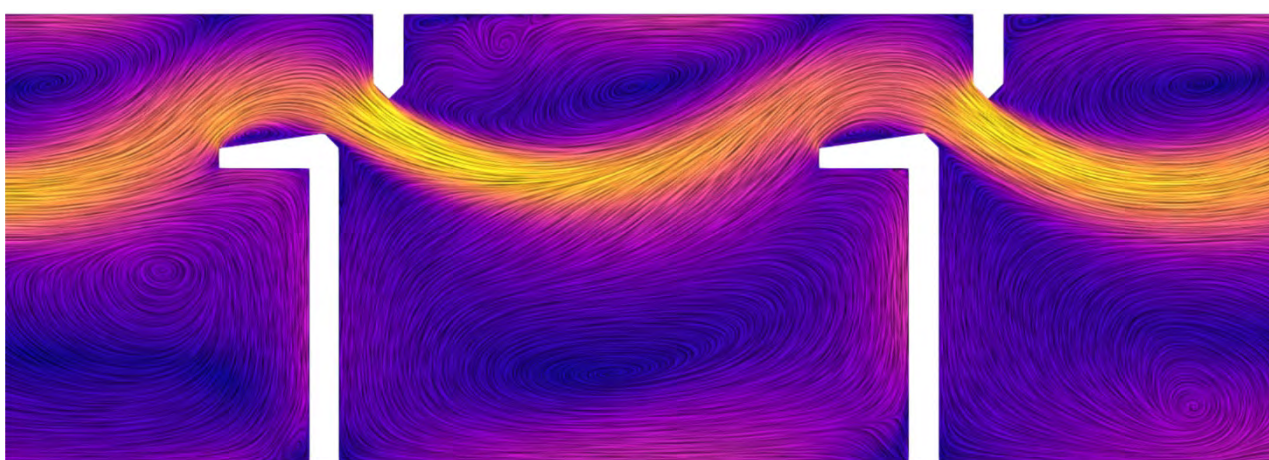
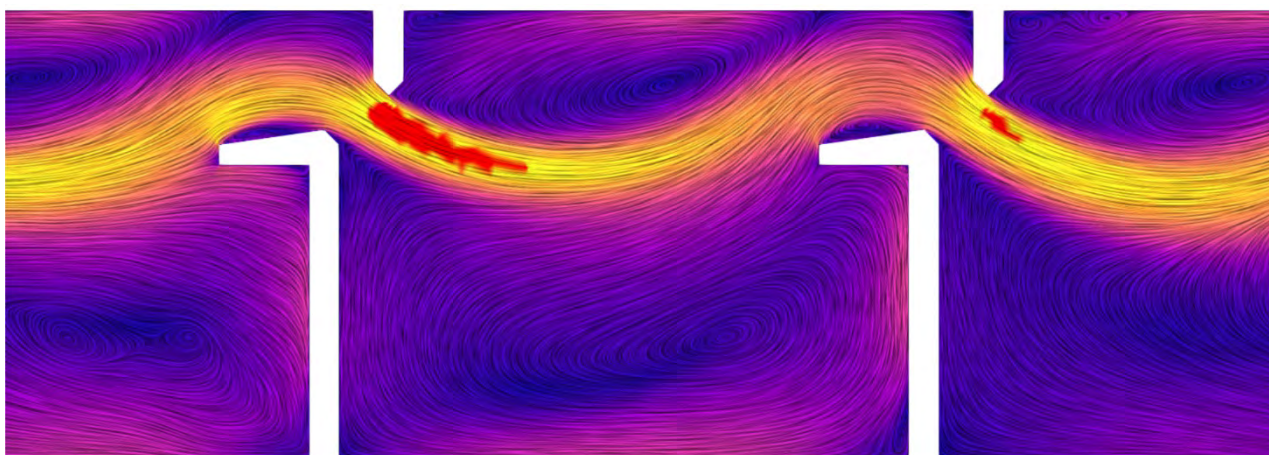
De stroompatronen werden door middel van CFD-simulaties gecontroleerd voor drie maatgevende scenario's voor optimale werking (zie ook Tabel 13):

- scenario S0 → $H_o = 5,70$ mTAW (streefpeil) en $H_a = 2,10$ mTAW (gemiddeld laagwater);
- scenario S1A → $H_o = 5,70$ mTAW (streefpeil) en $H_a = 3,50$ mTAW (gemiddeld tij);
- scenario S2A → $H_o = 5,70$ mTAW (streefpeil) en $H_a = 5,00$ mTAW (gemiddeld hoogwater);

Hierbij wordt opgemerkt dat deze simulaties nog uitgevoerd werden met een slotdiepte van 1,8 m. Dit heeft echter geen invloed op de stroompatronen, enkel op het debiet. Aangezien de natte sectie in het slot en het debiet daarbij evenredig afnemen, mag worden aangenomen dat ook de vervallen en stroomsnelheden nagenoeg gelijk zijn in geval van de uiteindelijk gekozen slotdiepte van 1,3 m (zie ook Figuur 37). De toevoeging van de letter 'A' in het scenario nummer geeft aan dat dit zonder toepassing van toegevoegd debiet is. In dezelfde studie werden namelijk ook scenario's onderzocht met toevoeging van extra debiet ('B') in enkele bekkens, zie verder in paragraaf 6.2.

De CFD-studie werd uitgevoerd door het studiebureau Actiflow. De opbouw van het 3D-grid en de resultaten van de CFD-studie worden beschreven in Broers *et al.* (2019). Aangezien het stroompatroon in de bekkens van een dubbelslot vispassage zonder bochten nagenoeg symmetrisch is (zie ook Oberle *et al.*, 2012), werd met oog op reductie in rekentijd gewerkt met een geknipt model waarbij alleen de linkerhelft van de bekkens werd opgenomen. Ter plaatse van deze symmetrie-as werd bij het uitvoeren van de CFD-modellering een symmetrievlak als randvoorwaarde beschouwd.

Figuur 30 toont het stroompatroon dat werd waargenomen in de verschillende scenario's op een kwart van de waterhoogte (circa 50 cm boven de bodem). Deze stroompatronen worden ook op de helft van waterkolom en driekwart van de waterkolom waargenomen. Hieruit blijkt dat de gewenste doorgaande hoofdstroom ontstaat met de twee dissipatie-neren aan weerszijden. Op basis hiervan worden de gekozen bekken- en slotdimensies bevestigd.



Figuur 30 – Stroompatroon op circa 50 cm boven de bodem ter plaatse van bekken 7, 8 en 9 (slot 8 en 9)

In het scenario met het grootste verval worden op een aantal locaties wel stroomsnelheden hoger dan 1,5 m/s vastgesteld (zie rode kleur Figuur 30). Dit is echter heel lokaal en zal ook kortstondig optreden aangezien S0 de laagwaterpiek van het tij betreft. Daarnaast wordt verwacht dat stroomsnelheden in de CFD-studie enigszins overschat worden aangezien een verval van 9 cm theoretisch gezien tot een maximale stroomsnelheid van circa 1,3 m/s zou leiden (op basis van $v = \sqrt{(2 \cdot g \cdot dh)}$). Vermoedelijk komt dit door een onderschatting van de slotruwheid en de contractie (= overschatting Cd-waarde), waardoor ook het debiet relatief hoger ligt dan verwacht op basis van desktopberekeningen (zie verder in paragraaf 3.6). Verwacht wordt echter dat dit het stroompatroon niet zal beïnvloeden, aangezien hogere stroomsnelheden eerder een conservatieve benadering geven.

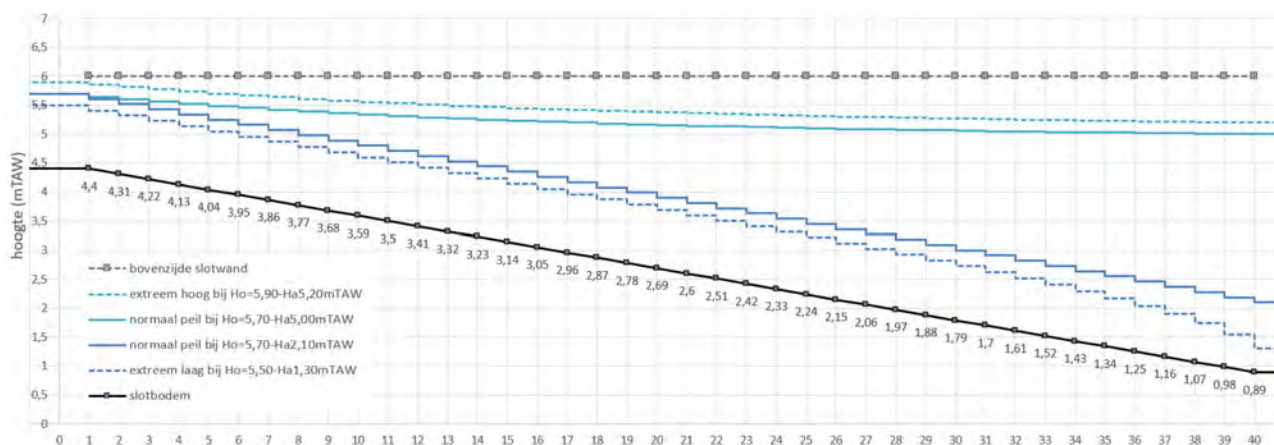
3.5 Bodemverhang, bodemhoogtes en hoogtes slotwanden

Het bodemverhang in de vispassage (S0) wordt bepaald door het maatgevende verval per slot ($dh_m = 0,09$ m) te delen door de bekkenlengte ($L_b = 6$ m), en geeft in dit geval een verhang S0 van $0,09/6 = 0,015$ (= 1,5%).

Figuur 31 toont bodemhoogtes in elk van de slots bij de gekozen slotdiepte van 1,3 m bij opwaarts streefpeil van 5,7m. De bodem wordt doorlopend onder het bovengenoemde verhang aangebracht (m.a.w. geen 'trap-effect'). De hoogtes geven dus de lokale hoogtes in de slots zelf aan.

Op de bodem zal ook een substraat bestaande uit rolstenen worden aangebracht (zie paragraaf 3.7). De opgegeven hoogtes in Figuur 31 betreffen de bovenzijde van dit substraat. Mocht er onder het substraat een betonnen vloer worden aangebracht dient deze dus over de dikte van het substraat dieper te worden aangebracht. De minimale hydraulische diepte dient namelijk behouden te blijven.

Ter illustratie zijn in de figuur ook de waterpeilen weergegeven voor de boven- en ondergrens bij normale werking (scenario's S0 en S2 uit Tabel 13), een scenario met sterk verhoogde op- en afwaartse peilen bij normale werking en een scenario met extreem lage op- en afwaartse waterpeilen. Ook is de gekozen hoogte van de slotwanden ($T = 6$ mTAW) aangeduid in de figuur. Deze hoogte is voldoende voor een goede geleiding onder normale werking. Bij hogere waterstanden komt het afwaartse waterpeil hoger dan het opwaartse waterpeil en zijn de stuwen zo goed als volledig opgetrokken.



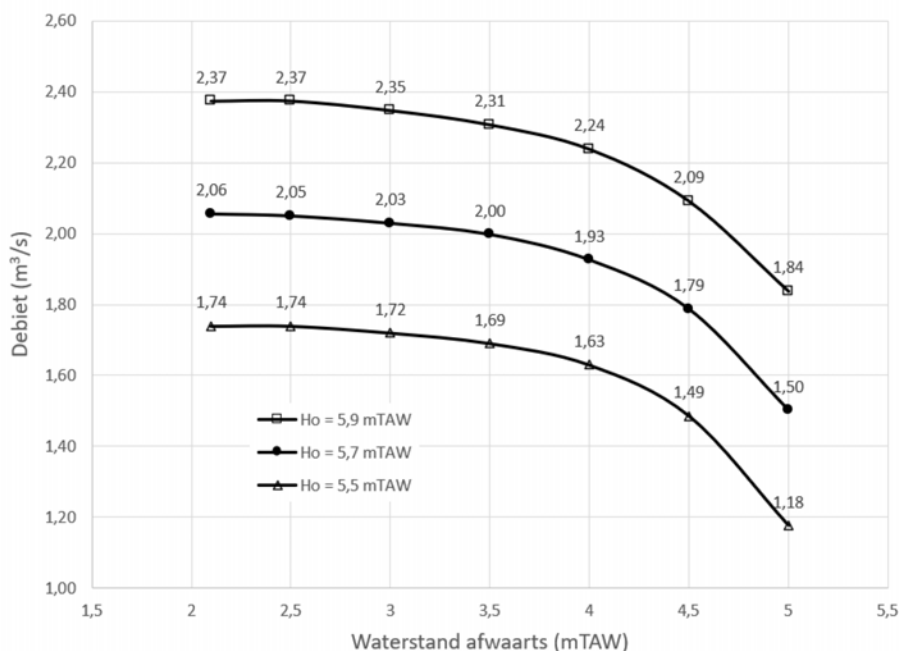
Figuur 31 – Bodemhoogtes en slotwandhoogte

3.6 Invloed waterstandfluctuaties

Door middel van desktopberekeningen (zie formules in paragrafen 3.1 en 3.4) en CFD-simulaties werd de invloed van de variatie in de opwaartse en afwaartse waterstand op het debiet (paragraaf 3.6.1), op het verval per slot en de daaraan verbonden stroomsnelheden (paragraaf 3.6.2) en op de energie per bekken (paragraaf 3.6.4) onder normale werking onderzocht. Tevens werden de belastingen (maximale stroomsnelheden en vervallen) onder extreme condities bepaald (paragraaf 3.6.5).

3.6.1 Debiet bij normale werking

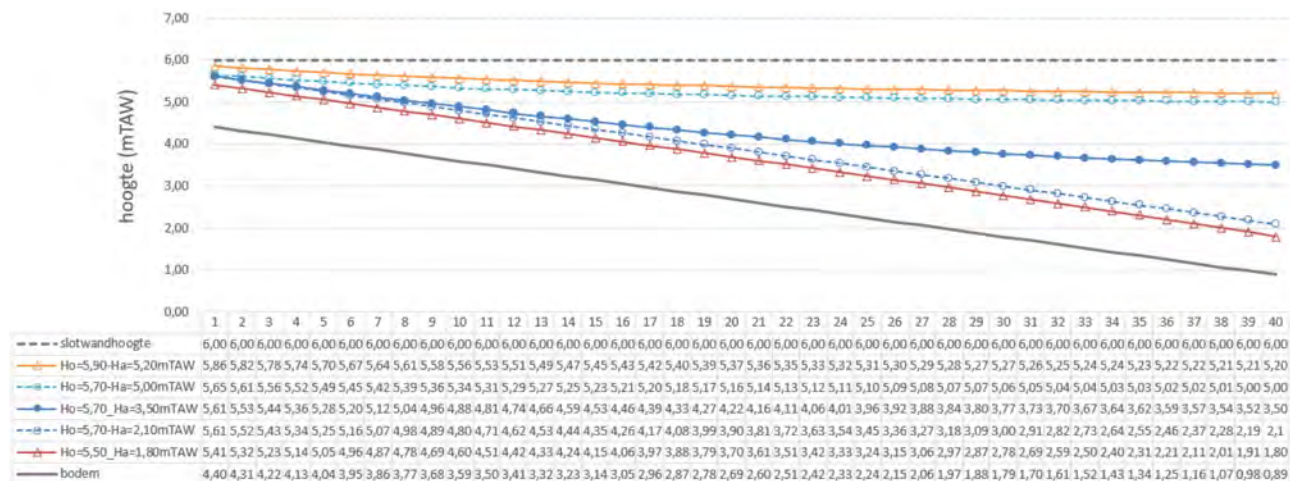
Figuur 32 toont de invloed van fluctuatie van het afwaartse waterpeil bij drie maatgevende opwaartse waterstanden, namelijk het streefpeil (5,70 mTAW, zie ook basisdebiet in Figuur 28) en de onder en bovengrens van de opwaartse waterstand onder normale omstandigheden (zie ook Tabel 12). Dit betreffen resultaten bij de gekozen slotdiepte van 1,3 m bij streefpeil (zie paragraaf 3.3.3).



Figuur 32 – Invloed peilfluctuaties op debiet bij normale werking

3.6.2 Waterstanden bij normale werking

Figuur 33 toont de range aan mogelijke waterstanden in de bekkens onder normale omstandigheden. Met blauw zijn de maatgevende scenario's bij normale werking gegeven (S0, S1 en S2 uit Tabel 13). Om een indicatie te geven voor de waterstanden bij licht verhoogde of verlaagde waterstanden, zijn ook combinaties gegeven van de bovengrens van het opwaarts waterpeil onder normale werking (5,90 mTAW) met het gemiddeld hoogwater bij springtij (5,20 mTAW, zie ook Tabel 11) en van de ondergrens van het opwaarts waterpeil onder normale werking (5,50 mTAW) met het laagwaterpeil dan minder dan 1% van de tijd wordt onderschreden (1,80 mTAW).

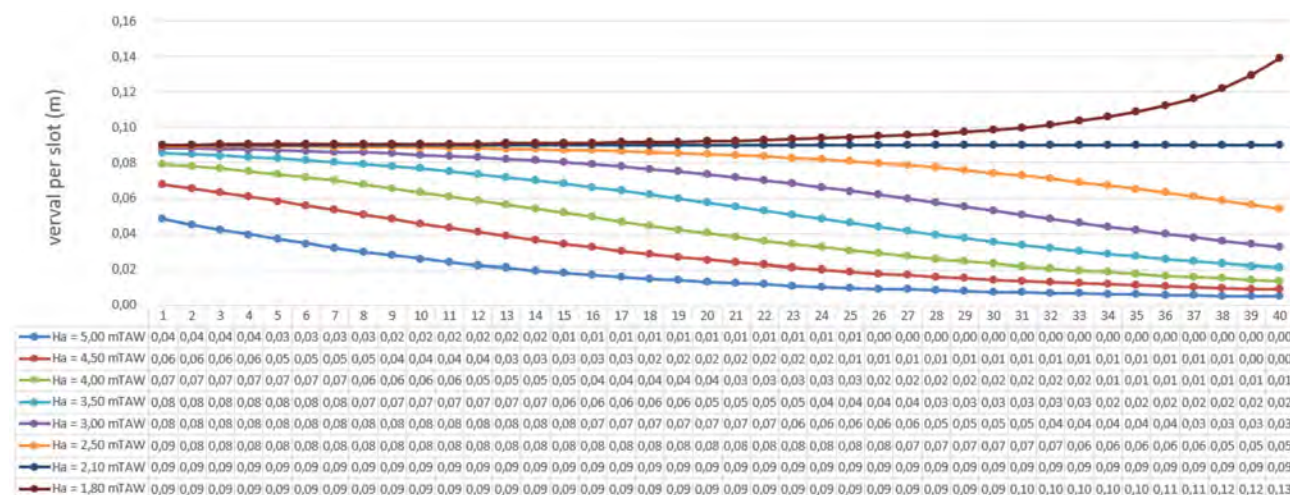


Figuur 33 – Range aan waterstanden in de bekens bij normale werking

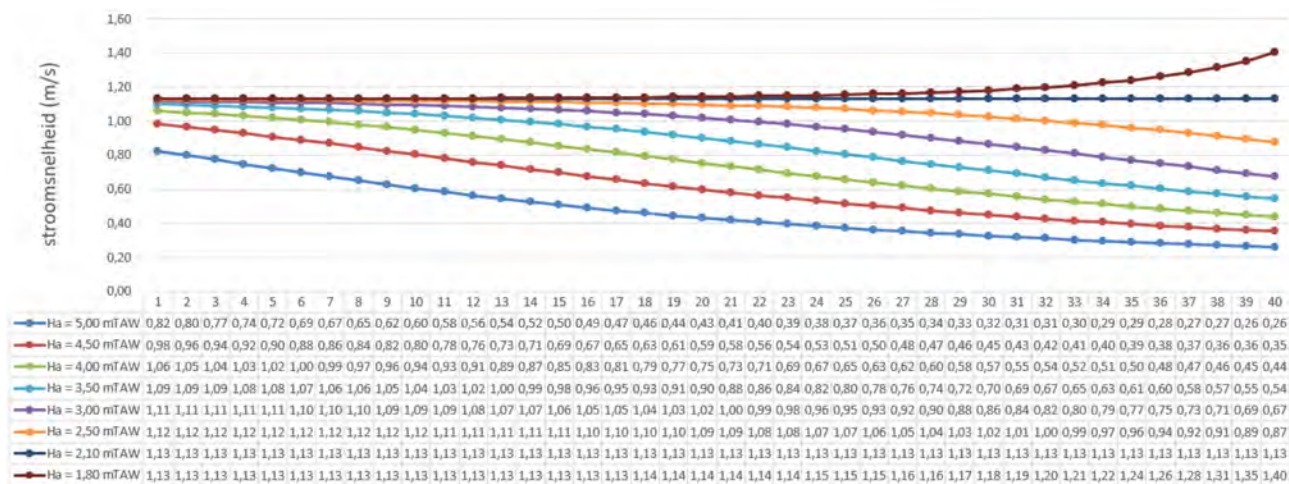
3.6.3 Verval en stroomsnelheid bij normale werking

Figuur 34 toont de invloed van de variatie in de afwaartse waterstand (het tij) op het verval per slot bij het opwaartse streefpeil (5,70 mTAW). Figuur 35 toont vervolgens de bijhorende invloed op de gemiddelde stroomsnelheden in de slots. Dit betreffen resultaten bij de gekozen slotdiepte van 1,3 m.

Uit de figuren is af te leiden dat de invloed van variatie in het afwaartse peil op vervallen en daarmee stroomsnelheden het grootste is in de meest afwaartse slots. Binnen de normale werkingsrange neemt het verval over het meest afwaartse slot af van 0,09 m bij $H_a = 2,10$ mTAW tot minder dan 0,01 m bij $H_a = 5,00$ mTAW. Stroomsnelheden nemen daarbij respectievelijk af van 1,13 m/s tot 0,26 m/s. De donkerrode grafiek is toegevoegd om een indicatie te geven wanneer het tij verder weg zou zakken tot 1,80 mTAW (komt minder dan 1% van de tijd voor). Aan opwaartse zijde is het effect iets minder groot. Hier neemt het verval over het meest opwaartse slot af van respectievelijk 0,09 tot 0,04 m en de gemiddelde stroomsnelheden van respectievelijk 1,1 tot 0,8 m/s.

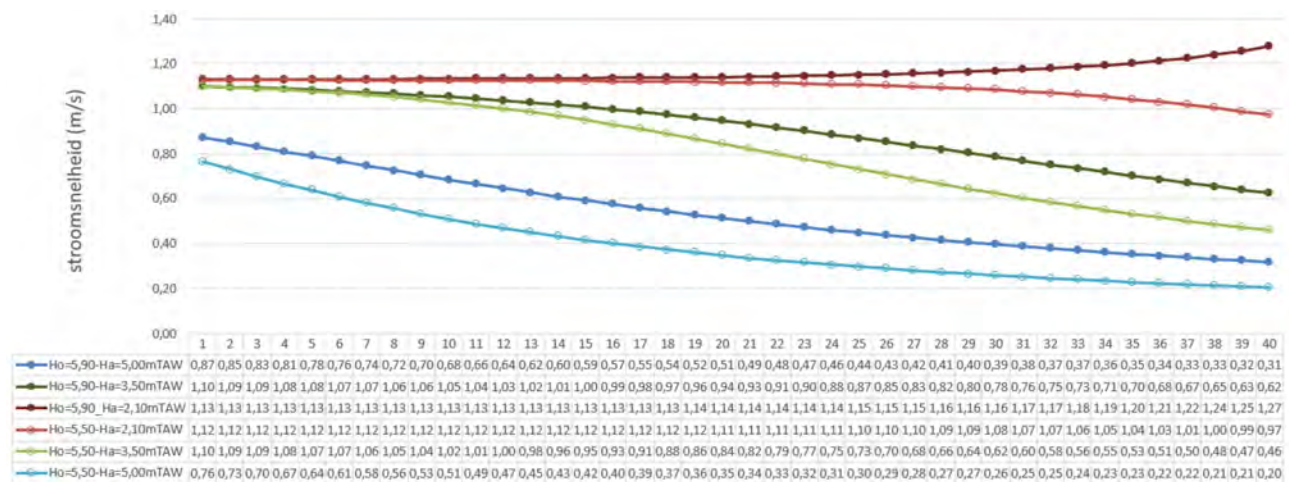


Figuur 34 – Verval per slot bij variatie in afwaartse waterstand en opwaarts streefpeil 5,70 mTAW



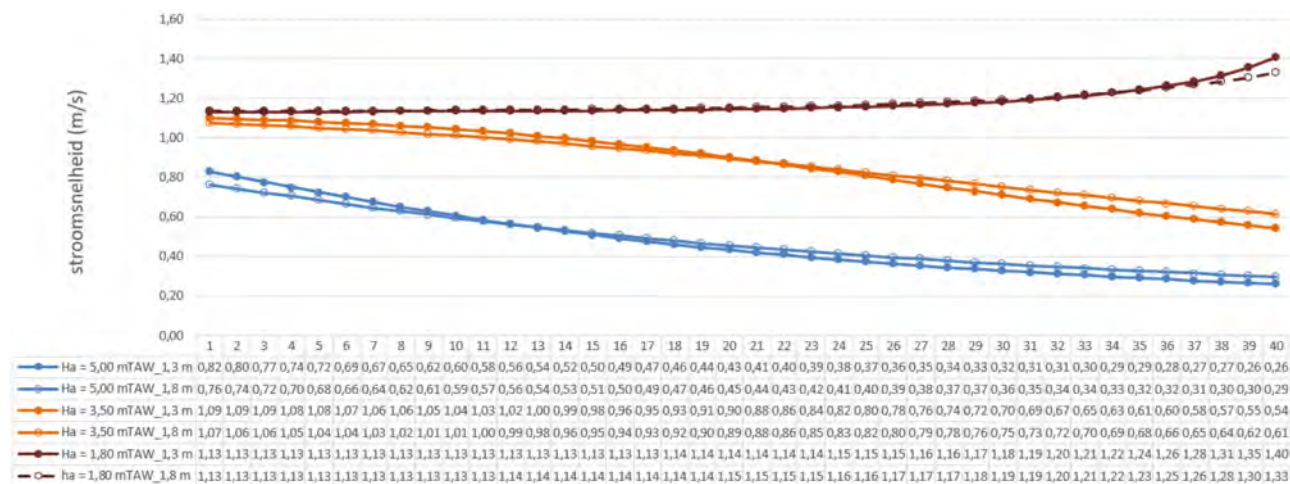
Figuur 35 – Gemiddelde stroomsnelheid in het slot bij variatie in afwaartse waterstand en opwaarts streefpeil 5,70 mTAW

Aangezien ook het opwaartse waterpeil kan fluctueren geeft Figuur 36 een weergave van de maatgevende afwaartse waterpeilen van 2,1 mTAW (rood), 3,5 mTAW (groen) en 5,00 mTAW (blauw) in combinatie met de bovengrens van het opwaartse waterpeil bij normale werking (5,90 mTAW) en met de ondergrens van het opwaartse waterpeil bij normale werking (5,50 mTAW). Bij de bovengrens van het opwaartse waterpeil (5,90 mTAW) zijn de stroomsnelheden in de meest afwaartse sloten iets hoger omdat ook het totaal verhang hierbij licht toeneemt. Dit betekent dat in het scenario van het laagste afwaartse waterpeil bij normale werking (2,10 mTAW) de stroomsnelheden iets hoger liggen dan bij de resultaten bij streefpeil (zie de rode grafiek). De stroomsnelheden blijven ook in deze situatie echter nog onder het maximale ontwerpcriterium van 1,5 m/s. Daarnaast komt deze combinatie maar zeer zelden voor.



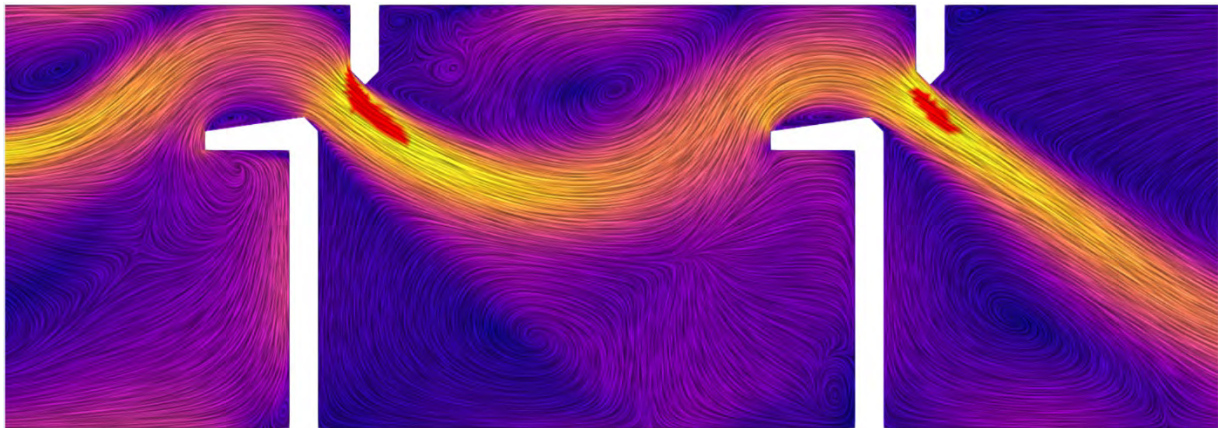
Figuur 36 – Gemiddelde stroomsnelheid in het slot bij maatgevende combinaties van op- en afwaartswaterpeil

Voor drie maatgevende scenario's bij normale werking (S0, S1A, S2A, zie ook paragraaf 3.4.3) werden ook CFD-simulaties uitgevoerd. Zoals eerder gezegd werden deze simulaties uitgevoerd met een slotdiepte van 1,8 m in plaats van de uiteindelijk gekozen diepte van 1,3 m. Aangezien dit slechts een geringe invloed heeft op de gemiddelde stroomsnelheden, wordt verwacht dat dit geen invloed zal hebben op het stroompatroon in de bekken. Figuur 37 geeft een vergelijking tussen de stroomsnelheden bij de twee dieptes voor de drie waterstandscenario's.

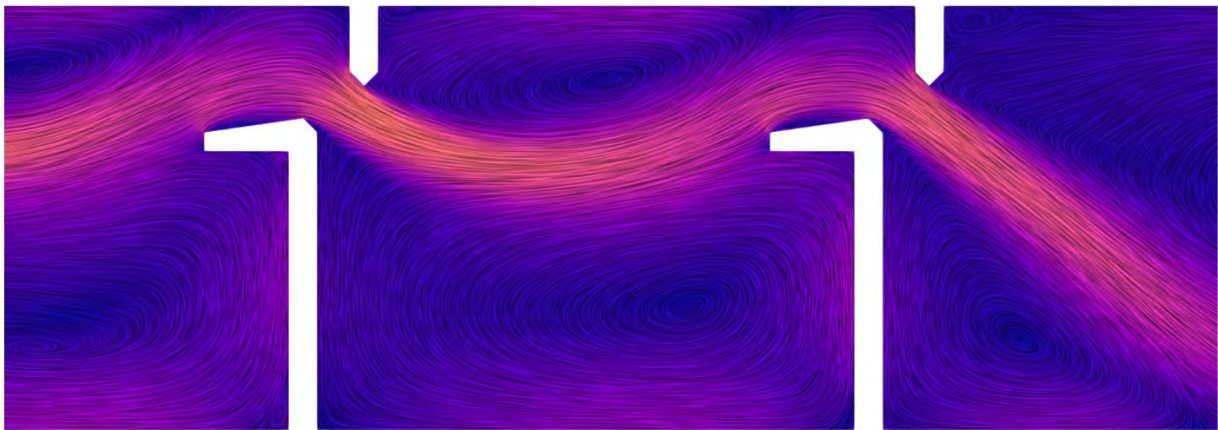


Figuur 37 – Vergelijking gemiddelde stroomsnelheden bij slotdiepte van 1,3 en 1,8 m en $H_o = 5,70$ mTAW

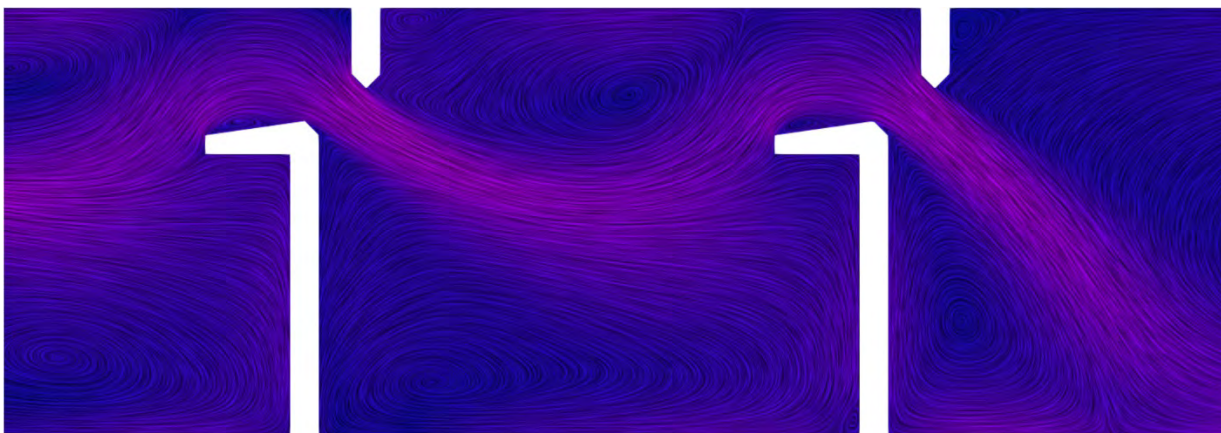
Figuur 38 toont de stroompatronen en snelheden in het meest afwaartse bekken in een horizontale doorsnede op circa 50 cm boven de bodem, zoals bepaald door middel van de CFD-simulaties. Figuur 39 toont tevens een dwarsdoorsnede van de stroomsnelheden in het meest afwaartse slot en in een dwarsdoorsnede loodrecht door dit slot. Bij deze dwarsdoorsneden wordt opgemerkt dat het luchtgedeelte boven water in de modelresultaten ook een blauwe kleur heeft gekregen waardoor de waterlijn moeilijker te onderscheiden is. Daarom is de waterlijn met een witte stippellijn aangeduid.



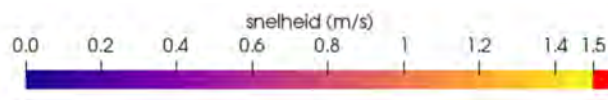
Afwaartse waterstand 2,10 mTAW (S0)



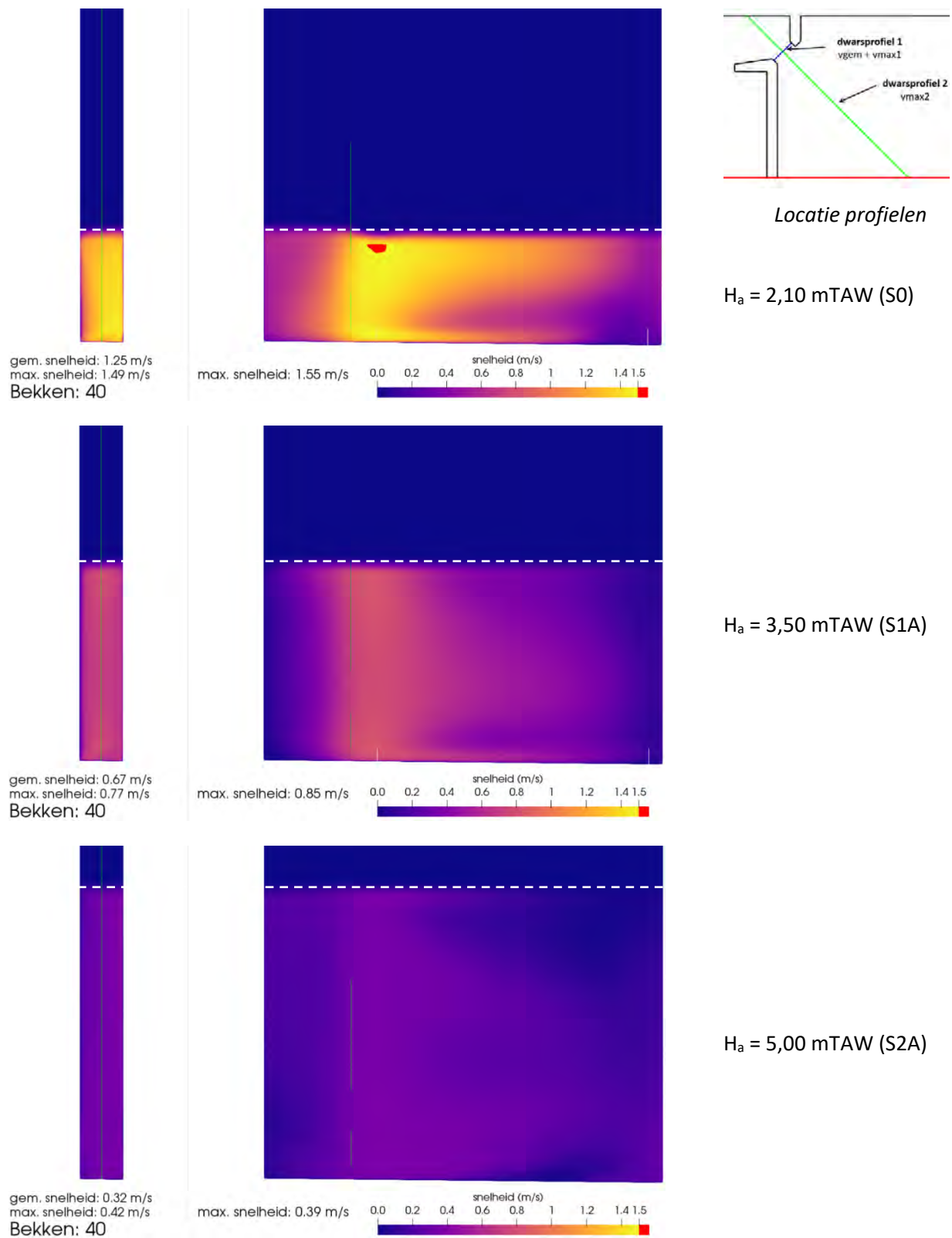
Afwaartse waterstand 3,50 mTAW (S1A)



Afwaartse waterstand 5,00 mTAW (S2A)

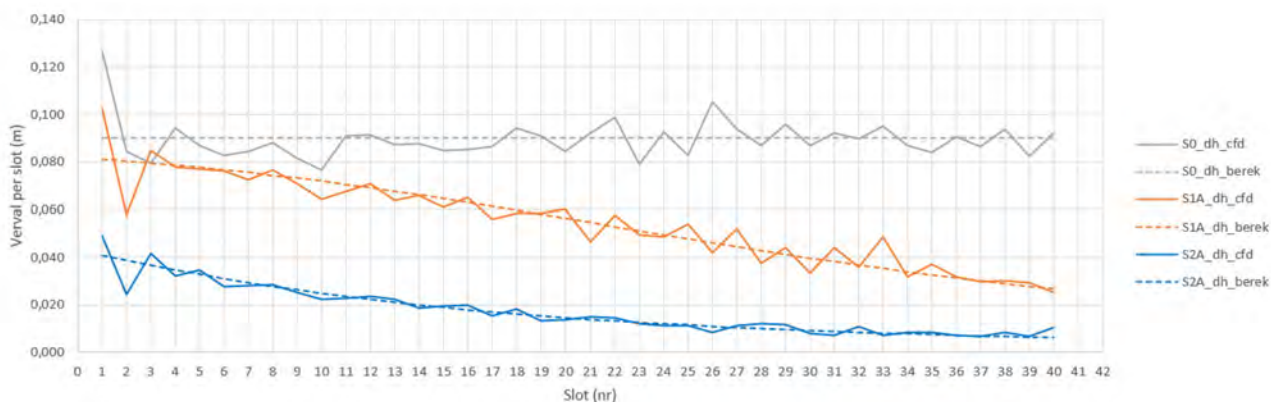


Figuur 38 – CFD-resultaten stroming in het meest afwaartse bekken op circa 50 cm boven de bodem

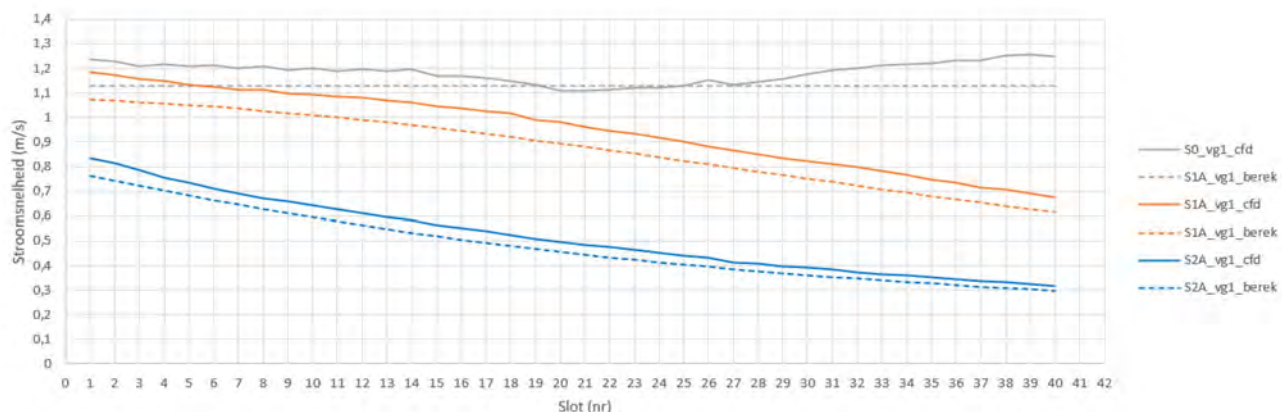


Figuur 39 – CFD-resultaten dwarsprofielen stroming meest afwaartse slot en bekken bij variatie afwaartse waterstand

Figuur 40 vergelijkt het verval per slot uit de CFD-simulaties met de resultaten van de desktopberekeningen, en Figuur 41 doet dit voor de gemiddelde stroomsnelheden per slot. Merk op, zoals eerder aangeven zijn zowel CFD-simulaties als de desktopberekeningen in dit geval uitgevoerd bij een slotdiepte van 1,8 m.



Figuur 40 – Vergelijking verval per bekken bij variatie in afwaartse waterstand



Figuur 41 – Vergelijking stroomsnelheden in de slots bij variatie in afwaartse waterstand

Op basis van de resultaten zoals weergegeven in deze paragraaf kan het volgende worden opgemerkt:

- De berekende gemiddelde vervallen per slot uit de desktop berekeningen komen relatief goed overeen met de resultaten van de CFD-simulaties.
- Alleen heeft het meest opwaartse slot bij alle CFD-simulaties een relatief groot verval terwijl het in het slot daarna weer relatief laag ligt. Het is opvallend dat dit effect niet terug te zien is in de gemiddelde stroomsnelheden (zie Figuur 41), terwijl je dit wel zou verwachten. Mogelijk ligt dit aan de aanstroming, maar het kan ook een modelmatig effect zijn. Of dit in werkelijkheid ook zou optreden kan enkel worden aangetoond door middel van proeven en/of veldmetingen.
- Gemiddelde stroomsnelheden in de CFD-simulaties liggen hoger dan die in de desktopberekeningen, terwijl al een relatief hoge Cd waarde werd toegepast (namelijk $C_d = 0,85$).
- Gemiddelde stroomsnelheden blijven in alle scenario's onder het ontwerpcriterium tav kruissnelheden (1,5 m/s), maar liggen wel relatief hoog voor gemiddelde stroomsnelheden.

- Met oog op het criterium voor de minimale stroomsnelheid waarbij vissen zich nog kunnen oriënteren op de hoofdstroom ($v_{\min} = 0,3 \text{ m/s}$; zie Schwevers & Neumann, 2012) lijkt het erop dat deze in principe enkel wordt onderschreden in het scenario met de hoogste afwaartse waterstand ($H_a = 5,00 \text{ mTAW}$; scenario S2A) en dan enkel bij de meest afwaartse bekkens.

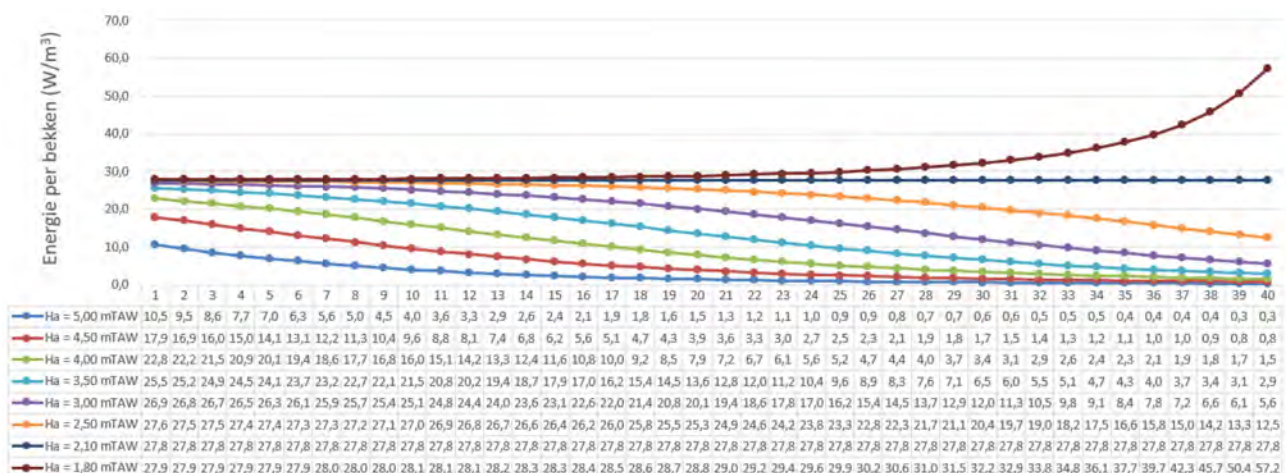
Met oog op de noodzaak voor het toegevoegd debiet in de bekkens zou uit deze resultaten geconcludeerd kunnen worden dat een toegevoegd debiet niet nodig zou zijn. Hierbij dienen echter twee bemerkingen te worden gemaakt:

- Ten eerste lijkt het erop dat de modelsimulaties (en de daarop gebaseerde Cd-factor in de desktopberekeningen) een overschatting geven van de stroomsnelheden, waardoor deze in werkelijkheid lager kunnen liggen. De voorbeeld vispassage te Geesthacht gaat namelijk uit van hetzelfde ontwerpverval per slot ($dh = 0,09 \text{ m}$) en daar werd op basis van zowel numerieke als schaalmodelstudie besloten dat een toegevoegd debiet wel benodigd bleek.
- Daarnaast worden in Figuur 41 (en ook in Figuur 35) enkel de gemiddelde stroomsnelheden in de slots zelf geëvalueerd en niet de stroomsnelheden in de bekkens. In de bekkens zullen stroomsnelheden logischerwijze lager liggen.

Aangezien er in deze studie geen tijd beschikbaar is om schaalmodelproeven uit te voeren, wordt besloten om dicht bij het ontwerp van de al beproefde en gerealiseerde vispassage te Geesthacht te blijven (Oberle *et al.*, 2012) en dus ook in de vispassage te Merelbeke toegevoegd debiet in de bekkens toe te passen. Dit toegevoegd debiet wordt verder uitgewerkt in paragraaf 6.2.

3.6.4 Energie per bekken bij normale werking

Figuur 42 toont de energie per bekken (E in W/m^3) bij variatie in afwaartse waterstand. Hieruit blijkt dat gedurende de periode voor optimale werking deze ruim beneden de maatlat van $E_{\max} = 100 \text{ W/m}^3$ blijft.



Figuur 42 – Energie per bekken (W/m^3) bij variatie in afwaarts waterpeil onder normale omstandigheden

3.6.5 Belastingen onder extreme condities

Ook buiten de periode van optimale werking blijft de vispassage zo veel mogelijk open, aangezien afhankelijk van de doelsoorten ook in suboptimale omstandigheden nog passeerbaar kan zijn. Hierbij dient echter wel gecontroleerd te worden of belastingen onder extreme condities niet leiden tot schade of ongewenste situaties. Al eerder werd beschreven dat de verhoogde waterpeilen (zowel op- als afwaarts) niet leiden tot grotere vervallen en dus ook niet tot stroomsnelheden hoger dan die onder normale omstandigheden. Enkel dient in die situaties wel rekening te worden gehouden met een mogelijk hogere vuillast. Dit risico kan echter beperkt en/of voorkomen worden door het voorzien van fysieke bescherming tegen drijfvuil aan zowel de opwaartse instroom als de afwaartse monding.

Een sterke daling van het afwaartse waterpeil kan echter wel zorgen voor een groter verval en dus ook hogere stroomsnelheden in de vispassage. Scenario S4 werd vastgesteld als maatgevend scenario voor belastingen onder extreme condities. Dit scenario bestaat uit een afwaartse waterstand van 1,30 mTAW (laagst gemeten laagwater in bemeeten periode) in combinatie met het opwaarts streefpeil van 5,70 mTAW. Dit geeft een totaal verval van 4,40 m.

Figuur 43 toont het berekende verval per slot en Figuur 44 de gemiddelde stroomsnelheid in het slot bij dit maatgevende extreme scenario S4. Om de invloed van lagere afwaartse waterstanden verder te illustreren zijn in beide figuren ook de vervallen en stroomsnelheden gegeven in geval van een afwaartse waterstand van 1,8 mTAW, 1,5 mTAW en 1 mTAW. In alle gevallen werd voor de opwaartse waterstand uitgegaan van $H_o = 5,7$ mTAW (= opwaarts streefpeil).

Hieruit blijkt dat bij het maatgevende scenario S4 ($H_a = 1,3$ mTAW) het verval over het meest afwaartse slot kan toenemen tot circa 0,30 m, met stroomsnelheden in het slot tot circa 2,1 m/s. Mocht het afwaarts peil nog verder zakken dan kan dat bij een afwaarts peil van 1 mTAW oplopen een verval van circa 0,46 m en gemiddelde stroomsnelheden rond circa 2,5 m/s.

Aangezien de vispassage van Merelbeke zal bestaan uit relatief sterke bouwkundige elementen (betonnen muren/vloeren en stalen damplanken) wordt bij deze stroomsnelheden geen schade verwacht aan de grove constructie. Wel kunnen deze ervoor zorgen dat het bodemsubstraat in de meest afwaartse slots en bekkens wordt weggespoeld. Met de onderstaande formule kunnen maximaal toelaatbare stroomsnelheden bij een bepaalde nominale steendiameter geschat worden (Pilarczyk, 1990).

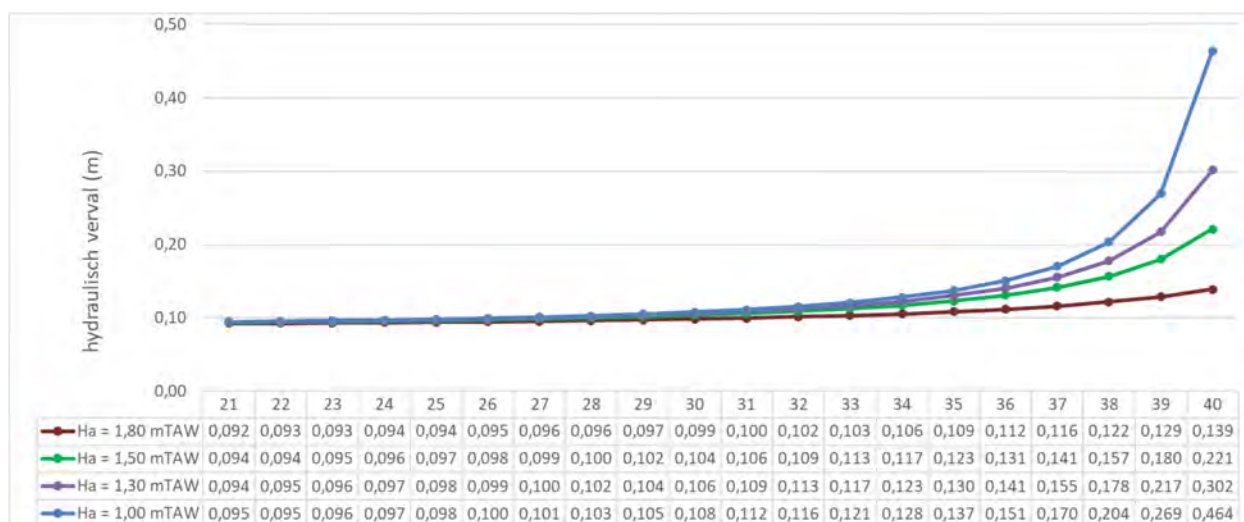
$$\Delta D_{n50} = 0.035 \frac{\Phi}{\Psi} \frac{K_T K_H}{K_S} \frac{u_g^2}{2g} \quad [4]$$

Met:

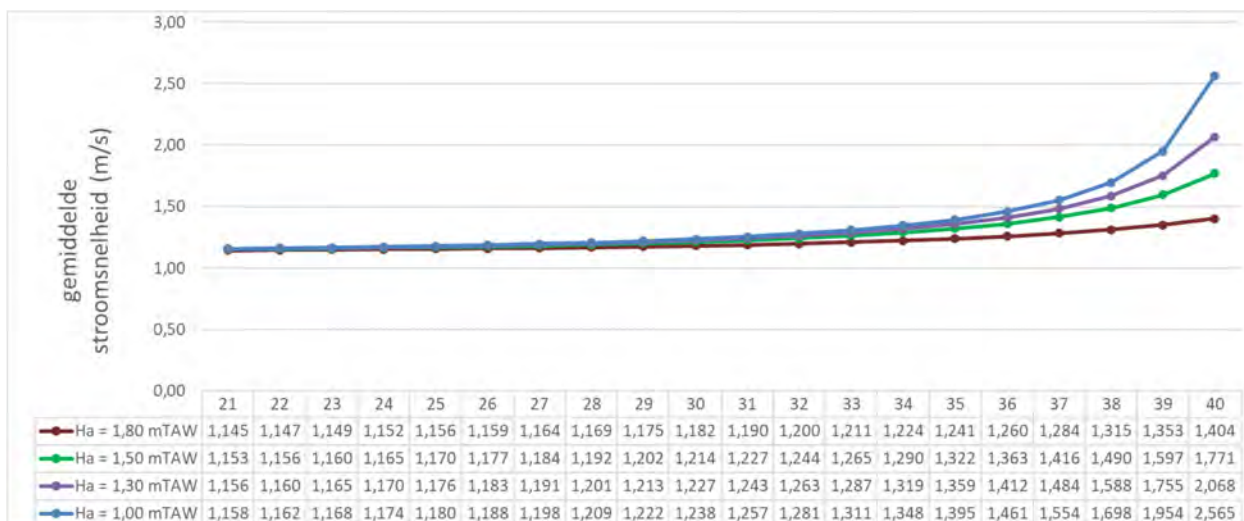
- D_{n50}	Nominale diameter breuksteensortering	[m]
- Δ	Specifieke dichtheid; $\Delta = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}$	[-]
- ρ_s	Dichtheid breuksteen (= 2650 kg/m ³)	[kg/m ³]
- ρ_w	Dichtheid water (= 1000 kg/m ³)	[kg/m ³]
- K_T	Turbulentiefactor (= 1 (normaal) of 1,5 (verhoogd) of 2,0 (hoog))	[-]
- K_h	Diepte- (of snelheidsprofiel) factor	[-]
	$K_h = \left(\frac{h}{D_{n50}}\right)^{-0.2}$ voor een niet volledig ontwikkeld snelheidsprofiel	
- K_S	Hellingfactor = 1 bij horizontale bodem	[-]
- Ψ	Kritische schuifspanningsparameter	[-]
- Φ	Stabiliteitsfactor voor stroming (= 1 voor doorlopende bekleding)	[-]
- u_g	Gemiddelde stroomsnelheid	[m/s]
- g	Valversnelling (= 9.81 m/s ²)	[m/s ²]
- h	Waterdiepte	[m]

In paragraaf 3.5 wordt voor de gewenste steendiameterrange vanuit ecologisch oogpunt een sortering voorgesteld met een nominale steendiameter (D_{n50}) van circa 15 cm. Bij conservatieve toepassing van de bovenstaande formule van Pilarczyk (namelijk met turbulentiefactor van $KT = 2$) volgt hieruit dat deze sortering stroomsnelheden tot circa 1,8 m/s kan weerstaan. Uit Figuur 44 kan vervolgens worden afgeleid dat dergelijke stroomsnelheden kunnen ontstaan bij afwaartse waterstanden lager dan circa 1,5 mTAW.

Bij lagere afwaartse peilen (en dus hogere vervallen) worden stroomsnelheden dusdanig hoog, en waterdieptes in het deel net afwaarts van het laatste slot dusdanig ondiep, dat het bodemsubstraat op deze plaatsen zou kunnen wegspoelen. Om dit te voorkomen wordt voorgesteld om in de automatische sturing van de opwaartse afsluitconstructie een voorwaarde op te nemen waarbij de vispassage zal sluiten bij afwaartse waterpeilen lager dan bijv. 1,5 mTAW (zie verder in hoofdstuk 8).



Figuur 43 – Verval over de meest afwaartse slots bij extreem totaal verval



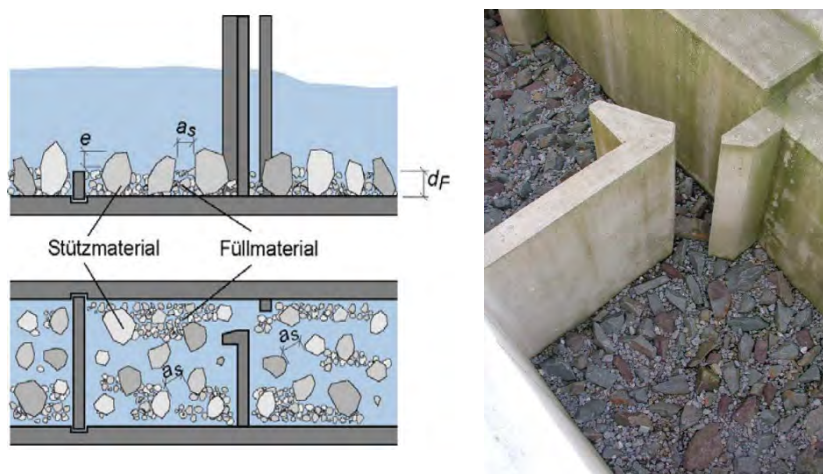
Figuur 44 – Stroomsnelheden in de meest afwaartse slots bij extreem totaal verval

Logischerwijze neemt ook de turbulentie in vooral de meest afwaartse bekkens toe bij extremere vervallen. Bij laagwaterpeilen tot 1,8 mTAW (onderschrijdingskans van 1%) neemt de energie per bekken (E) toe tot circa 60 W/m³, bij 1,5 mTAW tot circa 140 W/m³ en bij 1,3 mTAW tot circa 280 W/m³. Bij deze waterstanden kan niet meer worden voldaan aan de maatlat van $E_{\max} = 100 \text{ W/m}^3$, maar aangezien deze buiten de periode van normale werking vallen en slechts uitzonderlijk en waarschijnlijk kortstondig voorkomen, is dit ook niet vereist.

3.7 Bodemsubstraat

Technische visdoorgangen (zoals vertical slot vispassages) dienen voorzien te worden van een bodemsubstraat met voldoende ruwheid. Door de grotere bodemruwheid wordt de stroomsnelheid aan de bodem op deze wijze namelijk aanzienlijk verlaagd wat er voor 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 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'). Daarnaast is deze ruwheid niet alleen een meerwaarde voor vissen maar ook voor macrozoöbenthos of ongewervelde bodemdierpjes (bv. vlokreeftjes) omdat deze diertjes zich tussen de stenen door in stroomopwaartse richting kunnen bewegen.

Een dergelijk bodemsubstraat kan bestaan uit een vullaag met relatief kleinere steendiameters aangevuld met stoorstenen met een relatief grotere diameter. De stoorstenen kunnen daarbij tussen of op de vullaag worden geplaatst. Daarbij dient dat wel rekening te worden gehouden met voldoende afstand tussen de stenen, voldoende lage stroomsnelheden en voldoende waterdiepte boven de vullaag. DWA (2014) geeft richtlijnen voor optimale steendiameters, afstanden en laagdikte bij een dergelijke aanpak.



Bron: DWA (2014)

Figuur 45 – Voorbeeld aanpak bodemsubstraat met vullaag en stoorstenen

In geval van vispassages met relatief grotere waterdieptes kan ook gekozen worden voor één sortering met voldoende range aan steendiameters. In het geval van de vispassage te Geesthacht werd een sortering toegepast met steendiameters tussen circa 0,09 en 0,22 m (zie foto links in Figuur 46). Gezien de overeenkomst met Geesthacht wordt deze range ook voorgesteld voor de vispassage te Merelbeke. Dit komt neer op rolstenen sortering met een nominale steendiameter (D_{n50}) van circa 0,15 m. De doelstelling hier is verruwing van de bodem met oog op aan de bodemmigrerende soorten, het is daarom van belang om een sortering te kiezen die ook voldoende stenen bevat in de bovenrange van de steendiameter (groter dan 0,15 m).

De bijbehorende laagdikte met oog op voldoende pakking tegen erosie is afhankelijk van de gekozen sortering en wordt meestal verbonden aan $2 \times$ de nominale steendiameter (D_{n50}). In deze toepassing wordt het bodemsubstraat echter niet toegepast als erosiewerende maatregel aangezien onder het substraat nog een betonnen vloer wordt voorzien. In de hydraulische studie wordt uitgegaan van een laagdikte van circa 0,30 m.

Hierbij wordt nadrukkelijk opgemerkt dat met oog op steentype een rolstenen sortering (bijv. Maaskeien) dient te worden gebruikt en niet de relatief 'scherpe' breuksteensortering zoals in de waterbouw meestal toegepast vanuit oogpunt erosiebescherming. Figuur 46 geeft een visueel voorbeeld van een rolstenen bodemsubstraat zoals toegepast te Geesthacht.



DWA, 2014



Schwevers und Neumann, 2012

Figuur 46 – Voorbeeld bodemsubstraat in de vispassage te Geesthacht

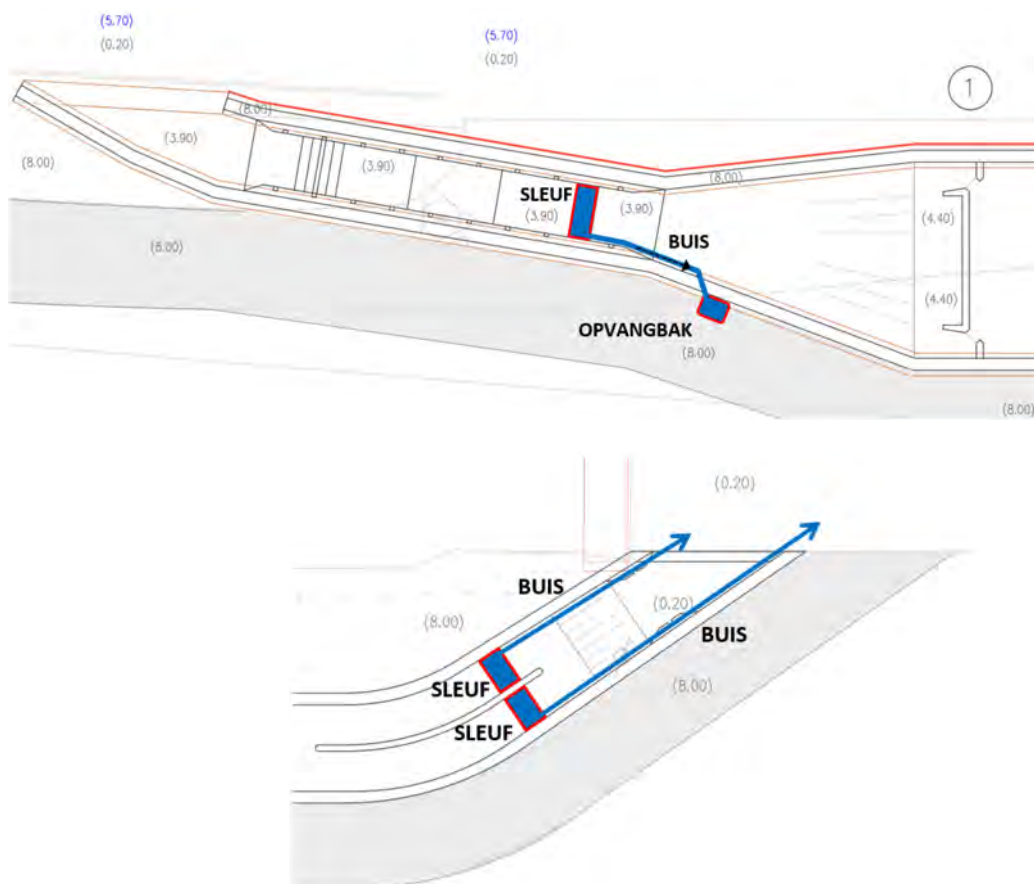
Het substraat dient de bodem van de vispassage volledig (m.a.w. het volledige traject) te bedekken, dus ook ter hoogte van de slots. Dit betekent dat het substraat moet worden doorgetrokken in de slots. Een eventueel onderliggende (betonnen) vloer dient in dat geval dus ook de laagdikte van het substraat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

Mocht er slibafzetting plaatsvinden op de luwere delen in de bekkens 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 slots en in het centrum van de bekkens wordt tevens verwacht dat er altijd delen in het bekken met voldoende ruwheid zullen blijven.

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

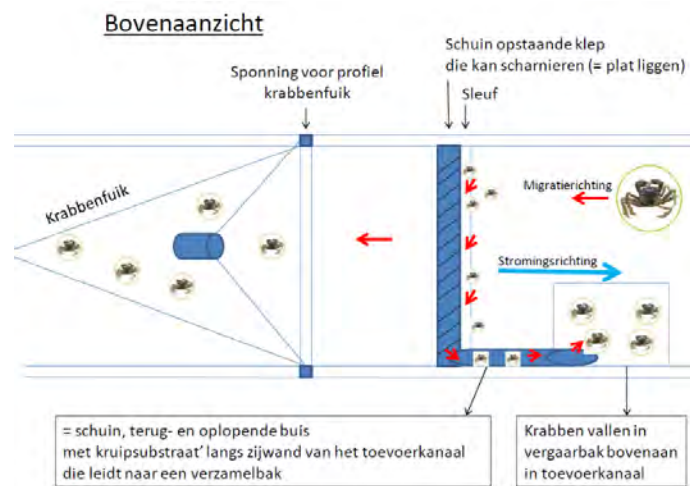
4 Krabbenva

Om te voorkomen dat invasieve soorten, zoals de Chinese wolhandkrab, de vispassage ook gebruiken om stroomopwaarts te migreren, worden er op twee plaatsen in de vispassage sleuven voorzien voor het kunnen plaatsen van krabbenvallen, namelijk één sleuf in de opwaartse monitoringzone en twee sleuven in het afwaartse mondingskanaal (aan weerszijden van de daar aanwezige geleidingswand), zie in Figuur 47 hieronder.

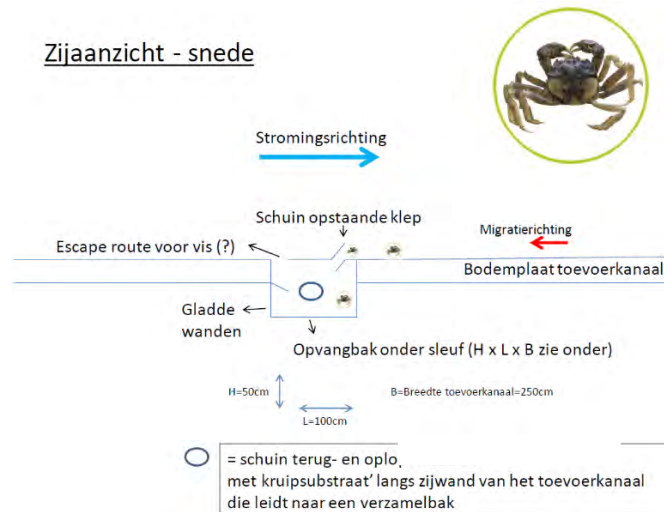


Figuur 47 – Locaties krabbenvallen in de vispassage te Merelbeke

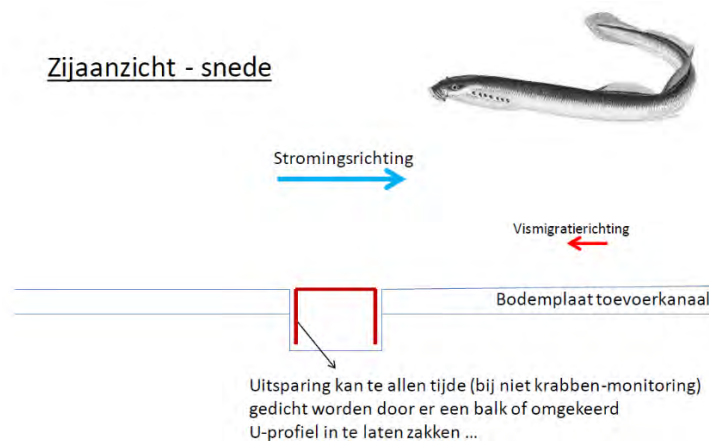
Figuur 48 toont het werkingsprincipe van een krabbenva. Dit principe gaat er vanuit dat krabben niet kunnen 'zwemmen' en dus enkel via de bodem (en/of langs 'ruwe' muren) opwaarts migreren/kruipen tegen de stroom in. De krabbenva zelfs bestaat uit een 'gladde' bak met sleuf (zie voorbeelden in Figuur 49) die over de volledige breedte van de waterloop wordt geplaatst en zo een barrière vormt waar krabben niet langs kunnen. Krabben die opwaarts migreren vallen dan namelijk in deze gladde bakken en kunnen alleen zijdelings weg. Aan de gladde bakken worden aan één of twee zijdes buizen gekoppeld met een ruwe binnenkant. Krabben die in de gladde bak zijn gevallen kunnen alleen langs deze buizen weggkomen. De helling van de buizen wordt daarbij best niet groter dan 45° om nog goed passeerbaar te zijn. Merk op dat ter plaatse van de krabbenvallen ook gladde voorzieningen moeten worden getroffen aan de zijwanden, anders zouden krabben via de zijwanden alsnog rond de krabbenvallen kunnen kruipen.



Zijaanzicht - snede



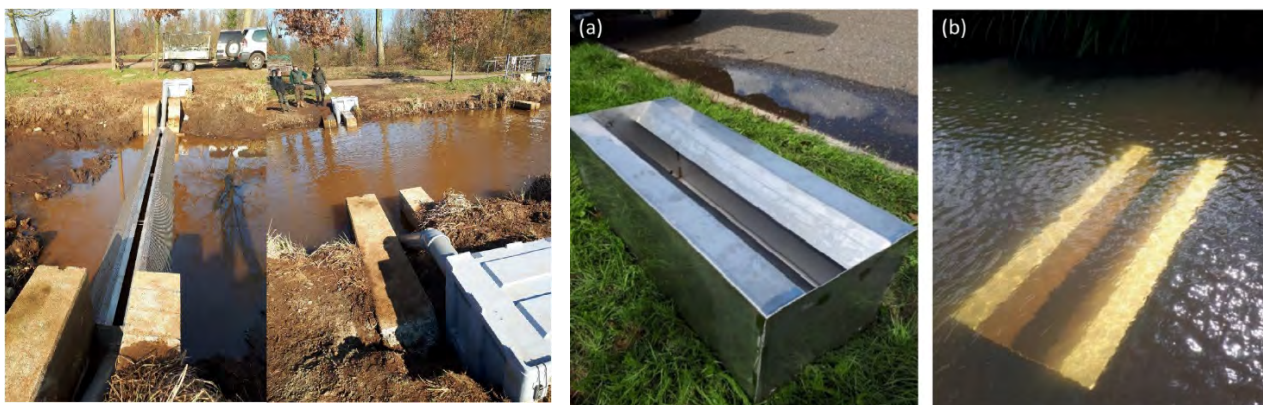
Zijaanzicht - snede



Figuur 48 – Schets werkingsprincipe krabbenval

Hoewel er enige praktijkervaring is met dergelijke krabbenvallen, zijn er ook zaken nog niet goed gekend. Zo is bijvoorbeeld nog niet duidelijk hoe groot de vangefficiëntie is. En heel belangrijk, ook de mogelijke negatieve effecten op aan de bodem migrerende vissoorten zijn nog niet goed gekend. Het is dus van groot belang dat dergelijke krabbenvallen worden geëvalueerd door middel van monitoring en dat ze kunnen worden verwijderd wanneer de negatieve effecten te groot zouden zijn. In dat laatste geval dient de sleuf met oog op bodem migrerende vissen logischerwijze terug gedicht te worden met bijv. een omgedraaide U-ligger (zie zijaanzicht onder in Figuur 48). Om het effect op bodemmigrerende vissen al zo veel mogelijk te beperken wordt de krabbenval best uitgevoerd in een verdiepte sleuf. De dimensies van de sleuven in de betonnen bodem te Merelbeke zijn 0,5 m diep en 1 m lang (in stroomrichting).

Figuur 49 – Voorbeelden van krabbenvallen (links te Grobbendonk)



Bron: Van Loon & Schoelynck, 2019

Voor het verloop van de ruwe buizen bestaan er momenteel twee methodes. De eerste methode is om de buizen langs de zijmuur (omhoog) naar een opvangbak te leiden waar deze worden verzameld en later volgens geldende ethische voorschriften worden vernietigd, zie ook links in Figuur 49 (deze methode is relatief arbeidsintensief). Een tweede/ alternatieve methode is de buizen terug te leiden naar het afwaartse pand waardoor krabben dus niet in het opwaartse pand geraken.

In de vispassage te Merelbeke worden er aanvankelijk alleen krabbenvallen geplaatst in de sleuven in het afwaartse mondingskanaal (zie onderin Figuur 47). Bij deze krabbenvallen wordt de methode met het retoursysteem toegepast waarbij de buizen de krabben dus terug leiden naar het afwaartse pand.

Daarbij dient wel rekening te worden gehouden met de mogelijkheid tot plaasting van schotbalken helemaal afwaarts in de monding voor het kunnen droogzetten van de vispassage. De retour buizen kunnen dus niet over de bodem tot in het afwaartse pand worden getrokken. Dit is ook de reden waarom de sleuven niet volledig aan de afwaartse zijde van het mondingskanaal kunnen worden geplaatst; er moet ruimte blijven om onder een hoek van maximaal 45° een hoogte tot minimaal 6 mTAW te kunnen overbruggen. Ook dient er een mogelijkheid te zijn om de buizen aan een opvangbak te kunnen koppelen om zo de werking te kunnen monitoren. Een goede ruimtelijke inpassing dient hiervoor onderzocht te worden in het bouwkundige ontwerp.

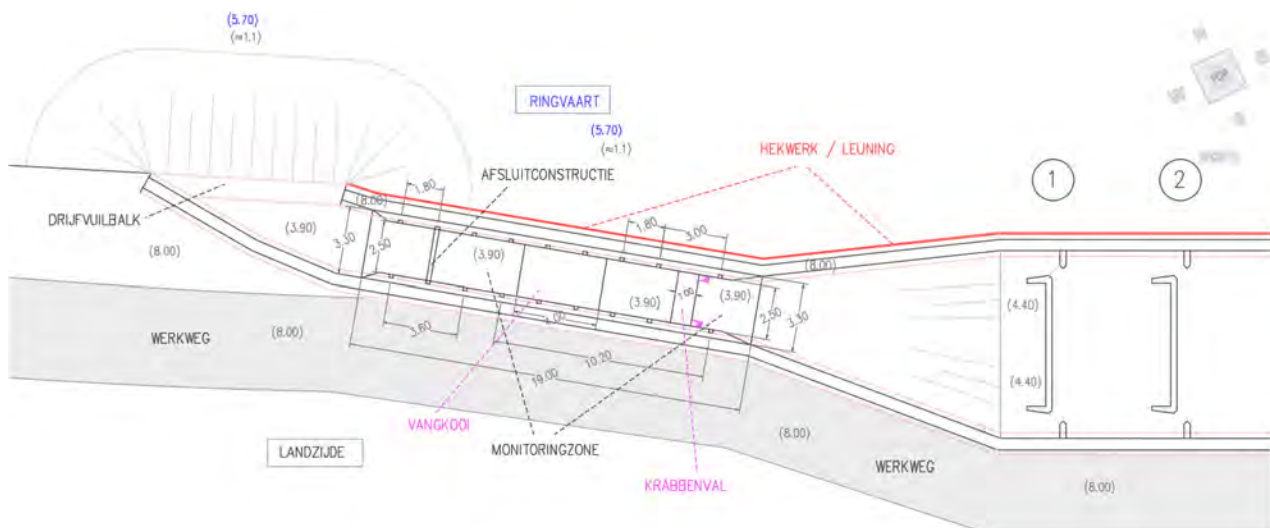
De sleuf in de opwaartse monitoringszone wordt in eerste instantie niet gebruikt als krabbenval, daarom wordt in deze sleuf een omgekeerd U-profiel geplaatst zodat dat deze geen barriere vormt voor de vismigratie. Deze locatie kan vanwege de grote afstand naar het afwaartse pand namelijk alleen als methode met opvangbak worden uitgevoerd. Indien nodig kan deze locatie wel worden ingezet als monitoringslocatie om de effectiviteit van de afwaartse krabbenval te evalueren.

5 Instroom

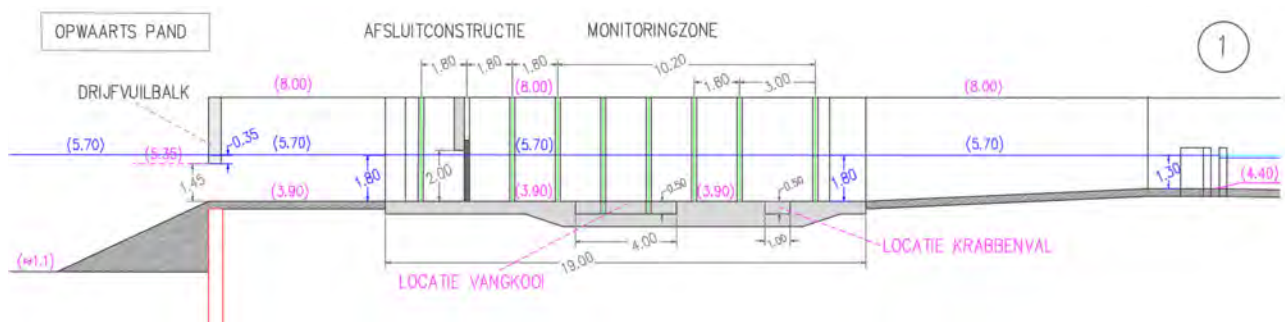
5.1 Dimensionering

Figuur 50 toont het hydraulisch ontwerp voor de instroom. In deze paragraaf wordt eerst de algemene dimensionering van de gehele instroom beschreven, waarna in de andere paragrafen de volgende onderdelen verder worden toegelicht:

- Drijfvuilbalk(en);
- Afsluitconstructie;
- Monitoringzone met mogelijkheid voor plaatsing vangkooi en/of krabbenval;
- Controle van energieverliezen.



Grondplan



Lengtedoorsnede

Figuur 50 – Bovenanzicht en lengtedoorsnede instroom vispassage

Op basis van de controle van de energieverliezen, het benodigde debiet, maximaal toelaatbare stroomsnelheden en praktische vereisten voor de monitoringzone werden de volgende hydraulische dimensies gekozen voor de instroom:

- Natte breedte = 2,5 m (= binnenzijde zijwand tot binnenzijde zijwand);
- Waterdiepte bij streefpeil = 1,8 m (= bodemhoogte op 3,90 mTAW).

Uit de bouwkundige studie door het studie bureau Tractebel volgde dat de zijwanden van de instroom zullen worden uitgevoerd als damwandplanken die op een (locatie afhankelijke) minimale afstand uit elkaar staan (buik-tot-buik). Aan de bovenkant van de damplanken wordt een betonnen kesp toegepast.

Ter plaatse van de afsluitconstructie en de monitoringzone worden betonnen zijwanden en een betonnen vloer toegepast om sponningen in te kunnen voorzien en een (glad) vloeroppervlak te realiseren voor zowel de waterdichtheid en krachtenafdracht van de afsluitconstructie als voor de plaatsing van schotbalken (zie paragraaf 5.3) en monitoringsapparatuur (zie paragraaf 5.4.1). Deze wanden en vloer vormen als het ware een betonnen U-bak tussen de damplanken. De minimaal benodigde dimensies voor de sponningen worden vooral bepaald door de krachtenafdracht van de afsluitconstructie en de op- en afwaartse sponningen voor schotbalken voor droogzetten. In de voorstudiefase werd uitgegaan van een breedte van 20 cm en een diepte van 15 cm. Deze maatvoering dient echter gevalideerd of bepaald te worden in het bouwkundige ontwerp.

Om sponningen met een diepte van 15 cm te kunnen toepassen bleek tevens een minimale muurdikte nodig van 0,40 m (= 25 cm voor wapening + 15 cm voor de sponningdiepte). Bij een minimaal benodigde natte breedte in de instroom van 2,5 m en twee betonnen muurdiktes van 0,40 m worden de damplanken van de zijwanden in de instroom dus 3,3 m uit elkaar geplaatst (buik tot buik).

Zoals eerder aangegeven wordt over de gehele lengte van de zone met de afsluitconstructie en monitoringzone een betonnen vloer voorzien. Op- en afwaarts van deze betonnen vloer wordt het rolstenen bodemsubstraat toegepast zoals ook toegepast in de bekkens (zie paragraaf 3.7). Het bodempeil van de gehele instroom ligt op 3,90 mTAW. Afwaarts van de monitoringzone loopt de bodem langzaam op tot een hoogte van 4,40 mTAW ter plaatse van het eerste slot (waterdiepte in slot bij opwaarts streefpeil is daarmee 1,3 m). De natte breedte (afstand tussen damplanken) neemt daarbij toe van 3,3 m (net na de monitoringzone) tot de bekkenbreedte van 9 m (ter plaatse van de slots).

Aan opwaartse zijde van de instroom wordt een drijfvuilbalk toegepast (zie volgende paragraaf). Het bodempeil in de stuwgeul ter plaatse van de instroom wordt op basis van bathymetrische metingen geschat op circa 1,1 mTAW. Vanuit het oogpunt van zowel op- als afwaartse migratie dient het bodempeil van de instroom geleidelijk en best zo flauw mogelijk (maximaal 1:2) te worden aangesloten op het bodempeil van het opwaarts pand (DWA, 2014). Om de lengte van de instroom te beperken werd vanuit bouwkundig oogpunt gekozen voor een overgang (helling) in de stuwgeul zelf. Voor deze aanvulling kan een breuksteenstorting worden toegepast van 5/40 kg, wel dienen deze stenen gefixeerd te worden met beton en goed aan te sluiten op de rolstenen sortering in de instroom zelf. Er mogen daarbij geen opstaande randen ontstaan.

Op basis van de dagelijkse peilschommelingen (vooral in afwaarts waterpeil vanwege tij) varieert het debiet door de vispassage, en daarmee dus de instroom, van circa 2,4 m³/s tot 1,5 m³/s, wat zorgt voor een gemiddelde stroomsnelheid van respectievelijk 0,3 tot 0,5 m/s in de instroom (zie verder in paragraaf 5.5).

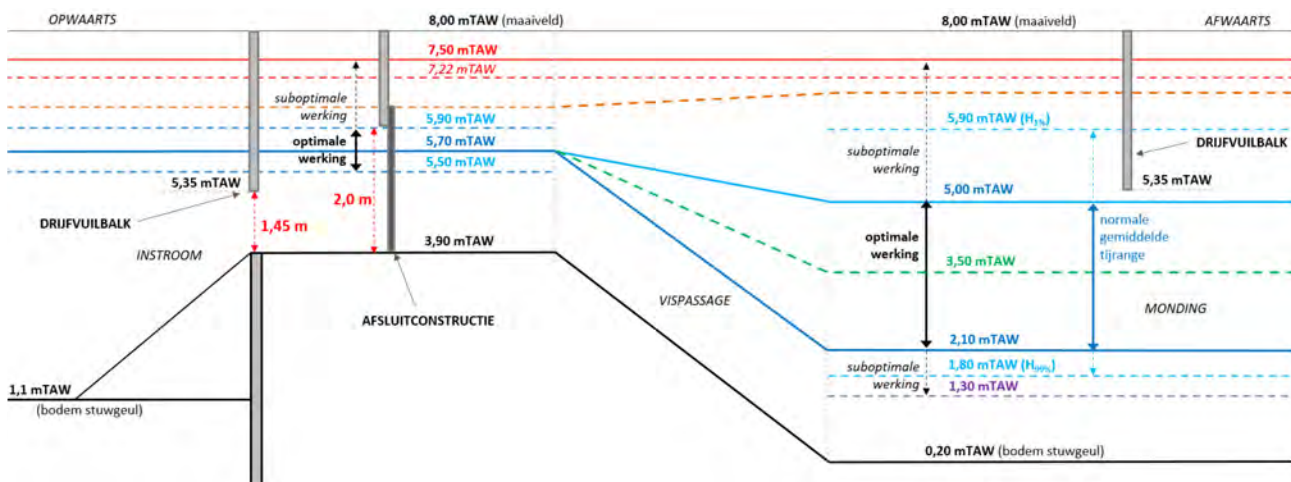
5.2 Drijfvuilbalk(en)

Zoals aangegeven in paragraaf 2.3.4 dient de vispassage optimaal te kunnen werken bij de volgende waterpeilen (zie ook Figuur 51):

- Opwaartse waterpeilen tussen 5,50 m TAW en 5,90 m TAW;
- Afwaartse waterpeilen tussen 2,10 m TAW en 5,00 m TAW.

Daarbij werd echter opgemerkt dat de vispassage vanuit migratie-oogpunt idealiter ook open blijft bij opwaartse waterpeilen hoger dan 5,90 m TAW en afwaartse waterpeilen hoger dan 5,00 m TAW, aangezien hierdoor ook in deze situaties nog een (sub)optimale passage mogelijk blijft afhankelijk van de vissoort. In deze situaties is het verval altijd kleiner dan onder normale werking waardoor de hydraulische belastingen lager zijn en er dus geen reden voor sluiting is met oog op risico op schade.

Wel dient er rekening te worden gehouden met een eventueel verhoogde vuillast bij hoogwatersituaties. Maar ook onder normale werking dient de instroom van drijfvuil zo veel mogelijk voorkomen te worden aangezien vertical slots relatief gevoelig zijn voor verstopping. Daarom worden zowel aan op- als afwaartse zijde drijfvuilbalken voorzien (zie grijze balken links en rechts in Figuur 51). De afwaartse drijfvuilbalk wordt voorzien omdat de stroomrichting in de vispassage kan omdraaien bij extreem hoogtij aan afwaartse zijde (zie verderop in deze paragraaf).



Figuur 51 – Schematische lengtedoorsnede met maatgevende peilen, afsluitconstructie en voorzieningen tegen drijfvuil

Voor een optimale werking wordt geadviseerd dat een drijfvuilbalk tot 15 cm onder het normale waterpeil vuil dient te kunnen afleiden (Coenen *et al.*, 2013). Aangezien het laagste opwaartse peil onder normale werking 5,50 m TAW is, dient de balk aan opwaartse zijde dus tot 5,35 m TAW in de waterkolom te kunnen reiken. In die situatie is er dan nog een waterdiepte van 1,45 m onder de balk aanwezig, wat nog boven het passeerbaarheids criterium voor minimale diepte ($h_{\min} = 1-1,5$ m) is.

Het is van groot belang dat de drijfvuilbalk helemaal aan de opwaartse zijde van de instroom en parallel aan de stuwwaai wordt geplaatst. Op deze wijze blijft het drijfvuil namelijk niet hangen in de instroom maar wordt verder geleid langs het kanaal. Bij toepassing van de drijfvuilbalk iets afwaarts in de instroom zou deze werken als vuilvang en dus veel onderhoud vergen.

Bij uitvoering van een vaste balk (aan opwaartse zijde) kan deze deel uitmaken van de stabiliteitsconstructie en doorlopen tot maaiveld. Bijkomend voordeel is dat de kans op breken door bv. grof drijfvuil klein is. Ook komen er geen over mekaar bewegende onderdelen aan te pas, zodat het geheel onderhoudsarm is. Deze uitvoering geeft echter wel relatief meer energieverliezen dan bij een uitvoering van de drijfbalk als drijvende constructie (zie paragraaf 5.5.4). Bij een drijvende (bv. houten) balk neemt de opening onder de balk namelijk toe, waardoor de snelheid en bijhorende ladingsverliezen, beperkt kunnen worden gehouden. Ook hierbij moet dan weer uitgegaan worden van een balk die 15 cm onder water zit, conform de aanbeveling in Coenen *et al.* (2013). In principe zijn energieverliezen en stroomsnelheden bij toepassing van een vaste balk tot 5,35 m TAW nog toelaatbaar (zie paragraaf 5.5.4). Er werd in het bouwkundig ontwerp uiteindelijk gekozen voor een vaste balk.

Merk op dat 'zweefvuil' door de onderwateropening onder de drijfvuilkalk logischerwijze wel tot in de vispassage kan geraken, maar gezien de relatief grote slotbreedte (0,7 m) en de relatief kleinere grootte van zweefvuil (ten opzichte van drijfvuil) wordt het risico op verstopping klein geacht.

Bij extreem hoogtij kan de afwaartse waterstand hoger worden dan de opwaartse waterstand (zie oranje gestippelde lijn in Figuur 51) waardoor de stroomrichting in de vispassage omdraaid. In normale omstandigheden kan dit enkel gebeuren bij afwaartse waterstanden hoger dan het opwaarts streefpeil van circa 5,5-5,9 mTAW. Daarom dient er ook aan afwaartse zijde een constructie te worden voorzien om de instroom van drijfvuil tegen te gaan. De onderkant van deze drijfbalk dient net als de opwaartse balk te reiken tot 5,35 mTAW. Dit is 15 cm onder het eerste waterpeil waarbij de stroming zou kunnen omkeren, namelijk 5,50 mTAW.

5.3 Afsluitconstructie

In de vispassage dient een automatisch geregelde afsluitconstructie voorzien te worden, in eerste instantie met oog op peilbeheer voor o.a. de scheepvaart en ook om de vispassage te kunnen afsluiten voor onderhoud en eventueel andere (beheer)randvoorwaarden. Met oog op constructietype is in overleg met het studiebureau en DVW gekozen voor een hefschuif, aangezien dit het meest optimale en ook toegepaste type is in dergelijke condities.

Zoals aangegeven in paragraaf 2.3.4 dient de vispassage met oog op werking van de vispassage optimaal te kunnen werken bij de volgende waterpeilen (zie ook Figuur 51):

- Opwaartse waterpeilen tussen 5,50 m TAW en 5,90 m TAW;
- Afwaartse waterpeilen tussen 2,10 m TAW en 5,00 m TAW.

Ook werd aanbevolen om de vispassage open te houden bij hogere waterpeilen aangezien er geen risico is op schade in de vispassage en er zo toch ook nog (suboptimale) passage mogelijk blijft.

In tegenstelling tot verhoogde waterpeilen is er bij extreem laag afwaarts waterpeil mogelijk wel risico op het wegspoelen van het bodemsubstraat in het afwaartse deel van de vispassage (zie paragraaf 3.6.5). Daarom wordt voorgesteld om in de automatische regeling van de afsluitconstructie een voorwaarde voor sluiting op basis van te laag afwaarts waterpeil op te nemen (zie paragraaf 8.2).

DVW heeft besloten om in het ontwerp van de vispassage ook de mogelijkheid te voorzien om de vispassage te kunnen afsluiten bij afwaartse waterpeilen hoger dan het opwaartse streefpeil in het Groot Pand (= negatief verval). Momenteel zijn de stuwen niet 'dubbelkerend' en zou het dus ook niet nodig zijn om de vispassage te kunnen afsluiten bij negatief verval. Maar het is wel gepland om in de nabije toekomst te onderzoeken of de stuwen in kader van SIGMA hierop aangepast dienen te worden. Daarom dient de afsluitconstructie van de vispassage al voorzien te worden op de mogelijkheid voor kering bij negatief verval. Onder normale omstandigheden kan dit enkel gebeuren bij afwaartse waterstanden hoger dan het opwaarts streefpeil van circa 5,5 – 5,9 m TAW.

Om de afsluitconstructie droog te kunnen zetten, worden aan op- en afwaartse zijde van deze hefschuif schotbalksponningen voorzien. Ook aan afwaartse zijde zijn schotbalken noodzakelijk aangezien het hoogwater aan afwaartse zijde door tijwerking in de dagelijkse omstandigheden kan stijgen tot circa 5 à 6 m TAW. De afstand tussen de sponningen voor de hefschuif zelf en de sponningen voor het droogzetten werd in voorstudie fase gelijk gekozen aan de afstand tussen de sponningen in de monitoringzone (zie volgende paragraaf), namelijk 1,8 m. Deze afstanden en ook de sponningbreedte en -diepte zullen verder uitgewerkt en/of gevalideerd worden in het bouwkundig ontwerp.

Tenslotte dient de vispassage droog gezet te kunnen worden voor onderhoud. Aan opwaartse zijde kan dit worden gedaan doormiddel van de sluiting van de hefschuif of plaatsen van schotbalken. Daarnaast is ook aan afwaartse zijde een afsluiting nodig. Deze afwaartse sluiting wordt voorzien door middel van schotbalken net opwaarts van de monding, zodat de gehele vispassage (inclusief mondingskanaal en krabbenvallen)

droog gezet kan worden. Aangezien wordt verwacht dat onderhoudswerken enkel onder normale tij- en afvoercondities zullen worden uitgevoerd wordt voor de maximale keerhoogte van de afwaartse schotbalken uitgegaan van 6 mTAW.

Op basis van het bovenstaande worden de volgende uitgangspunten voor de afsluitconstructie toegepast:

- Met oog op peilbeheer moet de vispassage (automatisch) kunnen worden afgesloten bij te laag opwaarts waterpeil. Voor deze voorwaarde wordt momenteel uitgegaan van 5,50 m TAW, maar kan in het automatisch regelscript worden uitgevoerd als instelbare waarde (zie verder in paragraaf 8.2);
- De vispassage moet kunnen worden afgesloten onder normale omstandigheden voor onderhoud. Voor normale omstandigheden wordt uitgegaan van een maximaal op- en afwaarts waterpeil van 6 m TAW. Dit betekent dat de afsluitconstructie onder normale omstandigheden water moet kunnen keren tot 6 m TAW aan opwaartse zijde. Ook zal aan afwaartse zijde (ter plaatse van de monding) een afsluitingsmogelijkheid moeten worden voorzien door middel van schotbalken tot 6 m TAW, om de vispassage droog te kunnen zetten. Merk op dat hierbij dus wordt uitgegaan van het feit dat er geen onderhoudswerkzaamheden worden voorzien bij extreem hoogtij (hoger dan 6 m TAW);
- Op vraag van DVW wordt de afsluitconstructie 'dubbel-kerend' uitgevoerd. Dit betekent dat de afsluitconstructie bij afwaartse waterpeilen hoger dan circa 5,70 m TAW voorkomt dat water door de vispassage naar het opwaarts pand kan stromen. Het maximale waterpeil in de bemeeten periode 1996 tot 2018 was 7,22 m TAW, alarmpeil is 7,50 m TAW en het SIGMA-peil is 8 mTAW. In de historische metingen bleek het negatieve verval tussen het afwaartse pand en het opwaarts pand te kunnen oplopen tot circa 1 m (zie ook Figuur 18). Merk op dat de stuwen in deze situaties echter volledig open waren en er dus water naar het Groot Pand kon stromen. Indien de stuwen in de toekomst dubbel-kerend worden gemaakt kan/zal dit negatieve verval logischerwijze toenemen;
- De maximale vrije doorstroomhoogte onder de topwand van de afsluitconstructie is 2 m, namelijk van 3,90 m TAW (= bodemhoogte instroom) tot 5,90 m TAW (= onderkant topwand en bovengrens dagelijkse waterstand schommeling).
- De natte breedte van de afsluitconstructie wordt gelijk gekozen aan de breedte van de instroom zelf, namelijk 2,5 m. Indien vanuit bouwkundig oogpunt een versmalling benodigd is, kan naar alle waarschijnlijkheid een kleinere natte breedte worden toegelaten vanuit hydraulisch oogpunt. Op basis van ervaring uit andere studies is een breedte van 2 m allicht haalbaar, maar een controle van de energieverliezen is nodig. Vanuit praktisch oogpunt blijven de op- en afwaartse schotbalken voor droogzetting daarbij wel best een breedte van 2,5 m behouden.

Uitgaande deze uitgangspunten geeft Tabel 14 een overzicht van de maatgevende combinaties van maximale hydraulische belastingen.

Tabel 14 – Maatgevende combinaties van hydraulische belastingen op de afsluitconstructie

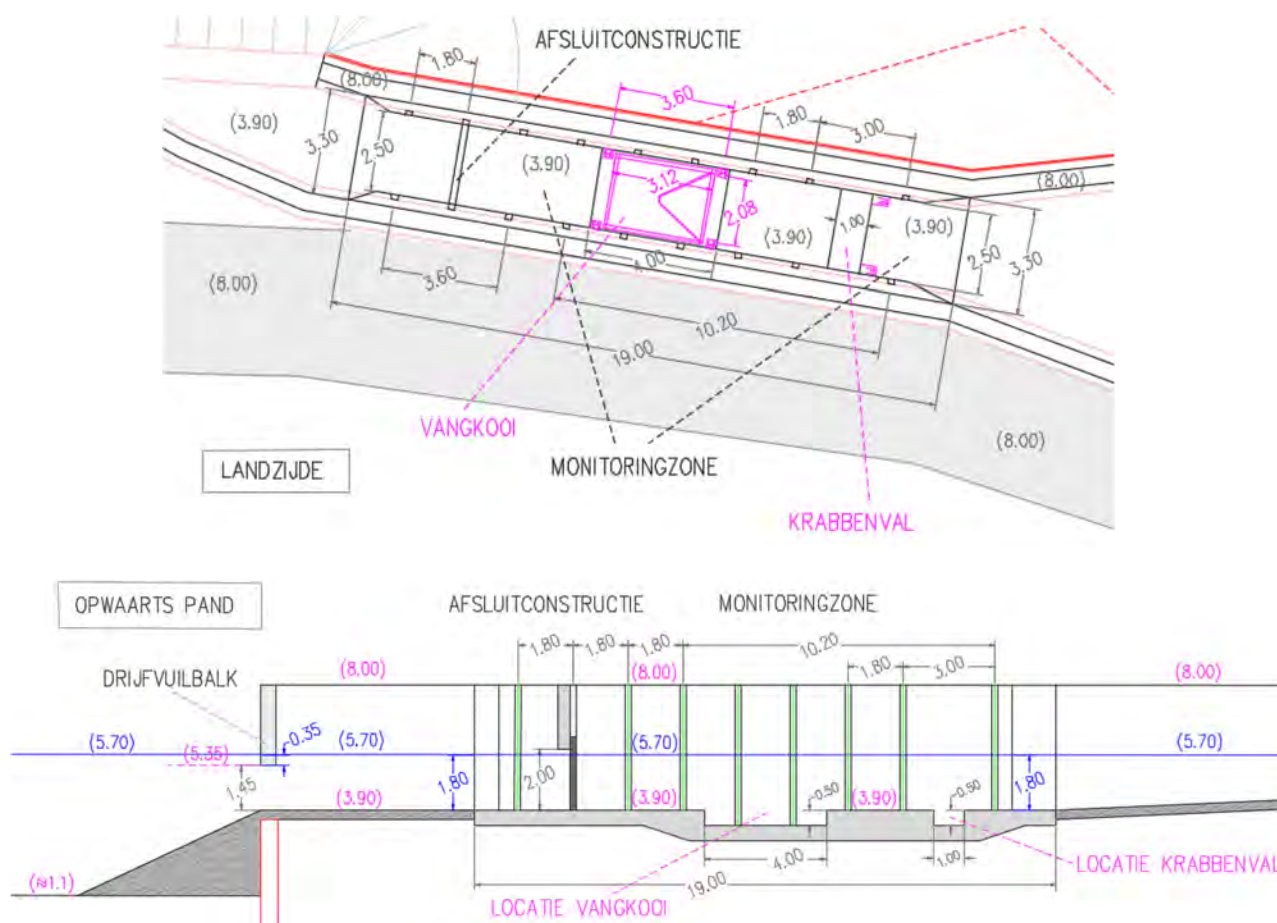
Omschrijving	Opwaartse waterpeil [m TAW]	Afwaarts waterpeil [m TAW]	Verval over constructie [m]
Sluiting vispassage algemeen (instroom niet leeggepompt)	6,00	4,40	1,60
Droogstaande vispassage voor onderhoud (instroom leeggepompt)	6,00	3,90	2,10
Negatief verval (buiten houden extreem hoogtij)	5,70	8,00	-2,30
Verval na extreem hoog opwaarts peil	7,50 – 6,00	6,50 – 5,00	± 1

5.4 Monitoringzone

In de opwaartse instroom wordt net afwaarts van de afsluitconstructie een zone voorzien voor monitoring. Figuur 52 toont een zoom in van deze monitoringzone. Totale lengte van de monitoringzone is circa 10 tot 13 m en de (natte) breedte ter plaatse is 2,5 m (zie algemene dimensionering instroom in paragraaf 5.1).

In deze zone worden de volgende onderdelen voorzien:

- Sponningen voor plaatsen fuiken en/of andere monitoringsapparatuur;
- Ruimte voor de mogelijke plaatsing van een vangkooi;
- Sleuf voor krabbenval.



Figuur 52 - Monitoringzone

5.4.1 Sponningen

In de monitoringzone dienen sponningen te worden voorzien voor de bevestiging van monitoringsapparatuur (zoals bijv. fuiken). Er worden zes paar sponningen in deze zone voorzien: vijf opwaarts van de krabbenval en één afwaarts.

De afstand tussen de sponningen opwaarts van de krabbenval werd uniform gekozen op 1,8 m (hart-op-hart). Deze tussen afstand is gekozen op basis van de lengte van de vangkooi (zie volgende paragraaf). De mogelijke vangkooi bevindt zich namelijk op dezelfde locatie als de fuiken maar worden logischerwijze nooit gelijktijdig ingezet.

Door ook een gelijke afstand en overspanningsbreedte (2,5 m) te kiezen is standaardisatie en uitwisseling mogelijk. Vanwege deze uitwisselingsmogelijkheden wordt ook gekozen om dezelfde sponningdiepte en -breedte toe te passen als benodigd voor de schotbalken voor droogzetten afsluitconstructie, namelijk sponningdiepte 0,15 m en -breedte 0,20 m (zie paragraaf 5.1).

Voor de plaatsing van meet- en monitoringsapparatuur kunnen dan standaard frames worden toegepast. Zo kan bijvoorbeeld in het geval van fuiken in één van de afwaartse sponningen een frame worden geplaatst waaraan de keel van de fuik is bevestigd. Gelijktijdig kan dan in één van de opwaartse sponningen een frame worden geplaatst met de aanhechtingspunten (palen) waarop de fuik kan worden opgespannen. In een ander voorbeeld kunnen frames met bijvoorbeeld (tel-)camera's worden geplaatst.

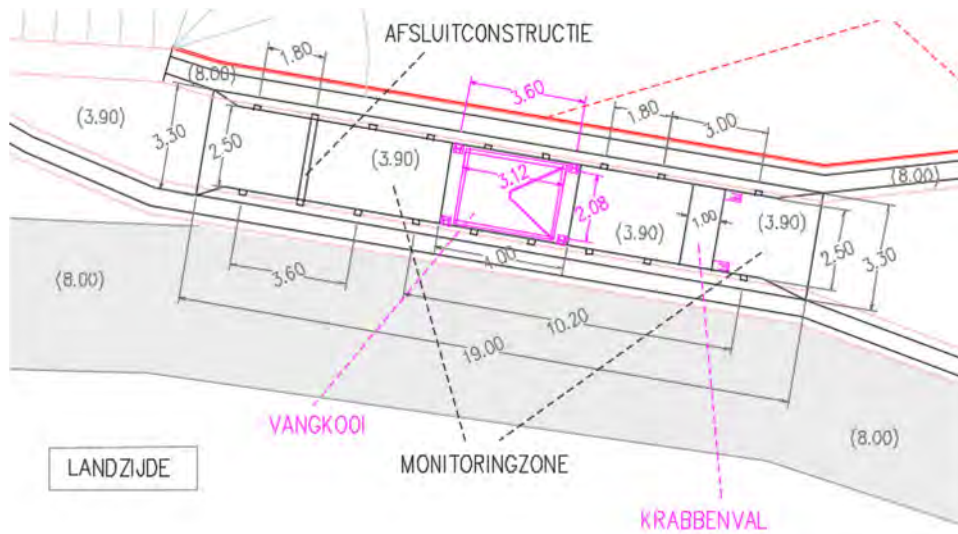
5.4.2 Vangkooi

In de instroom wordt de mogelijke toepassing en plaatsing van een vangkooiconstructie voorzien. Figuur 53 toont een principeschets. Een eerste schetsmatige uitwerking wordt gegeven in *Bijlage 1 – Schetsontwerp vangkooi* en is gebaseerd op de al gerealiseerde vangkooi op de Roer te Roermond in Nederland (zie Figuur 54). Een vangkooi is een monitoringsconstructie die werkt als een fuik. De kooi kan door middel van een motor langs geleiders op- en neer uit het water worden gehaald. Dit maakt gedetailleerd en uitgebreid onderzoek mogelijk. Door verschillende toepassingen van spijlbreedtes kan ook gericht gemonitord worden op specifieke soorten.

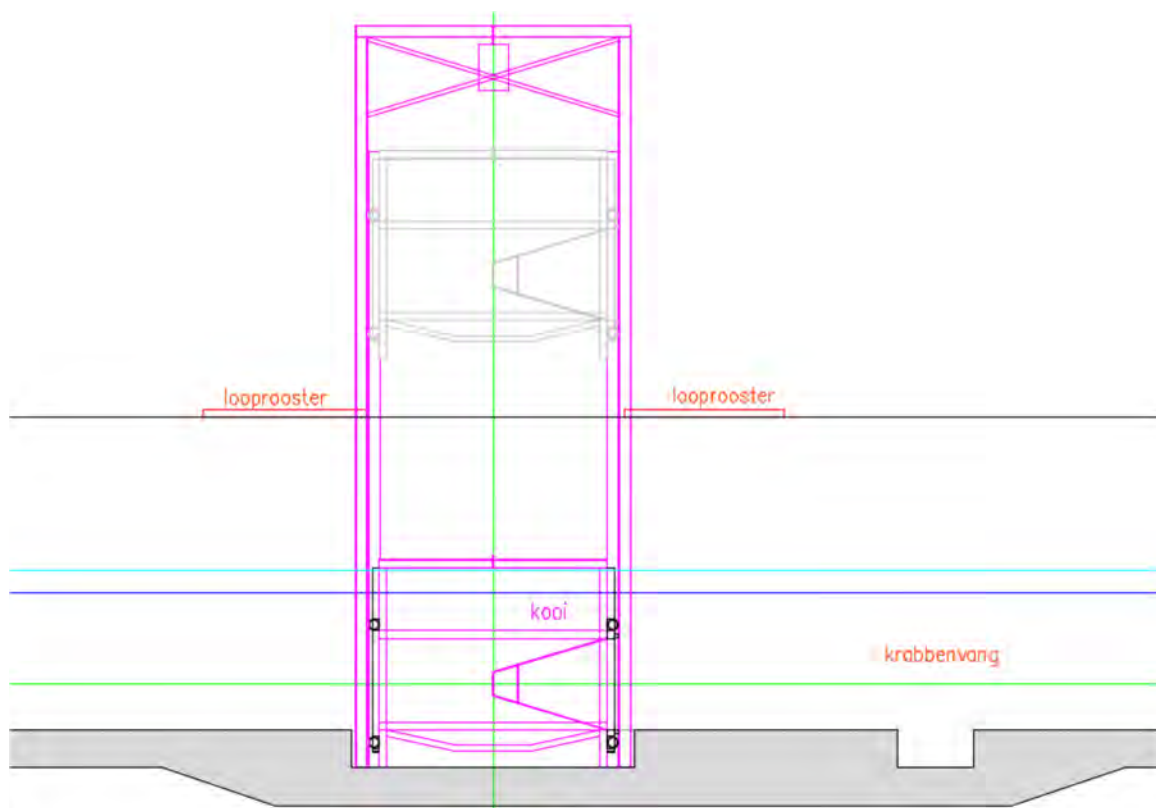
Gezien het belang van de vispassage te Merelbeke binnen het Schelde-estuarium zou dit een grote meerwaarde hebben, zowel voor fundamenteel onderzoek als voor educatieve doelstellingen (bezoekerscentrum voor scholen, verenigingen, universiteiten of andere geïnteresseerden). Dergelijke kooien worden wereldwijd toegepast. Voorbeelden relatief dichtbij zijn te bezichtigen in onder andere Nederland (bijv. op de Roer te Roermond; zie ook foto's in *Bijlage 1 – Schetsontwerp vangkooi*), Wallonië (bijv. op de Maas te Lixhe) en Duitsland (bijv. op de Elbe te Geesthacht, op de Iler te Altusried en op de Sieg te Buisdorf).

De bouw en realisatie van de vangkooi vormen onderdeel van een apart project, maar bij de aanleg van de vispassage in het onderhavig project wordt al wel rekening gehouden met voorzieningen die de latere plaatsing mogelijk maken. Hiervoor dienen de volgende zaken in het bouwkundig ontwerp te worden opgenomen:

- Verdieping in de betonnen vloer van 0,50 m over een afstand van 4 m. Deze verdieping is nodig om de hydraulische weerstand van de opvangbak onder in de kooi te beperken en de onderkant van de keel van de kooi goed op de lokale bodem te kunnen laten aansluiten. Wanneer de vangkooi niet wordt toegepast dient deze verdieping te worden opgevuld (bijv. met omgekeerde U-bakken; geldt ook voor de verdieping van de krabbenval (zie volgende paragraaf);
- De draagkracht van de betonnen vloer (en zijwanden) ter plaatse van de kooi dient voldoende te zijn om de een kracht tot circa 5000 kg te kunnen afleiden naar de bodem. In het huidig schetsontwerp wordt deze kracht afgeleid via vier H-kolommen (zie *Bijlage 1 – Schetsontwerp vangkooi*), maar ook een andere uitvoering is mogelijk. Merk op dat idealiter enige veiligheidsmarges worden opgenomen ten aanzien van het momenteel geschatte maximale gewicht van 5000 kg aangezien het ontwerp voor de kooi nog niet definitief is. Nu is het maximale gewicht gebaseerd op het voorbeeld ontwerp te Roermond;
- Voldoende sterkte en verbindingsmogelijkheden in de betonnen zijwanden voor de eventueel verbinding/verankering van de steunpalen aan deze wanden. Langskrachten die hierbij kunnen optreden zijn momenteel nog niet gekend. Mogelijk kan er wel al voldoende sterkte worden opgenomen om wat marge te hebben.



Bovenaanzicht ruimtelijke inpassing



Principe schets langsdoorsnede

Figuur 53 – Mogelijke vangkooi



Figuur 54 – Voorbeeld vangkooi op de Roer te Roermond (NL)

5.4.3 Sleuf krabbenva

In de monitoringzone wordt een sleuf in de bodem voorzien voor het plaatsen van een krabbenva om de effectiviteit van de krabbenva in de monding te kunnen monitoren. Voor het principe van de werking van een krabbenva wordt verwezen naar hoofdstuk 4. Wanneer deze niet wordt gebruikt voor monitoring dient deze sleuf afgesloten te worden met een omgekeerd U-profiel zodat deze geen obstakel vormt voor vismigratie, zie ook onder in Figuur 48.

5.5 Controle energieverliezen

5.5.1 Criteria

Het vispassagedebiet wordt – naast uiteraard de geometrie van de passage zelf en het afwaartse waterpeil – vooral bepaald door het opwaartse waterpeil aan het eerste slot. Als dit waterpeil te veel verschilt van het waterpeil in het opwaartse pand van de Ringvaart, met andere woorden als de ladingsverliezen in de instroom te groot zijn, zou dit een te sterke daling van het vispassagedebiet betekenen. Bovendien zouden de stroomsnelheden in bepaalde delen van de instroom door te grote energieverliezen niet meer kunnen voldoen aan de ontwerpcriteria (zie paragraaf 2.2.4). Daarom is het van belang om de instroom zodanig te ontwerpen dat de ladingsverliezen beperkt blijven.

Het voornaamste criterium is het beperken van de invloed van de ladingsverliezen op de stroomsnelheden in de instroom. Als maatlat voor de maximale stroomsnelheden wordt de kruissnelheid van 0,5 m/s toegepast (zie paragraaf 2.2.4). Daarnaast is het ook wenselijk dat het verval over de instroom door de (lokale) energieverliezen niet te groot wordt waardoor de waterdiepte in het meest opwaartse slot, en dus het vispassagedebiet, te veel wordt beïnvloed. Idealiter is deze invloed zo beperkt mogelijk, richtlijn maximaal 2 tot 5 cm.

5.5.2 Randvoorwaarden

De berekeningen gebeuren voor een streefpeil in het opwaarts pand van de Ringvaart van +5,70 m TAW en bijhorend ontwerpdebet. Daarnaast worden ook peildalingen van -10 cm en -20 cm en peilstijgingen van +10 cm en +20 cm beschouwd. Afhankelijk van de grootte van het opwaartse waterpeil varieert ook de grootte van het vispassagedebiet (zie Figuur 27). Als het afwaarts peil voldoende laag blijft, heeft het geen invloed op het vispassagedebiet (zie Figuur 32) en blijft het verval over het meest opwaartse slot gelijk. Verder toont Figuur 32 aan dat hogere afwaartse waterpeilen een lager vispassagedebiet (voor dezelfde slotdiepte) geven, en dus kleinere stroomsnelheden en bijhorende ladingsverliezen. Anders gezegd: als de ladingsverliezen bij $H_a = 2,10$ m TAW voldoende klein blijven, zal dat zeker het geval zijn bij hogere afwaartse waterpeilen. Het is dus niet nodig om andere afwaartse waterstanden te controleren.

Tabel 15 geeft een overzicht van de beschouwde randvoorwaarden, waarbij het debiet werd bepaald met een afwaarts waterpeil gelijk aan $H_a = 2,10$ m TAW (= afwaarts peil waarbij grootste vispassagedebiet ontstaat bij normale werking) en in de veronderstelling dat de ladingsverliezen verwaarloosbaar zijn (= initiële aanname dat het opwaarts waterpeil doorzet tot net opwaarts van het eerste slot). Deze randvoorwaarden vormen dan het vertrekpunt van de iteratieve berekeningen van de werkelijke energieverliezen (zie verder 5.5.3).

Tabel 15 – Beschouwde hydraulische randvoorwaarden voor controle van de ladingsverliezen

Peil opwaarts pand Ringvaart	Waarde [m TAW]	Vispassagedebiet [m³/s]	Waterdiepte slot [m]	Verval opwaartse slot [m]
Streefpeil – 20 cm	5,50	1,74	1,1	0,09
Streefpeil – 10 cm	5,60	1,90	1,2	
Streefpeil	5,70	2,06	1,3	
Streefpeil + 10 cm	5,80	2,21	1,4	
Streefpeil + 20 cm	5,90	2,37	1,5	

5.5.3 Berekening

Het totale ladingsverlies dat optreedt tussen de intrede en het eerste slot wordt berekend door de instroomconstructie op te splitsen in verschillende segmenten (zie Figuur 55), waarbij wordt aangenomen dat het ladingsverlies in elk segment apart van de andere segmenten kan berekend worden. De verschillende verliezen worden per segment als volgt veroorzaakt:

1. De instroom start met een schuine intrede onder een drijfvuilbalk;
2. Na de drijfvuilbalk stroomt het water onder een bepaald verhang verder door naar de afsluitconstructie;
3. De afsluitconstructie en monitoringzone zijn smaller dan de instroom en zijn voorzien van een aantal sponningen. Naast de versmalling (opwaarts), de verbreding (afwaarts) en de sponningen treedt er ook een verhang op. De uitsparingen in de bodem zijn in normale omstandigheden opgevuld met een (metalen) afsluitstuk resp. krabbensleuf en worden verder niet apart beschouwd;
4. Na de monitoringzone treedt een verbreding op met tegenhelling, tot aan het eerste slot.

Aangezien er subkritische stroming optreedt dienen de berekeningen van af- naar opwaarts te gebeuren. Dit betekent dat de berekeningen iteratief moeten worden uitgevoerd. Bij de eerste berekening wordt aan de afwaartse rand, *i.e.* het meest opwaartse vertical slot, een waterpeil en bijhorend debiet aangenomen uit Tabel 15. Daarna worden alle ladingsverliezen berekend tot opwaarts van de drijfvuilbalk, wat vervolgens gecontroleerd wordt met de opwaartse randvoorwaarde, namelijk het waterpeil in het opwaartse pand.

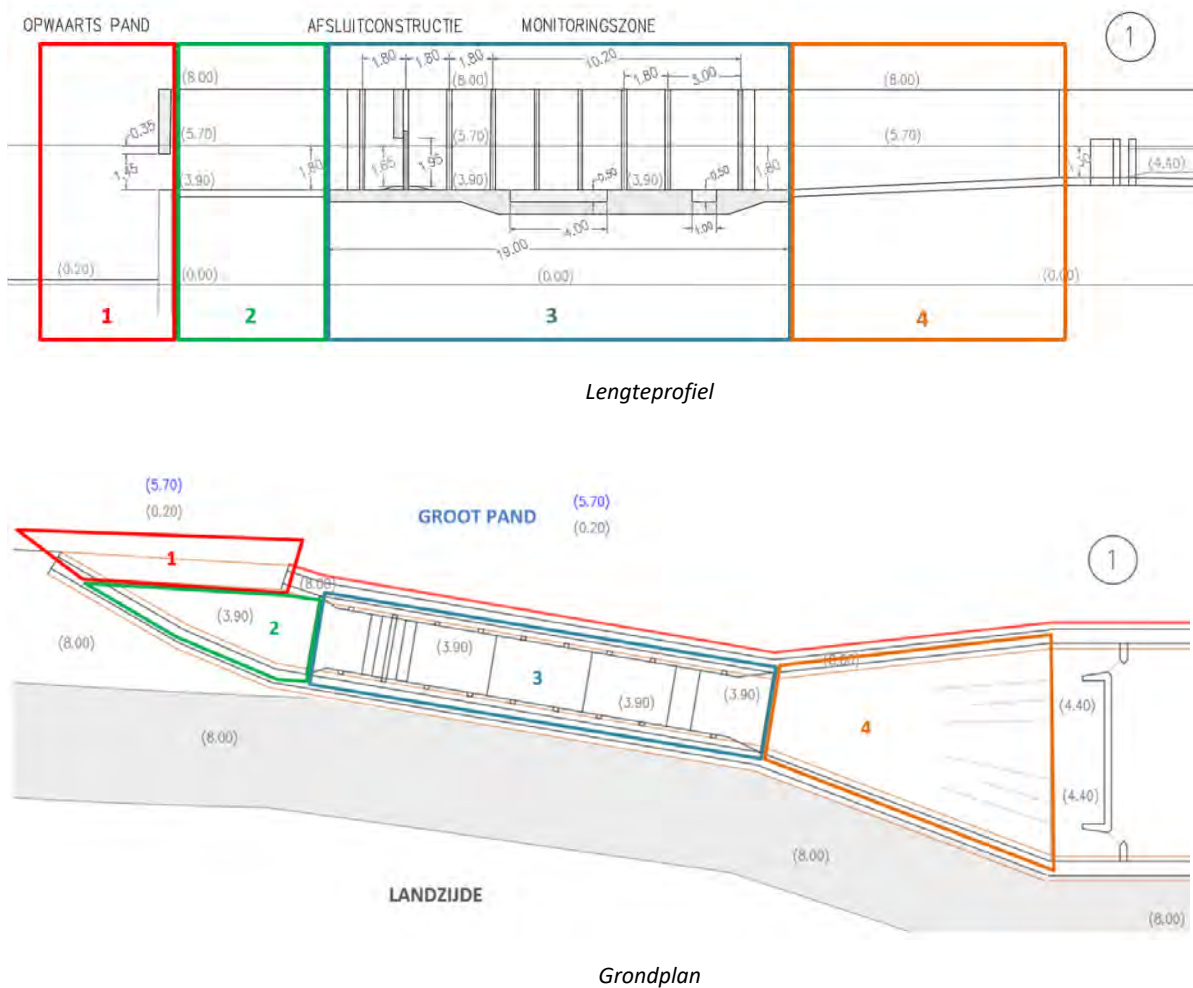
Bij de eerste berekeningen zal het berekende opwaartse waterpeil logischerwijze niet overeen komen met het aangenomen peil (zie Tabel 15 voor elk scenario) aangezien hierbij nog geen rekening werd gehouden met de energieverliezen in de instroom. Op basis van deze berekening wordt het afwaartse waterpeil ter plaatse van het slot en het daarbij horende debiet, bijgesteld, waarna de berekening opnieuw doorlopen wordt, tot het berekende opwaarts peil overeenkomt met de randvoorwaarde.

In bepaalde (de meeste) segmenten treedt stroming in een open kanaal op. Deze kan beschreven worden door de vergelijking van Bresse voor permanente stroming in een prismatisch kanaal (constante sectie, constante helling, constant debiet) beschouwd (Berlamont, 2004):

$$\frac{dh}{ds} = \frac{S_0 - S_f}{\sqrt{1 - S_0^2} - \frac{Q^2 \cdot B}{g \cdot A^2}} \quad [5]$$

Met:

dh/ds =	Verandering in waterhoogte over een afstand ds	[m/m]
S ₀ =	Bodemhelling	[m/m]
S _f =	Energieverhang, of het ladingsverlies per eenheidslengte ΔF/Δs	[m/m]
Q =	Debiet	[m³/s]
B =	Bovenbreedte (breedte van de waterspiegel)	[m]
g =	Valversnelling (9,81)	[m/s²]
A =	Natte sectie	[m²]



Figuur 55 – Indeling instroom in segmenten voor berekening ladingsverliezen

Het energieverhang kan via verscheidene formules berekend worden, voor de eenvoud wordt hier de formule van Manning-Strickler gevolgd (Berlamont, 2004):

$$S_f = \frac{n^2 \cdot U^2}{R^{\frac{4}{3}}} = \frac{n^2 \cdot U^2 \cdot P^{\frac{4}{3}}}{A^{\frac{10}{3}}} \quad [6]$$

Met:

U =	Sectiegemiddelde stroomsnelheid	[m/s]
R =	Hydraulische straal, $R = A/P$	[m]
A =	Natte sectie	[m ²]
P =	Natte perimeter	[m]
n =	Coëfficiënt van Manning	[sm ^{-1/3}]

Alhoewel deze empirische formule verouderd is en vervangen werd door de theorie van Prandtl – von Karman – White-Colebrook (zie bv. Formule [18]), leidt het gebruik van de wet van Manning volgens Berlamont (2004) tot een goede benadering voor kanalen en rivieren. Bovendien is Formule [6] gemakkelijker te implementeren.

Voor een samengestelde doorsnede, bestaande uit verschillende materialen 'i' wordt een "equivalente ruwheid" gebruikt, berekend als een gewogen gemiddelde aan de hand van de natte perimeter:

$$n = \left(\frac{\sum_i n_i^2 \cdot P_i}{P} \right)^{\frac{2}{3}} \quad [7]$$

Hierbij wordt $n = 0,017 \text{ sm}^{-1/3}$ gebruikt voor beton en $n = 0,035 \text{ sm}^{-1/3}$ voor damplanken. De waarde voor de damplanken tracht (enigszins) rekening te houden met de lokale 'eddies' die optreden. De keuze van een ruwheidsfactor gaat steeds gepaard met onzekerheden, zeker voor de damplanken. Er werd een (beperkte) gevoeligheidsanalyse uitgevoerd met hogere waarden voor n van de wanden (+ 40%), maar de invloed op het uiteindelijke ladingsverlies was zeer beperkt, gezien de relatief lage stroomsnelheden.

Om de verhanglijn te berekenen, wordt Formule [5] numeriek geïntegreerd volgens de trapeziumregel (gekozen Δh) (Berlamont, 2004). Discretiseren van Formule [5] met $dh/ds = \varphi(h)$ en herschikken geeft:

$$s_{i+1} = s_i + \frac{2 \cdot (h_{i+1} - h_i)}{\varphi(h_{i+1}) + \varphi(h_i)} \quad [8]$$

De numerieke methode berekent dus de langsafstand $\Delta s = s_{i+1} - s_i$ waarover een waterpeilverschil gelijk aan $\Delta h = h_{i+1} - h_i$ wordt bekomen. Het teken van (de gekozen) Δh hangt af van het stromingsregime (subkritisch: berekening van af- naar opwaarts; superkritisch: berekening van op- naar afwaarts) en type verhanglijn (neemt h toe of af in de berekeningsrichting). Zie Berlamont (2004) voor meer informatie.

De wandruwheid wordt uitgedrukt door middel van de Manning-coëfficiënt n [$\text{sm}^{-1/3}$].

Een lokaal ladingsverlies kan in het algemeen berekend worden aan de hand van volgende formule:

$$\Delta F = \xi \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad [9]$$

Met:

$\Delta F =$	Lokaal ladingsverlies	[m]
$g =$	Valversnelling (9,81)	[m/s ²]
$v =$	Sectiegemiddelde snelheid	[m/s]
$\xi =$	Ladingsverliescoëfficiënt	[-]

Wrijvingsverliezen bij stroming onder druk worden berekend met behulp van de formulering volgens Manning:

$$\Delta F_w = \frac{n^2 \cdot l}{R^{\frac{4}{3}}} \cdot v^2 \quad [10]$$

Met:

$\Delta F_w =$	Ladingsverlies	[m]
$l =$	Lengte waarover de wrijvingsverliezen gelden	[m]
$v =$	Sectiegemiddelde snelheid	[m/s]
$n =$	Coëfficiënt van Manning	[sm ^{-1/3}]
$R =$	Hydraulische straal	[m]

De gehanteerde waarde voor de coëfficiënt van Manning is $n = 0,017 \text{ sm}^{-1/3}$ voor beton.

In wat volgt worden de berekeningswijze per segment besproken. Hierbij wordt de stroomrichting gevolgd, hoewel de berekeningen in de andere volgorde gebeuren. De in de tekst vermelde cijferwaarden gelden voor de situatie met opwaarts streefpeil, maar *waar relevant en mogelijk (formule beschikbaar)* worden de ladingsverliescoëfficiënten mee gevarieerd in functie van het stromingsregime (Re en Fr).

Segment 1: schuine intrede onder drijfvuilbalk

Voor de drijfvuilbalk worden twee opties beschouwd: een vaste balk en een drijvende balk (zie paragraaf 5.3).

In beide gevallen wordt een stroming onder druk beschouwd. Het verschil is dat bij een vaste balk de doorstroomsectie constant wordt gehouden, terwijl deze bij een drijvende balk verandert per beschouwd opwaarts peil.

Het water stroomt onder een hoek ten opzichte van de hoofdstroomrichting de vistrap in. Het waterpeil staat steeds boven de onderkant van deze balk, zodat een stroming onder druk ontstaat. In beide opties wordt de balk 0,5 m dik verondersteld; dit is aan de hoge kant, maar heeft nauwelijks invloed op de uiteindelijke resultaten.

De ladingsverliescoëfficiënten worden bepaald aan de hand van de diagrammen in *Bijlage 2 – Ladingsverliescoëfficiënten uit Idelchik (2007)*. Waar nodig wordt lineair geïnterpoleerd.

Diagram 3.3 uit *Bijlage 2 – Ladingsverliescoëfficiënten uit Idelchik (2007)* wordt gebruikt om de ladingsverliescoëfficiënt van de intrede ζ_{in} in te schatten. De stroomsnelheid in het opwaarts pand (w_∞) wordt ingeschat op basis van een debiet van $6,24 \text{ m}^3/\text{s}$ ($= Q_{90}$) en een rechthoekige sectie met breedte 27 m en waterdiepte 4,6 m, dit geeft $w_\infty = 0,08 \text{ m/s}$. Hogere debietswaarden resulteerden in lagere waarden voor de ladingsverliescoëfficiënt, deze waarde werd dan ook constant gehouden om een conservatieve inschatting te hebben. Bovendien kan opgemerkt worden dat de invloed op de uiteindelijke waarde van het ladingsverlies zeer beperkt is. De hoek van de intrede bedraagt $\delta = 150^\circ$. Voor de oppervlakte van de opening wordt gerekend met de geprojecteerde oppervlakte, loodrecht op de aslijn.

Diagram 4.5 uit *Bijlage 2 – Ladingsverliescoëfficiënten uit Idelchik (2007)* wordt gebruikt om de coëfficiënt van het uittredeverlies ζ_{uit} [-] na de balk in te schatten. Dit diagram geeft de ladingsverliescoëfficiënt van een plotse verbreding met asymmetrische snelheidsverdeling. Op die manier wordt op 'een' manier rekening gehouden met een uittrede zonder dat de snelheid naar nul valt (zoals in een reservoir), en met het feit dat door de schuine intrede de snelheidsverdeling verstoord is. In de berekening wordt voor de oppervlakte na uittreden F_2 de natte oppervlakte afwaarts de drijfvuilbalk beschouwd.

Segment 2: stroming tussen drijfvuilbalk en afsluitconstructie

In segment 2 wordt enkel de verhanglijn berekend. Hierbij wordt abstractie gemaakt van het niet-prismatisch zijn van het kanaal; omdat de stroomsnelheid dermate laag is heeft dit weinig invloed op het resultaat. Aangezien het segment een horizontale bodem heeft (helling $S_0 = 0\%$), is de enige mogelijke verhanglijn een afwaarts bepaalde A2-verhanglijn en moet van stroomafwaarts naar stroomopwaarts gerekend worden.

Segment 3: stroming door afsluitconstructie en monitoringzone

Bij de stroming door de afsluitconstructie en aansluitend monitoringzone treden lokale ladingsverliezen op omwille van de versmalling, de sponningen en de verbreding. Daarnaast treden wrijvingsverliezen op. De vier componenten worden apart berekend en daarna opgeteld.

Formica (1955) gebruikt volgende formulering voor het ladingsverlies ten gevolge van een subkritische stroming doorheen een versmalling:

$$\Delta F = \xi_s \frac{U_3^2}{2 \cdot g} \quad [11]$$

Met:

$U_3 =$	De sectiegemiddelde snelheid na de versmalling	[m/s]
$\xi_s =$	Ladingsverliescoëfficiënt van de versmalling	[-]

De waarde ξ_s hangt af van de vormgeving, voor een afgeschuinde versmalling geeft Formica $\xi_s = 0,06$ (effect van de exacte waarde van de hoek is verwaarloosbaar).

Voor een verbreding volgt Formica (1955) een andere formulering:

$$\Delta F = \xi_b \frac{(U_1 - U_3)^2}{2 \cdot g} \quad [12]$$

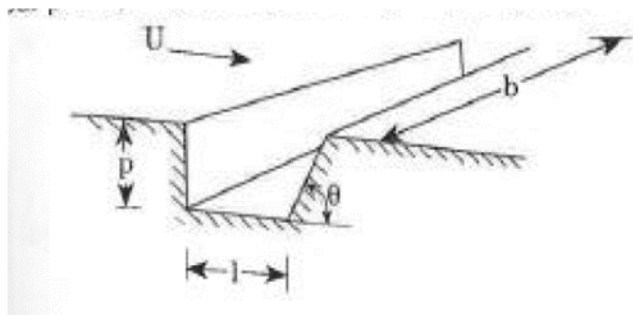
Met:

$U_1 =$	De sectiegemiddelde snelheid voor de verbreding	[m/s]
$U_3 =$	De sectiegemiddelde snelheid na de verbreding	[m/s]
$\xi_b =$	Ladingsverliescoëfficiënt van de versmalling	[-]

Voor een afgeschuinde verbreding (hoek 1:3) geeft Formica $\xi_b = 0,41$.

Naast de ladingsverliezen verandert in principe ook het waterpeil omwille van de snelheidsverandering: bij een versmalling daalt de waterspiegel (van op- naar afwaarts bekeken), bij een verbreding stijgt de waterspiegel (van op- naar afwaarts bekeken), ongeacht het feit dat er een verlies aan energie is. Uit de berekeningen bleek echter dat de optredende ladingsverliezen zeer klein zijn voor de beschouwde hydraulische condities. Een controle leerde bovendien dat de energieniveaus van de gewone en versmalde sectie quasi identiek zijn, zodat verder geen rekening gehouden wordt met dit effect.

Een sponning komt in principe overeen met een plotse verbreding opgevolgd door een plotse versmalling. Door de beperkte afmetingen kunnen de overeenstemmende coëfficiënten echter niet toegepast worden. Het ladingsverlies dat optreedt door de sponningen wordt ingeschat aan de hand van de formules gegeven in Lencastre (1996). Figuur 56 toont de schematisatie van een sponning.



Figuur 56 – Schematisatie van de sponningen (Bron: Lencastre, 1996)

Het ladingsverlies kan dan berekend worden:

$$\Delta F = \xi_{sp} \cdot \frac{U^2}{2 \cdot g} \quad [13]$$

Waarin de ladingsverliescoëfficiënt van één sponning ξ_{sp} berekend wordt via:

$$\xi_{sp} = \left(\frac{\eta^{1,8} - 1}{1,43 \cdot \eta^{-1,8} + 1} \right)^2 \cdot \sin \theta \quad [14]$$

Waarin de coëfficiënt η [-] een 'oppervlaktefactor' is, berekend als:

$$\eta = \frac{A + \frac{1}{4} l \cdot b}{A} \quad \text{als} \quad \frac{l}{p} < 4 \quad [15]$$

$$\eta = \frac{A + p \cdot b}{A} \quad \text{als} \quad \frac{l}{p} \geq 4 \quad [16]$$

Met:

A =	Natte sectie	[m ²]
l =	Opening van de sponning	[m]
b =	Breedte van de sponning loodrecht op de stroming	[m]
p =	Diepte van de sponning	[m]

Zowel de drie opwaartse sponningen, behorend tot de afsluitconstructie, als de zes afwaartse sponningen, behorend tot de monitoringzone, hebben een sponningdiepte van 15 cm, en een sponningbreedte in stroomrichting van 20 cm. Deze afmetingen gelden ook voor de bodemsponning.

Naast de verliezen omwille van de sponningen, wordt ook de verhanglijn berekend, volgens de methode hierboven uiteengezet. Aangezien het segment een horizontale bodem heeft (helling $S_0 = 0\text{‰}$), is de enige mogelijke verhanglijn een afwaarts bepaalde A2-verhanglijn en moet van stroomafwaarts naar stroomopwaarts gerekend worden.

Segment 4: geleidelijke verbreding in tegenhelling

Een geleidelijke verbreding an sich kan aanleiding geven tot energieverlies. Echter, de specifieke energieniveaus die hier beschouwd worden, zijn quasi gelijk aan elkaar zodat verwaarloosbaar energieverlies op treedt. Dit effect wordt verder dus niet beschouwd. Wel wordt nog het hydraulisch verhang berekend, weliswaar abstractie makend van het niet-prismatisch zijn van het kanaal. Aangezien het segment een tegenhelling heeft ($S_0 = -4,2\text{‰}$), is de enige mogelijke verhanglijn een afwaarts bepaalde A2-verhanglijn en moet van stroomafwaarts naar stroomopwaarts gerekend worden.

5.5.4 Resultaten

De berekening wordt telkens gestart met de waarden uit Tabel 15. Omdat er ladingsverliezen optreden tussen de intrede en het eerste vertical slot, moet het debiet door de vispassage herrekend worden aan de hand van het werkelijke waterpeil aan het slot *na ladingsverliezen*. Dat debiet is kleiner dan de waarde uit Tabel 15 omdat het waterpeil lager is. Vervolgens wordt de berekening van de ladingsverliezen opnieuw doorlopen met het bijgestelde debiet om zo een nieuwe waarde voor het ladingsverlies te bekomen. Deze iteratie werd doorlopen tot de geïtereerde waarden slechts weinig verschillen. Al na één iteratieronde verschilde het vispassagedebiet minder dan 0,01 m³/s.

Tabel 16 hieronder toont de resultaten van de berekeningen voor alle randvoorwaarden en beide opties voor de drijfvuilbalk. Uit de berekeningen kan geconcludeerd worden dat de drijfvuilbalk, hetzij vast hetzij drijvend, veruit de grootste bijdrage levert aan het ladingsverlies. Bij een vaste balk stijgt dit ladingsverlies met stijgend opwaarts waterpeil, terwijl dit bij een drijvende balk (nagenoeg) constant blijft. Hier moet wel de kanttekening gemaakt worden dat de berekeningen met een laag afwaarts peil zijn uitgevoerd, en dat hogere afwaartse peilen tot lagere debieten en dus kleinere ladingsverliezen zullen leiden.

De impact van de ladingsverliezen op het vispassagedebiet blijft, in beide opties, beperkt. Ook de stroomsnelheid blijft steeds onder de vooropgestelde limiet van 0,5 m/s. De stroomsnelheden liggen echter niet dusdanig lager dan de gestelde maatlat dat versmalling mogelijk zou zijn. De breedte van 2,5 m bij 1,8 m waterdiepte is daarmee een optimale waarde.

Tabel 16 – Ladingsverliezen in de instroom en impact op de vispassage

Variatie opwaarts peil Ringvaart	-20 cm		-10 cm		0 cm		+10 cm		+20 cm	
Vispassagedebiet zonder ΔF [m³/s]	1,74		1,87		2,06		2,24		2,44	
Verval opwaarts slot zonder ΔF [m]	0,09									
	ΔF [cm]	U [m/s]	ΔF [cm]	U [m/s]	ΔF [cm]	U [m/s]	ΔF [cm]	U [m/s]	ΔF [cm]	U [m/s]
Vaste balk										
Vispassagedebiet [m³/s]	1,71		1,86		2,02		2,17		2,32	
Verval opwaarts slot [m]	0,09									
Drijfvuilbalk	1,1	0,35	1,4	0,38	1,7	0,41	2,1	0,45	2,4	0,48
Relatieve bijdrage	58%	-	64%	-	68%	-	72%	-	75%	-
Afsluitconstructie + monitoringzone	0,5	0,43	0,6	0,44	0,6	0,45	0,6	0,47	0,6	0,47
Relatieve bijdrage	26%	-	27%	-	24%	-	21%	-	19%	-
Verbreiding + verhoging	0,3	0,26	0,2	0,26	0,2	0,26	0,2	0,26	0,2	0,26
Relatieve bijdrage	16%	-	9%	-	8%	-	7%	-	6%	-
Totaal	1,9	-	2,2	-	2,5	-	2,9	-	3,2	-
Drijvende balk										
Vispassagedebiet [m³/s]	1,71		1,87		2,03		2,18		2,34	
Verval opwaarts slot [m]	0,09									
Drijfvuilbalk	1,1	0,35	1,1	0,36	1,2	0,37	1,2	0,37	1,2	0,38
Relatieve bijdrage	61%	-	61%	-	63%	-	63%	-	60%	-
Afsluitconstructie + monitoringzone	0,5	0,43	0,5	0,44	0,5	0,46	0,5	0,46	0,6	0,47
Relatieve bijdrage	28%	-	28%	-	26%	-	26%	-	30%	-
Verbreiding + verhoging	0,2	0,26	0,2	0,26	0,2	0,26	0,2	0,26	0,2	0,26
Relatieve bijdrage	11%	-	11%	-	11%	-	11%	-	10%	-
Totaal	1,8	-	1,8	-	1,9	-	1,9	-	2,0	-

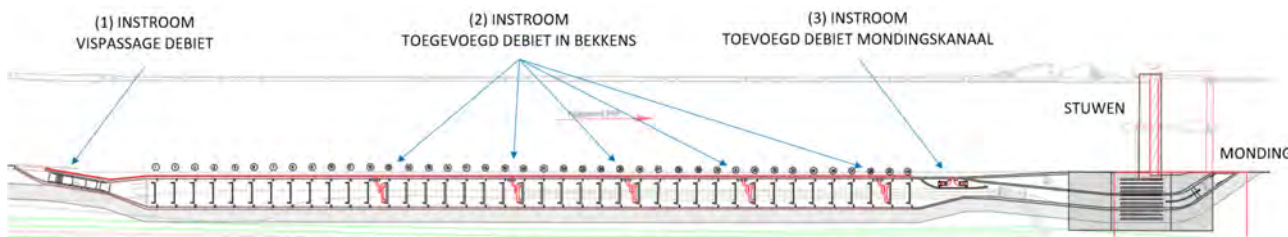
6 Toegevoegd debiet

6.1 Inleiding

Zoals vastgesteld in paragraaf 3.6.2 nemen stroomsnelheden in de vispassage af bij stijging van het afwaartse waterpeil. Om voldoende sterke lokstroom in de vispassage en de vispassagemonding te behouden wordt net als te Geesthacht op een aantal plaatsen extra debiet ingelaten via buizen, het zgn. toegevoegd debiet.

Naast het vispassagedebiet (1) worden twee types toegevoegd debiet onderscheiden (zie ook Figuur 57):

- In een aantal bekkens wordt via afzonderlijke buizen extra debiet toegevoegd (2). Dit is nodig om de stroomsnelheden in de slots en bekkens voldoende hoog te houden bij een verhoging van het afwaarts waterpeil ten gevolge van het getij.
- Afwaarts van het laatste bekken wordt in de opwaartse zijde van het mondingskanaal toegevoegd debiet voorzien via buizen die in één zijdelings bassin uitkomen (3). Dit is nodig om de stroomsnelheden in het mondingskanaal en de monding zelf voldoende hoog te houden bij verhoging van het afwaarts waterpeil ten gevolge van de getijwerking. Ook zorgt dit voor een verdere versterking van het lokstroomdebiet en daarmee een betere concurrentie ten opzichte van het debiet over de stuwen bij hogere afvoer.



Figuur 57 – Locaties instroom van (toegevoegd) debiet in de vispassage

6.2 Bekkens

6.2.1 Principe

Om de stroomsnelheden in de bekkens en slots hoog genoeg te houden bij verhoogde afwaartse waterstanden wordt er in enkele bekkens een toegevoegd debiet ingelaten via buizen die verbonden zijn met het opwaartse pand. Figuur 58 geeft een voorbeeldfoto van deze inbreng in de bekkens van de vispassage te Geesthacht. De grootte van het toegevoegd debiet per bekken wordt geregeld door een schuif in de buis die mechanisch verbonden is aan een vlotter. De vlotter zorgt ervoor dat de schuif (verder) opent afhankelijk van de stijging van het waterpeil in het betreffende bekken. Deze schuif wordt dus niet elektromechanisch aangestuurd, maar puur mechanisch door de vlotter. Opwaarts van deze mechanische schuif wordt tevens een manueel bedienbare (spindel)schuif voorzien, om in geval van nood of bij te weinig beschikbare afvoer de buis te kunnen afsluiten. Deze laatste schuif dient ook elektromechanisch te kunnen worden aangestuurd (zie verder in hoofdstuk 8).

In paragraaf 6.2.2 worden de bekken bepaald waarin het toegevoegd debiet zal worden ingelaten en wordt de grootte van het benodigde debiet per bekken door middel van desktopberekeningen bepaald. In paragraaf 6.2.3 worden de desktopberekeningen vergeleken met CFD-simulaties en worden de stroompatronen en snelheden gecontroleerd. In de paragrafen 6.2.4 en 6.2.5 worden vervolgens respectievelijk de benodigde buisdiameter en buishoogte bepaald. Ten slotte wordt in paragraaf 6.2.6 de benodigde schuifkarakteristiek bepaald op basis het benodigde debiet en range in afwaartse waterstanden.

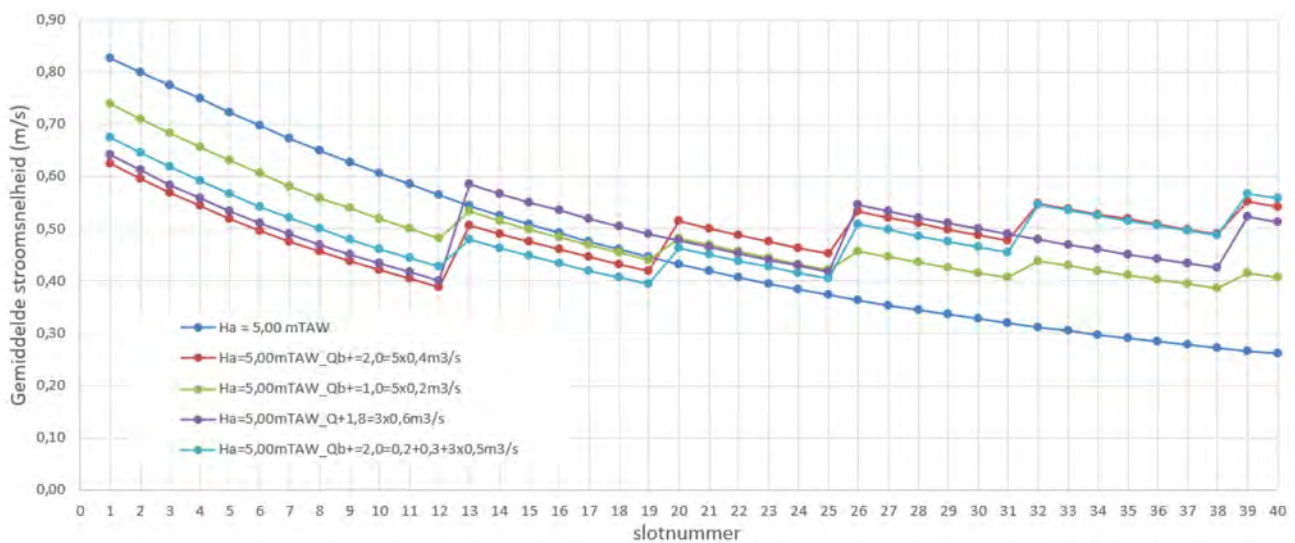


Figuur 58 – Foto's buizen toegevoegd debiet in de bekken van de dubbelslot-vispassage te Geesthacht

6.2.2 Locaties en benodigd debiet

Zoals bleek in paragraaf 3.6.2 nemen stroomsnelheden bij afwaartse peilstijging het sterkst af in de afwaartse slots. In opwaartse richting neemt deze invloed af, zie grafiek stroomsnelheden bij $H_a = 5,00$ mTAW (scenario S2) in vergelijking met grafiek stroomsnelheden bij $H_a = 2,10$ mTAW (scenario S0) in Figuur 35.

Door in bepaalde bekken extra debiet in te laten worden de vervallen (en daarmee de stroomsnelheden) ter plaatse van de slots afwaarts van dit inlaat punt verhoogd. Door deze stijging van het verval afwaarts nemen de vervallen (en daarmee de stroomsnelheden) opwaarts van het inlaatpunt (licht) af. Op deze wijze wordt de grafiek van de stroomsnelheid terug 'horizontaler' en liggen stroomsnelheden in de afwaartse bekken terug dichter rond de gewenste waarde. Zie grafieken met inlaat toegevoegd debiet 'b+' in Figuur 59. Merk op dat de stroomsnelheid in het slot afwaarts van het inlaatpunt steeds 'plots' omhoog schiet waarna het weer geleidelijk afneemt in de slots daarna (zgn. zaagtand-effect).



Figuur 59 – Invloed inbreng toegevoegd debiet op stroomsnelheden in de slots bij $Ha = 5$ mTAW

Voor de meest optimale verdeling van het toegevoegd debiet zou best in alle bekkens een klein deel worden ingebracht. Dit is echter met oog op kostprijs en beheer niet haalbaar. Er dient wel op een voldoende aantal locaties debiet te worden ingebracht aangezien de sprong in stroomsnelheid ter plaatse van inbreng anders te hoog zou zijn (zie bijvoorbeeld de paarse grafiek met 3 inlaatpunten in Figuur 59). Er moet dus gezocht worden naar een optimaal aantal en een optimale verdeling in relatie tot de grootte van het debiet.

Aangezien er in de studie voor de vispassage te Geesthacht al onderzoek werd gedaan naar een optimale verdeling en er in deze studie geen tijd beschikbaar is voor een aanvullende studie, wordt voor de verdeling van inlaatpunten te Merelbeke besloten om zo dicht mogelijk bij de configuratie te Geesthacht te blijven.

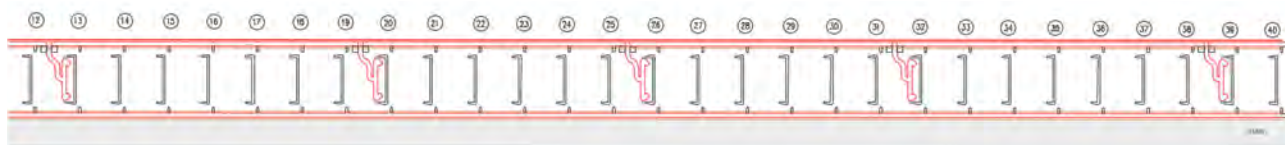
Tabel 17 geeft een overzicht over het aantal bekkens en de bekkens met inlaatpunten voor zowel Geesthacht als Merelbeke. Om de verhouding tussen het aantal bekkens en inlaatpunten gelijk te houden zijn te Merelbeke 5 inlaatpunten nodig. Figuur 60 geeft een ruimtelijke weergave van de inpassing.

Het meest afwaartse inlaatpunt wordt gekozen in het bekken opwaarts van het voorlaatste slot (bekken nr 38 in het geval van Merelbeke). Het volgende inlaatpunt bevindt zich vervolgens zeven bekkens opwaarts (= bekken 31). Daarna wordt steeds een afstand van zes bekkens aangehouden voor de volgende inlaatpunten, om tenslotte het meest opwaartse inlaatpunt (in bekken 12) weer op een afstand van zeven bekkens te situeren ten opzichte van het volgende afwaartse inlaatpunt (bekken 19).

Merk op dat het meest afwaartse inlaatpunt (in bekken 38) relatief dicht bij het laatste bekken wordt gekozen. Dit is nodig om een goede lokstroom te creëren in het meest afwaartse slot, anders zouden stroomsnelheden terug te sterk zijn afgenomen.

<i>Aantal bekkenen tussen inlaatpunten te Geesthacht:</i>					7	6	6	6	7	
Locatie	Totaal verval	Totaal aantal bekkenen	Verval per slot/ bekken	Aantal inlaatpunten	Qb6+	Qb5+	Qb4+	Qb3+	Qb2+	Qb1+
Geesthacht	4,5	49	0,092	6	47	40	34	28	22	15
Merelbeke	3,6	40	0,090	4,898	nvt	38	31	25	19	12
<i>Aantal bekkenen tussen inlaatpunten te Merelbeke:</i>						7	6	6	7	

Tabel 17 – Aantal en locatie inlaatpunten toegevoegd debiet in de bekkenen



Figuur 60 – Ruimtelijk overzicht inlaatpunten toegevoegd in de bekkenen

Met oog op de benodigde grootte van het toegevoegd debiet wordt er voor gekozen om op elke locatie steeds dezelfde grootte (afhankelijk van de waterstand) in te brengen. Dit zorgt er namelijk voor dat de 'sprong' in stroomsnelheid overal hetzelfde is.

De grootte van het benodigde debiet is afhankelijk van de afwaartse waterstand tijdens normale werking. Drie maatgevende waterstanden worden daarbij bekeken (zie ook Tabel 13):

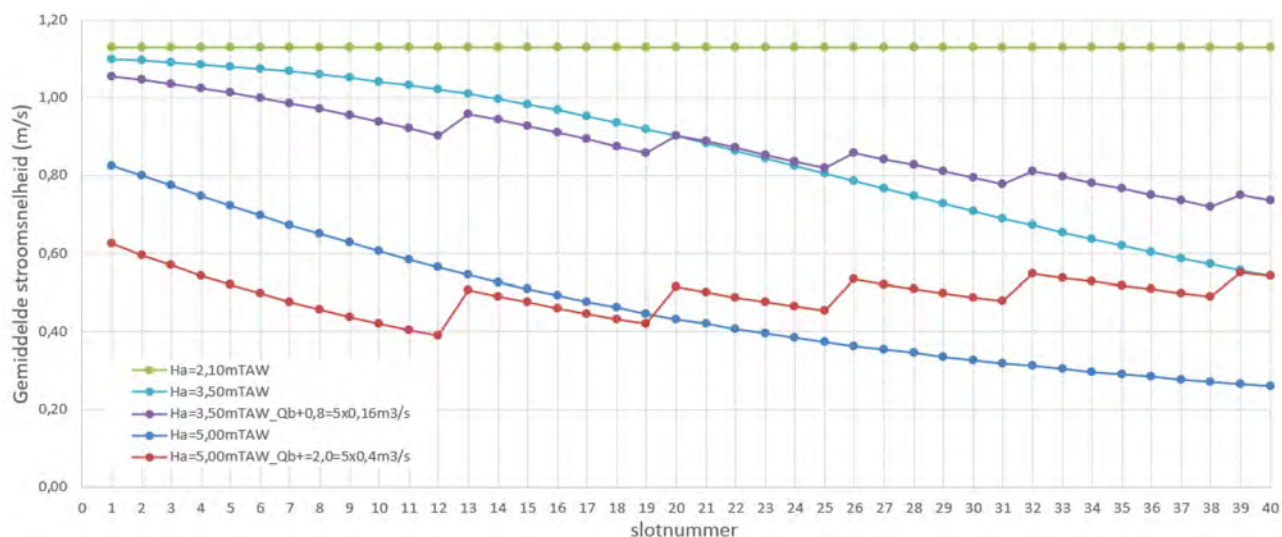
- $H_a = 2,10$ mTAW (scenario S0 → ondergrens normale werking)
- $H_a = 3,50$ mTAW (scenario S1 → circa gemiddeld tij bij normale werking)
- $H_a = 5,00$ mTAW (scenario S2 → bovengrens normale werking)

Bij de ondergrens ($H_a = 2,10$ mTAW) is geen toegevoegd debiet nodig. Voor de overige twee maatgevende waterstanden ($H_a = 3,50$ mTAW en $H_a = 5,00$ mTAW) werden via desktopberekeningen debieten vastgesteld die zorgen dat stroomsnelheden gemiddeld over de vispassage zo dicht mogelijk bij elkaar blijven liggen en indien mogelijk niet boven circa 0,8 m/s uitgaan. Op basis van deze berekeningen werden voor deze twee waterstanden de volgende optimale debieten gekozen:

- $H_a = 3,50$ mTAW (S1) → $Q_{b+} = 0,8$ m³/s wat 0,16 m³/s per bekken geeft;
- $H_a = 5,00$ mTAW (S2) → $Q_{b+} = 2,0$ m³/s wat 0,40 m³/s per bekken geeft.

Figuur 61 toont de gemiddelde stroomsnelheid per slot voor deze scenario's en de twee gekozen toegevoegde debieten.

Voor de benodigde buisdiameter en een indicatie van de opbouw van het benodigde toegevoegd debiet per inlaatpunt op basis van de toename van het afwaartse peil, wordt verwezen naar respectievelijk paragraaf 6.2.4 en paragraaf 6.2.6.



Figuur 61 – Gemiddelde stroomsnelheden in de slots bij maatgevende scenario's toegevoegd debiet

Bij de verdere dimensionering van de buizen is de waterstand in het bekken zelf van belang, omdat deze het verval over het buizensysteem bepaalt. Met behulp van de iteratieve toepassing van formule [1] werd de invloed van de bovengenoemde debieten in de geselecteerde bekken op de waterstanden in de bekken van de vispassage bepaald.

Tabel 18 toont per ontvangend bekken de waterstand H_b [mTAW] afhankelijk van het afwaarts peil in de Ringvaart H_a [mTAW], en het overeenstemmend benodigd debiet. Aan opwaartse zijde werd steeds uitgegaan van het streefpeil. Het benodigd debiet per buis is maximaal voor de situatie waarbij het verval tussen het opwaarts pand van de Ringvaart *bij streefpeil* en het respectieve bekken minimaal is. Bij toenemend verval moet het debiet door de buis verminderen. De afsluiter op de buis wordt daarom aangestuurd door middel van een vlotter-hefboomsysteem. Logischerwijze heeft het meest opwaartse ontvangende bekken, bekken 12, het kleinste verval aangezien het peil in dit bekken dicht bij het opwaarts waterpeil benaderd.

Tabel 18 – Hydraulische randvoorwaarden buizen per bekken

Opwaarts peil pand Ringvaart	Ho [m TAW]	5,7	5,7	5,7
Afwaarts peil pand Ringvaart	Ha [m TAW]	2,1	3,5	5,0
Benodigd debiet per buis*	Qb+ [m³/s]	0	0,16	0,40
	Bekken-nr.	Peil in bekken H_b [m TAW]		
	38	2,28	3,58	5,04
	31	2,91	3,87	5,18
	25	3,45	4,15	5,28
	19	3,99	4,47	5,38
	12	4,62	4,87	5,49

*) Door de scheidingswand, in het bekken zelf splitst de buis in twee.

6.2.3 Controle stroompatronen (CFD)

Gecontroleerd wordt of de gewenste stroompatronen in de bekkens – namelijk doorgaande meanderende hoofdstroom met zijneren (zie paragraaf 3.4) – gehandhaafd blijven bij de gekozen grootte van het toegevoegd debiet. Ook worden de stroomsnelheden in de slots vergeleken met de desktopberekeningen (zie vorige paragraaf).

Hierbij wordt het volgende opgemerkt:

- Voor de beproeving van het toegevoegd debiet werd hetzelfde model gebruikt als voor de simulaties van de basisscenario's, zie paragraaf 3.4.3;
- Om de rekentijd van de CFD-simulaties te beperken werd de inbreng van het toegevoegd debiet in de bekkens op een vereenvoudigde manier gesimuleerd. Dit aspect van het buisontwerp werd namelijk al uitvoerig beproefd in de numerieke – en schaalmodelstudie voor de vispassage te Geesthacht (Oberle *et al.*, 2012). In werkelijkheid 'valt' of stroomt het water uit de buis (zie links in Figuur 58). In de simulaties werd het debiet wel op dezelfde locatie ingelaten, maar dan vanuit de slotwand onder water (zie Broers *et al.*, 2019). Dit betekent dat de dissipatie van de inbreng zelf niet werd onderzocht, maar enkel de invloed van de grootte van het ingelaten toegevoegd debiet op de stroomsnelheden in de slots en op het algemene stroompatroon in de bekkens afwaarts van de inlaatpunten;
- De keuze voor zowel het - op Geesthacht gebaseerde - aantal inlaatpunten en de locaties daarvan, als de keuze voor de finale slotdiepte op basis van maximaal toelaatbaar vispassage debiet werd pas gemaakt na deze verkennende CFD-studie. De CFD-simulaties werden daarom uitgevoerd voor vier inlaatpunten met een slotdiepte van 1,8 m in plaats van de later gekozen vijf inlaatpunt bij een slotdiepte van 1,3 m. In de CFD-simulaties werd het toegevoegd debiet ingelaten in de volgende vier bekkens: 17, 24, 31 en 38.
- Bij de desktopberekeningen werd uitgegaan van een debietscoëfficiënt van $C_d = 0,85$, op basis van eerdere CFD-simulaties zonder toegevoegd debiet (zie paragraaf 3.4.3). De desktopberekeningen richten zich enkel op de stroomsnelheden in de slots.

Tabel 19 geeft een overzicht van de varianten die werden onderzocht door middel van CFD-simulaties bij de drie maatgevende scenario's uit Tabel 13. Hierbij wordt opgemerkt dat de hydraulische op- en afwaartse rand van het CFD-model (= instroom en uitstroom) werden uitgevoerd als waterpeil (drukhoogte) en niet als debiet (stroomsnelheid). Op deze wijze kan ook het debiet en de debietcoëfficiënt worden bepaald met behulp van de CFD-studie. Tabel 19 geeft de vergelijking tussen het debiet uit desktopstudie en de CFD-simulaties, waaruit blijkt dat deze relatief goed overeenkomen. De debietscoëfficiënt ($C_d = 0,85$) was dan ook gekozen op basis van de eerdere verkennende CFD-simulaties, zie paragraaf 3.3.3 en 3.4.3.

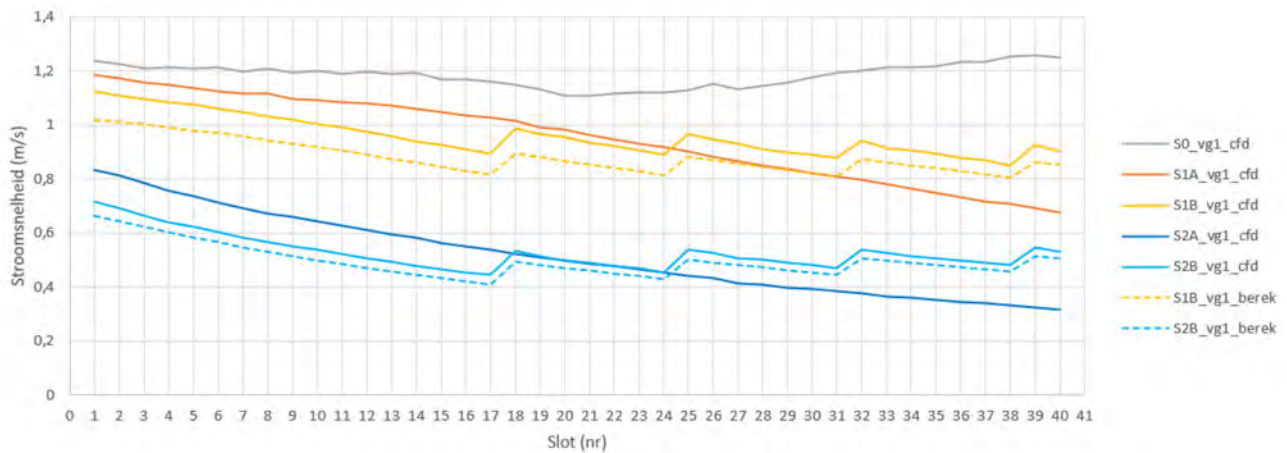
Tabel 19 – Overzicht CFD-simulaties voor de bekkens met en zonder toegevoegd debiet

Variant/ scenario*	H_o [mTAW]	H_a [mTAW]	Q_{vis} -berek [m ³ /s]	Q_{vis} -cfd [m ³ /s]	Q_B^{**} [m ³ /s]
S0	5,70	2,10	2,85	2,86	0
S1A	5,70	3,50	2,70	2,74	0
S1B	5,70	3,50	2,57	2,62	1,2 = 4 x 0,3
S2A	5,70	5,00	1,92	1,96	0
S2B	5,70	5,00	1,67	1,68	1,6 = 4 x 0,4

* Dit betreffen de drie maatgevende scenario's uit Tabel 13. De toevoeging 'A' is zonder toegevoegd debiet; de toevoeging 'B' is met toegevoegd debiet.

** Het toegevoegd debiet Q_B werd ingelaten in bekkens 17, 24, 31 en 38.

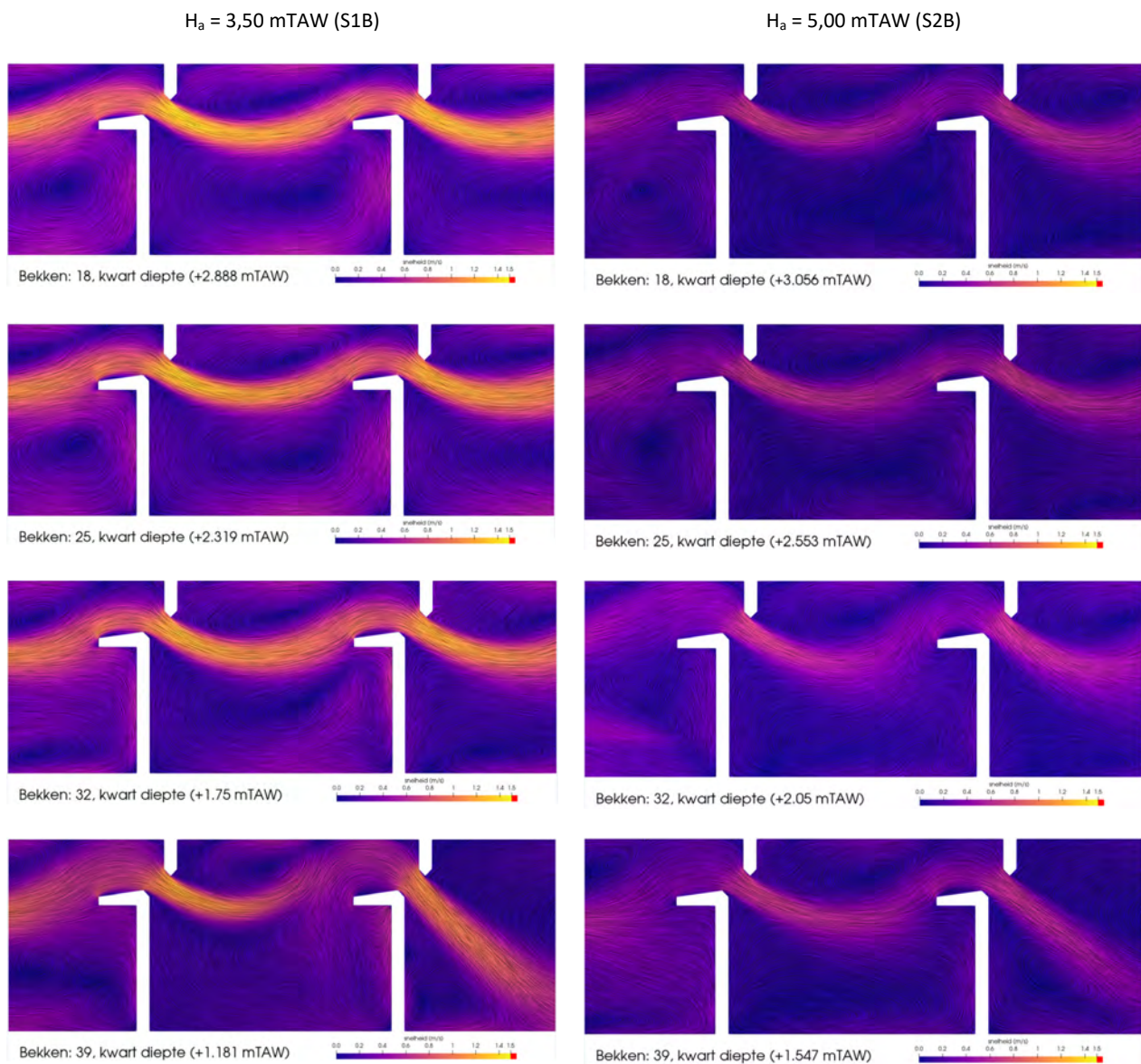
Figuur 62 toont de resultaten voor de gemiddelde stroomsnelheden in de sloten uit de CFD-simulaties en de desktopberekeningen. Uit de vergelijking blijkt dat de desktopberekeningen de CFD-simulaties steeds goed benaderen. De berekende stroomsnelheden zijn systematisch iets lager dan de stroomsnelheden uit de simulaties. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de desktopberekeningen een goede benadering geven van de stroomsnelheden in de sloten bij de verschillende scenario's/toegevoegd debietvarianten.



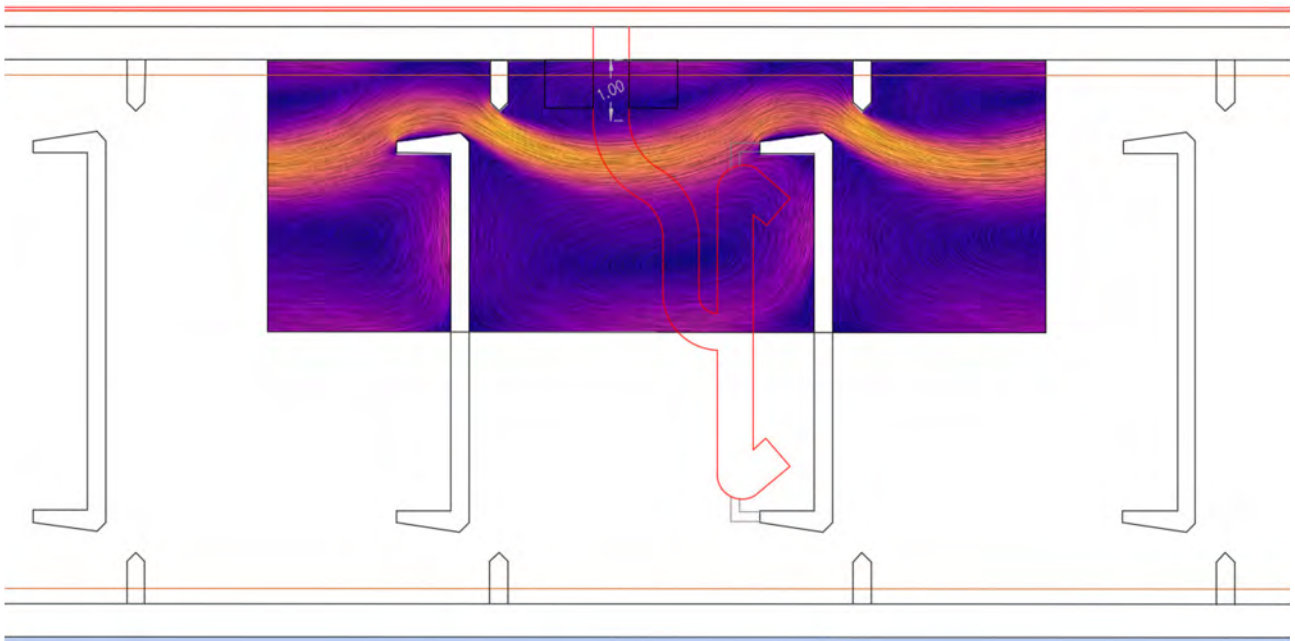
Figuur 62 – Vergelijking stroomsnelheden in de slots bij variatie in afwaartse waterstand en toepassing toegevoegd debiet

Ook blijkt de ordegrootte van de inbreng van het toegevoegd debiet geen negatieve invloed te hebben op het globale stroompatroon in de bekkens, zie Figuur 63. De gewenste doorgaande meanderende hoofdstroom met zij-neren ontstaat ook in deze simulaties.

De resultaten van de CFD-studie kunnen ook gebruikt worden voor de verdere bouwkundige inpassing van de buizen en het onderhoudsplatform. Figuur 64 toont in dit kader een mogelijke bouwkundige inpassing met op de achtergrond het stroompatroon in de bekkens zoals vastgesteld in de CFD-studie. Bij de inpassing is het van belang om te zorgen dat de hoofdstroom zo min mogelijk onderbroken wordt.



Figuur 63 – Stroompatroon op kwartdiepte ter plaatse van bekken 18, 25, 32 en 39 bij inlaat toegevoegd debiet



Figuur 64 – Voorbeeld inpassing buizen en onderhoudsplatform in relatie tot de hoofdstroom in de vispassage

6.2.4 Buisdiameter

De buisdiameter wordt best zo klein mogelijk gekozen, omdat de buis (al dan niet gedeeltelijk) onder het wateroppervlak komt te liggen bij hoge waterpeilen in het afwaartse pand van de Ringvaart, en zo de doorzwemhoogte voor de vissen verkleint.

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

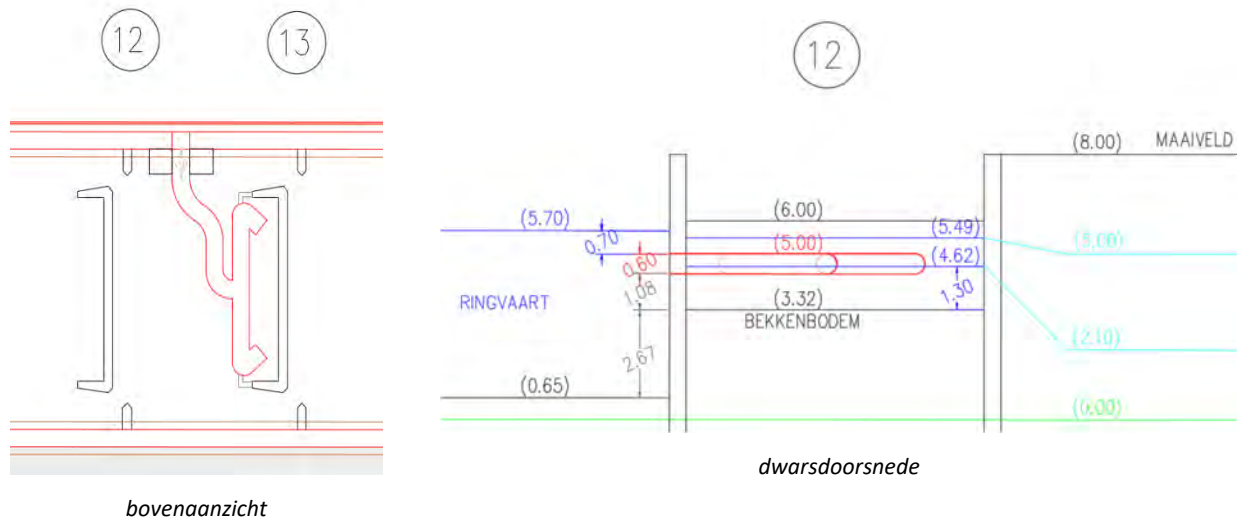
$$Q_{b+} = \left(\frac{2g \cdot A^2 \cdot dH}{\xi_{tot}} \right)^{1/2} = \left(\frac{2g \cdot A^2 \cdot dH}{\xi_i + \xi_u + \xi_k + \xi_r + \xi_b + \xi_s + \frac{f \cdot l}{D}} \right)^{1/2} \quad [17]$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} \approx -2.0 \log \left[\frac{\varepsilon/D}{3.7} - \frac{5.02}{Re} \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{13}{Re} \right) \right] \quad [18]$$

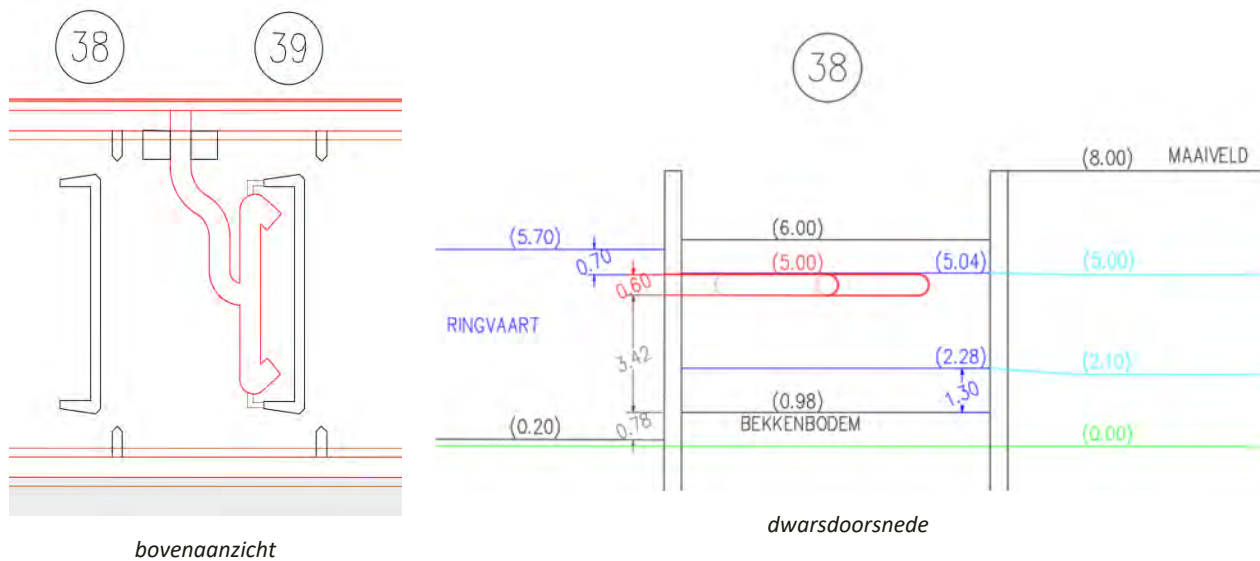
Met:

Q_{b+} =	Debiet (= toegevoegd debiet)	[m ³ /s]
g =	Valversnelling (9,81)	[m/s ²]
A =	Oppervlak natte dwarssectie	[m ²]
dH =	Hydraulisch verval	[m]
ξ_{tot} =	Coëfficiënt totaal aan verliezen	[-]
ξ_i =	Coëfficiënt intredeverlies	[-]
ξ_u =	Coëfficiënt uittredeverlies	[-]
ξ_k =	Coëfficiënt verlies t.g.v. schuif	[-]
ξ_r =	Coëfficiënt verlies t.g.v. rooster	[-]
ξ_b =	Coëfficiënt verlies t.g.v. bochten	[-]
ξ_s =	Coëfficiënt verlies t.g.v. splitsing	[-]
f =	Wrijvingsfactor (Darcy-Weisbach)	[-]
l =	Lengte buis	[m]
D =	Diameter buis	[m]
ε =	Wandruwheid (0,0005 voor staal)	[-]
Re =	Reynoldsgetal	[-]

De ladingsverliescoëfficiënten van de verschillende componenten dienen zo nauwkeurig mogelijk worden ingeschat. Figuur 65 en Figuur 66 tonen de buisconfiguratie en bijhorende waterpeilen voor het meest opwaartse (12) en meest afwaartse (38) bekken dat toegevoegd debiet moet ontvangen. In alle ontvangende bekkens wordt een identieke configuratie voorzien, hoewel de randvoorwaarden verschillen, en dit om het beheer en onderhoud zo eenvoudig mogelijk te maken. De schuif is schematisch weergegeven als een rechthoek tegen de scheidingswand.



Figuur 65 – Buizen toegevoegd debiet bekken 12 (tussen slots 12 en 13)



Figuur 66 – Buizen toegevoegd debiet bekken 38 (tussen slots 38 en 39)

Tabel 20 geeft een overzicht van de geometrie van de buizen. De doorgang door de scheidingswand gebeurt door een recht stuk ronde buis, waarna de schuif gepositioneerd wordt. Daarna zijn er twee opeenvolgende bochten met dezelfde bochtstraal maar in tegengestelde richting worden voorzien ('S-bocht'). Deze opstelling geeft ruimte aan de vlotter (niet getekend), die (in planzicht) in het verlengde van de rechte buis moet komen om te kunnen worden aangesloten op de schuif. Na de S-bocht volgt opnieuw een recht stuk, waarna de buis wegdraait onder een hoek van 90°, en splitst. Vandaar lopen de buizen parallel aan de wand van de vertical slots, om via een scherpe hoek uit te monden in het bekken.

Tabel 20 – Geometrie van de buizen voor toegevoegd debiet in de bekens

Component	Lengte [m]	Bochtstraal [m]	Draaiingshoek [°]	Qb+ [%]
recht stuk door scheidingswand + schuif	1,91	-	-	100%
S-bocht, 1 ^{ste} bocht	1,10	1,26	50	100%
S-bocht, 2 ^{de} bocht	1,10	1,26	50	100%
recht stuk na S-bocht	1,00	-	-	100%
bocht naar splitsing	0,99	0,63	90	100%
splitsing	-	-	-	100%
TOTAAL	6,09			
recht stuk tss. splitsing en scherpe bocht	2,24			50%
scherpe bocht	0,46	0,21	125	50%
recht stuk tot uitlaat	0,28	-	-	50%
TOTAAL	2,98			

De binnenbovenkant (BBK) is voor elke buis gelijk genomen aan +5,0 m TAW, oftewel 70 cm onder het wateroppervlak in het opwaarts pand. Afhankelijk van het peil in het bekken zal de uitstroom dus onder vrij oppervlak of onder druk gebeuren.

Verder worden volgende punten nog vooropgesteld bij de berekeningen:

- Er wordt geen vuilrooster beschouwd;
- Er wordt aangenomen dat een volledig openstaande schuif geen ladingsverlies veroorzaakt ($\xi_k = 0$);
- Om de berekeningen niet nodeloos complex te maken, wordt de wrijvingsfactor f [-] constant genomen, gelijk aan 0,0195. Uit enkele verkennende berekeningen met verschillende klepstanden bleek f voldoende dicht bij deze waarde te liggen, die daarmee als representatief voor de optredende debietsranges (eigenlijk range van het Reynoldsgetal en beschouwde diameters) werd beschouwd;
- De coëfficiënt ten gevolge van de bochten is afhankelijk van de precieze configuratie: bochten die kort op mekaar volgen geven tesamen een ander ladingsverlies dan de afzonderlijke delen. Idelchik (2007) geeft diagrammen voor verschillende configuraties, de gebruikte diagrammen zijn terug te vinden in *Bijlage 2 – Ladingsverliescoëfficiënten uit Idelchik (2007)*.
- De splitsing zorgt voor een bijkomend ladingsverlies, de coëfficiënt wordt eveneens aan de hand van de diagrammen in zie *Bijlage 2 – Ladingsverliescoëfficiënten uit Idelchik (2007)*.

Naast Idelchik (2007) wordt ook Nortier & de Koning (1996) gebruikt bij het inschatten van bepaalde waarden. Daarbij wordt $f \cdot l/D = \xi_w$ gesteld. Om rekening te houden met het halve debiet in het stuk na de splitsing wordt formule [17] nog verder uitgewerkt tot:

$$Q_{b+} = \left(\frac{2g \cdot A^2 \cdot dH}{\xi_{tot}} \right)^{1/2} = \left(\frac{2g \cdot A^2 \cdot dH}{\xi_k + \sum_i (\xi_i + \xi_{w,i}) + \frac{1}{4} \sum_j (\xi_j + \xi_{w,j})} \right)^{1/2} \quad [19]$$

Waarin de index i verwijst naar de componenten vóór de splitsing en index j naar de componenten na de splitsing.

De gebruikte ladingsverliescoëfficiënten worden weergegeven in Tabel 21. Uit de tabel wordt duidelijk dat de bijzondere ladingsverliezen overheersen, waarbij de inlaat, splitsing en uitlaat de grootste bijdrage leveren. Het valt op dat de ladingsverliescoëfficiënt van de S-bocht toeneemt met toenemende diameter, wat op het eerste zicht contra-intuïtief is. Echter aangezien de overige parameters (bochtstraal, hoekverdraaiing) in de geometrie constant gehouden wordt, neemt r/D af bij toenemende D ,

wat overeenstemt met een meer 'gedrongen' bocht. Bij de gebruikte curves van Idelchik (2007) zorgt dit voor een (lichte) stijging van de uiteindelijke coëfficiënt, althans binnen de beschouwde range van diameters. Daar tegenover staat uiteraard wel een daling van de stroomsnelheid bij stijgende diameter.

Tabel 21 – Ladingsverliescoëfficiënten van de buizen naar de ontvangende bekken

Component	Lengte [m]	f [-]	D = 50 cm		D = 60 cm		D = 70 cm	
			ξ_w [-]	ξ [-]	ξ_w [-]	ξ [-]	ξ_w [-]	ξ [-]
inlaat	-	-	-	0,5	-	0,5	-	0,5
recht stuk door scheidingswand	1,91	0,0195	0,07	-	0,06	-	0,05	-
schuif	-	-	-	0	-	0	-	0
S-bocht, 1 ^{ste} + 2 ^{de} bocht	2,20	0,0195	0,09	0,01	0,07	0,02	0,06	0,03
recht stuk na S-bocht	1,00	0,0195	0,04	-	0,03	-	0,03	-
bocht naar splitsing	0,99	0,0195	0,04	0,12	0,03	0,19	0,03	0,27
splitsing	-	-	-	1,38	-	1,38	-	1,38
Subtotaal	6,09		0,24	2,01	0,19	2,09	0,17	2,18
TOTAAL voor splitsing	6,09		2,25		2,28		2,35	
recht stuk tss. splitsing en scherpe bocht	2,24	0,0195	0,09	-	0,07	-	0,06	-
scherpe bocht	0,46	0,0195	0,02	0,31	0,02	0,32	0,01	0,34
recht stuk tot uitlaat	0,28	0,0195	0,01	-	0,01	-	0,01	-
uitlaat	-	-		1,0	-	1,0	-	1,0
Subtotaal	2,98		0,12	1,31	0,10	1,32	0,08	1,34
TOTAAL na splitsing	9,07		1,43		1,42		1,42	

Met de hydraulische randvoorwaarden uit Tabel 18, overeenstemmend met de hoge afwaartse waterstand $H_a = 5,0$ m TAW, en de ladingsverliescoëfficiënten uit Tabel 21 kan via formule [17] de capaciteit van de buizen berekend worden voor verschillende diameters. De resultaten worden weergegeven in Tabel 22. Daaruit blijkt dat een diameter $D = 50$ cm enkel voor bekken 38, *i.e.* het bekken met het grootste verval, een voldoende capaciteit zou kunnen geven. Wanneer $D = 60$ cm valt het debiet voor bekken 12 terug tot $0,35$ m³/s, terwijl er $0,40$ m³/s benodigd is, wat eigenlijk te laag is. Echter met dit verlaagde debiet in het opwaartse bekken werden de stroomsnelheden langsheen de gehele vispassage opnieuw berekend volgens de methode uiteengezet in paragraaf 6.2.2. De impact op de snelheden bleef aanvaardbaar, temeer omdat het effect al bijna helemaal opwaarts in de vispassage optreedt. Bovendien treden deze hoge waterpeilen slechts relatief kortstondig op in de tijcyclus. Het risico op terugzwemmen van de vissen op die plaats wordt dus als zeer beperkt beschouwd. In het slechtste geval zullen de vissen in de bekken wachten tot de stroomsnelheid terug aantrekt (bij dalend afwaarts waterpeil). Bij $D = 70$ cm zouden alle bekken een voldoende groot toegevoegd debiet kunnen ontvangen, maar de impact op de doorzwemdiepte is dan groter.

Men zou ervoor kunnen kiezen om voor bekken 12 een grotere buisdiameter te gebruiken, maar van uit beheersstandpunt geniet eenzelfde diameter voor alle bekken sterk de voorkeur. Aangezien een diameter van 60 cm voor alle behalve één bekken voldoet, en aangezien de impact op de attractiviteit al bij al beperkt is in deze uitzonderlijke situatie, wordt de diameter voor de buizen naar de bekken vastgelegd op $D = 60$ cm.

Tabel 22 – Gerealiseerde toegevoegde debieten per ontvangend bekken voor een hoog afwaarts waterpeil $H_a = 5,0$ m TAW

bekken-nr.		12	19	25	31	38
	Hb [m TAW]	5,49	5,39	5,28	5,18	5,04
Qb+ [m³/s]	D = 50 cm	0,25	0,30	0,35	0,39	0,44
	D = 60 cm	0,35	0,43	0,50	0,56	0,63
	D = 70 cm	0,48	0,58	0,67	0,75	0,84

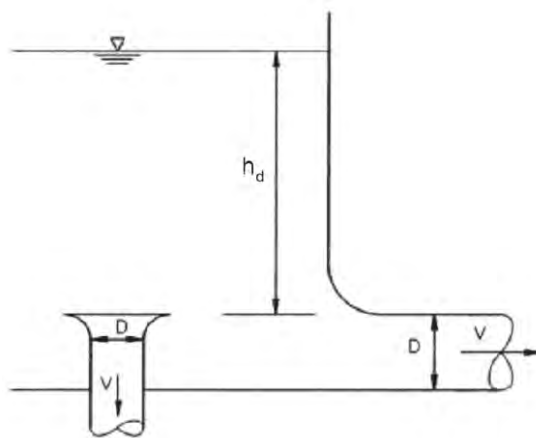
6.2.5 Buishoogte

In de literatuur worden criteria gegeven waarbij de relatieve waterdekking (h_d/D) groter moet zijn dan een bepaalde drempelwaarde, om aanzuiging van lucht te voorkomen. Deze drempelwaarde wordt daarbij meestal bepaald door de stroomsnelheid en het daarbij behorende Froudegetal:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{(g \cdot D)}} \quad [20]$$

Met:

Fr =	Froudegetal	[-]
V =	Stroomsnelheid	[m/s]
g =	Valversnelling (9,81)	[m/s²]
D =	Diameter koker	[m]



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

Figuur 67 – Definitieschets waterdekking (h_d) boven instroomopening met hydraulische diameter (D) en stroomsnelheid (V)

In Figuur 68 worden empirische resultaten weergegeven voor horizontale (en verticale) inlaten met en zonder problemen op het vlak van wervelvorming. De resultaten worden door middel van symbolen voorgesteld in een grafiek met op de horizontale as het Froudegetal en op de verticale as de relatieve waterdekking. Bij deze figuur worden twee zaken opgemerkt. Ten eerste worden in Figuur 68 ook een tweetal criteria uit de literatuur voorgesteld met volle lijnen. Deze volgen de formule:

$$\frac{h_d}{D} \geq a + b \cdot Fr \quad [21]$$

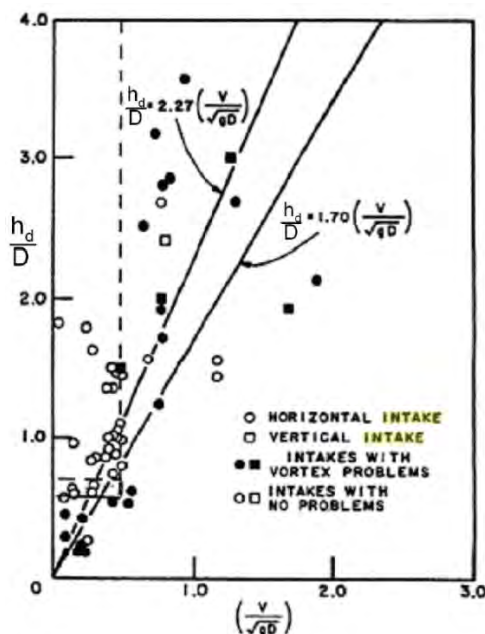
Met:

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

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

Ten tweede is in Figuur 68 ook een gebied te zien dat afgebakend wordt door een stippellijn. Binnen dit gebied wordt verwacht dat er op basis van de empirische resultaten een relatief 'veilig' ontwerp wordt bekomen ten aanzien van het voorkomen van luchtaanzuiging. Dit gebied wordt gedefinieerd door twee criteria die gelijktijdig vervuld moeten zijn:

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

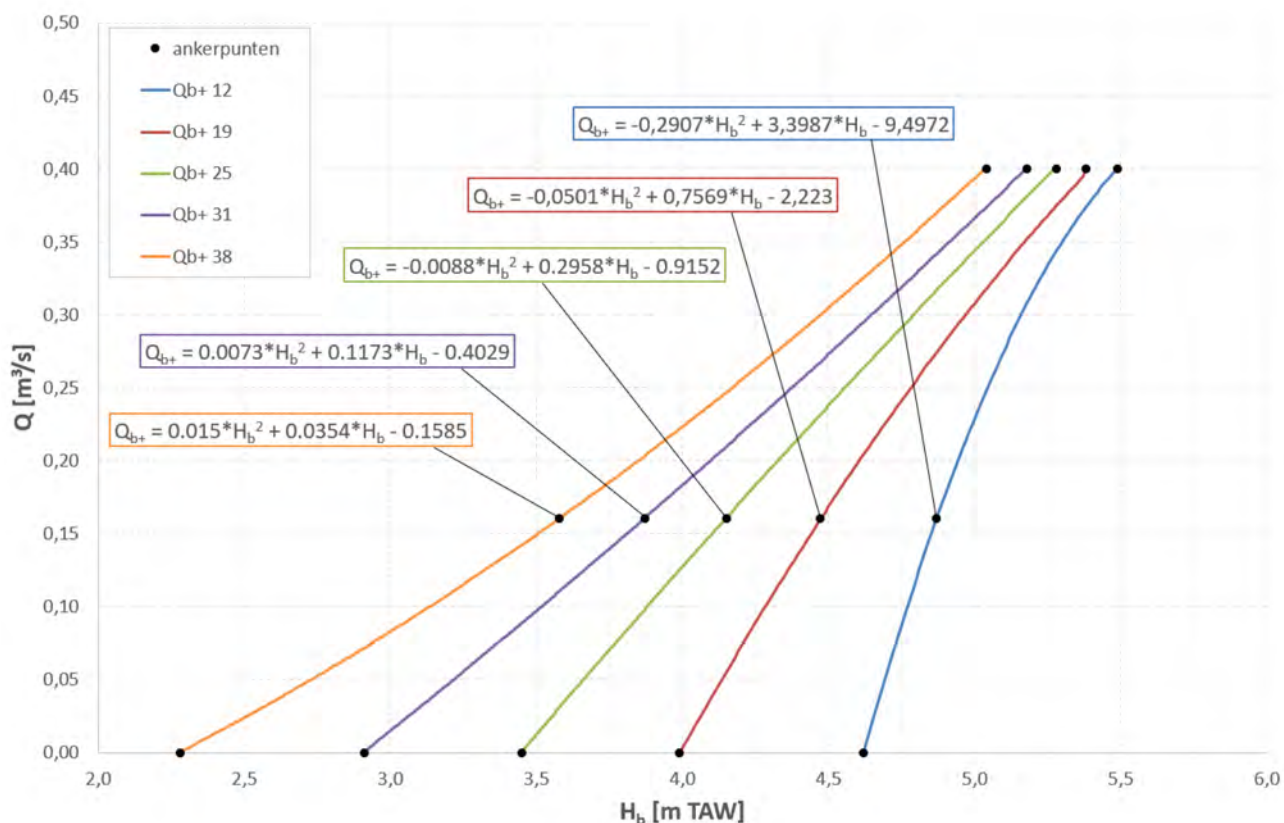


Figuur 68 – Relatieve waterdekking boven een instroomopening als functie van het Froudegetal (Bron: ASCE, 1995)

Op basis van de debieten uit Tabel 22 wordt duidelijk dat een Froude-getal $< 0,5$ niet haalbaar is voor de gegeven randvoorwaarden. De relatieve waterdekking zal dus groter moeten zijn dan 0,7. Op basis van de lineaire relaties in Figuur 68 en een diameter $D = 60$ cm is in principe een waterdekking van 0,75 à 1 m nodig. Omdat de buis niet te diep in de waterkolom mag steken, omdat anders de doorzwemdiepte te sterk verkleind, wordt de waterdekking (noodgedwongen) op 70 cm gelegd ($h_d/D = 1,17$). De binnenzijde van de bovenkant van de buizen in de bekkens komen daarmee op 5,00 mTAW te liggen. De praktijk zal moeten uitwijzen hoe groot het probleem van luchtaanzuiging werkelijk is. Eventueel kan nog een neerwaarts gericht opzetstuk voorzien worden, zodat de waterdekking relatief gezien toeneemt. De ladingsverliezen zullen dan ook toenemen, maar mits profilering van het opzetstuk kunnen deze minimaal gehouden worden.

6.2.6 Benodigde ladingsverliescoëfficiënt van de schuiven

In paragraaf 6.2.4 werd de buisdiameter voor de leidingen naar de bekken vastgelegd. In deze paragraaf wordt de benodigde ladingsverliescoëfficiënt van de schuif bepaald, nodig om het toegevoegd debiet Q_{b+} bij lagere afwaartse waterpeilen (en dus grotere vervallen) te beperken tot de vereiste waarde, zoals vastgelegd in Tabel 18. Om ook de tussenliggende situaties te kunnen berekenen, worden tussen de waarden (zgn. 'ankerpunten') uit Tabel 18 curves opgesteld (zie Figuur 69) aan de hand van een tweedegraadsvergelijking³. Die curves kunnen aanzien worden als het gewenste hydraulisch gedrag van het buizensysteem per bekken.



Figuur 69 – Gewenste relatie H_b - Q_{b+} per bekken

³ De keuze voor een tweedegraadscurve is enigszins arbitrair, en heeft vooral praktische redenen, nl. in de verdere berekeningen kon de tweedegraadsvergelijking gemakkelijk geïmplementeerd worden. Bovendien moet de bekomen curve door de ankerpunten gaan, omdat net deze waarden de vooropgestelde randvoorwaarden zijn. Een andere mogelijkheid zou bv. kunnen zijn om een getrapte lineaire curve te gebruiken. De resultaten zouden slechts weinig verschillen en binnen de marge van onzekerheid vallen, maar deze zou (iets) minder eenvoudig te implementeren zijn. Een hogere-graadscurve heeft geen zin, omdat er slechts drie punten beschikbaar zijn.

Met de buisdiameter gekend, alsook de gewenste Q-h-relatie in elk bekken, kan de benodigde ladingsverliescoëfficiënt van de schuif voor elke waterstand berekend worden. Immers, formule [19] kan herschreven worden als:

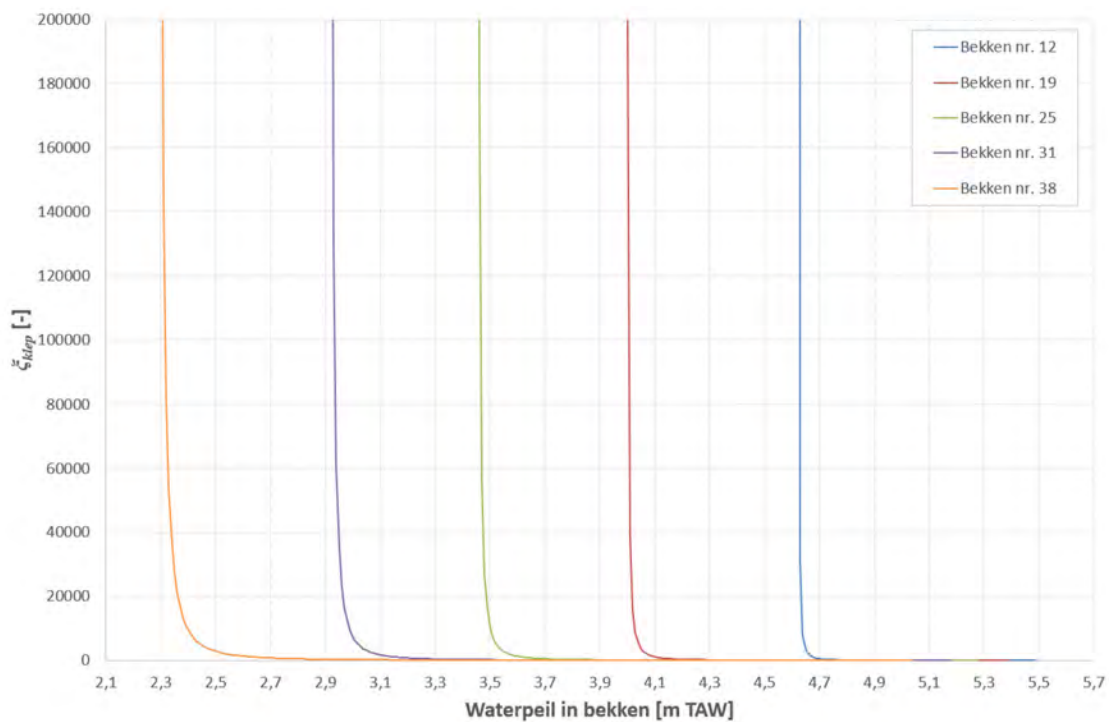
$$\xi_k = \frac{dH \cdot 2g \cdot A^2}{Q_{b+}^2} - \left[\sum_i (\xi_i + \xi_{w,i}) + \frac{1}{4} \cdot \sum_j (\xi_j + \xi_{w,j}) \right] \quad [22]$$

Aangezien H_b en dus dH en Q_{b+} gekend zijn vanuit de gewenste relatie uit Figuur 69, kan de ladingsverliescoëfficiënt van de klep dus rechtstreeks berekend worden voor elke waterstand en bijhorend debiet.

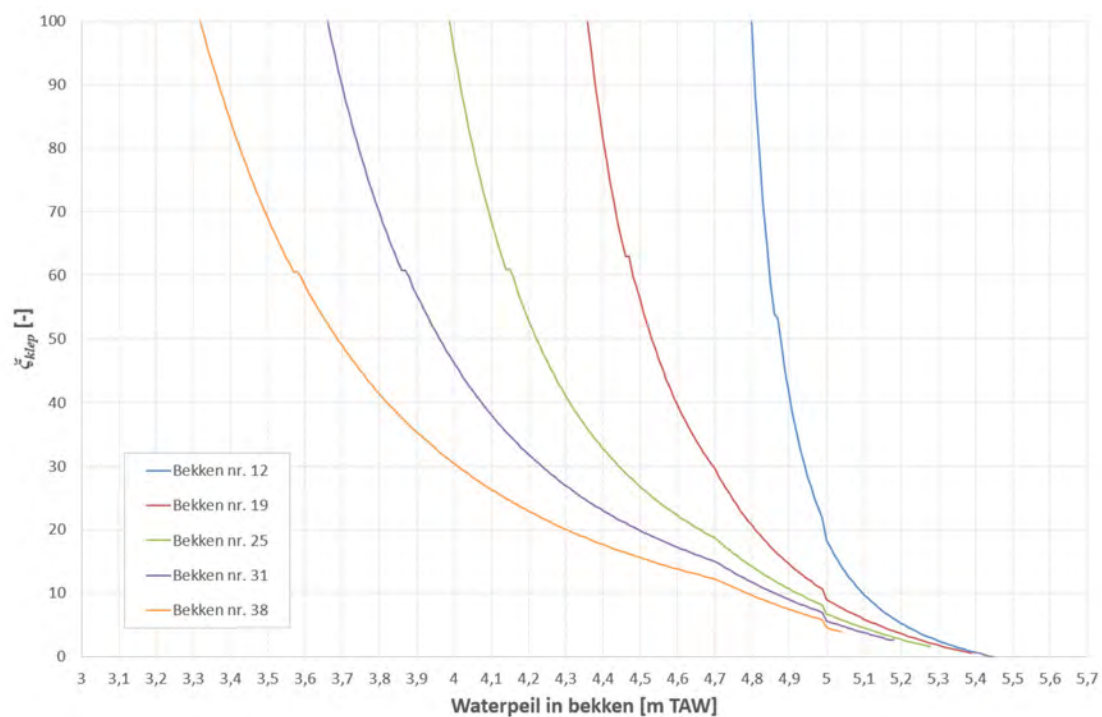
Zoals hierboven reeds aangehaald, ligt de BBK van de buizen naar de bekken op +5 m TAW, wat maakt dat de stroming niet meer over het volledige systeem onder druk geschiedt vanaf dat het waterpeil in de bekken onder een bepaalde waarde zakt. Er kan van uitgegaan worden dat tot aan de klep de stroming steeds onder druk stroomt. In principe moet dan een verhanglijn berekend worden tussen de klep en de uitstroom, waarbij het waterpeil in het bekken als afwaartse randvoorwaarde geldt (waterstand boven of onder kritische waterhoogte in de uitlaat). Een deel van het systeem kan hierbij nog steeds onder druk stromen. Eens de waterstand ter hoogte van de klep gekend is, is dH gekend en kan formule [22] toegepast worden.

De meerwaarde van de nauwkeurigheid van bovenstaande aanpak is echter beperkt, vandaar dat er teruggegrepen wordt naar een pragmatische aanpak. Zolang de waterstand in het bekken tot boven het centrum van de buis zit (dus zolang $H_b \geq BBK - D/2$) wordt gerekend alsof het volledige systeem onder druk staat, met Δh gelijk aan het waterpeilverschil. Zodra de waterstand onder het centrum van de buis zakt, wordt gerekend alsof er vrije uitstroom is achter de schuif, met $dH = H_{opw} - BBK - D/2$, wat dan constant blijft met dalende waterstand in het bekken. Deze benadering wordt als voldoende nauwkeurig beschouwd. Wanneer de waterstand in het bekken laag is, is immers ook Q_{b+} laag. Gezien de buis op dat moment sterk overgedimensioneerd is, zal de stroming vanaf de klep nauwelijks nog ladingsverliezen met zich meebrengen, en zal het doorgelaten debiet hierdoor niet beïnvloed worden.

Figuur 70 toont de resultaten van formule [22], voor het ganse bereik aan beschouwde waterstanden in elk bekken. Zoals verwacht lopen de curves asymptotisch naar oneindig bij het minimale waterpeil voor elk ontvangend bekken, het toegevoegd debiet moet immers nul worden. Figuur 71 toont een detail (ξ_k tot 100).

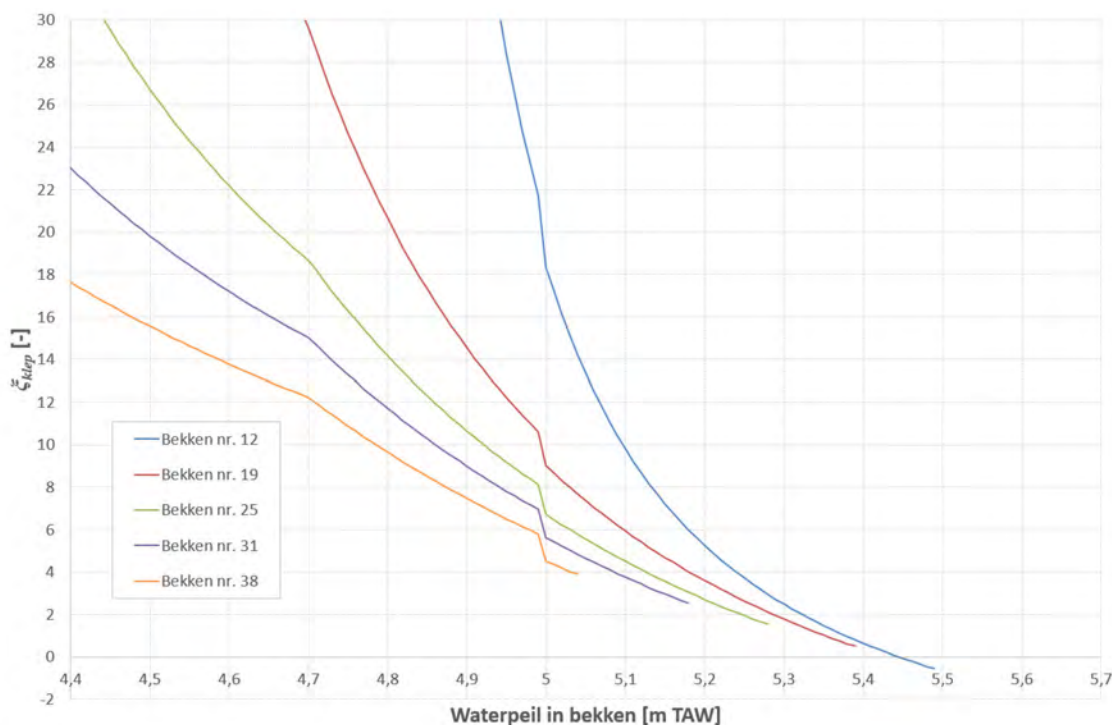


Figuur 70 – Benodigde ladingsverliescoëfficiënt in functie van de waterstand voor elk van de ontvangende bekkens



Figuur 71 – Benodigde ladingsverliescoëfficiënt in functie van de waterstand voor elk van de ontvangende bekkens (detail)

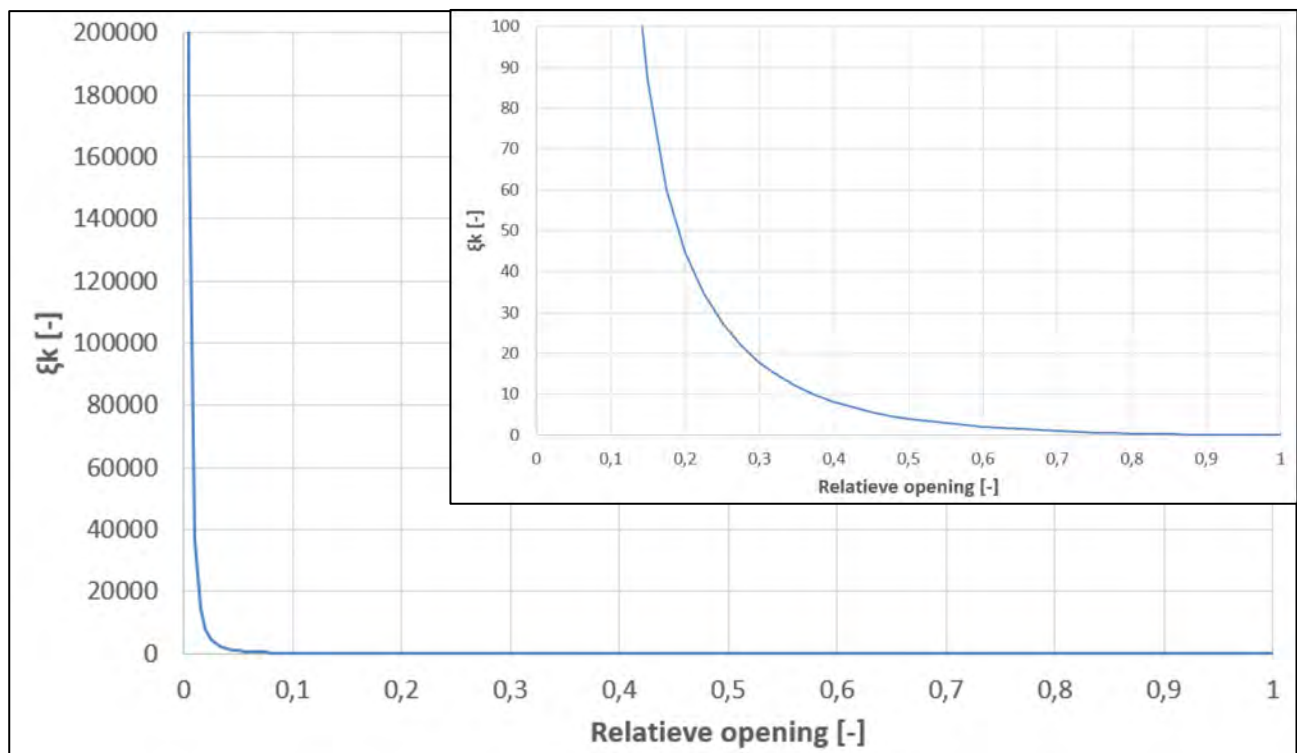
Ten slotte toont Figuur 72 een detail bij de hoogste waterstanden, wanneer de klep meer en meer moet open staan (ξ_k tot 30). In deze figuur wordt het effect van de vereenvoudiging voor waterpeilen rond de BBK duidelijk: de curve vertoont een sprong rond de waarde 5 m TAW. In principe zou de curve rond deze waarde dus (iets) anders verlopen. De grootte van de sprong blijft echter beperkt, en het resultaat wordt zeer aanvaardbaar geacht.



Figuur 72 – Benodigde ladingsverliescoëfficiënt in functie van de waterstand voor elk van de ontvangende bekken (detail 2)

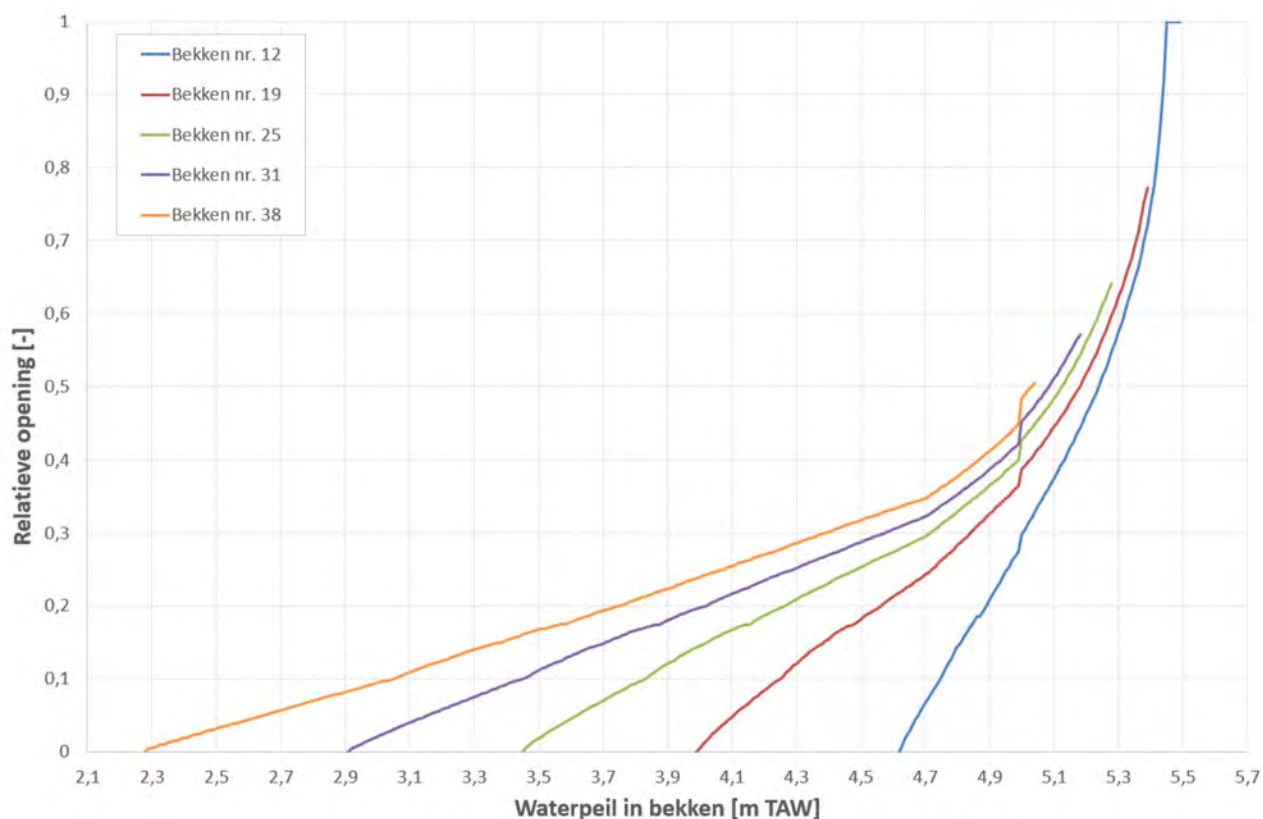
Belangrijker is wat er gebeurt vanaf 5,4 m TAW: de curve voor bekken nr. 12 duikt verder onder nul. Dit kan fysisch uiteraard niet, maar dit betekent wel dat het vooropgestelde debiet vanaf dat peil niet zal kunnen gehaald worden, zoals ook al zichtbaar gemaakt in Tabel 22.

De curves in Figuur 70 kunnen gebruikt worden om het schuif-vlottersysteem te ontwerpen. Om alvast een *indicatie* van de schuifstand te krijgen, worden de curves omgerekend naar een openingspercentage van een schuif met een schuifkarakteristiek (*i.e.* ladingsverliescoëfficiënt in functie van openingspercentage) zoals in Figuur 73. Deze functie werd overgenomen uit De Mulder *et al.* (2007), die op hun beurt de functie hebben opgesteld door middel van inter- en extrapolatie van gegevens uit Idelchik (1969).



Figuur 73 – Ladingsverliescoëfficiënt in functie van de relatieve opening van de beschouwde schuif

Figuur 74 toont het resultaat. Het blijkt dat, gegeven de schuifkarakteristiek uit Figuur 73, de schuif in bekken nr. 38 (het meest afwaartse ontvangende bekken) maximaal voor de helft geopend moet worden, terwijl dit voor bekken nr. 12 (het meest opwaartse ontvangende bekken) varieert van volledig dicht tot volledig open. Het effect van de vereenvoudiging voor de wissel in stromingsregime (atmosferisch of onder druk) rond 5,0 m TAW is ook nu weer zichtbaar.



Figuur 74 – Benodigde relatieve opening voor de beschouwde schuif in de buizen naar de bekken

Bij wijze van samenvatting worden de werkelijk optredende debieten Q_{b+} , met een gepaste ladingsverliescoëfficiënt van de schuif, per bekken en bij de verschillende afwaartse randvoorwaarden, gegeven in Tabel 23.

Tabel 23 – Gerealiseerde toegevoegde debieten per ontvangend bekken voor de beschouwde waterpeilen

Ho = 5,7 m TAW					
bekken-nr.	12	19	25	31	38
Ha = 2,1 m TAW					
Hb [m TAW]	4,62	3,99	3,45	2,91	2,28
Qb+ [m³/s]	0	0	0	0	0
Ha = 3,5 m TAW					
Hb [m TAW]	4,87	4,47	4,15	3,87	3,58
Qb+ [m³/s]	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
Ha = 5,0 m TAW					
Hb [m TAW]	5,49	5,39	5,28	5,18	5,04
Qb+ [m³/s]	0,35	0,40	0,40	0,40	0,40

6.3 Mondingskanaal

6.3.1 Principe

Ook afwaarts van de bekkens in het kanaal naar de monding dienen stroomsnelheden vanuit het oogpunt van attractiviteit voldoende hoog te blijven bij hogere afwaartse waterstanden. Daarnaast dient er in geval van verhoogde afvoer over de stuwen voldoende lokstroom gerealiseerd te worden ter plaatse van de monding. Daarom wordt juist afwaarts van de bekkens ook een toegevoegd debiet in het mondingskanaal ingelaten via een zijdelings bassin. Het debiet wordt ingebracht op één locatie net afwaarts van het laatste bekken van de vispassage en aan de opwaartse zijde van het mondingskanaal. Om met oog op het benodigde debiet de buisdiameter te beperken wordt het debiet ingelaten doormiddel van twee naast elkaar gelegen buizen. Ook hier wordt de grootte van het toegevoegd debiet geregeld door schuiven in de buizen die mechanisch verbonden zijn aan vlotters.

Figuur 75 toont een voorbeeld van een al uitgevoerd bassin voor de inbreng van dit toegevoegd debiet in de voorbeeldvispassage te Geesthacht. Zie ook locatie 3 in Figuur 57 voor de toepassing van dit type toegevoegd debiet in het ontwerp te Merelbeke.



Figuur 75 – Foto's buizen toegevoegd debiet in het mondingskanaal van de dubbelslot-vispassage te Geesthacht

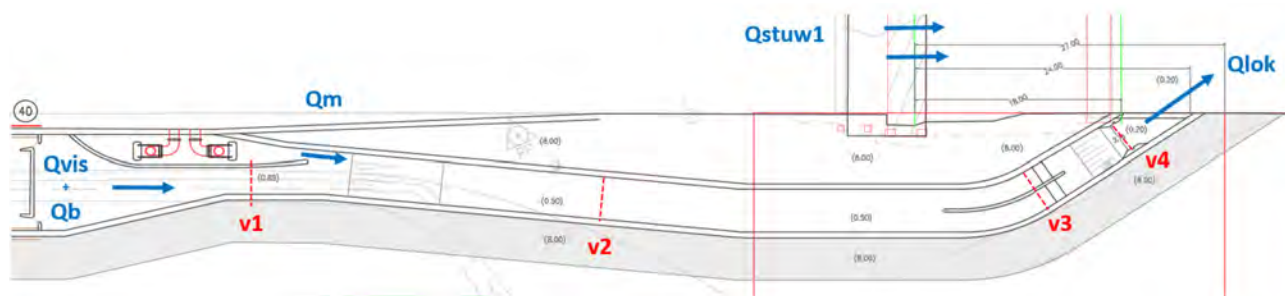
6.3.2 Benodigd debiet

Het minimaal benodigde toegevoegd debiet in het mondingskanaal, dat net afwaarts van het laatste bekken wordt ingelaten, wordt bepaald door twee doelstellingen:

- Behoud voldoende hoge stroomsnelheden in het lokstroomkanaal vanuit rheotactisch oogpunt (zie paragraaf 2.2.4) bij sterk variabel afwaarts waterpeil: richtlijn: $v_{\text{gem}} > 0,30 \text{ m/s}$;
- Voldoende sterke lokstroom in concurrentie met het debiet over de stuwen (minimaal) gedurende de periode van optimale werking (zie paragraaf 2.2.5: richtlijn $Q_{\text{lok}}/Q_{\text{stuw1}} > 0,10$). Hierbij moet echter ook altijd gecontroleerd worden dit niet leidt tot te hoge stroomsnelheden op bepaalde locaties ($v_{\text{gem}} < 1 \text{ m/s}$ voor korte afstanden (circa 1-2 m); $v_{\text{gem}} < 0,5 \text{ m/s}$ voor afstanden groter dan circa 5 m).

Figuur 76 toont enkele maatgevende locaties waarvoor de gemiddelde stroomsnelheden werden bepaald bij de drie maatgevende scenario's bij normale werking uit Tabel 13, namelijk gemiddeld laagwater bij gemiddeld tij (S0), gemiddeld tij (S1) en gemiddeld hoogwater bij gemiddeld tij (S2).

Tabel 24 toont voor elk van deze locaties en scenario's enkele varianten voor de inlaat van het toegevoegd debiet en de daarbij optredende stroomsnelheden. Hierbij werd ook gekeken naar de verhouding tussen het lokstroomdebiet (Q_{lok}) en het debiet over de stuwen (Q_{stuw}) bij een $Q_{90\%}$ -afvoer en een $Q_{10\%}$ -afvoer (de boven en ondergrens voor optimale werking). Merk op dat voor het debiet over de stuwen enkel de interactie met het debiet over de stuw aan de zijde van de vispassage monding (Q_{stuw1}) van belang is. Aangezien er twee stuwen aanwezig zijn wordt voor het debiet over deze stuw steeds de helft van de maatgevende afvoer genomen (Q_{stuw1}). De $Q_{90\%}$ en $Q_{10\%}$ zijn respectievelijk $6 \text{ m}^3/\text{s}$ en $90 \text{ m}^3/\text{s}$, zie Tabel 8.



Figuur 76 – Maatgevende locaties voor bepaling stroomsnelheden in lokstroomkanaal

Tabel 24 – Relatie inbreng toegevoegd debiet en stroomsnelheden in lokstroomkanaal

scen/var*	Ho	Ha	Qvis	Qb	Qm	Qlok	Qstuw1	Qlok/Qstuw1	v1	v2	v3	v4
(-)	mTAW	mTAW	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	(-)	m/s	m/s	m/s	m/s
S0	5,7	2,1	2,06	0	0	2,06	3	0,69	0,69	0,32	0,37	0,39
S0M	5,7	2,1	2,06	0	1	3,06	45	0,07	0,69	0,48	0,55	0,58
S1	5,7	3,5	2,00	0	0	2,00	3	0,67	0,31	0,17	0,19	0,22
S1B	5,7	3,5	2,00	0,8	0	2,80	3	0,93	0,43	0,23	0,27	0,31
S1BM	5,7	3,5	2,00	0,8	2	4,80	45	0,11	0,43	0,40	0,46	0,53
S2	5,7	5	1,50	0	0	1,50	3	0,50	0,15	0,08	0,10	0,11
S2B	5,7	5	1,50	2	0	3,50	3	1,17	0,34	0,19	0,22	0,27
S2BM	5,7	5	1,50	2	2	5,50	45	0,12	0,34	0,31	0,35	0,42

bodemhoogte (mTAW):	Hb	0,9	0,5	0,5	0,2
breedte (m):	B	2,5	4	3,5	2,75

* S0, S1 en S2 = zonder toegevoegd debiet; 'B' = enkel toegevoegd in bekkens; BM = toegevoegd debiet in zowel bekkens (Qb) als mondingskanaal (Qm)

Uit Tabel 24 blijkt het volgende:

- Bij scenario S0 is in principe geen extra toegevoegd debiet nodig vanuit rheotactisch oogpunt (voldoende stroomsnelheid om 'voelbaar' te zijn voor de vis) in het lokstroomkanaal, maar dat voor een goede concurrentie met het debiet over de stuwen voor een optimale lokstroom wel best extra debiet wordt ingelaten. Circa $1 \text{ m}^3/\text{s}$ lijkt een optimum aangezien stroomsnelheden in het lokstroomkanaal ook weer niet te hoog mogen worden (voor $V_{2\text{gem}} < 0,5 \text{ m/s}$).
- Bij het scenario S1 is toevoeging van extra debiet nodig vanuit zowel rheotactisch oogpunt als vanuit oogpunt optimale lokstroom. Om deze beide doelen optimaal te kunnen invullen en stroomsnelheden in het lokstroomkanaal (vooral ter plaatse van V2) ook niet te hoog te maken is een 'extra' debiet van circa $2 \text{ m}^3/\text{s}$ optimaal.
- In geval van het bovengrens scenario S2 is het extra debiet vooral benodigd vanuit rheotactisch oogpunt. In principe zou je vanuit dit oogpunt en de maximaal toelaatbare snelheid in het lokstroomkanaal (V2) kunnen gaan tot een 'extra' debiet van circa $5 \text{ m}^3/\text{s}$. Ook voor het versterken van de lokstroom zou dit goed zijn. Maar dit zou vanuit een hydraulisch oogpunt echter leiden tot relatief grote buisdiameters gegeven het relatief kleine hydraulische verval in dit scenario. Deze ruimte is echter niet beschikbaar ter plaatse van de inlaat, zie paragraaf 6.3.4. De grootst haalbare diameter bleek 80 cm, wat gegeven het kleine verval een maximaal debiet kan leveren van circa $1 \text{ m}^3/\text{s}$ per buis. Aangezien er twee buizen kunnen worden ingepast is het maximaal haalbare debiet in dit scenario circa $2 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Hoewel het extra toegevoegd debiet in het lokstroomkanaal ook nodig is voor situaties met hoger debiet over de stuwen (criterium voldoende sterke lokstroom), bleek dat het criterium van voldoende stroomsnelheid bij hogere afwaartse waterstanden maatgevend is. Dit betekent dat de regeling van dit afwaartse toegevoegde debiet best op dezelfde manier wordt uitgevoerd als in de bekkens (zie paragraaf 6.2), namelijk een mechanische sluiters met vlotter voor dagelijkse regeling en een elektromechanische schuif voor sluiting bij te weinig beschikbaar debiet (zie hoofdstuk 8).

Tabel 25 toont de hydraulische randvoorwaarden voor de buizen naar het mondingskanaal op basis van het voorgaande. Net zoals bij de buizen naar de bekkens worden als afwaarts peil volgende waarden beschouwd: 2,1 m TAW, 3,5 m TAW, en 5,0 m TAW. In principe treedt er ook een verschil op tussen H_a en het waterpeil in het bassin. Echter gezien het feit dat het bassin nog dicht bij het afwaarts pand van de Ringvaart ligt en de opening veel ruimer is, wordt aangenomen dat de ladingsverliezen verwaarloosbaar zijn tussen de uitstroom en het bassin. De peilen in het bassin H_b [m TAW] worden dus gelijk genomen aan H_a . Net zoals bij de bekkens is het benodigd debiet per buis maximaal voor de situatie waarbij het verval tussen het opwaarts pand van de Ringvaart *bij streefpeil* en het bassin minimaal is. Bij toenemend verval moet het debiet door de buis verminderen. De afsluiter op de buis wordt daarom ook aangestuurd door middel van het vlotter-hefboomsysteem. Er kan opgemerkt worden dat vanaf $H_a \geq 3,5 \text{ m TAW}$, het benodigd debiet constant blijft.

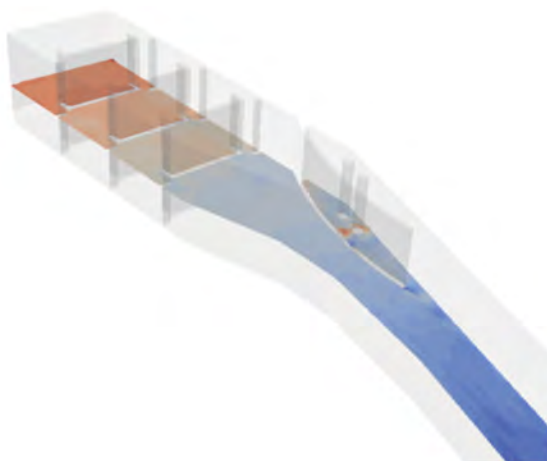
Tabel 25 – Hydraulische randvoorwaarden voor elk van de twee buizen van het toegevoegd debiet in het mondingskanaal

Opwaarts peil pand Ringvaart	Ho [m TAW]	5,7	5,7	5,7
Afwaarts peil pand Ringvaart	Ha [m TAW]	2,1	3,5	5,0
Benodigd debiet per buis	Qm+ [m^3/s]	0,5	1,0	1,0
	Bassin	Peil in bassin H_b [m TAW]		
		2,1	3,5	5,0

6.3.3 Controle stroompatronen (CFD)

Met oog op de controle van de stroompatronen in het lokstroomkanaal bij inbreng toegevoegd debiet werd een verkennende simulatie uitgevoerd in CFD, Figuur 77 geeft een 3D-impresie van het toegepaste model.

Aangezien deze simulatie in de verkennende fase werd uitgevoerd werd nog uitgegaan van de dimensionering met slotdieptes van 1,8 m (zie paragraaf 3.3.3), vier inlaatpunten voor het toegevoegd debiet in de bekkens (zie paragraaf 6.2.3) en een tracé van het lokstroomkanaal rond het schotbalkplatform in plaats van er onder door (zie paragraaf 3.1). Aangezien de verhoudingen tussen het toegevoegd debiet in het lokstroom kanaal ten opzichte van het vispassagedebiet, en ook de uitstroom uit het bassin van het toegevoegd debiet in het lokstroomkanaal zo goed als gelijk zijn gebleven, wordt verwacht dat deze simulaties toch nog een goed beeld kunnen geven van de te verwachten stroompatronen.

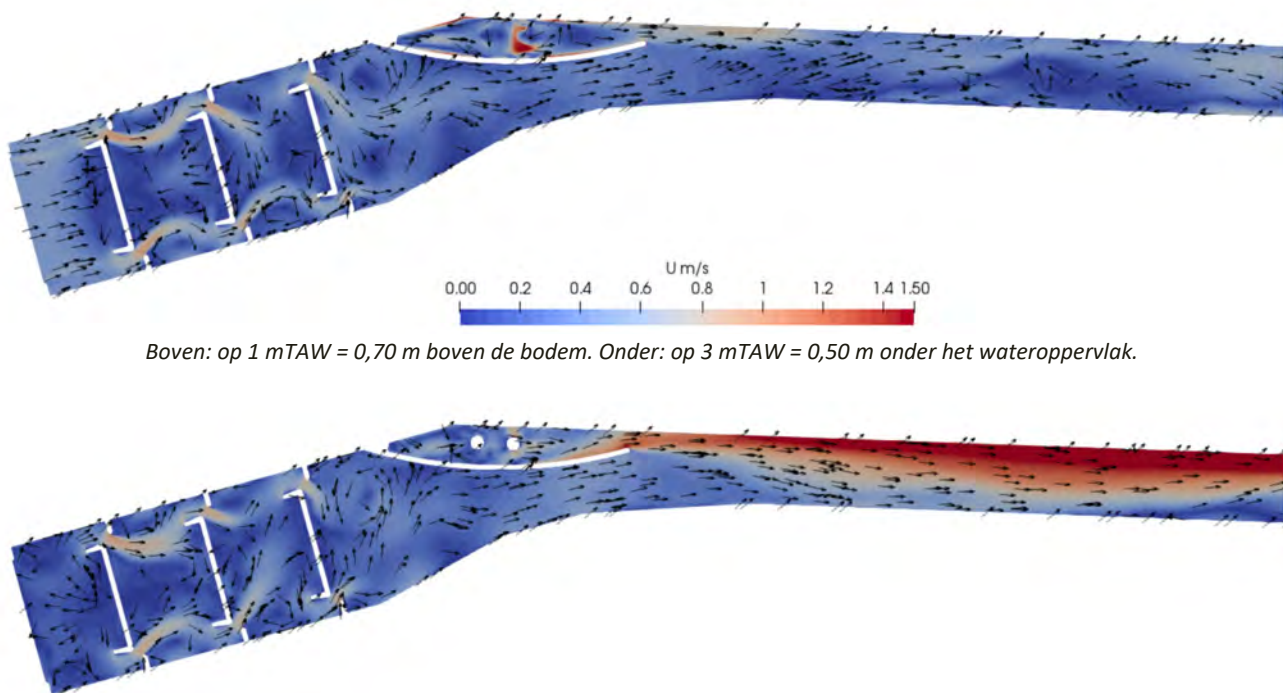


Figuur 77 – Visualisatie 3D-model voor CFD-simulaties inbreng toegevoegd debiet in lokstroomkanaal

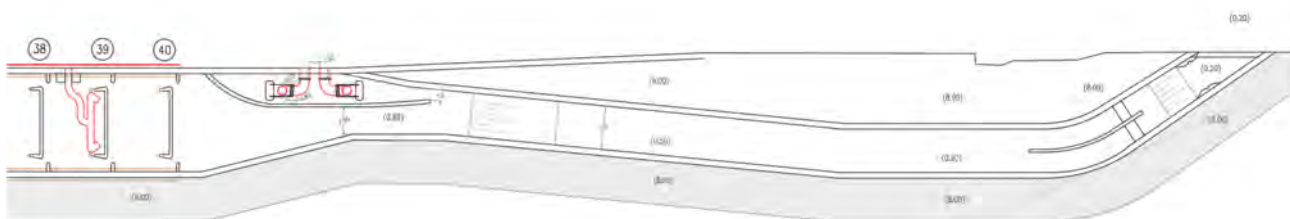
De simulatie werd gedaan voor scenario S1 (gemiddeld afwaarts tij) en had de volgende hydraulische randvoorwaarden en uitgangspunten:

- Aan opwaartse zijde van het model werden de drie meest afwaartse bekkens en sloten opgenomen in het model;
- Aan de opwaartse rand van het model werd een debiet opgelegd van $3,90 \text{ m}^3/\text{s}$, bestaande uit het vispassagedebiet ($Q_{\text{vis}} = 2,70 \text{ m}^3/\text{s}$) en het toegevoegd debiet in bekkens van ($Q_b = 1,2 \text{ m}^3/\text{s}$).
- Aan de afwaartse zijde (einde van het lokstroomkanaal) werd het afwaartse waterpeil volgens het gemiddeld tij ($=3,50 \text{ mTAW}$) opgelegd.
- De buizen in het bassin werden fysiek opgenomen in het model, maar de stroming in de buizen zelf werd niet gesimuleerd. Met andere woorden, het toegevoegd debiet werd uniform ingelaten aan het einde van de buizen.
- Voor het toegevoegd debiet in het bassin werd $3 \text{ m}^3/\text{s}$ gekozen; $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ per buis.
- De breedte van de uitstroom van het bassin is 1 m; de breedte van de doorstroom in de vispassage tussen de wand van het bassin en de zijwand van de vispassage is op het nauwste punt 2,5 m.
- De breedte van het lokstroomkanaal is 4 m en heeft een bodemhoogte van 0,30 mTAW (= ondergrens afwaarts waterpeil normale werking van 2,10 mTAW min de in de aanvankelijk gekozen slotdiepte van 1,8m).

Figuur 78 toont de resultaten voor de stroompatronen en stroomsnelheden op 70 cm boven de bodem (= 1 mTAW) en op 50 cm onder het wateroppervlak (= 3 mTAW). Om een vergelijking kunnen te kunnen maken met het finale ontwerp toont Figuur 79 ook dit ontwerp.



Figuur 78 – Stroompatronen en -snelheden in het lokstroomkanaal bij inlaten toegevoegd debiet



Figuur 79 – Grondplan finaal ontwerp lokstroomkanaal

Met oog op de evaluatie van de stroming zijn vooral de volgende twee aspecten van belang:

- Voldoende ruimte langs het volledige tracé van het lokstroomkanaal waar stroomsnelheden laag genoeg blijven ($V < 0,5$ m/s) vanuit oogpunt passeerbaarheid.
- Het voorkomen van complexe stroompatronen zoals recirculatieneren ten gevolg van de inlaat van het toegevoegd debiet;

Aan beide aspecten wordt voldaan.

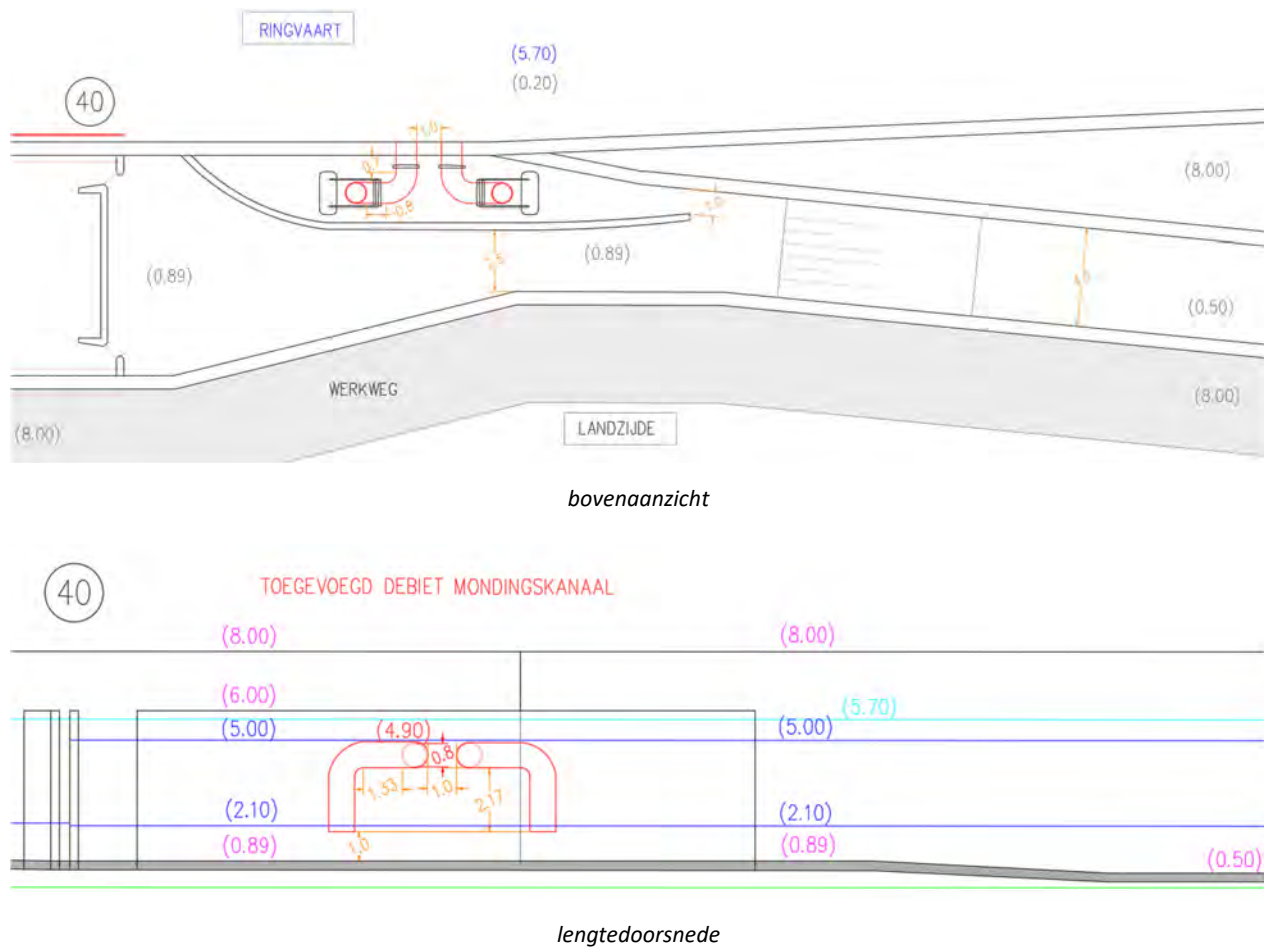
Ten aanzien van het eerste aspect zien we dat de hogere stroomsnelheden afwaarts van de inlaat zich vooral aan de rechterzijde van het wateroppervlak bevinden. Aan deze rechterzijde/ inlaatzijde liggen stroomsnelheden wel relatief hoog 1 tot 1,5 m/s, maar aan de linkerzijde van het kanaal liggen deze al een stuk lager (circa 0,5 tot 1 m/s). Belangrijker voor het passeerbaarheids criterium is echter dat in het onderste helft van de waterkolom stroomsnelheden wel duidelijk veel lager blijven. Stroomsnelheden liggen daar tussen de 0,4 en 0,6 m/s.

Het tweede aspect (voorkomen recirculatie neren) is afhankelijk van de verhouding tussen het debiet dat uit het bassin stroomt (het toegevoegd debiet Q_m) en het debiet dat door de vispassage langs het bassin stroomt ($Q_{vis} + Q_b$). In de simulatie was deze verhouding $Q_m / (Q_{vis} + Q_b) = 3/3,9$. Tevens is de verhouding tussen de stroomsnelheden van de uitstroom uit het bassin en de stroomsnelheden in het lokstroomkanaal van belang. In de simulatie was deze verhouding respectievelijk 0,94 m/s ten opzichte van 0,49 m/s (iets kleiner dan factor 2). Wanneer deze verhouding laag genoeg blijft dan is de kans op de neervorming na inlaat klein, wat ook blijkt uit de simulatie. In het uiteindelijke ontwerp zijn deze verhoudingen voor alle scenario kleiner dan de verhoudingen in deze verkennende simulatie, waardoor mag worden aangenomen dat er geen complexe stroompatronen zullen optreden.

6.3.4 Buisdiameter

De buisdiameter wordt bepaald op eenzelfde manier als bij de bekkens (zie paragraaf 6.2.4). In tegenstelling tot bij de bekkens, moet de buisdiameter niet per se minimaal gehouden worden omwille van obstructie voor vissen. Echter blijft een zo klein mogelijke diameter wenselijk omwille van inpassing van de buizen en bijhorende vlotter-hefboomsystemen in het bassin. Figuur 80 toont de beschouwde configuratie.

Tabel 26 geeft een overzicht van de geometrie van de buizen. Het gaat om een symmetrische opstelling van twee buizen. De doorgang door de scheidingswand gebeurt door een recht stuk ronde buis, waarna een zijwaartse bocht volgt. Vervolgens komt een recht stuk met daarin de schuif geplaatst. Daarna volgt een neerwaartse bocht met dezelfde bochtstraal en draaiingshoek als de zijwaartse bocht, gevolgd door een recht stuk tot onder het laagste peil.



Figuur 80 – Buizen toegevoegd debiet mondingskanaal

Tabel 26 – Geometrie van de buizen voor toegevoegd debiet naar het bassin van het mondingskanaal

Component	Lengte [m]	Bochtstraal [m]	Draaiingshoek [°]	Qm+ [%]
recht stuk door scheidingswand	1,25	-	-	100%
bocht zijwaarts	1,29	0,82	90	100%
recht stuk + schuif	0,93	-	-	100%
bocht neerwaarts	1,29	0,82	90	100%
recht stuk tot uitlaat	1,87	-	-	100%
TOTAAL	6,63			

De binnenbovenkant (BBK) van de instroom wordt gelijk genomen aan +4,90 m TAW, ofwel 80 cm onder het wateroppervlak in het opwaarts pand. De monding ligt 20 cm onder het laagste beschouwde waterpeil, dus op 1,90 m TAW. Afhankelijk van het peil in het bekken zal de uitstroom dus onder vrij oppervlak of onder druk gebeuren.

Dezelfde zaken als bij de berekening van de buizen naar de bekkens worden vooropgesteld bij de berekeningen:

- Er wordt geen vuilrooster beschouwd;
- Er wordt aangenomen dat een volledig openstaande schuif geen ladingsverlies veroorzaakt ($\xi_k = 0$);
- De wrijvingsfactor f [-] wordt constant genomen, gelijk aan 0,0180. De reden dat hier met een iets kleinere wrijvingsfactor gewerkt wordt, is het verschil in de relatieve wandruwheid ε/D en het Reynoldsgetal;
- De coëfficiënt ten gevolge van de bochten is afhankelijk van de precieze configuratie: bochten die kort op mekaar volgen en die *in perpendiculaire vlakken* liggen, geven tesamen een ander ladingsverlies dan de afzonderlijke delen. Idelchik (2007) geeft diagrammen voor verschillende configuraties, de gebruikte diagrammen zijn terug te vinden in *Bijlage 2 – Ladingsverliescoëfficiënten uit Idelchik (2007)*.

Tabel 27 geeft de daarbij gebruikte waarden weer voor de verschillende componenten. De waarden zijn gebaseerd op Nortier & de Koning (1996) en Idelchik (2007). Daarbij wordt $f \cdot l/D = \xi_w$ gesteld. Er wordt aangenomen dat een volledig openstaande schuif geen ladingsverlies veroorzaakt ($\xi_k = 0$). Ook nu weer overheersen de bijzondere ladingsverliezen, met de inlaat en uitlaat de grootste bijdrage. En ook nu weer neemt de ladingsverliescoëfficiënt van de opeenvolgende bochten toe met toenemende diameter. Daartegenover staat uiteraard wel een lagere stroomsnelheid bij stijgende diameter.

Tabel 27 – Ladingsverliescoëfficiënten van de buizen naar het bassin van het mondingskanaal

Component	Lengte [m]	f [-]	D = 70 cm		D = 80 cm		D = 90 cm	
			ξ_w [-]	ξ [-]	ξ_w [-]	ξ [-]	ξ_w [-]	ξ [-]
inlaat	-	-	-	0,5	-	0,5	-	0,5
recht stuk door scheidingswand	1,25	0,0180	0,03	-	0,03	-	0,03	-
bocht zijwaarts + recht stuk + bocht neerwaarts	3,51	0,0180	0,09	0,24	0,08	0,33	0,07	0,45
schuif	-	-	-	0	-	0	-	0
recht stuk (verticaal) tot uitlaat	1,87	0,0180	0,05	-	0,04	-	0,04	-
uitlaat	-	-	-	1,0	-	1,0	-	1,0
Subtotaal			0,17	1,74	0,15	1,83	0,14	1,95
TOTAAL	6,63		1,91		1,98		2,09	

Met de hydraulische randvoorwaarden uit Tabel 25, overeenstemmend met de hoge afwaartse waterstand $H_a = 5,0$ m TAW en een opwaarts waterpeil van 5,7 m TAW, en de ladingsverliescoëfficiënten uit Tabel 27 kan via formule [17] de capaciteit van de buizen berekend worden voor verschillende diameters. De resultaten worden weergegeven in Tabel 28. Daaruit blijkt dat een diameter $D = 70$ cm in principe voldoet. Er is echter zeer weinig marge (3%) om onzekerheden in de berekening en uitvoering op te vangen. Aangezien er voldoende plaats is voor een diameter $D = 80$ cm, geeft een keuze voor die maat voldoende marge (30%) om onzekerheden op te vangen. Bovendien geeft dit de mogelijkheid om het debiet Q_m op te trekken naar $2,6 \text{ m}^3/\text{s}$, indien mocht blijken dat $2 \text{ m}^3/\text{s}$ onvoldoende is. Deze redenering volgend zou ook de keuze $D = 90$ cm kunnen gemaakt worden, maar deze diameter valt al veel moeilijker in te passen. De diameter voor de buizen naar het bassin aan het mondingskanaal wordt vastgelegd op $D = 80$ cm.

Tabel 28 – Gerealiseerde toegevoegde debieten in het bassin van het mondingskanaal voor een hoog afwaarts waterpeil
 $H_a = 5,0$ m TAW

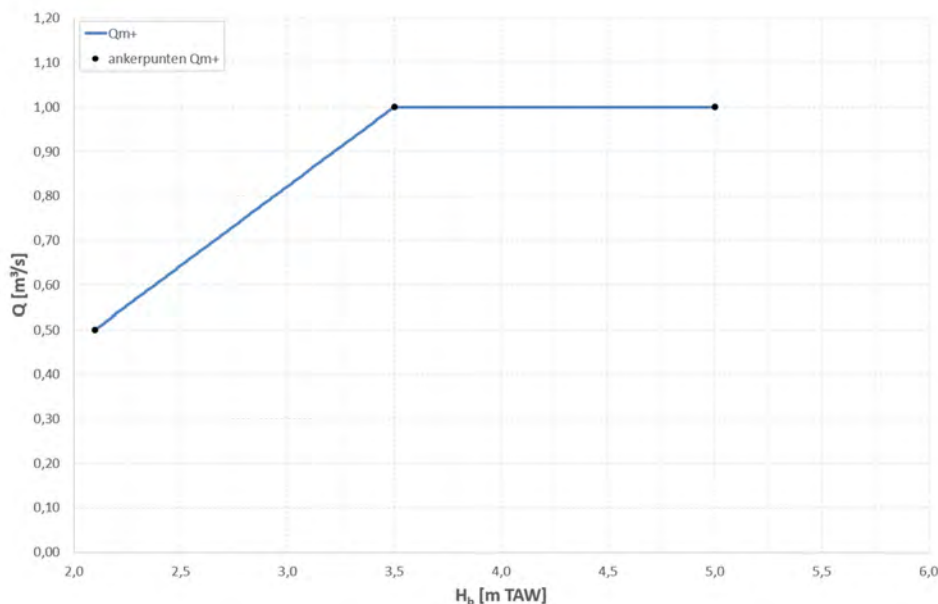
Opwaarts pand	H_o [m TAW]	5,7
Bassin	$H_b = H_a$ [m TAW]	5,0
Q_{m+} [m ³ /s]	$D = 70$ cm	1,03
	$D = 80$ cm	1,32
	$D = 90$ cm	1,63

6.3.5 Buishoogte

De formules zoals uiteengezet in paragraaf 6.2.5 kunnen ook hier gebruikt worden. Ook nu weer is een Froude-getal $< 0,5$ niet haalbaar voor de gegeven randvoorwaarden, dus h/D moet groter zijn dan 0,7. Op basis van de lineaire relaties in Figuur 68 en een diameter $D = 80$ cm is in principe een waterdekking van 1,2 à 1,6 m nodig. Deze diepte wordt niet gehaald, de bovenkant van de buis zit immers op +4,9 m TAW dus 80 cm diep ofwel $h/D = 1$. Ook nu weer zal de praktijk moeten uitwijzen hoe groot het probleem van luchtaanzuiging werkelijk is. Eventueel kan nog een neerwaarts gericht opzetstuk voorzien worden, zodat de waterdekking relatief gezien toeneemt. De ladingsverliezen zullen dan ook toenemen, maar mits profilering van het opzetstuk kunnen deze minimaal gehouden worden.

6.3.6 Benodigde ladingsverliescoëfficiënt van de schuiven

In paragraaf 6.3.4 werd de buisdiameter voor de leidingen naar het bassin aan het mondingskanaal vastgelegd. Net als bij de buizen naar de bekkens moet nog de benodigde ladingsverliescoëfficiënt van de schuif bepaald worden, nodig om het toegevoegd debiet Q_{m+} bij lagere afwaartse waterpeilen (en dus grotere vervallen) te beperken tot de vereiste waarde, zoals vastgelegd in Tabel 25. Dezelfde methode wordt gevolgd. De 'ankerpunten' uit Tabel 25 leiden tot een lineaire interpolatie (zie Figuur 81).



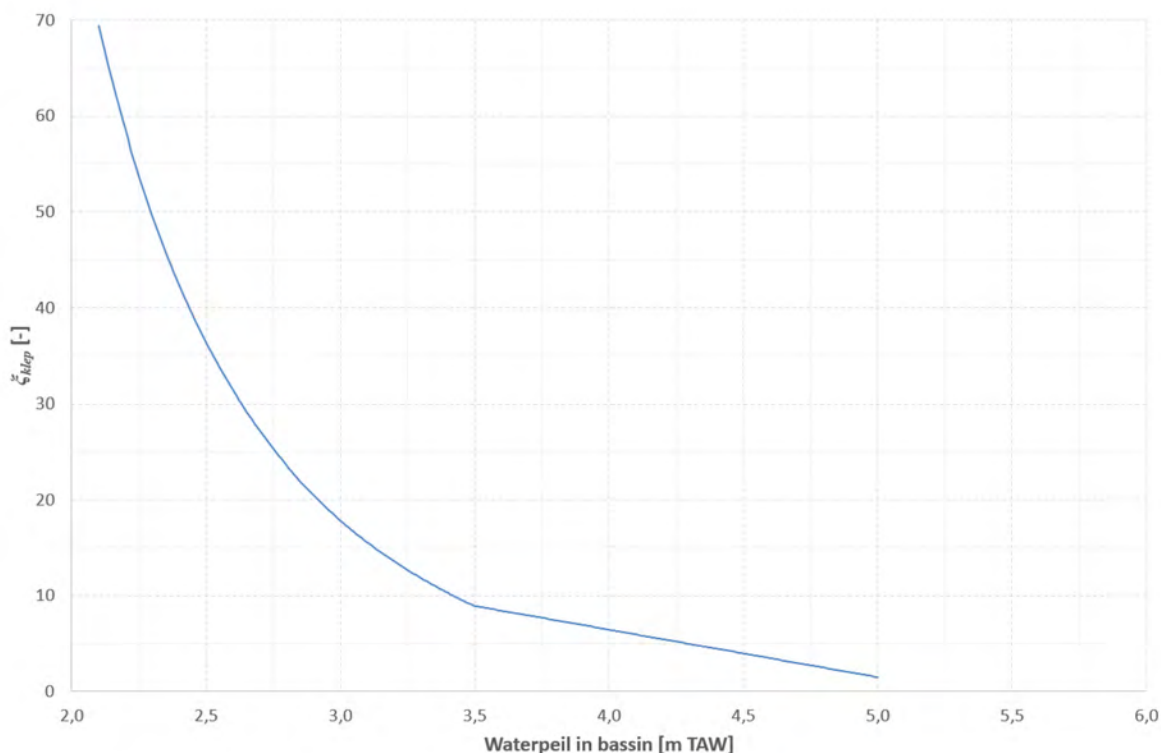
Figuur 81 – Gewenste relatie H_b - Q_{m+} voor het bassin van het mondingskanaal

De benodigde ladingsverliescoëfficiënt van de schuif voor elke waterstand wordt deze keer berekend aan de hand van volgende formule:

$$\xi_k = \frac{dH \cdot 2g \cdot A^2}{Q_{m+}^2} - \sum_i (\xi_i + \xi_{w,i}) \quad [23]$$

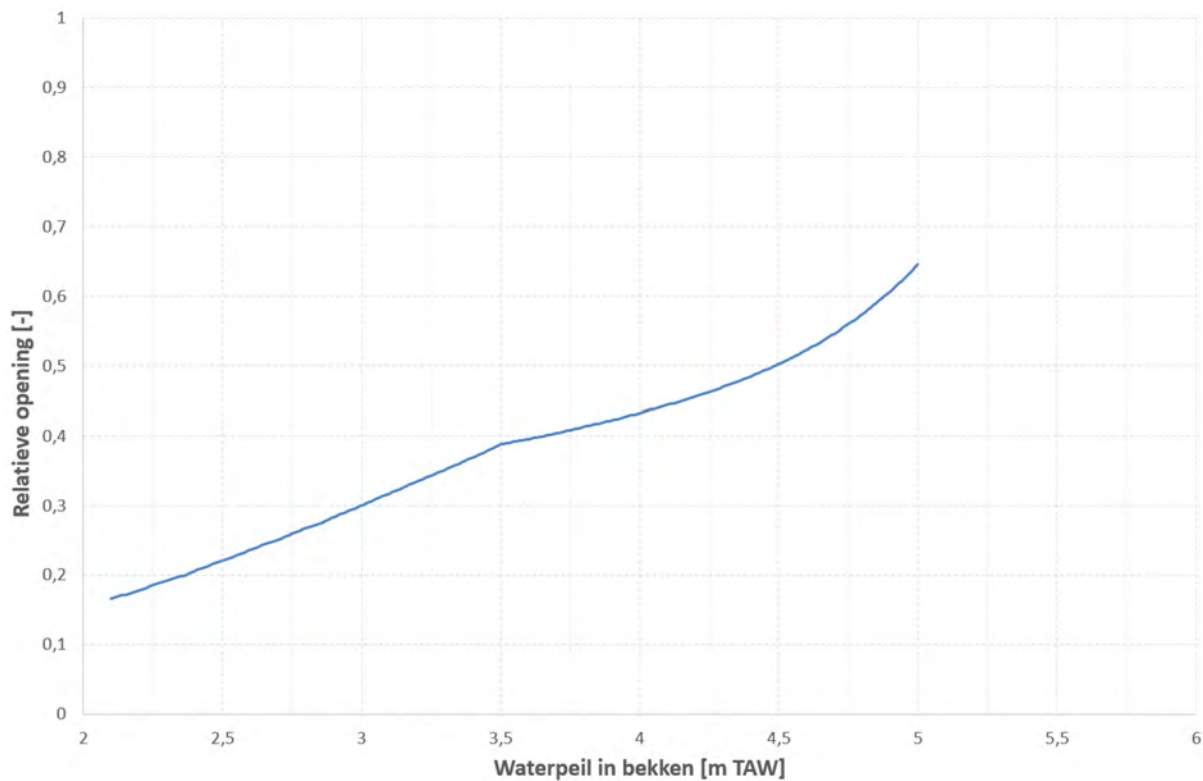
De uitlaat ligt op +1,90 m TAW, wat 20 cm onder het laagste beschouwde peil ligt. De stroming is dus steeds een stroming onder druk.

Figuur 82 toont de resultaten van formule [23], voor het ganse bereik aan beschouwde waterstanden in het bassin. In tegenstelling tot bij de bekkens loopt de curve nu niet asymptotisch naar oneindig bij het minimale waterpeil, omdat op dat moment nog steeds een debiet toegevoegd moet worden.



Figuur 82 – Benodigde ladingsverliescoëfficiënt in functie van de waterstand in het bassin van het mondingskanaal

Ook nu weer kan de curve uit Figuur 82 gebruikt worden om het schuif-vlottersysteem te ontwerpen. Om alvast een *indicatie* van de schuifstand te krijgen, wordt de curve omgerekend naar een openingspercentage van een schuif met een schuifkarakteristiek (*i.e.* ladingsverliescoëfficiënt in functie van openingspercentage) zoals in Figuur 73. Figuur 83 toont het resultaat.



Figuur 83 – Benodigde relatieve opening voor de beschouwde schuif in de buizen naar het bassin naar het mondingskanaal

Bij wijze van samenvatting worden de werkelijk optredende debieten Q_{m+} , met een gepaste ladingsverliescoëfficiënt van de schuif, per bekken en bij de verschillende afwaartse randvoorwaarden, nogmaals gegeven in Tabel 29.

Tabel 29 – Gerealiseerde toegevoegde debieten naar het bassin van het mondingskanaal voor de beschouwde waterpeilen

	Ho = 5,7 m TAW		Totaal [m³/s]
	Ha = 2,1 m TAW		
	Hb [m TAW]	2,1	
Qm+ [m³/s]	buis 1	0,5	1,0
	buis 2	0,5	
	Ha = 3,5 m TAW		
	Hb [m TAW]	3,5	
	Qm+ [m³/s]	buis 1	
buis 2		1,0	
	Ha = 5,0 m TAW		
	Hb [m TAW]	5,0	
	Qm+ [m³/s]	buis 1	
buis 2		1,0	

7 Monding

7.1 Inleiding

De meest optimale locatie voor de vispassagemonding ligt zo dicht mogelijk aan het knelpunt/migratielimietlijn (zie ontwerpcriteria in paragraaf 2.2.5). In het geval van stuwen, zoals te Merelbeke, wordt de ligging van de migratielimietlijn vooral bepaald door de watersprong afwaarts van de stuwen. Aangezien het debiet over de stuwen kan variëren, varieert ook de ligging van de migratielimietlijn.

Daarnaast kunnen ook ruimtelijke randvoorwaarden de mogelijkheden voor de inpassing van de monding naast de stuwen bepalen. In Paragraaf 7.2 worden deze ruimtelijke randvoorwaarden en de maatgevende dimensies van de stuw en stuwgeul beschreven, die het uitgangspunt vormen de voor verdere bepaling van de ligging van de limietlijn en meest optimale locatie voor de monding.

Met behulp van literatuurformules wordt vervolgens in paragraaf 7.3 een schatting gedaan van de locatie van het einde van de watersprong (en daarmee de ligging van de zone van de migratielimietlijn) bij de maatgevende hydraulische scenario's binnen de periode van optimale werking.

Op basis van de ligging van de migratielimiet zone, de ruimtelijke randvoorwaarden en de ontwerpcriteria voor attractiviteit en passeerbaarheid wordt tenslotte in paragraaf 7.4 de meeste optimale locatie, oriëntatie en dimensionering voor de monding bepaald en beschreven.

7.2 Randvoorwaarden en bepalende dimensies

7.2.1 Ruimtelijke inpassing

Met oog op de ruimtelijke inpassing van de monding zijn de volgende aspecten van belang (zie ook Figuur 84):

- Er kunnen geen openingen/ doorsteken in de zijwanden van de stuwen gemaakt worden tussen de op- en afwaartse schotbalkspanningen. Dit zowel met oog op de stabiliteit van de stuwen als voor het kunnen droogzetten van de stuwen voor onderhoud. Dit betekent dat eerst mogelijke locatie voor de monding zich bevindt op circa 18,5 m afwaarts van de stuwen (= gelijk aan einde tussenmuur). Hier bevindt zich ook een loopbrug over de stuwgeul;
- Op de rechteroever naast de stuwen bevindt zich een schotbalkplatform, dat (al dan niet op dezelfde locatie) behouden dient te blijven;
- In de grond op rechteroever naast de stuwen bevinden zich twee rijen damwanden loodrecht op de oever/stuwgeul (één opwaarts en één afwaarts) over een lengte van circa 20 m;
- Aanvankelijk had het de ruimtelijke en bouwkundige voorkeur voor DVW om het tracé voor de vispassagemonding rond deze wanden en het schotbalkplatform uit te voeren. Er bleek echter niet genoeg ruimte beschikbaar tussen het platform/ de wanden en het grondlichaam van de R4 (zie ook paragraaf 3.1). Op basis van de verdere bouwkundige verkenning werd daarom besloten om het tracé toch door de zijwanden en onder het schotbalk platform door te laten lopen. Dit heeft ook duidelijk de voorkeur vanuit hydraulisch oogpunt aangezien scherpe bochten zo voorkomen worden en de monding zo parallel mogelijk aan de hoofdstroom kan uitstromen.

Om een idee te krijgen van de ruimtelijke context ter plaatse van de stuwen toont Figuur 85 een zijaanzicht van de stuwen uit Google Street View. Voor een uitgebreidere beschrijving van de algemene ruimtelijke randvoorwaarden bij inpassing vispassage wordt verwezen naar paragraaf 2.1.4.



Figuur 84 – Luchtfoto met aanduiding belangrijkste maatvoering en aandachtspunten voor inpassing monding



Bron: Google Street View

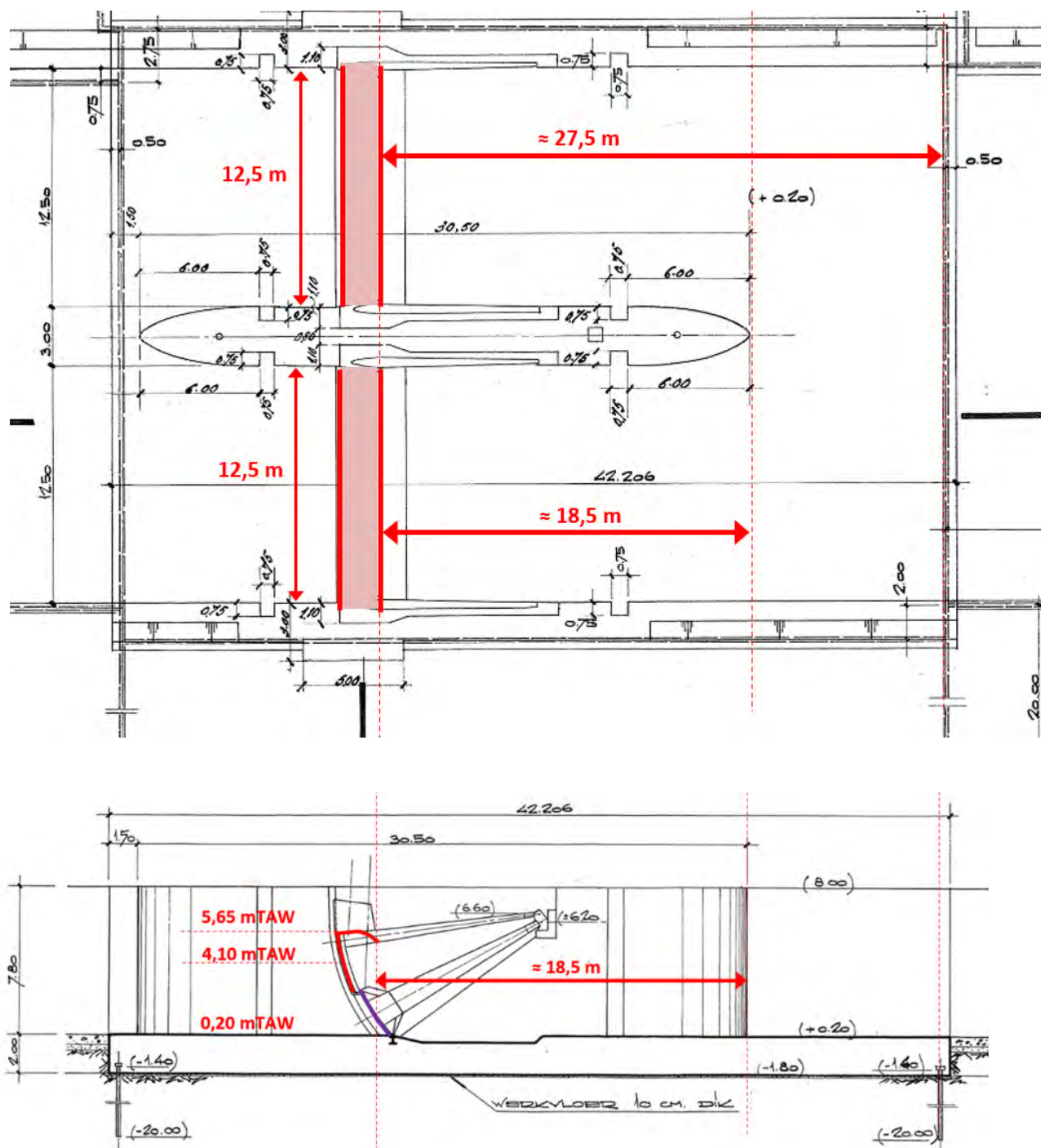
Figuur 85 – Foto zijaanzicht huidige stuwen

7.2.2 Stuwen en stuwgeul

Voor de bepaling van de zone van de watersprong zijn de volgende dimensies en uitgangspunten ten aanzien van de stuwen en stuwgeul van belang (zie ook Figuur 86):

- De betonnen bodemhoogte op- en afwaarts van de stuwen is 0,20 mTAW;
- De maximale hoogte van het bovenste segment is 5,65 mTAW;
- De minimale hoogte van het bovenste segment is 4,10 mTAW (is dus laagste stand voor overstort);
- De overstort breedte van elke stuw is 12,5 m (samen dus 25 m);
- Het einde van de middenmuur bevindt zich op een afstand van circa 18,5 m uit de overstortlijn van het bovenste segment;

- De middenmuur heeft een breedte van 3 m. Samen met de breedtes van de segmenten van elk 12,5 m geeft dit een op- en afwaartse stuwgeulbreedte van 28 m.



Figuur 86 – Maatgevende dimensies stuwen

7.3 Watersprong en migratielimietlijn

Zoals aangegeven in de inleiding van dit hoofdstuk wordt aangenomen dat de zone van de migratielimietlijn in het geval van de stuwen te Merelbeke samenvalt met het einde van de watersprongzone afwaarts van de stuwen. In deze paragraaf wordt op basis van literatuurformules een schatting gedaan van de ligging van het einde van de zone van de watersprong.

7.3.1 Randvoorwaarden

Met oog op de werkingsperiode werd in paragraaf 2.2.3 gesteld 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, de zogenaamde $Q_{90\%}$ en $Q_{10\%}$. Daarnaast geeft de $Q_{50\%}$ een goed beeld van het meest voorkomende debiet. In paragraaf 2.3.3 werd op basis van historische metingen een histogram opgesteld voor het debiet te Melle, welke kan worden gebruikt als representatief debiet te Merelbeke (zie Tabel 8).

Om een goed idee te krijgen van de locatie van de watersprong en de kans van voorkomen, worden voor de percentielwaarden uit Tabel 8 tussen de $Q_{10\%}$ en de $Q_{90\%}$ berekeningen uitgevoerd bij de driemaatgevende waterstandscenario's uit Tabel 13, namelijk bij gemiddeld laagwater van 2,10 mTAW (S0; ondergrens optimale werking), bij gemiddeld tij van 3,50 mTAW (S1) en bij gemiddeld hoogwater van 5,00 mTAW (S2; bovengrens optimale werking). Deze drie waterstandsscenario's gaan steeds uit van het opwaartse streefpeil van 5,70 mTAW. Tabel 30 geeft een overzicht van de hydraulische scenario's waarbij de watersprongberekeningen werden uitgevoerd.

Tabel 30 – Hydraulische randvoorwaarden watersprongberekeningen

Percentiel [%]	Debiet [m ³ /s]	Waterstand [mTAW]
10%	86,55	5,00 (S2) 3,50 (S1) 2,10 (S0)
20%	58,46	
30%	43,89	
40%	32,79	
50%	24,87	
60%	18,82	
70%	14,16	
80%	9,88	
90%	6,24	

Met oog op de berekeningen kunnen de stuwen worden gezien als een vrije overlaat. In principe is er te Merelbeke ook onderstroom mogelijk, maar uit de berekeningen bleek dat het bovengrensdebiet voor periode van optimale werking ($Q_{10\%} = 90 \text{ m}^3/\text{s}$) nog gehaald kan worden via overstort. Daarom worden enkel berekeningen uitgevoerd bij overstort.

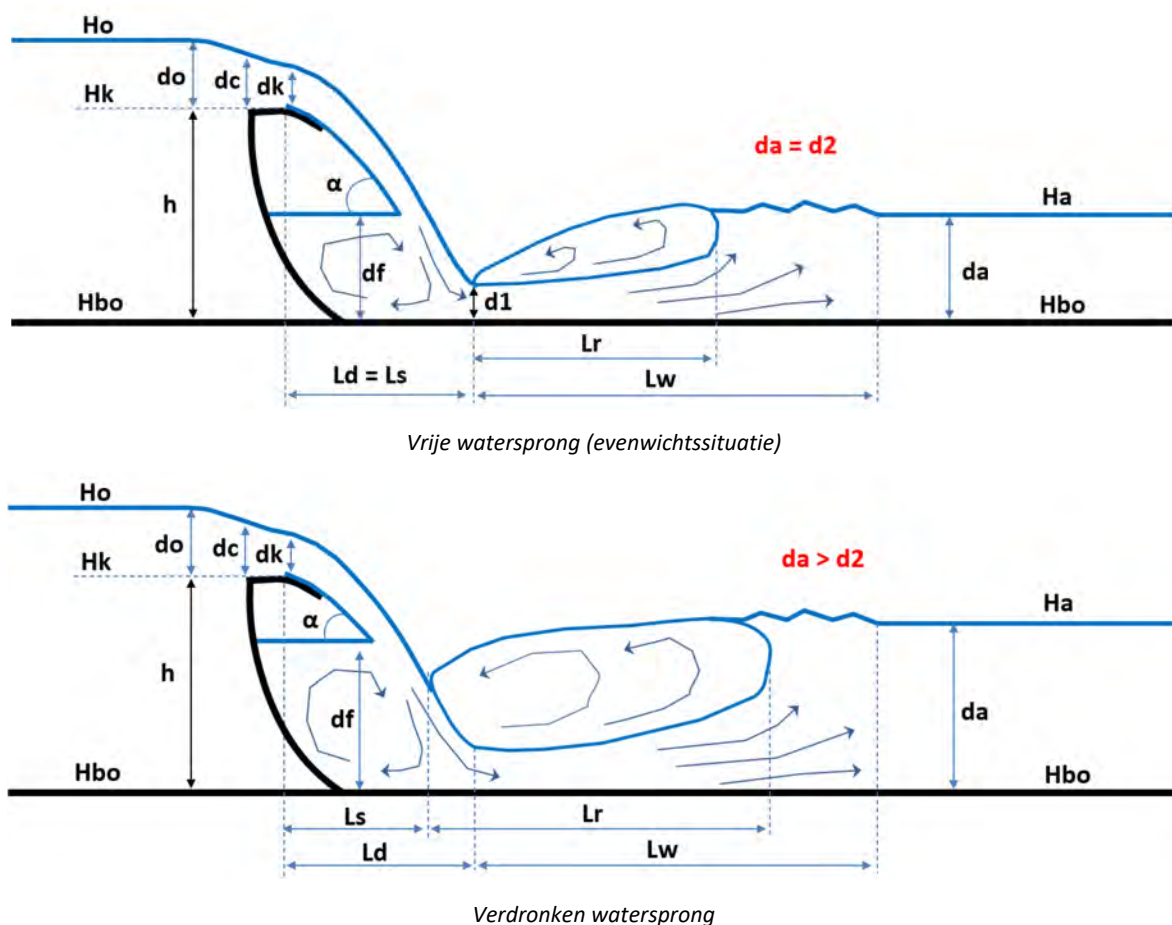
7.3.2 Rekenmethode

Bij overstort ontstaat er afwaarts van de stuw een vallende straal (L_d) en een zeer turbulente 'roller' (L_r) met hoge stroomsnelheden aan de bodem (superkritische stroming) en aan het oppervlak een terugstroom naar de vallende straal, zie Figuur 87. Na de zone van de 'roller' is er een overgangszone met relatief veel luchtbubbels naar een normale 'rustige' stroming. De zone van de roller plus deze overgangszone wordt de zone van de watersprong genoemd (L_w).

Afhankelijk van de verhouding tussen het overstortende debiet en de afwaartse waterstand kan er een vrije of verdrongen watersprong optreden. In het geval van een verdrongen watersprong (lees: waterdiepte $d >$ overeenstemmende waterdiepte d_2 na de roller) begint de zone van de watersprong al iets opwaarts van de zone van de vallende straal, zie parameter L_s ten opzichte van L_d .

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

Om de optimale afstand tussen de stuw en de vispassagemonding te bepalen wordt de ligging van het einde van de roller (L_r) en het einde van de watersprong (L_w) berekend met behulp van empirisch bepaalde literatuurformules. Afstanden worden daarbij steeds berekend ten opzichte van het overlaatpunt van de stuwen, zie 'dk' in Figuur 87.



Figuur 87 – Typen watersprong en maatgevende parameters

Het debiet over een vrije overlaat (zoals een stuw) kan worden berekend volgens:

$$Q = C_s \cdot B_o \cdot h_1^{3/2} \quad (\text{Nortier \& de Koning, 1996}) \quad [24]$$

Met:

•	Q	Debiet bij vrije overlaat	[m ³ /s]
•	C_s	Debietscoëfficiënt segment	[-]
•	B_o	Breedte overlaat	[m]
•	h_1	Opwaartse waterdiepte boven klep (= $H_o - H_k$, zie Figuur 87)	[m]
•	H_o	Hoogte opwaarts waterpeil	[mTAW]
•	H_k	Hoogte kruinpeil overlaat	[mTAW]

De lengte van een beluchte vallende straal:

$$\frac{L_d}{h} = 2.171 \left(\frac{h_c}{h} \right)^{0.525} \quad (\text{Chanson, 2002}) \quad [25]$$

Met:

•	L_d	Lengte vallende straal (gemeten vanaf kleppunt tot waterdiepte d_1 , zie Figuur 87)	[m]
•	h_c	Kritische waterhoogte ($h_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$)	[m]
•	q	Debiet per strekkende meter (Q / B_o)	[m ² /s]
•	Q	Debiet bij vrije overlaat	[m ³ /s]
•	B_o	Breedte overlaat	[m]
•	g	Valversnelling (9,81)	[m/s ²]
•	h	Valhoogte	[m]

De waterdiepte (d_1) voor de sprong:

$$\frac{d_1}{h} = 0.54 \cdot \left(\frac{h_c}{h} \right)^{1.275} \quad (\text{Rand, 1955}) \quad [26]$$

En de overeenstemmende waterdiepte (d_2) na de sprong⁴:

$$\frac{d_2}{h} = 1.66 \cdot \left(\frac{h_c}{h} \right)^{0.81} \quad (\text{Rand, 1955}) \quad [27]$$

Met:

•	d_1	Waterdiepte voor de watersprong	[m]
•	d_2	Overeenstemmende waterdiepte 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 ²]
•	q	Debiet per strekkende meter (Q / B_o)	[m ² /s]
•	Q	Debiet bij vrije overlaat	[m ³ /s]
•	B_o	Breedte overlaat	[m]
•	Fr_1	Froude getal vóór sprong $Fr_1 = \frac{q/d_1}{\sqrt{g \cdot d_1}}$	[-]

⁴ De overeenstemmende waterdiepte is de waterdiepte die zorgt voor een krachtenbalans voor en na de sprong.

$$d_2 = d_1 \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(\sqrt{1 + 8 \cdot Fr_1^2} - 1 \right) \quad (\text{Bélanger, 1828}) \quad [28]$$

Met:

• 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 ²]
• q	Debiet per eenheidsbreedte (Q / B_s)	[m ² /s]
• Q	Debiet bij vrije overlaat	[m ³ /s]
• B_s	Breedte	[m]

De lengte van een verdronken watersprong (L_w) kan worden berekend aan de hand van volgende formulering:

$$\frac{L_w}{d_2} = 6.1 + 4.9 \cdot S_j \quad (\text{Vischer \& Hager, 1995}) \quad [29]$$

Met:

• L_w	Lengte verdronken 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 verdronken is ($d_a \leq d_2$), kan de lengte van de watersprong berekend worden aan de hand van volgende formuleringen:

$$L_w = 6(d_2 - d_1) \quad (\text{Rand, 1955}) \quad [30]$$

$$\frac{L_w}{d_1} = 10 \cdot \alpha_j \cdot \tanh\left(\frac{Fr_1 - 1}{\alpha_j}\right) \quad (\text{Vischer \& Hager, 1995}) \quad [31]$$

Met:

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

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 87). De lengte van de roller bij een niet verdronken watersprong kan bepaald worden met de volgende formules:

$$\frac{L_r}{d_1} = 8 \cdot \left(\left(\frac{d_c}{d_1} \right)^{3/2} - 1.5 \right) \quad (\text{Chanson, 2002}) \quad [32]$$

$$\frac{L_r}{d_1} = -12 + 8 \cdot \alpha_r \cdot \tanh\left(\frac{Fr_1}{\alpha_r}\right) \quad (\text{Hager et al., 1990}) \quad [33]$$

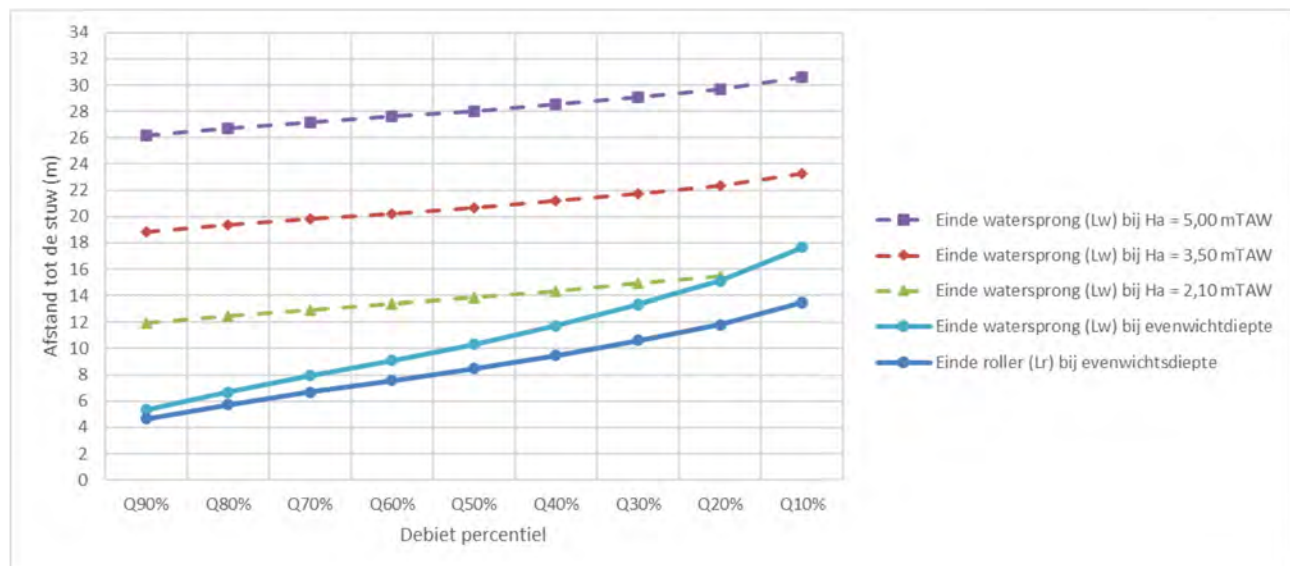
Met:

• 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 ²]
• q	Debiet per eenheidsbreedte (Q / B_s)	[m ² /s]
• Q	Debiet bij vrije overlaat	[m ³ /s]
• B_s	Breedte schuifopening	[m]
• Fr_1	Froude getal vóór sprong $Fr_1 = \frac{q/d_1}{\sqrt{g \cdot d_1}}$	[-]

7.3.3 Resultaten

Figuur 88 toont de resultaten van de berekeningen van de waterspronglengtes, en Tabel 31 toont de resultaten voor de bijbehorende maatgevende parameters. De donkerblauwe grafiek geeft de afstand waarop het einde van de roller ten opzichte van de tip van het bovenste stuwsegment wordt berekend bij evenwichtsdiepte voor de maatgevende debietpercentielen binnen de optimale werkingsperiode.



* Het einde van de watersprong en de roller zijn steeds bepaald ten opzichte van de afwaartse rand van het bovenste stuwsegment.

Figuur 88 – Resultaten berekeningen einde watersprong* bij debietpercentielen binnen de afvoerrange van optimale werking

De lichtblauwe grafiek geeft de afstand van het einde van de watersprong in het geval van de vrije watersprong bij evenwichtsdiepte, en de donkerblauwe grafiek het einde van de bijbehorende roller. Bij zo goed als alle debietpercentielen en alle drie de maatgevende waterstandsscenario's tijdens optimale werking is de afwaartse waterstand (d_a) echter groter dan overeenstemmende waterdiepte (d_2) na de sprong, en is er dus zo goed als altijd sprake van een verdronken watersprong (enkel bij $Ha = 2,1$ mTAW en $Q_{10\%}$ wordt een vrije watersprong berekend). Figuur 88 toont daarom tevens het einde van de watersprong voor de drie waterstandsscenario's op basis formule [29], zie de gestippelde grafieken: groen is bij gemiddeld laagwater,

rood is bij gemiddeld tij, paars is bij gemiddeld hoogwater). Momenteel is deze formule voor de berekening van de lengte van de verdronken watersprong de enige rekenmethode uit de literatuur die bekend is bij de auteurs. Er zijn echter twee onzekerheden bij de toepassing van deze formule⁵:

- de toepasbaarheid van de formule met oog op de grootte van de drinkingsgraad S_j is nog onduidelijk, mogelijk is deze methode voor een bepaalde verhouding tussen debiet ('dropfactor') en afwaartse waterdiepte (d_a/d_2) niet meer geldig;
- de formule gaat uit van de overeenstemmende waterdiepte d_2 bij krachtenbalans op- en afwaarts van de watersprong. Deze waarde d_2 wordt echter berekent op basis van de waterdiepte d_1 en Fr_1 bij evenwichtsdiepte/ vrije watersprong. De waarde van d_1 is in het geval van een verdronken watersprong eigenlijk niet gekend en zal in deze situaties altijd groter zijn dan in de evenwichtssituatie aangezien een deel van de energie van de vallende straal in de waterkolom wordt gedissipeert (Egea, 2015). Dit betekent dat ook het Froudegetal op locatie d_1 in werkelijkheid anders zal zijn. Nu is de waarde d_1 bepaald op basis van de rekenmethode voor de evenwichtssituatie, zie bovenin Figuur 87.

Tabel 31 – Resultaten watersprongberekeningen

omschrijving	eenheid	parameter	Q90	Q80	Q70	Q60	Q50	Q40	Q30	Q20	Q10
Vrije watersprong ($d_a = d_2$)											
Overstort debiet (vrije overlaat; $C_d=1,9$)	[m ³ /s]	Qstuw	6,24	9,88	14,16	18,82	24,87	32,79	43,89	58,46	86,55
Opwaarts waterpeil	[mTAW]	Ho	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70
Hoogte stuwsegmenten	[mTAW]	Hk	5,44	5,35	5,25	5,16	5,05	4,92	4,75	4,55	4,21
waterdiepte boven segment (H_o-H_k)	[m]	h1	0,26	0,35	0,45	0,54	0,65	0,78	0,95	1,15	1,49
Debietcoefficient segment	[-]	Cs	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90
Overstort debiet per strekende meter	[m ² /s]	q	0,25	0,40	0,57	0,75	0,99	1,31	1,76	2,34	3,46
Kritische waterhoogte	[m]	dc	0,19	0,25	0,32	0,39	0,47	0,56	0,68	0,82	1,07
Valhoogte	[m]	h	5,24	5,15	5,05	4,96	4,85	4,72	4,55	4,35	4,01
Dropfactor (Rand; Chanson)	[-]	dc/h	0,04	0,05	0,06	0,08	0,10	0,12	0,15	0,19	0,27
Lengte vallende straal (Chanson)	[m]	Ld	1,97	2,29	2,58	2,82	3,08	3,35	3,64	3,94	4,35
Waterdiepte voor watersprong (Rand)	[m]	d1	0,04	0,06	0,08	0,10	0,13	0,17	0,22	0,28	0,40
Stroomsnelheid voor watersprong	[m/s]	v1	6,26	6,67	7,01	7,28	7,54	7,80	8,07	8,32	8,63
Froudegetal voor watersprong	[-]	Fr1	10,01	8,75	7,87	7,22	6,63	6,07	5,52	5,01	4,35
Overeenst. waterdiepte na sprong (Rand)	[m]	d2	0,58	0,74	0,90	1,04	1,21	1,39	1,62	1,87	2,28
Lengte roller (Hager)	[m]	Lr	2,47	3,19	3,87	4,49	5,17	5,91	6,76	7,66	8,93
Lengte roller (Chanson)	[m]	Lr	2,71	3,44	4,12	4,74	5,41	6,15	7,00	7,89	9,14
Einde roller tov stuw (Chanson)	[m]	LrE	4,68	5,73	6,69	7,56	8,49	9,50	10,64	11,83	13,49
Lengte vrije watersprong (Rand)	[m]	Lw	3,24	4,09	4,90	5,63	6,45	7,35	8,41	9,56	11,28
Lengte vrije watersprong (Hager)	[m]	Lw	3,40	4,41	5,38	6,27	7,27	8,38	9,70	11,15	13,33
Einde vrije watersprong tov stuw (Hager)	[m]	LwE	5,37	6,70	7,95	9,09	10,34	11,73	13,34	15,09	17,68

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

Ha = 2,1 mTAW (da = 1,9 m)											
Verdrinkingsgraad watersprong (Rajar)	[-]	Sj	2,27	1,56	1,12	0,82	0,58	0,36	0,17	0,01	-0,17
Lengte verdrongen watersprong (Rajar)	[m]	Lws	10,01	10,20	10,39	10,56	10,76	10,98	11,25	11,56	nvt
Einde verdrongen watersprong tov stuw	[m]	Lws-E	11,97	12,49	12,96	13,38	13,83	14,33	14,89	15,50	nvt
Ha = 3,5 mTAW (da = 3,3 m)											
Verdrinkingsgraad watersprong (Rajar)	[-]	Sj	4,69	3,45	2,68	2,17	1,74	1,37	1,04	0,76	0,45
Lengte verdrongen watersprong (Rajar)	[m]	Lws	16,87	17,06	17,25	17,42	17,62	17,84	18,11	18,42	18,91
Einde verdrongen watersprong tov stuw	[m]	Lws-E	18,83	19,35	19,82	20,24	20,69	21,19	21,75	22,36	23,26
Ha = 5,0 mTAW (da = 4,80 m)											
Verdrinkingsgraad watersprong (Rajar)	[-]	Sj	7,27	5,48	4,35	3,61	2,98	2,45	1,96	1,56	1,10
Lengte verdrongen watersprong (Rajar)	[m]	Lws	24,22	24,41	24,60	24,77	24,97	25,19	25,46	25,77	26,26
Einde verdrongen watersprong tov stuw	[m]	Lws-E	26,18	26,70	27,17	27,59	28,04	28,54	29,10	29,71	30,61

Zoals eerder aangegeven wordt verwacht dat de migratielimietlijn in de zone tussen het einde van de roller en het einde van de watersprong ligt. Op basis van de resultaten uit Figuur 88 kan worden afgeleid dat de zone tussen einde roller en einde watersprong bij evenwichtsdiepte binnen de afvoerrange van optimale werking tussen de 5 en 12 meter uit de stuwen ligt. Hoe ver de zone van de roller komt te liggen in de verdrongen situatie is niet duidelijk (zal in ieder geval verder zijn). Het einde van de verdrongen watersprong volgens formule [29] zou tussen de 12 en 31 meter uit de stuwen, maar zoals aangegeven zijn er vragen bij de toepasbaarheid van deze formule zeker voor het scenario S2 met de hoogste afwaartse waterstand (paarse grafiek) en de hogere verdrinkingsgraden (Sj).

In principe zorgt een grotere verdrinkingsgraad (hoger afwaarts waterpeil) inderdaad voor een relatief grotere waterspronglengte aangezien de mate van dissipatie afneemt ten opzicht van een vrije watersprong, maar zeker ook bij de lagere debieten (bijv. bij Q90% met slechts 6 m³/s) lijkt deze formule een relatief lange watersprong te geven. Daarnaast moet ook worden aangegeven dat in de zone tussen de einde roller en einde watersprong (en waarschijnlijk ook in de zone onder het einde van de roller) de stroomsnelheden al relatief sterk zijn afgenomen in geval van een verdrongen watersprong.

Op basis van het bovenstaande en de resultaten uit Figuur 88 wordt aangenomen dat het einde van de turbulente zone (van de roller) op circa 10 tot 20 m uit de stuwen zal liggen en het einde van de verdrongen watersprong op circa 15 tot 30 m uit de stuwen ligt. Gezien de onzekerheden in de rekenmethode wordt echter **aanbevolen om deze inschatting te valideren** door middel van terreinmetingen (al dan niet gecombineerd met schaalmodelproeven en/of CFD-modellering).

7.4 Locatie, orientatie en dimensionering

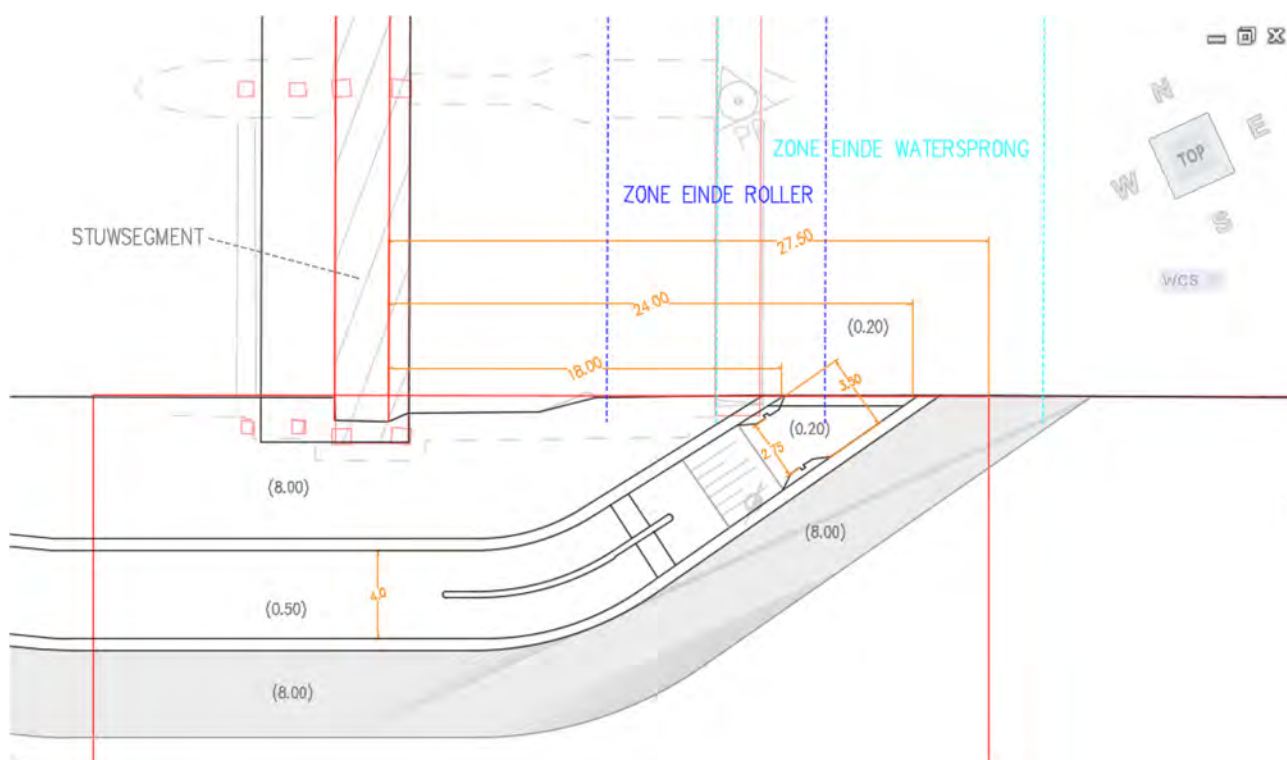
Voor een goede en optimale werking dient de monding zo dicht mogelijk aan het migratieknelpunt (migratielimietlijn/-zone) te worden ingepast, en dient de oriëntatie van de uitstroom zo parallel mogelijk aan de hoofdstroom te zijn (zie paragraaf 2.2.5).

Zoals eerder aangegeven wordt de zone van de migratielimietlijn gelijk gekozen met de zone tussen het einde van de roller en watersprong net afwaarts van de vallende straal bij stuwoverstort. Op basis van de berekening van het einde van de roller en watersprong bij maatgevende afvoeren binnen de optimale werkingsperiode (Q_{10%}-Q_{90%}) wordt deze zone ingeschat op 10 tot 30 m uit de stuwen (zie voorgaande paragraaf).

Naast de zone van de migratielimietlijn zijn de volgende (ruimtelijke) randvoorwaarden bepalend voor de inpassing van de monding en het mondingskanaal te Merelbeke:

- Omdat de stuwen te allen tijde droog gezet moeten kunnen worden, kan er geen doorsteek door de stuwgeulwanden opwaarts van de sponningen voor droogzetting worden gemaakt. Dit betekent dat de eerste mogelijke locatie vanuit bouwkundig oogpunt op circa 18 m uit de stuwen ligt, zie Figuur 86.
- Daarnaast spelen de ondergrondse dwarswanden van de stuwen en het schotbalk platform een rol voor de bouwkundige mogelijkheden (zie Figuur 84). Aanvankelijk werd daarom een tracé rond het platform onderzocht. Er bleek echter niet voldoende ruimte aanwezig tussen het uiteinde van deze wanden en het grondlichaam van de R4, waardoor een tracé onder het platform en door de opwaartse wand werd gekozen (zie paragraaf 3.1). Dit tracé heeft hydraulisch gezien ook duidelijk de voorkeur aangezien hier geen scherpe bochten in moeten worden toegepast.

Op basis van bovengenoemde ruimtelijke en hydraulische criteria werd in overleg met bouwkundige experts van het studiebureau Tractebel het meest optimale tracé voor het mondingslokaal en de meest optimale locatie voor de monding gekozen, zie Figuur 89. In deze figuur zijn ook de zone van het einde van de roller en de watersprong visueel weergegeven.



Figuur 89 – Meest optimale locatie en inpassing van de monding

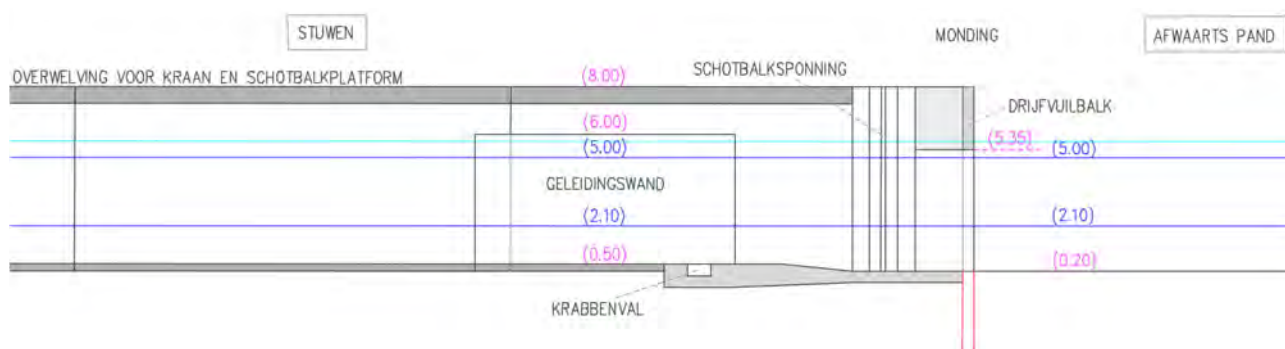
De monding bevindt zich hierbij tussen 18 m en 24 m uit de stuwen. Hydraulisch gezien is dit de meest optimale locatie aangezien de monding hiermee juist aan het einde van de turbulente zone van de roller ligt, wat voor de meeste doelsoorten gezien wordt als de migratielimiet lijn. Merk op dat in de bovengrenssituaties (circa $Q_{10\%}$ - $Q_{30\%}$) het einde van de zone van de watersprong wel voorbij de monding wordt berekend, maar er wordt verwacht dat stroomsnelheden in deze zone in het geval van een verdronken watersprong nog altijd goed passeerbaar zijn. INBO heeft daarom ook aangegeven dat het de voorkeur heeft om de monding niet verder van de stuwen af te leggen omdat deze anders voor de gemiddelde - en dus meest voorkomende - afvoeren net iets te ver van de migratielimietlijn kan liggen. Dit komt terug op het criterium dat de monding (voor een zo groot mogelijk deel van de tijd) best zo dicht mogelijk aan de stuwen/het knelpunt ligt. Daarnaast verwacht INBO ook dat in de bovengrenssituatie van verhoogde afvoer eerder de sterkere zwemmers zullen migreren.

Ook vanuit ruimtelijk en bouwkundig oogpunt heeft deze locatie de voorkeur omdat hierbij nog voor de tweede meest afwaartse dwarswand (zie de rode lijnen in Figuur 89) nog terug gebogen kan worden naar de stuwgeul en er dus een doorsteek door deze wand benodigd is. Vanuit oogpunt stabiliteit kan de monding ook niet te dicht tegen deze afwaartse dwarswand worden ingepast. De minimaal benodigde 'bufferafstand' werd aangegeven door het studiebureau, zie maatvoering tussen 24 en 27,5 meter uit de stuwen.

Wel wordt bij deze inpassing verwezen naar de onzekerheden die werden vastgesteld met oog op de berekening van de lengte van de roller en watersprong in geval van verdronken watersprongen (zie voorgaande paragraaf). Het verdient daarom de **aanbeveling om een vervolgstudie te doen met oog op de ligging van de watersprong met behulp van terreinmetingen**, die eventueel gecombineerd worden met schaalmodelproeven en/of CFD-modellering. Verwacht wordt dat dit geen aanpassingen zal opleveren aan de locatie en/of bouwkundige inpassing. Zoals al eerder aangegeven blijkt uit praktijkervaringen dat de monding best zo dicht mogelijk aan het knelpunt wordt gekozen. Mocht uit de vervolgstudie blijken dat de turbulente zone van de roller in de bovengrenssituaties toch verder zou reiken dan nu ingeschat, kan mogelijk een oplossing worden gevonden door middel van een optimalisatie van de stuwregeling. Door in de bovengrenssituatie (bijv. $Q_{10\%}$ tot $Q_{30\%}$) bijvoorbeeld in verhouding meer debiet over de stuw te sturen die het verst van de monding ligt, gaat er minder over de stuw direct naast de monding en vormt de afwaartse stroming als het ware een 'fuik-vormige' toegang naar de ingang van de vispassage (de monding).

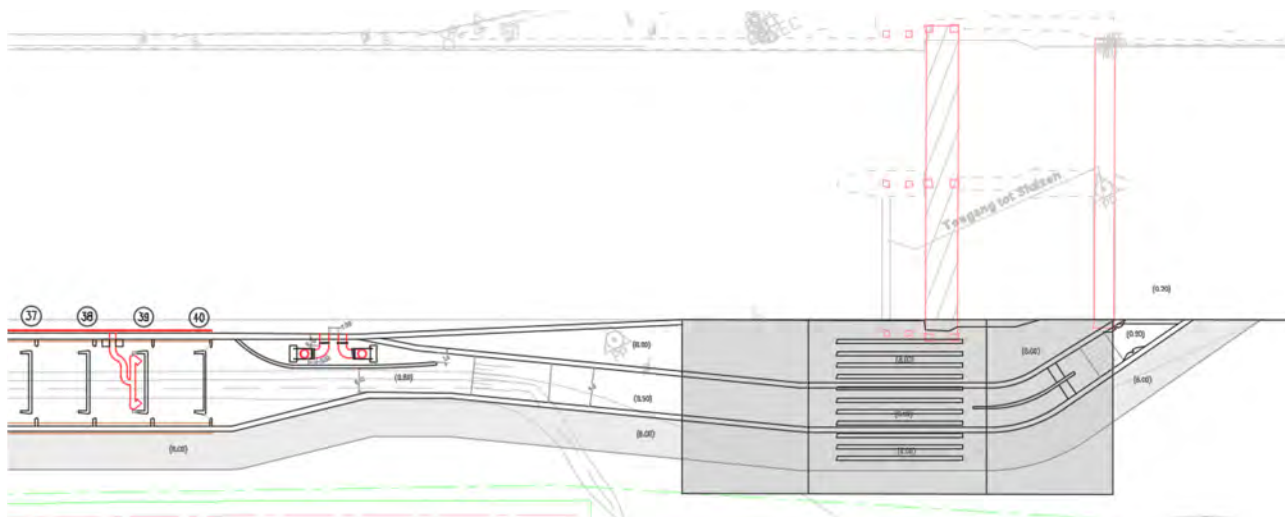
Figuur 90 toont het lengteprofiel van de monding. Het meest afwaartse deel van het mondingskanaal en de monding zelf hebben hetzelfde bodempeil als het afwaartse pand (0,20 mTAW) waardoor een goede aansluiting wordt bekomen. Iets meer opwaarts in het mondingskanaal loopt het bodempeil heel gering op tot 0,50 mTAW. Dit peil wordt voor het grootste deel van het mondingskanaal aangehouden. Aan opwaartse zijde van het mondingskanaal, net afwaarts van het bassin voor de inbreng van het toegevoegd debiet, loopt het bodempeil vervolgens geleidelijk op tot 0,89 mTAW (het bodempeil van het meest afwaartse slot).

Het mondingskanaal heeft voor het grootste deel een breedte van 4 m en in de bocht (net naast de stuwen en onder het schotbalkplatform) wordt in het midden een geleidingswand toegepast om loslatingseffecten en/of het ontstaan van recirculatieneren te voorkomen. Ter plaatse van de monding versmalt het kanaal licht tot een breedte van 3,5 m om zo de inpassing van de monding nog voor de daar aanwezige dwarswand in de bodem mogelijk te maken. Hydraulisch gezien heeft dit ook een licht voordeel doordat stroomsnelheden hierdoor enigszins verhogen en zo de lokstroom iets wordt versterkt. Merk op dat deze versmalling in de monding lokaal nog iets verder wordt versterkt door de daar aanwezige sponningen voor droogzetten vispassage (breedte 2,75 m). Voor de stroomsnelheden op maatgevende locaties in het mondingskanaal en in de monding zelf wordt verwezen naar paragraaf 6.3.2 ten aanzien van de inbreng van toegevoegd debiet in het mondingskanaal (Q_m).



Figuur 90 – Lengteprofiel monding

Tenslotte geeft Figuur 91 nog een bovenaanzicht van het gehele mondingskanaal, de stuwen en de meest afwaartse bekkens. Merk op dat hierin met een grijs-geaccreerd kader een overwelving over het mondingskanaal is aangeduid. Uit de bouwkundige verkenning bleek namelijk dat hier ruimte benodigd blijft voor de plaatsing van een kraan voor onderhoud stuwen en voor de opslag van de schotbalken. Deze overwelving heeft echter geen invloed op de hydraulische werking aangezien deze zich op enkele meters boven het hoogwaterpeil bevindt. Met andere woorden er blijft altijd stroming met een vrijwater oppervlak.



Figuur 91 – Boven-aanzicht finaal ontwerp mondingskanaal met aanduiding overwelving

8 Automatische sturing

8.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt een voorstel gedaan voor de automatische sturing van de beweegbare onderdelen van de vispassage te Merelbeke. Deze is gebaseerd op de sturing die eerder werd voorgesteld en geïmplementeerd voor nieuwe vispassages op de Bovenschelde en Leie (Vanderkimpfen *et al.*, 2019 en 2020). Dit eerste voorstel zal verder beproefd worden in een afzonderlijke numerieke modelstudie. Op basis van de resultaten van de modelstudie zal het voorstel (indien nodig) nog worden geüpdatet in een afzonderlijke memo (Vanderkimpfen & Visser *et al.*, 2022 (in prep)). Deze memo zal dienen voor de verdere softwarematige implementatie bij de bouw van de vispassage.

De vispassage te Merelbeke wordt uitgerust met de volgende (groepen van) beweegbare onderdelen (zie ook Figuur 92) waarvoor een automatische regeling benodigd is:

1. opwaartse afsluitconstructie (hefschuif) om de vispassage te kunnen sluiten met het oog op peilbeheer en/of onderhoud, zie ook paragraaf 5.3;
2. vijf afsluitschuiven in ronde buizen voor het inlaten van een toegevoegd debiet in de bekkens, zie ook paragraaf 6.2;
3. twee afsluitschuiven in ronde buizen voor het inlaten van een toegevoegd debiet in het afwaartse lokstroomkanaal, zie ook paragraaf 6.3.



Figuur 92 – Locaties beweegbare onderdelen waarvoor automatische regeling benodigd is

Voor elk van deze beweegbare onderdelen/ groepen dient een automatische regeling te worden voorzien, vooral met oog op het peilbeheer voor o.a. scheepvaart, maar ook om deze op afstand automatisch te kunnen sluiten indien nodig. De regelvoorwaarden voor elk van deze groepen worden verder uitgewerkt in dit hoofdstuk.

De drie typen/ groepen afsluitconstructies worden bij het openen en het sluiten onderworpen aan onderlinge voorrangregels. Bij het openen wordt eerst de vispassage, vervolgens het toegevoegd debiet in de bekkens en tenslotte het toegevoegd debiet in het afwaartse mondingskanaal ingeschakeld. Bij het sluiten is dit in omgekeerde volgorde en worden achtereenvolgens het toegevoegd debiet in het afwaartse mondingskanaal, het toegevoegd debiet in de bekkens en de vispassage afgesloten.

8.2 Afsluitconstructie vispassage

8.2.1 Principe

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

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

Om schade aan de vispassage te voorkomen, dient ze afgesloten te kunnen worden wanneer het debiet doorheen de vispassage te groot dreigt te worden. Aangezien dit zich enkel voordoet bij een extreem laag afwaarts waterpeil ten gevolge van het tij (zie paragraaf 3.6.5), wordt een voorwaarde opgenomen voor sluiting op basis van afwaarts waterpeil.

8.2.2 Sturingsregels bij automatische werking

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

1. **VOLLEDIG SLUITEN 1** als meest extreme alarmpeilvlotter (hoogste hoogwateralarm OF laagste laagwateralarm) geactiveerd worden⁶
2. **VOLLEDIG SLUITEN 2** als waterpeil opwaarts stuw groter dan **instelbaar peil 3** gedurende meer dan **instelbare tijd 3**
3. **VOLLEDIG SLUITEN 3** als waterpeil afwaarts stuw lager dan **instelbaar peil 4** gedurende meer dan **instelbare tijd 4**
4. **VOLLEDIG SLUITEN 4** als waterpeil afwaarts stuw groter dan **instelbaar peil 5** gedurende meer dan **instelbare tijd 5**
5. **VOLLEDIG SLUITEN 4** als 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**
6. **VOLLEDIG OPENEN** als 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**

De tweede regel laat toe een beveiliging tegen schade door hoge afvoeren in de vispassage te voorzien. Indien een dergelijke beveiliging niet nodig geacht wordt, dan kan ze uitgeschakeld worden door een artificieel hoge waarde voor het instelbaar peil (bv 99.99 mTAW) in te voeren.

De derde regel laat eveneens toe een beveiliging tegen schade door hoge afvoeren in de vispassage te voorzien. Indien een dergelijke beveiliging niet nodig geacht wordt, dan kan ze uitgeschakeld worden door een artificieel lage waarde voor het instelbaar peil (bv 0.00 mTAW) in te voeren.

⁶ De toepassing van alarmvlotter dient nog verder afgestemd te worden.

De vierde regel laat toe een beveiliging tegen terugstroming doorheen de vispassage te voorzien. Indien een dergelijke beveiliging niet nodig geacht wordt, dan kan ze uitgeschakeld worden door een artificieel hoge waarde voor het instelbaar peil (bv 99.99 mTAW) in te voeren. Deze regel laat toe de vispassage preventief te sluiten nog voor er effectief terugstroming optreedt en onafhankelijk van het feit of de stuwen waterkerend zijn of niet.

De vijfde 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 een artificieel lage waarde (bv -999 m³/s) en het waterpeil gelijk gesteld wordt aan een realistische waarde, dan zal de debietvoorwaarde nooit vervuld zijn en zal de vispassage sluiten op basis van het waterpeil;
- Wanneer het debiet gelijk gesteld wordt aan 0 m³/s en het waterpeil gelijk gesteld wordt aan een realistische waarde, dan zal de vispassage sluiten op basis van het waterpeil, maar eveneens wanneer er terugstroming over de stuwen optreedt.

Deze regel laat enkel toe de vispassage te sluiten van zodra de afvoer vanuit het Groot Pand te klein wordt om het opwaartse waterpeil te kunnen handhaven, en dient dus niet om terugstroming te vermijden als de stuwen waterkerend zijn (daarvoor dient de vierde regel).

De zesde 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 een artificieel lage waarde (bv -999 m³/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:

- 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, indien gewenst;
- In de praktijk wordt verwacht dat 'sluiten' best wordt geregeld op basis van waterpeil en 'openen' op basis van debiet. Een opening op basis van waterpeil kan in bepaalde gevallen bijdragen tot het langer openhouden van de vispassage bij watertekort. De meerwaarde van een sluiting op basis van debiet lijkt eerder beperkt;
- 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 tot en met 6 niet meer geëvalueerd);

- In tegenstelling tot andere sites, gaan de regels uit van de veronderstelling dat de formule voor het berekenen van het debiet over de stuw negatieve waarden kan produceren wanneer er terugstroming optreedt tijdens een stormtij op de Zeeschelde.

8.2.3 Initiële waarden instelbare parameters

Tabel 32 geeft een voorstel voor beginwaarden van de instelbare parameters.

Tabel 32 – Voorstel initiële waarden voor automatische sturing vispassage

Vispassage	debiet stuw (m ³ /s)	peil opw (mTAW)	peil afw (mTAW)	schuifstand
continu sluiten				volledig dicht
peil 5	nvt	nvt	> 99.99	
peil 4	nvt	nvt	< 1.50	
peil 3	nvt	> 99.99	nvt	
continu openen				volledig open
peil 2 en debiet 2	≥ 3.0	> 3.90	nvt	
rust				
peil 1 of debiet 1	< -999.9	< 5.50	nvt	
continu sluiten				volledig dicht

Hoge waterstanden op de Ringvaart gaan doorgaans gepaard met hoge waterstanden op de Zeeschelde, waardoor de stroomsnelheid in de vispassage beperkt blijft. Daarom wordt initieel geen automatische sluiting bij hoge waterstand opwaarts voorzien.

De hoogste stroomsnelheid in de vispassage doet zich voor bij verlaagde waterstanden op de Zeeschelde. Wanneer het afwaarts waterpeil minder dan 1.5 mTAW bedraagt, bestaat de kans op beschadiging van het steensubstraat. Daarom wordt voorgesteld om de vispassage te sluiten zodra de afwaartse waterstand minder dan 1.5 mTAW bedraagt. Deze waarde kan nog bijgesteld worden in functie van de definitieve sortering van het steensubstraat.

De bestaande stuwen in Merelbeke zijn niet in staat om hoge waterstanden op de Zeeschelde te keren en laten terugstroming tijdens stormtij op de Zeeschelde toe. Initieel wordt dan ook geen automatische sluiting bij hoge waterstand afwaarts voorzien.

De vispassage zal openen als het debiet over de stuw meer dan 3 m³/s bedraagt en het opwaarts waterpeil meer dan 3.90 mTAW (= bodempeil instroom van de vispassage) bedraagt.

De vispassage zal sluiten als het waterpeil opwaarts van de stuw minder dan 5.50 mTAW bedraagt (= 20 cm onder het opwaarts streefpeil van 5.70 mTAW) of het debiet over de stuw minder dan -999 m³/s bedraagt. De debietvoorwaarde is onvervulbaar en heeft bijgevolg geen invloed.

Voor de instelbare tijden 1, 2, 3, 4 en 5 wordt een initiële waarde van 10 minuten voorgesteld.

8.3 Afsluitschuiven toegevoegd debiet bekken

8.3.1 Principe

De schuiven van het toegevoegd debiet in de bekken hebben slechts twee standen: volledig open of volledig dicht. Deze schuiven moeten zowel manueel als automatisch bediend kunnen worden. De automatische regeling gebeurt op basis van het debiet over de stuw en/of het waterpeil opwaarts van de stuw. De regeling dient voorzien te worden van een keuzeschakelaar: openen en sluiten hefschuif manueel of automatisch.

Merk op dat de schuiven van het toegevoegd debiet in de bekken niet gebruikt worden voor het regelen van de grootte van het toegevoegd debiet. Dat gebeurt te Merelbeke immers door een tweede reeks schuiven die in serie geplaatst worden met de eerste en mechanisch aangestuurd worden door vlotter in de bekken (zie paragraaf 6.2.1). De automatisch geregelde schuiven dienen enkel voor sluiting met oog op peilbeheer in situaties van te weinig beschikbare afvoer in het Groot Pand.

In eerste instantie wordt een sturing voorgesteld die uitgaat van sluiten op basis van het debiet over de stuw of het waterpeil opwaarts van de stuw en (terug) openen op basis van het debiet over de stuw. Door een flexibele implementatie (zoals ook toegepast bij de afsluitconstructie van de vispassage, zie 8.2) kan de mogelijkheid tot het overschakelen op een ander type sturing (bijv. enkel sluiten op basis van waterpeil opwaarts van de stuw) grotendeels behouden blijven.

De schuiven van het toegevoegd debiet in de bekken krijgen allen dezelfde sturingsregels, maar krijgen elk een eigen set instelbare parameters. De initiële waarden van de instelbare parameters zijn gelijk voor alle schuiven, zodat ze als één geheel werken. Het gebruik van meerdere sets instelbare parameters laat toe de werking later verder te differentiëren, indien gewenst.

8.3.2 Sturingsregels bij automatische werking

Bij automatische werking (keuzeschakelaar op “automatisch”) worden de schuiven van het toegevoegd debiet in de bekken geopend en gesloten op basis van het waterpeil opwaarts van de stuw en/of het debiet over de stuw volgens de volgende sturingsregels:

1. **VOLLEDIG SLUITEN 1** als meest extreme alarmpeilvlotter (hoogste hoogwateralarm OF laagste laagwateralarm) geactiveerd worden⁷
2. **VOLLEDIG SLUITEN 2** als vispassage gesloten is
3. **VOLLEDIG SLUITEN 3** als (alle schuiven toegevoegd debiet afwaarts gesloten) 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 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**

De eerste twee regels zijn veiligheidsregels en zijn gedeeltelijk redundant. De derde en vierde regel beschrijven de werking van de schuiven van het toegevoegd debiet in de bekken 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 schuiven van het toegevoegd debiet in de bekken altijd sluiten wanneer het waterpeil opwaarts van de stuw te hoog of te laag wordt.

⁷ De toepassing van alarmvlotter dient nog verder afgestemd te worden.

De tweede regel zorgt ervoor dat er geen nutteloos toegevoegd debiet in de bekkens geleverd wordt als de vispassage om één of andere reden automatisch of manueel gesloten werd. En voorkomt ook schade aan bodemsubstraat bij te hoog debiet in combinatie met te lage afwaartse waterstand.

De derde regel laat toe dat de schuiven van het toegevoegd debiet in de bekkens gesloten worden op basis het debiet over de stuw of van het waterpeil opwaarts van de stuw, met de bijkomende voorwaarde dat de schuiven van het toegevoegd debiet in het afwaartse mondingskanaal reeds gesloten zijn.

De vierde regel laat toe dat de schuiven van het toegevoegd debiet in de bekkens geopend worden op basis van het debiet over de stuw en/of het waterpeil opwaarts van de stuw.

8.3.3 Initiële waarden instelbare parameters

Tabel 33 geeft een voorstel voor beginwaarden van de instelbare parameters.

Tabel 33 – Voorstel initiële waarden voor automatische sturing afsluitschuiven toegevoegd debiet bekkens

Toegevoegd debiet bekkens	debiet stuw (m ³ /s)	peil opwaarts (mTAW)	schuifstand
continu openen			volledig open
peil 2 en debiet 2	≥ 3.0	> 3.90	
rust			
peil 1 of debiet 1	< 0.1	< 5.55	
continu sluiten			volledig dicht

De schuiven van het toegevoegd debiet in de bekkens zullen openen als het debiet over de stuw meer dan 3.0 m³/s bedraagt en het opwaarts waterpeil meer dan 3.90 mTAW (= bodempeil instroom van de vispassage) bedraagt.

De schuiven van het toegevoegd debiet in de bekkens zullen sluiten als het waterpeil opwaarts van de stuw minder dan 5.55 mTAW bedraagt (= 15 cm onder het opwaarts streefpeil van 5.70 mTAW) of het debiet over de stuw minder dan 0.1 m³/s bedraagt. Een bijkomende voorwaarde (niet in de tabel) stelt dat de schuiven van het toegevoegd debiet afwaarts gesloten moeten zijn.

Voor de instelbare tijden 1 en 2 wordt een initiële waarde van 10 minuten voorgesteld.

8.4 Afsluitschuiven toegevoegd debiet afwaarts mondingskanaal

8.4.1 Principe

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

Merk op dat, net als in de bekkens, ook de schuiven van het toegevoegd debiet in het afwaartse mondingskanaal niet gebruikt worden voor het regelen van de grootte van het toegevoegd debiet. Dat gebeurt te Merelbeke immers door een tweede reeks schuiven die in serie geplaatst worden met de eerste en mechanisch aangestuurd worden door vlotters in de bekkens (zie paragraaf 6.3.1).

De automatisch geregelde schuiven dienen enkel voor sluiting met oog op peilbeheer in situaties van te weinig beschikbare afvoer in het Groot Pand.

In eerste instantie wordt een sturing voorgesteld die uitgaat van sluiten op basis van het debiet over de stuw of het waterpeil opwaarts van de stuw en (terug) openen op basis van het debiet over de stuw. Door een flexibele implementatie (zoals ook toegepast bij de afsluitconstructie van de vispassage, zie 8.2) kan de mogelijkheid tot het overschakelen op een ander type sturing (bijv. enkel sluiten op basis van waterpeil opwaarts van de stuw) grotendeels behouden blijven.

De schuiven van het toegevoegd debiet in het afwaartse mondingskanaal krijgen beide dezelfde sturingsregels, maar krijgen elk een eigen set instelbare parameters. De initiële waarden van de instelbare parameters zijn gelijk voor beide schuiven, zodat ze als één geheel werken. Het gebruik van meerdere sets instelbare parameters laat toe de werking later verder te differentiëren, indien gewenst.

8.4.2 Sturingsregels bij automatische werking

Bij automatische werking (keuzeschakelaar op “automatisch”) worden de schuiven van het toegevoegd debiet in het afwaartse mondingskanaal geopend en gesloten op basis van het waterpeil opwaarts van de stuw en/of het debiet over de stuw volgens de volgende sturingsregels:

1. **VOLLEDIG SLUITEN 1** als meest extreme alarmpeilvlotter (hoogste hoogwateralarm OF laagste laagwateralarm) geactiveerd worden⁸
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 1** OF debiet over stuw kleiner dan **instelbaar debiet 1** gedurende meer dan **instelbare tijd 1**
4. **VOLLEDIG OPENEN** als (alle schuiven toegevoegd debiet bekkens open) 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**)

De eerste twee regels zijn veiligheidsregels en zijn gedeeltelijk redundant. De derde en vierde regel beschrijven de werking van de schuiven van het toegevoegd debiet afwaarts 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 schuiven van het toegevoegd debiet altijd sluiten wanneer het waterpeil opwaarts van de stuw te hoog of te laag wordt.

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

De derde regel laat toe dat de schuiven van het toegevoegd debiet afwaarts gesloten worden op basis van het waterpeil opwaarts van de stuw of het debiet over de stuw.

De vierde regel laat toe dat de schuiven van het toegevoegd debiet afwaarts geopend worden op basis van het waterpeil opwaarts van de stuw en/of het debiet over de stuw, met de bijkomende voorwaarde dat de schuiven van het toegevoegd debiet in de bekkens reeds geopend zijn.

⁸ De toepassing van alarmvlotter dient nog verder afgestemd te worden.

8.4.3 Initiële waarden instelbare parameters

Tabel 34 geeft een voorstel voor beginwaarden van de instelbare parameters.

Tabel 34 – Voorstel initiële waarden voor automatische sturing afsluitschuiven toegevoegd debiet afwaarts

Toegevoegd debiet afwaarts	debiet stuw (m^3/s)	peil opwaarts (mTAW)	schuifstand
continu openen			volledig open
peil 2 en debiet 2	≥ 3.0	> 3.90	
rust			
peil 1 of debiet 1	< 0.1	< 5.55	
continu sluiten			volledig dicht

De schuiven van het toegevoegd debiet afwaarts zullen openen als het debiet over de stuw meer dan $3.0 \text{ m}^3/\text{s}$ bedraagt en het opwaarts waterpeil meer dan 3.90 mTAW (= bodempeil instroom van de vispassage) bedraagt. Een bijkomende voorwaarde (niet in de tabel) stelt dat de schuiven van het toegevoegd debiet in de bekkens reeds geopend moeten zijn.

De schuiven van het toegevoegd debiet afwaarts zullen sluiten als het waterpeil opwaarts van de stuw minder dan 5.55 mTAW bedraagt (= 15 cm onder het opwaarts streefpeil van 5.70 mTAW) of het debiet over de stuw minder dan $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ bedraagt.

Voor de instelbare tijden 1 en 2 wordt een initiële waarde van 10 minuten voorgesteld.

8.5 Eenheden en formaten

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

De debieten dienen instelbaar te zijn met een nauwkeurigheid van $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ (formaat $\pm \text{xxx.x m}^3/\text{s}$).

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

9 Samenvatting finaal ontwerp

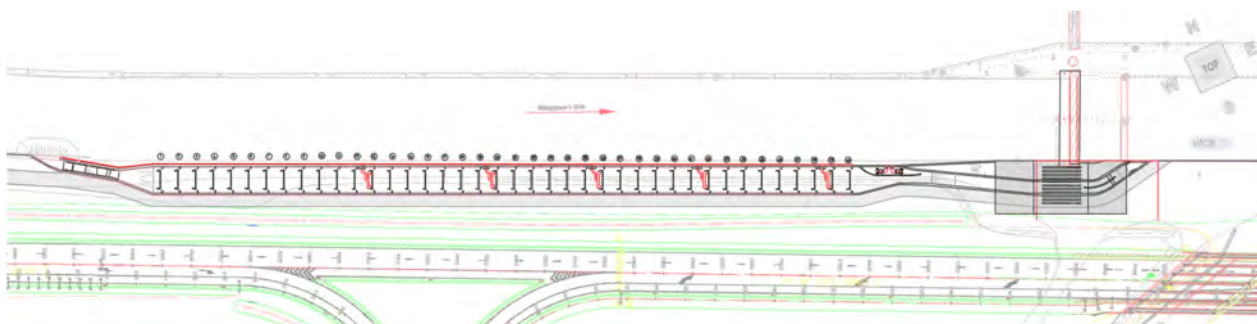
9.1 Type, inpassing en optimale werking

Gekozen werd voor een dubbele vertical slotvispassage aangezien dit type beter geschikt is voor (sterk) fluctuerende waterpeilen dan bijv. een bekkentrap of een semi-natuurlijke nevengeul. Ook heeft een vertical slotpassage een relatief laag basisdebiet waardoor dit type in drogere perioden langer open kan blijven, wat zeker met oog op de mogelijke invloed van klimaatverandering een robuuster ontwerp geeft. Op de Elbe te Geesthacht (Duitsland) is in 2010 onder nagenoeg soortgelijke hydraulische condities een vispassage van dit type gebouwd. Deze dubbel slotvispassage werd over verschillende jaren goed gemonitord en bleek voor alle doelsoorten die ook op de Schelde van toepassing zijn zeer goed passeerbaar.

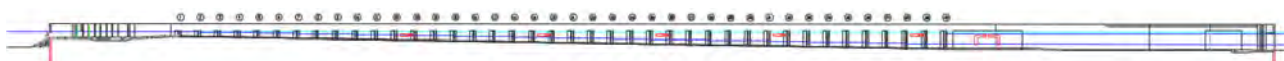
De dubbele vertical slotvispassage wordt ingepast tussen de stuwgeul en het grondlichaam van de R4, zie Figuur 93. Uit de hydraulische studie bleken 40 bekkens benodigd met een breedte van 9 m. De bekkens van de vispassage hebben een totale lengte circa 240 m, de instroom en het afwaarte lokstroomkanaal (de uitstroom) hebben respectievelijk een lengte van circa 40 m en 100 m.



Inpassing met luchtfoto



Grondplan



Lengteprofiel

Figuur 93 – Hydraulisch ontwerp en ruimtelijke inpassing dubbel vertical slotvispassage te Merelbeke

De vispassage dient optimaal te kunnen werken bij afvoeren tussen een debiet dat 90% van de tijd (=circa 330 dagen per jaar, de $Q_{90\%}$ -waarde) beschikbaar is of wordt overschreden, en een debiet dat 10% van de tijd (= circa 30 dagen van het jaar, de $Q_{10\%}$ -waarde) wordt overschreden. Voor Merelbeke werd op basis de beschikbare meetgegevens een $Q_{90\%}$ van circa 6 m³/s en een $Q_{10\%}$ van 90 m³/s op jaarbasis vastgesteld. Hierbij wordt opgemerkt dat ook bij hogere debieten dan $Q_{10\%}$ -waarde afhankelijk van de doelsoort nog een (suboptimale) passage mogelijk blijft. Voor de doelsoorten en bijbehorende ontwerpcriteria zoals toegepast in deze ontwerpstudie wordt verwezen naar paragraaf 2.2. Figuur 94 toont enkele van de doelsoorten.

Aan opwaartse zijde van de vispassage bevindt zich de Ringvaart van het Groot Pand rond Gent met een relatief vast streefpeil van 5,70 mTAW. Aan afwaartse zijde bevindt zich de Zeeschelde waarin het waterpeil door getijde werking sterk fluctueert. Naast het bovengenoemde debietcriterium dient de vispassage optimaal te kunnen werken bij de volgende waterpeilen:

- Opwaarts (Ringvaart/ Groot Pand) tussen 5,50 m TAW en 5,90 m TAW;
- Afwaarts (getij in de Zeeschelde) tussen 2,10 m TAW en 5,00 m TAW.

Daarbij wordt aanbevolen om de vispassage ook bij hogere waterpeilen open te houden aangezien er geen risico is op schade in de vispassage en er zo toch nog (suboptimale) passage mogelijk blijft. Aan zowel opwaartse als afwaartse zijde worden balken voorzien tegen indringing drijfvuil. Bij extreem verlaagde afwaartse waterpeilen (< 1,50 mTAW) is het wel aanbevolen om de vispassage te sluiten aangezien het bodemsubstraat in vooral de afwaartse bekkens en het mondingskanaal dan kan wegstromen.

In de drogere perioden (bijv. de zomermaanden) kan de afvoer naar de Zeeschelde via Merelbeke relatief laag worden. Dit betekent dat het vispassagedebiet met oog op een zo hoog mogelijk openingspercentage best zo laag mogelijk wordt gekozen. Op basis van de hydraulische analyse van de $Q_{90\%}$ -waarde in de zomermaanden, de schutverliezen en de criteria voor optimale passeerbaarheid werd een slotontwerp gekozen dat bij de bovengenoemde peilfluctuaties een vispassagedebiet geeft van 1,2 tot 2,4 m³/s (bij opwaarts streefpeil ligt deze tussen circa 1,5 tot 2 m³/s).

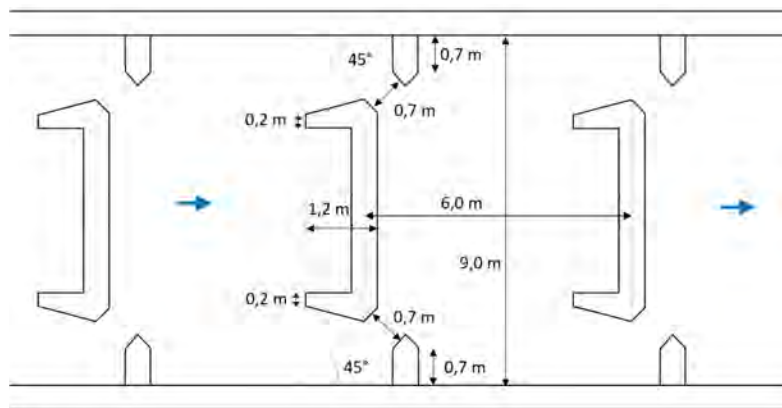


Figuur 94 – Enkele doelsoorten (Foto's: Rollin Verlinde/Vilda)

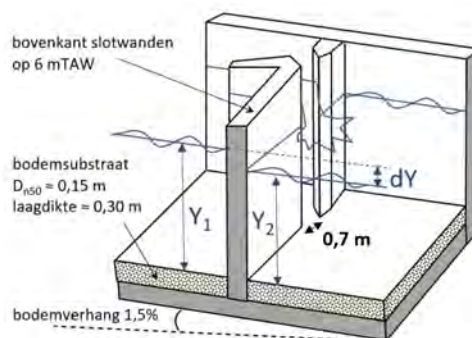
9.2 Bekkens en slots

Op basis van de doelsoorten, de ruimtelijke randvoorwaarden en de hydraulische analyse werd gekozen voor een slotbreedte van 0,7 m, een bekkenbreedte van 9 m en een bekkenlengte van 6 m.

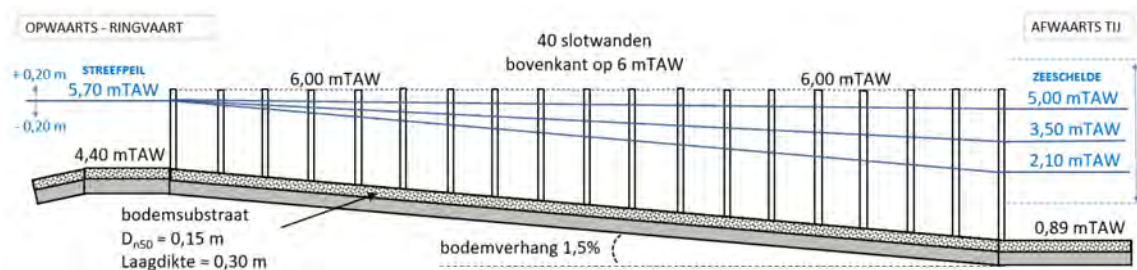
Figuur 95 en Tabel 35 geven respectievelijk een visuele weergave en opsomming van de belangrijkste parameters met betrekking tot de dimensionering van de bekken en slots. Tabel 36 geeft tevens een indicatie van de bodemhoogtes in de slots. De bodem van de vispassage heeft een doorlopend verhang (dus geen trappen!) van 1,5% ($dh/Lb = 0,09/6$). De top van alle slotwanden is gelijk en ligt op 6 mTAW. Dit betekent dat de relatieve hoogte van de slotwanden tot de bekkenbodem toeneemt in afwaartse richting, zie onderin Figuur 95.



Grondplan



3D-impressie



Schematische lengtedoorsnede

Figuur 95 – Dimensionering hydraulisch ontwerp bekken en slots

Tabel 35 – Maatgevende waarden dimensionering hydraulisch ontwerp

parameter	omschrijving	aantal / waarde	eenheid
N	Aantal slots/bekkens	40	[-]
dh	Verval per slot/bekken	0,09	[m]
bs	Slotbreedte	0,70	[m]
Lb	Bekkenlengte (h.o.h. van slotwand tot slotwand)	6,00	[m]
Bb	Bekkenbreedte (binnenzijde zijwand tot binnenzijde zijwand)	9,00	[m]
S0	Gemiddelde bodemhelling (= dh/Lb)	0,015	[-]
T	Hoogte bovenzijde slotwanden	6,00	[mTAW]
W	Lengte kleine slotwand	0,70	[m]
H	Lengte haak van grote slotwand	1,20	[m]
β	Hoek van slotopening (t.o.v. stroomrichting)	45	[°]
Qv	Range vispassagedebiet tijdens optimale werking (uitgaande van $C_d = 0,85$)	1,1 – 2,4	[m ³ /s]
y _o	Range waterdiepte in opwaartse slots tijdens normale werking	1,1 – 1,5	[m]
y _a	Range waterdiepte in afwaartse slots tijdens normale werking	1,1 – 5,0	[m]

Tabel 36 – Bodemhoogtes in de slots bij bodemverhang in bekkens van 1,5%

N	slot nr	[-]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Hbs	slotbodem	[mTAW]	4,4	4,31	4,22	4,13	4,04	3,95	3,86	3,77	3,68	3,59
N	slot nr	[-]	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Hbs	slotbodem	[mTAW]	3,5	3,41	3,32	3,23	3,14	3,05	2,96	2,87	2,78	2,69
N	slot nr	[-]	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Hbs	slotbodem	[mTAW]	2,6	2,51	2,42	2,33	2,24	2,15	2,06	1,97	1,88	1,79
N	slot nr	[-]	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Hbs	slotbodem	[mTAW]	1,7	1,61	1,52	1,43	1,34	1,25	1,16	1,07	0,98	0,89

9.3 Bodemsubstraat

Met oog op aan de bodem migrerende vissen en andere waterdieren dient de vispassage voorzien te worden van een bodemsubstraat met voldoende ruwheid (zie Figuur 95). Voorgesteld wordt om een rolstenensortering toe te passen met een mediaan nominale steendiameter (D_{n50}) van circa 0,15 m.

De doelstelling hier is verruwing van de bodem met oog op aan de bodemmigrerende soorten, waardoor het van belang is om een sortering te kiezen die ook voldoende stenen bevat in de bovenrange van steendiameter (groter dan 0,15 m). De bijbehorende laagdikte met oog op voldoende pakking tegen erosie is afhankelijk van de gekozen sortering en wordt meestal verbonden aan 2x de grootste steendiameter uit de D_{n50} -range. In deze toepassing wordt het bodemsubstraat echter niet toegepast als erosiewerende maatregel aangezien onder het substraat nog een betonnen vloer werd aangelegd. In de hydraulische studie wordt daarom uitgegaan van een laagdikte van circa 0,30 m.

Hierbij wordt nadrukkelijk opgemerkt dat met oog op steentype een rolstenen sortering (bijv. Maaskeien) dient te worden gebruikt en niet de relatief 'scherpe' breuksteensortering zoals in de waterbouw meestal toegepast wordt als erosiebescherming.

9.4 Instroom

Figuur 96 toont de dimensionering van de instroom. In de instroom bevinden zich een vaste drijfvuilbalk, de afsluitconstructie en een monitoringzone. Het bodempeil van de instroom ligt op 3,90 mTAW, wat bij een streefpeil van 5,70 mTAW een waterdiepte van 1,8 m geeft. De instroom bestaat voor het grootste deel uit een U-vormige betonnen bak tussen damwandplanken met een natte tussenbreedte van 2,5 m.

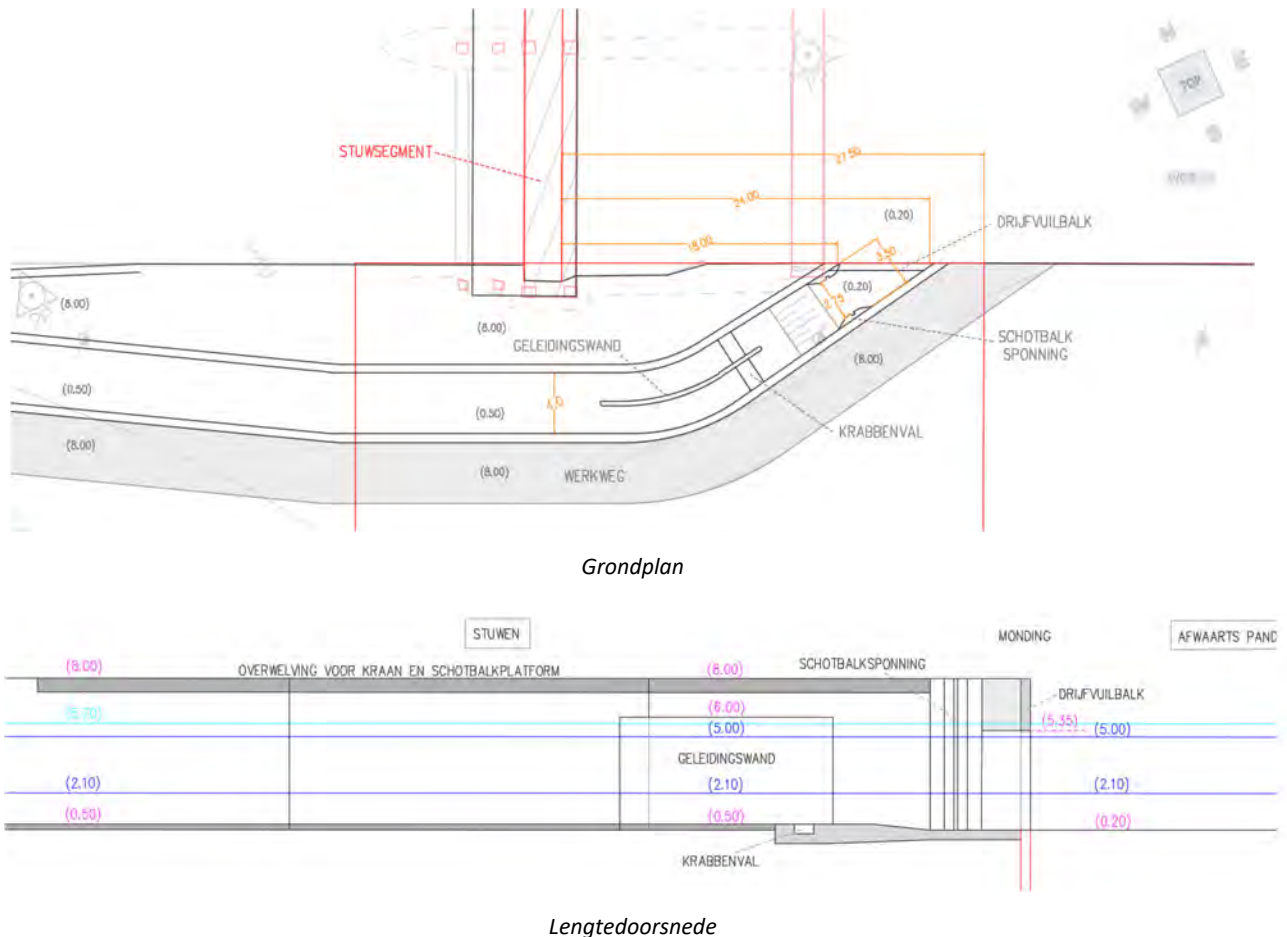
In de instroom bevinden zich negen paar sponningen: 1 voor de afsluitconstructie, 2 voor het droog kunnen zetten van de afsluitconstructie en 6 voor het kunnen plaatsen monitoringsapparatuur (zoals bijv. fuiken) in de monitoringzone. Uit de bouwkundige verkenning volgde een sponningsdiepte van 15 cm en een sponningsbreedte van 20 cm.

Aan opwaartse zijde bevindt zich de vaste drijfvuilbalk en de afsluitconstructie. De drijfvuilbalk reikt tot een diepte van 5,35 mTAW, wat 15 cm onder het laagste opwaartse peil is. De afsluitconstructie is nodig om de vispassage te kunnen afsluiten met oog op peilbeheer (bij te lage beschikbare afvoer) of voor onderhoud. Er is gekozen voor een hefschuif aangezien dit hydraulisch gezien het meest optimale en ook meest toegepaste type is in dergelijke condities. De natte breedte van de afsluitconstructie is gelijk gekozen aan de breedte van de instroom zelf, namelijk 2,5 m.

De afsluitconstructie moet opwaartse peilen kunnen keren tot circa 6 mTAW. Uit meetgevens bleek dat hogere peilen in de Ringvaart altijd veroorzaakt worden door (extreem) hoog afwaarts tij. DVW heeft er echter voor gekozen om de afsluitconstructie 'dubbelkerend' te maken zodat voorkomen kan worden dat water vanuit de Zeeschelde via de vispassage naar de Ringvaart zou kunnen stromen bij extreem hoogtij. Dit omdat verwacht wordt dat de stuwen in de toekomst mogelijk ook dubbelkerend gemaakt zullen worden. In het bouwkundige ontwerp wordt de kering van het afwaarts waterpeil momenteel voorzien door het toepassen van een topwand (boven de afsluitconstructie) die loopt van maaiveld (8,00 mTAW) tot 5,90 mTAW, zie grijze rechthoek net opwaarts van de afsluitconstructie in het lengteprofiel in Figuur 96. In gesloten toestand steunt de bovenkant van de afsluitconstructie tegen deze topwand. Voor de beschrijving van alle maatgevende hydraulische belastingen op de afsluitconstructie wordt verwezen naar paragraaf 5.3. De afsluitconstructie wordt voorzien van een automatische aansturing, zie korte samenvatting van de voorgestelde regeling in paragraaf 9.7 of de volledige beschrijving in paragraaf 8.2.

9.5 Monding

Figuur 97 toont de dimensionering en de ruimtelijke inpassing van de monding. De locatie van de monding werd bepaald op basis van zowel hydraulische berekeningen van de migratielimitlijnzone (welke in deze situatie verbonden is aan de turbulente zone van de watersprong afwaarts van de stuwen) als de ruimtelijke en bouwkundige randvoorwaarden, zie hiervoor hoofdstuk 7.



Figuur 97 – Dimensionering en ruimtelijke inpassing van de monding

De opwaartse rand van de doorsteek van de monding door de stuwgeulwand werd gekozen op circa 18 m uit de stuwen aan het einde van de betonnenstuwwallen. De afwaartse rand van de doorsteek ligt op circa 24 meter uit de stuwwallen, en circa 3,5 m opwaarts van een daar al aanwezige dwarswand in de ondergrond (zie de rode lijn op 27,5 m uit de stuwen). Een soortgelijke dwarswand bevindt zich ook in de ondergrond opwaarts van de stuwen (zie rode lijn opwaarts van de stuwen). Naast de stuwen en tussen deze ondergrondse dwarswallen is in de huidige situatie een schotbalkplatform aanwezig op maaiveld niveau. Het maaiveld ter plaatse van de stuwen ligt op circa 8 mTAW. Het tracé tussen de bekkens van de vispassage en monding wordt in deze studie het mondingskanaal genoemd.

Het mondingskanaal heeft over het grootste gedeelte een breedte van 4 m. Afwaarts van de geleidingswand in de afwaartse bocht neemt de breedte af tot circa 3,5 m om zo bouwkundig ingepast te kunnen worden tussen het einde van de stuwwand (op 18 m uit de stuwen) en de al aanwezige ondergrondse dwarswand (zie rode lijn op circa 27,5 m uit de stuwen).

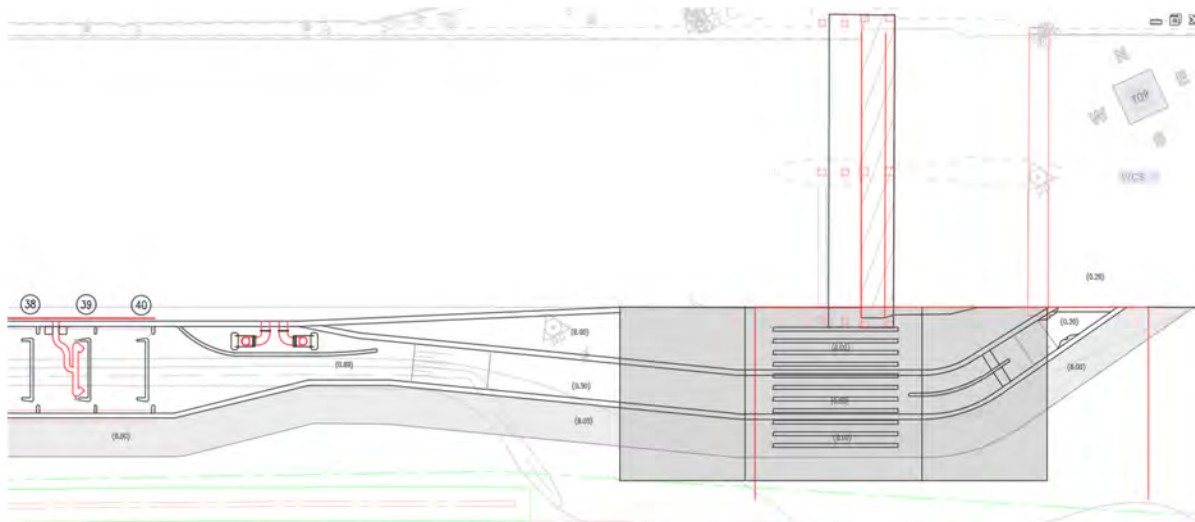
Aan afwaartse zijde net voor de monding zijn twee schotbalk sponningen aanwezig om de vispassage droog te kunnen zetten voor onderhoud. Er wordt vanuit gegaan dat er geen onderhoud zal worden uitgevoerd tijdens springtij waardoor deze schotbalken een afwaarts tij tot 6 mTAW zouden moeten kunnen keren.

In de monding zelf bevindt zich aan bovenzijde een drijfvuilbalk die loopt van maaiveld 8 mTAW tot onderkant op 5,35 mTAW. Deze balk moet ervoor zorgen dat er geen drijfvuil in de vispassage stroomt in situaties waarbij het afwaartse waterpeil (bij extreem hoogtij) hoger wordt als het opwaartspeil in de Ringvaart en de stroming in de vispassage zich dus omkeert (voor de situatie dat nog geen gebruik wordt gemaakt van de dubbelkerendheid van de opwaartse afsluitconstructie, zie voorgaande paragraaf).

Ter hoogte van de geleidingswand worden aanweerszijden twee sleuven voorzien met een diepte van 0,5 m en een breedte van 1 m (in stroomrichting) voor de plaatsing van krabbenvallen.

Figuur 98 toont het volledige traject van het mondingskanaal. Met grijze kaders zijn in deze figuur ook de locatie aangeduid voor een benodigde overwelling voor stelplaatsen van een kraan voor onderhoud stuwen en voor de opslag van de schotbalken voor het droog kunnen zetten van de stuwen. Deze overwelling ligt op en net onder maaiveldniveau (op circa 8 tot 7,5 mTAW) waardoor er altijd vrije ruimte tussen de overwelling en het wateroppervlak in het mondingskanaal blijft.

Het bodempeil van de monding zelf is gelijk aan het bodempeil van het afwaartse pand, namelijk 0,2 mTAW. Vervolgens loopt het bodempeil na enkele meters opwaarts in het mondingskanaal geleidelijk op naar 0,5 mTAW. Dit peil wordt zo goed als het gehele tracé van het mondingskanaal aangehouden. Net afwaarts van de inlaat van het toegevoegd debiet aan opwaartse zijde van het mondingskanaal loopt het bodempeil geleidelijk op tot 0,89 mTAW, wat gelijk is aan de bodemhoogte in het meest afwaartse slot (zie ook Tabel 36).



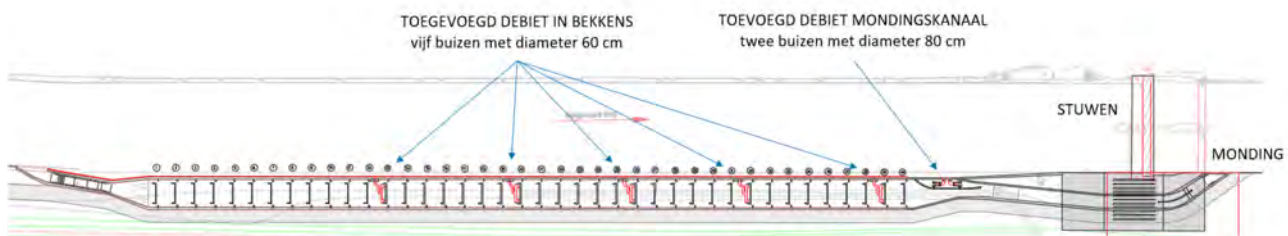
Figuur 98 – Mondingskanaal met overwelling voor standplaat kraan en opslag schotbalken

9.6 Toegevoegd debiet

Bij de stijging van het afwaartse waterpeil door het tij in de Zeeschelde nemen stroomsnelheden in de vispassage en ook de lokstroom (sterk) af. Om een goede migratie-impuls en een optimale vindbaarheid van de hoofdstroom te behouden is het daarom van belang om op een aantal plaatsen in de vispassage een toegevoegd debiet in te laten. Figuur 99 toont de locaties langs het tracé waar toegevoegd debiet dient te worden ingelaten. Het inlaten van het toegevoegd gebeurt doormiddel van buizen die verbonden zijn met het opwaartse pand. Een schuif regelt het debiet in de betreffende buis. Deze schuiven worden mechanisch aangestuurd door vlotters op basis van het afwaartse waterpeil.

Er zijn twee groepen te onderscheiden:

- toegevoegd debiet in de bekkens;
- toegevoegd debiet in het afwaartse mondingskanaal.



Figuur 99 – Locaties inbreng toegevoegd debiet

9.6.1 Bekkens

In de bekkens wordt op vijf locaties toegevoegd debiet ingelaten namelijk in bekken 12, 19, 25, 31 en 38. Het ontwerp en de inpassing van de buizen is op elk van deze locaties gelijk. Figuur 100 toont enkele foto's van het al gerealiseerde systeem in de voorbeeld vispassage te Geesthacht. Dit systeem bestaat steeds uit een ronde buis die door de wand tussen de vispassage en stuwgeul verbonden is met het opwaarts pand en zo debiet kan inlaten in het betreffende bekken. De grootte van het toegevoegd debiet per bekken wordt geregeld door een schuif in de buis die mechanisch verbonden is aan een vlotter.

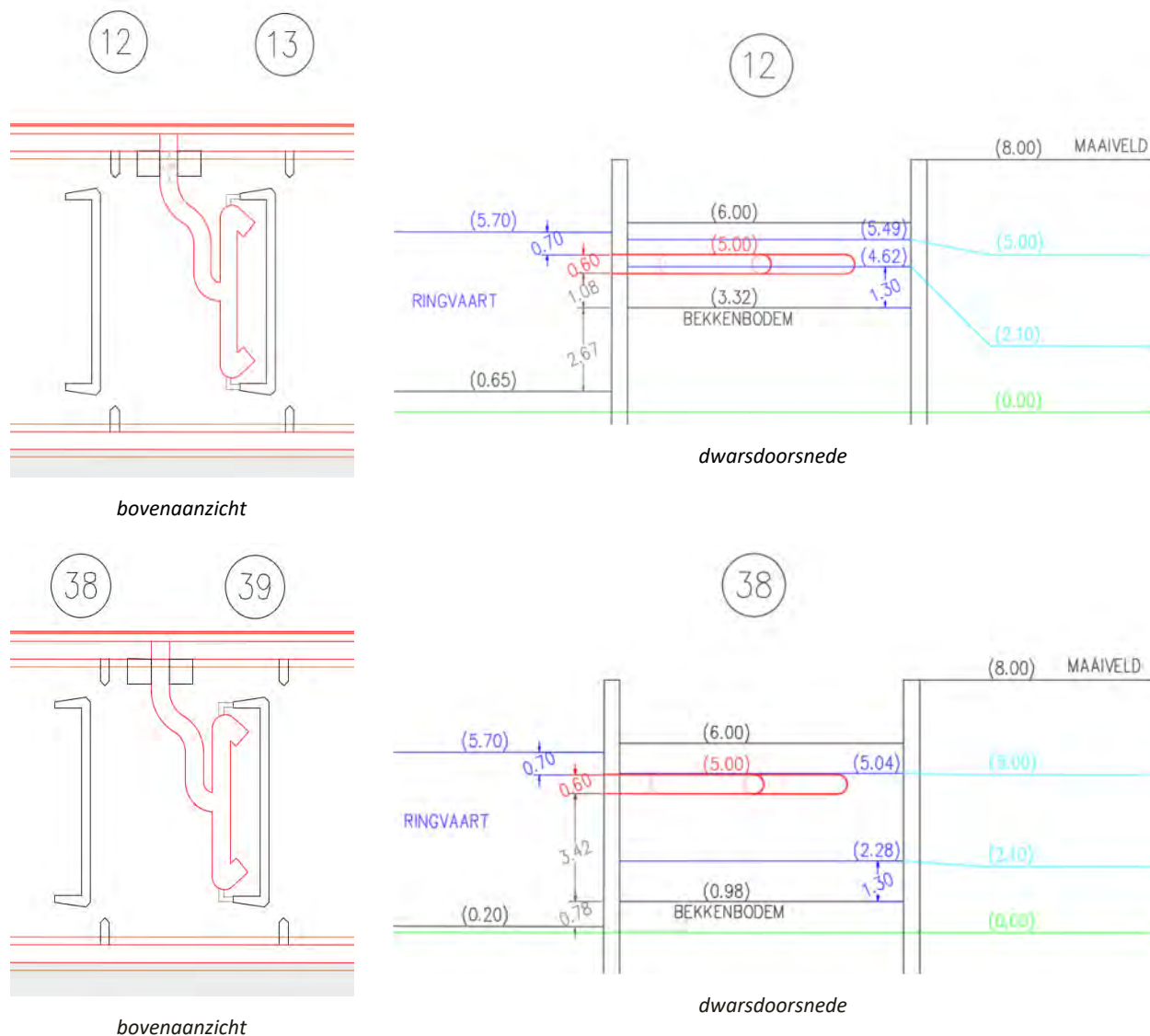
De vlotter zorgt ervoor dat de schuif (verder) opent afhankelijk van de stijging van het waterpeil in het betreffende bekken. Deze schuif wordt dus niet elektromechanisch aangestuurd, maar puur mechanisch door de vlotter. Opwaarts van deze mechanische schuif wordt wel ook een manueel en automatisch bedienbare (spindel)schuif voorzien, om in geval van nood of bij te weinig beschikbare afvoer de buis te kunnen afsluiten. Voor de voorwaarden voor automatische regeling van de opwaartse afsluitschuif wordt verwezen naar paragraaf 8.3



Figuur 100 – Foto's buizensysteem voor inbreng toegevoegd in de bekkens uit de voorbeeldpassage te Geesthacht (Du)

Figuur 101 toont het ontwerp van de buizen in bekkens 12 en 38 zoals voorzien te Merelbeke. Dit zijn de meest opwaartse en meest afwaartse locatie, de tussenliggende locaties hebben dezelfde uitvoering. Op basis van de hydraulische studie bleek een buisdiameter van 60 cm nodig om het benodigde debiet tot circa $0,40 \text{ m}^3/\text{s}$ per bekken te kunnen halen. Het totale toegevoegde debiet in de bekkens komt daarmee op circa $2 \text{ m}^3/\text{s}$ bij de hoogste afwaartse waterstand. Bij de laagste afwaartse waterstand zijn de schuiven volledig gesloten. Per bekken werden de (tussenliggende) schuifstanden bepaald om het benodigde debiet te realiseren op basis van de afwaartse waterstand doormiddel van de vlotter (zie paragraaf 6.2.6).

De instroom van de buizen moet diep genoeg worden gekozen om aanzuiging van lucht en drijfvuil te voorkomen. Aan de andere kant wordt de doorsteek door de stuwwand met oog op beheer en onderhoud van de schuiven best zo hoog mogelijk gekozen om er zo voor te zorgen dat deze bij de afwaartse tijfluctuatie voor een zo groot mogelijk deel van tijd boven water blijven. De doorsteek door de stuwwand werd voor alle vijf de buizen met de bovenkant van de binnenzijde op 5,00 mTAW gekozen.



Figuur 101 – Hydraulisch ontwerp buizen voor toegevoegd debiet in de bekens

9.6.2 Mondingskanaal

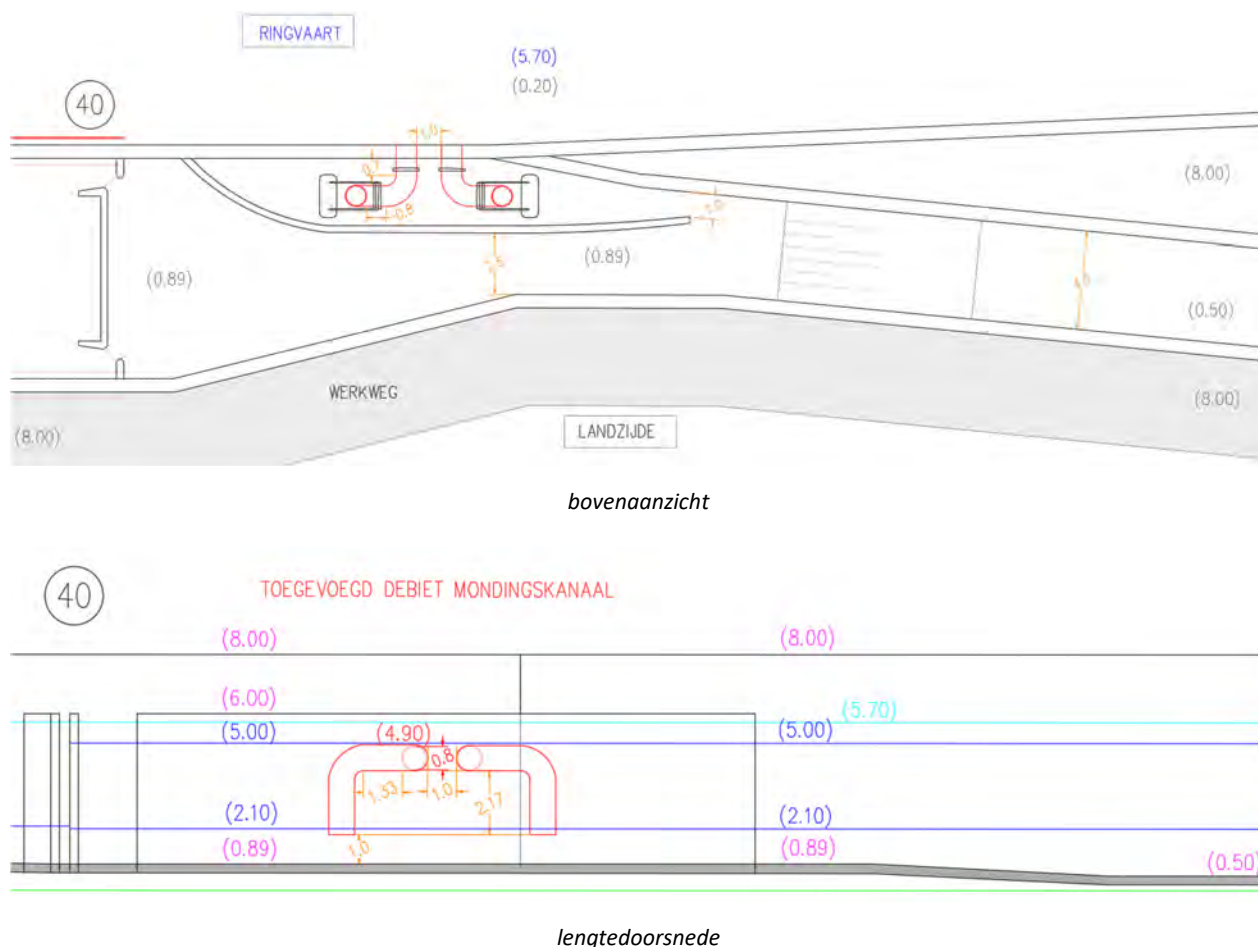
Het tweede type toegevoegd debiet wordt ingebracht in een bassin net afwaarts van het laatste bekken van de vispassage en aan de opwaartse zijde van het mondingskanaal. Dit bassin mondt in stroomrichting uit in het mondingskanaal. Om de buisdiameter te beperken wordt het debiet ingelaten doormiddel van twee naast elkaar gelegen buizen. Net als in de bekens (zie vorige paragraaf) wordt de grootte van het toegevoegd debiet ook hier geregeld door schuiven in de buizen die mechanisch verbonden zijn aan vlotter. Opwaarts van de mechanische schuif wordt ook weer een manueel en een automatisch bedienbare (spindel)schuif voorzien, om in geval van nood of bij te weinig beschikbare afvoer de buis te kunnen afsluiten. Voor de voorwaarden voor automatische regeling van de opwaartse afsluitschuif wordt verwezen naar paragraaf 8.4. Figuur 102 toont een voorbeeld van een al uitgevoerd bassin voor de inbreng van dit toegevoegd debiet in de voorbeeldvispassage te Geesthacht.



Figuur 102 – Foto's buizensysteem voor inbreng toegevoegd in het mondingskanaal uit de voorbeeldpassage te Geestacht (Du)

Figuur 103 toont het ontwerp van de buizensysteem en het bassin zoals voorzien in het mondingskanaal te Merelbeke. Op basis van de hydraulische studie bleek een buisdiameter van 80 cm nodig om het benodigde debiet tot circa $1 \text{ m}^3/\text{s}$ per buis te kunnen halen. Het totale toegevoegde debiet in het mondingskanaal komt daarmee op circa $2 \text{ m}^3/\text{s}$ bij de hoogste afwaartse waterstand. Ook bij de laagste afwaartse waterstand wordt nog $1 \text{ m}^3/\text{s}$ ($0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ per buis) ingelaten voor het versterken van de lokstroom bij hogere debieten over de stuwen. Per bekken werden de (tussenliggende) schuifstanden bepaald om het benodigde debiet te realiseren op basis van de afwaartse waterstand doormiddel van de vlotter (zie paragraaf 6.3.6).

Net als in de bekkens moet ook hier weer gezocht wordt naar een optimale hoogte voor de doorsteek door de stuwanden uitgaande van het voorkomen van aanzuiging lucht en drijfvuil en een goede bereikbaarheid voor beheer en onderhoud schuiven. De doorsteek door de stuwwand werd voor beide buizen met de bovenkant van de binnenzijde op 4,90 mTAW gekozen.



Figuur 103 – Buizen toegevoegd debiet mondingskanaal

9.7 Automatische sturing

Voor zowel de opwaartse afsluitconstructie van de vispassage als voor de afsluitschuiven in de buizen van het toegevoegd debiet werden voorwaarden voor een automatische regeling voorgesteld. Deze automatische regeling is vooral vereist met oog het peilbeheer voor o.a. de scheepvaart, maar ook om deze afsluitconstructies op afstand automatisch te kunnen sluiten indien nodig. Voor elke afsluiter wordt dan ook een keuzeschakelaar voorzien voor automatische of manuele sturing.

Hoofdstuk 8 in dit rapport geeft het uitgebreide voorstel voor de concrete sturingsregels van elk van de afsluiters. In deze sturing wordt de volgende prioritering toegepast: bij te weinig beschikbare afvoer om het opwaarts waterpeil te kunnen handhaven sluiten eerst de buizen voor het toegevoegd debiet in het mondingskanaal, daarna de buizen in de bekkens en tenslotte de afsluitconstructie van de vispassage zelf. Bij openen is dit in de omgekeerde volgorde en wordt dus eerst de vispassage, vervolgens het toegevoegd debiet in de bekkens en tenslotte het toegevoegd debiet in het afwaartse mondingskanaal (terug) ingeschakeld.

Voor elk van de drie typen afsluiters werd een flexibel script voorgesteld waarbij sluiting en opening op basis van zowel waterpeil als debiet over de stuwen mogelijk is. Voor elk van de typen afsluiters werd in hoofdstuk 8 ook initiële waarden voor de automatische sturing voorgesteld. Deze waarden zijn echter aanpasbaar op basis van bijv. praktijkervaringen of gewijzigde randvoorwaarden.

In het voorstel voor de initiële sturingswaarden sluit de afsluitconstructie van de vispassage op basis van opwaarts waterpeil en opent (terug) op basis van debiet over de stuwen. Voor het toegevoegd debiet werd gekozen om zowel sluiten als openen op basis van debiet over de stuwen te regelen.

Tenslotte is het van belang dat afvoer via de B4-stuw langs te Tijarm enkel wordt ingezet bij wascondities en dus zeker geen afvoer heeft in normale stromingscondities. Anders zouden vissen in deze Tijarm gelokt kunnen worden en vervolgens vast komen te zitten onder de B4 stuw. In principe wordt de B4-stuw in de huidige situatie enkel ingezet bij sterk verhoogde afvoer (vanaf een gemeten debiet van 80 m³/s te Bossuit/Helkijn op de Bovenschelde).

9.8 Aanbevelingen

Op basis van deze studie worden de volgende aanbevelingen gedaan:

- De voorgestelde sturingsvoorwaarden voor automatische regeling worden best beproeft en mogelijk geoptimaliseerd via een numerieke modelstudie met het bestaande 1D stromingsmodel van het Groot Pand.
- Uit de ontwerpstudie bleek dat er momenteel kennisleemtes bestaan met betrekking tot het bepalen van de stroompatronen en de lengte van verdronken watersprongen bij stuwoverstort. Hierdoor bestaan er onzekerheden ten aanzien van de ligging van de migratielinielij, welke belangrijk is voor de bepaling van de locatie van de monding. Gezien deze onzekerheden en het grote belang van de vindbaarheid en bereikbaarheid van de monding voor de effectiviteit van de vispassage, wordt sterk aanbevolen om de resultaten van deze berekeningen te valideren door middel van terreinmetingen, al dan niet gecombineerd met schaalmodelproeven en/of CFD-modellering.
- Uit de ontwerpstudie van de vispassage bleek tevens dat de effectiviteit van de vispassage ook sterk afhankelijk is van de keuzes in het waterbeheer van het Grootpand, zeker in periodes met relatief lage beschikbare afvoer vanuit de Leie en Bovenschelde (droge periodes). Hier is eventueel een win-win mogelijk met minimale E-flows voor een goede ecologische waarde van de Zeeschelde en het Schelde-estuarium. Aangezien verwacht wordt dat droge periodes vanwege klimaatverandering vaker zullen voorkomen wordt geadviseerd om het waterbeheer van het Groot Pand in meer detail te onderzoeken o.a. door middel van (bestaande) stromingsmodellen.

Referenties

- Adam, B., Bader, S. (2015). Der Doppelschlitzpass am Elbewehr Geesthacht – Bilanz des Fischaufstiegs über Europas grösste Fischaufstiegsanlage nach fünf Jahren. Institut für angewandte Ökologie. Im auftrag der Vattenfall Europe Generation AG.
- AMINAL (2005). Vismigratie – Een handboek voor herstel in Vlaanderen en Nederland. Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap: Brussel. ISBN 9080324566. 205 pp.
- Armstrong, G.; Apahamian, M.; Fewings, G.; Gough, P.; Reader, N.; Varallo, P. (2010). Environment Agency Fish Pass Manual. GeoJournal: 369
- ASCE (1995). Guidelines for design of intakes for hydroelectric plants. Committee on Hydropower Intakes of the Energy Division of the American society of Civil Engineers.
- Bélangier, J.B. (1828). Essai sur la Solution Numérique de quelques Problèmes Relatifs au Mouvement Permanent des Eaux Courantes.
- Berlamont, J. (2004). Theorie van de verhanglijnen. Cursustekst (KU Leuven), L. Wouters, Leuven.
- Boeckx, L. (2018). 18_I_135: Debieten rond Gent/Melle. Versie 1.0. WL Memo's, 18_PA007. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.
- Buyse, 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.
- Buyse, 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.
- Buyse, D., Van Wichelen, J., Van Braeckel, A., Vermeersch, S., Breine, J., Van Ryckegem, G., Van den Bergh, E., & Coeck, J. (2021). Advies over de ecologische kwetsbaarheid van bevaarbare waterlopen bij droogte. (Adviezen van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek; Nr. INBO.A.4183). Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek.
- Broers, R.; Fahner, T.; Terry, E. (2019) Vispassage Merelbeke – Rapportage deel 1. AFR-7880. Actiflow B.V.
- 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.]
- Cornet, E.; Vandenbruwaene, W; Vereecken, H.; Deschamps, M.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2019). Hydrologisch jaarboek 2018: HIC meetstations. Versie 2.0. WL Rapporten, PA026_2.
- De Mulder, T.; Vercruysse, J.B.; Verelst, K.; Mostaert, F. (2007). Tweede sluis Waaslandhaven: opmaak numeriek modelinstrumentarium voor vul- en ledigingssysteem. WL Rapporten, 760/03A-2. 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.
- Egea, M.L. (2015) Experimental and Numerical Modelling of Submerged Hydraulic Jumps at Low-Head Dams. Master Thesis, Department of Civil Engineering Faculty of Engineering University of Ottawa.

- Formica, G. (1955). Esperienze preliminari sulle perdite di carico nei canali, dovute a cambiamenti di sezione (Preliminary test on head losses in channels due to cross-sectional changes), *L'Energia elettrica, Milano*, vol. 32, no. 7, pp. 554-568, juli 1955. Herdrukt als *Istituto di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Milano, Memorie e studi No. 124*, 1955.
- Foulds, W.L.; Lucas, M.C. (2013). Extreme inefficiency of two conventional, technical fishways used by European river lamprey (*Lampetra fluviatilis*). *Ecological Engineering*, 58: 423-433.
- Hager, W.H.; Bremen, R.; Kawagoshi, N. (1990). Classical hydraulic jump: length of roller. *J. Hydraul. Res.* 28 (5): 591
- Haro, A.; Castro-Santos, T. (2012). Passage of American Shad: Paradigms and Realities. *J Marine and Coastal Fisheries: Dynamics, Management, and Ecosystem Science*. 10, 252-261.
- Hertoghs, R.; Vereecken, H.; Boeckx, L.; Deschamps, M.; Mostaert, F. (2018). Vijfjarig overzicht van de tijwaarnemingen in het Zeescheldebekken: Tijdvak 2011-2015. Versie 4.0. WL Rapporten, 16_035_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.
- Huysecom, S.; Mouton, A.; Buysse, D.; Gelaude, E.; Baeyens, R.; Jacobs, Y.; Stevens, M.; Van den Neucker, T.; Robberechts, K.; Pauwels, I. & Coeck, J. (2012). Evaluatie van de visnevengeulen bij de stuwen van Asper en Oudenaarde in de Bovenschelde. Rapporten van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek 2012 (INBO.R.2012.66). Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, Brussel.
- Idelchik, I.E. (1969). Mémento des pertes de charge : coefficients de pertes de charge singulières et de pertes de charge par frottement. *Collection du centre de recherches et d'essais de Chatou, 13*. Eyrolles, Paris. 494 pp.
- Idelchik, I.E. (2007). Handbook of Hydraulic Resistance. 4th Revised and Augmented Edition. Eds: A.S. Ginevskiy & A.V. Kolesnikov. Begell House, Redding, CT, USA. ISBN: 978-1-56700-251-5.
- 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) DOI: 10.1002/rra.1364.
- Kottelat, M.; Freyhof, J. (2007). Handbook of European freshwater fishes. Publications Kottelat, Cornol and Freyhof, Berlin. 646 pp.
- 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.
- Larinier, M., Travade, F. (2002). The design of fishways for shad. Bull. Fr. Pêche Piscic., 364 Suppl., 135-146.
- Lencastre, A. (1996). Hydraulique générale. Editions Eyrolles, Paris. ISBN : 2-212-01894-0.
- Lucas, M. C., Baras, E., (2001). Migration of freshwater fishes. Blackwell Science Ltd., Oxford. 440 pp.
- Maris, T; Cox, T.; Meire, P. (2018) Minimaal debiet voor ecologie in de Boven-Zeeschelde. Nota ECOBE 018-R227. Antwerpen, september 2018.
- McAllister, D.E. (1984). Osmeridae. p. 399-402. In P.J.P. Whitehead, M.-L. Bauchot, J.-C. Hureau, J. Nielsen and E. Tortonese (eds.) *Fishes of the north-eastern Atlantic and the Mediterranean*. UNESCO, Paris. Vol. 1.
- Michielsen, S.; Pereira, F.; Mostaert, F. (2012). Opmaak van modellen voor onderzoek naar waterbeschikbaarheid en -allocatiestrategieën in het Scheldestroomgebied: deelrapport 2. Analyse van het huidige watergebruik. Versie 3.0. WL Rapporten, 724_04. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.
- Musall, M., Oberle, P., Henning, M., Weichert, R., Nestmann, F. (2014) Analysen zu Strömungsmustern in technischen Fischaufstiegsanlagen. 37. Dresdner Wasserbaukolloquium 2014 "Simulationsverfahren und Modelle für Wasserbau und Wasserwirtschaft", p. 353-362.

- Nortier, I.W.; de Koning, P. (1996). Toegepast vloeistofmechanica – hydraulica voor waterbouwkundigen. Noordhoff Uitgevers B.V. Zevende druk. ISBN 9789040103186.
- Oberle, P.; Musall, M.; Riesterer, J.; Nestmann, F. (2012) Numerische Modelluntersuchungen im Rahmen der Planung der Fischaufstiegsanlage Geesthacht. WASSERWIRTSCHAFT april, 2012.
- Pauwels I.S., Buysse D., Mouton A.M., De Maerteleire N., Pieters S., Robberechts K., Gelaude E. & Coeck J. (2014). Evaluatie van vismigratie in de Demer in Diest. Evaluatie van de Grote Steunbeer als potentieel knelpunt en de Zwarte Beek als alternatieve route voor vismigratie. Rapporten van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek 2014 (INBO.R.2016.7009776). Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, Brussel.
- Pilarczyk, K.W. (1990). Proceedings of the short course on coastal protection, Delft University of Technology / 30 June-1 July 1990. Balkema: Rotterdam. ISBN 90-6191-127-3
- Prchalová, M., Horky, P., Slavík, O., Vetesník, 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. and Solanki, S. (1992) New Designs for Vertical Slot Fishways. Canadian Journal of Civil Engineering, 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
- Schwevers, U.; Neuman, C. (2012) Maßnahmen zur Gewährleistung der Passierbarkeit des Doppelschlitzpasses Geesthacht. WASSERWIRTSCHAFT april, 2012.
- 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.
- Sullivan, T. (2004). In Evaluation of the Turners Falls fishway complex and potential improvements for passing adult American shad, University of Massachusetts, Amherst, Master's thesis.
- Vandenbruwaene, W.; Michielsens, S.; Hertoghs, R.; Boeckx, L.; Vereecken, H.; Deschamps, M.; Mostaert, F. (2020). Hydrologie bevaarbare waterlopen in Vlaanderen: Jaar 2019. Versie 4.0. WL Rapporten, PA026_3. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.
- Vanderkimpfen, P.; Visser, K. P.; Viaene, P. (2019). Voorstel sturing vispassage Kerkhove. Versie 3.0. WL Memo's, 16_045_3. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.
- Vanderkimpfen, P.; Visser, K. P.; Viaene, P. (2020). Voorstel sturing vispassage Sint-Baafs-Vijve. Versie 3.0. WL Memo's, 15_036_4. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.
- Vanderkimpfen, P.; Visser, K.P. (2022; in prep.). Voorstel sturing vispassage Merelbeke. Versie 1.0. WL Memo's, 18_144_6. Waterbouwkundig Laboratorium, Antwerpen.
- Van Loon, P.; Schoelynck, J. (2019). Rapport Krabbenvaai Grobbendonk. In opdracht van de Vlaamse milieumaatschappij (AOW).
- 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.

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. (2018a). Verkenning haalbaarheid vispassage te Merelbeke. WL Memo's, WL2018M18_097_1. Waterbouwkundig Laboratorium, Antwerpen.

Visser, K.P.; Viaene, P. (2018b). Verkenning vispassage te Merelbeke_beschikbaar debiet en ontwerp monding. WL Memo's, WL2018M18_097_2. Waterbouwkundig Laboratorium, Antwerpen.

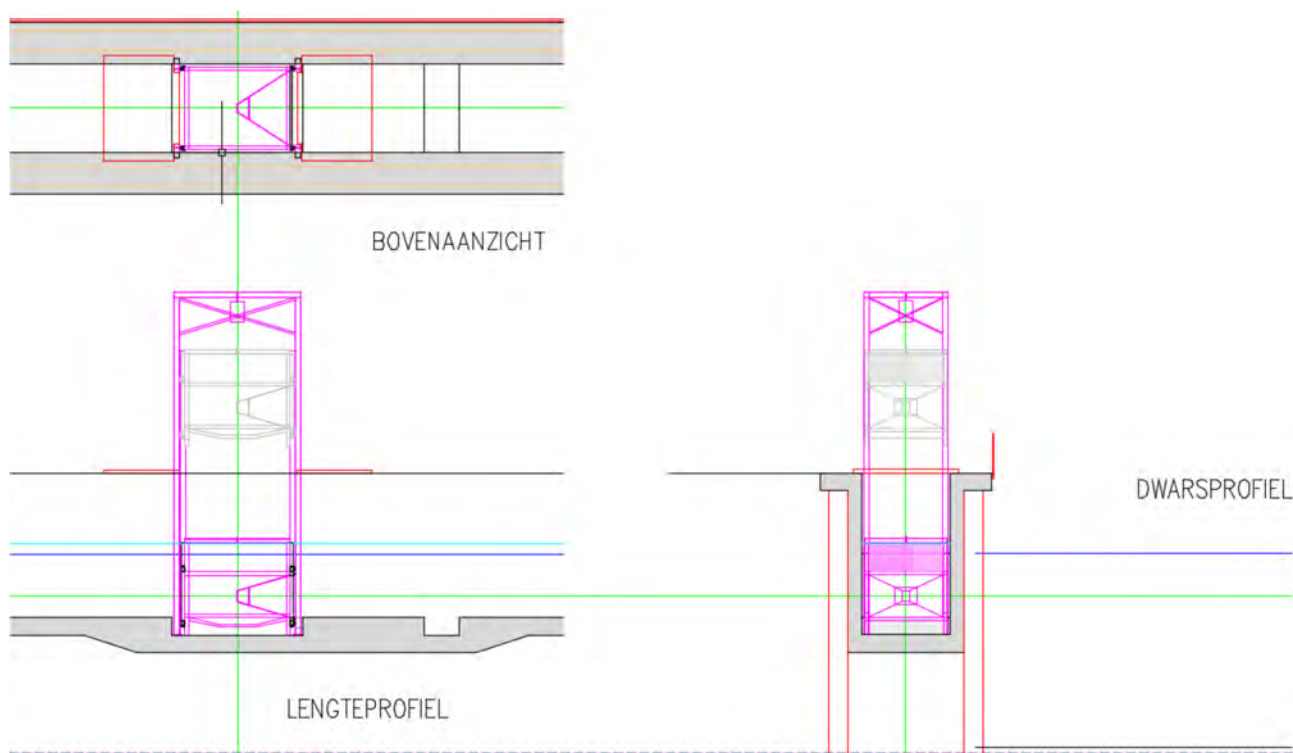
Visser, K.P.; Verelst, K.; Vercruysse, J.; Buysse, D.; Vanderkimpen, P.; Viaene, P.; Mostaert, F. (2020). Vispassage op de Leie te Sint-Baafs-Vijve: Hydraulisch ontwerp. Versie 6.0. WL Rapporten, 15_036_2. Waterbouwkundig Laboratorium, Antwerpen.

Bijlage 1 – Schetsontwerp vangkooi

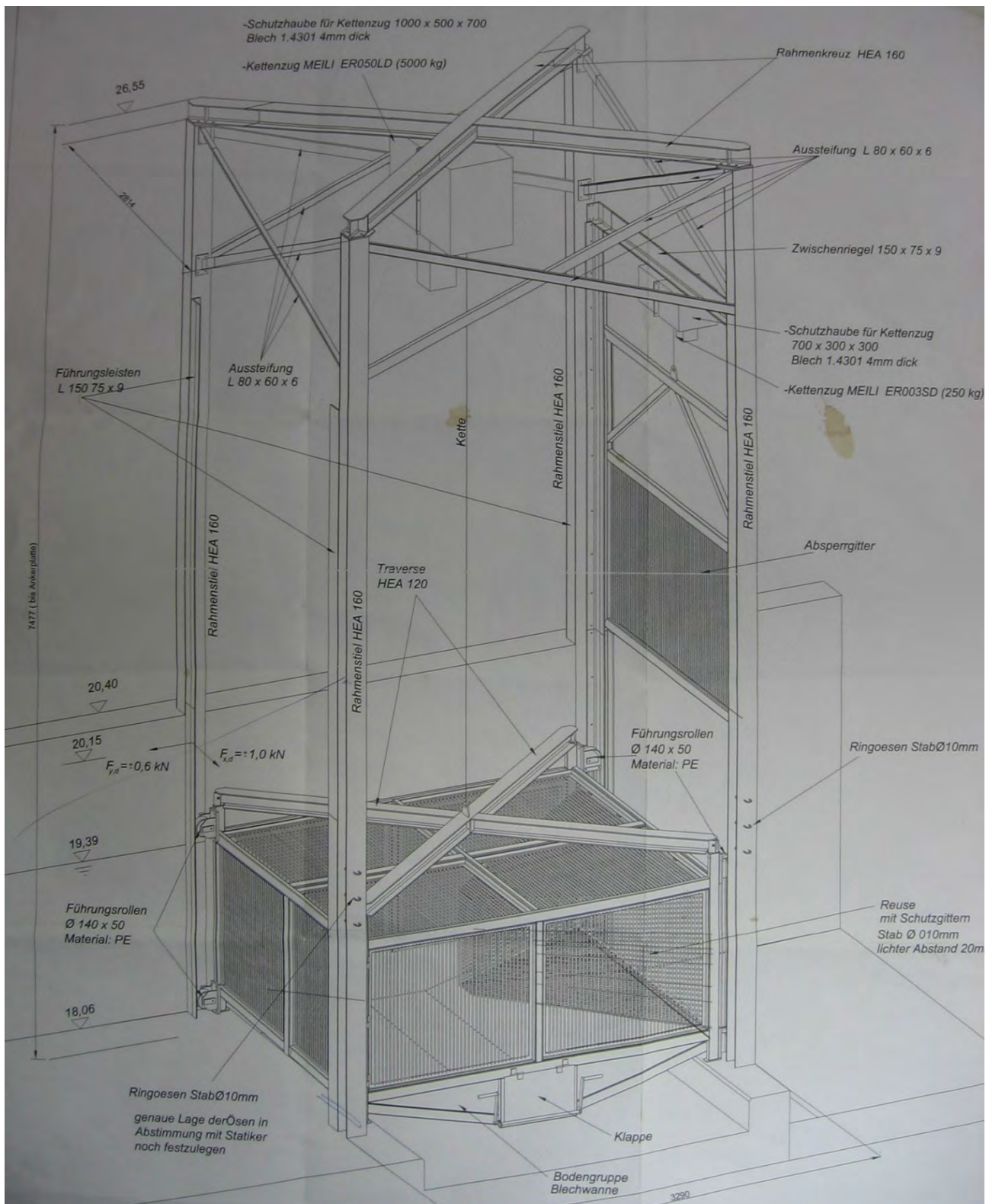
Figuur 104 geeft een overzicht van enkele doorsneden van het schetsontwerp voor een mogelijke vangkooi in de monitoringzone van de vispassage te Merelbeke. Dit ontwerp werd gebaseerd op een al gerealiseerde vangkooiconstructie op de Roer te Roermond in Nederland. Figuur 105 geeft een schematische weergave van het bijbehorende technische ontwerpplan. Figuur 54 in het rapport toonde al enkele foto's van deze al gerealiseerde voorbeeld constructie.

Het huidige schetsontwerp voor de vangkooi heeft de volgende dimensies: $L \times B \times H = \text{circa } 3 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 1,3 \text{ m}$. Aangezien de dimensies voor de kooi te Merelbeke relatief gelijk zijn aan die van Roermond wordt ook de hijskracht voor de motor die de vangkooi moet kunnen optakelen wordt voorlopig in de orde grootte gelijk geschat aan die van Roermond, namelijk een hijskracht tot 5000 kg.

Figuur 106 t.e.m. Figuur 110 tonen vervolgens enkele typeprofielen en zoom-ins met indicatieve maatvoering. Hierbij wordt opgemerkt dat dit een eerste voorlopige uitwerking betreft. In een later stadium zal deze nog verder uitgewerkt en/of aangepast moeten worden. Na de typeprofielen en zoom-ins worden enkele aandachtspunten voor het verdere ontwerp opgesomd die al opkwamen bij deze eerste schetsmatige uitwerking.



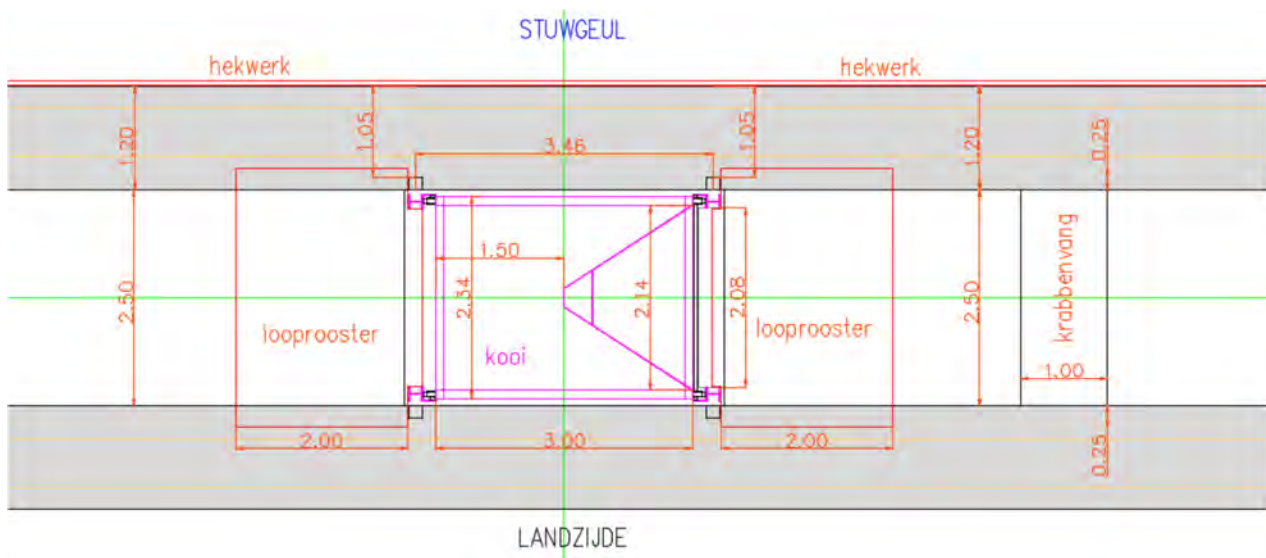
Figuur 104 – Overzicht typeprofielen schetsontwerp vangkooi te Merelbeke



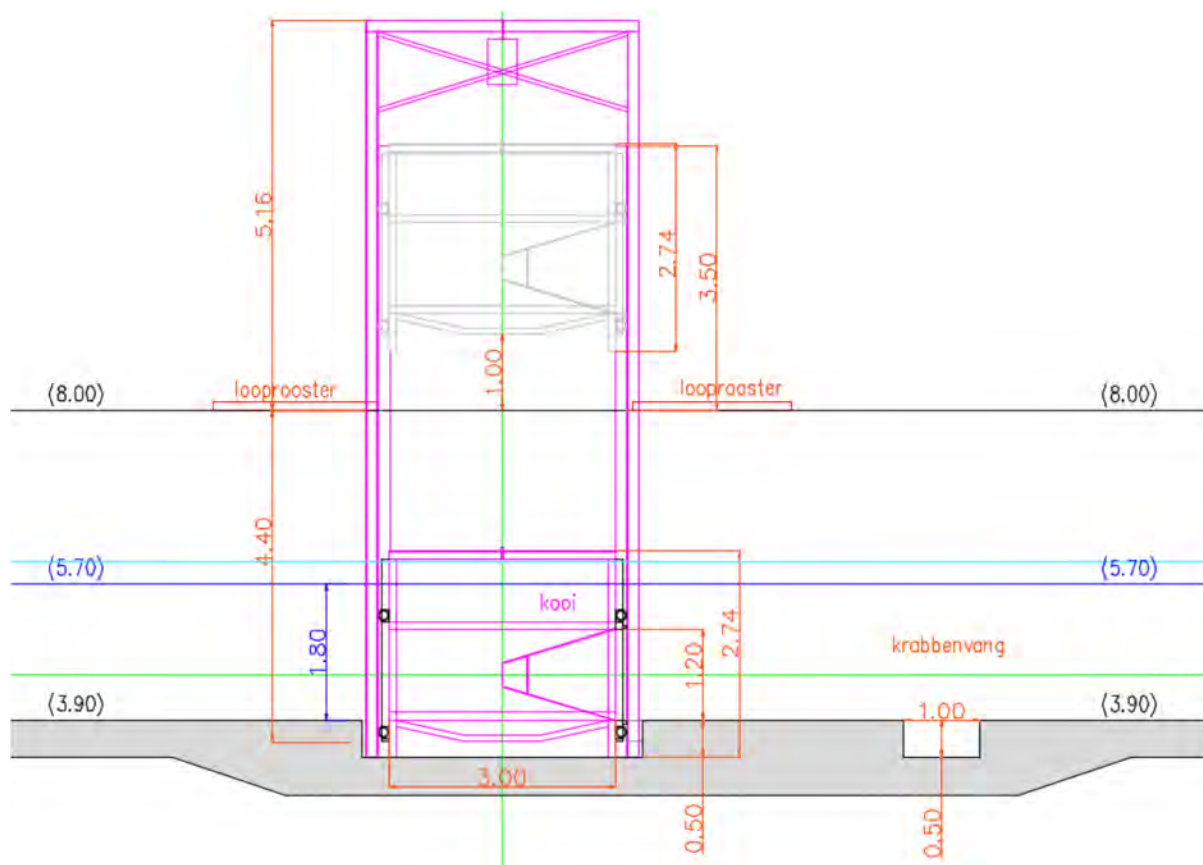
Bron: Ingenieurbüro Floecksmühle GmbH, in opdracht van Waterschap Limburg.

Figuur 105 – Schetsmatige weergave technisch ontwerp vangkooi te Roermond

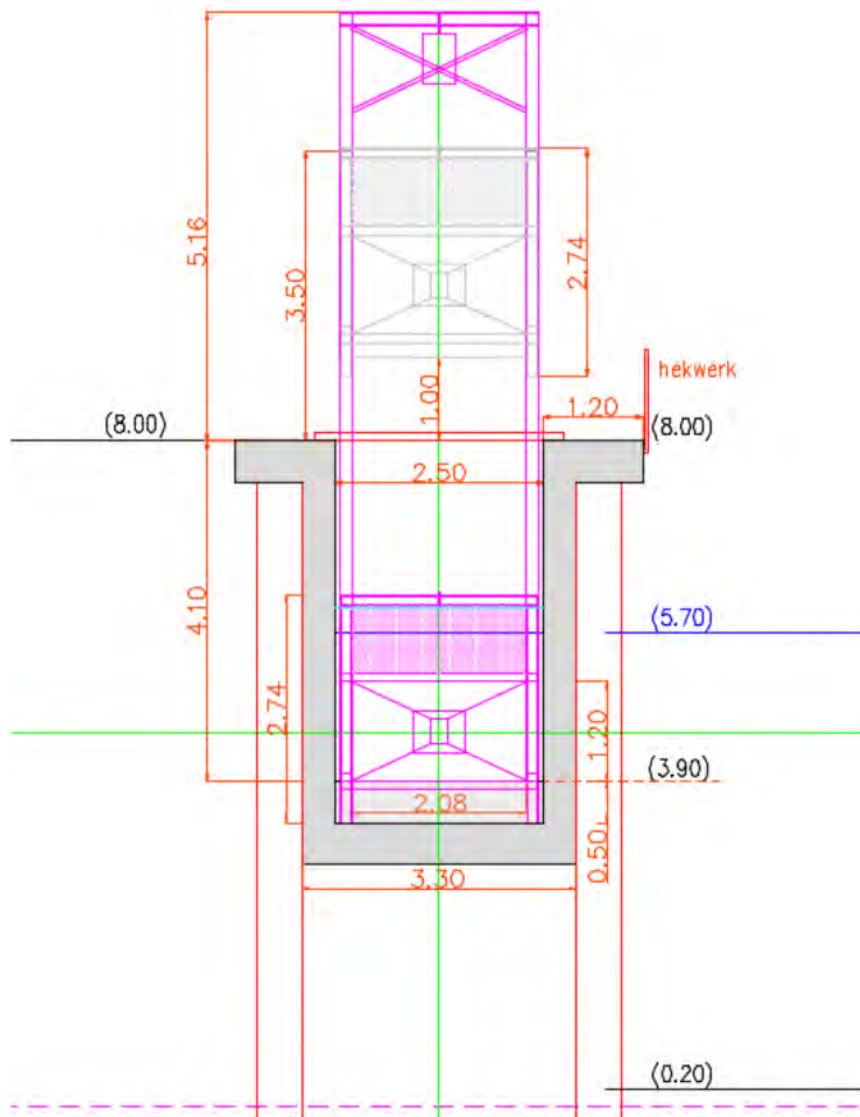
Type profielen



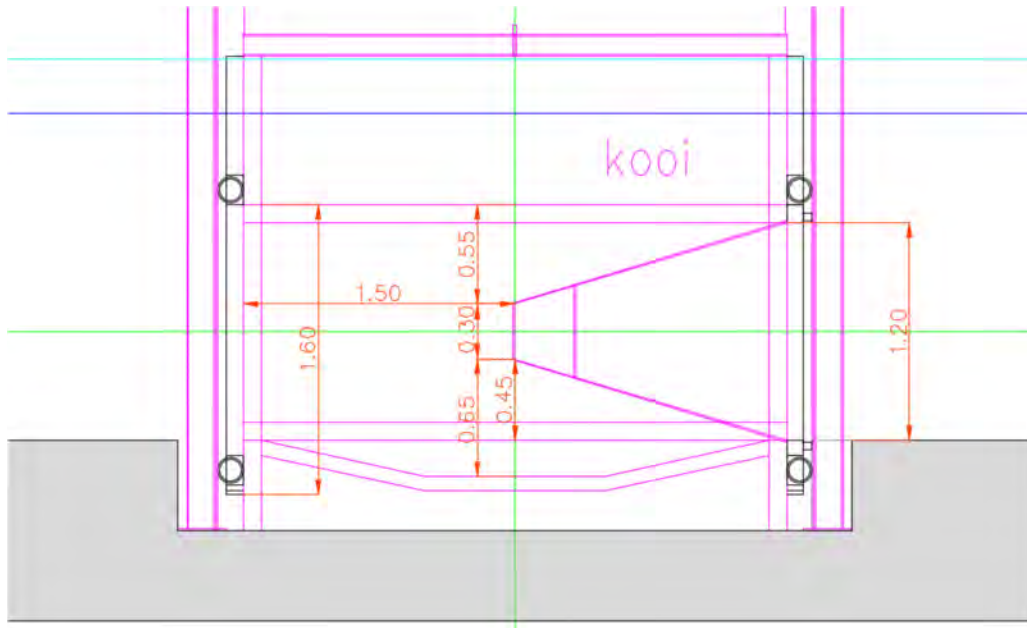
Figuur 106 – Bovenaanzicht schetsontwerp vangkooi



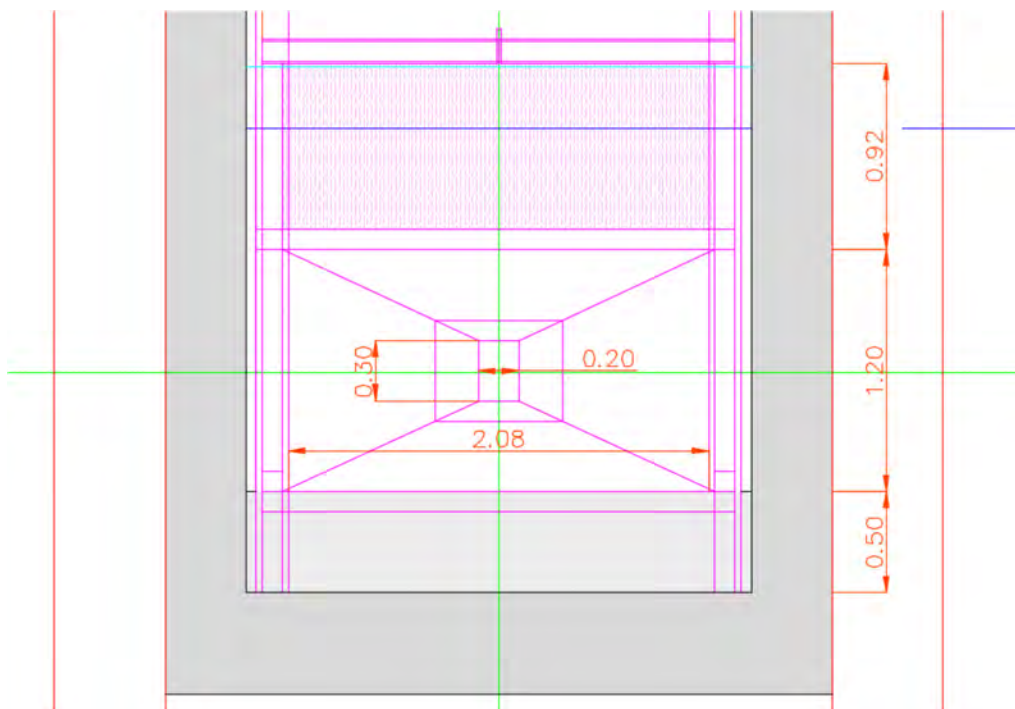
Figuur 107 – Lengtedoorsnede schetsontwerp vangkooi



Figuur 108 – Dwarsdoorsnede/ vooraanzicht schetsontwerp vangkooi



Figuur 109 – Zoom in lengtedoorsnede schetsontwerp vangkooi

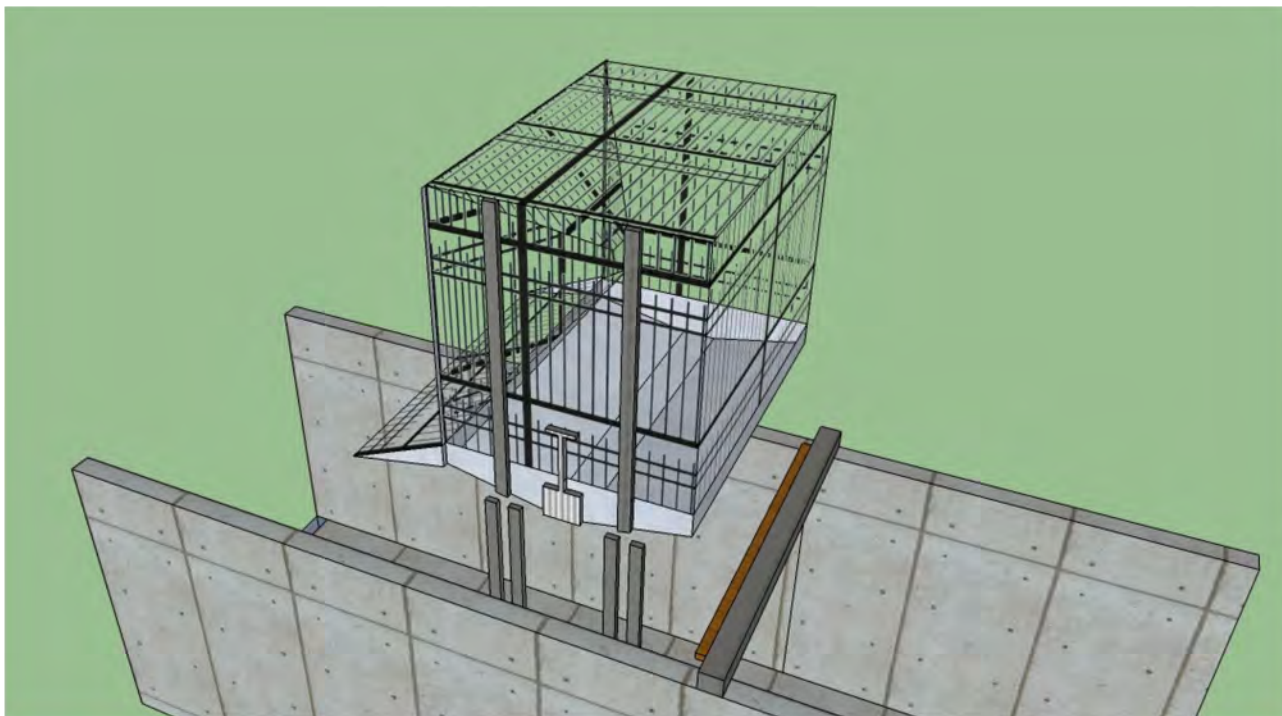


Figuur 110 – Zoom-in dwarsdoorsnede/ vooraanzicht schetsontwerp vangkooi

Aandachtspunten

Tijdens het uitwerken van het schetsontwerp werden de volgende aandachtspunten/vragen voor de verdere uitwerking van het (detail) ontwerp opgemerkt:

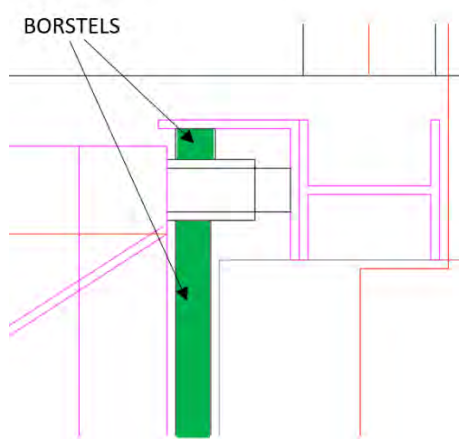
- Schatting hydraulische weerstand (bij verschillende spijlafstanden en spijlbreedtes) moet nog worden gedaan.
- Kooi eventueel modulair maken? Rooster elementen en keel worden best modulair gemaakt, zodat gewisseld kan worden met spijlafstand en/of spijlbreedte.
- Zijroosters kooi scharnierend uitvoeren, zodat kooi eenvoudig kan worden open gemaakt.
- Lesson learned van Roermond: punt van keel moet hoog genoeg boven bodem worden gekozen anders vinden vissen te gemakkelijk de weg terug uit de kooi via de keel.
- Hoe meest optimaal omgaan met (zweef)vuil last? De opwaartse kant van de kooi wordt Logischerwijze het meeste belast. Eventueel toepassing van 'zelfreinigende' borstels (zie Figuur 111) of 'gewoon' schoonspuiten opwaartse zijde met hoge druk spuit? Heeft ook relatie met volgend punt.
- Uitvoering roosters boven kooi? Nu toegepast om kooihoogte en daarmee framehoogte te beperken. Opwaarts om vuilast tegen te houden, en afwaarts om vissen tegen te houden. In Roermond bewegen deze roosters los van de kooi, maar daarvoor zijn dan wel extra hefmechanismes nodig. Misschien deze daarom best 'gewoon' op de kooi bevestigen net als roosters van de kooi zelf?
- Goede afsluiting en geleiding kan mogelijk gebeuren door (harde) borstels, zie Figuur 112.
- Meest optimale dimensies punt van keel moeten nog worden gekozen (relatie met modulair karakter). Eventueel zelfs flexibel verlengstuk zoals bij fuik op einde keel toepassen?
- De onderste bak wordt, net als te Roermond, best trapeziumvormig uitgevoerd met tevens een lichte helling in dwarsrichting naar de klep toe voor eenvoudig leeg te kunnen laten lopen in de opvangbak (lessons learned bij vangkooien in Wallonië en Frankrijk). Ook kunnen, net als in Roermond, gaatjes in de bovenzijde van de dichte bak worden voorzien, zodat deze iets kan leeglopen voordat de inhoud in de opvangbak wordt geloosd (dit om volume water en ook gewicht te beperken).
- Mogelijkheid voor plaatsing van looproosters aan op- en afwaartse zijde.
-



Figuur 111 – 3D-impressie vangkooi met illustratie opwaartse borstels voor vuilreiniging



Voorbeeld roosters



Schets mogelijke locatie borstels



Voorbeeld type borstels in palinggoot

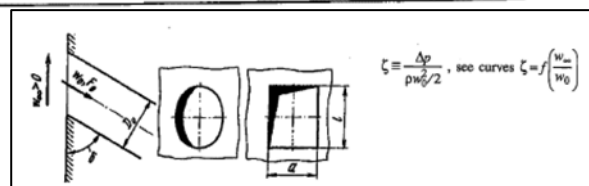
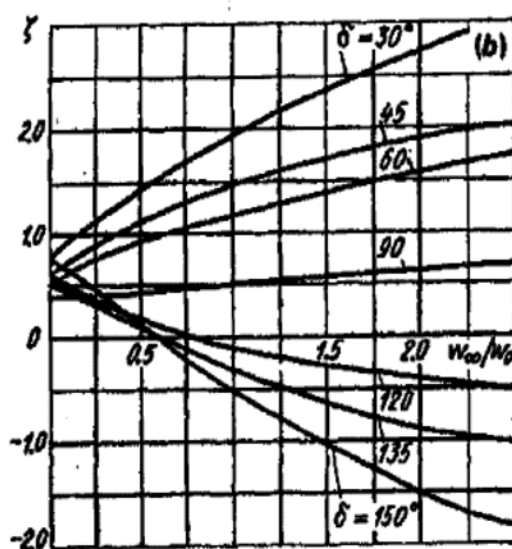
Figuur 112 – Mogelijke toepassing van (harde) borstels voor geleiding en goede afsluiting vangkooi

Bijlage 2 – Ladingsverliescoëfficiënten uit Idelchik (2007)

Diagram 3.3 – Intrede

Entrance into a tube mounted flush into a wall in the presence of a passing flow ($w_\infty > 0$); $Re = w_0 D_H / \nu \geq 10^4$

Diagram 3.3



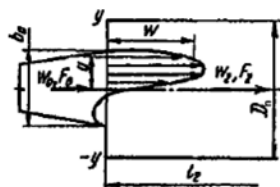
Values of ζ (rounded up to 10%) at $l/a = 0.2-0.5$ (see graph b)

δ , deg	$\frac{w_\infty}{w_0}$					
	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
30	0.80	1.30	1.85	2.20	2.50	2.75
45	0.67	1.10	1.43	1.65	1.83	2.0
60	0.58	0.92	1.25	1.45	1.60	1.75
90	0.45	0.45	0.60	0.67	0.75	0.85
120	0.53	0.15	-0.10	-0.30	-0.40	-0.50
150	0.80	0.13	-0.50	-1.00	-1.35	-1.70

Diagram 4.5 – Uittredeverlies na drijfvuilbalk

Sudden expansion downstream of a plane diffuser with $\alpha > 10^\circ$,
elbows, and so on, with asymmetrical velocity distribution;
 $Re = w_0 D_h / \nu > 3.5 \times 10^3$ ^{13,15}

Diagram 4.5

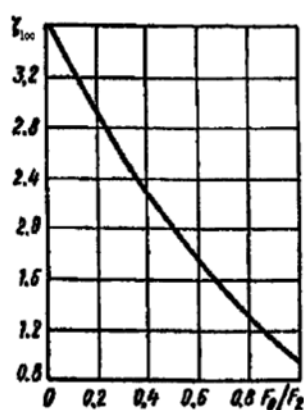


$$D_h = \frac{4F_0}{\Pi_0}; \quad D_{2h} = \frac{4F_2}{\Pi_2}; \quad n_{ar} = \frac{F_2}{F_0}; \quad \Pi \text{ is the perimeter}$$

$$\frac{w}{w_0} = 0.585 + 1.64 \sin \left(0.2 + 1.95 \frac{2y}{b_0} \right),$$

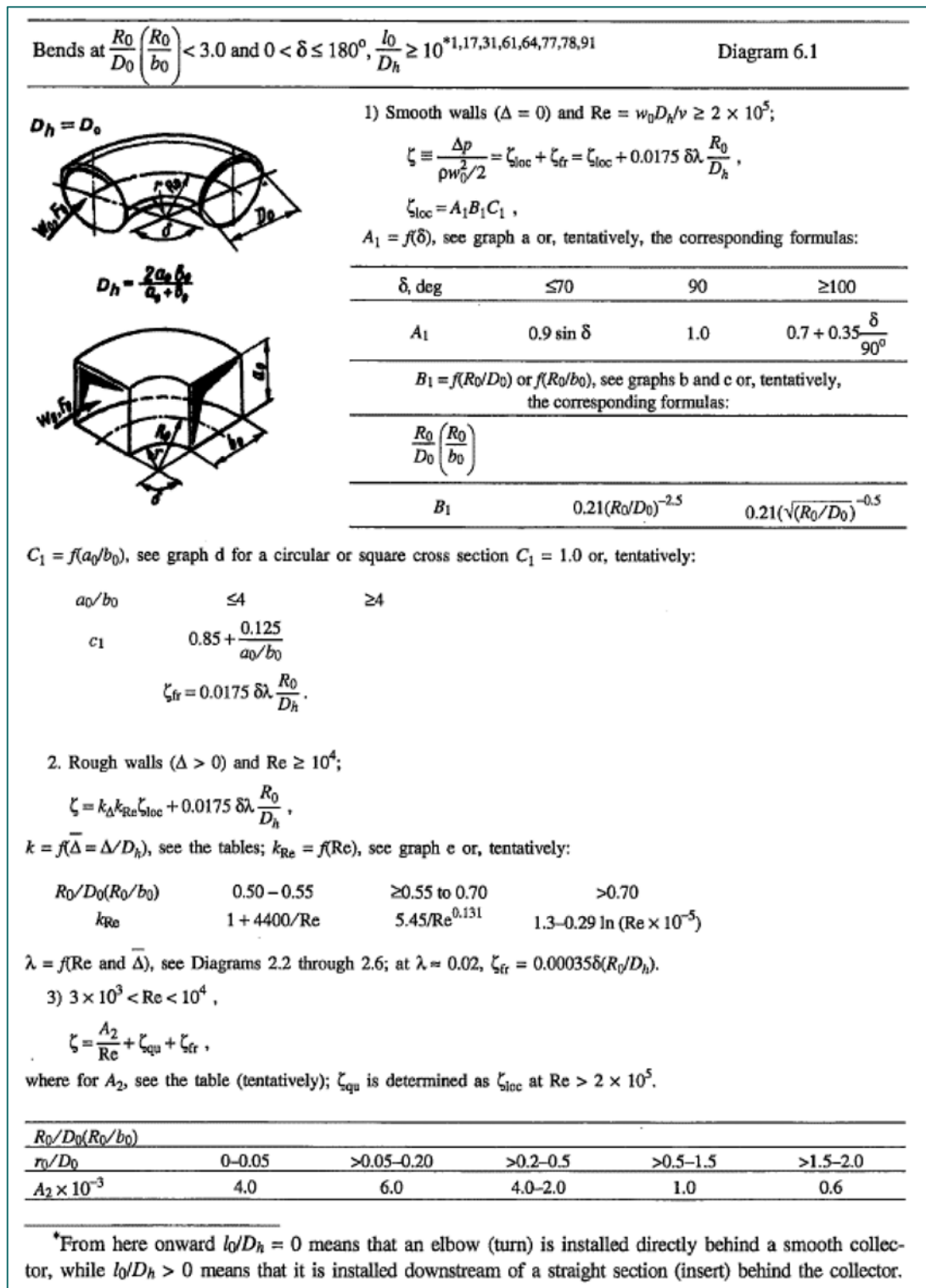
$$\zeta \equiv \frac{\Delta p}{\rho w_0^2 / 2} = \frac{1}{n_{ar}^2} + 3.7 - \frac{3.74}{n_{ar}} + \frac{\zeta_{fr}}{n_{ar}^2} = \zeta_{loc} + \frac{\zeta_{fr}}{n_{ar}^2},$$

where $\zeta_{loc} = f(F_0/F_2)$, see graph; $\zeta_{fr} = \lambda l_2 / D_{2h}$, for λ , see Chapter 2.



$\frac{F_0}{F_2} = 1/n_{ar}$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	1.0
ζ	3.70	3.34	2.99	2.66	2.36	2.09	1.82	1.58	1.35	0.96

Diagram 6.1 – Bocht



Flow with Changes of the Stream Direction

425

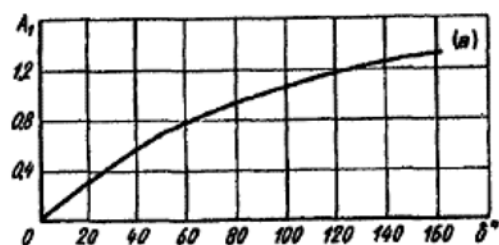
Bends at $\frac{R_0}{D_0} \left(\frac{R_0}{b_0} \right) < 3.0$ and $0 < \delta \leq 180^\circ$, $\frac{l_0}{D_h} \geq 10^{*1,17,31,61,64,77,78,91}$

Diagram 6.1

Values of k_Δ

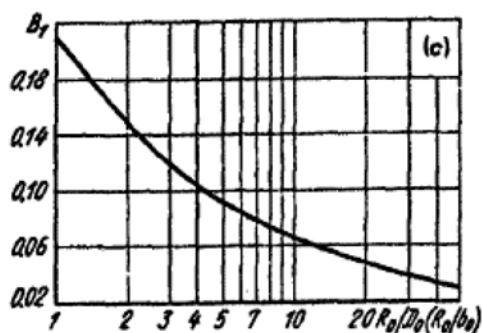
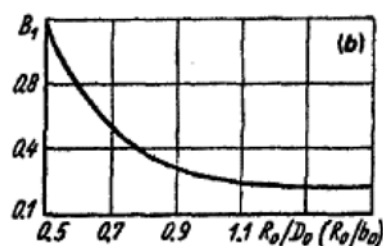
R_0/D_0 (R_0/b_0)	Re				
Δ	$3 \times 10^3 - 4 \times 10^4$	$> 4 \times 10^4$	$3 \times 10^3 - 4 \times 10^4$	$> 4 \times 10^4 - 2 \times 10^5$	$> 2 \times 10^5$
0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
0-0.001	1.0	$1 + 0.5 \times 10^3 \Delta$	1.0	$\lambda_\Delta / \lambda_{sm}$	$1 + \Delta \times 10^3$
>0.001	1.0	~1.5	1.0	~2.0	~2.0

where for λ_{sm} , see λ of commercially smooth tubes at the given Re in Diagrams 2.5 and 2.6; for λ_Δ , see λ of rough tubes ($\Delta > 0$) at the given Re and Δ in Diagrams 2.2 through 2.6.



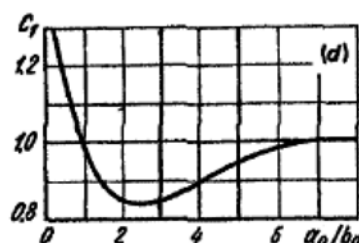
δ , deg	0	20	30	45	60	
A_1	0	0.31	0.45	0.60	0.78	
δ , deg	75	90	110	130	150	180
A_1	0.90	1.00	1.13	1.20	1.28	1.40

$R_0/D_0(R_0/b_0)$				
B_1	1.18	0.77	0.51	0.37
$R_0/D_0(R_0/b_0)$				
B_1	0.28	0.21	0.19	0.17



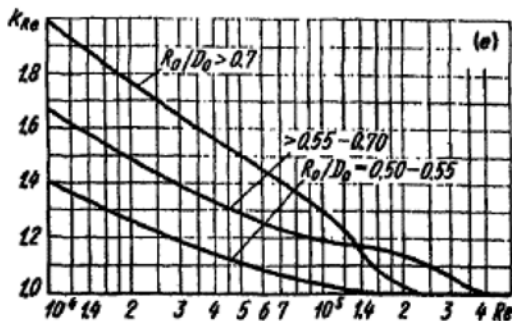
$R_0/D_0(R_0/b_0)$					
B_1	0.15	0.11	0.09	0.07	0.07
$R_0/D_0(R_0/b_0)$					
B_1	0.15	0.11	>40		

a_0/b_0	0.25	0.50	0.75	1.0	1.5	2.0
C_1	1.30	1.17	1.09	1.00	0.90	0.85
a_0/b_0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0
C_1	0.85	0.90	0.95	0.98	1.00	1.00



Bends at $\frac{R_0}{D_0} \left(\frac{R_0}{b_0} \right) < 3.0$ and $0 < \delta \leq 180^\circ$, $\frac{l_0}{D_h} \geq 10^{*1,17,31,61,64,77,78,91}$

Diagram 6.1

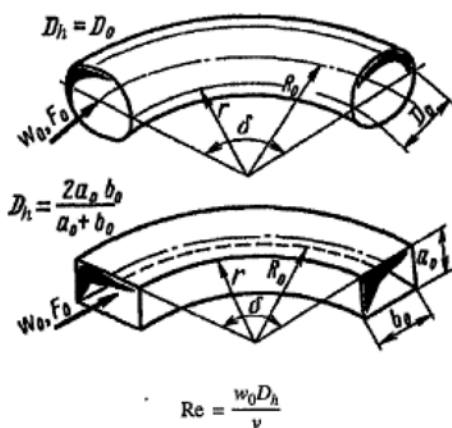
Values of k_{Re}

R_0/D_0 (R_0/b_0)	0.1	0.14	0.2	0.3	0.4	0.6
0.5-0.55	1.40	1.33	1.26	1.19	1.14	1.09
>0.55-0.70	1.67	1.58	1.49	1.40	1.34	1.26
>0.70	2.00	1.89	1.77	1.64	1.56	1.46

R_0/D_0 (R_0/b_0)	0.8	1.0	1.4	2.0	3.0	4.0
0.5-0.55	1.06	1.04	1.0	1.0	1.0	1.0
>0.55-0.70	1.21	1.19	1.17	1.14	1.06	1.0
>0.70	1.38	1.30	1.15	1.02	1.0	1.0

Tubes and channels (smooth), smoothly curved $\left(\frac{R_0}{D_0} \geq 3 \right)$ with any angle of the turn (coils), 3,4,12,24,28,51,79,84 $l_0/D_0 \geq 10$

Diagram 6.2



1. Circular cross section

$$\zeta = \frac{\Delta p}{\rho w_0^2 / 2} = 0.0175 \lambda_{el} \delta \frac{R_0}{D_h},$$

where $\lambda_{el} = f(Re, R_0/D_0)$, see curves, or for a circular cross section:

$$\text{at } 50 < Re \sqrt{\frac{D_0}{2R_0}} < 600 \quad \lambda_{el} = \frac{20}{Re^{0.65}} \left(\frac{D_0}{2R_0} \right)^{0.175},$$

$$\text{at } 600 < Re \sqrt{\frac{D_0}{2R_0}} < 1400 \quad \lambda_{el} = \frac{10.4}{Re^{0.55}} \left(\frac{D_0}{2R_0} \right)^{0.225},$$

$$\text{at } 1400 < Re \sqrt{\frac{D_0}{2R_0}} < 5000 \quad \lambda_{el} = \frac{5}{Re^{0.45}} \left(\frac{D_0}{2R_0} \right)^{0.275}.$$

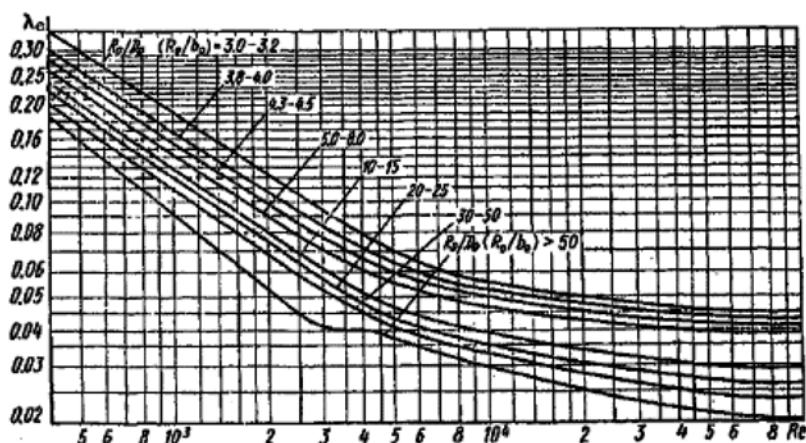


Diagram 6.18 – Opeenvolgende bochten in hetzelfde vlak

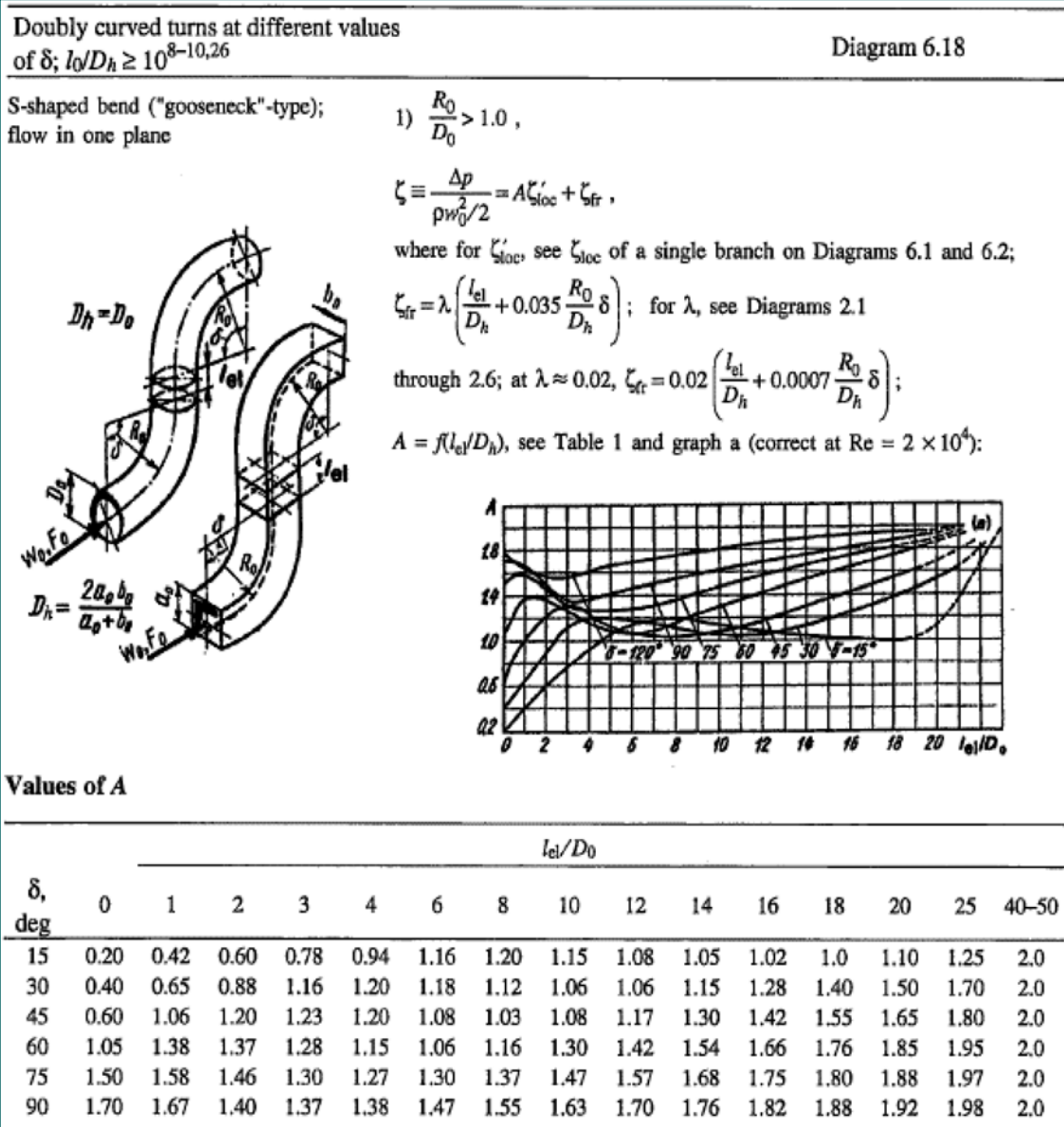
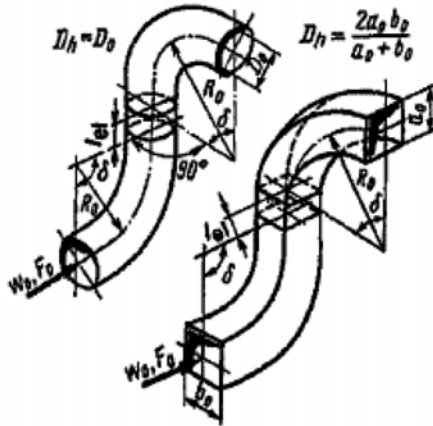


Diagram 6.19 – Opeenvolgende bochten in twee perpendiculaire vlakken

S-shaped joined bends; spatial (flow in two mutually perpendicular planes)^{8-10,26}

Diagram 6.19



1. $R_0/D_0 \geq 1.0$:

$$\zeta \equiv \frac{\Delta p}{\rho w_0^2/2} = A\zeta'_{\text{loc}} + \zeta_{\text{fr}},$$

where for ζ'_{loc} , see ζ_{loc} of a single bend on Diagrams 6.1 and 6.2; $\zeta_{\text{fr}} = \lambda(l_{\text{el}}/D_h + 0.035 \delta R_0/D_h)$; for λ , see Diagrams 2.1 through 2.6; at $\lambda = 0.02$, $\zeta = 0.02l_{\text{el}}/D_h + 0.0007 \delta R_0/D_h$; $A = f(l_{\text{el}}/D_h)$, from Table 1 and graph a (valid at $\text{Re} \geq 2 \times 10^4$).

2. $R_0/D_0 = 0.8$ (circular cross section):

$$\zeta = A\zeta_{\text{loc}} + \zeta_{\text{fr}},$$

where $\zeta_{\text{loc}} = f(\delta)$, see Table 2; $A = f(l_{\text{el}}/D_h)$, see Table 2 and graph b or

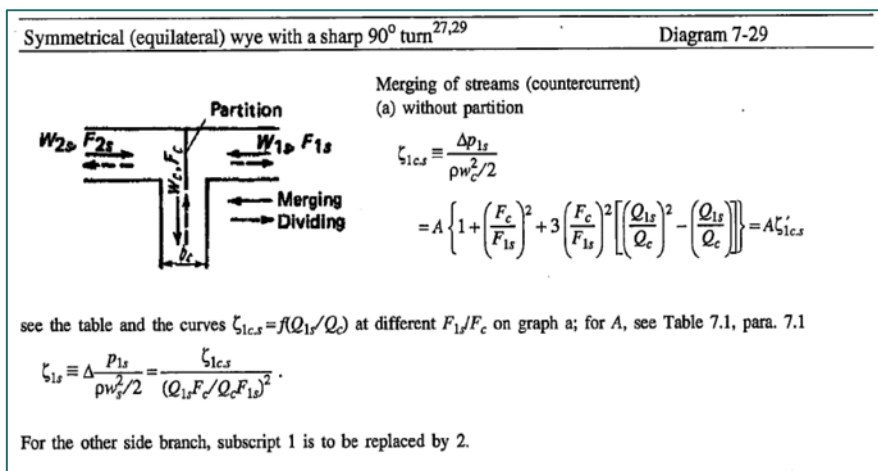
$$\zeta = 3.0\zeta_{\text{loc}}^{1.25} - 3.3 \left(\zeta_{\text{loc}}^{0.5} + 2D_0 l_{\text{el}} \right) \left(\lambda l_{\text{el}}/D_0 \right) \zeta_{\text{loc}}^2 + \zeta_{\text{fr}},$$

for ζ_{fr} , see para. 1.

1. Values of A

δ , deg	l_0/D_h												
	0	1	2	3	4	6	8	10	12	14	20	25	40
60	2.0	1.90	1.50	1.35	1.30	1.20	1.25	1.50	1.63	1.73	1.85	1.95	2.0
90	2.0	1.80	1.60	1.55	1.55	1.65	1.80	1.90	1.93	1.98	2.0	2.0	2.0

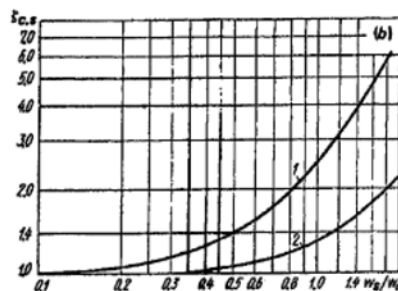
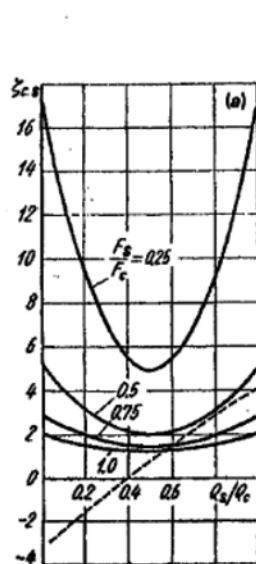
Diagram 7.29 – Splitting



Symmetrical (equilateral) wye with a sharp 90° turn^{27,29} Diagram 7.29

Values of $\zeta'_{1c,s}$ and $\zeta_{1c,s}$

$\frac{F_{1s}}{F_c}$	$\frac{Q_{1s}}{Q_c}$										
	0	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.0
Without partition ($\zeta'_{1c,s}$)											
0.25	17.0	12.7	9.30	6.92	5.48	5.00	5.48	6.92	9.32	12.7	17.0
0.50	5.02	3.94	3.10	2.50	2.14	2.00	2.14	2.50	3.10	3.94	5.00
0.75	2.78	2.30	1.92	1.66	1.50	1.57	1.56	1.66	1.92	2.30	2.78
1.0	2.00	1.73	1.52	1.37	1.28	1.25	1.28	1.37	1.52	1.73	2.00
With partition ($\zeta_{1c,s}$)											
1.0	-3.25	-2.40	-1.51	-0.80	0	0.75	1.45	2.15	2.85	3.50	4.15

Values of $\zeta_{c,s}$

Type of wye	w_s/w_c														
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.4	1.6	2.0	
Standard made of iron (curve 1)	1.02	1.06	1.14	1.24	1.38	1.54	1.74	1.96	2.22	2.50	3.16	3.94	4.84	7.0	
Welded (curve 2)	1.0	1.01	1.03	1.05	1.08	1.11	1.15	1.19	1.24	1.30	1.43	1.59	1.77	2.2	

DEPARTEMENT **MOBILITEIT & OPENBARE WERKEN**
Waterbouwkundig Laboratorium

Berchemlei 115, 2140 Antwerpen

T +32 (0)3 224 60 35

F +32 (0)3 224 60 36

waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be

www.waterbouwkundiglaboratorium.be