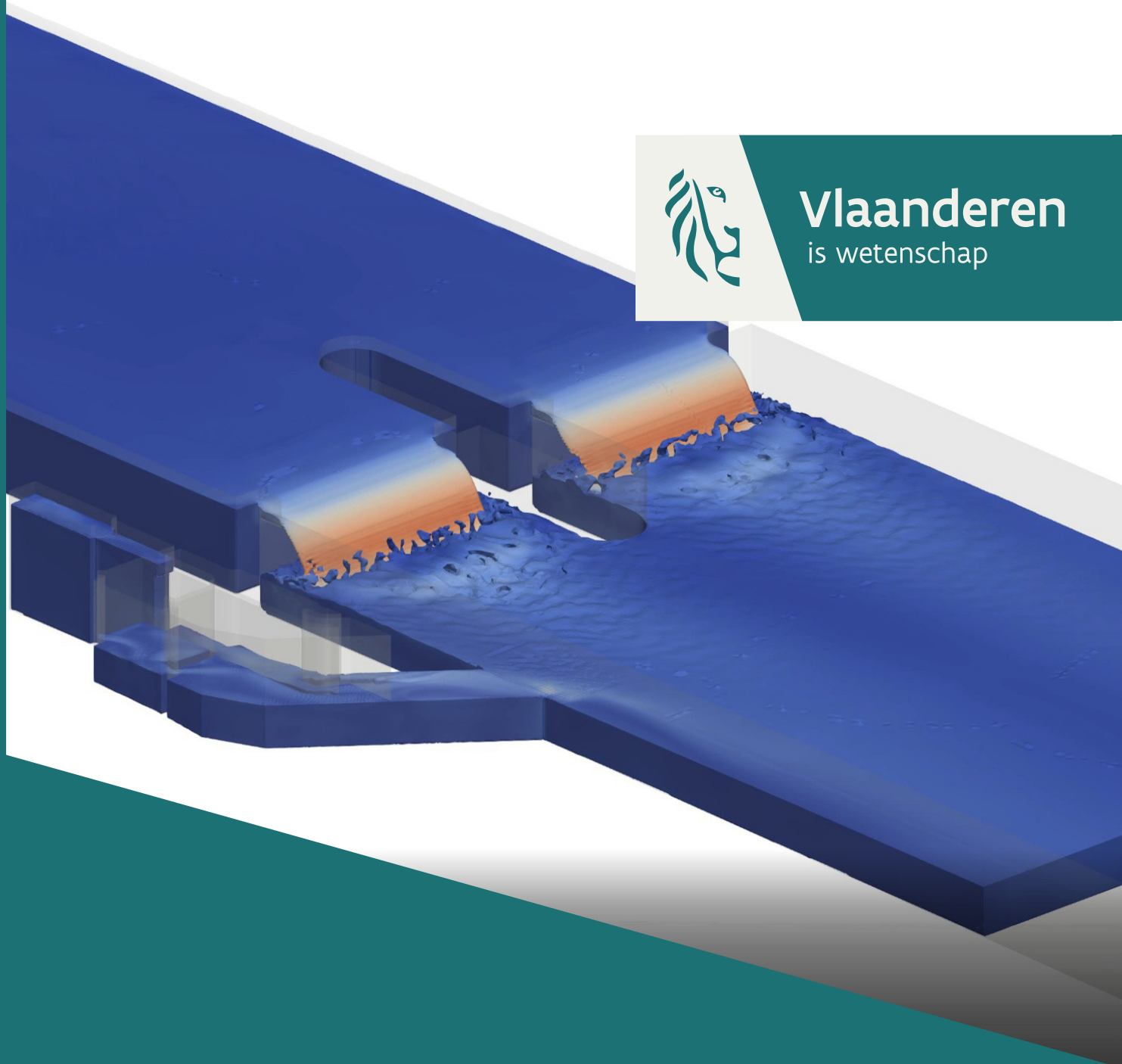




Vlaanderen
is wetenschap



19_126_1
WL rapporten

Ontwerp vispassage Sint-Baafs-Vijve

CFD-modellering monding

DEPARTEMENT
MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

Ontwerp vispassage Sint-Baafs-Vijve

CFD-modellering monding

Verelst, K.; Castaño Lopez, S.; Van Hoydonck, W.; Visser, K.P.; Mostaert, F.

Juridische kennisgeving

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

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

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

Copyright en wijze van citeren

© Vlaamse overheid, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Waterbouwkundig Laboratorium 2021
D/2021/3241/020

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Verelst, K.; Castaño Lopez, S.; Van Hoydonck, W.; Visser, K.P.; Mostaert, F. (2021). Ontwerp vispassage Sint-Baafs-Vijve CFD-modellering monding. Versie 4.0. WL Rapporten, 19_126_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

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

Documentidentificatie

Opdrachtgever:	De Vlaamse Waterweg Regio West	Ref.:	WL2021R19_126_1
Keywords (3-5):	Fish passage, weir channel, confluence, CFD modelling		
Kennisdomeinen	Waterbouwkundige constructies > Vispassages > Monding en lokstroom > Numerieke modelleringen		
Tekst (p.):	47	Bijlagen (p.):	/
Vertrouwelijk:	☒ Nee	☒ Online beschikbaar	

Auteur(s):	Verelst, K.; Castaño Lopez, S.
------------	--------------------------------

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Visser, K.P.	Getekend door:Klaas Visser (Signature) Getekend op:2021-02-02 15:08:42 +01:00 Reden:Ik keur dit document goed
	Van Hoydonck, W.	Getekend door:Wim Van Hoydonck (Sign) Getekend op:2021-02-02 08:41:58 +01:00 Reden:Ik keur dit document goed
Projectleider:	Verelst, K.	Getekend door:Kristof Verelst (Signature) Getekend op:2021-02-01 17:14:47 +01:00 Reden:Ik keur dit document goed

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Mostaert, F.	Getekend door:Frank Mostaert (Signature) Getekend op:2021-02-01 16:52:35 +01:00 Reden:Ik keur dit document goed
-----------------	--------------	---



Abstract

Bij de vernieuwing van het stuwsluiscomplex te Sint-Baafs-Vijve door de Vlaamse Waterweg nv wordt ook een oplossing voorzien voor het vismigratieknelpunt dat het huidige stuwsluiscomplex vormt. In de kleinere (klasse I) sluis naast de stuw wordt een vertical slot vispassage voorzien met 24 sloten/bekkens. De monding van de vispassage in de afwaartse stuwgeul bestaat uit een schuine koker door de bestaande sluismuur juist onder de waterlijn. Om een voldoende sterke lokstroom in het afwaarts pand te kunnen realiseren wordt een toegevoegd debiet voorzien via een kanaal parallel met de vispassage. Ter plaatse van de samenvloeiing van de stroming uit het kanaal voor het toegevoegd debiet en de stroming uit de vispassage worden twee geleidingswanden voorzien om de vorming van complexe stromingspatronen tegen te gaan. In deze studie is het stromingspatroon ter plaatse van de samenvloeiing van de stroming uit de vispassage met de stroming uit het kanaal voor het toegevoegd debiet en tevens de stroming door de koker van de monding van de vispassage in de afwaartse stuwgeul bepaald aan de hand van modellering met 3D Computational Fluid Dynamics (CFD). Hiervoor zijn 4 CFD-simulaties uitgevoerd. Deze simulaties zijn beoordeeld met betrekking tot de locatie van de monding van de vispassage in de afwaartse stuwgeul, de lengte van de woelkom afwaarts van de hefschuif in het kanaal voor het toegevoegd debiet en de stroming ten gevolge van de geleidingswanden in het kanaal voor het toegevoegd debiet.

Op basis van de uitgevoerde CFD-simulaties dienen aan de locatie van de monding van de vispassage in de stuwgeul geen wijzigingen te worden aangebracht, aangezien deze zich zowel bij hoge debieten bij onderstroming als bij lagere debieten bij overstorting afwaarts van de migratielimietlijn bevindt. De watersprong afwaarts van de hefschuif in het kanaal voor het toegevoegd debiet strekt zich bij alle simulaties uit tot tegen de middelste geleidingsmuur in het kanaal voor het toegevoegd debiet, dewelke zorgt voor de verdere energiedissipatie. De woelkom, noch de einddrempel van de woelkom zorgen daarmee voor voldoende energiedissipatie. De einddrempel blijft constructief wel nodig om het hoogteverschil tussen het bodempeil ter plaatse van de hefschuif en het bodempeil ter plaatse van de koker onder de muur van de kleine sluis te overbruggen.

Aanvankelijk was een opening voorzien in de geleidingswand tussen de vispassage en het kanaal voor het toegevoegd debiet om vissen die in het kanaal terecht zouden komen ter hoogte van het einde van de woelkom een ontsnappingsmogelijkheid naar de vispassage te geven. De onvoldoende energiedissipatie in de woelkom zorgt ervoor dat deze opening niet bereikt kan worden. De opening heeft ook een negatief effect op de lokstroom uit de vispassage aangezien een groot deel van het debiet van de vispassage door deze opening wordt weggezogen naar het kanaal van het toegevoegd debiet. Om die reden is deze opening in de geleidingswand niet behouden.

Bij debieten door het kanaal voor het toegevoegd debiet die, met een grootte van circa 2 tot 4 m³/s, beduidend groter zijn dan het debiet door de vispassage (1.0 m³/s), ontstaat afwaarts van de geleidingswanden in de koker door de sluismuur van de kleine sluis aan de rechterzijde een neer met een lengte ongeveer gelijk aan de lengte van de koker. Eigenlijk zou deze neer vermeden moeten worden, maar omwille van ruimtelijke en bouwkundig randvoorwaarden kan dit enkel door aanpassing van de verhouding tussen toegevoegd debiet en het vispassagedebiet. Dit geeft dan weer aanleiding tot een lager lokstroomdebiet, wat ook niet wenselijk is. Verwacht wordt echter dat de vispassage toch voldoende bereikbaar blijft vanwege de zeer lage stroomsnelheden in deze neer en de passeerbare snelheden in het linker deel van de koker. Bij lage toegevoegde debieten (1 m³/s) ontstaan in deze koker twee door een neer gescheiden stromen naast elkaar, die ervoor zorgen dat vissen het kanaal voor het toegevoegd debiet in kunnen zwemmen. Bijgevolg wordt aanbevolen om zo ver mogelijk afwaarts in beide delen van het kanaal voor toegevoegd debiet roosters te plaatsen.

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	V
Lijst van de tabellen.....	VI
Lijst van de figuren	VII
1 Inleiding	1
2 Voorontwerp vispassage en kanaal toegevoegd debiet	3
3 Randvoorwaarden en uitgangspunten uitgevoerde CFD-simulaties.....	6
4 Simulatie S1	12
4.1 3D CAD-model	12
4.2 Resultaten CFD-simulatie	16
5 Simulatie S2	21
5.1 3D CAD-model	21
5.2 Resultaten CFD-simulatie	24
6 Simulatie S3	29
6.1 3D CAD-model	29
6.2 Resultaten CFD-simulatie	32
7 Simulatie S4	37
7.1 3D CAD-model	37
7.2 Resultaten CFD-simulatie	40
8 Conclusies	44
9 Referenties	47

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Beschrijving uitgevoerde simulaties	6
Tabel 2 – Overzicht randvoorwaarden simulaties S1, S2, S3 en S4.....	11
Tabel 3 – Beschrijving uitgevoerde simulaties	44

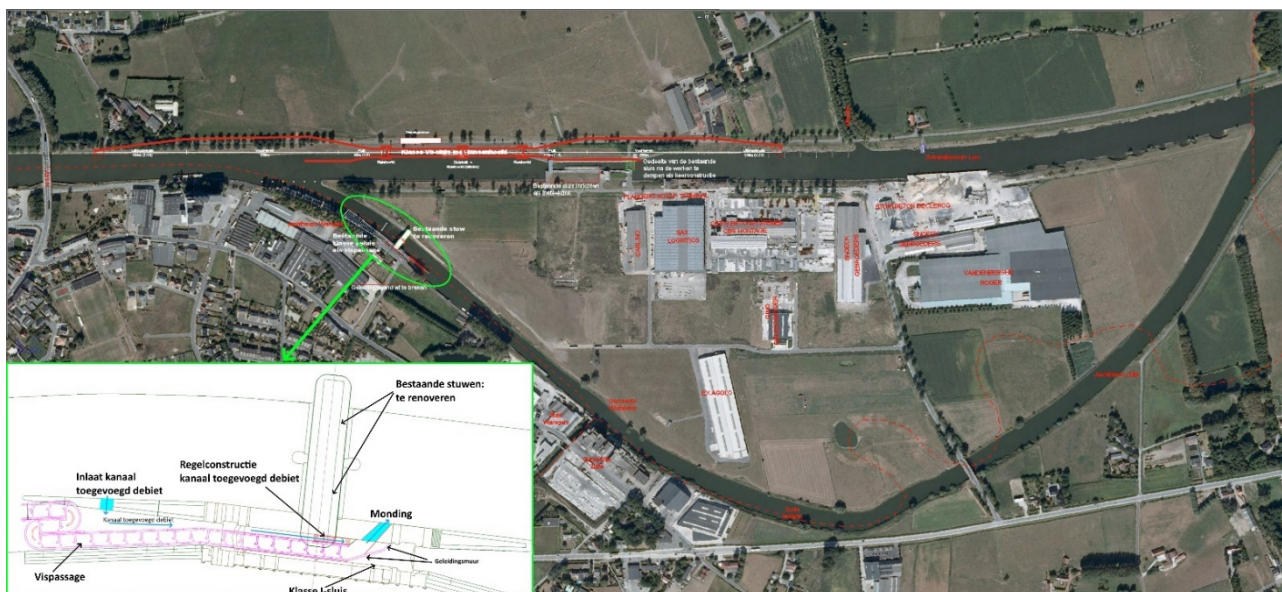
Lijst van de figuren

Figuur 1 – Overzicht van de werken op de Leie te Sint-Baafs-Vijve	1
Figuur 2 – Voorontwerp vispassage Sint-Baafs-Vijve	4
Figuur 3 – Afmetingen bekkens en sloten vispassage	5
Figuur 4 – Dwarsdoorsnede kanaal toegevoegd debiet.....	5
Figuur 5 – Modeldomein simulaties	7
Figuur 6 – Bodem in de afwaartse stuwgeul	8
Figuur 7 – Locatie randvoorwaarden CFD-simulaties.....	8
Figuur 8 – Contractiecoëfficiënt bij stroming onder een hefschuif.....	10
Figuur 9 – Ligging verticale (boven) en horizontale (onder) vlakken voor visualisatie resultaten CFD-simulatie	11
Figuur 10 – Hefstuwen met kleppen te Sint-Baafs-Vijve.....	12
Figuur 11 – Aanzicht 3D CAD-model voor simulatie S1.....	14
Figuur 12 – Bovenaanzicht 3D CAD-model voor simulatie S1	15
Figuur 13 – Doorsnede 3D CAD-model voor simulatie S1	15
Figuur 14 – Optredende debieten op maatgevende locaties voor simulatie S1.....	16
Figuur 15 – Stromingspatroon in horizontale vlakken voor simulatie S1.....	17
Figuur 16 – Stromingspatroon in verticale vlakken in de afwaartse stuwgeul voor simulatie S1.....	19
Figuur 17 - Stromingspatroon in verticaal vlak in het midden van kanaal toegevoegd debiet voor simulatie S1	19
Figuur 18 – Aanzicht 3D CAD-model voor simulatie S2.....	22
Figuur 19 – Bovenaanzicht 3D CAD-model voor simulatie S2	23
Figuur 20 – Doorsnedes 3D CAD-model voor simulatie S2	23
Figuur 21 – Optredende debieten op maatgevende locaties voor simulatie S2.....	24
Figuur 22 – Stromingspatroon in horizontale vlakken voor simulatie S2.....	25
Figuur 23 – Stromingspatroon in verticale vlakken in de afwaartse stuwgeul voor simulatie S2.....	26
Figuur 24 – Stromingspatroon in verticaal vlak in het midden van kanaal toegevoegd debiet voor simulatie S2	27
Figuur 25 – Aanzicht 3D CAD-model voor simulatie S3.....	30
Figuur 26 – Bovenaanzicht 3D CAD-model voor simulatie S3	31
Figuur 27 – Doorsnedes 3D CAD-model voor simulatie S3	31
Figuur 28 – Optredende debieten op maatgevende locaties voor simulatie S3.....	32
Figuur 29 – Stromingspatroon in horizontaal vlakken voor simulatie S3.....	33
Figuur 30 – Stromingspatroon in verticale vlakken in de afwaartse stuwgeul voor simulatie S3.....	34

Figuur 31 – Stromingspatroon in verticaal vlak in het midden van kanaal toegevoegd debiet voor simulatie S3	35
Figuur 32 – Aanzicht 3D CAD-model voor simulatie S4.....	38
Figuur 33 – Bovenaanzicht 3D CAD-model voor simulatie S4	39
Figuur 34 – Doorsnedes 3D CAD-model voor simulatie S4	39
Figuur 35 – Optredende debieten op maatgevende locaties voor simulatie S4.....	40
Figuur 36 – Stromingspatroon in horizontaal vlakken voor simulatie S4.....	41
Figuur 37 – Stromingspatroon in verticale vlakken in de afwaartse stuwgeul voor simulatie S4.....	42
Figuur 38 – Stromingspatroon in verticaal vlak in het midden van kanaal toegevoegd debiet voor simulatie S4	43

1 Inleiding

In het kader van het Seine-Schelde project wordt de Leie uitgebouwd tot een Europese hoofdvaarweg voor schepen CEMT-klasse Vb. Hierbij wordt door de Vlaamse Waterweg nv te Sint-Baafs-Vijve een nieuwe sluis CEMT-klasse Vb gebouwd. Met de vernieuwing van de sluis wordt ook een oplossing voorzien voor het vismigratieknelpunt dat het huidige stuwsluiscomplex vormt. Figuur 1 toont een overzicht van de geplande werken. De bestaande stuwen op de Oude Leiearm blijven hierbij behouden maar worden wel gerenoveerd. Hierdoor zal de hoofdstroom via deze arm blijven lopen. Naast de stuwen bevindt zich een kleinere (klasse I) sluis die niet meer operationeel is. In de project-MER werd vastgelegd dat de vispassage wordt voorzien ter plaatse van deze niet meer operationele sluis.



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

Het voorontwerp van de vispassage bestaat uit een vertical slot vispassage met 24 sloten/bekkens. De monding van deze vispassage in de afwaartse stuwgeul bestaat uit een schuine koker door de bestaande sluismuur juist onder de waterlijn. Om een voldoende sterke lokstroom in het afwaarts pand te kunnen realiseren wordt een toegevoegd debiet voorzien via een parallel kanaal met breedte 1.6 m, gelegen tussen de vispassage en de sluiswand van de bestaande kleine sluis. Om de grootte van het toegevoegd debiet te kunnen regelen is in dit kanaal aan afwaartse zijde een regelconstructie aanwezig in de vorm van een hefschuif. Ter plaatse van de samenvloeiing van de stroming uit het kanaal voor het toegevoegd debiet en de stroming uit de vispassage worden twee geleidingswanden voorzien om de vorming van complexe stromingspatronen tegen te gaan. De geleidingsmuur op het einde van de vispassage leidt het volledige lokstroomdebiet, i.e. de som van het debiet door de vispassage en het toegevoegd debiet, naar de monding van de vispassage in de afwaartse stuwgeul.

Het hydraulisch ontwerp van de vispassage is door het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) uitgevoerd aan de hand van literatuurformules en expert judgement binnen project 15_036 (Visser *et al.*, 2020). Het complexe stromingspatroon ter plaatse van de samenvoeging van de stroming uit de vispassage met de stroming uit het kanaal voor het toegevoegd debiet en vervolgens de stroming door de opening van de monding van de vispassage in de afwaartse stuwgeul kunnen met deze onderzoeksmethodes niet met voldoende zekerheid bepaald worden. Om die reden heeft de Vlaamse Waterweg nv regio West (contactpersoon: Charlotte Beels) aan WL gevraagd om dit stromingspatroon en het meest optimale ontwerp

van de monding nauwkeuriger te bepalen aan de hand van modellering met 3D Computational Fluid Dynamics (CFD). De 3D CFD-modellering heeft tot doel het volgende te beoordelen:

- De interactie tussen de stroming uit de vispassage en de stroming uit het kanaal van het toegevoegd debiet, in het bijzonder de effectiviteit en vormgeving van de geleidingwanden ter plaatse van de samenvoeging van deze beide stromingen. Hierbij wordt het volgende gecontroleerd:
 - Voorkomen van nadelige neren (ten gevolge van loslatingseffecten) die de toegang tot de vispassage kunnen blokkeren;
 - Over de volledige lengte van de monding tot aan het meest afwaartse slot is een voldoende brede zone aanwezig waar stroomsnelheden laag genoeg zijn ($< 1.5 \text{ m/s}$ = kruissnelheid doelsoorten) en de stroming zo rechtlijnig mogelijk verloopt;
 - In het kanaal van het toegevoegd debiet zijn stroomsnelheden idealiter hoger dan 1.5 m/s zodat vissen dit kanaal niet inzwemmen.
- De interactie tussen de lokstroom uit de mondingsopening van de vispassage met de stroming over de stuwen, in het bijzonder de afstand van deze opening tot de as van de stuwen. Hierbij wordt het volgende gecontroleerd:
 - De monding mag onder maatgevende omstandigheden (lees: debieten kleiner dan de Q10% op de rivier) niet volledig in de zone van de watersprong liggen, maar liefst wel zo dicht mogelijk afwaarts daarvan en/of deels net daarin;
 - Er is een lokstroom waar te nemen die zo ver mogelijk in de stuwgeul reikt, zonder dat stroomsnelheden hoger worden dan 1.5 m/s (i.e. de kruissnelheid van de doelsoorten van de vispassage).

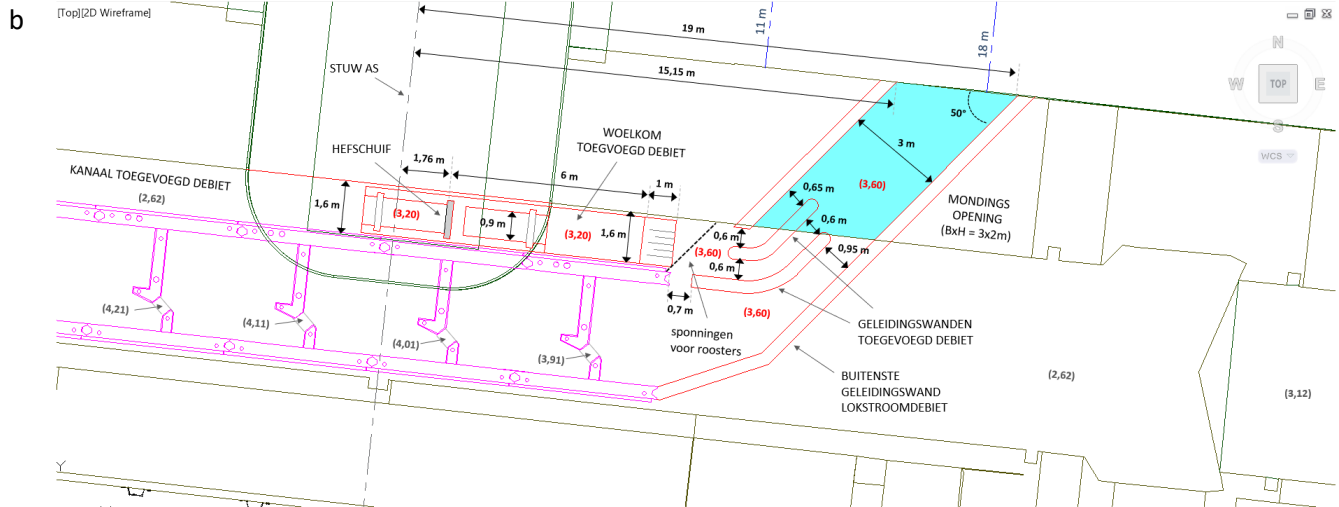
Hoofdstuk 2 van dit rapport beschrijft het voorontwerp van de vispassage en het kanaal voor het toegevoegd debiet. Alle CFD-simulaties in deze studie, zijn uitgevoerd met OpenFOAM versie 6.0. Hoofdstuk 3 beschrijft de hydraulische randvoorwaarden en uitgangspunten die voor het uitvoeren van de simulaties zijn toegepast. Het beschouwde 3D CAD-model en de resultaten van de verschillende uitgevoerde simulaties worden besproken in hoofdstuk 4 tot en met hoofdstuk 7. Hoofdstuk 8 vat de conclusies van dit rapport samen.

De uitvoering van de CFD-simulaties is door WL uitbesteed aan IMDC NV. De resultaten van de uitgevoerde CFD-simulaties zijn beschreven in Badano *et al.*, (2021).

2 Voorontwerp vispassage en kanaal toegevoegd debiet

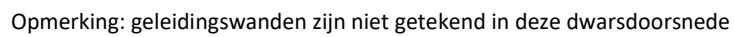
Het voorontwerp van de vispassage bestaat uit een vertical slot vispassage met 24 sloten/bekken. In Figuur 2 is de vispassage in paars afgebeeld. Het totaal verval bij streefpeil in het opwaarts en afwaarts pand bedraagt 2.39 m, wat overeenkomt met een verval per slot van ca. 0.10 m ($dh = 2.39 \text{ m}/24 = 0.0996 \text{ m}$). De bekken van de vispassage hebben een lengte van 4.50 m en een breedte van 3.20 m. De sloten van de vispassage hebben een breedte van 0.50 m. Figuur 3 geeft details van één bekken van de vispassage met aanduiding van de afmetingen. De monding van de vispassage in de afwaartse stuwgeul bestaat uit een schuine koker door de bestaande sluismuur juist onder de waterlijn. Deze koker heeft een breedte van 3.0 m en een hoogte van 2.0 m, en maakt een hoek van circa 50° met de sluismuur. De kruising tussen de afwaartse zijwand van de koker met de rechteroever van de stuwgeul bevindt zich op ca. 19.0 m afwaarts van de as van de stuwen.

Om een voldoende sterke lokstroom in het afwaarts pand te kunnen realiseren, wordt een toegevoegd debiet voorzien. Dit toegevoegd debiet wordt gerealiseerd in een parallel kanaal met breedte 1.6 m, gelegen tussen de vispassage en de sluiswand van de bestaande kleine sluis. In Figuur 4 is een dwarsdoorsnede gegeven door het kanaal voor het toegevoegd debiet. Om de grootte van het toegevoegd debiet te kunnen regelen is in dit kanaal aan afwaartse zijde een regelconstructie aanwezig in de vorm van een hefschuif. Ter plaatse van de hefschuif is het kanaal 0.90 m breed en de opening onder de hefschuif heeft een maximale hoogte van 1.1 m. Afwaarts van de hefschuif is in dit kanaal een woelkom met lengte 7.0 m en een einddrempel met hoogte van 0.40 m aanwezig voor de dissipatie van de energie afwaarts van de hefschuif. Ter plaatse van de samenvloeiing van de stroming uit het kanaal voor het toegevoegd debiet en de stroming uit de vispassage zijn twee geleidingswanden (met breedte 0.40 m) voorzien om de vorming van complexe stromingspatronen tegen te gaan. Afwaarts van de drempel van de woelkom zijn sponningen voorzien voor het plaatsen van een (fijnmazig) rooster. Dit rooster leidt vissen die in het kanaal voor het toegevoegd debiet terechtgekomen zijn af naar de vispassage via een opening van 0.7 m in de geleidingsmuur tussen vispassage en kanaal voor toegevoegd debiet. De geleidingsmuur op het einde van de vispassage leidt het volledige lokstroomdebiet, i.e. de som van het debiet door de vispassage en het toegevoegd debiet, naar de monding van de vispassage in de afwaartse stuwgeul.



a: planzicht; b: detail ter plaatse van samenvloeiing stroming uit vispassage en stroming uit kanaal toegevoegd debiet
bodempelen (in mTAW) zijn tussen haakjes aangeduid

Figuur 2 – Voorontwerp vispassage Sint-Baafs-Vijve



3 Randvoorwaarden en uitgangspunten uitgevoerde CFD-simulaties

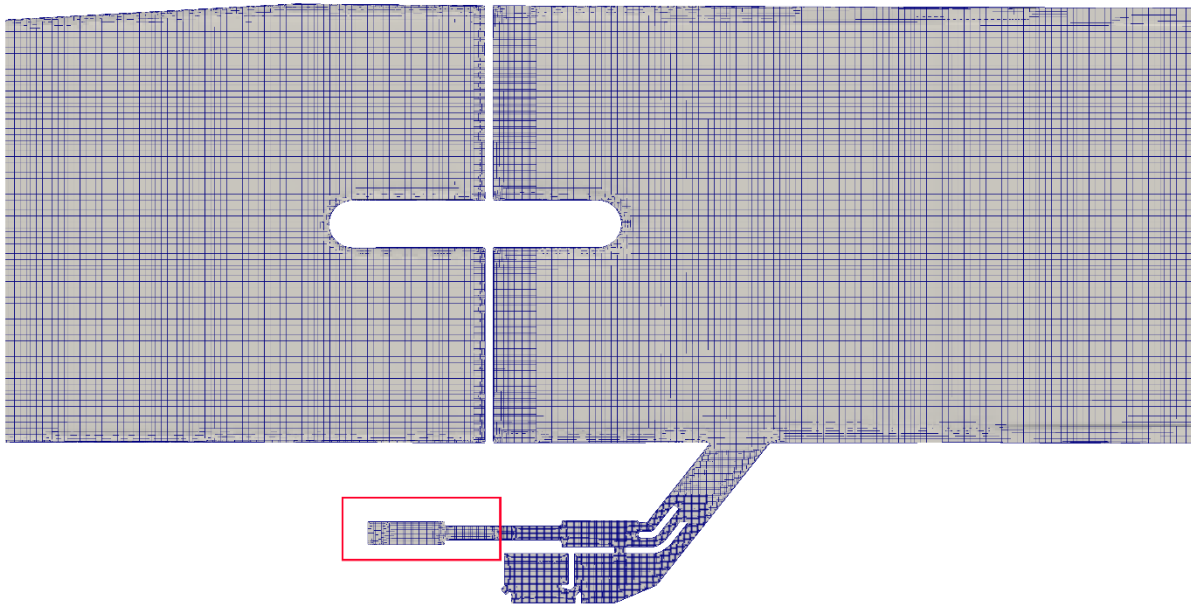
In totaal zijn 4 simulaties uitgevoerd, aangeduid met S1 tot en met S4. Tabel 1 geeft een korte beschrijving van de verschillende uitgevoerde simulaties. In deze tabel zijn ook de te verwachten waarden voor het debiet over de stuwen en het toegevoegd debiet gegeven op basis van de ontwerpberekeningen uit de bureaustudie (Visser *et al.*, 2020). Het debiet door de vispassage bedraagt bij alle simulaties 1 m³/s. De beschrijving van de geometrieën en de resultaten van de verschillende uitgevoerde simulaties is gegeven in hoofdstukken 4, 5, 6 en 7 voor respectievelijk de geometrieën van simulaties S1, S2, S3 en S4.

Tabel 1 – Beschrijving uitgevoerde simulaties

Simulatie	Debiet stuwen*	Toegevoegd debiet*	Debiet vispassage	Beschrijving
S1	22 m ³ /s	4 m ³ /s	1 m ³ /s	Geometrie: voorontwerp vispassage (geometrie 1). Hydraulische randvoorwaarden: overstorting over de stuwen.
S2	22 m ³ /s	4 m ³ /s	1 m ³ /s	Geometrie: aanpassing geleidingsmuur tussen kanaal toegevoegd debiet en vispassage (geometrie 2). Hydraulische randvoorwaarden: overstorting over de stuwen; wijziging inbouw stuwen in het model.
S3	60 m ³ /s	4 m ³ /s	1 m ³ /s	Geometrie: geometrie 2. Hydraulische randvoorwaarden: onderstroming onder de stuwen; aanpassing randvoorwaarde kanaal voor toegevoegd debiet.
S4	22 m ³ /s	1 m ³ /s	1 m ³ /s	Geometrie: geometrie 2. Hydraulische randvoorwaarden: overstorting over stuwen; aanpassing randvoorwaarde kanaal voor toegevoegd debiet.

* = Het debiet over de stuwen en het toegevoegd debiet volgen uit de CFD-simulaties op basis van de opgelegde opwaartse en afwaartse waterstand. In deze kolommen zijn de te verwachten waarden ingevuld op basis van de ontwerpberekeningen uit Visser *et al.*, (2020).

Vooraleer een CFD-simulatie uit te voeren wordt op basis van de 3D CAD-geometrie een rekenrooster opgemaakt. Het modeldomein voor alle uitgevoerde simulaties omvat een gedeelte van de opwaartse stuwgeul, een gedeelte van de afwaartse stuwgeul en de beide stuwen. Slechts een gedeelte van het kanaal voor het toegevoegd debiet en een gedeelte van de vispassage maken deel uit van het modeldomein. Het gedeelte van het kanaal voor het toegevoegd debiet tussen de hefschuif en de monding in de afwaartse stuwgeul, alsook een beperkt gedeelte opwaarts van de hefschuif worden beschouwd. Wat de vispassage betreft worden enkel het laatste en het voorlaatste bekken van de vispassage en de samenvloeiing met het kanaal voor het toegevoegd debiet beschouwd. De randvoorwaarde voor het debiet door de vispassage wordt opgelegd in het slot van het voorlaatste bekken van de vispassage. Dit modeldomein is weergegeven in Figuur 5. Hierbij wordt opgemerkt dat voor simulaties S1 en S2 het volledige modeldomein uit deze figuur beschouwd wordt. Bij simulaties S3 en S4 echter wordt het gedeelte aangeduid met de rode rechthoek niet beschouwd.

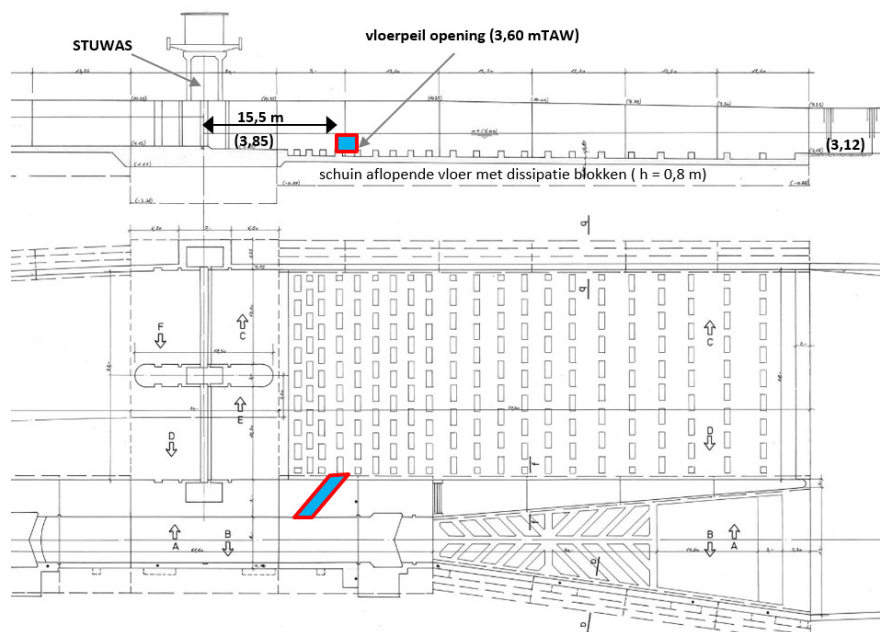


Het gedeelte in de rode rechthoek wordt niet beschouwd bij simulaties S3 en S4

Figuur 5 – Modeldomein simulaties

Het bodempeil opwaarts van de stuwen bedraagt +4.15 mTAW. Dit peil wordt voor alle simulaties beschouwd als opwaarts bodempeil. Het bodempeil afwaarts van de nieuwe stuwen is over een lengte van 10 m gelijk aan +3.85 mTAW en neemt daarna over een afstand van 75 m geleidelijk af naar +3.12 mTAW. Het bodempeil ter plaatse van de samenvloeiing van de stroming uit de vispassage en de stroming uit het kanaal voor het toegevoegd debiet bedraagt circa +3.60 mTAW, wat gelijk is aan het bodempeil van de opening in de muur van de bestaande (klasse I-) sluis. Met betrekking tot deze bodempeilen wordt opgemerkt dat volgens de beschikbare plannen, op de bodem afwaarts van de stuwen een groot aantal energiedissipatieblokken aanwezig (zou) zijn met hoogte 0.80 m (Figuur 6). Voor de CFD-modellering wordt in de afwaartse stuwgeul een bodempeil beschouwd dat gelijk is aan het peil van de bovenzijde van deze energiedissipatieblokken. Dit bodempeil neemt geleidelijk af van het peil +3.85 mTAW naar het peil +3.60 mTAW ter plaatse van de opening in de sluiswand. Ter plaatse van de opening in de sluiswand blijft het peil +3.60 mTAW behouden. Afwaarts van de opening in de sluiswand neemt het bodempeil opnieuw geleidelijk af van +3.60 mTAW naar +3.12 mTAW.

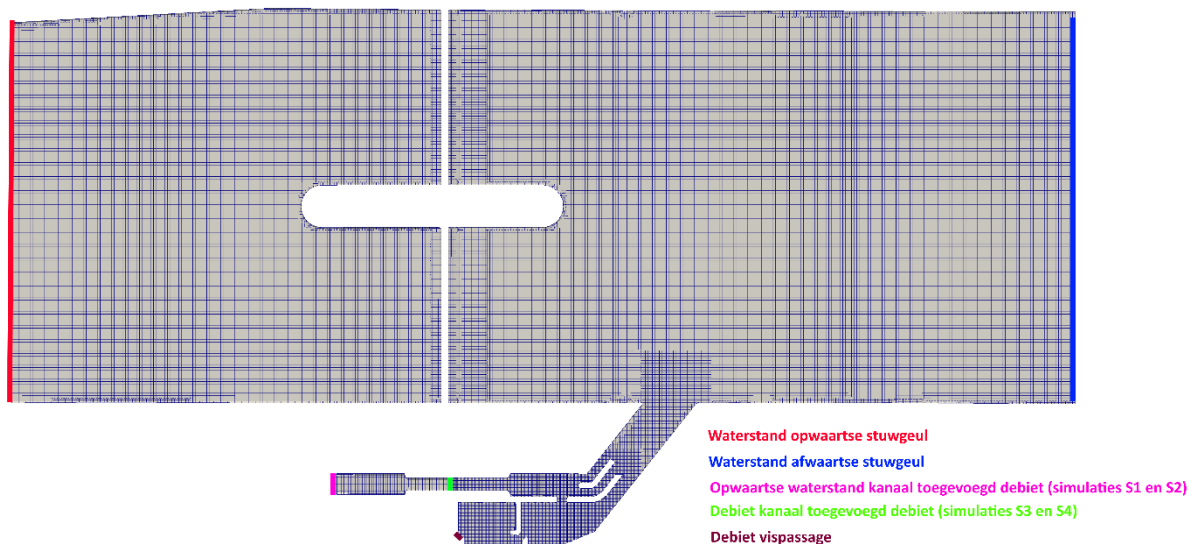
Voor details in verband met de gebruikte rekenroosters voor de verschillende uitgevoerde CFD-simulaties wordt verwezen naar Badano *et al.* (2021).



Figuur 6 – Bodem in de afwaartse stuwgeul

De CFD-simulaties zijn uitgevoerd met de InterFoam solver van OpenFOAM versie 6. InterFoam is een tijdsafhankelijke twee-fase VOF (Volume of Fluid) solver voor twee strikt gescheiden onsamendrukbaar stromende media. Daarbij hoort ook een RANS (Reynolds Averaged) turbulentiemodel. In dit geval is gekozen voor het $k-\omega$ -SST model.

Figuur 7 toont de locaties waar bij de CFD-simulaties de randvoorwaarden zijn opgelegd.



Figuur 7 – Locatie randvoorwaarden CFD-simulaties

Aan het opwaartse en het afwaartse uiteinde van de stuwgeul wordt de opwaartse en afwaartse waterstand opgelegd. Alle simulaties worden uitgevoerd met een opwaarts waterpeil gelijk aan +8.00 mTAW en een afwaarts waterpeil gelijk aan +5.61 mTAW. Dit zijn de streefpeilen voor het opwaarts en afwaarts pand ter

plaats van het stuwsuiscomplex te Sint-Baafs-Vijve. Het debiet over de stuwen volgt dan uit het kruinpeil van de stuw bij overstorting en de grootte van de opening onder de stuw bij onderstroming.

Bij simulaties S1, S2 en S4 bedraagt het kruinpeil van de stuwen +7.27 mTAW. Het debiet bij overstorting over de stuwen kan ingeschat worden aan de hand van volgende formulering:

$$Q_{stuw} = C_k b h^{3/2}$$

met:

-	Q_{stuw}	Debiet over de stuwen	[m ³ /s]
-	b	Breedte kleppen	[m]
-	h	Waterdiepte boven kleppen (= $H_{opw} - H_{stuw}$)	[m]
-	H_{opw}	Opwaarts waterpeil	[mTAW]
-	H_{stuw}	Kruinpeil van de stuw	[mTAW]
-	C_k	Debietscoëfficiënt	[-]

Bij het voorontwerp van de vispassage in (Visser *et al.*, 2020) is een waarde 1.86 beschouwd voor de debietscoëfficiënt bij overstorting. Deze debietscoëfficiënt is benaderend bepaald op basis van de gemeten debieten bij overstort in De Laet *et al.*, (1988) en wordt ook hier beschouwd voor het inschatten van het debiet bij overstorting. Toepassen van deze formulering bij een opwaartse waterstand gelijk aan +8.00 mTAW, een kruinpeil van de stuwen gelijk aan +7.27 mTAW en een totale breedte van de stuwen gelijk aan 20.0 m geeft een totaal debiet over beide stuwen gelijk aan ca. 22.0 m³/s. Uit Visser *et al.* (2020) volgt dat de overschrijdingsfrequentie van dit debiet tussen 40% en 50 % bedraagt.

Bij simulatie S3 is een onderstroming onder de stuwen aanwezig. Voor deze simulatie wordt een debiet over de stuwen beoogt met een overschrijdingsfrequentie van 10 %. Dit is de richtlijn voor de bovengrens waarbij de vispassage nog optimaal moet kunnen functioneren en komt overeen met een debiet van ca. 60 m³/s. Uit De Laet *et al.*, (1988) volgt dat dit debiet bij aanwezigheid van de streefpeilen in het opwaarts en afwaarts pand zich voordoet bij een hefhoogte van de stuw gelijk aan 0.35 m. Deze hefhoogte van de stuw wordt voor deze simulatie beschouwd.

Wat betreft het kanaal voor toegevoegd debiet, wordt bij simulatie S1 en S2 de opwaartse waterstand als randvoorwaarde opgelegd. De hefhoogte van de hefschuif en de afwaartse waterstand bepalen dan het debiet door de opening onder de hefschuif. Het debiet door de opening onder de hefschuif kan dan bepaald worden aan de hand van de volgende formulering:

$$Q_{hefschuif} = C_d b h_{hefschuif} \sqrt{2g (H_{opw} - H_{afw})}$$

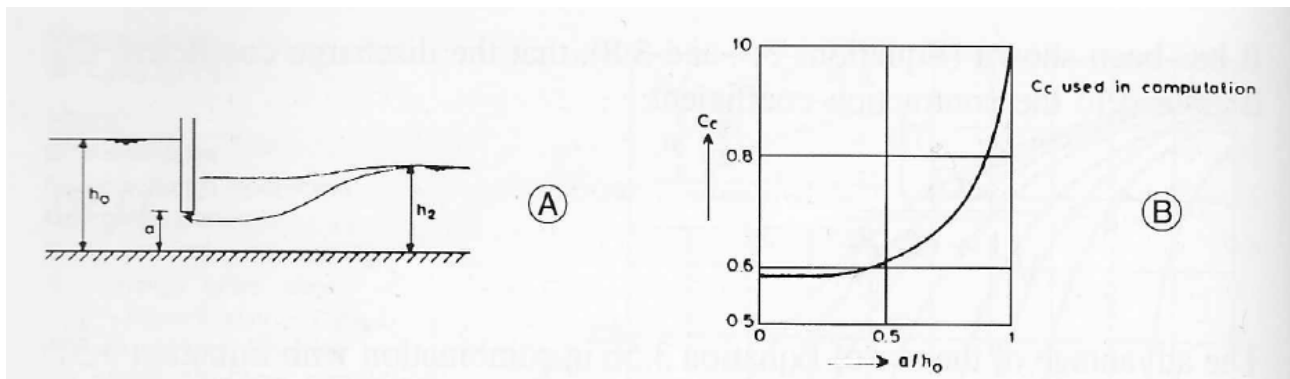
met:

-	$Q_{hefschuif}$	Debiet door de opening onder de hefschuif	[m ³ /s]
-	b	Breedte opening	[m]
-	$h_{hefschuif}$	Hoogte opening onder hefschuif	[m]
-	H_{opw}	Opwaarts waterpeil	[mTAW]
-	H_{afw}	Afwaarts waterpeil	[mTAW]
-	C_d	Debietscoëfficiënt	[-]

Uit door WL uitgevoerde schaalmodelproeven voor een rechthoekige opening afgesloten door een hefschuif, die bijna volledig geopend is, volgt een debietscoëfficiënt gelijk aan ca. 0.65 (Vercruysse *et al.*, 2019).

Bij simulatie S1 en S2 is opwaarts en afwaarts in het kanaal voor het toegevoegd debiet het streefpeil aanwezig, i.e. +8.00 mTAW opwaarts en +5.61 mTAW afwaarts. De breedte van het kanaal voor het toegevoegd debiet ter plaatse van de hefschuif bedraagt 0.90 m. Aan de hand van bovenstaande formulering wordt met deze gegevens een hefhoogte 1.00 m van de hefschuif berekend om het gewenste debiet van 4 m³/s te bekomen. Deze hefhoogte is toegepast bij simulaties S1 en S2.

Bij simulaties S3 en S4 is het debiet door het kanaal voor toegevoegd debiet rechtstreeks opgelegd op de rand ter plaatse van de opening onder de hefschuif. Hierbij is rekening gehouden met de contractie van een jet bij stroming onder een hefschuif. Bij stroming onder een hefschuif doet de kleinste sectie van de jet zich namelijk op een beperkte afstand afwaarts van de opening voor. Deze kleinste sectie kan berekend worden door de hoogte van de opening te vermenigvuldigen met een contractiecoëfficiënt. Figuur 8 uit Miller (1994) toont de berekening van de contractiecoëfficiënt in functie van de hoogte van de opening en de opwaartse waterdiepte. Bij een opwaarts waterpeil gelijk aan +8.00 mTAW, een bodempeil van het kanaal voor toegevoegd debiet gelijk aan +3.20 mTAW bedraagt de opwaartse waterdiepte 4.8 m. Bij een hoogte van de opening gelijk aan 1.0 m volgt uit Figuur 8 een contractiecoëfficiënt gelijk aan 0.59. Uit simulatie S2 volgt een contractie van de jet met 66 % (zie paragraaf 5.2). Dit is beperkt hoger dan de waarde berekend volgens Miller (1994). Voor het bepalen van de hoogte van de opening bij simulatie S3 wordt een gemiddelde contractiecoëfficiënt gelijk aan 0.61 beschouwd. Bij een werkelijke hoogte van de opening gelijk aan 1.00 m geeft dit dan een toe te passen hoogte van de opening in het CFD-model gelijk aan 0.61 m.



Bron: Miller (1994)

Figuur 8 – Contractiecoëfficiënt bij stroming onder een hefschuif

Simulatie S4 wordt uitgevoerd met een verlaagd toegevoegd debiet om de stroomsnelheden in zowel het kanaal van het toegevoegd debiet als in de monding te kennen bij lagere waarde van het toegevoegd debiet. Hiervoor wordt een toegevoegd debiet van $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$ beschouwd. Uit bovenstaande formulering voor het debiet onder de hefschuif volgt dat een hoogte van de opening onder de hefschuif gelijk aan 0.25 m nodig is om dit debiet te bekomen. Rekening houdend met de contractie van de stroming en een gemiddelde contractiecoëfficiënt gelijk aan 0.61 volgt hieruit een hoogte van de opening in het CFD-model gelijk aan 0.15 m.

Voor alle uitgevoerde simulaties bedraagt het debiet door de vispassage $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$.

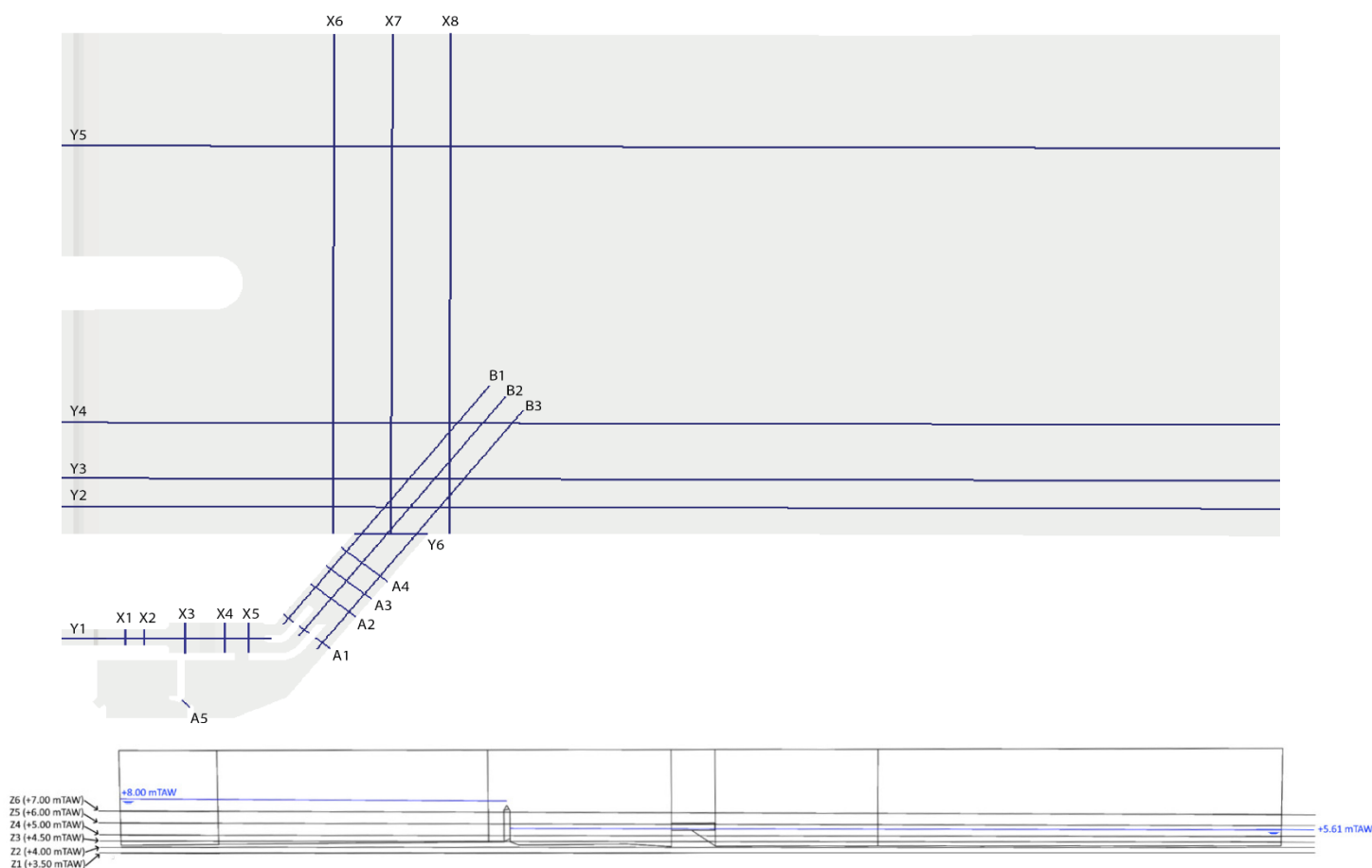
Tabel 2 geeft een overzicht van de randvoorwaarden die bij de verschillende uitgevoerde simulaties toegepast zijn.

Tabel 2 – Overzicht randvoorwaarden simulaties S1, S2, S3 en S4

	Simulatie			
	S1	S2	S3	S4
Waterpeil stuwgeul opwaarts	+8.00 mTAW	+8.00 mTAW	+8.00 mTAW	+8.00 mTAW
Waterpeil stuwgeul afwaarts	+5.61 mTAW	+5.61 mTAW	+5.61 mTAW	+5.61 mTAW
Waterpeil kanaal toegevoegd debiet opwaarts	+8.00 mTAW	+8.00 mTAW	n.v.t.	n.v.t.
Stromingstype stuw	overstort	overstort	onderstroom	overstort
Kruinpeil kleppen stuwen	+7.27 mTAW	+7.27 mTAW	n.v.t.	+7.27 mTAW
Onderzijde hefschuiven stuwen	n.v.t.	n.v.t.	+ 4.50 mTAW	n.v.t.
Hefhoogte hefschuif kanaal toegevoegd debiet	1.00 m	1.00 m	0.61 m	0.15 m
Debiet stuwen*	22 m ³ /s	22 m ³ /s	60 m ³ /s	22 m ³ /s
Debiet kanaal toegevoegd debiet*	4 m ³ /s	4 m ³ /s	4 m ³ /s	1 m ³ /s
Debiet vispassage	1 m ³ /s	1 m ³ /s	1 m ³ /s	1 m ³ /s

* = Het debiet over de stuwen en het debiet door het kanaal van het toegevoegd debiet volgt uit de CFD-simulaties. In deze rijen is het vòòr uitvoeren van de simulaties geschatte debiet weergegeven;
n.v.t. = niet van toepassing.

De resultaten van de simulaties worden beschreven in hoofdstukken 4, 5, 6 en 7. Voor de visualisatie van het optredende stromingspatroon zijn door het studie bureau hiervoor grafische voorstellingen gemaakt voor 21 verticale vlakken en 6 horizontale vlakken, zie Figuur 9. Bij de bespreking van het optredende stromingspatroon in deze hoofdstukken zullen vooral de visualisaties van verticale vlakken Y2, Y3, Y4, Y5 en horizontale vlakken Z2, Z3 en Z4 (respectievelijk hoogte +4.00 mTAW, +4.50 mTAW, en +5.00 mTAW) beschouwd worden.



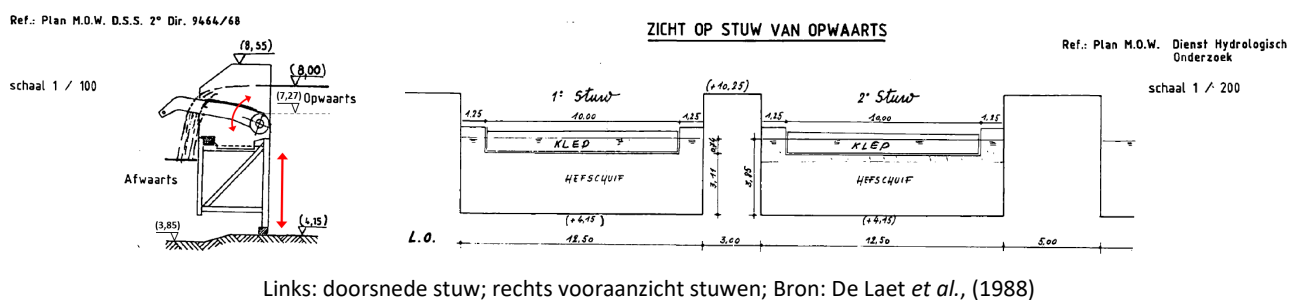
Figuur 9 – Ligging verticale (boven) en horizontale (onder) vlakken voor visualisatie resultaten CFD-simulatie

4 Simulatie S1

4.1 3D CAD-model

Het 3D CAD-model voor simulatie S1 betreft de geometrie uit het voorontwerp van de monding van de vispassage. Figuur 11 geeft een aanzicht van het 3D CAD-model voor deze geometrie, in Figuur 12 is een bovenaanzicht gegeven. In beide figuren is zowel het volledige 3D CAD-model afgebeeld als een detail van het kanaal voor het toegevoegd debiet en de monding van de vispassage in de afwaartse stuwgeul. Figuur 13 toont een doorsnede van het model ter plaatse van de beide stuwen en een doorsnede ter plaatse van het kanaal voor het toegevoegd debiet.

Figuur 10 geeft een voorstelling van de hefstuwen te Sint-Baafs-Vijve. Het hefgedeelte bestaat uit een raamwerk met een lengte van ca. 1.0 m en een breedte van 12.5 m. Bovenop dit hefgedeelte is een klep aanwezig. De breedte van deze klep bedraagt 10.0 m. In neergelaten toestand bedraagt het kruinpeil van deze klep +7.27 mTAW. De klep zelf heeft een lengte van ca. 1.40 m. Hierbij wordt opgemerkt dat de lengte van het raamwerk en de lengte van de klep van de beide stuwen eerder benaderend afgeleid is op basis van de beschikbare gegevens en plannen.



Figuur 10 – Hefstuwen met kleppen te Sint-Baafs-Vijve

Bij deze eerste simulatie zijn de beide stuwen in het model op een vereenvoudigde wijze als een scherpe overlaat ingebouwd in het 3D CAD model van deze simulatie (Figuur 13). De beide stuwen hebben een breedte van 12.5 m (totale overlaatbreedte is 25.0 m). De punt van de scherpe overlaat bevindt zich ca. 1.0 m afwaarts van de positie van de as van de kleppen. Deze positie betreft het afwaarts uiteinde van het raamwerk van de stuw. Deze overlaat heeft een dikte van 0.50 m, en het kruinpeil bedraagt +7.27 mTAW. Het bodempeil opwaarts en afwaarts van de stuwen is ingebouwd zoals beschreven in hoofdstuk 3.

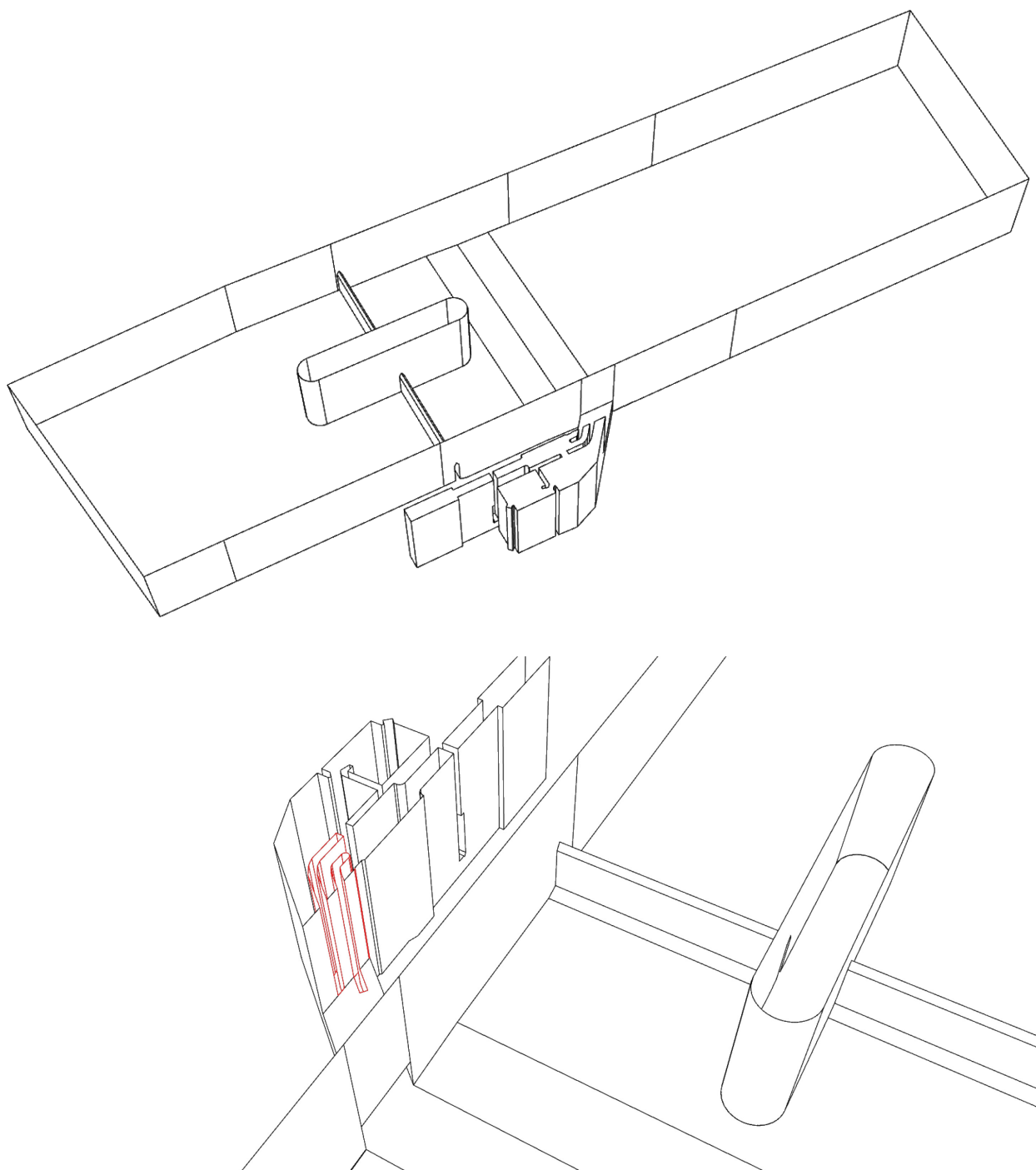
In het kanaal voor het toegevoegd debiet is een hefschuif aanwezig om het debiet door dit kanaal te regelen. Ter plaatse van de hefschuif is een opening in de wand aanwezig met een hoogte van 1.10 m en een breedte van 0.90 m. De hefschuif is in het CFD-model tot 1.00 m boven de bodem geopend (zie ook Figuur 13). Opwaarts en ter plaatse van deze hefschuif bedraagt het bodempeil +3.20 mTAW. Afwaarts van deze hefschuif is een woelkom aanwezig met een lengte van 4.80 m en een bodempeil op +3.20 mTAW. De einddrempel van deze woelkom met helling 2:1 zorgt voor de overgang naar het bodempeil +3.60 mTAW ter plaatse van de samenvloeiing. Hierbij wordt opgemerkt dat bij de rapportering is vastgesteld dat de lengte van de woelkom en de helling van de einddrempel in het 3D CAD-model overgenomen zijn uit de eerste versie van de aanbestedingsplannen¹ van het kanaal voor het toegevoegd debiet en bijgevolg afwijken van de afmetingen vermeld in hoofdstuk 2.

¹ Plan BA_BOUW_VISPASSAGE_P_N_D3_100_439_Grondplan NT.pdf

Afwaarts van de drempel van de woelkom zijn sponningen voorzien voor de plaatsing van een rooster om vissen die in het kanaal voor het toegevoegd debiet terechtgekomen zijn via de opening in de geleidingsmuur af te leiden naar de vispassage. Noch de sponningen in de bodem en in de muur van het kanaal voor het toegevoegd debiet, noch het rooster zelf zijn aanwezig in het 3D CAD-model. Het meenemen van deze sponningen en dit rooster zou een te grote verfijning van het rekenrooster op deze locatie betekenen met bijgevolg een beduidende vergroting van de rekentijd tot gevolg. Zowel de sponningen als het rooster beïnvloeden het stromingspatroon ter plaatse van de samenvloeiing van het kanaal voor het toegevoegd debiet en de vispassage niet. Om die reden zijn deze bijgevolg niet beschouwd.

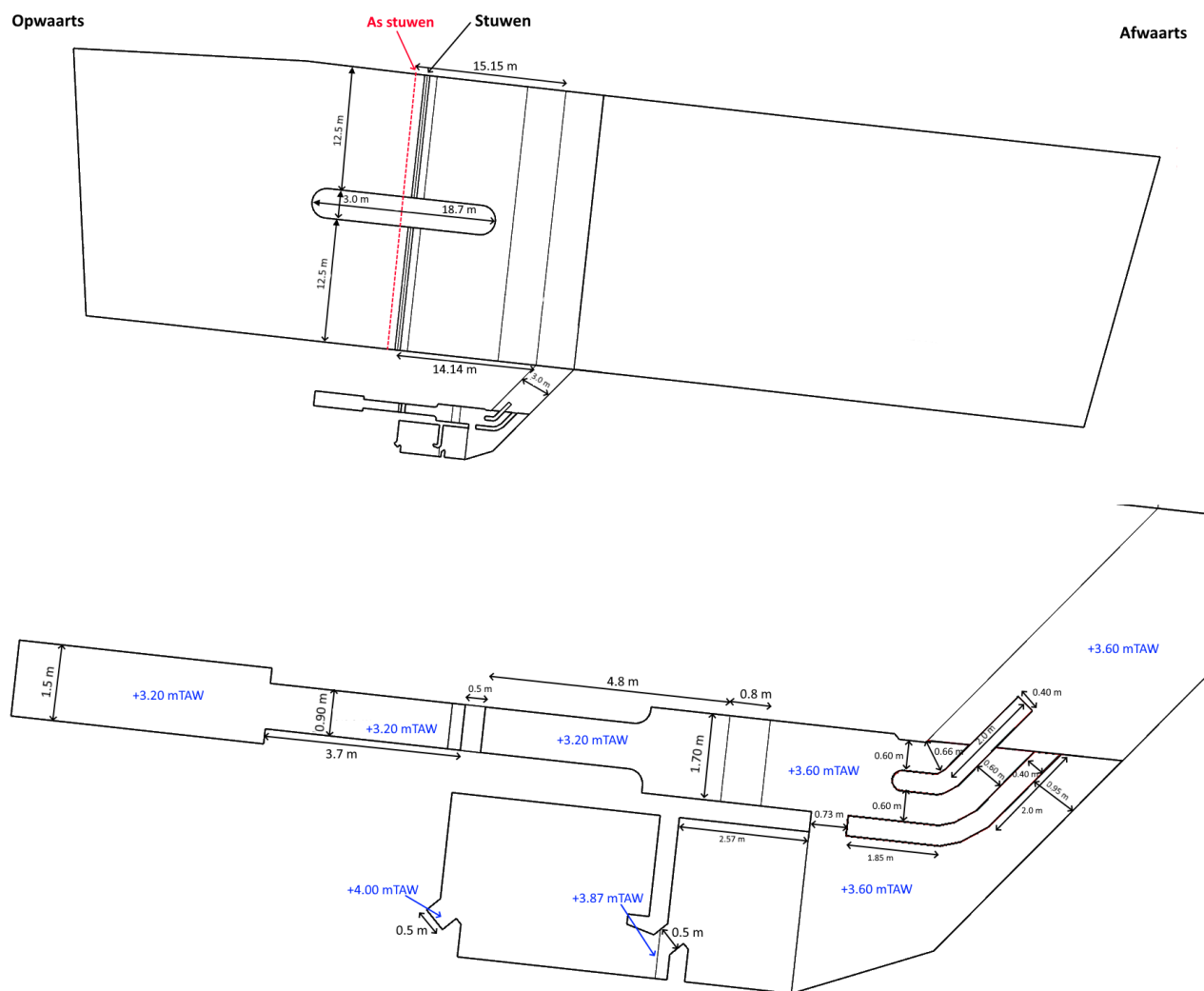
In het voorontwerp van de geometrie van de monding van de vispassage is in de geleidingsmuur tussen het kanaal voor het toegevoegd debiet en de vispassage een opening voorzien met een lengte van 0.73 m (zie Figuur 12). Deze opening bevindt zich 2.57 m afwaarts van de meest afwaartse slotwand van de vispassage en heeft tot doel vissen die in het kanaal voor het toegevoegd debiet terechtgekomen zijn af te leiden naar de vispassage. De beide geleidingsmuren in het kanaal voor het toegevoegd debiet hebben een breedte van 0.40 m. De geleidingsmuur tussen het kanaal voor het toegevoegd debiet en de vispassage buigt afwaarts van de opening in de wand na een lengte van 1.85 m af tot tegen de koker door de muur van de kleine sluis. De geleidingsmuur in het kanaal voor het toegevoegd debiet verdeelt dit kanaal in twee delen met elk een breedte van 0.60 m.

Met betrekking tot het bodempeil van de vispassage wordt opgemerkt dat het laatste slot in het voorontwerp een bodempeil heeft van +3.90 mTAW en het voorlaatste slot een bodempeil +4.00 mTAW. Dit bodempeil doet zich voor in het midden van het slot. In het 3D CAD-model voor de simulaties bedraagt het bodempeil van het voorlaatste slot +4.00 mTAW. Ter vereenvoudiging van het 3D CAD-model is een lineaire overgang in de bodem van de bekkens van de vispassage voorzien. De bodem neemt lineair af van +4.00 mTAW ter plaatse van het voorlaatste slot naar +3.87 m TAW juist voor het laatste slot en neemt daarna lineair af naar +3.60 mTAW aan het einde van het laatste bekken van de vispassage.



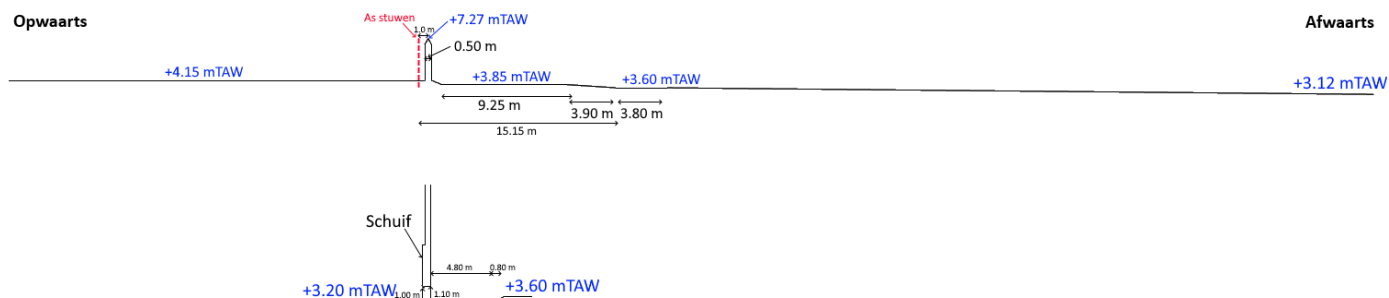
Boven: aanzicht volledig 3D-model; onder: detail ter plaatse van monding vispassage in stuwgeul

Figuur 11 – Aanzicht 3D CAD-model voor simulatie S1



Boven: bovenaanzicht volledig 3D CAD-model; onder: detail ter plaatse van kanaal voor toegevoegd debiet en vispassage

Figuur 12 – Bovenaanzicht 3D CAD-model voor simulatie S1

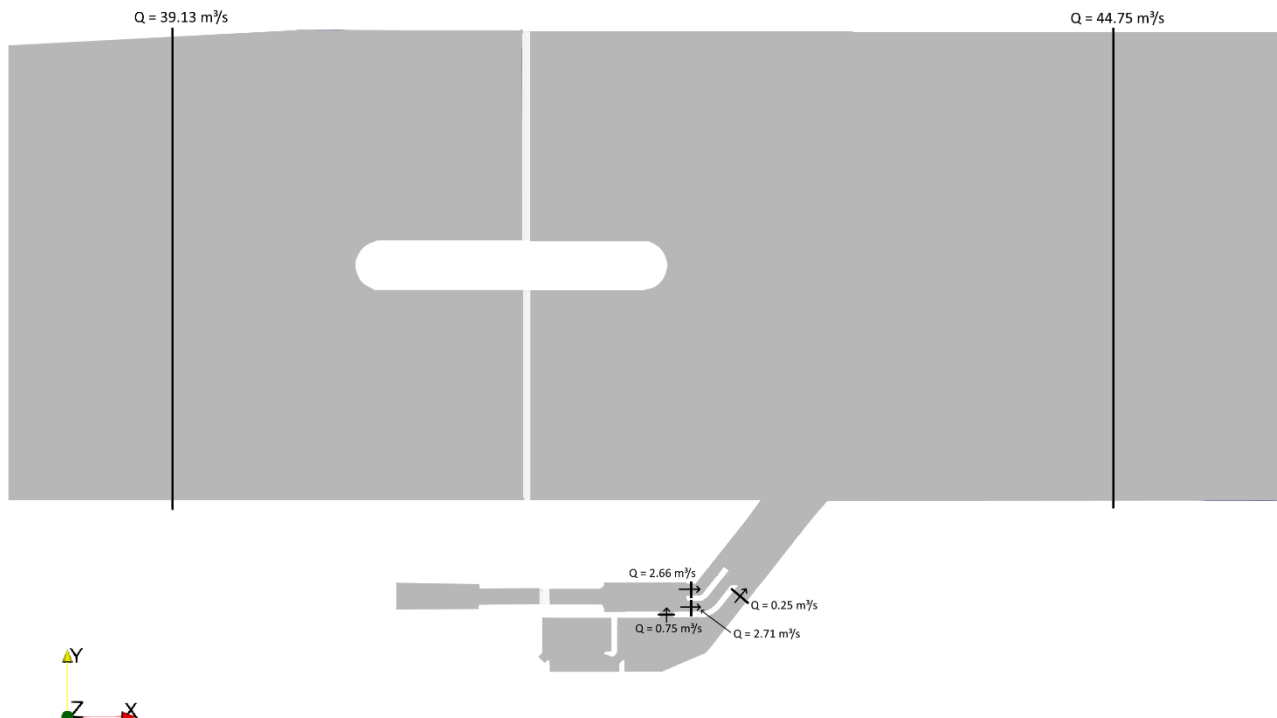


Boven: doorsnede ter plaatse van stuwen; onder: doorsnede ter plaatse van kanaal voor toegevoegd debiet;
Opmerking: enkel het gedeelte van het kanaal voor het toegevoegd debiet ter plaatse van de hefschuif en de woelkom zijn afgebeeld.

Figuur 13 – Doorsnede 3D CAD-model voor simulatie S1

4.2 Resultaten CFD-simulatie

Figuur 14 toont voor deze simulatie het debiet in de opwaartse en afwaartse stuwgeul en op verschillende locaties in de samenvloeiing van het kanaal voor het toegevoegd debiet en de vispassage.



Figuur 14 – Optredende debieten op maatgevende locaties voor simulatie S1

Vooreerst volgt uit Figuur 14 dat het debiet in de opwaartse stuwgeul $39.1 \text{ m}^3/\text{s}$ bedraagt. Dit debiet is beduidend hoger dan het te verwachten debiet van $22 \text{ m}^3/\text{s}$ (zie hoofdstuk 3). Hierbij moet opgemerkt worden dat het 3D CAD-model voor simulatie S1 een vereenvoudigde stuw, i.e. een overlaat met scherpe rand, bevat en dat de totale breedte van de twee stuwen gelijk is aan 25 m. Echter uit Figuur 10 in paragraaf 4.1 volgt dat de klep een breedte heeft van 10 m of een totale breedte voor beide stuwen samen van 20 m. Uit dezelfde figuur volgt dat bij een volledig neergelaten klep de stuw eerder een brede overlaat is in plaats van een overlaat met scherpe rand. Toepassen van de formulering voor het inschatten van het debiet over de stuw bij overstorting uit hoofdstuk 3 met dit berekende debiet en een totale breedte van 25 m geeft een waarde voor de debietscoëfficiënt C_k gelijk aan 2.50, wat beduidend hoger is dan de waarde van 1.86 dewelke in hoofdstuk 3 toegepast werd. Voor een overlaat met scherpe wand, waarbij het kruinpeil zich 3.12 m boven de bodem bevindt, vermeldt Bos (1989) een waarde voor de debietscoëfficiënt C_k gelijk aan ca. 1.77, wat beduidend lager is dan de waarde van 2.50 die volgt uit de CFD-modellering.

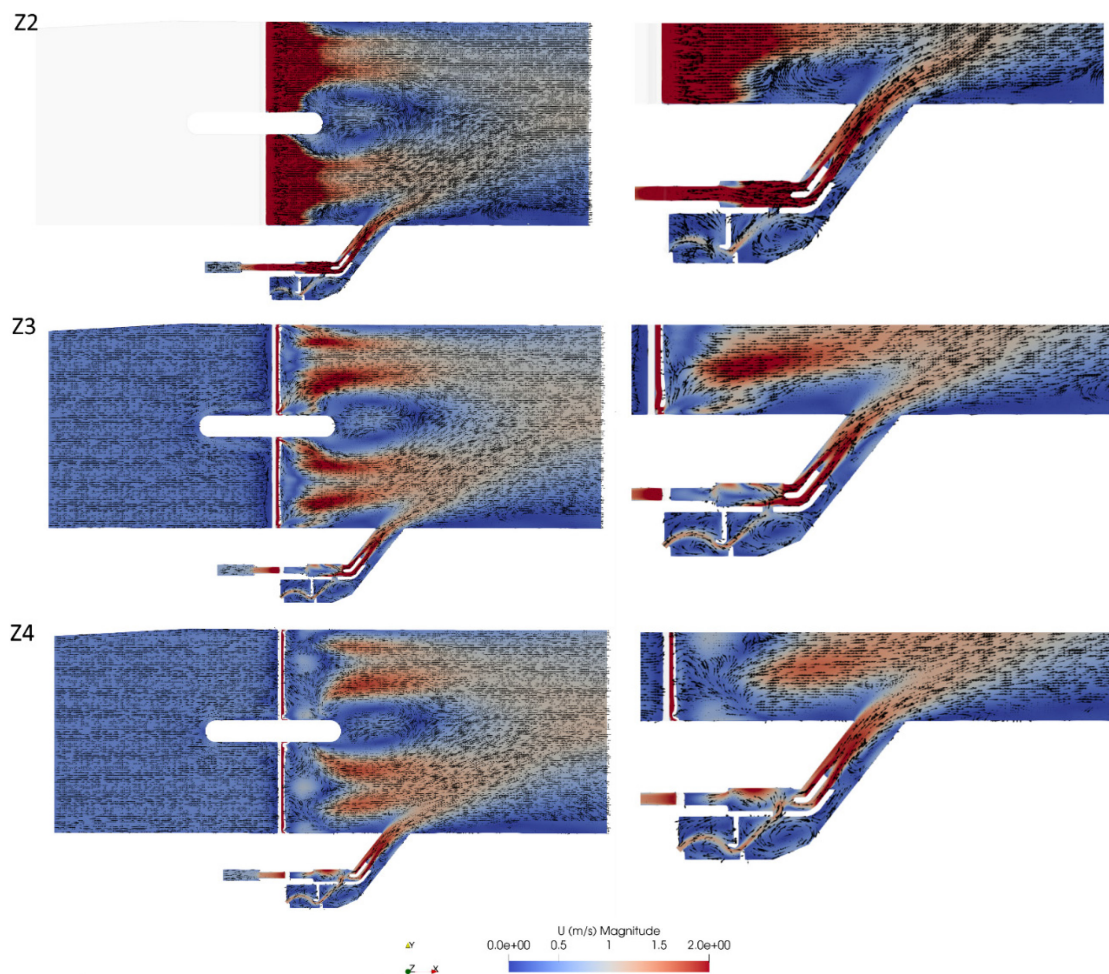
De stroming uit het laatste slot van de vispassage is gericht naar de geleidingswand tussen de vispassage en het kanaal voor het toegevoegd debiet. Op deze locatie bevindt zich ook een opening in deze wand om vissen die in het kanaal van het toegevoegd debiet zijn gekomen de kans te geven terug naar de vispassage te kunnen zwemmen. In het kanaal voor het toegevoegd debiet doen zich hoge stroomsnelheden voor (zie ook Figuur 17). Ten gevolge van deze hoge stroomsnelheden in het kanaal voor toegevoegd debiet wordt de stroming uit de vispassage voor het grootste deel weggezogen door de opening in de geleidingswand. Het debiet door deze opening bedraagt $0.75 \text{ m}^3/\text{s}$. Ter plaatse van de middelste geleidingswand in het kanaal voor het toegevoegd debiet wordt hierdoor een totaal debiet van $5.4 \text{ m}^3/\text{s}$ berekend. Rekening houdend met het extra debiet van $0.75 \text{ m}^3/\text{s}$ door de opening in de geleidingsmuur betekent dit dat het debiet onder de hefschuif in het kanaal voor het toegevoegd debiet $4.62 \text{ m}^3/\text{s}$ bedraagt. Dit is 16 % meer dan het vooropgestelde debiet van $4.0 \text{ m}^3/\text{s}$. Toepassen van de formulering voor debiet onder een hefschuif uit

hoofdstuk 3 met dit berekende debiet van $4.62 \text{ m}^3/\text{s}$ geeft een debietscoëfficiënt gelijk aan 0.75. Dit is beduidend hoger dan de waarde van 0.65 uit Vercruysse *et al.* (2019). Hierbij moet wel opgemerkt worden dat het onderzoek in Vercruysse *et al.* (2019) een opening in een wand betreft die zich op een beperkte hoogte boven de bodem bevindt. Een verklaring voor deze afwijking tussen de debietscoëfficiënt uit de CFD-modellering en deze uit de literatuur is niet gevonden. Om deze afwijkingen te vermijden wordt om die reden bij simulatie S3 en simulatie S4 het vooropgestelde debiet rechtstreeks opgelegd ter plaatse van de opening onder de hefschuif.

Uit Figuur 14 volgt dat de tussenmuur in het kanaal voor het toegevoegd debiet, het totale debiet van $5.37 \text{ m}^3/\text{s}$ zo goed als gelijk verdeelt. Het debiet door het rechter gedeelte van het kanaal bedraagt $2.71 \text{ m}^3/\text{s}$, wat slechts 2 % groter is dan het debiet van $2.66 \text{ m}^3/\text{s}$ door het linker gedeelte.

Door de opening in de geleidingswand tussen het kanaal voor het toegevoegd debiet en de vispassage wordt van het totale debiet van $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$ door de vispassage $0.75 \text{ m}^3/\text{s}$ (of $3/4$) weggezogen naar het kanaal voor het toegevoegd debiet. Hierdoor vermindert het debiet van de vispassage ter plaatse van de samenvloeiing met het kanaal voor het toegevoegd debiet tot slechts $0.25 \text{ m}^3/\text{s}$ of $1/4$ van het totale debiet door de vispassage. Dit is niet wenselijk vanuit het oogpunt van een goede attractiviteit (vindbaarheid) van de ingang naar de vispassage zelf (m.a.w. het meest afwaartse slot).

Figuur 15 geeft voor deze simulatie een grafische voorstelling van het stromingspatroon in drie horizontale vlakken Z2, Z3 en Z4. Hierbij is zowel het stromingspatroon afgebeeld in het volledige modeldomein als een detail van het stromingspatroon ter plaatse van de samenvloeiing van het kanaal voor het toegevoegd debiet en de vispassage.



Links: volledig modeldomein; rechts detail ter plaatse van monding vispassage in afwaartse stuwgeul

Figuur 15 – Stromingspatroon in horizontale vlakken voor simulatie S1

Uit Figuur 15 volgt vooreerst dat zich bij beide stuwen loslating voordoet afwaarts van de stuwen tegen de middenpijler op een afstand van ongeveer de helft van het afwaartse gedeelte van deze middenpijler. Afwaarts van de middenpijler ontstaat hierdoor bij beide stuwgeuldelen een neer. Ook aan de andere zijde van de twee stuwgeuldelen doet zich op ongeveer dezelfde afstand van de stuwen een loslating voor en ontstaat een neer tegen de buitenste muren van de stuwgeul. Deze neren doen zich voor op alle 3 de beschouwde hoogtes. Ten gevolge van het ontstaan van deze neren aan de beide zijden van elk van de stuwgeuldelen wordt de stroming over elke stuw afzonderlijk gedwongen naar het midden van de twee delen van de stuwgeul. Hoger in de waterkolom worden juist afwaarts van de stuwen bij elk van de stuwen twee deelstromen waargenomen, die zich verder afwaarts samenvoegen tot één stroming. Ter plaatse van de monding van de vispassage in de afwaartse stuwgeul bedraagt de stroomsnelheid in het midden van de stuwgeul op de drie hoogtes ca. 1.5 m/s.

De stroming uit het laatste slot van de vispassage is gericht naar de geleidingswand tussen het kanaal voor het toegevoegd debiet en de vispassage. Dit wordt versterkt doordat $\frac{3}{4}$ van het debiet uit de vispassage wordt weggezogen door de opening naar het kanaal van het toegevoegd debiet. Dit stromingspatroon is niet wenselijk voor de vindbaarheid van de vispassage.

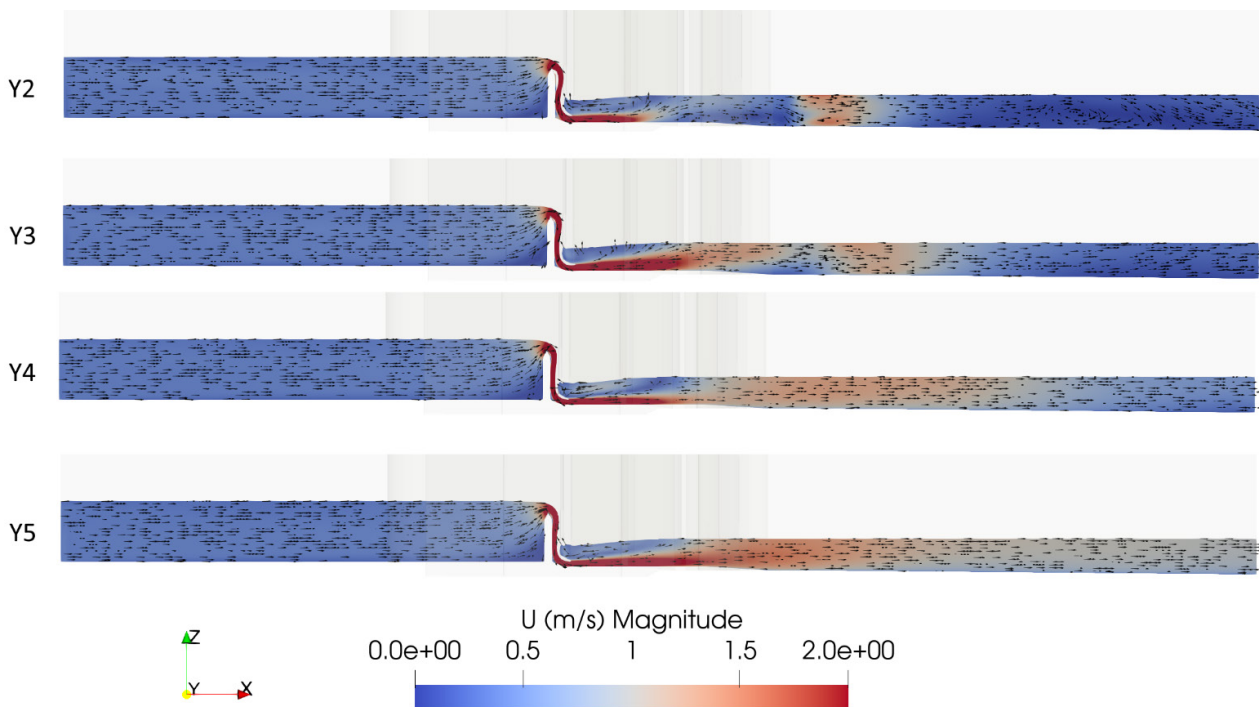
Ten gevolge van het grote debiet uit de beide delen van het kanaal voor het toegevoegd debiet (in totaal $5.4 \text{ m}^3/\text{s}$) en het relatief kleine debiet door de vispassage ($0.25 \text{ m}^3/\text{s}$ i.p.v. de verwachte $1 \text{ m}^3/\text{s}$) ontstaat in de koker door de muur van de kleine sluis (=mondung) een neer. De lengte van deze neer is bijna gelijk aan de volledige lengte van deze koker. In het overige gedeelte van de koker doet zich een stroming met hoge stroomsnelheid voor. Deze stroming met hoge stroomsnelheden en de grote neer in de koker zorgen er samen voor dat de vispassage minder goed bereikbaar is voor vissen via deze koker.

De opening in de geleidingsmuur tussen vispassage en kanaal voor toegevoegd debiet was aangebracht om vissen die in het kanaal voor het toegevoegd debiet terechtkomen, af te leiden naar de vispassage. Echter de hoge stroomsnelheden aan beide zijden van de tussenmuur in het kanaal voor het toegevoegd debiet zorgen dat vissen niet tot op deze locatie in het kanaal voor het toegevoegd debiet kunnen raken.

Afwaarts van de monding van de vispassage in de afwaartse stuwgeul ontstaat aan de wand van de stuwgeul aan rechteroever een neer ten gevolge van de loslating van de stroming uit de koker. De stroming uit de koker voegt zich ongeveer in het midden van de rechtse helft van de stuwgeul samen met de stroming die van de stuw afkomstig is. Dit stroompatroon is vanuit oogpunt van de vindbaarheid van de vispassage wel een goed patroon.

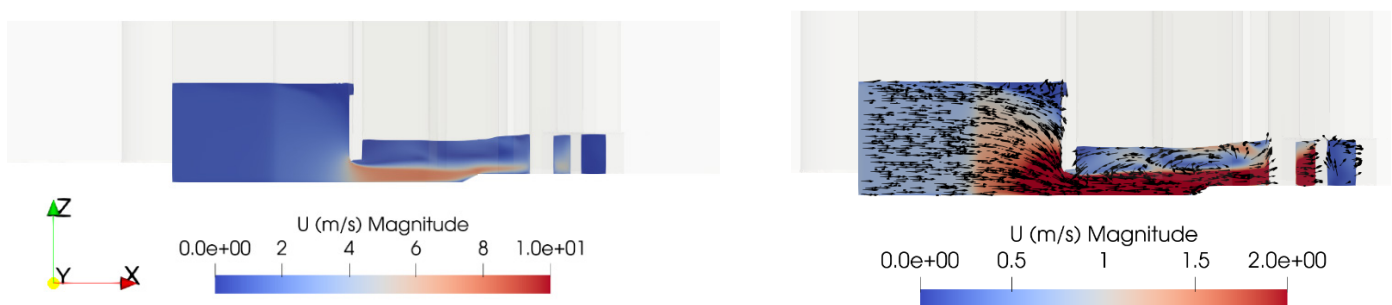
Om de lengte van de watersprong afwaarts van de stuwen te begroten is in Figuur 16 het stromingspatroon voorgesteld in 4 verticale vlakken in de afwaartse stuwgeul. Voor het bepalen van het einde van de watersprong wordt hierbij in deze figuren (visueel) de meest afwaartse locatie beschouwd waar de snelheidsvectoren aan de oppervlakte naar opwaarts in de richting van de stuwen gericht zijn. Uit deze figuur volgt dat het einde van de watersprong zich juist opwaarts van de monding van de vispassage in de afwaartse stuwgeul bevindt. Echter eerder werd vastgesteld dat het debiet over de stuwen beduidend hoger is dan het geschatte debiet en dat de breedte van de klep in werkelijkheid kleiner is dan in het CFD-model. Het debiet over een stuw beïnvloedt beduidend de lengte van de watersprong en deze zou dus korter kunnen zijn bij een betere benadering van de stuwklep in het CFD-model. Anderzijds is het mogelijk dat de lengte van de watersprong in de as van de stuwgeul wel relatief toeneemt bij beschouwen van een kleinere breedte van de klep.

In Figuur 16 valt op dat de jet die over de stuwen gaat als het ware kleeft tegen de stuw zelf. Uit Figuur 10 in hoofdstuk 3 volgt dat bij een volledig neergelaten klep de stuw eerder een brede overlaat betreft in plaats van een stuw met scherpe rand. Door het raamwerk van de stuw en de kleinere breedte van de stuwklep zal de jet over de stuw in werkelijkheid niet kleven tegen de stuw. Door de vereenvoudiging van de geometrie van de stuw in het CFD-model is het mogelijk dat de jet over de stuw gemakkelijker zal aanliggen tegen de stuw zelf, onder andere door de afwezigheid van beluchting. Het correct beschouwen van de geometrie van de stuw beïnvloedt bijgevolg ook de vorm van de jet die over de stuw gaat.



Figuur 16 – Stromingspatroon in verticale vlakken in de afwaartse stuwgeul voor simulatie S1

Figuur 17 geeft een grafische voorstelling van het stromingspatroon in een verticaal vlak in het midden van het kanaal voor het toegevoegd debiet. De stroomsnelheden in deze figuur zijn zowel afgebeeld op een schaal met een maximale waarde van 10 m/s als op een schaal met een maximale waarde gelijk aan 2 m/s. Uit deze figuur volgt dat in de woelkom afwaarts van de hefschuif aan de bodem stroomsnelheden voorkomen tussen 6.0 m/s en 8.0 m/s. Ook juist afwaarts van de drempel van de woelkom komen nog hoge stroomsnelheden voor. De watersprong afwaarts van de hefschuif doet zich voor tot voorbij de drempel van de woelkom. De geleidingswanden in het kanaal voor toegevoegd debiet zorgen hier voor de energiedissipatie. Het aanzuigen van het debiet van de vispassage door de opening in de geleidingsmuur naar het kanaal voor het toegevoegd debiet zorgt ervoor dat het debiet in het kanaal voor het toegevoegd debiet beduidend groter is dan initieel geschat. In Figuur 17 wordt vastgesteld dat zich afwaarts van deze locatie een soort tweede watersprong voordoet. Er lijkt zich een soort dubbele watersprong te vormen.



Rechts: stroomsnelheden: links stromingspatroon

Figuur 17 - Stromingspatroon in verticaal vlak in het midden van kanaal toegevoegd debiet voor simulatie S1

Op basis van voorgaande observaties wordt het volgende besloten:

- De monding van de vispassage bevindt zich bij deze condities op de juiste locatie. Het einde van de watersprong afwaarts van de stuwen bevindt zich namelijk juist opwaarts van de monding van de vispassage. Echter het debiet over de stuwen is in de CFD-simulaties beduidend hoger dan het geschatte debiet, wat mogelijk veroorzaakt wordt door de vereenvoudigde uitvoering van de stuwen in het CFD-model. Dit zal ook de lengte van de watersprong beïnvloeden. De stuw in de CFD-simulaties heeft bij deze simulatie namelijk een breedte van 12.5 m en betreft een overlaat met scherpe rand, terwijl deze in werkelijkheid een breedte heeft van 10.0 m en eerder een brede overlaat met lengte 1.40 m betreft.
- De opening in de geleidingswand tussen het kanaal van het toegevoegd debiet en de afwaartse zijde van de vispassage heeft een negatief effect op de lokstroom en daarmee de vindbaarheid van de vispassage. Door deze opening wordt namelijk $\frac{3}{4}$ van het vispassagedebiet weggezogen naar het kanaal voor het toegevoegd debiet. Daardoor is ter plaatse van de samenvloeiing met het kanaal voor het toegevoegd debiet maar $\frac{1}{4}$ van het debiet van de vispassage aanwezig voor de lokstroom naar de vispassage.
- Het wegzuigen van het vispassage debiet door de opening in de geleidingswand zorgt tevens voor een slechtere verhouding tussen de stroming uit het kanaal van het toegevoegd debiet en het vispassagedebiet ter plaatse van de samenvloeiing. De stroming van het toegevoegd debiet wordt versterkt terwijl de lokstroom naar de vispassage wordt verzwakt. Dit zorgt er ook voor dat er in de koker door de muur van de kleine sluis, met andere woorden de monding van de vispassage, een grote neer ontstaat met een lengte die bijna gelijk is aan de lengte van deze koker. Deze stroming met relatief hoge stroomsnelheden en de grote neer in de koker zorgen ervoor dat de vispassage slecht bereikbaar is voor vissen via deze koker.
- Het oorspronkelijke doel van de opening in de geleidingswand tussen vispassage en kanaal voor toegevoegd debiet was het creëren van een ontsnappingsmogelijkheid terug naar de vispassage voor vissen die in het kanaal voor het toegevoegd debiet zouden terechtkomen bij vooral lagere waarden van het toegevoegd debiet. Bij hogere debieten, zoals de 4 m³/s, blijkt dat niet nodig aangezien stroomsnelheden tussen de geleidingswanden in het kanaal hoog genoeg blijven om niet passeerbaar te zijn voor de vissen.
- De watersprong afwaarts van de hefschuif in het kanaal voor het toegevoegd debiet heeft een lengte die groter is dan de lengte van de woelkom. Hierbij wordt wel opgemerkt dat de lengte van de woelkom in de CFD-simulatie iets korter was als volgde uit de berekeningen in het voorontwerp. Het einde van de watersprong bevindt zich ter plaatse van de geleidingswanden in het kanaal voor het toegevoegd debiet. Door het aanzuigen van vispassagedebiet door de opening in de geleidingswand tussen vispassage en kanaal voor toegevoegd debiet ontstaat als het ware een dubbele watersprong in de woelkom.

Op basis van deze besluiten wordt vooreerst voorgesteld om bij de vervolgsimulaties in het 3D CAD-model de stuwen in de stuwgeul te beschouwen met de correcte breedte van de overstortklep en als een brede overlaat (met een breedte gelijk aan de lengte van de overstortklep). Dit zal het debiet over de stuwen, het stromingspatroon afwaarts van de stuwen en de lengte van de watersprong afwaarts van de stuwen beïnvloeden. Daarnaast wordt voorgesteld om de opening in de geleidingsmuur tussen het kanaal voor toegevoegd debiet en de vispassage te sluiten. Om de neer in de koker onder de muur van de kleine sluis te verkleinen of te vermijden wordt tevens voorgesteld om deze geleidingswand tussen het kanaal voor het toegevoegd debiet en de vispassage te verkorten tot net na de bocht. Op deze wijze zouden de stroming door deze buitenste opening van het kanaal voor het toegevoegd debiet en de stroming van de vispassage zich samen kunnen voegen voordat de stroming uit het linkerdeel van het kanaal van het toegevoegd debiet aan deze stroming toegevoegd wordt.

5 Simulatie S2

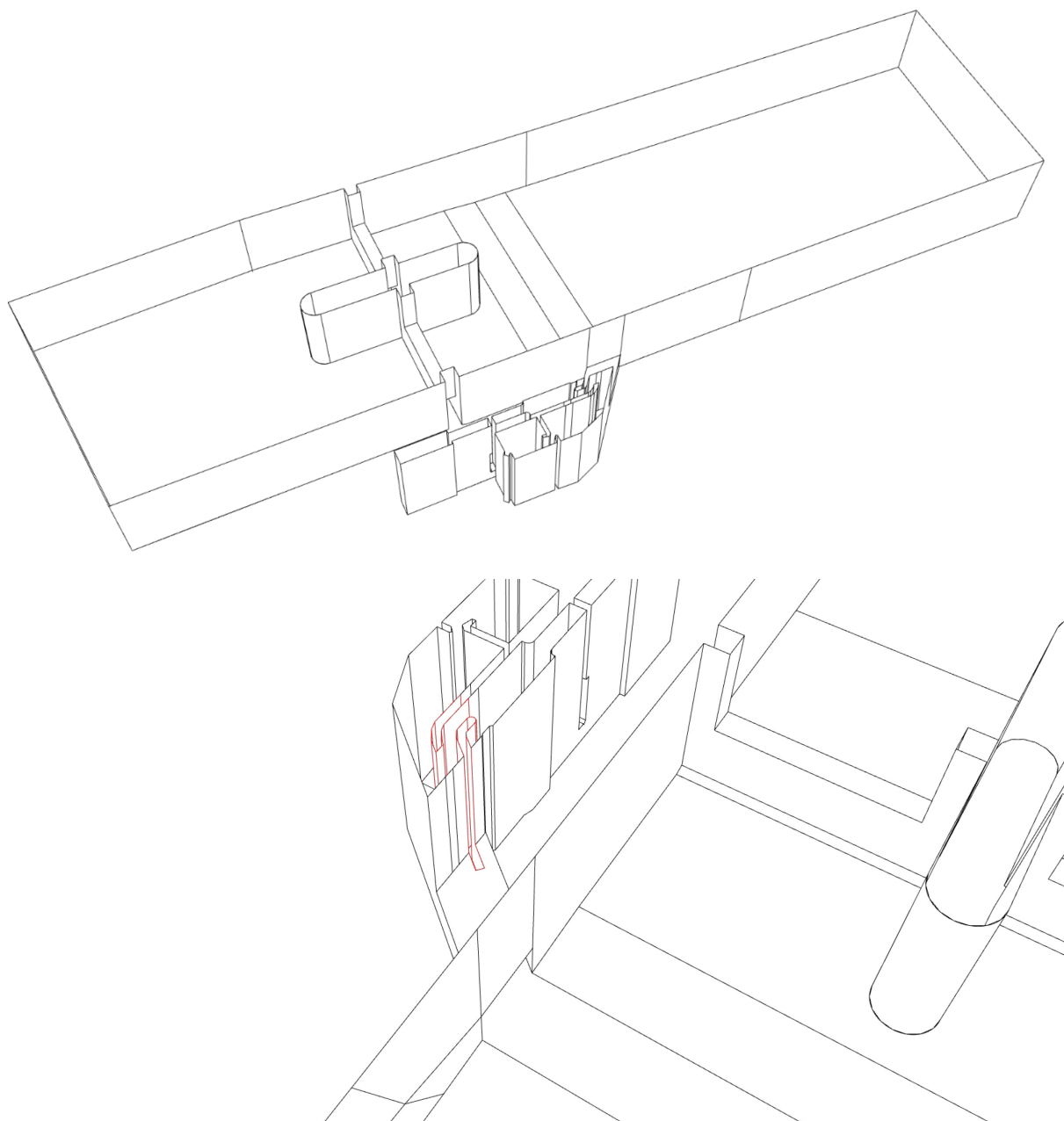
5.1 3D CAD-model

Op basis van de resultaten van simulatie S1 zijn aan het 3D CAD-model een aantal wijzigingen aangebracht. Figuur 18 geeft een aanzicht van het gewijzigde 3D CAD-model, in Figuur 19 is een bovenaanzicht gegeven. In beide figuren is zowel het volledige 3D CAD-model afgebeeld als een detail van het kanaal voor het toegevoegd debiet en de monding van de vispassage in de afwaartse stuwgeul. Figuur 20 toont een doorsnede van het 3D CAD-model ter plaatse van de beide stuwen en een doorsnede ter plaatse van het kanaal voor het toegevoegd debiet.

Uit de resultaten van simulatie S1 (zie paragraaf 4.2) volgt dat het correct beschouwen van de geometrie van de stuwen noodzakelijk is om de stroming over de stuwen en de lengte van de watersprong afwaarts van de stuwen realistisch te simuleren. Uit Figuur 10 in paragraaf 4.1 volgt dat de breedte van de overstortkleppen van de beide stuwen 10.0 m bedraagt, terwijl de totale breedte van de stuw 12.5 m is. Daarnaast vormt de stuw bij volledig neergelaten kleppen eerder een brede overlaat dan een overlaat met scherpe wand. Om die reden zijn de stuwen met de juiste breedte en lengte in het model ingebouwd. De volledig horizontaal neergelaten klep heeft daarbij een peil van +7.27 mTAW over een lengte van 1.40 m (zie Figuur 18). In het 3D CAD-model is bijgevolg de volledige lengte van de kleppen van de stuwen beschouwd.

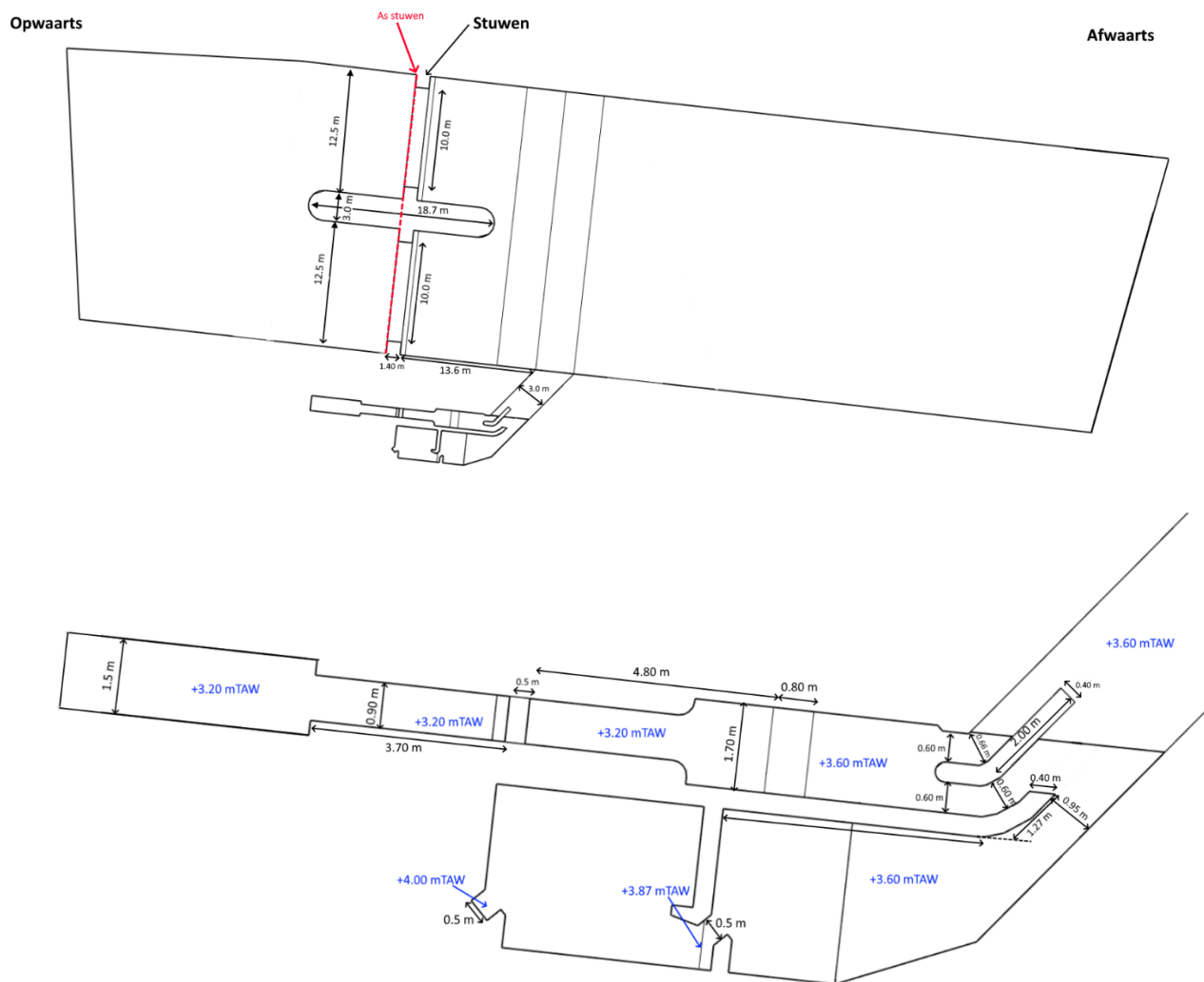
De hierboven beschreven wijziging aan het 3D CAD-model betreft de hydraulische randvoorwaarde voor de simulatie. Daarnaast is ook de geometrie van de vispassage en het kanaal voor het toegevoegd debiet in het 3D CAD-model gewijzigd. Met oog op het ontwerp van de geleidingswanden van het toegevoegd debiet is naar aanleiding van de resultaten van simulatie S1 de opening in de geleidingsmuur tussen het kanaal voor het toegevoegd debiet en de vispassage gesloten (zie Figuur 18). Deze opening zorgde namelijk voor een verlies aan attractiviteit van de lokstroom vanuit het meest afwaartse slot. Daarnaast is de lengte van de buitenste geleidingswand van het toegevoegd debiet ingekort. Dit betreft de wand tussen de vispassage en het kanaal van het toegevoegd debiet. De afmetingen en de locatie van de andere geleidingswand, de tussenmuur in het kanaal voor het toegevoegd debiet, is niet gewijzigd. Om te verhinderen dat vissen stroomopwaarts het kanaal voor het toegevoegd debiet in zwemmen wordt in beide delen van het kanaal voor het toegevoegd debiet best een rooster voorzien zo ver mogelijk aan afwaartse zijde van het kanaal. Deze roosters, alsook de sponningen in de muur voor deze roosters zijn niet beschouwd in de CFD-modellering en zijn ook niet ingetekend in Figuur 18.

De afmetingen van de woelkom afwaarts van de hefschuif in het kanaal voor het toegevoegd debiet en de hoogte van de opening onder deze hefschuif zijn niet gewijzigd.



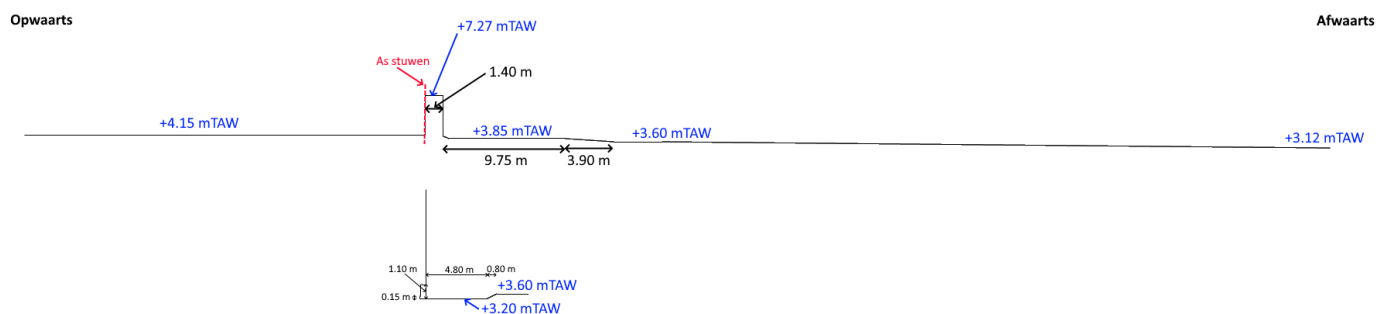
Boven: aanzicht volledig 3D CAD-model; onder: detail ter plaatse van monding vispassage in stuwgeul

Figuur 18 – Aanzicht 3D CAD-model voor simulatie S2



Boven: bovenaanzicht volledig 3D CAD-model; onder: detail ter plaatse van kanaal voor toegevoegd debiet en vispassage

Figuur 19 – Bovenaanzicht 3D CAD-model voor simulatie S2



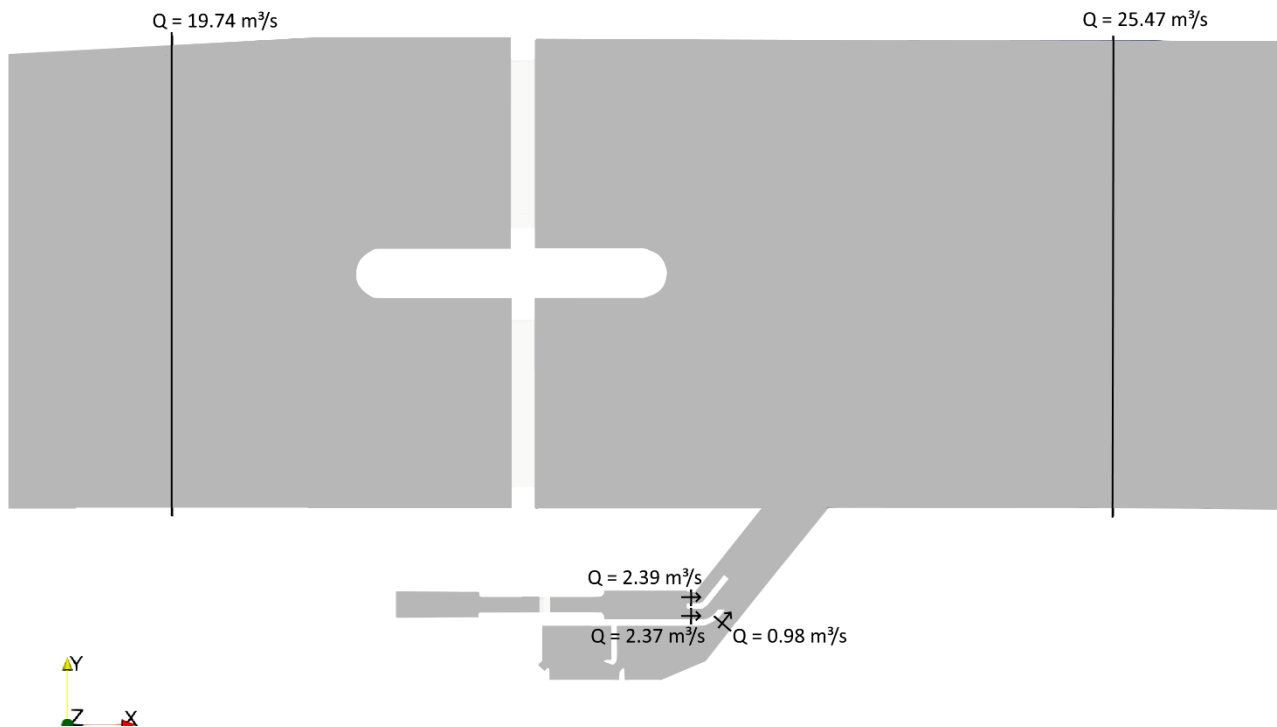
Boven: doorsnede ter plaatse van stuwen; onder: doorsnede ter plaatse van kanaal voor toegevoegd debiet

Opmerking: enkel het gedeelte van het kanaal voor het toegevoegd debiet ter plaatse van de hefschuif en de woelkom zijn afgebeeld

Figuur 20 – Doorsnedes 3D CAD-model voor simulatie S2

5.2 Resultaten CFD-simulatie

Figuur 21 toont voor deze simulatie het debiet in de opwaartse en afwaartse stuwgeul en op verschillende locaties in de samenvloeiing van het kanaal voor het toegevoegd debiet en de vispassage.



Figuur 21 – Optredende debieten op maatgevende locaties voor simulatie S2

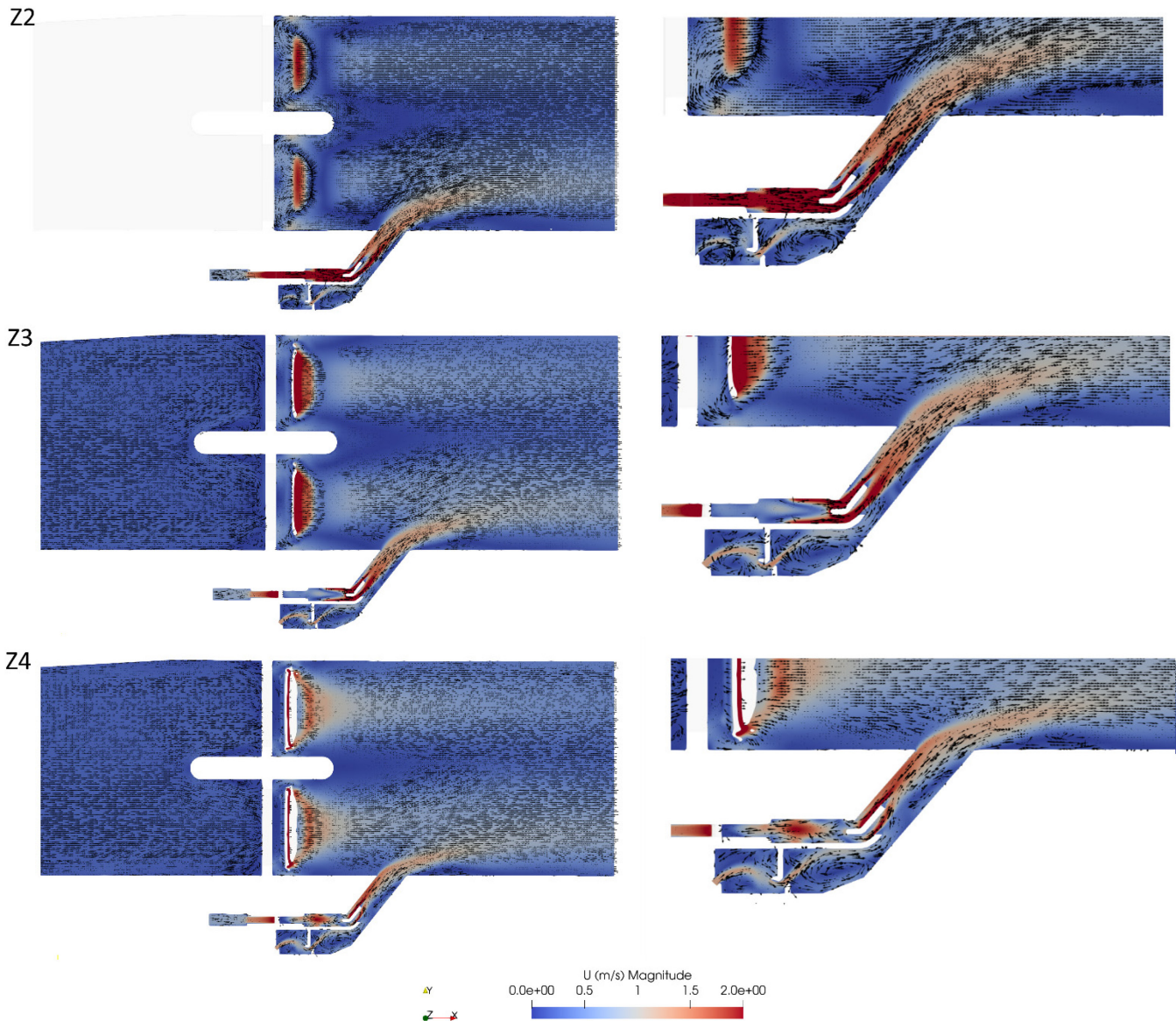
Uit Figuur 21 volgt dat het debiet over de stuwen, i.e. het debiet in het opwaarts gedeelte van de stuwgeul, $19.7 \text{ m}^3/\text{s}$ bedraagt. Dit is slechts 10 % lager dan het geschatte debiet van $22 \text{ m}^3/\text{s}$. Het beschouwen van de juiste breedte voor de klep van de stuwen en het beschouwen van een brede overlaat heeft bijgevolg gezorgd voor een berekening van het debiet over de stuwen dewelke dichter bij de initiële schatting ligt.

Het totale debiet door het kanaal voor het toegevoegd debiet bedraagt $4.76 \text{ m}^3/\text{s}$. Dit is 20 % hoger dan het vooropgestelde debiet van $4.0 \text{ m}^3/\text{s}$. Analoog als in paragraaf 4.2 wordt met dit berekende debiet aan de hand van de formulering voor het debiet onder een hefschuif uit hoofdstuk 3 een debietscoëfficiënt gelijk aan 0.77 berekend. Dit is beduidend hoger dan de waarde van 0.65 uit Vercruyssen *et al.* (2019). Een verklaring voor deze afwijking tussen de debietscoëfficiënt uit de CFD-modellering en deze uit de literatuur is niet gevonden. Om deze afwijking tussen berekend debiet en vooropgesteld debiet te vermijden wordt om die reden bij simulatie S3 en simulatie S4 het vooropgestelde debiet rechtstreeks opgelegd ter plaatse van de opening onder de hefschuif.

De geleidingswand in het midden van het kanaal voor het toegevoegd debiet verdeelt het totale debiet van $4.76 \text{ m}^3/\text{s}$ in twee zo goed als gelijke debieten door de beide delen van dit kanaal. Het debiet door het rechter gedeelte (dat het dichtst tegen de vispassage gelegen is) bedraagt $2.37 \text{ m}^3/\text{s}$, wat beperkt kleiner is dan het debiet van $2.39 \text{ m}^3/\text{s}$ door het linker gedeelte.

Aangezien de opening in de geleidingswand tussen kanaal voor toegevoegd debiet en de vispassage niet meer aanwezig is, blijft het debiet vanuit de vispassage ter plaatse van de samenvloeiing gelijk aan $1 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figuur 22 geeft voor deze simulatie een grafische voorstelling van het stromingspatroon in drie horizontale vlakken Z2, Z3 en Z4. Hierbij is zowel het stromingspatroon afgebeeld in het volledige model domein als een detail van het stromingspatroon ter plaatse van de samenvloeiing van het kanaal voor het toegevoegd debiet en de vispassage.



Links: volledig modeldomein; rechts detail ter plaatse van monding vispassage in afwaartse stuwgeul

Figuur 22 – Stromingspatroon in horizontale vlakken voor simulatie S2

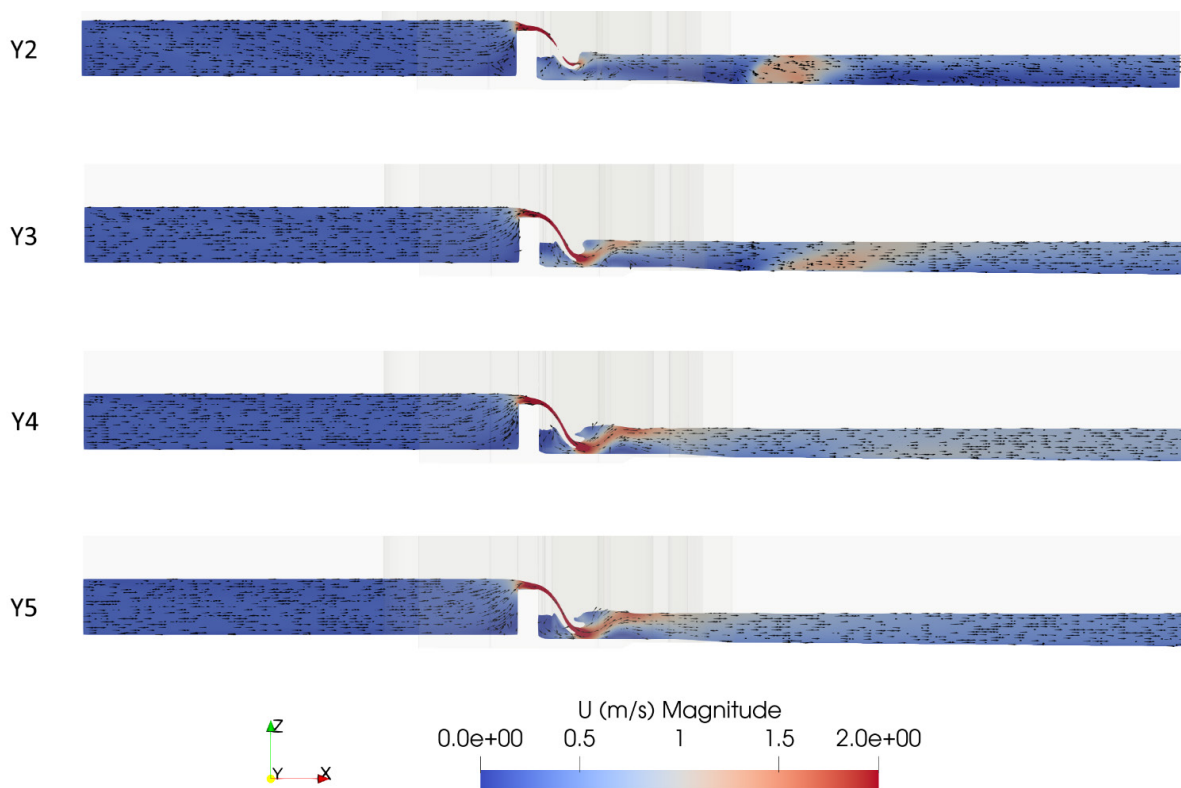
Net als bij simulatie S1 volgt uit Figuur 22 dat zich afwaarts van beide stuwen loslating voordoet aan de zijkant van de middenpijler. In vergelijking met simulatie S1 bevindt het loslatingspunt zich beduidend dichterbij de stuwen en is de neer ook langer en heeft deze een grotere diameter. Dit is het gevolg van het feit dat de breedte van de stuw in het model verkleind is van 12.5 m naar 10.0 m. Door de grotere lengte van de neer bevindt de samenvoeging van de stroming uit beide stuwgeulen zich ook meer naar afwaarts dan bij simulatie S1. Op de drie beschouwde hoogtes doet zich één stroming in het midden van de betreffende helft van de stuwgeul voor. De stroomsnelheid in het midden van de stuwgeul ter plaatse van de monding van de vispassage bedraagt 0.5 m/s à 1.0 m/s, wat beduidend lager is dan de stroomsnelheid van 1.0 m/s à 1.5 m/s bij simulatie S1.

Net als bij simulatie S1 doet zich afwaarts van de monding van de vispassage in de stuwgeul aan rechteroever een neer voor. Echter de diameter van deze neer is kleiner dan bij simulatie S1. De stroming uit de vispassage leunt meer aan tegen de rechteroever van de stuwgeul dan bij simulatie S1.

Net afwaarts van de vispassage zelf doet zich nog altijd een neer voor door het feit dat de stroming uit het laatste slot van de vispassage gericht is naar de geleidingsmuur tussen het kanaal voor toegevoegd debiet en de vispassage. De stroomsnelheid ten gevolge van deze neer tegen de geleidingsmuur bedraagt 0.5 m/s à 1.0 m/s. Dit is laag genoeg om vissen toe te laten tegen de stroming in naar het laatste slot van de vispassage te zwemmen. Deze neer is gelijk aan de neren die ook in de bekkens ontstaan maar is iets groter omdat er geen slot meer volgt. Gezien de duidelijk hoofdstroom uit het slot naar de samenvloeiing vormt deze geen probleem met oog op de vindbaarheid van de vispassage.

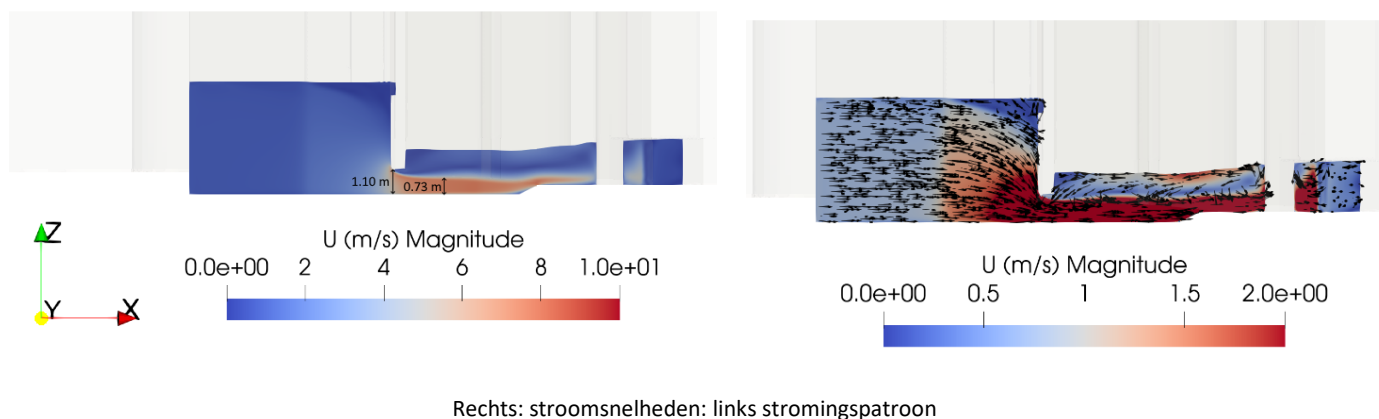
Ter plaatse van de samenvloeiing van het kanaal voor het toegevoegd debiet en de vispassage volgt uit Figuur 22 dat de stroming uit het deel van de vispassage met debiet $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$ aangezogen wordt door de sterke stroming uit het kanaal voor het toegevoegd debiet. Hierdoor ontstaat in de koker onder de muur van de kleine sluis nog altijd een neer met een lengte gelijk aan de afstand tussen het uiteinde van de geleidingsmuur tussen vispassage en kanaal voor toegevoegd debiet en de monding van de vispassage in de afwaartse stuwgeul. Het inkorten van de lengte van de geleidingsmuur bij deze simulatie zorgt ervoor dat de neer langer wordt dan bij simulatie S1. De diameter van de neer blijft ongeveer dezelfde. Omwille van de relatief lage stroomsnelheden (ca. 1.0 m/s) aan de rand van deze neer juist naast de stroming met hogere stroomsnelheid uit het kanaal voor toegevoegd debiet, kunnen vissen de vispassage nog bereiken. Bijgevolg wordt een aanpassing van de lengte van deze geleidingsmuur niet meer nodig geacht.

Figuur 23 geeft een voorstelling van het stromingspatroon in 4 verticale vlakken in de afwaartse stuwgeul. Uit deze figuur volgt dat de stroming over de stuwen niet meer kleeft tegen de stuw, wat volgens de verwachtingen is, omdat in het numeriek model nu lucht aangezogen kan worden achter vallende straal. De stroming over de stuwen raakt de bodem op ongeveer één vierde van de afstand tussen de stuw en de monding van de vispassage. De lengte van de watersprong is beduidend korter dan deze bij simulatie S1. Het einde van de watersprong bevindt zich op ongeveer de helft van de afstand tussen de stuw en de monding van de vispassage. Dit is het gevolg van het lagere berekende debiet over de stuwen.



Figuur 23 – Stromingspatroon in verticale vlakken in de afwaartse stuwgeul voor simulatie S2

Figuur 24 geeft een grafische voorstelling van het stromingspatroon in een verticaal vlak in het midden van het kanaal voor het toegevoegd debiet. De stroomsnelheden in deze figuur zijn zowel afgebeeld op een schaal met een maximale waarde van 10 m/s als op een schaal met een maximale waarde gelijk aan 2 m/s. Uit deze figuur volgt dat in de woelkom afwaarts van de hefschuif aan de bodem stroomsnelheden voorkomen tussen 6.0 m/s en 8.0 m/s. Ook juist afwaarts van de drempel van de woelkom doen zich nog hoge stroomsnelheden voor. De watersprong afwaarts van de hefschuif strekt zich uit tot voorbij de drempel van de woelkom tot tegen de geleidingsmuur in het kanaal voor toegevoegd debiet. De geleidingsmuur zorgt hier voor verdere energiedissipatie. In tegenstelling tot simulatie S1, ontstaat nu één grote watersprong afwaarts van de hefschuif in het kanaal voor het toegevoegd debiet. Uit Figuur 24 volgt dat de jet afwaarts van de hefschuif in hoogte afneemt van 1.10 m onder de hefschuif tot 0.73 m. Dit is een contractie met 66 %.



Figuur 24 – Stromingspatroon in verticaal vlak in het midden van kanaal toegevoegd debiet voor simulatie S2

Op basis van bovenstaande wordt het volgende besloten:

- Het debiet over de stuwen is 10 % lager is dan het geschatte debiet. De stroming over de stuwen raakt de bodem op ongeveer één vierde van de afstand tussen de stuw en de monding van de vispassage. De lengte van de watersprong is beduidend korter dan deze bij simulatie S1. Het einde van de watersprong bevindt zich op ongeveer de helft van de afstand tussen de stuw en de monding van de vispassage.
- Net afwaarts van de vispassage zelf doet zich een neer voor door het feit dat de stroming uit het laatste slot van de vispassage gericht is naar de geleidingsmuur tussen kanaal voor toegevoegd debiet en de vispassage. Deze neer is gelijk aan de neren die ook in de bekkens ontstaan maar is iets groter omdat er geen slot meer volgt. Gezien de duidelijk hoofdstroom uit het slot naar de samenvloeiing vormt deze geen probleem met oog op de vindbaarheid van de vispassage. De stroomsnelheid naast de geleidingsmuur is ook laag genoeg om vissen toe te laten tegen de stroming in naar het laatste slot van de vispassage te zwemmen.
- Aan het uiteinde van de geleidingswand tussen het kanaal voor het toegevoegd debiet en de vispassage wordt de stroming uit de vispassage met debiet $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$ aangezogen door de sterke stroming uit het kanaal voor het toegevoegd debiet. Hierdoor ontstaat in de koker onder de muur van de kleine sluis, analoog aan simulatie S1, nog altijd een neer met een lengte gelijk aan de afstand tussen het uiteinde van de geleidingswand tussen de vispassage en het kanaal voor het toegevoegd debiet en de monding van de vispassage in de afwaartse stuwgeul. Het inkorten van de lengte van de geleidingswand bij deze simulatie zorgt ervoor dat de neer langer wordt dan bij simulatie S1. De diameter van de neer blijft ongeveer dezelfde. Omwille van de relatief lage stroomsnelheden (ca. 1.0 m/s) aan de rand van deze neer juist naast de stroming met hogere stroomsnelheid uit het kanaal voor het toegevoegd debiet, kunnen vissen de vispassage nog bereiken. Bijgevolg wordt een verdere aanpassing van de lengte van deze geleidingsmuur voor simulatie S3 niet meer nodig geacht.
- In de woelkom afwaarts van de hefschuif ontstaan stroomsnelheden aan de bodem tussen 6.0 m/s en 8.0 m/s. Ook juist afwaarts van de drempel van de woelkom doen zich nog hoge stroomsnelheden

voor. De watersprong afwaarts van de hefschuif strekt zich, analoog aan simulatie S1, uit tot voorbij de drempel van de woelkom tot tussen de geleidingswanden in het kanaal voor het toegevoegd debiet. De geleidingswanden zorgen hier voor de verdere energiedissipatie. In tegenstelling tot simulatie S1 ontstaat nu één grote watersprong afwaarts van de hefschuif in het kanaal voor het toegevoegd debiet.

- Het totale debiet in het kanaal voor het toegevoegd debiet bedraagt $4.76 \text{ m}^3/\text{s}$, wat 20 % hoger is dan het vooropgestelde debiet van $4.0 \text{ m}^3/\text{s}$. Analoog als bij simulatie S1 zorgt de tussenmuur in het kanaal voor het toegevoegd debiet ervoor dat het debiet door de twee openingen aan elkaar gelijk is.

Uit deze besluiten volgt dat de lengte van de watersprong bij overstorting over de stuwen met een debiet van $19.7 \text{ m}^3/\text{s}$ beduidend korter is dan de afstand tussen de stuwen en de monding van de vispassage. Dit doet vermoeden dat de toestand met onderstroming met hogere debieten over de stuwen wel eens meer bepalend zou kunnen zijn wat betreft de lengte van de watersprong dan de toestand met overstorting. Om die reden wordt voorgesteld om voor simulatie S3 een toestand met onderstroming met hogere debieten over de stuwen te beschouwen.

Uit de resultaten volgt dat de lengte van de geleidingswand in het kanaal voor het toegevoegd debiet en de lengte van de geleidingsmuur tussen kanaal voor toegevoegd debiet en de vispassage voldoet. Er ontstaat nog een neer in de koker onder de muur van de kleine sluis, maar verondersteld wordt dat deze de vissen niet verhindert om in de richting van de vispassage te zwemmen. Bijgevolg wordt voor simulatie S3 de lengte en de locatie van de beide geleidingsmuren niet meer gewijzigd.

Het debiet in het kanaal voor het toegevoegd debiet is nog 20 % hoger dan het vooropgestelde debiet van $4.0 \text{ m}^3/\text{s}$. De positie van de hefschuif kan altijd nog verlaagd worden om dit vooropgestelde debiet te bekomen. Echter dit zal iteratief moeten gebeuren. Een nieuwe (lagere) positie van de hefschuif wordt voorgesteld, de CFD-simulatie wordt uitgevoerd, het nieuwe totale debiet onder de hefschuif volgt uit de CFD-simulatie, waarna mogelijk opnieuw een nieuwe positie van de hefschuif kan voorgesteld worden. Omdat dit eerder tijdrovend is, wordt gekozen om bij de simulatie S3 het vooropgestelde debiet van $4.0 \text{ m}^3/\text{s}$ rechtstreeks op te leggen ter plaatse van de hefschuif in het kanaal voor het toegevoegd debiet, waarbij rekening wordt gehouden met de te verwachten contractie van de stroming ten gevolge van de hefschuif.

6 Simulatie S3

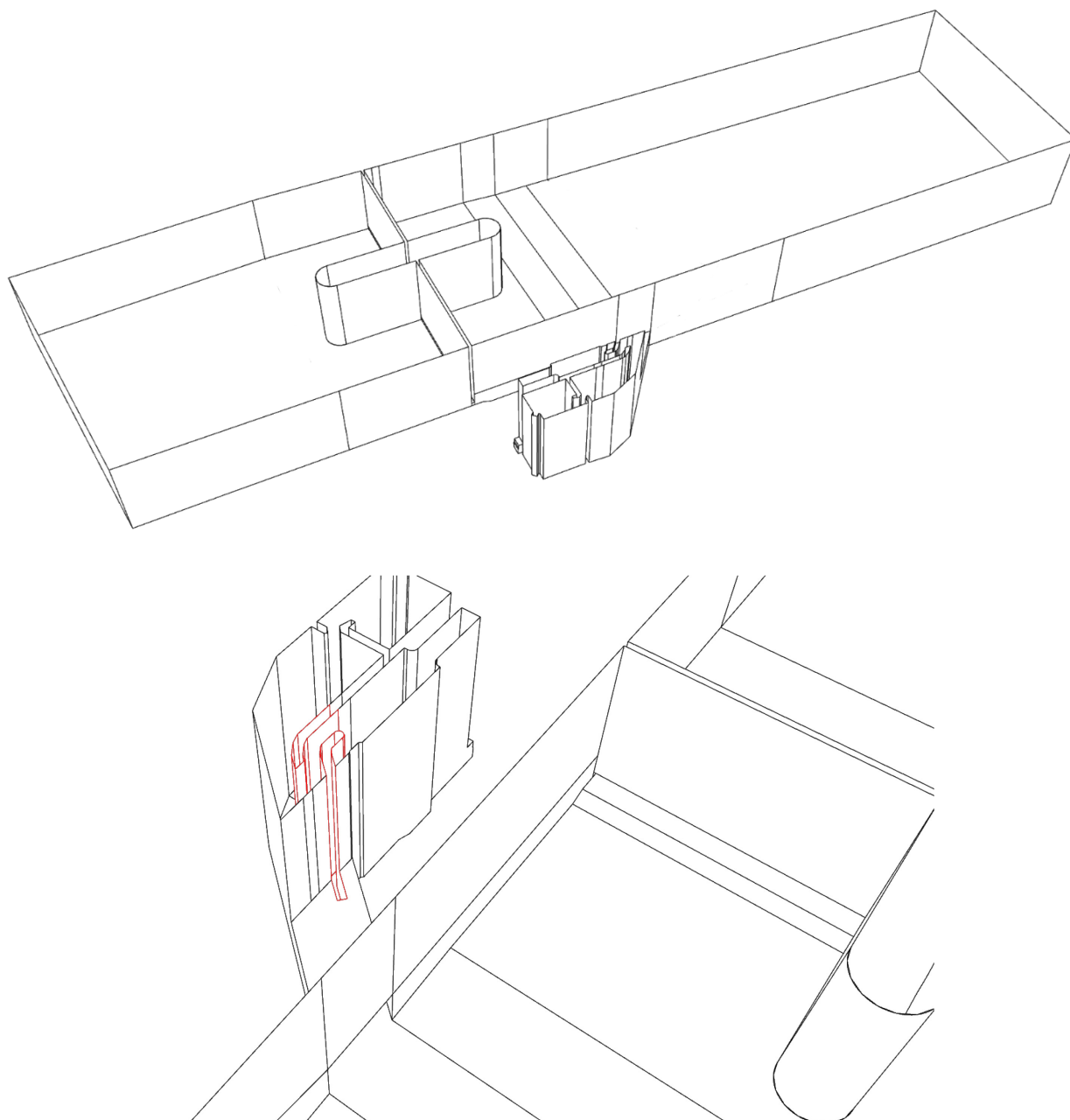
6.1 3D CAD-model

Op basis van de resultaten van simulatie S2 zijn in het 3D CAD-model een aantal wijzigingen aangebracht. Figuur 25 geeft een aanzicht van het gewijzigde 3D CAD-model, in Figuur 26 is een bovenaanzicht gegeven. In beide figuren is zowel het volledige 3D CAD-model afgebeeld als een detail van het kanaal voor het toegevoegd debiet en de monding van de vispassage in de afwaartse stuwgeul. Figuur 27 toont een doorsnede van het 3D CAD-model ter plaatse van de beide stuwen en een doorsnede ter plaatse van het kanaal voor het toegevoegd debiet.

Op basis van de resultaten van simulatie S2 werd besloten dat de monding van de vispassage in de afwaartse stuwgeul voldoende ver afwaarts verwijderd is van de stuwen bij overstorting over de stuwen. Echter de resultaten doen vermoeden dat bij onderstroming met hogere debieten mogelijk een grotere lengte van de watersprong berekend wordt. Om die reden zijn voor simulatie S3 stuwen met onderstroming ingebouwd in het 3D CAD-model. Hiervoor is een opening met hoogte 0.35 m boven de bodem van de opwaartse stuwgeul open gelaten, waarbij op basis de schaalmodelmetingen uit De Laet *et al.*, (1988) een debiet van circa 60 m³/s wordt verwacht. De dikte van de hefschuiven van de stuwen werd op basis van de oorspronkelijke ontwerptekeningen in De Laet *et al.*, (1988) geschat op 0.30 m. Deze dikte is beschouwd om de loslating aan opwaartse zijde van de stuwen bij onderstroming zo correct mogelijk te modelleren. De (natte) breedte onder elk van de hefschuiven is 12.5 m (totale natte breedte is daarmee 25 m).

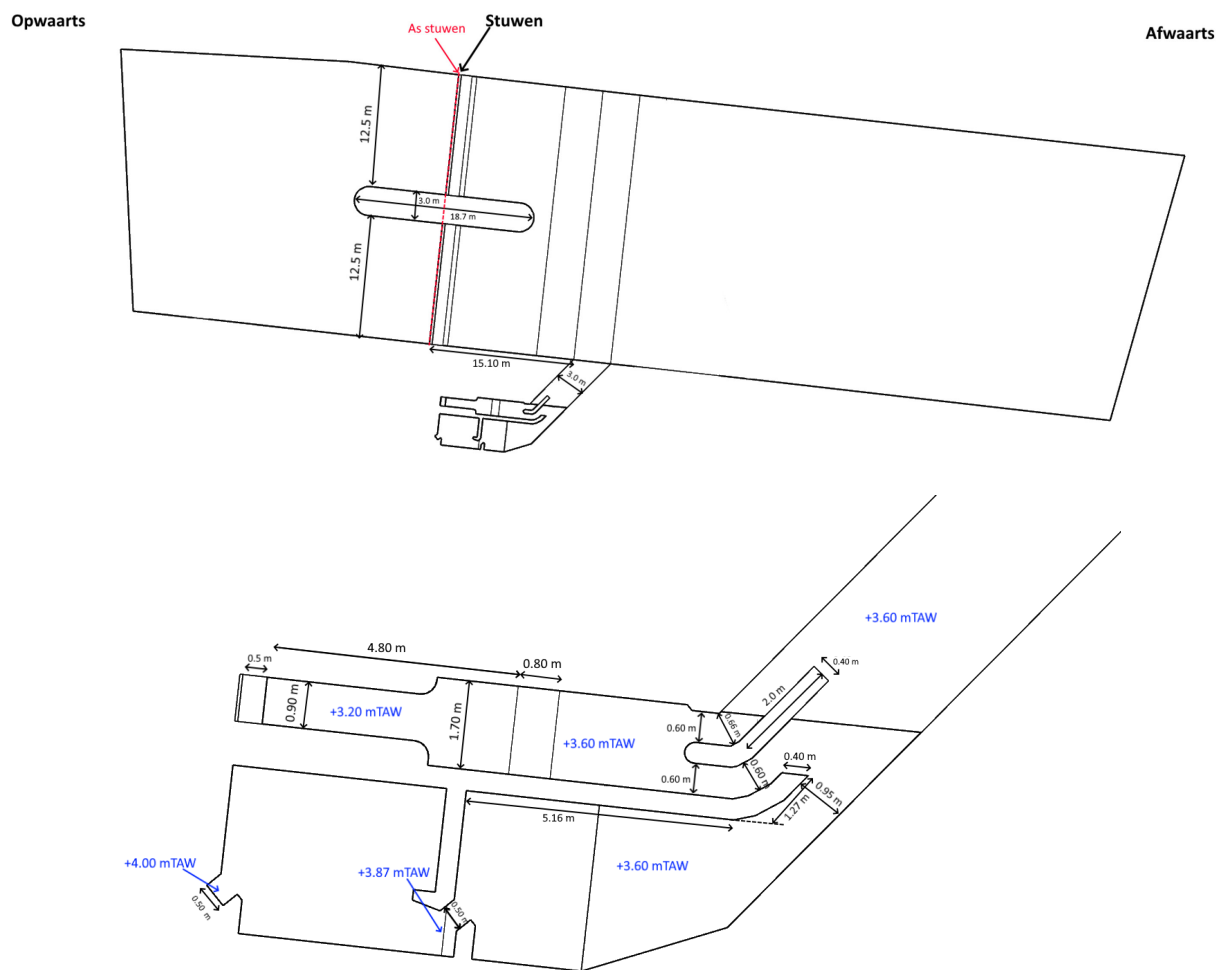
Bij simulatie S2 werd in het kanaal voor het toegevoegd debiet een hoger debiet bekomen dan verwacht werd op basis van de 1D berekeningen (namelijk 4.0 m³/s). Aangezien 4.0 m³/s het maximale debiet is dat in het voorontwerp van de vispassage beschouwd wordt, is er bij simulatie S3 voor gekozen om dit maximale debiet ter plaatse van de opening onder de hefschuif op te leggen in plaats van een debiet dat ontstaat na opleggen van het opwaarts waterpeil en de hefhoogte van de hefschuif. Bijgevolg is in het 3D CAD-model voor simulatie S3 het gedeelte van het kanaal voor het toegevoegd debiet opwaarts van de hefschuif niet meer aanwezig. Hierbij moet dan wel rekening gehouden worden met de contractie van de stroming onder de hefschuif. De opening onder de hefschuif is daarom verkleind van 1.00 m naar 0.61 m (zie ook hoofdstuk 3).

Bovenstaande wijzigingen aan het 3D CAD-model voor deze simulatie betreffen de hydraulische randvoorwaarden voor de simulatie. Aan de geometrie van de vispassage en het kanaal voor het toegevoegd debiet werden geen wijzigingen meer aangebracht ten opzichte van simulatie S2. De lengte en het bodempeil van de woelkom afwaarts van de hefschuif in het kanaal voor het toegevoegd debiet zijn niet gewijzigd ten opzichte van de voorgaande simulaties. Ook de locatie en positie van de geleidingswanden in het kanaal voor het toegevoegd debiet zijn dezelfde gebleven als bij simulatie S2.



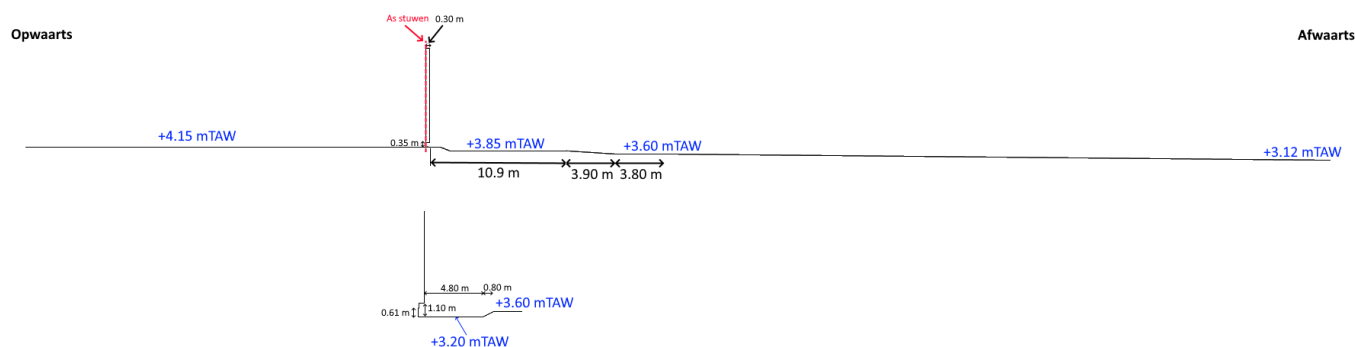
Boven: aanzicht volledig 3D CAD-model; onder: detail ter plaatse van monding vispassage in stuwgeul

Figuur 25 – Aanzicht 3D CAD-model voor simulatie S3



Boven: bovenaanzicht volledig 3D CAD-model; onder: detail ter plaatse van kanaal voor toegevoegd debiet en vispassage

Figuur 26 – Bovenaanzicht 3D CAD-model voor simulatie S3

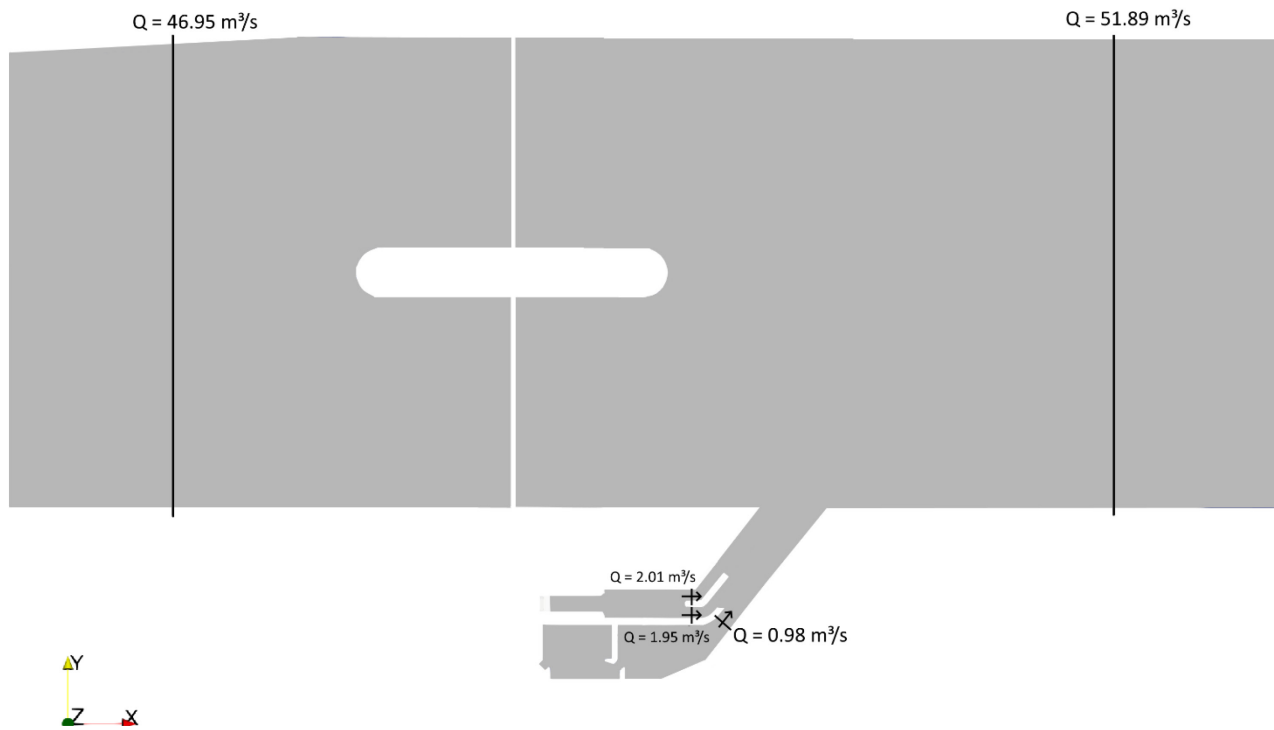


Boven: doorsnede ter plaatse van stuwen; onder: doorsnede ter plaatse van kanaal voor toegevoegd debiet
Opmerking: enkel het gedeelte van het kanaal voor het toegevoegd debiet ter plaatse van de hefschuif en de woelkom zijn afgebeeld

Figuur 27 – Doorsnedes 3D CAD-model voor simulatie S3

6.2 Resultaten CFD-simulatie

Figuur 28 toont voor deze simulatie het debiet in de opwaartse en afwaartse stuwgeul en op verschillende locaties in de samenvloeiing van het kanaal voor het toegevoegd debiet en de vispassage.

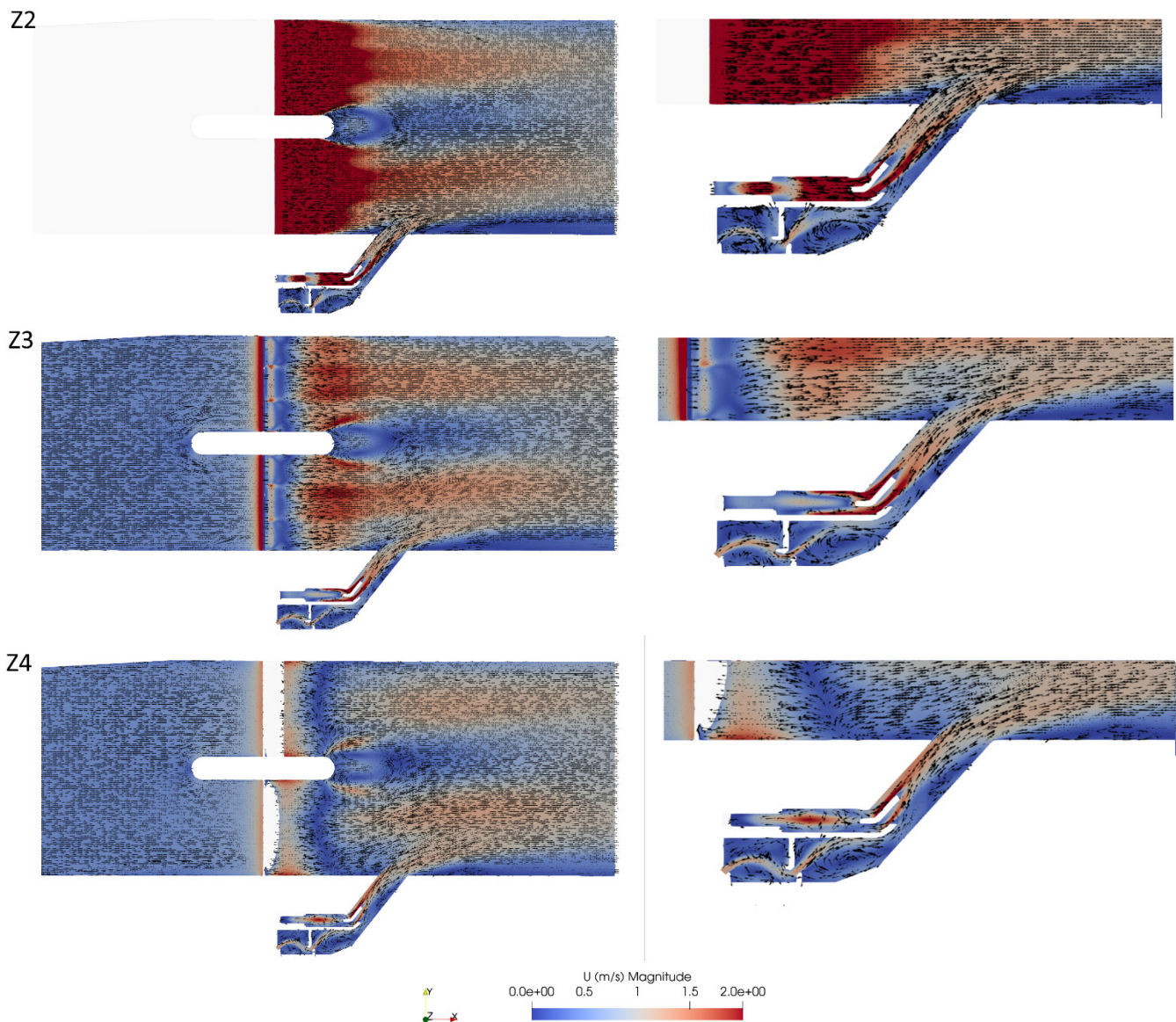


Figuur 28 – Optredende debieten op maatgevende locaties voor simulatie S3

Uit Figuur 28 volgt dat het debiet over de stuwen, i.e. het debiet in het opwaarts gedeelte van de stuwgeul, $47.0 \text{ m}^3/\text{s}$ bedraagt. Dit is beduidend lager dan het vooropgestelde debiet van $60 \text{ m}^3/\text{s}$, wat overgenomen is uit De Laet *et al.*, (1988) en bepaald is op basis van schaalmodelonderzoek. Toepassen van de formulering voor debiet onder een hefschuif uit hoofdstuk 3 met het berekende debiet van $47.0 \text{ m}^3/\text{s}$, een totale breedte gelijk aan 25.0 m en een hefhoogte van de stuw gelijk aan 0.35 m geeft een debietscoëfficiënt gelijk aan 0.78 . Dit is dezelfde waarde als de debietscoëfficiënt berekend voor de hefschuif in het kanaal voor het toegevoegd debiet (zie paragraaf 4.2). Voor het verschil tussen de uit de CFD-modellering berekende debietscoëfficiënten en deze uit de literatuur is geen verklaring gevonden.

Door het rechtstreeks opleggen van het debiet van $4.0 \text{ m}^3/\text{s}$ ter plaatse van de hefschuif in het kanaal voor het toegevoegd debiet, bedraagt het totale debiet in het kanaal voor het toegevoegd debiet exact $4.0 \text{ m}^3/\text{s}$. De geleidingswand in het midden van het kanaal voor het toegevoegd debiet verdeelt het totale debiet van $4.0 \text{ m}^3/\text{s}$ in twee gelijke debieten door de beide gedeelten van het kanaal. Het debiet door het gedeelte van het kanaal dat het dichtst tegen de vispassage gelegen is, bedraagt $1.95 \text{ m}^3/\text{s}$, wat beperkt lager is dan het debiet van $2.01 \text{ m}^3/\text{s}$ door het andere gedeelte. Het debiet vanuit de vispassage blijft ter plaatse van de samenvloeiing gelijk aan $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figuur 29 geeft voor deze simulatie een grafische voorstelling van het stromingspatroon in drie horizontale vlakken Z2, Z3 en Z4. Hierbij is zowel het stromingspatroon afgebeeld in het volledige model domein als een detail van het stromingspatroon ter plaatse van de samenvloeiing van het kanaal voor het toegevoegd debiet en de vispassage.



Links: volledig modeldomein; rechts detail ter plaatse van monding vispassage in afwaartse stuwgeul

Figuur 29 – Stromingspatroon in horizontaal vlakken voor simulatie S3

Uit Figuur 29 volgt vooreerst dat de stroming afwaarts van de beide stuwen loslaat aan het afwaartse uiteinde van de middenpijler tussen de beide delen van de stuwgeul. Door het hogere debiet over de stuwen is dit punt van loslating meer naar afwaarts verschoven dan bij simulatie S2. De neer afwaarts van deze middenpijler heeft ook een beduidend kortere lengte dan bij simulatie S2. De samenvoeging van de stroming uit de beide delen van de stuwgeul vindt plaats ter plaatse van de monding van de vispassage in de afwaartse stuwgeul, wat dichtert tegen de stuwen is dan bij de simulatie met overstorting.

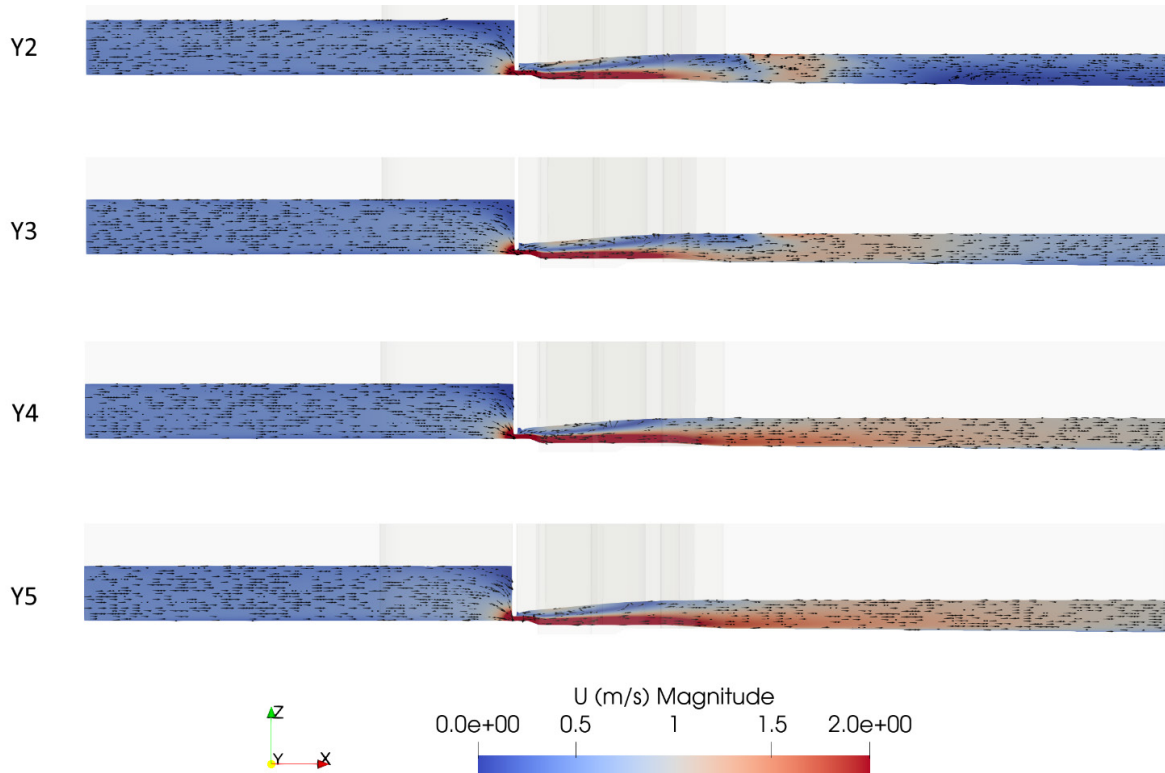
Analoog aan simulatie S2 met overstorting over de stuwen wordt afwaarts van de monding van de vispassage in de stuwgeul aan rechteroever een neer gevormd. De breedte van deze neer is kleiner dan deze bij simulatie S2 met het lagere debiet. De stroming uit de vispassage leunt nog iets meer aan tegen de rechteroever van de stuwgeul.

Het stromingspatroon in de vispassage is niet gewijzigd ten opzichte van deze bij simulatie S2. De geometrie van de vispassage is niet gewijzigd, enkel het toegevoegd debiet is beperkt verlaagd naar $4.0 \text{ m}^3/\text{s}$. Ter plaatse van de samenvloeiing van de vispassage en het kanaal voor het toegevoegd debiet wordt de stroming uit de vispassage aangezogen door de stroming met hogere snelheden uit het kanaal voor het toegevoegd debiet.

Op deze wijze ontstaat, analoog als bij simulatie S2, een neer in de koker onder de muur van de kleine sluis met een lengte gelijk aan deze bij simulatie S2. Echter de diameter van deze neer is groter dan deze bij simulatie S2, omwille van het iets lagere debiet uit de beide delen van het kanaal voor het toegevoegd debiet. Aan de rand van deze neer is een zone aanwezig met stroomsnelheden van ca. 1.0 m/s, die toelaat dat vissen de vispassage via deze weg kunnen bereiken.

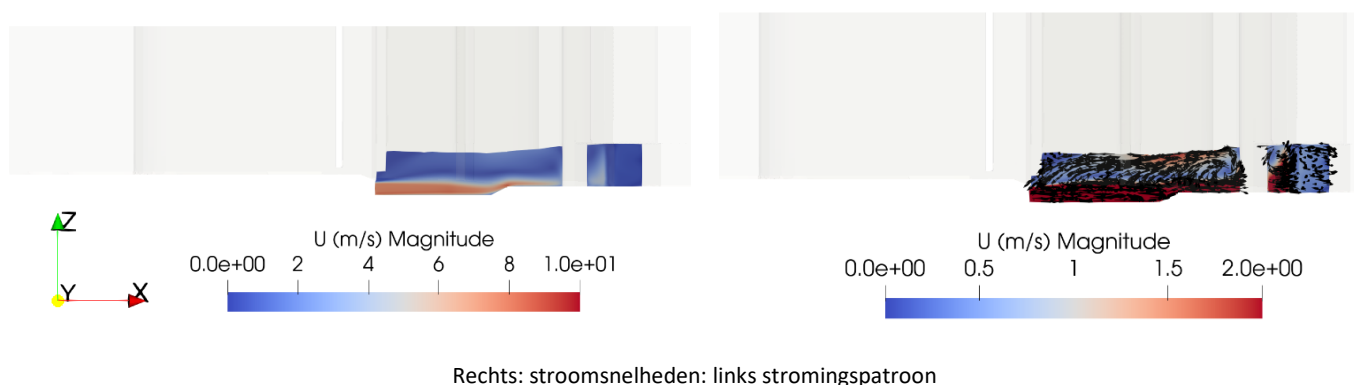
Hoewel de debietverdeling over de twee delen van het kanaal van het toegevoegd debiet zo goed als gelijk is (zie Figuur 28), is tussen de twee delen van het kanaal voor het toegevoegd debiet wel een verschil merkbaar over de waterdiepte. In de koker door de sluismuur worden ten gevolge van de stroming uit het rechterdeel van het kanaal voor het toegevoegd debiet aan de bodem hogere stroomsnelheden berekend dan in de stroming uit het linkerdeel van het kanaal voor het toegevoegd debiet (zie Z2 in Figuur 29). Hoger in de waterkolom is dit gespiegeld en worden in de koker ten gevolge van de stroming uit het linkerdeel van het kanaal voor het toegevoegd debiet hogere stroomsnelheden berekend als ten gevolge van de stroming uit het rechterdeel (zie Z4 in Figuur 29). Dit zorgt er voor dat er aan de bodem (circa eerste 50 cm) een pluim met stroomsnelheden hoger dan 1.5 m/s ontstaat uit het rechterdeel van het kanaal van het toegevoegd debiet (dit is het middelste deel ter plaatse van de samenvloeiing), dewelke zich in het midden over een groot deel van de kokerlengte uitstrekt. Hierdoor kunnen vissen die in het linkerdeel van de koker zwemmen niet naar de ingang van de vispassage zwemmen, wat nadelig is voor de vindbaarheid en bereikbaarheid van de vispassage.

Figuur 30 geeft een voorstelling van het stromingspatroon in 4 verticale vlakken in de afwaartse stuwgeul. Hieruit volgt dat juist afwaarts van de stuwen hoge stroomsnelheden aan de bodem van 8 m/s worden berekend. Deze hoge stroomsnelheden nemen af tot ca 6.0 m/s ter plaatse van het midden tussen de stuwen en de monding van de vispassage in de stuwgeul. Het einde van de watersprong, bepaald als de meest afwaartse locatie waar de vectoren aan de oppervlakte in de richting van de stuwen gericht zijn, bevindt zich juist opwaarts van de monding van de vispassage in de stuwgeul.



Figuur 30 – Stromingspatroon in verticale vlakken in de afwaartse stuwgeul voor simulatie S3

Figuur 31 geeft een grafische voorstelling van het stromingspatroon in een verticaal vlak in het midden van het kanaal voor het toegevoegd debiet. De stroomsnelheden in deze figuur zijn zowel afgebeeld op een schaal met een maximale waarde van 10 m/s als op een schaal met een maximale waarde gelijk aan 2 m/s. Deze figuur toont analoge resultaten als bij simulatie S2, aangezien het debiet van 4.0 m³/s bij deze simulatie slechts beperkt lager is dan dit van simulatie S2. Afwaarts van de hefschuif wordt geen contractie van de stroming meer berekend. Echter de contractie is reeds in rekening gebracht bij het bepalen van de hefhoogte van de hefschuif. In de woelkom afwaarts van de hefschuif worden aan de bodem stroomsnelheden berekend tussen 6.0 m/s en 8.0 m/s. Ook juist afwaarts van de drempel van de woelkom doen deze hoge stroomsnelheden zich nog voor. De watersprong afwaarts van de hefschuif strekt zich ook bij deze simulatie uit tot voorbij de drempel van de woelkom tot tegen de geleidingsmuur in het kanaal voor toegevoegd debiet. Deze geleidingsmuur zorgt hier wederom voor de verdere energiedissipatie.



Figuur 31 – Stromingspatroon in verticaal vlak in het midden van kanaal toegevoegd debiet voor simulatie S3

Op basis van voorgaande wordt het volgende besloten:

- Het debiet dat door de opening onder de stuwen stroomt is in de CFD-modellering beduidend lager dan het verwachte debiet zoals overgenomen uit De Laet *et al.*, (1988) en bepaald op basis van schaalmodelonderzoek. De debietscoëfficiënt voor de stuwen berekend uit de CFD-modellering is gelijk aan de waarde in paragraaf 4.2 berekend voor de hefschuif in het kanaal voor het toegevoegd debiet. Voor het verschil tussen de uit de CFD-modellering berekende debietscoëfficiënten en bijbehorende debieten en deze uit de literatuur is geen verklaring gevonden.
- Het einde van de watersprong afwaarts van de stuwen bevindt zich juist opwaarts van de monding van de vispassage in de stuwgeul. Dit betekent dat de vispassagemonding zich in dit bovengrens scenario (Q10%) niet te dicht aan de stuwen bevindt.
- Analooq aan simulatie S2 met overstorting over de stuwen en een lager debiet wordt afwaarts van de monding van de vispassage in de stuwgeul aan rechteroever een neer gevormd. De stroming uit de vispassage leunt nog iets meer aan tegen de rechteroever van de stuwgeul, maar sluit nog goed aan bij de hoofdstroom in de stuwgeul.
- Het stromingspatroon in de vispassage is niet gewijzigd ten opzichte van deze bij simulatie S2. De geometrie van de vispassage is niet gewijzigd, enkel het toegevoegd debiet is beperkt verlaagd naar 4.0 m³/s. Ter plaatse van de samenvloeiing van de vispassage en het kanaal voor het toegevoegd debiet wordt de stroming uit de vispassage aangezogen door de stroming met hogere snelheden uit het kanaal voor het toegevoegd debiet. Op deze wijze ontstaat, analooq als bij simulatie S2, een neer in de koker onder de muur van de kleine sluis met een lengte gelijk aan deze bij simulatie S2. Echter de diameter van deze neer is groter dan deze bij simulatie S2, omwille van het iets lagere debiet uit de beide delen van het kanaal voor het toegevoegd debiet. Dit maakt dat de zone met lagere stroomsnelheden die het voor vissen mogelijk maakt om de vispassage te vinden wel groter wordt dan bij simulatie S2.

- In de koker door de sluismuur wordt aan de bodem (circa eerste 50 cm) een pluim met stroomsnelheden hoger dan 1.5 m/s gevormd uit het rechterdeel van het kanaal van het toegevoegd debiet (dit is het middelste deel van de samenvloeiing). Deze pluim strekt zich in het midden over een groot deel van de kokerlengte uit. Dit zorgt ervoor dat vissen die in het linkerdeel van de koker zwemmen niet naar de ingang van de vispassage kunnen zwemmen, wat nadelig is voor de vindbaarheid en bereikbaarheid van de vispassage.
- Analooq als bij simulatie S2 strekt de watersprong afwaarts van de hefschuif in het kanaal voor het toegevoegd debiet zich ook bij deze simulatie uit tot voorbij de drempel van de woelkom tot tegen de geleidingsmuur in het kanaal voor toegevoegd debiet. Deze geleidingsmuur zorgt hier wederom voor de verdere energiedissipatie.

Uit deze resultaten volgt dat er nog steeds een neer aanwezig is in de koker (monding). Met oog op een goede lokstroom zou deze neer vermeden moeten worden, maar omwille van ruimtelijke en bouwkundig randvoorwaarden kan dit enkel door aanpassing van de verhouding tussen toegevoegd debiet en het vispassagedebiet. Dit geeft dan weer aanleiding tot een lager lokstroomdebiet, wat ook niet wenselijk is. Om die reden is voor simulatie S4 besloten om geen wijzigingen meer aan te brengen aan de lengte van de geleidingsmuren in het kanaal voor toegevoegd debiet en is besloten om nog een simulatie uit te voeren met een lager debiet door het kanaal voor het toegevoegd debiet om de stroompatronen in de monding en het kanaal te kennen bij een lager debiet.

Wel is het nog van belang dat de pluim met hogere stroomsnelheden afkomstig uit het rechter deel van het kanaal van het toegevoegd debiet wordt voorkomen door de debietverdeling over de twee delen van het kanaal voor het toegevoegd debiet te wijzigen. Op basis van expert judgement wordt aanbevolen om de middelste geleidingswand te verschuiven zodat het linker gedeelte van het kanaal voor het toegevoegd debiet 0.7 m breed wordt en het rechtergedeelte 0.5 m. Op deze wijze zouden hogere stroomsnelheden moeten optreden aan de linkerwand van de koker door de sluismuur waardoor een soort trechter wordt gevormd naar de ingang van de vispassage. Dit besluit en deze aanbevelingen op basis van de resultaten van simulatie S3 zijn echter geformuleerd na uitvoering van simulatie S4, waardoor deze niet beschouwd zijn bij uitvoeren van simulatie S4.

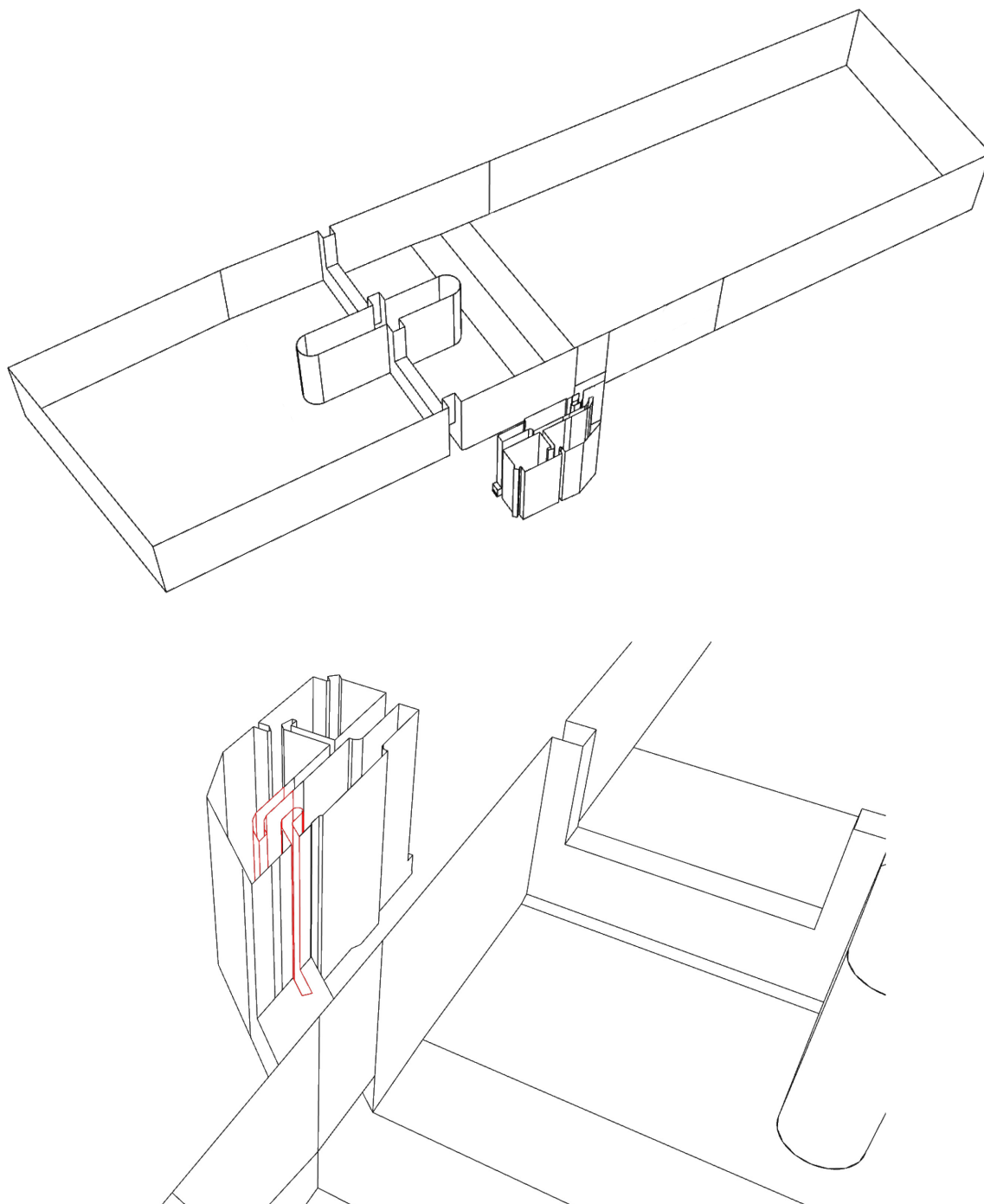
7 Simulatie S4

7.1 3D CAD-model

De laatste simulatie S4 betreft een simulatie, waarbij het debiet in het kanaal voor het toegevoegd debiet verlaagd wordt naar $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$, i.e. een even groot debiet als in de vispassage. Aangezien deze grootte van het toegevoegd debiet enkel zal optreden bij kleinere debiet over de stuwen, wordt deze simulatie uitgevoerd met eenzelfde geometrie voor de beide stuwen als bij simulatie S2, namelijk overstorting bij volledig platgelegde stuwkleppen. De positie, de geometrie en het kruinpeil van de stuwen zijn voor deze simulatie volledig overgenomen van deze bij simulatie S2 (zie paragraaf 5.1). De geometrie van de geleidingswanden in het kanaal voor het toegevoegd debiet is dezelfde als deze voor simulatie S3 (zie paragraaf 6.1).

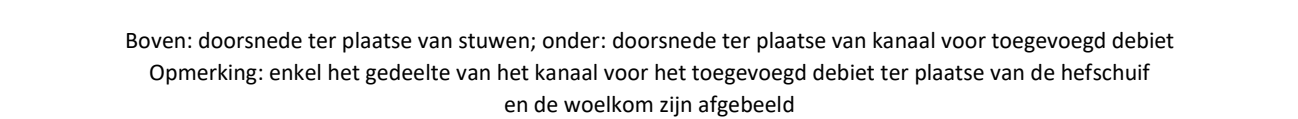
Figuur 32 geeft een aanzicht van het 3D CAD-model voor deze simulatie, in Figuur 33 is een bovenaanzicht gegeven. In beide figuren is zowel het volledige 3D CAD-model afgebeeld als een detail van het kanaal voor het toegevoegd debiet en de monding van de vispassage in de afwaartse stuwgeul. Figuur 34 toont een doorsnede van het 3D CAD-model ter plaatse van de beide stuwen en een doorsnede ter plaatse van het kanaal voor het toegevoegd debiet.

Het lagere debiet van $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$ in het kanaal voor het toegevoegd debiet wordt, analoog aan simulatie S3, opgelegd ter plaats van de hefschuif. De opening onder de hefschuif bedraagt hierbij 0.15 m (zie hoofdstuk 3).



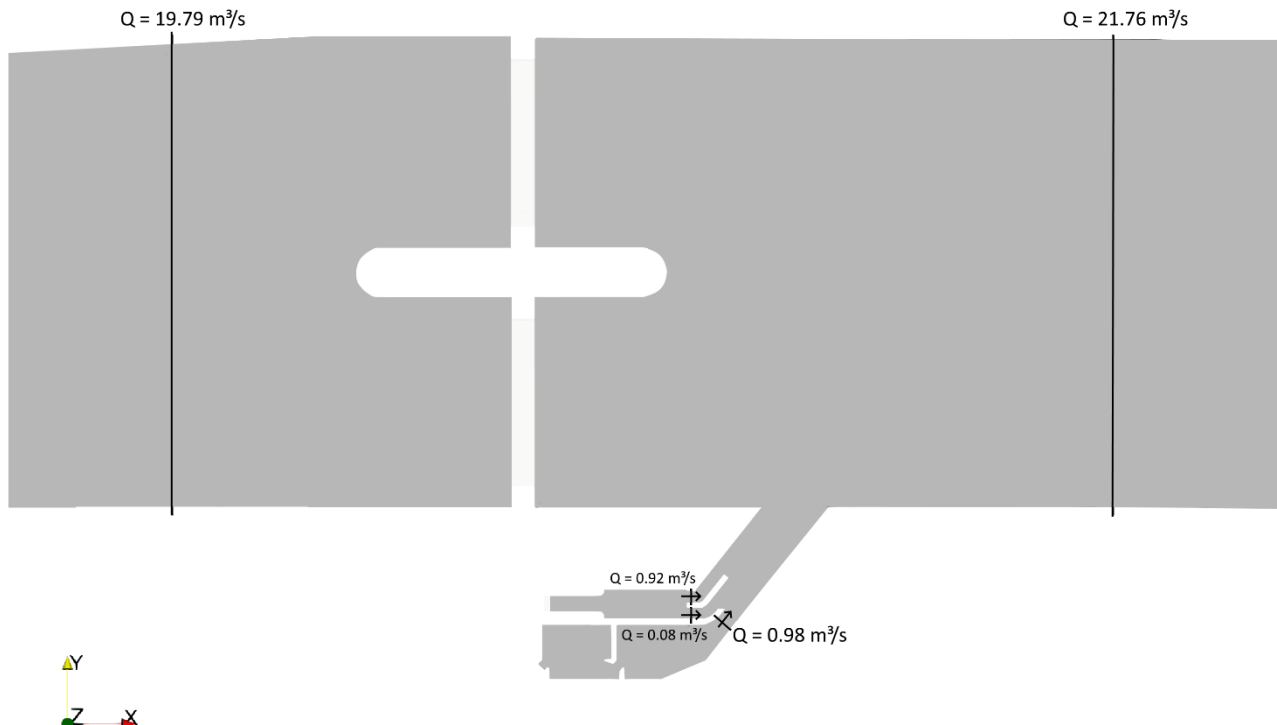
Boven: aanzicht volledig 3D CAD-model; onder: detail ter plaatse van monding vispassage in stuwgeul

Figuur 32 – Aanzicht 3D CAD-model voor simulatie S4



7.2 Resultaten CFD-simulatie

Figuur 35 toont voor deze simulatie het debiet in de opwaartse en afwaartse stuwgeul en op verschillende locaties in de samenvloeiing van het kanaal voor het toegevoegd debiet en de vispassage.

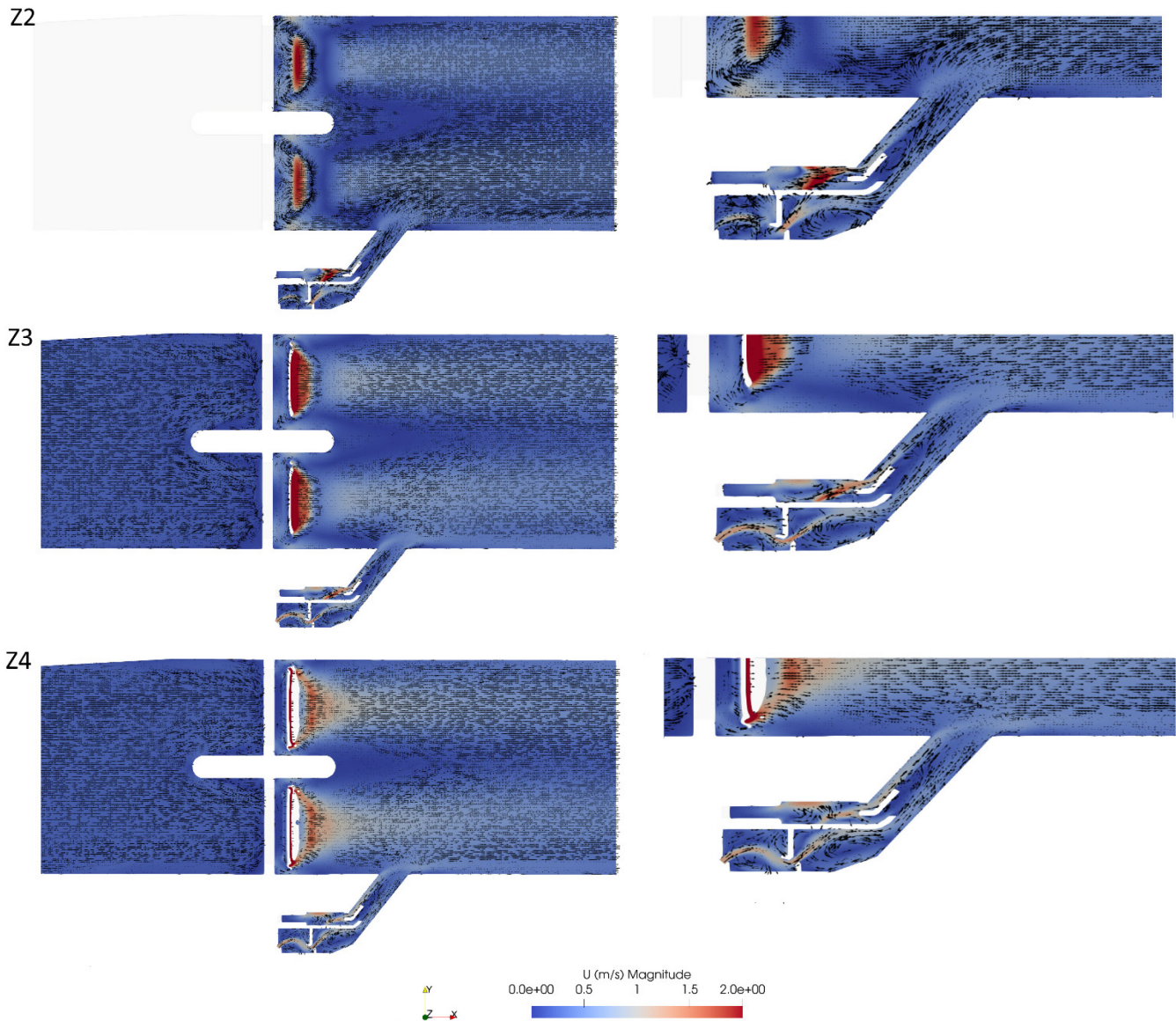


Figuur 35 – Optredende debieten op maatgevende locaties voor simulatie S4

Aangezien de geometrie van de stuwen identiek is als deze bij simulatie S2, wordt eenzelfde debiet over de stuwen berekend als bij simulatie S2, i.e. $19.8 \text{ m}^3/\text{s}$.

Ter plaatse van de hefschuif in het kanaal voor het toegevoegd debiet wordt het debiet van $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$ opgelegd. In tegenstelling tot simulatie S3 (met debiet $4.0 \text{ m}^3/\text{s}$) zorgt de middelste geleidingswand in het kanaal voor het toegevoegd debiet nu niet meer voor een gelijke verdeling van het debiet over de beide delen van het kanaal. Het linker gedeelte voert nu bijna het volledige debiet ($0.92 \text{ m}^3/\text{s}$) af, terwijl de stroming door het rechter gedeelte met $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ nagenoeg stilvalt. Het debiet vanuit de vispassage blijft ter plaatse van de samenvloeiing gelijk aan circa $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figuur 36 geeft voor deze simulatie een grafische voorstelling van het stromingspatroon in drie horizontale vlakken Z2, Z3 en Z4. Hierbij is zowel het stromingspatroon afgebeeld in het volledige model domein als een detail van het stromingspatroon ter plaatse van de samenvloeiing van het kanaal voor het toegevoegd debiet en de vispassage.



Links: volledig model domein; rechts detail ter plaatse van monding vispassage in afwaartse stuwgeul

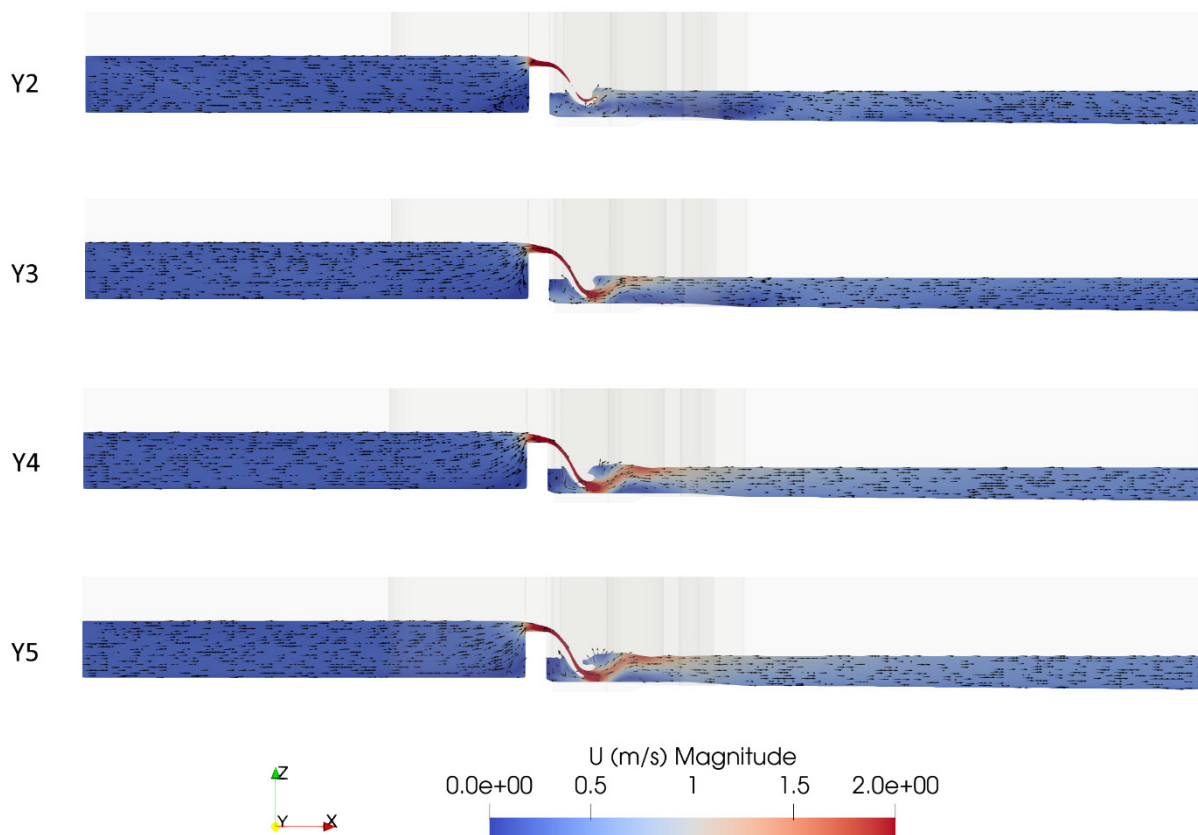
Figuur 36 – Stromingspatroon in horizontaal vlakken voor simulatie S4

Aangezien bij deze simulatie een identieke configuratie voor de stuw beschouwd wordt als bij simulatie S2, volgen uit Figuur 36 dezelfde vaststellingen en besluiten voor de stroming in de afwaartse stuwgeul als bij simulatie S2 (zie paragraaf 5.2). Omwille van het lagere debiet dat uit de monding van de vispassage de stuwgeul in stroomt, $2.0 \text{ m}^3/\text{s}$ bij deze simulatie in vergelijking met $5.7 \text{ m}^3/\text{s}$ bij simulatie S2, is de breedte van de neer aan de rechteroever van de stuwgeul afwaarts van de monding van de vispassage kleiner dan bij simulatie S2. Hierdoor leunt de stroming uit de monding van de vispassage nog meer aan tegen de rechteroever dan bij simulatie S2.

Net afwaarts van de vispassage is het stromingspatroon identiek als bij simulatie S2. Doordat het debiet uit het kanaal voor het toegevoegd debiet en het debiet door de vispassage aan elkaar gelijk zijn, doet zich geen aanzuiging van de stroming uit de vispassage naar het kanaal voor toegevoegd debiet meer voor. Aan het uiteinde van de geleidingsmuur tussen het kanaal voor het toegevoegd debiet en de vispassage doet zich wel een neer voor ten gevolge van loslatingseffecten. Deze neer blokkeert het gedeelte van het kanaal voor het toegevoegd debiet naast de geleidingswand tussen vispassage en kanaal toegevoegd debiet, waardoor het debiet door het rechter gedeelte van het kanaal van het toegevoegd debiet heel laag is. Er ontstaan twee

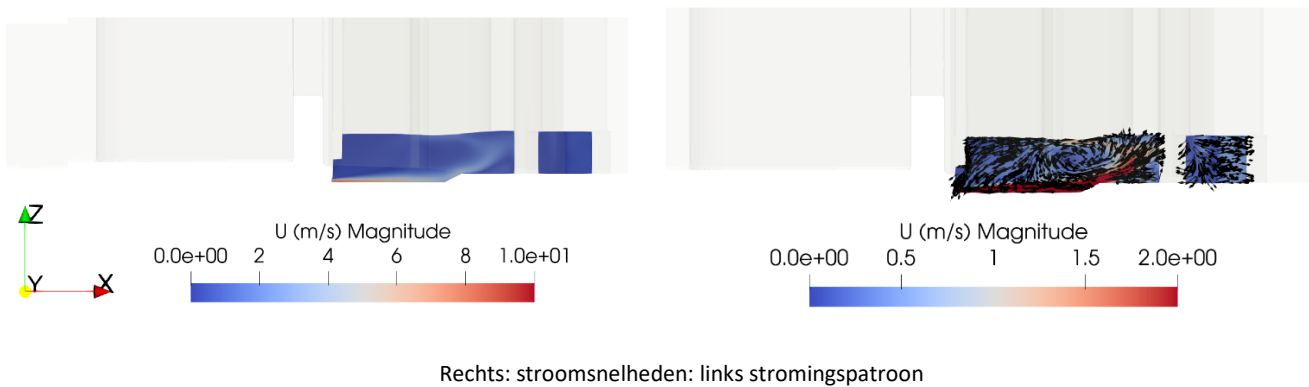
stromen naast elkaar, gescheiden door deze neer, namelijk de stroming uit de vispassage en de stroming uit het linker gedeelte van het kanaal voor het toegevoegd debiet. Naar het uiteinde van de koker door de sluismuur voegen deze beide stromen zich samen tot één stroom in de richting van de afwaartse stuwgeul. Doordat stroomsnelheden in beide delen van het kanaal van toegevoegd debiet lager zijn dan de kruissnelheden voor doelsoorten (namelijk $< 1.5 \text{ m/s}$) is het bij lage waarden van het toegevoegd debiet van belang dat zo ver mogelijk afwaarts en in beide delen van het kanaal roosters wordt geplaatst. Verwacht wordt echter wel dat deze lagere waarden voor het toegevoegd debiet relatief weinig voor komen.

Figuur 37 geeft een voorstelling van het stromingspatroon in 4 verticale vlakken in de afwaartse stuwgeul. Aangezien bij deze simulatie een identieke configuratie voor de stuw beschouwd wordt als bij simulatie S2, volgen uit deze figuur dezelfde vaststellingen en besluiten als bij simulatie S2 (zie paragraaf 5.2). Het einde van de watersprong bevindt zich ongeveer in de helft van de zone tussen de stuwen en de monding van de vispassage in de stuwgeul.



Figuur 37 – Stromingspatroon in verticale vlakken in de afwaartse stuwgeul voor simulatie S4

Figuur 38 geeft een grafische voorstelling van het stromingspatroon in vlak Y1 in het midden van het kanaal voor het toegevoegd debiet. De stroomsnelheden in deze figuur zijn zowel afgebeeld op een schaal met een maximale waarde van 10 m/s als op een schaal met een maximale waarde gelijk aan 2 m/s . Uit deze figuur volgt dat aan de bodem van de woelkom een stroomsnelheid berekend wordt tussen 6.0 m/s en 8.0 m/s . Deze stroomsnelheid neemt ter plaatse van de drempel van de woelkom af naar ca. 4.0 m/s . De watersprong betreft hier een verdronken watersprong. Ook bij deze simulatie strekt de watersprong zich uit tot voorbij de drempel van de woelkom en zorgt de geleidingsmuur in het midden van het kanaal voor toegevoegd debiet voor de verdere energiedissipatie.



Figuur 38 – Stromingspatroon in verticaal vlak in het midden van kanaal toegevoegd debiet voor simulatie S4

Op basis van voorgaande wordt het volgende besloten:

- Omwille van het lagere debiet dat uit de monding van de vispassage de stuwgeul in stroomt leunt de stroming uit de monding van de vispassage iets meer aan tegen de rechteroever dan bij de overige simulaties met een hoger debiet uit de monding van de vispassage.
- Ter plaatse van het afwaartse uiteinde van de geleidingsmuur tussen vispassage en kanaal voor toegevoegd debiet wordt de stroming uit de vispassage niet meer aangezogen naar de stroming uit het kanaal voor toegevoegd debiet. Op deze locatie doet zich wel nog een loslatingsneer voor, dewelke het rechter gedeelte van het kanaal voor het toegevoegd debiet blokkeert. Hierdoor wordt het volledige debiet door het linker gedeelte afgevoerd. Er ontstaan twee gescheiden stromen naast elkaar, gescheiden door deze neer, namelijk de stroming uit de vispassage en de stroming uit het kanaal voor het toegevoegd debiet. Naar het uiteinde van de koker onder de muur van de kleine sluis voegen deze beide stromen zich samen tot één stroom in de richting van de afwaartse stuwgeul.
- Doordat de stroomsnelheden in beide delen van het kanaal van toegevoegd debiet lager zijn dan de kruissnelheden voor doelsoorten (namelijk < 1.5 m/s) is het bij lage waarden van het toegevoegd debiet van belang dat er zo ver mogelijk afwaarts en in beide delen van het kanaal voor het toegevoegd debiet roosters worden geplaatst. Verwacht wordt echter wel dat deze lagere waarden voor het toegevoegd debiet relatief weinig voor komen.
- Ook bij deze simulatie strekt de watersprong in het kanaal van het toegevoegd debiet zich uit tot voorbij de drempel van de woelkom en zorgt de geleidingswand in het midden van het kanaal voor toegevoegd debiet voor de verdere energiedissipatie.

8 Conclusies

Bij de vernieuwing van het stuwsluiscomplex te Sint-Baafs-Vijve door de Vlaamse Waterweg nv wordt ook een oplossing voorzien voor het vismigratieknelpunt dat het huidige stuwsluiscomplex vormt. De bestaande stuw op de Oude Leiearm blijft hierbij behouden maar wordt wel gerenoveerd. Naast de stuw bevindt zich een kleinere (klasse I) sluis die niet meer operationeel is. In het voorontwerp wordt in deze kleinere (klasse I-) sluis een vertical slot vispassage voorzien met 24 sloten/bekken. De monding van de vispassage in de afwaartse stuwgeul bestaat uit een schuine koker door de bestaande sluismuur juist onder de waterlijn. Om een voldoende sterke lokstroom in het afwaarts pand te kunnen realiseren wordt een toegevoegd debiet voorzien via een kanaal met breedte 1.6 m parallel met de vispassage, gelegen tussen de vispassage en de sluiswand van de bestaande kleine sluis. Ter plaatse van de samenvloeiing van de stroming uit het kanaal voor het toegevoegd debiet en de stroming uit de vispassage worden twee geleidingswanden voorzien om de vorming van complexe stromingspatronen tegen te gaan. De buitenste geleidingsmuur op het einde van de vispassage leidt het volledige lokstroomdebiet, i.e. de som van het debiet door de vispassage en het toegevoegd debiet, naar de monding van de vispassage in de afwaartse stuwgeul.

Het hydraulisch ontwerp van de vispassage is door het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) uitgevoerd aan de hand van literatuurformules en expert judgement. Het complexe stromingspatroon ter plaatse van de samenvoeging van de stroming uit de vispassage met de stroming uit het kanaal voor het toegevoegd debiet en vervolgens de stroming door de opening van de monding van de vispassage in de afwaartse stuwgeul kunnen met deze onderzoeksmethodes niet met voldoende zekerheid bepaald worden. Om die reden heeft de Vlaamse Waterweg nv regio West (contactpersoon: Charlotte Beels) aan WL gevraagd om dit stromingspatroon nauwkeuriger te bepalen aan de hand van modellering met 3D Computational Fluid Dynamics (CFD).

Binnen dit project zijn 4 CFD-simulaties uitgevoerd. Tabel 3 geeft een korte beschrijving van deze simulaties. In deze tabel is ook het uit de CFD-simulaties berekende debiet over de stuwen en het berekende debiet onder de hefschuif in het kanaal voor het toegevoegd debiet gegeven.

Tabel 3 – Beschrijving uitgevoerde simulaties

Simulatie	Debiet stuwen	Toegevoegd debiet	Debiet vispassage	Beschrijving
S1	39.1 m ³ /s	4.6 m ³ /s	1 m ³ /s	Geometrie: voorontwerp vispassage (geometrie 1) Hydraulische randvoorwaarden: overstorting over de stuwen.
S2	19.7 m ³ /s	4.8 m ³ /s	1 m ³ /s	Geometrie: aanpassing geleidingsmuur tussen kanaal toegevoegd debiet en vispassage (geometrie 2). Hydraulische randvoorwaarden: overstorting over de stuwen; wijziging inbouw stuwen in het model.
S3	47.0 m ³ /s	4.0 m ³ /s	1 m ³ /s	Geometrie: geometrie 2. Hydraulische randvoorwaarden: onderstroming onder de stuwen; aanpassing randvoorwaarde kanaal voor toegevoegd debiet.
S4	19.8 m ³ /s	1.0 m ³ /s	1 m ³ /s	Geometrie: geometrie 2. Hydraulische randvoorwaarden: overstorting over stuwen; aanpassing randvoorwaarde kanaal voor toegevoegd debiet.

De uitvoering van de CFD-simulaties is door WL uitbesteed aan IMDC NV. De resultaten van de uitgevoerde CFD-simulaties zijn beschreven in Badano *et al.*, (2021).

Wat betreft **de locatie van de monding van de vispassage** in de afwaartse stuwgeul volgt uit de CFD-simulaties dat het einde van de watersprong afwaarts van de stuwen zich bij simulatie S1 juist opwaarts bevindt van de monding van de vispassage in de stuwgeul. Echter door een meer gedetailleerde modellering van de stuw in het 3D CAD-model bij simulatie S2 bevindt dit einde van de watersprong zich bij deze simulatie met onderstroming op ongeveer de helft van de afstand tussen de stuwen en de monding van de vispassage. Bij onderstroming onder de stuwen met een hoger debiet van 47.0 m³/s bevindt het einde van de watersprong zich juist opwaarts van de monding van de vispassage in de stuwgeul. Hieruit volgt dat geen wijzigingen dienen aangebracht te worden aan de locatie van de monding in de stuwgeul, aangezien deze zich zowel bij het hoge debiet bij onderstroming als bij het lagere debieten bij overstorting afwaarts van de migratielimietlijn bevindt.

Voor alle simulaties geldt dat de watersprong afwaarts van de hefschuif in het kanaal voor het toegevoegd debiet een lengte heeft die groter is dan de lengte van **de woelkom afwaarts van de hefschuif**. Hierbij wordt opgemerkt dat bij de rapportering is vastgesteld dat de lengte van de woelkom en de helling van de einddrempel overgenomen zijn uit de eerste versie van de aanbestedingsplannen van het kanaal voor het toegevoegd debiet. De lengte van de woelkom is hierbij kleiner dan deze uit het voorontwerp en de helling van de einddrempel (1:2) is iets steiler dan de helling van de einddrempel uit het voorontwerp (1:2.5). Bij alle simulaties strekt het einde van de watersprong zich voorbij de drempel van de woelkom uit tot tegen middelste geleidingsmuur in het kanaal voor het toegevoegd debiet. Bij simulatie S1 wordt door het aanzuigen van debiet door de opening in de geleidingsmuur tussen vispassage en kanaal voor toegevoegd debiet als het ware een dubbele watersprong in de woelkom gevormd. Het feit dat het einde van de watersprong zich bevindt ter plaatse van geleidingswanden in het kanaal voor het toegevoegd debiet betekent dat de middelste geleidingswand zorgt voor de uiteindelijke energiedissipatie. De energiedissipatie vindt dus niet volledig plaats in de woelkom. Ook de einddrempel kan dus niet zorgen voor volledige dissipatie van de watersprong maar blijft constructief wel nodig om het hoogteverschil tussen het bodempeil +3.20 mTAW ter plaatse van de hefschuif en het bodempeil +3.60 mTAW ter plaatse van de koker onder de muur van de kleine sluis te overbruggen.

Daarnaast zijn **de geleidingswanden in het kanaal voor het toegevoegd debiet** beoordeeld. In de geometrie van het voorontwerp (simulatie S1) is een opening in de geleidingswand tussen het kanaal voor het toegevoegd debiet en de vispassage aanwezig. De stroming uit het laatste slot van het laatste bekken van de vispassage is in de richting van deze geleidingswand gericht, waardoor ongeveer $\frac{3}{4}$ van het debiet door de vispassage afgeleid wordt naar het kanaal voor het toegevoegd debiet. Ter plaatse van de samenvloeiing met het kanaal voor het toegevoegd debiet is bij deze simulatie maar $\frac{1}{4}$ van het debiet van de vispassage meer aanwezig. Door de hoge stroomsnelheden in de twee delen van het kanaal voor het toegevoegd debiet meer afwaarts schiet deze opening zijn doel voorbij, namelijk vissen die tegen de stroming in het kanaal voor het toegevoegd debiet inzwemmen afleiden naar de vispassage. Door het feit dat bij de vervolgsimulaties (simulaties S2, S3 en S4) deze opening in de geleidingsmuur niet meer aanwezig is, bedraagt het debiet vanuit de vispassage ter plaatse van de samenvloeiing met de stroming uit het kanaal van het toegevoegd debiet bij deze simulaties altijd 1.0 m³/s. Afwaarts van het laatste slot van de vispassage is een neer aanwezig, dewelke gelijkaardig van vorm maar iets groter is dan de neren die in de bekkens ontstaan omdat er geen slot meer volgt. Gezien de duidelijk hoofdstroom uit het slot naar de samenvloeiing vormt deze geen probleem met oog op de vindbaarheid van de vispassage. Ten gevolge van deze neer bedraagt de stroomsnelheid tegen de geleidingswand tussen de vispassage en het kanaal voor toegevoegd debiet 0.5 m/s à 1.0 m/s. Dit is laag genoeg om vissen toe te laten tegen de stroming in naar het laatste slot van de vispassage te zwemmen.

Bij debieten door het kanaal voor het toegevoegd debiet die beduidend groter zijn dan het debiet door de vispassage (1.0 m³/s), wordt ter plaatse van de samenvloeiing van het kanaal voor het toegevoegd debiet en de vispassage de stroming uit de vispassage aangezogen door de snellere stroming uit het kanaal voor het toegevoegd debiet. Hierdoor ontstaat een neer met een lengte die min of meer gelijk is aan de lengte van de koker door de sluismuur. Eigenlijk zou deze neer in de koker moeten vermeden worden. Maar omwille van ruimtelijke en bouwkundig randvoorwaarden kan dit enkel door aanpassing van de verhouding tussen

toegevoegd debiet en het vispassagedebiet. Dit geeft dan weer aanleiding tot een lager lokstroomdebiet, wat ook niet wenselijk is. De diameter van de neer wijzigt niet bij aanpassen van de lengte van de geleidingsmuur tussen vispassage en kanaal voor toegevoegd debiet bij simulaties S2 en S3. Omwille van de relatief lage stroomsnelheden (ca. 1.0 m/s) aan de rand van deze neer juist naast de stroming met hogere stroomsnelheid uit het kanaal voor toegevoegd debiet, kunnen vissen de vispassage bij simulaties S2 en S3 nog bereiken.

Bij simulatie S3 is nog wel vastgesteld dat in de koker door de sluismuur aan de bodem (circa eerste 50 cm) een pluim met stroomsnelheden hoger dan 1.5 m/s gevormd wordt uit het rechterdeel van het kanaal van het toegevoegd debiet (dit is het middelste deel ter plaats van de samenvloeiing). Deze pluim is nadelig voor de vindbaarheid en bereikbaarheid van de vispassage. Bijgevolg is het aangewezen om de debietverdeling over de twee delen van het kanaal voor het toegevoegd debiet te wijzigen. Op basis van expert judgement wordt aanbevolen om de middelste geleidingswand te verschuiven zodat het linker gedeelte van het kanaal voor het toegevoegd debiet 0.7 m breed wordt en het rechtergedeelte 0.5 m. Op deze wijze zouden hogere stroomsnelheden moeten optreden aan de linkerwand van de koker door de sluismuur waardoor een soort trechter wordt gevormd naar de ingang van de vispassage.

Simulatie S4 betreft een simulatie met lage debieten ($1.0 \text{ m}^3/\text{s}$) in het kanaal voor het toegevoegd debiet. Bij deze lage debieten ontstaat ter plaatse van het uiteinde van de geleidingsmuur tussen vispassage en kanaal voor toegevoegd debiet een loslatingsneer, dewelke het rechter gedeelte van het kanaal voor het toegevoegd debiet blokkeert. Hierdoor ontstaan twee gescheiden stromen naast elkaar, namelijk de stroming uit de vispassage en de stroming uit het linker gedeelte van het kanaal voor het toegevoegd debiet. Naar het uiteinde van de koker door de sluismuur voegen deze beide stromen zich samen tot één stroom in de richting van de afwaartse stuwgeul. Aangezien de stroomsnelheden in beide delen van het kanaal laag genoeg zijn voor vissen om te kunnen passeren, dienen er zo ver mogelijk afwaarts en in beide delen van het kanaal roosters te worden geplaatst. Wel wordt opgemerkt dat verwacht wordt dat deze lagere waarden voor het toegevoegd debiet relatief weinig zullen voorkomen vanwege het relatief grote debiet dat beschikbaar is op de Leie.

Bij simulaties met onderstroming, zowel voor de stuw als voor de hefschuif, wordt een debiet door de opening van de stuw of hefschuif berekend dat beduidend lager is dan het vooropgestelde debiet. Ook de aan de hand van deze debieten berekende debietscoëfficiënten voor stuw of hefschuif zijn beduidend lager dan in de literatuur wordt vermeld. Voor dit verschil tussen de uit de CFD-modellering berekende debietscoëfficiënten van stuw of hefschuif (en de bijbehorende debieten onder stuw of hefschuif) en deze uit de literatuur is geen verklaring gevonden. Onderzoek naar schematisatie van stuwen met onderstroming en stroming onder een hefschuif in CFD-modellering is daarom aanbevolen.

9 Referenties

Badano, N.; Breugem, A.; Decrop, B. (2021). Meervoudige raamovereenkomst voor CFD-modellering met OpenFOAM met betrekking tot stroming rond waterbouwkundige constructies. Deelopdracht 1: CFD-modellering van de monding van de vispassage te Sint-Baafs-Vijve. Rapport I/RA/11592/20.123/BDC/.

Bos, M.G. (1989). Discharge measurement structures. *ILRI Publication*, Third rev (M. G. Bos, Ed.). International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI): Wageningen. ISBN 90-70754-15-0. 401 pp.

De Laet, P.; Coen, I.; Verbist, F. (1988). Ijking van stuwen: stuw te St.Baafs-Vijve. *WL Rapporten*, 449_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Miller, D.S. (Ed.). (1994). Discharge characteristics. *Hydraulic Structures Design Manual: Hydraulic Design Considerations*, 8. Balkema: Rotterdam. ISBN 90-5410-180-6. 249 pp.

Vercruysse, J.B.; Verelst, K.; De Mulder, T.; Mostaert, F. (2019). Hydraulisch onderzoek naar breekbalken voor sluizen met nivelleeropeningen in de deuren: eindrapport. Versie 3.0. *WL Rapporten*, 14_050_4. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. Available at: <http://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=321065>

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

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