



Vlaanderen
is wetenschap



18_093_1
WL rapporten

Zenneduiker te Halle

Hydraulisch ontwerp loodrechte kruising kanaal Brussel-Charleroi

DEPARTEMENT
**MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN**

waterbouwkundiglaboratorium.be

Zenneduiker te Halle

Hydraulisch ontwerp loodrechte kruising kanaal Brussel-Charleroi

Verelst, K.; Coen, L.; Lopez Castaño, S.; Vercruysse, J.; Van Hoydonck, W.; Mostaert, F.

Juridische kennisgeving

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

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

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

Copyright en wijze van citeren

© Vlaamse overheid, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Waterbouwkundig Laboratorium 2020
D/2020/3241/192

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Verelst, K.; Coen, L.; Lopez Castaño, S.; Vercruysse, J.; Van Hoydonck, W.; Mostaert, F. (2020). Zenneduiker te Halle: Hydraulisch ontwerp loodrechte kruising kanaal Brussel-Charleroi. Versie 6.0. WL Rapporten, 18_093_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

Tot en met de datum van vrijgave, kan overname uit en verwijzen naar deze publicatie enkel mits uitdrukkelijke en schriftelijke toestemming van de opdrachtgever of het Waterbouwkundig Laboratorium. Correcte bronvermelding is steeds noodzakelijk.

Documentidentificatie

Opdrachtgever:	De Vlaamse Waterweg nv. afdeling Regio Centraal	Ref.:	WL2020R18_093_1
Keywords (3-5):	Culvert, Zenne, Halle, design, CFD-modelling		
Kennisdomeinen	Waterbouwkundige constructies > Duikers > Numerieke modelleringen		
Tekst (p.):	60	Bijlagen (p.):	111
Vertrouwelijk:	☒ Ja	Vrijgegeven vanaf:	01/01/2025

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

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Vercruysse, J. Van Hoydonck, W.	Getekend door: Jeroen Vercruysse (Signatu Getekend op: 2020-10-05 08:18:50 +01:00 Reden: Ik keur dit document goed <i>Jeroen Vercruysse</i> Getekend door: Wim Van Hoydonck (Signat Getekend op: 2020-10-05 08:34:40 +01:00 Reden: Ik keur dit document goed <i>Wim Van Hoydonck</i>
Projectleider:	Verelst, K.	Getekend door: Kristof Verelst (Signature) Getekend op: 2020-10-15 13:37:21 +00:00 Reden: Ik keur dit document goed <i>Kristof Verelst</i>

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Mostaert, F.	Getekend door: Frank Mostaert (Signature) Getekend op: 2020-10-05 12:38:02 +01:00 Reden: Ik keur dit document goed <i>Frank Mostaert</i>
-----------------	--------------	---



Abstract

Net opwaarts van de sluis te Halle kruist de Zenne het kanaal Brussel-Charleroi. De Zenne wordt hierbij door middel van een duiker onder het kanaal geleid. Onder het kanaal bestaat de huidige duiker uit 4 kokers dewelke na de kruising overgaan in 2 kokers. In het kader van de verdieping van het kanaal Brussel-Charleroi dient een nieuwe, dieper gelegen, duiker voorzien te worden voor de Zenne. Door het studiebureau SBE werd reeds een voorontwerp opgemaakt van een schuine kruising van het kanaal door de nieuwe duiker. Hierbij werd zowel een schuine kruising opwaarts de sluis te Halle als afwaarts de sluis beschouwd. Door afdeling Regio Centraal van de Vlaamse Waterweg nv werd bij de verdere uitwerking van het ontwerp opgemerkt dat een loodrechte kruising van het kanaal door de duiker economisch voordeliger uit te voeren is dan een schuine kruising. Daarnaast werd ook de mogelijkheid open gehouden om de duiker uit te voeren met behulp van afgezonken elementen, aan de hand van een persing onder het kanaal of aan de hand van een boring onder het kanaal.

Voor het hydraulisch ontwerp van de nieuwe Zenneduiker, waarbij deze het kanaal loodrecht kruist, vraagt afdeling Regio Centraal advies aan het Waterbouwkundig Laboratorium. De vraag wordt gesteld of een loodrechte kruising van het kanaal Brussel-Charleroi door de duiker mogelijk is en hoe deze nieuwe duiker het waterpeil van de Zenne opwaarts van de duiker beïnvloedt. Om deze vragen te beantwoorden wordt de opstuwing in de Zenne bepaald voor een aantal varianten van de nieuwe duiker. Vooreerst is hiervoor door WL in overleg met de opdrachtgever, zowel voor de opwaartse als de afwaartse ligging van de nieuwe duiker, een ontwerp gemaakt van een loodrechte kruising van het kanaal door de duiker.

De stroming door de huidige duiker en deze van de varianten van de nieuwe duiker zijn bepaald aan de hand van modellering met Computational Fluid Dynamics (CFD). Initieel zijn simulaties uitgevoerd voor de huidige duiker, het initieel ontwerp van de opwaartse variant van de loodrechte kruising en het initieel ontwerp van de afwaartse variant van de loodrechte kruising. Op basis van de resultaten van de CFD modellering werd één geoptimaliseerde geometrie gedefinieerd voor de opwaartse variant en twee geoptimaliseerde geometrieën voor de afwaartse variant. Voor deze geoptimaliseerde geometrieën werden ook CFD-simulaties uitgevoerd.

Van de huidige duiker, de initiële en geoptimaliseerde geometrieën van de opwaartse –en de afwaartse variant van de loodrechte kruising werden het berekende stromingspatroon in de duiker, de hydraulische verliezen van de verschillende onderdelen van de duiker, de waterpeilverhoging tussen inlaat en uitlaat van de duiker en de verdeling van het debiet over de kokers onder het kanaal met elkaar vergeleken. Voor de opwaartse en de afwaartse variant van de loodrechte kruising wordt (ten opzichte van de huidige duiker) een opstuwing van 0.12 à 0.15 m berekend. Voor de afwaartse variant is ook een CFD-simulatie uitgevoerd waarbij het volledige debiet van 41.7 m³/s door één koker wordt afgevoerd en een simulatie met het maximale (eerder exceptionele) debiet van 70 m³/s door de vier kokers van de duiker. Bij afvoeren van het volledige debiet door één koker wordt hierbij wordt een opstuwing van 2.34 m berekend ten opzichte van de huidige duiker. Bij het afvoeren van 70 m³/s door de 4 kokers van de duiker wordt een opstuwing van 0.30 m berekend ten opzichte van de huidige duiker.

Na uitvoering van de CFD-simulaties is het 1D-numeriek model van de Zenne en het kanaal Brussel-Charleroi van WL aangepast zodat de waterpeilverhoging over de duiker in het 1D-model overeenkomt met deze berekend met de CFD-simulaties. Simulaties met dit gewijzigde 1D-numeriek model tonen aan dat opwaarts van de Zenneduiker tot de stuw te Lembeek het verschil tussen het maximaal optredend waterpeil bij de was met terugkeerperiode 100 jaar en de laagste ligging van het kruinpeil van de oever nog circa 2.11 m bedraagt. Dit betreft een zeer ruime marge in vergelijking met de opstuwing van 0.12 à 0.15 m ten opzichte van de huidige duiker ten gevolge van het realiseren van de opwaartse en de afwaartse variant van de loodrechte kruising.

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	V
Lijst van de tabellen.....	VII
Lijst van de figuren	VIII
1 Inleiding	1
2 Onderzochte geometrieën	3
2.1 Huidige Zenneduiker	5
2.2 Opwaartse variant loodrechte kruising	9
2.2.1 Algemeen.....	9
2.2.2 Initieel ontwerp	10
2.2.3 Optimalisatie 1.....	14
2.3 Afwaartse variant loodrechte kruising	15
2.3.1 Algemeen.....	15
2.3.2 Initieel ontwerp	16
2.3.3 Optimalisatie 1.....	20
2.3.4 Optimalisatie 2.....	20
3 Hydraulische randvoorwaarden CFD-simulaties	21
4 Resultaten CFD-simulaties.....	24
4.1 Algemeen.....	24
4.2 Stroomsnelheid in karakteristieke secties van de duiker	26
4.2.1 Huidige Zenneduiker	26
4.2.2 Opwaartse variant loodrechte kruising.....	28
4.2.3 Afwaartse variant loodrechte kruising	32
4.3 Opstuwing ten gevolge van de nieuwe Zenneduiker	39
4.4 Verliescoëfficiënt van de onderdelen van de duiker	43
4.5 Verdeling debiet over de kokers van de duiker.....	47
5 1D-Modellering Zenne met nieuwe Zenneduiker	51
5.1 Numeriek 1D-model Zenne-Zeekanaal.....	51
5.1.1 Basismodel.....	51
5.1.2 Aanpassing model.....	53
5.2 Toelaatbaarheid opstuwing ten gevolge van nieuwe Zenneduiker	54

5.3	Bepaling maximaal debiet door Zenne.....	55
6	Conclusie.....	57
7	Referenties	60
	Bijlage A: rapport CFD-modellering Zenneduiker.....	B1

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Karakteristieke afmetingen huidige Zenneduiker.....	8
Tabel 2 – Bodempeilen en plafondpeilen huidige Zenneduiker.....	8
Tabel 3 – Karakteristieke afmetingen initieel ontwerp opwaartse variant loodrechte kruising.....	12
Tabel 4 - Bodempeilen en plafondpeilen initieel ontwerp opwaartse variant loodrechte kruising	13
Tabel 5 – Karakteristieke afmetingen initieel ontwerp afwaartse variant loodrechte kruising.....	18
Tabel 6 - Bodempeilen en plafondpeilen initieel ontwerp afwaartse variant loodrechte kruising	18
Tabel 7 – Hydraulische randvoorwaarden voor CFD-modellering	22
Tabel 8 – Overzicht uitgevoerde CFD-simulaties, aantal roostercellen en toegepaste randvoorwaarden	25
Tabel 9 – Bepaling verhang waterpeil Zenne opwaarts en afwaarts uit 1D-modellering met huidige duiker	40
Tabel 10 – Bepaling van de totale waterpeilverhoging in de Zenne ten gevolge van de constructie voor de uitgevoerde CFD-simulaties.....	41
Tabel 11 – Overzicht opstuwing ten gevolge van nieuwe Zenneduiker.....	42
Tabel 12 – Verliescoëfficiënt onderdelen van de duiker.....	44
Tabel 13 – Verliescoëfficiënt voor simulaties met optimalisatie 2 van de geometrie van de afwaartse variant van de loodrechte kruising	46
Tabel 14 –Debiet (in m ³ /s) door verschillende kokers van de duiker	48
Tabel 15 –Verdeling (in %) debiet over kokers onder het kanaal	49
Tabel 16 – Resultaten wijziging 1D-numeriek model	53
Tabel 17 – Overzicht opstuwing ten gevolge van nieuwe Zenneduiker.....	59

Lijst van de figuren

Figuur 1 – Locatie huidige Zenneduiker	1
Figuur 2 – Ligging huidige duiker, opwaartse en afwaartse variant van de nieuwe duiker	3
Figuur 3 – Langsprofiel opwaartse overgangsconstructie tussen Zenne en Zenneduiker in de nieuwe toestand	4
Figuur 4 – Doorsnede rechthoekige kokers voor ontwerp uit SBE (2015)	5
Figuur 5 – Ligging duiker in huidige toestand.....	5
Figuur 6 – Dwarsdoorsnedes huidige Zenneduiker	6
Figuur 7 – 3D CAD-model van de huidige Zenneduiker.....	6
Figuur 8 – Details geometrie huidige Zenneduiker	7
Figuur 9 – Ligging opwaartse variant loodrechte kruising	9
Figuur 10 – 3D CAD-model van het initiële ontwerp van de opwaartse variant van de loodrechte kruising.	11
Figuur 11 – Details geometrie initieel ontwerp opwaartse variant van de loodrechte kruising.....	11
Figuur 12 – Details geometrie initieel ontwerp opwaartse variant van de loodrechte kruising (vervolg)	12
Figuur 13 – Optimalisatie inlaat opwaartse variant loodrechte kruising	14
Figuur 14 – Optimalisatie overgangsconstructie tussen Zenne opwaarts en kokers onder het kanaal	14
Figuur 15 – Ligging afwaartse variant loodrechte kruising	15
Figuur 16 – 3D CAD-model van het initiële ontwerp van de afwaartse variant van de loodrechte kruising..	16
Figuur 17 – Details geometrie initieel ontwerp afwaartse variant loodrechte kruising	17
Figuur 18 – Ontwerpschets landschapspark (Omgeving, 2015).....	18
Figuur 19 – Vergelijking dwarssectie Zenne uit ontwerp landschapspark Zenne met dwarssectie van de Zenne in de CFD-simulaties	19
Figuur 20 – Oevers Zenne afwaarts van nieuwe duiker	19
Figuur 21 – Optimalisatie overgangsconstructie tussen Zenne opwaarts en kokers onder het kanaal	20
Figuur 22 – Optimalisatie overgangsconstructie tussen kokers onder het kanaal en Zenne afwaarts	20
Figuur 23 – Stuw en overlaat op de Zenne te Lembeek.....	21
Figuur 24 – Variatie in de tijd van het waterpeil opwaarts en afwaarts van de Zenneduiker te Halle, het debiet in de Zenne en het debiet op het kanaal afwaarts Lembeek bij de was met terugkeerperiode 50 jaar	23
Figuur 25 – Variatie in de tijd van het waterpeil opwaarts en afwaarts van de Zenneduiker te Halle, het debiet in de Zenne en het debiet op het kanaal afwaarts Lembeek bij de was met terugkeerperiode 100 jaar	23
Figuur 26 – Stroomsnelheid ter plaatse van overgangen voor de simulatie met de huidige duiker	26
Figuur 27 – Stroomsnelheid in een aantal secties voor de simulatie met de huidige duiker	27
Figuur 28 – Stroomsnelheid ter plaatse van de inlaat en ter plaatse van de overgangsconstructie naar de kokers onder het kanaal voor de simulaties met de opwaartse variant van de loodrechte kruising	28

Figuur 29 – Stroomsnelheden ter plaatse van overgangen van 4 naar 2 kokers en stroomsnelheden ter plaatse van de uitlaat voor de simulatie met de opwaartse variant van de loodrechte kruising.	29
Figuur 30 – Stroomsnelheden in een aantal secties voor de simulaties met de opwaartse variant van de loodrechte kruising.....	30
Figuur 31 – Stroomsnelheid ter plaatse van de inlaat en ter plaatse van de overgangsconstructie naar de kokers onder het kanaal voor de simulaties met de afwaartse variant van de loodrechte kruising	32
Figuur 32 – Stroomsnelheid in de kokers onder het kanaal en ter plaatse van de uitlaat voor de simulaties met de afwaartse variant van de loodrechte kruising	33
Figuur 33 – Stroomsnelheid in een aantal secties van de afwaartse variant van de loodrechte kruising	34
Figuur 34 – Stroomsnelheid in een aantal overgangen voor simulatie met 1 koker open en simulatie met debiet 70 m ³ /s	37
Figuur 35 – Stroomsnelheid in een aantal secties voor simulatie met 1 koker open en simulatie met debiet 70 m ³ /s	38
Figuur 36 – Schets met afmetingen voor bepaling opstuwings ten gevolge van de nieuwe Zenneduiker	39
Figuur 37 – Variatie van minimaal waterpeil, maximaal waterpeil en bodempeil langs de Zenne bij was met terugkeerperiode 100 jaar uit simulatie met 1D-model voor de huidige duiker	40
Figuur 38 – Locatie secties voor bepaling verliescoëfficiënt van de verschillende onderdelen van de duiker	43
Figuur 39 – Nummering kokers duiker	47
Figuur 40 – Procentuele verdeling debiet over kokers onder kanaal	49
Figuur 41 – Overzicht numeriek 1D-model Zenne-Zeekanaal	52
Figuur 42 – Vergelijking maximaal waterpeil berekend voor huidige duiker, initieel ontwerp van opwaartse en afwaartse variant van loodrechte kruising met de oeverlijnen van de Zenne.....	54
Figuur 43 – Vergelijking maximaal waterpeil in de Zenne voor huidige duiker met de oeverlijnen van de Zenne	56
Figuur 44 – Vergelijking maximaal waterpeil in de Zenne voor opwaartse en afwaartse variant loodrechte kruising met de oeverlijnen van de Zenne	56
Figuur 45 – Geometrie huidige duiker (groen); opwaartse variant loodrechte kruising (blauw) en afwaartse variant loodrechte kruising (rood)	57

1 Inleiding

Net opwaarts van de sluis te Halle kruist de Zenne het kanaal Brussel-Charleroi. De Zenne wordt hierbij door middel van een duiker onder het kanaal geleid. Onder het kanaal bestaat de huidige duiker uit 4 kokers dewelke na de kruising overgaan in 2 kokers. In het kader van de verdieping van het kanaal Brussel-Charleroi dient een nieuwe, dieper gelegen duiker voorzien te worden voor de Zenne. Figuur 1 toont de ligging van de bestaande duiker ten opzichte van de sluis te Halle.

Figuur 1 – Locatie huidige Zenneduiker



Blauwe lijn: Kanaal Brussel-Charleroi; groene lijn: Zenne

Door het studiebureau SBE werd reeds een voorontwerp opgemaakt van de nieuwe duiker (SBE, 2015). In dit voorontwerp werd zowel een schuine kruising van het kanaal opwaarts van de sluis te Halle als een schuine kruising afwaarts van de sluis te Halle beschouwd. Door afdeling Regio Centraal van de Vlaamse Waterweg nv (DVW) werd bij de verdere uitwerking van het ontwerp opgemerkt dat een loodrechte kruising van het kanaal door de duiker economisch voordeliger uit te voeren is dan een kruising onder een hoek. Daarnaast is ook de mogelijkheid open gehouden om de duiker uit te voeren met behulp van afgezonken elementen, aan de hand van een persing onder het kanaal of aan de hand van een boring onder het kanaal.

Voor het hydraulisch ontwerp van de nieuwe Zenneduiker, dewelke het kanaal loodrecht kruist, vraagt DVW (projectleider: Olivier Devriese) advies aan het Waterbouwkundig Laboratorium (WL). De vraag wordt gesteld of een loodrechte kruising van het kanaal Brussel-Charleroi door de duiker mogelijk is en hoe deze nieuwe duiker het waterpeil van de Zenne opwaarts van de duiker beïnvloedt.

Om de vragen van DVW te beantwoorden wordt de opstuwing (ten opzichte van de toestand met de huidige duiker) bepaald voor een aantal varianten van de nieuwe duiker. Hiervoor is vooreerst door WL in overleg

met de opdrachtgever, zowel voor de opwaartse als de afwaartse ligging van de nieuwe duiker, een ontwerp gemaakt van een loodrechte kruising van het kanaal door de duiker. Daarna zijn de verliezen van de huidige duiker en deze van de varianten van de nieuwe duiker bepaald aan de hand van modellering met Computational Fluid Dynamics (CFD). De CFD-modellering is door WL uitbesteed aan het studiebureau Actiflow B.V. Hierbij zijn initieel volgende simulaties uitgevoerd:

- De huidige Zenneduiker ter bepaling van de huidige waterpeilverhoging tussen het opwaarts en afwaarts uiteinde van de duiker.
- Een variant waarbij de nieuwe Zenneduiker opwaarts van de sluis gelegen is. De Zenneduiker kruist het kanaal loodrecht en is opgebouwd uit een afzinkelement.
- Een variant waarbij de nieuwe Zenneduiker afwaarts van de sluis gelegen is. De Zenneduiker kruist het kanaal loodrecht en is opgebouwd uit een afzinkelement.

Op basis van de resultaten van deze initiële CFD-simulaties werden vervolgens aan de opwaartse en afwaartse variant van de nieuwe duiker een aantal geometrische optimalisaties uitgevoerd. Voor deze geoptimaliseerde geometrieën zijn ook CFD-simulaties uitgevoerd. De randvoorwaarden voor al deze simulaties zijn bepaald met behulp van het 1D-numeriek model van de Zenne en het Kanaal Brussel-Charleroi van WL.

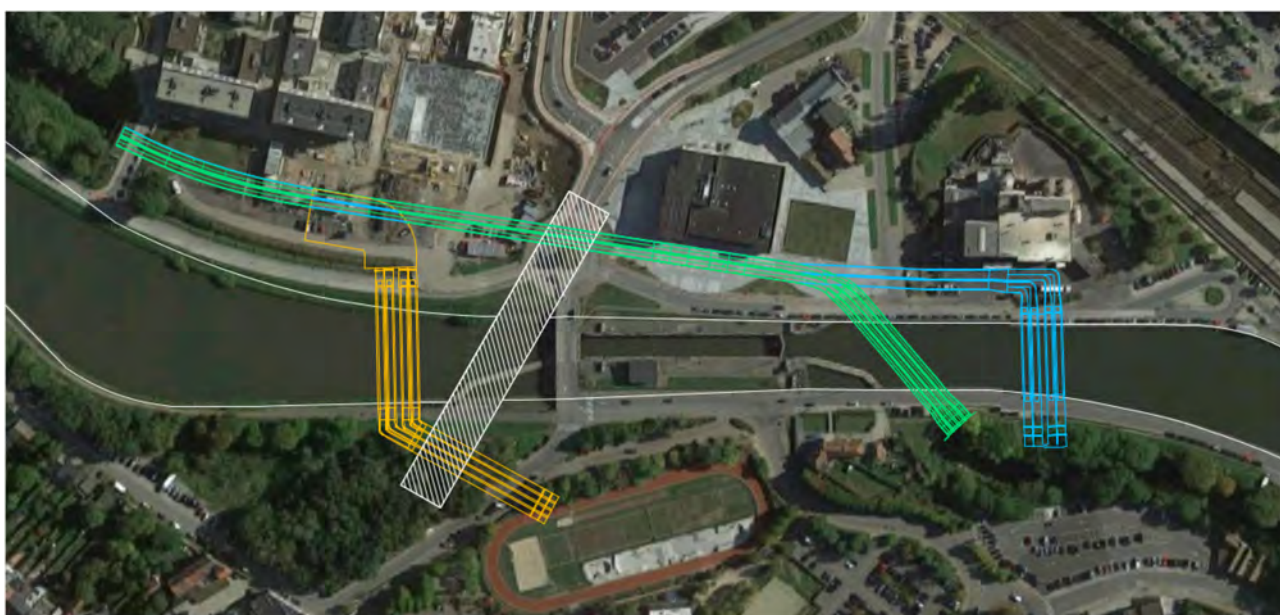
Hoofdstuk 2 van dit rapport beschrijft de in deze studie beschouwde ontwerpen van de nieuwe duiker, alsook de geometrie van de huidige duiker. In hoofdstuk 3 worden de hydraulische randvoorwaarden van de uitgevoerde CFD-simulaties besproken. De resultaten van de CFD-simulaties op vlak van stromingspatroon door de duiker, opstuwings, hydraulische verliezen en verdeling van het debiet over de kokers onder het kanaal worden besproken in hoofdstuk 4. Aan de hand van de resultaten van de uitgevoerde CFD-modellering is het 1D-numeriek model aangepast en zijn een aantal simulaties met dit aangepaste 1D-numeriek model uitgevoerd. De resultaten van deze simulaties worden beschreven in hoofdstuk 5. De conclusies van dit rapport worden geformuleerd in hoofdstuk 6.

Het door het studiebureau opgeleverde rapport met de beschrijving en de resultaten van de uitgevoerde CFD-simulaties wordt gegeven in bijlage A van dit rapport.

2 Onderzochte geometrieën

Dit hoofdstuk beschrijft de verschillende beschouwde geometrieën voor de CFD-simulaties van de nieuwe Zenneduiker. De geometrie van de huidige Zenneduiker wordt besproken in paragraaf 2.1. De geometrie van de opwaartse en afwaartse varianten van de loodrechte kruising van het kanaal door de nieuwe duiker worden besproken in paragrafen 2.2 en 2.3. Figuur 2 geeft een voorstelling van de ligging van de huidige Zenneduiker en de ligging van de opwaartse en de afwaartse variant van de loodrechte kruising van het kanaal door de nieuwe duiker.

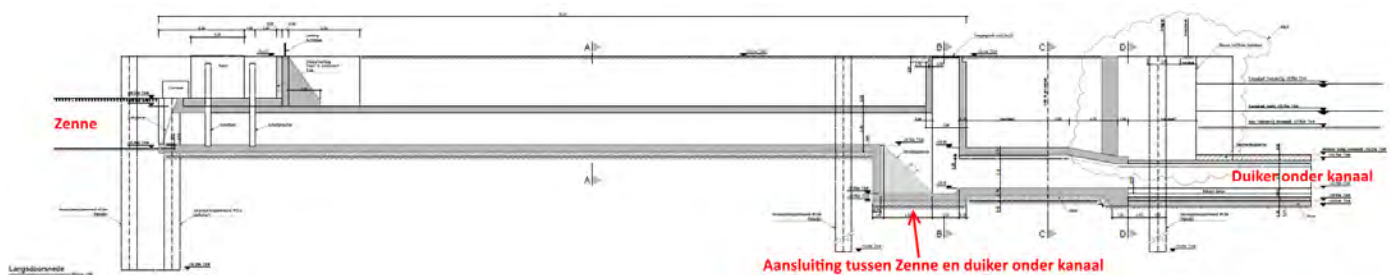
Figuur 2 – Ligging huidige duiker, opwaartse en afwaartse variant van de nieuwe duiker



Witte lijnen: Ontwerp oeverlijnen kanaal Brussel-Charleroi uit IMDC NV (2016); witte arcering: contouren toekomstige brug over kanaal Brussel-Charleroi; groen: huidige Zenneduiker; blauw: opwaartse variant loodrechte kruising nieuwe Zenneduiker; geel: afwaartse variant loodrechte kruising nieuwe Zenneduiker

Het ontwerp van de opwaartse en afwaartse variant van de loodrechte kruising is door WL uitgevoerd in nauw overleg met DVW. Om rekening te houden met de toekomstige verdieping van het kanaal wordt de duiker hierbij opwaarts ongeveer 2.0 m en afwaarts ongeveer 4.0 m onder de huidige kanaalbodem aangelegd. De aansluiting van de duiker onder het kanaal met de Zenne bestaat uit een overgangsconstructie met beperkte lengte (zie Figuur 3). Het vloerpeil van deze overgangsconstructie is 0.5 m lager gelegen dan het vloerpeil van de kokers onder het kanaal. Hierdoor is het mogelijk de duiker leeg te pompen indien deze drooggezet moet worden. In de overgangsconstructie is een helling van 45° aanwezig om de overgang van het verdiepte vloerpeil naar de hoger gelegen Zenne te maken. Het ontwerp van deze overgangsconstructie is integraal overgenomen uit SBE, (2015). Uit hydraulisch oogpunt is een dergelijke overgang echter niet ideaal. Het behouden van de doorstroomsectie door bijvoorbeeld het plafond van de duiker onder dezelfde helling uit te voeren is hydraulisch efficiënter. Indien dit niet mogelijk is, is het hydraulisch beter om de hoek tussen de verticale wand van de toegangsschacht en het plafond van de kokers onder het kanaal af te schuinen of af te ronden. De voorziene helling van 45° geeft aanleiding tot loslating van de stroming. Een overgang met helling 1:7 (ca 7°) zou vanuit hydraulisch standpunt aan te bevelen zijn. Echter om deze hellingen te realiseren is een grotere afstand nodig, dewelke aan beide oevers naast het kanaal Brussel-Charleroi niet aanwezig is.

Figuur 3 – Langsprofiel opwaartse overgangsconstructie tussen Zenne en Zenneduiker in de nieuwe toestand

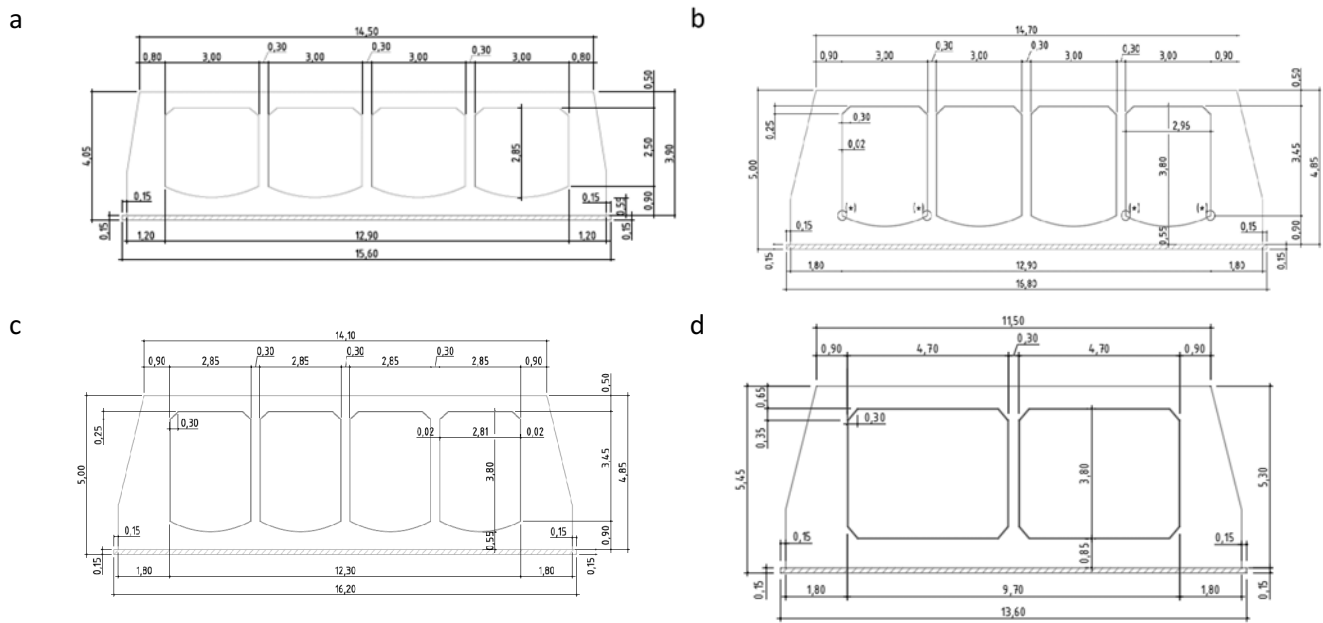


Bron: SBE, (2015)

Met betrekking tot het ontwerp van de opwaartse en afwaartse variant van de loodrechte kruising wordt opgemerkt dat de uitvoeringswijze van de kokers onder het kanaal nog niet beslist is door de opdrachtgever. De kokers onder het kanaal kunnen gerealiseerd worden door middel van het afzinken van de kokers, het boren van de kokers van de ene oever naar de andere of het persen van de kokers van de ene oever naar de andere. Bij boren van de kokers van de ene oever naar de andere is de vorm van de kokers cirkelvormig en is de hoogte van deze cirkelvormige kokers beperkt door de maximale diameter van de beschikbare boorkoppen (ca. 3.5 m). Bij de overige uitvoeringswijzen is een rechthoekige sectie van de kokers onder het kanaal mogelijk. In het geval van een rechthoekige sectie worden de breedte en hoogte van de kokers zo gekozen dat de totale doorstroomsectie niet groter is dan de totale doorstroomsectie van vier cirkelvormige kokers met diameter 3.5 m ($= 38.5 \text{ m}^2$). Op deze wijze wordt geen enkele uitvoeringswijze uitgesloten en kan de uitvoeringswijze in een later stadium door de opdrachtgever nog bepaald worden. Wat verliezen betreft volgt uit hoofdstuk 4 dat de verliezen van de inlaat en uitlaat van de duiker en de overgangsconstructies naar de kokers onder het kanaal maatgevend zijn ten opzichte van de wrijving in de kokers onder het kanaal. Bij overgang naar een cirkelvormige doorsnede is de hoogte (diameter) van deze cirkelvormige doorsnede groter dan deze van een rechthoekige doorsnede met dezelfde oppervlakte, wat tot gevolg heeft dat de ladingsverliezen ter plaatse van de overgangsconstructies naar de kokers onder het kanaal vermoedelijk groter worden. De wrijvingsverliezen van de kokers onder het kanaal zijn afhankelijk van de natte omtrek. De natte omtrek van een cirkelvormige doorsnede is beperkt kleiner dan deze van een rechthoekige doorsnede met dezelfde oppervlakte, wat maakt dat de wrijvingsverliezen van een koker met cirkelvormige doorsnede beperkt lager zijn dan deze van een koker met rechthoekige sectie.

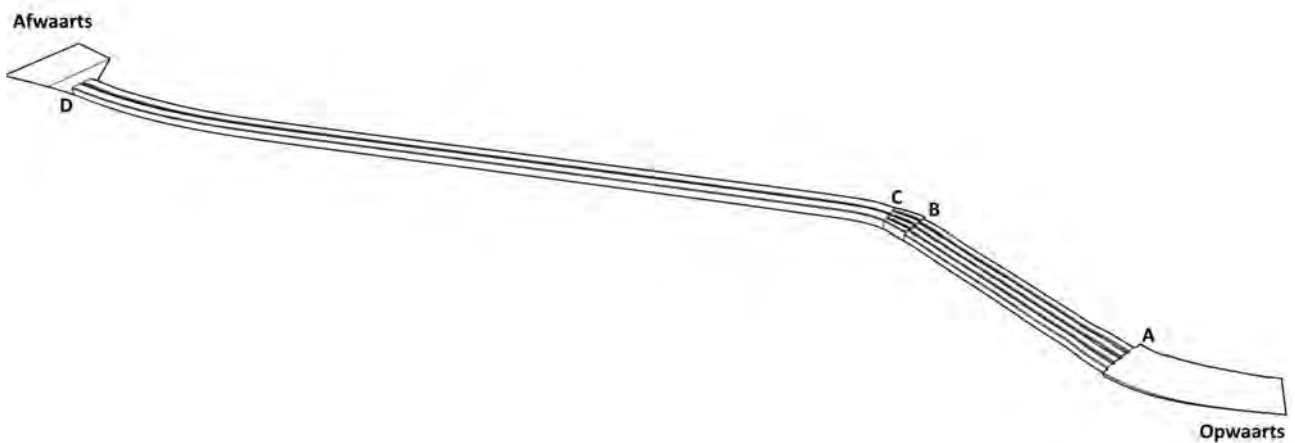
Voor het ontwerp van de opwaartse en afwaartse variant van de loodrechte kruising wordt in deze studie een rechthoekige doorstroomsectie voor de kokers onder het kanaal beschouwd. De vier kokers onder het kanaal hebben hierbij een breedte van 4.0 m en een hoogte van 2.3 m, of een totale doorstroomsectie van 36.8 m^2 . Deze afmetingen zijn overgenomen uit het ontwerp van de opwaartse en afwaartse variant in SBE (2015). Dit ontwerp was opgemaakt voor het afzinken van de kokers onder het kanaal. Figuur 4 toont een doorsnede ter plaatse van de kokers onder het kanaal uit dit ontwerp. Uit deze figuur volgt dat de afmeting van $4.0 \text{ m} \times 2.3 \text{ m}$ de effectieve doorstroomsectie betreft. De werkelijke hoogte van de kokers is hierbij groter, omdat bij afzinken omwille van constructieve redenen nog een laag ballastbeton moet aangebracht worden in de kokers. Bij het ontwerp van de opwaartse en de afwaartse variant van de loodrechte kruising in paragrafen 2.2 en 2.3 moet ermee rekening gehouden worden dat de sectie van de kokers onder het kanaal de effectieve doorstroomsectie betreft en dat de werkelijke sectie van de kokers omwille van constructieve redenen groter kan zijn. Daarnaast wordt ook opgemerkt dat voor deze studie een theoretische ligging van de nieuwe Zenneduiker bepaald is. Er is bij het ontwerp van de nieuwe Zenneduiker bijvoorbeeld geen rekening gehouden met de nodige afstand tot bewoning voor het realiseren van de bouwkuip.

Figuur 6 – Dwarsdoorsnedes huidige Zenneduiker

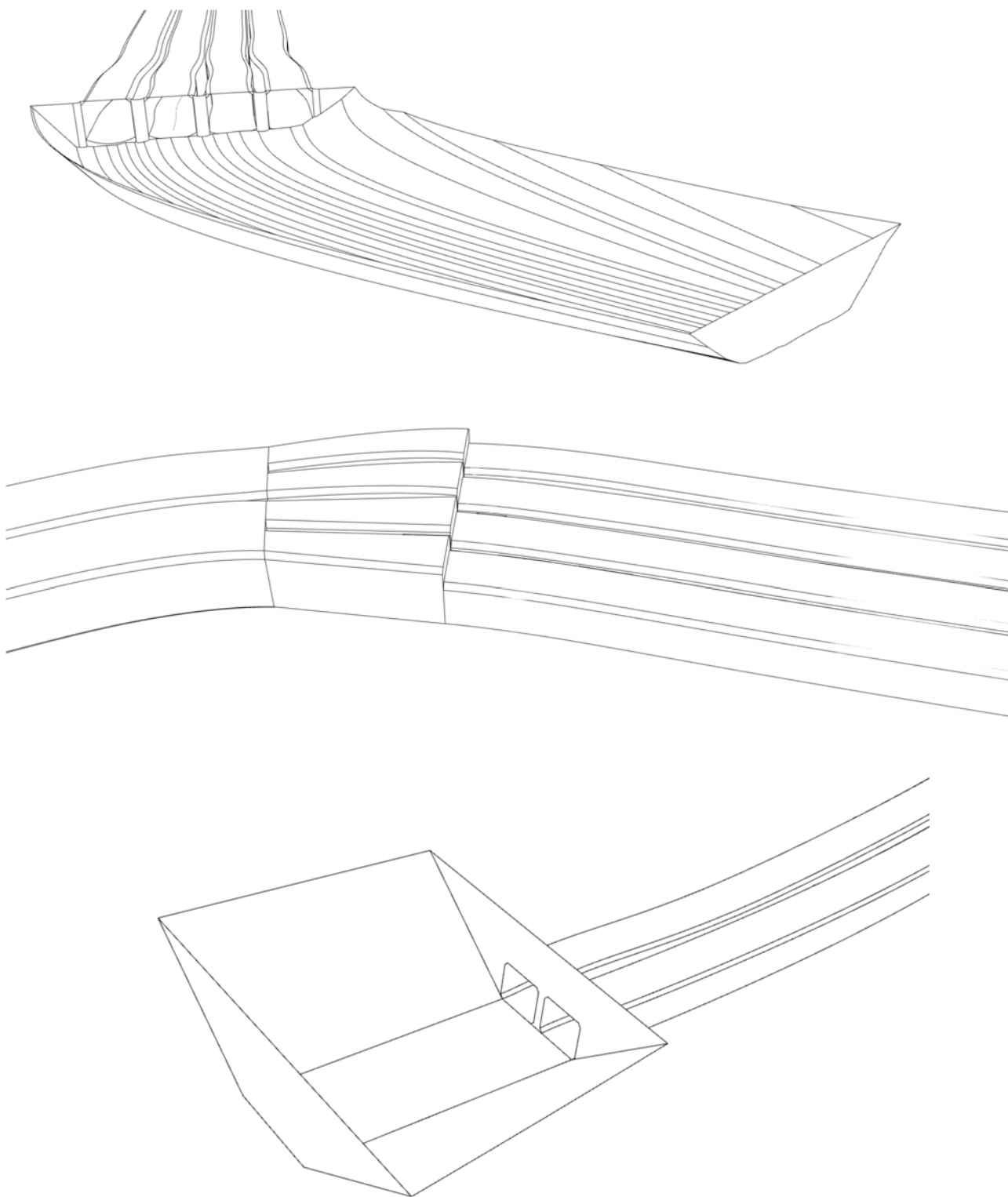


a: duiker onder kanaal (tussen sectie A en B); b: ter plaatse van sectie B; c: ter plaatse van sectie C; d: duiker tussen sectie C en D; de ligging van secties A,B,C en D is voorgesteld in Figuur 7

Figuur 7 – 3D CAD-model van de huidige Zenneduiker



Figuur 8 – Details geometrie huidige Zenneduiker



boven: detail opwaarts uiteinde duiker; midden: detail overgang 4 kokers onder kanaal naar 2 kokers;
onder: detail afwaarts uiteinde duiker

Tabel 1 – Karakteristieke afmetingen huidige Zenneduiker

Sectie	Lengte	Aantal kokers	Breedte kokers	Hoogte kokers	Totale sectie
AB	82 m	4	3.00 m	2.85 m	32.85 m ²
BC	10 m	4	Variërend tussen 3.00 m en 2.20 m	3.80 m	Variërend tussen 45.6 m ² en 33.4 m ²
CD	342 m	2	4.70 m	3.80 m	35.73 m ²

Tabel 2 – Bodempeilen en plafondpeilen huidige Zenneduiker

Sectie	Bodempeil	Plafondpeil
Zenne opwaarts	+26.50 mTAW	n.v.t.
A	+26.50 mTAW	+29.35 mTAW
B	+26.50 mTAW	+29.35 mTAW
	+26.50 mTAW	+30.30 mTAW
C	+26.50 mTAW	+30.30 mTAW
D	+25.75 mTAW	+29.55 mTAW
Zenne afwaarts	+25.75 mTAW	n.v.t.

n.v.t. = niet van toepassing

Bij de geometrie van de huidige Zenneduiker wordt opgemerkt dat deze hydraulisch efficiënt is. Het bodempeil van de duiker aan het opwaartse en afwaartse uiteinde is hetzelfde als dit van de Zenne. De inlaat en de uitlaat zijn georiënteerd in de richting van de Zenne. Het bodempeil van de duikers onder het kanaal sluit zonder bijkomende verdieping aan op het bodempeil van de Zenne opwaarts en op het bodempeil van de Zenne afwaarts. Bochten in de duiker zijn uitgevoerd met een ruime straal. Met uitzondering van de plotse verwijding van de kokers ter plaatse van sectie B blijft de totale sectie van de duiker min of meer constant. Tussen sectie B en sectie C blijft de plafondhoogte constant, maar neemt de breedte van de vier kokers af naar 2.2 m, waardoor de totale sectie dezelfde blijft als deze van de vier kokers onder het kanaal. Bij stroming met vrij oppervlak in de duiker is het wateroppervlak lager gelegen dan het plafondpeil en wordt de stroming niet beïnvloed door de ligging van het plafond. Bij stroming onder druk blijft de doorstroomsectie wel behouden, maar de stroming heeft enige afstand nodig om uit te spreiden in hoogte. Uit de resultaten van de CFD-modellering volgt dat deze afstand ca. 5.0 m bedraagt. Het uitspreiden in hoogte van de stroming gaat altijd gepaard met een verlies.

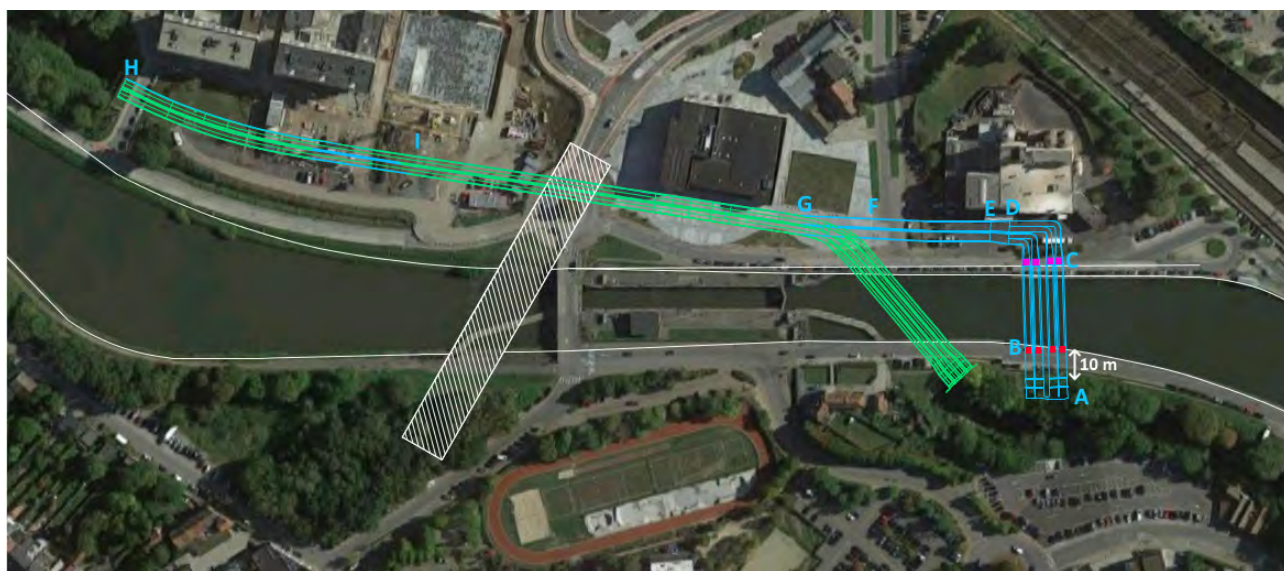
2.2 Opwaartse variant loodrechte kruising

2.2.1 Algemeen

Door WL werd een ontwerp gemaakt van de opwaartse variant van de loodrechte kruising van het kanaal Brussel-Charleroi door de nieuwe Zenneduiker. Voor de overgang tussen de Zenne en de kokers onder het kanaal wordt een analoge overgangsconstructie beschouwd als in SBE (2015), zie Figuur 3. Voor het uittekenen van deze variant werd ook rekening gehouden met de nieuwe ligging van de oeverlijnen van het Kanaal Brussel-Charleroi uit IMDC NV. (2016).

Figuur 9 geeft een voorstelling van de ligging van de opwaartse variant van de loodrechte kruising van het kanaal door de Zenneduiker.

Figuur 9 – Ligging opwaartse variant loodrechte kruising



witte lijnen: Ontwerp oeverlijnen kanaal Brussel-Charleroi uit IMDC NV (2016); witte arcering: contouren toekomstige brug over kanaal Brussel-Charleroi; groen: ligging huidige Zenneduiker; blauw: ligging opwaartse variant loodrechte kruising nieuwe Zenneduiker met aanduiding van de in deze paragraaf beschouwde secties

Voor het ontwerp van de opwaartse variant van de loodrechte kruising van het kanaal door de nieuwe duiker zijn door DVW volgende randvoorwaarden gesteld:

- De duiker kruist het kanaal Brussel-Charleroi loodrecht.
- Het bodempeil en plafondpeil van de duiker onder het kanaal wordt overgenomen uit SBE (2015). Bij de rapportering, zie ook de opmerking in paragraaf 2.2.2, is vastgesteld dat bij het opmaken van het 3D model van de duiker eenzelfde ligging van de kokers onder het kanaal is beschouwd als bij de afwaartse variant. Voor het ontwerp van de opwaartse duiker is bijgevolg een 2.2 m te diepe ligging van de kokers onder het kanaal beschouwd.
- De duiker onder het kanaal wordt afwaarts en op de rechteroever van het kanaal aangesloten op het afwaartse gedeelte van de huidige duiker met twee kokers. Om constructieve redenen mag de hoek van deze aansluiting niet te scherp zijn. Bij realisatie van deze aansluiting wordt eerst één koker van de huidige duiker afgesloten waarna één koker van de nieuwe duiker aangesloten wordt. Daarna wordt de andere koker van de huidige duiker afgesloten en de resterende koker van de nieuwe duiker aangesloten.

- De afdekroosters (rood gekleurd in Figuur 9) van de toegangsschacht ter plaatse van de opwaartse overgangsconstructie naar de kokers onder het kanaal mogen zich aan linkeroever van het kanaal juist naast de nieuwe oeverlijn van het kanaal bevinden. Echter tussen deze afdekroosters en de sponningen voor het aanbrengen van schuiven en schotbalken dient een afstand van 10.0 m aanwezig te zijn. Op deze wijze bevinden de afdekroosters en de sponningen voor de schuiven zich aan beide zijden van een nieuw aan te leggen weg.
- De afdekroosters (paars gekleurd in Figuur 9) van de toegangsschacht ter plaatse van de afwaartse overgangsconstructie naar de kokers onder het kanaal mogen zich aan rechteroever van het kanaal vlak naast de nieuwe oeverlijn van het kanaal bevinden.
- Afwaarts van de kruising met het kanaal gaat de duiker over in twee kokers. Dit gedeelte wordt naast de bestaande bebouwing gerealiseerd.
- Aan het opwaartse uiteinde van de nieuwe duiker, waar deze overgaat in de Zenne, wordt bij voorkeur zo weinig mogelijk ingenomen van de op dit ogenblik aanwezige open ruimte.

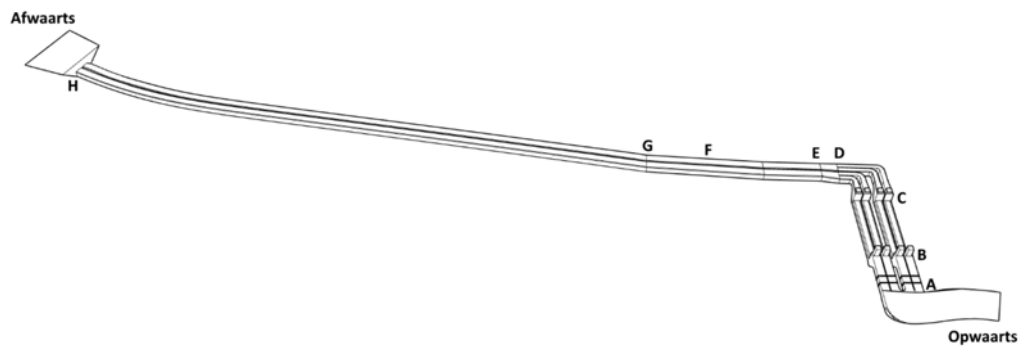
Rekening houdend met deze randvoorwaarden is het initiële ontwerp van de opwaartse variant van de nieuwe duiker uitgewerkt. Dit initiële ontwerp wordt beschreven in paragraaf 2.2.2. De optimalisaties die aan dit ontwerp zijn aangebracht op basis van de resultaten van de simulatie met dit initiële ontwerp worden beschreven in paragraaf 2.2.3. Bij het ontwerp van de nieuwe duiker wordt het volgende opgemerkt:

- De vormgeving van een aantal elementen (overgangsconstructie tussen de Zenne en de kokers onder het kanaal, sponningen voor schuiven en schotbalken, effectieve doorstroomsectie van kokers onder het kanaal) is overgenomen uit het ontwerp van de nieuwe duiker uit SBE (2015).
- Tussen sectie I en sectie H in Figuur 9 wordt de Zenne, analoog als bij de afwaartse variant van de loodrechte kruising, aangelegd in een landschapspark. Uit eenvoud is bij het ontwerp van de opwaartse variant de koker tussen sectie H en sectie I behouden. Tussen deze secties doen zich in de kokers enkel wrijvingsverliezen voor. De wrijvingsverliezen in een koker onder druk zijn algemeen groter dan bij stroming in een open bedding. Om die reden is het beschouwen van een koker onder druk tussen sectie H en sectie I conservatief. Op basis van de resultaten van de CFD-modellering wordt in hoofdstuk 4 een inschatting gemaakt van de verschillen tussen de verliezen bij een open bedding en de wrijvingsverliezen van een koker (onder druk).

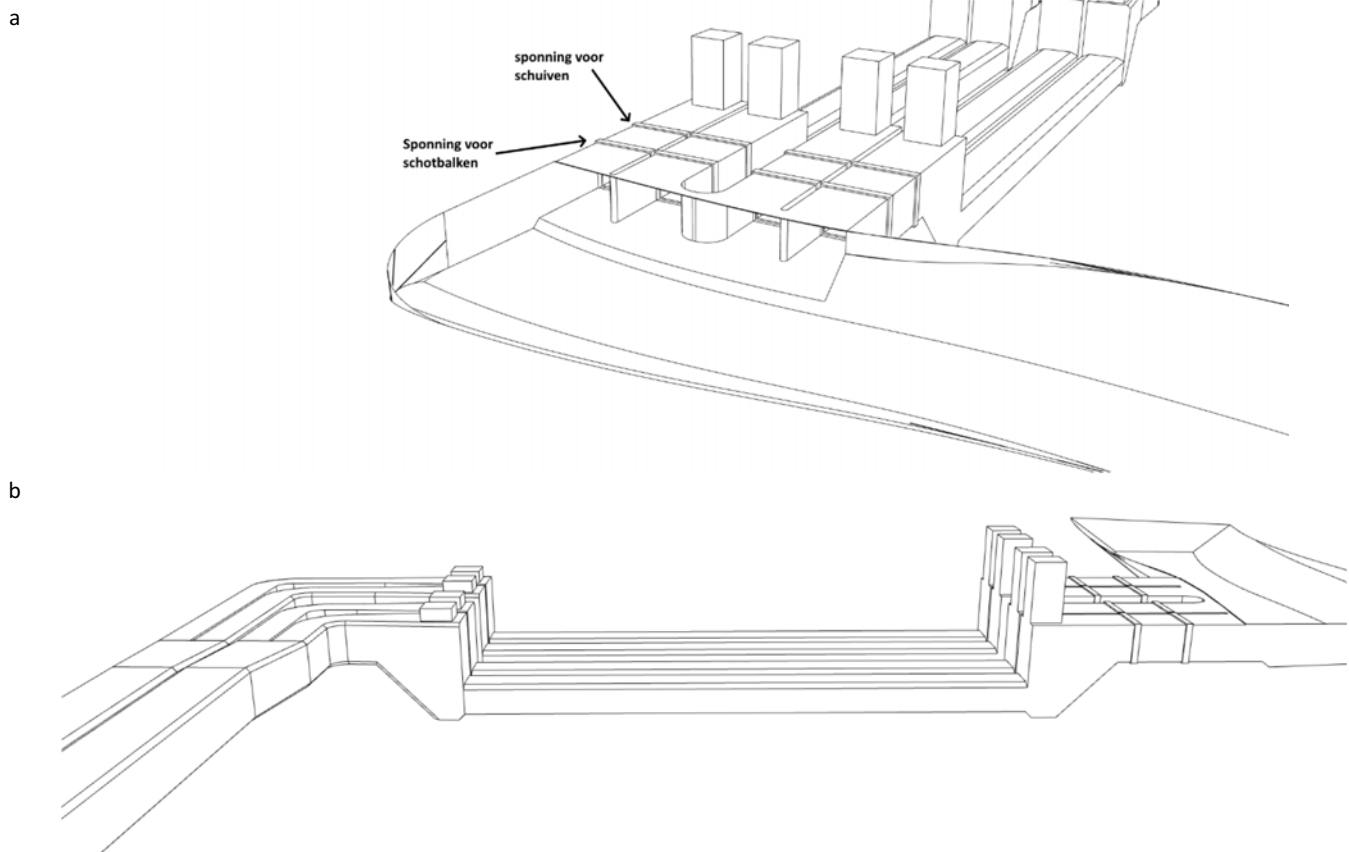
2.2.2 Initieel ontwerp

Figuur 10 toont de 3D CAD-geometrie van de opwaartse variant van de nieuwe duiker. Een aantal delen van de nieuwe duiker zijn in detail weergegeven in Figuur 11 en Figuur 12. Opwaarts van de kruising met het kanaal en onder het kanaal bestaat de duiker uit vier kokers. Aan het opwaartse uiteinde zijn in elke koker ook twee sponningen aanwezig: de meest opwaartse voor het aanbrengen van schotbalken om het opwaartse uiteinde van de koker af te sluiten en de meest afwaartse voor een schuif, waarmee de debietsverdeling tussen de kokers onderling gestuurd kan worden. Om de bocht tussen sectie C en D zo compact mogelijk te houden worden ter plaatse van de afwaartse overgangsconstructie tussen de kokers onder het kanaal en de Zenne geen sponningen voor schotbalken meer voorzien om de kokers af te sluiten. Deze sponningen worden meer afwaarts voorzien juist naast de Nederhemweg (ter plaatse van sectie F in Figuur 10). Aangezien de sponningen in de CFD-modellering niet mee beschouwd worden (zie paragraaf 4.1) zijn deze ter plaatse van sectie F ook niet aangebracht in het 3D CAD model en zijn deze niet zichtbaar in Figuur 10. Ter plaatse van sectie G worden de kokers van de nieuwe duiker samengevoegd met deze van de huidige duiker. Een overzicht van een aantal karakteristieke afmetingen, respectievelijk de bodempeilen en plafondpeilen van de opwaartse variant van de nieuwe duiker wordt gegeven in Tabel 3, respectievelijk Tabel 4.

Figuur 10 – 3D CAD-model van het initiële ontwerp van de opwaartse variant van de loodrechte kruising



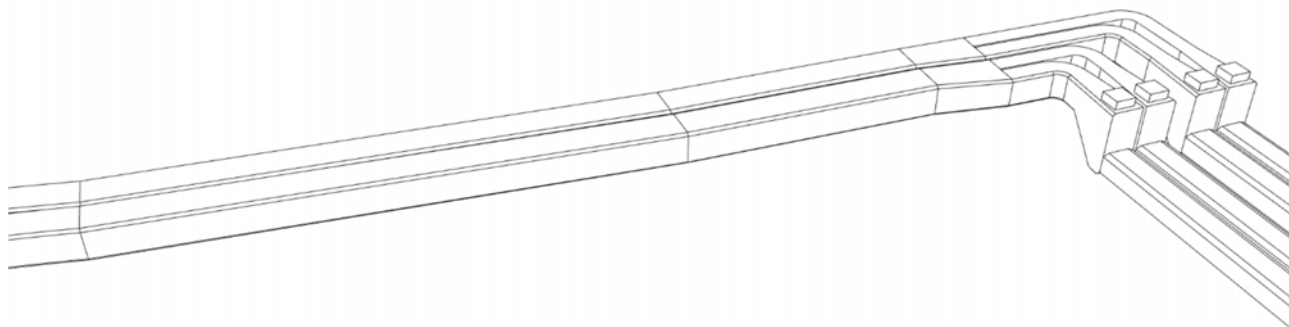
Figuur 11 – Details geometrie initieel ontwerp opwaartse variant van de loodrechte kruising



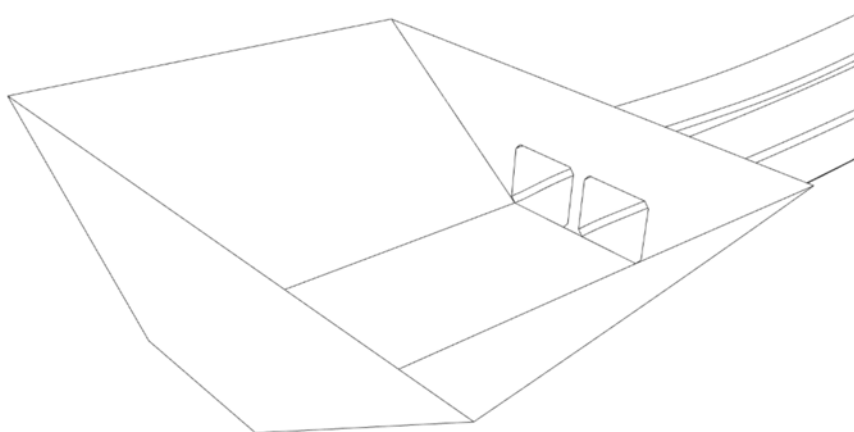
a: detail opwaarts uiteinde duiker; b: detail overgangsconstructie tussen Zenne en kokers onder kanaal

Figuur 12 – Details geometrie initieel ontwerp opwaartse variant van de loodrechte kruising (vervolg)

a



b



a: detail bocht afwaarts van kokers onder kanaal en aansluiting met kokers van huidige duiker; b: detail afwaarts uiteinde duiker

Tabel 3 – Karakteristieke afmetingen initieel ontwerp opwaartse variant loodrechte kruising

Sectie	Lengte	Aantal kokers	Breedte kokers	Hoogte kokers	Totale sectie
AB	18 m	4	4.00 m	3.00 m	48.0 m ²
BC	39 m	4	4.00 m	2.30 m	36.8 m ²
CD	Variabel	4	2.60 m	3.50 m	36.4 m ²
DE	9 m	2	Variërend tussen 5.45 m en 4.70 m	Variërend tussen 3.50 m en 3.80 m	Variërend tussen 38.15 m ² en 35.73 m ²
EFG	91 m	2	4.70 m	3.80 m	35.73 m ²
GH	330 m	2	4.70 m	3.80 m	35.73 m ²

Tabel 4 - Bodempeilen en plafondpeilen initieel ontwerp opwaartse variant loodrechte kruising

Sectie	Bodempeil	Plafondpeil
Zenne opwaarts	+26.50 mTAW	n.v.t.
A	+26.50 mTAW	+29.50 mTAW
B	+26.50 mTAW	+29.50 mTAW
	+22.50 mTAW	+24.80 mTAW
C	+22.50 mTAW	+24.80 mTAW
	+26.35 mTAW	+30.15 mTAW
D	+26.35 mTAW	+30.15 mTAW
E	+26.35 mTAW	+30.30 mTAW
H	+25.75 mTAW	+29.55 mTAW
Zenne afwaarts	+25.75 mTAW	n.v.t.

n.v.t. = niet van toepassing

Met betrekking tot het ontwerp van de geometrie wordt nog het volgende opgemerkt:

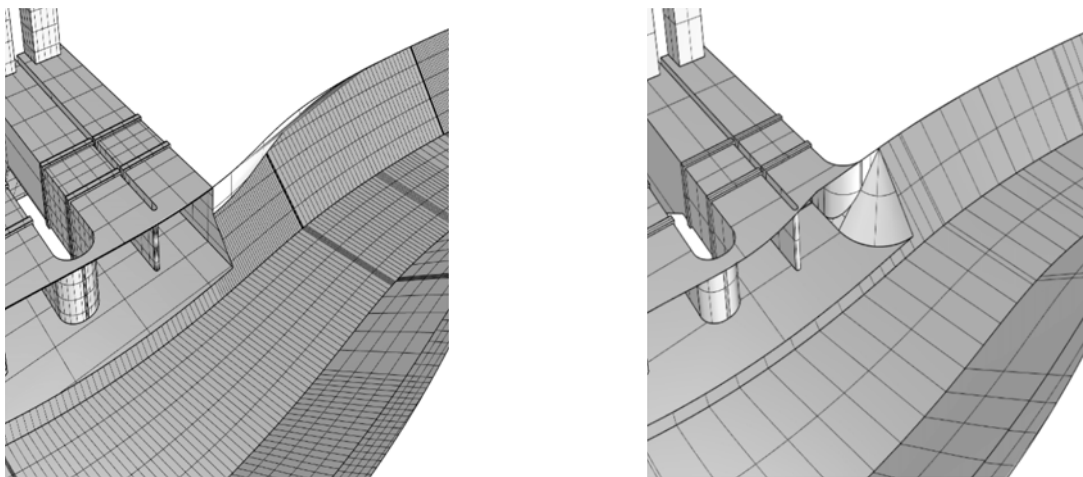
- Ter plaatse van sectie C bevindt zich de afwaartse overgangsconstructie tussen de kokers onder het kanaal en de kokers van de Zenne op rechteroever. Voor elk van de vier kokers heeft deze overgangsconstructie ter plaatse van de kokers onder het kanaal een breedte van 4 m. Deze breedte neemt naar de afwaartse bocht toe geleidelijk aan af van 4.0 m naar 2.6 m, i.e. de breedte van de kokers van de Zenne op rechteroever. Omwille van het behoud van de doorstroomsectie neemt de hoogte van de kokers hierbij toe van 2.3 m onder het kanaal naar 3.8 m, i.e. de hoogte van de kokers van de Zenne op rechteroever.
- Het opwaartse uiteinde van de nieuwe duiker sluit met een bocht van 90° aan op de bestaande loop van de Zenne. Bij het ontwerp van de geometrie van de nieuwe duiker is een meer geleidelijke overgang overwogen. De beschikbare ruimte was hiervoor echter niet voorhanden zonder de parkeerplaatsen aan linkeroever van de Zenne op te offeren (zie Figuur 9).
- Bij de rapportering van deze studie is vastgesteld dat het bodempeil, respectievelijk het plafondpeil van de kokers onder het kanaal 2.2 m lager is dan het bodempeil van +24.70 mTAW, respectievelijk het plafondpeil van +27.00 mTAW van de kokers onder het kanaal uit SBE (2015). Bij het aanmaken van het 3D model van de duiker is voor de afstand tussen het bodempeil van de Zenne en het bodempeil van de kokers onder het kanaal dezelfde afstand beschouwd als bij de afwaartse variant, terwijl dit bij de opwaartse variant 2.2 m minder moest zijn. Deze diepere ligging van de kokers onder het kanaal heeft een invloed op de verliescoëfficiënt van de opwaartse en afwaartse overgangsconstructies naar de kokers onder het kanaal. Deze zal in werkelijkheid lager zijn, waardoor ook het totale verlies over de duiker lager zal zijn.

2.2.3 Optimalisatie 1

Op basis van de resultaten van de CFD-simulaties met het initieel ontwerp van de opwaartse variant van de loodrechte kruising van het kanaal door de nieuwe duiker zijn volgende optimalisaties voorgesteld:

1. Aan het opwaartse uiteinde van de nieuwe duiker wordt de rechteroever van de Zenne afgerond (Figuur 13). Op deze locatie wordt een overgang met behulp van een kwartkegel voorzien naar het bestaande talud van de Zenne.

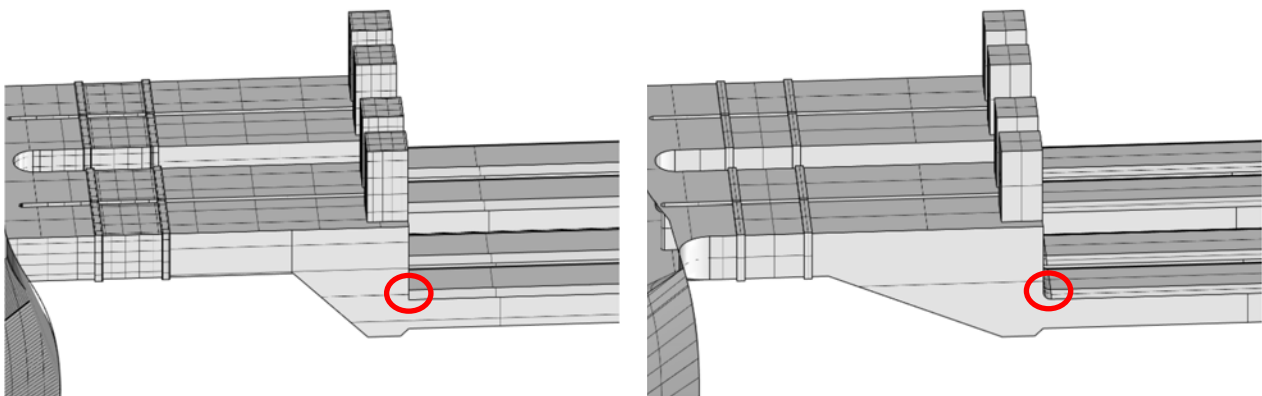
Figuur 13 – Optimalisatie inlaat opwaartse variant loodrechte kruising



links: initieel ontwerp inlaat; rechts: optimalisatie ontwerp inlaat

2. Ter plaatse van de overgangsconstructie tussen de Zenne opwaarts en de kokers onder het kanaal wordt de hoek tussen de verticale muur van de toegangsschacht en het plafond van de kokers onder het kanaal (aangeduid met rode cirkel in Figuur 14) afgerond met straal 0.5 m om de loslating hier te verminderen. Door het toevoegen van deze afronding wordt de toegangsschacht in de overgangsconstructie 0.5 m naar opwaarts verschoven. Daarnaast wordt de helling in de overgangsconstructie flauwer gemaakt. De helling begint opwaarts net na de sponningen voor de schuiven en eindigt ter plaatse van het verdiepte bodempeil in deze overgangsconstructie. Op deze wijze wordt een helling van ca. 23° bekomen in plaats van een helling van 45°.

Figuur 14 – Optimalisatie overgangsconstructie tussen Zenne opwaarts en kokers onder het kanaal



links: initieel ontwerp; rechts: optimalisatie ontwerp

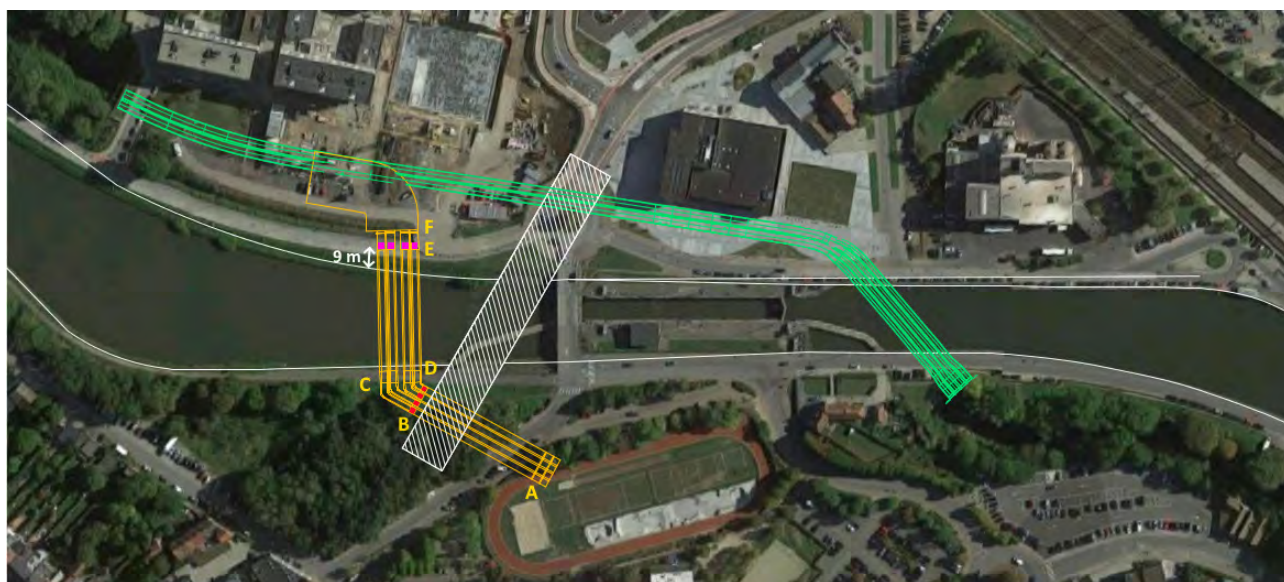
2.3 Afwaartse variant loodrechte kruising

2.3.1 Algemeen

Door WL werd een ontwerp gemaakt van de afwaartse variant van de loodrechte kruising van het kanaal Brussel-Charleroi door de nieuwe Zenneduiker. Voor de overgang tussen de Zenne en de kokers onder het kanaal wordt een analoge overgangsconstructie beschouwd als in SBE (2015), zie Figuur 3. Voor het uittekenen van deze variant werd ook rekening gehouden met de nieuwe ligging van de oeverlijnen van het Kanaal Brussel-Charleroi uit IMDC NV. (2016).

Figuur 15 geeft een voorstelling van de ligging van de afwaartse variant van de loodrechte kruising van de Zenneduiker.

Figuur 15 – Ligging afwaartse variant loodrechte kruising



witte lijnen: Ontwerp oeverlijnen kanaal Brussel-Charleroi uit IMDC NV (2016); witte arcering: contouren toekomstige brug over kanaal Brussel-Charleroi; groen: ligging huidige Zenneduiker; geel: ligging afwaartse variant loodrechte kruising nieuwe Zenneduiker met aanduiding van secties uit Figuur 16 en Tabel 5

Voor het ontwerp van de afwaartse variant van de loodrechte kruising van de duiker zijn door DVW volgende randvoorwaarden gesteld:

- De duiker kruist het kanaal Brussel-Charleroi loodrecht.
- Het bodempeil en plafondpeil van de duiker onder het kanaal worden overgenomen uit SBE (2015).
- Naar analogie met het ontwerp van SBE (2015) bevindt de opwaartse overgangsconstructie tussen de Zenne en de kokers onder het kanaal zich juist afwaarts van de zone waarin de nieuwe brug over het kanaal Brussel-Charleroi gepland is. Deze locatie is beschouwd omwille van de bereikbaarheid voor het uitvoeren van inspecties, het ruimen van specie uit de kokers of het plaatsen van een pomp in de verdiepte zone van de overgangsconstructie om de kokers leeg te pompen. De afdekroosters van deze overgangsconstructie (aangeduid in rood in Figuur 15) mogen zich namelijk niet onder de brug bevinden.
- Aan afwaartse zijde wordt tussen de kokers onder het kanaal en het afwaartse gedeelte van de Zenne ook een overgangsconstructie voorzien. Tussen de afdekroosters (aangeduid in paars in Figuur 15) van de toegangsschacht van deze overgangsconstructie en de nieuwe oeverlijn van het kanaal aan

rechteroever bevindt zich minimaal 9.0 m. Deze afstand is nodig voor de aanleg van een nieuwe fietssnelweg.

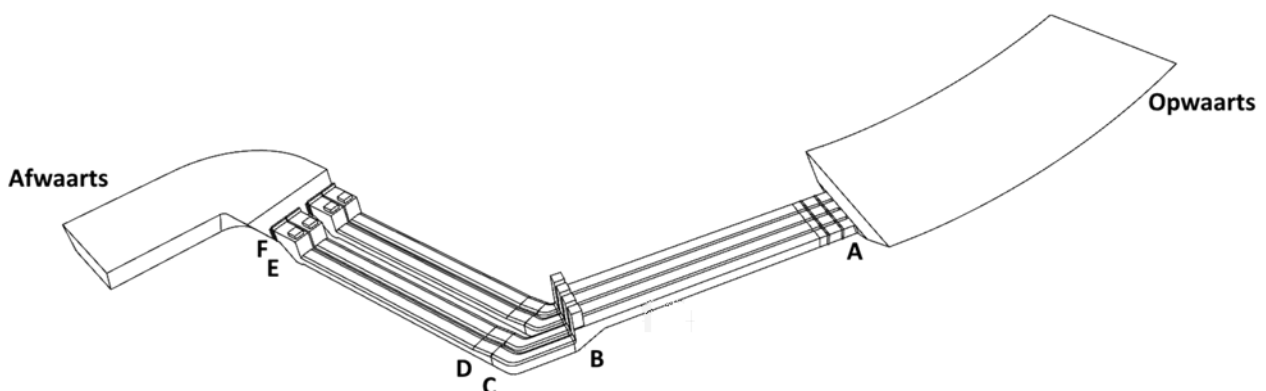
- Zowel aan opwaartse als aan afwaartse zijde van de nieuwe duiker wordt een landschapspark voorzien. De effectieve loop van de Zenne in dit landschapspark is nog niet gekend. Van dit landschapspark zijn voorlopig enkel een aantal ontwerpschetsen beschikbaar. Om die reden zijn de opwaartse en afwaartse delen van de Zenne eerder schematisch meegenomen in het ontwerp.

Rekening houdend met deze randvoorwaarden is het initiële ontwerp van de geometrie van de afwaartse variant van de nieuwe duiker uitgewerkt. Dit initiële ontwerp wordt beschreven in paragraaf 2.3.2. Een eerste en tweede optimalisatie van dit ontwerp op basis van de resultaten van de uitgevoerde CFD-simulaties met het initiële ontwerp worden beschreven in respectievelijk paragrafen 2.3.3 en 2.3.4. Bij het ontwerp van de nieuwe duiker wordt opgemerkt dat de vormgeving van een aantal elementen (overgangsconstructies tussen kokers onder het kanaal en de Zenne, sponningen voor schuiven en schotbalken, locaties van de overgangsconstructies, afmetingen van de kokers van de Zenne opwaarts en afwaarts en effectieve doorstroomsectie van de kokers onder het kanaal) overgenomen zijn uit het ontwerp van de nieuwe duiker in SBE (2015).

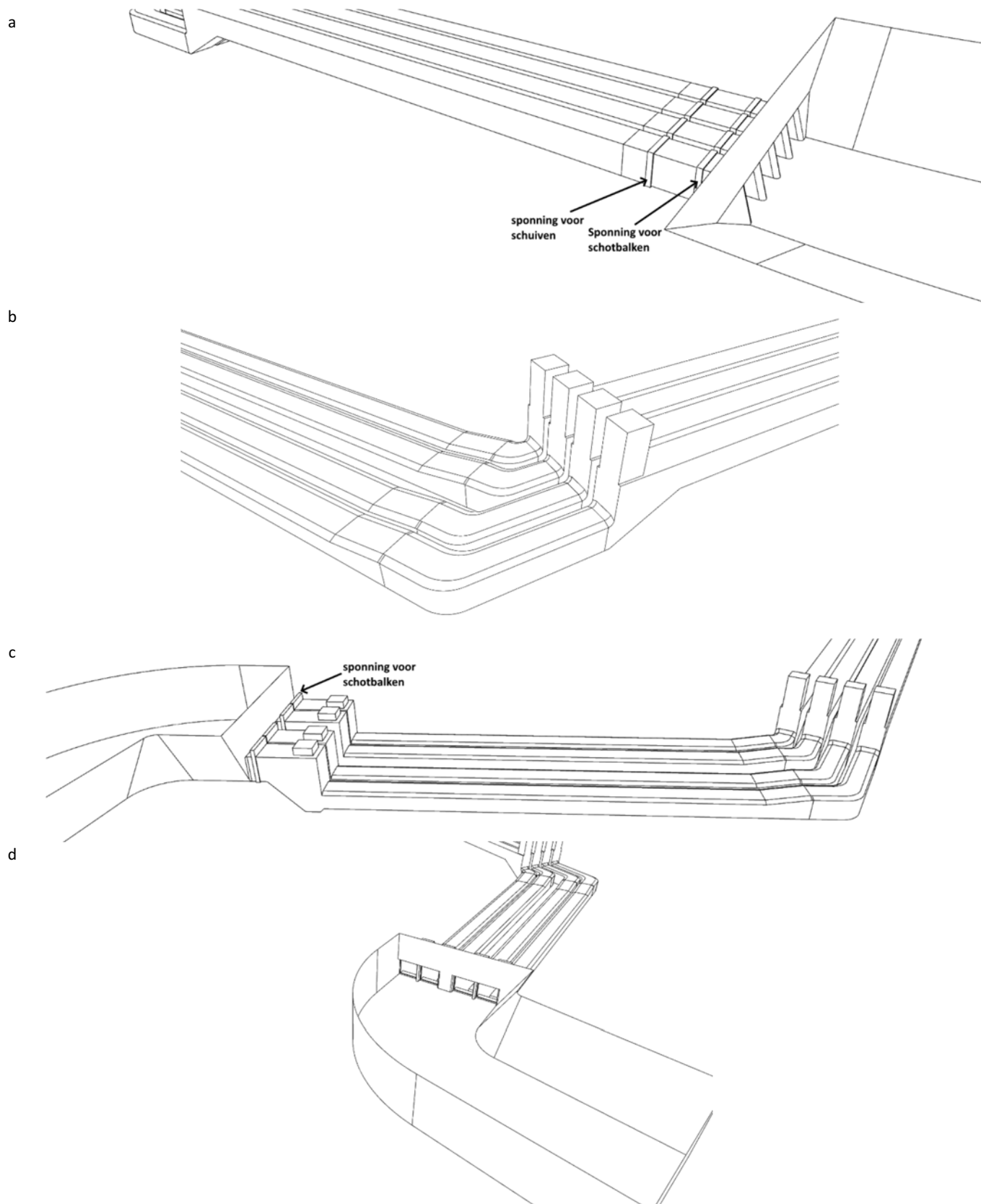
2.3.2 Initieel ontwerp

Figuur 16 toont de 3D CAD-geometrie van de afwaartse variant van de nieuwe duiker. Een aantal delen van de nieuwe duiker zijn in detail weergegeven in Figuur 17. Aan opwaartse zijde en onder het kanaal bestaat de duiker uit vier kokers. Aan het opwaartse uiteinde zijn in elke koker ook twee sponningen aanwezig, de meest opwaartse voor het aanbrengen van schotbalken om het opwaartse uiteinde van de koker af te sluiten en de meest afwaartse voor een schuif, waarmee de onderlinge debietsverdeling door de kokers gestuurd kan worden. Tussen sectie B en C wordt een bocht aangebracht, maar blijft de doorstroomsectie constant. Tussen sectie C en D varieert zowel de breedte als de hoogte van de vier kokers. Aan het afwaartse uiteinde van de nieuwe duiker (ter plaatse van sectie F) worden sponningen voor het aanbrengen van schotbalken voorzien om het afwaartse uiteinde van de kokers af te sluiten. Tabel 3 geeft een overzicht van een aantal karakteristieke afmetingen van de afwaartse variant van de nieuwe duiker. Tabel 4 geeft een overzicht van de bodempeilen en plafondpeilen van de nieuwe duiker.

Figuur 16 – 3D CAD-model van het initiële ontwerp van de afwaartse variant van de loodrechte kruising



Figuur 17 – Details geometrie initieel ontwerp afwaartse variant loodrechte kruising



a: detail opwaarts uiteinde duiker; b: detail overgangsconstructie tussen Zenne opwaartse en kokers onder kanaal;
c: detail kokers onder kanaal en overgangsconstructie naar Zenne afwaarts; d: detail afwaarts uiteinde duiker

Tabel 5 – Karakteristieke afmetingen initieel ontwerp afwaartse variant loodrechte kruising

Sectie	Lengte	Aantal kokers	Breedte kokers	Hoogte kokers	Totale sectie
AB	67 m	4	3.00 m	3.00 m	36.0 m ²
BC	Variërend tussen ca. 3.4 m en ca. 13.3 m	4	3.00 m	3.10 m	37.2 m ²
CD	6 m	4	Variërend tussen 3.00 m en 4.00 m	Variërend tussen 3.10 m en 2.30 m	Variërend tussen 37.2 m ² en 36.8 m ²
DE	57 m	4	4.00 m	2.30 m	36.8 m ²
EF	2 m	4	4.00 m	3.50 m	56.0 m ²

Tabel 6 - Bodempeilen en plafondpeilen initieel ontwerp afwaartse variant loodrechte kruising

Sectie	Bodempeil	Plafondpeil
Zenne opwaarts	+26.16 mTAW	n.v.t.
A	+26.16 mTAW	+29.16 mTAW
B	+26.16 mTAW	+29.16 mTAW
	+22.10 mTAW	+25.20 mTAW
C	+22.10 mTAW	+25.20 mTAW
D	+22.10 mTAW	+24.40 mTAW
E	+22.10 mTAW	+24.40 mTAW
	+26.00 mTAW	+29.50 mTAW
H	+26.00 mTAW	+29.50 mTAW
Zenne afwaarts	+26.00 mTAW	n.v.t.

n.v.t. = niet van toepassing

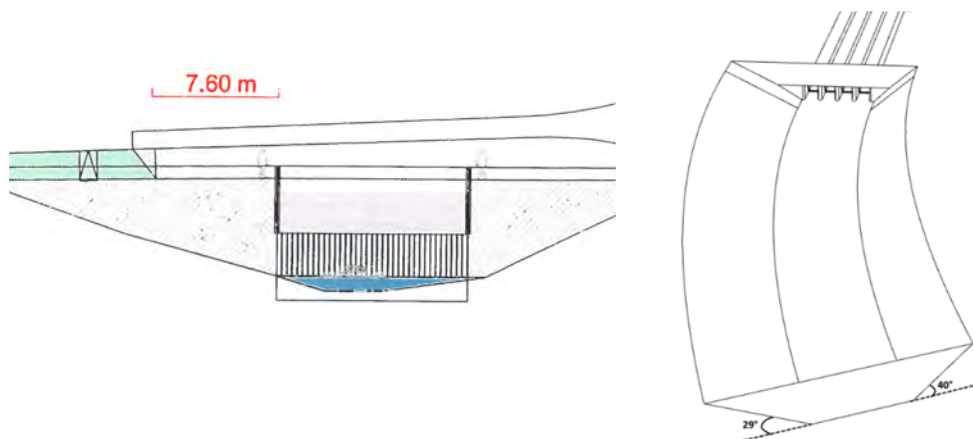
Aan opwaartse en afwaartse zijde mondt de duiker uit in de Zenne. Op deze locaties loopt de Zenne in een landschapspark. Een ontwerpschets van dit landschapspark is gegeven in Figuur 18. De eigenlijke loop van de Zenne in dit landschapspark is nog niet gekend. Om die reden is de Zenne ter plaatse van de inlaat en de uitlaat van de nieuwe duiker eerder schematisch aan het numeriek model toegevoegd.

Figuur 18 – Ontwerpschets landschapspark (Omgeving, 2015)



Met betrekking tot de vormgeving van de Zenne opwaarts van de nieuwe duiker moet opgemerkt worden dat de helling van de beide oevers van dit gedeelte van de Zenne bij het ontwerp foutief omgewisseld zijn in het 3D CAD-model. Figuur 19 vergelijkt de dwarssectie van de Zenne uit het ontwerp van het landschapspark Zenne met de dwarssectie van de Zenne uit de CFD-simulaties. Het feit dat de helling van de oevers omgewisseld zijn in de CFD-simulaties heeft hydraulisch een verwaarloosbare invloed. Om die reden is dit niet meer aangepast in het 3D-CAD model voor de CFD-simulaties.

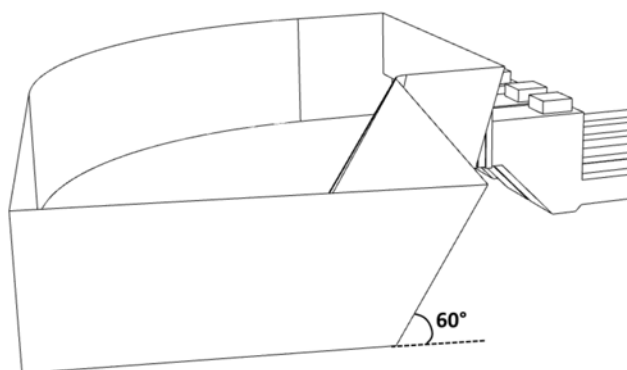
Figuur 19 – Vergelijking dwarssectie Zenne uit ontwerp landschapspark Zenne met dwarssectie van de Zenne in de CFD-simulaties



links: dwarssectie Zenne uit ontwerp landschapspark Zenne (Omgeving, 2015);
rechts: dwarssectie van de Zenne in de CFD-simulaties

Afwaarts van de nieuwe duiker wordt de rechteroever van de Zenne als een verticale wand uitgevoerd (zie Figuur 20). Omwille van de beschikbare ruimte tussen de Zenne en de gebouwen op deze locatie is de enige mogelijkheid om de bocht hydraulisch vorm te geven het realiseren van deze oever door middel van een verticale wand. De rechteroever maakt in het CFD-model een hoek van 60° met de bodem. Een hoek van 60° is beduidend hoger dan de (maximale) hoek van interne stabiliteit van breuksteen (40°). Bijgevolg kan deze oever niet uitgevoerd worden in breuksteen, indien dit nodig zou zijn. Bij het uittekenen van de geometrie van de afwaartse variant van de duiker in 3D is foutief deze hoek van 60° beschouwd. Het overgaan naar een flauwere hoek bij toepassen van een oeverbekleding uit breuksteen of een eventuele overgang naar een verticale oever heeft een verwaarloosbare invloed op de resultaten. Bijgevolg is dit niet meer aangepast in het 3D model.

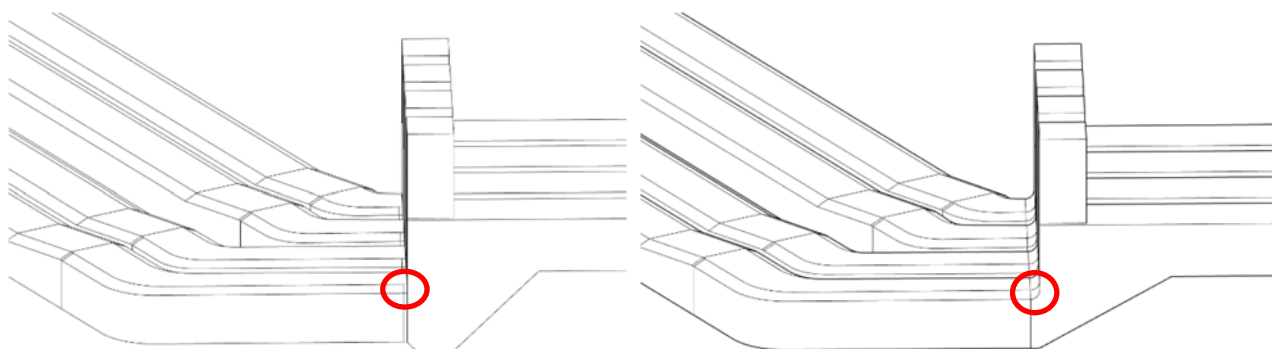
Figuur 20 – Oevers Zenne afwaarts van nieuwe duiker



2.3.3 Optimalisatie 1

Op basis van de resultaten van de CFD-simulaties met het initieel ontwerp van de afwaartse variant van de nieuwe duiker is als eerste optimalisatie voorgesteld om de verdieping van het bodempeil in de overgangsconstructie tussen de Zenne opwaarts en de kokers onder het kanaal weg te laten. Deze verdieping kan aan opwaartse zijde weggelaten worden, aangezien aan afwaartse zijde ook een verdieping aanwezig is voor het plaatsen van pompen of het ruimen van specie. Door het weglaten van deze verdieping kan de helling in de overgangsconstructie aangepast worden naar een hoek van 33° wat beduidend minder steil is dan de hellingshoek van 45° uit het initiële ontwerp (zie Figuur 21). Daarnaast wordt, naar analogie met de opwaartse variant van de nieuwe duiker, de rechte hoek tussen het plafond van de kokers onder het kanaal en de verticale muur van de toegangsschacht afgerond met een straal 0.5 m.

Figuur 21 – Optimalisatie overgangsconstructie tussen Zenne opwaarts en kokers onder het kanaal

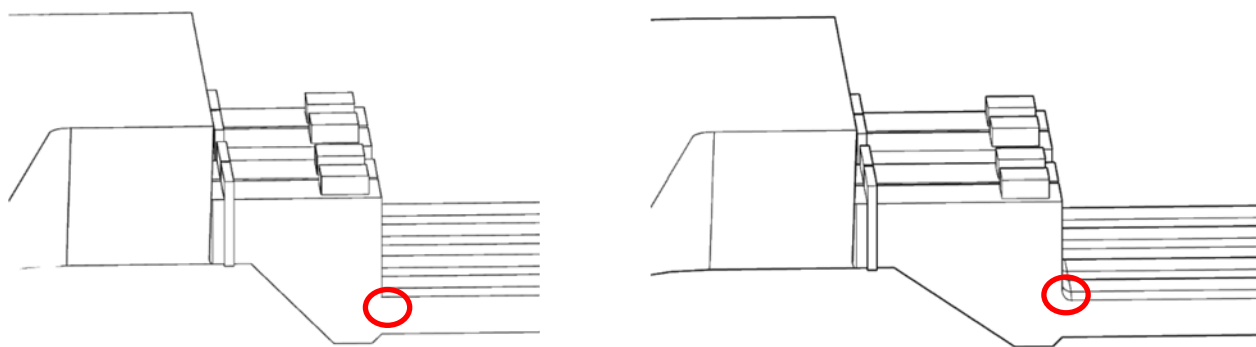


links: initieel ontwerp; rechts: optimalisatie ontwerp

2.3.4 Optimalisatie 2

Na het uitvoeren van de simulaties met de geometrie van optimalisatie 1 is, analoog aan de optimalisatie van de overgangsconstructie opwaarts, de helling in de overgangsconstructie afwaarts flauwer gemaakt. Hiervoor is de zone met verdiept bodempeil circa 2.0 m in de richting van de oevers van het kanaal Brussel-Charleroi verschoven. De minimale afstand van 9.0 m tussen de nieuwe rechteroever van het kanaal en de afdekroosters van de toegangsschacht van de overgangsconstructie is bij deze optimalisatie bijgevolg verminderd naar 7.0 m. Hierdoor neemt de bodemhelling in overgangsconstructie af van 45° naar 34.5° . Analooq aan de optimalisatie van de overgangsconstructie tussen de Zenne opwaarts en de kokers onder het kanaal is ook hier de hoek tussen het plafond van de kokers onder het kanaal en de verticale muur van de toegangsschacht afgerond met een straal 0.5 m. Figuur 22 vergelijkt de geometrie van de overgangsconstructie afwaarts uit het initiële ontwerp met het ontwerp van deze optimalisatie.

Figuur 22 – Optimalisatie overgangsconstructie tussen kokers onder het kanaal en Zenne afwaarts



links: initieel ontwerp; rechts: optimalisatie ontwerp

3 Hydraulische randvoorwaarden CFD-simulaties

Dit hoofdstuk beschrijft de bepaling van de hydraulische randvoorwaarden voor de uitgevoerde CFD-simulaties.

Bij de bepaling van de hydraulische randvoorwaarden is de hydrologische situatie van de Zenne te Halle belangrijk. Het debiet doorheen de Zenne te Halle wordt bepaald door de stuw en de overlaat op de Zenne die circa 3.4 km opwaarts te Lembeek aanwezig zijn. De overlaat heeft een constant kruinpeil en leidt bij waterpeilen hoger dan dit kruinpeil water af van de Zenne naar het Kanaal Brussel-Charleroi. Figuur 23 geeft een voorstelling van de ligging van deze stuw en overlaat. De Zenne valt onder beheer van de VMM. De stuw te Lembeek is eigendom van de Vlaamse Waterweg nv, maar wordt bediend door de VMM. In het verleden werd deze stuw niet automatisch bediend en had deze een vaste positie, waarbij deze voor 0.60 m opgetrokken was. Op dit ogenblik wordt de stuw wel bediend door VMM.

Met betrekking tot de hydrologische toestand van de Zenne dient het volgende opgemerkt te worden:

- Afwaarts van de Zenneduiker te Halle kan met behulp van de watervang van de Aa ter plaatse van de sluis van Anderlecht een bijkomend debiet van de Zenne naar het kanaal Brussel-Charleroi afgeleid worden. Dit debiet bedraagt maximaal 24 m³/s.
- In het centrum van Brussel is de Zenne overwelfd. Met behulp van de twee kokers van deze overwelfing kan maximaal 60 m³/s afgevoerd worden.

Figuur 23 – Stuw en overlaat op de Zenne te Lembeek



blauwe lijn: Kanaal Brussel-Charleroi; groene lijn: Zenne

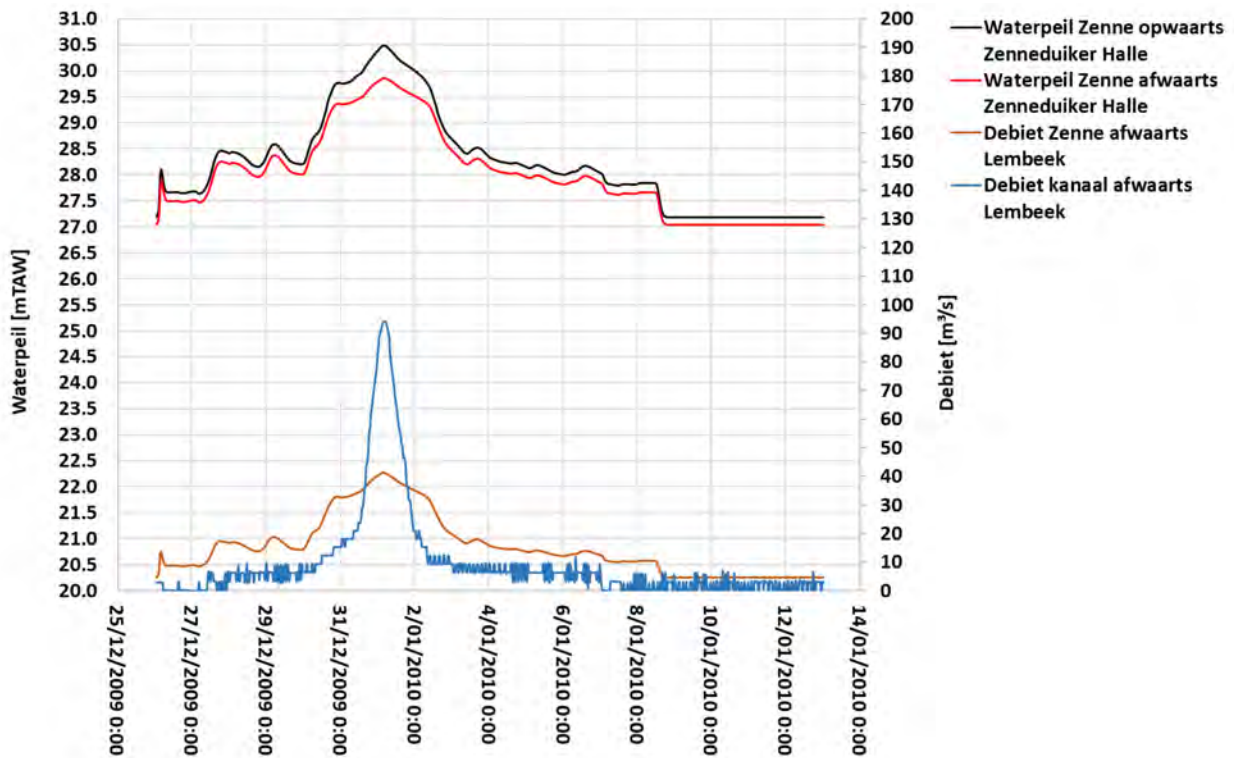
Het WL heeft een 1D model beschikbaar van het kanaal Brussel-Charleroi en de Zenne (Pereira *et al.*, 2015). Een beschrijving van dit model wordt gegeven in hoofdstuk 5.

Voor het bepalen van de hydraulische randvoorwaarden voor de CFD-modellering worden simulaties met het 1D-model van de Zenne van WL uitgevoerd. Bij dit numeriek model moet opgemerkt worden dat de bathymetrie van dit model bestaat uit de peilingen van de Zenne van 2004. Met dit numeriek model zijn simulaties uitgevoerd met de huidige duiker voor een was met een terugkeerperiode van 50 jaar en een was met een terugkeerperiode van 100 jaar. Voor deze simulaties wordt de stuw te Lembeek volledig opengezet. Figuur 24 en Figuur 25 tonen voor de was met een terugkeerperiode van respectievelijk 50 en 100 jaar de variatie in de tijd van het waterpeil in de Zenne opwaarts en afwaarts van de Zenneduiker te Halle, het debiet in de Zenne afwaarts Lembeek en het debiet op het kanaal afwaarts van Lembeek. Tabel 7 geeft voor deze beide simulaties een overzicht van de maximale waterstand opwaarts en afwaarts van de Zenneduiker te Halle en het maximaal debiet door de Zenne te Halle. Hierbij wordt opgemerkt dat de beschouwde toestanden eerder situaties betreffen met een relatief groot debiet door de Zenne, dewelke in het verleden nog niet voorgekomen zijn. In het verleden werd consequent een groter debiet afgeleid naar het Kanaal Brussel-Charleroi, waardoor het debiet door de Zenne zelfs in wasperiodes beduidend lager was dan de 41.7 m³/s uit Tabel 7. Deze beduidend hogere debieten door de Zenne kunnen in de toekomst voorkomen bij een eventuele wijziging van het beleid met betrekking tot de verdeling van het debiet door de Zenne en het debiet dat te Lembeek afgeleid wordt naar het kanaal Brussel-Charleroi. Om die reden zijn deze hogere debieten beschouwd als randvoorwaarden voor het uitvoeren van de CFD-modellering.

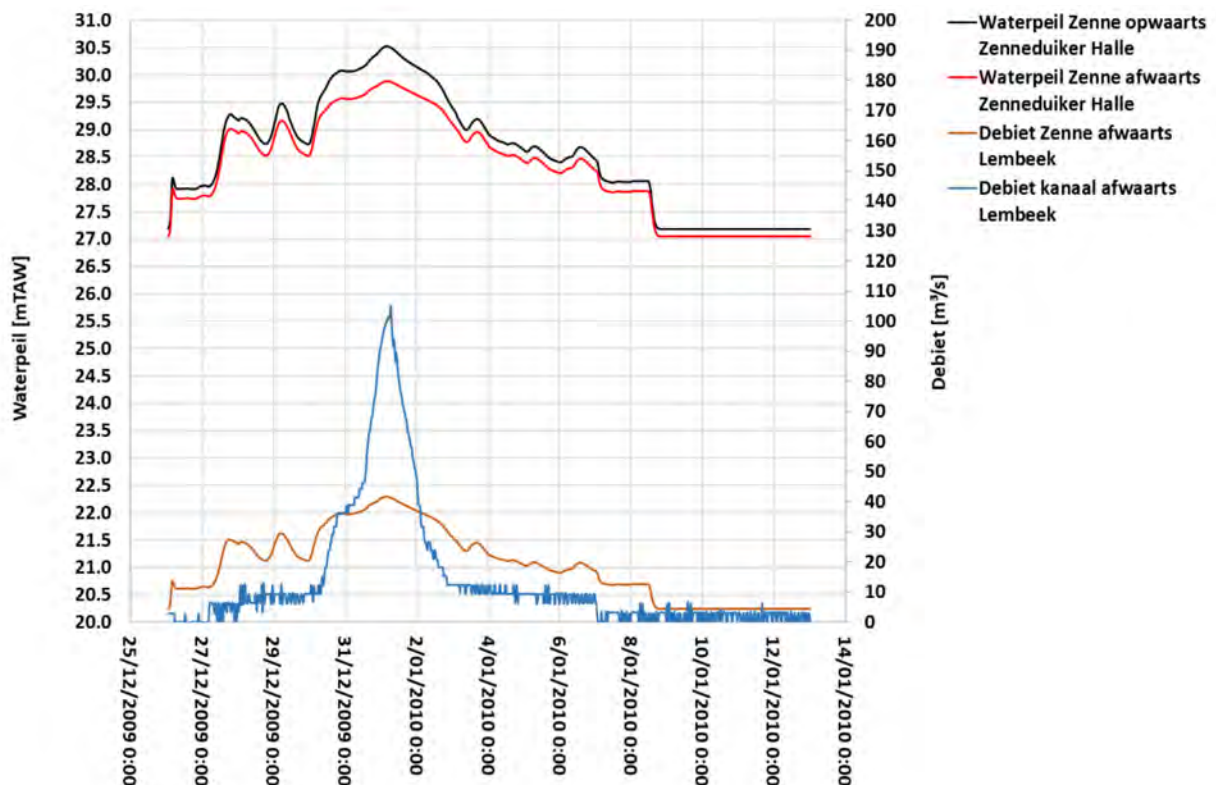
Tabel 7 – Hydraulische randvoorwaarden voor CFD-modellering

	T50	T100
Waterstand opwaarts	+30.48 mTAW	+30.52 mTAW
Waterstand afwaarts	+29.86 mTAW	+29.89 mTAW
Debiet	41.3 m ³ /s	41.7 m ³ /s

Figuur 24 – Variatie in de tijd van het waterpeil opwaarts en afwaarts van de Zenneduiker te Halle, het debiet in de Zenne en het debiet op het kanaal afwaarts Lembeek bij de was met terugkeerperiode 50 jaar



Figuur 25 – Variatie in de tijd van het waterpeil opwaarts en afwaarts van de Zenneduiker te Halle, het debiet in de Zenne en het debiet op het kanaal afwaarts Lembeek bij de was met terugkeerperiode 100 jaar



4 Resultaten CFD-simulaties

4.1 Algemeen

Voor de verschillende geometrieën beschreven in hoofdstuk 2 zijn CFD-simulaties uitgevoerd. De resultaten van deze simulaties worden in dit hoofdstuk beschreven. Deze paragraaf beschrijft in het kort enkele belangrijke karakteristieken van de uitgevoerde CFD-simulaties. Voor een meer gedetailleerde beschrijving van de uitgevoerde CFD-simulaties wordt verwezen naar het rapport van het studiebureau in bijlage A van dit rapport.

Vooraleer een CFD-simulatie uit te voeren wordt op basis van de 3D CAD-geometrie een rekenrooster opgemaakt. Bij de opmaak van het rekenrooster zijn in de duiker en in het gedeelte van de Zenne waar water stroomt cellen beschouwd met een minimale lengte van 50 mm en een maximale lengte van 150 mm. In het gedeelte van het rekenrooster waar lucht aanwezig is, wordt voor de roostercellen een minimale lengte van 50 mm en een maximale lengte van 500 mm beschouwd. Tabel 8 geeft voor alle beschouwde geometrieën een overzicht van het aantal roostercellen van het rekenrooster. Met betrekking tot de 3D CAD-geometrie wordt opgemerkt dat deze ook de sponningen voor schuiven en sponningen voor schotbalken om de duiker af te sluiten bevatten. Deze sponningen zijn lokale verdiepingen in de duiker. De beperkte afmetingen van deze lokale verdiepingen zouden bij het genereren van het rekenrooster leiden tot een rekenrooster met zeer kleine roostercellen op deze locaties. Dit verhoogt de rekentijd beduidend. Aangezien deze sponningen een verwaarloosbare invloed hebben op de stroming en dus ook op de verliezen van de duiker, zijn deze niet meegenomen in het rekenrooster van de CFD-simulaties.

De CFD-simulaties zijn uitgevoerd met de InterFoam solver van OpenFOAM versie 6. Hierbij is gebruik gemaakt van een LTS (Local Time Stepping) tijdsdiscretisatie. InterFoam is een tijdsafhankelijke twee-fase VOF (Volume of Fluid) solver voor twee strikt gescheiden onsamendrukbaar stromende media. Het gekozen LTS schema dient om zo snel mogelijk naar een steady-state situatie te convergeren. Daarbij hoort ook een RANS (Reynolds Averaged) turbulentiemodel. In dit geval is gekozen voor het k- ω -SST model. Voor het uitvoeren van de CFD-simulaties wordt op de afwaartse rand van het numeriek model een waterstand opgelegd en op de opwaartse rand het debiet door de Zenneduiker. De opwaartse waterstand volgt dan uit de CFD-simulatie. Voor het uitvoeren van de CFD-simulaties wordt de maximale waterstand afwaarts van de Zenneduiker en het maximale debiet door de Zenneduiker beschouwd, dewelke met het 1D numeriek model van de Zenne van WL voor de was met een terugkeerperiode van 100 jaar (zie Tabel 7 in hoofdstuk 3) berekend zijn.

Met deze randvoorwaarden en instellingen zijn simulaties uitgevoerd voor alle geometrieën beschreven in hoofdstuk 2. In de loop van de uitvoering van de studie is gebleken dat, wat opstuwing betreft (zie paragraaf 4.2), de opwaartse en de afwaartse variant van de loodrechte kruising weinig van elkaar verschillen. Omwille van de beperkt aanwezige beschikbare open ruimte en omwille van constructieve redenen (lange kokers op rechtoever, het tracé is zo goed als niet realiseerbaar via boren, werken in de diepte vlakbij de bebouwing) heeft de opdrachtgever in de loop van het project de voorkeur uitgesproken voor de afwaartse variant van de loodrechte kruising. Voor deze afwaartse variant zijn met optimalisatie 2 van de geometrie nog volgende extra simulaties uitgevoerd:

- Een simulatie waarbij het volledige debiet van 41.7 m³/s door één koker wordt afgevoerd. Alle andere kokers zijn hierbij afgesloten. Deze toestand kan zich voordoen wanneer bijvoorbeeld de 3 overige kokers worden afgesloten om aan de hand van de hogere optredende stroomsnelheden in de koker de aanwezige aanslibbing in de betreffende koker van de duiker weg te spoelen of tijdens herstellingswerken of onderhoudswerken aan de andere kokers.
- Een simulatie met het maximale debiet door de Zenne van 70 m³/s. De bepaling van dit maximale debiet wordt beschreven in hoofdstuk 5. Deze laatste simulatie is door WL zelf uitgevoerd en is

bijgevolg niet gerapporteerd in bijlage A van dit rapport. Enkel de voornaamste resultaten van deze simulatie worden gerapporteerd en besproken in dit hoofdstuk.

Deze extra simulaties hebben tot doel de werking van de duiker in een aantal extreme situaties na te gaan en na te gaan of zich bij deze extreme situaties afwijkende stromingspatronen voordoen in de duiker.

Tabel 8 geeft een overzicht van alle uitgevoerde CFD-simulaties, het aantal roostercellen voor het beschouwde rekenrooster en de toegepaste randvoorwaarden op de opwaartse en afwaartse randen van het model.

Tabel 8 – Overzicht uitgevoerde CFD-simulaties, aantal roostercellen en toegepaste randvoorwaarden

Geometrie		Aantal roostercellen	Waterstand afwaarts	Debiet
Huidige duiker		24 395 125	+29.89 mTAW	41.7 m ³ /s
Opwaartse variant loodrechte kruising	Initieel ontwerp	21 835 908	+29.89 mTAW	41.7 m ³ /s
	Optimalisatie 1	31 953 794	+29.89 mTAW	41.7 m ³ /s
Afwaartse variant loodrechte kruising	Initieel ontwerp	26 508 994	+29.89 mTAW	41.7 m ³ /s
	Optimalisatie 1	28 857 048	+29.89 mTAW	41.7 m ³ /s
	Optimalisatie 2	33 456 210	+29.89 mTAW	41.7 m ³ /s
		33 456 210	+31.22 mTAW	70.0 m ³ /s
	Optimalisatie 2 (3 kokers afgesloten)	26 726 123	+29.89 mTAW	41.7 m ³ /s

De volgende paragrafen beschrijven de resultaten van de verschillende uitgevoerde CFD-simulaties. Achtereenvolgens worden volgende parameters besproken:

1. stroomsnelheid in karakteristieke secties van de duiker (paragraaf 4.2),
2. opstuwingsdruk in de Zenne ten gevolge van de nieuwe Zenneduiker (paragraaf 4.3),
3. verliescoëfficiënten van de verschillende onderdelen van de duiker (paragraaf 4.4),
4. verdeling van het debiet over de verschillende kokers van de duiker (paragraaf 4.5).

Om beperkte periodieke fluctuaties in de resultaten uit te middelen worden de resultaten uitgemiddeld over de laatste 20000 iteraties.

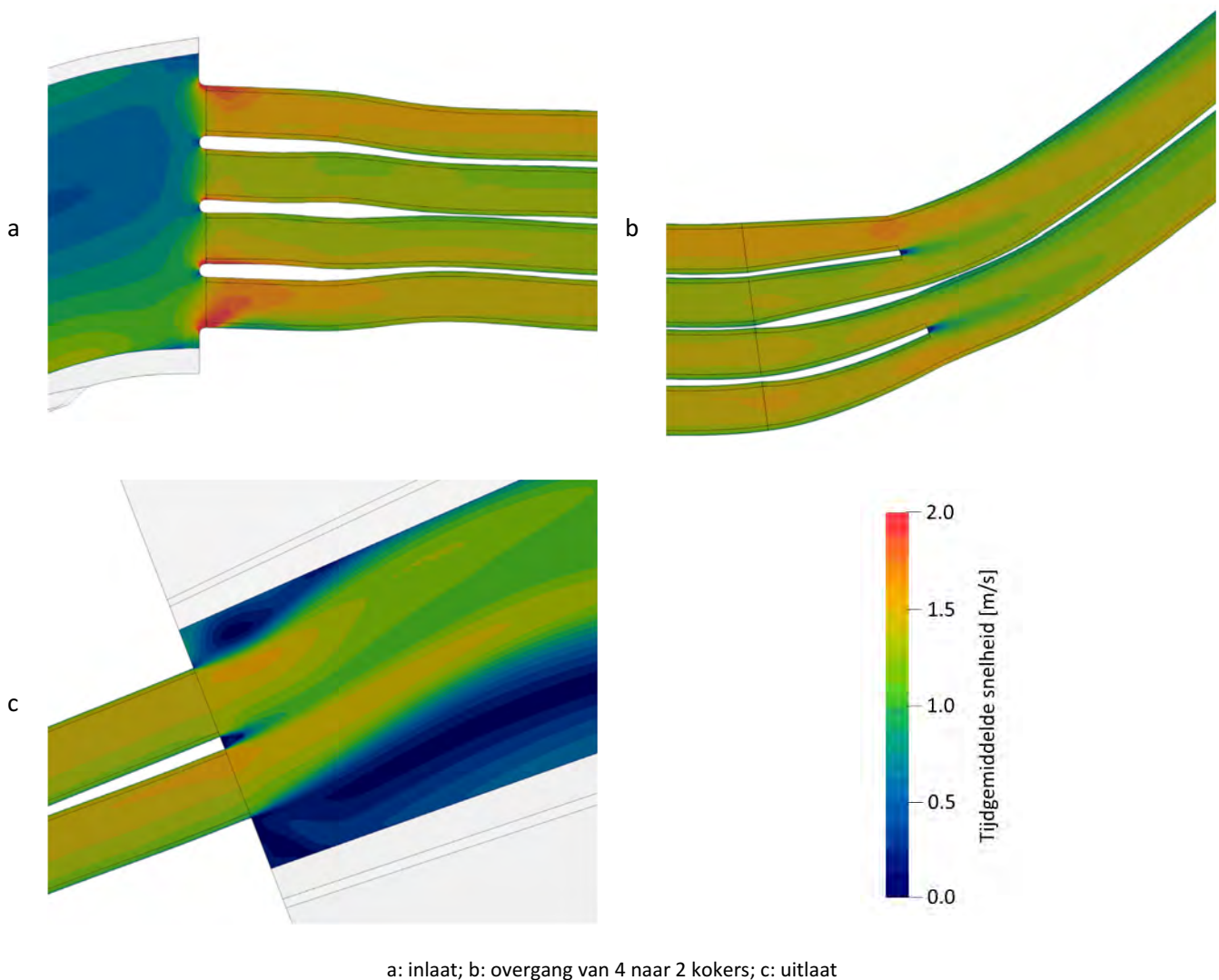
4.2 Stroomsnelheid in karakteristieke secties van de duiker

In deze paragraaf wordt voor de huidige duiker en de opwaartse en de afwaartse varianten van de loodrechte kruising het stromingspatroon besproken. Hiervoor wordt in een aantal karakteristieke secties van de duiker de berekende stroomsnelheid gevisualiseerd. Voor grafische voorstellingen van de stroomsnelheden in andere secties van de betreffende duikers wordt verwezen naar het rapport van het studiebureau in Bijlage A van dit rapport.

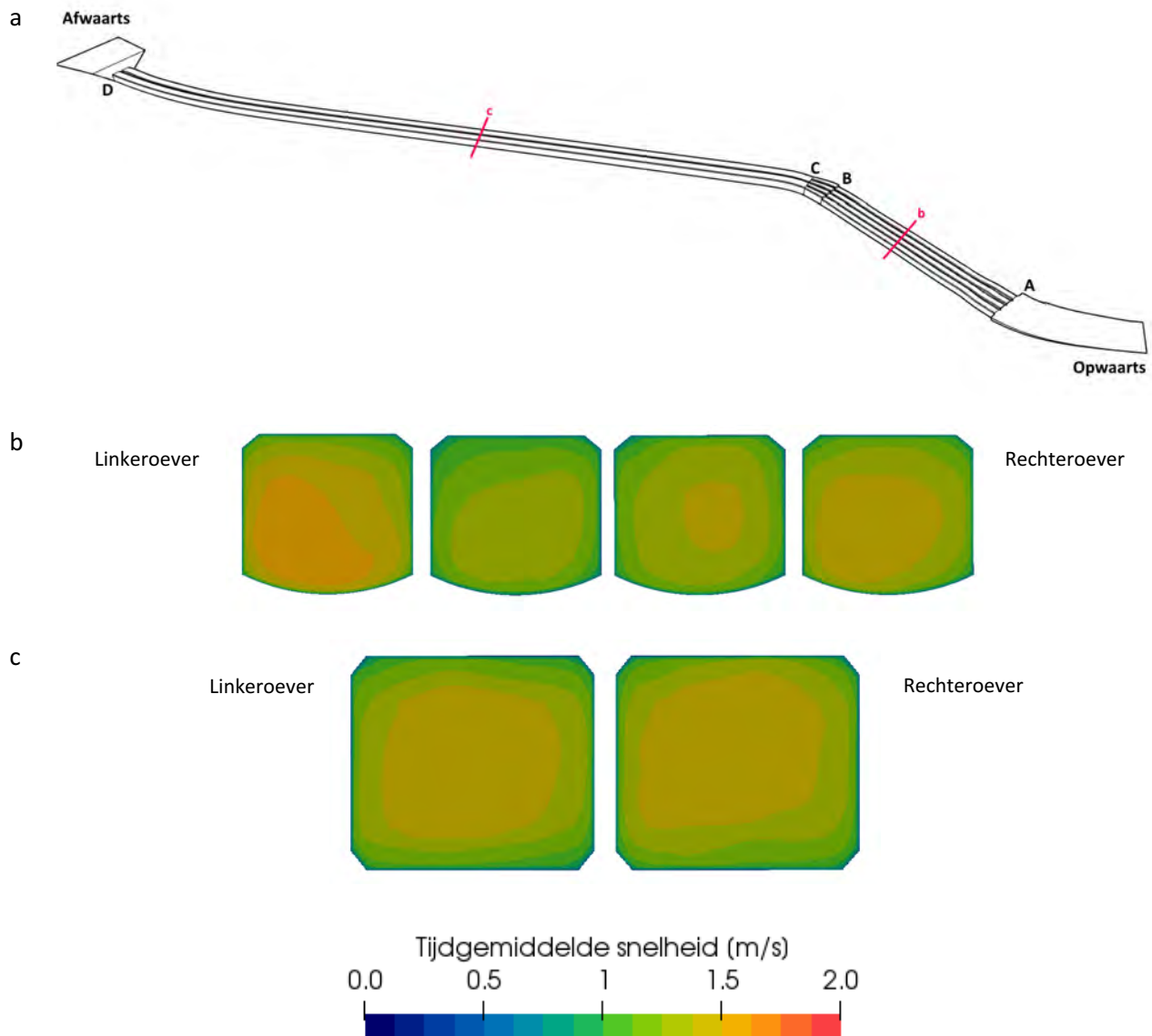
4.2.1 Huidige Zenneduiker

Figuur 26 geeft een grafische voorstelling van de stroomsnelheid ter plaatse van de overgangen in de huidige duiker. Figuur 27 geeft een grafische voorstelling van de stroomsnelheid in een aantal dwarssecties.

Figuur 26 – Stroomsnelheid ter plaatse van overgangen voor de simulatie met de huidige duiker



Figuur 27 – Stroomsnelheid in een aantal secties voor de simulatie met de huidige duiker



a: locatie secties voor visualisatie snelheden; b: Kokers onder kanaal; b: Twee lange kokers afwaarts;
opmerking: schaal figuren voor sectie b en sectie c is niet dezelfde

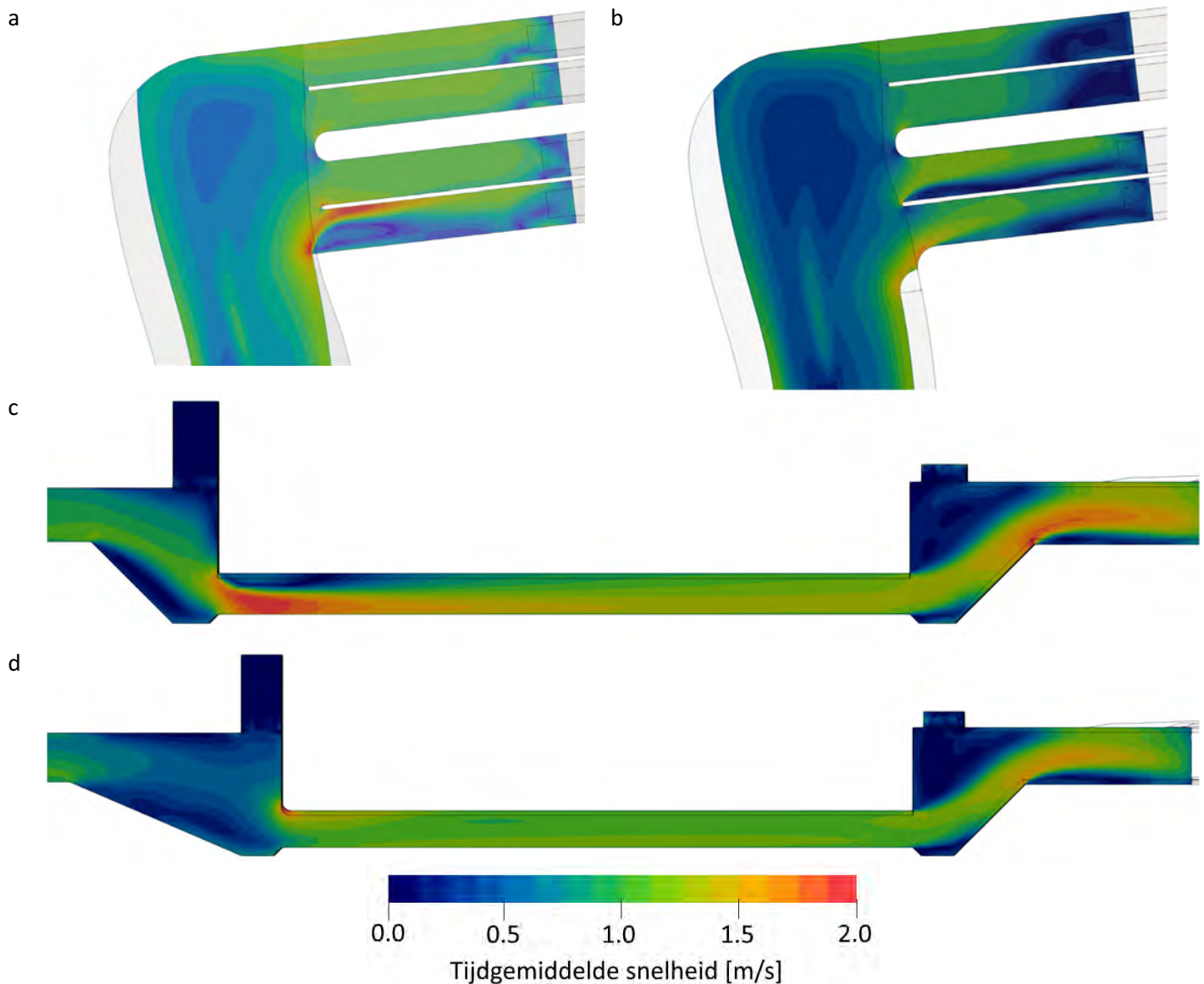
Uit Figuur 26 en Figuur 27 volgt het volgende:

- Ter plaatse van de inlaat wordt een beperkte loslating van de stroming waargenomen aan de afgeronde tussenmuren tussen de kokers. De hoogste stroomsnelheden van ca. 2.0 m/s doen zich voor aan de buitenste afgeronde hoeken van de buitenste kokers.
- Bij samenvoegen van de stroming ter plaatse van de overgang van vier naar twee kokers en ter plaatse van de uitlaat doet zich een loslating voor ter plaatse van de tussenmuur tussen de kokers.
- Aan de uitlaat van de duiker wordt de stroming uit de twee kokers samengevoegd. Omwille van de asymmetrie van het profiel van de Zenne op deze locatie doen de grootste stroomsnelheden zich voor aan de linkeroever van de Zenne.

4.2.2 Opwaartse variant loodrechte kruising

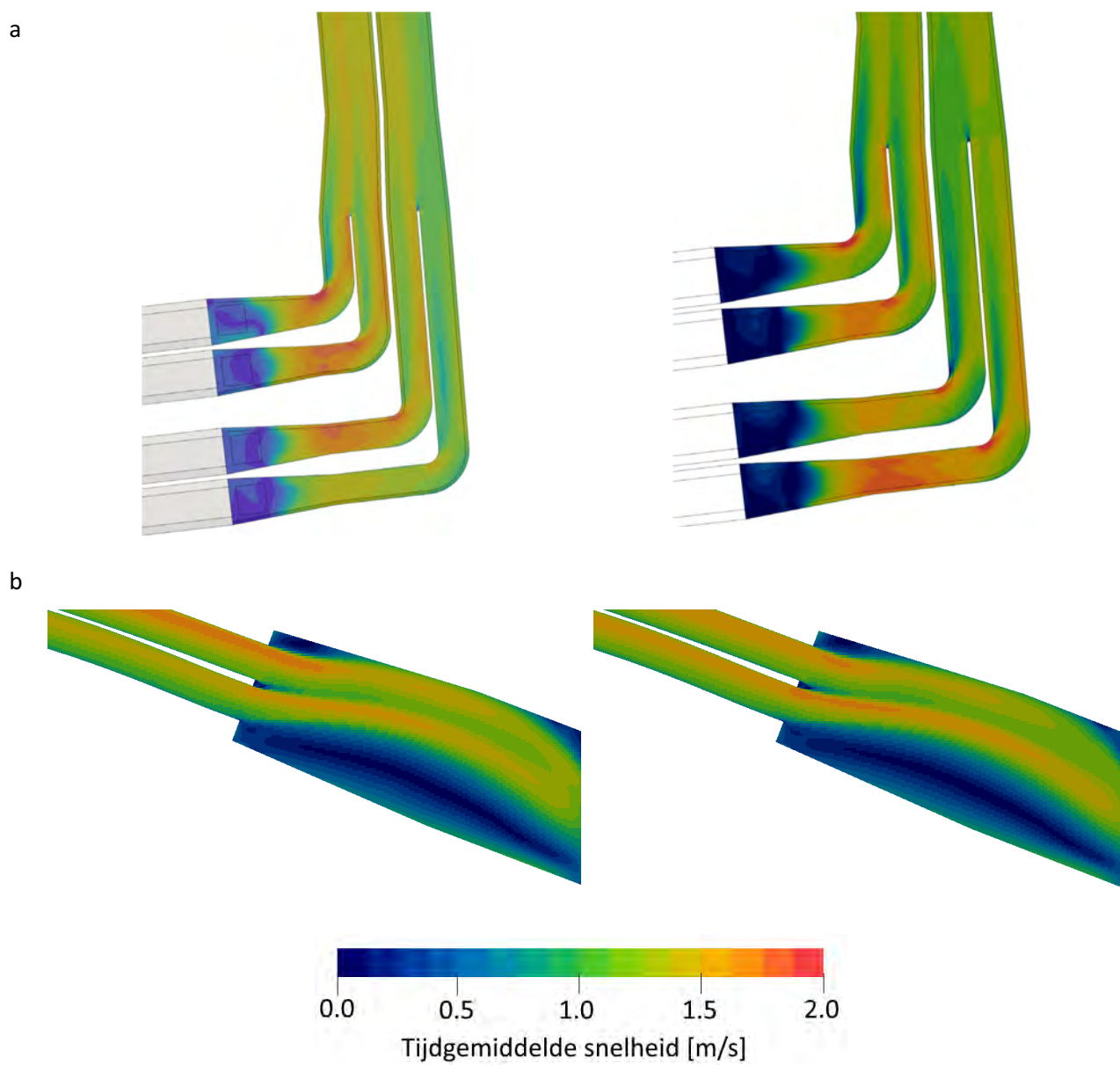
Figuur 28 en Figuur 29 geven een grafische voorstelling van de stroomsnelheid ter plaatse van een aantal overgangen in de opwaartse variant van de loodrechte kruising. Figuur 30 geeft voor deze variant een grafische voorstelling van de stroomsnelheid in een aantal dwarssecties van de duiker. In deze figuren wordt zowel het snelheidsveld getoond voor het initieel ontwerp als dit voor het geoptimaliseerde ontwerp.

Figuur 28 – Stroomsnelheid ter plaatse van de inlaat en ter plaatse van de overgangsconstructie naar de kokers onder het kanaal voor de simulaties met de opwaartse variant van de loodrechte kruising



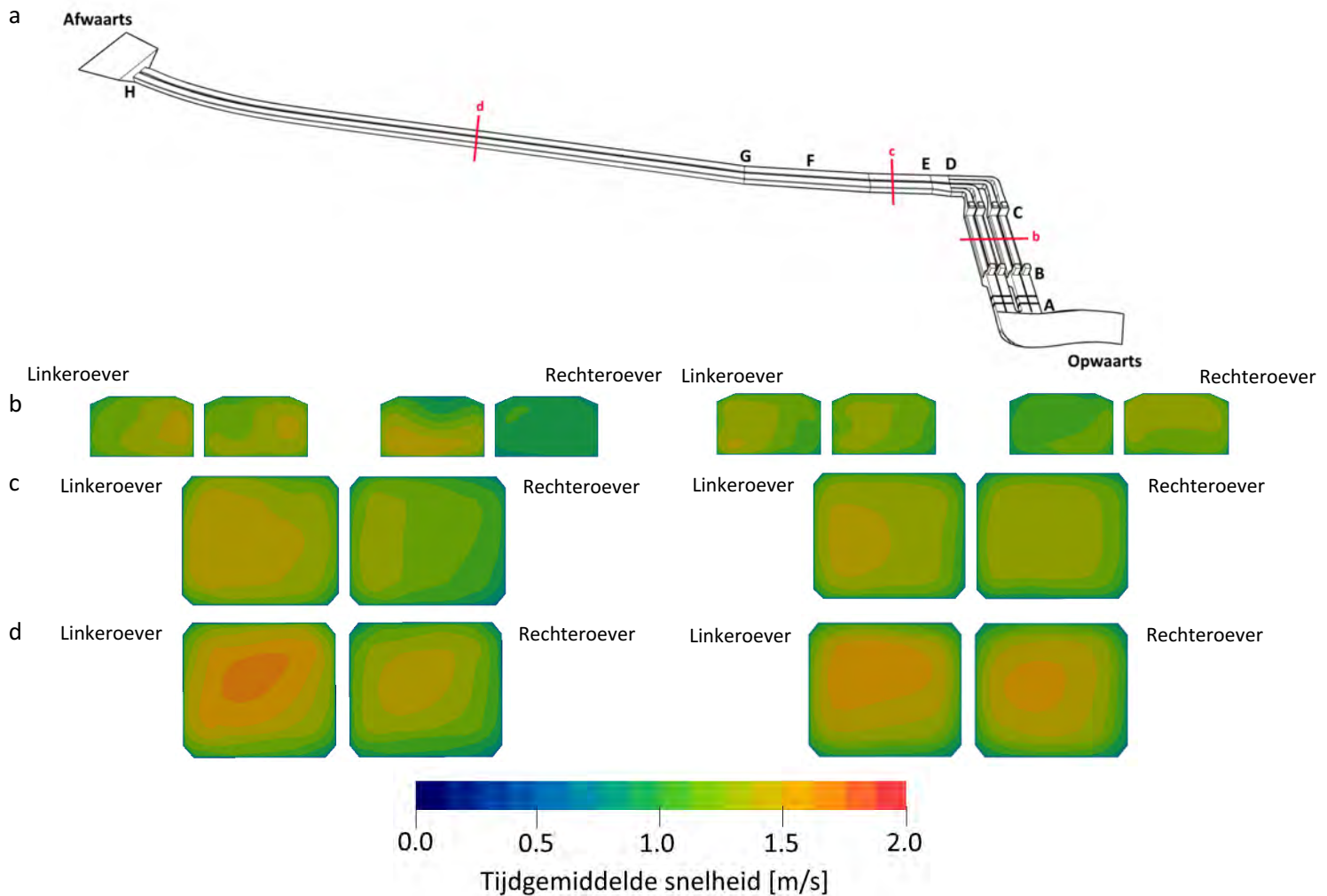
a: Inlaat geometrie initieel ontwerp; b: inlaat geometrie optimalisatie 1; c: overgangsconstructie naar kokers onder het kanaal voor geometrie initieel ontwerp; d: overgangsconstructie naar kokers onder het kanaal voor geometrie optimalisatie 1

Figuur 29 – Stroomsnelheden ter plaatse van overgangen van 4 naar 2 kokers en stroomsnelheden ter plaatse van de uitlaat voor de simulatie met de opwaartse variant van de loodrechte kruising.



a: overgang van 4 naar 2 kokers; b: uitlaat
links: geometrie initieel ontwerp; rechts: geometrie optimalisatie 1.

Figuur 30 – Stroomsnelheden in een aantal secties voor de simulaties met de opwaartse variant van de loodrechte kruising



a: locaties secties voor visualisatie stroomsnelheden; b: kokers onder kanaal; c: twee lange kokers voor overgang naar kokers huidige duiker; d: twee lange kokers afwaarts; links: initieel ontwerp; rechts optimalisatie 1
opmerking: schaal figuren voor sectie b, sectie c en sectie d is niet dezelfde

Uit Figuur 28 tot en met Figuur 30 volgt het volgende:

- Ten gevolge van de hoek van 90° tussen de inlaat van de duiker en de Zenne in het initieel ontwerp doet zich ter plaatse van de buitenste koker aan rechteroever loslating voor. Ten gevolge van deze loslating ontstaat in deze koker een relatief grote neer met stroomsnelheden tot 2.0 m/s aan de binnenwand van de koker tot gevolg. De aanwezigheid van de neer zorgt in vergelijking met de andere kokers voor een beduidend lager debiet (zie ook paragraaf 4.5) in de koker met beduidend lagere stroomsnelheden tot gevolg. Bij optimalisatie 1 van de geometrie is inlaat van de buitenste koker en de de rechteroever ter plaatse van de inlaat van de duiker afgerond met behulp van een kwartkegel. Deze afronding zorgt ervoor dat de optredende loslating op deze locatie kleiner is dan bij het initieel ontwerp en dat de neer in de koker een plattere vorm heeft. Hierdoor doen zich in deze koker ter plaatse van de inlaat lagere stroomsnelheden voor en is het debiet over de vier kokers (zie paragraaf 4.5) en bijgevolg de stroomsnelheid in de kokers meer gelijkmatig verdeeld dan bij het initieel ontwerp.
- In het initieel ontwerp doet zich aan opwaartse zijde van de steile helling van 45° in de overgangsconstructie tussen de Zenne opwaarts en de kokers onder het kanaal loslating voor. Daarnaast doet zich ook loslating voor ter plaatse van de scherpe hoek tussen de verticale wand van de toegangsschacht en het plafond van de kokers onder het kanaal. Ten gevolge van deze laatste

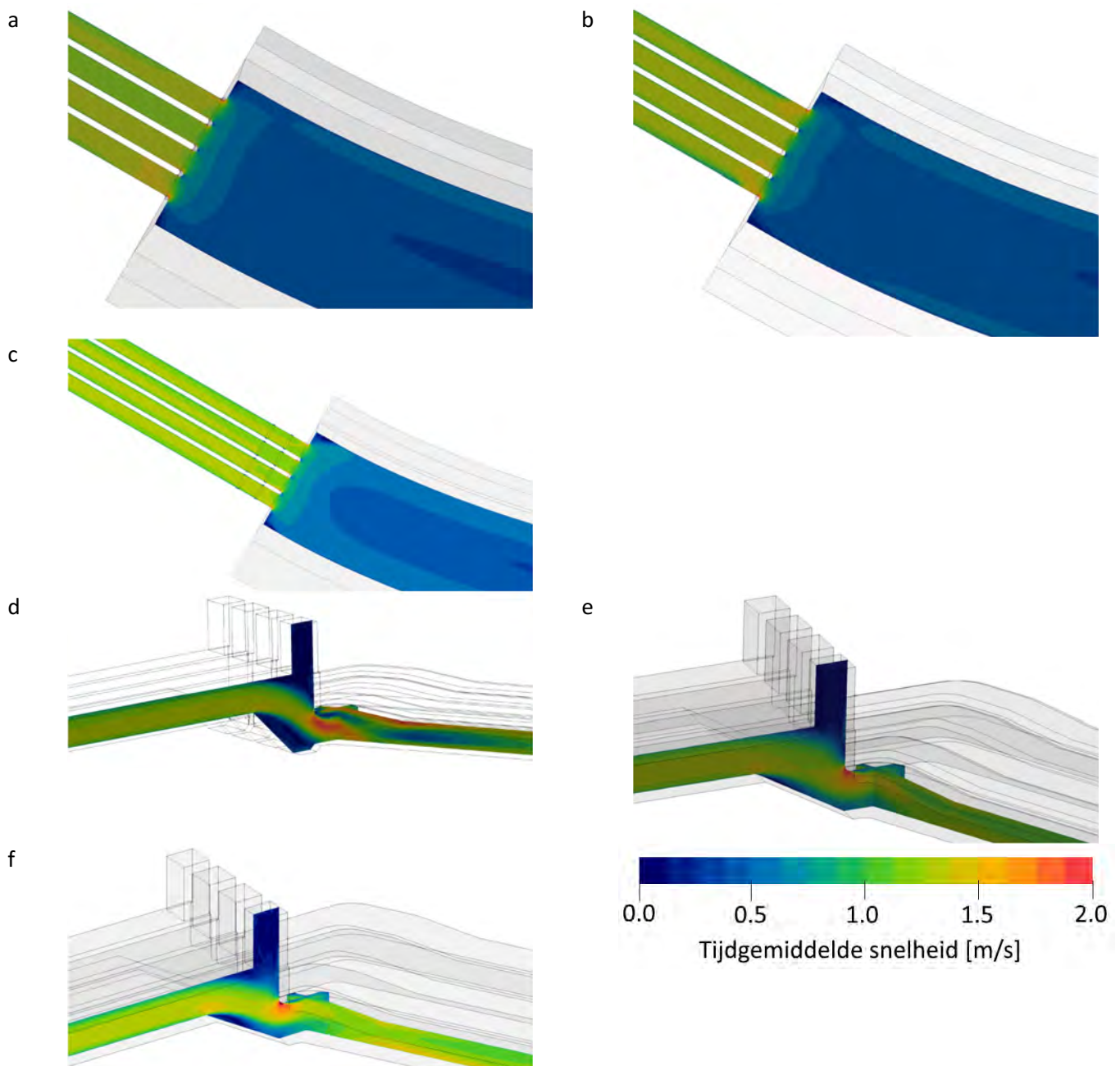
loslating wordt bij het initieel ontwerp aan het plafond van de kokers onder het kanaal een neer gevormd en doen zich aan de bodem van deze kokers relatief hoge stroomsnelheden tot meer dan 2.0 m/s voor. Bij optimalisatie 1 van de geometrie is een flauwere helling voorzien in de opwaartse overgangsconstructie tussen de Zenne en de kokers onder het kanaal en is de hoek tussen de verticale wand van de toegangsschacht en het plafond van de kokers onder het kanaal afgerond. Hierdoor doet zich op deze locaties minder loslating voor, waardoor de stroming aan de ingang van de kokers onder het kanaal meer verdeeld is over de hoogte van de koker. Analoog als bij de huidige duiker is de maximale stroomsnelheid in de twee buitenste kokers onder het kanaal iets hoger dan deze in de twee binnenste kokers onder het kanaal.

- Aan rechteroever van het kanaal bevindt zich de afwaartse overgangsconstructie tussen de kokers onder het kanaal en de kokers van de Zenne. Afwaarts van deze overgangsconstructie bevindt zich een bocht van 90°. In deze bocht doet zich loslating van de stroming voor met hogere stroomsnelheden aan de rechterwand van de kokers tot gevolg. Deze loslating doet zich zowel bij het initieel ontwerp voor als bij optimalisatie 1 van de geometrie. In het initieel ontwerp worden in de buitenste koker beduidend lagere stroomsnelheden berekend dan in de andere kokers, omwille van het lagere debiet door deze koker. De aanpassingen van de geometrie bij optimalisatie 1 zorgt voor een betere verdeling van de stroomsnelheden over de vier kokers.
- Na samenvoeging van de vier kokers onder het kanaal tot twee kokers is in het initieel ontwerp de stroomsnelheid in de koker aan linkeroever iets hoger dan de stroomsnelheid in de koker aan rechteroever. De aanpassingen aan de geometrie bij optimalisatie 1 zorgen voor een meer gelijkmatige verdeling van de stroming over beide kokers. De maximale waarde van de stroomsnelheid in de beide kokers in het afwaartse gedeelte (ter plaatse van sectie d) is gelijk.
- Het stromingspatroon in de Zenne ter plaatse van de uitlaat van de duiker is vergelijkbaar met het stromingspatroon bij de huidige duiker. Ten gevolge van de asymmetrie van het profiel van de Zenne op deze locatie leunt de stroming aan aan de linkeroever van de Zenne. Ondanks de hogere stroomsnelheden in de koker aan linkeroever bij het initieel ontwerp, is de stroomsnelheid uit beide kokers in de Zenne vergelijkbaar. Bij optimalisatie 1 van de geometrie wordt in het midden van de Zenne, i.e. het gedeelte van de stroom uit de koker aan rechteroever, een hogere stroomsnelheid berekend dan in het gedeelte van de stroom uit de koker aan linkeroever.

4.2.3 Afwaartse variant loodrechte kruising

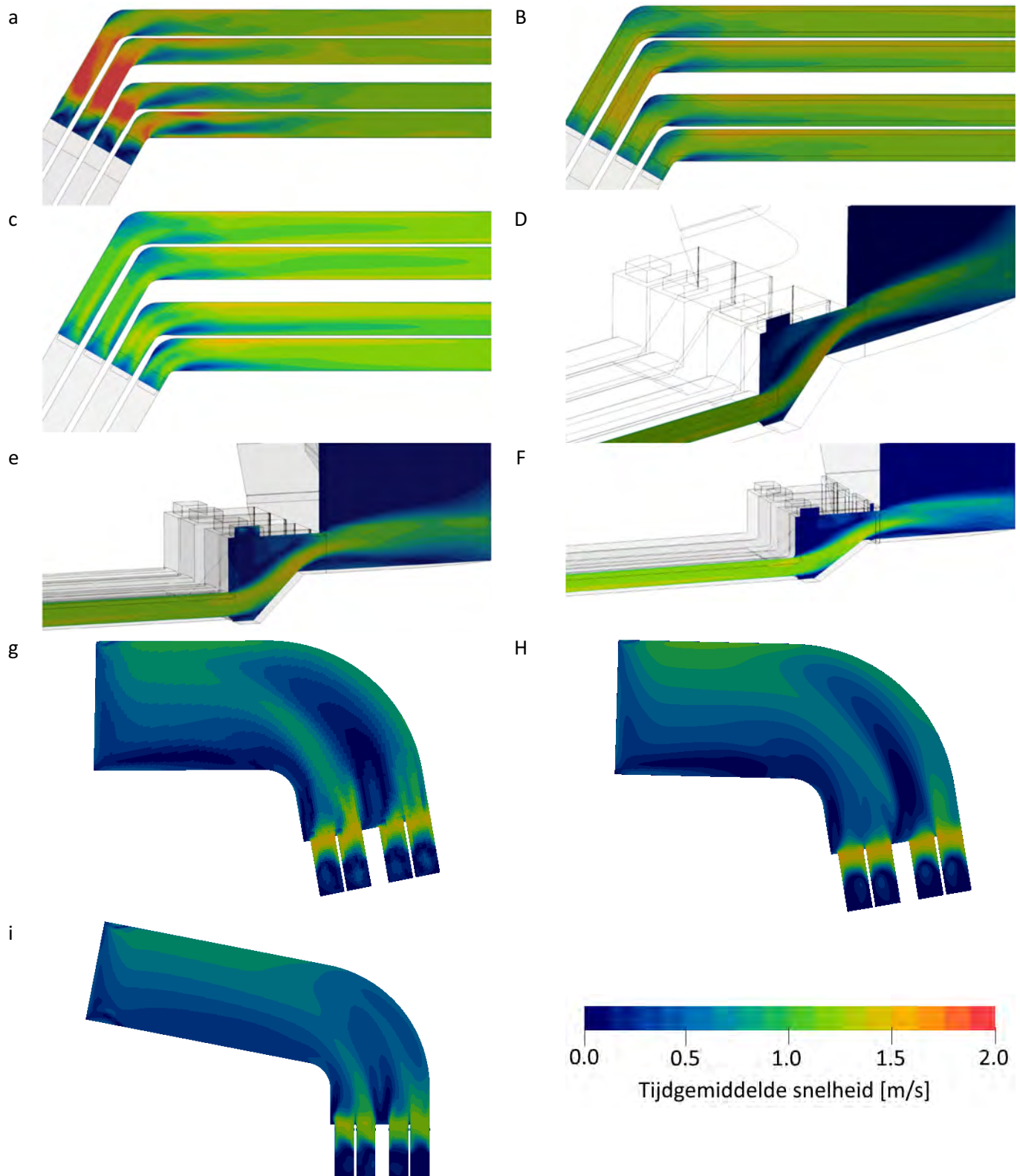
Figuur 31 en Figuur 32 geven een grafische voorstelling van de stroomsnelheid ter plaatse van een aantal overgangen in de afwaartse variant van de loodrechte kruising. Figuur 33 geeft voor deze variant een grafische voorstelling van de stroomsnelheid in een aantal dwarssecties. In deze figuren wordt zowel de stroomsnelheid getoond voor het initieel ontwerp als de stroomsnelheid van de beide geoptimaliseerde ontwerpen.

Figuur 31 – Stroomsnelheid ter plaatse van de inlaat en ter plaatse van de overgangsconstructie naar de kokers onder het kanaal voor de simulaties met de afwaartse variant van de loodrechte kruising



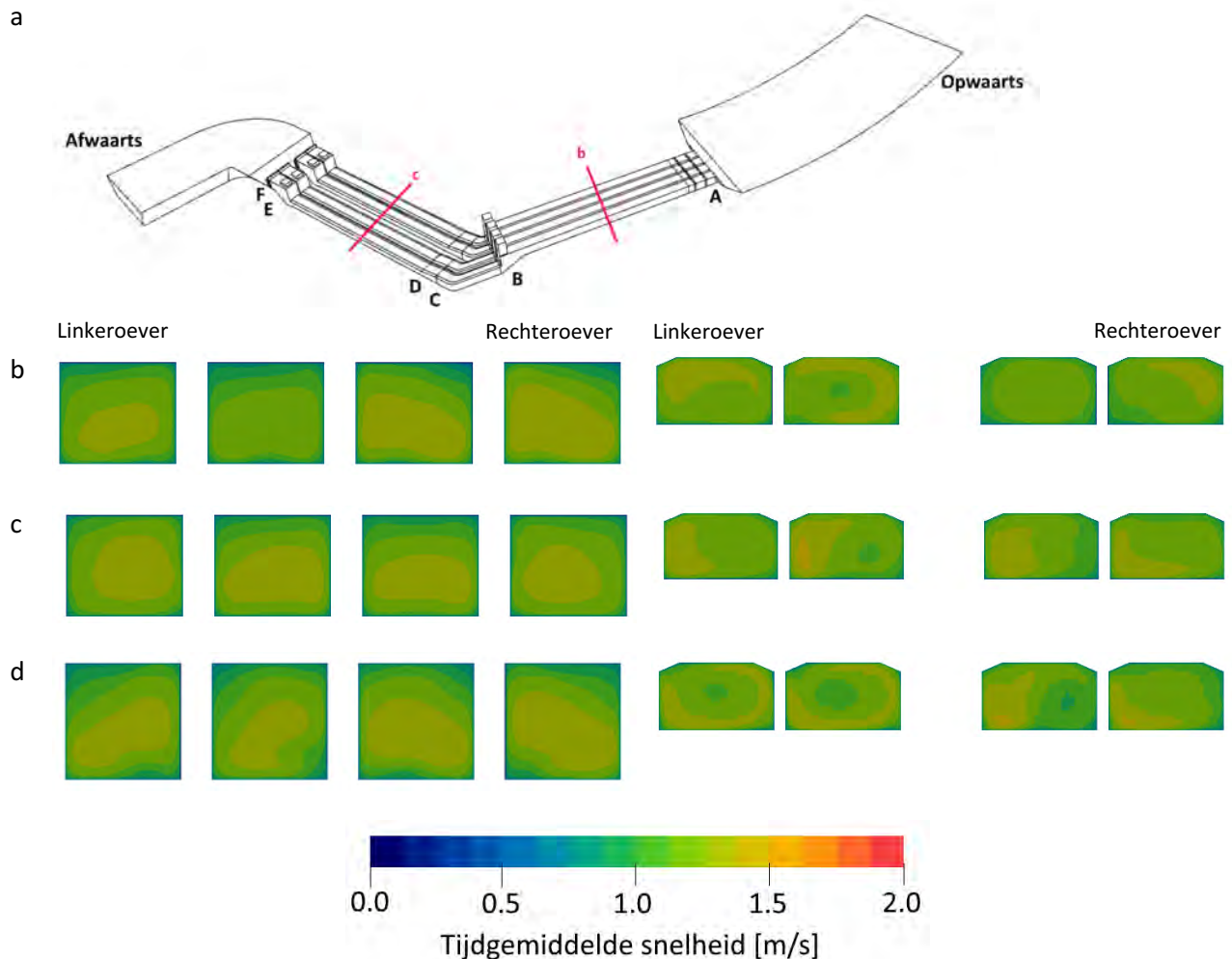
a: Inlaat geometrie initieel ontwerp; b: inlaat geometrie optimalisatie 1; c: inlaat geometrie optimalisatie 2; d: overgangsconstructie naar de kokers onder het kanaal voor geometrie initieel ontwerp; e: overgangsconstructie naar de kokers onder het kanaal voor geometrie optimalisatie 1; f: overgangsconstructie naar de kokers onder het kanaal voor geometrie optimalisatie 2.

Figuur 32 – Stroomsnelheid in de kokers onder het kanaal en ter plaatse van de uitlaat voor de simulaties met de afwaartse variant van de loodrechte kruising



a: kokers onder het kanaal geometrie initieel ontwerp; b: kokers onder het kanaal geometrie optimalisatie 1; c: kokers onder het kanaal geometrie optimalisatie 2; d: overgangsconstructie afwaarts geometrie initieel ontwerp; e: overgangsconstructie afwaarts geometrie optimalisatie 1; f: overgangsconstructie afwaarts geometrie optimalisatie 2; g: uitlaat geometrie initieel ontwerp; h: uitlaat geometrie optimalisatie 1; i: uitlaat geometrie optimalisatie 2.

Figuur 33 – Stroomsnelheid in een aantal secties van de afwaartse variant van de loodrechte kruising



a: locaties secties voor visualisatie stromingspatroon; b: initieel ontwerp; c: geometrie optimalisatie 1; d: geometrie optimalisatie 2;
 links: stromingspatroon in kokers opwaarts (sectie b); rechts: stromingspatroon in kokers onder het kanaal (sectie c);
 opmerking: schaal figuren voor sectie b en sectie c is niet dezelfde

Uit Figuur 31 tot en met Figuur 33 volgt het volgende:

- Ter plaatse van de inlaat van de duiker is de stroomsnelheid uniform verdeeld over de vier kokers. De verklaring hiervoor is dat de inlaat van de duiker in het verlengde ligt van het beschouwde opwaarts gedeelte van de Zenne. Analoog met de huidige duiker doet zich een beperkte loslating voor ter plaatse van de buitenste wanden van de buitenste kokers aan linker- en rechteroever. De geometrie van kokers ter plaatse van de inlaat is niet gewijzigd bij de verschillende optimalisaties. Bijgevolg wordt bij de beide geoptimaliseerde ontwerpen eenzelfde type stromingspatroon waargenomen als bij het initieel ontwerp.
- Ter plaatse van de opwaartse overgangsconstructie naar de kokers onder het kanaal doet zich bij het initieel ontwerp loslating voor aan de bodem van het opwaartse uiteinde van de helling van 45°. Daarnaast doet zich loslating voor ter plaatse van de hoek tussen de verticale wand van de toegangsschacht en het plafond van de kokers onder het kanaal. De relatief scherpe bocht na deze overgangsconstructie geeft aanleiding tot loslating aan de binnenbocht. Deze loslating is groter bij de scherpere bocht in de koker aan rechteroever dan in de minder scherpe bocht in de koker aan linkeroever. De loslating in de bocht in combinatie met de loslating aan het plafond van de overgangsconstructie geeft aanleiding tot een helicoïdaal stromingspatroon in het eerste gedeelte

van de kokers onder het kanaal. Het flauwer maken van de bodemhelling van de overgangsconstructie verkleint de loslating aan de bodem ter plaatse van deze helling. Het afronden van de hoek tussen de verticale wand van de toegangsschacht en het plafond van de kokers onder het kanaal vermindert ook daar de loslating. De bocht afwaarts van de overgangsconstructie naar de kokers onder het kanaal is niet gewijzigd bij de optimalisaties. De loslating in deze bocht blijft aanwezig, maar door de kleinere loslating aan het plafond van de kokers onder het kanaal is de helicoïdale stroming in de kokers minder sterk aanwezig.

- Ter plaatse van de afwaartse overgangsconstructie tussen de kokers onder het kanaal en de Zenne botst de stroming als het ware tegen de helling van 45° en doet zich een loslating voor aan de bodem ter plaatse van het opwaarts uiteinde van deze helling. Deze helling is flauwer gemaakt bij optimalisatie 2 van de geometrie. Hierdoor verkleint de loslating op deze locatie. Het afronden van de hoek tussen de verticale wand van de toegangsschacht en het plafond van de kokers onder het kanaal bij optimalisatie 2 van de geometrie heeft bijna geen invloed op het stromingspatroon ter plaatse van deze opwaartse overgangsconstructie.
- Het stromingspatroon in de vier kokers onder het kanaal is gelijkaardig, zowel bij het initieel ontwerp als bij de beide optimalisaties aan de geometrie.
- Ter plaatse van de afwaartse uitlaat van de duiker in de Zenne voegt de stroming uit de twee kokers aan linkeroever zich samen en voegt de stroming uit de twee kokers aan rechteroever zich samen. Omwille van de grotere afstand tussen de twee middelste kokers doet zich op deze locatie loslating voor, waardoor de twee samengevoegde jets uit de kokers pas afwaarts van de bocht van 90° samenvoegen tot één geheel. Omwille van de bocht van 90° doet zich loslating voor aan de binnenbocht en leunt de stroming afwaarts van deze bocht aan tegen de rechteroever van de Zenne. Aan rechteroever van deze bocht van 90° volgt de stroming uit de kokers de verticale wand met stroomsnelheden van ca. 1.0 m/s. Het stromingspatroon ter plaatse van de afwaartse uitlaat is bij de beide geoptimaliseerde geometrieën hetzelfde als bij de initiële geometrie.

Met optimalisatie 2 van de geometrie is ook een simulatie uitgevoerd waarbij het volledige debiet van $41.7 \text{ m}^3/\text{s}$ afgevoerd wordt door 1 koker en een simulatie met een debiet van $70 \text{ m}^3/\text{s}$ afgevoerd door alle vier de kokers. Voor deze beide simulaties tonen Figuur 34 en Figuur 35 respectievelijk het stromingspatroon ter plaatse van de overgangen in de duiker en het stromingspatroon in een aantal secties van de duiker.

Uit deze figuren volgt dat bij het afvoeren van het volledige debiet van $41.7 \text{ m}^3/\text{s}$ door 1 koker stroomsnelheden tot 6 m/s in de betreffende koker worden bereikt. Ook onmiddellijk opwaarts van de inlaat naar deze koker worden hoge stroomsnelheden van 3 à 4 m/s berekend. Om te kunnen weerstaan aan deze hoge stroomsnelheden dient de bodem direct opwaarts van de inlaat van de duiker te worden voorzien van een voldoende stevige bodembescherming (bijvoorbeeld: breuksteen gepenetreerd met colloïdaal beton of een bodembescherming uit beton). In het overige deel van de duiker wordt een stromingspatroon berekend dat gelijkaardig is aan dit van de simulaties waarbij het debiet door alle kokers wordt afgevoerd, maar met stroomsnelheden die vier maal hoger zijn. De hoogste stroomsnelheden doen zich voor aan de bodem van de koker onder het kanaal. Ter plaatse van de uitlaat worden ook stroomsnelheden bereikt tot 6 m/s. Door de bocht van 90° in de Zenne botst deze stroming op de tegenoverliggende verticale wand alvorens verder naar afwaarts te stromen. Bijgevolg worden juist afwaarts van de bocht van 90° de hoogste stroomsnelheden van 1.5 à 2.0 m/s aan rechteroever berekend.

De simulatie waarbij het maximale debiet van $70 \text{ m}^3/\text{s}$ door de vier kokers wordt afgevoerd, werd niet door het studiebureau uitgevoerd maar door WL zelf. Bij deze simulatie wordt opgemerkt dat deze simulatie op de volgende twee punten verschilt van de simulaties uitgevoerd door het studiebureau:

- Om de rekentijd te beperken is het gedeelte van de Zenne ter plaatse van de opwaartse inlaat en de afwaartse uitlaat van de duiker niet meer beschouwd. Dit gedeelte is vervangen door watervolume dat bestaat uit een halve cilinder. Het niet meer beschouwen van de correcte vorm van de Zenne opwaarts en afwaartse heeft geen invloed op de stroming door de duiker, het debiet door de duiker en op de verliescoëfficiënten. Enkel het stromingspatroon ter plaatse van de inlaat en de uitlaat van de duiker en (in beperkte mate) de opstuwing kan hierdoor beïnvloed worden. Echter het

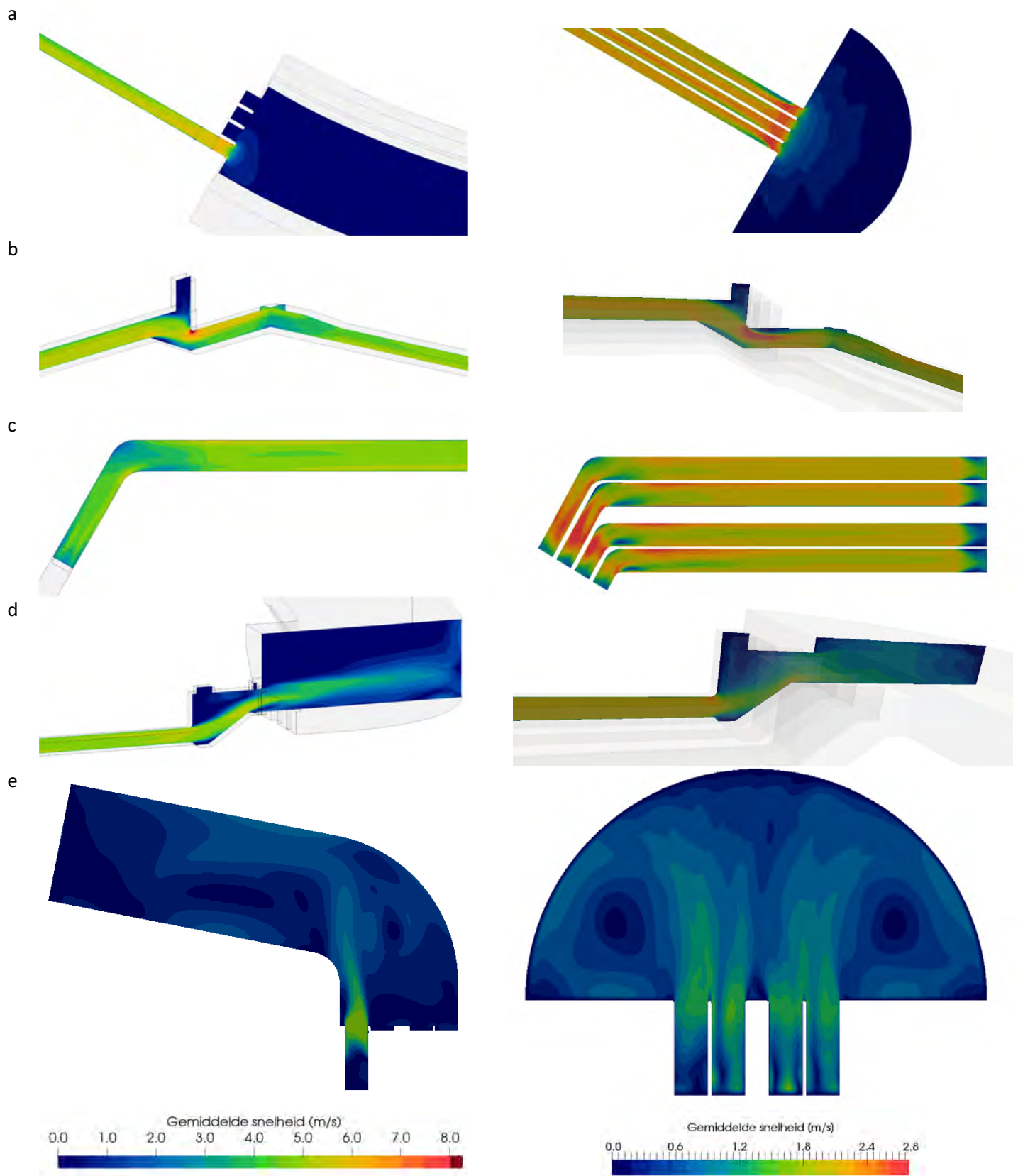
stromingspatroon ter plaatse van de inlaat en de uitlaat zal voor deze simulatie gelijkaardig zijn als dit van de uitgevoerde simulaties met een debiet van $41.7 \text{ m}^3/\text{s}$ en de 4 kokers in gebruik. Enkel de stroomsnelheden in de Zenne ter plaatse van de inlaat en de uitlaat zullen stijgen door het hogere debiet door de duiker.

- In de simulaties van het studiebureau zijn de afdekroosters ter plaatse van de beide overgangsconstructies tussen de Zenne en de kokers onder het kanaal dicht beschouwd. Het waterpeil in de toegangsschachten van deze overgangsconstructies kan niet hoger stijgen dan de bovenzijde van de kokers in het CFD-model. De op deze wijze opgebouwde druk kan de stroming in de overgangsconstructie beïnvloeden. In de simulatie uitgevoerd door WL zijn de toegangsschachten van de opwaartse overgangsconstructie naar de kokers onder het kanaal open. Het waterpeil op deze locatie kan wel stijgen tot een peil hoger dan de bovenzijde van de kokers in het CFD-model van het studiebureau.

Uit Figuur 34 volgt dat het stromingspatroon ter plaatse van de inlaat gelijkaardig is dan dit bij de simulatie met een debiet van $41.7 \text{ m}^3/\text{s}$ en alle 4 de kokers in gebruik (zie Figuur 31). De stroomsnelheden ter plaatse van de inlaat bij een debiet van $70 \text{ m}^3/\text{s}$ door de 4 kokers nemen toe tot 2.4 m/s à 2.8 m/s . Aan de buitenwand van de twee buitenste kokers doet zich een loslating voor met een iets hogere stroomsnelheid ter plaatse van de binnenwand tot gevolg. Ter plaatse van de opwaartse overgangsconstructie naar de kokers onder het kanaal doet zich aan de afronding van het plafond loslating voor. Deze loslating was minder aanwezig bij de simulaties met een debiet van $41.7 \text{ m}^3/\text{s}$ en de 4 kokers in gebruik omwille van het lagere debiet. Ten gevolge van deze loslating doet zich in de onderste helft van de sectie van de koker een stroming voor met een hogere stroomsnelheid (2.4 m/s à 2.8 m/s). In de kokers onder het kanaal zelf is het stromingspatroon gelijkaardig als bij de simulatie met een debiet van $41.7 \text{ m}^3/\text{s}$. Ter plaatse van de helling in de afwaartse overgangsconstructie van de kokers onder het kanaal naar de Zenne spreidt de stroming meer uit in de hoogte. Hierdoor botst de stroming uit de kokers onder het kanaal tegen het plafond van de overgangsconstructie. Door deze grotere uitspreiding in de hoogte doet zich ter plaatse van de uitlaat een (in hoogte) iets minder geconcentreerde stroming voor met iets lagere stroomsnelheden op de helling van de afwaartse overgangsconstructie zelf (1.2 m/s à 1.8 m/s in vergelijking met 1.5 m/s à 2.0 m/s bij de simulatie met debiet $41.7 \text{ m}^3/\text{s}$).

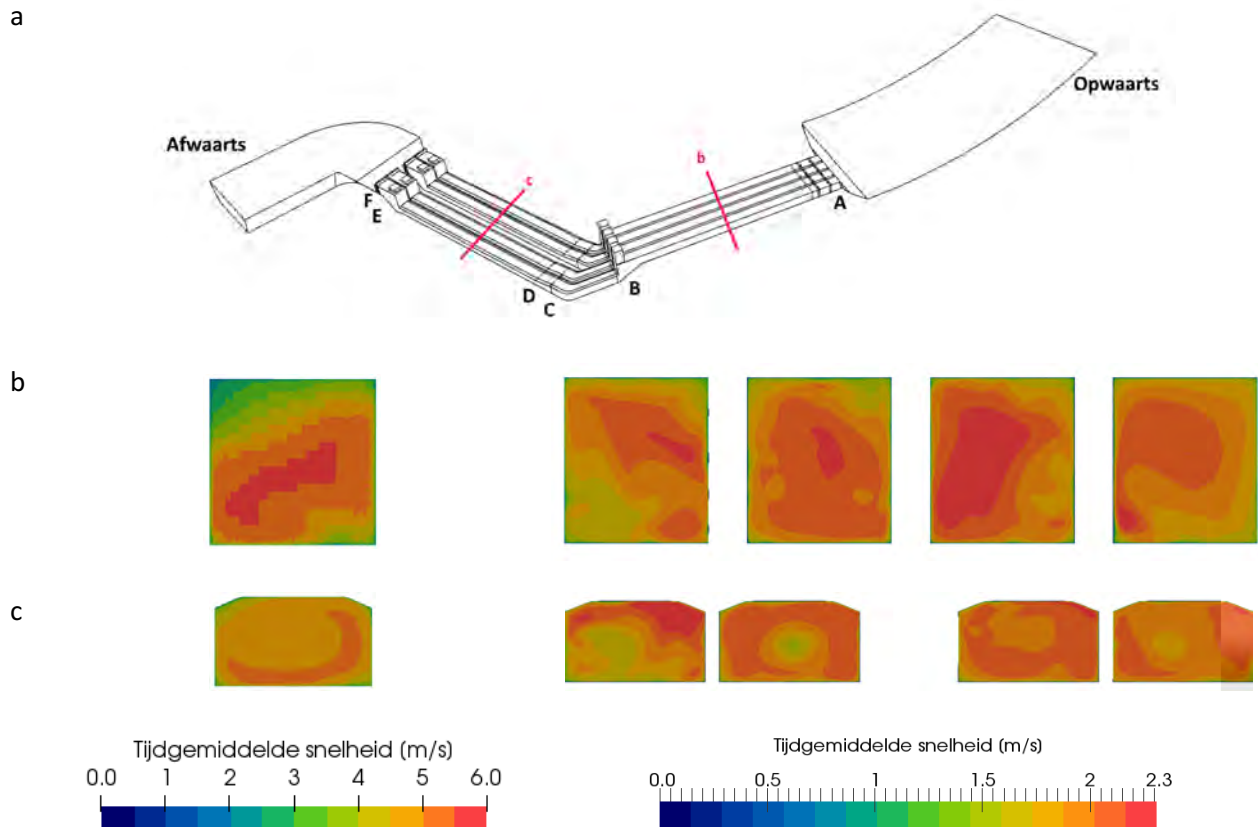
Uit Figuur 35 volgt voor de simulatie met $70 \text{ m}^3/\text{s}$ een gelijkaardig stromingspatroon als bij de simulatie met een debiet gelijk aan $41.7 \text{ m}^3/\text{s}$ en alle de kokers in gebruik. Door het hogere debiet door de kokers doen de hogere stroomsnelheden zich niet enkel in het midden van de kokers voor, maar ook meer aan de randen. In de kokers worden stroomsnelheden van 2.0 m/s à 2.4 m/s berekend.

Figuur 34 – Stroomsnelheid in een aantal overgangen voor simulatie met 1 koker open en simulatie met debiet 70 m³/s



a: inlaat duiker; b: afwaartse overgangsconstructie tussen Zenne en de kokers onder het kanaal; c: kokers onder het kanaal;
d: opwaartse overgangsconstructie tussen de kokers onder het kanaal en de Zenne; e: uitlaat;
links: simulatie met 1 koker open; rechts: simulatie met debiet 70 m³/s

Figuur 35 – Stroomsnelheid in een aantal secties voor simulatie met 1 koker open en simulatie met debiet 70 m³/s



a: locaties secties voor visualisatie stromingspatroon; b: stromingspatroon in kokers opwaarts (sectie b); c: stromingspatroon in kokers onder het kanaal (sectie c); links: simulatie met 1 koker open; rechts: simulatie met debiet 70 m³/s;
opmerking: schaal figuren voor sectie b en sectie c is niet dezelfde

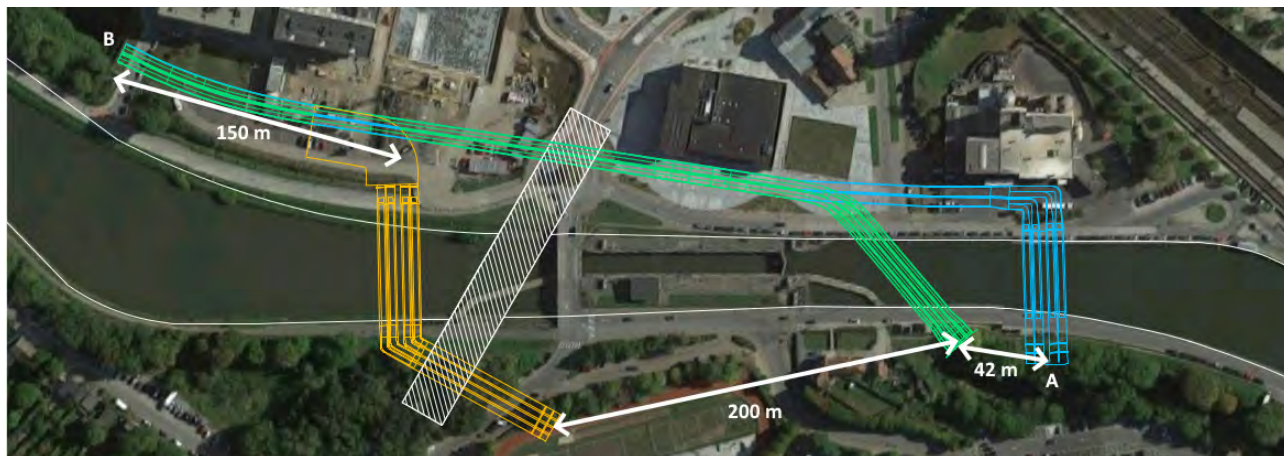
4.3 Opstuwing ten gevolge van de nieuwe Zenneduiker

Deze paragraaf vergelijkt de opstuwing in de Zenne ten gevolge van de aanwezigheid van de nieuwe Zenneduiker.

In de CFD-modellering zijn het afwaarts waterpeil en het debiet aan de opwaartse rand toegepast als randvoorwaarde. Het waterpeil opwaarts van de Zenneduiker volgt dan uit de CFD-simulatie. Vooreerst wordt de waterpeilverhoging in de Zenne ten gevolge van de constructie bepaald als het verschil tussen het waterpeil opwaarts van de Zenneduiker en het waterpeil afwaarts van de Zenneduiker. Hierbij moet opgemerkt worden dat de lengte van de duiker bij de afwaartse variant beduidend korter is dan bij de huidige duiker en ook beduidend korter is dan bij de opwaartse variant. De reden hiervoor is dat bij de afwaartse variant zowel afwaarts als opwaarts van de nieuwe duiker de Zenne in een open bedding van een (nog te ontwerpen) landschapspark wordt aangelegd. Met het verhang in de beide gedeeltes van de Zenne in open bedding moet rekening gehouden worden bij het bepalen van de opstuwing ten gevolge van de nieuwe Zenneduiker uit de waterpeilverhoging ten gevolge van de constructie.

Voor het bepalen van de opstuwing ten gevolge van de nieuwe Zenneduiker wordt de principeschets uit Figuur 36 beschouwd. Hiervoor wordt vooreerst zowel voor de huidige variant als voor de opwaartse en de afwaartse variant van de nieuwe Zenneduiker de totale waterpeilverhoging in de Zenne ten gevolge van de constructie bepaald tussen het opwaartse uiteinde van de opwaartse variant (aangeduid met A in Figuur 36) en het afwaarts uiteinde van de afwaartse variant (aangeduid met B in Figuur 36). Deze totale waterpeilverhoging wordt berekend als de som van de waterpeilverhoging ten gevolge van de constructie uit de CFD-modellering vermeerderd met het verhang in de Zenne opwaarts en afwaarts van de duiker. Voor de huidige duiker wordt hierbij opwaarts een gedeelte van de Zenne met lengte 42 m beschouwd. Voor de afwaartse variant van de duiker wordt opwaarts een gedeelte van de Zenne met lengte 242 m beschouwd en afwaarts een gedeelte met lengte 150 m.

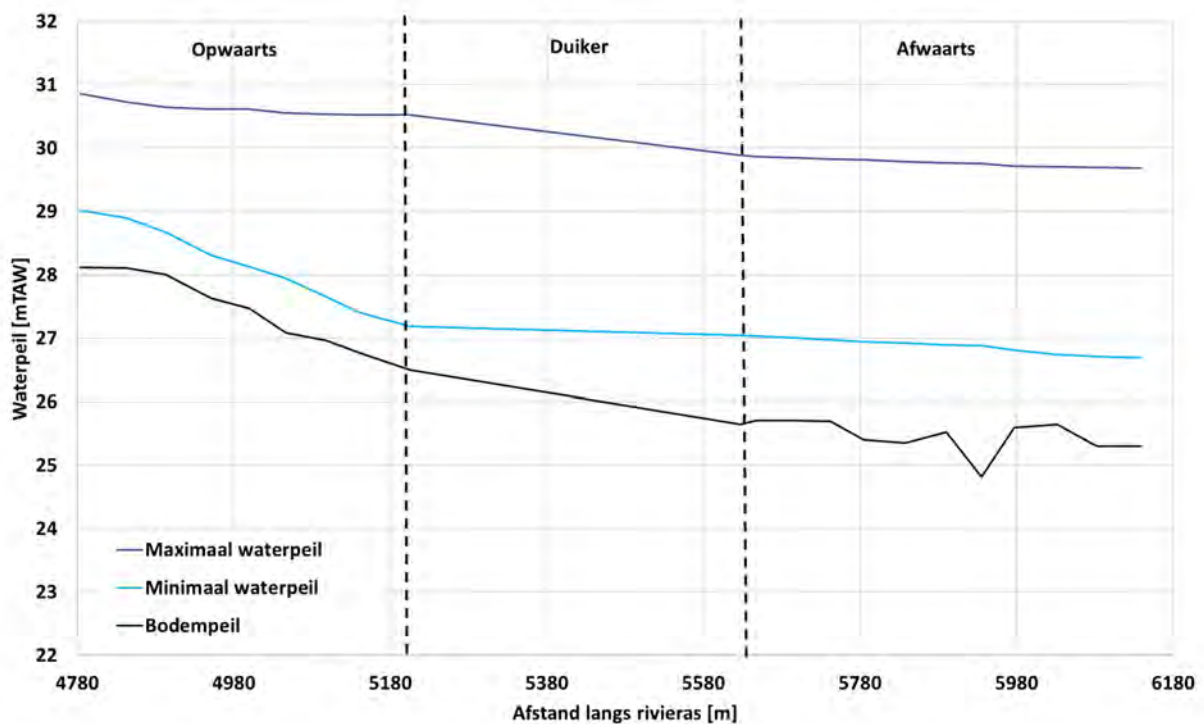
Figuur 36 – Schets met afmetingen voor bepaling opstuwing ten gevolge van de nieuwe Zenneduiker



Het bepalen van het verhang in de Zenne is niet eenvoudig aangezien het landschapspark nog niet ontworpen is waardoor de loop van de Zenne opwaarts en afwaarts van de Zenneduiker nog niet gekend is. Om een inschatting te maken van het verhang van het waterpeil in de Zenne opwaarts en afwaarts van de Zenneduiker wordt in Figuur 37 voor een gedeelte van de Zenne met een lengte van 1.4 km voor elke locatie het minimaal en het maximaal waterpeil bij de was met terugkeerperiode 100 jaar grafisch voorgesteld. Tabel 9 geeft voor de sectie in het 1D-model direct afwaarts, respectievelijk opwaarts van de Zenneduiker en voor een sectie in het 1D-model 492 m afwaarts, respectievelijk 358 m opwaarts van de Zenneduiker een overzicht van het maximaal waterpeil, het bodempeil en de waterdiepte. Aan de hand van deze gegevens is in de tabel het verhang van de waterlijn en het bodemverhang afwaarts en opwaarts van de Zenneduiker

berekend. Uit de tabel volgt dat opwaarts van de Zenneduiker een steiler bodemverhang aanwezig is dan afwaarts. Dit steilere bodemverhang opwaarts heeft ook een steiler verhang van de waterlijn van 0.00092 m/m tot gevolg, in vergelijking met het verhang van de waterlijn van 0.00038 m/m afwaarts. Voor het bepalen van de totale waterpeilverhoging in de Zenne wordt zowel voor de Zenne opwaarts als voor de Zenne afwaarts van de Zenneduiker het verhang van de waterlijn van 0.00038 m/m beschouwd uit Tabel 9. Het steilere verhang van de waterlijn opwaarts van de Zenneduiker uit Tabel 9 wordt niet als realistisch beschouwd voor een nog aan te leggen landschapspark opwaarts van de nieuwe duiker.

Figuur 37 – Variatie van minimaal waterpeil, maximaal waterpeil en bodempeil langs de Zenne bij was met terugkeerperiode 100 jaar uit simulatie met 1D-model voor de huidige duiker



Tabel 9 – Bepaling verhang waterpeil Zenne opwaarts en afwaarts uit 1D-modellering met huidige duiker

		Waterpeil	Bodempeil	Waterdiepte
Opwaarts Zenneduiker	X = 4784 m	+30.85 mTAW	+28.12 mTAW	2.73 m
	X = 5142 m^(*)	+30.52 mTAW	+26.50 mTAW	4.00 m
	Vershil	0.35 m	1.62 m	-1.27 m
	Verhang	0.00092 m/m	0.00453 m/m	-0.00360 m/m
Afwaarts Zenneduiker	X = 5647 m^(*)	+29.87 mTAW	+25.65 mTAW	4.22 m
	X = 6139 m	+29.68 mTAW	+25.30 mTAW	4.38 m
	Vershil	0.19 m	0.35 m	-0.16 m
	Verhang	0.00038 m/m	0.00071 m/m	-0.00033 m/m

* locatie ter plaatse van de Zenneduiker

Rekening houdend met dit verhang van de waterlijn in de Zenne van 0.00038 m/m wordt met de hierboven vermelde afstanden een bijkomend verhang berekend van 0.09 m opwaarts en 0.06 m afwaarts van de Zenneduiker voor de afwaartse variant en een bijkomend verhang van 0.02 m opwaarts voor de huidige duiker. Hierbij moet opgemerkt worden dat de wijze van de bepaling van het verhang van de waterlijn in de Zenne opwaarts en afwaarts slechts een eerste inschatting is. Indien een gedetailleerd ontwerp van de loop van de Zenne in het landschapspark beschikbaar is, is een bepaling van dit verhang aan de hand van 1D-numerieke modellering meer aangewezen en nauwkeuriger. Dit maakt ook dat onzekerheid op de bepaling van het verhang in de Zenne relatief groot is.

Tabel 10 geeft voor alle uitgevoerde CFD-simulaties een overzicht van de op deze wijze bepaalde totale waterpeilverhoging tussen de locatie van de inlaat van de opwaartse variant en de locatie van de uitlaat van de opwaartse variant, de punten A en B uit Figuur 36. Uit deze tabel volgt voor de huidige duiker een totale waterpeilverhoging van 0.23 m. De totale waterpeilverhoging voor het initiële ontwerp van de opwaartse, respectievelijk afwaartse variant van de loodrechte kruising bedraagt 0.35 m, respectievelijk 0.38 m. Het verschil van 0.03 m in berekende waterpeilverhoging tussen deze beide varianten van de loodrechte kruising is eerder verwaarloosbaar, rekening houdend met de onzekerheid op de bepaling van het verhang in de Zenne opwaarts en afwaarts voor de afwaartse variant. De eerste optimalisaties aan de geometrie van de opwaartse en afwaartse variant verlagen de totale waterpeilverhoging met respectievelijk 0.05 m en 0.04 m ten opzichte van het initieel ontwerp tot respectievelijk 0.30 m en 0.34 m. De tweede optimalisatie aan de geometrie van de afwaartse variant verlaagt de totale waterpeilverhoging met 0.09 m ten opzichte van het initieel ontwerp tot 0.29 m. Deze totale waterpeilverhoging verschilt slechts 0.06 m met deze berekend voor de huidige duiker.

Tabel 10 – Bepaling van de totale waterpeilverhoging in de Zenne
ten gevolge van de constructie voor de uitgevoerde CFD-simulaties

Geometrie		Debiet	CFD-modellering			Verhang Zenne		Totale waterpeilverhoging
			Waterstand opwaarts	Waterstand afwaarts	Waterpeilverhoging	Opwaarts	Afwaarts	
			m ³ /s	mTAW	mTAW	m	m	
Huidige duiker		41.67	+30.10	+29.89	0.21	n.v.t.	0.02	0.23
Opwaartse variant loodrechte kruising	Initieel ontwerp	41.67	+30.24	+29.89	0.35*	n.v.t.	n.v.t.	0.35 ⁽¹⁾⁽²⁾
	Optimalisatie 1	41.67	+30.19	+29.89	0.30*	n.v.t.	n.v.t.	0.30 ⁽¹⁾⁽²⁾
Afwaartse variant loodrechte kruising	Initieel ontwerp	41.67	+30.12	+29.89	0.23	0.09	0.06	0.38
	Optimalisatie 1	41.67	+30.08	+29.89	0.19	0.09	0.06	0.34
	Optimalisatie 2	41.67	+30.03	+29.89	0.14	0.09	0.06	0.29
		70.00	+31.60	+31.22	0.38	0.09	0.06	0.53
	Optimalisatie 2 (3 kokers afgesloten)	41.67	+32.31	+29.89	2.42	0.09	0.06	2.57

⁽¹⁾ Ten gevolge van de 2.2 m te diepe ligging van de duiker in het ontwerp kan de waterpeilverhoging vermoedelijk nog ca. 0.05 m afnemen.

⁽²⁾ Het vervangen van de beide kokers in het afwaartse gedeelte van de duiker door een open bedding kan vermoedelijk leiden tot een afname van de opstuwing met enkele centimeters.

Aan de hand van de totale waterpeilverhoging in de Zenne ten gevolge van de constructie is daarna de opstuwing in de Zenne ten gevolge van de nieuwe Zenneduiker bepaald als het verschil tussen de totale waterpeilverhoging bij de nieuwe Zenneduiker en de totale waterpeilverhoging van de huidige Zenneduiker. Tabel 11 geeft een overzicht van de op deze wijze bepaalde opstuwing in de Zenne ten gevolge van de nieuwe Zenneduiker. Rekening houdend met de onzekerheden op de bepaling van het verhang in de Zenne bij de bepaling van de opstuwing, volgt uit deze tabel dat de opstuwing voor de opwaartse en de afwaartse variant van de loodrechte kruising aan elkaar gelijk zijn.

Tabel 11 – Overzicht opstuwing ten gevolge van nieuwe Zenneduiker

Geometrie		Debiet	Opstuwing
		m ³ /s	m
Opwaartse variant loodrechte kruising	Initieel ontwerp	41.67	0.12 ⁽¹⁾⁽²⁾
	Optimalisatie 1	41.67	0.07 ⁽¹⁾⁽²⁾
Afwaartse variant loodrechte kruising	Initieel ontwerp	41.67	0.15
	Optimalisatie 1	41.67	0.11
	Optimalisatie 2	41.67	0.06
		70.00	0.30
	Optimalisatie 2 (3 kokers afgesloten)	41.67	2.34

⁽¹⁾ Ten gevolge van de 2.2 m te diepe ligging van de duiker in het ontwerp kan de opstuwing vermoedelijk nog ca. 0.05 m afnemen.

⁽²⁾ Het vervangen van de beide kokers in het afwaartse gedeelte van de duiker door een open bedding kan vermoedelijk leiden tot een afname van de opstuwing met enkele centimeters.

Voor optimalisatie 2 van de afwaartse variant geeft het afvoeren van het volledige debiet van 41.7 m³/s door 1 koker van de duiker aanleiding tot een significante stijging van de opstuwing tot 2.34 m en geeft het afvoeren van het maximale debiet van 70 m³/s door alle vier de kokers aanleiding tot een stijging van de opstuwing tot 0.30 m.

Bij de berekende opstuwing voor de opwaartse variant moet het volgende opgemerkt worden:

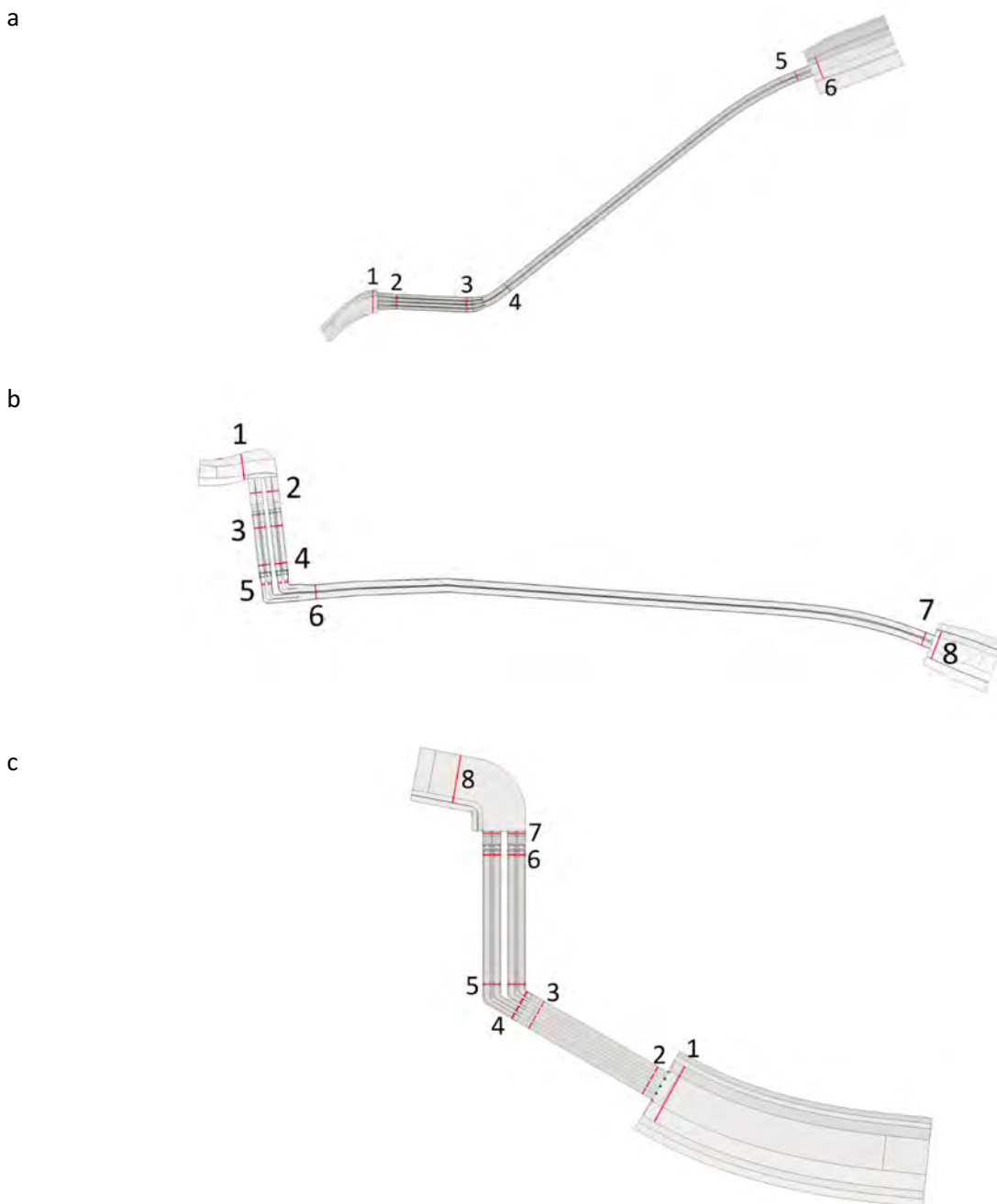
- Bij de rapportering is opgemerkt dat de kokers onder het kanaal in de CFD-simulaties 2.2 m dieper liggen dan eigenlijk de bedoeling was. Een 2.2 m hogere ligging van de kokers onder het kanaal zou de verliescoëfficiënt van de opwaartse en de afwaartse overgangsconstructies naar de kokers onder het kanaal verlagen (zie ook paragraaf 4.4). Hierdoor zal de totale verliescoëfficiënt nog afnemen. Deze verlaging wordt ingeschat niet groter te zijn dan het verschil in opstuwing tussen het initieel ontwerp van de opwaartse variant en optimalisatie 1 van de opwaartse variant (0.05 m). Bijgevolg kan de berekende opstuwing voor de opwaartse variant vermoedelijk nog met 0.05 m verlaagd worden.
- Aan het afwaartse uiteinde van de nieuwe duiker, tussen sectie I en sectie H in Figuur 9 in paragraaf 2.2.1, wordt de Zenne, analoog als bij de afwaartse variant van de loodrechte kruising, aangelegd in een landschapspark. Uit eenvoud is bij het ontwerp van de opwaartse variant tussen sectie I en H de koker met lengte ca. 150 m behouden. Uit de CFD-modellering volgt dat de beide kokers samen aan het afwaarts uiteinde van de opwaartse variant van de loodrechte kruising over een lengte van ca. 150 m een energieverlies kennen van ca. 0.026 m. Rekening houdend met het hierboven beschouwde verhang van de waterlijn in de Zenne van 0.00038 m/m wordt voor een open bedding met een lengte van 150 m een verhang in de waterlijn van 0.057 m bekomen. Dit is beduidend hoger dan het energieverlies van 0.026 m in de beide kokers, wat tegen de verwachtingen in is. Echter de onzekerheid op het verhang in de Zenne is, zoals hierboven reeds vermeld, omwille van de berekeningswijze relatief groot. Dit kan grootteorde enkele centimeters zijn. Om die reden wordt ingeschat dat het vervangen van de beide kokers afwaarts over een lengte van 150 m door een open bedding aanleiding zal geven tot een verlaging van de opstuwing met enkele centimeters.
- De combinatie van de beide hierboven beschreven invloeden kan voor de opwaartse variant van de loodrechte kruising geen aanleiding geven tot een totale waterpeilverhoging in de Zenne die kleiner is dan deze van de huidige duiker. Er wordt ingeschat dat de opstuwing ten gevolge van de opwaartse variant van de loodrechte kruising niet negatief kan worden. De overgangen naar de (dieper gelegen) kokers onder het kanaal zorgen namelijk nog altijd voor grotere verliezen dan gelijkvloerse overgangen.

4.4 Verliescoëfficiënt van de onderdelen van de duiker

In deze paragraaf worden de verliescoëfficiënten van de verschillende onderdelen van de duiker met elkaar vergeleken. Ook wordt de invloed van de aangebrachte optimalisaties aan het ontwerp van de opwaartse en de afwaartse variant van de loodrechte kruising op deze verliescoëfficiënten besproken.

Voor de berekening van de verliescoëfficiënten van de verschillende onderdelen van de duiker worden voor de huidige duiker en de opwaartse en afwaartse variant van loodrechte kruising de secties uit Figuur 38 gedefinieerd.

Figuur 38 – Locatie secties voor bepaling verliescoëfficiënt van de verschillende onderdelen van de duiker



a: huidige duiker; b: opwaartse variant loodrechte kruising; c: afwaartse variant loodrechte kruising

Voor elke sectie wordt eerst de gemiddelde druk op deze secties bepaald. Daarna wordt de verliescoëfficiënt bepaald aan de hand van volgende uitdrukking:

$$\xi_{xy} = \frac{2 \Delta p_{tot,xy} A^2}{\rho Q^2}$$

Met:

- ξ_{xy}	Verliescoëfficiënt van onderdeel tussen sectie x en y	[-]
- $\Delta p_{tot,xy}$	Drukverschil tussen sectie x en y (= $P_y - P_x$)	[Pa]
- P_x	Gemiddelde druk op sectie x	[Pa]
- P_y	Gemiddelde druk op sectie y	[Pa]
- A	Doorstroomsectie koker	[m ²]
- ρ	Dichtheid water (= 1000 kg/m ³)	[kg/m ³]
- Q	Debiet door koker	[m ³ /s]

Omwille van de vergelijkbaarheid van de resultaten van de berekening van de verliescoëfficiënt is voor elke geometrie en voor elk onderdeel de verliescoëfficiënt bepaald voor een referentie-oppervlak van 32 m². Dit is de oppervlakte van de kokers aan opwaartse zijde en onder het kanaal voor de huidige duiker.

In de CFD-simulaties wordt aan opwaartse zijde het debiet door de duiker opgelegd. Uit paragraaf 4.5 volgt dat omwille van numerieke redenen het berekende debiet ter plaatse van de afwaartse uitlaat van de duiker beperkt kan verschillen met het debiet dat aan de inlaat is opgelegd. Het rapport van het studiebureau (zie Bijlage A) vermeldt dat om die reden de verliescoëfficiënten ook gecorrigeerd zijn met het totaal debiet berekend ter plaatse van de afwaartse uitlaat van de duiker (zie Tabel 14 in paragraaf 4.5).

Tabel 12 geeft voor de CFD-simulaties uitgevoerd met de huidige duiker, voor het initieel ontwerp en optimalisatie 1 van de geometrie van de opwaartse variant van de loodrechte kruising, voor het initieel ontwerp en de beide optimalisaties aan de geometrie van de afwaartse variant van de loodrechte kruising een overzicht van de op deze wijze berekende verliescoëfficiënten voor de verschillende onderdelen van de duiker. De tabel vermeldt ook de totale verliescoëfficiënt voor de volledige duiker. Deze totale verliescoëfficiënt is berekend aan de hand van het drukverschil tussen de sectie ter plaatse van het opwaartse uiteinde en de sectie ter plaatse van het afwaartse uiteinde. Deze totale verliescoëfficiënt is niet noodzakelijk gelijk aan de som van de verliescoëfficiënten van de verschillende onderdelen, aangezien voor de berekening van de verliescoëfficiënt van de verschillende onderdelen de secties herrekend zijn naar de referentiesectie van 32 m².

Tabel 12 – Verliescoëfficiënt onderdelen van de duiker

Onderdeel	Huidige duiker	Opwaartse variant loodrechte kruising		Afwaartse variant loodrechte kruising		
		Initieel ontwerp	Optimalisatie 1	Initieel ontwerp	Optimalisatie 1	Optimalisatie 2
1-2	0.244	0.408	0.152	0.136	0.188	0.127
2-3	0.248	0.784	0.219	0.179	0.173	0.201
3-4	0.213	0.441	0.148	0.960	0.325	0.300
4-5	0.796	0.625	0.653	0.436	0.329	0.149
5-6	0.461	0.171	0.172	0.129	0.013	0.147
6-7	n.v.t.	1.025	1.022	0.685	0.716	0.410
7-8	n.v.t.	0.531	0.701	0.160	0.215	0.077
Volledige duiker	1.962	3.588	3.067	2.685	1.959	1.411

n.v.t. = niet van toepassing; De totale verliescoëfficiënt voor de volledige duiker is bepaald aan de hand van het drukverschil tussen opwaarts en afwaarts einde van de duiker. Deze waarde is niet noodzakelijk gelijk aan de som van de verliescoëfficiënten van de verschillende onderdelen

Uit Tabel 12 volgt dat voor de huidige duiker het grootste verlies zich voordoet in de lange leiding met lengte 342 m tussen sectie 4 en sectie 5. In het gedeelte van de duiker opwaarts met vier kokers en het gedeelte van de duiker onder het kanaal doen zich beperkte verliezen voor.

Bij de opwaartse variant van de loodrechte kruising doen zich naast de lange leiding met lengte 342 m tussen sectie 6 en sectie 7 grote verliezen voor ter plaatse van de overgangsconstructies naar de kokers onder het kanaal, i.e. tussen sectie 2 en sectie 3 en tussen sectie 4 en sectie 5. Bij de afwaartse variant doen zich de grootste verliezen ook voor ter plaatse van de overgangsconstructies naar de kokers onder het kanaal, i.e. tussen sectie 3 en sectie 4 en tussen sectie 6 en sectie 7. Aan het beginpunt (bij de opwaartse overgangsconstructie) en het eindpunt (bij de afwaartse overgangsconstructie) van de helling in deze overgangsconstructie doet zich namelijk loslating aan de bodem voor. Daarnaast doet zich bij de opwaartse overgangsconstructie ook loslating voor aan de hoek van de verticale wand van de toegangsschacht met het plafond van de koker onder het kanaal. Deze loslating is duidelijk merkbaar in Figuur 28 in paragraaf 4.2.2 voor de opwaartse duiker en Figuur 31 en Figuur 32 in paragraaf 4.2.3 voor de afwaartse duiker.

Bij de initiële geometrie van de opwaartse variant is het verlies van de inlaat van de duiker beduidend hoger dan het verlies van de inlaat bij de huidige duiker en het verlies van de inlaat van de afwaartse variant. Omwille van de hoek van 90° tussen de inlaat van de duiker en de Zenne doet zich aan de hoek tussen de meest opwaarts gelegen koker en de Zenne loslating voor (zie Figuur 28 in paragraaf 4.2.2). Deze loslating zorgt voor een toename van het verlies van de inlaat en zorgt er ook voor dat het debiet minder gelijkmatig verdeeld wordt over de vier kokers onder het kanaal (zie paragraaf 4.5). Een minder gelijkmatige verdeling van het debiet over de vier kokers onder het kanaal geeft aanleiding tot hogere verliezen van het geheel van de kokers onder het kanaal. Het aanbrengen van de kegelvormige afronding van de rechteroever ter plaatse van de inlaat bij optimalisatie 1 van de geometrie van de opwaartse variant zorgt voor een beduidend lager verlies ter plaatse van de inlaat (tussen sectie 1 en sectie 2).

Het toepassen van een flauwere helling in de opwaartse overgangsconstructie naar de kokers onder het kanaal en het toepassen van een afronding tussen de verticale wand van de toegangsschacht en het plafond van de kokers onder het kanaal zorgt zowel bij de opwaartse als de afwaartse variant van de loodrechte kruising voor een verlaging van de verliescoëfficiënt van deze overgangsconstructie (tussen sectie 2 en sectie 3 bij de opwaartse variant en tussen sectie 3 en sectie 4 bij de afwaartse variant).

Voor de afwaartse variant van de loodrechte kruising is bij optimalisatie 2 van de geometrie ook de helling in de afwaartse overgangsconstructie naar de kokers onder het kanaal flauwer gemaakt en is de hoek tussen de verticale wand van de toegangsschacht in de overgangsconstructie en het plafond van de kokers onder het kanaal afgerond. Deze optimalisaties zorgen ervoor dat het verlies van de opwaartse overgangsconstructie (tussen sectie 6 en 7) afneemt van 0.716 naar 0.410, wat ongeveer gelijk is aan het verlies van de afwaartse overgangsconstructie van 0.300 (tussen sectie 3 en 4). Hierdoor neemt het verlies ter plaatse van de uitlaat ook af van 0.215 naar 0.077.

In de literatuur wordt voor een uitlaat van een duiker in een oneindig waterreservoir een waarde voor de verliescoëfficiënt vermeld gelijk aan 1.0. Hierbij wordt de verliescoëfficiënt berekend tussen de opwaartse sectie en een afwaartse sectie die de uitlaat van het domein betreft. Voor de opwaartse variant van de duiker wordt voor de beide uitgevoerde simulaties een verliescoëfficiënt berekend die iets lager is dan deze waarde. Voor de afwaartse variant is de berekende waarde van de verliescoëfficiënt beduidend lager. De verklaring hiervoor is de bocht van 90° in de Zenne onmiddellijk afwaarts van de uitlaat en het feit dat de verliescoëfficiënt berekend is op basis van de gemiddelde drukken in een sectie die juist afwaarts van deze bocht gelegen is en niet aan de uitlaat van het domein. Door deze bocht vindt in de Zenne een stroming plaats die aanleunt tegen de rechteroever van de Zenne. Aan de linkeroever van de Zenne vindt een terugstroming plaats. Deze terugstroming beïnvloedt de berekening van de gemiddelde druk ter plaatse van de afwaartse sectie.

Met optimalisatie 2 van de geometrie van de afwaartse variant zijn nog twee simulaties uitgevoerd, één simulatie waarbij het volledige debiet van 41.7 m³/s afgevoerd wordt door één koker van de duiker en één simulatie waarbij een debiet van 70 m³/s afgevoerd wordt door alle vier de kokers van de duiker. Voor deze beide simulaties vergelijkt Tabel 13 de waarde van de verliescoëfficiënt voor de verschillende onderdelen van de duiker met deze voor de simulatie waarbij het debiet van 41.7 m³/s afgevoerd wordt door alle vier de kokers van de duiker. Bij vergelijking van de waarden van de verliescoëfficiënt voor de simulatie waarbij het volledige debiet van 41.7 m³/s afgevoerd wordt door 1 koker met dit van de simulaties waarbij het volledige debiet afgevoerd wordt door vier kokers moet opgemerkt worden dat bij deze laatste simulaties een gemiddelde verliescoëfficiënt voor de vier kokers bepaald is. Omwille van een verschillend stromingspatroon in de vier kokers kunnen deze waarden bijgevolg niet één op één vergeleken worden met de verliescoëfficiënt voor de simulatie waarbij het debiet door één koker wordt afgevoerd. Uit Tabel 13 volgt bij afvoeren van het volledige debiet van 41.7 m³/s door één koker dat de locaties met de grootste verliezen dezelfde zijn als deze bij de overige simulaties. Relatief gezien is het verlies aan de inlaat bij de simulatie met 1 koker wel groter dan deze bij de overige simulaties wegens de vernauwing van de stroming van de volledige Zenne naar de ene koker van de duiker. Bij de simulaties waarbij een debiet van 70 m³/s door de vier kokers wordt afgevoerd zijn de locaties met de grootste verliezen ook dezelfde als bij de overige simulaties. Het verlies aan de inlaat is iets groter dan bij de simulatie waarbij 41.7 m³/s afgevoerd wordt door de vier kokers omwille van het hogere opwaartse waterpeil. Uit paragraaf 4.2.3 volgt dat het hogere debiet door de duiker zorgt voor meer loslating aan de afronding van het plafond van de opwaartse overgangsconstructie naar de kokers aan het kanaal en de botsing van de stroming tegen het plafond van de duiker bij afwaartse overgangsconstructie van de kokers onder het kanaal naar de Zenne. Dit zorgt voor een iets hogere verliescoëfficiënt van de beide overgangsconstructies naar de duikers onder het kanaal.

Tabel 13 – Verliescoëfficiënt voor simulaties met optimalisatie 2 van de geometrie van de afwaartse variant van de loodrechte kruising

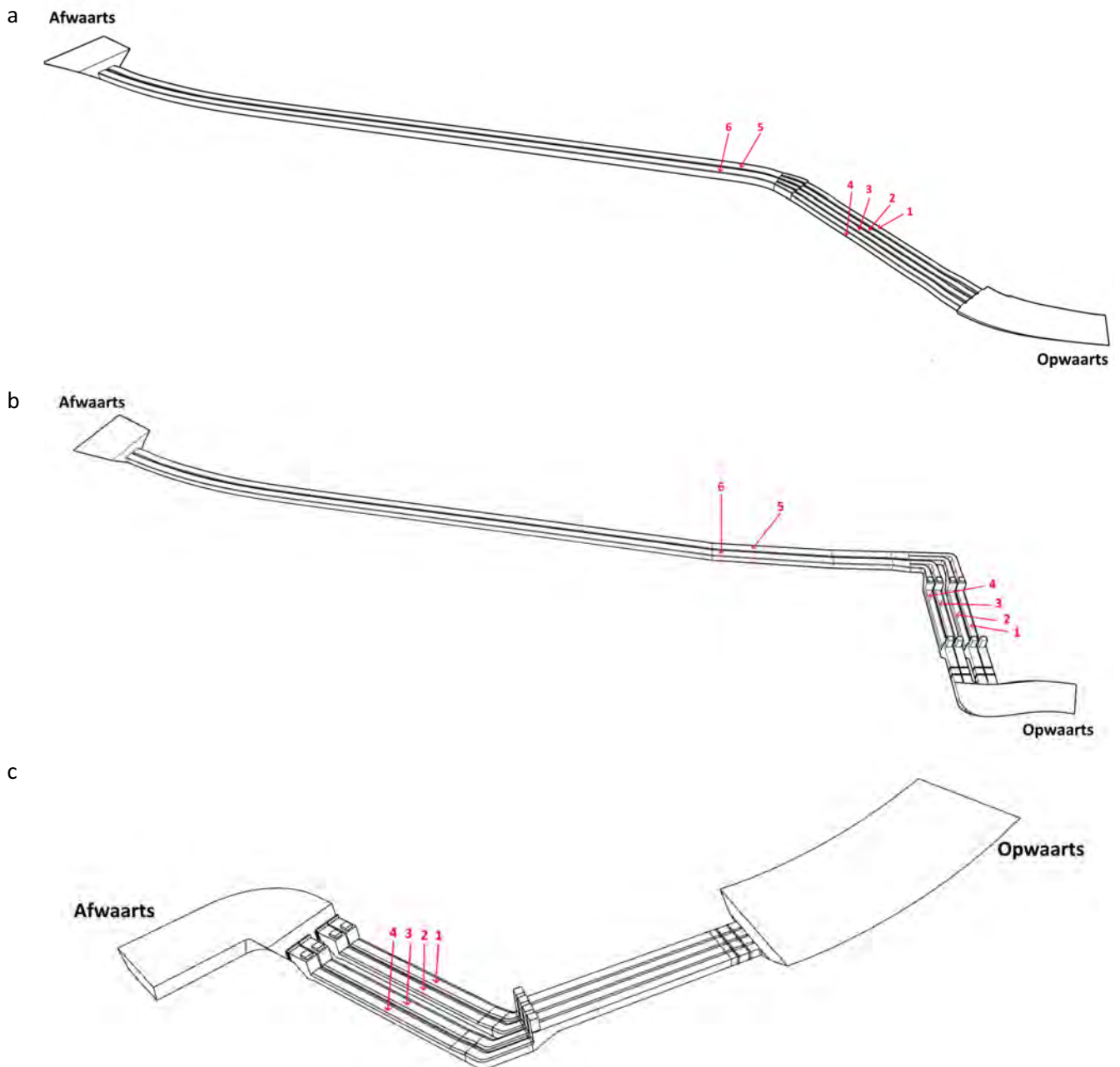
Onderdeel	4 kokers - Debiet 41.7 m ³ /s	1 koker - Debiet 41.7 m ³ /s	4 kokers – Debiet 70 m ³ /s
1-2	0.127	0.265	0.302
2-3	0.201	0.142	0.101
3-4	0.300	0.311	0.563
4-5	0.149	0.078	0.117
5-6	0.147	0.177	0.062
6-7	0.410	0.658	0.504
7-8	0.077	0.041	0.096
Volledige duiker	1.411	1.672	1.745

De totale verliescoëfficiënt voor de volledige duiker is bepaald aan de hand van het drukverschil tussen opwaarts en afwaarts einde van de duiker. Deze waarde is niet noodzakelijk gelijk aan de som van de verliescoëfficiënten van de verschillende onderdelen

4.5 Verdeling debiet over de kokers van de duiker

In deze paragraaf wordt de verdeling van het debiet over de verschillende kokers van de duiker besproken. Hiervoor worden de verschillende kokers van de huidige duiker, de opwaartse variant van de loodrechte kruising en de afwaartse variant van de loodrechte kruising genummerd zoals aangegeven in Figuur 39.

Figuur 39 – Nummering kokers duiker



a: huidige duiker; b: opwaartse variant loodrechte kruising; c: afwaartse variant loodrechte kruising

Tabel 14 geeft voor elke uitgevoerde CFD-simulatie een overzicht van het debiet door elke koker van de duiker. In deze tabel is ook het totaal debiet door de vier kokers onder het kanaal gegeven. Dit debiet is berekend als de som van het debiet van de vier kokers onder het kanaal. De laatste kolom in de tabel geeft de waarde van het totale debiet ter plaatse van de afwaartse uitlaat van de duiker. Dit debiet is gebruikt bij de berekening van de verliescoëfficiënt van de verschillende onderdelen in paragraaf 4.4. Voor elke uitgevoerde CFD-simulatie geeft Tabel 15 de procentuele verdeling van het debiet over de verschillende kokers onder het kanaal en Figuur 40 een grafische voorstelling van deze procentuele verdeling.

Bij Tabel 14 wordt opgemerkt dat tussen het totaal debiet ter plaatse van de uitlaat en het debiet opgelegd op de opwaartse inlaat een verschil tussen 0.02 % en 1.70 % wordt waargenomen en een verschil van maximaal 0.17 % tussen het totaal debiet door de kokers onder het kanaal en het totaal debiet berekend ter plaatse van de uitlaat. Dit zijn zeer beperkte verschillen. Het verschil tussen het totaal debiet ter plaatse van de inlaat en het totaal debiet ter plaatse van de uitlaat kan verklaard worden doordat het berekende debiet door de kokers tijdens de simulaties beperkt varieert in de tijd. Het berekende debiet door de kokers is een uitmiddeling van de laatste 20000 iteraties van de simulatie. Het uitmiddelen van waarden die een beperkte variatie vertonen kan echter aanleiding geven tot een iets hoger of lager gemiddeld debiet dan het debiet dat aan de inlaat wordt opgelegd. Anderzijds worden de CFD-simulaties uitgevoerd gebruik maken van de Local Time Stepping discretisatie. Bij deze methode is de tijdstap voor de simulatie niet constant maar wordt de tijdstap lokaal aangepast in functie van de lokale celgrootte en de lokale stroomsnelheid. Bij deze methode is er echter geen absoluut behoud van massa. Het debiet door de kokers kan hierbij lokaal beperkt wijzigen. De toename van het debiet met maximaal 2 %, in vergelijking met het als randvoorwaarde opgelegde debiet, is eerder beperkt. Het verschil van maximaal 0.17 % tussen het totaal debiet door de kokers onder het kanaal en het totaal debiet berekend ter plaatse van de uitlaat duidt er op dat een aantal van de uitgevoerde simulaties nog niet volledig geconvergeerd zijn tot het steady-state eindresultaat. Een iets langere rekentijd voor deze simulaties geeft vermoedelijk aanleiding tot identiek hetzelfde debiet op de beide beschouwde locaties. Echter de beduidende verlenging van de rekentijd weegt hier niet op tegen de verbetering van de resultaten, aangezien de verschillen verwaarloosbaar zijn. De overige simulaties, waarbij het totaal debiet door de kokers niet verschilt van het berekende debiet ter plaatse van de uitlaat, zijn wel volledig geconvergeerd.

Tabel 14 – Debiet (in m³/s) door verschillende kokers van de duiker

		Debiet opwaartse inlaat	Debiet door kokers onder kanaal					Debiet lange kokers		Totaal debiet afwaartse uitlaat
Geometrie			Koker 1	Koker 2	Koker 3	Koker 4	Totaal	Koker 5	Koker 6	
Huidige duiker		41.67	10.61	10.07	9.67	11.26	41.61	20.68	20.93	41.61
Opwaartse variant loodrechte kruising	Initieel ontwerp	41.67	8.40	10.92	11.17	11.22	41.71	19.321	22.390	41.66
	Optimalisatie 1	41.67	11.06	9.48	10.57	10.80	41.91	20.534	21.367	41.90
Afwaartse variant loodrechte kruising	Initieel ontwerp	41.67	10.36	9.94	10.62	10.83	41.75	n.v.t.	n.v.t.	41.68
	Optimalisatie 1	41.67	10.56	10.46	10.66	10.70	42.38	n.v.t.	n.v.t.	42.38
	Optimalisatie 2	41.67	10.33	10.24	10.51	10.61	41.69	n.v.t.	n.v.t.	41.71
	Optimalisatie 2	70.00	17.61	18.15	17.55	17.07	70.39	n.v.t.	n.v.t.	70.11
	Optimalisatie 2 (3 kokers afgesloten)	41.67	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	41.67	41.67	n.v.t.	n.v.t.	42.21

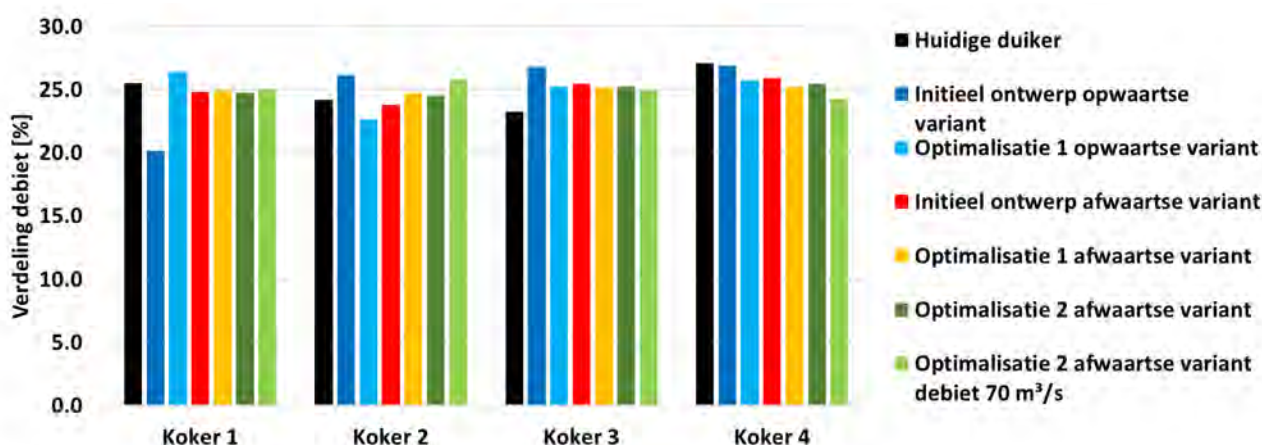
n.v.t. = niet van toepassing

Tabel 15 –Verdeling (in %) debiet over kokers onder het kanaal

Geometrie		Debiet inlaat	Koker 1	Koker 2	Koker 3	Koker 4
Huidige duiker		41.67	25.5	24.2	23.2	27.1
Opwaartse variant loodrechte kruising	Initieel ontwerp	41.67	20.1	26.2	26.8	26.9
	Optimalisatie 1	41.67	26.4	22.6	25.2	25.8
Afwaartse variant loodrechte kruising	Initieel ontwerp	41.67	24.8	23.8	25.4	25.9
	Optimalisatie 1	41.67	24.9	24.7	25.2	25.2
	Optimalisatie 2	41.67	24.8	24.6	25.2	25.4
	Optimalisatie 2	70.00	25.0	25.8	24.9	24.3
	Optimalisatie 2 (3 kokers afgesloten)	41.67	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	100.0

n.v.t. = niet van toepassing

Figuur 40 – Procentuele verdeling debiet over kokers onder kanaal



Op basis van Tabel 15 en Figuur 40 wordt het volgende besloten:

- Bij de huidige duiker is het debiet relatief gelijkmatig verdeeld over de vier kokers. Het debiet door de buitenste kokers, koker 1 en koker 4, is beperkt hoger dan 25 % van het totale debiet (25.5 % en 27.1 %), het debiet door de twee binnenste kokers, koker 2 en koker 3, is beperkt lager dan 25 % van het totale debiet (23.2 % en 24.2 %).
- Bij de initiële geometrie van de opwaartse variant zorgt de loslating ter plaatse van de opwaartse inlaat van koker 1 (zie ook paragraaf 4.4 en paragraaf 4.2.2) ervoor dat het debiet door koker 1 beduidend lager is dan het debiet door de overige 3 kokers. Het debiet door koker 1 bedraagt 20.1 % van het totale debiet, terwijl het debiet door de overige 3 kokers 26.2 % à 26.9 % van het totale debiet bedraagt. Het debiet door koker 2 is hierbij beperkt lager dan het debiet door koker 3 en koker 4. Het voorzien van een kegelvormige afronding aan rechteroever ter plaatse van de opwaartse inlaat bij de optimalisatie van de geometrie van de opwaartse variant zorgt voor een betere verdeling van het debiet over de verschillende kokers onder het kanaal. Analoog aan de huidige duiker is bij optimalisatie 1 van de geometrie het debiet door koker 1 en koker 4 iets hoger dan 25 % van het totale debiet, respectievelijk 26.4 % en 25.8 % van het totale debiet. Het debiet door koker 2 is beperkt lager dan 25 % van het totale debiet (22.6 %), het debiet door koker 3 is gelijk aan 25.2 % van het totale debiet.

- De inlaat van de afwaartse variant is gelegen in het verlengde van de open bedding van de Zenne opwaarts. Dit zorgt ervoor dat de verdeling van het debiet over de vier kokers onder het kanaal meer gelijkmatig is dan bij de opwaartse variant. Het debiet door koker 2 bedraagt 23.8 % van het totale debiet. Het debiet door de overige kokers varieert tussen 24.8 % en 25.9 % van het totale debiet. Bij optimalisatie 1 van de geometrie zorgt de aanpassing van de bodemhelling van de opwaartse overgangsconstructie naar de kokers onder het kanaal en de afronding van de hoek tussen de verticale toegangsschacht en het plafond van de kokers onder het kanaal in deze overgangsconstructie voor een uniforme verdeling van het debiet over de vier kokers. Het debiet over de vier kokers onder het kanaal varieert tussen 24.7 % en 25.3 % van het totale debiet. Deze verdeling wijzigt nauwelijks bij de aanpassing van de bodemhelling in de afwaartse overgangsconstructie en de afronding van de hoek tussen de verticale toegangsschacht ter plaatse van deze overgangsconstructie en het plafond van de kokers onder het kanaal bij optimalisatie 2.
- Bij afvoeren van een debiet van 70 m³/s door vier kokers varieert het debiet door de vier kokers tussen 24.3 % en 25.8 %. Dit is dezelfde variatie als bij het afvoeren van het debiet van 41.7 m³/s door de vier kokers.

5 1D-Modellering Zenne met nieuwe Zenneduiker

5.1 Numeriek 1D-model Zenne-Zeekanaal

De CFD-simulaties zijn uitgevoerd met als randvoorwaarden de afwaartse waterstand en het debiet door de Zenne bij een was met terugkeerperiode T100. Het debiet van 41.7 m³/s (zie ook hoofdstuk 3) is zodanig bepaald dat bij platleggen van de stuw te Lembeek zich geen overstromingen voordoen ter plaatse van de overwelvingen van Brussel. Hierbij wordt afwaarts ook geen debiet afgevoerd via de watervang van de Aa naar het kanaal Brussel-Charleroi.

Na uitvoeren van de CFD-simulaties zijn zowel voor de opwaartse als voor de afwaartse variant van de loodrechte kruising van het kanaal door de Zenneduiker een aantal simulaties uitgevoerd met het 1D numeriek model van de Zenne en van het kanaal Brussel-Charleroi¹.

5.1.1 Basismodel

Als basismodel wordt gebruik gemaakt van het 1D-model van het kanaal Brussel-Charleroi en de Zenne (Pereira *et al.*, 2015). Dit model, voorgesteld in Figuur 41, omvat het Vlaamse, Brusselse en een deel van het Waalse deel van het Zennebekken. In het model zijn zowel de Zenne als het Zeekanaal en het Kanaal Brussel-Charleroi opgenomen om de verschillende interacties tussen beide kanalen en de Zenne te kunnen simuleren. Het hydrodynamisch model van de Zenne omvat naast de panden van het Zeekanaal in Vlaanderen ook het Kanaal naar Charleroi in het Waals Gewest en het tussenpand in het Brussels Hoofdstedelijk Gewest. Het kanaal is dus gemodelleerd van het Hellend Vlak van Ronquières tot aan de monding in de Zeeschelde. De aftakkingen naar de Zenne ter hoogte van de hevels te Vilvoorde en naar de Rupel zijn ook ingevoerd in het model.

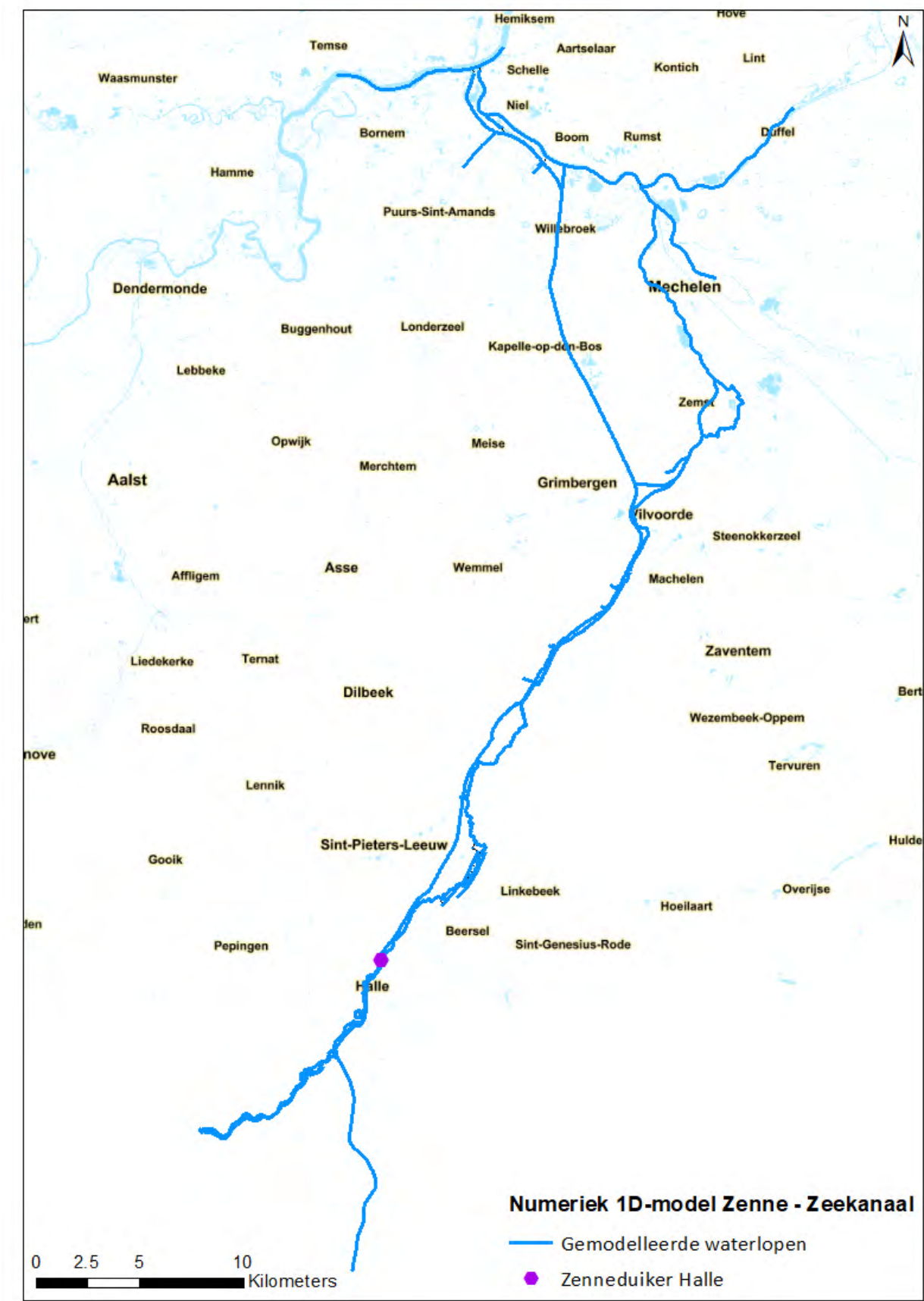
De Zenne is gemodelleerd vanaf Steenkerque in Wallonië, waar de rivier 'Senne' heet, tot aan de monding in de Rupel. Er zijn slechts een aantal overstromingsgebieden ter hoogte van Halle in het model ingebouwd. Van de zijrivieren is enkel de Sennette hydrodynamisch gemodelleerd. De Zuunbeek wordt in het model als fictieve tak voorgesteld.

De belangrijkste structuren van het systeem, die de interactie tussen de Zenne en het kanaal bepalen, zijn in het model ingevoerd en worden in detail beschreven in het deelrapport 4 van de studie "Opmaak van numerieke hydrologische en hydraulische modellen van het Kanaal naar Charleroi en Zeekanaal Brussel-Schelde" (Pereira, 2007).

¹ Versiebeheer:

https://wl-subversion.vlaanderen.be/svn/repoSpNumMod/MIKE11/Zeekanaal/Zenne_20191024_18_093 revisie 3651

Figuur 41 – Overzicht numeriek 1D-model Zenne-Zeekanaal



5.1.2 Aanpassing model

Het 1D numeriek model is aangepast op basis van de resultaten van de CFD-simulaties. Voor de huidige duiker volgt uit de CFD-modellering een totale waterpeilverhoging ten gevolge van de constructie van 0.23 m (zie paragraaf 4.2). Echter bij het bepalen van de randvoorwaarden voor de CFD-simulaties in hoofdstuk 3 is vastgesteld dat de totale waterpeilverhoging berekend met het 1D-numeriek model 0.63 m bedraagt. Dit is een beduidend verschil. Om die reden is het 1D-model aangepast. De huidige duiker is in het 1D-model aanwezig als twee kokers met een breedte van 4.36 m en een hoogte van 3.8 m. De vier kokers onder het kanaal zijn hierbij dus als twee maal één koker beschouwd. De afmetingen van deze twee kokers zijn ongeveer gelijk aan de afmetingen van de kokers van de Zenne afwaarts van de duiker onder het kanaal. Omwille van praktische redenen is de ruwheid van de kokers in het 1D-model gewijzigd om de totale waterpeilverhoging in de Zenne ten gevolge van de huidige duiker berekend met dit model te verlagen. Hierbij wordt opgemerkt dat dus niet de totale verliescoëfficiënt van de huidige duiker onder het kanaal uit de CFD-simulaties in het 1D-numeriek model wordt gewijzigd. Eenzelfde werkwijze is gevolgd om het initieel ontwerp van de opwaartse en de afwaartse variant in het 1D-numeriek model in te brengen. Dit is enkel uitgevoerd voor de initiële ontwerpen van de opwaartse en afwaartse variant van de loodrechte kruising aangezien de totale waterpeilverhoging ten gevolge van de constructie voor deze varianten hoger is dan bij de varianten met optimalisaties. Hiervoor is niet de werkelijke geometrie van de duiker met de bijbehorende totale verliescoëfficiënt uit de CFD-modellering in het model ingevoegd. Enkel de lengte van de duiker en de ruwheid zijn aangepast in het 1D-model. Het aantal kokers (2) en de afmetingen van de kokers zijn hierbij niet gewijzigd. Tabel 16 geeft een overzicht van de wijzigingen aan het 1D-numeriek model en de met dit model berekende totale waterpeilverhoging ten gevolge van de constructie voor de huidige duiker, de opwaartse en de afwaartse variant van de loodrechte kruising. Bij deze tabel wordt opgemerkt dat de totale waterpeilverhoging ten gevolge van de constructie bij de afwaartse duiker na wijziging van het numeriek model 0.30 m bedraagt, wat nog 0.08 m lager is dan de totale waterpeilverhoging uit Tabel 10 in paragraaf 4.3. Voor deze simulatie bedraagt de waarde van de ruwheid van de kokers al 0.030, wat relatief hoog is voor de ruwheid van een constructie in beton. Om die reden is de waarde van de ruwheid van de kokers niet meer verder verhoogd en bedraagt de berekende totale waterpeilverhoging ten gevolge van de constructie voor de afwaartse variant 0.30 m. Echter na optimalisatie van het ontwerp voor de afwaartse variant bedraagt de totale waterpeilverhoging in de Zenne ten gevolge van de constructie 0.29 m.

Tabel 16 – Resultaten wijziging 1D-numeriek model

	Huidige duiker	Opwaartse variant	Afwaartse variant
Lengte duiker in model	422.30 m	530.0 m	170.0 m
Manningruwheid kokers	0.013	0.020	0.030
Debiet	41.7 m ³ /s	41.7 m ³ /s	41.7 m ³ /s
Waterstand opwaarts	+30.11 mTAW	+30.24 mTAW	+30.19 mTAW
Waterstand afwaarts	+29.89 mTAW	+29.89 mTAW	+29.89 mTAW
Waterpeilverhoging	0.22 m	0.35 m	0.30 m

Met behulp van het 1D-numeriek model voor de huidige duiker, de opwaartse en de afwaartse variant van de loodrechte kruising zijn volgende simulaties uitgevoerd:

1. De toelaatbaarheid van de hogere opstuwing door de opwaartse en de afwaartse variant wordt nagegaan. Hierbij wordt nagegaan of deze hogere opstuwing aanleiding geeft tot overstromingen. De resultaten van deze simulaties worden beschreven in paragraaf 5.2.
2. Bepaling van het maximaal debiet door de Zenneduiker. Hierbij wordt het maximaal debiet voor de Zenne afwaarts Lembeek bepaald, waarbij juist geen overstromingen optreden. De resultaten van deze simulaties worden beschreven in paragraaf 5.3.

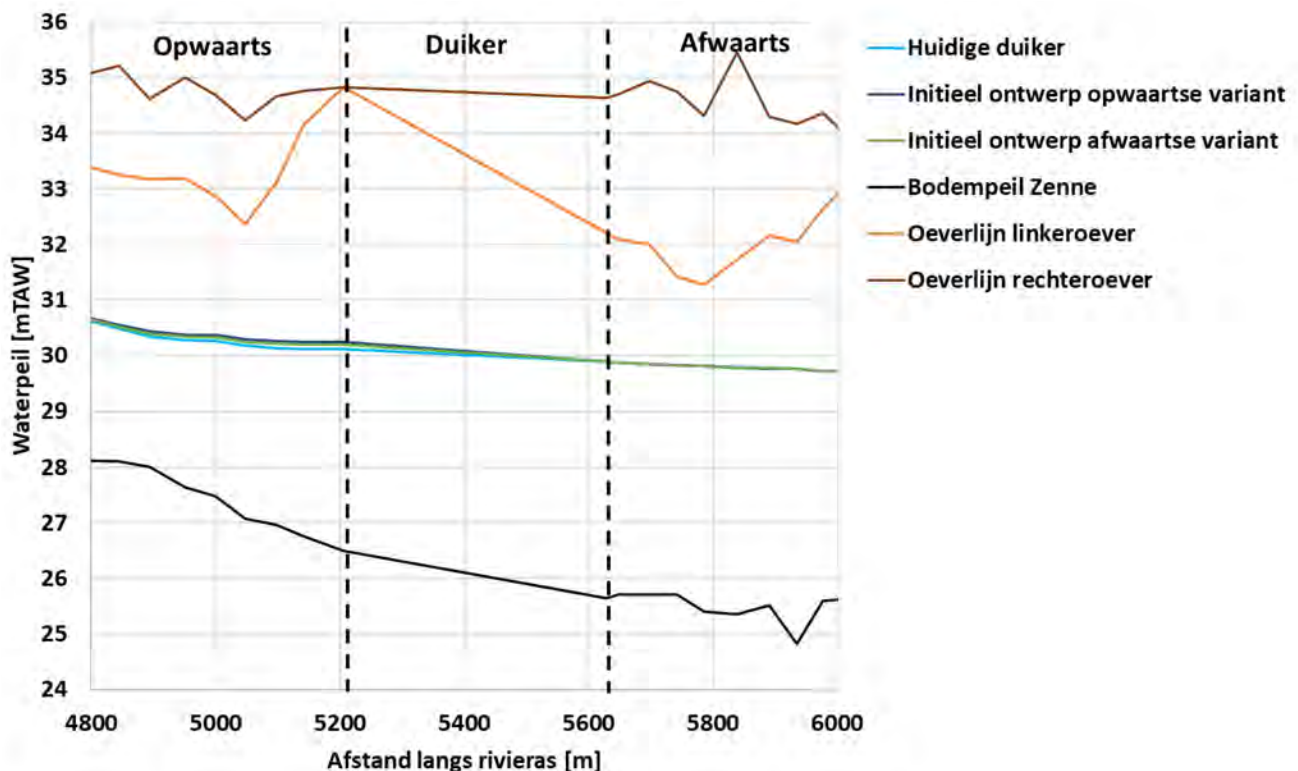
5.2 Toelaatbaarheid opstuwing ten gevolge van nieuwe Zenneduiker

Uit paragraaf 4.2 volgt dat met het initieel ontwerp van de opwaartse en de afwaartse variant van de loodrechte kruising een opstuwing berekend wordt van respectievelijk 0.12 m en 0.15 m. Zowel voor de opwaartse als de afwaartse variant zorgen de beschouwde optimalisaties voor een verlaging van deze opstuwing. Om te bepalen of deze opstuwing toelaatbaar is, is om die reden enkel de configuratie met de grootste opstuwing, namelijk het initieel ontwerp voor de opwaartse en de afwaartse variant gesimuleerd met het 1D-numeriek model.

Figuur 42 vergelijkt het maximaal waterpeil berekend voor de huidige duiker, het initieel ontwerp van de opwaartse variant van de loodrechte kruising en het initieel ontwerp van de afwaartse variant van de loodrechte kruising met de ligging van de oeverlijnen voor de Zenne. Uit deze figuur volgt dat opwaarts van de Zenneduiker het verschil tussen het maximaal optredend waterpeil en de laagste ligging van de oever nog circa 2.11 m bedraagt. Dit betreft een zeer ruime marge in vergelijking met de opstuwing van 0.12 à 0.15 m ten gevolge van het realiseren van de opwaartse en de afwaartse variant van de loodrechte kruising. Deze beperkte opstuwing in vergelijking met de ligging van de oevers aan linkeroever laat besluiten dat niet alle vier de kokers nodig zijn voor het afvoeren van debieten tot 41.7 m³/s.

Uit paragraaf 4.3 volgt dat voor de simulatie met de afwaartse variant waarbij het volledige debiet van 41.7 m³/s wordt afgevoerd door één koker een opstuwing wordt berekend van 2.34 m. Dit zou betekenen dat het waterpeil van de Zenneduiker zal stijgen tot een peil juist hoger dan de oeverlijn aan linkeroever. Deze opstuwing is dus niet toelaatbaar, maar deze toestand waarbij het volledige debiet van 41.7 m³/s door één koker afgevoerd wordt als niet realistisch beschouwd. De bepaling van het debiet dat wel door één koker kan afgevoerd worden behoort niet tot het onderwerp van deze studie en is een onderwerp voor verder onderzoek.

Figuur 42 – Vergelijking maximaal waterpeil berekend voor huidige duiker, initieel ontwerp van opwaartse en afwaartse variant van loodrechte kruising met de oeverlijnen van de Zenne



5.3 Bepaling maximaal debiet door Zenne

Uit paragraaf 5.2 volgt dat bij een was met terugkeerperiode 100 jaar en bij het maximum debiet op de Zenne waarbij ter plaatse van de overwelling in Brussel zich nog geen overstroming voordoet het waterpeil in de Zenne te Halle nog meer dan 2.0 m lager is dan de oeverlijn in het 1D-numeriek model.

De opdrachtgever vraagt zich echter af wat het maximale debiet door de Zenne is, waarbij er zich te Halle juist geen overstromingen voordoen. Hiervoor zijn simulaties uitgevoerd met het 1D-numeriek model van de Zenne met de huidige duiker, het initieel ontwerp van de opwaartse variant de afwaartse variant van de loodrechte kruising. Om deze simulaties uit te voeren is in het numeriek model juist afwaarts van de stuw te Lembeek een bijkomend debiet op de Zenne opgelegd. Dit debiet is iteratief verhoogd tot zich overstromingen voordoen op het beschouwde traject. Figuur 43 (huidige duiker) en Figuur 44 (opwaartse en afwaartse variant loodrechte kruising) vergelijken voor een aantal debieten (41.7 m³/s, 70 m³/s, 80 m³/s en 90 m³/s) het verloop van het maximaal waterpeil in de Zenne met de ligging van de oeverlijnen. Op basis van deze figuren wordt het volgende besloten:

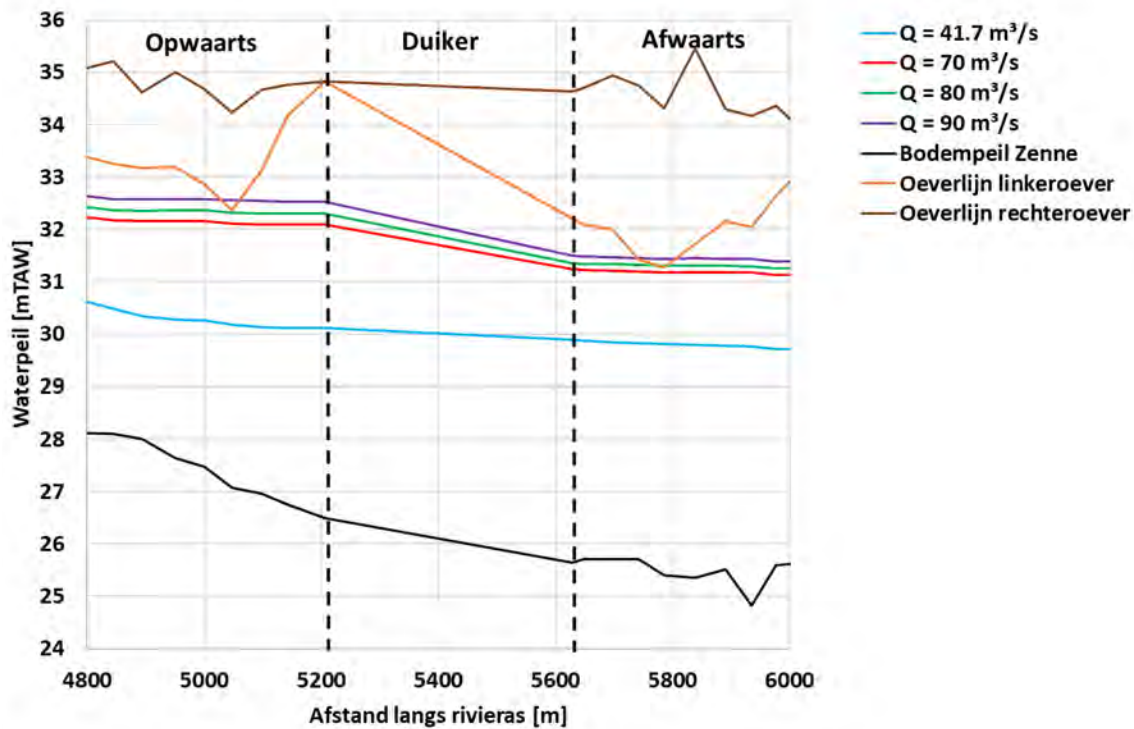
- Voor de huidige duiker doen zich tot een debiet van 70 m³/s in het beschouwde deel van het 1D-model van de Zenne geen overstromingen voor. Vanaf een debiet van circa 80 m³/s stijgt het waterpeil zowel opwaarts als afwaarts van de Zenneduiker boven de oeverlijn van de linkeroever.
- Zowel bij het initiële ontwerp van de opwaartse variant van de loodrechte kruising, als bij het initiële ontwerp van de afwaartse variant van de loodrechte kruising stijgt het waterpeil opwaarts van de Zenneduiker vanaf een debiet van 70 m³/s tot boven de oeverlijn aan linkeroever. Vanaf een debiet van 80 m³/s stijgt het waterpeil ook afwaarts tot boven de oeverlijn aan linkeroever.

Op basis van deze resultaten is het maximale debiet van 70 m³/s beschouwd als randvoorwaarde voor de CFD-simulatie met het maximale debiet door de duiker (zie paragraaf 4.1). Bij dit maximale debiet moet het volgende opgemerkt worden:

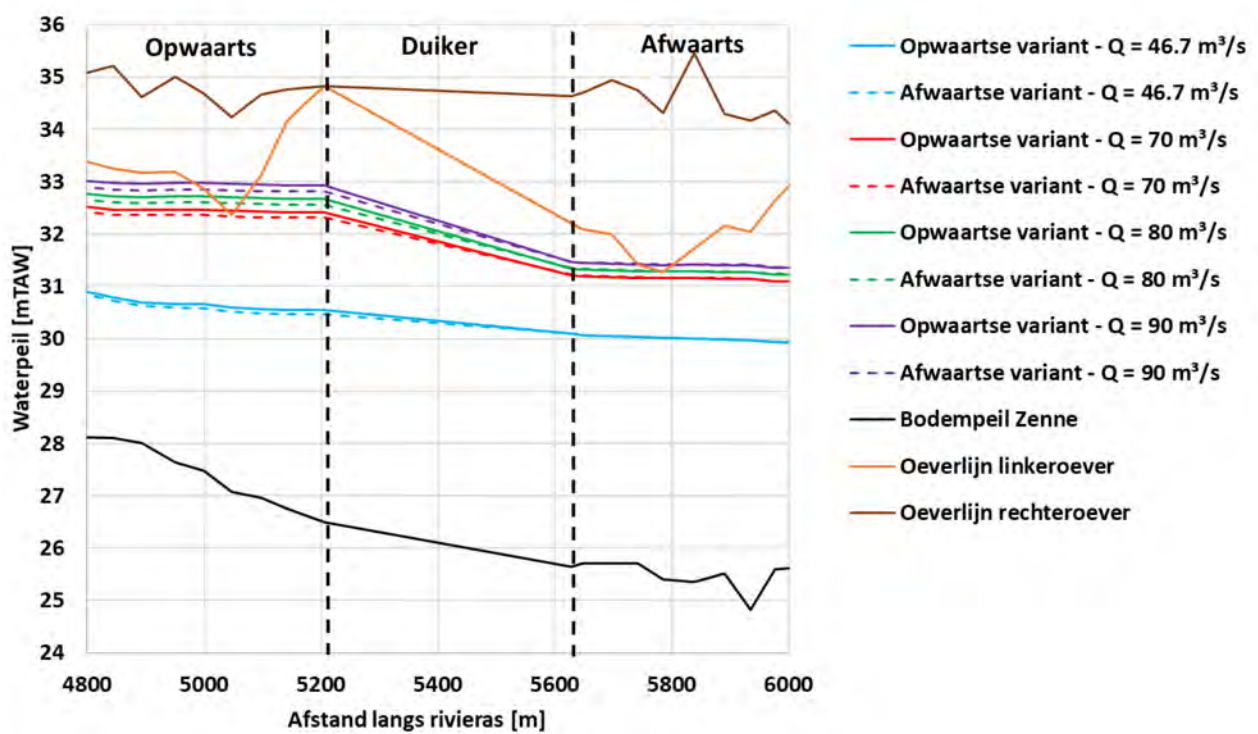
- Dit maximale debiet is bepaald voor het initiële ontwerp van de opwaartse en de afwaartse variant van de loodrechte kruising. De optimalisaties aan deze ontwerpen zorgen voor een verlaging van de verliezen van de stroming door de duiker en bijgevolg voor een verlaging van opstuwing ten gevolge van de duiker. Voor de geoptimaliseerde ontwerpen kan bijgevolg een beperkt hoger debiet bekomen worden. Echter dit debiet zal niet hoger zijn dan 80 m³/s, aangezien zich bij dit debiet afwaarts van de Zenneduiker overstromingen voordoen.
- De kans dat dit maximale debiet door de Zenneduiker in praktijk voorkomt is klein. Het maximale debiet door de Zenneduiker is hoger dan het maximale debiet van 60 m³/s voor de overwellingen van Brussel. Afwaarts van de Zenneduiker te Halle kan ter plaatse van de watervang van de Aa maximaal 24 m³/s worden afgevoerd naar het kanaal Brussel-Charleroi. Bijgevolg kan dit maximale debiet door de Zenneduiker te Halle van 70 m³/s enkel voorkomen zonder overstromingen te veroorzaken in Brussel indien via de watervang van de Aa bijkomend maximaal 24 m³/s wordt afgevoerd naar het kanaal Brussel-Charleroi.

Voor de afwaartse duiker volgt uit deze paragraaf dat overstromingen zich voordoen vanaf een debiet van 70 m³/s door de Zenneduiker. Echter uit Tabel 11 in paragraaf 4.3 volgt dat de opstuwing voor de CFD-simulatie met debiet 70 m³/s 0.30 m bedraagt. Dit is nog beduidend lager dan de maximaal toelaatbare opstuwing van 2.11 m uit paragraaf 5.2. Hieruit volgt dat het maximaal debiet door de Zenneduiker nog hoger kan zijn dan deze 70 m³/s, maar zoals hoger al vermeld niet hoger dan 80 m³/s, aangezien er dan afwaarts van de Zenneduiker te Halle overstromingen voordoen.

Figuur 43 – Vergelijking maximaal waterpeil in de Zenne voor huidige duiker met de oeverlijnen van de Zenne



Figuur 44 – Vergelijking maximaal waterpeil in de Zenne voor opwaartse en afwaartse variant loodrechte kruising met de oeverlijnen van de Zenne



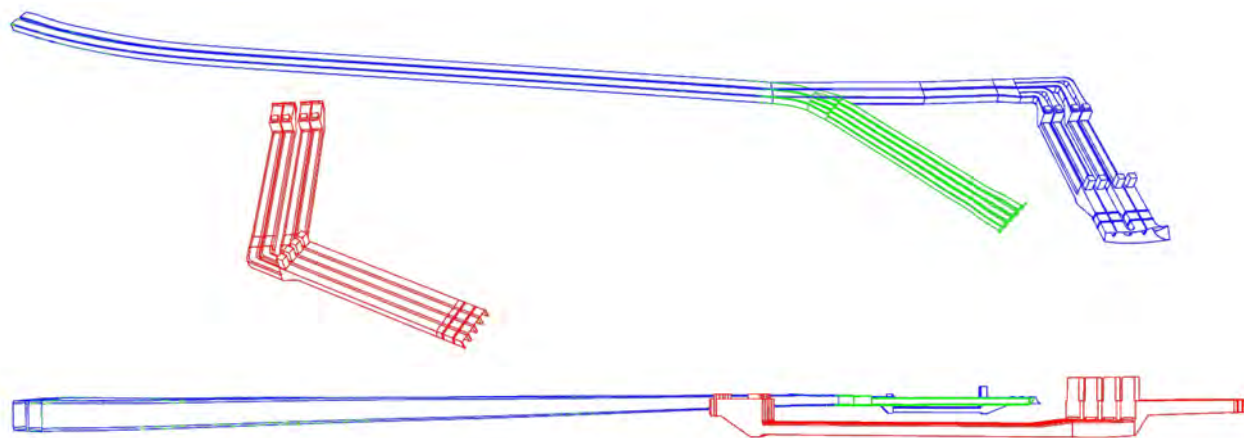
6 Conclusie

Net opwaarts van de sluis te Halle kruist de Zenne het kanaal Brussel-Charleroi. Hierbij wordt de Zenne door middel van een duiker onder het kanaal geleid. De duiker bestaat onder het kanaal uit 4 kokers dewelke na de kruising overgaan in 2 kokers. In het kader van de verdieping van het kanaal Brussel-Charleroi dient een nieuwe, dieper gelegen, duiker voorzien te worden voor de Zenne. Door het studie bureau SBE werd reeds een voorontwerp opgemaakt van een schuine kruising van het kanaal door middel van een duiker, zowel opwaarts als afwaarts van de sluis (SBE, 2015). Door afdeling Regio Centraal van de Vlaamse Waterweg nv (DVW) werd bij de verdere uitwerking van het ontwerp opgemerkt dat een loodrechte kruising van het kanaal door de duiker economisch voordeliger uit te voeren is dan een schuine kruising. Daarnaast werd ook de mogelijkheid open gehouden om de duiker uit te voeren met behulp van afgezonken elementen, aan de hand van een persing onder het kanaal of aan de hand van een boring onder het kanaal.

Voor het hydraulisch ontwerp van de nieuwe Zenneduiker, waarbij deze het kanaal loodrecht kruist, vraagt DVW (projectleider: Olivier Devriese) advies aan het Waterbouwkundig Laboratorium (WL). De vraag wordt gesteld of een loodrechte kruising van het kanaal Brussel-Charleroi door de duiker mogelijk is en hoe deze nieuwe duiker het waterpeil van de Zenne opwaarts van de duiker beïnvloedt. Om deze vragen te beantwoorden wordt de opstuwing in de Zenne bepaald voor een aantal varianten van de nieuwe duiker.

Vooreerst is door WL in overleg met de opdrachtgever zowel voor de opwaartse als de afwaartse ligging van de loodrechte kruising een ontwerp gemaakt voor de nieuwe duiker. Figuur 45 vergelijkt de ligging van de huidige Zenneduiker met deze van de ligging van de opwaartse en afwaartse variant van de loodrechte kruising van het kanaal Brussel-Charleroi.

Figuur 45 – Geometrie huidige duiker (groen); opwaartse variant loodrechte kruising (blauw) en afwaartse variant loodrechte kruising (rood)



Boven: bovenaanzicht: Onder: Perspectiefzicht vanuit afwaarts gedeelte van Kanaal Brussel-Charleroi

De opwaartse variant van de loodrechte kruising bestaat onder het kanaal uit vier kokers, dewelke op rechteroever overgaan naar twee kokers. Deze twee kokers sluiten aan op de twee kokers van de huidige duiker. Analoog als bij de afwaartse variant van de loodrechte kruising wordt het afwaarts gedeelte van de opwaartse duiker aangelegd in een landschapspark. Uit eenvoud is bij het ontwerp van de opwaartse variant het afwaarts gedeelte van de kokers van de huidige duiker behouden. In dit gedeelte doen zich in de kokers enkel wrijvingsverliezen voor, dewelke algemeen groter zijn dan de verliezen bij een stroming in een open bedding. Om die reden is het beschouwen van een koker onder druk aan het afwaartse uiteinde iets conservatiever dan het beschouwen van een open bedding. Daarnaast werd bij de rapportering opgemerkt dat bij het ontwerp van de opwaartse variant van de loodrechte kruising voor het bodempeil van de kokers

onder het kanaal foutief het bodempeil van de afwaartse variant werd overgenomen. Het bodempeil van de kokers onder het kanaal ligt hierdoor bij de opwaartse variant 2.2 m te laag. De afwaartse variant bestaat opwaarts op rechteroever en onder het kanaal uit vier kokers. Bij deze variant stroomt de Zenne opwaarts en afwaarts van de nieuwe duiker in een (nog te ontwerpen) landschapspark.

De stroming doorheen deze drie varianten werd gesimuleerd met behulp van 3D Computational Fluid Dynamics, door WL uitbesteed aan het studiebureau Actiflow B.V. Voor deze simulaties zijn de hydraulische randvoorwaarden bepaald met behulp van het 1D-numeriek model van WL. Hiervoor is een was beschouwd met terugkeerperiode 100 jaar, waarbij de stuw te Lembeek volledig geopend is, waarbij zich geen overstromingen voordoen ter plaatse van de overwelvingen van Brussel en waarbij afwaarts ter plaatse van de watervang van de Aa ook geen debiet afgevoerd wordt naar het kanaal Brussel-Charleroi. Het debiet gelijk aan $41.7 \text{ m}^3/\text{s}$ wordt opgelegd als opwaartse randvoorwaarde en de afwaartse waterstand gelijk aan +29.89 mTAW als afwaartse waterstand. De waterstand opwaarts van de duiker volgt dan uit de CFD-simulatie.

Op basis van de resultaten van een initiële simulatie met de opwaartse en de afwaartse variant van de loodrechte kruising werd vervolgens één optimalisatie uitgewerkt en gesimuleerd voor de opwaartse variant en twee optimalisaties voor de afwaartse variant. Bij de eerste optimalisatie van de opwaartse en de afwaartse variant werd ter plaatse van de opwaartse overgangsconstructie naar de kokers onder het kanaal een flauwere helling aangebracht en werd de hoek tussen de verticale toegangsschacht en het plafond van de kokers onder het kanaal afgerond. Bij de opwaartse variant werd aan rechteroever van de Zenne ter plaatse van de inlaat ook een kegelvormige afronding aangebracht. De tweede optimalisatie bij de afwaartse variant betrof, naar analogie met de opwaartse overgangsconstructie naar de kokers onder het kanaal, het aanbrengen van een flauwere helling en het afronden van de hoek tussen de toegangsschacht en het plafond van de kokers onder het kanaal ter plaatse van de overgangsconstructie tussen de kokers onder het kanaal en de Zenne afwaarts.

De verschillende varianten werden beoordeeld en vergeleken met betrekking tot het optredende stromingspatroon in de duiker, de debietverdeling over de kokers, de verliescoëfficiënten van de verschillende onderdelen van de duiker en de opstuwing ten gevolge van de duiker. Uit deze beoordeling volgt dat de huidige duiker een hydraulisch gunstige geometrie heeft. Er bevinden zich geen plotse overgangen in het bodempeil van de kokers en de bochten worden uitgevoerd met een hydraulisch ruime straal. Dit resulteert in een beperkt aantal zones met loslating. De geometrieën van de beide varianten van de loodrechte kruising zijn hydraulisch minder efficiënt. De verklaring hiervoor is de diepere ligging van de kokers onder het kanaal, de aanwezigheid van de overgangsconstructies naar de kokers onder het kanaal en de aanwezigheid van een aantal scherpere overgangen en kleinere bochtstralen in het ontwerp omwille van constructieve en planmatige redenen. Bij de opwaartse variant is ook de aansluiting met de Zenne opwaarts onder een rechte hoek niet optimaal. De voorgestelde optimalisaties aan de geometrie van deze beide varianten van de loodrechte kruising zorgen voor een merkelijke verbetering van het stromingspatroon in de duiker.

Met uitzondering van het initieel ontwerp voor de opwaartse variant bedraagt de verdeling van het debiet over de kokers onder het kanaal voor de verschillende varianten ontwerpen tussen 23 % en 27 % van het totaal debiet. Hieruit volgt dat het debiet goed verdeeld is over de 4 kokers. Enkel bij het initieel ontwerp voor de opwaartse variant bedraagt het debiet in de koker aan rechteroever 20 % en het debiet in de overige kokers 26 % à 27 %.

Tabel 17 geeft voor de huidige duiker, de opwaartse en afwaartse variant van loodrechte kruising en voor de optimalisaties aan deze varianten een overzicht van de berekende opstuwing over de duiker (ten opzichte van de toestand met de huidige duiker). Hiervoor is de totale waterpeilverhoging in de Zenne ten gevolge van de constructie bepaald tussen het opwaartse en het afwaartse uiteinde van de opwaartse. Deze totale waterpeilverhoging wordt berekend als de som van de waterpeilverhoging ten gevolge van de constructie uit de CFD-modellering vermeerderd met (indien van toepassing) het verhang in de Zenne opwaarts en afwaarts van de duiker. De opstuwing is dan berekend als het verschil tussen de totale waterpeilverhoging in de Zenne ten gevolge van de constructie en de totale waterpeilverhoging ten gevolge van de huidige duiker. Hierbij wordt opgemerkt dat ten gevolge van de hierboven vermelde 2.2 m te lage ligging van de kokers onder het

kanaal voor de opwaartse variant van de loodrechte kruising ingeschat wordt dat de voor deze variant berekend opstuwing tot ca. 0.05 m lager kan zijn. Daarnaast wordt ingeschat dat het vervangen van de beide kokers in het afwaartse gedeelte van de opwaartse variant van de loodrechte kruising door een open bedding aanleiding kan geven tot een afname van de berekende opstuwing met enkele centimeters. Rekening houdend met de onzekerheden op de bepaling van het verhang in de Zenne bij de bepaling van deze opstuwing, volgt uit deze tabel dat de opstuwing voor de opwaartse en de afwaartse variant van de loodrechte kruising gelijk zijn aan elkaar.

Tabel 17 – Overzicht opstuwing ten gevolge van nieuwe Zenneduiker

Geometrie		Debiet	Opstuwing
		m ³ /s	m
Opwaartse variant loodrechte kruising	Initieel ontwerp	41.67 m ³ /s	0.12 m*
	Optimalisatie 1	41.67 m ³ /s	0.07 m*
Afwaartse variant loodrechte kruising	Initieel ontwerp	41.67 m ³ /s	0.15 m
	Optimalisatie 1	41.67 m ³ /s	0.11 m
	Optimalisatie 2	41.67 m ³ /s	0.06 m
		70.00 m ³ /s	0.30 m
	Optimalisatie 2 (3 kokers afgesloten)	41.67 m ³ /s	2.34 m

(1) Ten gevolge van de 2.2 m te diepe ligging van de duiker in het ontwerp kan de opstuwing vermoedelijk nog ca. 0.05 m afnemen.

(2) Het vervangen van de beide kokers in het afwaartse gedeelte van de duiker door een open bedding kan vermoedelijk leiden tot een afname van de opstuwing met enkele centimeters.

Na uitvoering van de CFD-simulaties is het 1D numeriek model van de Zenne en het kanaal Brussel-Charleroi aangepast zodat de totale waterpeilverhoging ten gevolge van de constructie berekend met het 1D-model overeenkomt met deze berekend uit de CFD-simulaties. Met dit gewijzigde 1D-model is nagegaan of de berekende opstuwing toelaatbaar is. Hieruit volgt dat opwaarts van de Zenneduiker het verschil tussen het maximaal optredend waterpeil bij de was met terugkeerperiode 100 jaar en de laagste ligging van de oever nog circa 2.11 m bedraagt. Dit betreft een zeer ruime marge in vergelijking met de opstuwing van 0.12 m à 0.15 m ten gevolge van het realiseren van de opwaartse en de afwaartse variant van de loodrechte kruising. Deze beperkte opstuwing in vergelijking met de ligging van de oevers aan linkeroever laat besluiten dat niet alle vier de kokers nodig zijn voor het afvoeren van debieten tot 41.7 m³/s. Echter, bij het afvoeren van dit debiet door 1 koker wordt een extra opstuwing berekend van 2.34 m ten opzichte van de opstuwing berekend met de huidige duiker. Dit zou betekenen dat het waterpeil opwaarts van de Zenneduiker zal stijgen tot een peil juist hoger dan de oeverlijn aan linkeroever, wat niet toelaatbaar is. Deze toestand wordt echter als niet realistisch beschouwd.

Algemeen kan uit deze studie besloten worden dat, rekening houdend met de onzekerheid op de bepaling van het verhang in de Zenne en bijgevolg ook de opstuwing, de opstuwing ten gevolge van de opwaartse en de afwaartse variant van de loodrechte kruising van de nieuwe Zenneduiker aan elkaar gelijk zijn. Deze opstuwing is beperkt (maximaal 0.15 m bij een debiet door de duiker van 41.67 m³/s en 0.30 m bij een debiet van 70.0 m³/s door de duiker) en nog toelaatbaar.

Na uitwerken van het uiteindelijke ontwerp van de loodrechte kruising van de duiker en het uitwerken van het ontwerp voor het landschapspark is het aanbevolen om de opstuwing te bepalen van dit ontwerp rekening houdend met de effectieve loop van de Zenne in het landschapspark (op basis van numerieke modellering in plaats van de eerste inschatting in dit rapport). Uit deze studie volgt dat er bij afvoeren van 41.7 m³/s door de 4 kokers van de afwaartse variant zich geen overstromingen zullen voordoen. Het bepalen van het maximaal mogelijk debiet dat door 1 koker (of eventueel door 2 kokers) kan worden afgevoerd of een optimalisatie van het aantal kokers van de duiker is ook een aanbeveling voor verder onderzoek na uitwerking van het uiteindelijke ontwerp van de nieuwe Zenneduiker.

7 Referenties

Afdeling algemene Technische Ondersteuning. (2014). Opmeting kokers van de Zenne. Halle. dd. 17/06/2014

IMDC NV. (2016). Haalbaarheidsstudie Kanaal naar Charleroi. Ruimtelijk scenario 2. plan DR-11447-15.015-RAD-v1.0 dd. 19/02/2016

Omgeving. (2015). Nederhembrug - Park. Principesnedes.

Pereira, F. (2007). Opmaak van numerieke hydrologische en hydraulische modellen van het Kanaal naar Charleroi en Zeekanaal Brussel-Schelde: deelrapport 4: hydrodynamica, opzetten en kalibreren van het hydrodynamische model. Versie 2.0.

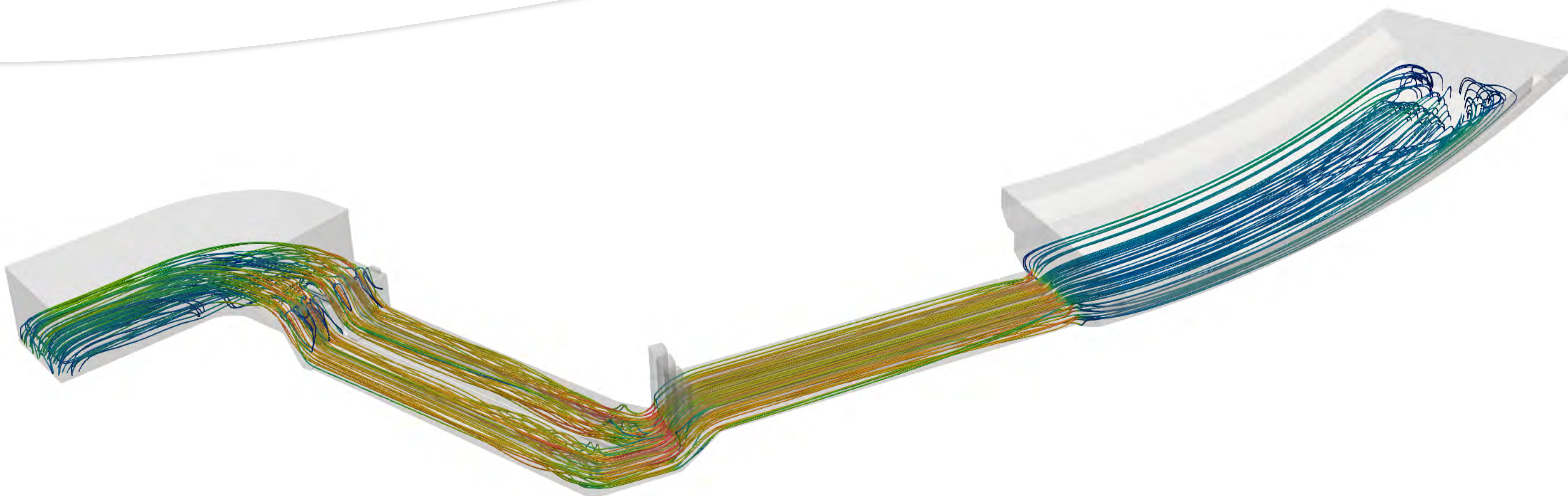
Pereira, F.; Franken, T.; Smets, S.; Vanderkimpen, P.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2015). Interregionale studie van de overstromingsproblematiek in het Zennebekken. *WL Rapporten*, 12_103. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

SBE. (2015). Zenneduiker te Halle. Hydraulisch voorontwerp. 10641-REK-G-002-0.

SBE nv. (2017a). Zenneduiker Halle. Zuid - Variant. Grondplan. Bestaande toestand. Plan. 12581-TEK-G-001-A. dd. 17/05/2017

SBE nv. (2017b). Zenneduiker Halle. Zuid - Variant. Sneden. Bestaande toestand. Plan 12581-TEK-G-002-A dd. 17/05/2017

Bijlage A: rapport CFD-modellering Zenneduiker



Zenne duiker

Resultaten geometrie varianten

Auteur(s): Tom Fahner, Werner Jousma, Roland Broers
Controleur(s): Eric Terry
25 november 2019

AFR-4830-varianten
Versie 1.1
2019 © Actiflow bv

Inhoudsopgave

1	Introductie	1
2	CFD Model	2
2.1	Geometrieën en situatieschets	2
2.1.1	Geometrie 2 v2 en geometrie 3 v2	6
2.1.2	Geometrie 3 v3 en geometrie 3 v3 met drie afgesloten kokers	7
2.2	Numerieke opzet	7
2.2.1	Solver	7
2.2.2	Randvoorwaarden	9
2.2.3	Numerieke schema's en solvers	9
2.3	Rekenroosters	11
2.4	Convergentie	13
3	Resultaten	14
3.1	Opwaartse waterhoogte	14
3.2	Verliescoëfficiënten	19

3.3	Stromingsverschijnselen	23
3.3.1	Huidige duiker	23
3.3.2	Geometrie 2	27
3.3.3	Geometrie 2 v2	31
3.3.4	Geometrie 3	35
3.3.5	Geometrie 3 v2	40
3.3.6	Geometrie 3 v3	45
3.3.7	Geometrie 3 v3 - 1 koker	50
4	Conclusies en aanbevelingen	55
4.1	Conclusies	55
4.2	Aanbevelingen	56
A	Convergentie	57
B	Debiet per koker	59
C	Snelheid op meet locaties	61
C.1	Huidige duiker	61
C.2	Geometrie2	63
C.3	Geometrie2 v2	66

C.4	Geometrie3	68
C.5	Geometrie3 v2	71
C.6	Geometrie3 v3	74
C.7	Geometrie3 v3 - 1 koker	78
D	Stroming in verlaagde deel duiker	80
D.1	Geometrie 2	80
D.2	Geometrie 2 v2	82
D.3	Geometrie 3	84
D.4	Geometrie 3 v2	86
D.5	Geometrie 3 v3	88
D.6	Geometrie 3 v3 - 1 koker	90
E	Druk visualisatie	92
E.1	Geometrie 2 v2	93
E.2	Geometrie 3 v2	98
E.3	Geometrie 3 v3	101
E.4	Geometrie 3 v3 - 1 koker	104

1 Introductie

Dit rapport beschrijft een CFD-studie uitgevoerd door Actiflow B.V. op aanvraag van het Waterbouwkundig Laboratorium. Het betreft een studie voor een te vervangen rivierduiker in de Zenne in Halle.

Het doel van de CFD-studie is het bepalen van de invloed van aanpassingen van de rivierduiker. Deze rivierduiker kruist het kanaal naar Charleroi, welke verdiept zal worden. De huidige duiker kruist het kanaal opwaarts van de sluis in Halle. Voor deze studie zijn 3 verschillende geometrieën in beschouwing genomen: de huidige duiker, een nieuwe duiker die het kanaal opwaarts van de sluis kruist (geometrie 2) en een nieuwe duiker die het kanaal afwaarts van de sluis kruist (geometrie 3).

Dit rapport begint na deze introductie met een beschrijving van het toegepaste model in hoofdstuk 2. Vervolgens worden in hoofdstuk 3 de resultaten besproken. In hoofdstuk 4 worden vervolgens conclusies getrokken aangaande de resultaten en aanbevelingen gedaan.

Update 29-3-2019: extra resultaten toegevoegd in de appendix en kleine aanpassing meetlocaties geometrie 2.

Update 29-5-2019: naar aanleiding van de resultaten van geometrie 2 en geometrie 3 zijn er verbeteringen aangebracht (geometrie 2 v2 en geometrie 3 v2). De resultaten van deze simulaties zijn toegevoegd aan dit rapport.

Update 31-10-2019: naar aanleiding van de resultaten geometrie 3 v2 zijn er verbeteringen aangebracht (geometrie 3 v3). De resultaten van deze simulatie zijn toegevoegd aan dit rapport.

Update 08-11-2019: er is een simulatie uitgevoerd van geometrie 3 v3 waarbij drie van de vier kokers zijn afgesloten en het volledige debiet van 41,674 m³/s door één koker gaat. De resultaten van deze simulatie zijn toegevoegd aan dit rapport.

2 CFD Model

In dit hoofdstuk zal het CFD model worden besproken. In paragraaf 2.1 worden de geometrieën besproken. In paragraaf 2.2 wordt het numerieke rekenmodel gedefinieerd. Vervolgens bespreekt paragraaf 2.3 de opbouw van het rekenrooster. Het hoofdstuk eindigt met een beschrijving van de convergentie van de simulaties in paragraaf 2.4.

2.1 Geometrieën en situatieschets

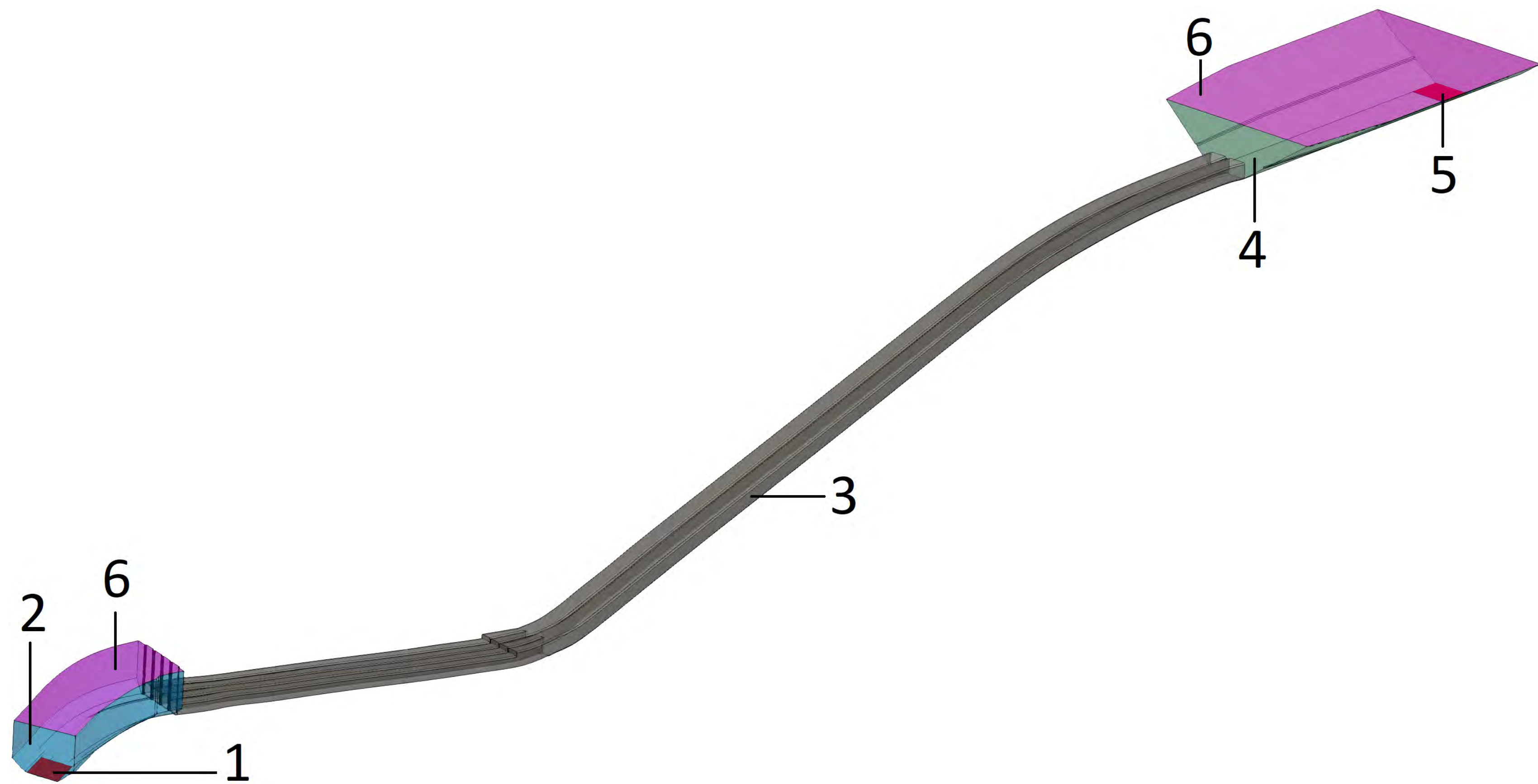
Voor deze studie zijn 3 verschillende geometrieën gebruikt zoals weergegeven in figuren 2.1 t/m 2.3. De randen van de geometrie bestaan uit de volgende 6 verschillende onderdelen (met nummer aangeduid in figuren 2.1 t/m 2.3). Voor geometrie 2 v2 en geometrie 3 v2 geldt dezelfde aanduiding als bij geometrie 2 en geometrie 3.

1. Inlaat
2. Opwaartse bedding
3. Duiker
4. Afwaartse bedding
5. Uitlaat
6. Atmosfeer

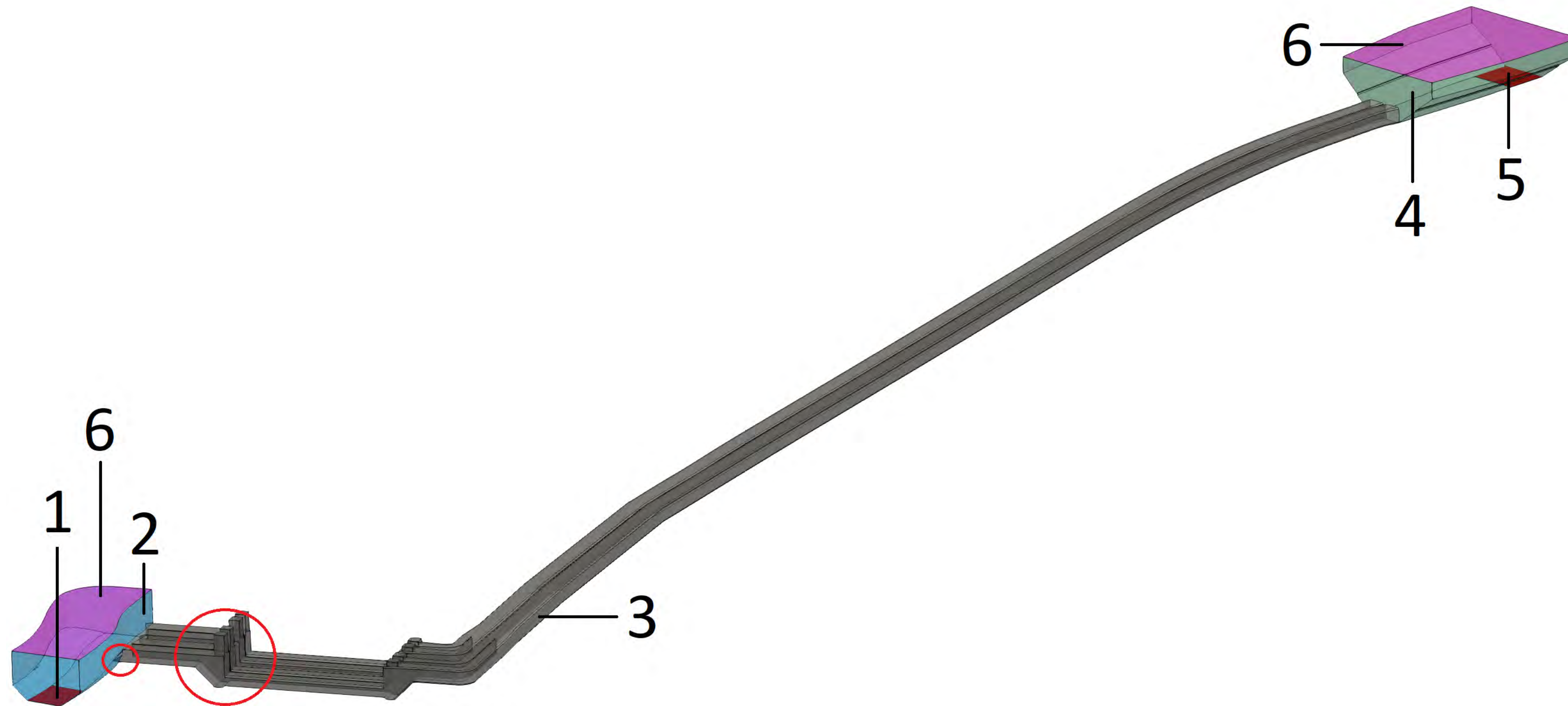
Zoals zichtbaar is in de figuren, zijn zowel de inlaat als de uitlaat op de bodem geplaatst. Dit is noodzakelijk om correct werkende randvoorwaarden toe te kunnen passen in OpenFOAM.

De situatie die gesimuleerd wordt is voor alle geometrieën gelijk. Een constant inlaat debiet van $41,674 \text{ m}^3/\text{s}$ is opgegeven. Het waterpeil afwaarts van de duiker wordt constant gehouden op +29,885 mTAW zoals aangeleverd door het Waterbouwkundig Laboratorium¹.

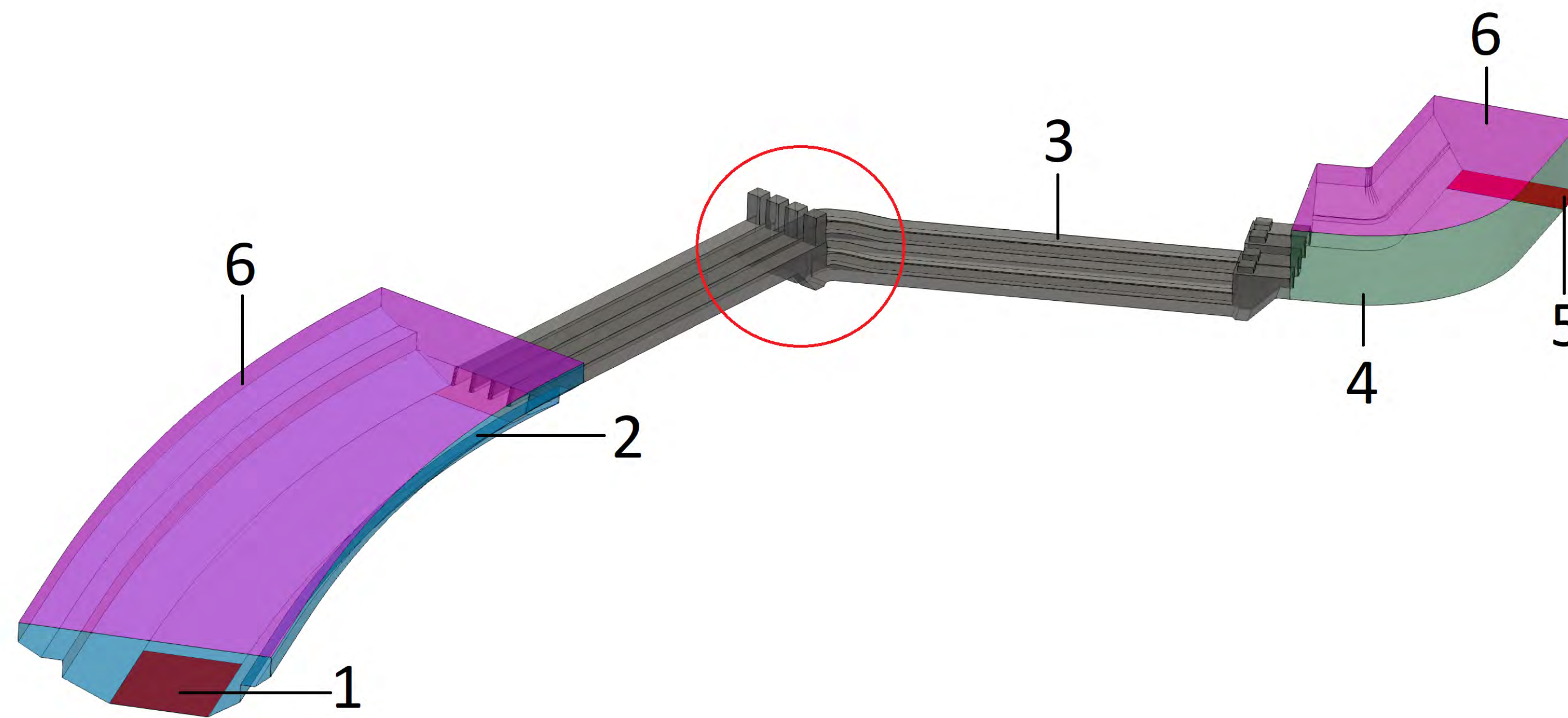
¹Email communicatie woensdag 19 december 2018 15:55



— **Figuur 2.1:** Huidige duiker



— Figuur 2.2: Geometrie 2

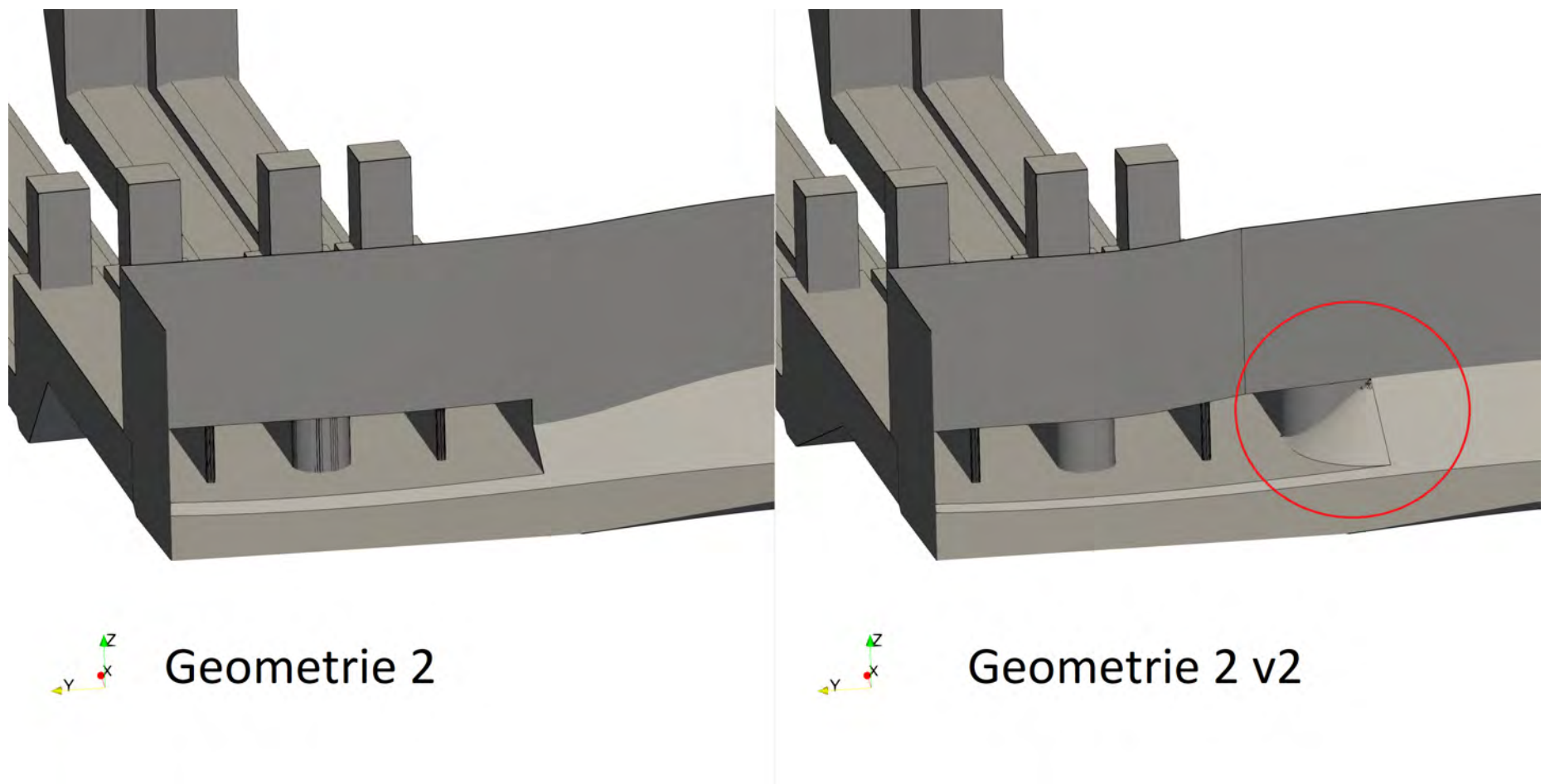


— Figuur 2.3: Geometrie 3

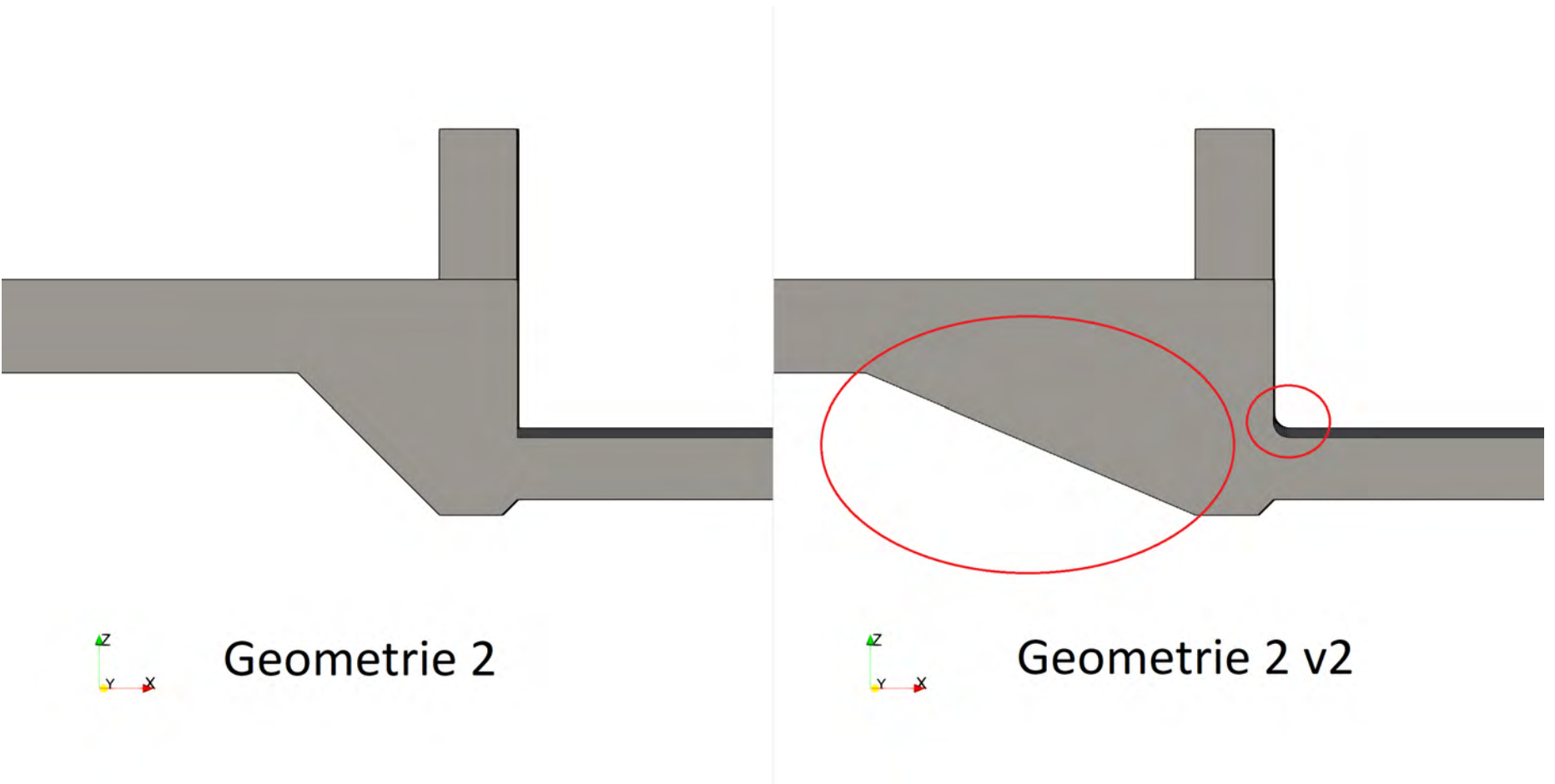
2.1.1 Geometrie 2 v2 en geometrie 3 v2

Als beoogde optimalisatie van geometrie 2 en geometrie 3 zijn aanpassingen ten behoeve van de stroming toegepast in geometrie 2 v2 en geometrie 3 v2. De globale locaties van deze aanpassingen zijn met rode cirkels aangegeven in figuren 2.2 en 2.3.

De eerste aanpassing aan geometrie 2 is gelegen aan het begin van de duiker waar een afronding is toegepast. De tweede aanpassing bevindt zich bij de verlaging welke minder steil is gemaakt en waarbij een afronding is geplaatst aan de bovenkant van de verlaagde koker. De aanpassingen zijn gevisualiseerd in figuren 2.4 en 2.5.

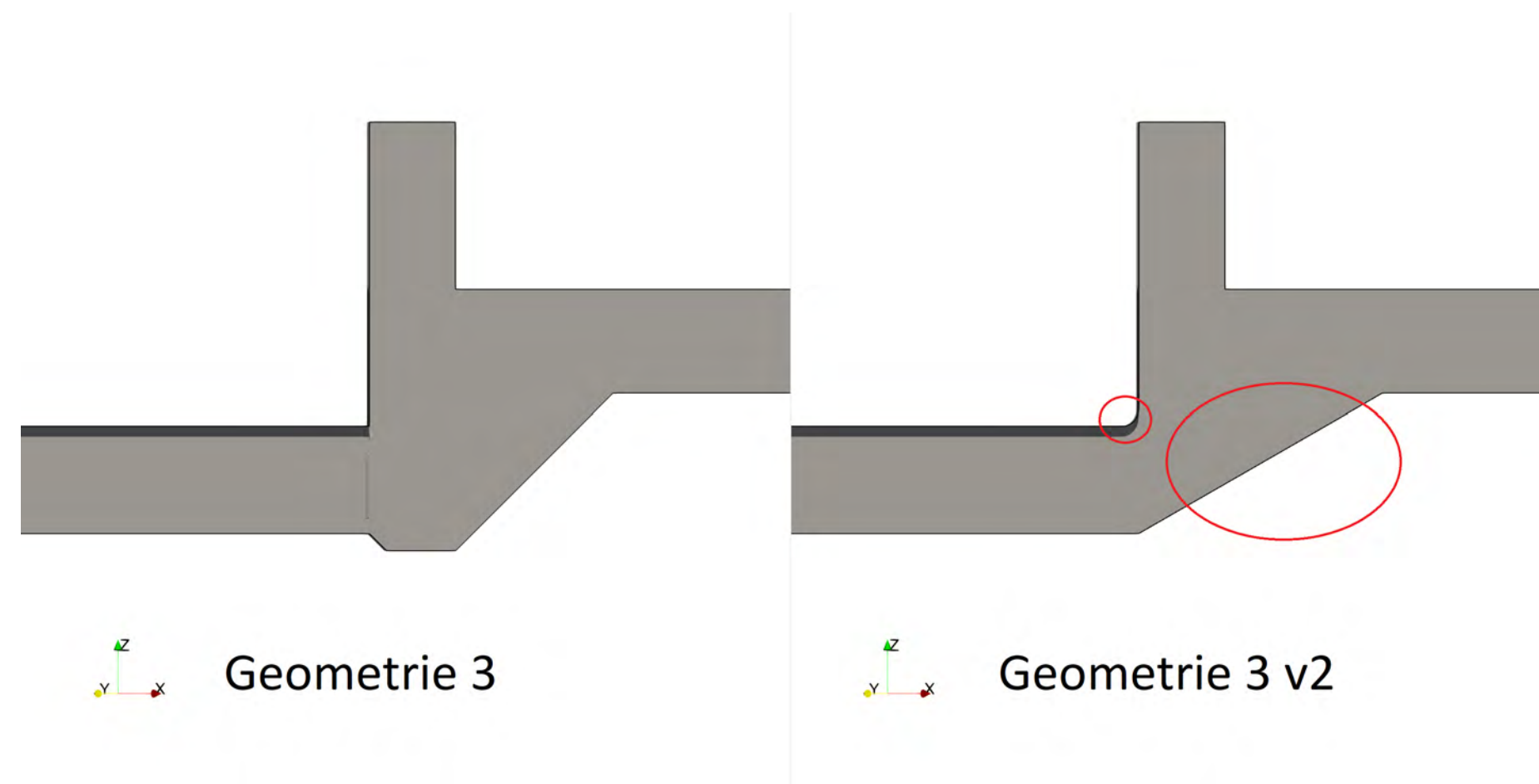


— Figuur 2.4: Geometrie 2 en geometrie 2 v2, aanpassing 1



— Figuur 2.5: Geometrie 2 en geometrie 2 v2, aanpassing 2

De aanpassingen aan geometrie 3 zijn gelegen bij het begin van de verlaging. De verlaging is minder steil gemaakt en er is een afronding aangebracht aan de bovenkant van de verlaging.

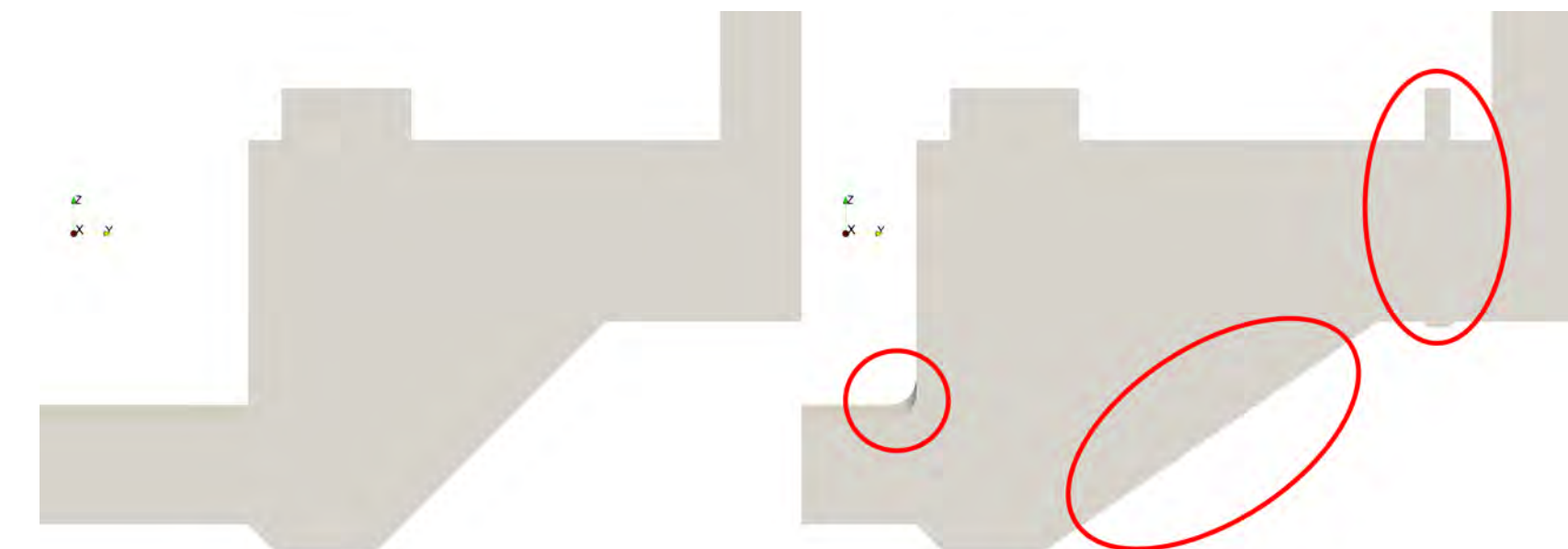


— Figuur 2.6: Geometrie 3 en geometrie 3 v2, aanpassingen

2.1.2 Geometrie 3 v3 en geometrie 3 v3 met drie afgesloten kokers

Er is een aanvullende optimalisatie uitgevoerd van geometrie 3 v3, waarbij de verhoging minder steil is gemaakt en er een afronding aangebracht is aan de bovenkant van de verlaging. Ook zijn de sponning zichtbaar in figuur 2.7 behouden, welke in voorgaande simulaties, tijdens de vereenvoudiging van het model, verwijderd zijn.

Verder is er een simulatie uitgevoerd waarbij drie van de vier kokers zijn afgesloten, zodat het volledige debiet van $41,674 \text{ m}^3/\text{s}$ door één koker gaat,



— Figuur 2.7: Geometrie 3 v2 en geometrie 3 v3, aanpassingen

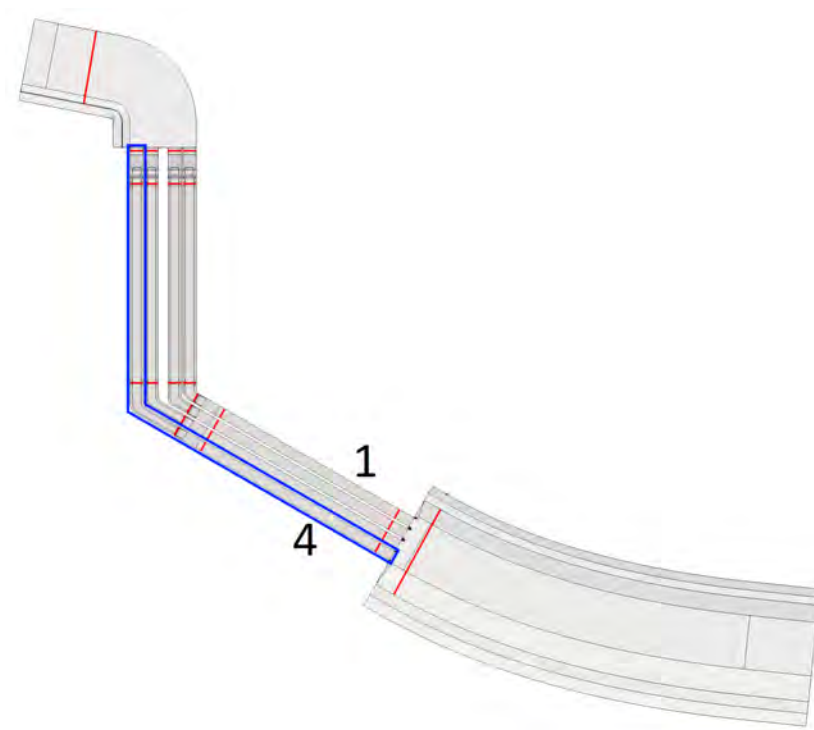
zie figuur 2.8. Hierbij blijft de afwaartse waterstand van $+29,885 \text{ mTAW}$ hetzelfde. De kokers zijn afgesloten ter plaatse van de sponningen voor schotbalken, zie figuur 2.9.

2.2 Numerieke opzet

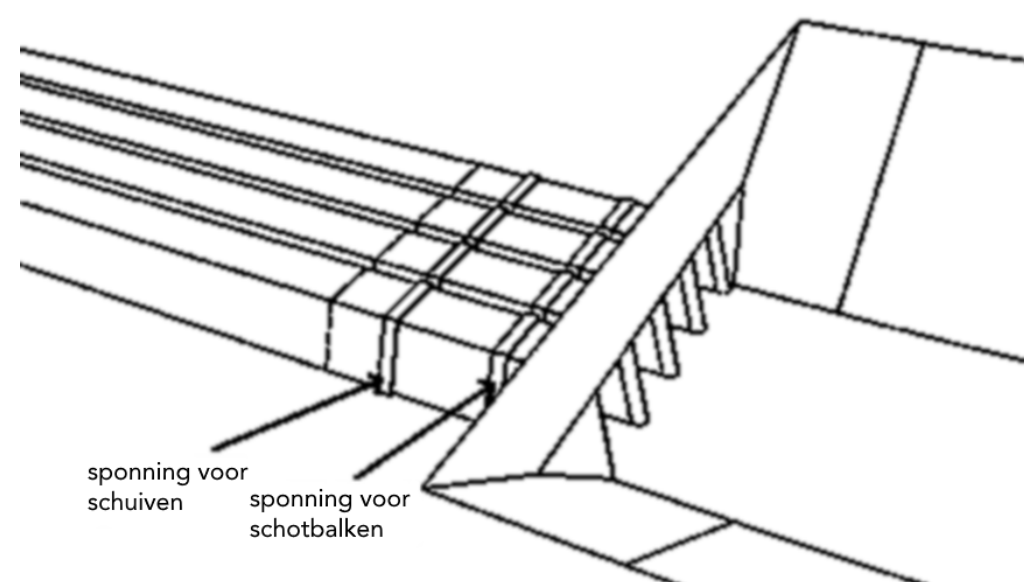
2.2.1 Solver

De simulaties zijn uitgevoerd met de `interFoam` solver van OpenFOAM versie 6². Hierbij is gebruik gemaakt van een LTS (Local Time Stepping) tijdsdiscretisatie. `interFoam` is een tijdsafhankelijke twee-fase VOF (Volume of Fluid) solver voor twee strict gescheiden incompressibele

²Meer precies: commit 9f9576a0e767f35e66cbbfb7a7ed2ef7821c4de9 d.d. 13-12-2018 (<https://github.com/OpenFOAM/OpenFOAM-6/commit/9f9576a0e767f35e66cbbfb7a7ed2ef7821c4de9>)



— **Figuur 2.8:** Koker 4 wordt niet afgesloten



— **Figuur 2.9:** Koker 4 wordt niet afgesloten

stromende media. Turbulentie kan worden gemodelleerd middels RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) of LES (Large Eddy Simulation) turbulentiemodellen. Het gekozen LTS schema dient om zo snel mogelijk naar een steady-state situatie te convergeren. Daarbij hoort ook een RANS turbulentiemodel. In dit geval is gekozen voor het $k-\omega$ -SST model. Dit model is een betrouwbaar model voor stromingen met een variërende drukgradiënt, welke met name rond de duiker te verwachten zijn.

Voor het volgen van de interface (de waterspiegel) tussen de twee verschillende fasen wordt een indicator α gebruikt, welke aangeeft welke fractie van het volume van de cel door welke fase wordt ingenomen. Voor slechts één van de twee fasen wordt een transportvergelijking voor de indicator opgelost. De volumefractie van de andere volgt uit de vergelijking³:

$$\alpha_2 = 1 - \alpha_1 \quad (2.1)$$

Om deze interface scherp te houden wordt gebruik gemaakt van MULES (Multidimensional Universal Limiter with Explicit Solution), een methode ontwikkeld voor OpenFOAM. Deze methode zorgt tegelijkertijd voor een scherpe interface en een stabiel convergentieproces.

Daarnaast wordt de invloed van de zwaartekracht meegenomen in de drukvergelijking. Voor het oplossen van de vergelijkingen wordt gebruikt gemaakt van de statische druk minus de hydrostatische druk:

$$p_rgh = p - \rho \bar{g} \cdot \bar{h} \quad (2.2)$$

³<https://github.com/OpenFOAM/OpenFOAM-6/blob/e05f780ebc875b6fbddff3168e983eb91491828b/applications/solvers/multiphase/VoF/alphaEqn.H>

2.2.2 Randvoorwaarden

Alle cases hebben dezelfde randvoorwaarden. Een vast debiet van $41,674 \text{ m}^3/\text{s}$ is opgegeven op de inlaat. Op de inlaat kan alleen water naar binnen stromen. Op de uitlaat worden de snelheid en fase het domein uit geëxtrapoleerd.

De bovenkant van het domein functioneert als atmosfeer. Bij uitstroom werkt de atmosfeer als een vlak wat de waarde van de fase uit het domein extrapoleert. Bij instroom kan hier enkel lucht het domein in stromen.

De wanden zijn gemodelleerd als no-slip wanden. Op alle wanden worden wandfuncties toegepast voor turbulentie gerelateerde variabelen. Op de wanden van de duiker zelf is een ruwheid van $1,5 \text{ mm}$ toegepast door middel van het gebruik van een wandfunctie. Op de wanden is de waarde van de fase indicator geëxtrapoleerd vanuit het domein.

De druk op de inlaat en wanden wordt berekend aan de hand van de opgegeven flux. Op de uitlaat wordt een totale druk opgegeven om het waterpeil afwaarts van de duiker constant te houden.

De wiskundige beschrijving van alle randvoorwaarden is weergegeven in tabel 2.1.

2.2.3 Numerieke schema's en solvers

De verschillende vergelijkingen moeten worden gediscrètiseerd en vervolgens worden opgelost. OpenFOAM is een eindige volume code voor ongestructureerde grids. Deze methode is in OpenFOAM maximaal tweede orde nauwkeurig in ruimte en tijd.

Het tijdsschema is een eerste orde nauwkeurig voorwaarts Euler schema, met lokale tijdstappen. Dit is een methode om snel naar een steady-state oplossing te komen wanneer deze bestaat. Voor de discretisatie van de convectie van de snelheid wordt het linearUpwind schema gebruikt. Voor de convectie van de indicatorfunctie α het vanLeer schema, met limieten van $0 \leq \alpha \leq 1$. Voor de turbulente grootheden wordt een upwindschema gebruikt. Laplacianen worden gediscrètiseerd met een tweede orde lineair schema met gelimiteerde correctie voor niet-orthogonaliteit. Dit zorgt voor een stabiele en nauwkeurige discretisatiemethode.

Er worden matrix-vector vergelijkingen opgelost voor de indicator α , de gemodificeerde druk p_rgh en de turbulente grootheden. De impulsvergelijkingen worden opgesteld in een predictor stap voor de drukvergelijking, maar niet opgelost. Dit geeft een kleine tijdswinst per iteratie en geeft vaak een betere stabiliteit voor het oplossen van het gekoppelde systeem tussen druk, snelheid en indicatorfunctie. Slechts bij simulaties met een sterk tijdsafhankelijk beeld wordt aangeraden de impulsvergelijkingen ook op te lossen. Voor de indicatorfunctie wordt MULES gebruikt, voor de druk een geometrisch geagglomereerde multi-grid solver en voor de turbulente grootheden wordt een Gauss-Seidel eliminatiesolver gebruikt. De genormaliseerde residuen voor de druk moeten per tijdstap kleiner worden dan $1e-9$, voor de indicatorfunctie kleiner dan $1e-8$ en voor de turbulente grootheden kleiner dan $1e-7$. De maximale tijdstap in een cel is 2 seconden.

Tabel 2.1: Wiskundige beschrijving randvoorwaarden

rand/variabele	inlaat	uitlaat	atmosfeer	wanden
Druk p_{rgh} (Pa)	$p_{rgh} = f(\bar{\mathbf{U}})$	$p_{rgh} = p_0$ als $\phi > 0$ $p_{rgh} = p_0 - 0.5\rho \bar{\mathbf{U}} ^2$ als $\phi \leq 0$	$p_{rgh} = p_0$ als $\phi > 0$ $p_{rgh} = p_0 - 0.5\rho \bar{\mathbf{U}} ^2$ als $\phi \leq 0$	$p_{rgh} = f(\bar{\mathbf{U}})$
Snelheid $\bar{\mathbf{U}}$ (m/s)	$\bar{\mathbf{U}} = -\frac{Q}{A} \cdot \bar{\mathbf{n}}$	$\bar{\mathbf{U}} = f(p_{rgh})$ als $\phi \leq 0$ $\partial\bar{\mathbf{U}}/\partial\bar{\mathbf{n}} = 0,$ als $\phi > 0$	$\bar{\mathbf{U}} = f(p_{rgh})$ als $\phi \leq 0$ $\partial\bar{\mathbf{U}}/\partial\bar{\mathbf{n}} = 0,$ als $\phi > 0$	$\bar{\mathbf{U}} = (0 \ 0 \ 0)$
Volumefractie water α .water (-)	$\alpha = 1$	$\alpha = 1$ als $\phi \leq 0$ $\partial\alpha/\partial\bar{\mathbf{n}} = 0$ als $\phi > 0$	$\alpha = 0$ als $\phi \leq 0$	$\partial\alpha/\partial\bar{\mathbf{n}} = 0$
Turbulente kinetische energie k (m ² /s ²)	$k = 3/2(I \bar{\mathbf{U}})^2$ $I = 0,05$	$k = 6.8 \times 10^{-3}$ als $\phi \leq 0$ $\partial k/\partial\bar{\mathbf{n}} = 0,$ als $\phi > 0$	$k = 6.8 \times 10^{-3}$ als $\phi \leq 0$ $\partial k/\partial\bar{\mathbf{n}} = 0,$ als $\phi > 0$	$k = f(\bar{\mathbf{U}}, y^+)$
Specifieke dissipatie van k ω (1/s)	$\omega = \frac{\sqrt{k}}{C_\mu^{0.25} 0.07 D_h}$	$\omega = 0.86$ als $\phi \leq 0$ $\partial\omega/\partial\bar{\mathbf{n}} = 0,$ als $\phi > 0$	$\omega = 0.86$ als $\phi \leq 0$ $\partial\omega/\partial\bar{\mathbf{n}} = 0,$ als $\phi > 0$	$\omega = f(\bar{\mathbf{U}}, k, y^+) = 0$
Turbulente viscositeit ν_t (m ² /s)	$\nu_t = f(k, \omega)$	$\nu_t = f(k, \omega)$	$\nu_t = f(k, \omega)$	$\nu_t = f(\bar{\mathbf{U}}, k, \omega, k_s, y^+)$

2.3 Rekenroosters

Voor deze studie zijn rekenroosters gebruikt met vergelijkbare verfijning, zoals bepaald is in de grid sensitiviteit studie⁴. Voor alle rekenroosters is ANSA van Beta CAE systems gebruikt. Het oppervlakte mesh van het domein bestaat voornamelijk uit vierhoeken. Dit is echter niet overal mogelijk (met name nabij de randen en in gebieden waar de cellen groeien) waardoor er ook driehoeken aanwezig zijn in het oppervlakte mesh.

Rond de verwachte hoogte van het wateroppervlakte (zowel opwaarts als afwaarts), is een (verticaal) gestructureerd deel in het rekenrooster opgebouwd waardoor het wateroppervlakte goed kan worden gevangen. Vervolgens worden op de wanden van het domein (opwaartse bedding, afwaartse bedding en duiker) 5 prisma lagen aangebracht om de grenslaag te verfijnen. Het domein wordt verder opgevuld met hexahedrons. Tussen de prisma lagen en hexahedrons gebruikt ANSA pyramides en tetraëders om een transitie te creëren.

Voor de 3 geometrieën zijn de limiterende cel lengtes weergegeven in tabel 2.2. De minimale cel lengte is gebruikt om de kwaliteit van het mesh in de nabijheid van kleine randen te garanderen. De verticale resolutie nabij het verwachte wateroppervlak is opwaarts 60 mm en 20 mm afwaarts.

De methode voor het opbouwen van de rekenroosters creëert verschillende soorten cellen. De samenstelling van de rekenroosters is weergegeven in tabel 2.3.

De kwaliteit van de cellen is gecorrigeerd naar beter dan 3.0 voor skewness en beter dan 60° voor niet-orthogonale cel faces.

⁴Memo grid sensitiviteit AFR-4829, 21 februari 2019

Tabel 2.2: Minimale en maximale gridlengtes voor de cellen

Grid/onderdeel	Cel lengtes (mm)	
	Min	Max
Bedding (onderwater)	50	150
Duiker	50	150
Water opp	50	150
Bedding (bovenwater)/atmosfeer	50	500

— Tabel 2.3: Samenstelling rekenroosters

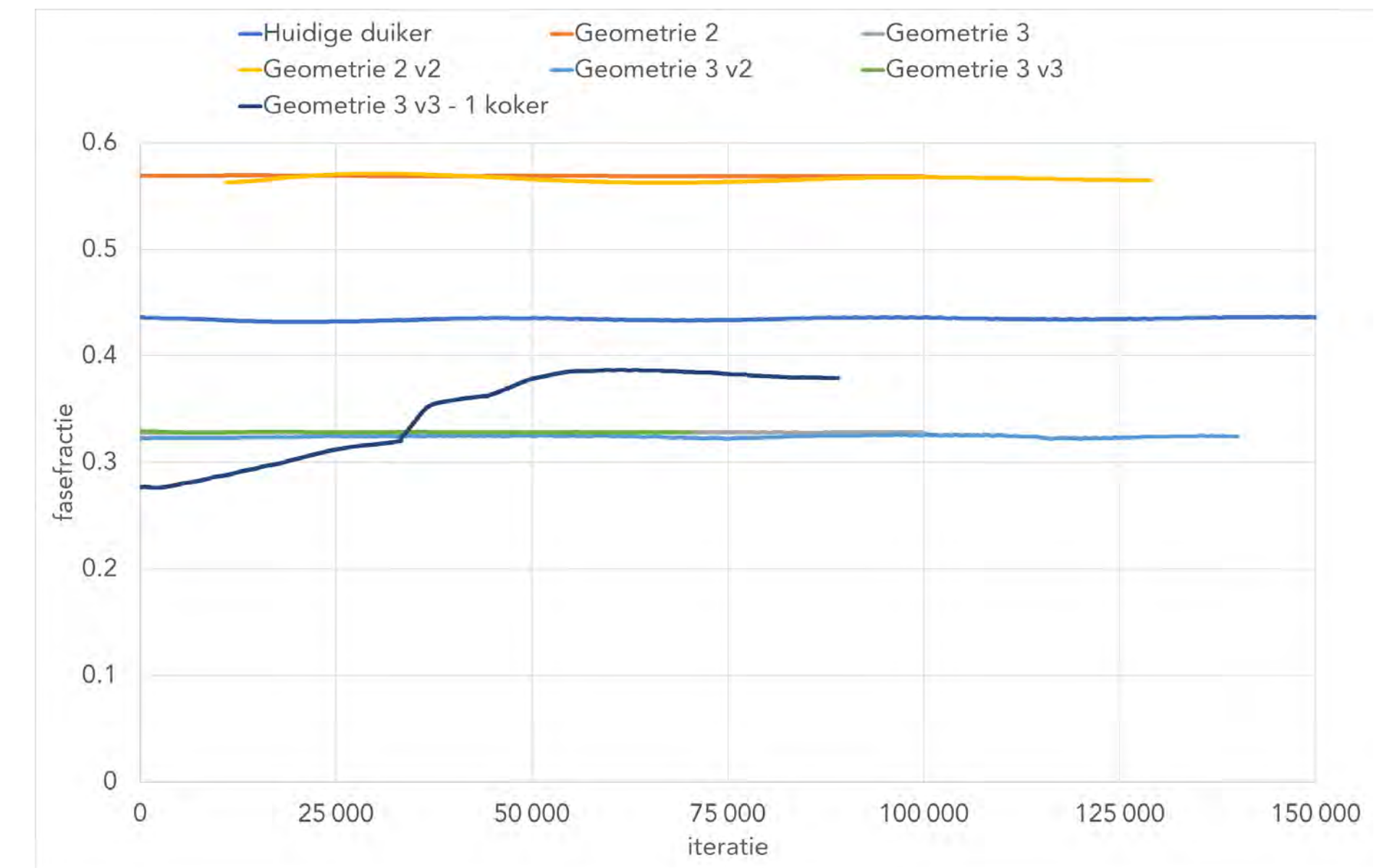
	Huidige duiker	Geometrie 2	Geometrie 2 v2	Geometrie 3	Geometrie 3 v2	Geometrie 3 v3	Geometrie 3 v3 - 1 koker
Hexahedrons	9 505 978	7 637 697	11 092 843	10 697 940	11 202 762	14 707 648	12 212 014
Prisma's	402 310	460 641	671 441	419 734	521 534	272 347	246 996
Pyramides	2 060 959	1 948 286	2 836 802	2 136 247	2 353 820	2 554 279	1 982 367
Tetraëders	12 425 878	11 789 284	17 352 708	13 255 073	14 778 932	15 921 936	12 284 746
Total	24 395 125	21 835 908	31 953 794	26 508 994	28 857 048	33 456 210	26 726 123

2.4 Convergentie

De convergentie van de simulaties is beoordeeld op basis van de fase fractie indicator α van het hele domein. De waarden van deze fase fracties zijn gevisualiseerd in figuur 2.10. In appendix A worden de fase fracties van de afzonderlijke geometrieën weergegeven om periodieke fluctuaties inzichtelijk te maken.

Alle geometrieën zijn geïnitieerd met waarden vanaf een grover grid. In de grid sensitiviteit studie bleek dit een efficiëntere methode om tot convergentie te komen door de nauwkeurigere initialisatie van de water hoogte.

Door de lage kinematische viscositeit van water, dempen golven traag of zelfs helemaal niet uit. Om een gemiddelde te vinden in de golf bewegingen en om overblijvende transiënte effecten uit te middelen wordt het gemiddelde van de laatste 10 000 iteraties gebruikt voor geometrie 2 en geometrie 3. Voor de huidige duiker, geometrie 2 v2 en geometrie 3 v2 is een gemiddelde van de laatste 20 000 iteraties gebruikt om het licht periodieke gedrag (zie appendix A) uit te middelen. Ook de simulaties geometrie 3 v3 en geometrie 3 v3 - 1 koker gebruiken een middeling van 20 000 iteraties.



— Figuur 2.10: Fase indicator als functie van iteratie

3 Resultaten

In dit hoofdstuk zullen de resultaten van de simulaties worden besproken. Eerst zal de invloed van de duiker geometrie op het opstuwen van het opwaartse waterpeil worden besproken in paragraaf 3.1. In paragraaf 3.2 zal inzichtelijk worden gemaakt welke delen van de geometrie bijdragen aan het drukverlies en de opstuwing van het opwaartse waterpeil. In paragraaf 3.3 zal het stromingsbeeld in de delen met veel drukverlies inzichtelijk worden gemaakt.

3.1 Opwaartse waterhoogte

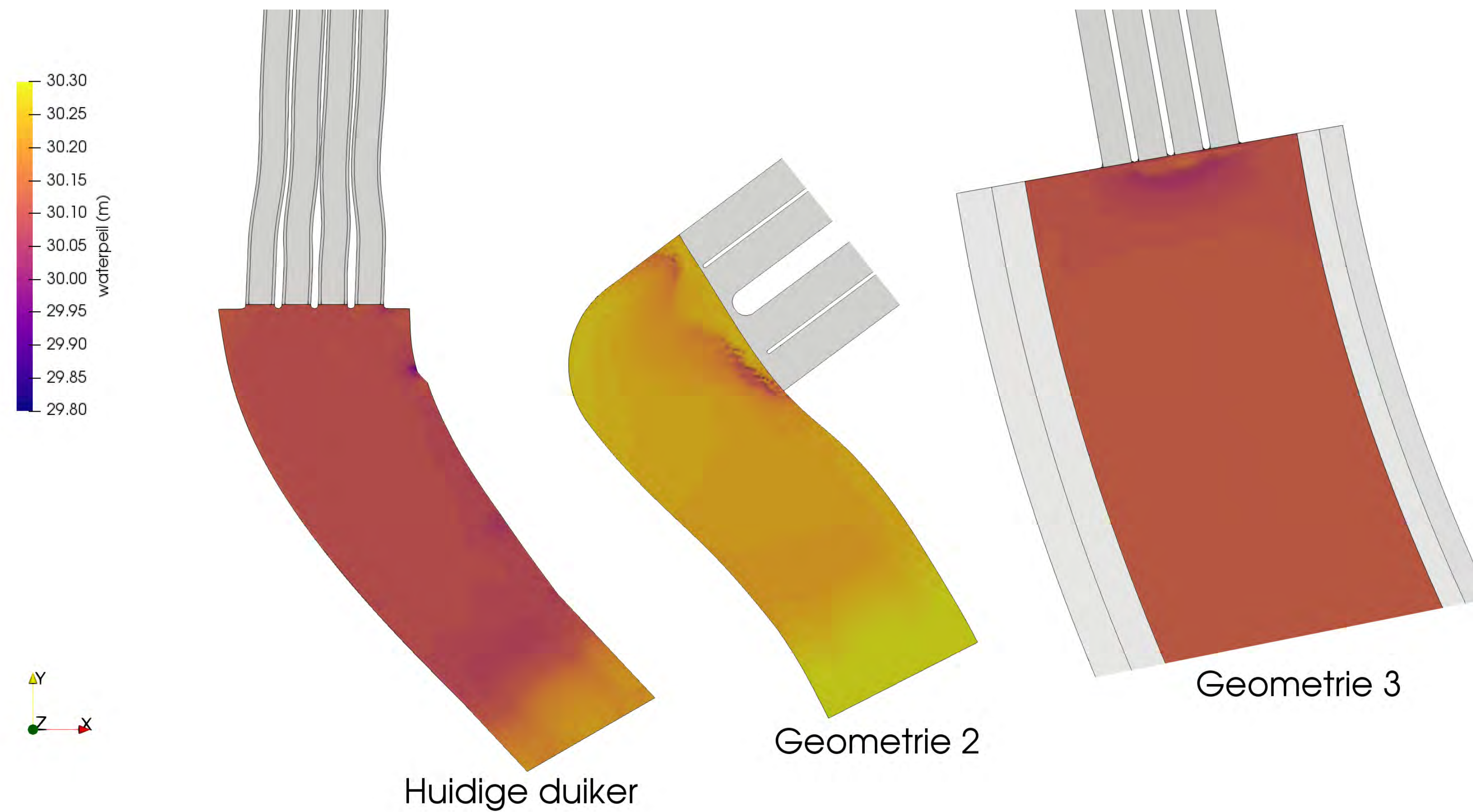
De invloed van de duiker op het opstuwen van het water in de opwaartse bedding is van belang in deze studie. Figuur 3.1 toont de verdeling van het waterpeil in de opwaartse beddingen voor de 3 geometrieën.

Gemiddeld is het waterpeil in de opwaartse bedding respectievelijk +30,10 mTAW, +30,24 mTAW en +30,12 mTAW voor de huidige duiker, geometrie 2 en geometrie 3. Met name geometrie 2 laat een aanzienlijke toename in waterhoogte zien.

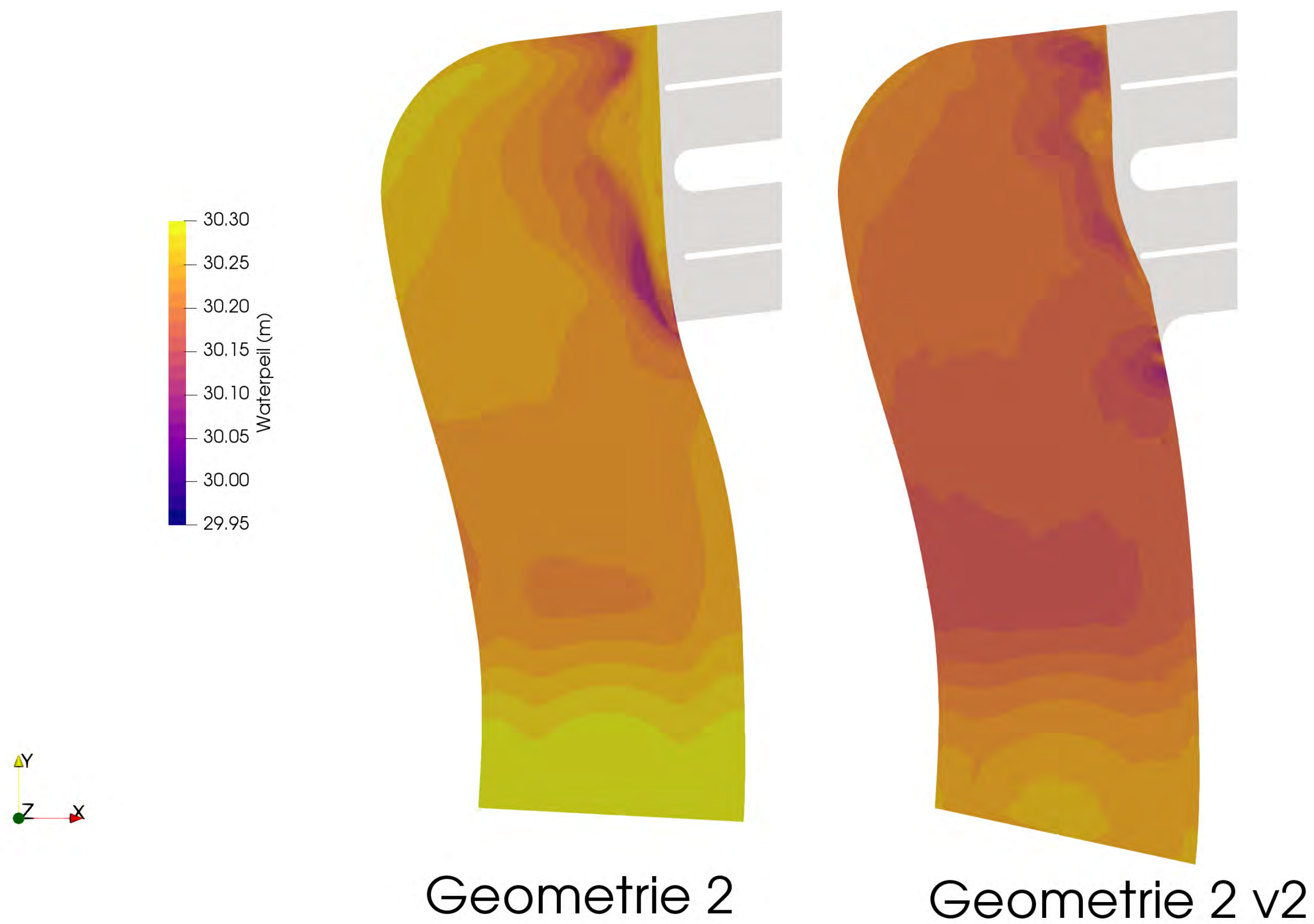
Update 29-5-2019: Het gemiddelde waterpeil in de opwaartse bedding van de geoptimaliseerde versies (geometrie 2 v2 en geometrie 3 v2) is respectievelijk +30,19 mTAW en +30,08 mTAW. Ten opzichte van de originele varianten staat dit gelijk aan een afname van 0,05 m en 0,04 m. De wateroppervlakten met daarop de hoogte zijn gevisualiseerd in figuren 3.2 en 3.3.

Update 31-10-2019: Het gemiddelde waterpeil in de opwaartse bedding van de versie 3 van geometrie 3 is +30,03 mTAW. Ten opzichte van de originele variant van de geometrie staat dit gelijk aan een afname van 0,09 m. In vergelijking met v2 is dit een afname van 0,05 m. De wateroppervlakte met daarop de hoogte is gevisualiseerd in figuur 3.4.

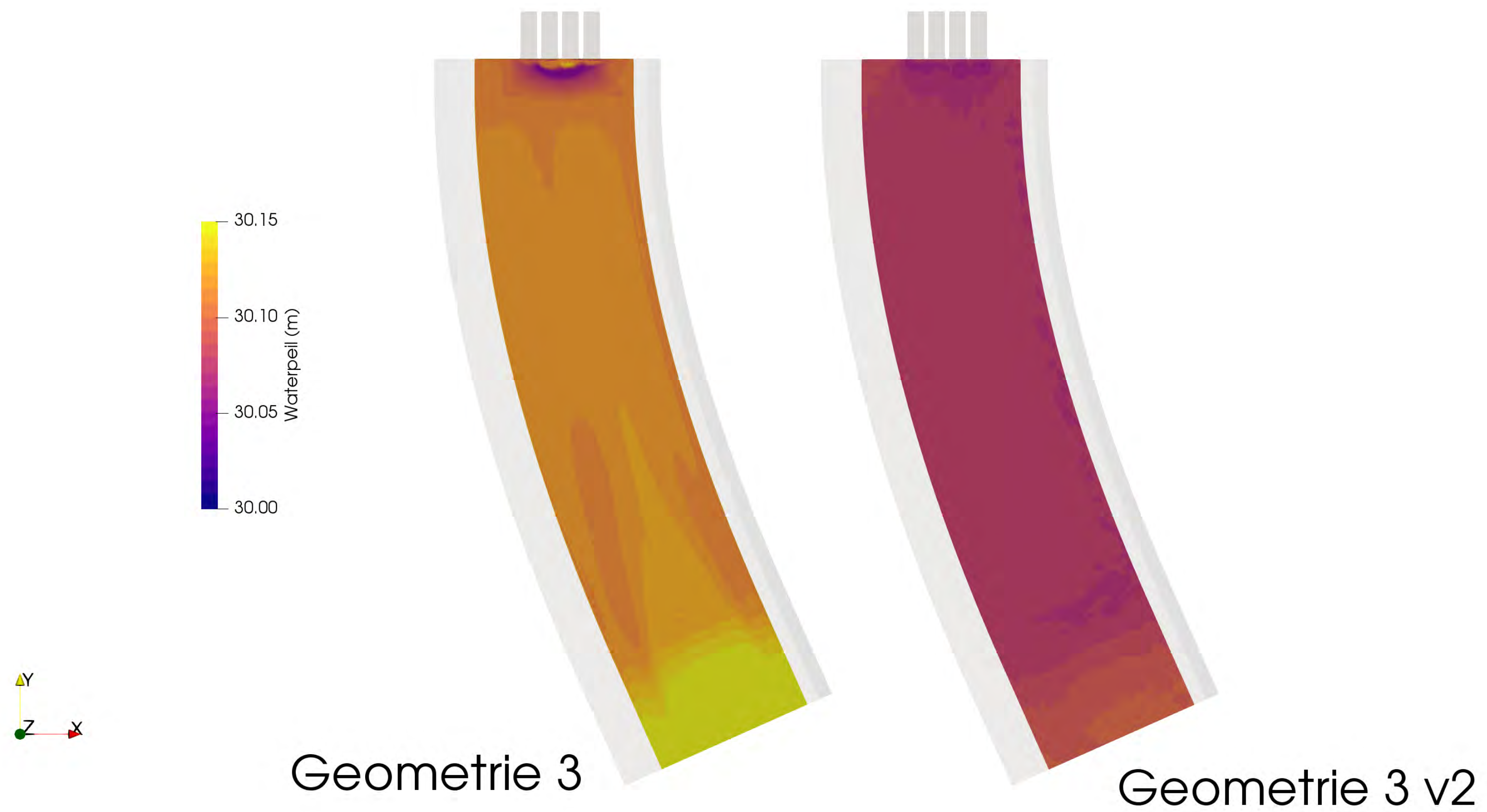
Update 08-11-2019: Het gemiddelde waterpeil in de opwaartse bedding van de versie 3 van geometrie 3 met slechts één koker beschikbaar is +32,31 mTAW. Dit is een stijging van 2,28 m ten opzichte van de situatie met alle kokers in gebruik. De wateroppervlakte met daarop de hoogte is gevisualiseerd in figuur 3.4.



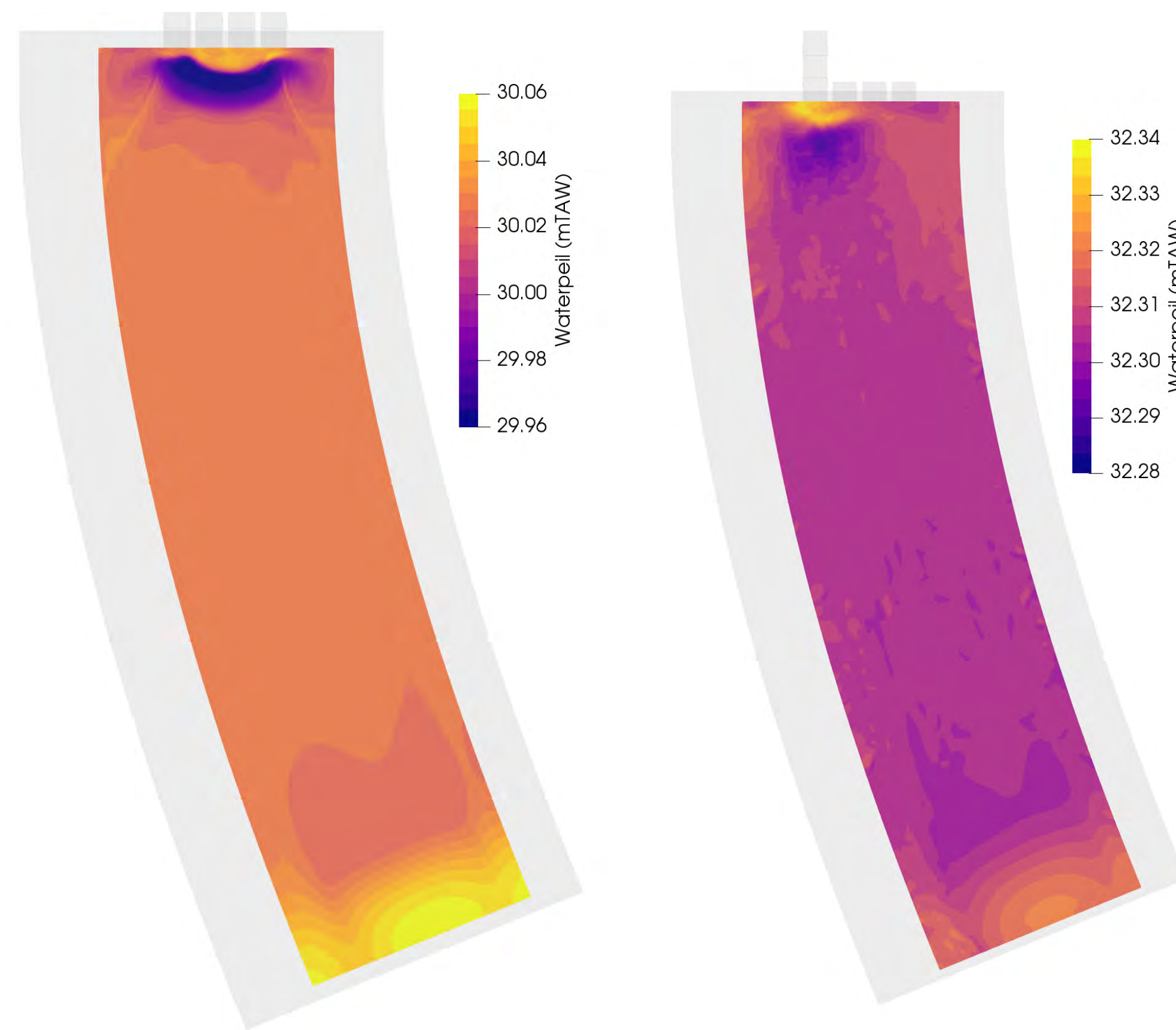
— **Figuur 3.1:** Tijdsgemiddelde (laatste 10 000 of 20 000 iteraties) waterpeil



— **Figuur 3.2:** Tijdsgemiddelde (laatste 10 000 of 20 000 iteraties) waterpeil geometrie 2 en geometrie 2 v2



— **Figuur 3.3:** Tijdsgemiddelde (laatste 10 000 of 20 000 iteraties) waterpeil geometrie 3 en geometrie 3 v2



— **Figuur 3.4:** Tijdsgemiddelde (laatste 20 000 iteraties) waterpeil geometrie 3 v3 (links) en geometrie 3 v3 - 1 koker (rechts)

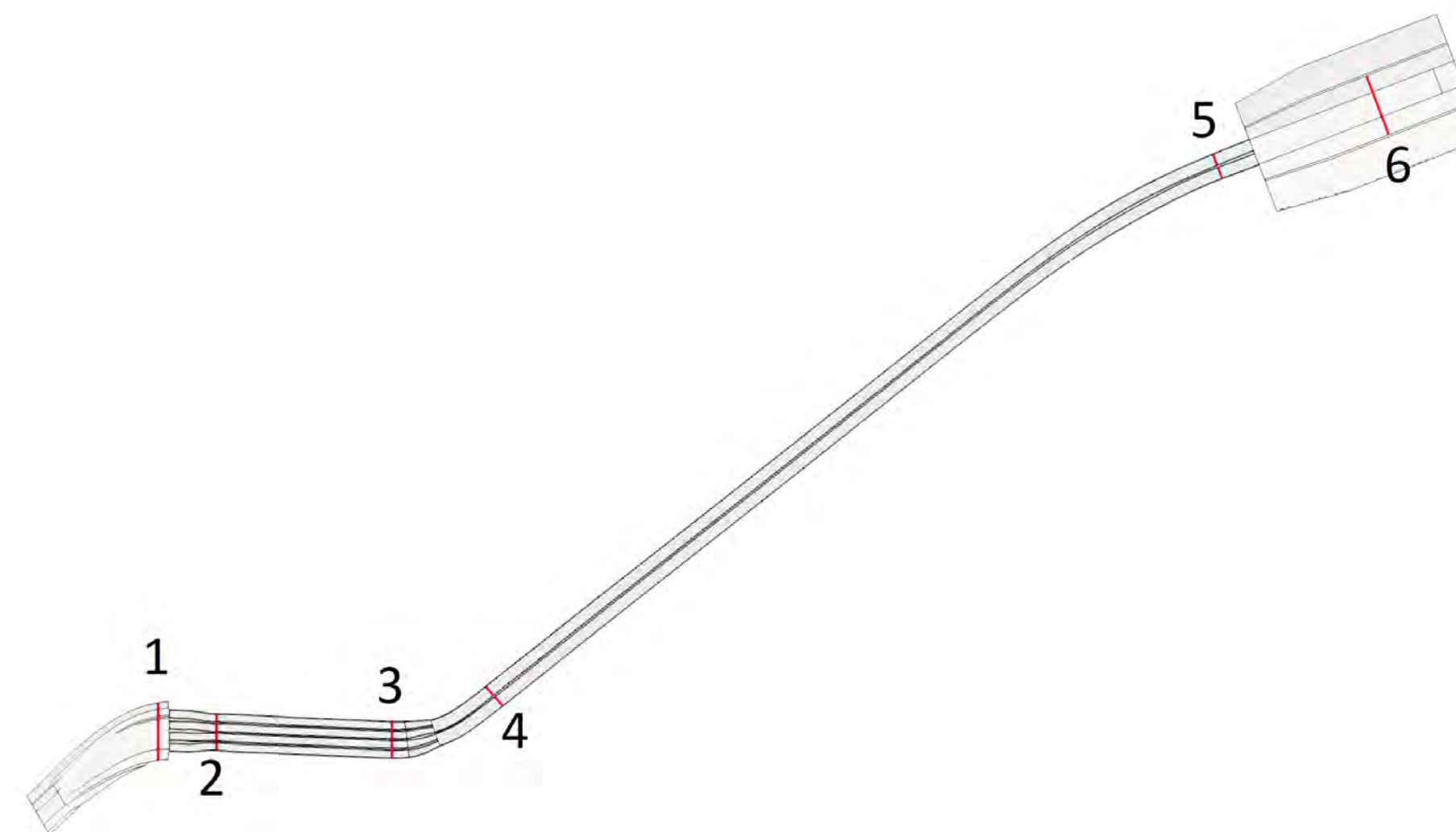
3.2 Verliescoëfficiënten

De verliescoëfficiënten tussen verschillende locaties zijn bepaald aan de hand van het verlies in totale druk. De meetlocaties van deze totale druk zijn weergegeven in figuren 3.5 t/m 3.7. De meetlocaties zijn genummerd van opwaarts naar afwaarts.

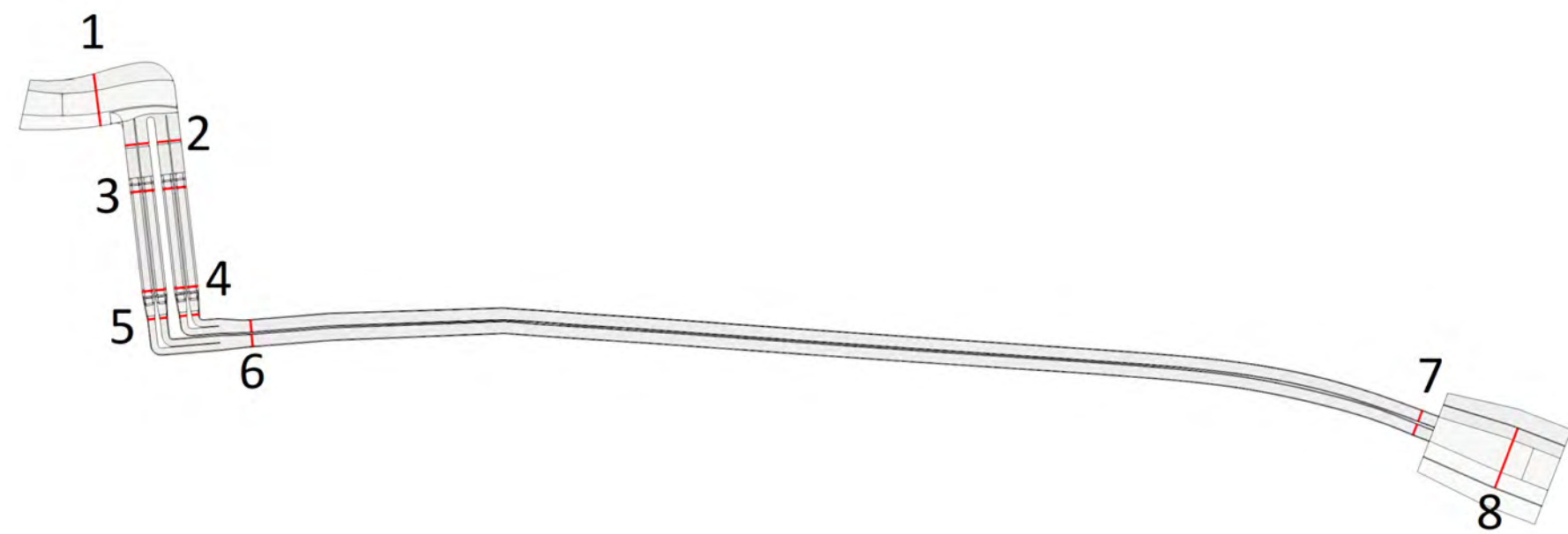
Voor de doorsneden op de meetlocaties wordt de gemiddelde totale druk berekend, waarna de verliescoëfficiënt wordt berekend met vergelijking 3.1.

$$\zeta = \frac{2\Delta p_{tot} A^2}{\rho Q^2} \quad (3.1)$$

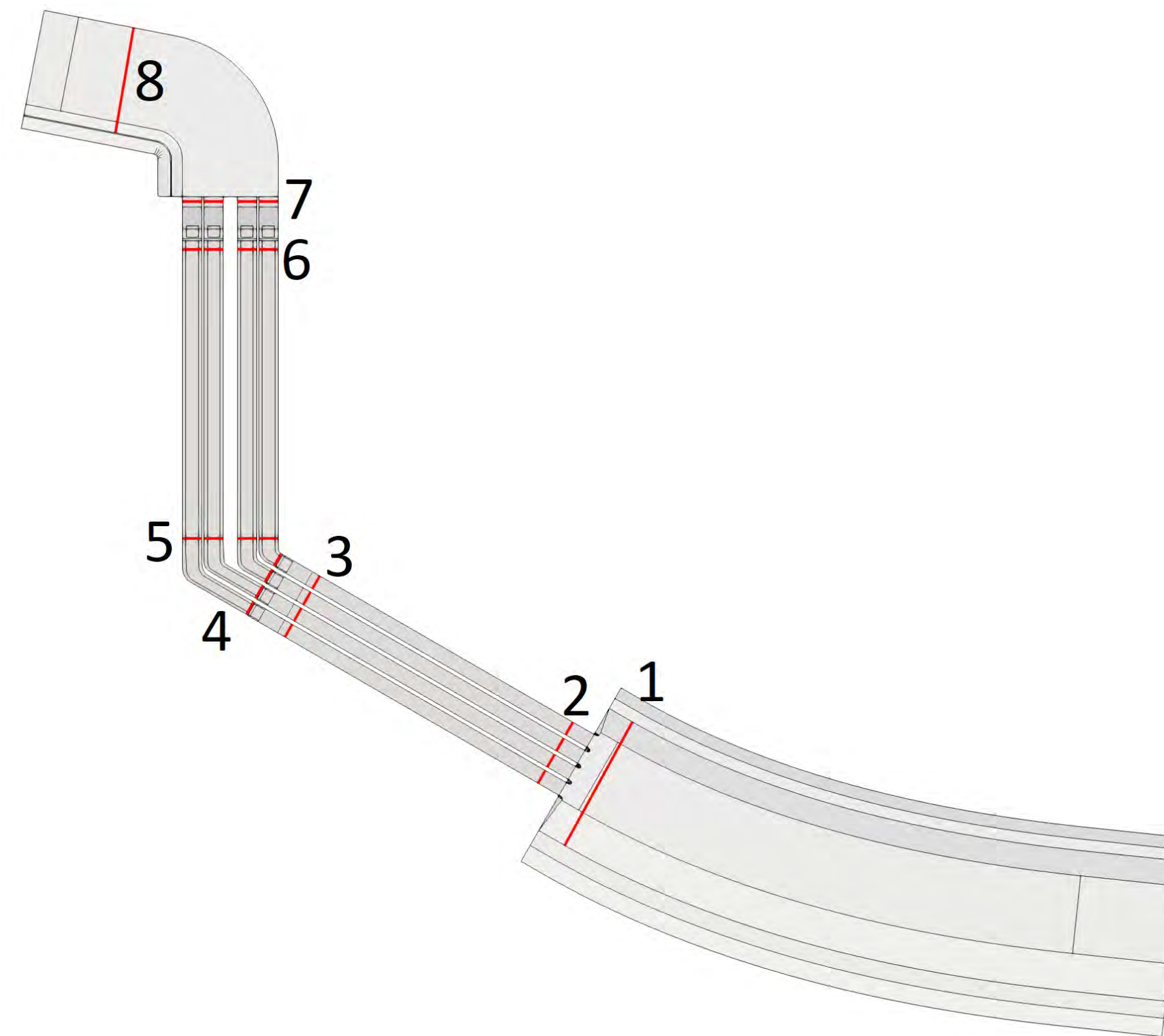
De verliescoëfficiënten voor de verschillende delen zijn weergegeven in tabel 3.1. Hierbij is rekening gehouden met een referentie oppervlakte A van 32 m^2 (oppervlakte van de doorsnede van de kokers van de duiker aan de opwaartse zijde van de huidige duiker). Verder zijn de verliescoëfficiënten gecorrigeerd met het gemiddelde debiet (Q) aanwezig op de uitlaat. Dit is voor de 3 rekenroosters niet exact gelijk door het licht fluctuerende gedrag van de solver. De gemiddelde uitlaatdebieten bij de 3 geometrieën zijn respectievelijk $41,610 \text{ m}^3/\text{s}$, $41,656 \text{ m}^3/\text{s}$ en $41,676 \text{ m}^3/\text{s}$ voor de huidige duiker, geometrie 2 en geometrie 3. De gemiddelde uitlaatdebieten voor geometrie 2 v2 en geometrie 3 v2 zijn respectievelijk $41,901 \text{ m}^3/\text{s}$ en $42,375 \text{ m}^3/\text{s}$. Voor geometrie 3 v3 en geometrie 3 v3 - 1 koker gaat het om $41,708 \text{ m}^3/\text{s}$ en $42,212 \text{ m}^3/\text{s}$, respectievelijk.



— Figuur 3.5: Indicatie van meetlocaties, huidige duiker



— **Figuur 3.6:** Indicatie van meetlocaties, geometrie 2



— **Figuur 3.7:** Indicatie van meetlocaties, geometrie 3

De huidige duiker toont voornamelijk verliezen in de lange kokers, afwaarts van de kruising met het kanaal (deel 4-5).

Geometrie 2 en 3 vertonen beide relatief veel verlies in het deel waar de duiker het uitgediepte kanaal kruist. De transities naar het dieper gelegen deel (deel 2-3 voor geometrie 2 en deel 3-4 voor geometrie 3) en weer terug omhoog (deel 4-5 voor geometrie 2 en deel 6-7 voor geometrie 3) voegen erg veel druk verlies toe.

Bij geometrie 2 is een relatief grote toename in drukverlies bij de ingang van de duiker waar te nemen.

Bij geometrie 3 wordt het toegenomen drukverlies gedeeltelijk gecompenseerd door het ontbreken van een lange koker. Bij geometrie 2 is deze lange koker wel aanwezig en is een grote toename in het totale verlies waar te nemen.

Update 29-5-2019: Geometrie 2 v2 toont een lagere totale verliescoëfficiënt ten opzichte van geometrie 2. Met name deel 1-2 en 2-3 waar de aanpassingen zijn aangebracht (afrondingen en een minder steile verlaging) laten een lagere verliescoëfficiënt zien.

Geometrie 3 v2 toont een lagere totale verliescoëfficiënt ten opzichte van geometrie 3. Het grootste verschil zit in deel 3-4. Hier zijn de minder steile verlaging en afronding op de bovenkant van de kokers toegepast.

Update 31-10-2019: Geometrie 3 v3 toont een lagere totale verliescoëfficiënt ten opzichte van de vorige versie. Ruim de helft van de afname bevindt zich in deel 6-7 (waar de geometrie-aanpassingen zijn doorgevoerd), een derde in deel 4-5 en een kwart in deel 7-8. Daarentegen ziet deel 5-6 een toename die overeenkomt met een kwart van de totale afname.

Update 08-11-2019: Voor het bepalen van verliescoëfficiënt van Geometrie 3 v3 - 1 koker is het referentieoppervlak met een factor 4 verlaagd tot 8 m². We zien dat het gebruik van een enkele koker het totale verliescoëfficiënt doet toenemen met 19%.

De grootste toename van het verlies vindt plaats in segment 6-7; hier stijgt de verliescoëfficiënt van 0,410 naar 0,658, oftewel een toename van 0,248. Aangezien de totale verliescoëfficiënt stijgt met 0,261, van 1,411 naar 1,672, komt dit overeen met 95% van het totaal. De op een na grootste stijging vindt plaats in segment 1-2, met een toename met 53% ten opzichte van de totale stijging.

De grootste afname van het verlies vindt plaats in segment 4-5; hier daalt de verliescoëfficiënt van 0,149 naar 0,078, oftewel een afname met 0,071. Ten opzichte van de totale toename van 0,261 komt dit overeen met een afname met 27%. Segmenten 2-3 en 7-8 ondervinden een afname met respectievelijk 22% en 14% van de totale toename.

— Tabel 3.1: Verliescoëfficiënten

Deel	Huidige duiker	Geometrie 2	Geometrie 2 v2	Geometrie 3	Geometrie 3 v2	Geometrie 3 v3	Geometrie 3 v3 - 1 koker ¹
1-2	0,244	0,408	0,152	0,136	0,188	0,127	0,265
2-3	0,248	0,784	0,219	0,179	0,173	0,201	0,142
3-4	0,213	0,441	0,148	0,960	0,325	0,300	0,311
4-5	0,796	0,625	0,653	0,436	0,329	0,149	0,078
5-6	0,461	0,171	0,172	0,129	0,013	0,147	0,177
6-7	-	1,025	1,022	0,685	0,716	0,410	0,658
7-8	-	0,531	0,701	0,160	0,215	0,077	0,041
Totaal	1,962	3,588	3,067	2,685	1,959	1,411	1,672

¹referentie oppervlak A = 8 m²

3.3 Stromingsverschijnselen

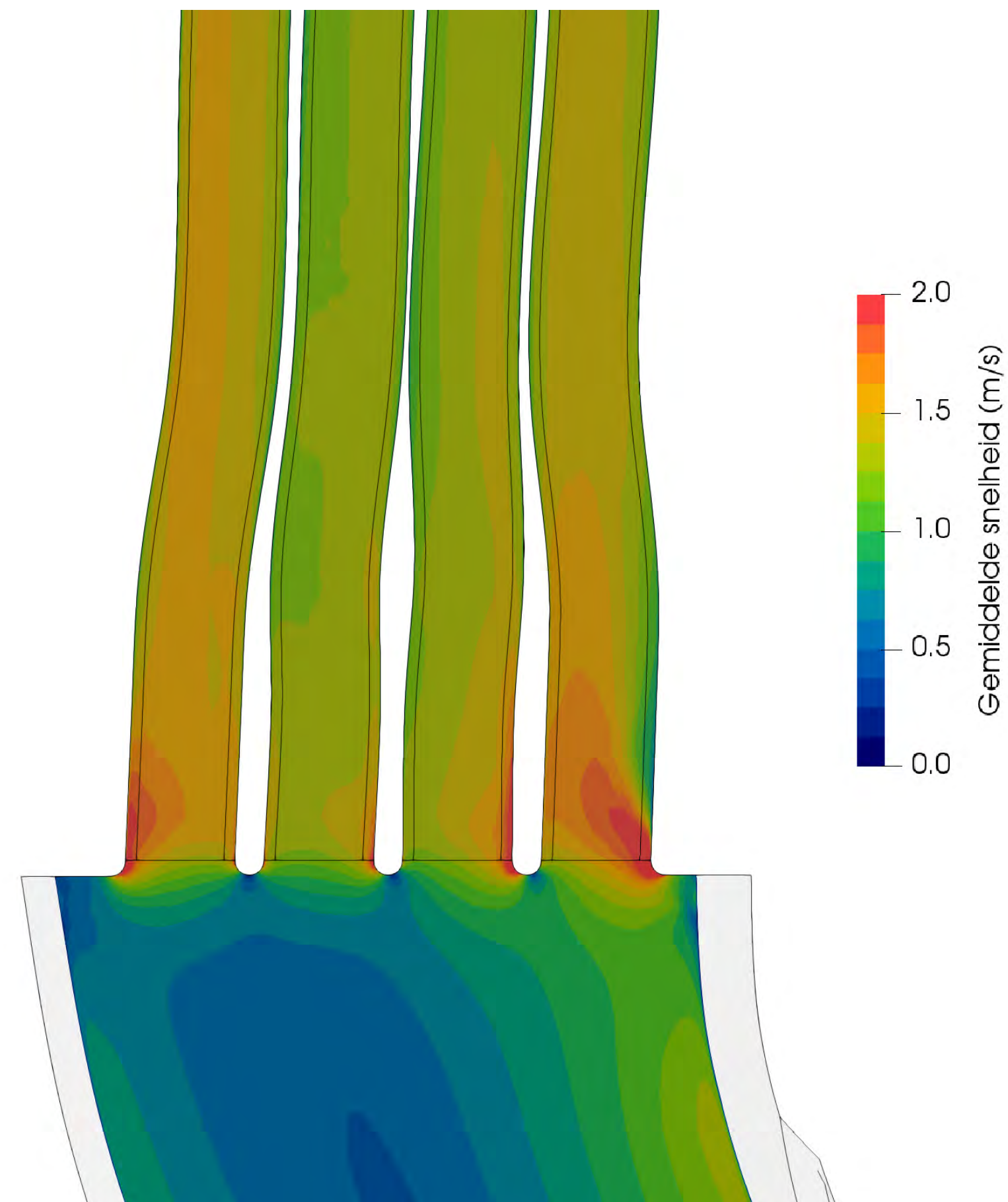
In deze paragraaf zal de stroming in verschillende delen van de duiker inzichtelijk gemaakt worden voor de 3 varianten. Hierin zal een verklaring worden gezocht voor toenames in de drukverliezen zoals gevonden in paragraaf 3.2.

3.3.1 Huidige duiker

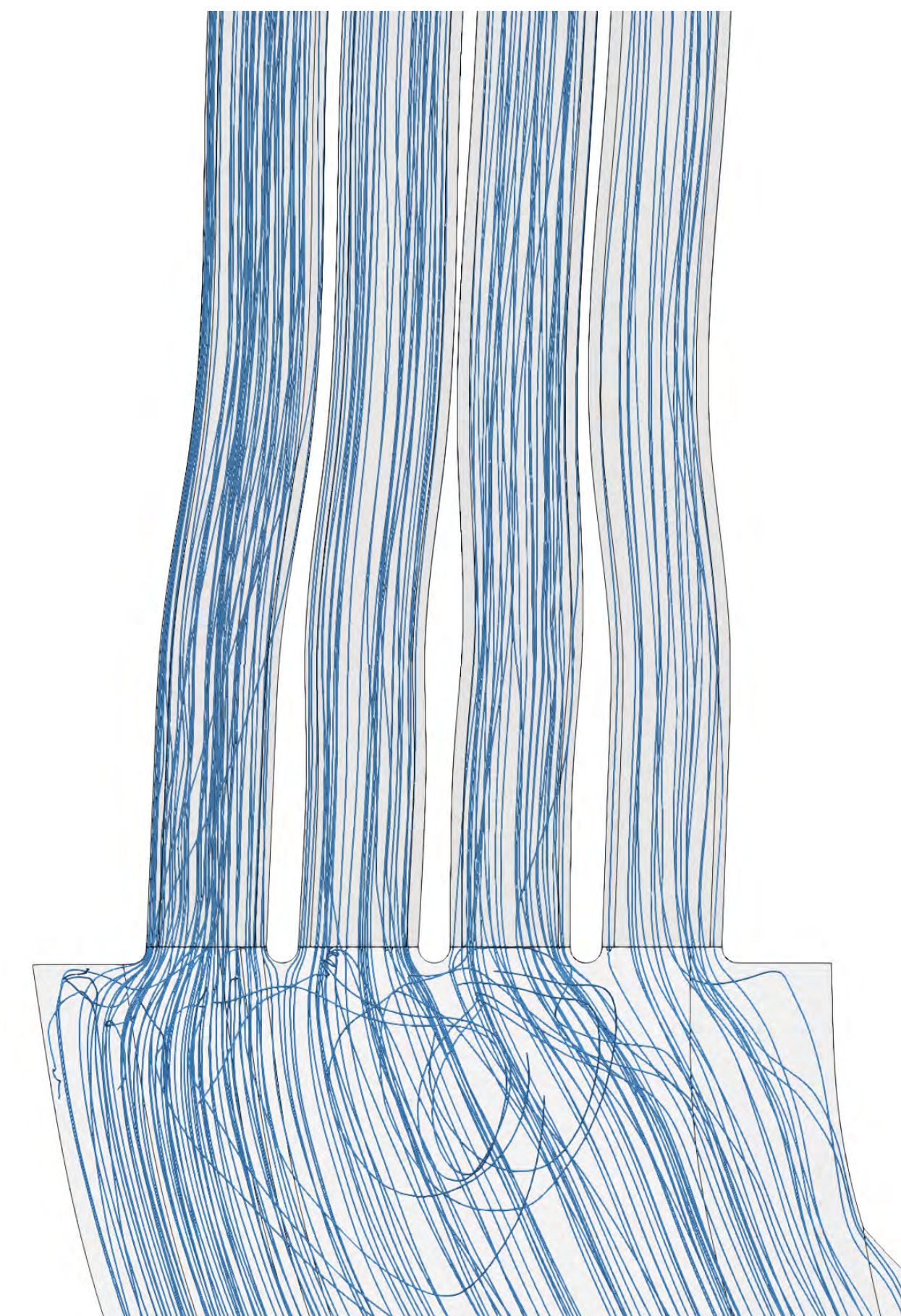
De stroming in de overgang tussen de opwaartse bedding en de duiker is gevisualiseerd in figuren 3.8 en 3.9. Hier is te zien dat de meest rechtse koker een zog vertoont als resultaat van loslating.

Verderop in de duiker bevindt zich een overgang naar het deel bestaande uit 2 kokers. De stroming in deze overgang is gevisualiseerd in figuren 3.10 en 3.11. Hier is waar te nemen dat er lichte loslating plaats vindt aan de binnenkant van de bocht, groeiend vanaf de overgang van 4 naar 2 kokers.

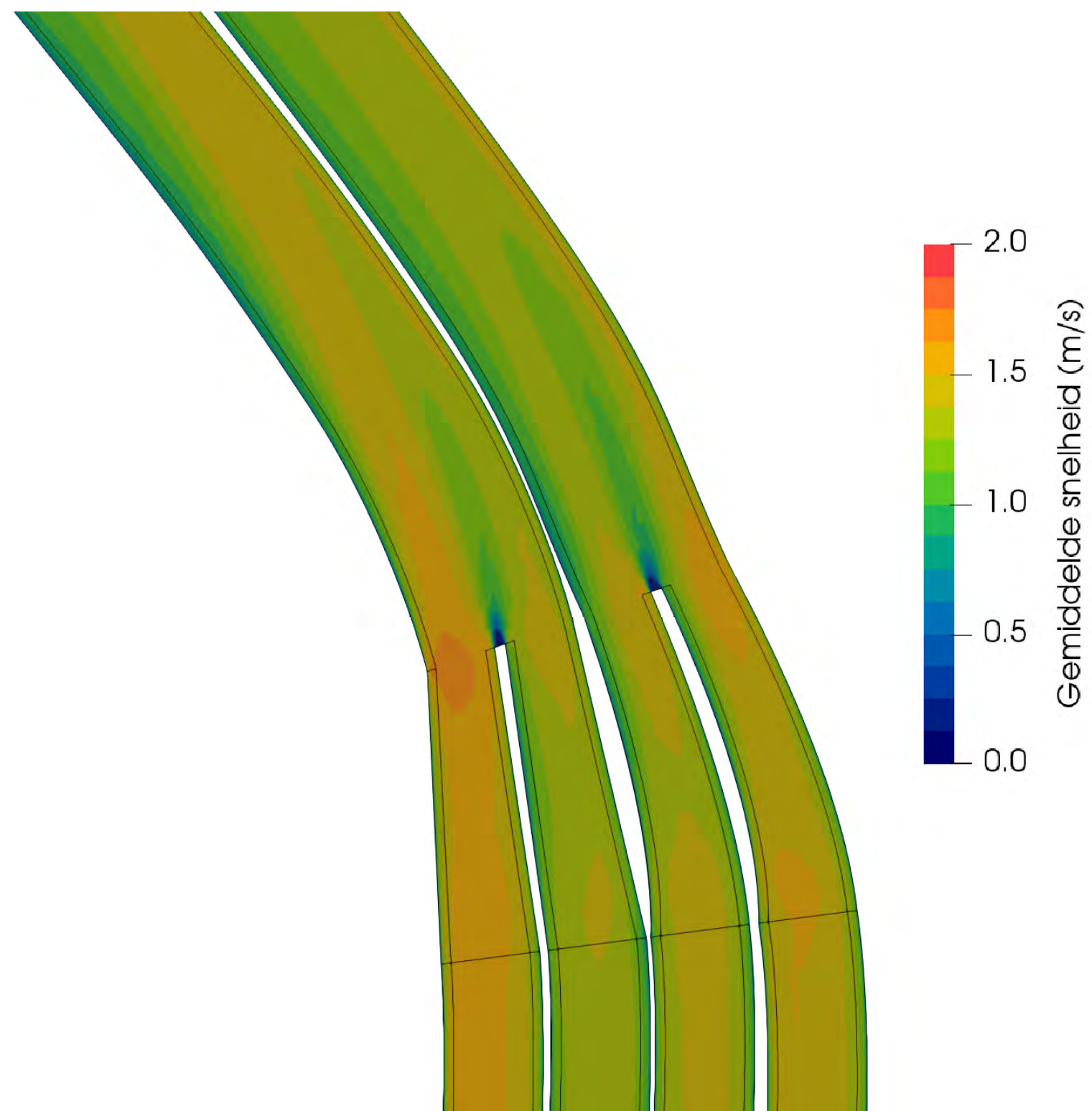
Verder afwaarts in de duiker is de overgang naar de afwaartse bedding. De stroming in deze overgang is gevisualiseerd in figuren 3.12 en 3.13. Hier is sprake van loslating door plotselinge expansie. Ook is hier zichtbaar dat er asymmetrie bestaat in de snelheid in de kokers.



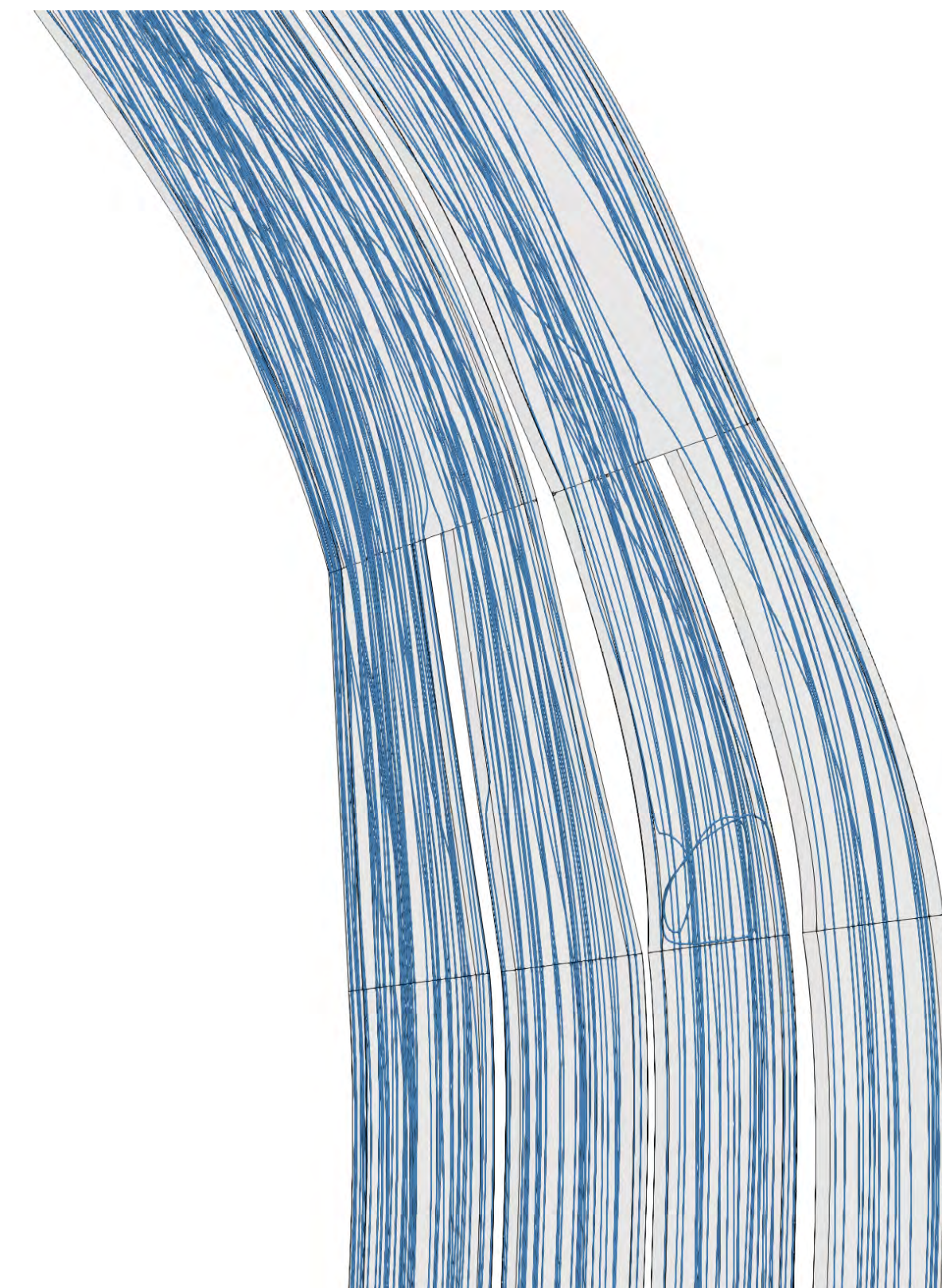
— **Figuur 3.8:** Snelheid duiker ingang, huidige duiker



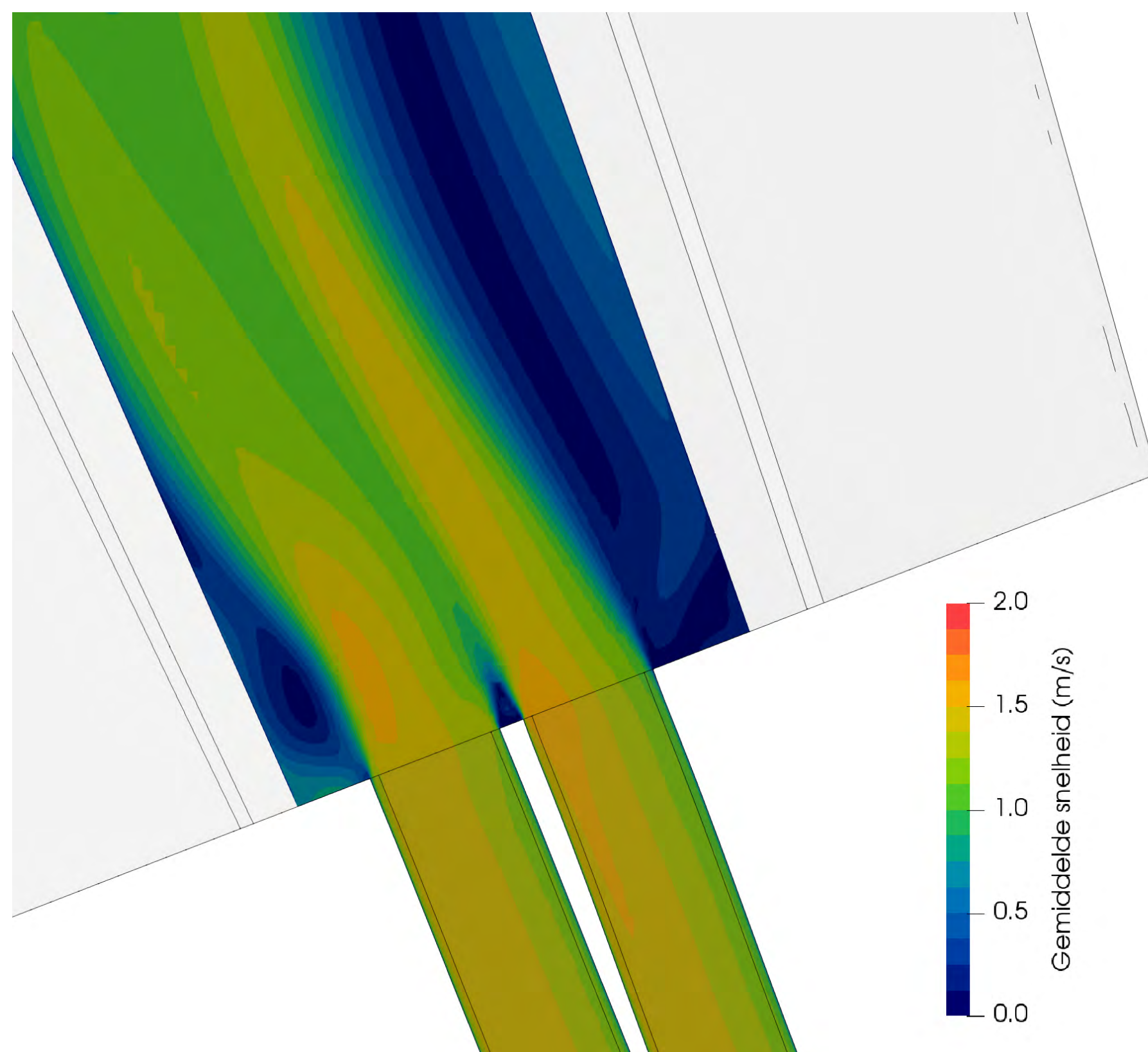
— **Figuur 3.9:** Stroombaan duiker inlaat, huidige duiker



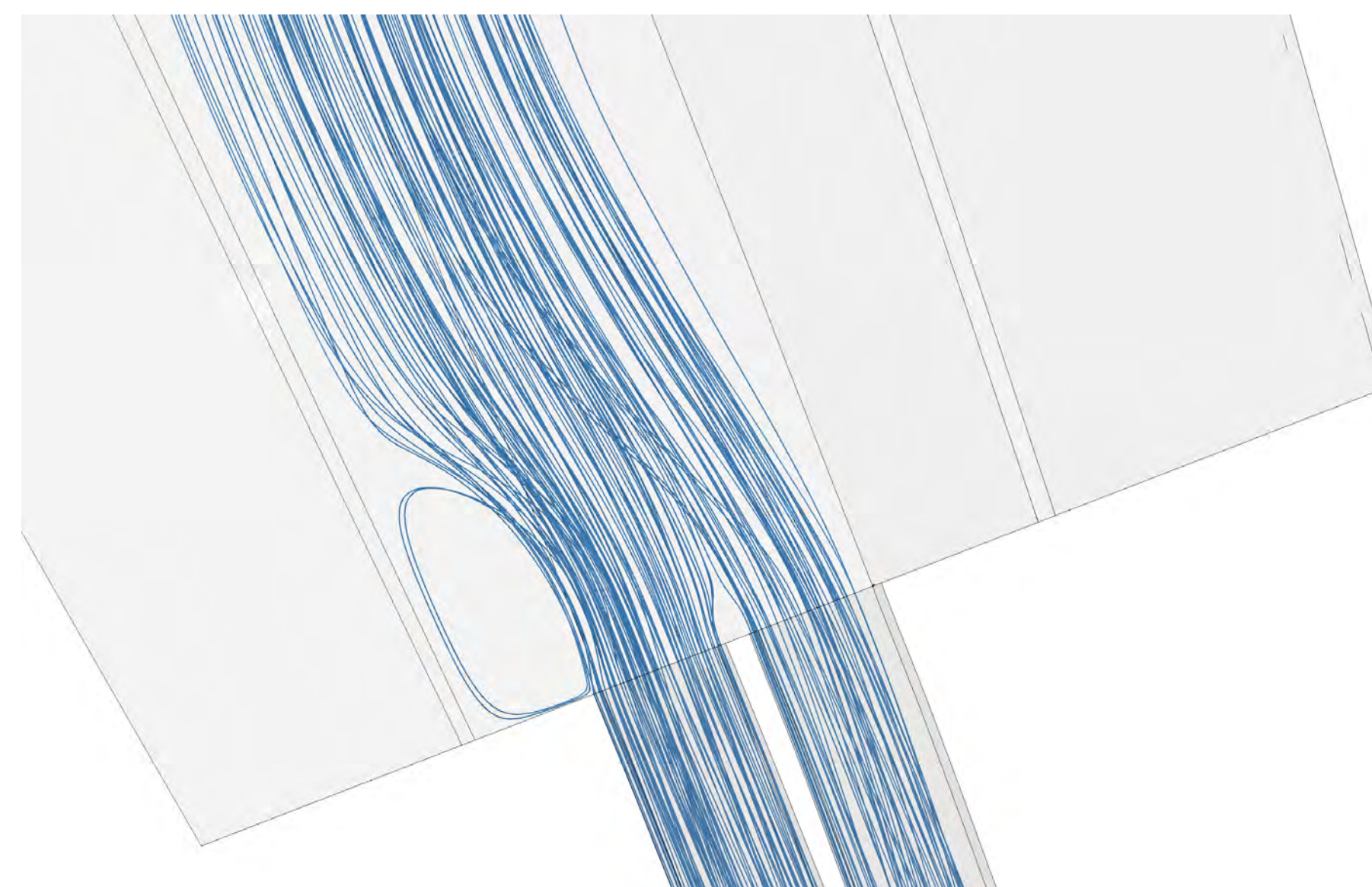
— **Figuur 3.10:** Snelheid overgang, huidige duiker



— **Figuur 3.11:** Stroombaan overgang, huidige duiker



— **Figuur 3.12:** Snelheid duiker uitlaat, huidige duiker



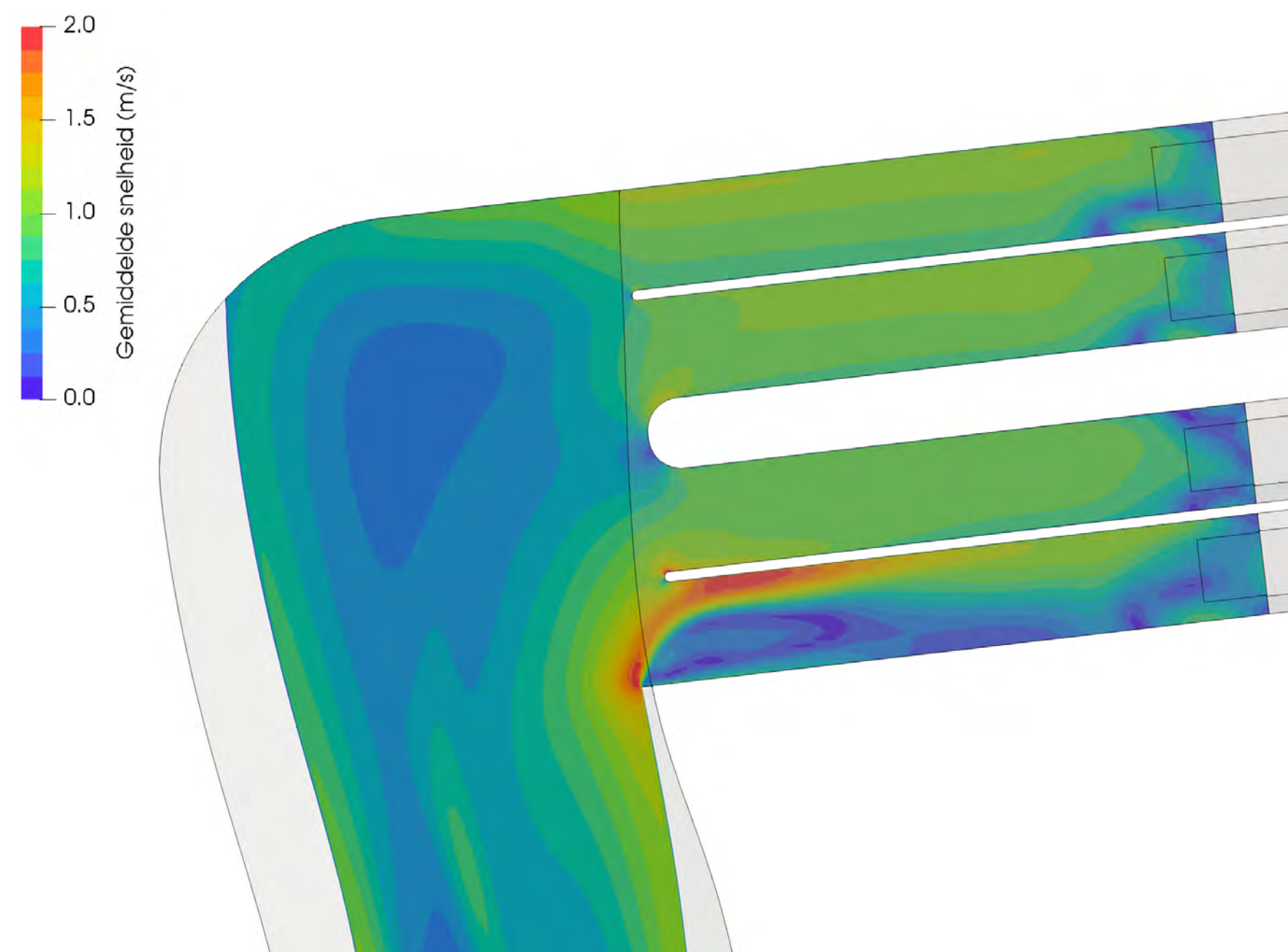
— **Figuur 3.13:** Stroombaan duiker uitlaat, huidige duiker

3.3.2 Geometrie 2

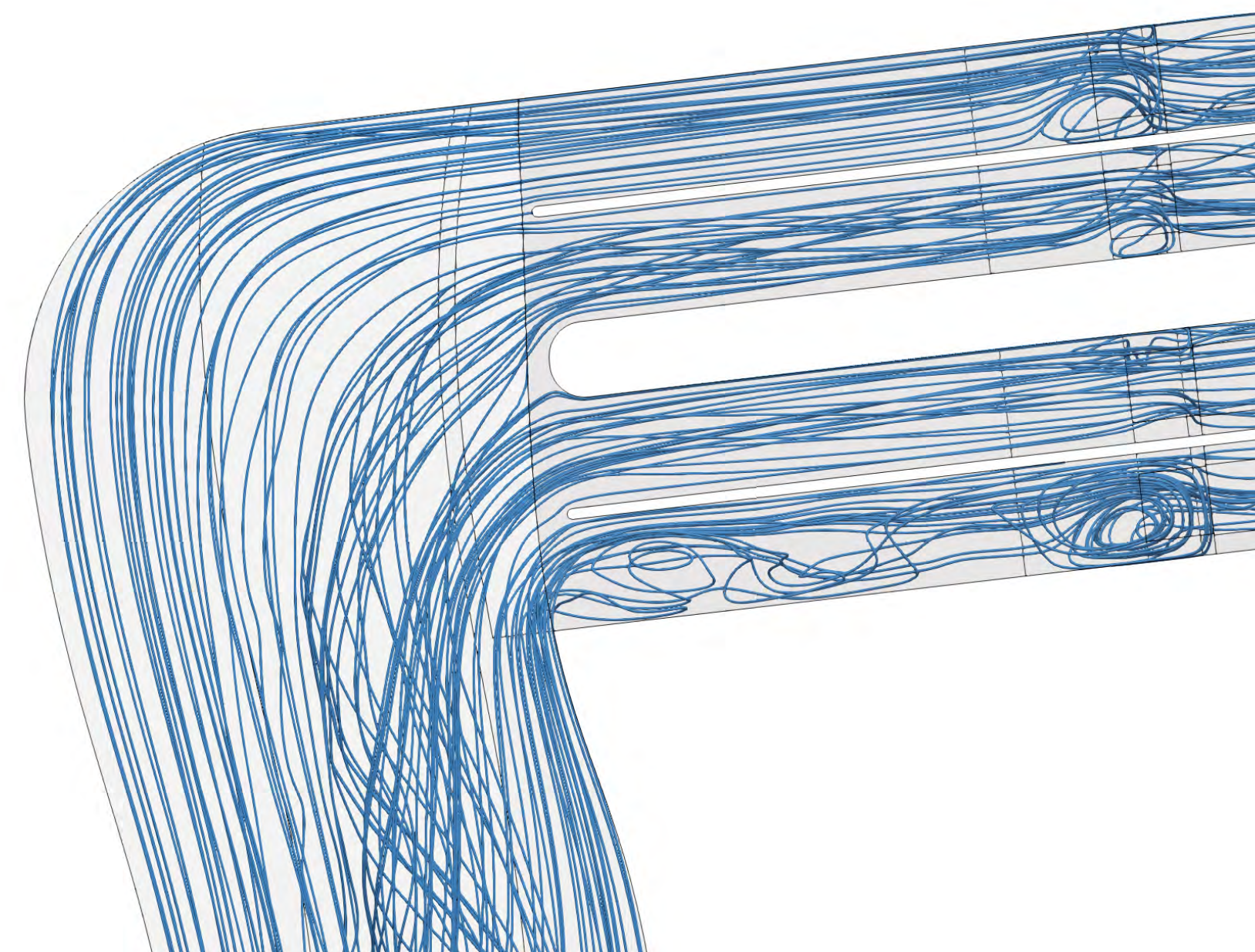
Geometrie 2 toont een hoger verlies tussen de opwaartse bedding en de duiker ten opzichte van de huidige duiker. In figuren 3.14 en 3.15 is de stroming bij de overgang tussen de bedding opwaarts en de duiker gevisualiseerd. Hierin is duidelijk waar te nemen dat de stroming loslaat bij de inlaat van de eerste duiker koker, wat het verhoogde verlies aan druk verklaart.

Verder afwaarts in de duiker volgt een verlaging (onder het kanaal naar Charleroi). Deze verlaging laat relatief hoge druk verliezen zien. De stroming is gevisualiseerd in figuren 3.16 en 3.17. Bij de overgang naar beneden is een loslaat gebied aan de bovenkant van de koker waar te nemen. Bij de overgang naar boven is een loslaat gebied waar te nemen aan de bodem van de koker.

Na het lage deel van de duiker volgt direct een bocht richting het oude afwaartse twee koker gedeelte van de huidige duiker. De stroming in deze bocht is gevisualiseerd in figuren 3.18 en 3.19. In de binnenzijde van de bocht is een zog zichtbaar in alle 4 de kokers. Hiernaast is in de stroombanen te zien dat de bocht rotatie toevoegt aan de stroming.



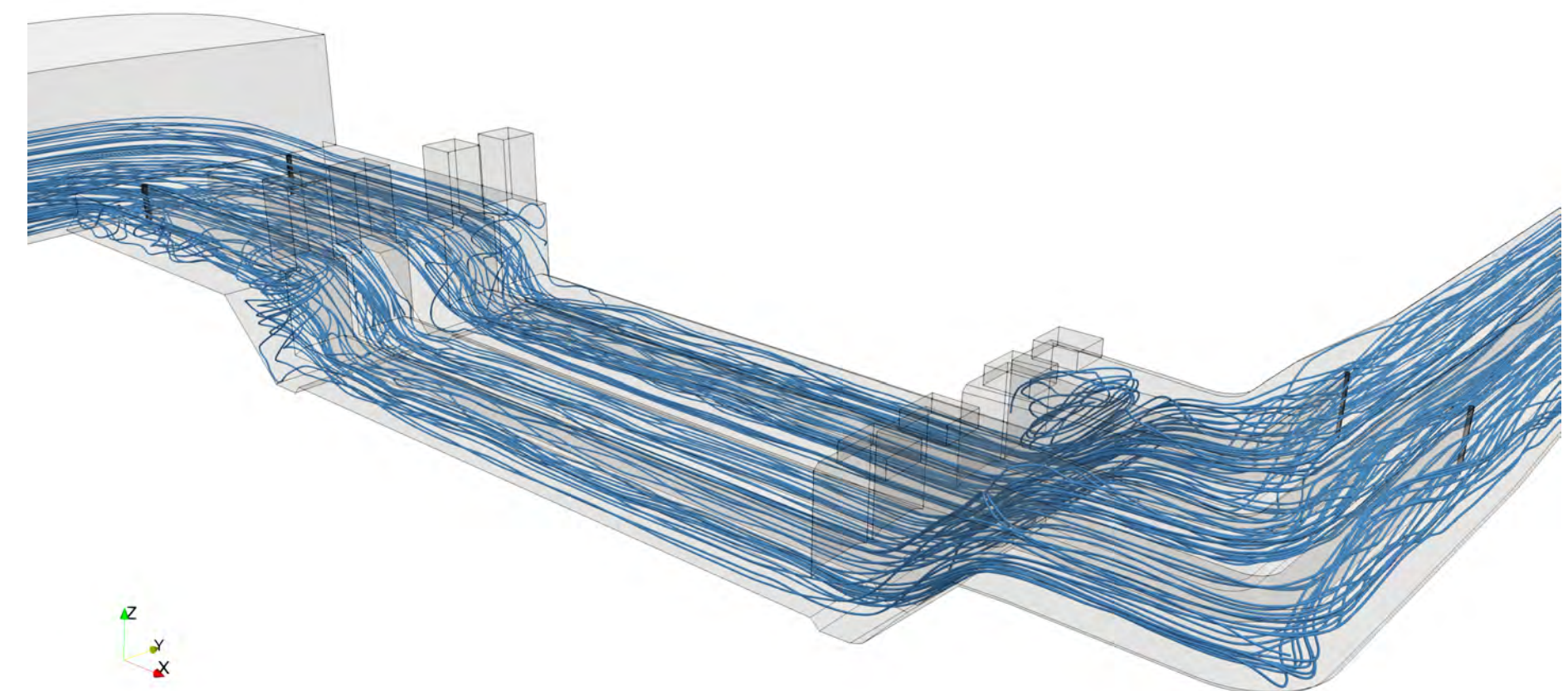
— **Figuur 3.14:** Snelheid duiker inlaat, geometrie 2



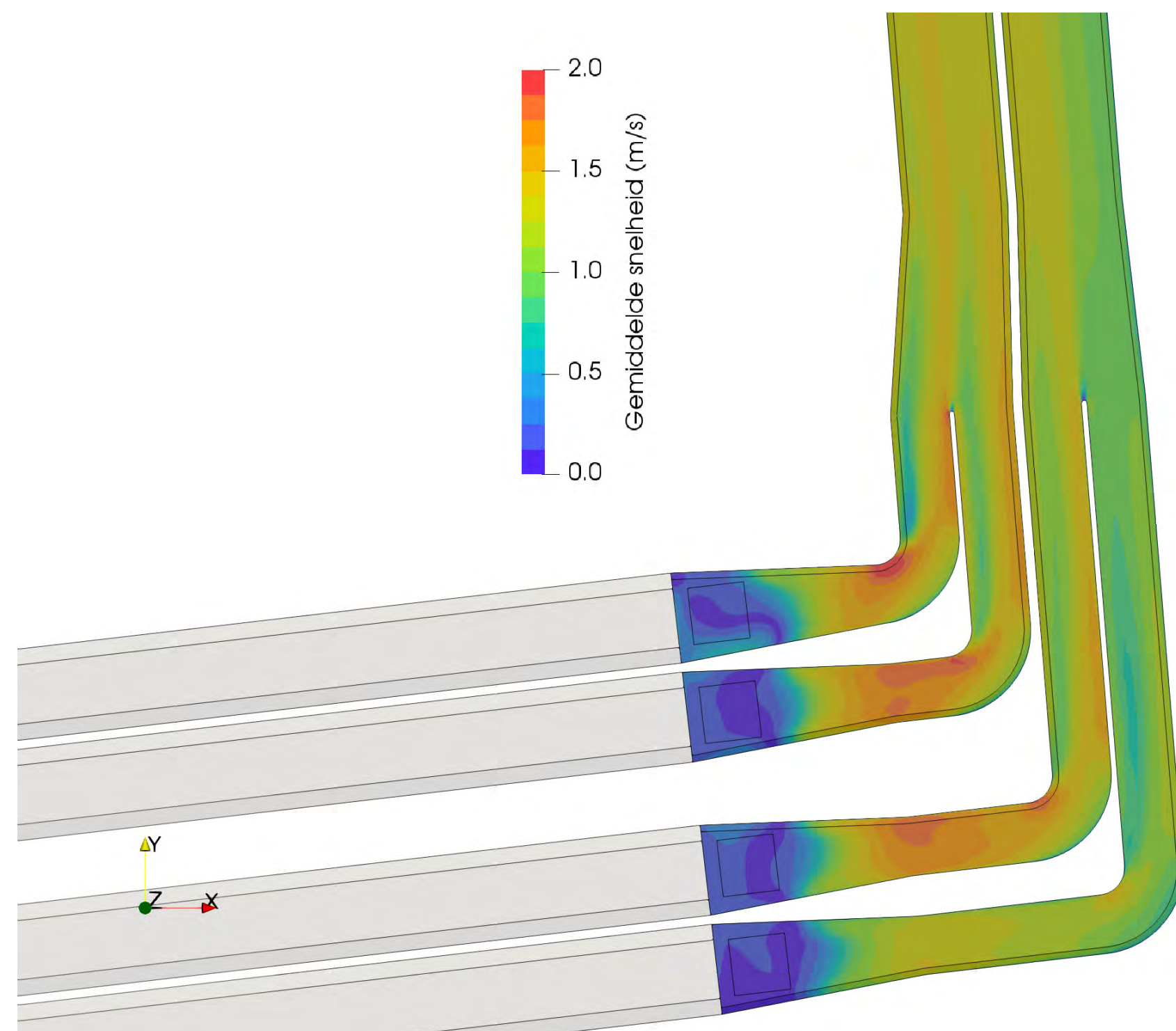
— **Figuur 3.15:** Stroombaan duiker inlaat, geometrie 2



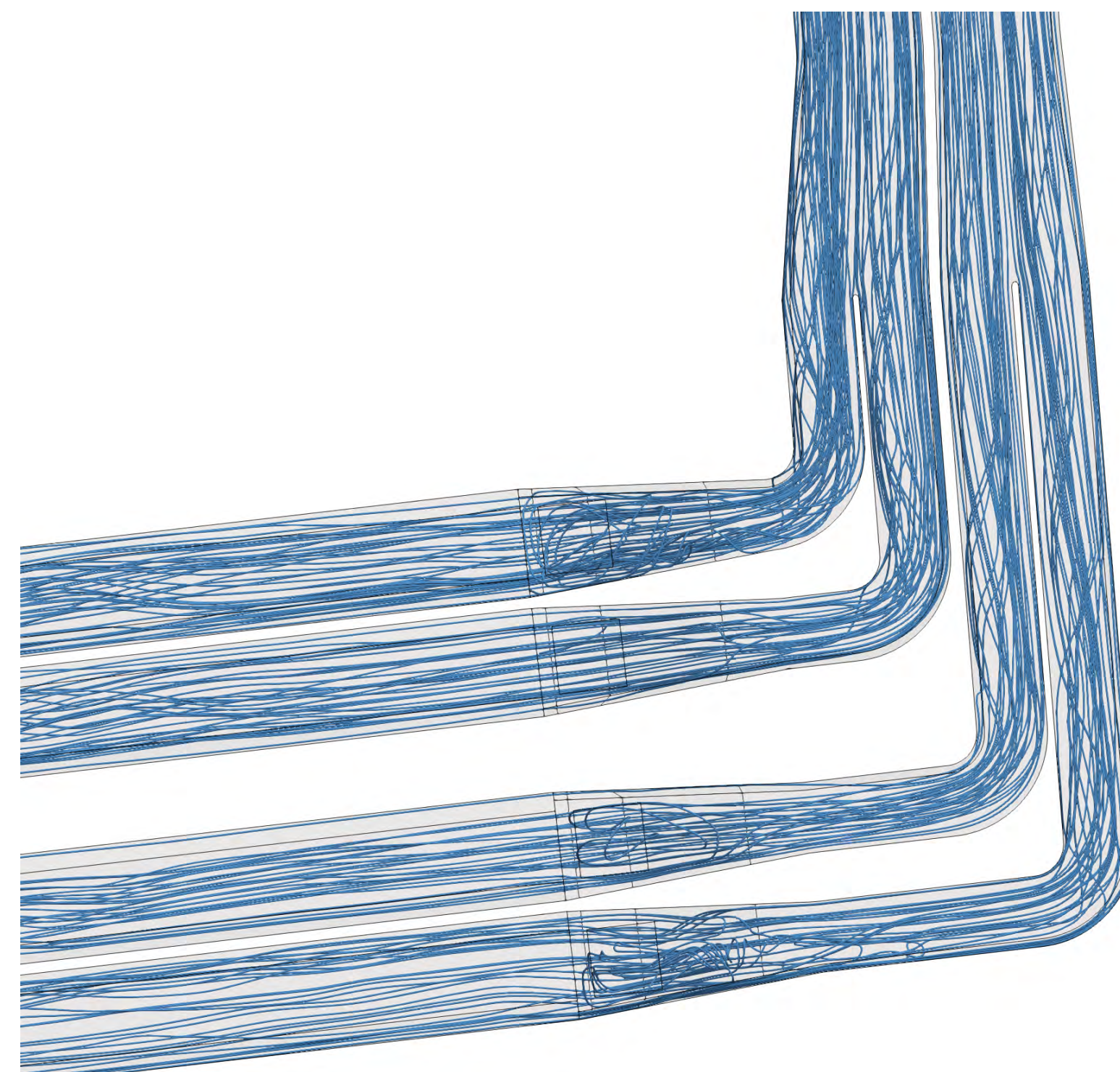
— **Figuur 3.16:** Snelheid duiker koker 2 laag, geometrie 2



— **Figuur 3.17:** Stroombanen duiker laag, geometrie 2



— **Figuur 3.18:** Snelheid duiker bocht, geometrie 2



— **Figuur 3.19:** Stroombanen duiker bocht, geometrie 2

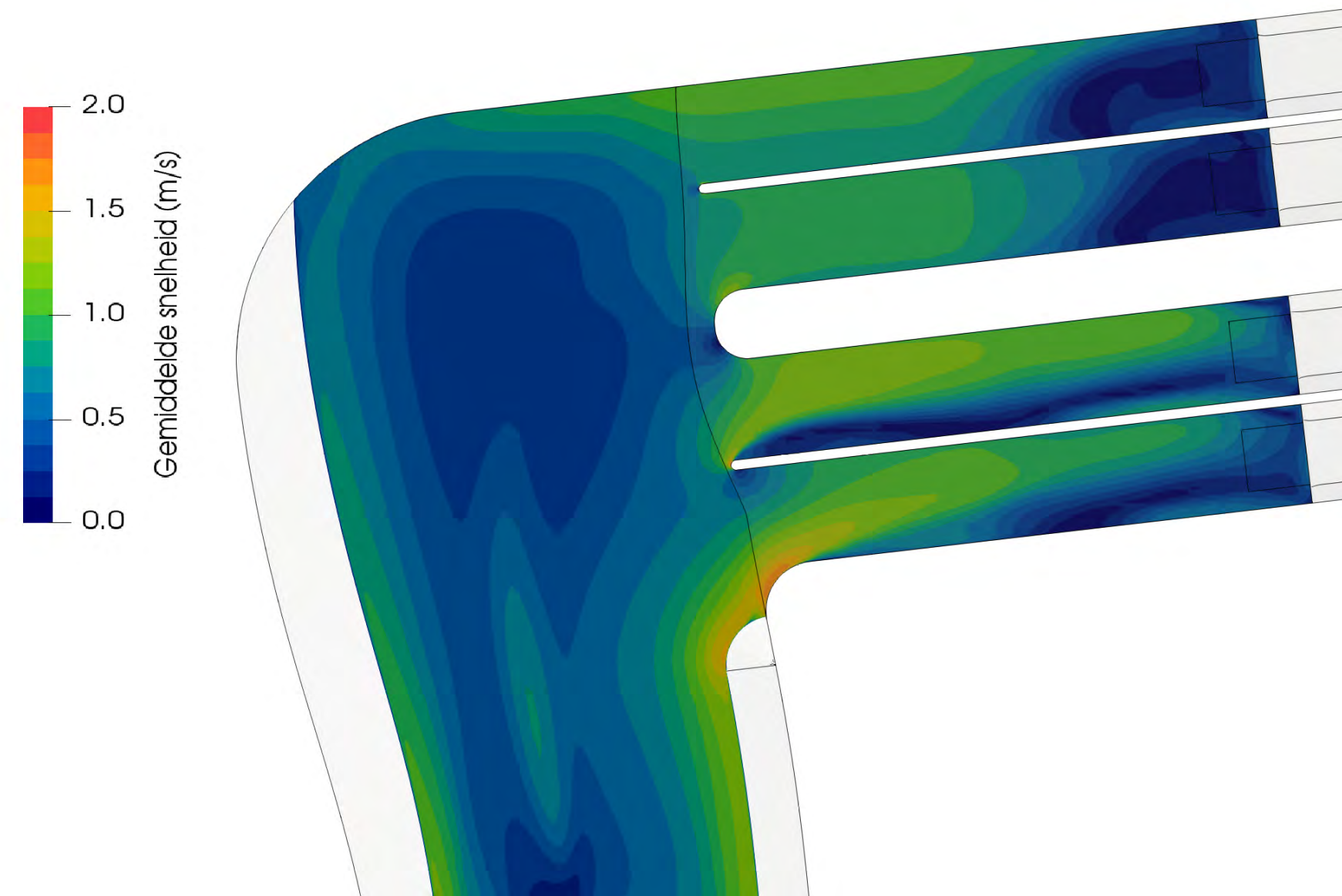
3.3.3 Geometrie 2 v2

De stromingsverschijnselen van geometrie 2 v2 zijn (lokaal) veranderd ten opzichte van geometrie 2.

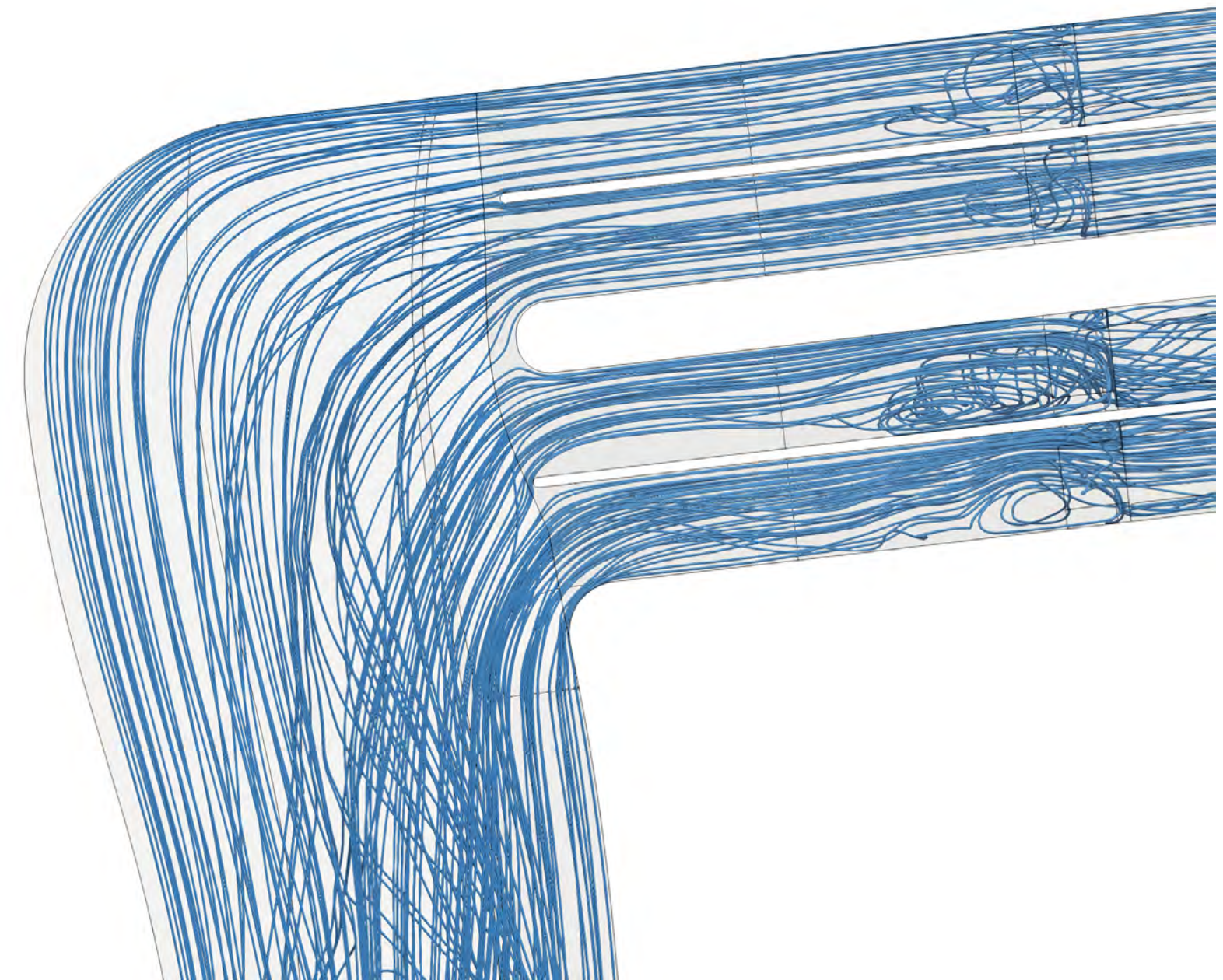
Bij de ingang van de duiker volgt de stroming de bocht een stuk beter bij de eerste koker zoals zichtbaar in figuur 3.20. Dit heeft echter als gevolg dat er wat loslating zichtbaar is in de tweede koker die bij geometrie 2 niet aanwezig was. Boven de verlaging (einde van het hoge deel van de duiker opwaarts van de verlaging) lijkt meer loslating plaats te vinden dan bij geometrie 2. In figuur 3.22 is te zien dat door de minder steile verlaging de stroming eerder een lager pad kiest dan bij geometrie 2, waardoor dit loslaat gebied ontstaat.

Verderop in de duiker hebben de minder steile verlaging en afronding een loslaat gebied verwijderd zoals zichtbaar in figuur 3.22. Hierdoor ontstaat een betere verdeling in stroomsnelheid en minder insnoering.

Het laatste deel van de stroming in geometrie 2 v2 komt globaal overeen met de stroming in geometrie 2 zoals te zien in figuur 3.24. Echter is de verdeling van snelheid beter en is er minder rotatie waar te nemen in 3.25.



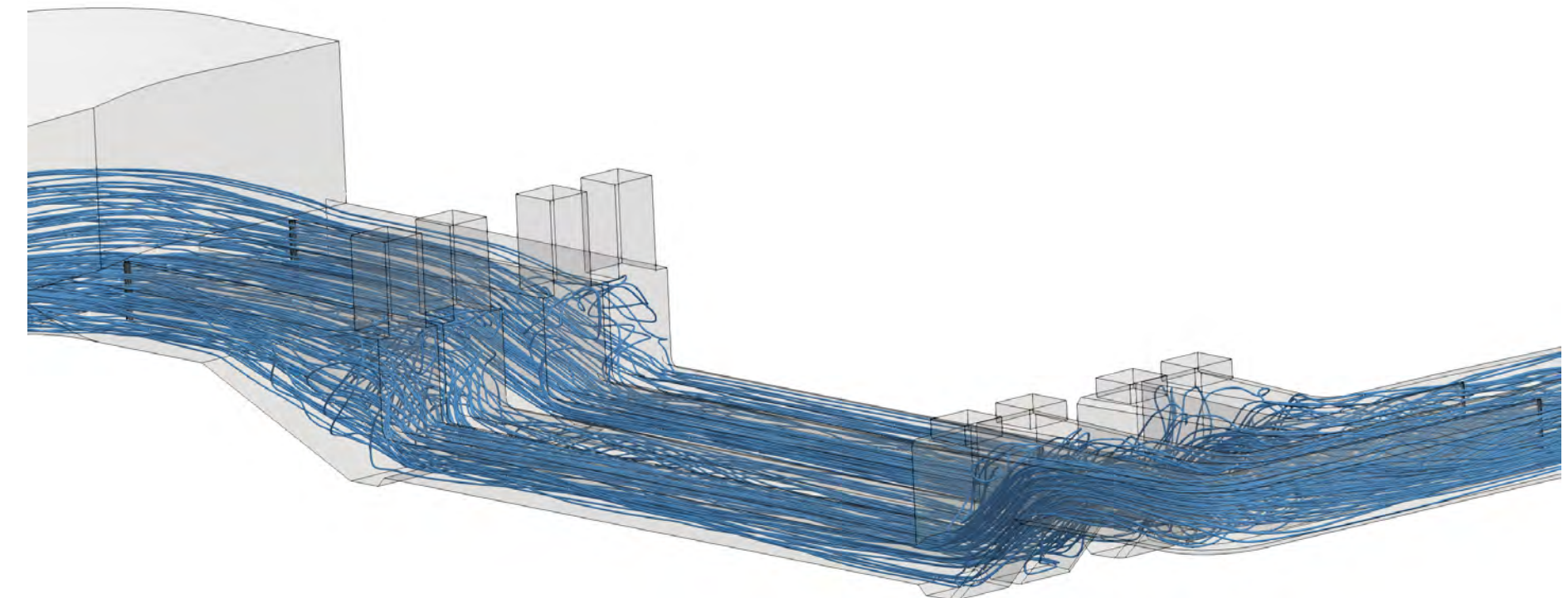
— **Figuur 3.20:** Snelheid duiker inlaat, geometrie 2 v2



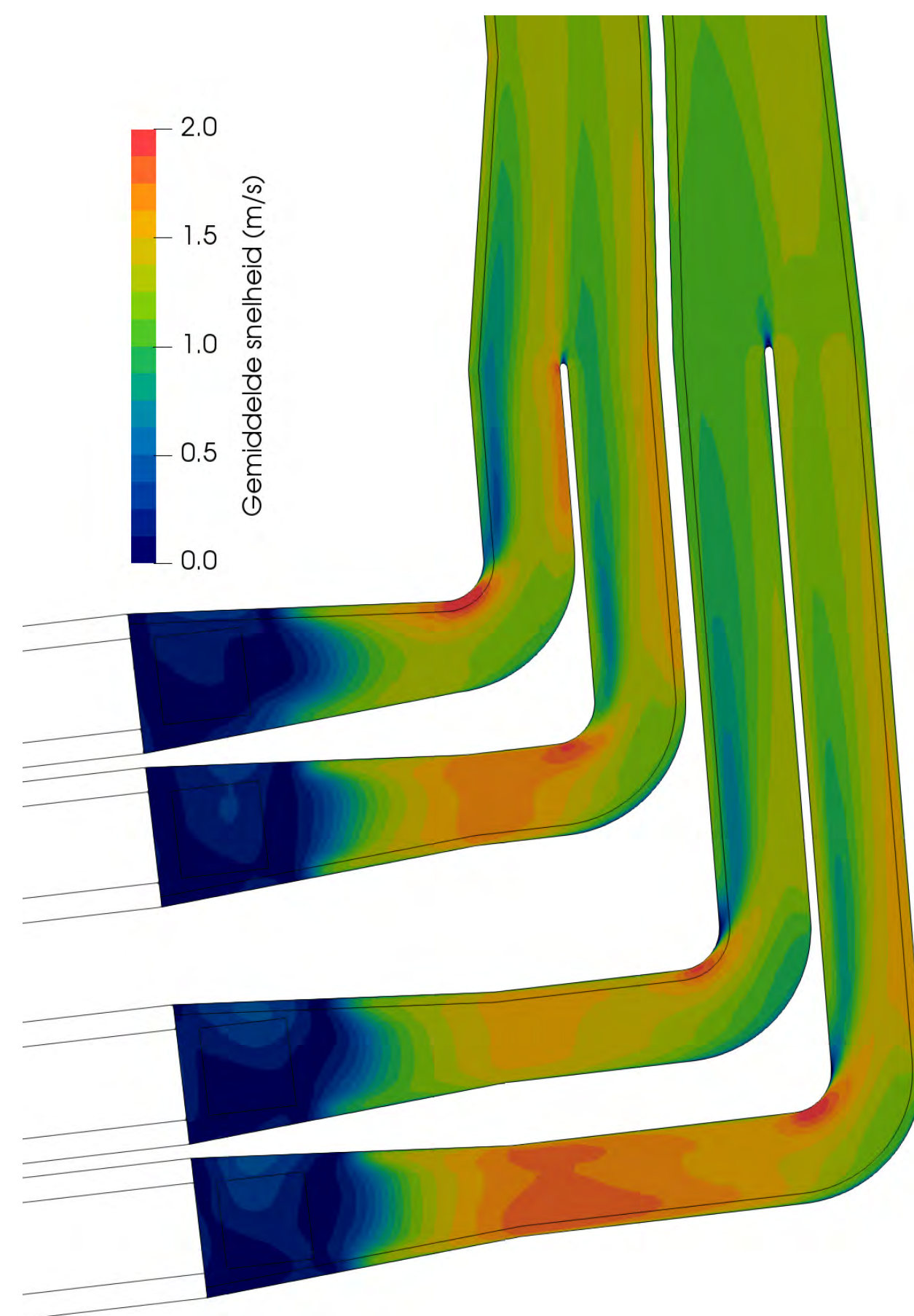
— **Figuur 3.21:** Stroombaan duiker inlaat, geometrie 2 v2



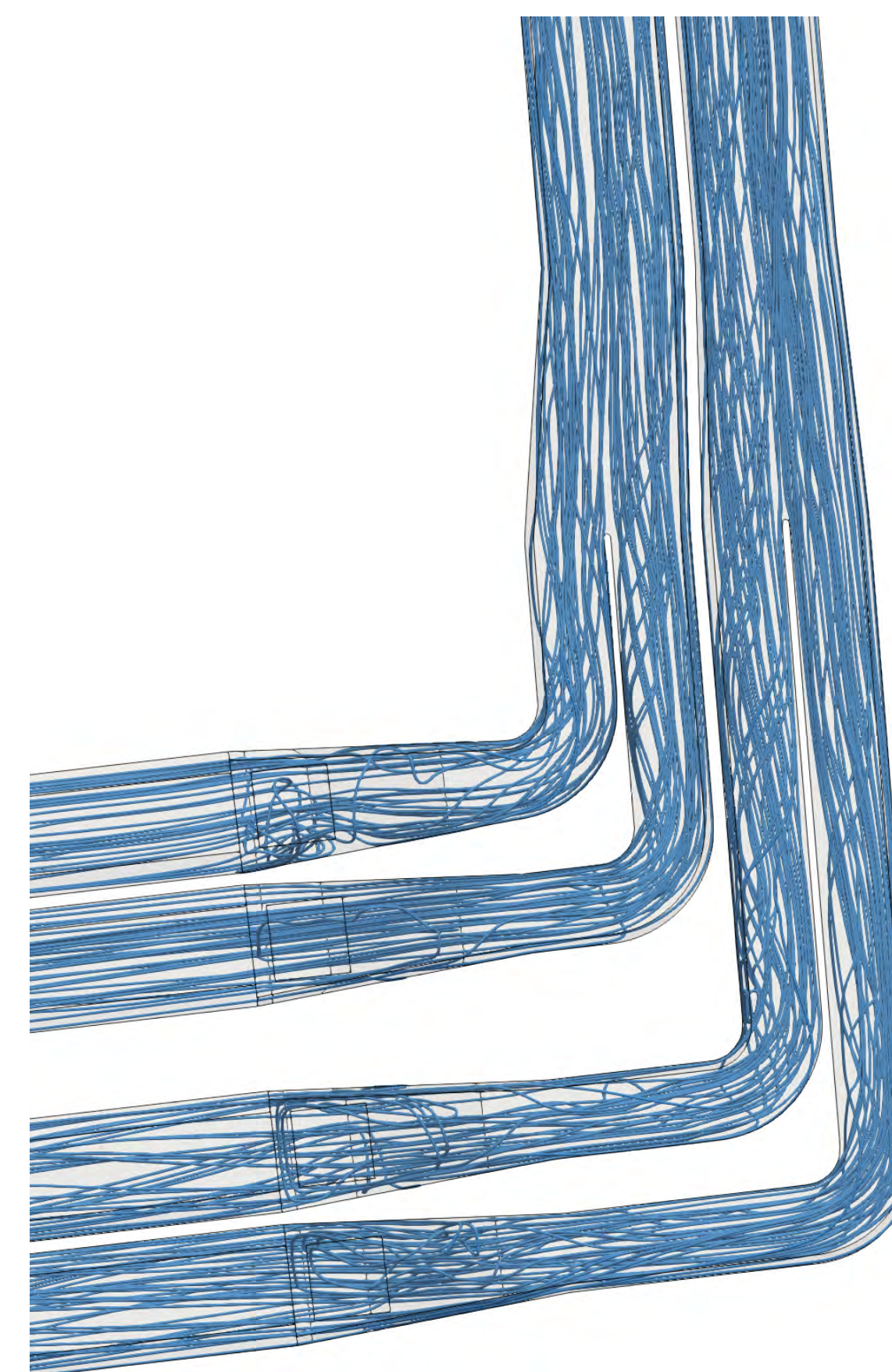
— **Figuur 3.22:** Snelheid duiker koker 2 laag, geometrie 2 v2



— **Figuur 3.23:** Stroombanen duiker laag, geometrie 2 v2



— **Figuur 3.24:** Snelheid duiker bocht, geometrie 2 v2



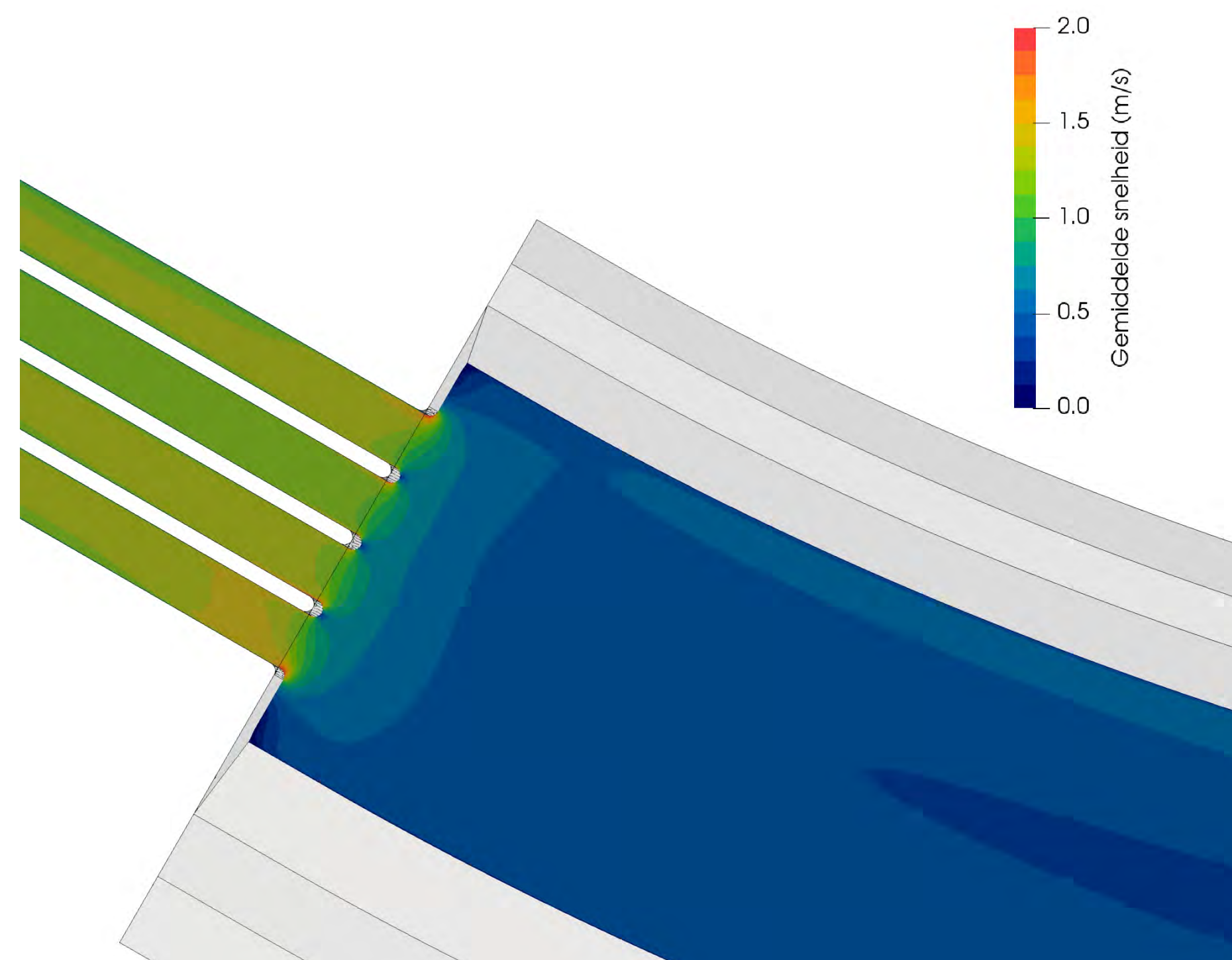
— **Figuur 3.25:** Stroombanen duiker bocht, geometrie 2 v2

3.3.4 Geometrie 3

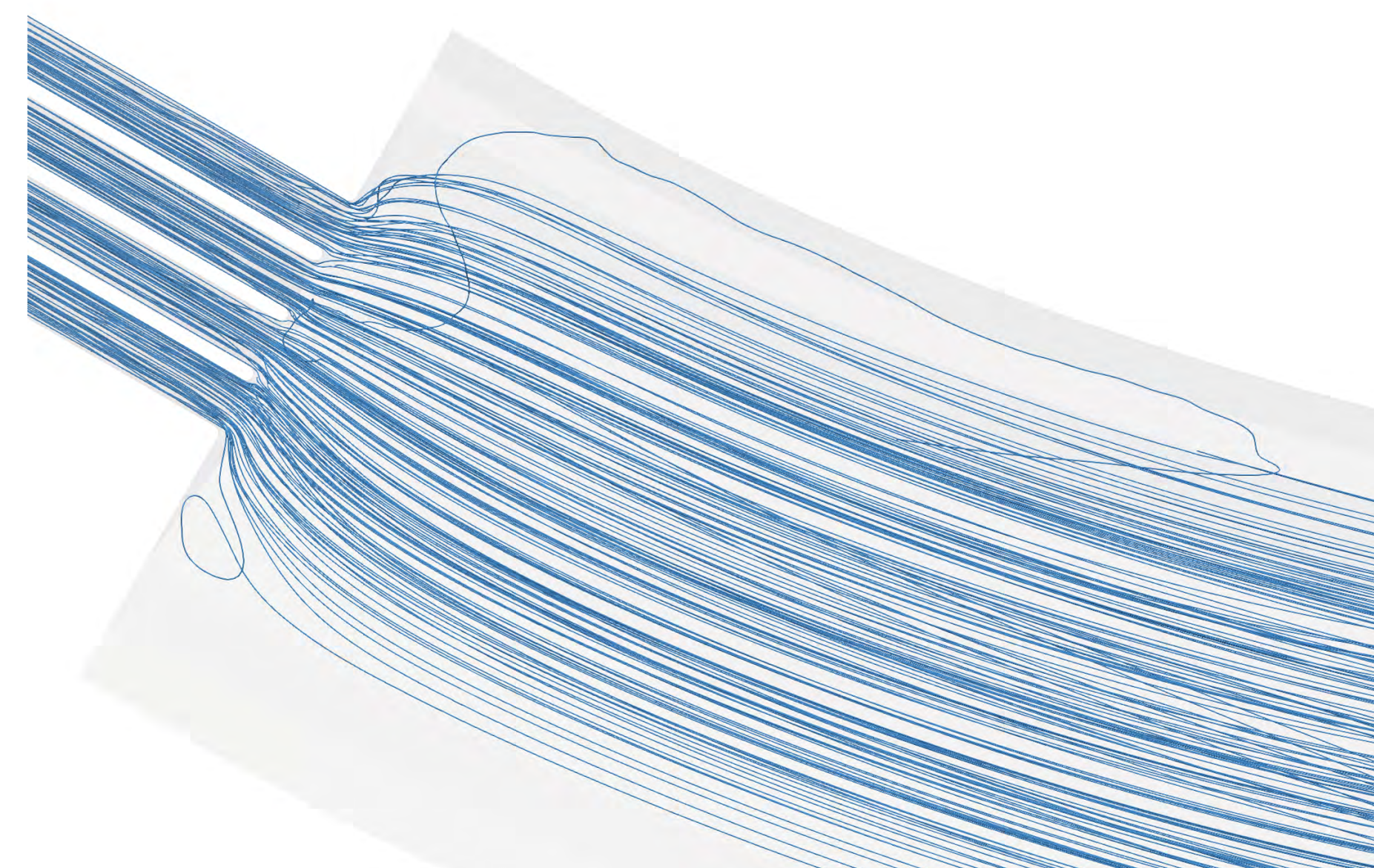
De overgang van de opwaartse bedding naar de duiker van geometrie 3 toont minder drukverlies dan die van de huidige duiker. De stroming bij deze overgang is gevisualiseerd in figuren 3.26 en 3.27. Hier is waar te nemen dat er minder zog ontstaat na de inlaat van de duiker. Ook lijkt de verdeling van snelheid over de verschillende duiker kokers beter te zijn dan bij de huidige duiker.

Verder afwaarts in de duiker komt een vergelijkbare situatie voor als bij geometrie 2. Bij geometrie 3 is de bocht in de duiker echter in het verlaagde gedeelte gelegen, vlak na de overgang naar het verlaagde deel. De stroming in de overgang naar het lage deel van de duiker is gevisualiseerd in figuren 3.28 t/m 3.31. Hierin is te zien dat wederom de scherpe overgangen in de hoogte van de duiker loslating veroorzaken aan de bovenkant van de koker. Daarnaast laat ook de stroming aan de binnenkant van de bocht los. De bocht voegt wederom rotatie toe aan de stroming.

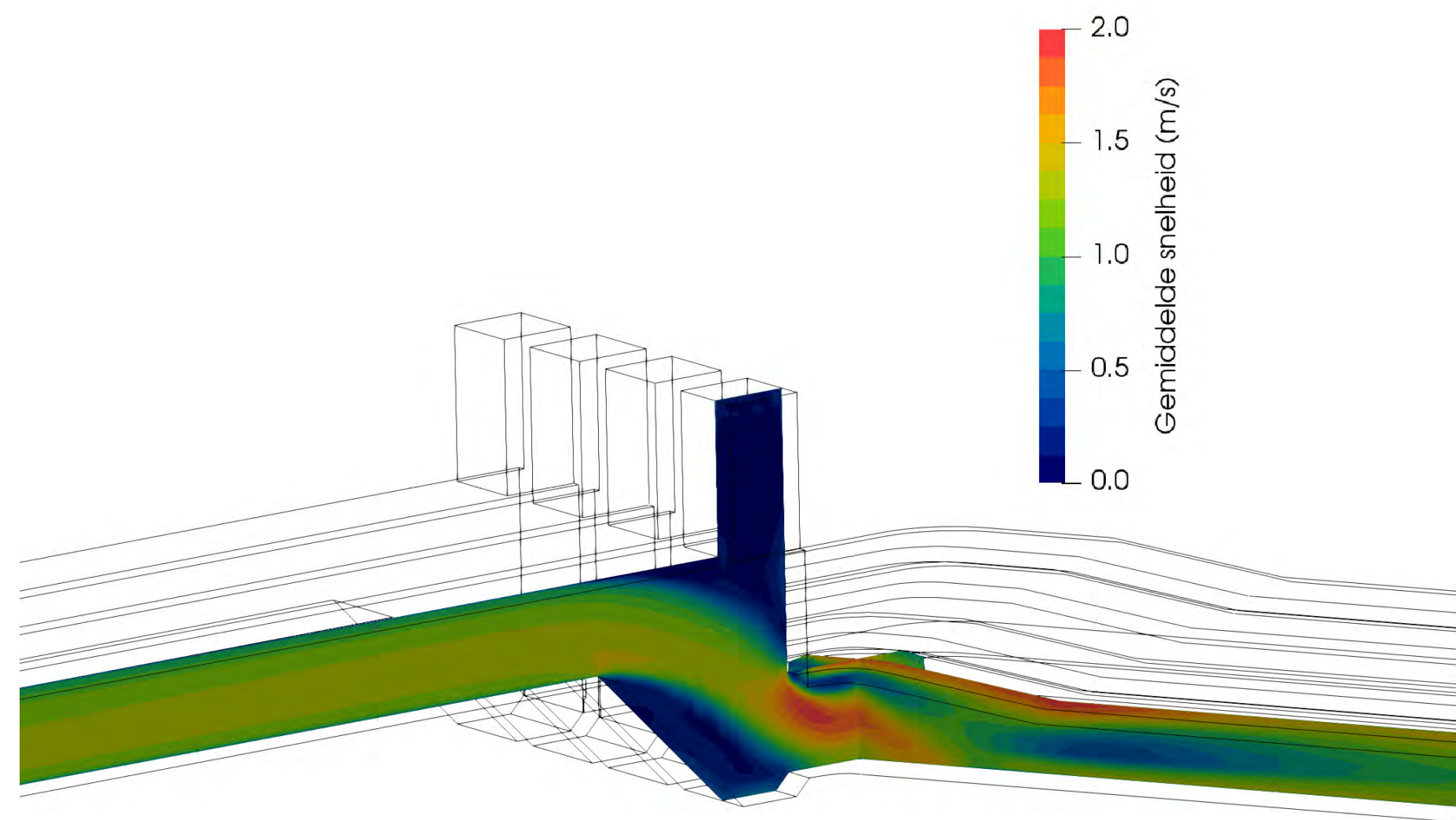
Na het laag gelegen deel volgt een overgang naar de afwaartse bedding (schuin omhoog). De stroming in deze overgang is gevisualiseerd in figuren 3.32 en 3.33. De scherpe overgang zorgt wederom voor loslaat gebieden.



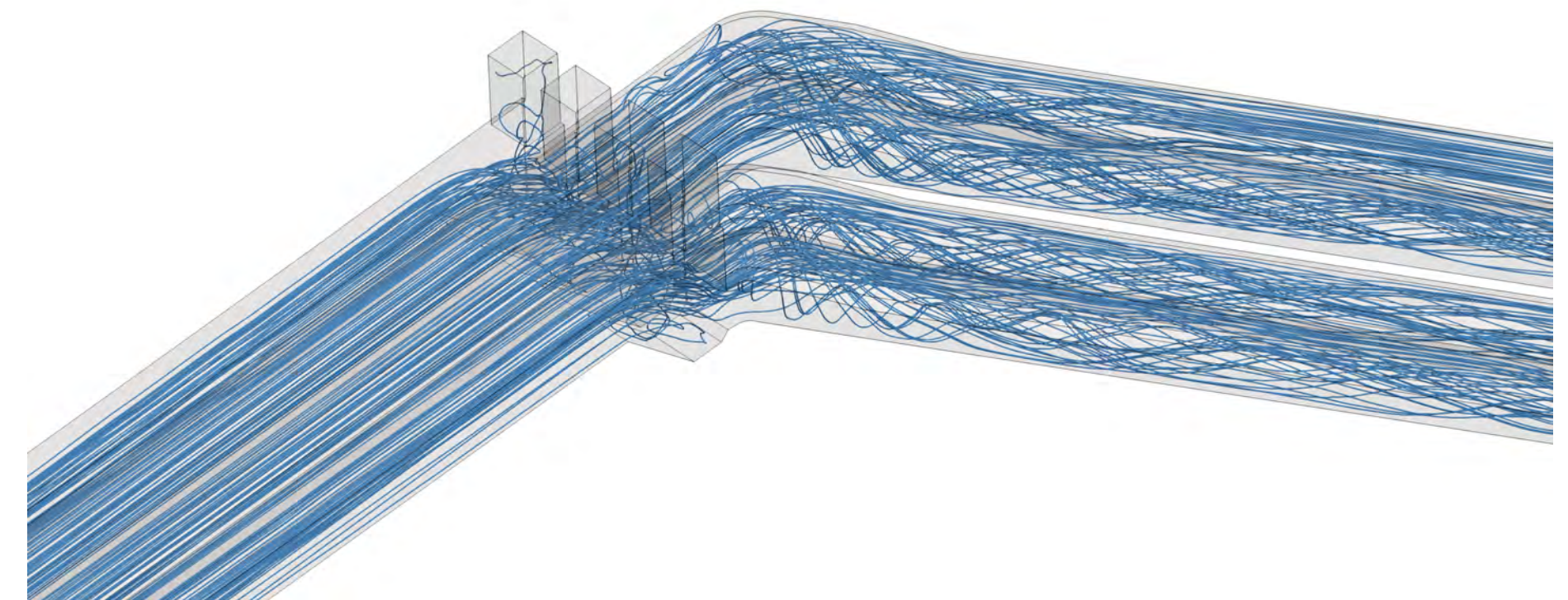
— **Figuur 3.26:** Snelheid duiker inlaat, geometrie 3



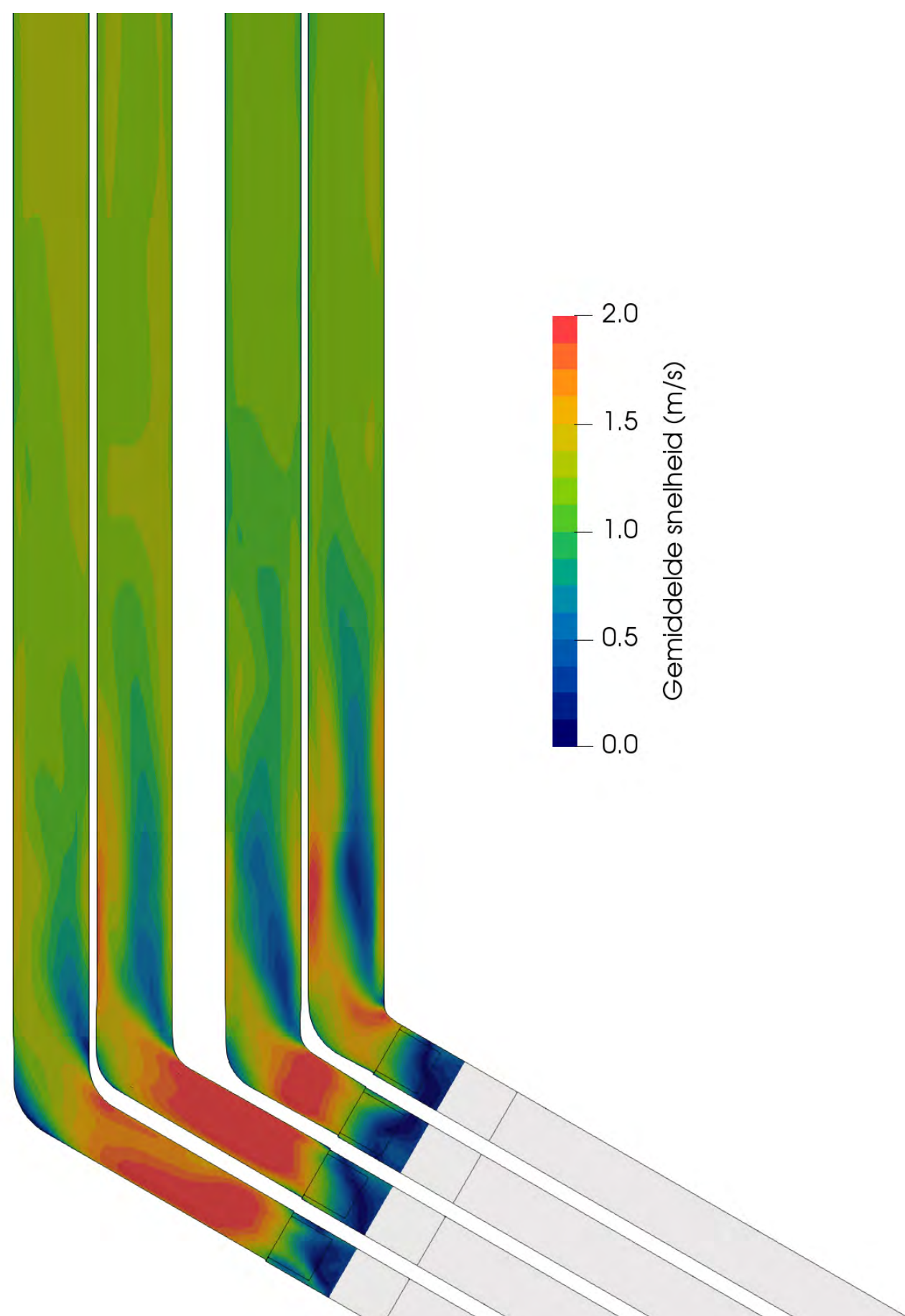
— **Figuur 3.27:** Stroombanen duiker inlaat, geometrie 3



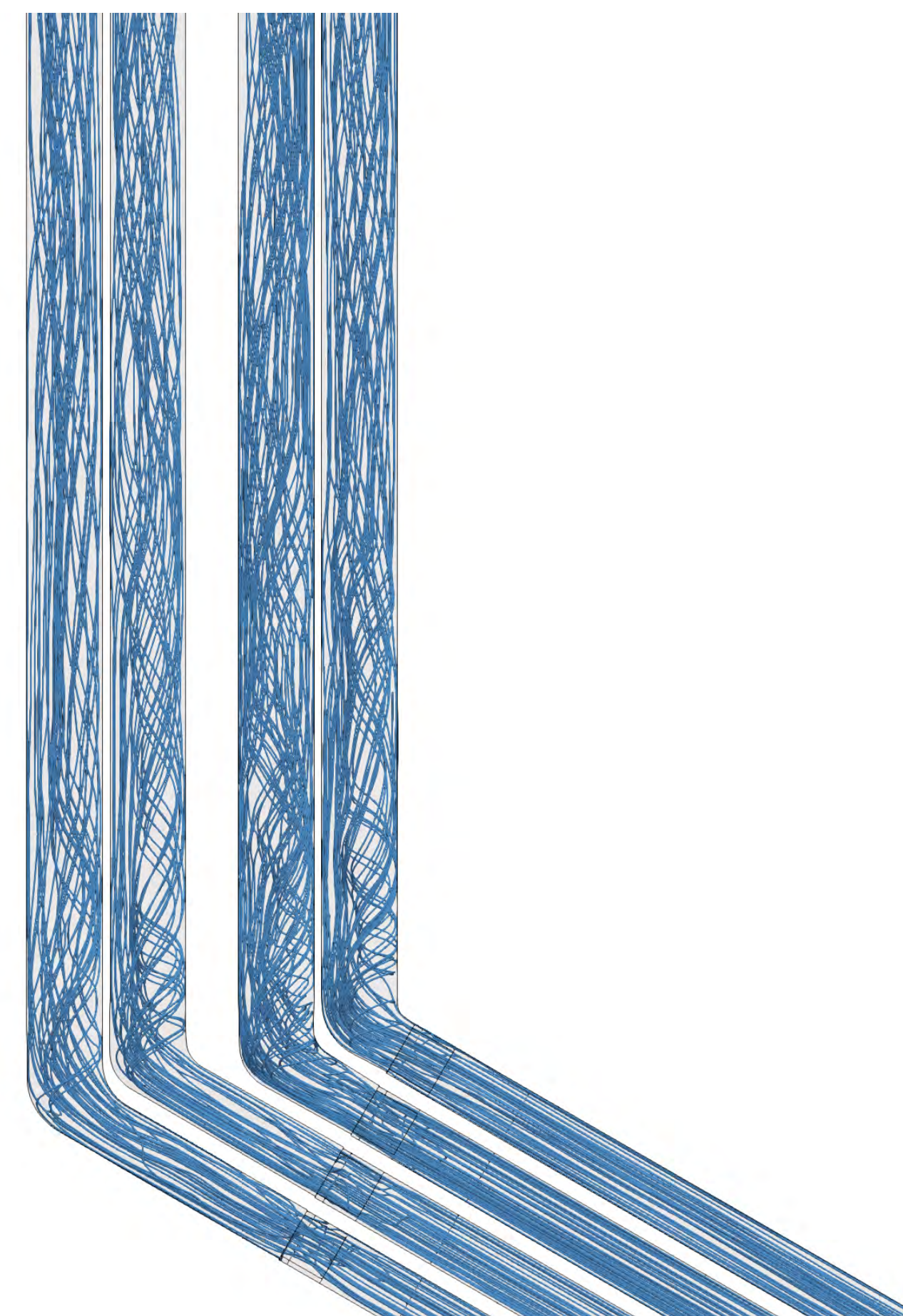
— **Figuur 3.28:** Snelheid duiker overgang, geometrie 3



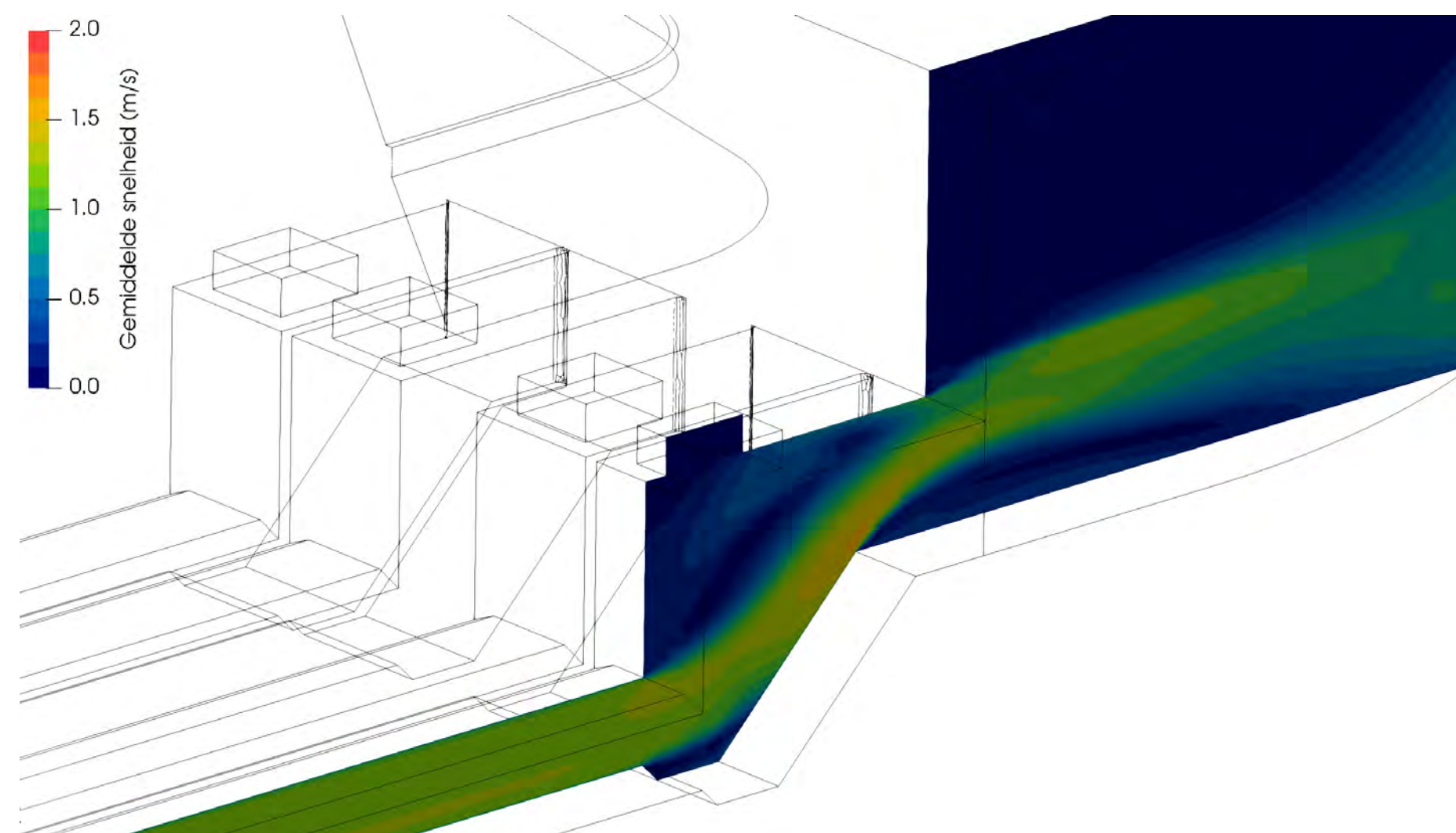
— **Figuur 3.29:** Stroombanen duiker overgang, geometrie 3



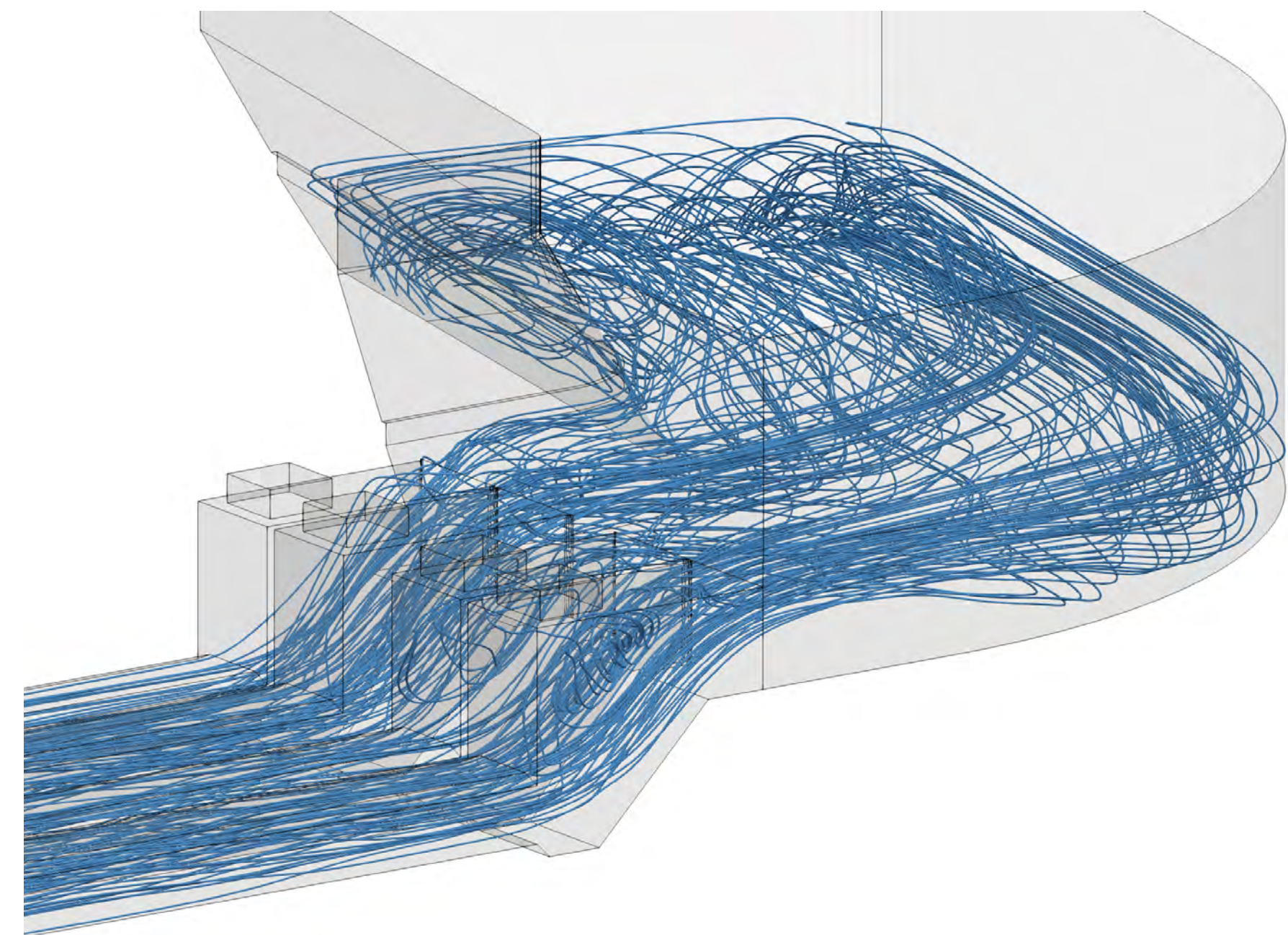
— **Figuur 3.30:** Snelheid duiker laag deel, geometrie 3



— **Figuur 3.31:** Stroombanen duiker laag deel, geometrie 3



— **Figuur 3.32:** Snelheid duiker uitlaat, geometrie 3



— **Figuur 3.33:** Stroombanen duiker uitlaat, geometrie 3

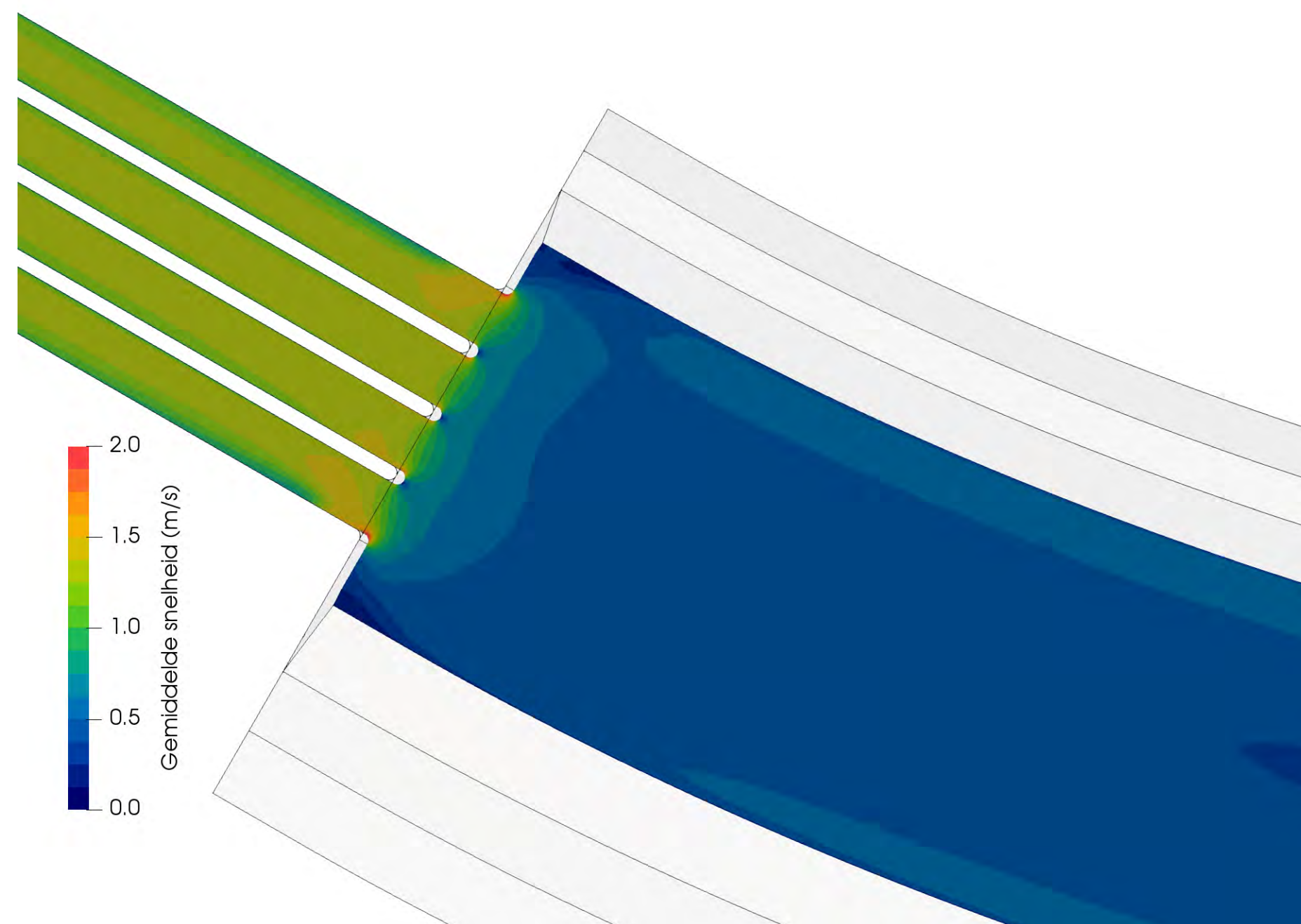
3.3.5 Geometrie 3 v2

De stromingsverschijnselen van geometrie 3 v2 zijn (lokaal) veranderd ten opzichte van geometrie 3.

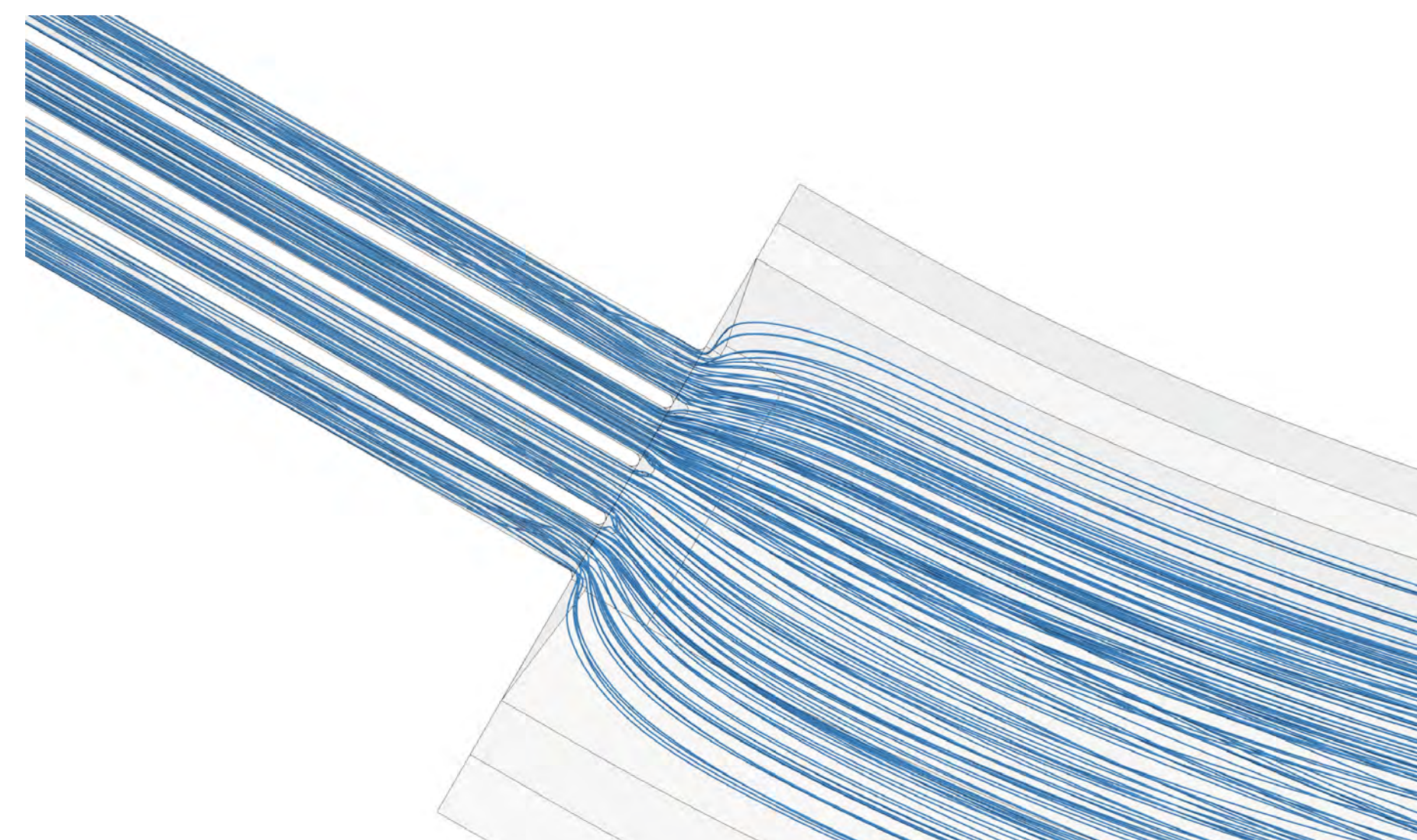
Rond de inlaat van de duiker komt de stroming sterk overeen met de stroming in geometrie 3 zoals getoond in figuur 3.34.

Verder afwaarts in de duiker is het loslaat gebied gereduceerd als gevolg van de minder steile verlaging en de afronding aan de koker zoals te zien in figuur 3.36. Hierdoor komen er minder hoge snelheden voor in de verlaging zoals te zien in figuur 3.38. Ook laat figuur 3.39 zien dat de rotatie in de stroming is afgenomen.

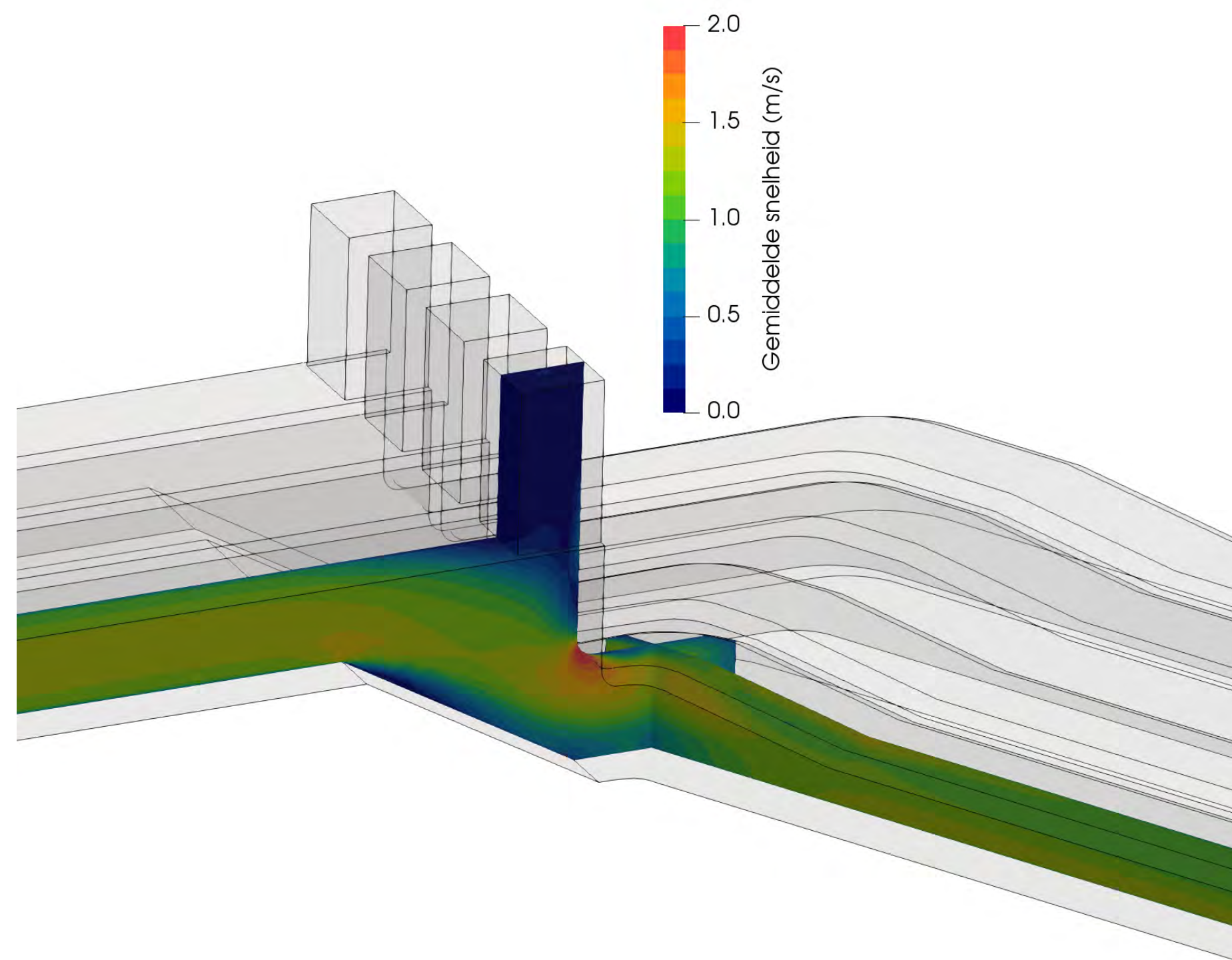
Verderop in de duiker komt de stroming weer sterk overeen met geometrie 3 (figuur 3.40).



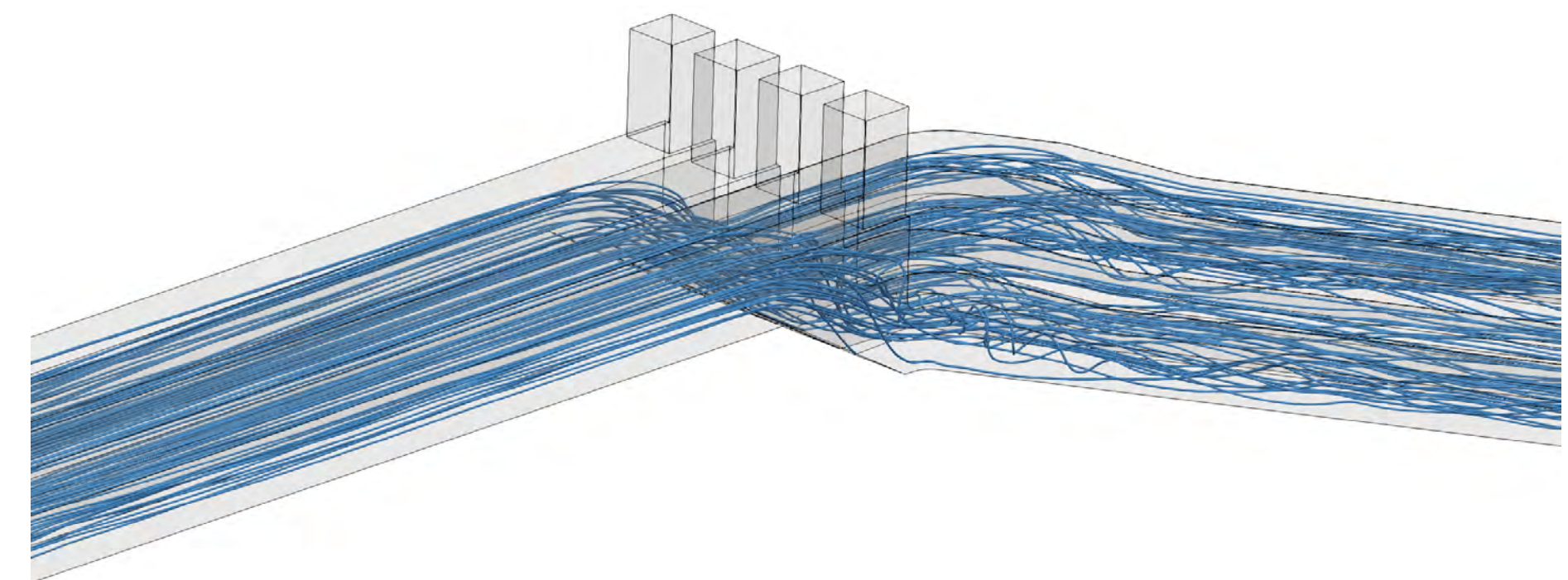
— **Figuur 3.34:** Snelheid duiker inlaat, geometrie 3 v2



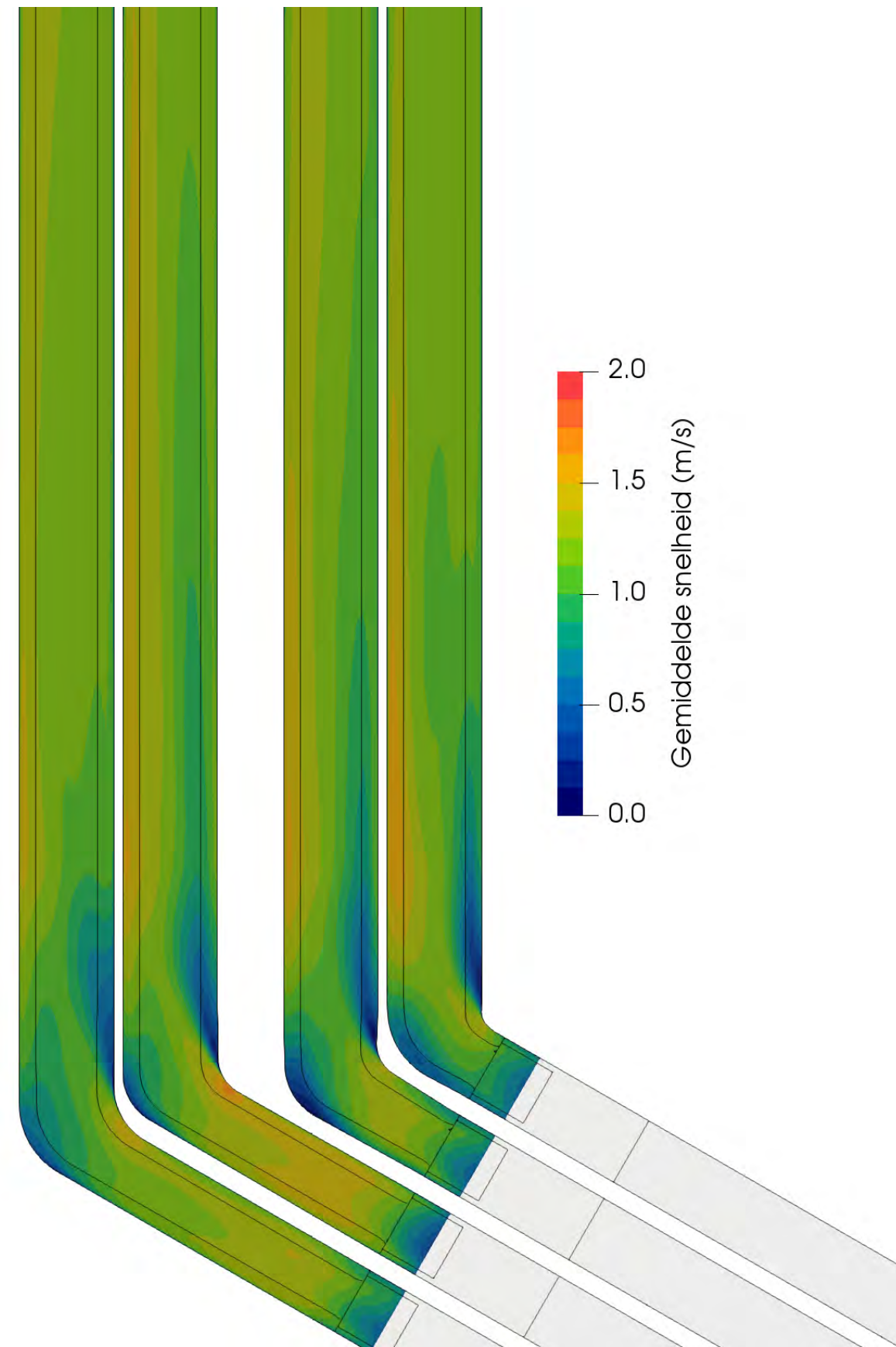
— **Figuur 3.35:** Stroombanen duiker inlaat, geometrie 3 v2



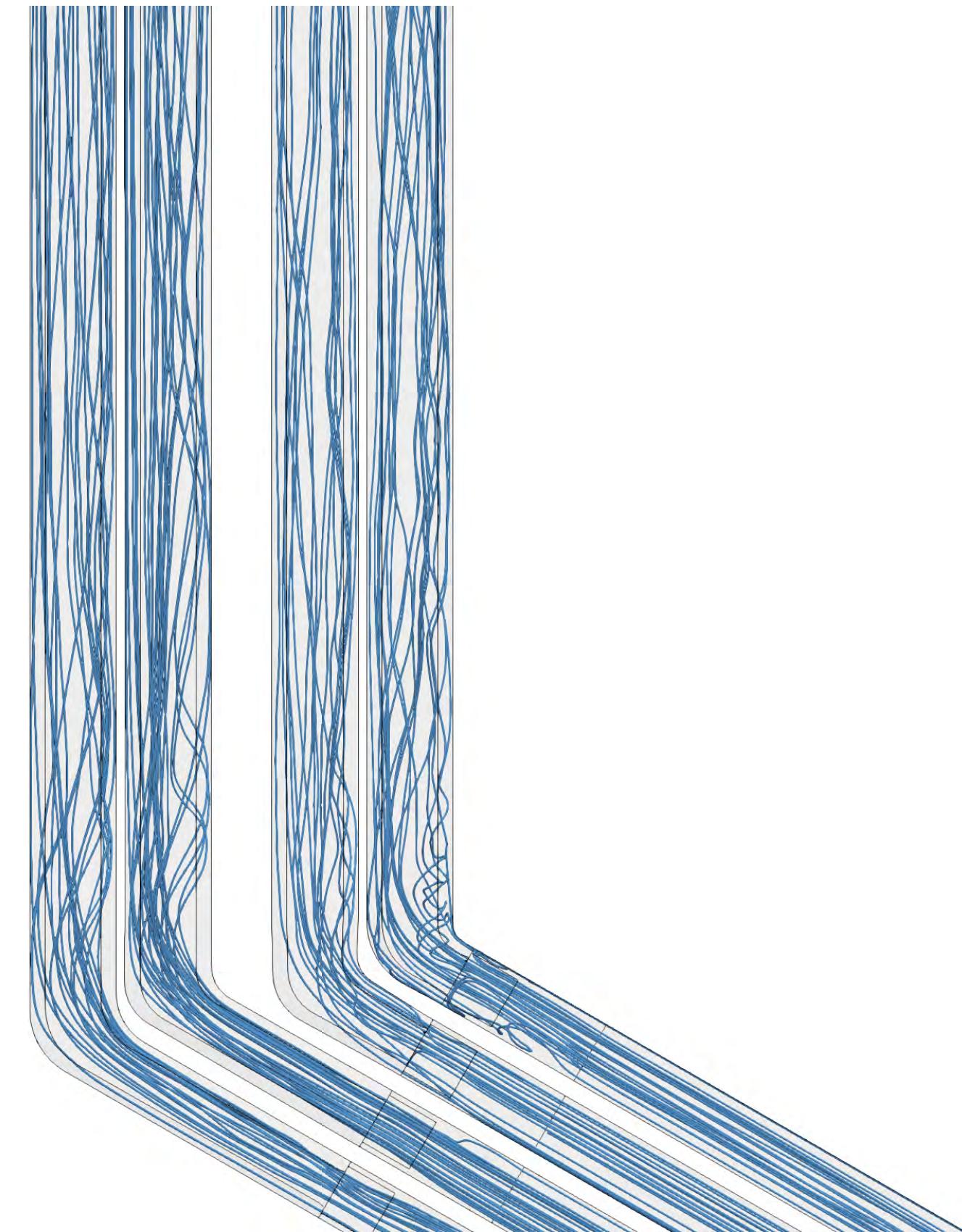
— **Figuur 3.36:** Snelheid duiker overgang, geometrie 3 v2



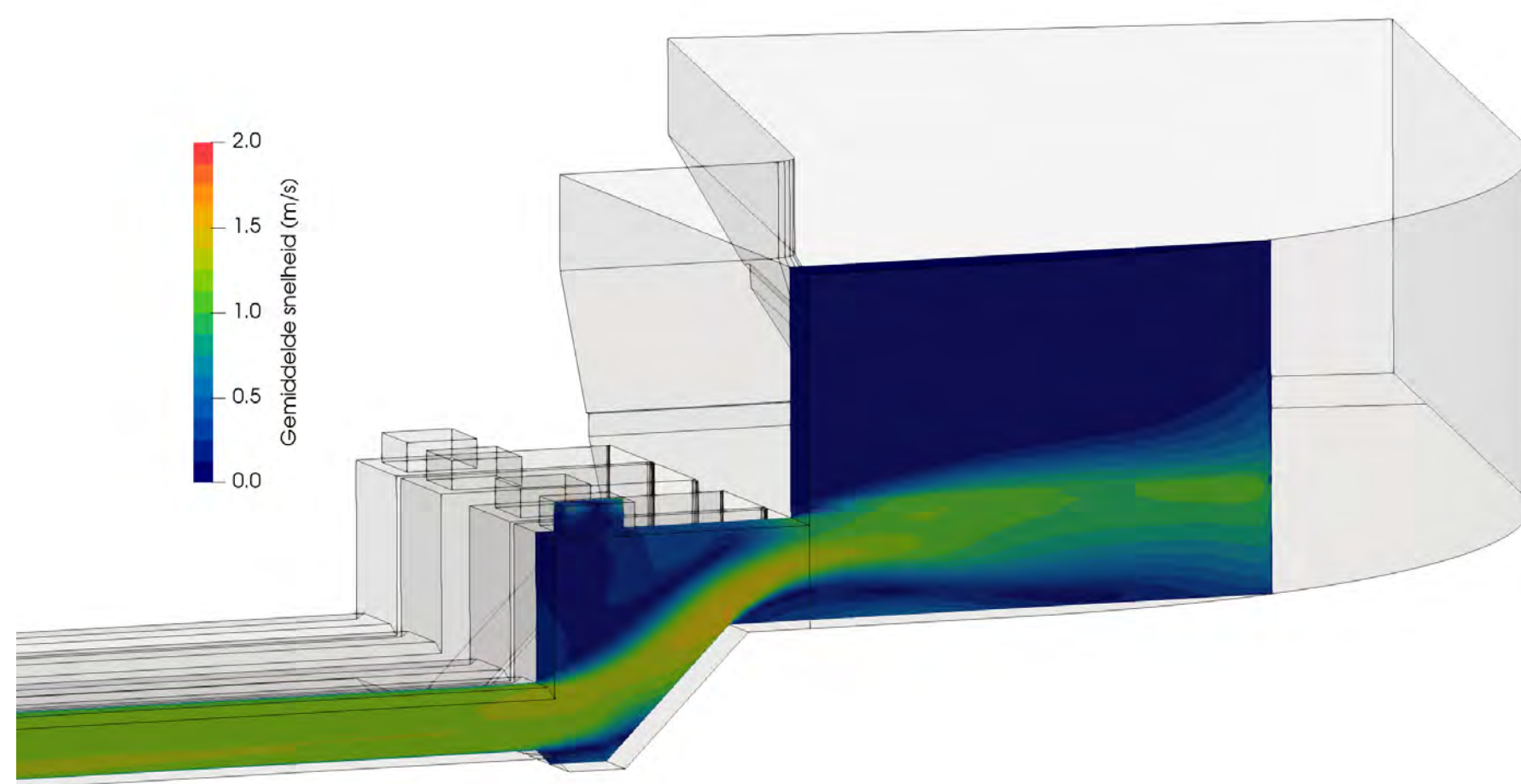
— **Figuur 3.37:** Stroombanen duiker overgang, geometrie 3 v2



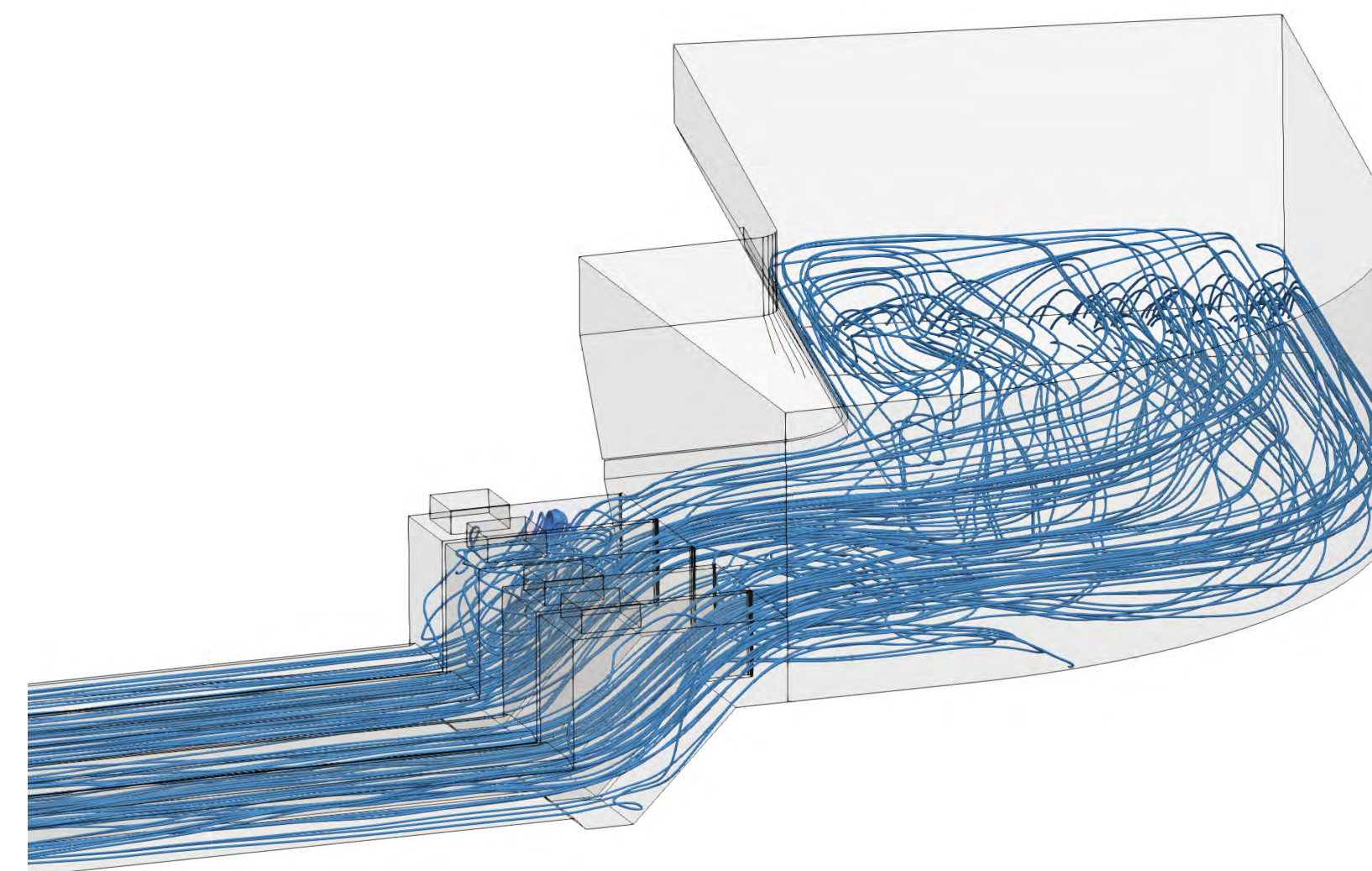
— **Figuur 3.38:** Snelheid duiker laag deel, geometrie 3 v2



— **Figuur 3.39:** Stroombanen duiker laag deel, geometrie 3 v2



— **Figuur 3.40:** Snelheid duiker uitlaat, geometrie 3 v2



— **Figuur 3.41:** Stroombanen duiker uitlaat, geometrie 3 v2

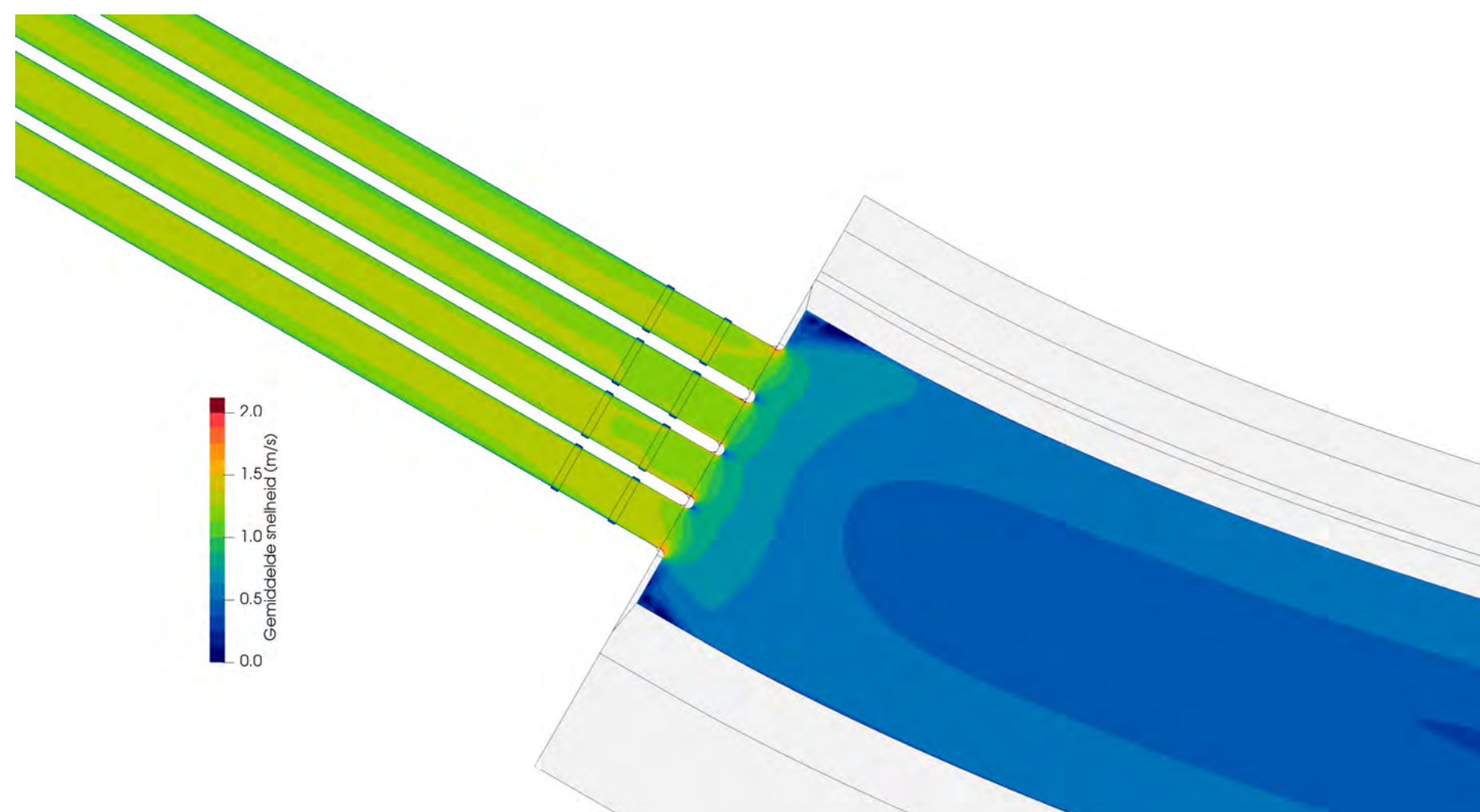
3.3.6 Geometrie 3 v3

De stromingsverschijnselen van geometrie 3 v3 zijn (lokaal) veranderd ten opzichte van de vorige versie van geometrie 3.

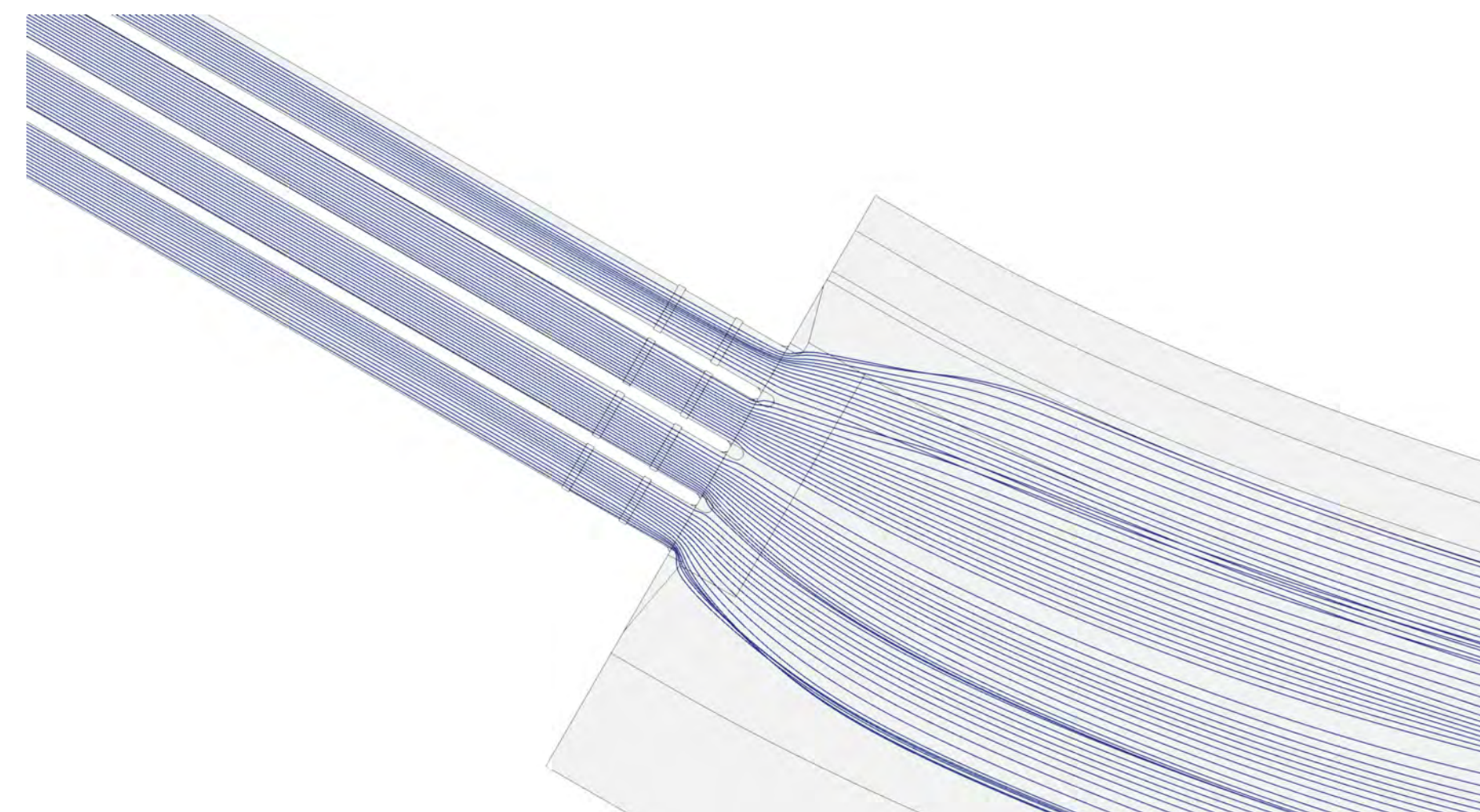
Rond de inlaat van de duiker komt de stroming sterk overeen met de stroming in geometrie 3 zoals getoond in figuur 3.42.

Hoewel er geen aanpassing doorgevoerd is nabij de overgang naar de verlaging is hier toch een toename aanwezig van het loslaatgebied, zoals te zien is in figuur 3.44. Er is geen noemenswaardig verschil in rotatie zichtbaar in figuur 3.45 en ook de snelheden en het stromingspatroon door de verlaging zijn weinig verandert, zie figuren 3.46 en 3.47.

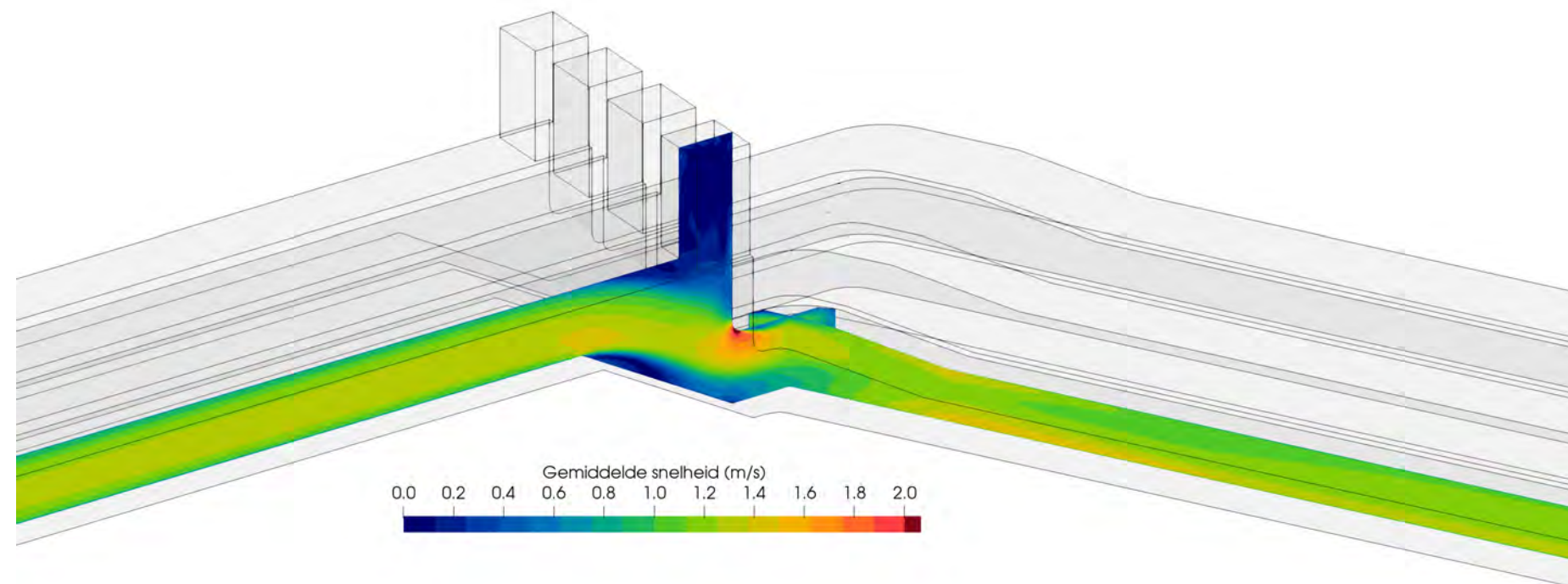
De geometrie-aanpassing bij de verhoging aan het einde van de duiker zorgen voor een verlaging van de aldaar optredende maximale stroomsnelheid, zie 3.48. Ook is het stromingspatroon minder chaotisch, zie figuur 3.49.



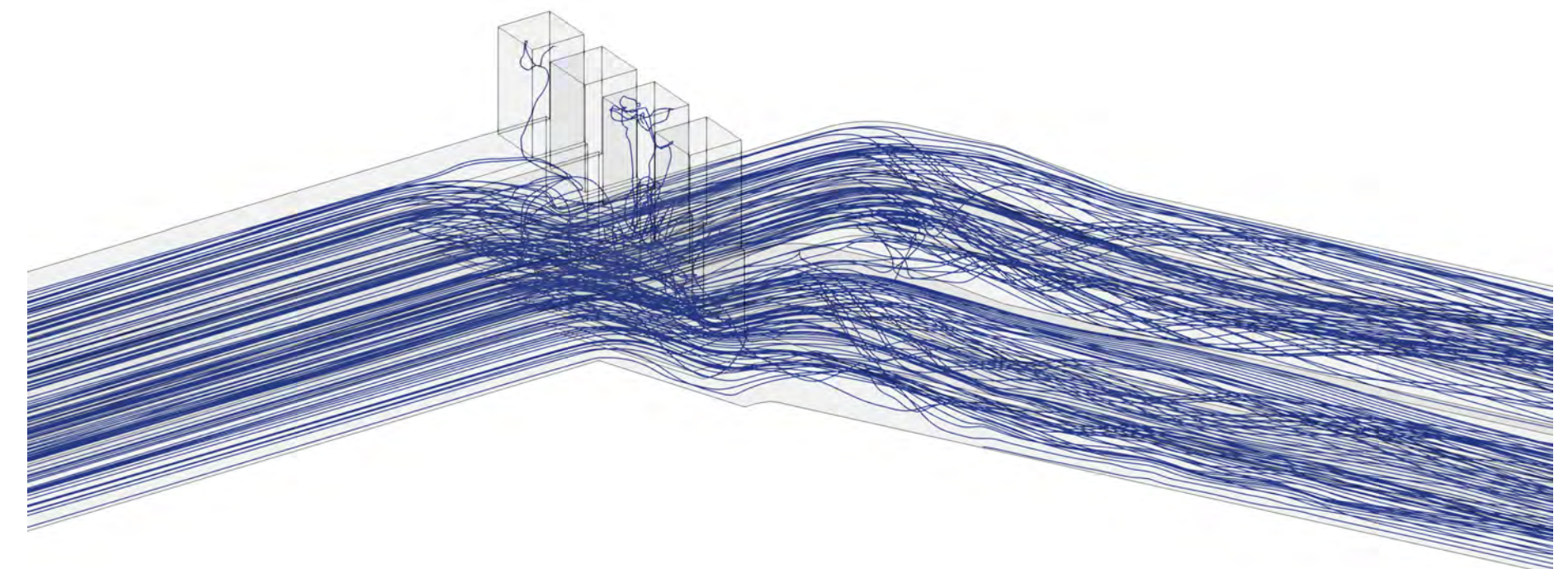
— **Figuur 3.42:** Snelheid duiker inlaat, geometrie 3 v3



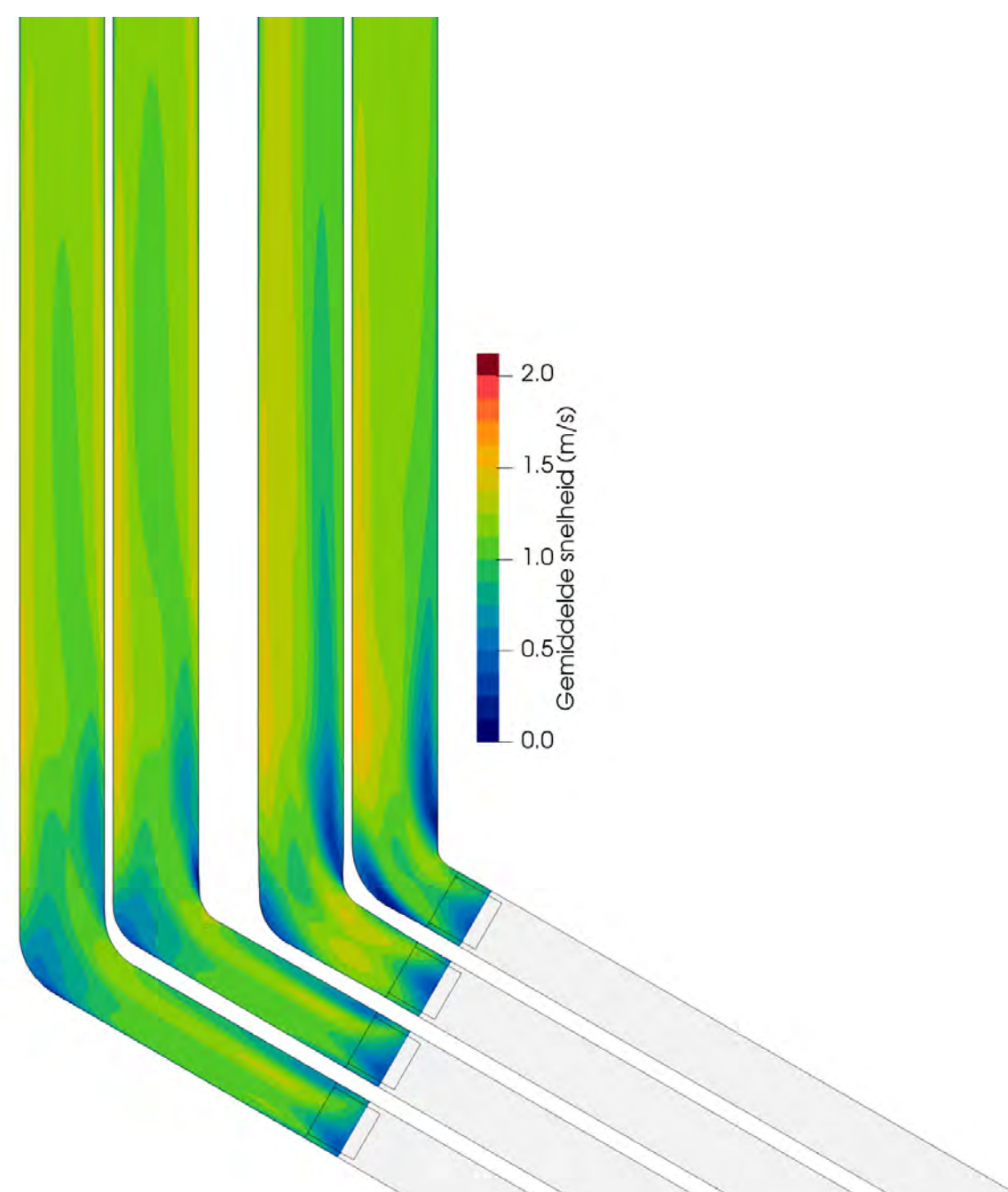
— **Figuur 3.43:** Stroombanen duiker inlaat, geometrie 3 v3



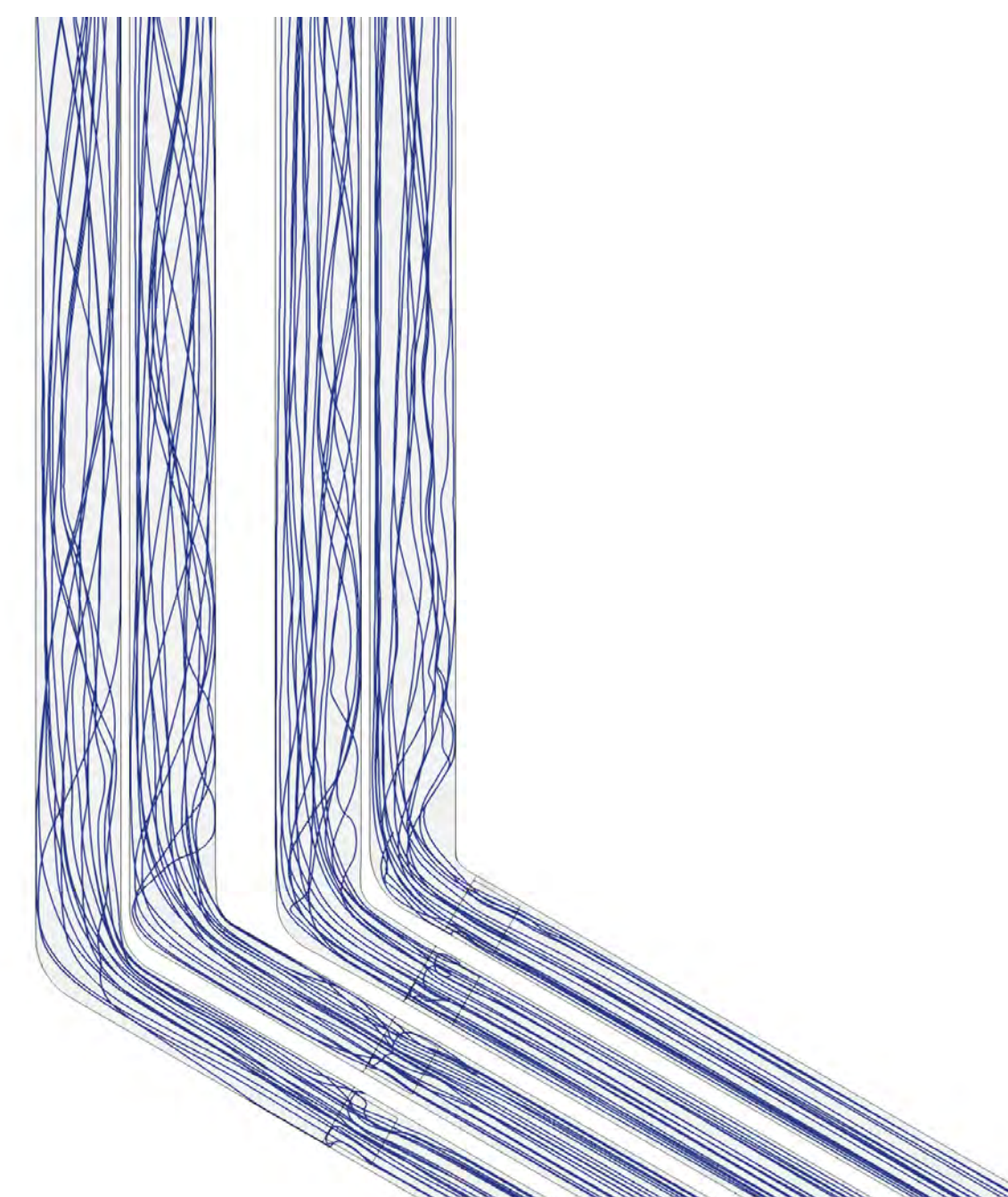
— **Figuur 3.44:** Snelheid duiker overgang, geometrie 3 v3



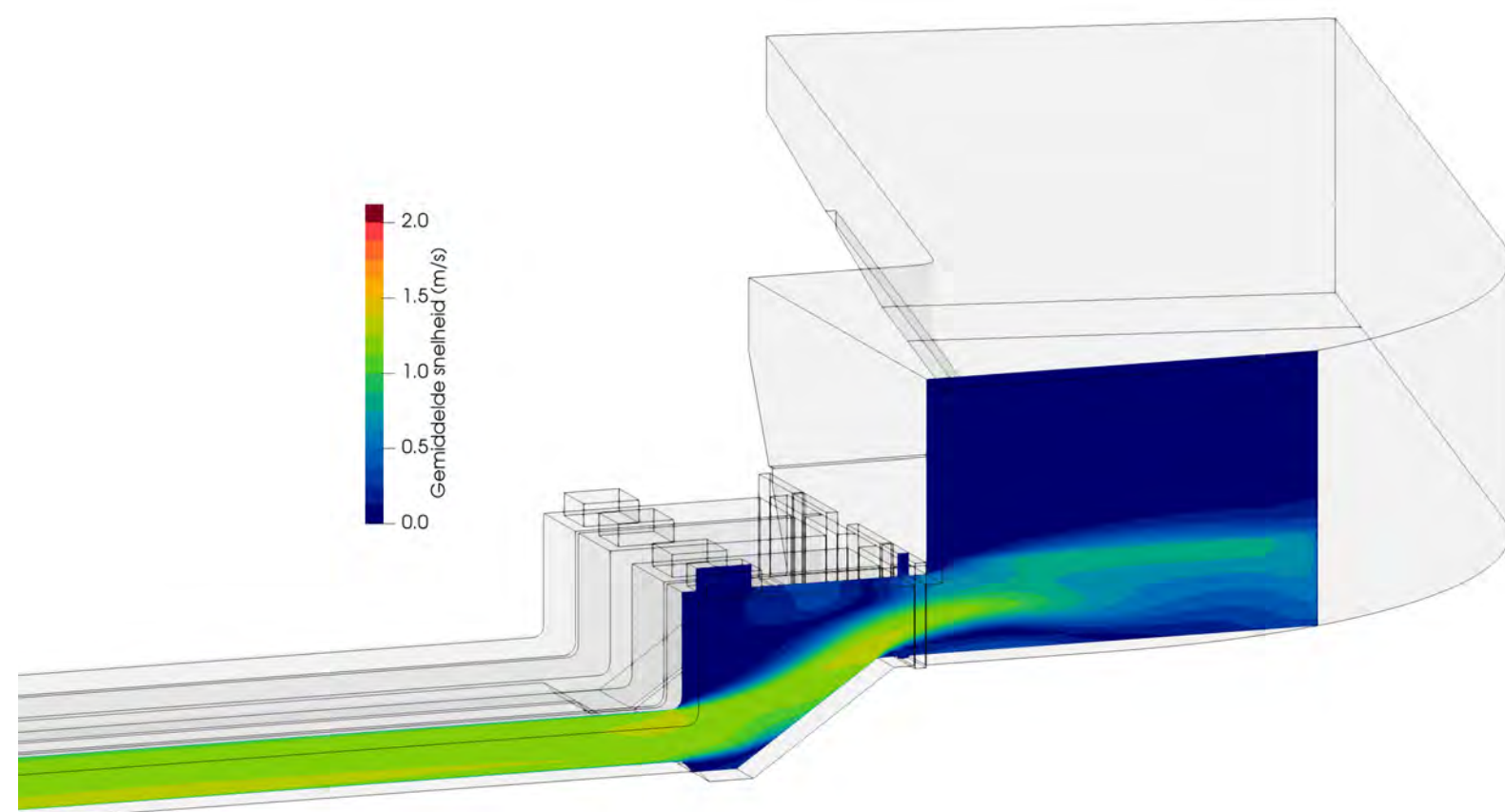
— **Figuur 3.45:** Stroombanen duiker overgang, geometrie 3 v3



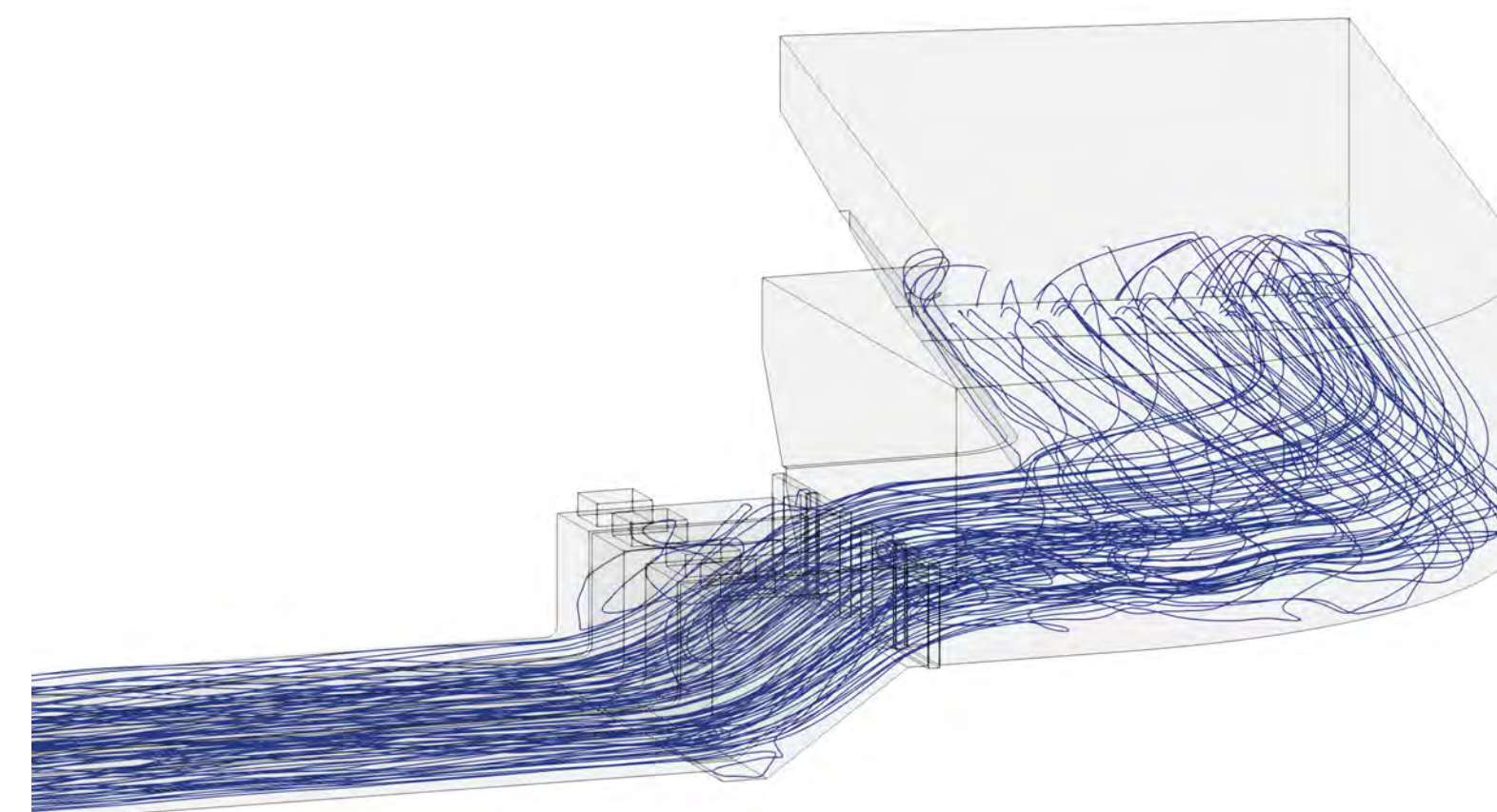
— **Figuur 3.46:** Snelheid duiker laag deel, geometrie 3 v3



— **Figuur 3.47:** Stroombanen duiker laag deel, geometrie 3 v3



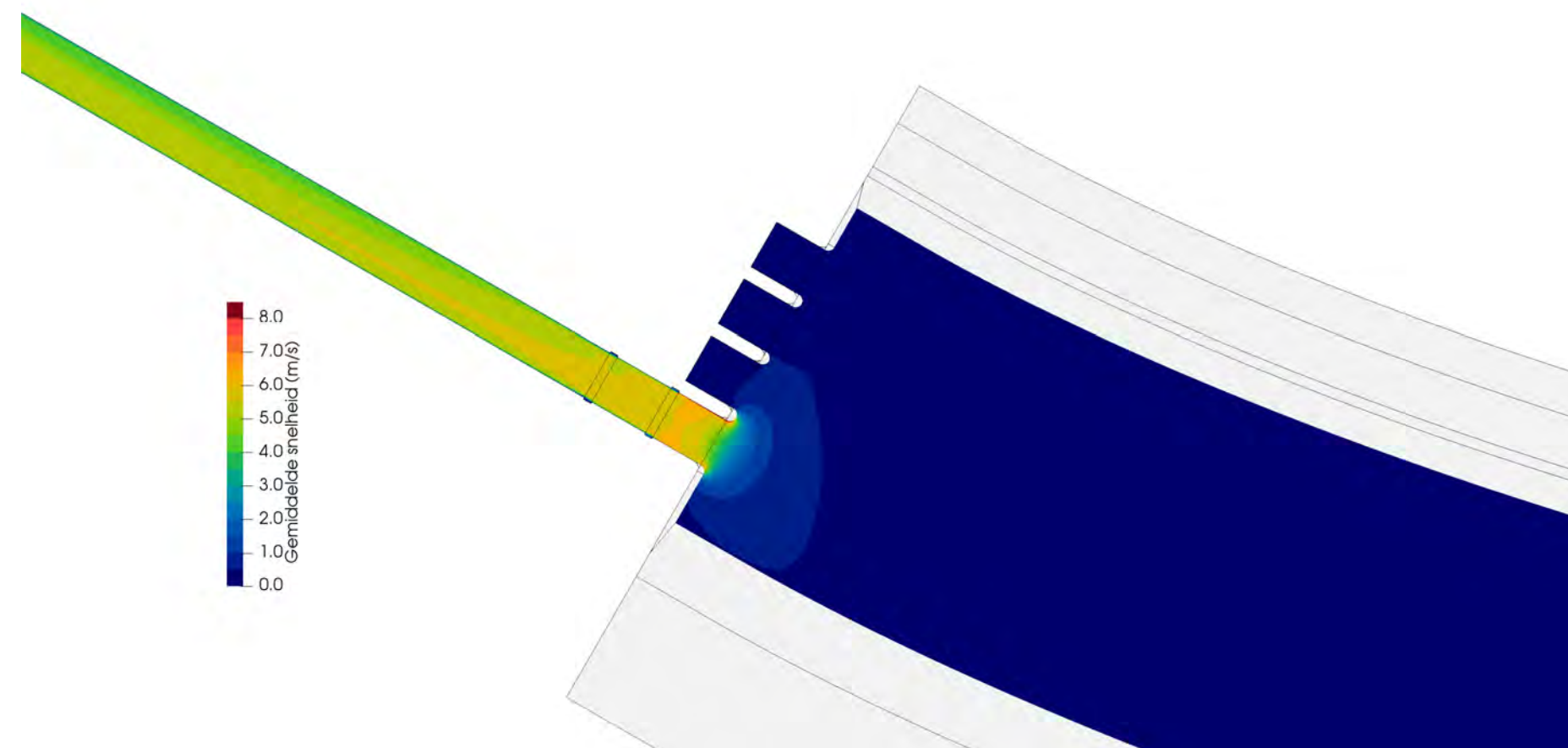
— **Figuur 3.48:** Snelheid duiker uitlaat, geometrie 3 v3



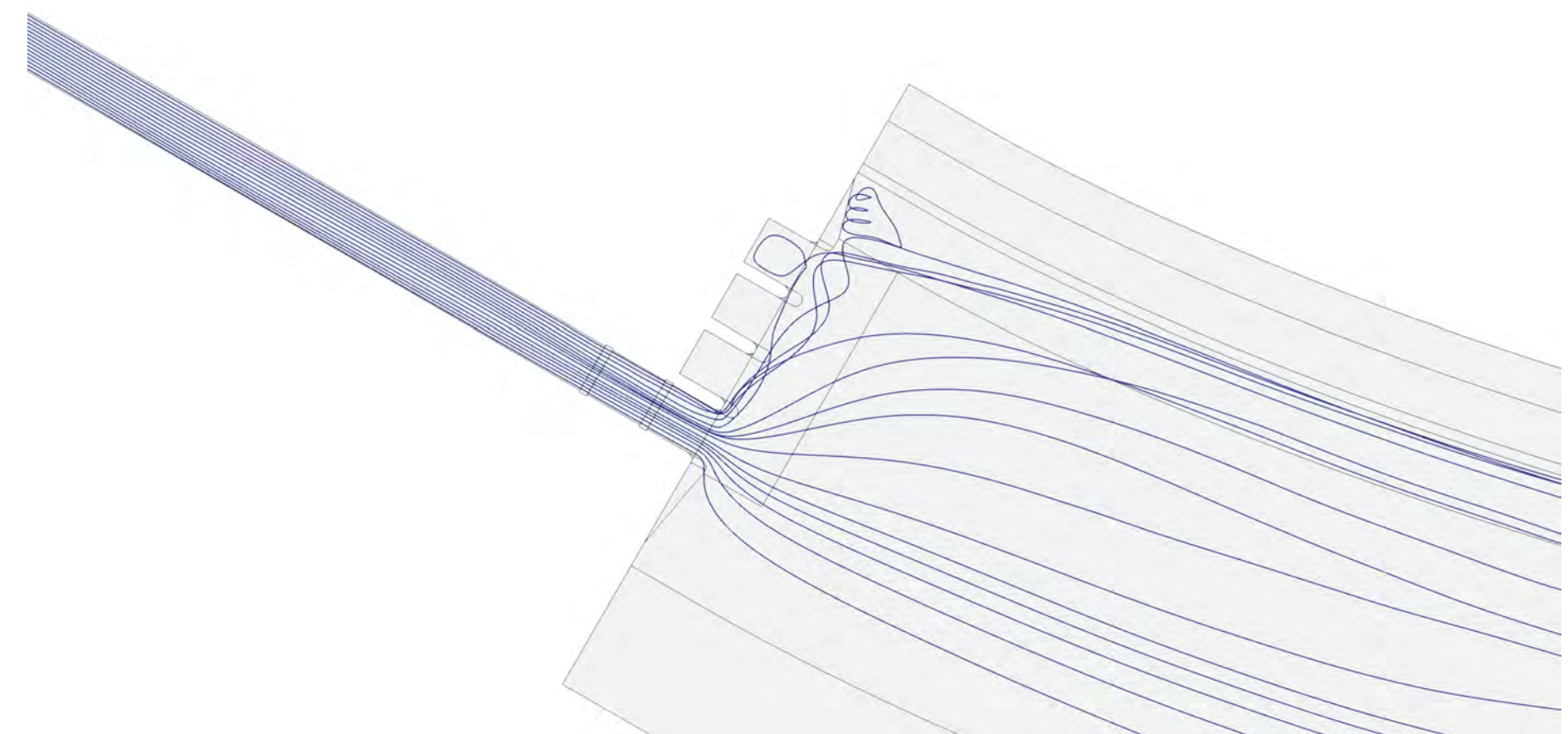
— **Figuur 3.49:** Stroombanen duiker uitlaat, geometrie 3 v3

3.3.7 Geometrie 3 v3 - 1 koker

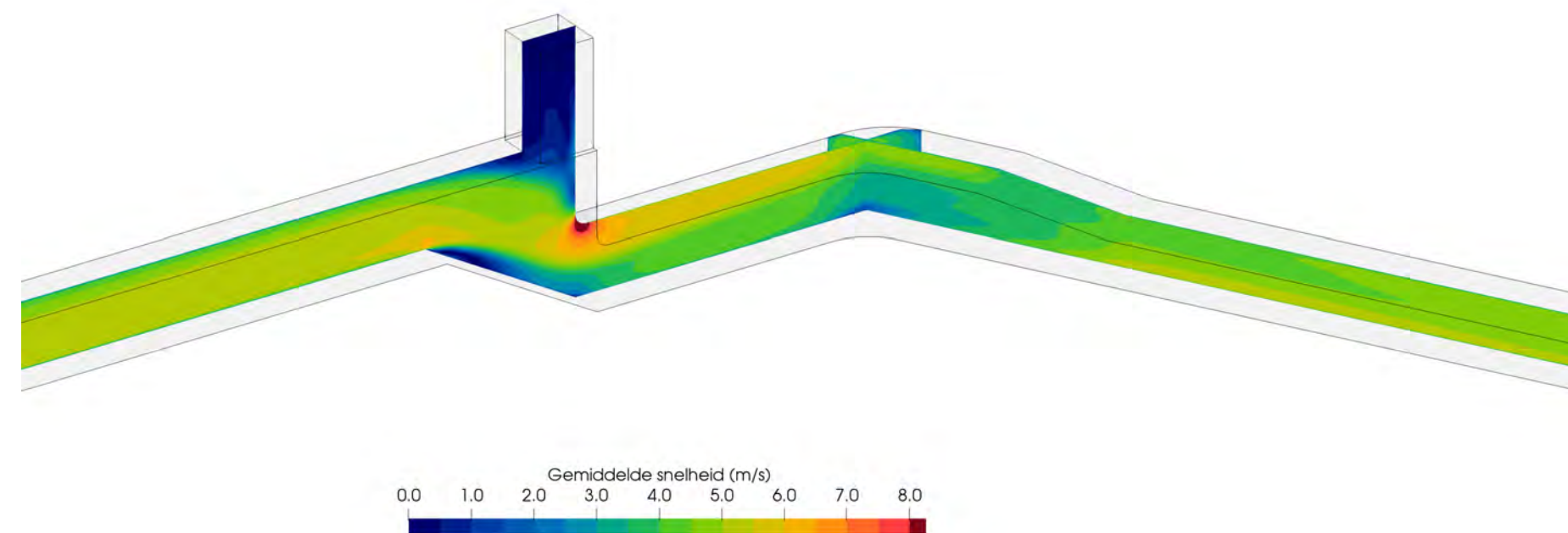
Het afsluiten van drie kokers verviervoudigd de snelheid in de opgehouden koker, maar het stromingspatroon in deze koker verandert hierdoor weinig. Vanzelfsprekend verandert het stromingsbeeld bij de in- en uitlaten wel. De optredende snelheden en stromingspatronen zijn weergegeven in figuur 3.50 tot en met 3.57.



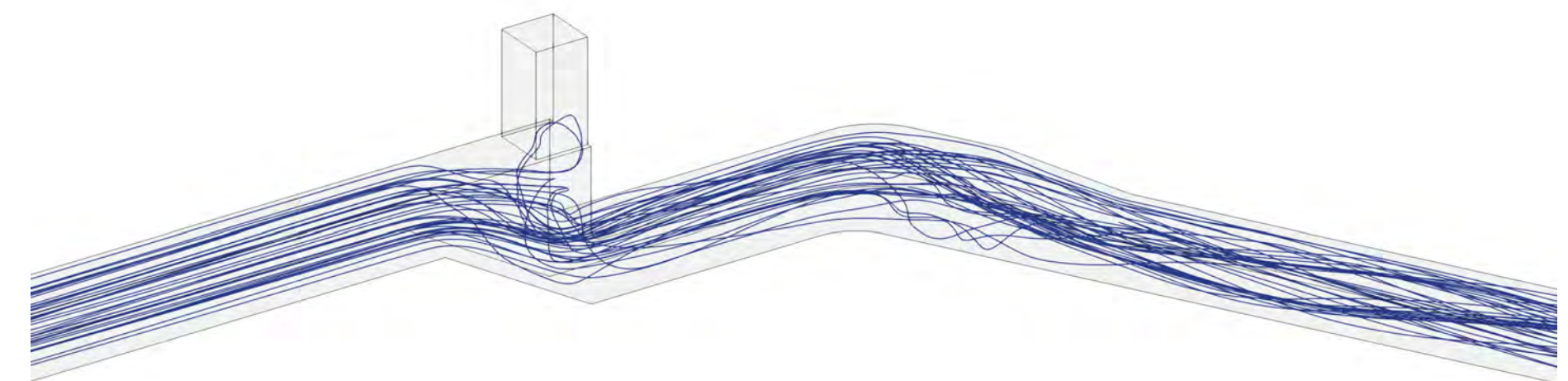
— **Figuur 3.50:** Snelheid duiker inlaat, geometrie 3 v3 - 1 koker



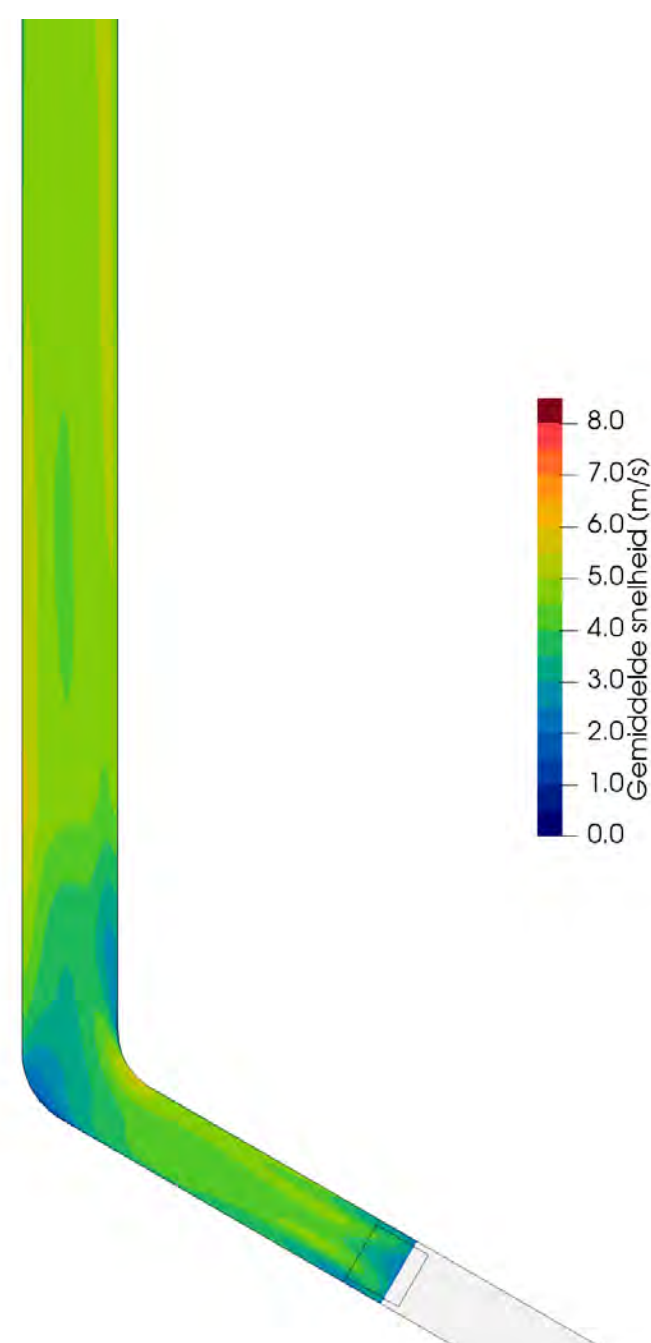
— **Figuur 3.51:** Stroombanen duiker inlaat, geometrie 3 v3 - 1 koker



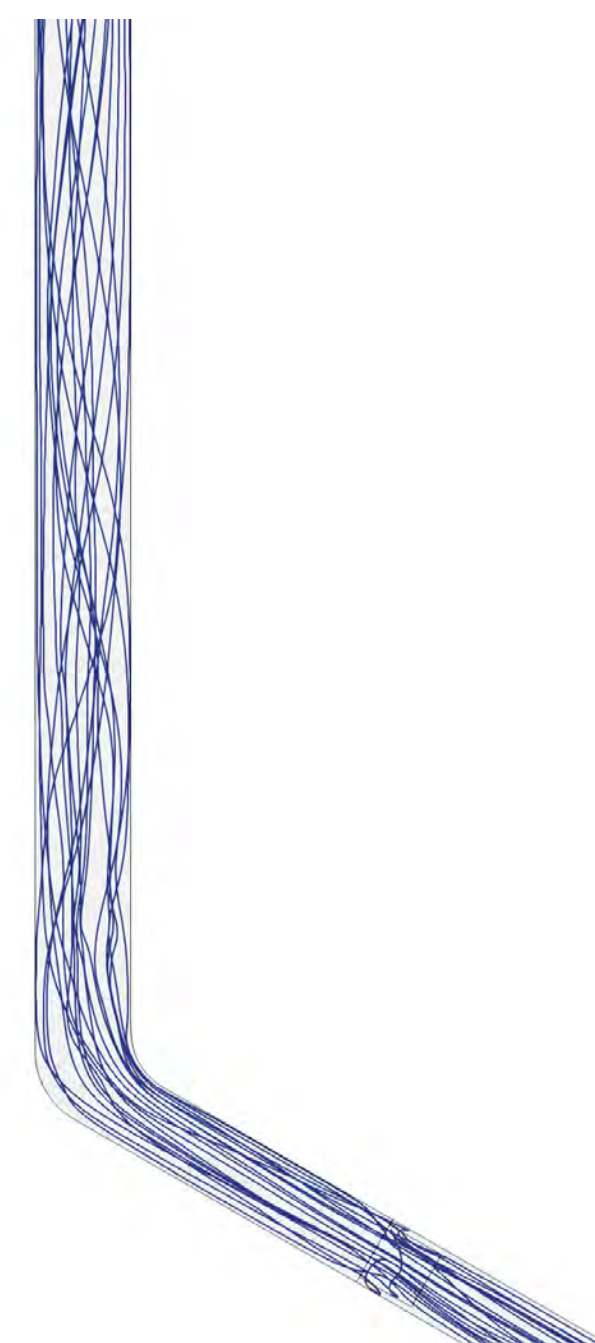
— **Figuur 3.52:** Snelheid duiker overgang, geometrie 3 v3 - 1 koker



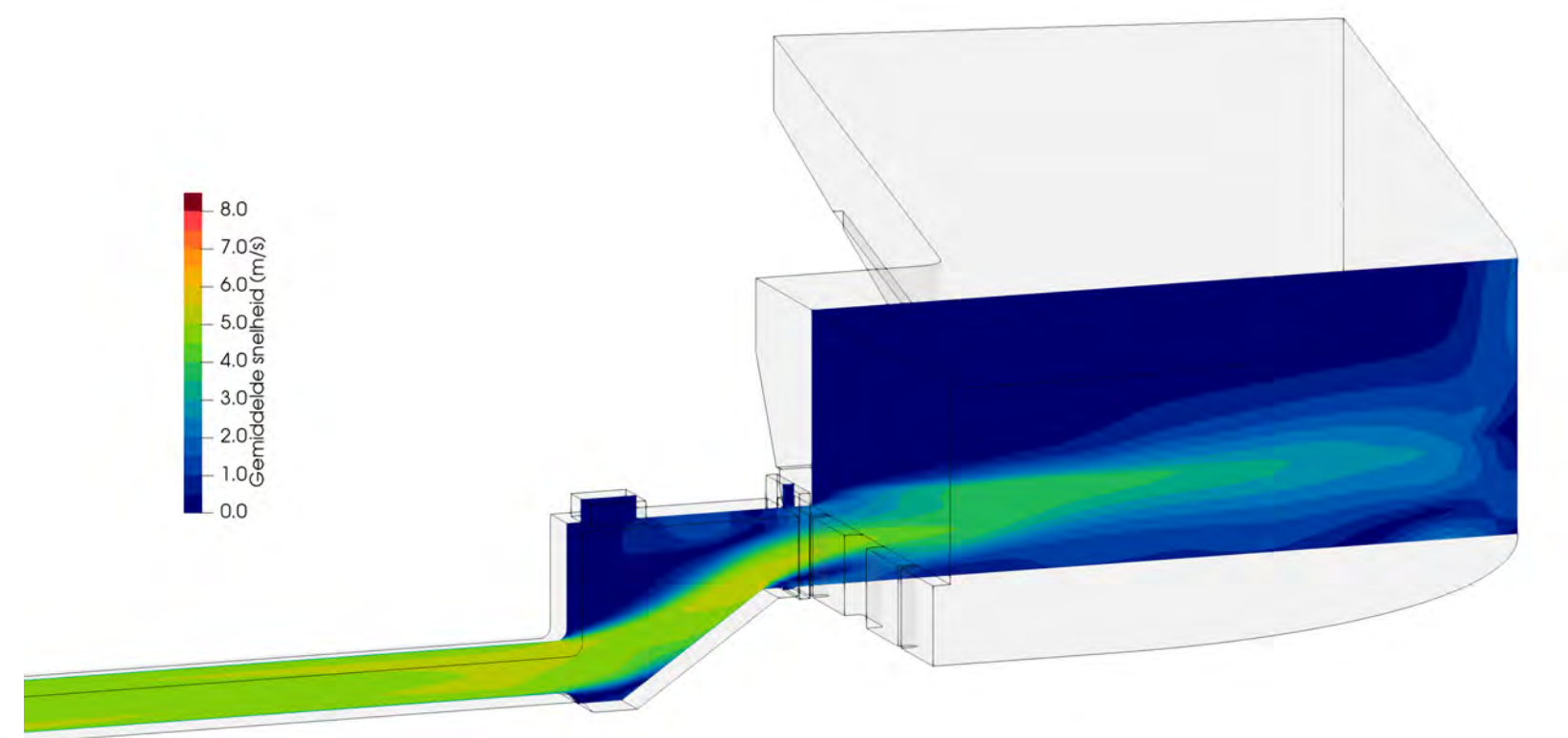
— **Figuur 3.53:** Stroombanen duiker overgang, geometrie 3 v3 - 1 koker



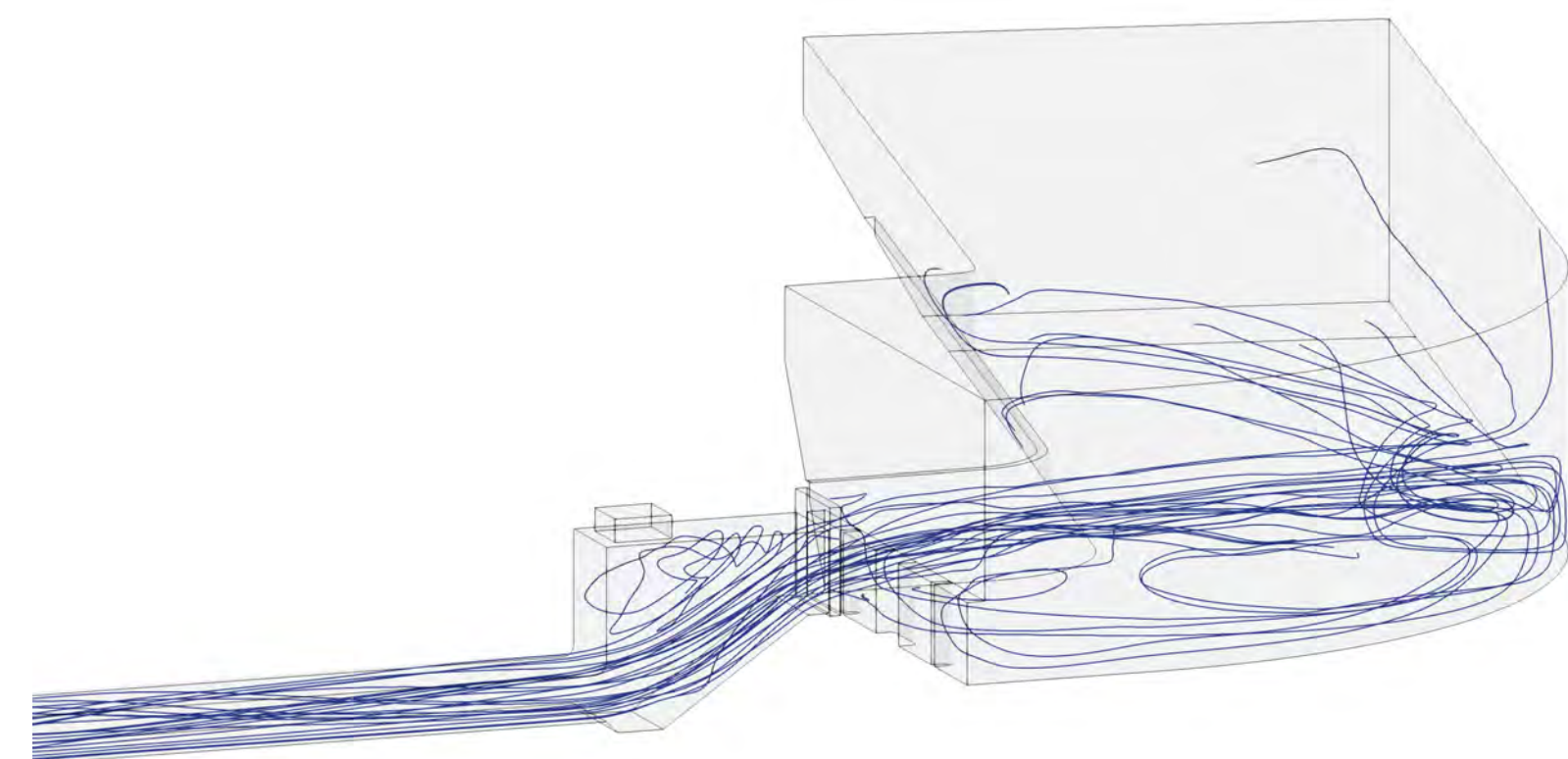
— **Figuur 3.54:** Snelheid duiker laag deel, geometrie 3 v3 - 1 koker



— **Figuur 3.55:** Stroombanen duiker laag deel, geometrie 3 v3 - 1 koker



— **Figuur 3.56:** Snelheid duiker uitlaat, geometrie 3 v3 - 1 koker



— **Figuur 3.57:** Stroombanen duiker uitlaat, geometrie 3 v3 - 1 koker

4 Conclusies en aanbevelingen

In dit hoofdstuk worden conclusies getrokken met betrekking tot de resultaten van de CFD simulaties van de geometrie varianten van de te vervangen duiker in de Zenne.

4.1 Conclusies

- Ten opzichte van het waterpeil van 30,10 mTAW in de opwaartse bedding van de huidige duiker, wordt het waterpeil in de opwaartse bedding met respectievelijk 0,14 en 0,02 m verhoogd door geometrie 2 en geometrie 3.
- Het toegenomen waterpeil is het resultaat van hogere drukverliezen in de duiker. De totale verliescoëfficiënt van de duiker neemt met respectievelijk 82,9% en 36,9% toe voor geometrie 2 en geometrie 3.
- Specifiek voor geometrie 3 wordt een deel van de toegenomen verliescoëfficiënt gecompenseerd door het ontbreken van het langste deel van de duiker. Bij geometrie 2 is deze echter wel aanwezig.
- De toename van de verliescoëfficiënten komt voornamelijk door scherpe overgangen tussen de hoger gelegen delen van de duiker en het lager gelegen deel. Bij deze scherpe overgangen zijn loslaat gebieden waargenomen. Ook de scherpere bochten in geometrieën 2 en 3 zorgen voor veel loslating waardoor de totale verliescoëfficiënt toeneemt. Ook ontstaat er een verschil in debiet per koker. Bij een gelijk debiet per koker zal het totale drukverlies ook lager zijn.

Update 29-5-2019: De volgende conclusie worden getrokken naar aanleiding van de optimalisatie van geometrie 2 en geometrie 3.

- Geometrie 2 v2 toont het gewenste effect door het verminderen van loslating in de eerste koker. Hierdoor ontstaat een betere verdeling van de stroming over de 4 kokers. Hier staat tegenover dat er loslating in de tweede koker bij is gekomen.
- Beide optimalisaties van de varianten hebben het gewenste effect door het verminderen van loslating in het lage deel van de duiker. Hierdoor vinden lokaal minder hoge snelheden plaats.
- Ten opzichte van het waterpeil van 30,24 mTAW in de opwaartse bedding van geometrie 2, wordt het waterpeil met 0,05 m verlaagd door geometrie 2 v2.
Ten opzichte van het waterpeil van 30,12 mTAW in de opwaartse bedding van geometrie 3, wordt het waterpeil met 0,04 m verlaagd door geometrie 3 v2.
- Ten opzichte van geometrie 2 is de verliescoëfficiënt van geometrie 2 v2 met 14,5% afgenomen.
Ten opzichte van geometrie 3 is de verliescoëfficiënt van geometrie 3 v2 met 27,0% afgenomen.

Update 31-10-2019: De volgende conclusie worden getrokken naar aanleiding van de vormaanpassing geometrie 3 v3.

- Geometrie 3 v3 toont een vermindering van loslating aan het einde van het lage deel van de duiker. Hierdoor vinden lokaal minder hoge snelheden plaats.
- Het gemiddelde waterpeil in de opwaartse bedding is +30,03 mTAW, dit is een afname van 0,05 m ten opzichte van de vorige versie.
- Ten opzichte van geometrie 3 v2 is de verliescoëfficiënt met 28,0% afgenomen.

Update 08-11-2019: De volgende conclusie worden getrokken naar aanleiding van het afsluiten van drie kokers in geometrie 3 v3.

- Het gemiddelde waterpeil in de opwaartse bedding is +32,31 mTAW, dit is een toename van 2,28 m ten opzichte van de simulatie met alle vier de kokers open.
- De totale verliescoëfficiënt neemt toe met 19%. Het grootste verlies vindt plaats aan het einde van de duiker (segment 6-7, 39%).

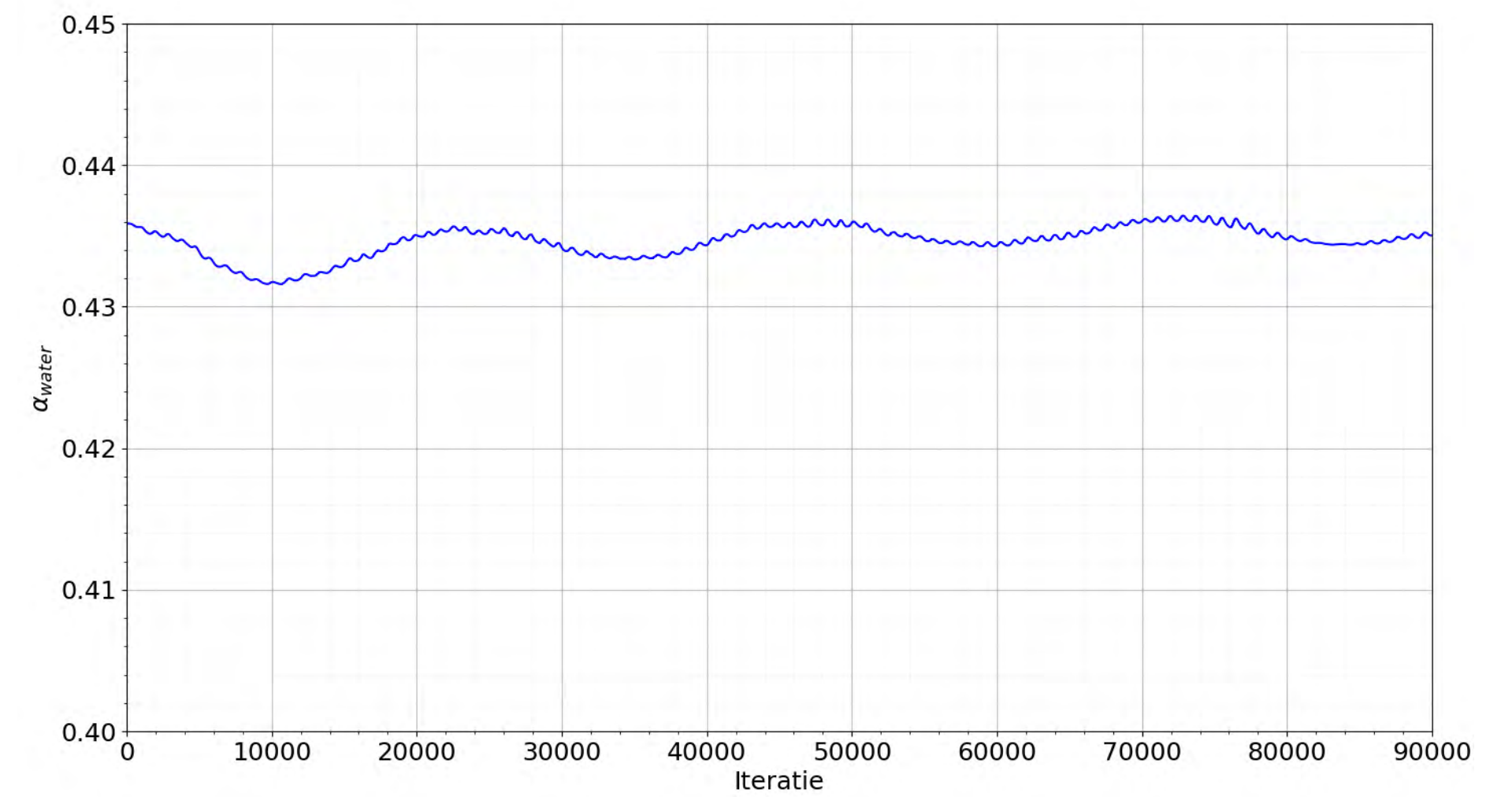
4.2 Aanbevelingen

Op basis van de resultaten wordt geadviseerd om het ontwerp van de nieuwe duiker verder uit te werken op basis van geometrie 3. Geometrie 3 toont de minste toename in opwaarts waterpeil. Deze toename kan verder gereduceerd worden door middel van geometrische aanpassingen van de koker overgangen. Zo zouden scherpe overgangen tussen de verschillende hoogte lagen geleidelijker kunnen verlopen en zou een wat ruimere bocht gebruikt kunnen worden. Wanneer realistisch uitvoerbaar zouden keerschoepen het loslaat gebied nog verder kunnen verkleinen. Met dergelijke aanpassingen zou een minimale toename van het opwaartse waterpeil gerealiseerd kunnen worden.

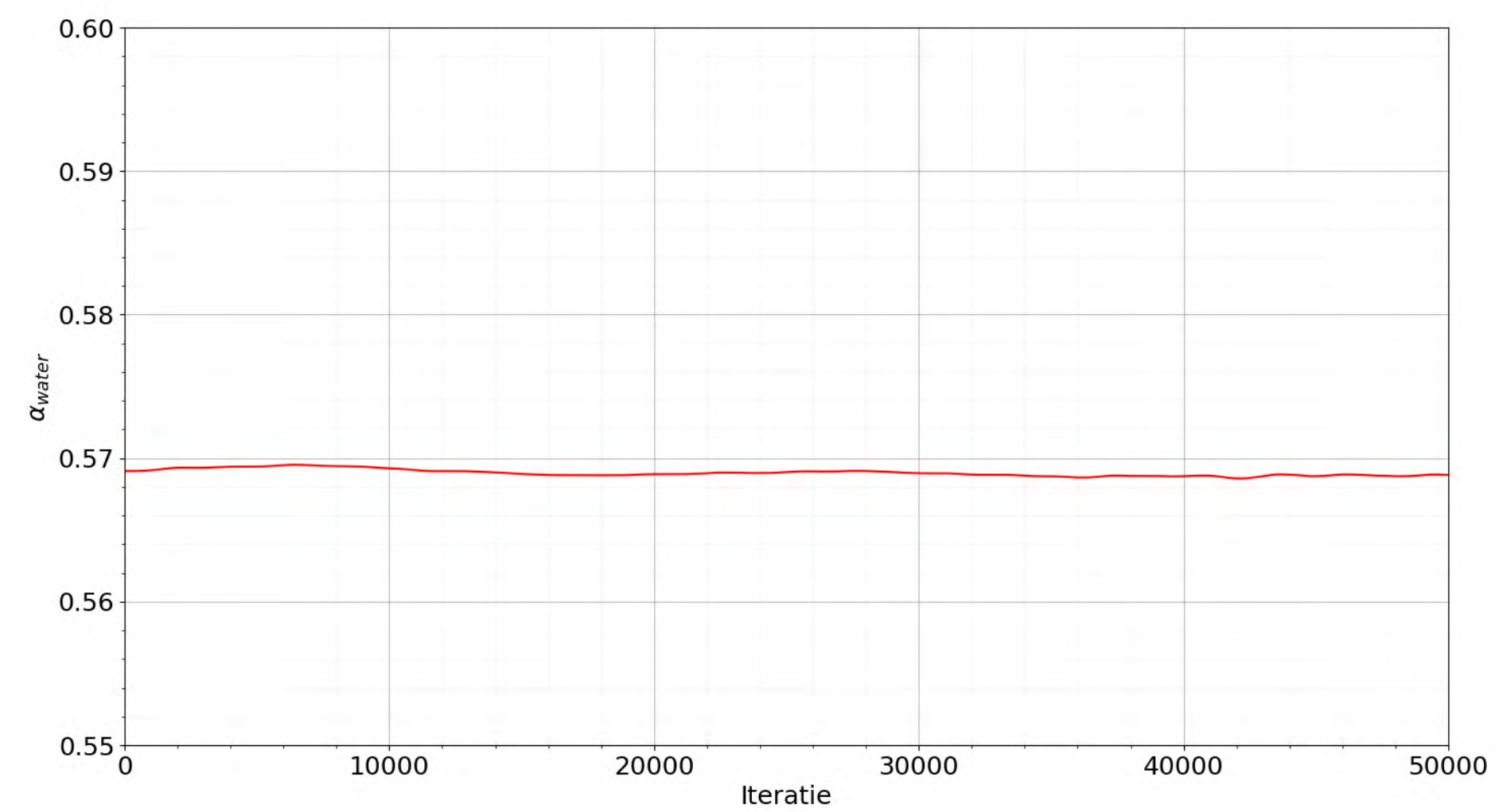
Update 29-5-2019: Op basis van de resultaten wordt wederom aanbevolen om het ontwerp verder te optimaliseren op basis van geometrie 3 (v2). Om de verliezen in de duiker verder te verlagen (als geometrie 3 v2 niet volstaat) wordt geadviseerd om de loslaat gebieden verder te verkleinen of de doorsnede van de kokers te vergroten. Om de loslaat gebieden kleiner te maken zou een nog minder steile verlaging en een grotere afronding aan de bovenkant van de duiker gebruikt kunnen worden. Ook zou de verhoging aan het einde van de duiker minder steil gemaakt kunnen worden.

Update 31-10-2019: Nog altijd zijn er loslaatgebieden aanwezig in de stroming, het voorkomen of verkleinen van deze gebieden zal de verliescoëfficiënten verder doen afnemen. Hiervoor kan gedacht worden aan het verder afvlakken van de verlaging en de verhoging, ook kunnen meer afrondingen toegepast worden.

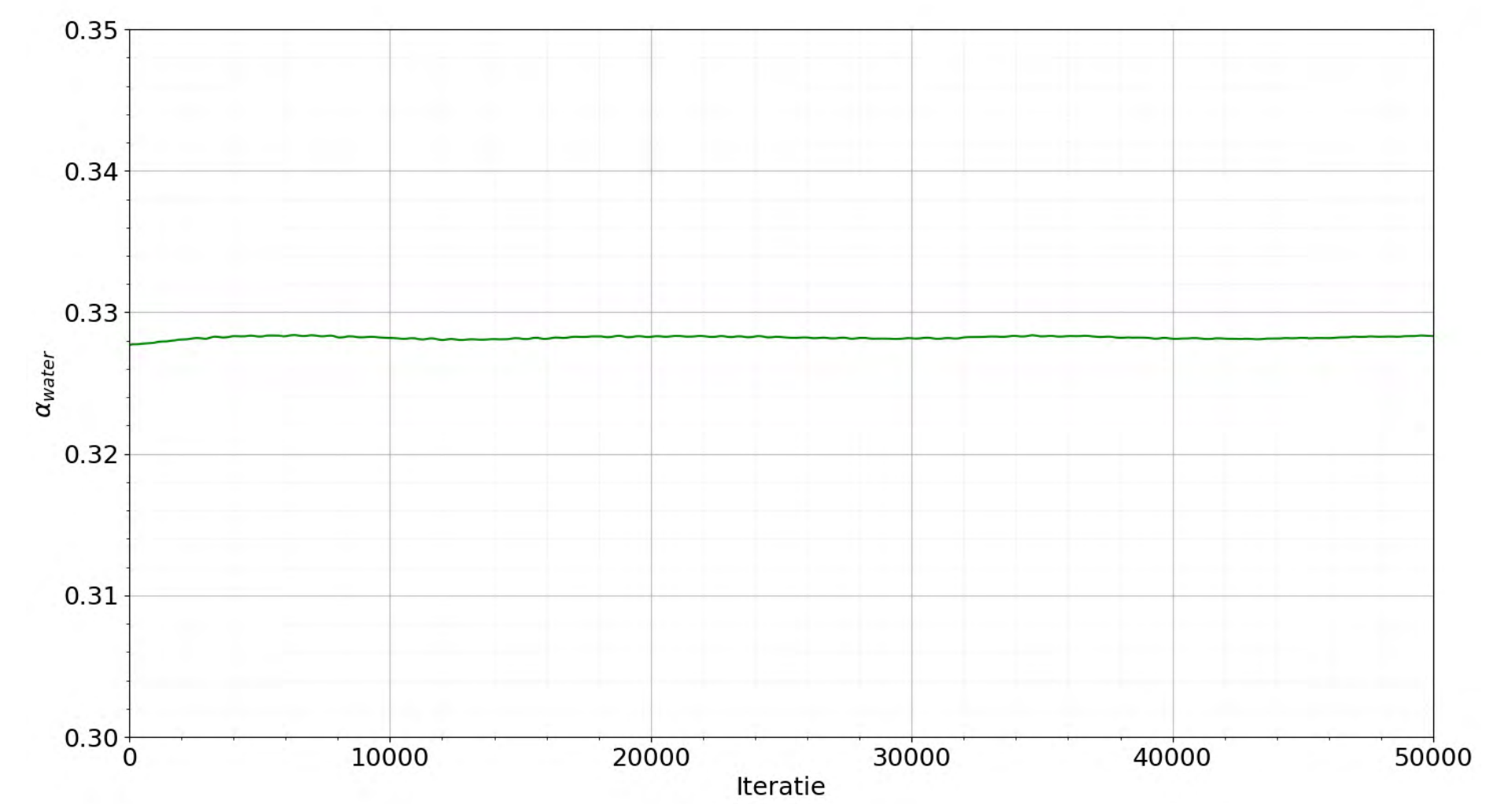
A Convergentie



— Figuur A.1: Fase fractie water, huidige duiker



— **Figuur A.2:** Fase fractie water, geometrie 2



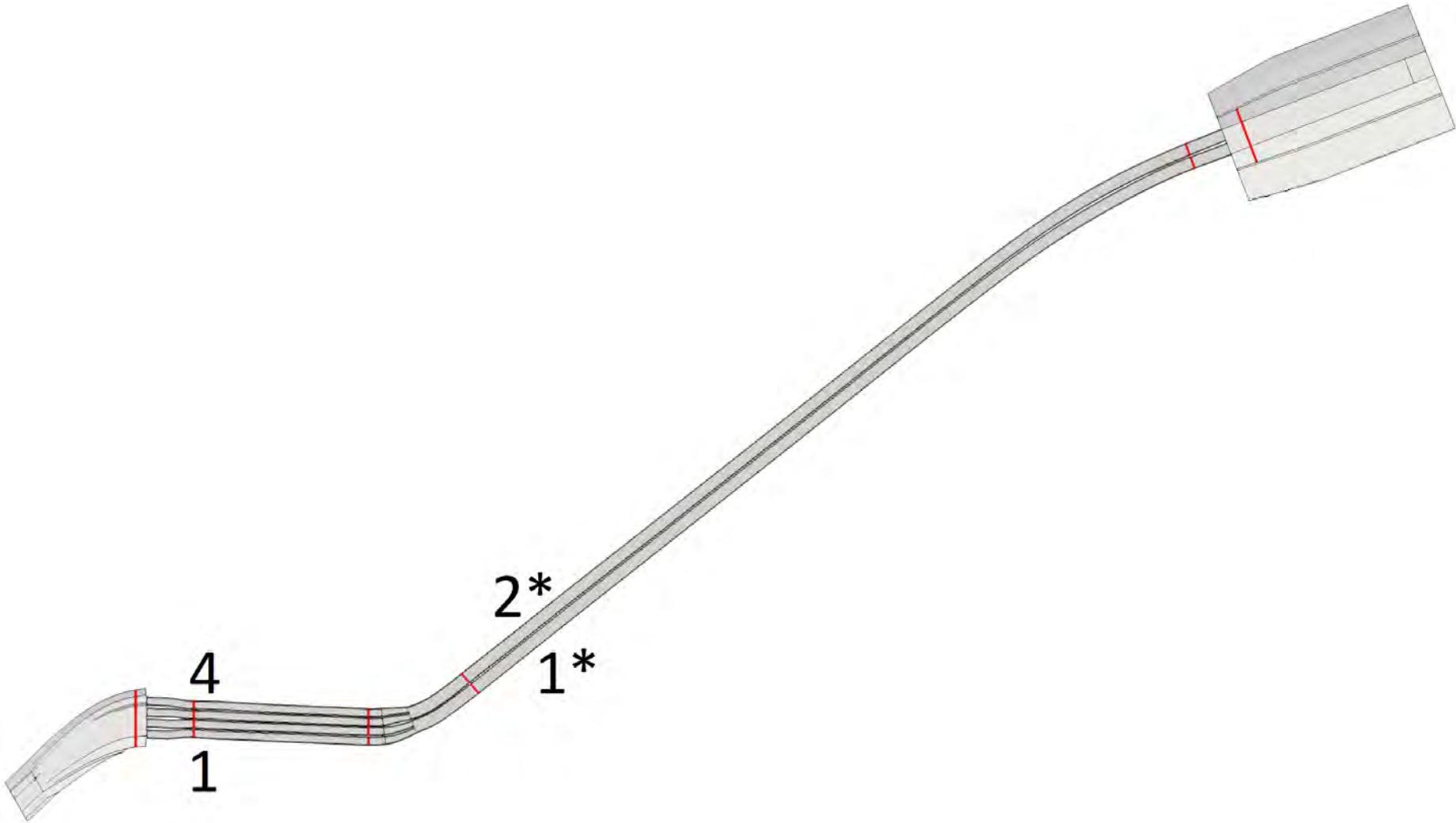
— **Figuur A.3:** Fase fractie water, geometrie 3

B Debiet per koker

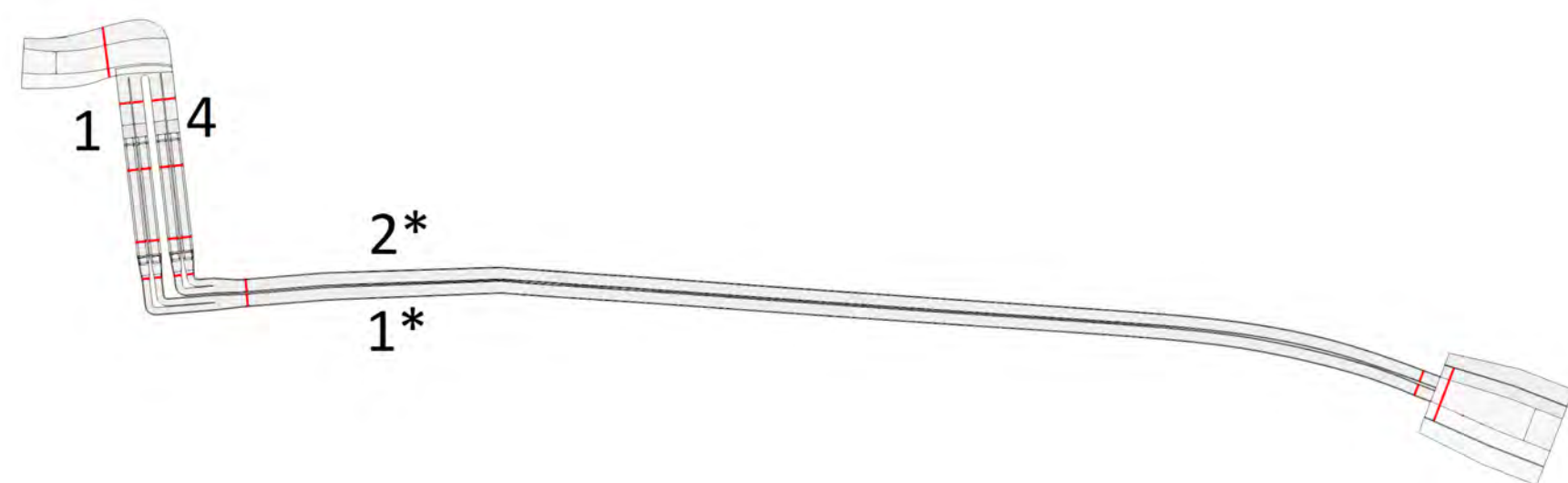
Tabel B.1: Debiet per duiker koker (m³/s)

Geometrie/koker	1	2	3	4	1*	2*
Huidig	10,61	10,07	9,67	11,26	20,68	20,93
Geometrie 2	8,40	10,92	11,17	11,22	19,32	22,39
Geometrie 2 v2	11,06	9,48	10,57	10,80	20,53	21,37
Geometrie 3	10,36	9,94	10,62	10,83	-	-
Geometrie 3 v2	10,56	10,46	10,66	10,70	-	-
Geometrie 3 v3	10,33	10,24	10,51	10,61	-	-

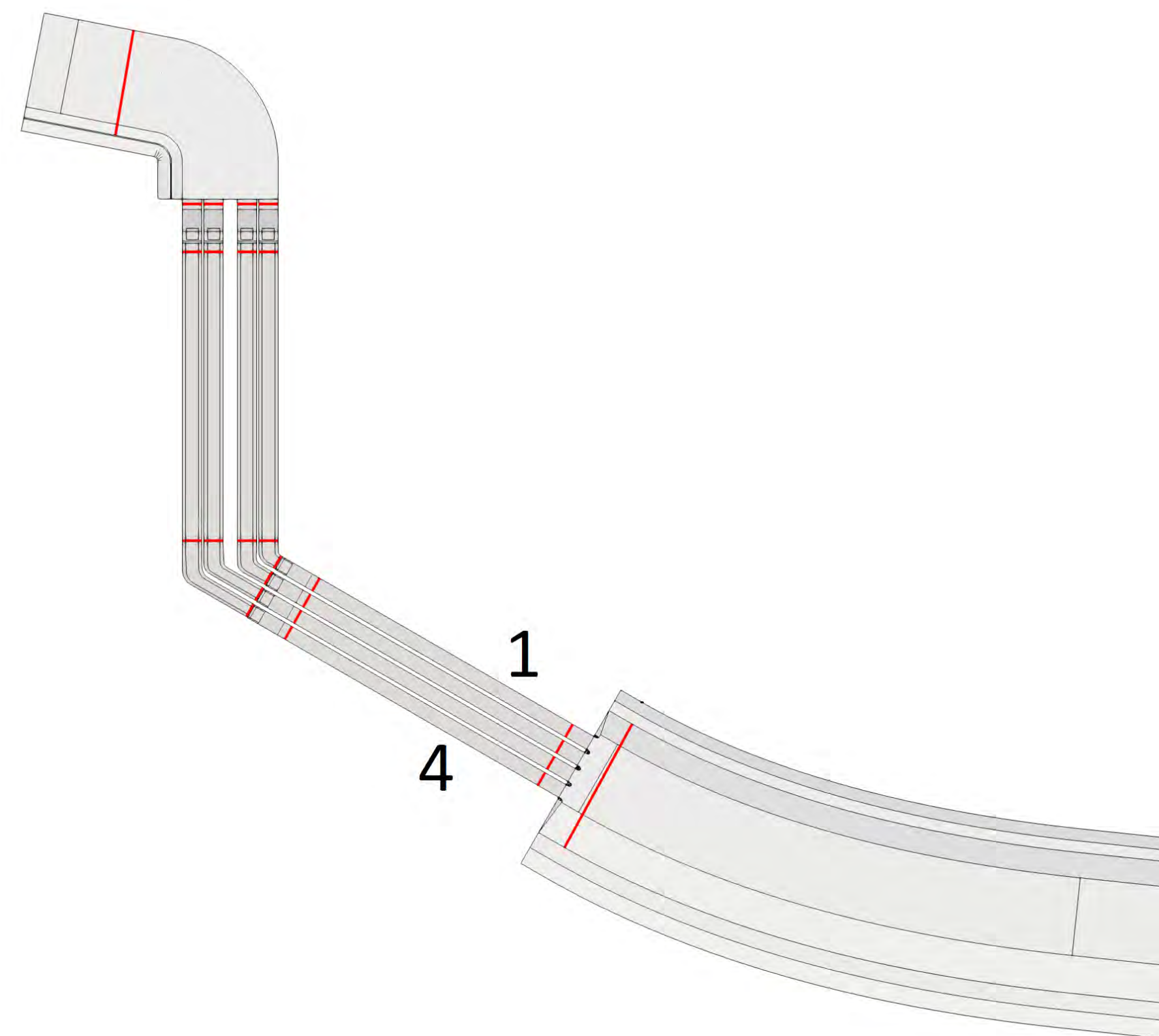
Het debiet per koker voor alle geometrieën is weergegeven in tabel B.1. De nummering van de kokers is weergegeven in figuren B.1 t/m B.3.



Figuur B.1: Koker nummering, huidige duiker



— Figuur B.2: Koker nummering, geometrie 2



— Figuur B.3: Koker nummering, geometrie 3

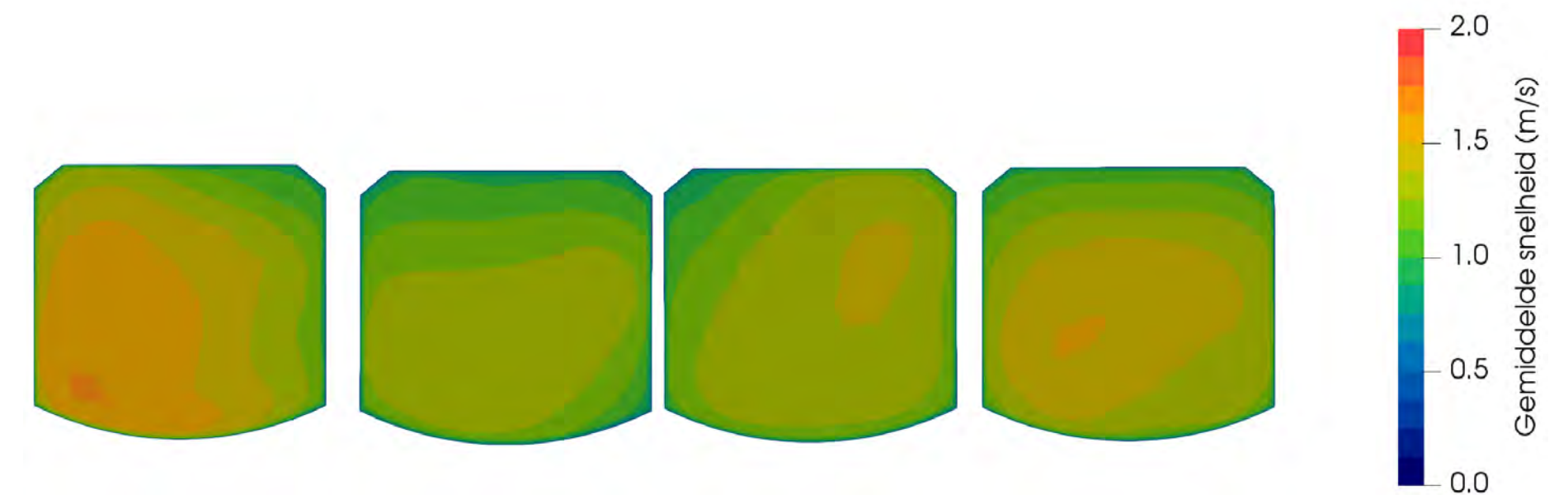
C Snelheid op meet locaties

De snelheid op de meetlocaties (gebruikt voor de verliescoëfficiënten in paragraaf 3.2) voor de 3 duiker geometrieën zijn weergegeven in dit deel van de appendix.

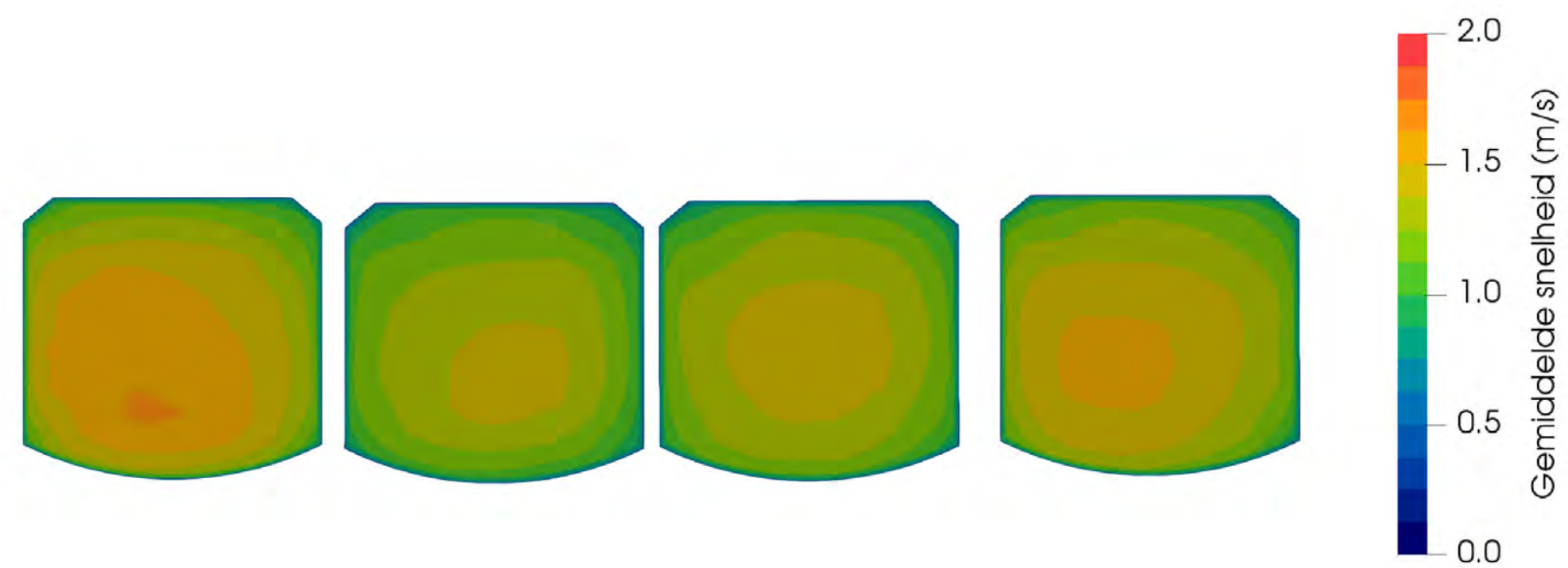
C.1 Huidige duiker



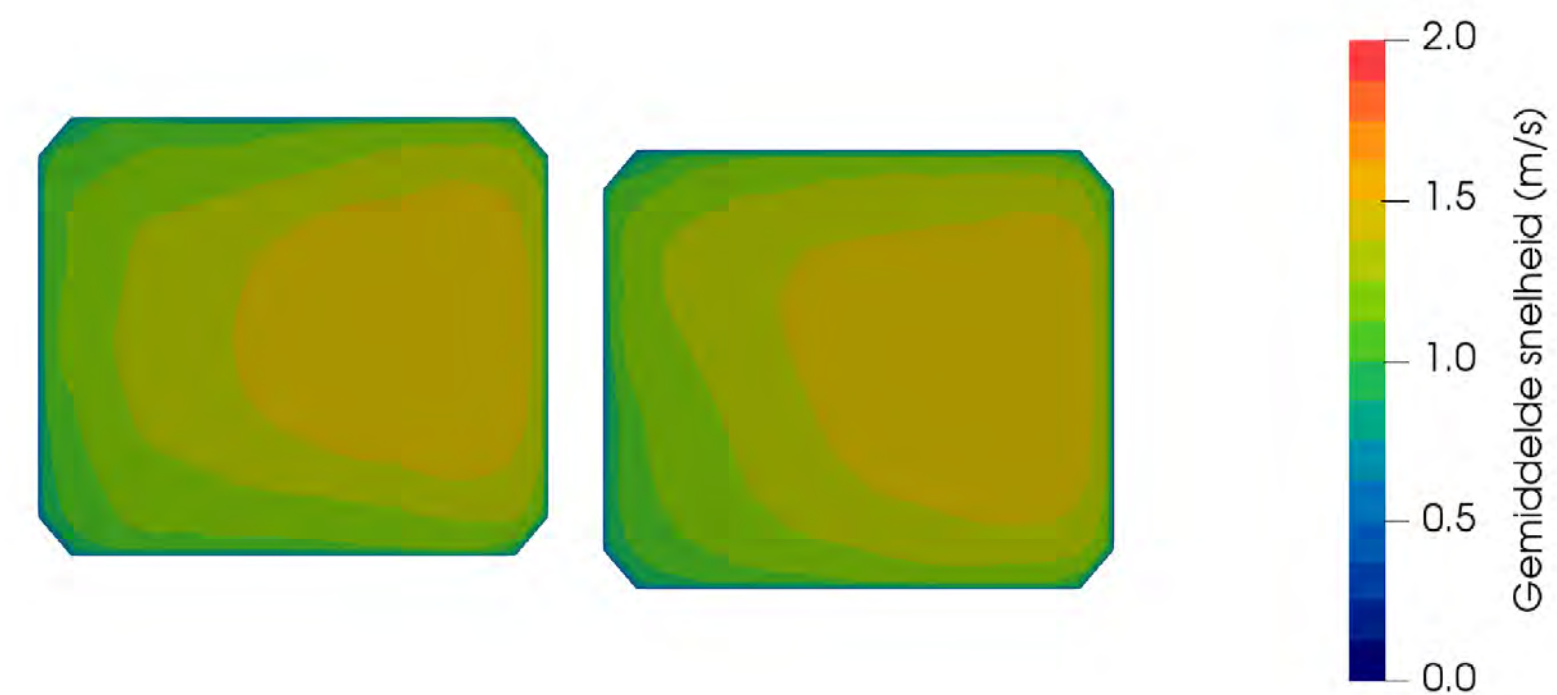
— Figuur C.1: Meetlocatie 1, huidige duiker



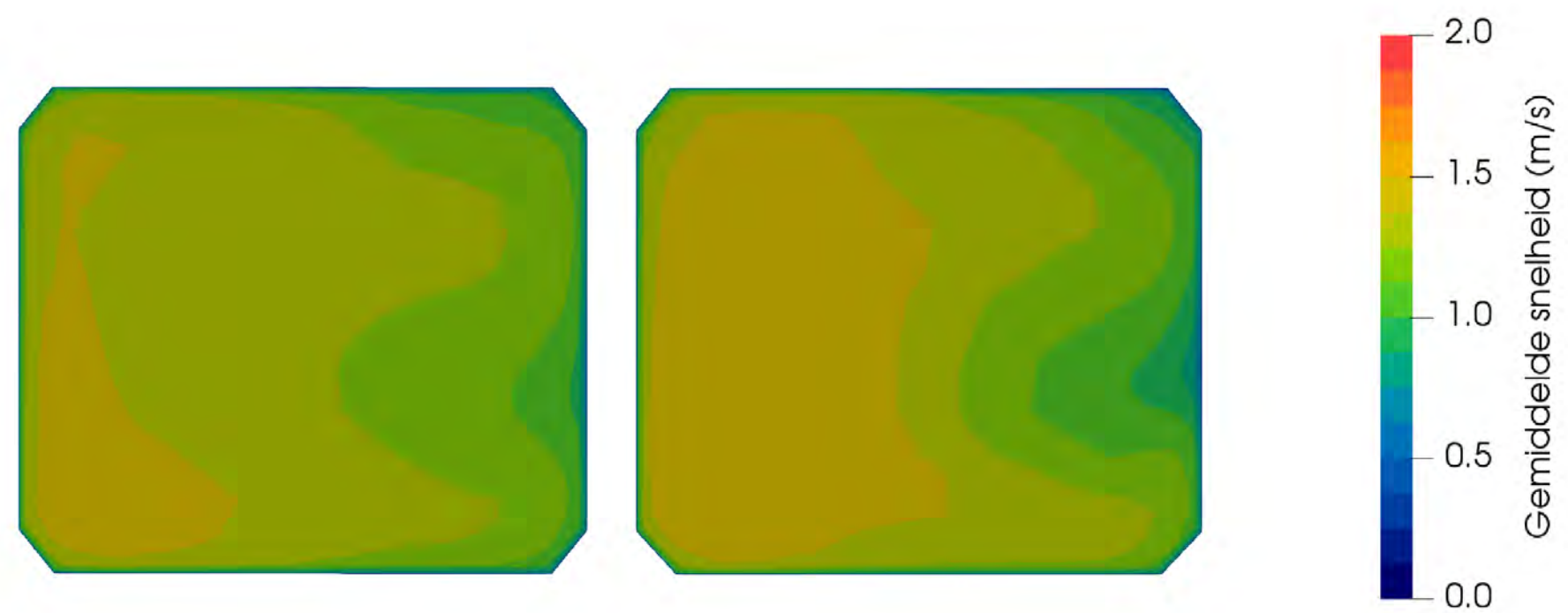
— Figuur C.2: Meetlocatie 2, huidige duiker



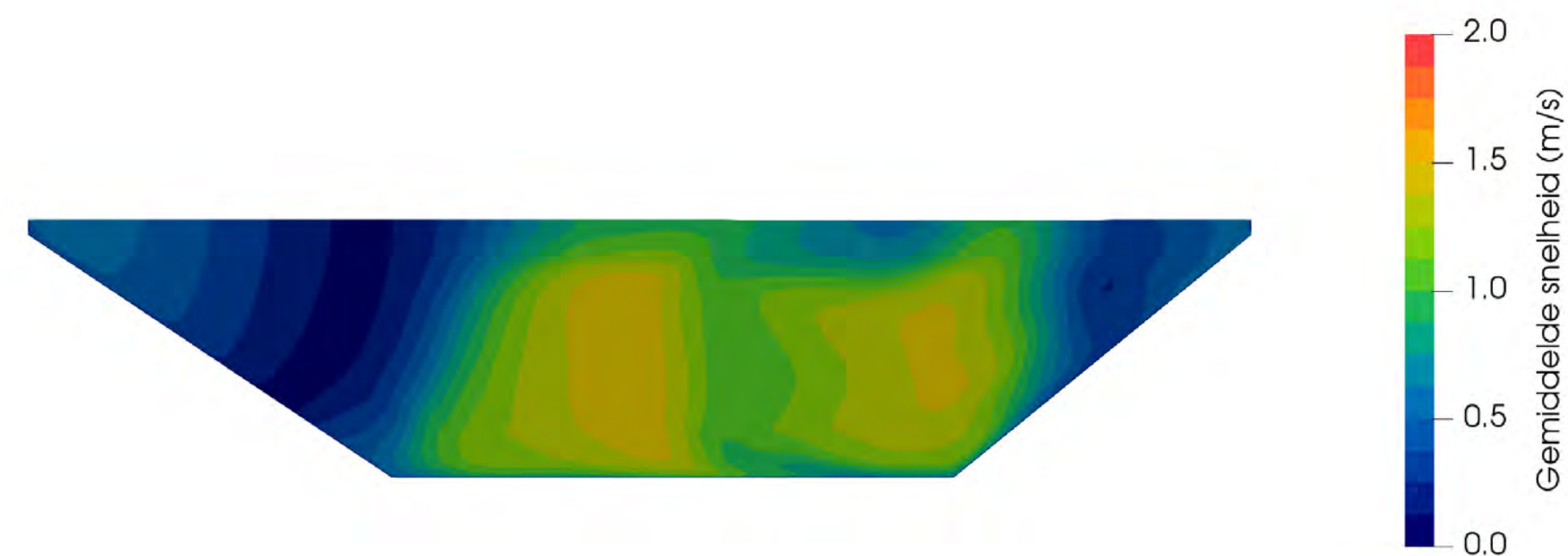
— Figuur C.3: Meetlocatie 3, huidige duiker



— Figuur C.5: Meetlocatie 5, huidige duiker



— Figuur C.4: Meetlocatie 4, huidige duiker

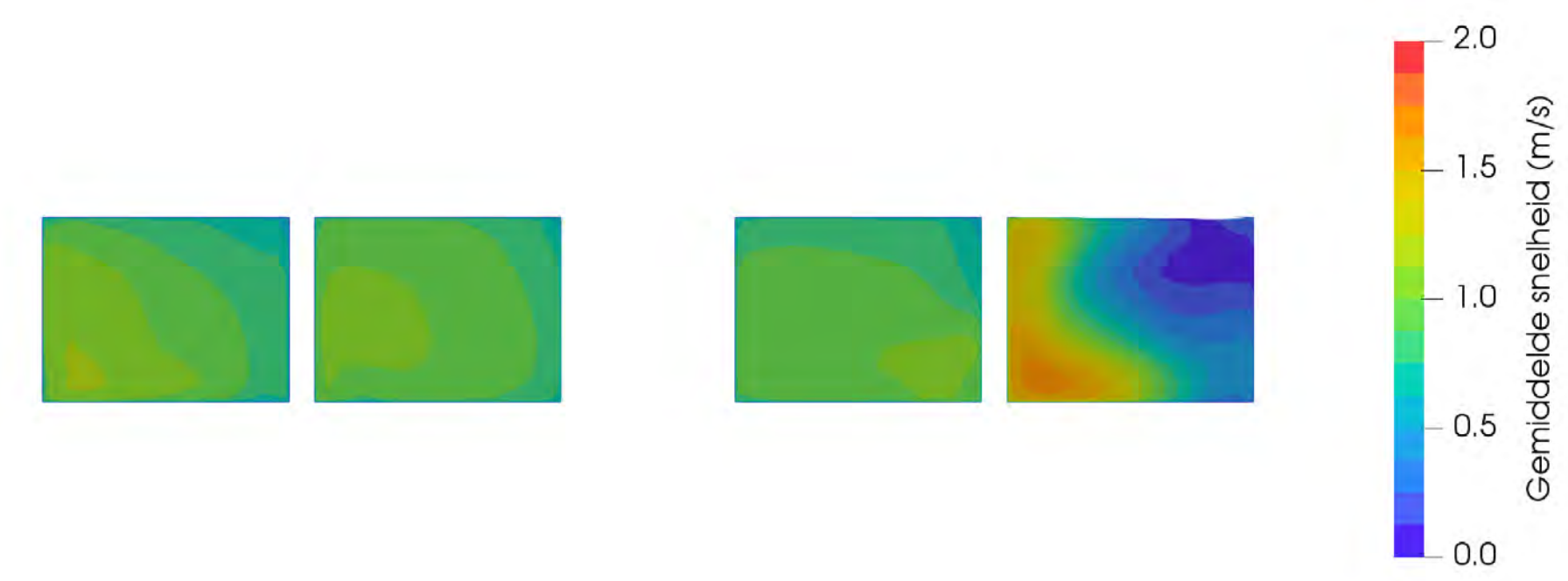


— Figuur C.6: Meetlocatie 6, huidige duiker

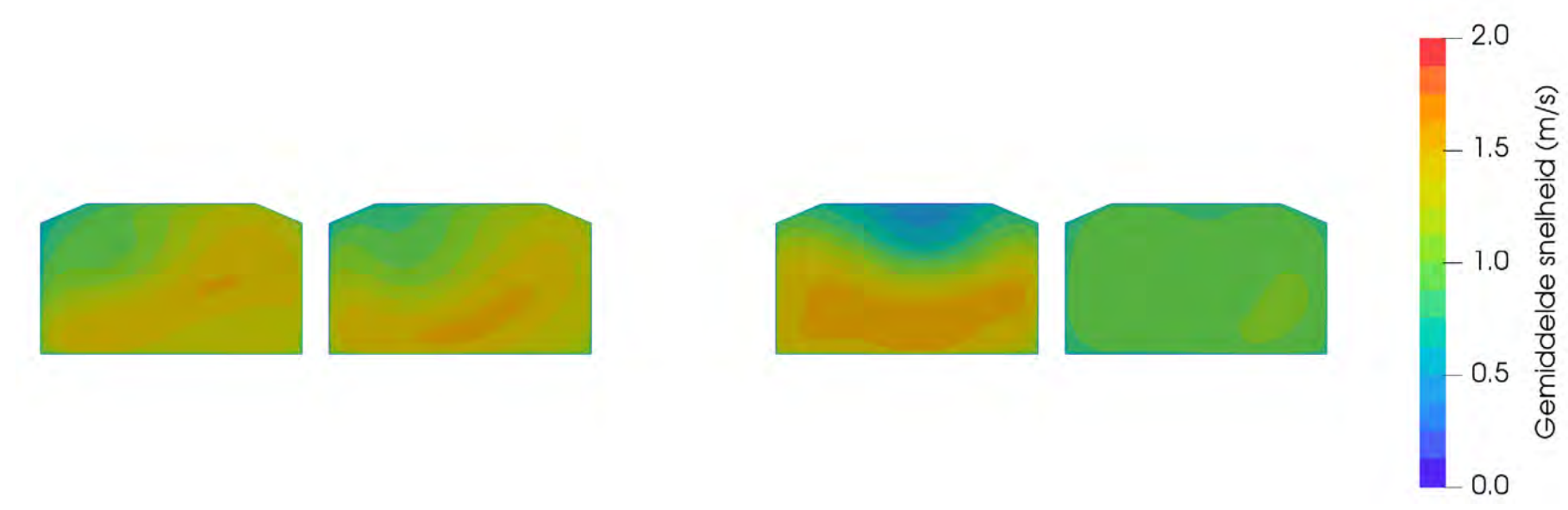
C.2 Geometrie2



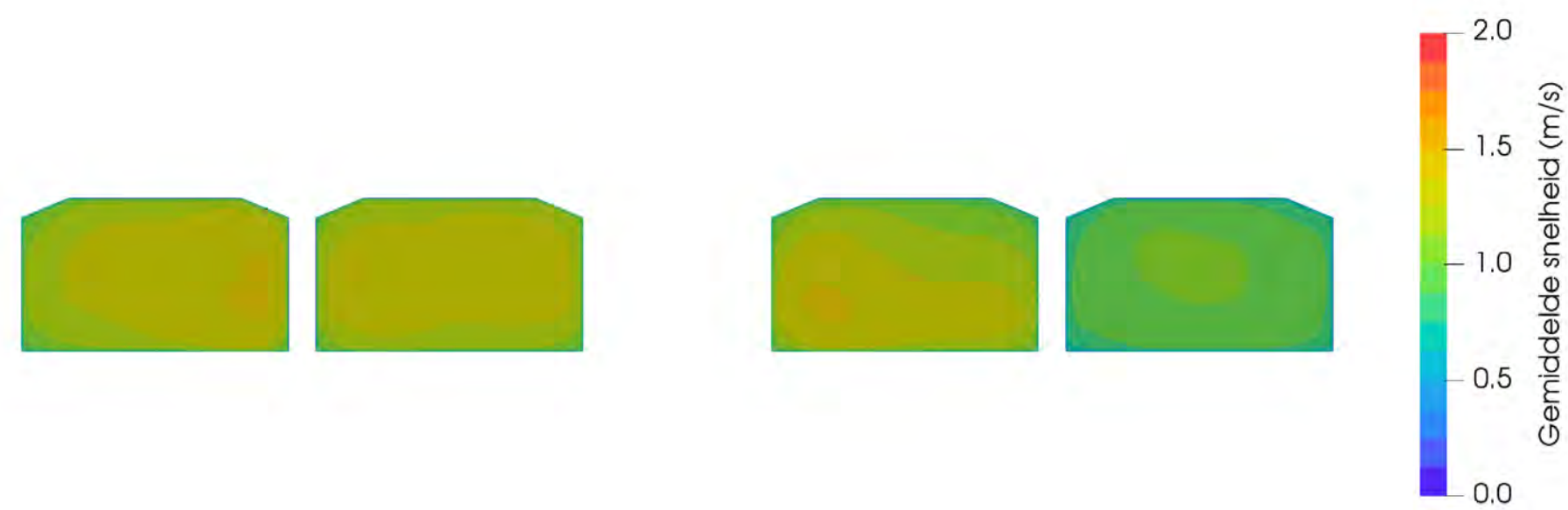
— Figuur C.7: Meetlocatie 1, geometrie 2



— Figuur C.8: Meetlocatie 2, geometrie 2



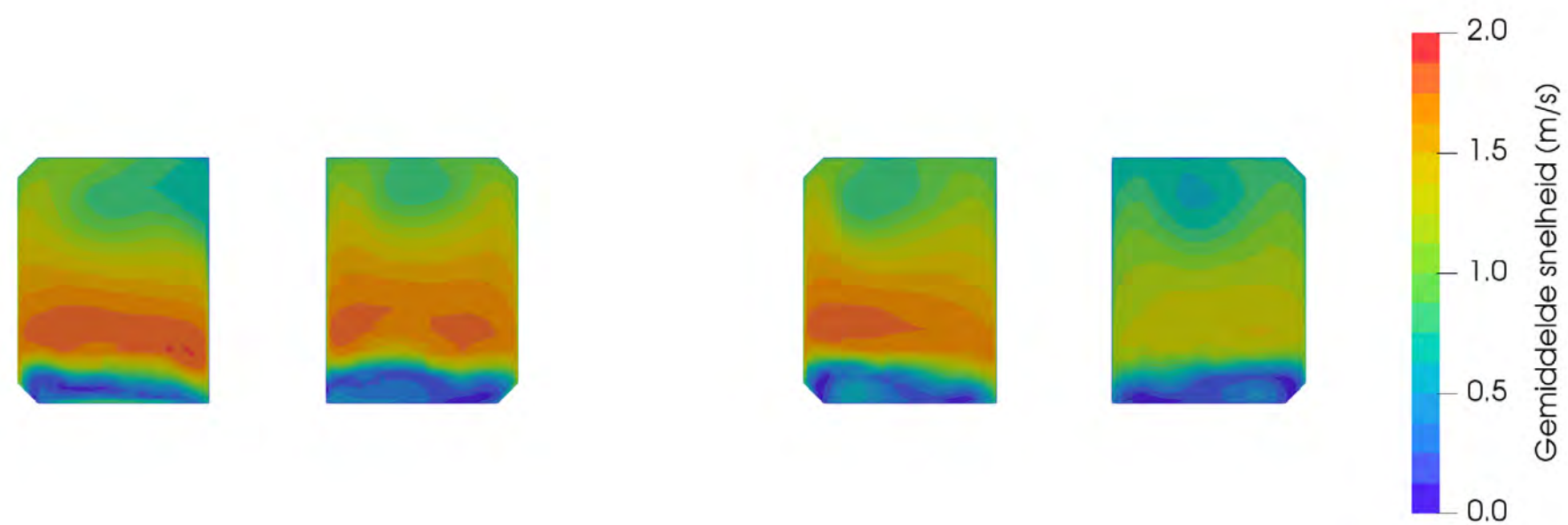
— Figuur C.9: Meetlocatie 3, geometrie 2



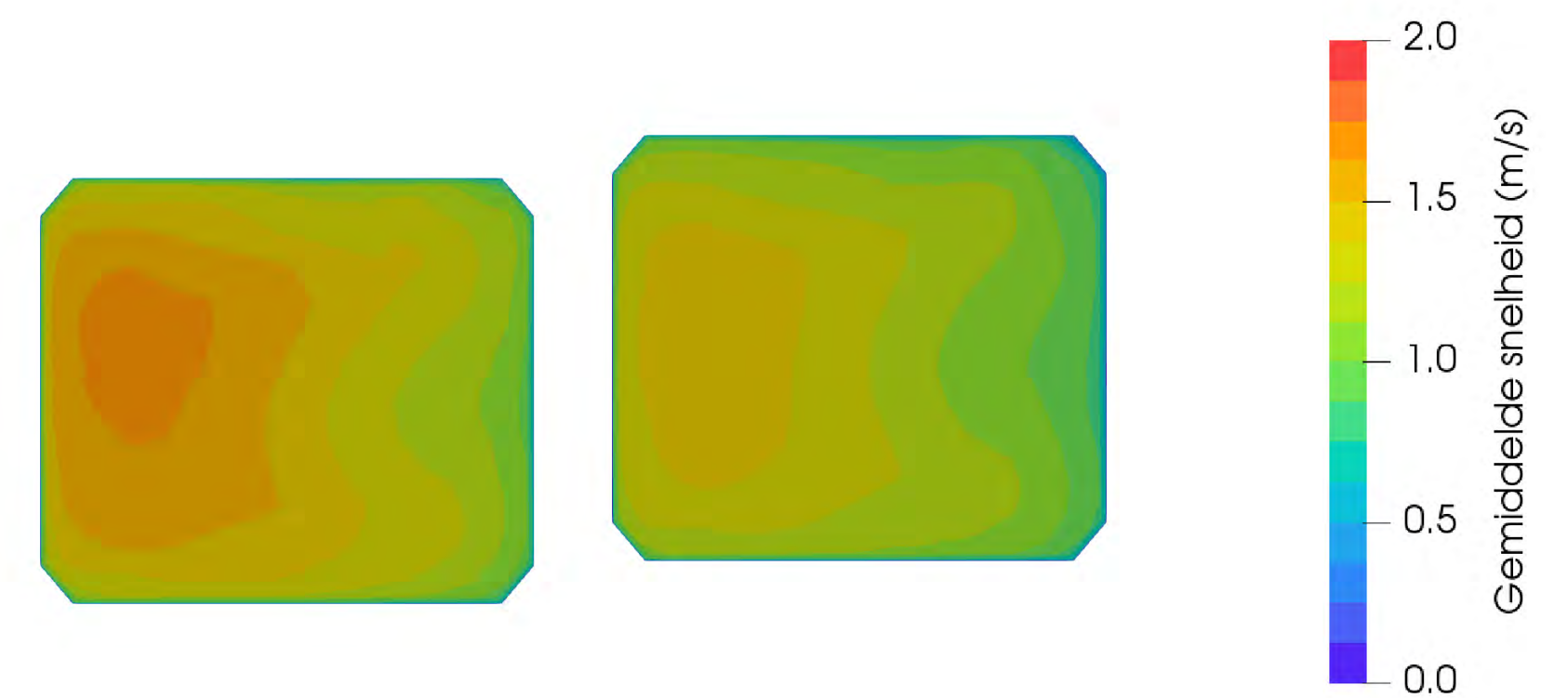
— Figuur C.10: Meetlocatie 4, geometrie 2



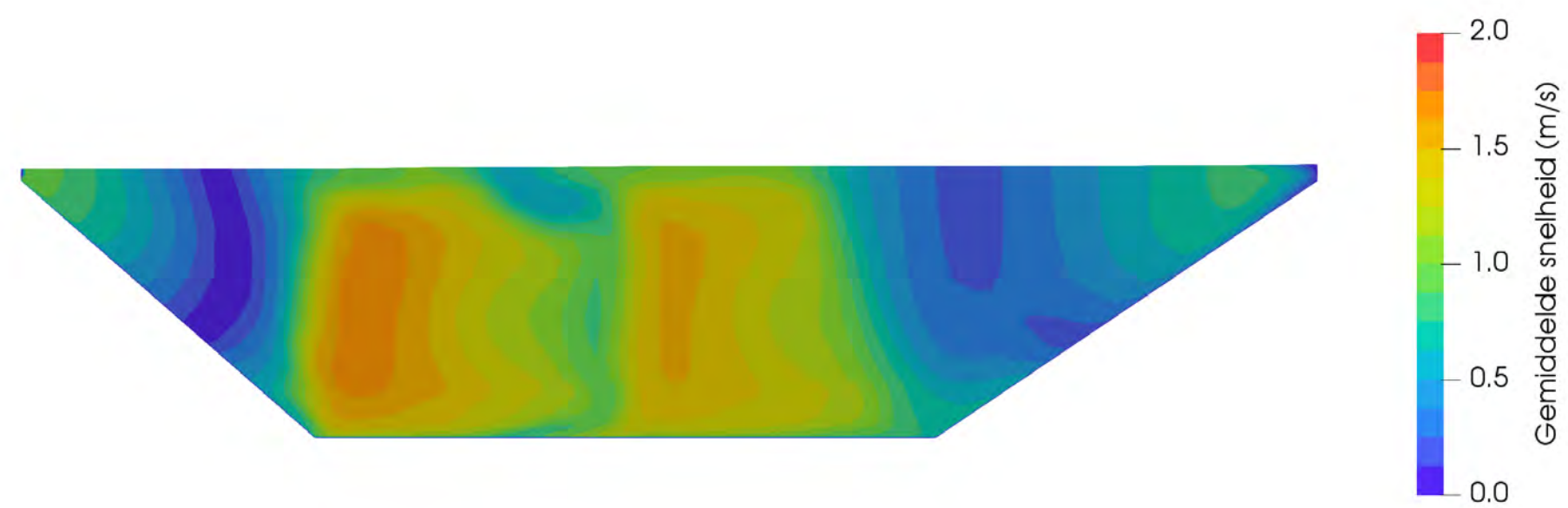
— Figuur C.12: Meetlocatie 6, geometrie 2



— Figuur C.11: Meetlocatie 5, geometrie 2

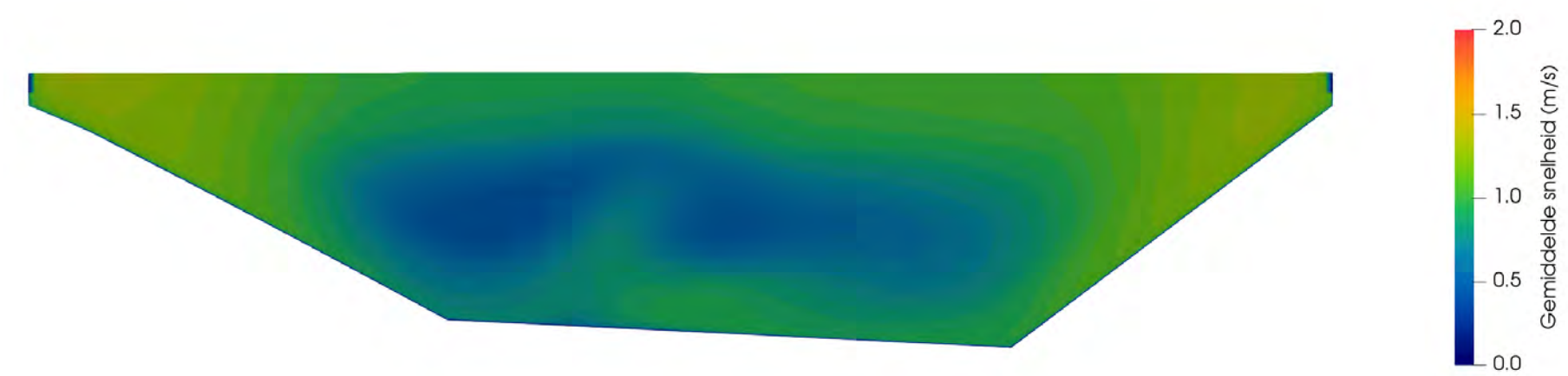


— Figuur C.13: Meetlocatie 7, geometrie 2



— Figuur C.14: Meetlocatie 8, geometrie 2

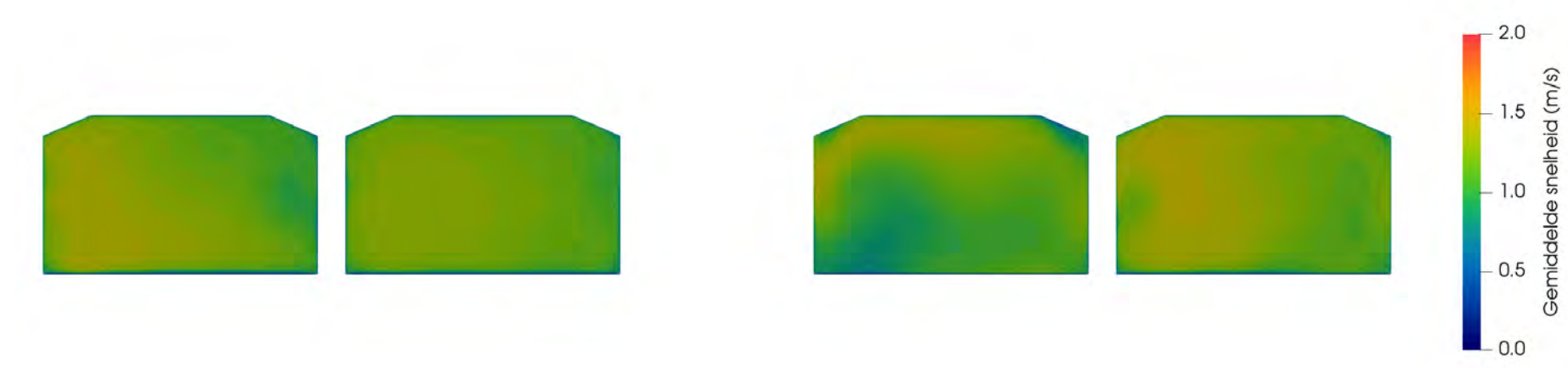
C.3 Geometrie2 v2



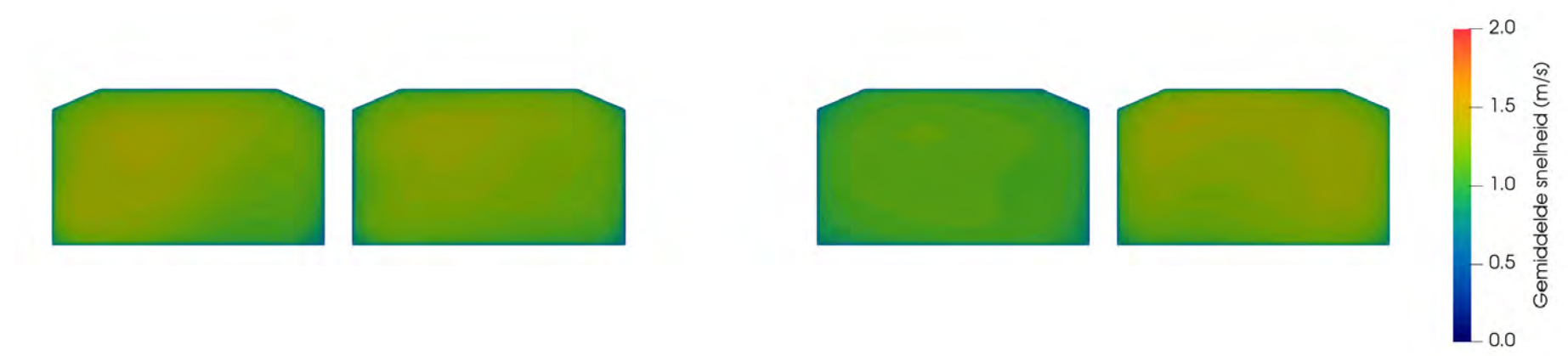
— Figuur C.15: Meetlocatie 1, geometrie 2 v2



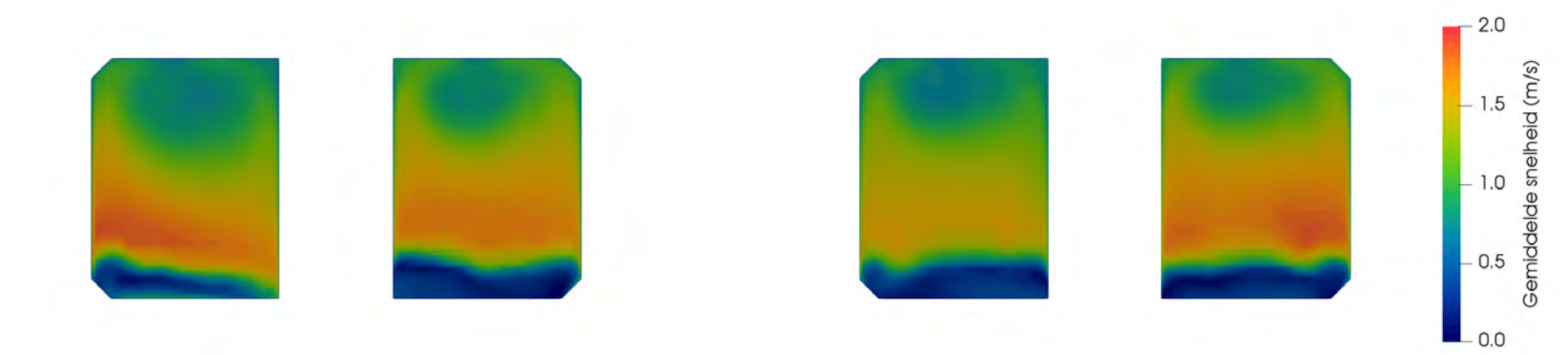
— Figuur C.16: Meetlocatie 2, geometrie 2 v2



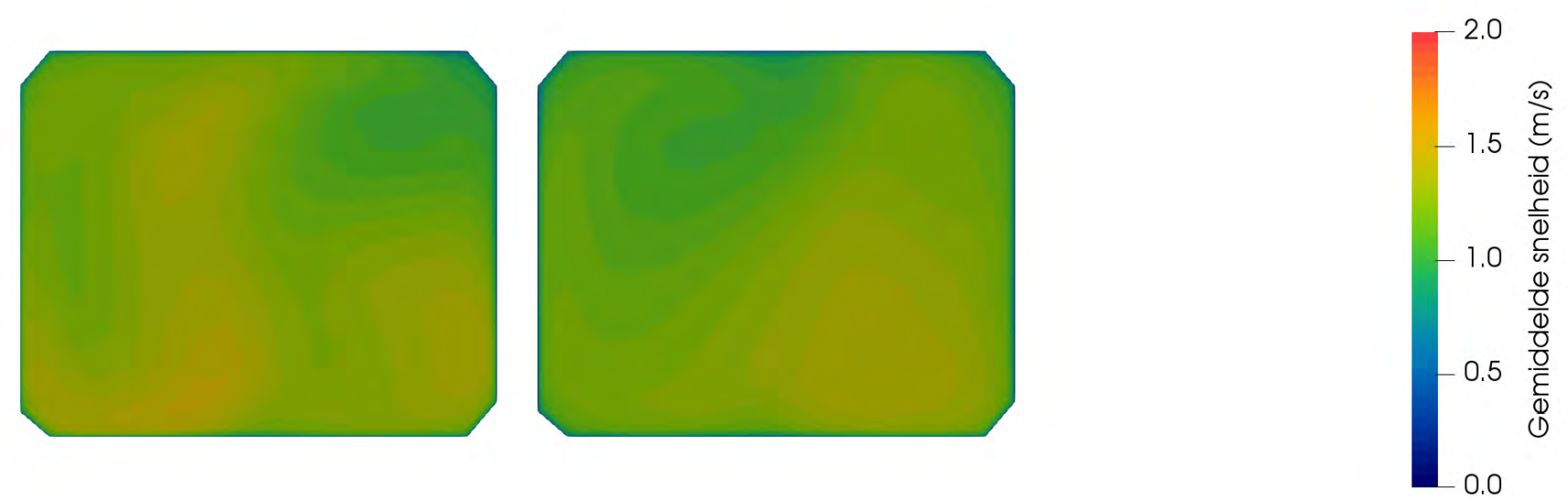
— Figuur C.17: Meetlocatie 3, geometrie 2 v2



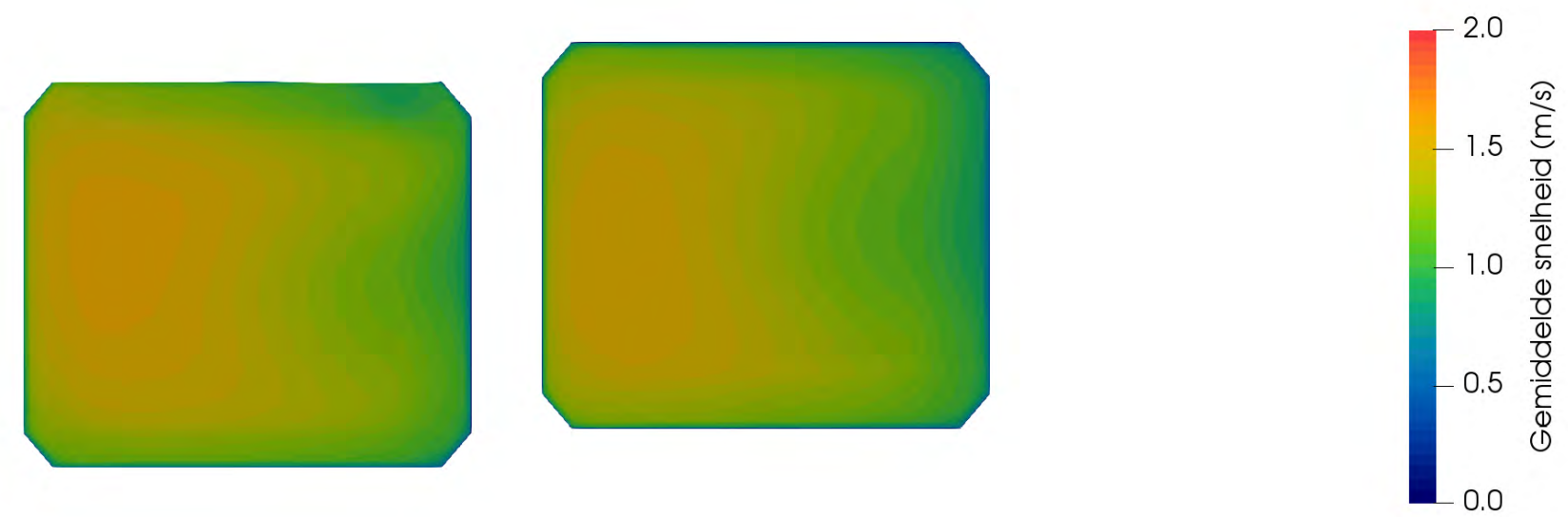
— Figuur C.18: Meetlocatie 4, geometrie 2 v2



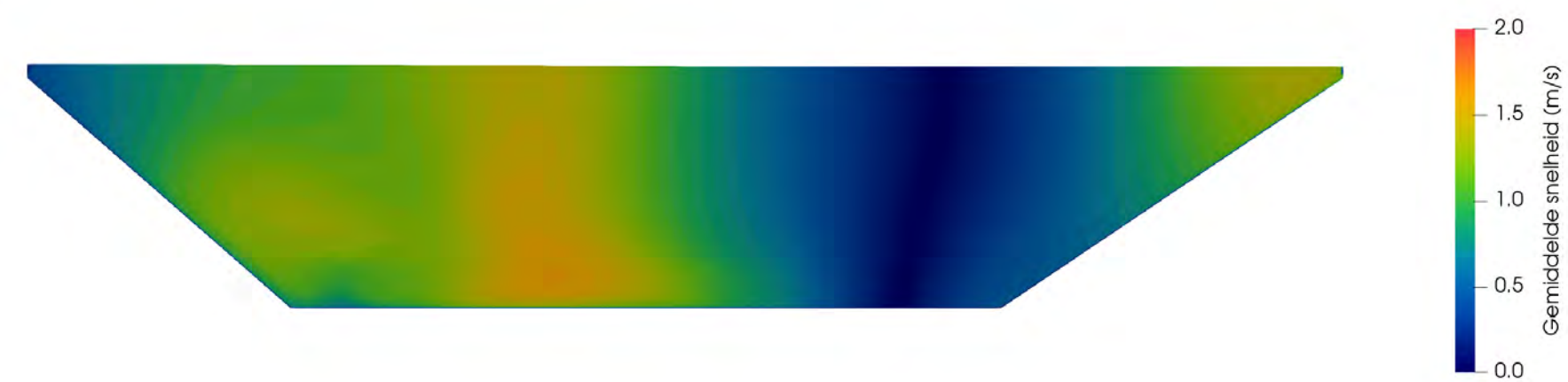
— Figuur C.19: Meetlocatie 5, geometrie 2 v2



— **Figuur C.20:** Meetlocatie 6, geometrie 2 v2



— **Figuur C.21:** Meetlocatie 7, geometrie 2 v2

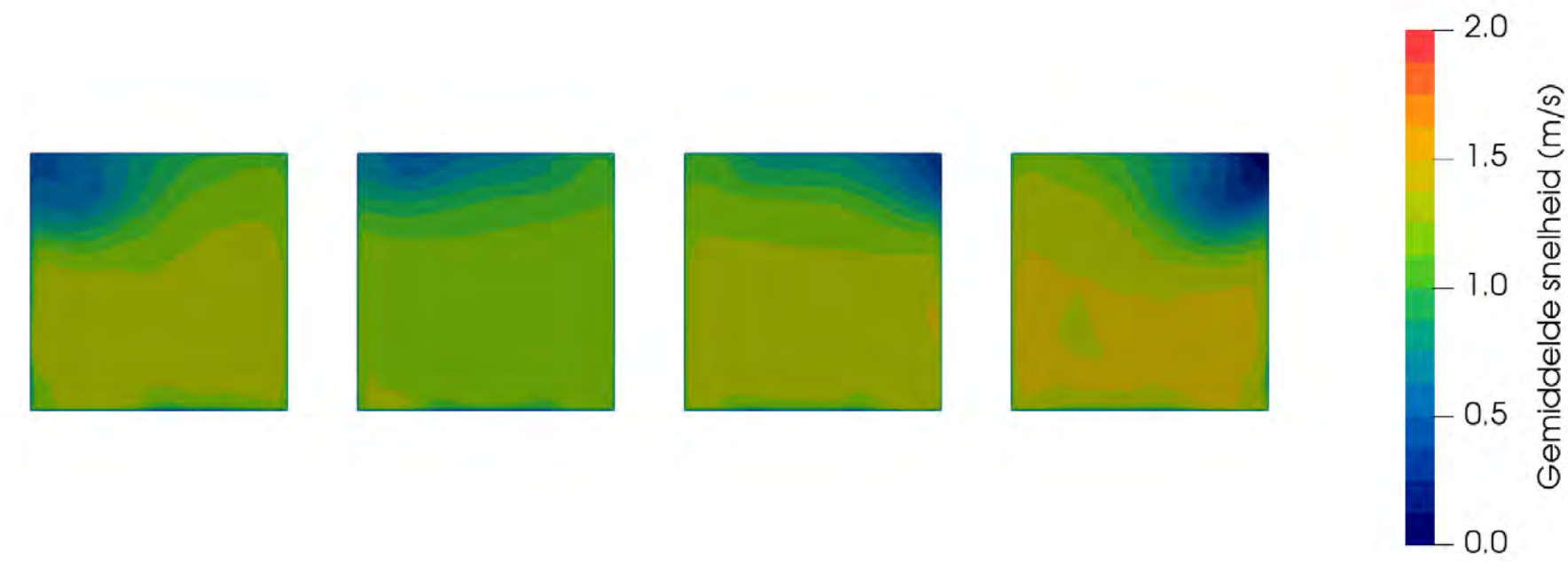


— **Figuur C.22:** Meetlocatie 8, geometrie 2 v2

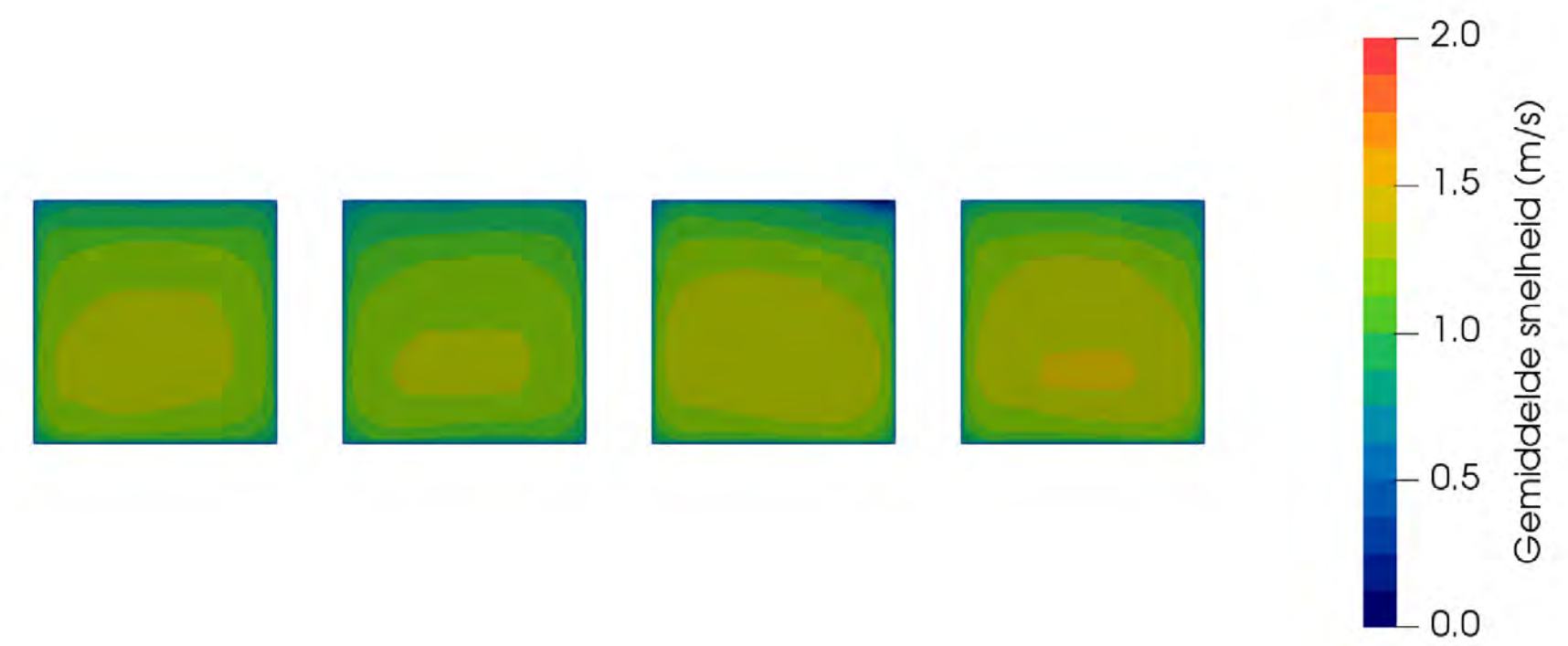
C.4 Geometrie3



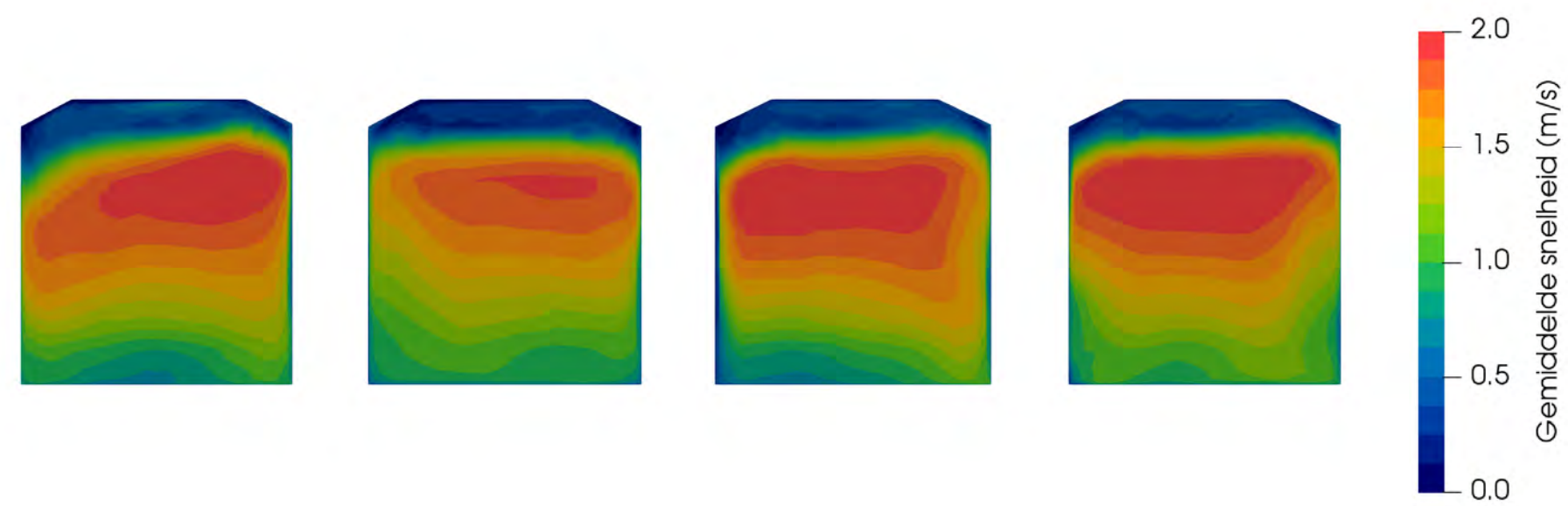
— Figuur C.23: Meetlocatie 1, geometrie 3



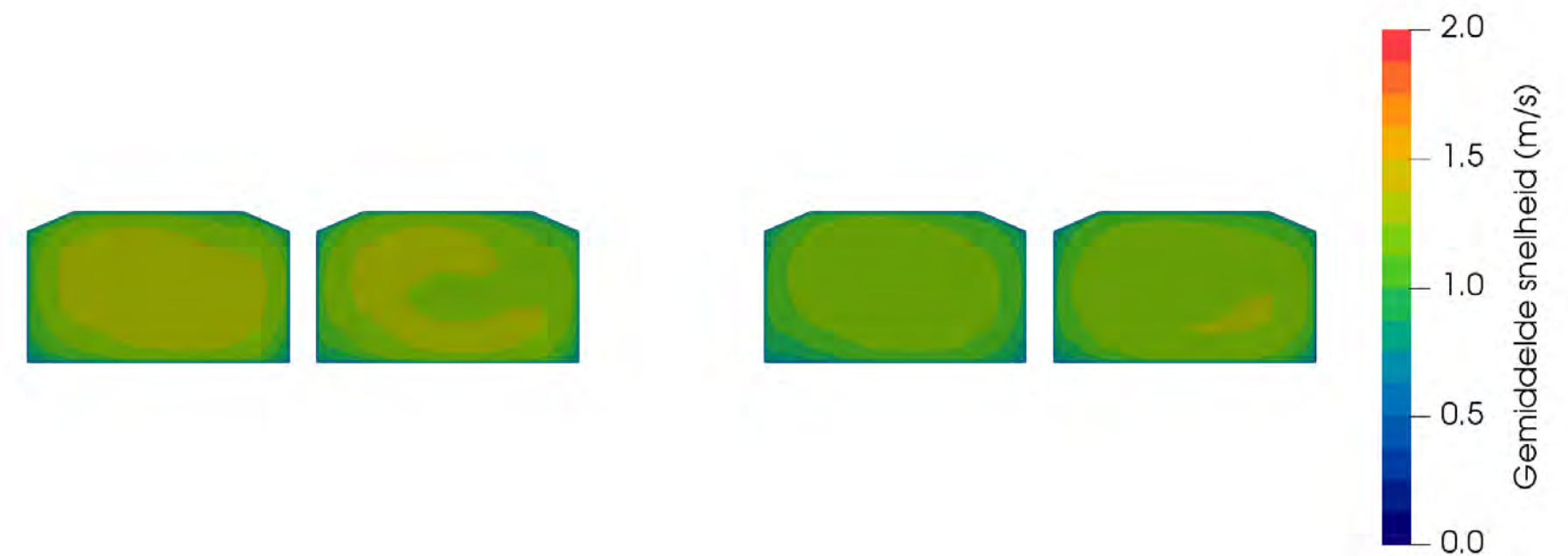
— Figuur C.24: Meetlocatie 2, geometrie 3



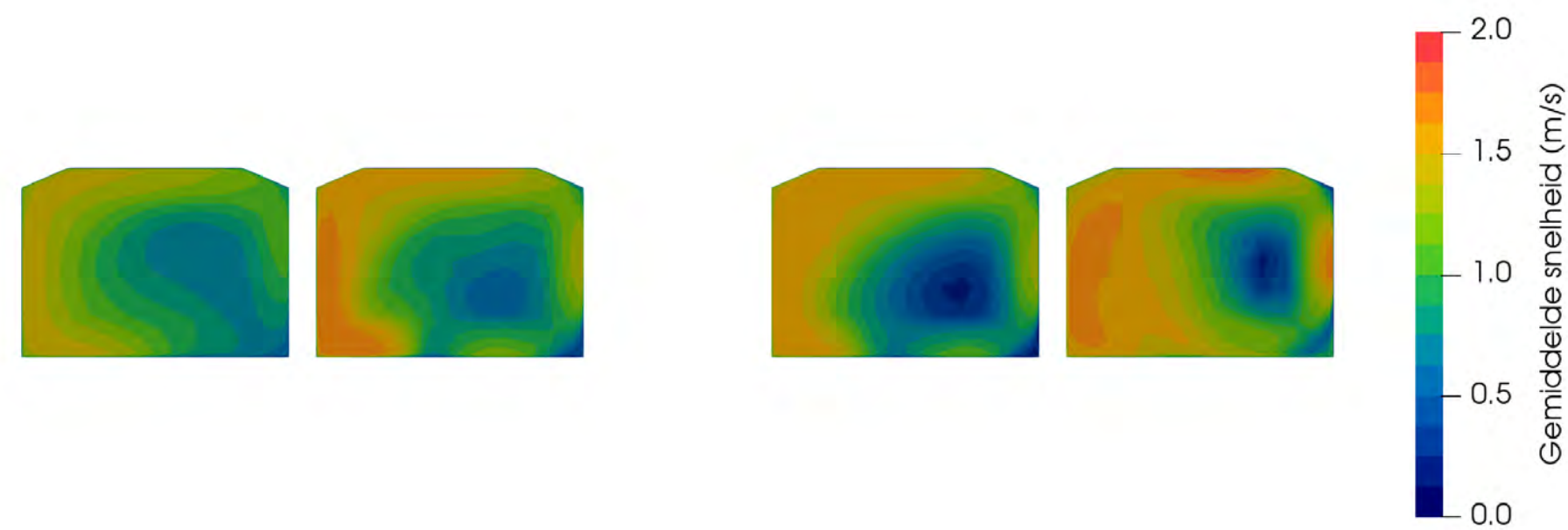
— Figuur C.25: Meetlocatie 3, geometrie 3



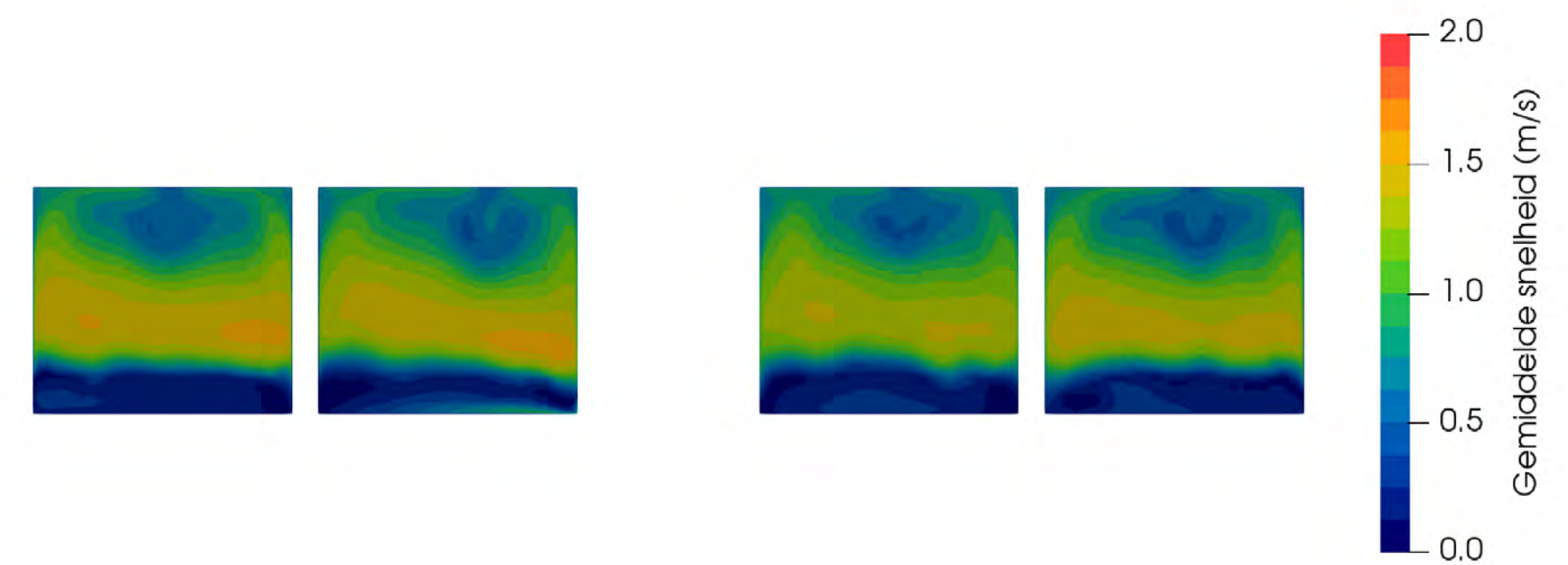
— Figuur C.26: Meetlocatie 4, geometrie 3



— Figuur C.28: Meetlocatie 6, geometrie 3



— Figuur C.27: Meetlocatie 5, geometrie 3



— Figuur C.29: Meetlocatie 7, geometrie 3

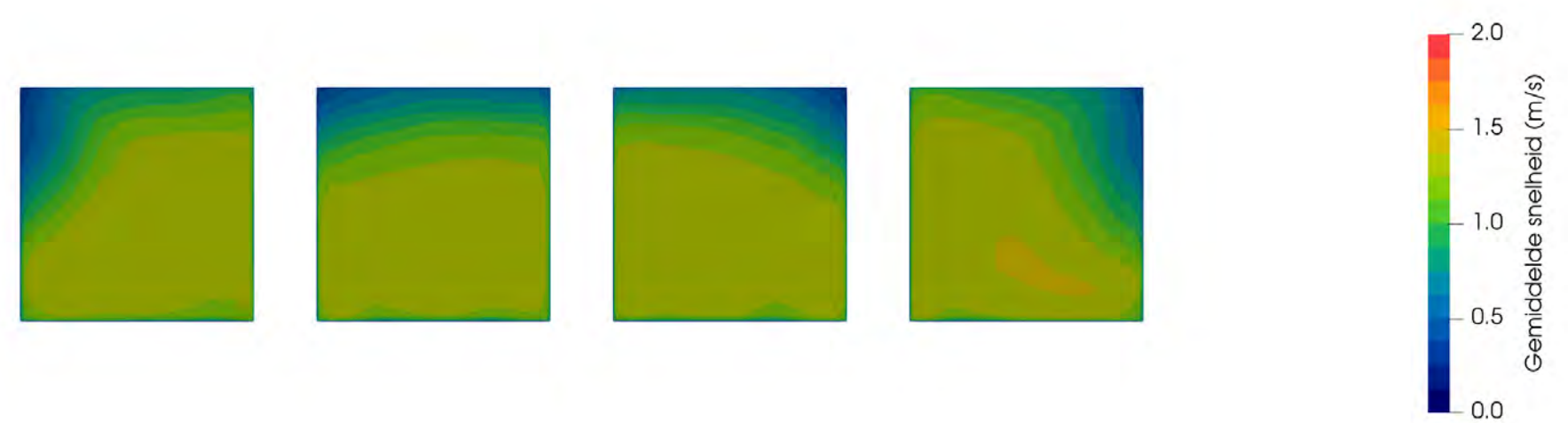


— Figuur C.30: Meetlocatie 8, geometrie 3

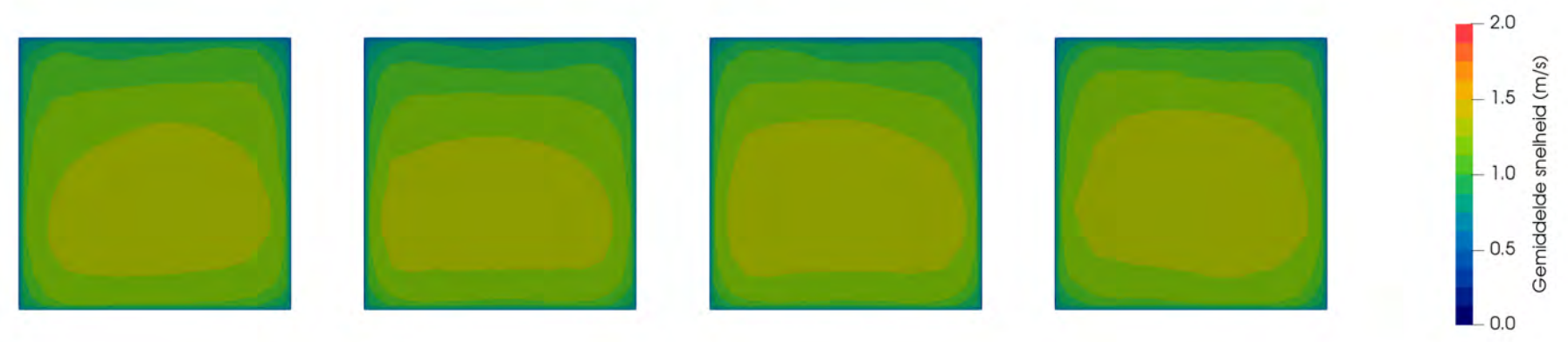
C.5 Geometrie3 v2



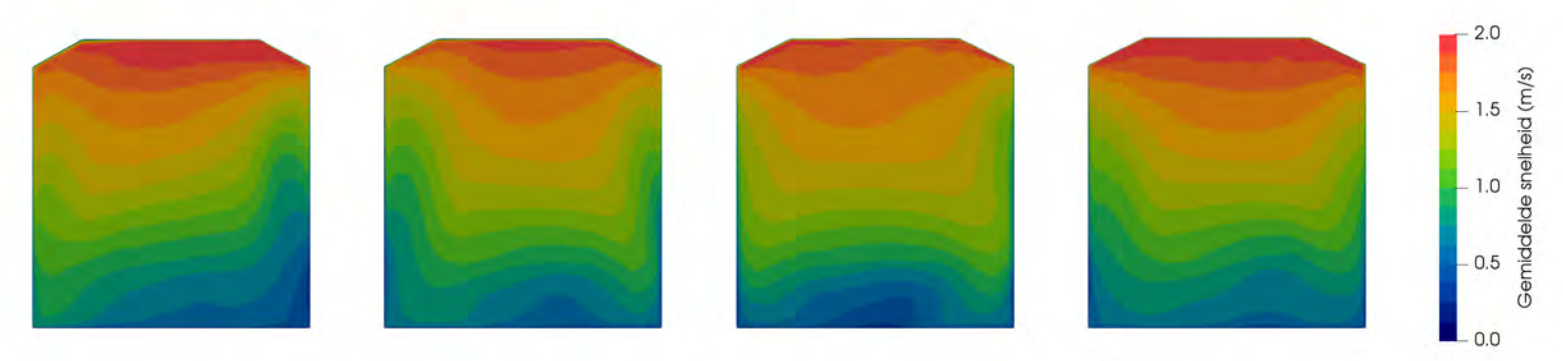
— Figuur C.31: Meetlocatie 1, geometrie 3 v2



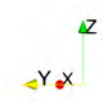
— Figuur C.32: Meetlocatie 2, geometrie 3 v2

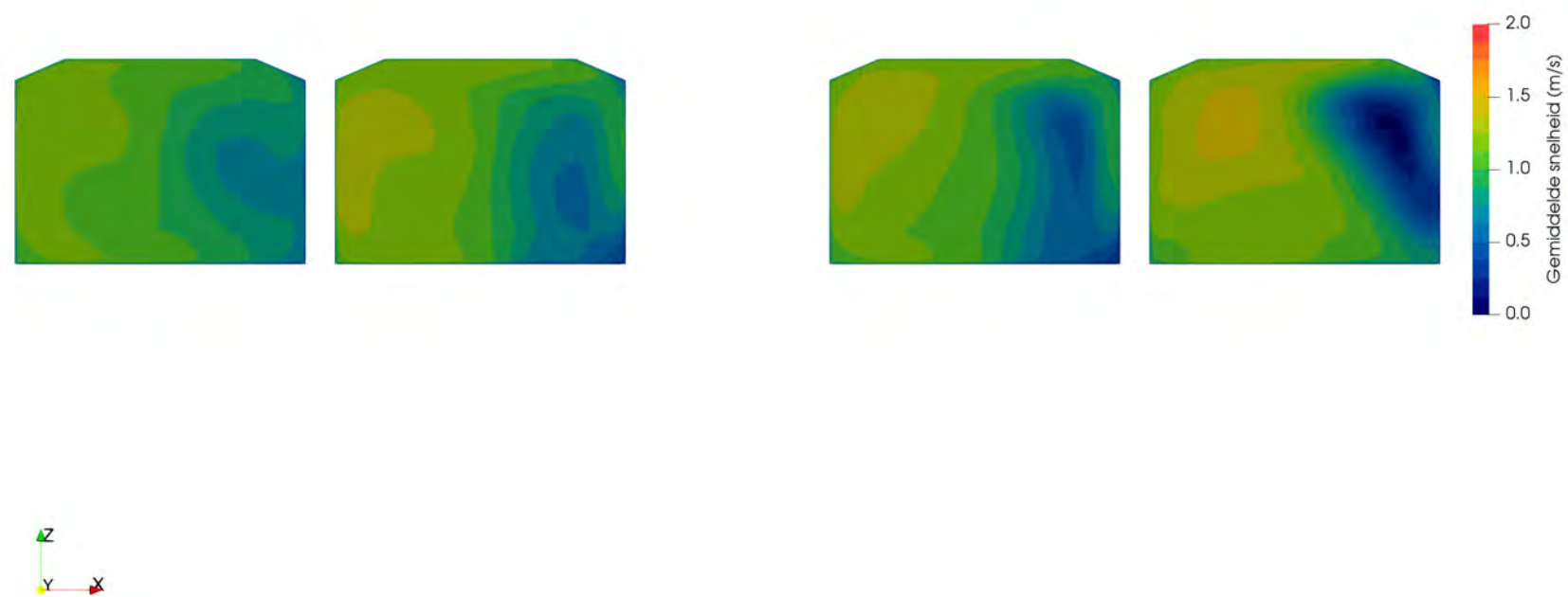


— Figuur C.33: Meetlocatie 3, geometrie 3 v2

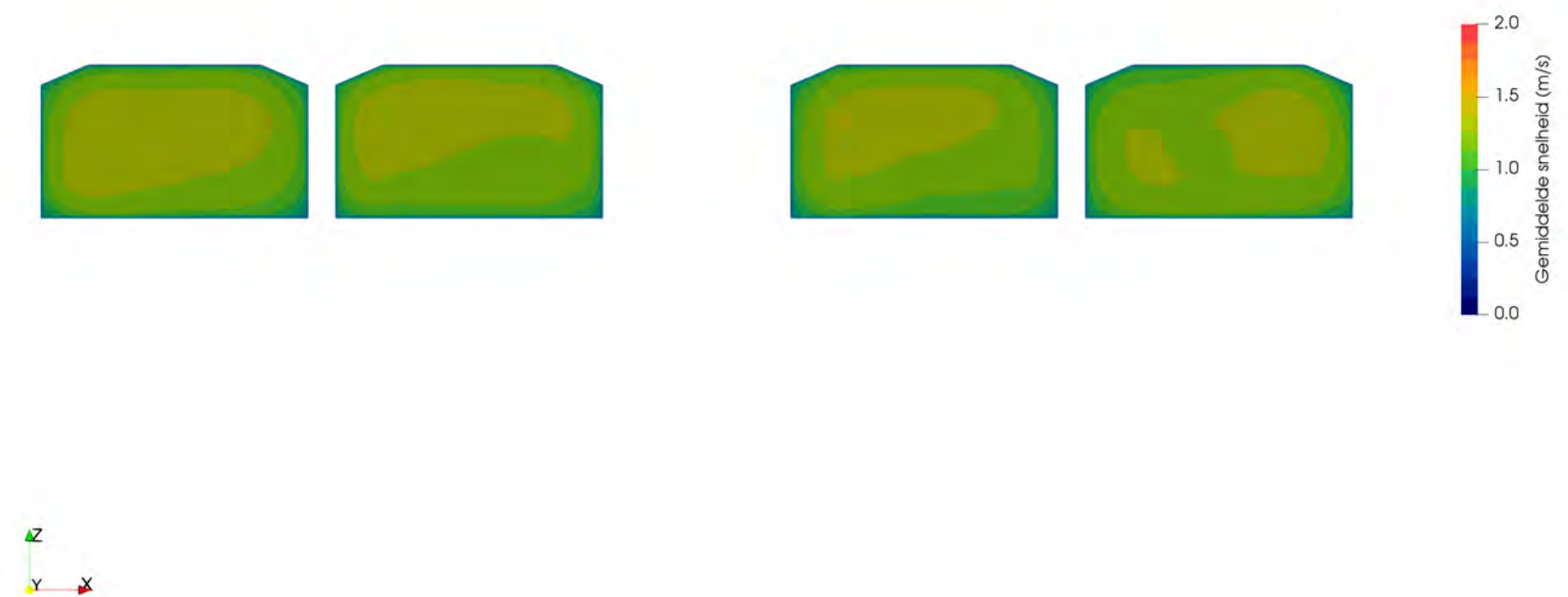


— Figuur C.34: Meetlocatie 4, geometrie 3 v2

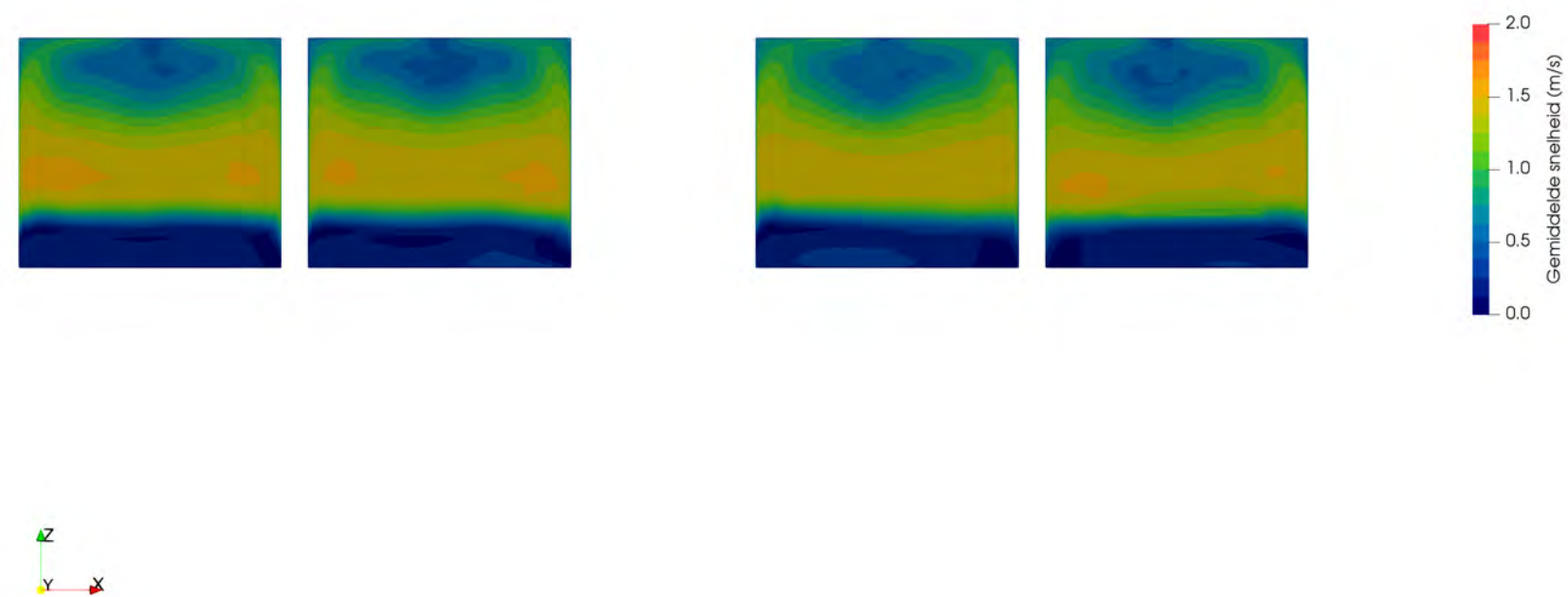




— **Figuur C.35:** Meetlocatie 5, geometrie 3 v2



— **Figuur C.36:** Meetlocatie 6, geometrie 3 v2



— **Figuur C.37:** Meetlocatie 7, geometrie 3 v2

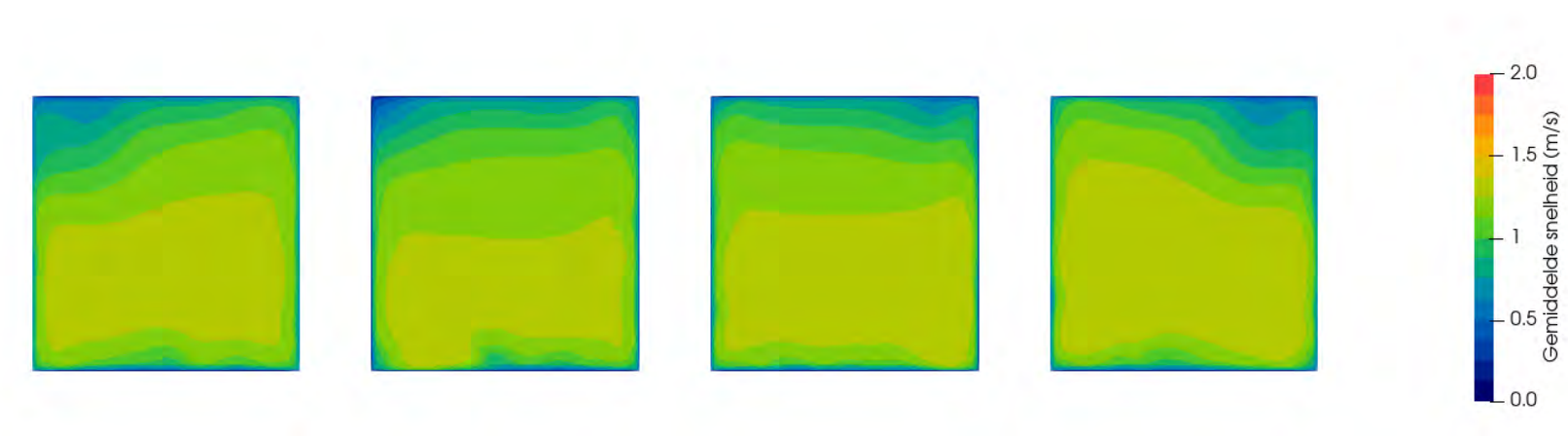


— **Figuur C.38:** Meetlocatie 8, geometrie 3 v2

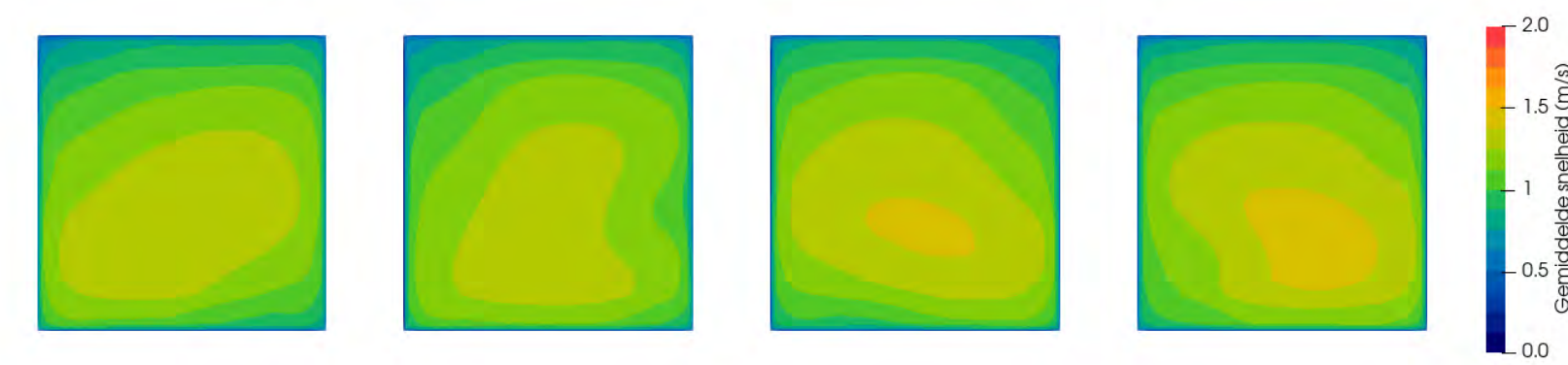
C.6 Geometrie3 v3



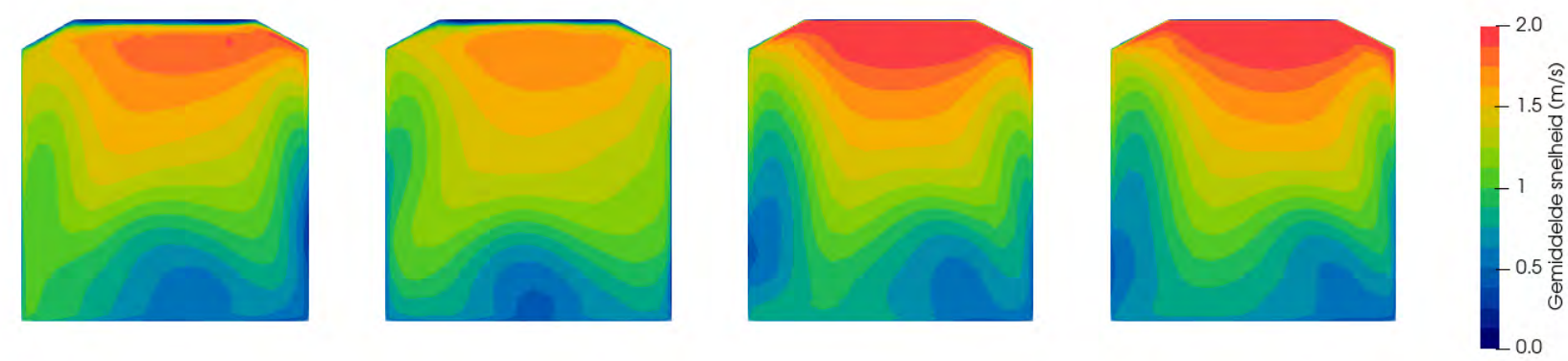
— Figuur C.39: Meetlocatie 1, geometrie 3 v3



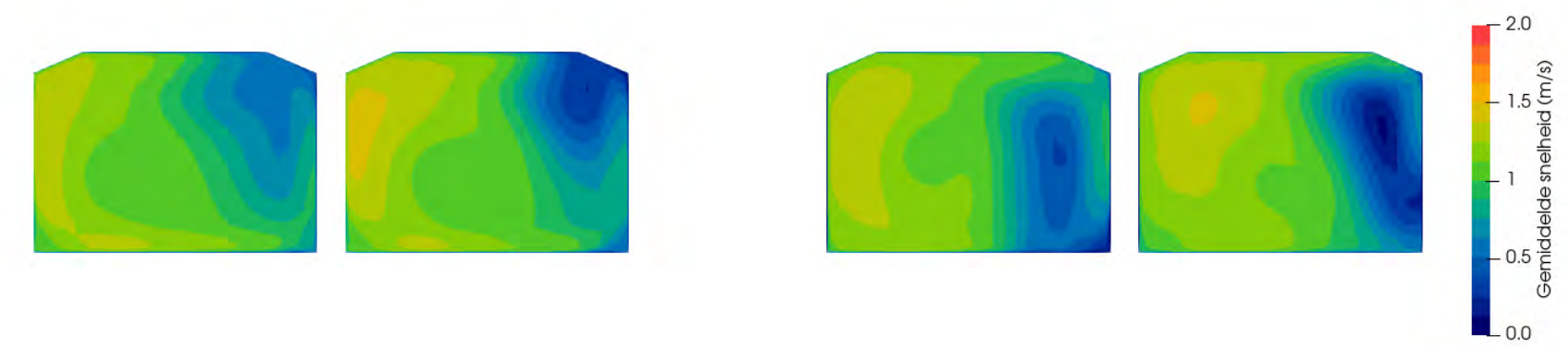
— Figuur C.40: Meetlocatie 2, geometrie 3 v3



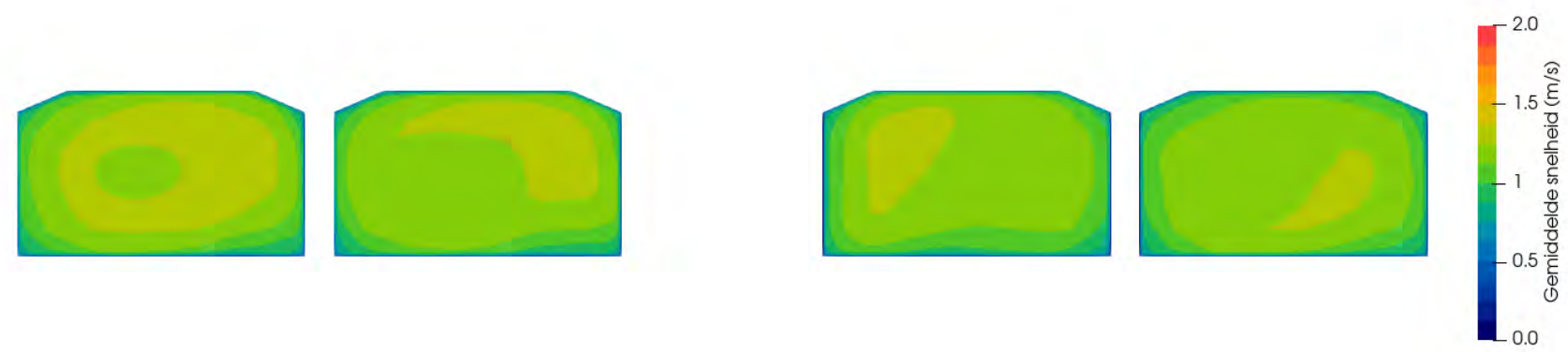
— Figuur C.41: Meetlocatie 3, geometrie 3 v3



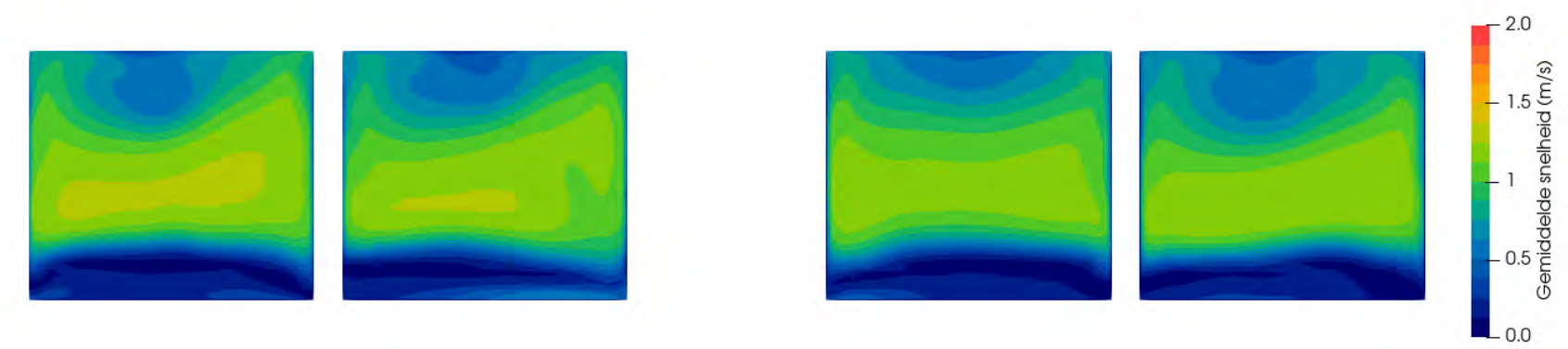
— **Figuur C.42:** Meetlocatie 4, geometrie 3 v3



— **Figuur C.43:** Meetlocatie 5, geometrie 3 v3



— **Figuur C.44:** Meetlocatie 6, geometrie 3 v3



— **Figuur C.45:** Meetlocatie 7, geometrie 3 v3

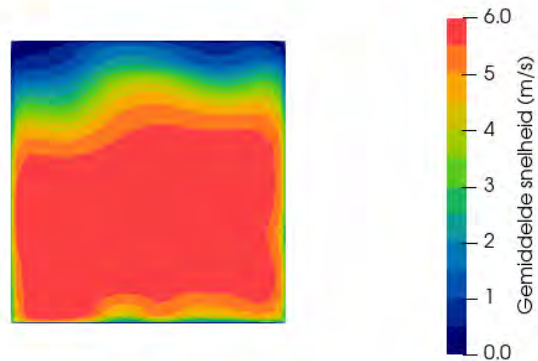


— **Figuur C.46:** Meetlocatie 8, geometrie 3 v3

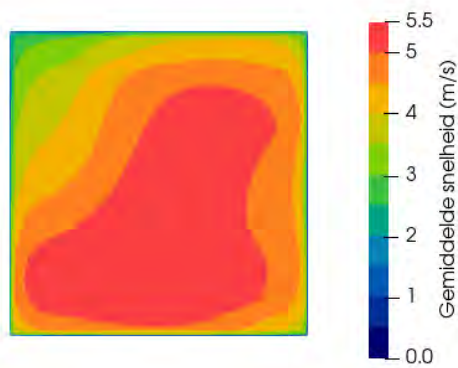
C.7 Geometrie3 v3 - 1 koker



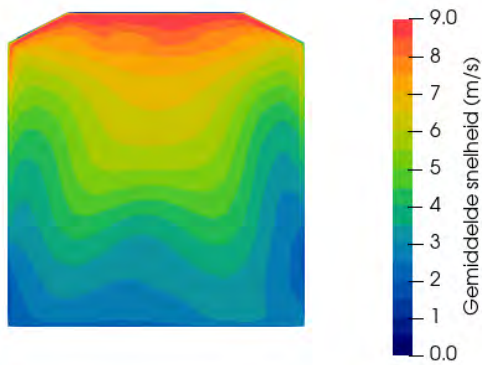
— Figuur C.47: Meetlocatie 1, geometrie 3 v3 - 1 koker



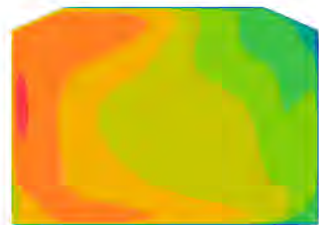
— Figuur C.48: Meetlocatie 2, geometrie 3 v3 - 1 koker



— Figuur C.49: Meetlocatie 3, geometrie 3 v3 - 1 koker



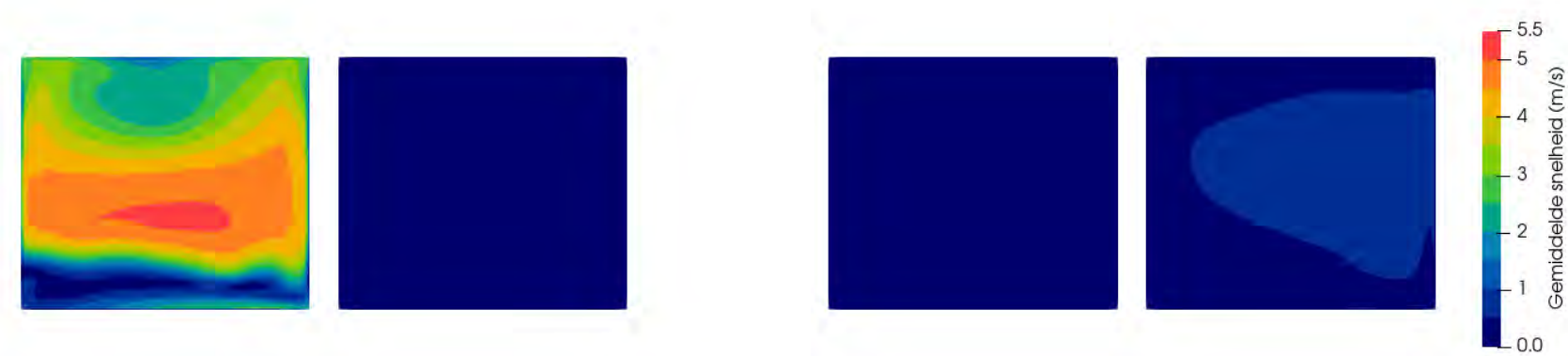
— Figuur C.50: Meetlocatie 4, geometrie 3 v3 - 1 koker



— Figuur C.51: Meetlocatie 5, geometrie 3 v3 - 1 koker



— **Figuur C.52:** Meetlocatie 6, geometrie 3 v3 - 1 koker



— **Figuur C.53:** Meetlocatie 7, geometrie 3 v3 - 1 koker

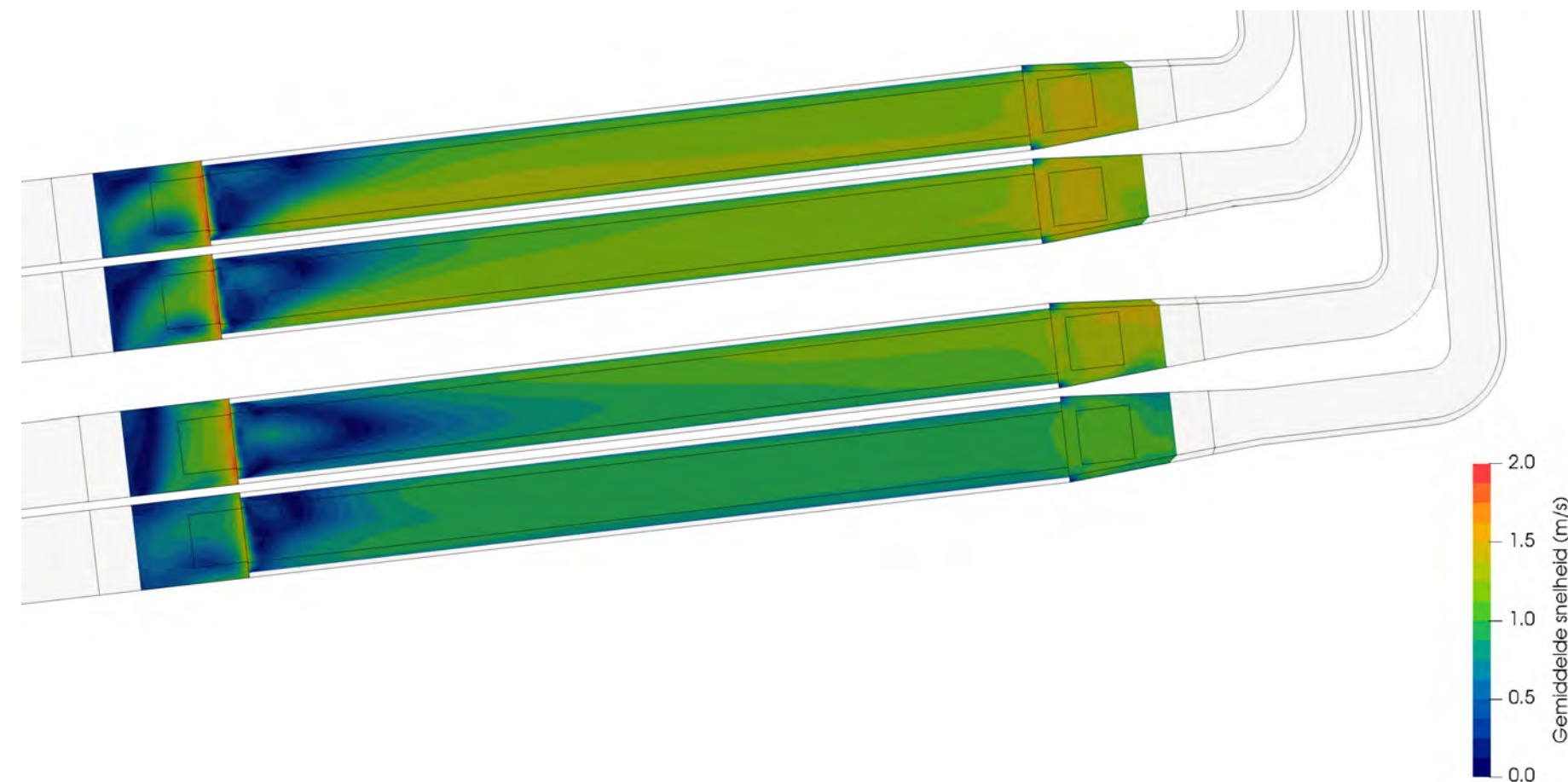


— **Figuur C.54:** Meetlocatie 8, geometrie 3 v3 - 1 koker

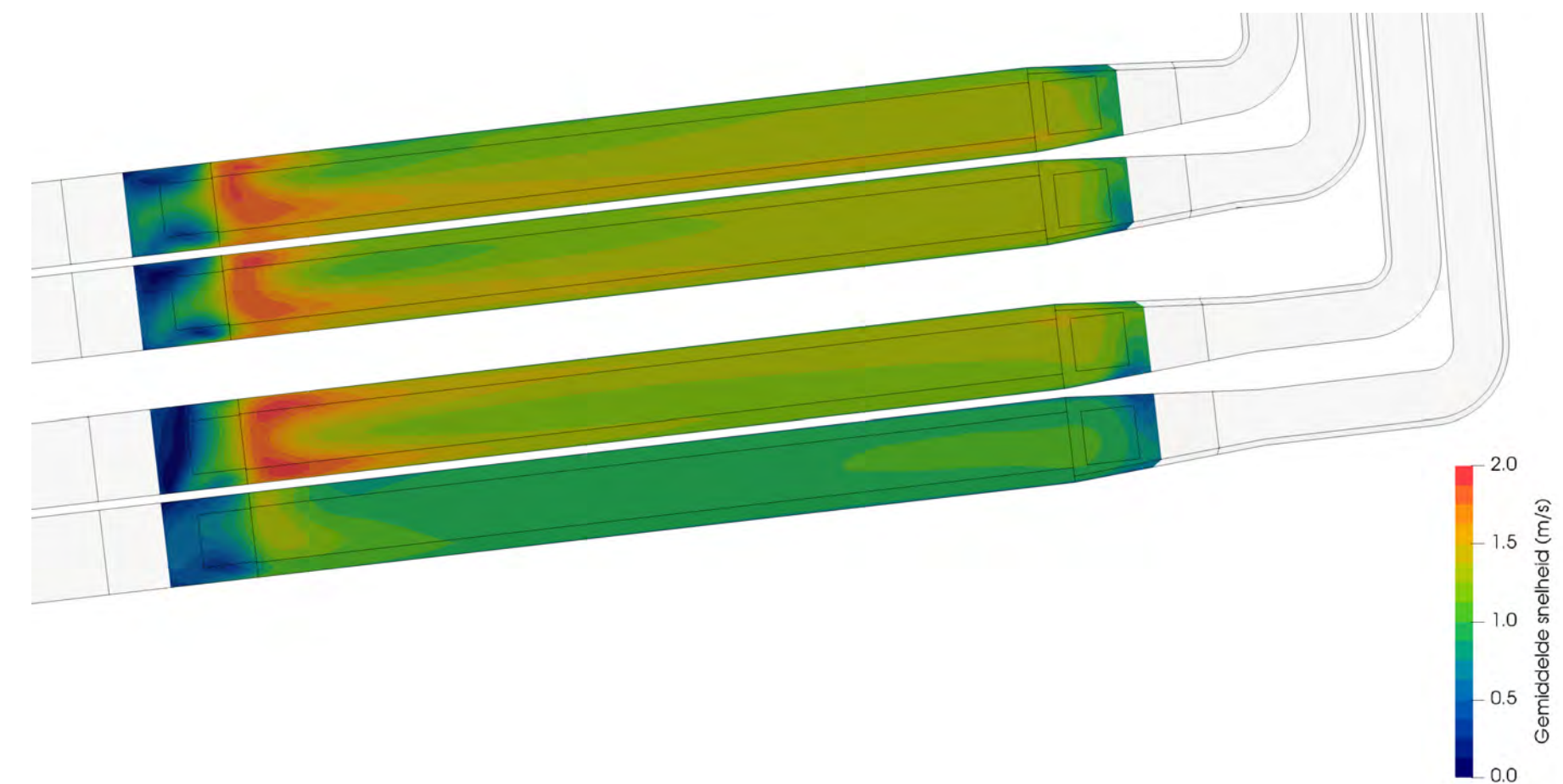
D Stroming in verlaagde deel duiker

Op verzoek is de stroming in het lage deel van de duiker voor geometrie 2 en 3 in meer detail in kaart gebracht.

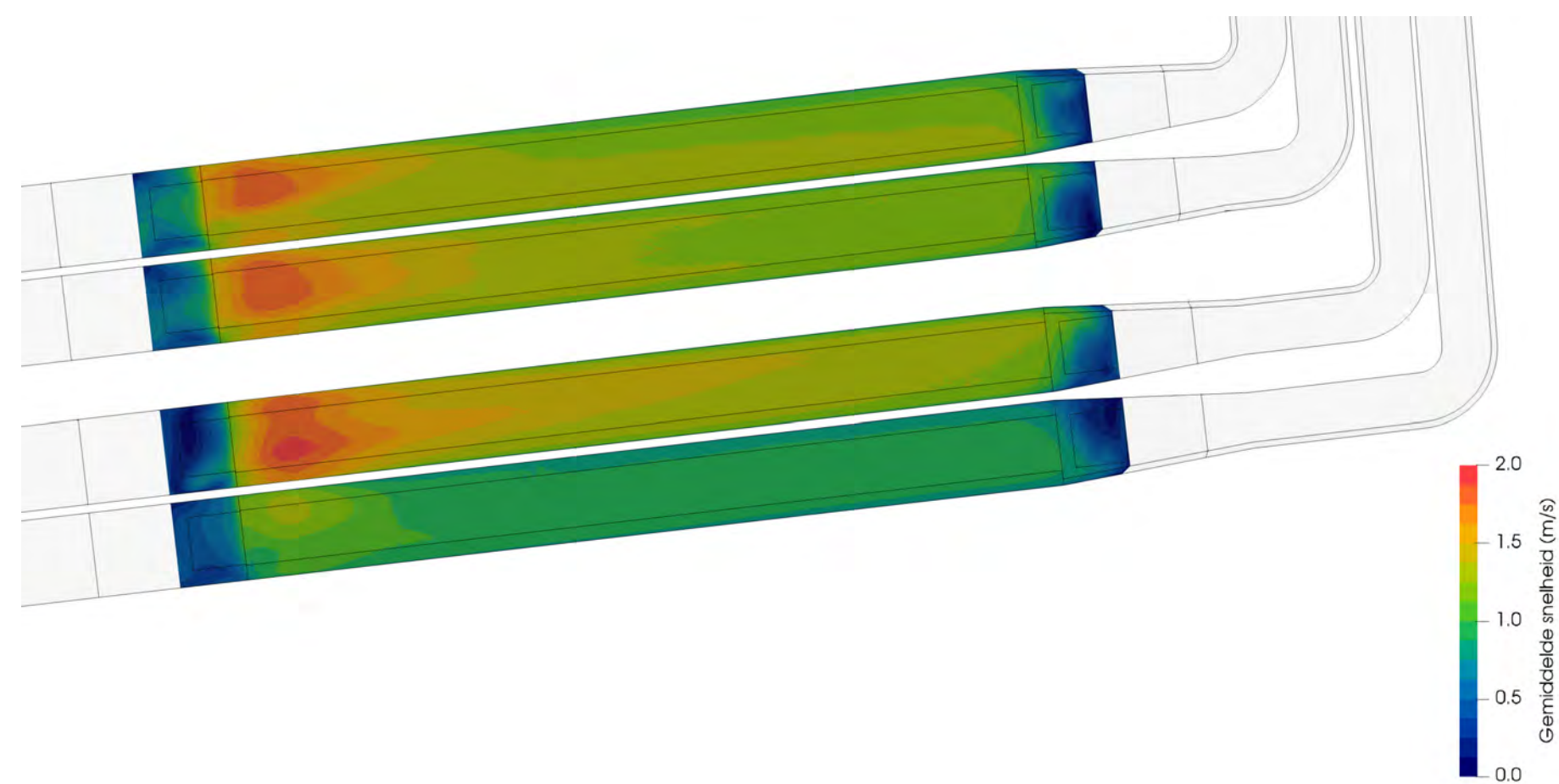
D.1 Geometrie 2



— Figuur D.1: Snelheid 200 mm onder duiker plafond, geometrie 2

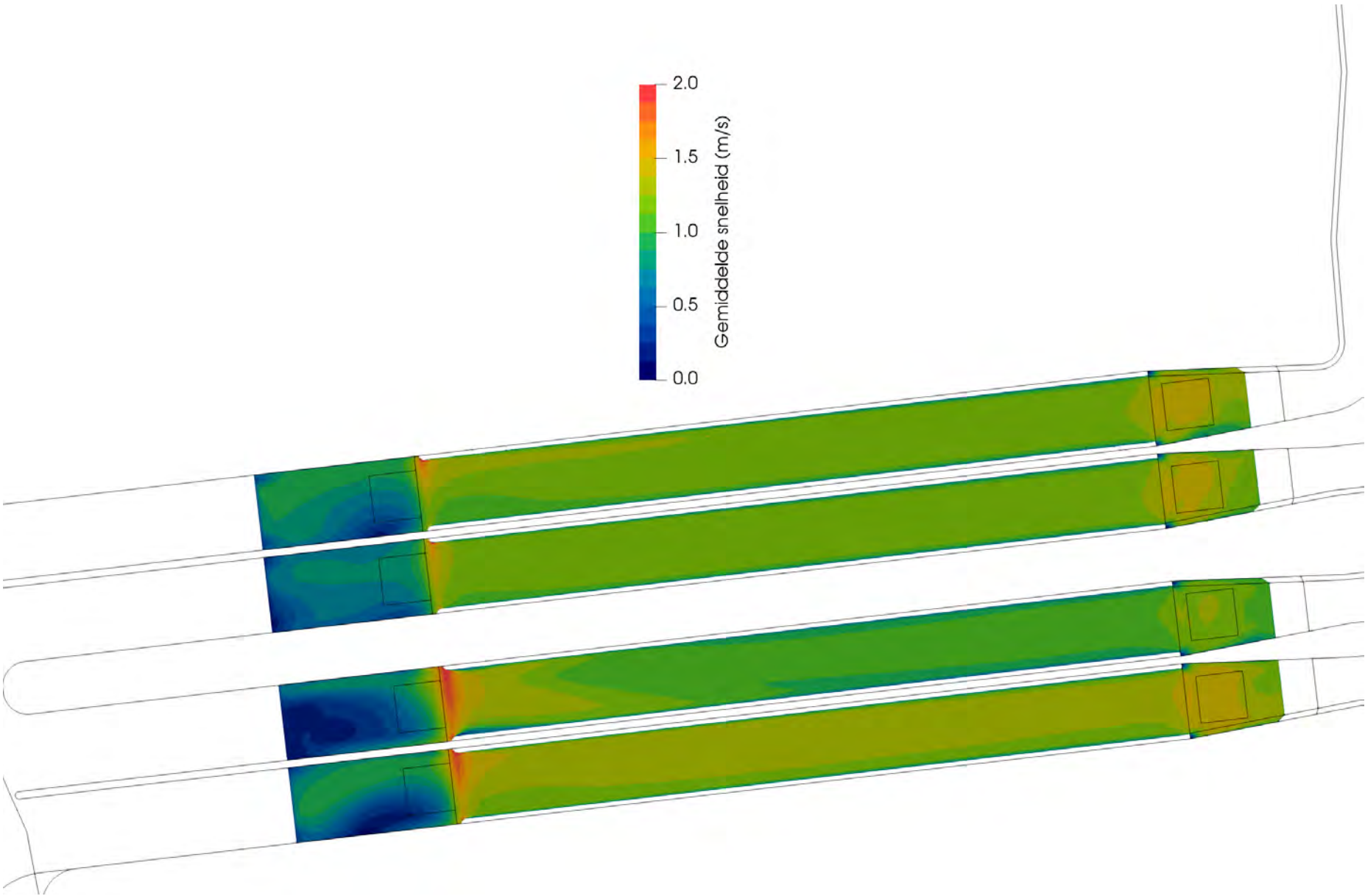


— Figuur D.2: Snelheid centerlijn duiker, geometrie 2

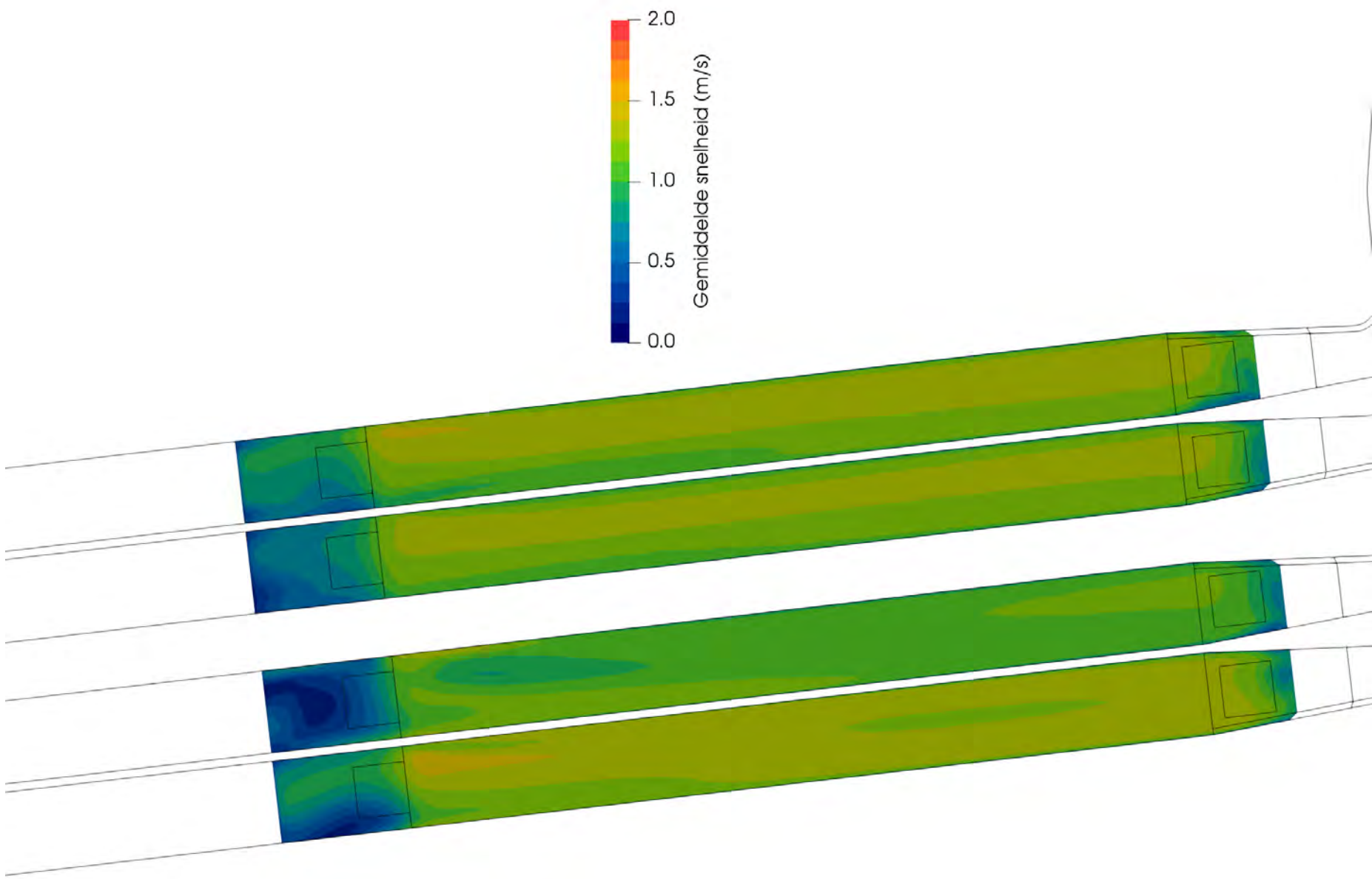


— **Figuur D.3:** Snelheid 200 mm boven duiker bodem, geometrie 2

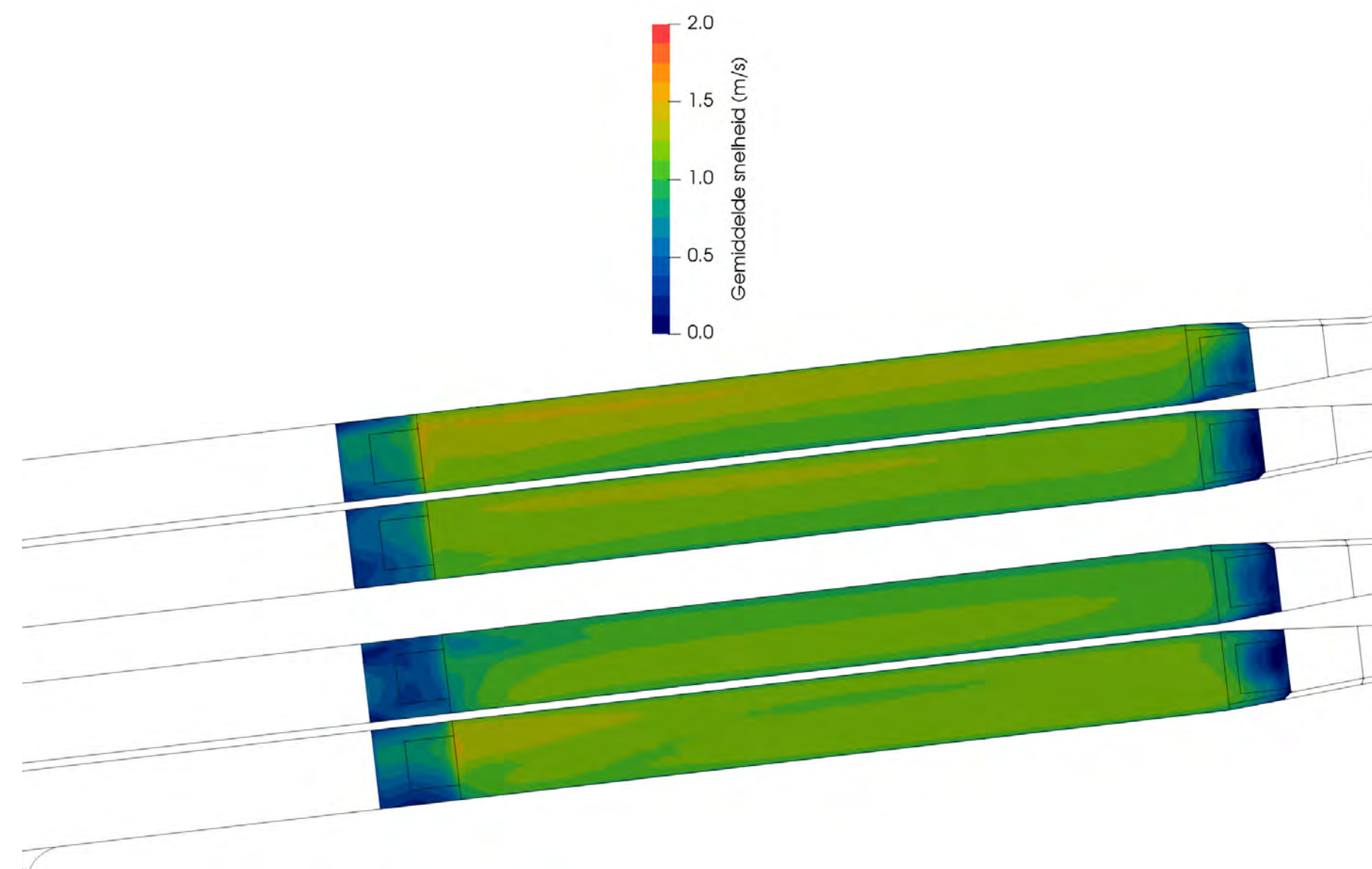
D.2 Geometrie 2 v2



— Figuur D.4: Snelheid 200 mm onder duiker plafond, geometrie 2 v2

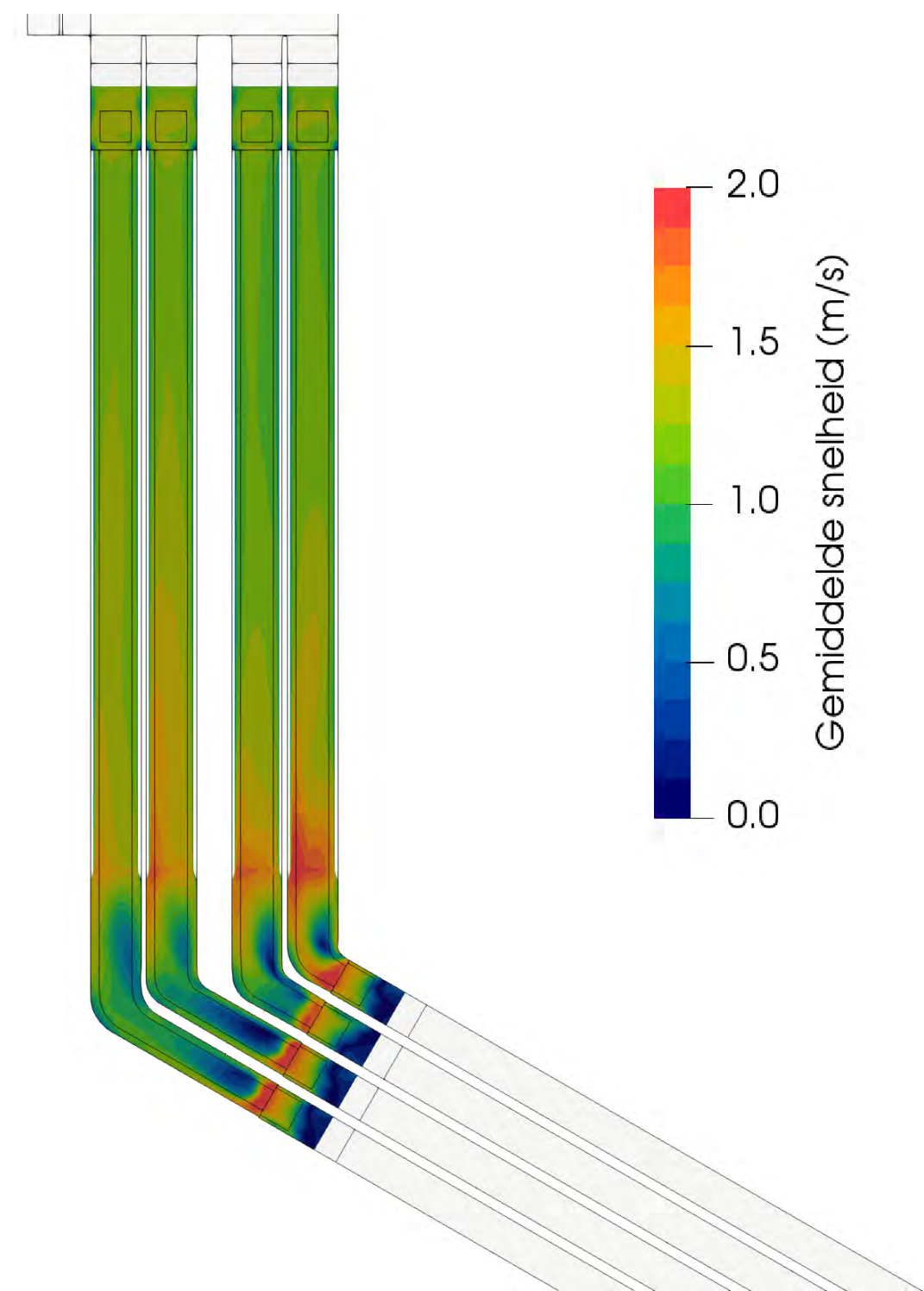


— Figuur D.5: Snelheid centerlijn duiker, geometrie 2 v2

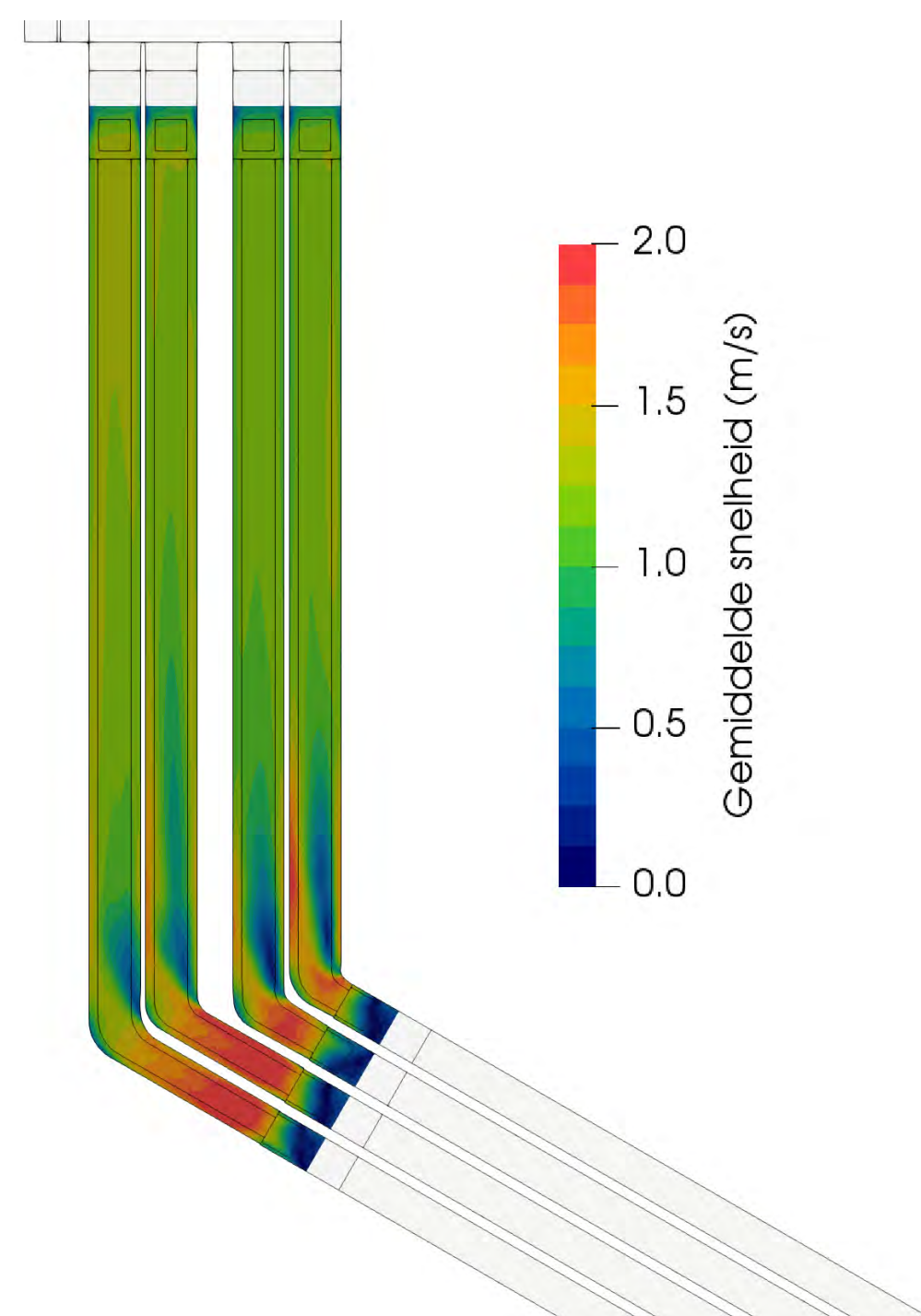


— **Figuur D.6:** Snelheid 200 mm boven duiker bodem, geometrie 2 v2

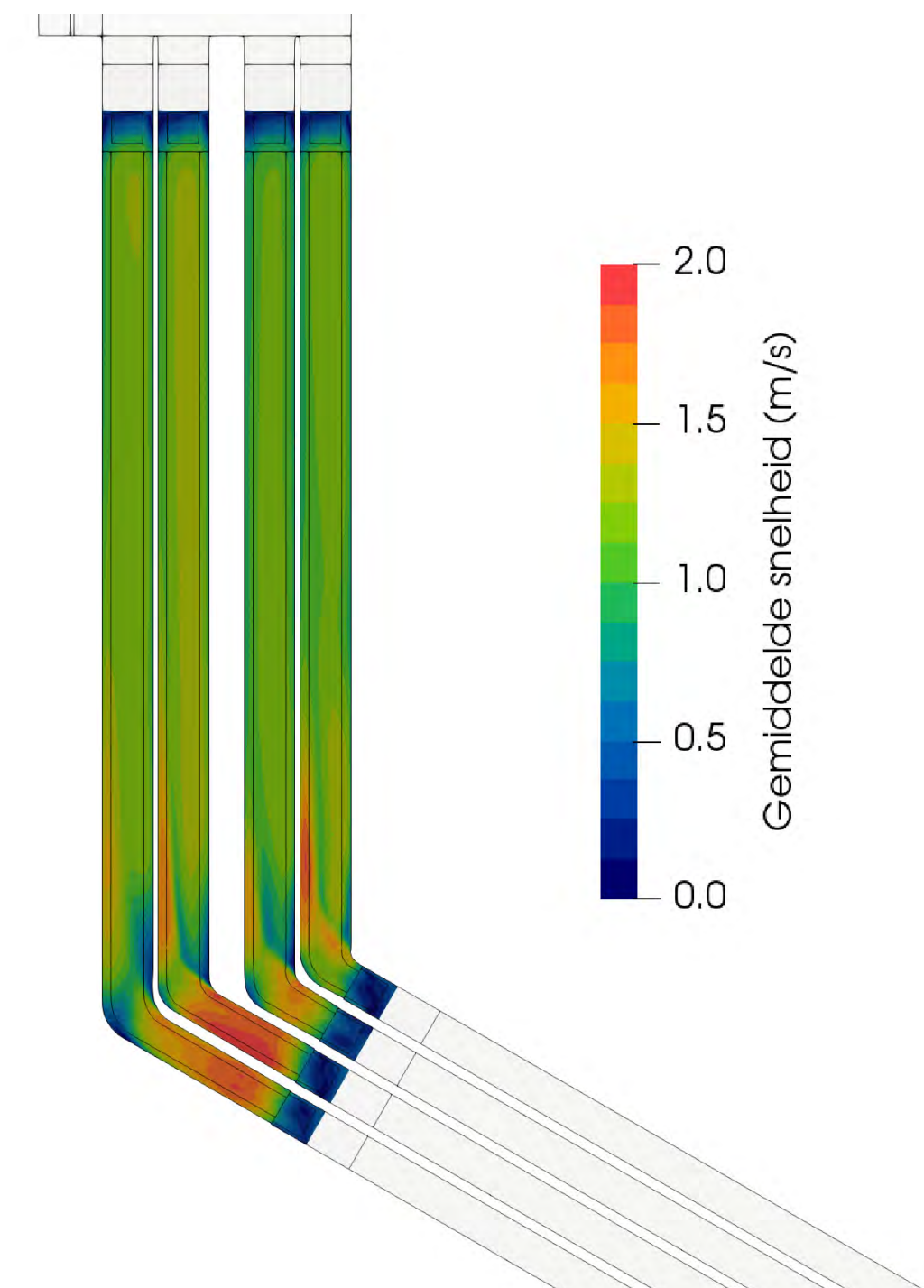
D.3 Geometrie 3



— **Figuur D.7:** Snelheid 200 mm onder duiker plafond, geometrie 3

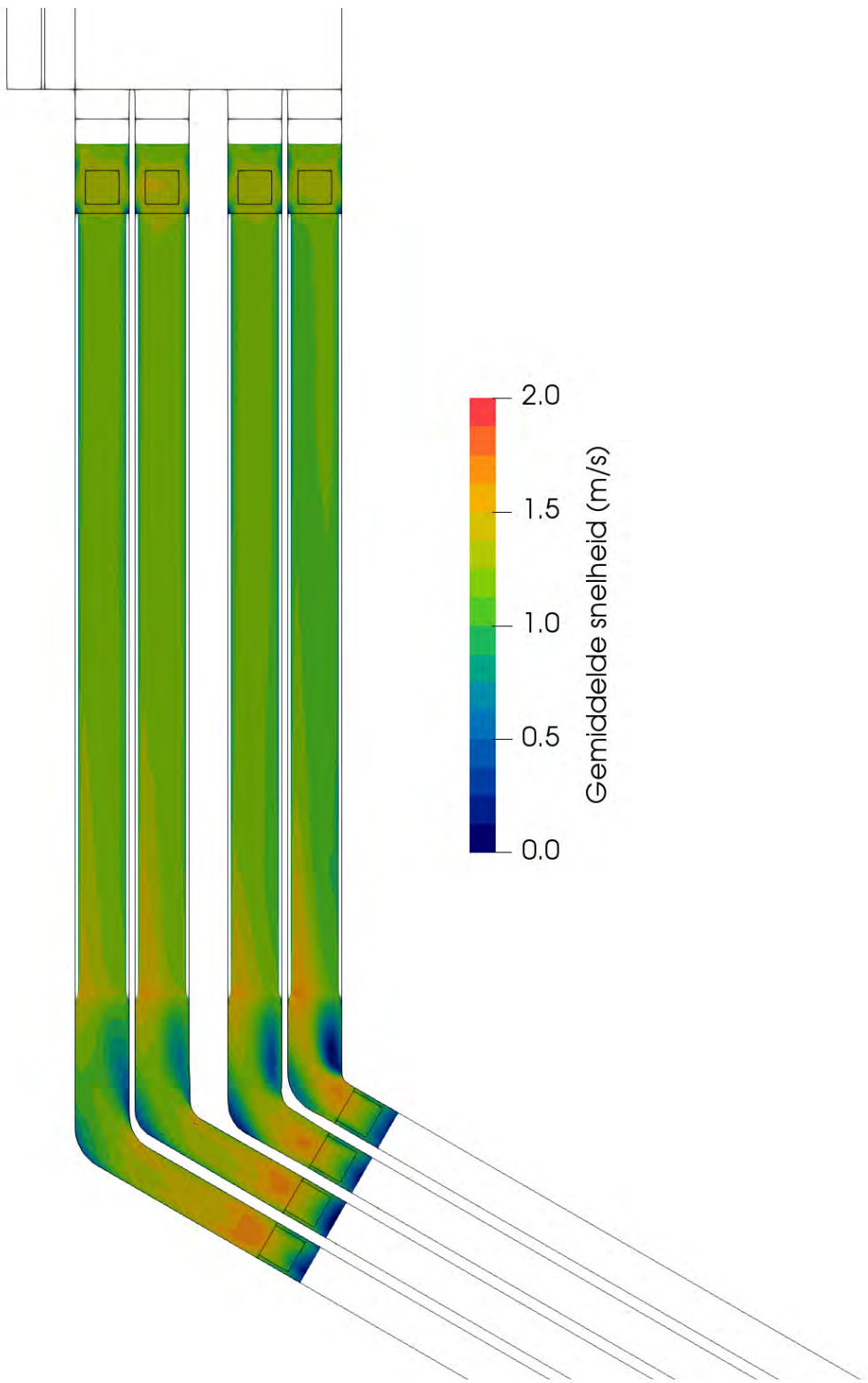


— **Figuur D.8:** Snelheid centerlijn duiker, geometrie 3

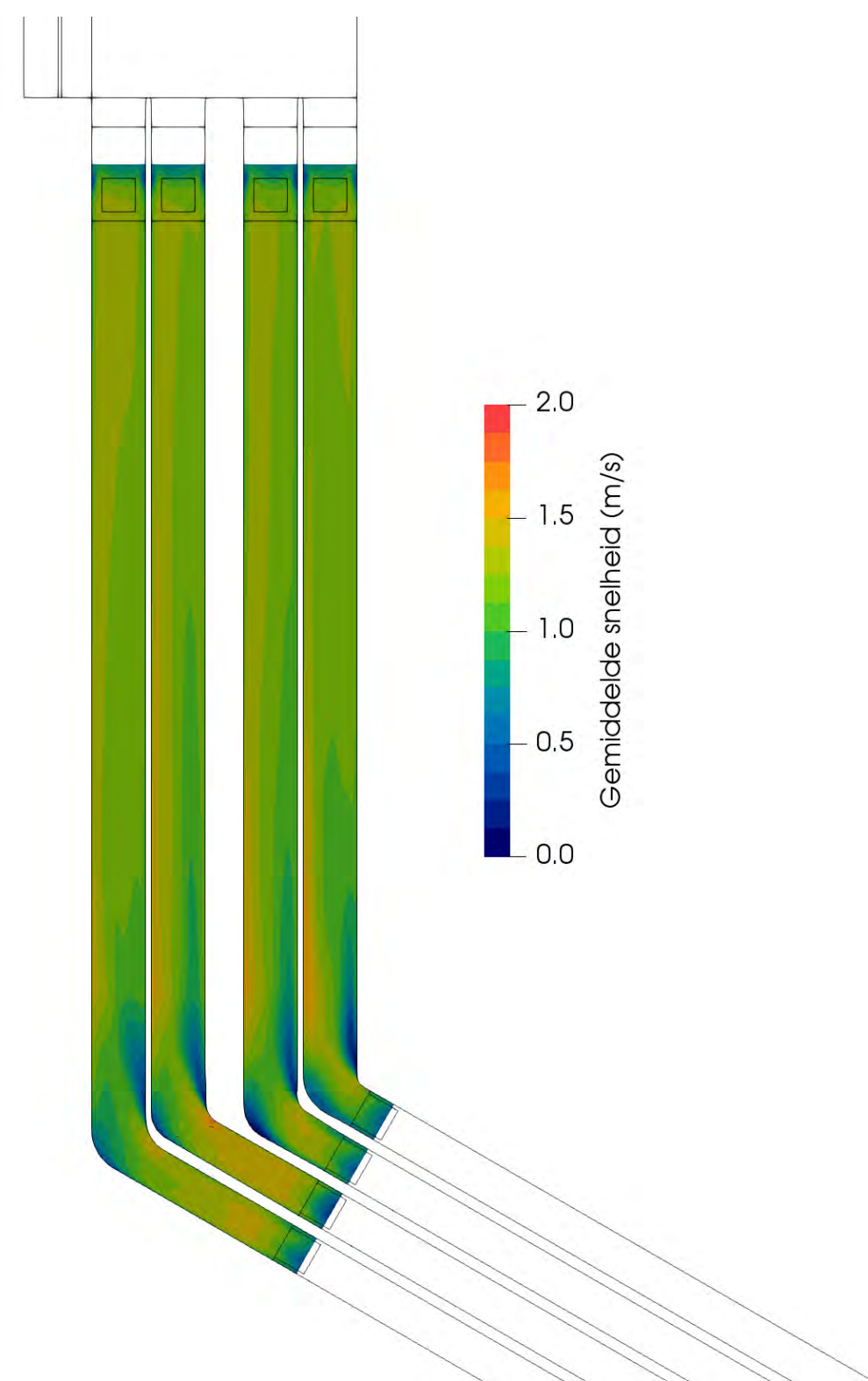


— **Figuur D.9:** Snelheid 200 mm boven duiker bodem, geometrie 3

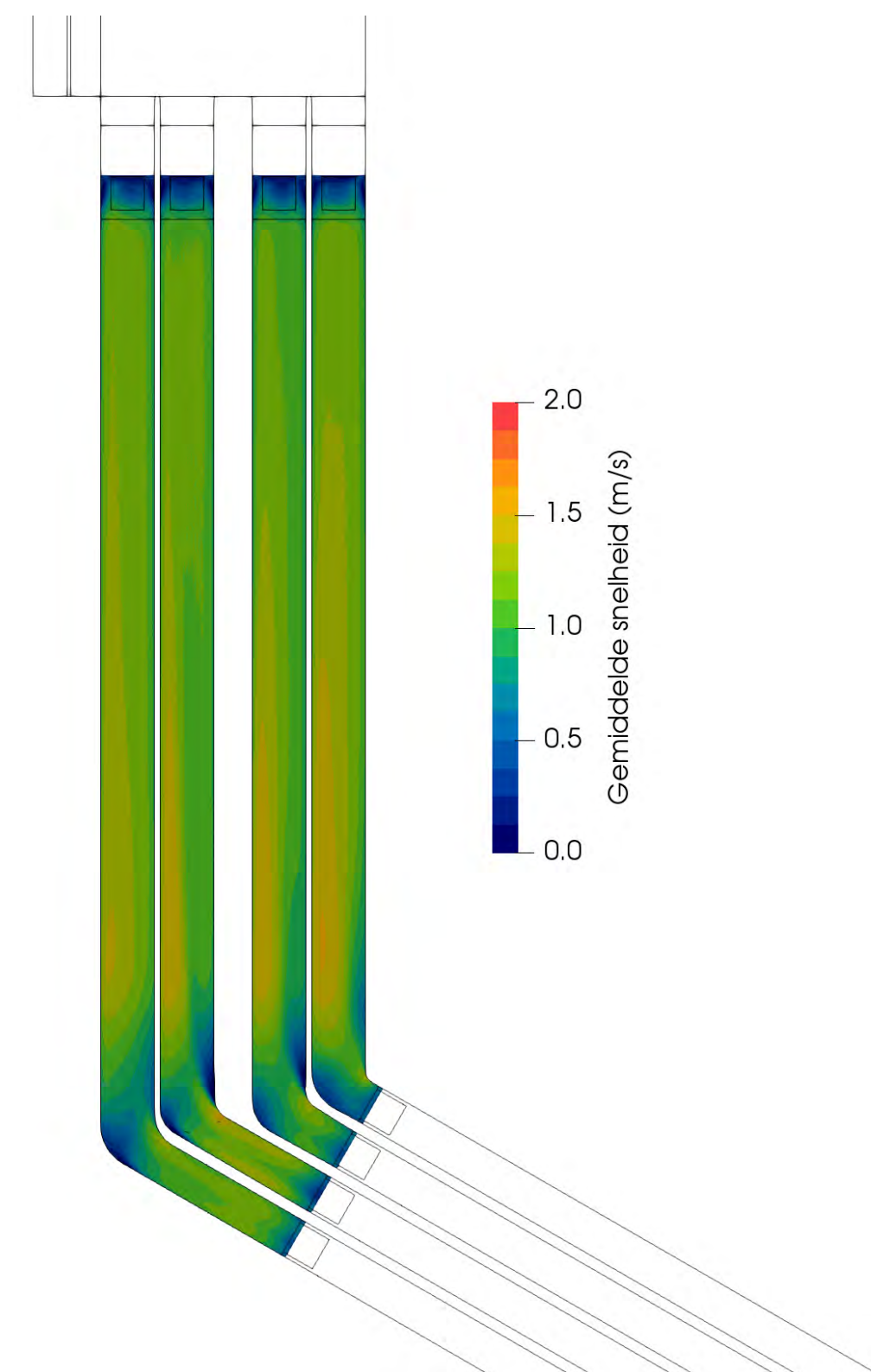
D.4 Geometrie 3 v2



— Figuur D.10: Snelheid 200 mm onder duiker plafond, geometrie 3 v2

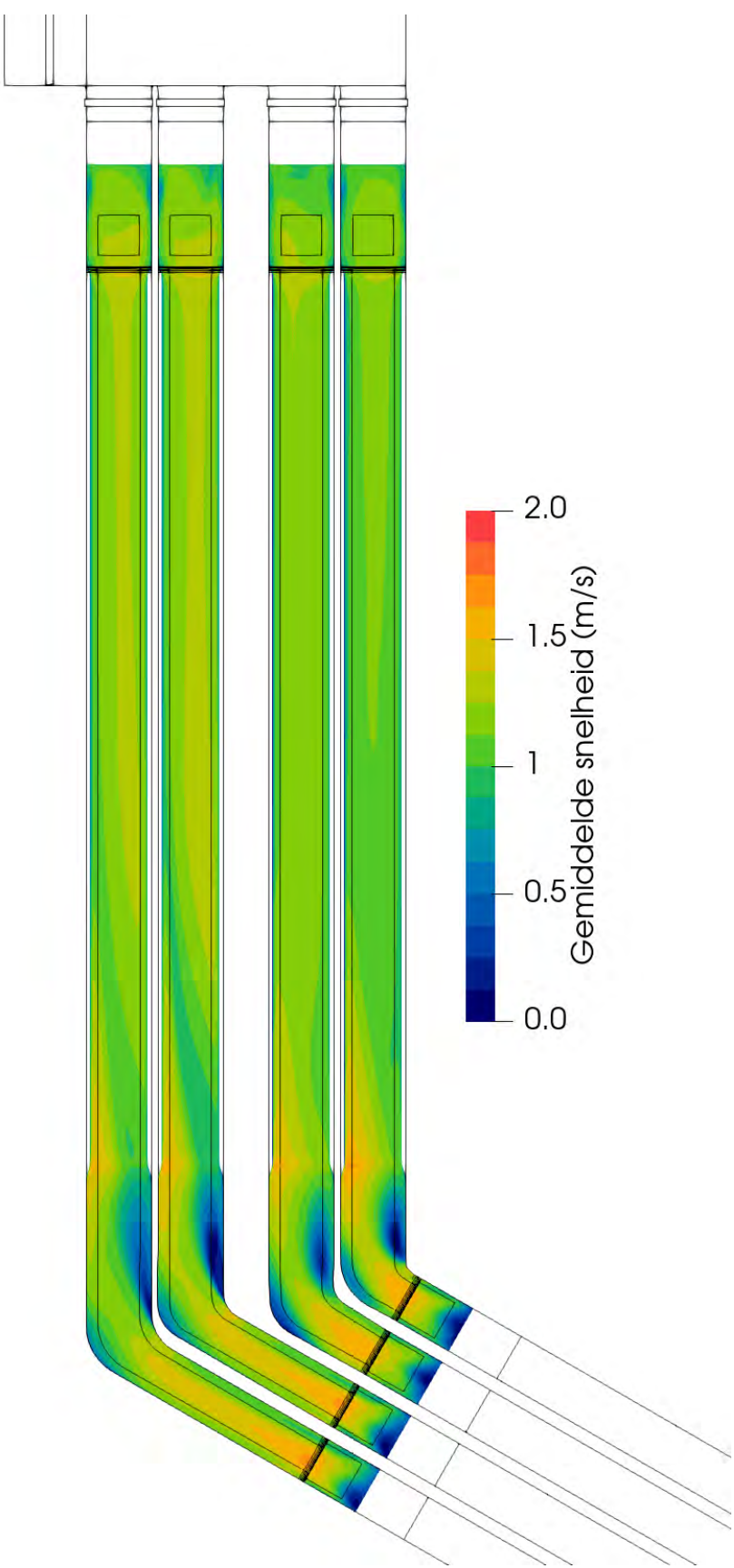


— Figuur D.11: Snelheid centerlijn duiker, geometrie 3 v2

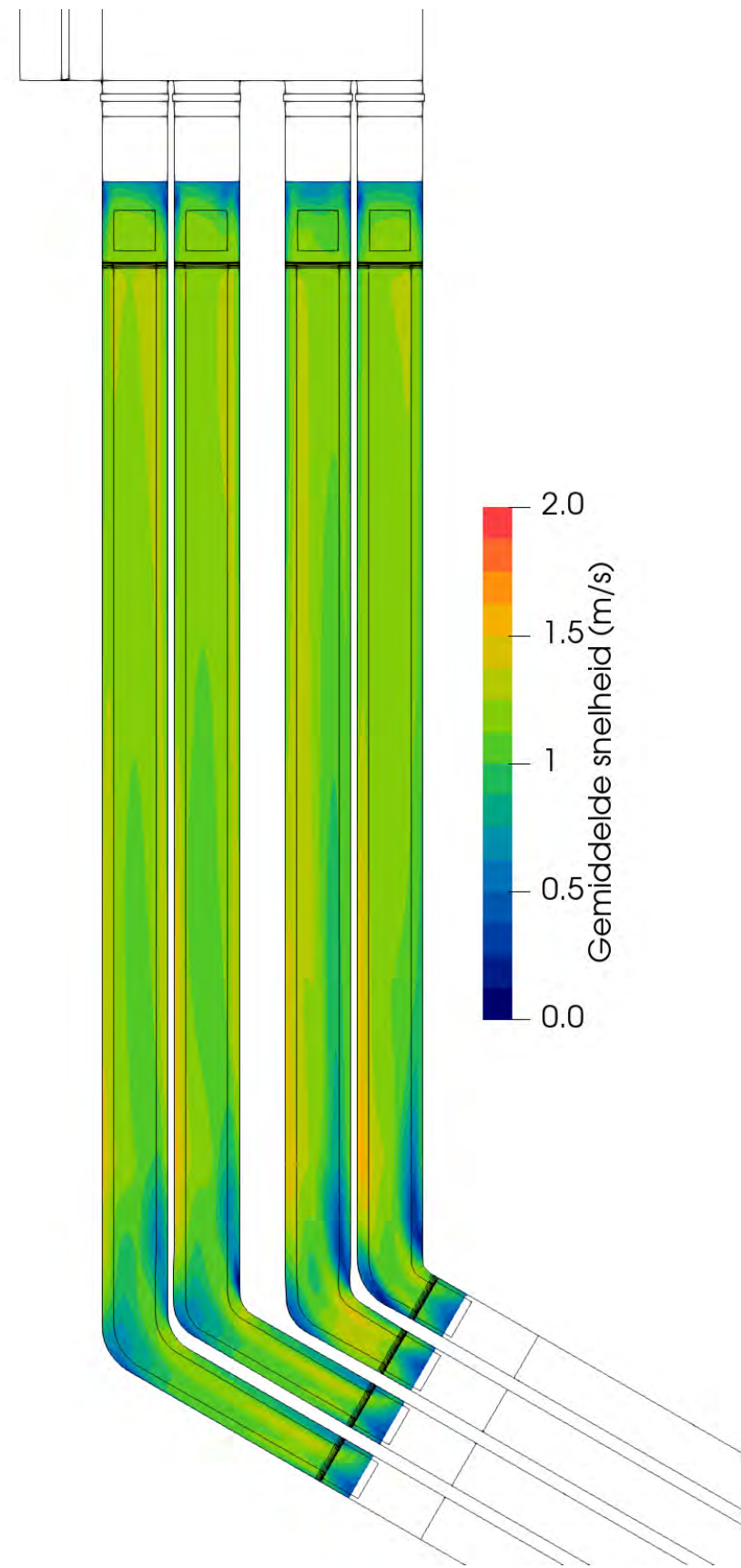


— Figuur D.12: Snelheid 200 mm boven duiker bodem, geometrie 3 v2

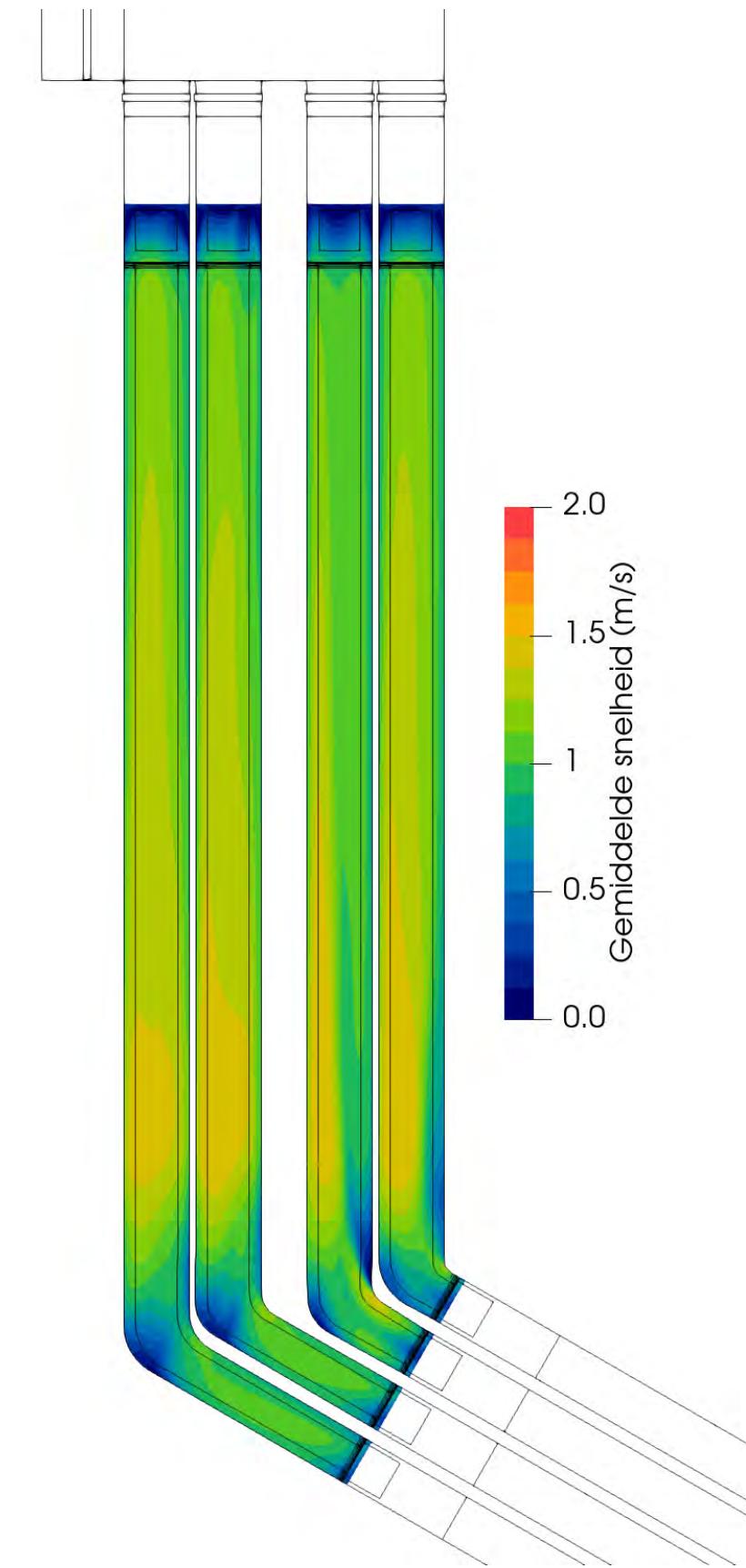
D.5 Geometrie 3 v3



— **Figuur D.13:** Snelheid 200 mm onder duiker plafond, geometrie 3 v3

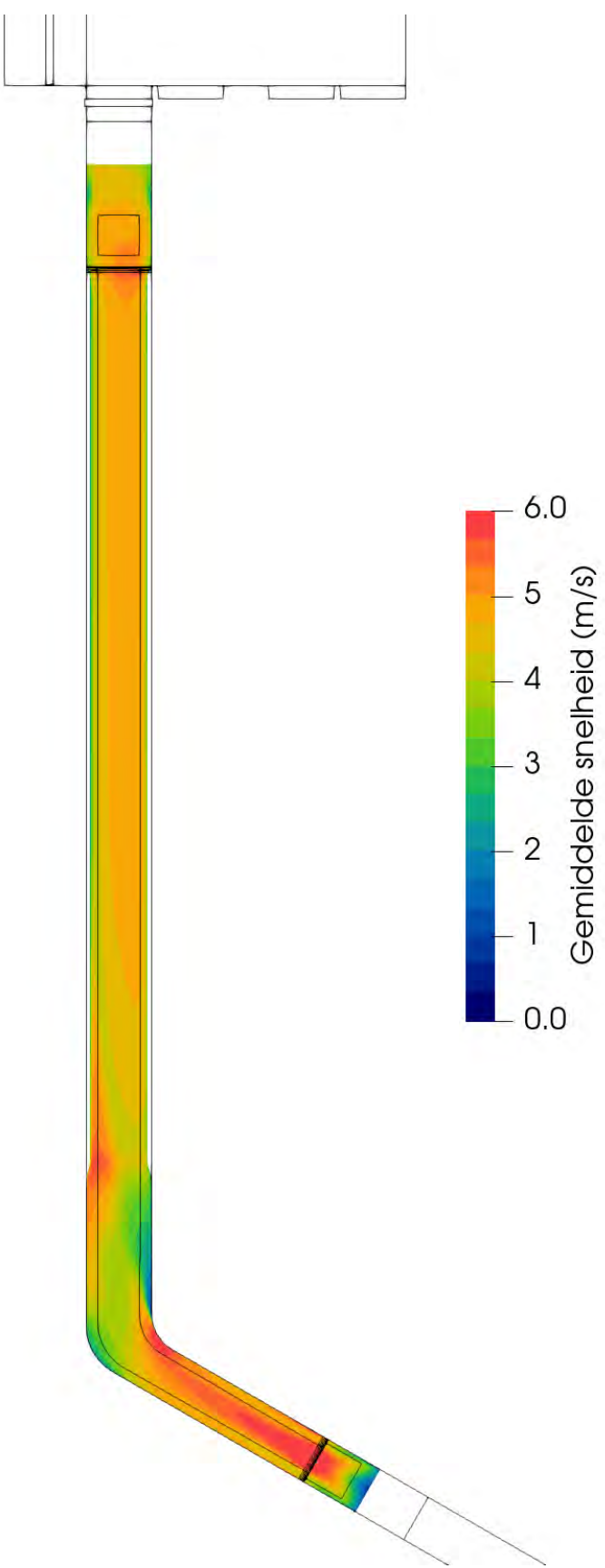


— **Figuur D.14:** Snelheid centerlijn duiker, geometrie 3 v3

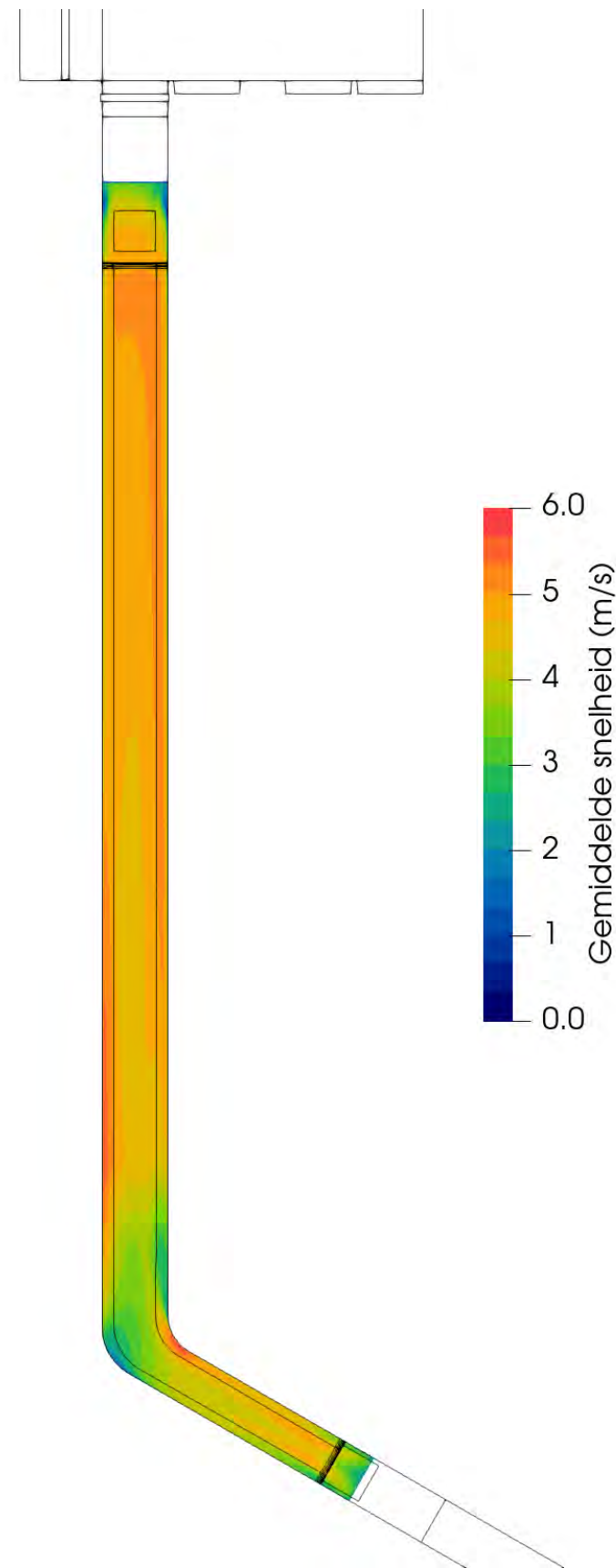


— **Figuur D.15:** Snelheid 200 mm boven duiker bodem, geometrie 3 v3

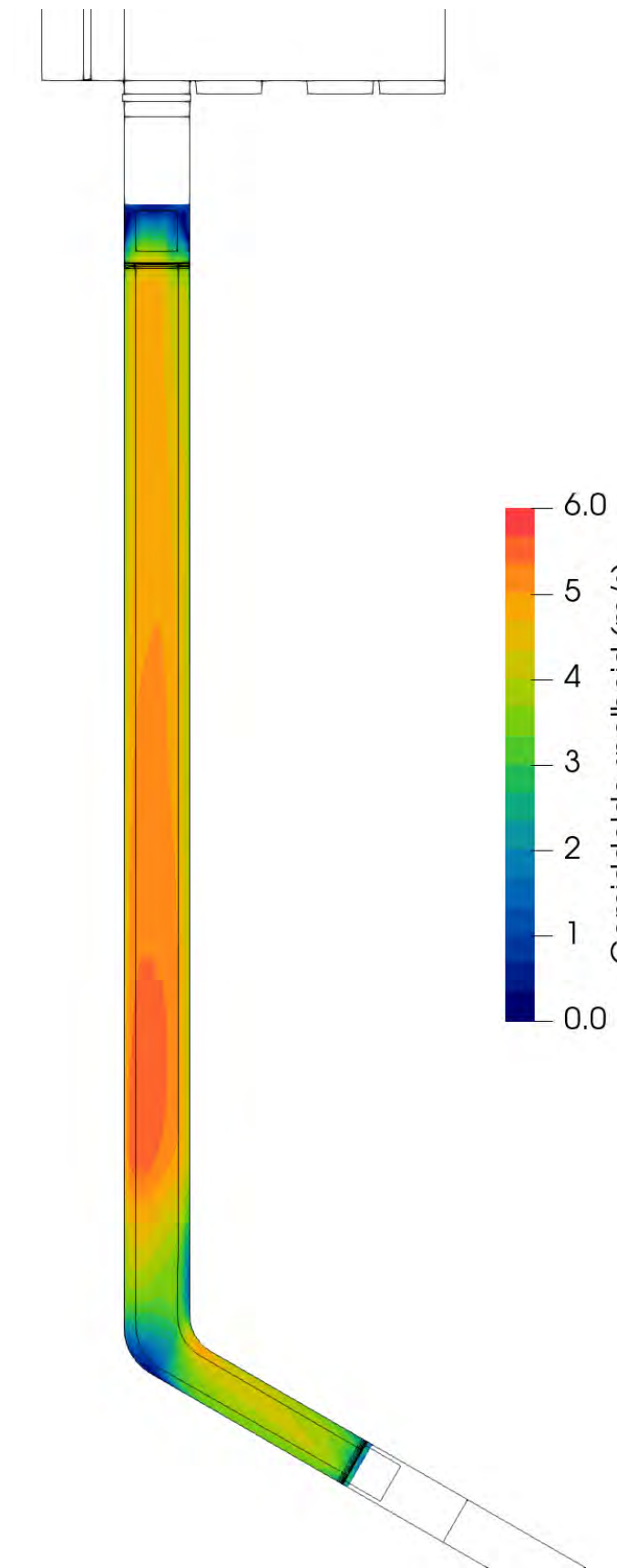
D.6 Geometrie 3 v3 - 1 koker



— **Figuur D.16:** Snelheid 200 mm onder duiker plafond, geometrie 3 v3 - 1 koker



— **Figuur D.17:** Snelheid centerlijn duiker, geometrie 3 v3 - 1 koker

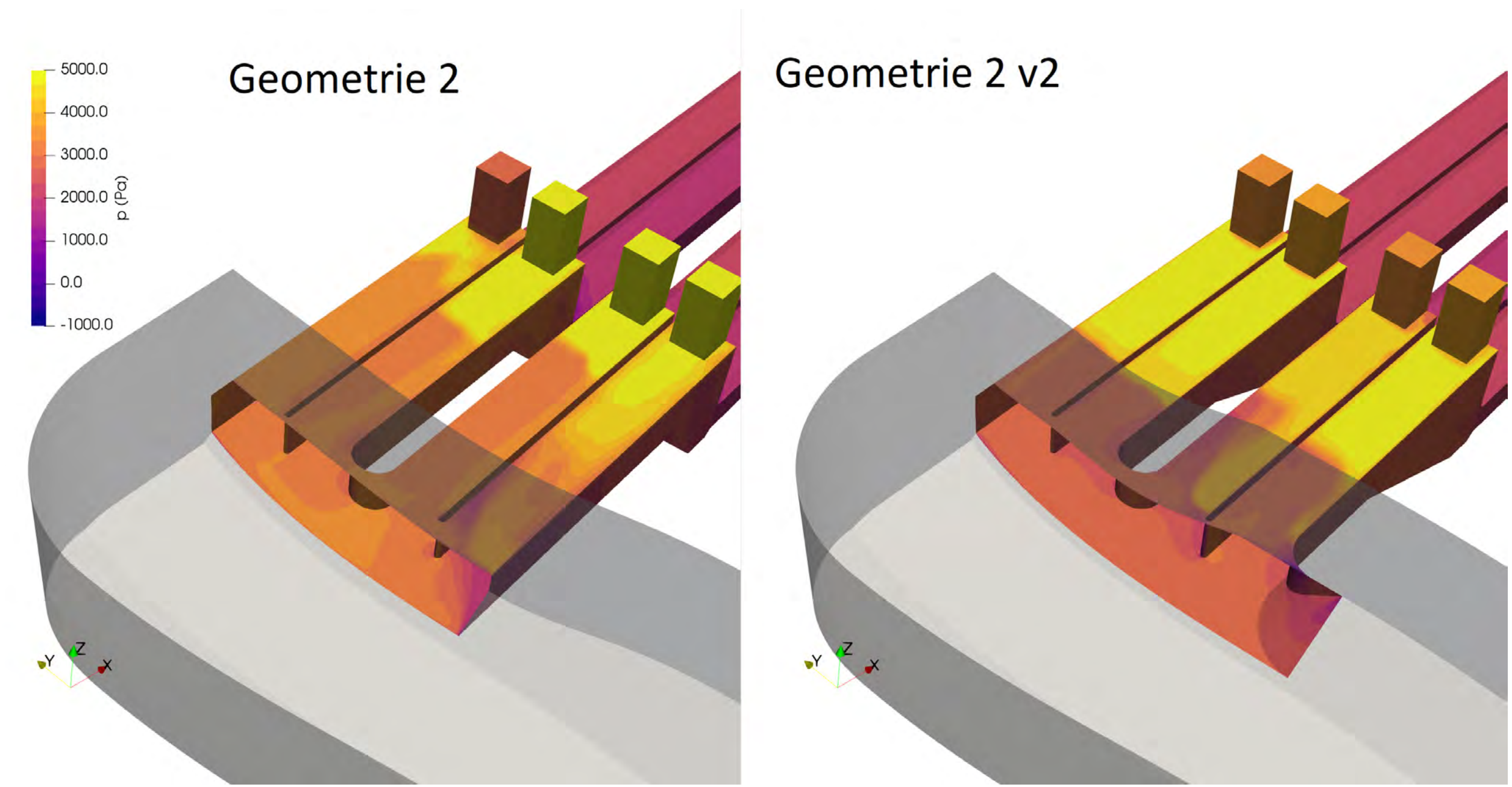


— **Figuur D.18:** Snelheid 200 mm boven duiker bodem, geometrie 3 v3 - 1 koker

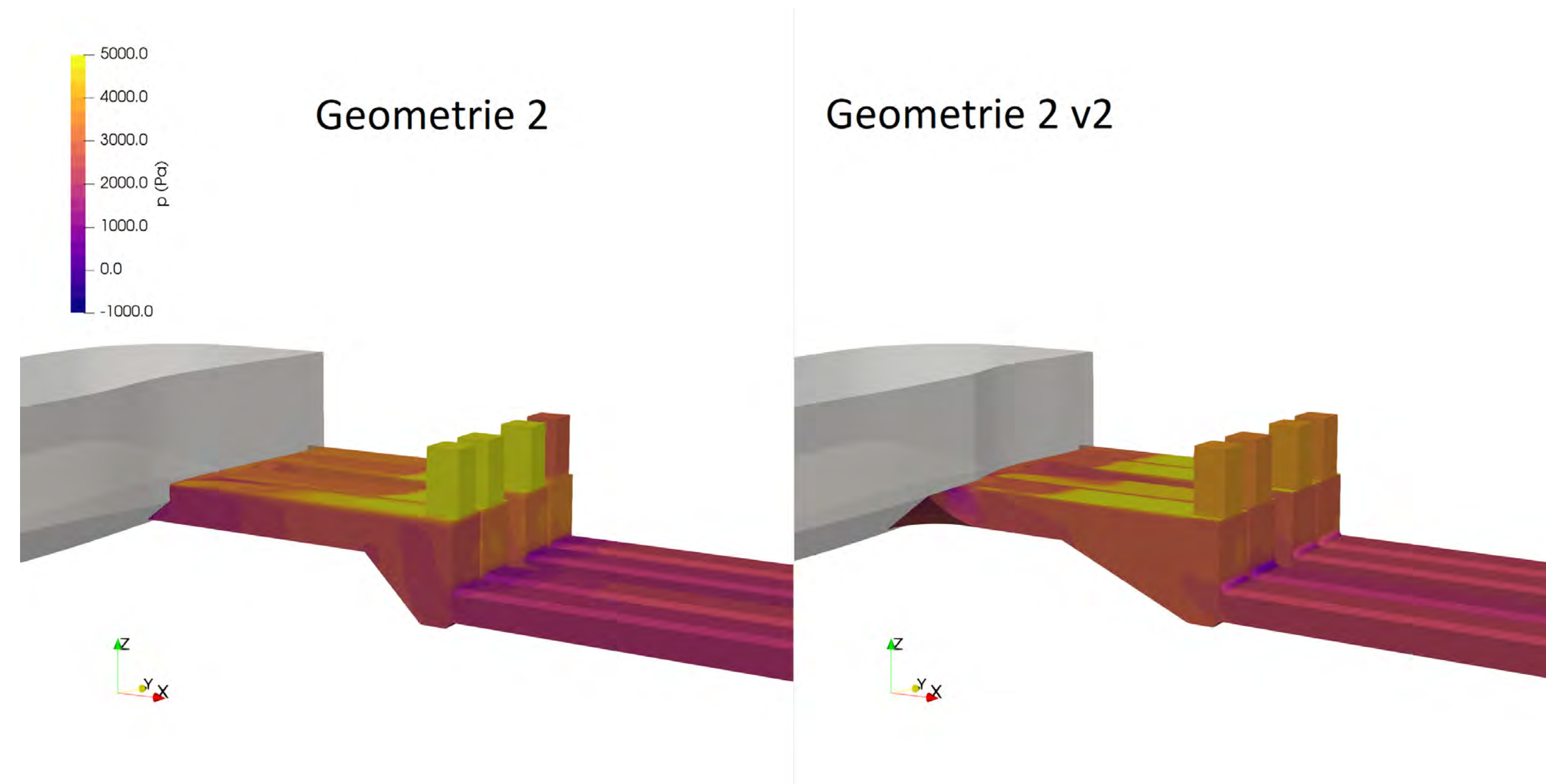
E Druk visualisatie

Op verzoek van het Waterbouwkundig Laboratorium zijn druk visualisatie van de nieuwe geometrieën toegevoegd in dit hoofdstuk. Op de volgende pagina's wordt de druk zonder de hydrostatische druk weergegeven op het betonnen deel van de duiker varianten.

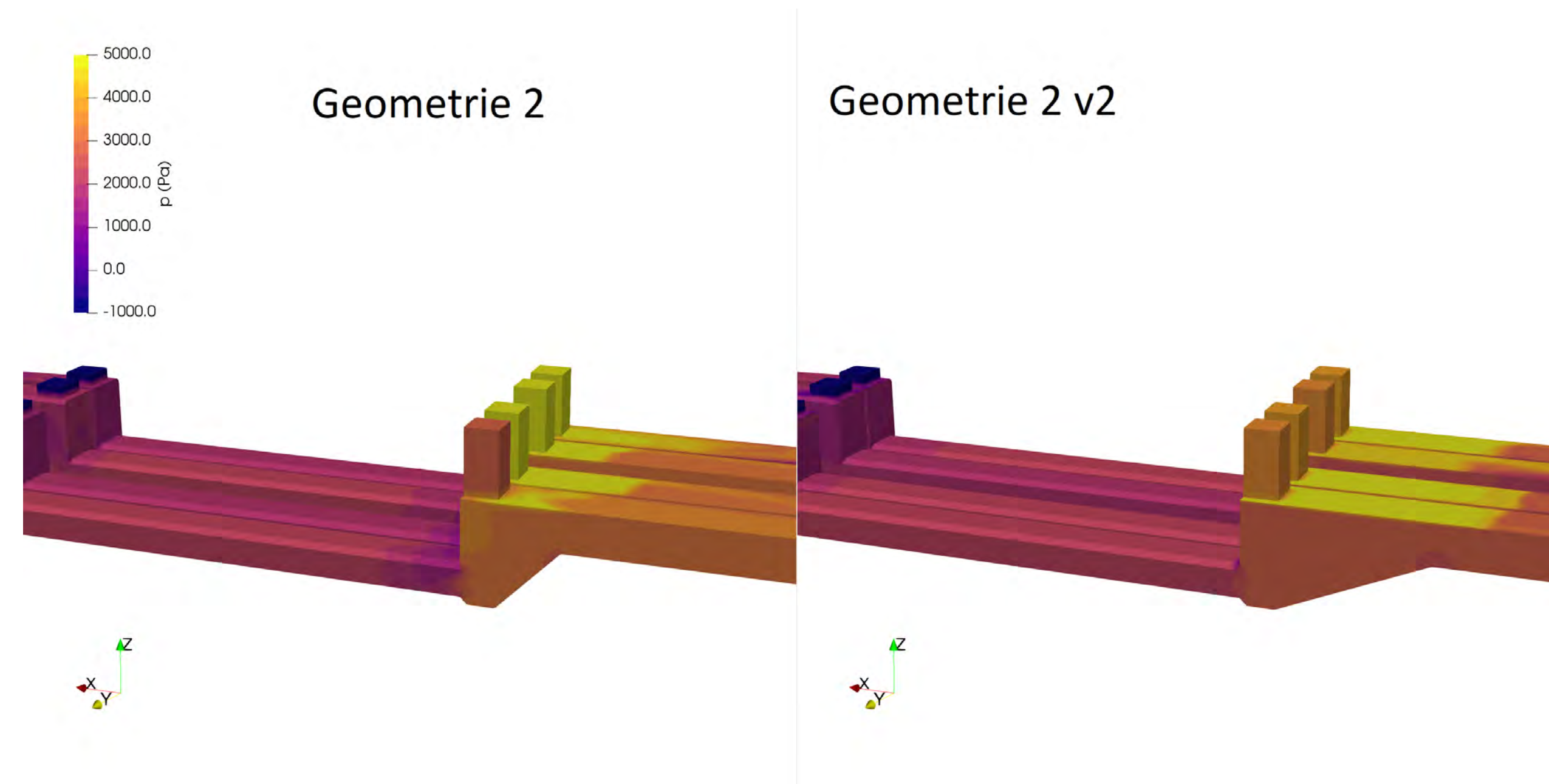
E.1 Geometrie 2 v2



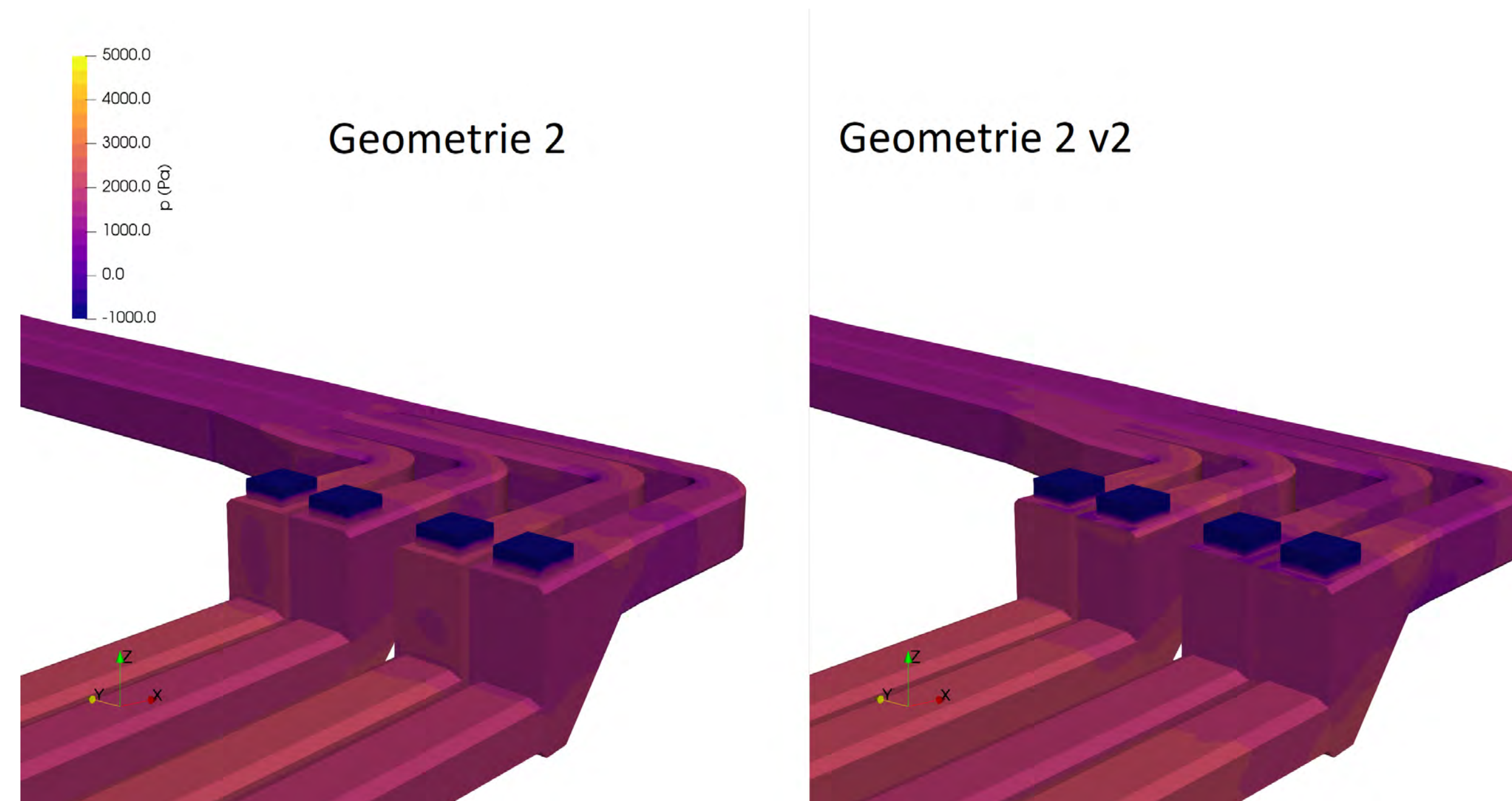
— Figuur E.1: Druk visualisatie duiker ingang



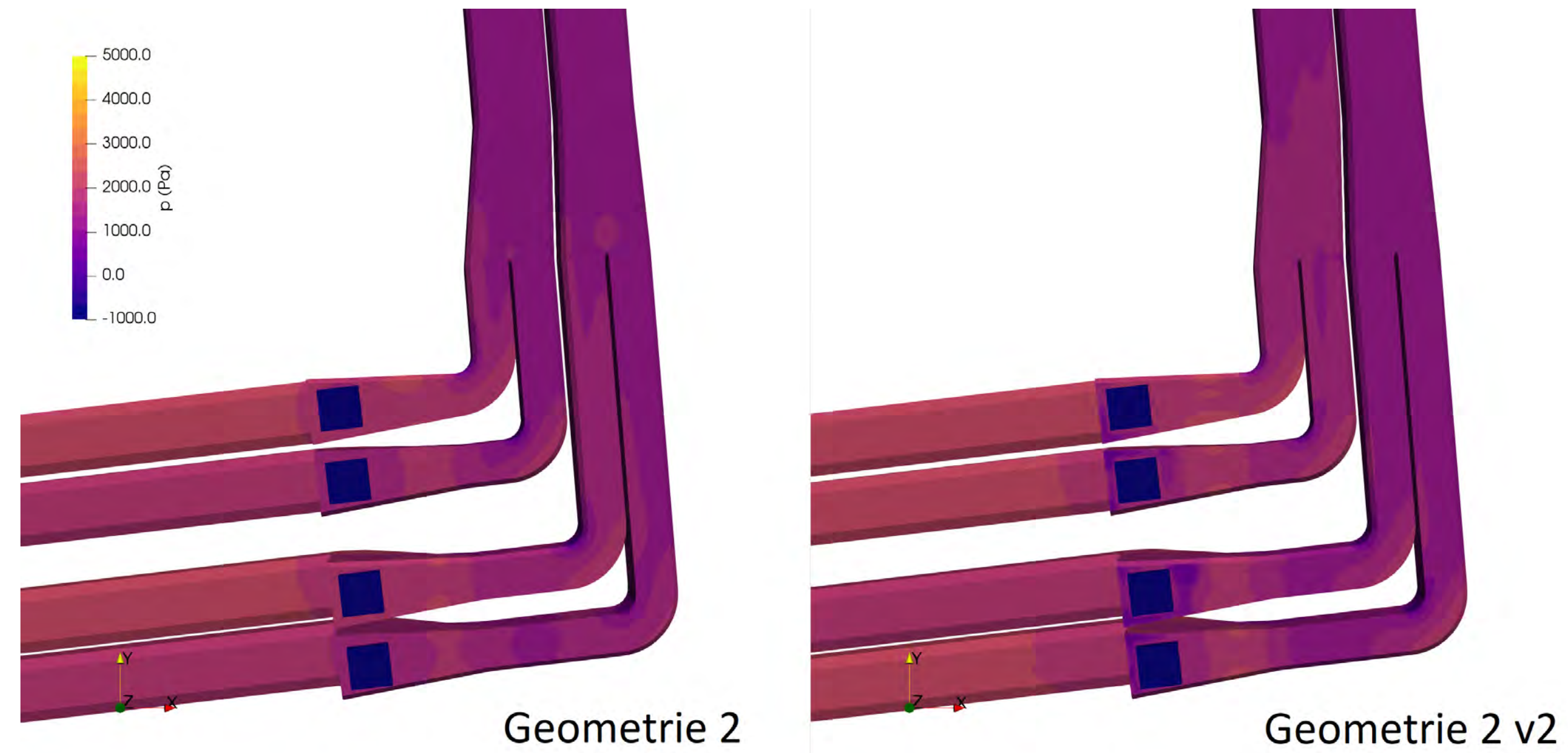
— **Figuur E.2:** Druk visualisatie verlaging in duiker



— Figuur E.3: Druk visualisatie verlaging in duiker 2

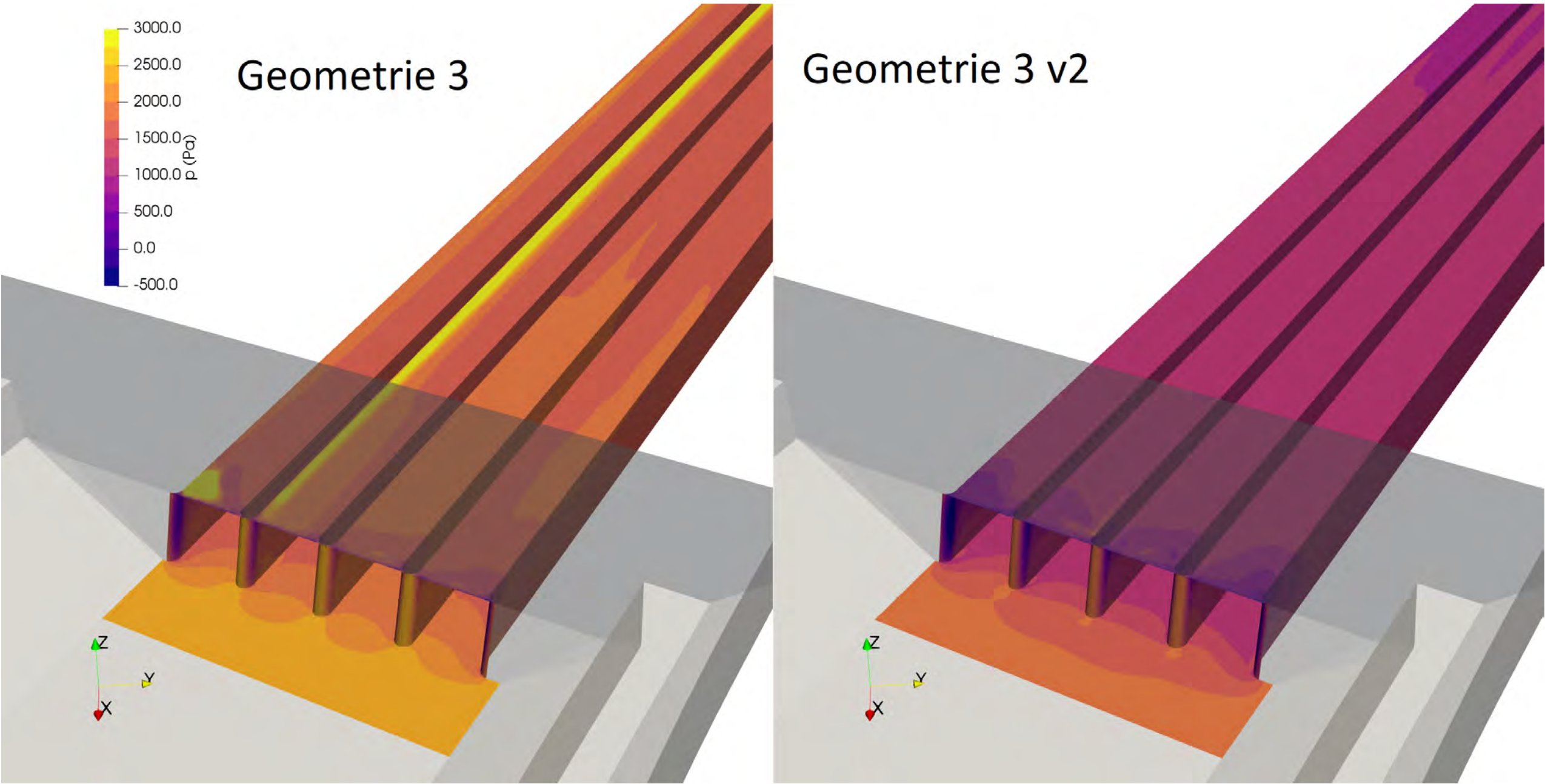


— **Figuur E.4:** Druk visualisatie verhoging in duiker

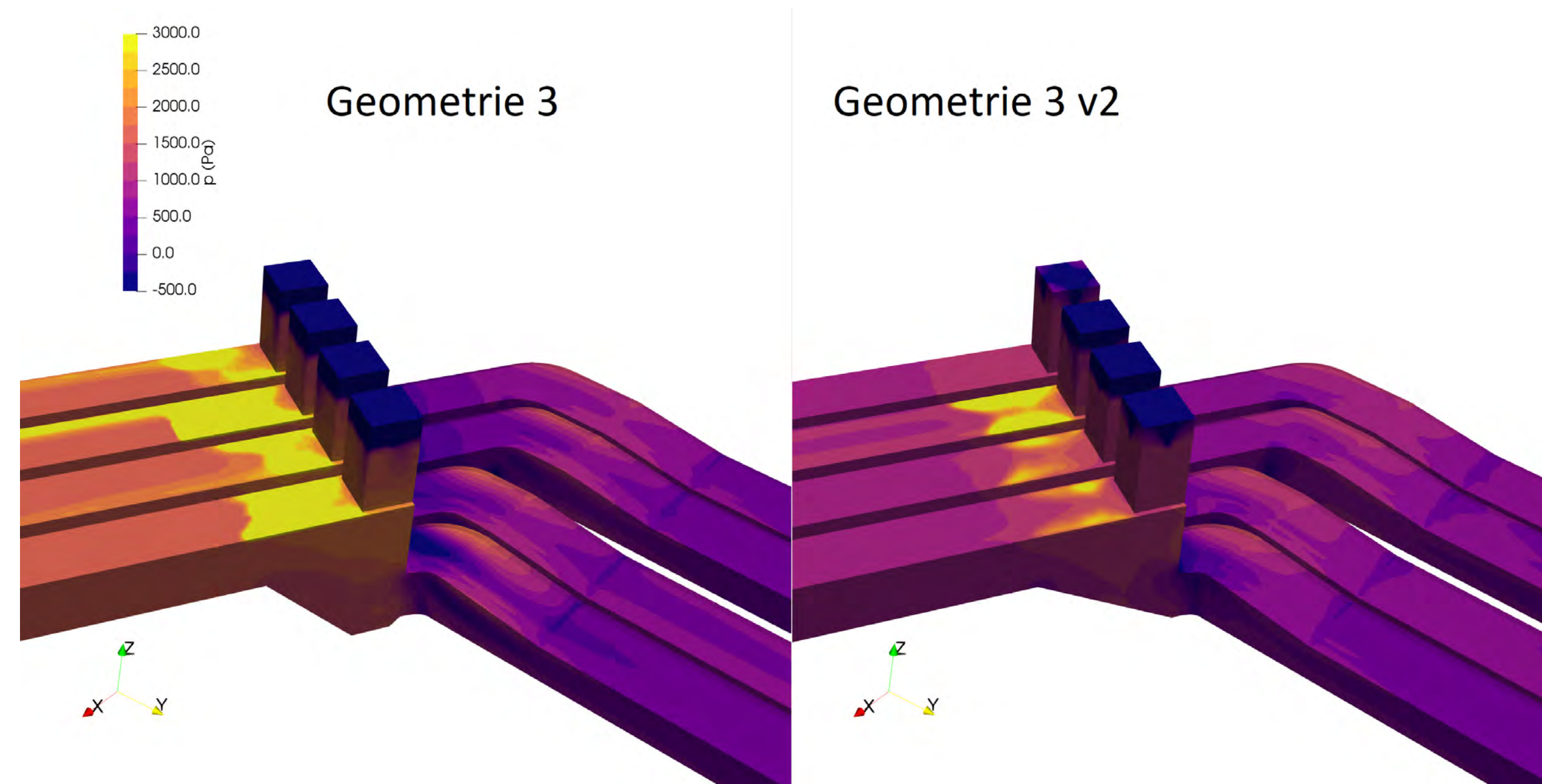


— Figuur E.5: Druk visualisatie bocht in duiker

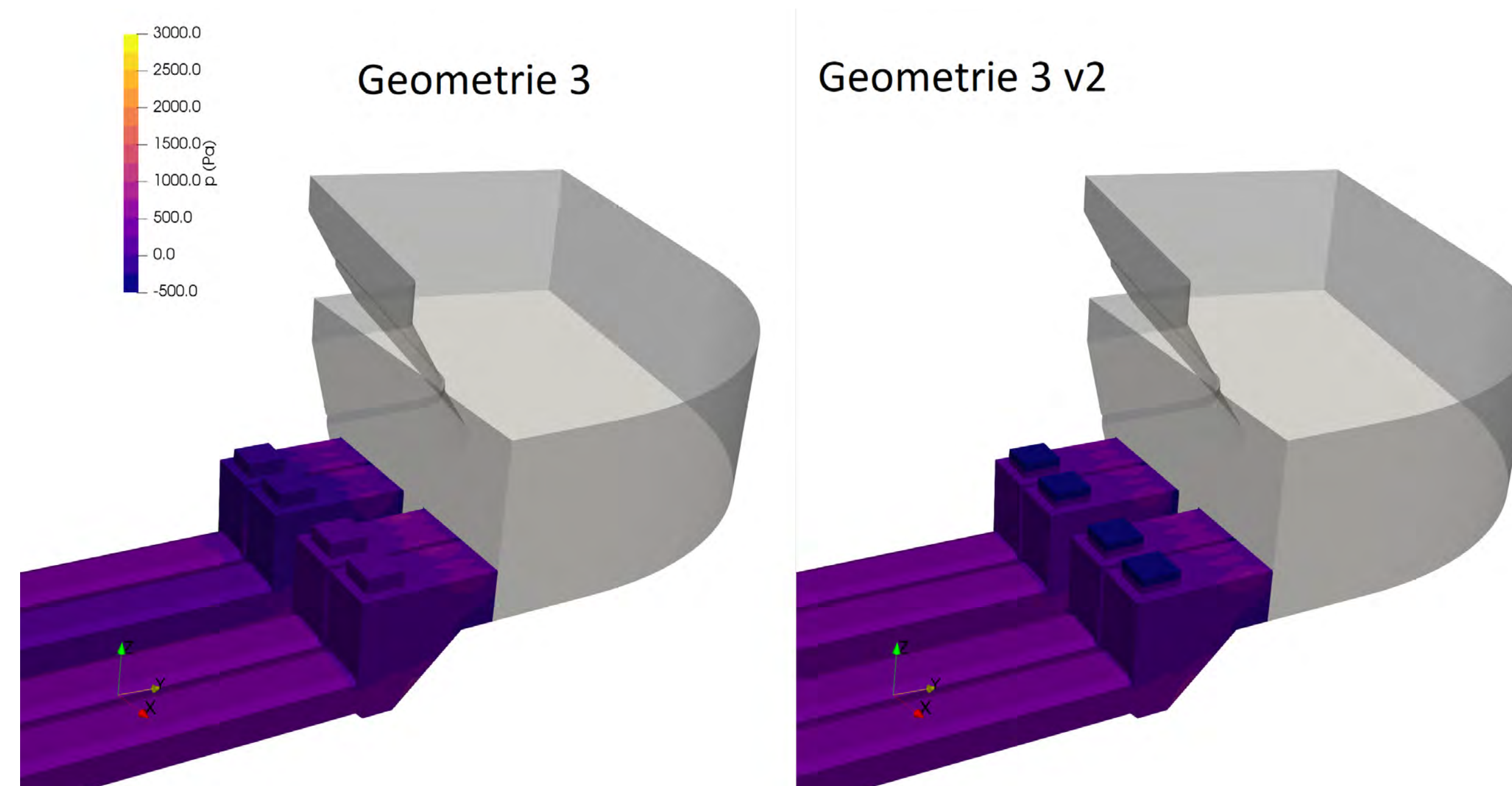
E.2 Geometrie 3 v2



— Figuur E.6: Druk visualisatie duiker ingang

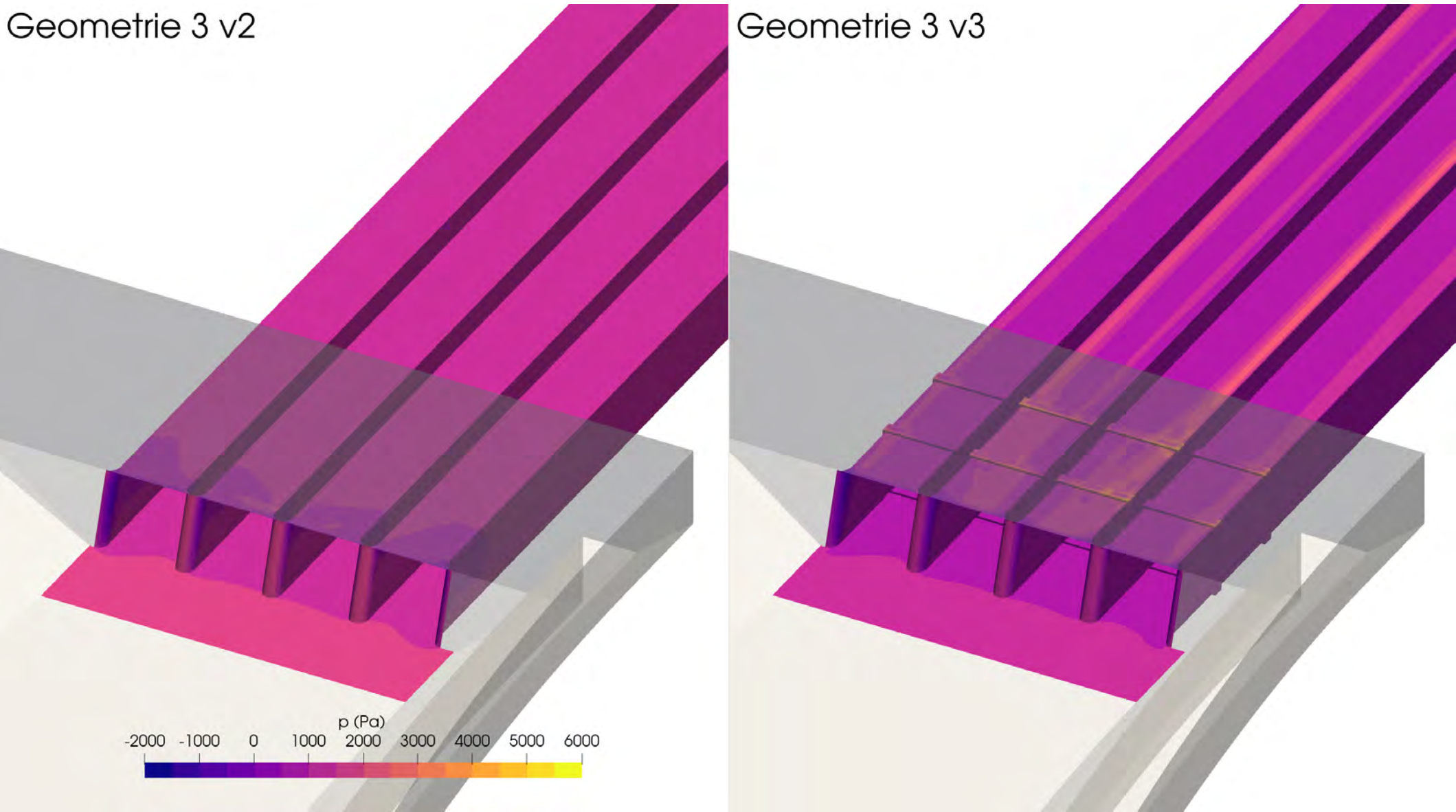


— Figuur E.7: Druk visualisatie verlaging in duiker



— Figuur E.8: Druk visualisatie verhoging in duiker

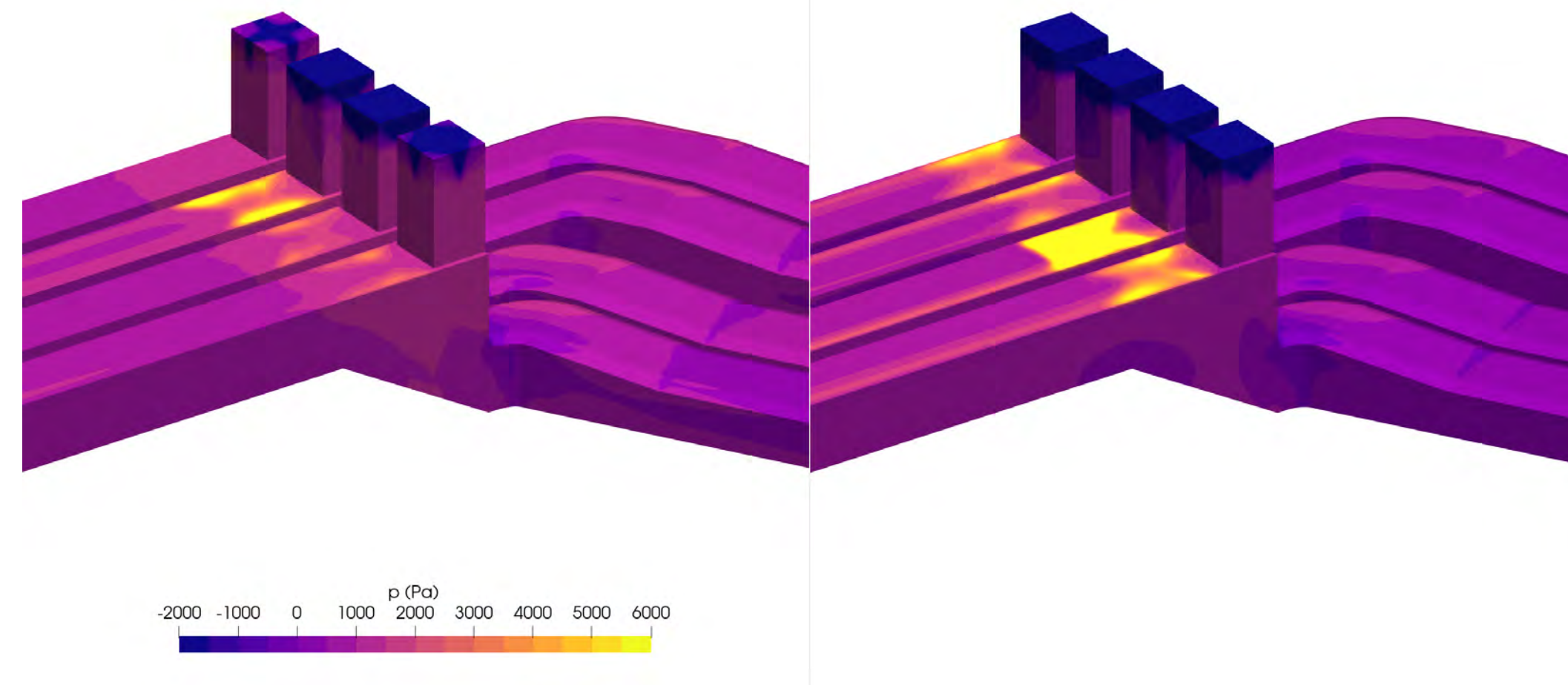
E.3 Geometrie 3 v3



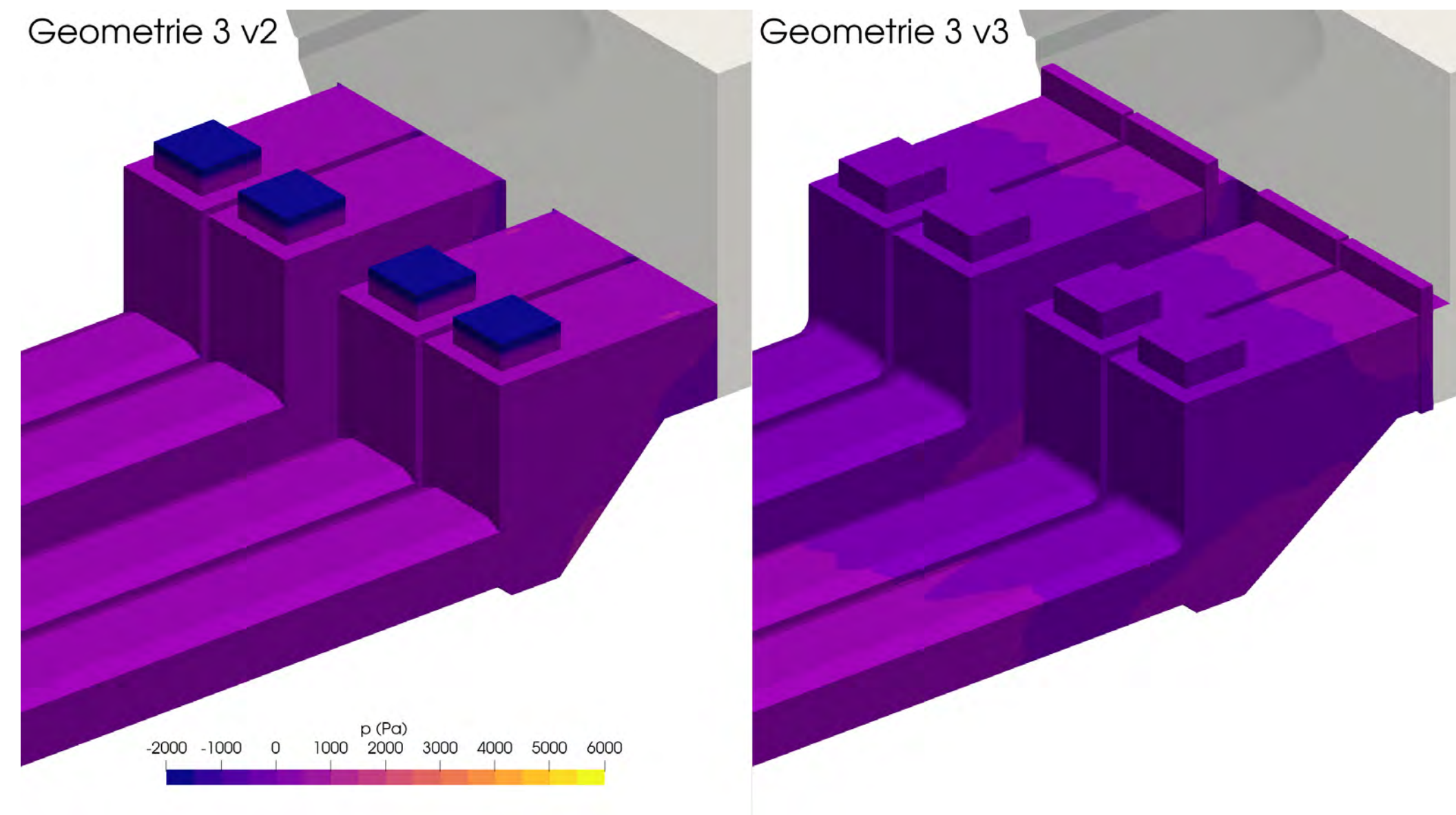
— Figuur E.9: Druk visualisatie duiker ingang

Geometrie 3 v2

Geometrie 3 v3

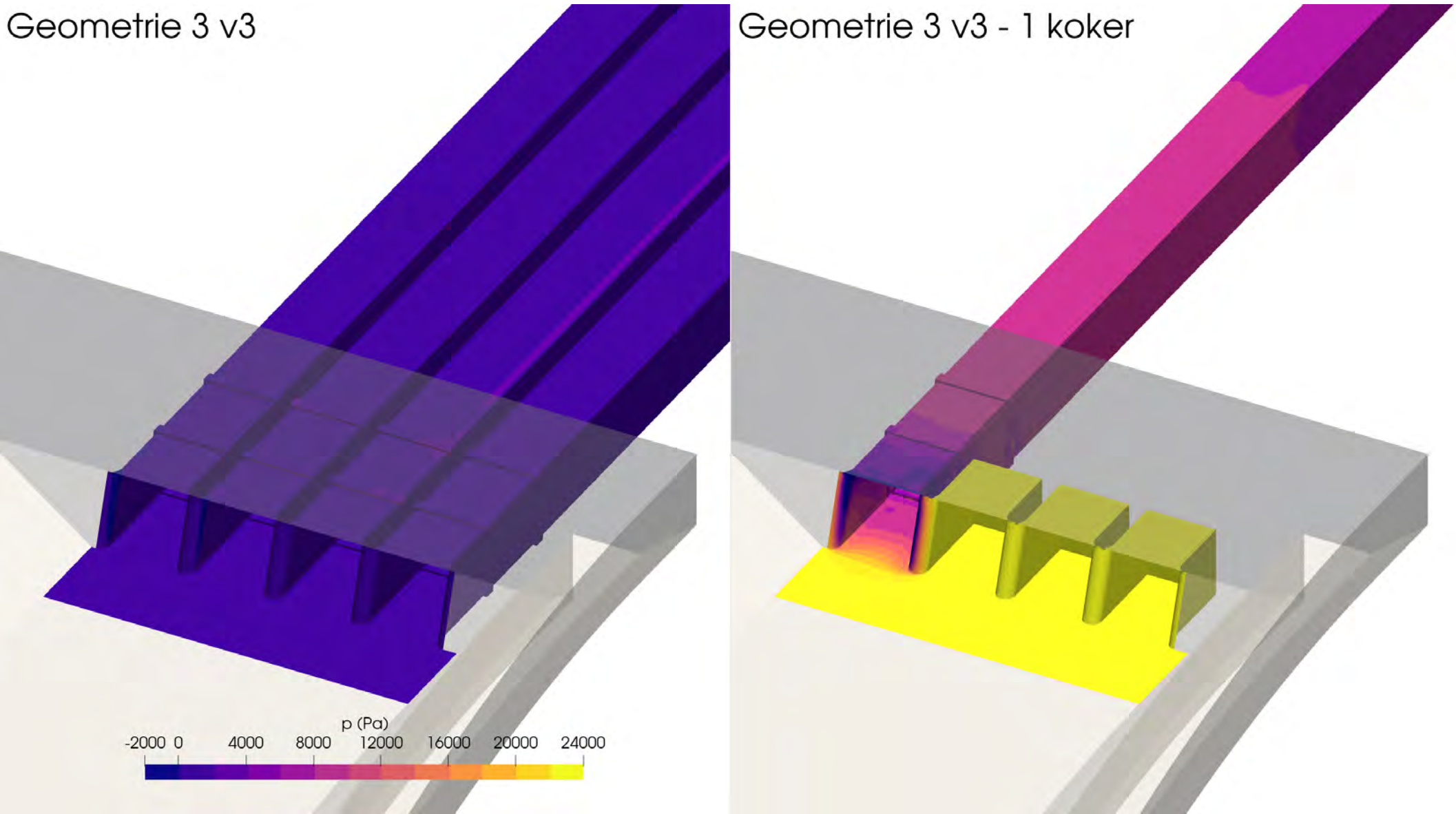


— Figuur E.10: Druk visualisatie verlaging in duiker



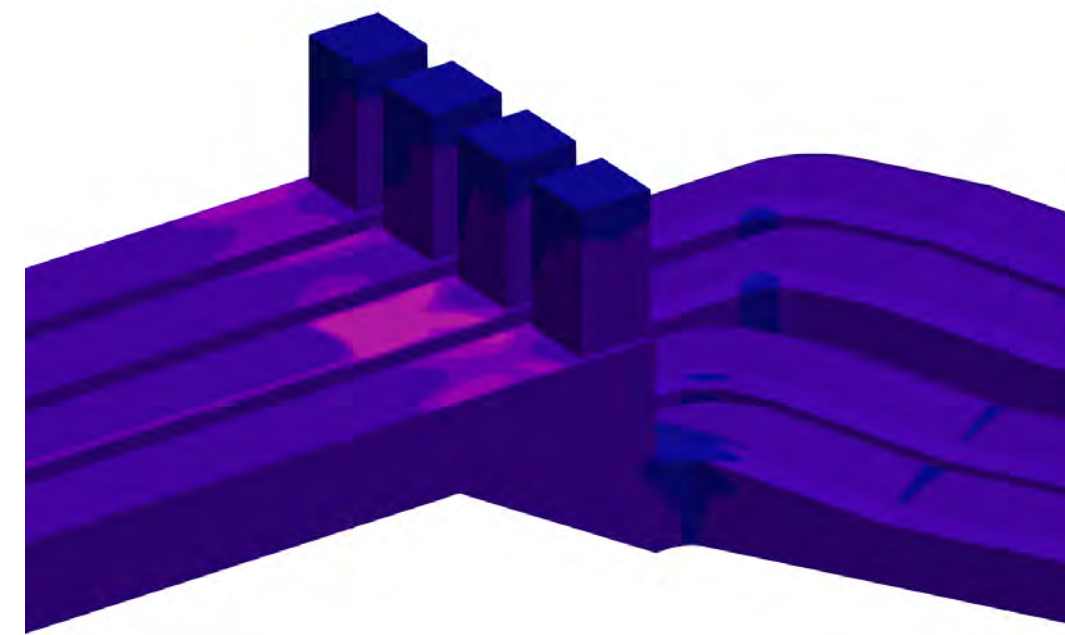
— **Figuur E.11:** Druk visualisatie verhoging in duiker

E.4 Geometrie 3 v3 - 1 koker

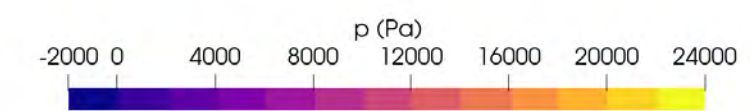
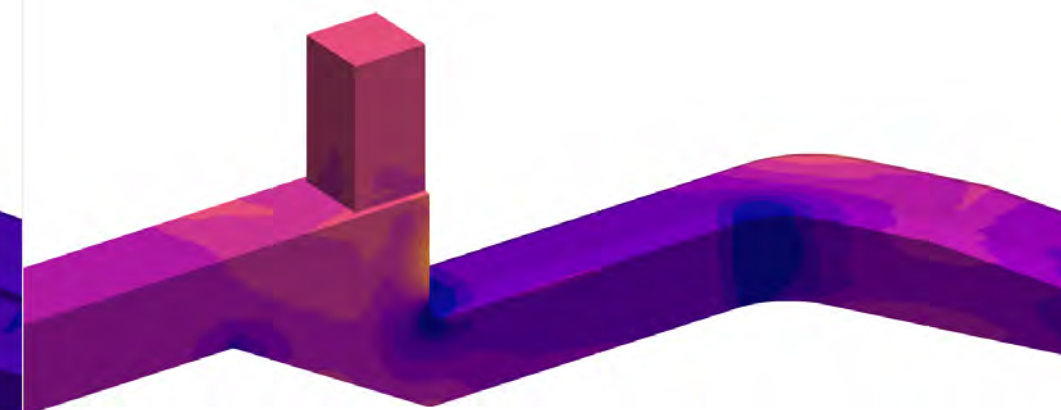


— Figuur E.12: Druk visualisatie duiker ingang

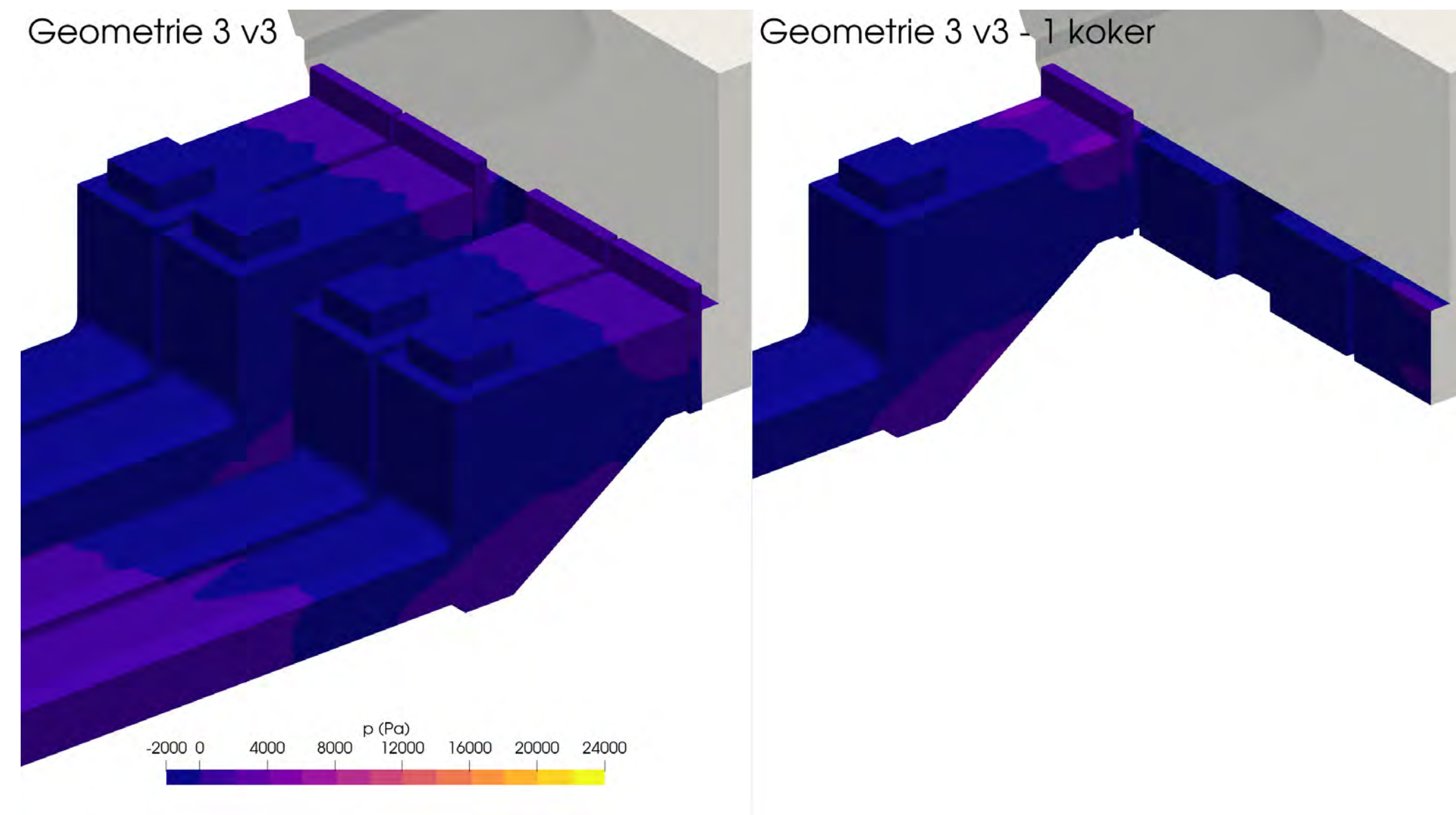
Geometrie 3 v3



Geometrie 3 v3 - 1 koker



— **Figuur E.13:** Druk visualisatie verlaging in duiker



— **Figuur E.14:** Druk visualisatie verhoging in duiker

Streamlines Design BV
Halstraat 31a
4811 HV Breda
+31 (0)76 5422 220
contact@actiflow.com
www.actiflow.com



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