



Vlaanderen
is wetenschap

17_064_1
WL rapporten

Dender – Nieuwe sluis Aalst

CFD-modellering van een geleiding
opwaarts van de nivelleeropeningen

DEPARTEMENT
MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

Dender – Nieuwe sluis Aalst

CFD-modellering van een geleiding opwaarts van de nivelleeropeningen

Vercruysse, J.; Van Hoydonck, W.; Verelst, K.; 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 2018
D/2018/3241/024

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Vercruysse, J.; Van Hoydonck, W.; Verelst, K.; Mostaert, F. (2018). Dender – Nieuwe sluis Aalst: CFD-modellering van een geleiding opwaarts van de nivelleeropeningen. Versie 5.0. WL Rapporten, 17_064_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

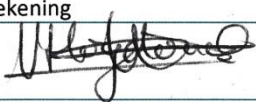
Overname uit en verwijzingen naar deze publicatie worden aangemoedigd, mits correcte bronvermelding.

Documentidentificatie

Opdrachtgever:	EBS	Ref.:	WL2018R17_064_1
Keywords (3-5):	Lock, Leveling System, Computational Fluid Dynamics		
Tekst (p.):	21	Bijlagen (p.):	54
Vertrouwelijk:	☒ Nee	☒ Online beschikbaar	

Auteur(s):	Vercruysse, J.
------------	----------------

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Van Hoydonck, W.; Verelst, K.	 
Projectleider:	Vercruysse, J.	

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Mostaert, F.	
-----------------	--------------	--



Abstract

Op de Dender te Aalst wordt een nieuwe sluis (lengte: 54 m, breedte: 6 m) gebouwd. Voor deze nieuwe sluis heeft het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) het hydraulisch ontwerp van het nivelleersysteem en het ontwerp van de erosiebescherming uitgevoerd. Het constructief ontwerp van de draaideur werd uitgevoerd door Expertise Beton & Staal (EBS). Op basis van het hydraulisch en het constructief ontwerp werd besloten om een nivelleersysteem te voorzien dat bestaat uit 5 cirkelvormige openingen diameter 0.70 m afgesloten met vlinderkleppen.

Bij het uitwerken van het constructief ontwerp van de deur door Expertise Beton en Staal werd de vraag gesteld of door de scherpe overgang in het dagvlak van de opening geen loslating van de stroming kan ontstaan, wat vervolgens kan resulteren in een niet optimale aanstroming naar de vlinderkleppen. Door WL en EBS werd besloten de mogelijkheid van loslating van de stroming te beoordelen door middel van Computational Fluid Dynamics (CFD)-modellering, dewelke uitbesteed werd. Voor deze CFD-modellering werd zowel een geometrie zonder geleiding als een alternatieve geometrie met een geleiding beschouwd. Dit rapport beschrijft de gegevens en gemaakte keuzes voor het uitvoeren van de simulaties en bespreekt de resultaten van de uitgevoerde CFD-modellering.

Uit de simulaties voor de configuratie zonder geleiding volgt dat de zone met loslating nabij de opwaarts gelegen vlinderklephelft zeer beperkt is en niet resulteert in een onregelmatige aanstroming. Uit de simulaties met een geleiding volgt dat de zones met loslating in de opening zo goed als verdwenen zijn. Wat betreft het stromingspatroon afwaarts van de vlinderklep, de afvoercoëfficiënt van de opening met vlinderklep in de deur en de kracht en het moment op de vlinderklep wordt een verwaarloosbaar verschil opgemerkt tussen de geometrie met en de geometrie zonder geleiding.

Tot slot wordt een aanbeveling gegeven over de draairichting van de vlinderkleppen.

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	V
Lijst van de tabellen.....	VI
Lijst van de figuren	VII
1 Inleiding	1
2 Gegevens	2
2.1 Geometrie deur	2
2.2 Geometrie klep.....	4
3 Beschrijving CFD-modellering.....	6
4 Bespreking resultaten CFD-modellering.....	11
4.1 Gridgevoeligheid.....	12
4.2 Invloed geleiding	14
4.3 Aanbevelingen	18
5 Conclusies en aanbevelingen	19
6 Referenties	21
7 Bijlage A– Rapport CFD simulatie	B1

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Dimensies nieuwe sluis te Aalst.....	1
Tabel 2 – Hydraulische randvoorwaarden CFD simulatie bij een klephoek 45°.....	8
Tabel 3 – Vergelijking afvoercoëfficiënt bij klephoek 45°	16

Lijst van de figuren

Figuur 1 – Vooraanzicht en doorsnede deur	2
Figuur 2 – Doorsnede deur ter hoogte van vlinderkleppen	3
Figuur 3 – Geometrie vlinderklep	4
Figuur 4 – Flens vlinderklep	5
Figuur 5 – Illustratie draaihoek vlinderklep voor de middelste opening	6
Figuur 6 – Variatie in de tijd van het debiet, de stijgsnelheid, de langskracht en de positie en draaihoek van de vlinderkleppen	7
Figuur 7 – Geometrie met afmetingen bij klephoek 45°	7
Figuur 8 – Varianten geleiding	8
Figuur 9 – Op- en afwaarts aanzicht en doorsnede nivelleeropening	9
Figuur 10 – Vereenvoudigde geometrie vlinderklep	10
Figuur 11 – Vergelijking stromingspatroon basisgrid en lokaal verfijnd grid	12
Figuur 12 – Vergelijking afvoercoëfficiënt basisgrid en lokaal verfijnd grid	13
Figuur 13 – Vergelijking stroomsnelheid met en zonder geleiding	14
Figuur 14 - Vergelijking stromingspatroon met en zonder geleiding – uitstroming	14
Figuur 15 - Vergelijking stromingspatroon met en zonder geleiding	15
Figuur 16 – Terreinmeting nieuwe sluis Zemst – vergelijking afvoercoëfficiënt afgeleid uit meting met afvoercoëfficiënt toegepast voor ontwerp simulaties	17
Figuur 17 – Voorgestelde draairichting vlinderkleppen tijdens openen	18

1 Inleiding

Op de Dender wordt het stuwsluiscomplex te Aalst vervangen door een nieuw opwaarts gelegen stuwsluiscomplex. Hierbij wordt een nieuwe sluis gebouwd met een kolk lengte van 54 m en een kolk breedte van 6 m. Het ontwerpschip voor deze nieuwe sluis is een schip CEMT klasse I. Een overzicht van de karakteristieke dimensies van de nieuwe sluis wordt gegeven in Tabel 1. Voor deze nieuwe sluis heeft het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) het hydraulisch ontwerp uitgevoerd van het nivelleersysteem (Verelst *et al.*, 2014; Verelst, De Mulder, *et al.*, 2009) en het ontwerp uitgevoerd van de erosiebescherming (Verelst, Vercruyssen, *et al.*, 2009; Verelst, Viaene, *et al.*, 2012). Het constructief ontwerp van de draaideur werd uitgevoerd door Expertise Beton & Staal (EBS). Op basis van het hydraulisch en het constructief ontwerp werd besloten om per draaideur 5 cirkelvormige openingen met een diameter 0.70 m afgesloten met vlinderkleppen te voorzien.

Tabel 1 – Dimensies nieuwe sluis te Aalst

Lengte sluiskolk	54 m
Breedte sluiskolk	6 m
Bodempeil opwaarts kanaalpand	TAW + 3.20 m
Bodempeil afwaarts kanaalpand	TAW + 2.20 m
Drempelpeil bovenhoofd	TAW + 2.70 m
Drempelpeil benedenhoofd	TAW + 2.70 m
Minimale vrije doorvaarthoogte	4.0 m
Type sluisdeur opwaarts	Draaideur
Type sluisdeur afwaarts	Draaideur

Bron: Verelst *et al.* (2014)

Bij het uitwerken van het constructief ontwerp van de deur door Expertise Beton en Staal (EBS; contactpersoon Robin Timmermans) is door EBS de vraag gesteld of de scherpe overgang in het dagvlak van de opening geen aanleiding zou geven tot loslating, wat vervolgens kan resulteren in een niet optimale aanstroming naar de vlinderkleppen. Hierop werd door WL en EBS besloten om dit te beoordelen door middel van CFD¹-modellering. Deze CFD-modellering is uitbesteed aan het studiebureau IMDC nv (N. Badano *et al.*, 2017). Voor het uitvoeren van de CFD-modellering is zowel de geometrie zonder geleiding als een alternatieve geometrie met een geleiding beschouwd. Onderhavig rapport beschrijft de gegevens, de gemaakte keuzes voor de randvoorwaarden en de simulaties en bespreekt de resultaten van de uitgevoerde simulaties.

De beschikbare gegevens van de deur en vlinderkleppen worden gegeven in hoofdstuk 2. Vervolgens wordt een keuze gemaakt voor de klephoek, de geleiding, de hydraulische randvoorwaarden en de geometrie voor de CFD simulaties, zie hoofdstuk 3. Het door het studiebureau opgeleverde rapport van de CFD simulaties is overgenomen in bijlage A. Een bespreking van de resultaten wordt gegeven in hoofdstuk 4. De conclusies en aanbevelingen worden tot slot samengevat in hoofdstuk 5.

¹ Computational Fluid Dynamics

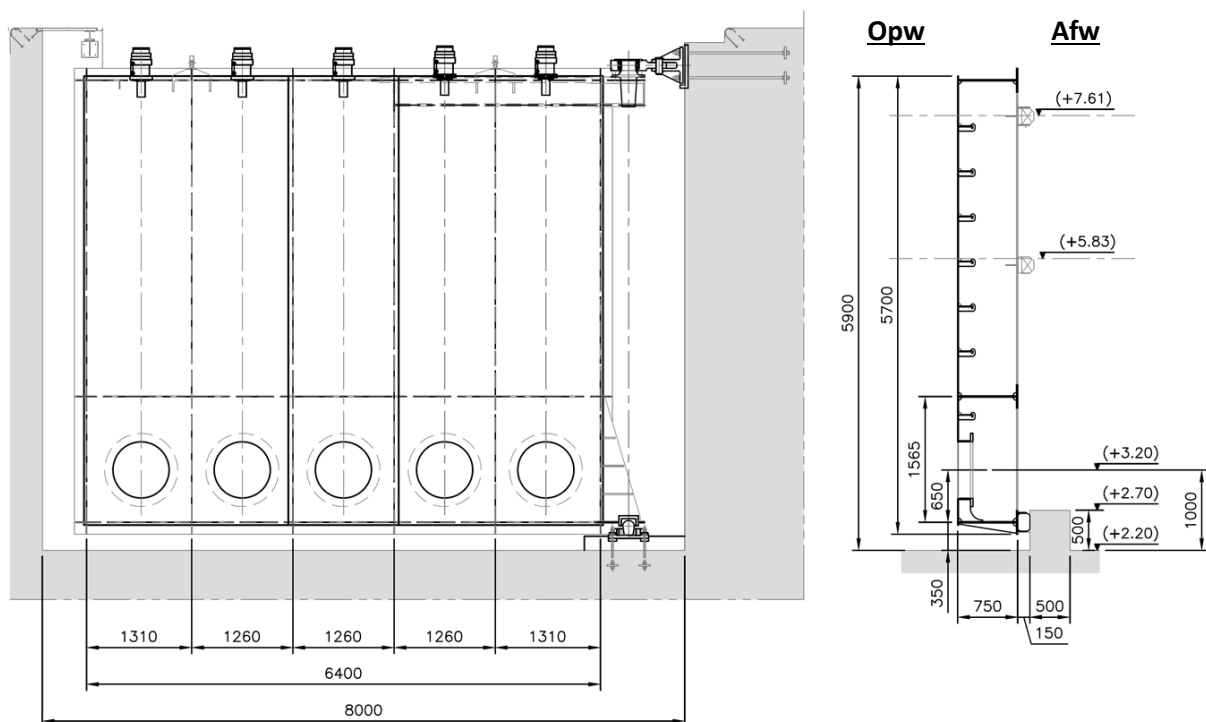
2 Gegevens

De geometrie van de deur wordt toegelicht in paragraaf 2.1. De geometrie van de vlinderklep wordt toegelicht in paragraaf 2.2.

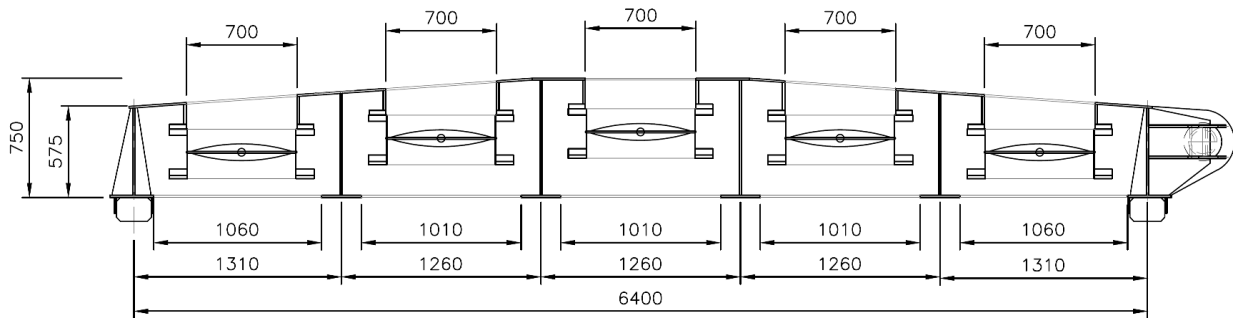
2.1 Geometrie deur

Voor de nieuwe sluis te Aalst wordt een identieke deur toegepast voor het bovenhoofd en het benedenhoofd. Door EBS is een Autocad bestand overgemaakt met de plannen van de deur (mail Robin Timmermans dd. 12/07/2017). Een vooraanzicht en een verticale doorsnede van deze deur wordt gegeven in Figuur 1, een horizontale doorsnede ter hoogte van het center van de vlinderkleppen wordt gegeven in Figuur 2.

Figuur 1 – Vooraanzicht en doorsnede deur



Figuur 2 – Doorsnede deur ter hoogte van vlinderkleppen

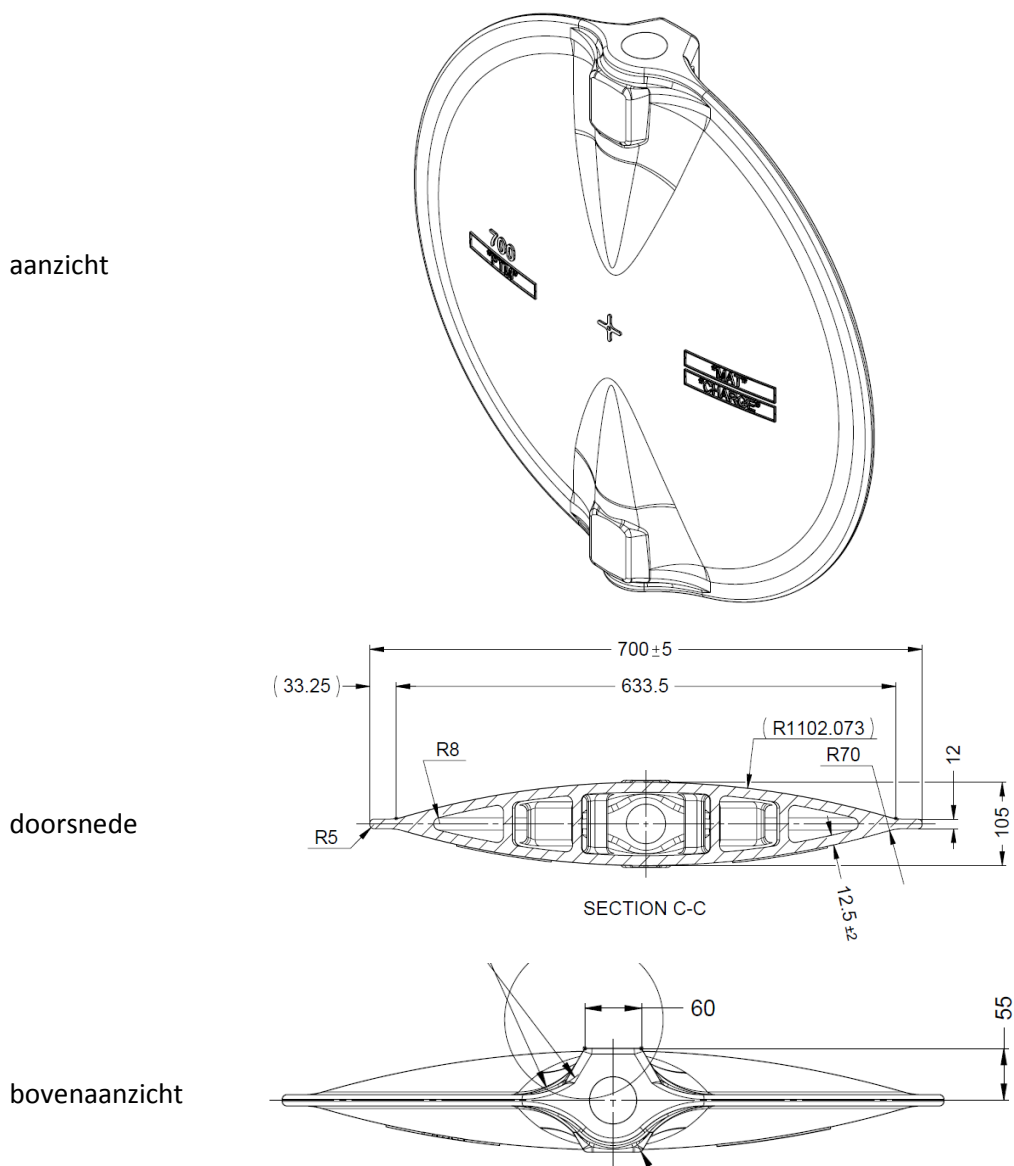


Omwille van de beperkte kolkbreedte (6.00 m) wordt een draaideur toegepast. De deur heeft een dikte van 0.75 m in het midden en 0.575 m aan de zijkanten. In de deur worden 5 nivelleeropeningen met diameter 0.70 m voorzien. Deze openingen worden afgesloten door middel van vlinderkleppen. Door het niet constant zijn van de deurbreedte staat enkel voor de middelste opening het opwaarts dagvlak loodrecht op het centerlijn van de opening. Voor de naastliggende kleppen heeft het opwaarts dagvlak een hoekverdraaiing ten opzichte van de loodrechte op het centerlijn van de opening. De vlinderkleppen worden gemonteerd in een deurkamer met breedte 1.26 m (de drie middelste) of 1.31 m (de buitenste) en een hoogte 1.57 m. De kolkbodem ligt op peil 2.20 m TAW. De draaideur sluit tegen een drempel met hoogte 0.50 m ten opzichte van de kolkbodem. De as van de openingen bevindt zich 1.0 m boven de kolkbodem. De onderzijde van de opening in de deur komt aan afwaartse zijde op gelijke hoogte met de bovenzijde van de drempel. Hierbij worden geen breekbalken voorzien. Het afwaarts streefpeil bedraagt +5.83 m TAW (waterhoogte t.o.v. kolkbodem: 3.63 m), het opwaarts streefpeil bedraagt +7.61 m TAW (waterhoogte t.o.v. kolkbodem: 5.41 m).

2.2 Geometrie klep

De geometrie van de klep werd door AKV Valves per mail overgemaakt aan EBS (mail 25/07/2017). Deze mail bevat afbeeldingen in png formaat met afmetingen. De afbeeldingen van de vlinder worden gegeven in Figuur 3.

Figuur 3 – Geometrie vlinderklep

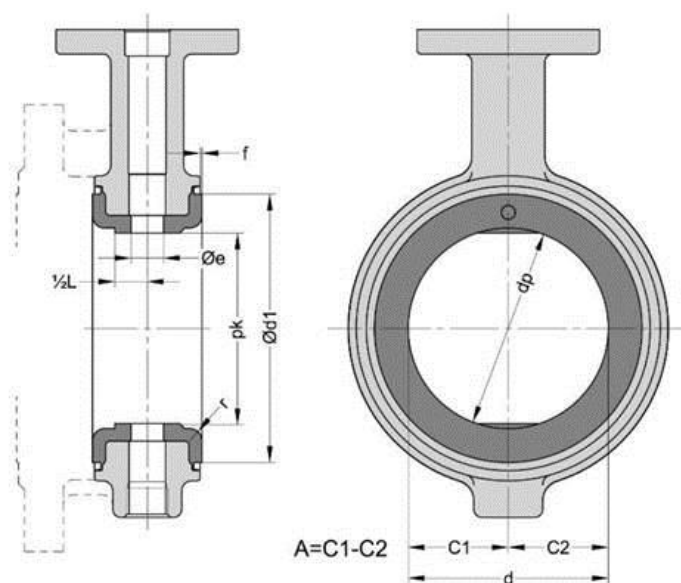


De vlinderklep bestaat uit een centrale schijf met diameter 0.70 m en dikte 0.12 m. De randen van deze schijf zijn afgerond met een straal 0.005 m. Tegen deze afgeronde schijf bevindt zich aan elke zijde een bolsegment met straal 1.102 m. Aan de boven en onderzijde is er een afwijking op deze vorm omwille van de as van de klep. De aangeleverde plannen bevatten niet voldoende gegevens om de volledige geometrie van de vlinderklep (o.a. de aansluiting van de as op de schijf) uit te werken in 3D.

De vlinderklep is geplaatst in een flens met rubber. Deze wordt voorgesteld in Figuur 4. Bemerkt dat dit een type tekening betreft die bedoelt is om de locatie van de afmetingen aan te duiden en dat deze tekening niet op schaal getekend is voor een vlinderklep met diameter 0.700 m. Bij deze tekening wordt voor de

binnendiameter van de rubber 'dp' de waarden 0.684 m +/- 0.0015 m aangegeven. De binnendiameter van de rubber is dus kleiner dan de klepdiameter. Dit is nodig voor het voorzien van de dichting. De klep zal zich hierdoor in de rubber duwen tot de zuiger die de klep aanstuurt een bepaalde kracht bereikt heeft. Een hoek van 0° komt dus niet overeen met een klep loodrecht op de as van de opening. Bemerk hiernaast dat de hoogte van de klep beperkt kleiner is dan de diameter: de diameter van de centrale schijf van de vlinder is boven- en onderaan afgetopt. De ontvangen plannen bevatten niet voldoende detail om dit exact te beschrijven. De hoogte van de klep ter plaatste van de assen komt ongeveer overeen met de hoogte van de rubber ter hoogte van de assen, namelijk de afmeting 'pk' = 0.6745 +/- 0.0015 mm of 0.0255 m minder dan de diameter van de klep (0.700 m +/- 0.005 m). Bemerk dat de rubbers aan de rand van de flens een afronding hebben. De straal van deze afronding is niet gekend.

Figuur 4 – Flens vlinderklep



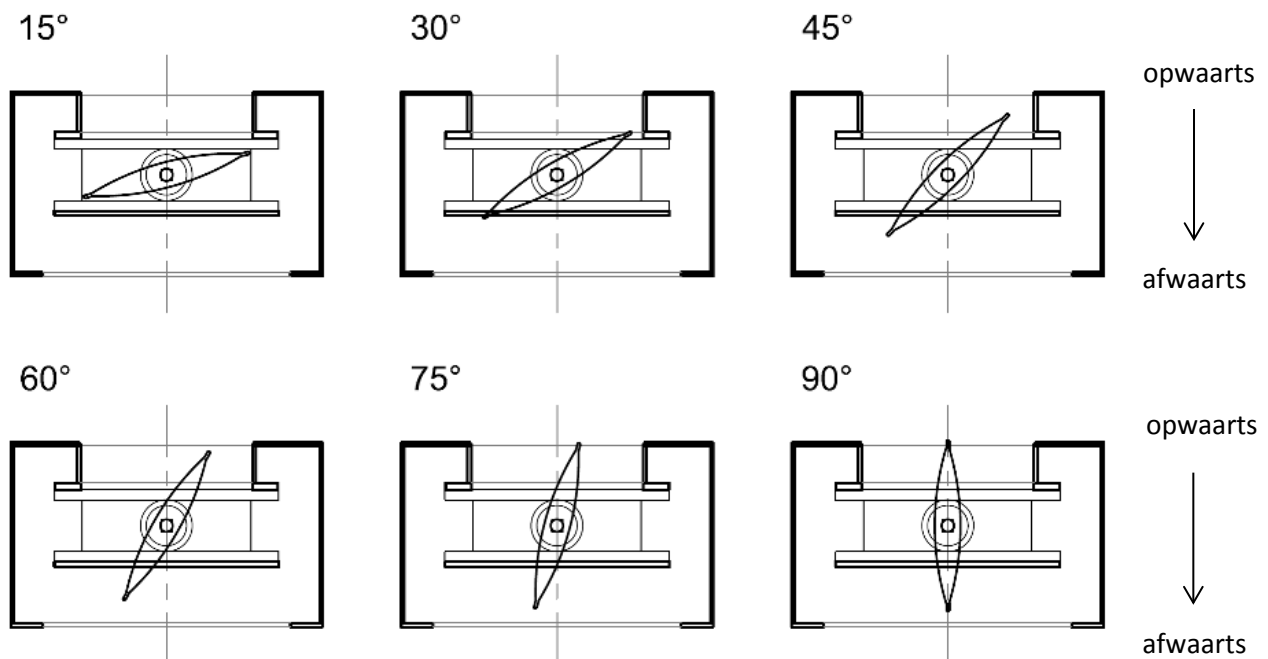
3 Beschrijving CFD-modellering

In onderhavig hoofdstuk wordt een beschrijving gegeven van de gemaakte keuzes voor de CFD modellering.

Per deur worden 5 nivelleeropeningen voorzien. Voor het beoordelen van de geleiding is het voldoende om één nivelleeropening te simuleren. Gekozen wordt voor de middelste opening. De breedte van het modeldomein wordt beperkt tot het deel van de sluisdeur met één nivelleeropening. Voor de te simuleren klephoek wordt door middel van een grafische analyse van verschillende klephoeken en de bijhorende hydraulische randvoorwaarden getracht om een kritische klephoek te bepalen. Deze klephoek met de bijhorende randvoorwaarden wordt vervolgens toegepast in de CFD modellering. Het is constructief niet mogelijk om de geleiding vorm te geven in het dagvlak van de deur. Om die reden wordt een geleiding ontworpen die bovenop de opwaartse deurplaat geplaatst wordt. Hiervoor worden drie geometrieën beschouwd waarvan er één geselecteerd wordt voor de simulaties. De simulaties worden dus uitgevoerd voor de geometrie zonder geleiding en voor één geometrie met een geleiding.

Figuur 5 illustreert de geometrie ter hoogte van het centerlijn van de opening voor verschillende hoeken van de vlinderklep. Merk op dat het loslaten van de stroming bij de inlaat voornamelijk een invloed zal hebben op de aanstroming naar de opwaartse gerichte vlinderklephelft. Op basis van Figuur 5 wordt besloten dat voornamelijk voor een klephoek tussen 30° en 60° een risico lijkt te bestaan dat door loslating de aanstroming naar de opwaartse gerichte vlinderklephelft sterk beïnvloed wordt.

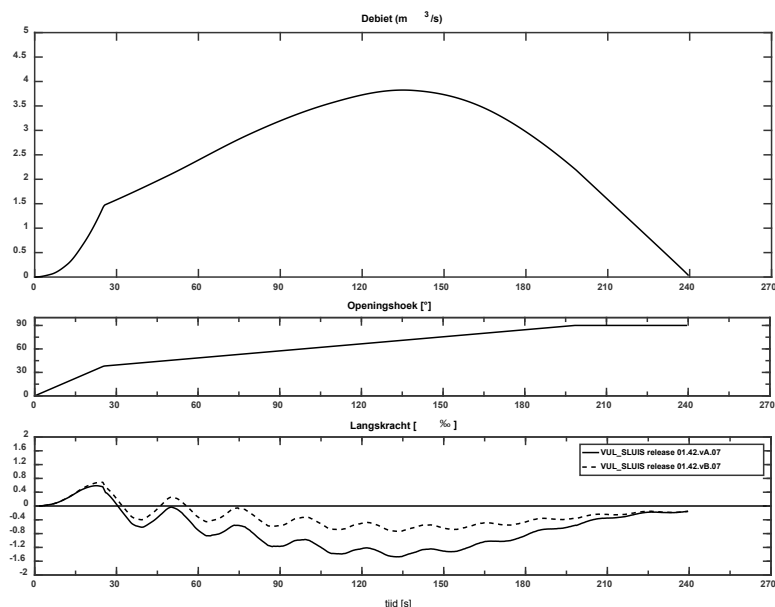
Figuur 5 – Illustratie draaihoek vlinderklep voor de middelste opening



Voor het hydraulisch ontwerp van het nivelleersysteem werden door WL hydraulische simulaties van het nivelleersysteem uitgevoerd met het programma VUL_SLUIS (Verelst *et al.*, 2014). Voor het vullen van de sluiskolk met het ontwerpschip in de kolk (een CEMT klasse I schip) wordt het gesimuleerde debiet, de langskracht op het schip en de bijhorende openingswet van de vlinderkleppen in Figuur 6 gegeven. Uit de resultaten volgt dat de nivellering uitgevoerd wordt in 240 s. De openingswet van de vlinderkleppen vertoont een eerste snelle fase waarbij de kleppen geopend worden in 25 s tot 37°. Hierna openen de

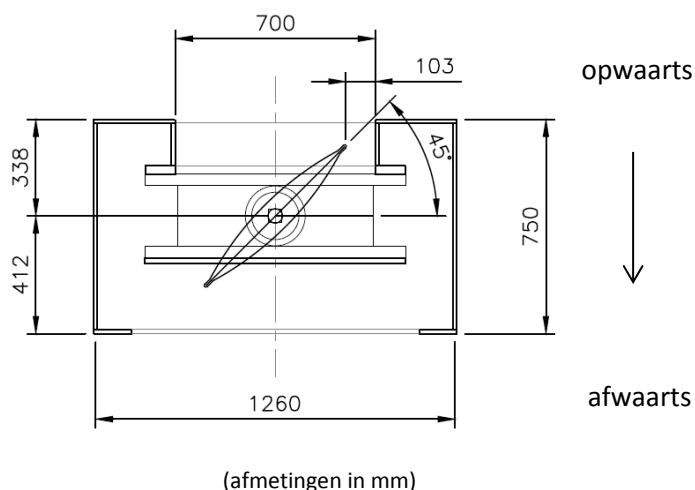
kleppen met een tragere snelheid tot een openingshoek 90° op 198 s. Het maximum debiet treedt op na 135 s bij een klephoek 71° . De maximale negatieve waarde van de langskracht treedt op na 133 s.

Figuur 6 – Variatie in de tijd van het debiet, de stijgsnelheid, de langskracht en de positie en draaihoek van de vlinderkleppen



Het simuleren van een kleinere openingshoek dan 37° is minder relevant omdat in deze eerste fase de klep snel geopend wordt en dat op dit ogenblik ook het debiet en de langskrachten op het schip niet maatgevend zijn (zie Figuur 6). Hierom werd besloten om de CFD simulatie uit te voeren voor een klephoek van 45° . Een detaildoorsnede met afmetingen wordt gegeven in Figuur 7.

Figuur 7 – Geometrie met afmetingen bij klephoek 45°



De bij een klephoek van 45° horende waterpeil, waterhoogte en debiet bepaald uit Figuur 6 worden gegeven in Tabel 2.

Tabel 2 – Hydraulische randvoorwaarden CFD simulatie bij een klephoek 45°

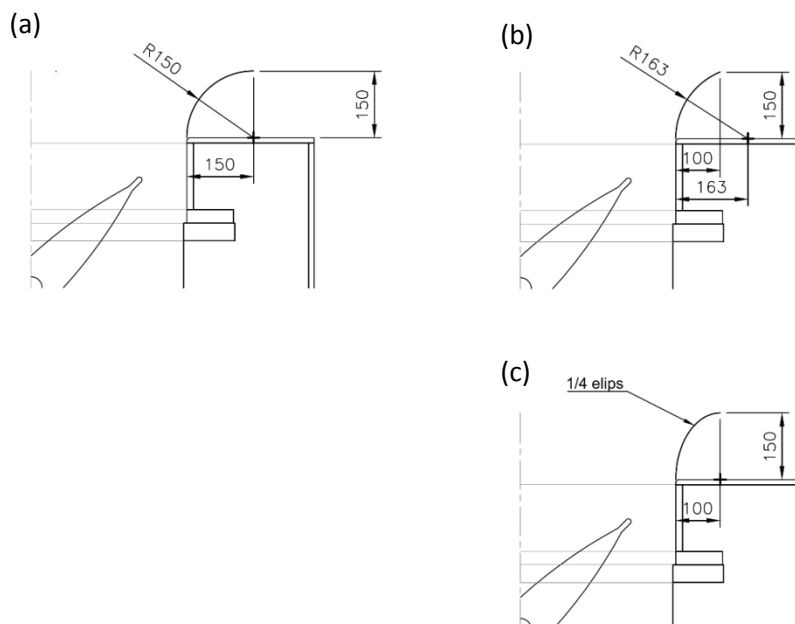
waterpeil	opwaarts	7.61 m TAW
	kolk	5.99 m TAW
waterhoogte ten opzichte van bodem kolk op 2.20 m TAW	opwaarts	5.41 m
	kolk	3.79 m
verval		1.62 m
debiet	totaal (5 openingen)	2.06 m ³ /s
	1 opening	0.41 m ³ /s

Door EBS is gesteld dat de geleiding niet verder dan 0.15 m opwaarts uit de deurplaat mag komen. In Figuur 8 is voor een geleiding met lengte en breedte 0.15 m een kwartcirkelvormige geleiding (a) uitgewerkt en voor een geleiding met lengte 0.15 m en breedte 0.10 m een cirkelsegmentvormige (b) en ellipsvormige (c) geleiding uitgewerkt. Om de volledige geleiding te bekomen, worden deze vormen geroteerd rondom de centerlijn van de opening.

Figuur 8 – Varianten geleiding

breedte uit dagvlak opening 0.150 m

breedte uit dagvlak opening 0.100 m



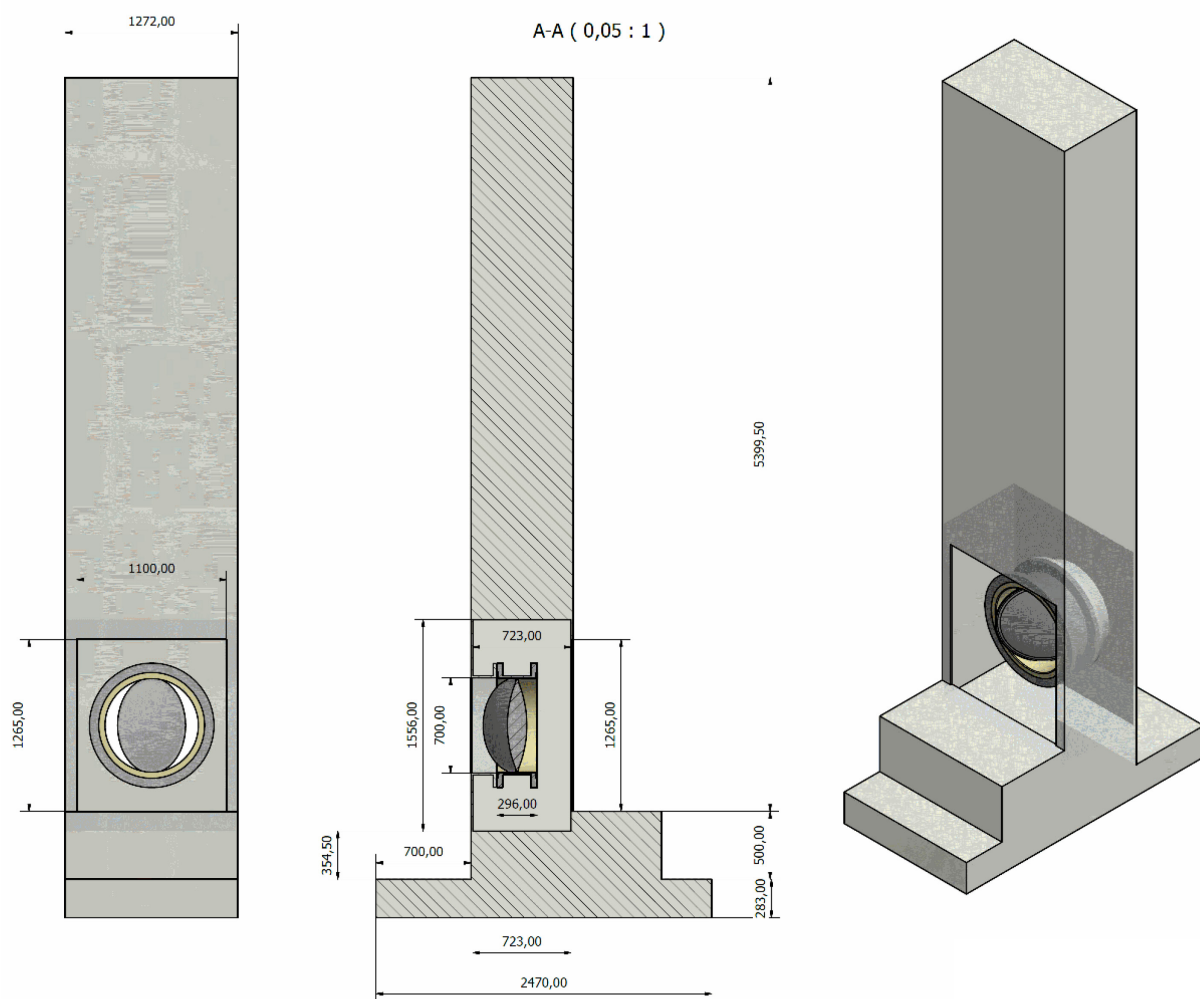
(afmetingen in mm)

Gekozen wordt voor een geleiding met breedte 0.10 m en hoogte 0.15 m. Hydraulisch lijkt een elipsvormige (c) geleiding interessanter. Omwille van het beperkte verschil tussen de elipsvormige (c) en cirkelsegmentvormige geleiding (a) wordt de eenvoudigere cirkelsegmentvormige (a) geleiding geselecteerd voor de CFD simulaties.

Voor de CFD simulaties wordt een vereenvoudigde geometrie van de opening in de deur en de vlinderklep opgesteld, zie Figuur 9. In deze geometrie worden volgende vereenvoudigingen toegepast:

- De deurkamer boven de opening wordt voorgesteld als een dichte ruimte. In werkelijkheid is deze ruimte open aan de afwaartse zijde.
- De ruimte onder de deur wordt ook als een dichte ruimte voorgesteld, aansluitend met de drempel.
- Aan afwaartse zijde van de opening bevindt de onderzijde van de opening zich op een gelijke hoogte als de drempel. Tussen de opening en de drempel bevindt zich nog een holte met lengte 0.15 m en diepte 0.03 m. Deze holte wordt niet meegenomen in de uitgevoerde simulaties.
- Verstijvingen in de deur worden weggelaten.
- De geometrie van de vlinderklep wordt vereenvoudigd door het weglaten van de assen.

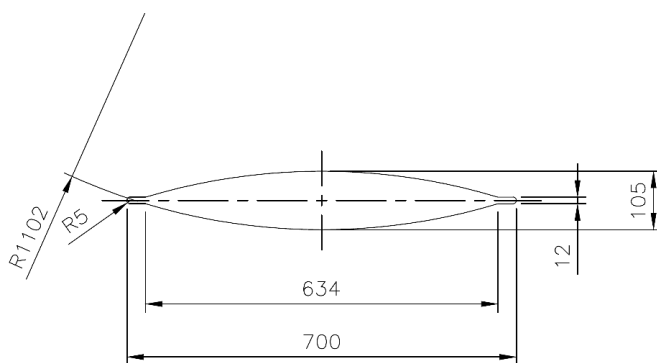
Figuur 9 – Op- en afwaarts aanzicht en doorsnede nivelleeropening



links: opwaarts aanzicht / midden: doorsnede / rechts: zijwaarts zicht vanaf afwaarts
maten in mm

Op basis van de aangeleverde tekeningen (zie paragraaf 2.2) was het niet mogelijk om de correcte geometrie van de as op te stellen. Bij een openingshoek 45° wordt de invloed van deze as op de stroming verwaarloosbaar geacht. Hierom wordt voor de CFD simulatie de as niet meegenomen en wordt de vlinderklep opgebouwd uit één centrale schijf (met afgeronde rand) en twee bolsegmenten, zie Figuur 10.

Figuur 10 – Vereenvoudigde geometrie vlinderklep



De simulaties worden uitgevoerd met OpenFOAM v5.0. De Reynolds-Averaged Navier Stokes (RANS) vergelijkingen worden opgelost met behulp van de niet-stationaire pimpleFOAM solver. Voor het turbulentiemodel werd het $k-\omega$ SST model gebruikt. Het wateroppervlak werd gemodelleerd als een rigid lid. De simulaties werden uitgevoerd met een variabele tijdstap van 110 tot 160 ms (bepaald op basis van een maximum Courant number van 5). De stroming werd gesimuleerd voor 30 s. Zowel opwaarts als afwaarts wordt een druk opgelegd, het debiet doorheen de opening volgt uit de simulatie. Meer details worden gegeven in het rapport van het studiebureau, zie bijlage A.

4 Bespreking resultaten CFD-modellering

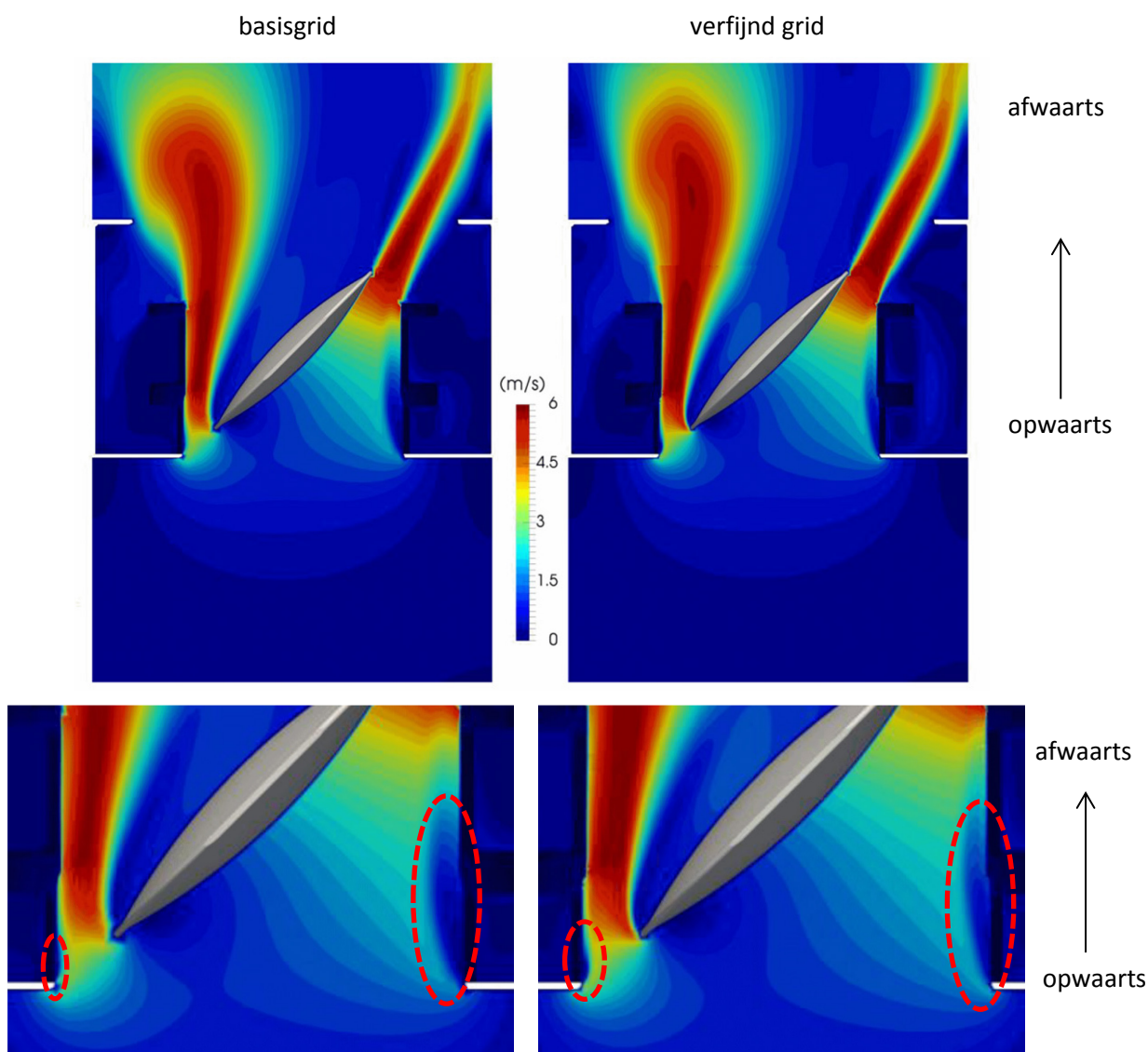
Een gedetailleerde beschrijving van de uitgevoerde CFD simulaties en de resultaten van de CFD-simulaties wordt gegeven in het door het studiebureau opgestelde rapport, zie bijlage B. In dit hoofdstuk wordt een bespreking en korte analyse gegeven van de resultaten van de CFD-modellering.

Vooreerst werd door het studiebureau een gridgevoeligheidsanalyse uitgevoerd voor de geometrie zonder geleiding (paragraaf 4.1). Vervolgens werd zowel voor de geometrie zonder geleiding als voor de geometrie met geleiding een simulatie uitgevoerd. De invloed van de geleiding op het stromingspatroon en de afvoercoëfficiënt wordt besproken in paragraaf 4.2. Een aanbeveling over de draairichting van de vlinderkleppen wordt gegeven in paragraaf 4.3.

4.1 Gridgevoeligheid

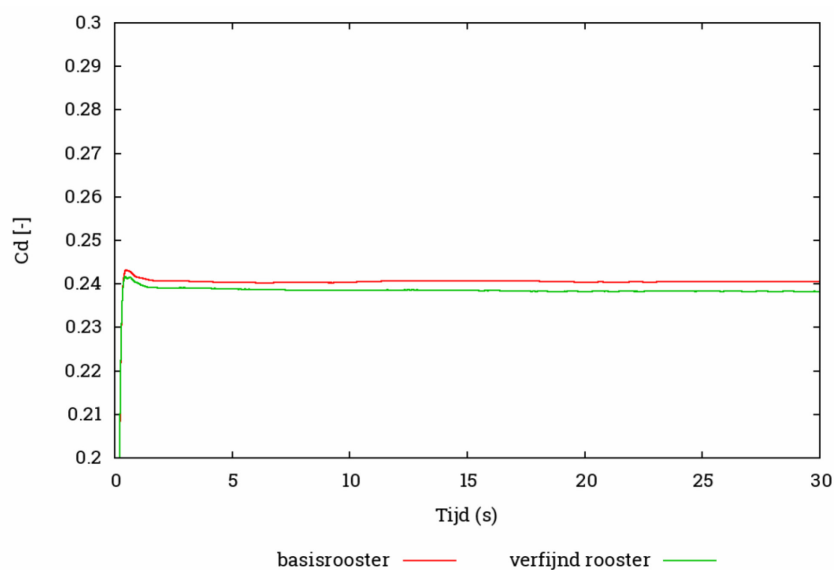
Voor de geometrie zonder geleiding worden de simulaties uitgevoerd met een basisrooster en een tweede rooster waarin het grid lokaal verfijnd is (door elke cel in acht kleine cellen te delen) in een kubusvormige zone rondom de opening met vlinderklep. De stroomsnelheid in het horizontaal vlak op het centerlijn van de opening voor beide simulaties wordt voorgesteld in Figuur 11. De variatie van de afvoercoëfficiënt in de tijd wordt vergeleken in Figuur 12. De gegeven figuren zijn ogenblikkelijke stromingspatronen. Door het stationaire karakter van de stroming zijn deze beelden nagenoeg identiek aan het tijdsgemiddelde stroombeeld.

Figuur 11 – Vergelijking stromingspatroon basisgrid en lokaal verfijnd grid



Horizontaal vlak ter hoogte van center opening ; zones met loslating aangeduid door middel van rode ellips

Figuur 12 – Vergelijking afvoercoëfficiënt basisgrid en lokaal verfijnd grid

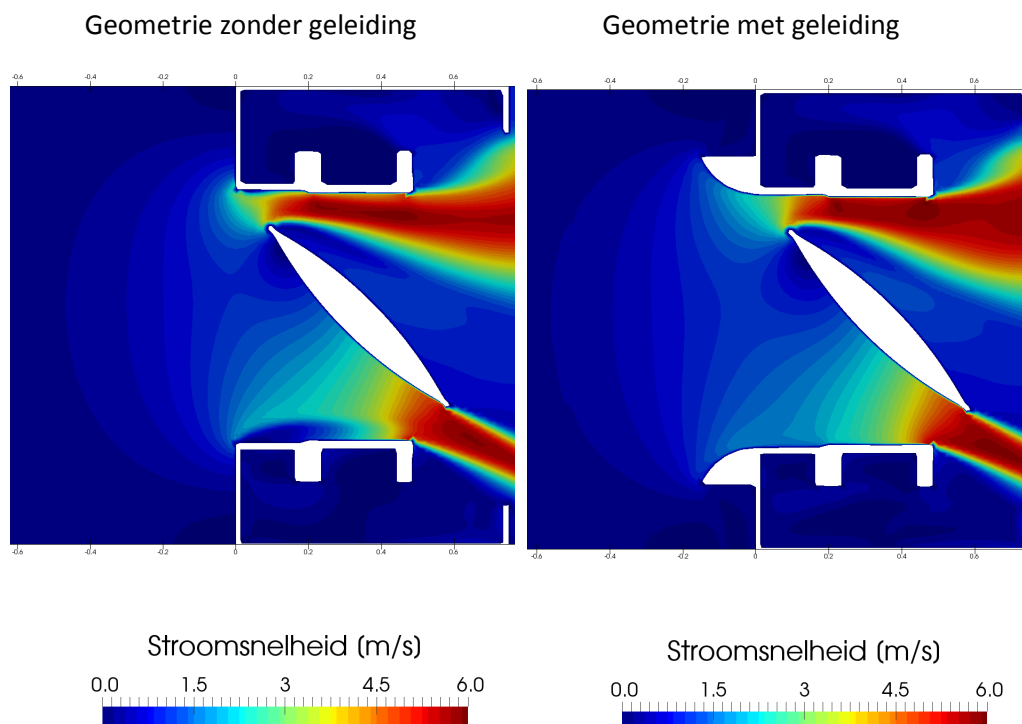


Uit Figuur 11 blijkt dat de stromingspatronen voor het basisgrid en het lokaal verfijnd grid quasi gelijk zijn. De zone met loslating nabij de opwaarts gelegen vlinderklephelft is zeer beperkt en resulteert niet in een onregelmatige aanstroming. In de simulatie met het lokaal verfijnd grid zijn de zones met loslating in de opening (i.e. de zone met stroomsnelheid bijna 0 m/s nabij de wanden) iets breder. Dit beperkte verschil heeft vrijwel geen invloed op de afvoercoëfficiënt, zie Figuur 12. Ook voor het moment en de kracht op de vlinderklep zijn de verschillen tussen het basisgrid en het lokaal verfijnd grid verwaarloosbaar, zie rapport in bijlage A. Op basis hiervan werd besloten dat het basisgrid voldoet voor het uitvoeren van de simulatie zonder geleiding en de simulatie met geleiding.

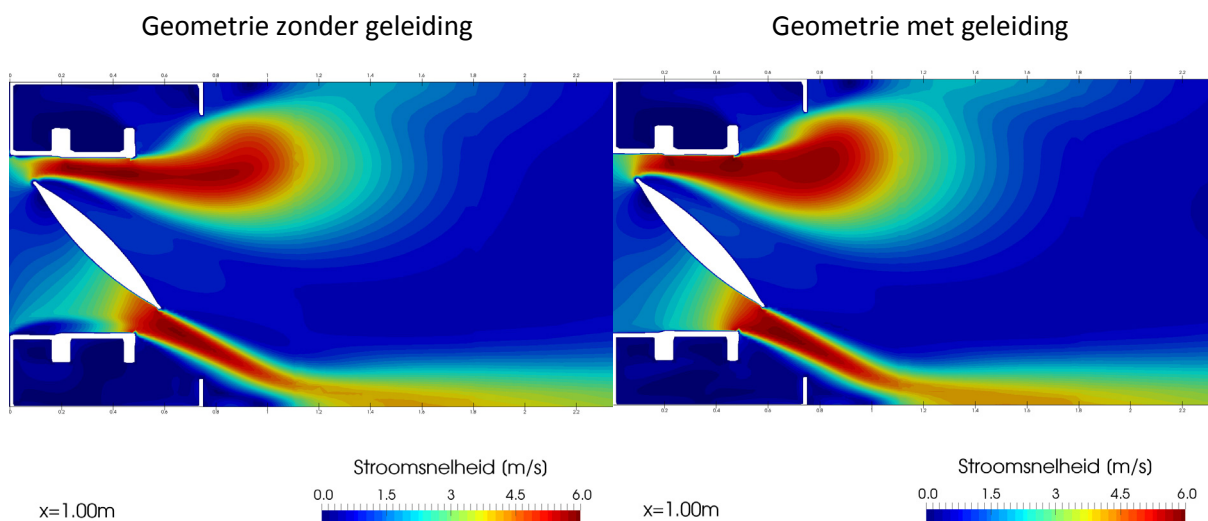
4.2 Invloed geleiding

In deze paragraaf worden de resultaten voor de geometrie met geleiding en de geometrie zonder geleiding vergeleken. De stroomsnelheid in het horizontaal vlak ter hoogte van de inlaat wordt in Figuur 13 vergeleken voor de zone opwaarts van de vlinderklep en in Figuur 14 vergeleken voor de zone afwaarts van de vlinderklep. In Figuur 15 wordt het stromingspatroon in het verticaal vlak op 0.175 m uit het center van de opening richting de naar afwaarts gerichte vlinderklephelft vergeleken.

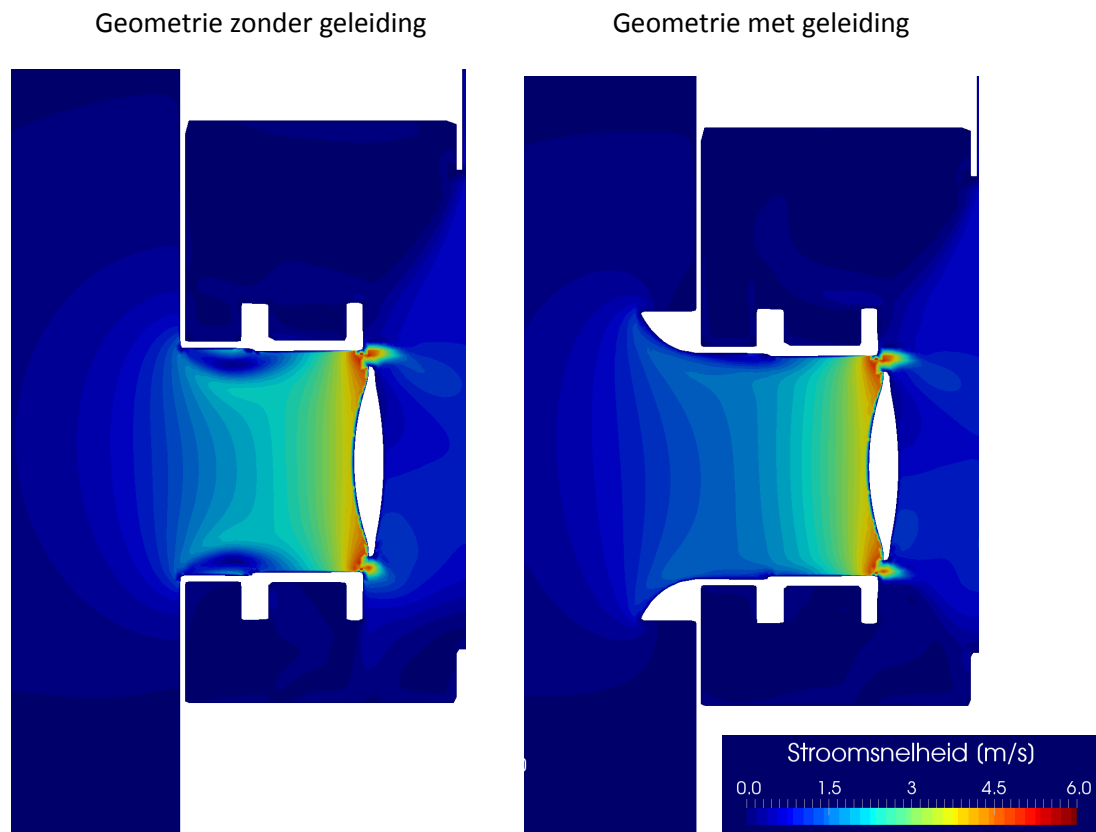
Figuur 13 – Vergelijking stroomsnelheid met en zonder geleiding – horizontaal vlak t.h.v. center



Figuur 14 - Vergelijking stromingspatroon met en zonder geleiding – uitstroming – horizontaal vlak t.h.v. center



Figuur 15 - Vergelijking stromingspatroon met en zonder geleiding
– verticaal vlak ter hoogte van de naar afwaartse gerichte vlinderklephelft



locatie op 0.175 m uit center richting de naar afwaartse gerichte vlinderklephelft

Merk in Figuur 13 tot en met Figuur 15 op dat de geleiding de zones met loslating sterk reduceert. De uitstroom is evenwel quasi gelijk voor de geometrie met en zonder geleiding. Achter de naar opwaartse gerichte vlinderklephelft is de snelheid op ca. 0.6 m afwaarts de deur reeds verlaagd met 50 %. Bij de naar afwaartse gerichte vlinderhelft sluit de jet aan bij de wand waardoor de dissipatie vertraagt, hier is de snelheid in de jet op ca. 1.6 m verlaagd tot 50 %.

Het model domein voor de simulaties werd opgesteld om de geleiding te simuleren. Hiervoor werd het voldoende geacht om de modelbreedte te beperken tot deel van de sluisdeur met één nivelleeropening. Voor het correct simuleren van de uitstroming moet een simulatie uitgevoerd worden met meerdere naastliggende nivelleeropeningen. De naastliggende jets zullen naar elkaar toe aangezogen worden wat leidt tot een ander stromingspatroon dan gegeven in Figuur 14. Wel kan besloten worden dat uit de CFD simulaties volgt dat de geleiding geen invloed zal hebben op stroming afwaarts van de opening.

Het debiet doorheen één nivelleeropening wordt berekend door middel van volgende formule:

$$Q = \mu \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta H}$$

Met:

- | | | | |
|---|----|--|---------------------|
| • | Q | Debiet | [m ³ /s] |
| • | μ | Afvoercoëfficiënt in functie van klephoek | [-] |
| • | A | Doorstroomsectie (1 nivelleeropening A= 0.385 m ²) | [m ²] |
| • | g | Graviteitsconstante = 9.81 m/s ² | [m/s ²] |
| • | ΔH | Verval = 1.62 m | [m] |

In Tabel 3 worden de waarden voor de afvoercoëfficiënt bij een klephoek 45° vergeleken voor de CFD simulatie met en zonder geleiding. Deze waarden worden in de tabel ook vergeleken met de waarde die voor deze hoek toegepast is in de hydraulische simulaties met het nivelleersysteem (Verelst *et al.*, 2014) en met de waarde die afgeleid is uit een terreinmeting die door WL is uitgevoerd in de sluis te Zemst. De middendeuren in de sluis te Zemst hebben een nivelleersysteem met openingen in de deur afgesloten door vlinderkleppen zonder breekbalken en zonder geleiding, gelijkaardig als voor de nieuwe sluis te Aalst. Doordat bij de middendeur van de sluis te Zemst een geleidelijke openingswet wordt toegepast was het mogelijk om de afvoercoëfficiënt in functie van de openingshoek af te leiden uit het gemiddeld kolkpeil en de openingshoek (Vercruysse *et al.*, 2015). Hierbij moet opgemerkt worden dat de opgemeten hoek een bepaalde onnauwkeurigheid heeft. De hoek werd berekend op basis van de door het besturingssysteem van de sluis geregistreerde relatieve zuigeruitslag. Deze zuigeruitslag werd vervolgens absoluut gemaakt en omgerekend naar een klephoek op basis van een ter beschikking gestelde omrekeningsformule. De werkelijke starthoek van de klep, de werkelijke zuigeruitslag en de werkelijke positie van de zuiger en kruk was niet gekend.

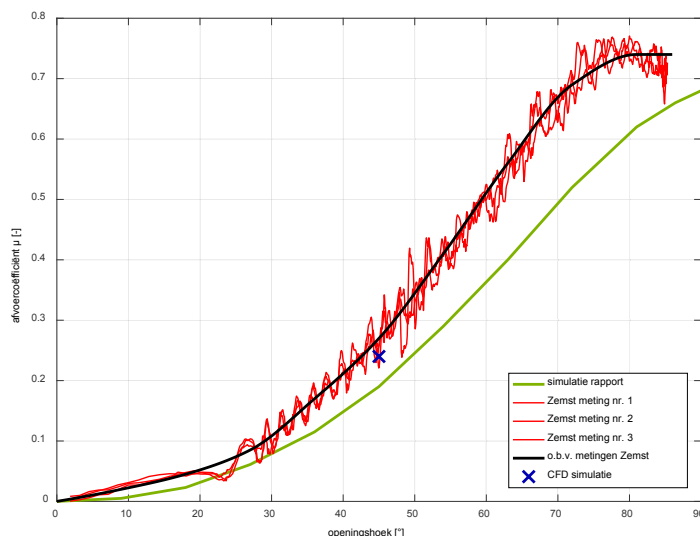
Tabel 3 – Vergelijking afvoercoëfficiënt bij klephoek 45°

	afvoercoëfficiënt μ [-]	procentueel verschil ten opzichte van CFD simulatie zonder geleiding
CFD simulatie zonder geleiding	0.240	
CFD simulatie geometrie met geleiding	0.243	1.25%
vul_sluis simulatie ontwerp nivelleersysteem (Verelst <i>et al.</i> , (2014) overgenomen uit Schwanenberg & Jongeling (2003))	0.190	-20.83%
meting sluis Zemst (Vercruysse <i>et al.</i> , 2015)	0.27	12.50%

Uit de CFD-modellering volgt bij een klephoek 45° een waarde voor de afvoercoëfficiënt gelijk aan 0.240 voor de geometrie zonder een geleiding en 0.243 voor de geometrie met een geleiding. Dit is een (verwaarloosbaar) verschil van 1.25 %. De afvoercoëfficiënt die bepaald is uit de terreinmeting in de sluis te Zemst is 12.5 % hoger dan de afvoercoëfficiënt volgend uit de simulatie (0.27 ten opzichte van 0.24). De afvoercoëfficiënt toegepast voor het ontwerp van het nivelleersysteem is 21 % lager (0.19 ten opzichten van 0.24).

Zowel voor het ontwerp van het nivelleersysteem van de nieuwe sluis te Zemst (Verelst, Vercruysse, *et al.*, 2012) als voor het ontwerp van het nivelleersysteem van de nieuwe sluis te Aalst (Verelst *et al.*, 2014) werd de reeks voor de afvoercoëfficiënt in functie van de tijd overgenomen uit Schwanenberg & Jongeling (2003). Ter informatie wordt Figuur 16 overgenomen uit Vercruysse *et al.* (2015). Deze figuur vergelijkt de afvoercoëfficiënt afgeleid uit de meting in de sluis van Zemst met de afvoercoëfficiënt die toegepast was voor de simulaties bij het ontwerp van het nivelleersysteem (deze van Schwanenberg & Jongeling (2003)) en de afvoercoëfficiënt horende bij een klephoek 45° volgend uit de CFD simulaties. In deze figuur valt op dat de afvoercoëfficiënt uit de meting hoger is dan de afvoercoëfficiënt overgenomen uit Schwanenberg & Jongeling (2003).

Figuur 16 – Terreinmeting nieuwe sluis Zemst – vergelijking afvoercoëfficiënt afgeleid uit meting met afvoercoëfficiënt toegepast voor ontwerp simulaties



Merk op dat een hogere waarde voor de afvoercoëfficiënt resulteert in een snellere nivellering waardoor, normalerwijs, ook de kracht op het schip in de kolk toeneemt. Aangezien simulaties altijd een bepaalde onzekerheid hebben adviseert het WL om bij de ingebruikname van een nieuwe sluis in situ metingen uit te voeren. Het WL beschikt over een meetopstelling waarmee de optredende langse waterspiegelhellingen, welke de belangrijkste component is van de langskracht, in situ opgemeten kunnen worden. Op basis van de in situ opgemeten langse waterspiegelhellingen en de (kwalitatieve) appreciatie van de betrokken sluismeester(s) en schipper(s), kan - indien nodig - een bijsturing voorgesteld worden.

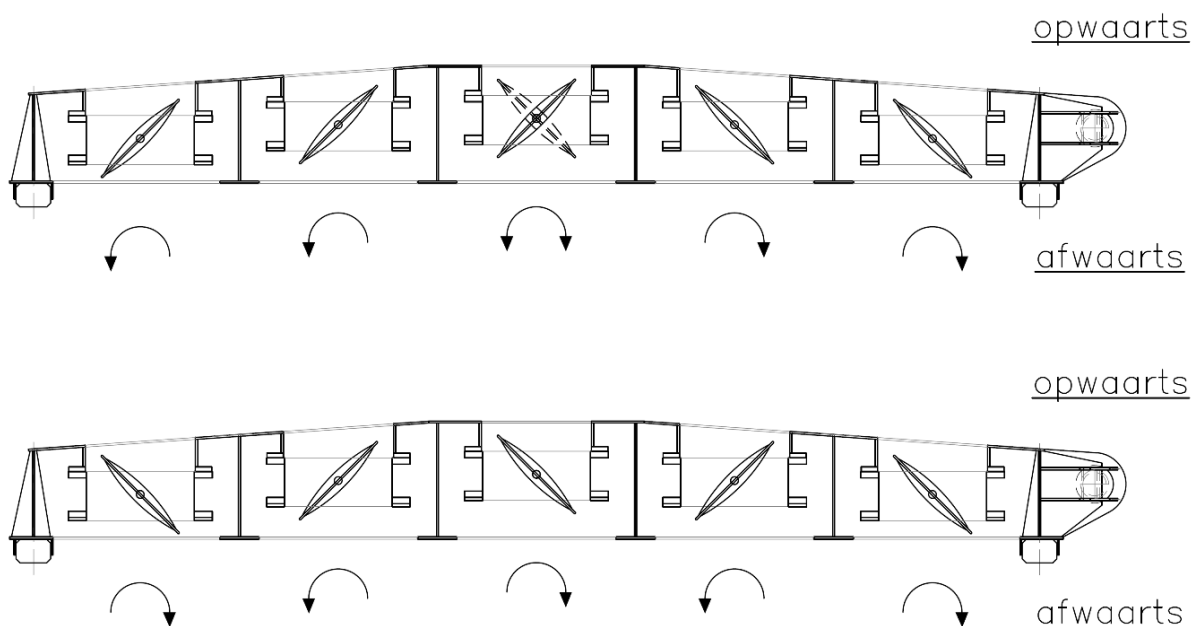
Het plaatsen van de geleiding heeft een verwaarloosbare invloed op de kracht of moment op de vlinderklep. Zie ook Bijlage A.

Zowel voor de geometrie zonder geleiding als voor de geometrie met geleiding wordt in de tijd een quasi stationair stromingspatroon vastgesteld. Dit volgt uit de in het rapport gegeven tijdreeksen van de kracht, moment, debiet en afvoercoëfficiënt. Daarnaast zijn ook visualisaties van het stromingspatroon in de tijd overgemaakt. Ook hieruit volgden geen noemenswaardige tijdsafhankelijke effecten. Merk op dat de loslaatpunten van de stroming scherp gedefinieerd zijn en dat het loslaatpunt met maximum 0.01 m kan verschuiven, wat overeenkomt met de roostergrootte. Het ontbreken van Von Karman wervels wordt toegeschreven aan de te beperkte breedte van het model waardoor deze wervels zich niet kunnen ontwikkelen.

4.3 Aanbevelingen

Uit de CFD simulaties volgt een verschil in stromingspatroon bij uitstroom tussen de naar opwaarts gerichte vlinderklephelft en de naar afwaarts gerichte vlinderklephelft, zie Figuur 14. De uitstroming achter de naar opwaarts gerichte vlinderklephelft gebeurt zonder een merkelijke verdraaiing ten opzichte van de aslijn van de kolk. De uitstroming achter de naar afwaarts gerichte vlinderklephelft volgt de hoek van de vlinderklep. De simulaties werden uitgevoerd voor de breedte van één nivelleeropening. In werkelijkheid zullen de naastliggende uitstromingen vermoedelijk samenvoegen. Bij het samenvoegen van de uitstroming achter een naar opwaartse gerichte vlinderklep met de uitstroming achter een naar afwaarts gerichte vlinderklep zal de resulterende stroming vermoedelijk nog een hoek hebben ten opzichte van de aslijn van de kolk. Wanneer de 5 vlinderkleppen in dezelfde richting opendraaien vergroot het risico dat door het verschil in uitstromingspatroon tussen de opwaarts en afwaarts gerichte vlinderklephelft een asymmetrische stromingspatroon in de kolk ontstaat. Een dergelijk asymmetrisch stromingspatroon kan resulteren in een toename van de dwarskrachten op de schepen in de kolk. Door WL worden twee draairichtingen voor de vlinderkleppen voorgesteld, zie Figuur 17. Hierbij beveelt WL aan om CFD simulaties uit te voeren voor meerdere naast elkaar liggende nivelleeropeningen. Op basis van deze simulaties kan de draairichting van de vlinderkleppen geoptimaliseerd worden.

Figuur 17 – Voorgestelde draairichting vlinderkleppen tijdens openen



5 Conclusies en aanbevelingen

Op de Dender te Aalst wordt een nieuwe sluis (lengte: 54 m, breedte: 6 m) gebouwd. Voor deze nieuwe sluis heeft het WL het hydraulisch ontwerp van het nivelleersysteem en het ontwerp van de erosiebescherming uitgevoerd. Het constructief ontwerp van de draaideur werd uitgevoerd door Expertise Beton & Staal (EBS). Op basis van het hydraulisch en het constructief ontwerp werd besloten om een nivelleersysteem te voorzien dat bestaat uit 5 cirkelvormige openingen diameter 0.70 m afgesloten met vlinderkleppen.

Bij het uitwerken van het constructief ontwerp van de deur door Expertise Beton en Staal werd de vraag gesteld of door de scherpe overgang in het dagvlak van de opening geen loslating van de stroming kan ontstaan, wat vervolgens kan resulteren in een niet optimale aanstroming naar de vlinderkleppen. Door WL en EBS is besloten om het mogelijks loslaten van de stroming te beoordelen door middel van CFD-modellering, dewelke uitbesteed is. Voor deze CFD-modellering wordt zowel een geometrie zonder geleiding als een alternatieve geometrie met een geleiding beschouwd. Dit rapport beschrijft de gegevens en gemaakte keuzes voor het uitvoeren van de simulaties en bespreekt de resultaten van de uitgevoerde CFD-modellering.

Voor het beoordelen van de geleiding is het voldoende om één nivelleeropening te simuleren. Gekozen wordt voor de middelste opening. De openingen bevinden zich tussen verticale en horizontale spijlen in de deur. De breedte van het CFD model komt overeen met de breedte tussen twee spijlen. De lengte van het model werd zo gekozen dat de rand geen invloed heeft. De simulaties werden uitgevoerd voor één klephoek. Uit een vergelijking van de geometrie voor verschillende klephoeken werd een klephoek tussen 30° en 60° risicovol geacht voor loslating die resulteert in een kleiner debiet langsheen naar de opwaarts gerichte vlinderklephelft. Uit de simulaties die voor het ontwerp van het nivelleersysteem werden uitgevoerd volgde een openingswet met een eerste snelle fase waarbij in 25 s geopend wordt tot 37°. Hierna wordt trager geopend tot de klep 90° gedraaid is op 198 s. Op basis hiervan wordt besloten om een klephoek 45° te gebruiken voor het uitvoeren van de simulaties. De geleiding mag maximaal 0.15 m opwaarts uit het dagvlak van de opening komen. Drie varianten worden beschouwd en er wordt gekozen voor een geleiding bestaande uit een cirkelsegment geroteerd rondom het center van de opening. Dit cirkelsegment komt 0.15 m opwaarts uit het dagvlak en 0.10 m uit de rand van de opening.

Na het uitvoeren van een gridsensitiviteitsanalyse, zijn CFD-simulaties uitgevoerd voor de geometrie zonder vlinderklep en de geometrie met vlinderklep. In de simulatie zonder geleiding volgt dat de zone met loslating nabij de opwaarts gelegen vlinderklephelft zeer beperkt is en niet resulteert in een onregelmatige aanstroming. De simulatie met geleiding toont dat deze zones met loslating in de opening zo goed als verdwenen zijn. Voor de afvoercoëfficiënt, de kracht en het moment op de vlinderklep wordt een verwaarloosbaar verschil opgemerkt tussen de geometrie met en zonder geleiding. Uit de CFD-modellering volgt bij een klephoek 45° een afvoercoëfficiënt gelijk aan 0.24. De simulaties werden tijdsafhankelijk uitgevoerd. Uit de resultaten volgde dat na de eerste opstartverschijnselen het stromingspatroon quasi stationair is. Het ontbreken van tijdsafhankelijke effecten wordt toegeschreven aan de scherppte van de loslaatpunten en de beperkte breedte van het model waardoor Von Karman wervels zich niet kunnen ontwikkelen.

Uit de CFD simulaties volgt een verschil in uitstromingspatroon tussen de naar opwaarts gerichte vlinderhelft en de naar afwaarts gerichte vlinderklephelft. Voor de naar afwaartse gerichte vlinderklephelft is de stroming gericht volgens de hoek van de vlinderklep. Wanneer de 5 vlinderkleppen in dezelfde richting opendraaien bestaat het risico dat door het verschil in uitstromingspatroon tussen de opwaarts en afwaartse gerichte vlinderklephelft een asymmetrische stroming in de kolk ontstaat. Een asymmetrisch stromingspatroon kan resulteren in een toename van de dwarskrachten op de schepen in de kolk. Hierom is het aanbevolen om de kleppen niet dezelfde draairichting te geven. Door WL worden twee mogelijke draairichtingen voorgesteld voor de vlinderkleppen. Om meer inzicht te krijgen in de stroming in de kolk

wordt aanbevolen om een simulatie uit te voeren voor meerdere naast elkaar liggende nivelleeropeningen. Op basis hiervan kan de draairichting van de vlinderkleppen geoptimaliseerd worden.

Voor de CFD modellering wordt een RANS model gebruikt. Voor het beoordelen van de aanstroming van de vlinderklep (zonder en met geleiding) wordt een RANS model voldoende nauwkeurig geacht. Om de invloed van deze keuze op de wervels en tijdsafhankelijke effecten na te gaan verdient het aanbeveling om de simulaties te herhalen met een DES model. Een DES model is beter geschikt voor dergelijke stromingsverschijnselen, maar vergt een aanzienlijke grotere rekenkracht.

Uit de CFD resultaten volgt dat bij een klephoek 45° de afvoercoëfficiënt 21 % hoger is dan deze die werd toegepast bij het ontwerp van het nivelleersysteem. Merk op dat een hogere waarde voor de afvoercoëfficiënt resulteert in een snellere nivellering waardoor, normalerwijs, ook de kracht op het schip in de kolk toeneemt. Aangezien simulaties altijd een bepaalde onzekerheid hebben adviseert het WL om bij de ingebruikname van een nieuwe sluis in situ metingen uit te voeren. Het WL beschikt over een meetopstelling waarmee de optredende langse waterspiegelhellingen, welke de belangrijkste component is van de langskracht, in situ opgemeten kunnen worden. Op basis van de in situ opgemeten langse waterspiegelhellingen en de (kwalitatieve) appreciatie van de betrokken sluismeester(s) en schipper(s), kan - indien nodig - een bijsturing voorgesteld worden.

6 Referenties

- Breugem, W.A.; Decrop, B.; Rauwoens, P.; Van Hoydonck, W.; Verelst, K.; Peeters, P.; Mostaert, F.** (2016). Hydraulic study of breaking logs in lock filling with gate openings: sub report 2 – CFD modeling of scale model experiments. *WL Rapporten*, 14_050. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerp
- N. Badano; P.Rauwoens; Decrop, B.** (2017). Raamovereenkomst CFD-modellering stroming rond waterbouwkundige constructies DO2: CFD-modellering van een vlinderklep geplaatst in een sluisdeur 5 december 2017 versie 3.0
- SBE.** (2011). Dender – Dendermonde – Aalst. Opwaardering tot klasse IV. Voorontwerp. Deelproject: Stuwsuis te Denderbelle. Grondplan. Plan nummer 7309/V22-D dd. 09/12/2011
- Schwanenberg, D.; Jongeling, T.H.G.** (2003). Vul- en ledigingssysteem Royerssluis: deelopdracht I. Eerste ontwerp Q2887. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België. Q2887 ed.
- Vercruysse, J.B.; Verelst, K.; Peeters, P.; Mostaert, F.** (2015). Zeekanaal Brussel Schelde - sluis Zemst: terreinmeting na renovatie middendeur. *WL Rapporten*, 14_035. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- Verelst, K.; De Mulder, T.; Vercruysse, J.B.; Mostaert, F.** (2009). Dender: stuwsuis Aalst. Kolkafmetingen en nivelleersysteem sluis. *WL Rapporten*, 760_10a. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- Verelst, K.; Vercruysse, J.; Peeters, P.; Mostaert, F.** (2014). Dender - Stuwsuis Aalst: aanpassing ontwerp nivelleersysteem sluis. *WL Adviezen*, 13_097. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- Verelst, K.; Vercruysse, J.B.; Cui, J.; De Mulder, T.; Mostaert, F.** (2009). Dender - stuwsuis Aalst: erosiebescherming. *WL Rapporten*, 760_10b. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- Verelst, K.; Vercruysse, J.B.; Peeters, P.; Mostaert, F.** (2012). Sluis Zemst - Middendeuren: optimalisatiestudie nivelleersysteem nieuwe sluisdeuren. *WL Rapporten*, 760_04d. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- Verelst, K.; Viaene, P.; Peeters, P.; Mostaert, F.** (2012). Dender – stuwsuis Aalst: deelrapport 2. Update dimensionering erosiebescherming. *WL Rapporten*, 760_10b. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

7 Bijlage A– Rapport CFD simulatie

RAPPORT

**Departement Mobiliteit en Openbare
Werken**

Afdeling Waterbouwkundig Laboratorium

**Raamovereenkomst CFD-modellering
stroming rond waterbouwkundige
constructies**

DO2: CFD-modellering van een vlinderklep
geplaatst in een sluisdeur

5 december 2017 - versie 3.0

Colofon

International Marine & Dredging Consultants

Adres: Van Immerseelstraat 66, 2018 Antwerp, Belgium

: + 32 3 270 92 95

: + 32 3 235 67 11

Email: info@imdc.be

Website: www.imdc.be

IMDC nv

Raamovereenkomst CFD berekeningen waterbouwkundige constructies
DO2: CFD-modellering van een vlinderklep**Document Identificatie**

Titel	DO2: CFD-modellering van een vlinderklep geplaatst in een sluisdeur
Project	Raamovereenkomst CFD-modellering stroming rond waterbouwkundige constructies
Opdrachtgever	Departement Mobiliteit en Openbare Werken - Afdeling Waterbouwkundig Laboratorium
Besteknummer	WL-16-30
Documentref	I/RA/11530/17.174/BDC
Documentnaam	K:\PROJECTS\11\11530_P011376 - CFD-modellering WL\11530-002 - CFD stroming vlinderklep sluisdeur\10-Rap\RA17174-11530-eindrapport-DO2\RA17174-11530-eindrapport-DO2-Vlinderklep_v3.0.docx

Revisies / Goedkeuring

Versie	Datum	Omschrijving	Auteur	Nazicht	Goedgekeurd
1.0	11/10/2017	Concept	N. Badano	P.Rauwoens,	B. Decrop
2.0	13/11/2017	Finaal rapport	N. Badano	P.Rauwoens,	B. Decrop
3.0	05/12/2017	Finaal rapport	N. Badano	P.Rauwoens,	B. Decrop


Verdeellijst

☐	Analoog	
☒	Digitaal	Jeroen Vercruysse

Contactpersoon IMDC

Contactpersoon	Boudewijn Decrop
Telefoonnummer	+32 3 270 92 95
E-mail	bdc@imdc.be

Inhoudstafel

1. INLEIDING	1
1.1 DE OPDRACHT	1
1.2 DOEL VAN HET RAPPORT	1
2. GEOMETRIE EN DOMEIN	2
2.1 BASISGEVAL ZONDER AANSTROOMGELEIDING	2
2.2 GEVAL MET AANSTROOMGELEIDING	3
2.3 CONVENTIES	3
3. MODELPARAMETERS EN INSTELLINGEN	4
4. ROOSTERGEVOELIGHEIDSANALYSE	6
5. KWALITEITSCONTROLE	11
5.1 VERGELIJKING MET LITERATUUR	11
5.2 GELDIGHEID VAN DE WANDWET	12
6. RESULTATEN	14
6.1 VLINDERKLEP ZONDER GELEIDING	14
6.1.1 Opwaarts stroombeeld	14
6.1.2 Afwaarts stroombeeld	18
6.2 VLINDERKLEP MET GELEIDING	19
6.2.1 Opwaarts stroombeeld	20
6.2.2 Afwaarts stroombeeld	23
6.3 EFFECTEN VAN DE AANSTROOMGELEIDING	23
7. CONCLUSIES	26
8. REFERENTIES	27

Bijlagen

BIJLAGE A	CONTOURPLOTS VAN STROOMSNELHEID	28
A.1	ZONDER AANSTROOMGELEIDING	29
A.1.1	Opwaarts	29
A.1.2	Afwaarts	33
A.2	MET AANSTROOMGELEIDING	39
A.2.1	Opwaarts	39
A.2.2	Afwaarts	43

Lijst van figuren

FIGUUR 2-1: SNEDEN VAN DE GEOMETRIE	2
FIGUUR 2-2: DETAIL VAN DE VLINDERKLEP	3
FIGUUR 2-3: DETAIL VAN DE AANSTROOMGELEIDING AAN DE INLAAT	3
FIGUUR 4-1: BASISROOSTER MET CELGROOTTE EN LOKALE VERFIJNINGEN AANGEGEVEN	6
FIGUUR 4-2: BASISROOSTER (LINKS) EN VERFIJND ROOSTER (RECHTS) GEVISUALISEERD LANGS EEN HORIZONTAAL VLAK DOORHEEN MIDDELPUNT VAN DE KLEP	7
FIGUUR 4-3: TIJDREEKS VAN KRACHT (COMPONENT DWARS OP STROMING), VOOR BASISROOSTER EN VERFIJND ROOSTER	8
FIGUUR 4-4: TIJDREEKS VAN KRACHT (COMPONENT LANGS STROMING), VOOR BASISROOSTER EN VERFIJND ROOSTER	8
FIGUUR 4-5: TIJDREEKS VAN MOMENT OP DE SCHIJF (COMPONENT LANGS AS), VOOR BASISROOSTER EN VERFIJND ROOSTER	9
FIGUUR 4-6: TIJDREEKS VAN DE DEBIETSCOËFFICIËNT (C_d), VOOR BASISROOSTER EN VERFIJND ROOSTER	9
FIGUUR 4-7: STROOMBEELD VAN BEREKENING MET BASISROOSTER (LINKS) EN MET VERFIJND ROOSTER (RECHTS), LANGS EEN SNEDE OP EEN HORIZONTAAL VLAK DOOR HET CENTRUM VAN DE SCHIJF.	10
FIGUUR 5-1: CURVE VAN C_d -WAARDEN ALS FUNCTIE VAN DE OPENINGSHOEK (LIN & SCHOHL, 2004). DE C_d -WAARDE BEREKEND IN OPENFOAM VOOR 45° IS AANGEDUID MET RODE MARKER	11
FIGUUR 5-2: Y^+ OP DE WANDEN, GEZIEN VAN OPWAARTS (BOVEN) EN AFWAARTS (ONDER)	13
FIGUUR 6-1: HORIZONTALE SNEDE DOOR HET VELD VAN RELATIEVE DRUK (BOVEN) EN STROOMSNELHEID (ONDER), OP 1.00 M BOVEN DE BODEM (DOOR HET MIDDELPUNT VAN DE SCHIJF)	16
FIGUUR 6-2: DETAIL VAN DE RELATIEVE DRUK LANGS EEN HORIZONTALE SNEDE OP 1.0 M BOVEN DE BODEM.	17
FIGUUR 6-3: STROOMSNELHEID LANGS EEN VERTICALE SNEDE DOORHEEN HET CENTRUM VAN DE SCHIJF.	17
FIGUUR 6-4: STROOMSNELHEID IN EEN VERTICAAL VLAK NORMAAL OP DE STROMING, 5 CM AFWAARTS VAN DE INSTROOMOPENING (5 CM AFWAARTS HET VLAK VAN DE OPWAARTSE SLUISDEURMUUR)	18
FIGUUR 6-5: STROOMBEELD IN EEN HORIZONTAAL VLAK DOORHEEN HET CENTRUM VAN DE SCHIJF, ZONDER STROOMGELEIDING.	19
FIGUUR 6-6: DETAIL VAN HET ROOSTER MET STROOMGELEIDING	20
FIGUUR 6-7: STROOMBEELD IN EEN HORIZONTAAL VLAK DOORHEEN HET CENTRUM VAN DE SCHIJF, MET STROOMGELEIDING.	21
FIGUUR 6-8: DRUKVELD ROND DE KLEP, MET STROOMGELEIDING.	21
FIGUUR 6-9: STROOMSNELHEID LANGS EEN VERTICALE SNEDE DOORHEEN HET CENTRUM VAN DE SCHIJF. SITUATIE MET STROOMGELEIDING	22
FIGUUR 6-10: STROOMSNELHEID IN EEN VERTICAAL VLAK NORMAAL OP DE STROMING, 5 CM AFWAARTS VAN HET VLAK VAN DE OPWAARTSE MUUR. SITUATIE MET STROOMGELEIDING.	22

FIGUUR 6-11: TIJDREEKS VAN MOMENT OP DE SCHIJF (COMPONENT LANGS AS), MET EN ZONDER GELEIDING.	23
FIGUUR 6-12: TIJDREEKS VAN KRACHT (COMPONENT LANGS STROMING), MET EN ZONDER GELEIDING.	24
FIGUUR 6-13: TIJDREEKS VAN KRACHT (COMPONENT DWARS OP STROMING), MET EN ZONDER GELEIDING	24
FIGUUR 6-14: TIJDREEKS VAN DEBIET, MET EN ZONDER GELEIDING	25
FIGUUR 6-15: TIJDREEKS VAN DE DEBIETSCOËFFICIËNT C_d), MET EN ZONDER GELEIDING.	25

1. INLEIDING

1.1 DE OPDRACHT

In het kader van de raamovereenkomst gegund aan IMDC (bestek, WL-16-30; offerte I/OF/01000/17143) werd deelopdracht 2 gegund aan IMDC na indienen van offerte I/OF/01000/17.200/BDC.

Het doel van deelopdracht 2 bestaat erin om de stroming te berekenen doorheen twee varianten van een vlinderklep geplaatst in een sluisdeur. Eén variant met stroomgeleiding en één variant zonder stroomgeleiding wordt doorgerekend, om aldus het stroombeeld en de debietscoëfficiënt van beide alternatieven te bepalen.

1.2 DOEL VAN HET RAPPORT

In het voorliggende rapport wordt de opzet van het CFD-model beschreven en het aantonen van de kwaliteit van het rooster en de simulaties. Verder wordt beschreven in welke mate het stroombeeld en de afvoercapaciteit verbeterd na toevoeging van een structuur voor stromingsgeleiding.

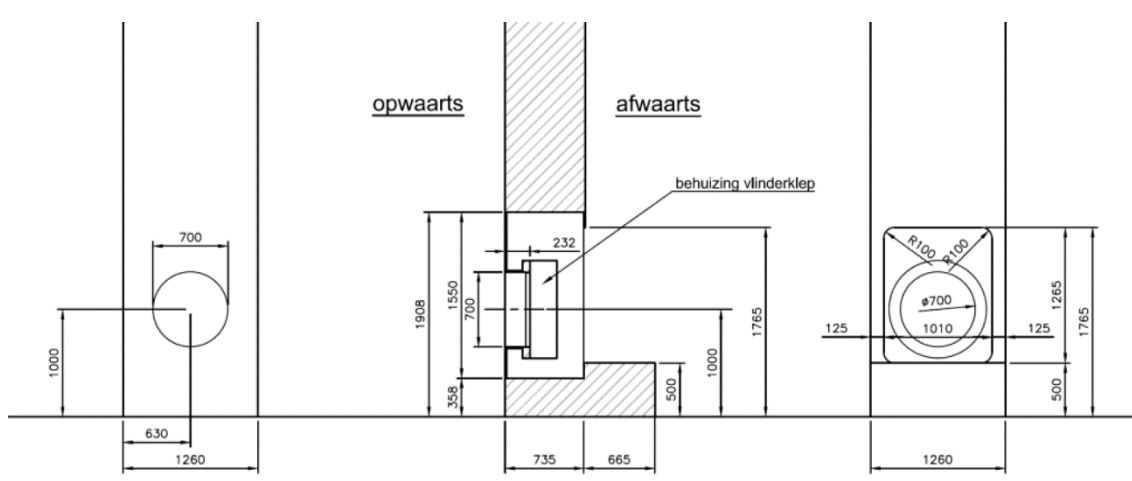
2. GEOMETRIE EN DOMEIN

2.1 BASISGEVAL ZONDER AANSTROOMGELEIDING

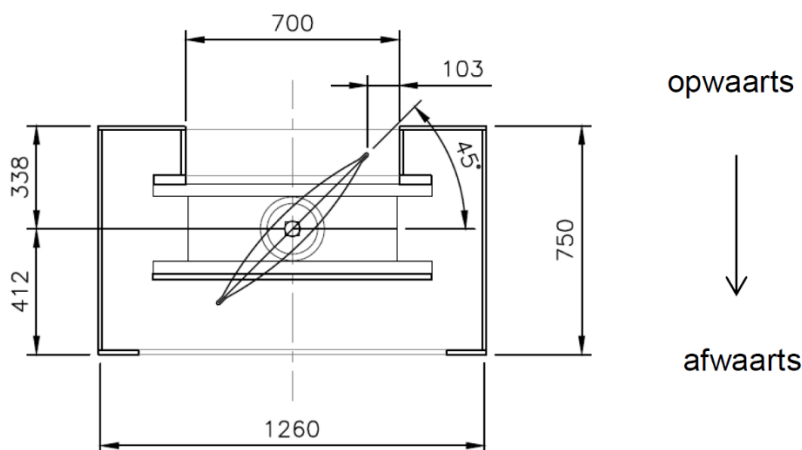
De geometrie werd opgebouwd op basis van het 3D-model voorzien door het WL, waarvan sneden worden afgebeeld in Figuur 2-1 en Figuur 2-2. Het model bestaat uit een sectie van de sluis met opwaarts pand, sluisdeur met ingebouwde vlinderklep en afwaarts pand:

- Opwaarts pand (Waterdiepte = 5.41 m, lengte = 3.5 m, breedte = 1.26 m)
- Afwaarts pand (Waterdiepte = 3.79 m, lengte = 10 m, breedte = 1.26 m)
- Cilindrische behuizing van de klep, met diameter $D=0.7$ m
- Rechthoekige opening in afwaartse wand van de deur, waarbinnen de cilinder van de behuizing gedeeltelijk uitloopt

Geometrie van de schijf van de klep werd niet gewijzigd in vergelijking met het door het WL opgeleverde 3D-model.



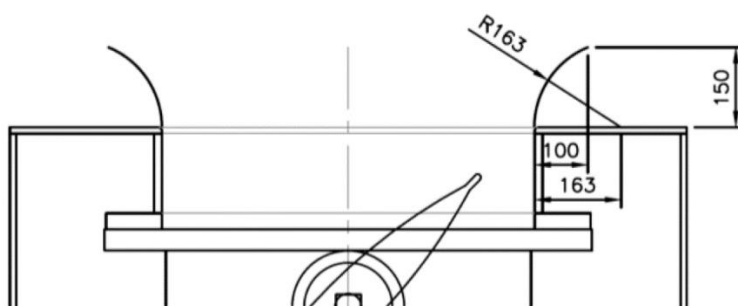
Figuur 2-1: Sneden van de geometrie



Figuur 2-2: Detail van de vlinderklep

2.2 GEVAL MET AANSTROOMGELEIDING

Verder werd voor het geval met aanstroomgeleiding naar de inlaat een kwart-torus geplaatst rond de instroomopening. Deze torus werd geconstrueerd door een cirkelsectie van ongeveer 75° met radius 163 mm (zoals zichtbaar in de snede in Figuur 2-3), te roteren rond het middelpunt van de instroomopening. Op die manier kan het trompetvormige oppervlak van de aanstroomgeleiding bekomen worden.



Figuur 2-3: Detail van de aanstroomgeleiding aan de inlaat

2.3 CONVENTIES

Het model wordt opgebouwd in een rechtshandig assenstelsel, zoals tevens aangegeven in Figuur 4-1. De z-as loopt in de richting van de stroming door de klep, de y-as ligt lateraal op de stroming (horizontaal) en de x-as wijst verticaal naar boven.

3. MODELPARAMETERS EN INSTELLINGEN

De eigenschappen van de **modelopzet** kunnen als volgt worden opgelijst:

- OpenFOAM v5.0 werd gebruikt
- Non-stationary pimpleFOAM solver.
- Turbulence model k-omega SST (daar eerder succesvol toegepast in IMDC (2016))
- Water oppervlak met *rigid lid* aanpak (gesloten rand, free slip)

De gebruikte **numerieke schema's** voor de verschillende termen zijn:

- Advectie term: *blended linearUpwindV* schema.
- First order upwind schemas voor advectionstermen van turbulentie parameters.
- Tijdsafgeleiden werden berekend met *eerste orde impliciet* Euler schema, een variabele tijdstap van 110 tot 160 ms werd bepaald door toepassing van een maximum Courant number van 5, een courante waarde voor URANS berekeningen.
- De andere ruimtelijke afgeleiden werden bepaald met een *tweede orde lineair* schema.
- Voor alle residuals werd een convergentiecriteria van 10^{-8} aangehouden
- PIMPLE corrector steps voor elke tijdstap: 2 *inner correctors* en 3 *outer corrector steps*.

Randvoorwaarden zijn als volgt aangepakt:

- Druk:
 - Uitstroom: een constante en uniforme kinematische druk van $0 \text{ m}^2/\text{s}^2$
 - Inlaat: constante en uniforme kinematische druk van $15.89 \text{ m}^2/\text{s}^2$ werd gespecificeerd, bekomen door het verschil in waterstand tussen de panden te vermenigvuldigen met g .
- Snelheid:
 - Uitstroom: een *inletOutlet* conditie werd gebruikt, dit komt overeen met een *zero gradient* methode, maar met toestaan van omkering van de stroming.
 - Op de inlaat werd een *pressureInletUniformVelocity* gespecificeerd. Deze randvoorwaarde bepaalt elke tijdstap een uniforme snelheid gebaseerd op de gemiddelde druk net naast de rand.

- Turbulentie parameters:
 - Inlaat
 - De turbulente kinetische energie (tke) werd opgelegd met de *turbulentIntensityKineticEnergyInlet* randvoorwaarde. In deze methode wordt de tke bepaald op basis van de stroomsnelheid en een opgegeven turbulent intensiteit, waarvoor een waarde werd gekozen van 2%, wat een typische waarde is voor velocity inlets. Merk op dat de definitie van *turbulente intensiteit* wordt gegeven door de verhouding van RMS turbulente fluctuaties tot tijdsgemiddelde stroomsnelheid. Gezien de instroomsnelheid aan de inlaat zeer klein is, zal de opgelegde TKE ook zeer klein zijn.
 - Omega werd bepaald aan de randen met *turbulentMixingLengthFrequencyInlet*. Deze methode bepaalt omega op basis van tke en een opgegeven mengweglengte van 0.5 m. Gezien TKE aan de instroomrand zeer klein is, zal omega ook zeer klein zijn.
- Wanden:
 - Op alle wanden, ook op de klep, werd een ruwe grenslaag opgelegd met *nutkRoughWallFunction*. De ruwheidshoogte k_s werd vastgelegd op 0.0001 m, zoals opgegeven door de opdrachtgever.

Vloeistofparameters:

- Dichtheid: 1000 kg/m³ (enkel voor postprocessing)
- Kinematische viscositeit: 1.2 10⁻⁶ kg/m³

Aangaande postprocessing werden de volgende voorzieningen getroffen:

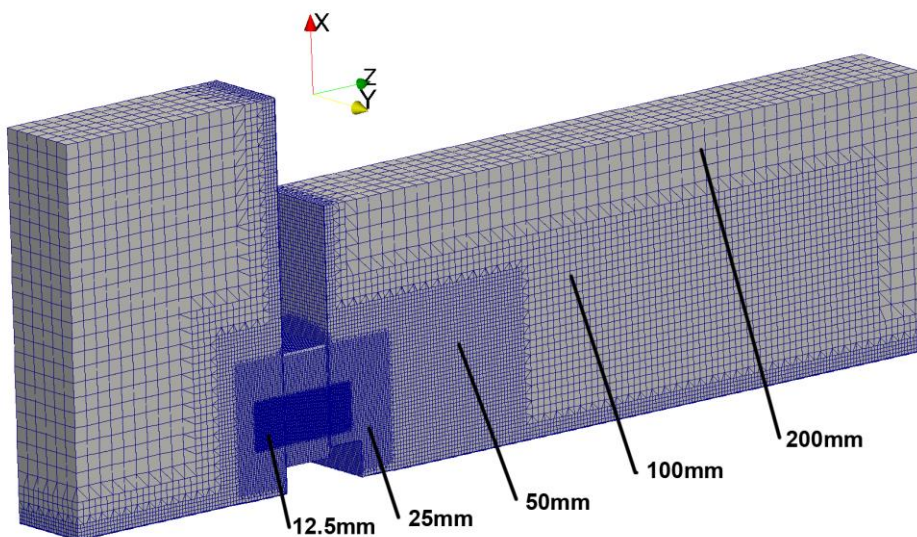
- Function objects werden aangemaakt voor de berekening van:
 - Krachten op de schijf
 - Moment op de schijf (component langs as van de schijf)
 - Debiet, bepaald door integratie van de volumeflux.
- De debietscoëfficiënt werd geprogrammeerd zodat een waarde werd weggeschreven na elke tijdstap. Deze werd bepaald op basis van het berekende debiet en drukverschil op de randen, als volgt: $C_d = Q/A\sqrt{(2\Delta p)}$, waarin de eenheid van druk Pa is.

4. ROOSTERGEVOELIGHEIDSANALYSE

Om aan te tonen dat de resultaten niet significant afhankelijk zijn van de gekozen roosterresolutie, wordt geanalyseerd welke gevoeligheid de resultaten hebben voor verfijning van het productierooster.

Het **basisrooster** of productierooster heeft de volgende eigenschappen (Figuur 4-1):

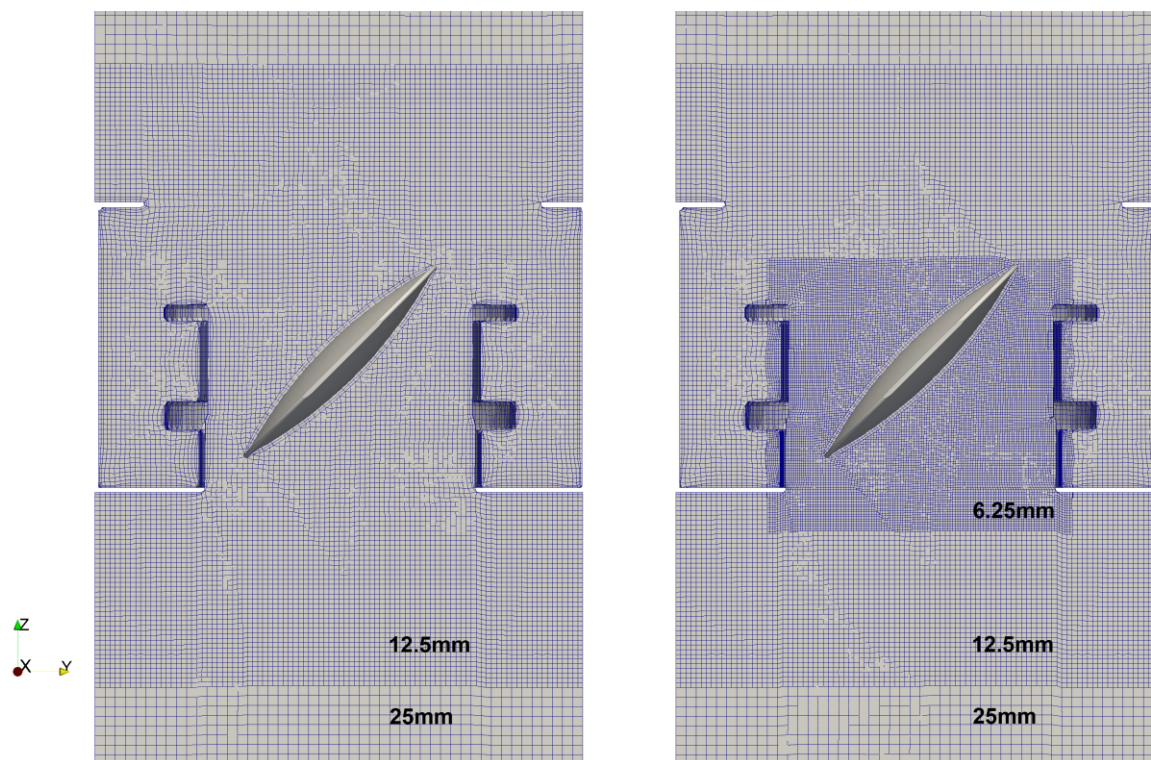
- Een basis celgrootte van 200 mm werd gebruikt over het gehele domein. Op basis van dit basisrooster werd de celgrootte gehalveerd in verschillende stappen totdat een celgrootte van 12,5 mm rond de klep werd bereikt.
- Het rooster werd verder verfijnd aan de wanden, waarbij twee bijkomende lagen werden voorzien voor de grenslaag, elk met een dikte van 6 mm.
- Totaal aantal cellen van het basisrooster bedraagt 1,5 miljoen.



Figuur 4-1: Basisrooster met celgrootte en lokale verfijningen aangegeven

Het **verfijnde rooster** voor de roostergevoeligheidsanalyse heeft de volgende eigenschappen (Figuur 4-2, rechts):

- Halvering van het rooster rond instroom en schijf tot 6.125 mm.
- Totaal aantal cellen: 2.6 miljoen.



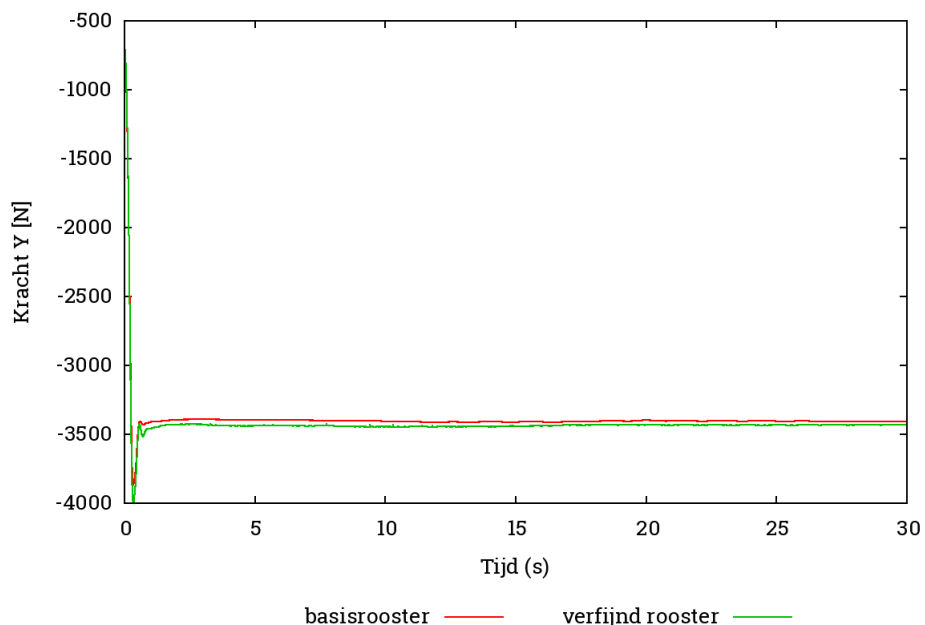
Figuur 4-2: Basisrooster (links) en verfijnd rooster (rechts) gevisualiseerd langs een horizontaal vlak doorheen middelpunt van de klep

Om de gevoeligheid van de resultaten voor verdere verfijning van het rooster te onderzoeken werden voor beide roosters de volgende grootheden in een tijdreeks afgebeeld:

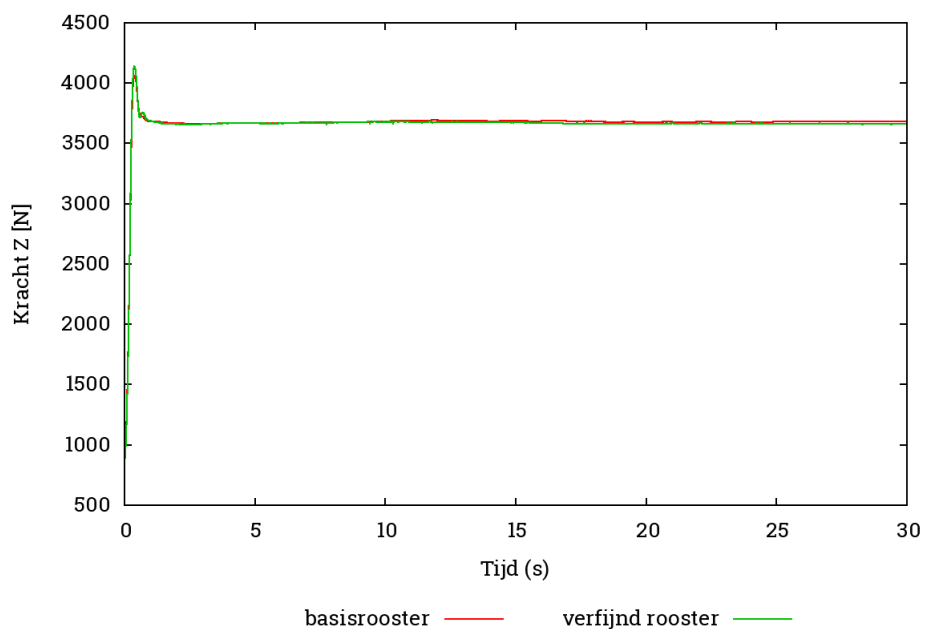
- Kracht (component langs en dwars op stroming),
- Moment (component langs rotatieas van de schijf)
- Debietscoëfficiënt.

Deze tijdsreeksen kunnen worden teruggevonden in Figuur 4-3 tot Figuur 4-6. Algemeen kan gesteld worden dat er geen significant verschil kan worden waargenomen in de resultaten na verfijning van het basisrooster met een factor twee.

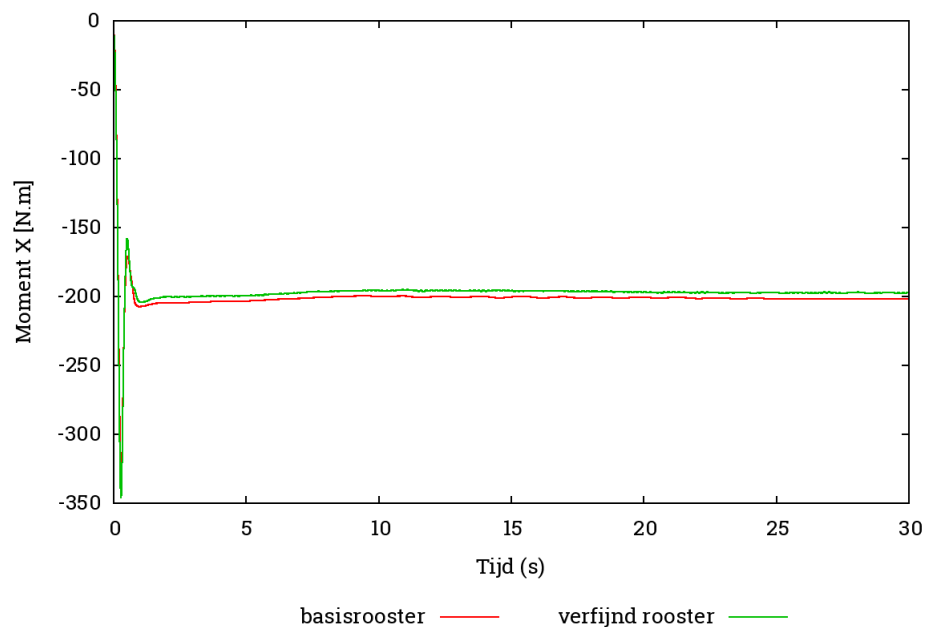
In Figuur 4-7 wordt een vergelijking getoond van het stroombeeld met basisrooster en met verfijnd rooster. Ook hier kan slechts een miniem verschil gezien worden in de stroomsnelheid en mate waarin de straal doordringt in het afwaartse pand. In de zone van loslating kan geen significant verschil worden waargenomen.



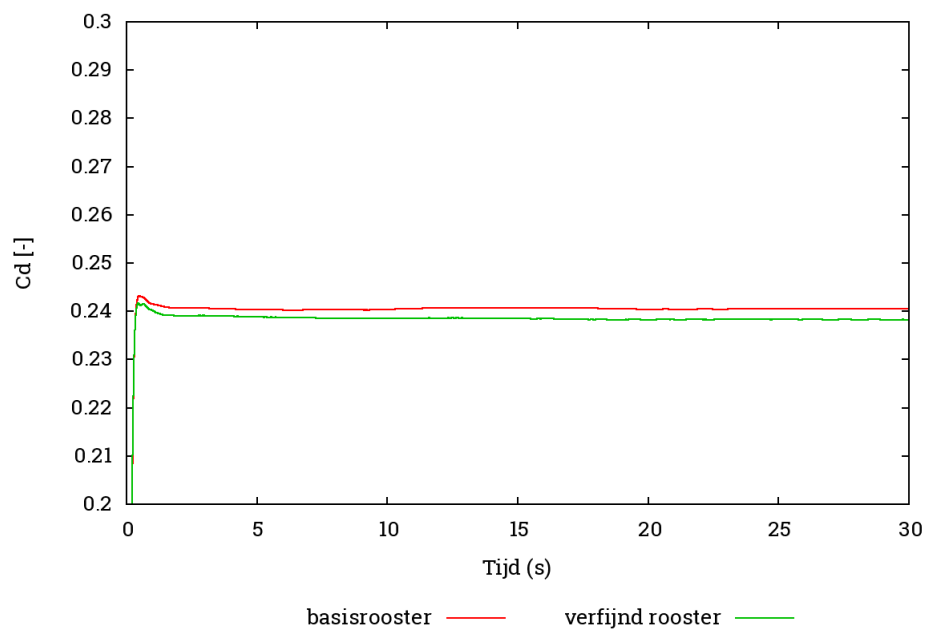
Figuur 4-3: Tijdreeks van Kracht (component dwars op stroming), voor basisrooster en verfijnd rooster



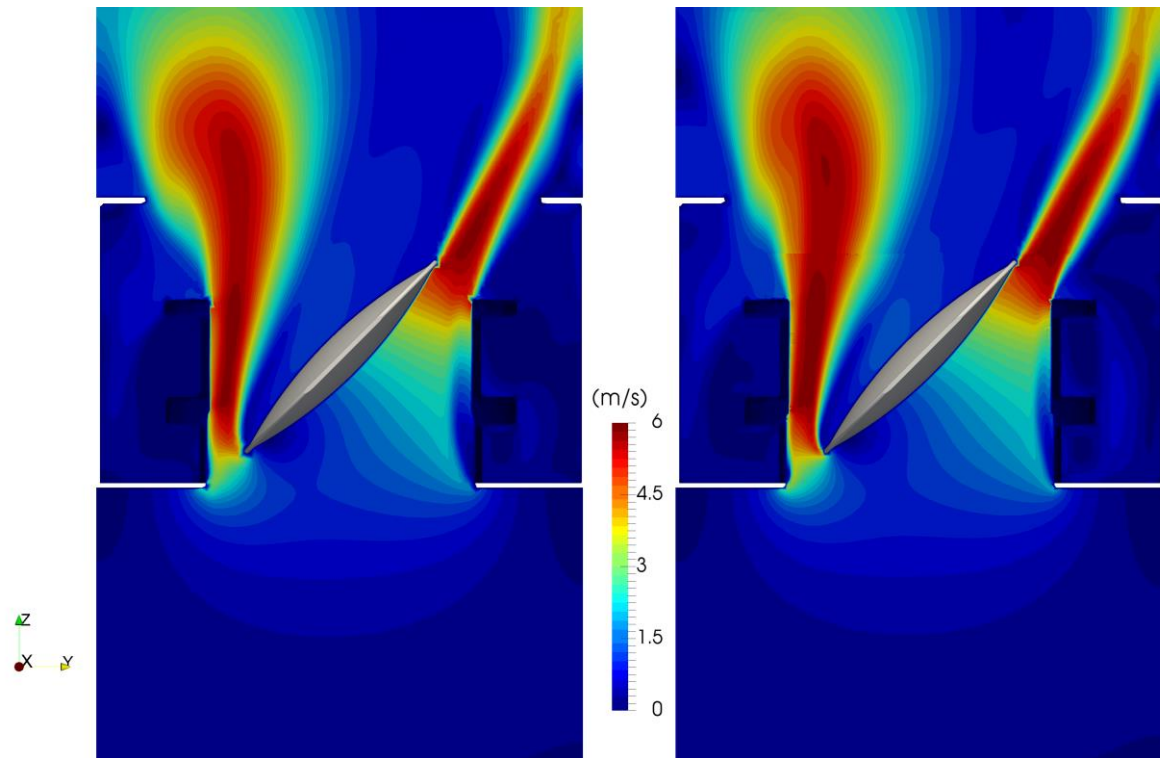
Figuur 4-4: Tijdreeks van Kracht (component langs stroming), voor basisrooster en verfijnd rooster



Figuur 4-5: Tijdreeks van moment op de schijf (component langs as), voor basisrooster en verfijnd rooster



Figuur 4-6: Tijdreeks van de debietscoëfficiënt (C_d), voor basisrooster en verfijnd rooster



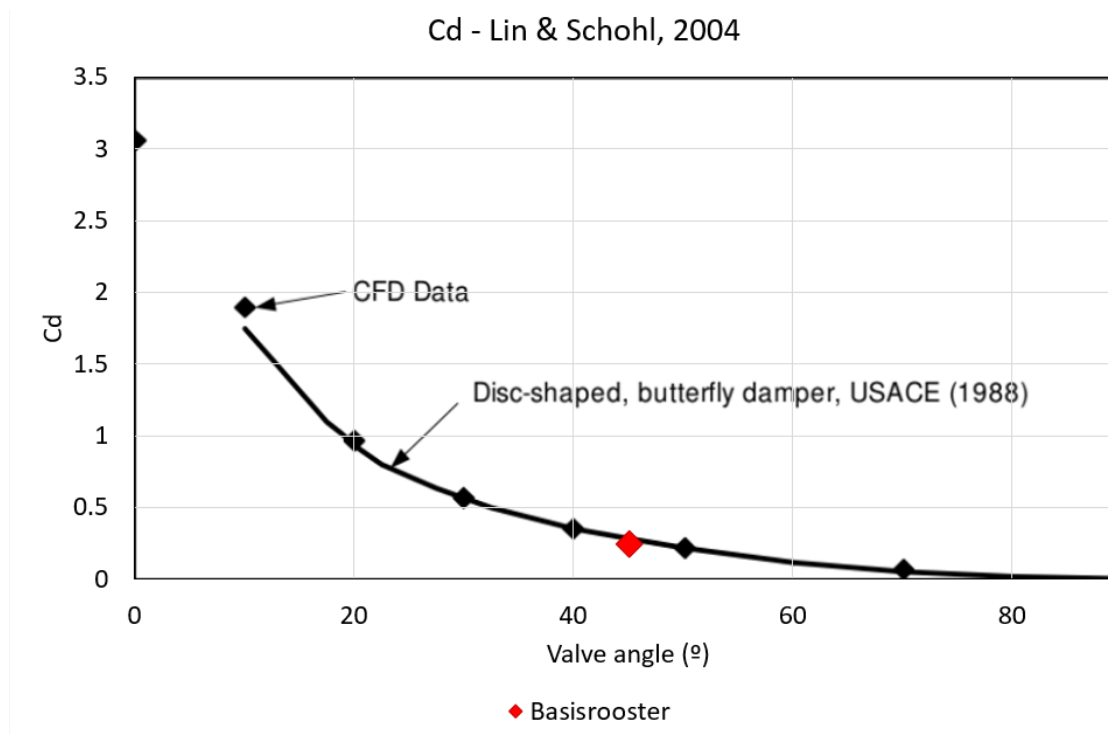
Figuur 4-7: Stroombeeld van berekening met basisrooster (links) en met verfijnd rooster (rechts), langs een snede op een horizontaal vlak door het centrum van de schijf.

5. KWALITEITSCONTROLE

5.1 VERGELIJKING MET LITERATUUR

Een eerste test bestaat erin om na te kijken of de berekende debietscoëfficiënt (C_d) in lijn ligt met de gekende waarden van C_d in de literatuur.

De berekende C_d werd vergeleken met de waarden bekomen door Lin & Schohl (2004). Zoals in Figuur 5-1 aangegeven betreft het hier een 'Disc-shaped valve' en dus tevens een cirkelvormige leiding. In Figuur 5-1 wordt de C_d gegeven voor experimentele resultaten van USACE-Waterway Experimental Station (1988), en voor CFD-resultaten van de auteurs. De C_d waarden uit CFD resultaten werden gerapporteerd voor enkele openingshoeken, waaronder 40° en 60°, maar niet voor 45°. Zoals in Figuur 5-1 kan worden opgemerkt ligt de in deze studie berekende C_d van 0.24 zeer dicht bij de curve door de experimentele resultaten van USACE (1988). De hier berekende waarde ligt net onder de curve, wat mogelijk verklaard kan worden doordat de klep zich niet in een ontwikkelde stroming in een leiding bevindt, maar in een zone met contractie van de stroming. Over het algemeen kan worden gesteld dat de gevonden waarde van 0.24 vertrouwen schept in de resultaten van het CFD model voor deze studie.

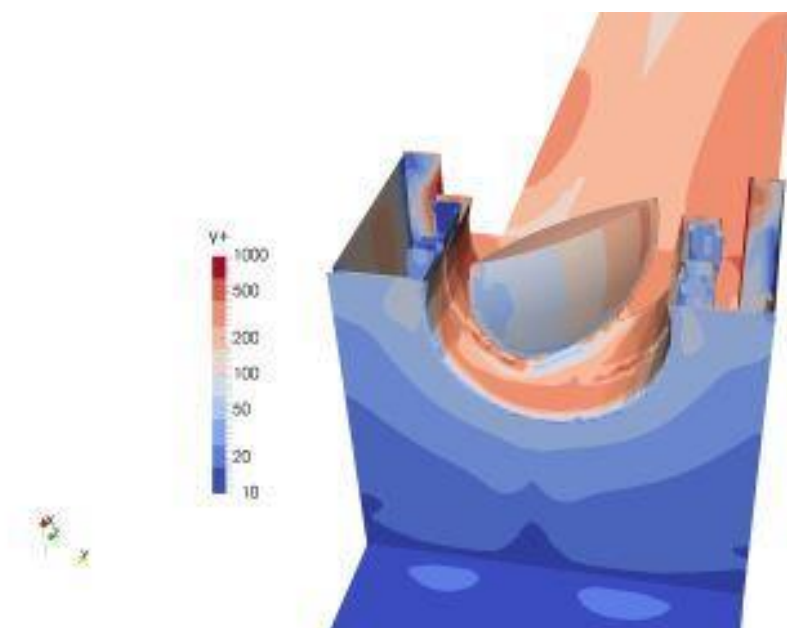


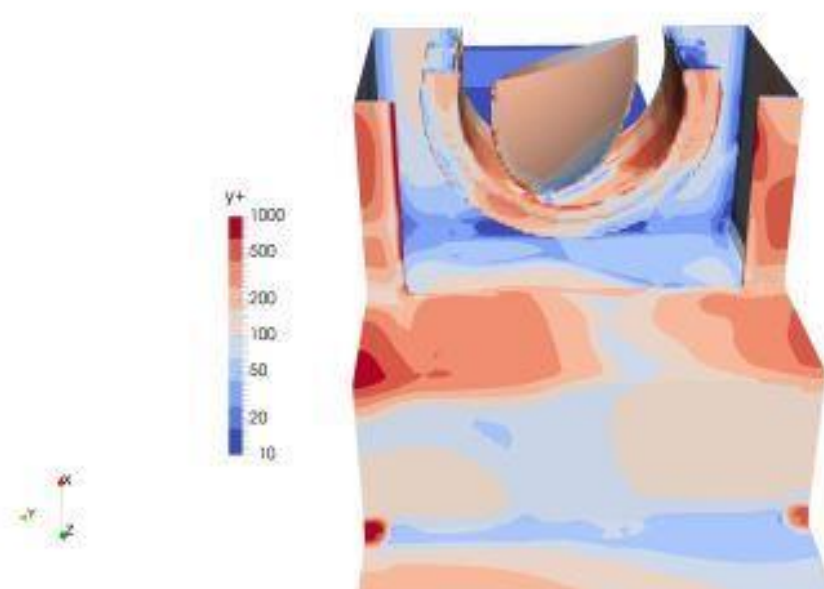
Figuur 5-1: Curve van C_d -waarden als functie van de openingshoek (Lin & Schohl, 2004).
De C_d -waarde berekend in OpenFOAM voor 45° is aangeduid met rode marker

5.2 GELDIGHEID VAN DE WANDWET

Aangezien een wandwet gebruikt wordt voor het bepalen van de stroomsnelheid op het eerste punt naast de wand, moet worden nagegaan of de Y^+ waarde op die locatie in het geschikte bereik ligt. Algemeen kan worden aangenomen dat wanneer deze kleiner wordt dan 30, het eerste punt naast de wand zich in de *viscous sublayer* bevindt, waar een lineair eerder dan een logaritmisch snelheidsprofiel geldt. Vaak wordt een maximale waarde van 300 voor het begin van de *outer layer* aangenomen, al is deze eerder geldig voor volledig ontwikkelde stromingen.

Voor het huidige model werd een 3D visualisatie gemaakt van Y^+ op de wanden (Figuur 5-2). Zoals te zien is in de figuur, ligt de Y^+ waarde minimaal rond 50 op de plaatsen waar significante stroming bestaat. Op de sluisdeur in het opwaarts pand vinden we Y^+ waarden van 40-50 in de aanloop naar de instroom. Op de hoek van de inlaat en in de cilindrische opening vinden we Y^+ waarden van 100 tot 300. Enkel op de bodem van het opwaarts pand zijn de Y^+ waarden kleiner dan 30 aangezien daar lokaal zo goed als geen stroming bestaat.





Figuur 5-2: Y+ op de wanden, gezien van opwaarts (boven) en afwaarts (onder)

6. RESULTATEN

In dit hoofdstuk worden de resultaten beschreven van de stromingsberekeningen doorheen de vlinderklep zonder en met aanstroomgeleiding, en wordt de vergelijking tussen beide gevallen gemaakt.

6.1 VLINDERKLEP ZONDER GELEIDING

Voor de vlinderklep zonder aanstroomgeleiding vinden we een debietscoëfficiënt C_d van 0.24, wat goed aansluit bij waarden uit de literatuur, zoals aangetoond in paragraaf 5.1.

6.1.1 Opwaarts stroombeeld

In Figuur 6-1 wordt een horizontale snede afgebeeld van het druk- en stroomsnelheidsveld doorheen het centrum van de schijf, of op 1.00 m boven de bodem. Alle in dit rapport afgebeelde sneden van dit type zijn ogenblikkelijke stroombeelden, maar door het stationaire karakter van de stroming zijn deze weergaven nagenoeg identiek aan het tijdsgemiddelde stroombeeld. Merk op dat niet de absolute druk p gebruikt wordt, maar wel relatieve druk p'

$$p' = p - \rho_w g h$$

met h de lokale diepte met als referentie $h=0$ aan het wateroppervlak van het afwaarts pand. In wat volgt wordt met *druk* steeds naar de *relatieve druk* verwezen.

In het drukveld is te zien dat er aan de zijde waar de rand van de schijf in de opwaartse richting wijst (bovenkant in deze figuur), een sterke drukgradiënt optreedt. Daardoor wordt de stroming dicht tegen de wand van de behuizing gedrukt en treedt zo goed als geen loslating op (Figuur 6-1, onderaan). Aan de andere zijde, daarentegen, is de drukgradiënt zwakker en vertoont het stroombeeld een klassieke contractie met loslating. Een tijdreeks van de druk rond de klep wordt verder niet weergegeven, gezien het stationaire karakter van de stroming (zie Figuur 6-11 en volgende).

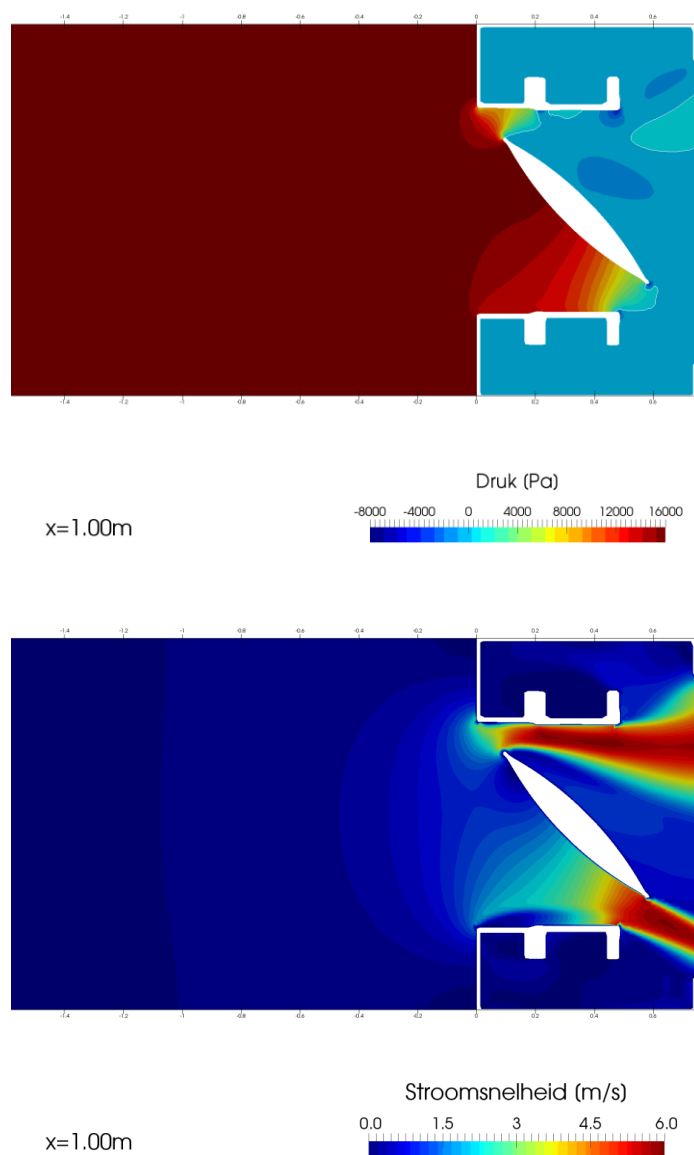
Een analyse van de stromingssituatie kan verklaren waarom in deze simulaties variaties in de tijd nauwelijks aanwezig zijn. De *shear layer* die zich vormt bij loslating afwaarts de schijf van de klep, is door de geometrie beperkt tot enkele centimeter (dit wordt geïllustreerd door de breedte van de zone met snelheidsgradient). Dit wil ook zeggen dat de turbulente structuren binnen deze zone maximaal een grootte-orde van 0.01 m hebben, ongeveer gelijk aan de roostergrootte. Bij een snelheid van 6 m/s wil dit zeggen dat de frequentie van de turbulente fluctuaties rond 600 Hz ligt. Dergelijke hoge frequentie kan uiteraard niet opgelost worden in het huidige model. Dergelijke frequentie is qua constructie allicht ook niet van belang in relatie tot resonantie.

Wanneer men op een andere schaal kijkt naar mogelijke wervels voortkomend uit een Von Karman wervelstraat dient men rekening te houden met een Strouhal getal $St (=f.D/U)$ van 0.2. Dit leidt een frequentie van 2.4 Hz, of grootte van de wervels van $6 \text{ m/s} / 2.4 \text{ Hz} = 2.5 \text{ m}$. Gezien de beperkte ruimte in het model (slechts 1.26 m breed) kunnen deze wervels tevens niet tot ontwikkeling komen.

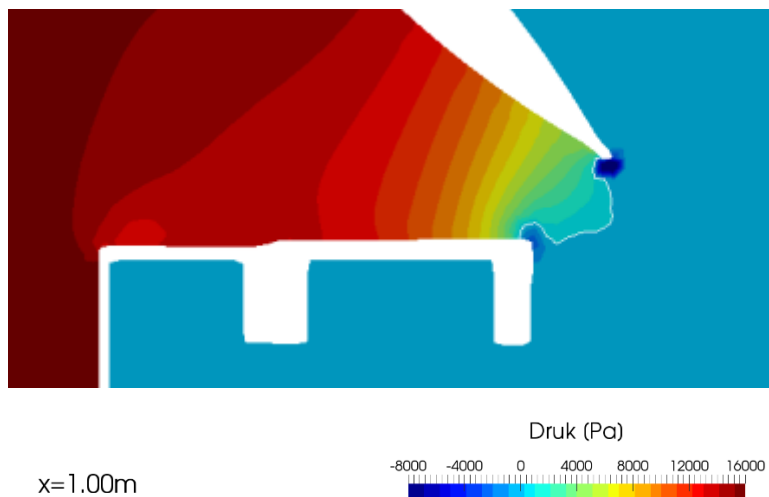
In Figuur 6-2 wordt een detail gegeven van de stroming op een horizontaal vlak, op 1.0 m boven de bodem. Hier is te zien dat de druk aan de afwaartse punt van de schijf een lokaal minimum vertoont. Er wordt een onderdruk gevonden van ongeveer 29 kPa (absolute druk) die, gezien de absolute hydrostatische druk van 37.2 kPa (3.79 m waterhoogte in afwaarts pand), geen aanleiding zal geven tot cavitatie.

Tevens interessant is het stroombeeld op een verticaal vlak doorheen het centrum van de schijf (Figuur 6-3). Hier is te zien dat er loslating en recirculatie optreedt aan zowel de boven- als de onderzijde. Dit wordt allicht veroorzaakt door de obstructie gevormd door de contactpunten tussen schijf en huis. Dit is ook goed te zien in Figuur 6-4, waarin het stroombeeld in een vlak op 5 cm afwaarts van de opwaartse sluisdeurwand wordt afgebeeld (gezien van afwaarts richting opwaarts). Bovenaan en onderaan komt loslating voor; rechts bevindt zich de sterkste stroming met nauwelijks loslating; links bevindt zich een dunne zone met loslating.

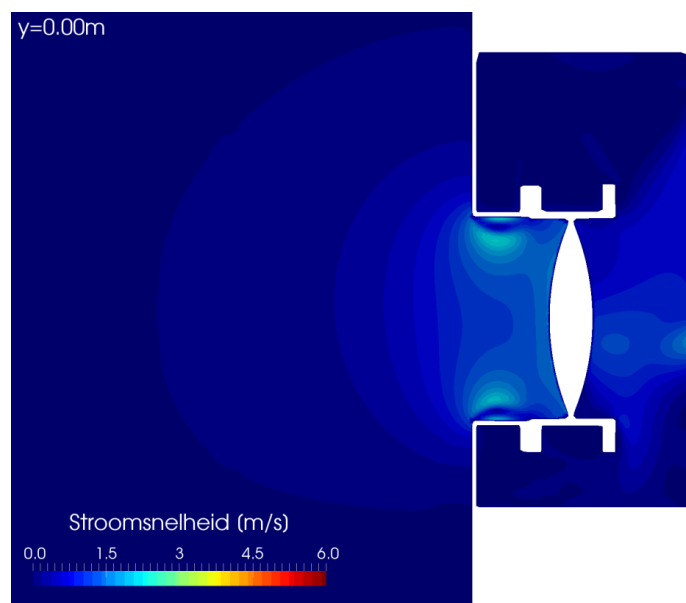
De volledige set van figuren van het opwaartse stroombeeld zonder stroomgeleiding is terug te vinden in annex A.1.1.



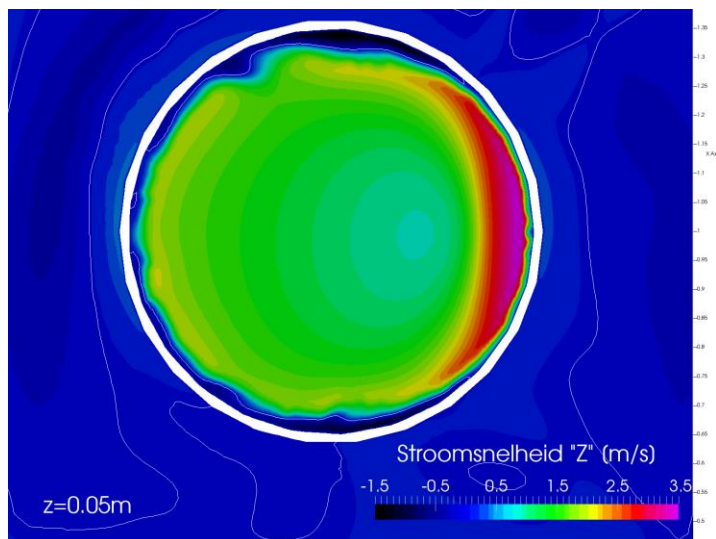
Figuur 6-1: Horizontale snede door het veld van relatieve druk (boven) en stroomsnelheid (onder), op 1.00 m boven de bodem (door het middelpunt van de schijf)



Figuur 6-2: Detail van de relatieve druk langs een horizontale snede op 1.0 m boven de bodem.



Figuur 6-3: Stroomsnelheid langs een verticale snede doorheen het centrum van de schijf.



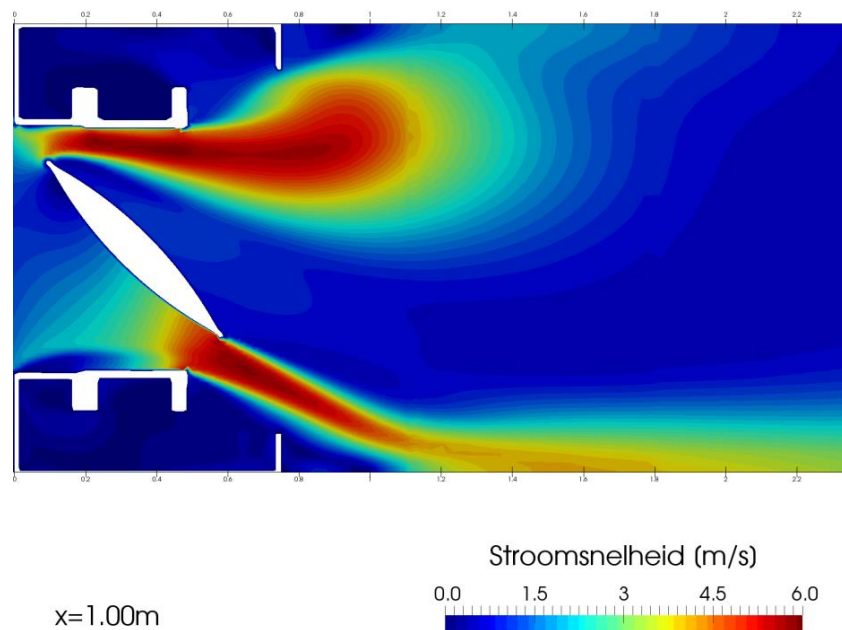
Figuur 6-4: Stroomsnelheid in een verticaal vlak normaal op de stroming, 5 cm afwaarts van de instroomopening (5 cm afwaarts het vlak van de opwaartse sluisdeurmuur).

6.1.2 Afwaarts stroombeeld

In de visualisaties van het afwaarts stroombeeld is te zien dat de straal aan de bovenzijde (in Figuur 6-5: Stroombeeld in een horizontaal vlak doorheen het centrum van de schijf, zonder stroomgeleiding.) sneller breder wordt dan de straal aan de onderzijde. Mogelijks wordt dit verklaard door het grotere effect van het zog van de schijf, met sterkere turbulente menging, veroorzaakt door een hoek van 45° tussen de schijf bovenaan en de aanstroming. Onderaan is de stroming meer parallel aan de schijf bij verlaten van de wand van de schijf.

De maximale stroomsnelheid in de stralen bereikt ongeveer 6 m/s. De straal onderaan ondervindt invloed van de rand van het model, gezien deze straal erg lateraal gericht is. Om het effect te kennen van interacties van deze straal met de – in realiteit – nabijgelegen andere kleppen, zijn verdere simulaties met stroming doorheen een aantal parallelle kleppen aangewezen.

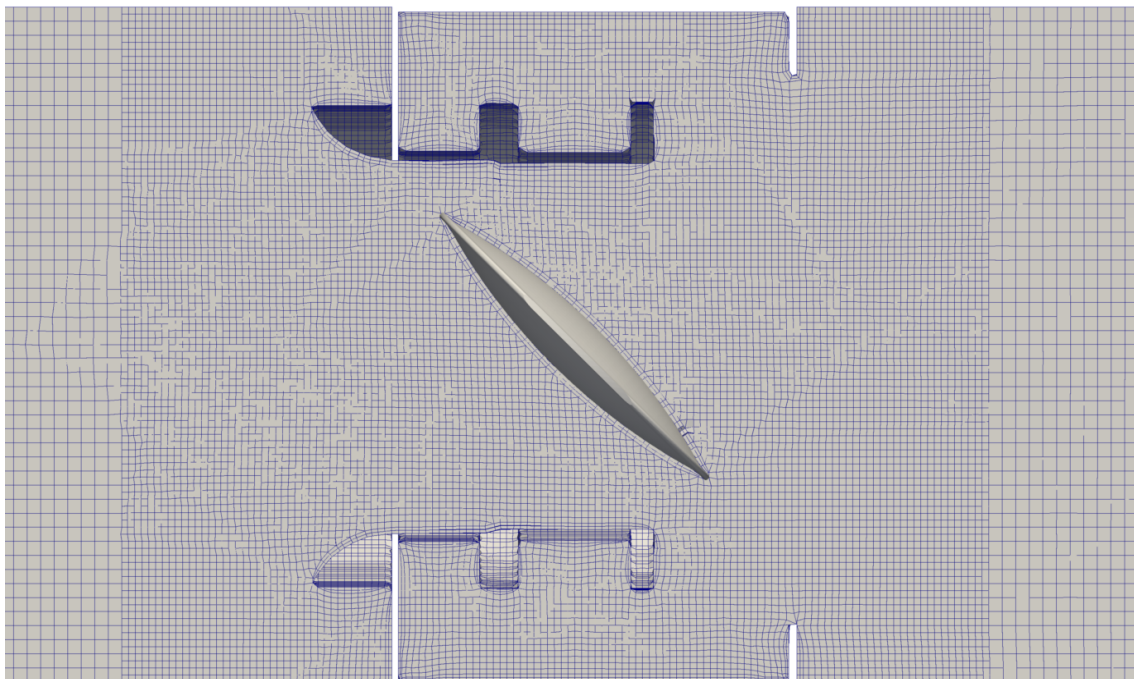
De volledige set van figuren van het afwaartse stroombeeld zonder stroomgeleiding is terug te vinden in annex A.1.2.



Figuur 6-5: Stroombeeld in een horizontaal vlak doorheen het centrum van de schijf, zonder stroomgeleiding.

6.2 VLINDERKLEP MET GELEIDING

De stroomgeleiding werd in het rooster opgenomen door cellen te verwijderen overeenkomstig het volume dat niet langer deelneemt aan de stroming. Verder werden de grenslagen langs de wand opnieuw uitgelijnd in de richting van de wand (Figuur 6-6).



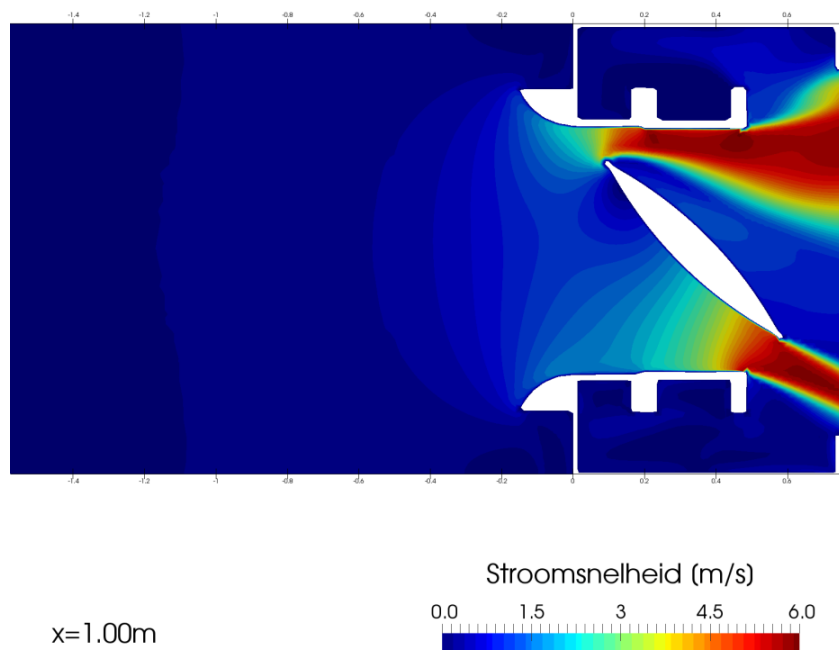
Figuur 6-6: Detail van het rooster met stroomgeleiding

6.2.1 Opwaarts stroombeeld

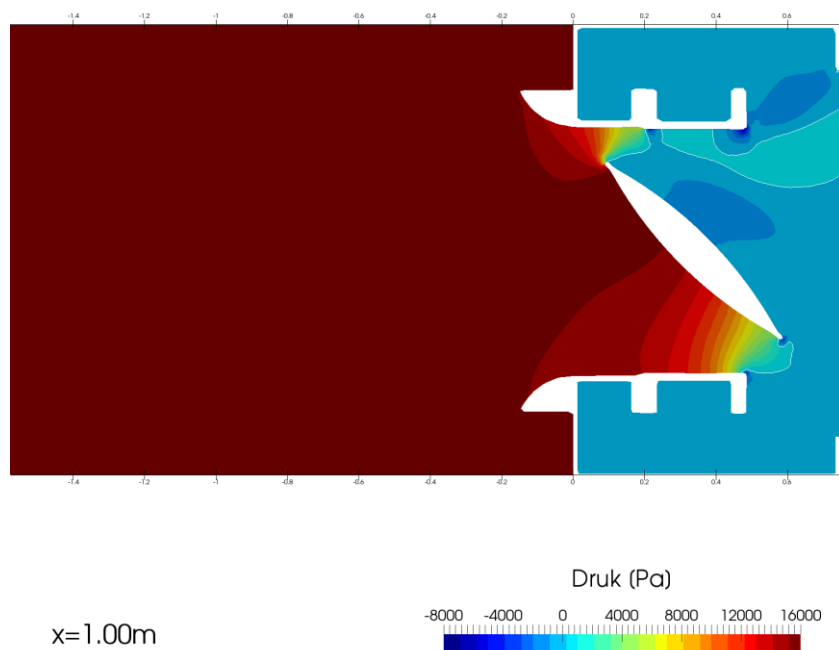
In Figuur 6-7 wordt het stroombeeld getoond van de situatie met stroomgeleiding, in een horizontaal vlak op 1.00 m boven de bodem. Het drukveld rond de klep is zeer gelijkaardig aan dat van de geometrie zonder stroomgeleiding (Figuur 6-8). Een tijdreeks van de druk rond de klep wordt opnieuw verder niet weergegeven, gezien het stationaire karakter van de stroming (zie Figuur 6-11 en volgende).

Er kan tevens worden vastgesteld dat geen loslating meer te zien is, aan beide laterale zijden. Ook aan de onder- en bovenkant is de loslating sterk gereduceerd, zoals weergegeven in Figuur 6-9 en Figuur 6-10. Recirculatie treedt helemaal niet meer op in dit geval.

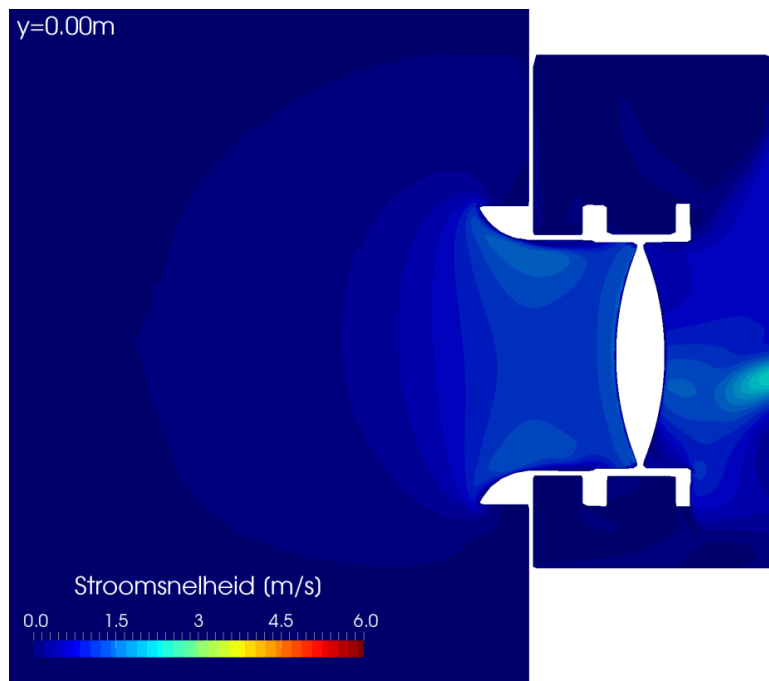
De volledige set van figuren van het opwaartse stroombeeld met stroomgeleiding is terug te vinden in annex A.2.1.



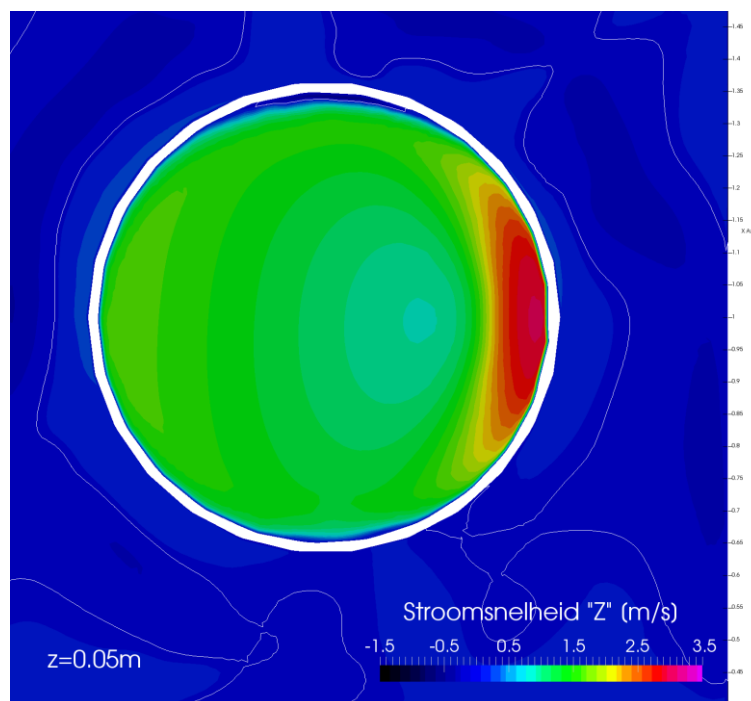
Figuur 6-7: Stroombeeld in een horizontaal vlak doorheen het centrum van de schijf, met stroomgeleiding.



Figuur 6-8: Drukveld rond de klep, met stroomgeleiding.



Figuur 6-9: Stroomsnelheid langs een verticale snede doorheen het centrum van de schijf. Situatie met stroomgeleiding.



Figuur 6-10: Stroomsnelheid in een verticaal vlak normaal op de stroming, 5 cm afwaarts van het vlak van de opwaartse muur. Situatie met stroomgeleiding.

6.2.2 Afwaarts stroombeeld

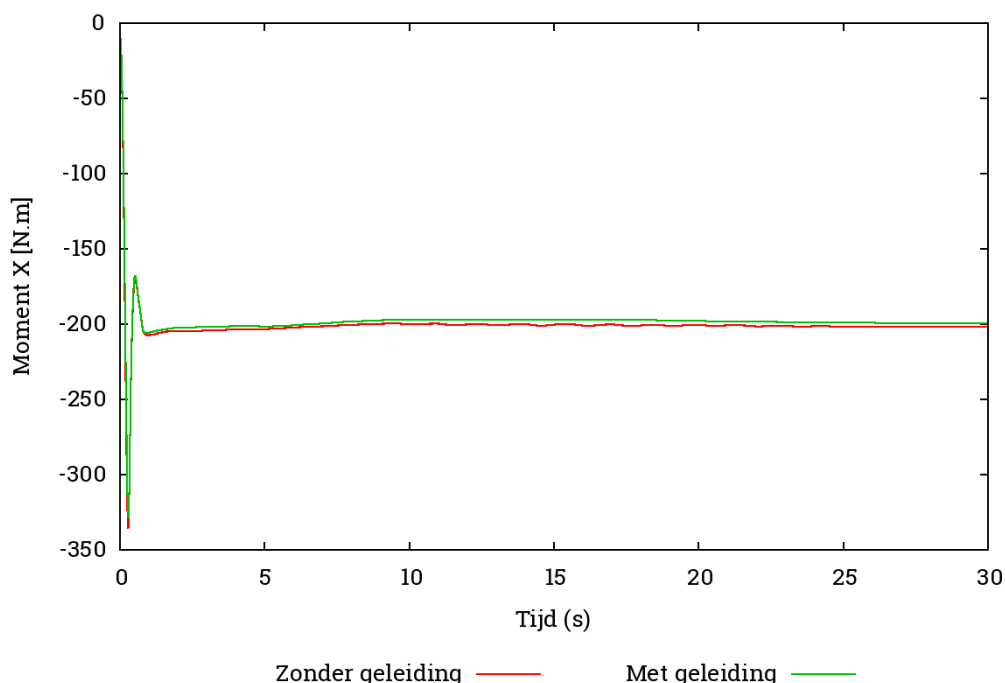
Afwaarts de klep is het stroombeeld nagenoeg identiek aan de situatie zonder stroomgeleiding. Er wordt dan ook niet verder ingegaan op de figuren van deze zone, die echter wel in Annex A.2.2 zijn opgenomen.

6.3 EFFECTEN VAN DE AANSTROOMGELEIDING

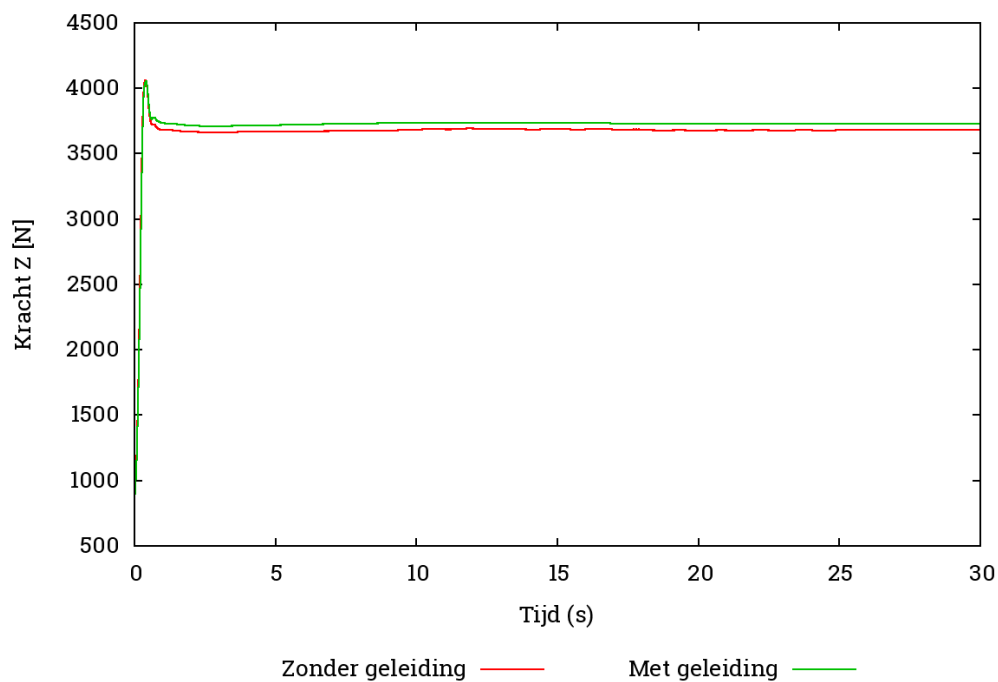
In deze paragraaf wordt ingegaan op het grootschalige effect van de stroomgeleiding op de werking van de klep.

Ondanks de invloed van de stroomgeleiding op de loslating aan de inlaat, is het effect op de grootschalige stroming zeer beperkt. Het debiet wordt een fractie groter met stroomgeleiding, maar slechts ongeveer 1%. De componenten van de kracht en het moment op de schijf zijn eveneens zeer vergelijkbaar met de situatie zonder geleiding. De debietscoëfficiënt C_d , ten slotte, verhoogt van 0.240 naar 0.243, wat dichterbij de USACE curve ligt, zoals verwacht. Dit is tevens een verhoging van 1 à 2%.

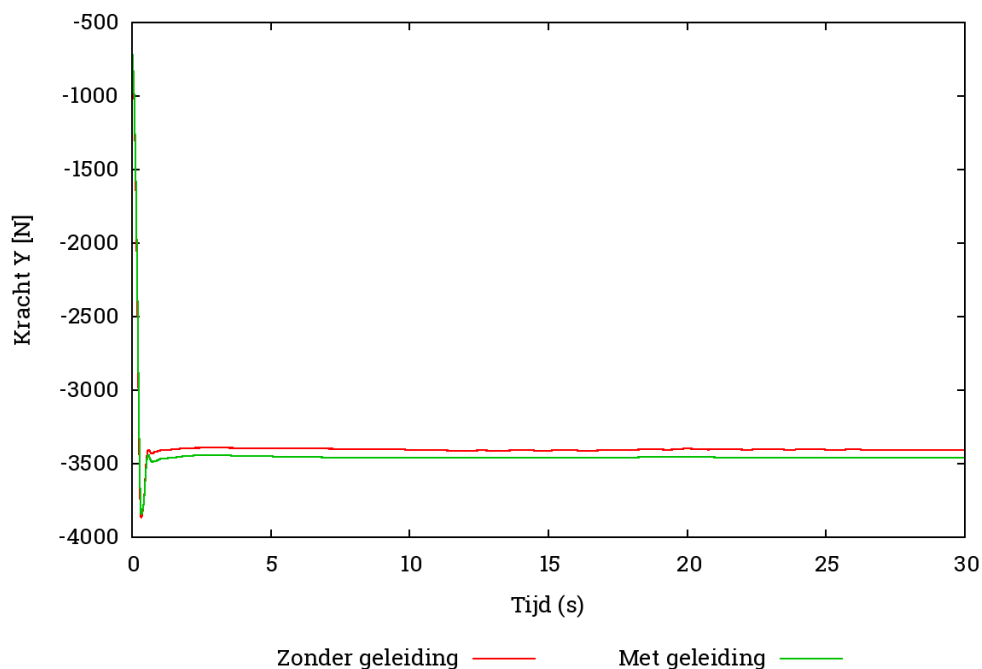
De tijdsreeksen voor deze grootheden kunnen worden teruggevonden in Figuur 6-11 tot Figuur 6-15.



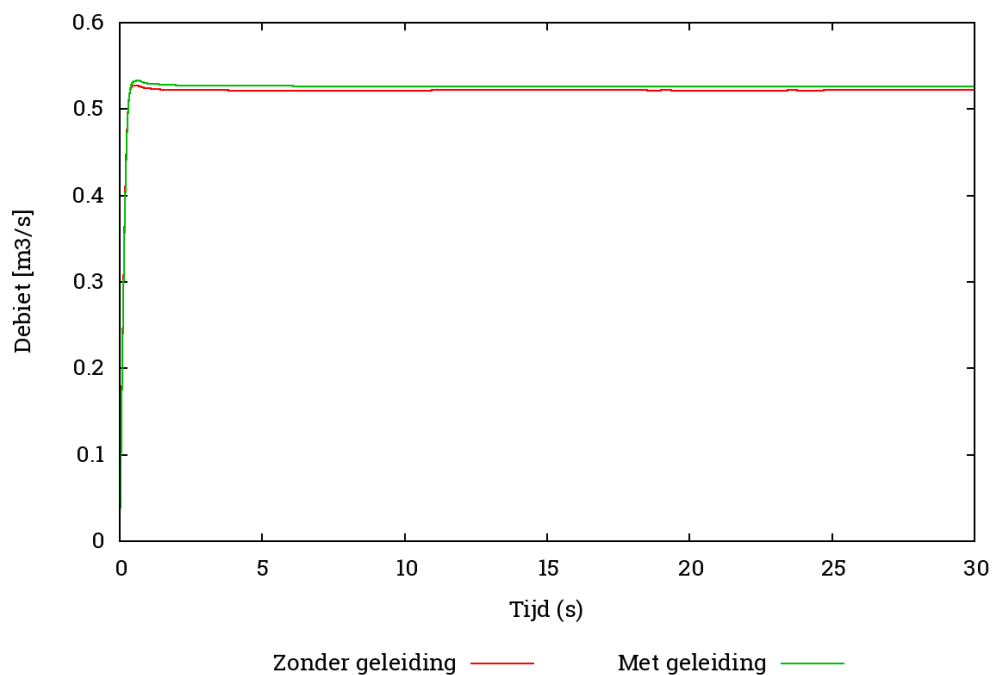
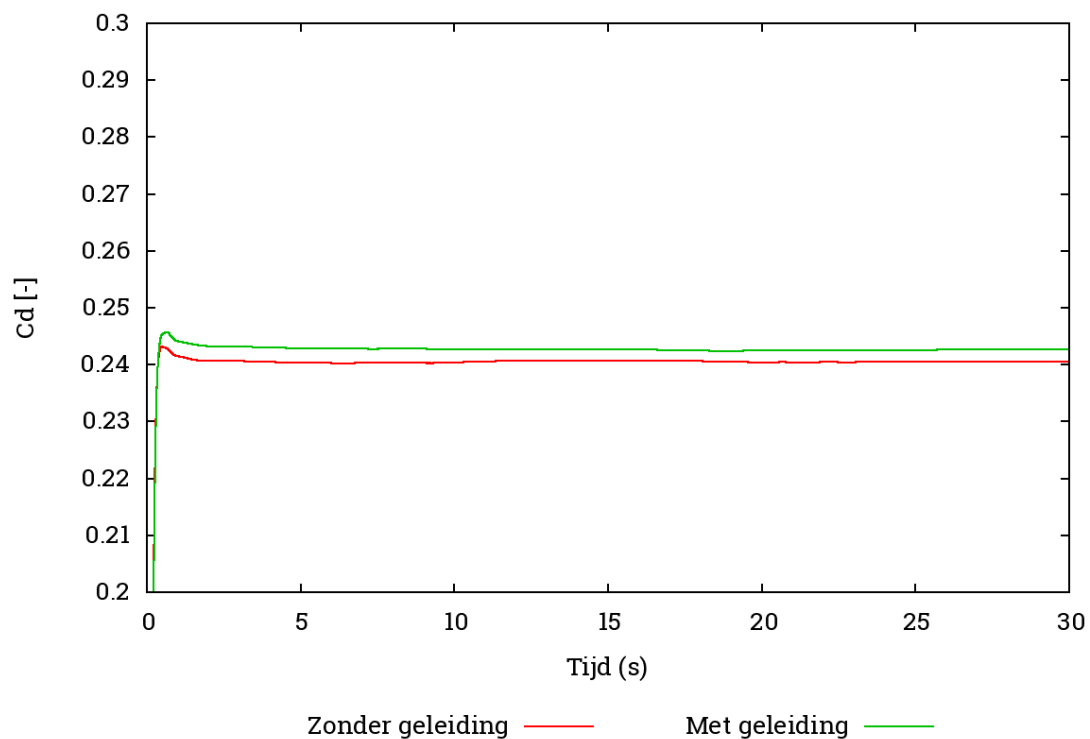
Figuur 6-11: Tijdsreeks van moment op de schijf (component langs as), met en zonder geleiding.



Figuur 6-12: Tijdsreeks van kracht (component langs stroming), met en zonder geleiding.



Figuur 6-13: Tijdsreeks van Kracht (component dwars op stroming), met en zonder geleiding

*Figuur 6-14: Tijdreeks van debiet, met en zonder geleiding**Figuur 6-15: Tijdreeks van de debietscoëfficiënt Cd), met en zonder geleiding.*

7. CONCLUSIES

Het opgebouwde CFD model simuleert stroming door één van de vlinderkleppen voorzien voor de sluis van Aalst. Het model werd opgebouwd in OpenFOAM, volgens de overeengekomen eigenschappen en met state-of-the-art instellingen voor turbulentiemodellen, roostergrootte en solvers.

De resultaten tonen aan dat het CFD-model een stromingsbeeld berekent dat aanleiding geeft tot een debietscoëfficiënt die zeer dicht aanleunt tegen waarden in de literatuur.

Zoals in paragraaf 6.1.1 besproken, werden geen turbulente variaties verwacht in het huidige model, en werden deze ook niet teruggevonden.

Er werd aandacht geschonken aan controle van Y^+ waarden in gebieden met significante stroming. In deze gebieden ligt de Y^+ waarde steeds in de vork 30 tot 300. Tevens werd een roostergevoeligheidsanalyse uitgevoerd.

De CFD-resultaten tonen verder de invloed aan van structuren aan de inlaat die de aanstroming beter geleiden. Op lokaal niveau werd aangetoond dat de stroomgeleidingsstructuren een iets betere aansluiting van de stroming tegen wand met zich mee brengen en recirculatie verhinderen. Echter, het effect op de grootschalige afvoer is zeer beperkt. De debietscoëfficiënt C_d verhoogt dan wel licht, maar dit slechts met 1 à 2%.

8. REFERENTIES

IMDC (2016). Hydraulic study of breaking logs in lock filling with gate openings - Subreport 2 – CFD modeling of scale model experiments. I/RA/11467/16.024/ABR.

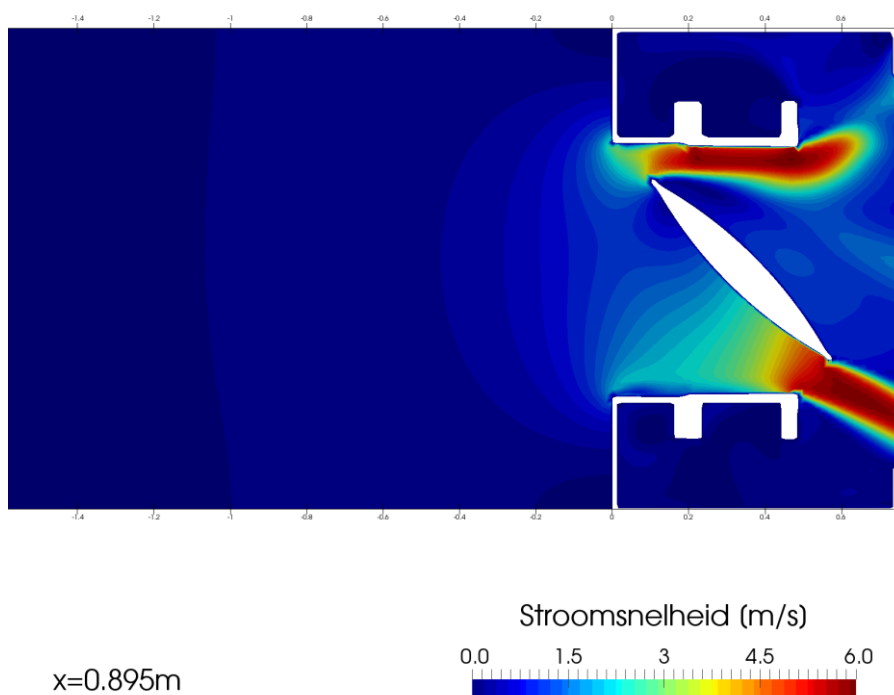
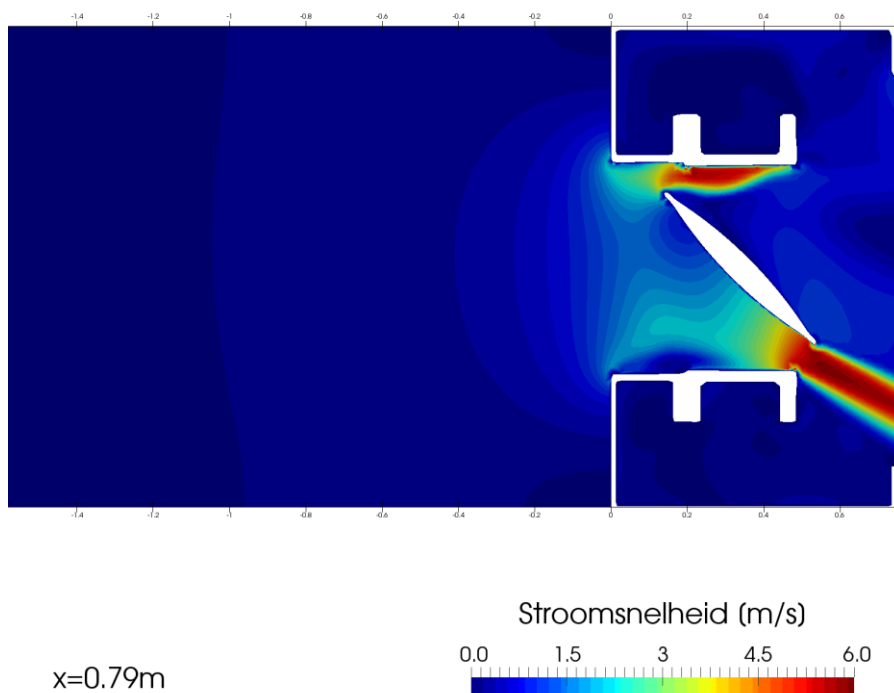
Lin F. & Schohl G.A. (2004). CFD prediction and validation of butterfly valve hydrodynamic forces. Critical Transitions in Water and Environmental Resources Management.

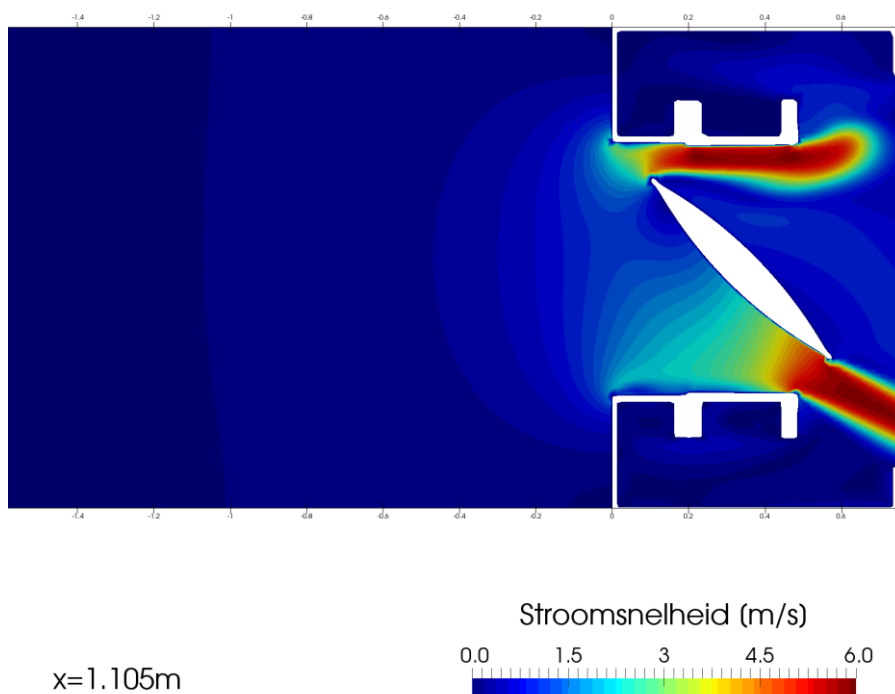
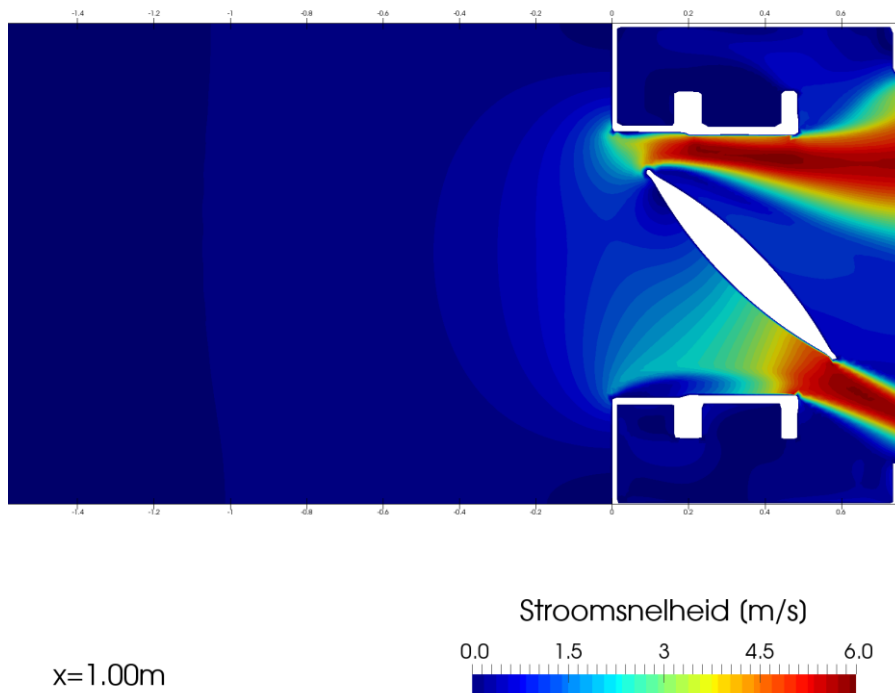
USACE (Waterways Experimental Station) (1988). Hydraulic Design Criteria Eighteenth issue. Vicksburg, MS.

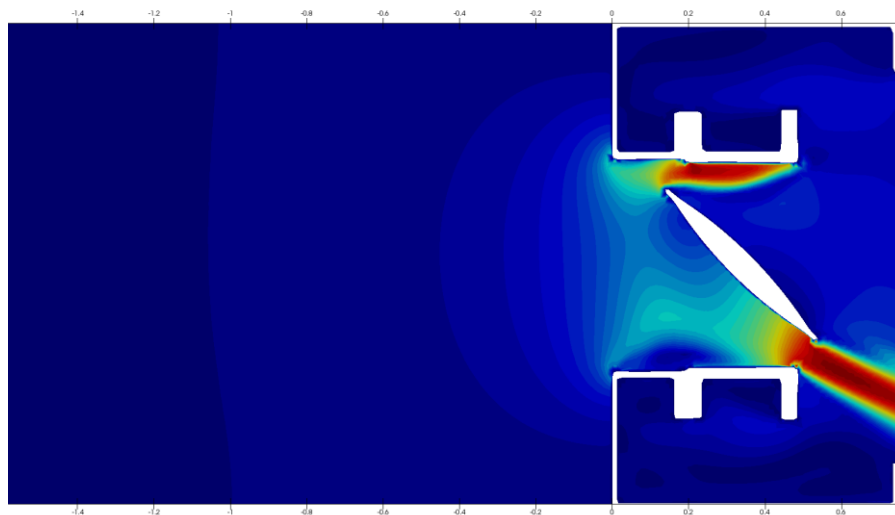
Bijlage A Contourplots van stroomsnelheid

A.1 Zonder aanstroomgeleiding

A.1.1 Opwaarts

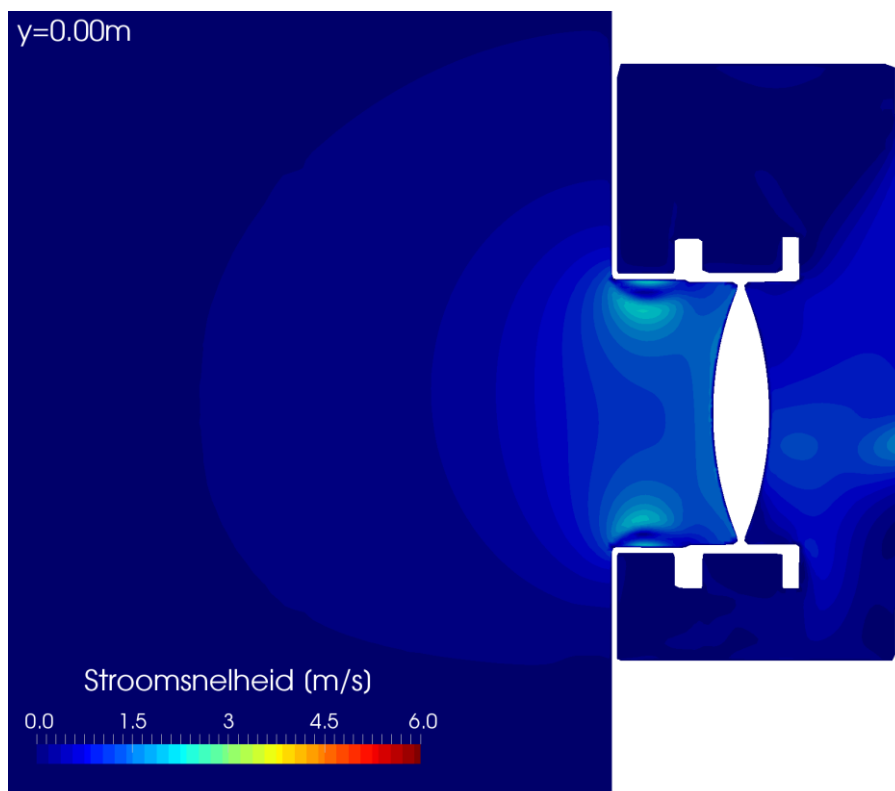
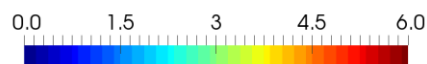






x=1.21m

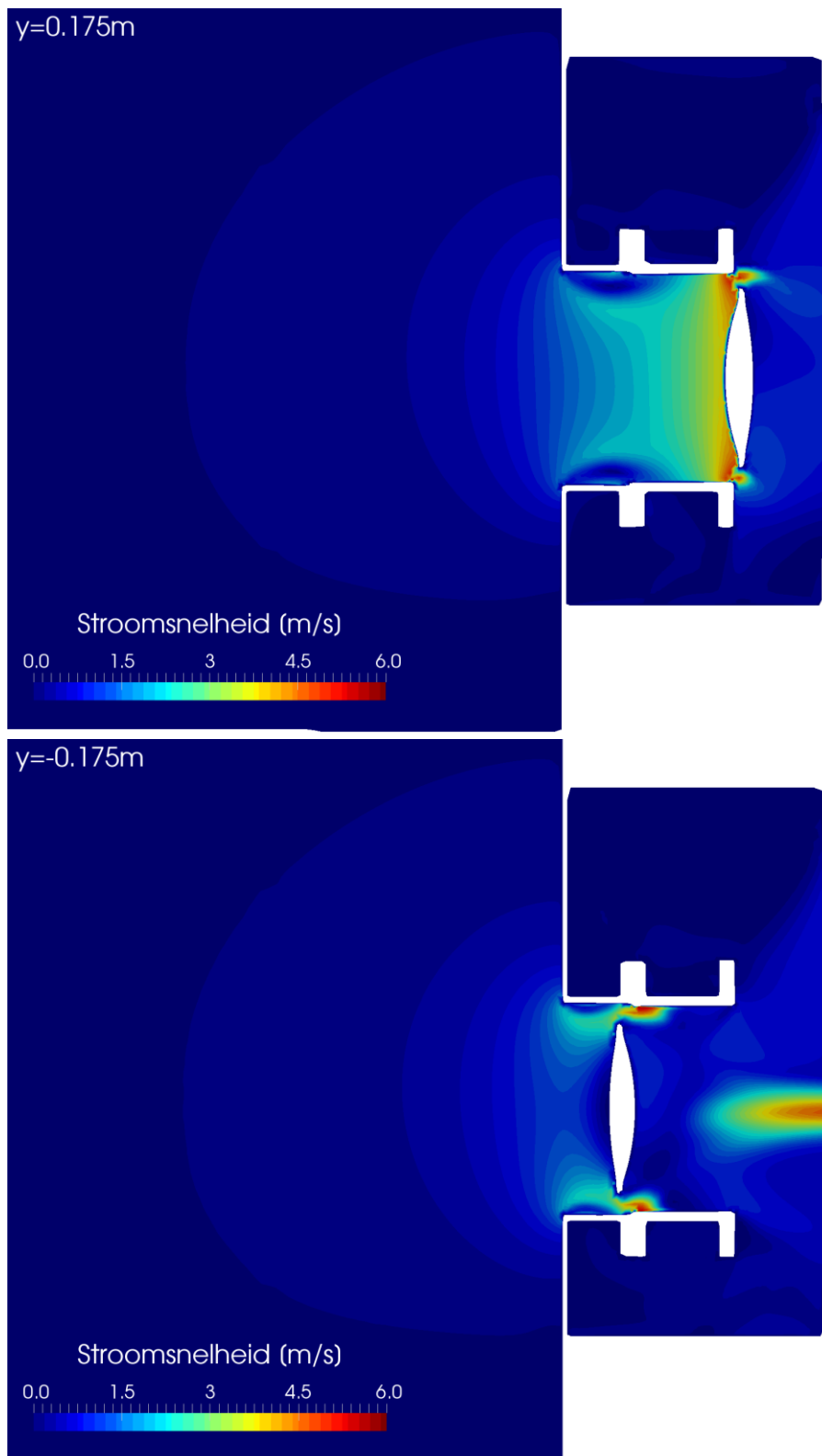
Stroomsnelheid (m/s)



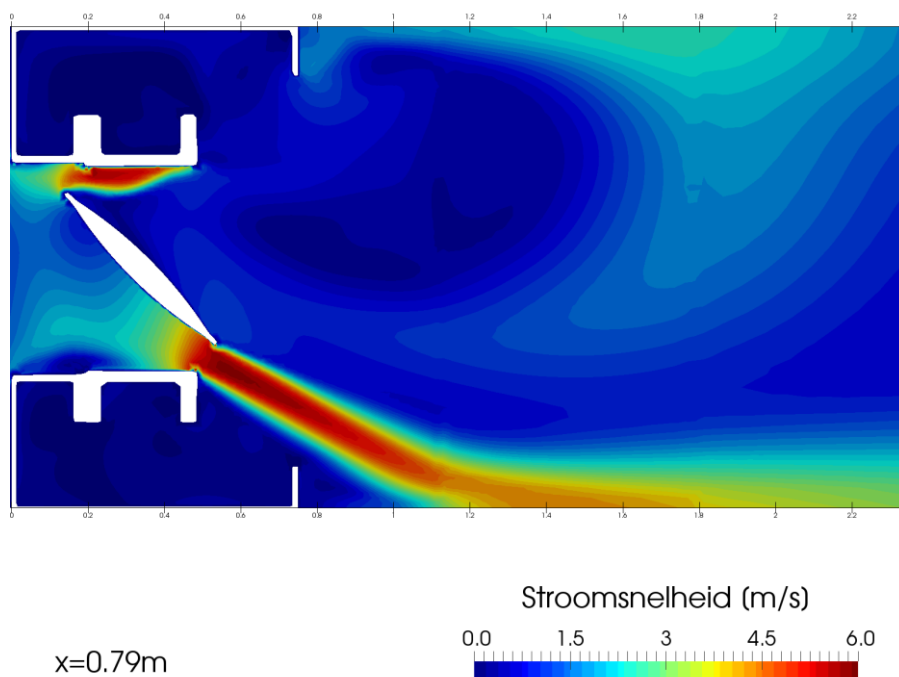
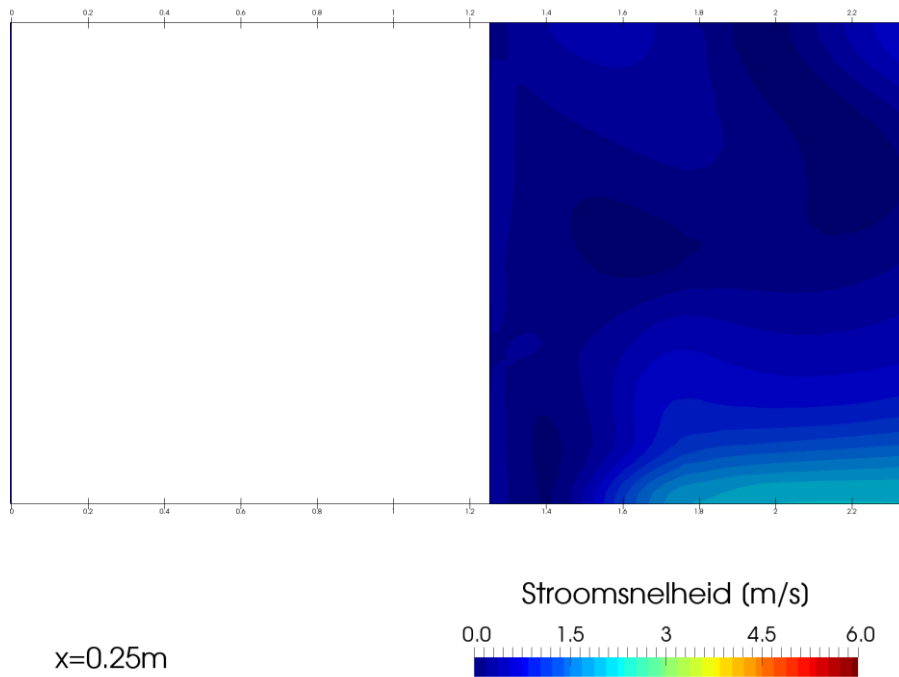
y=0.00m

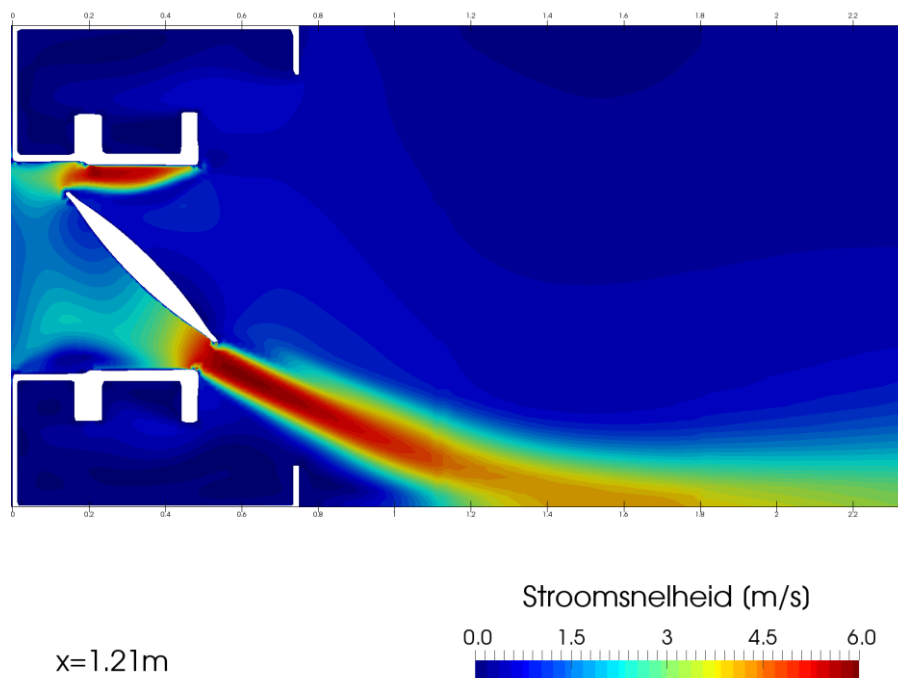
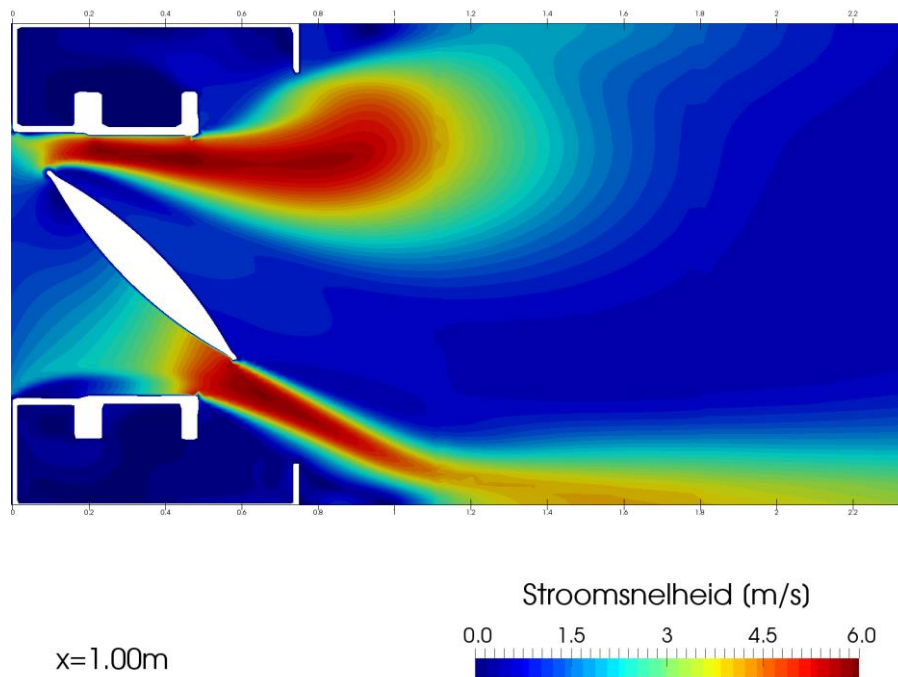
Stroomsnelheid (m/s)

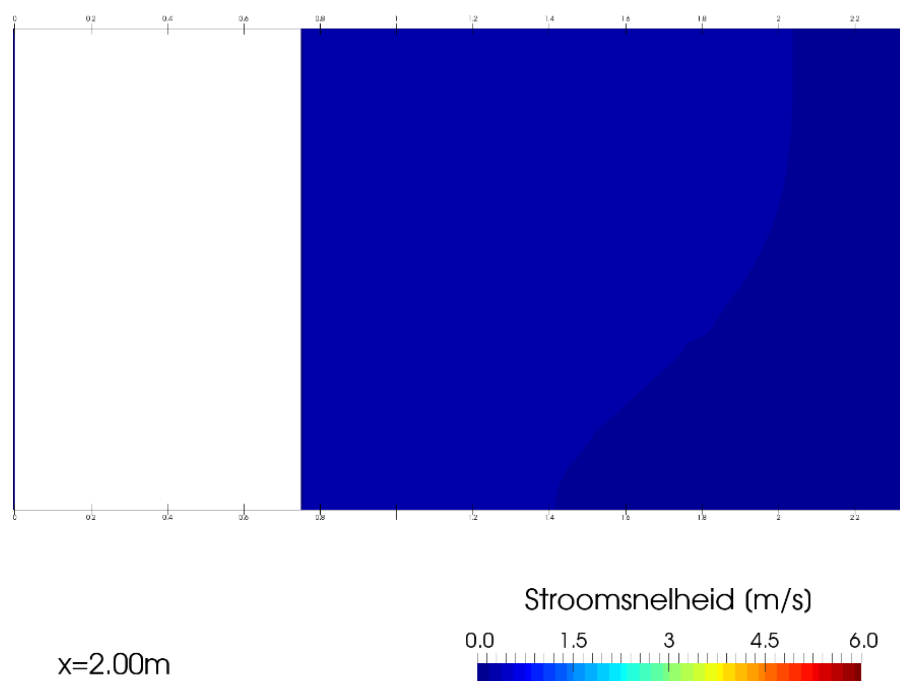
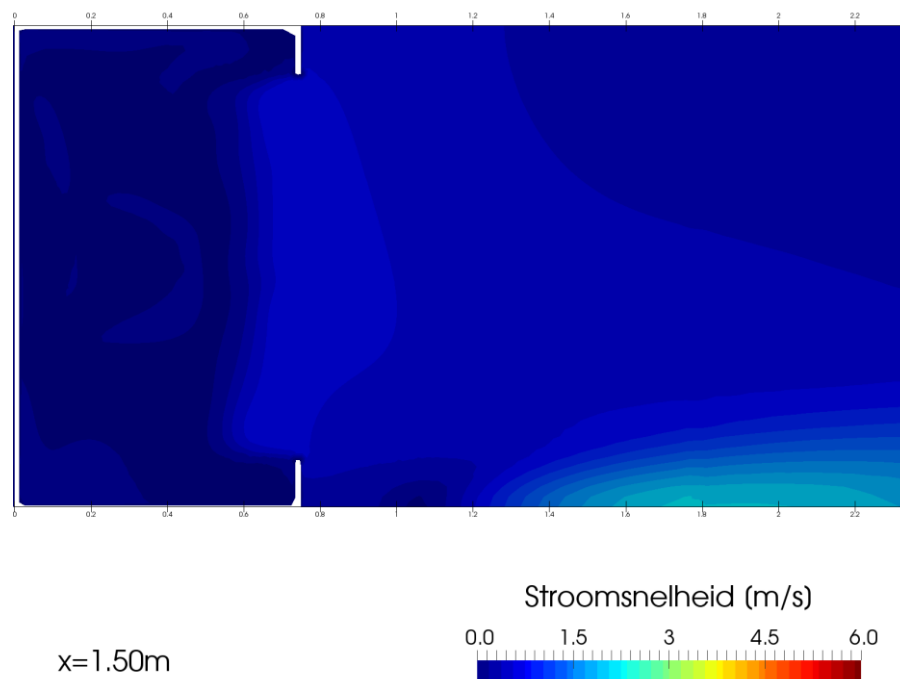


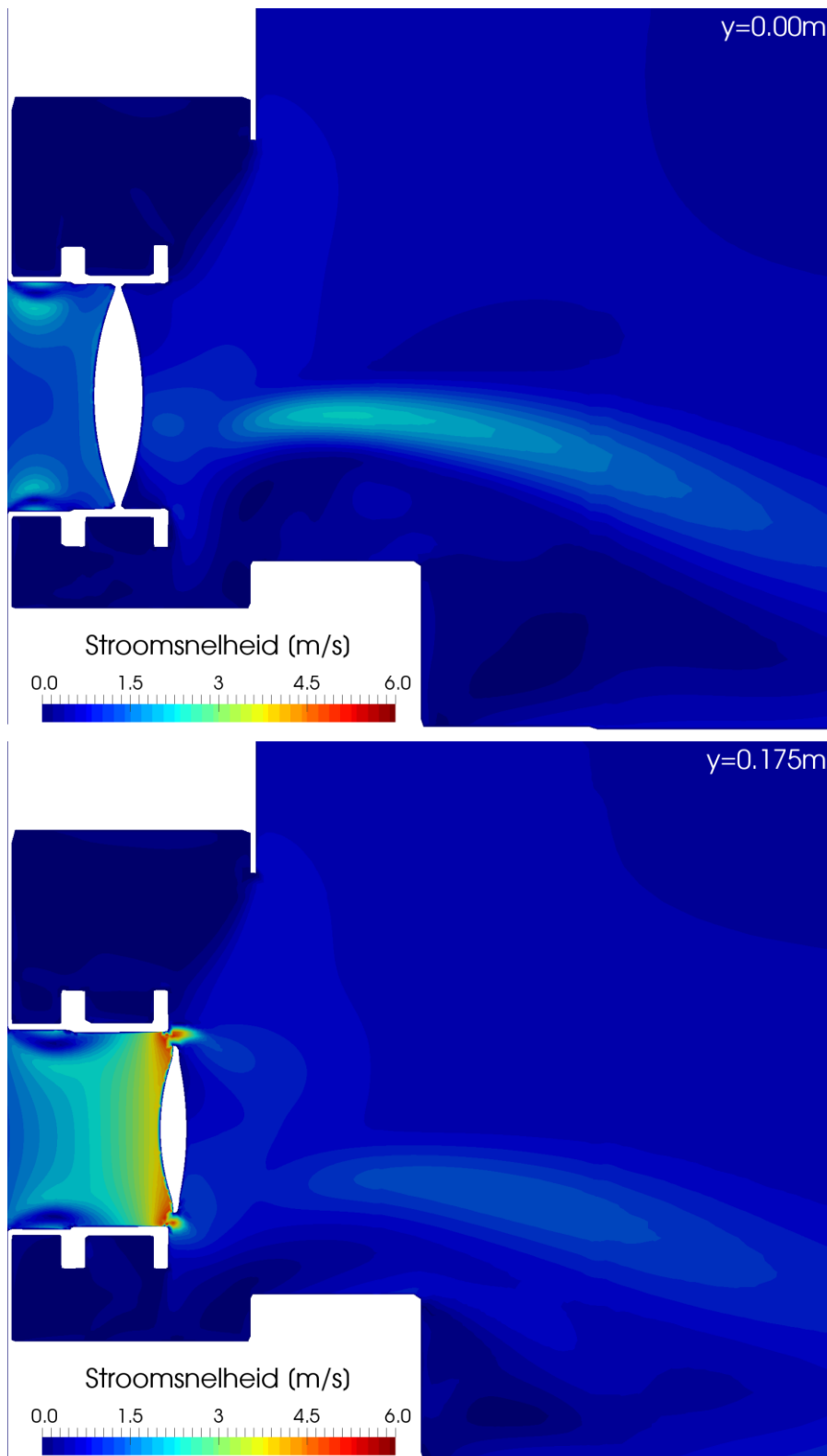


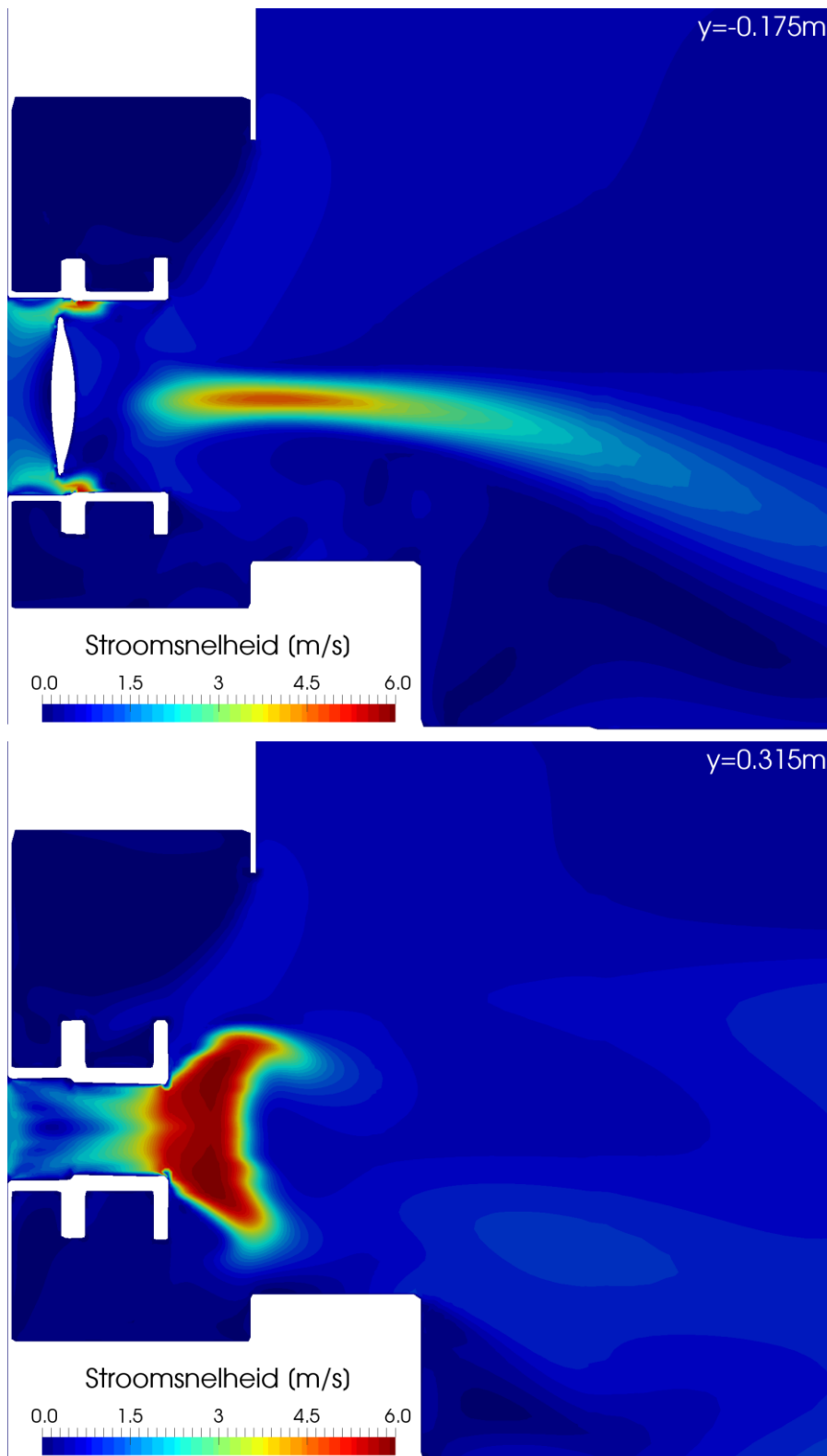
A.1.2 Afwaarts

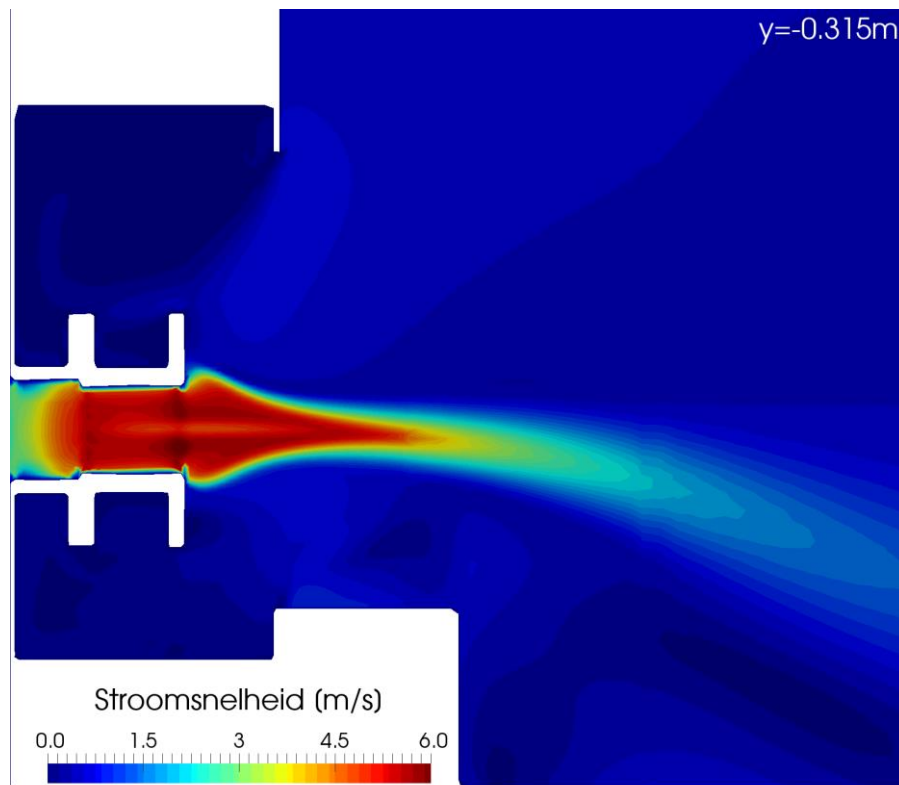






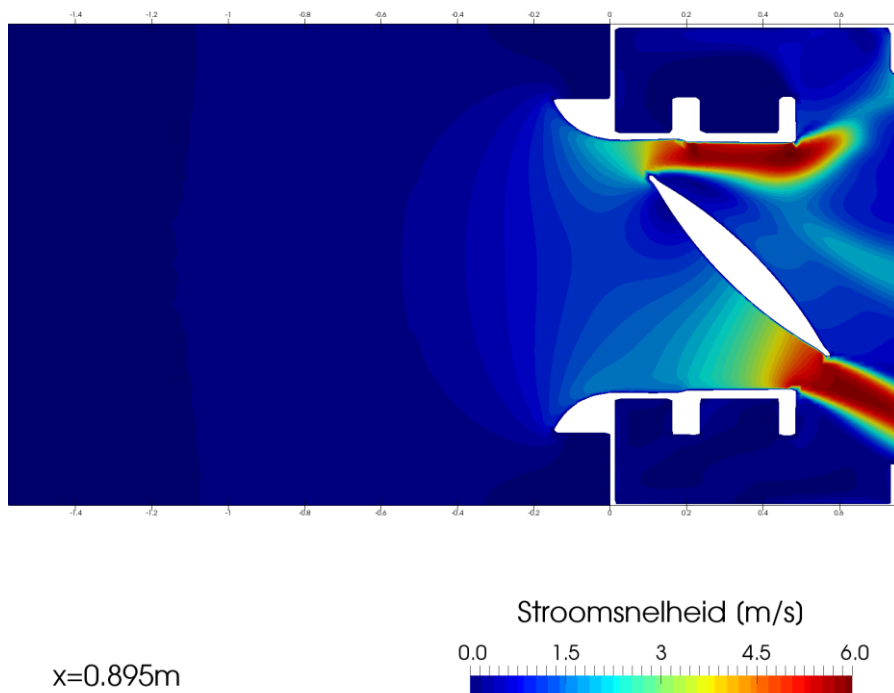
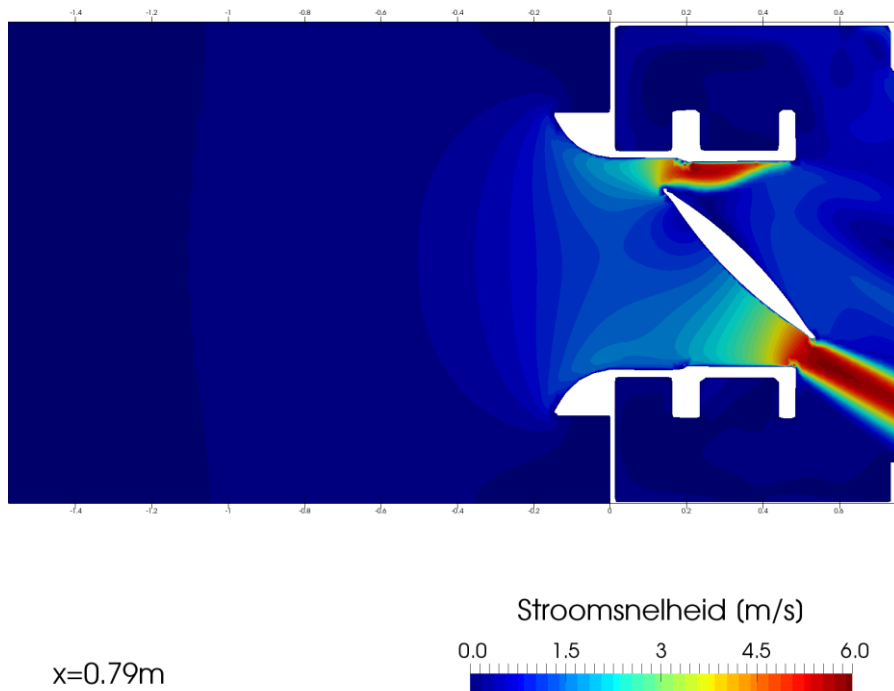


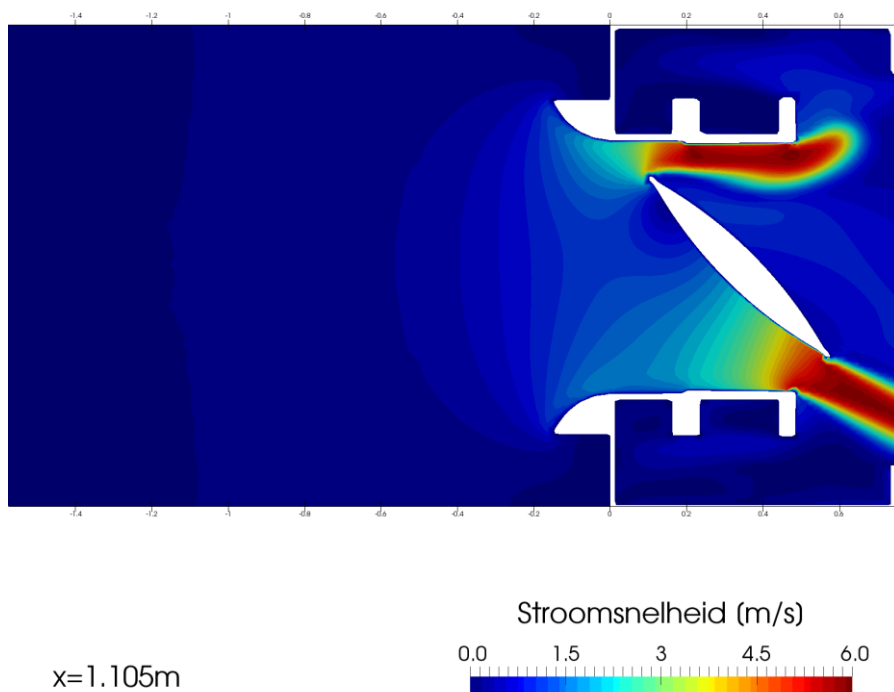
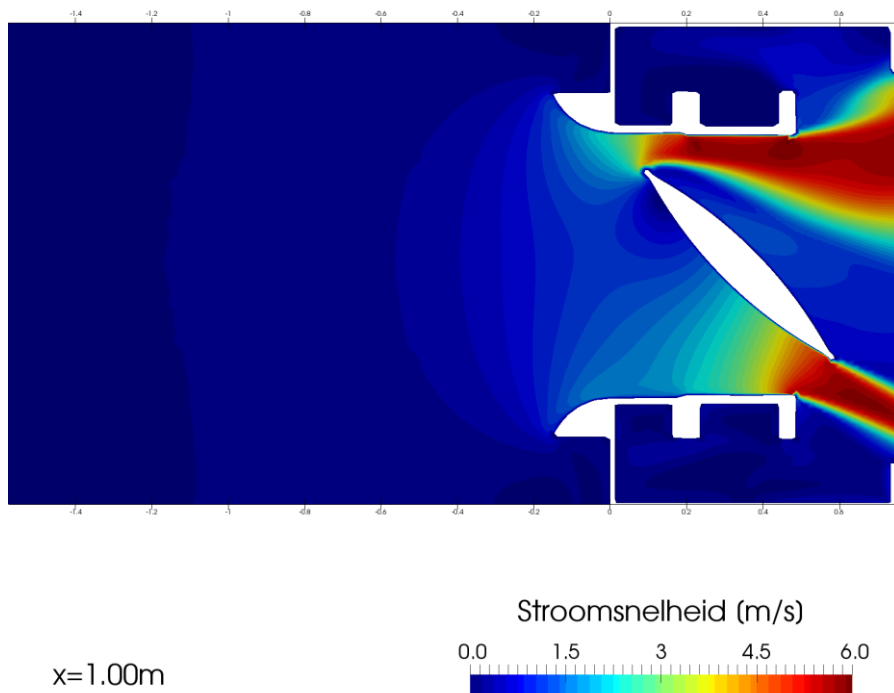


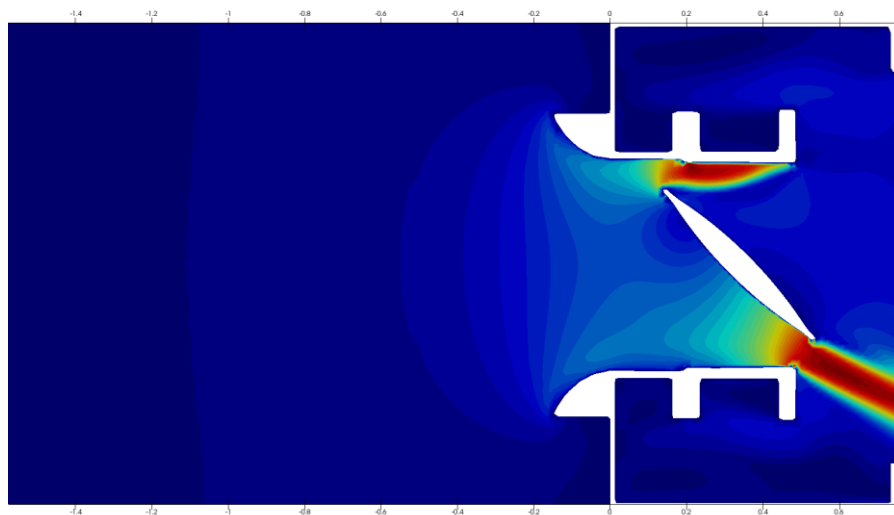


A.2 Met aanstroomgeleiding

A.2.1 Opwaarts

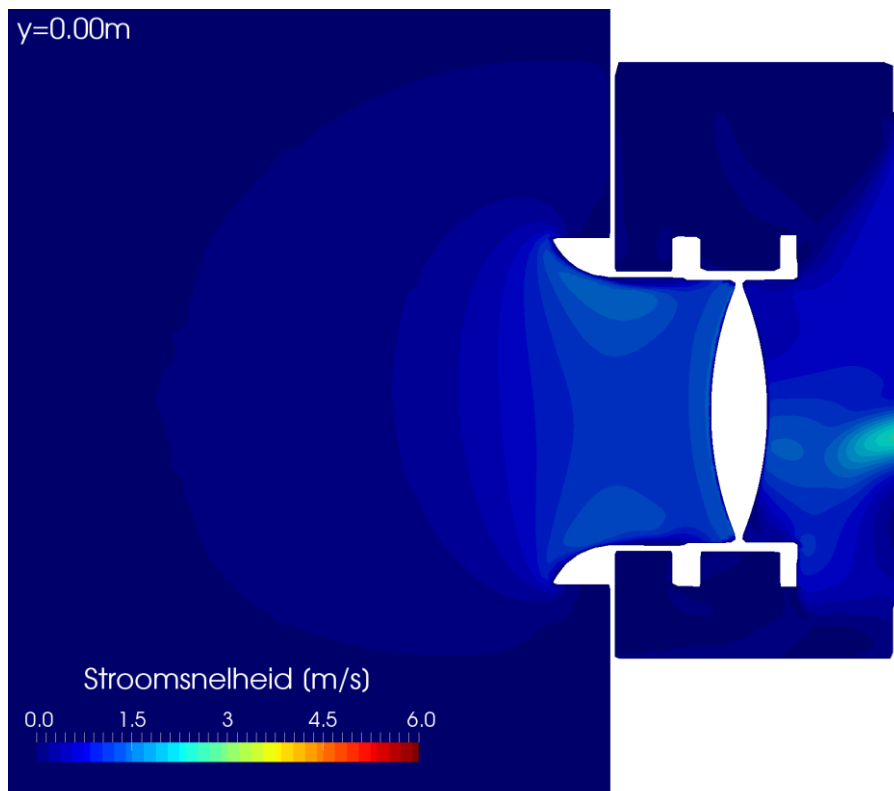
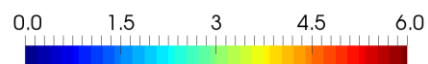






$x=1.21\text{m}$

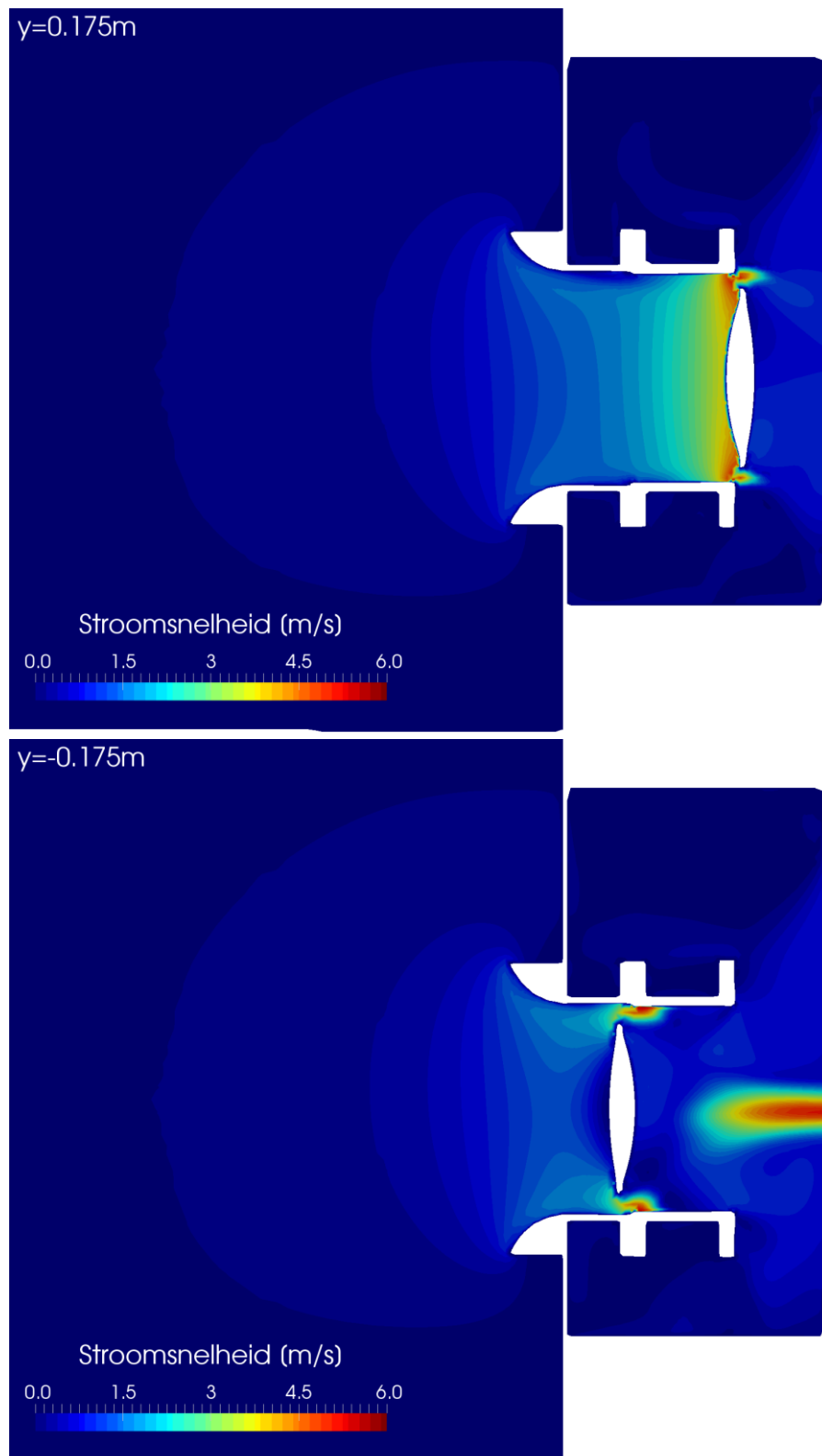
Stroomsnelheid (m/s)



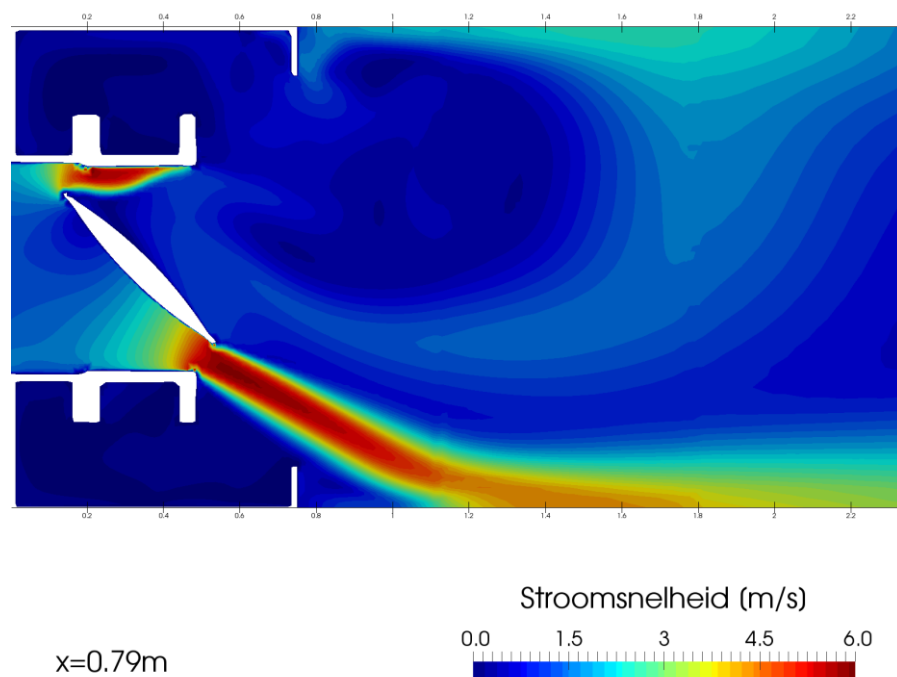
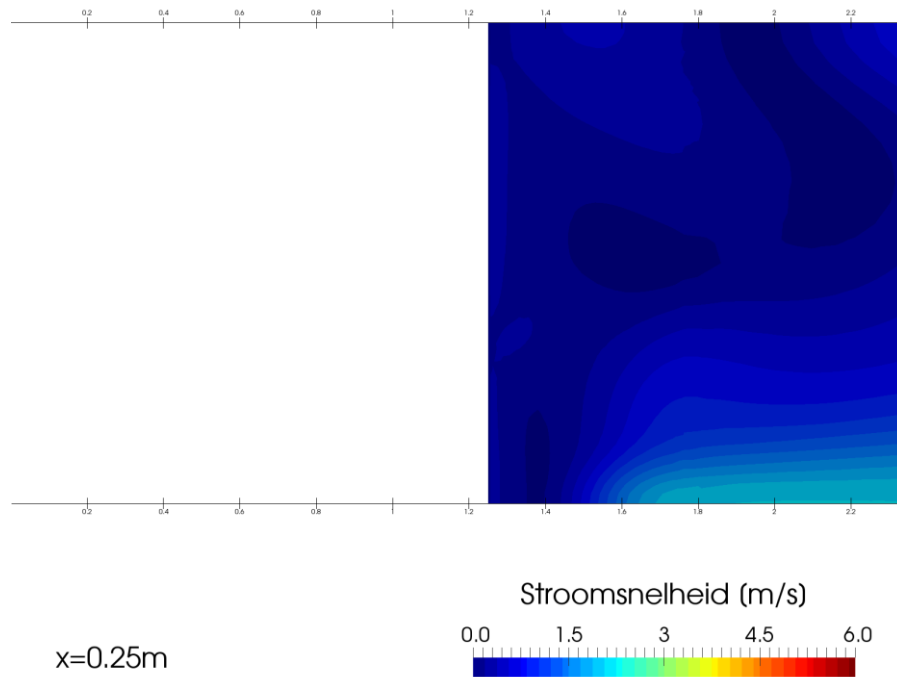
$y=0.00\text{m}$

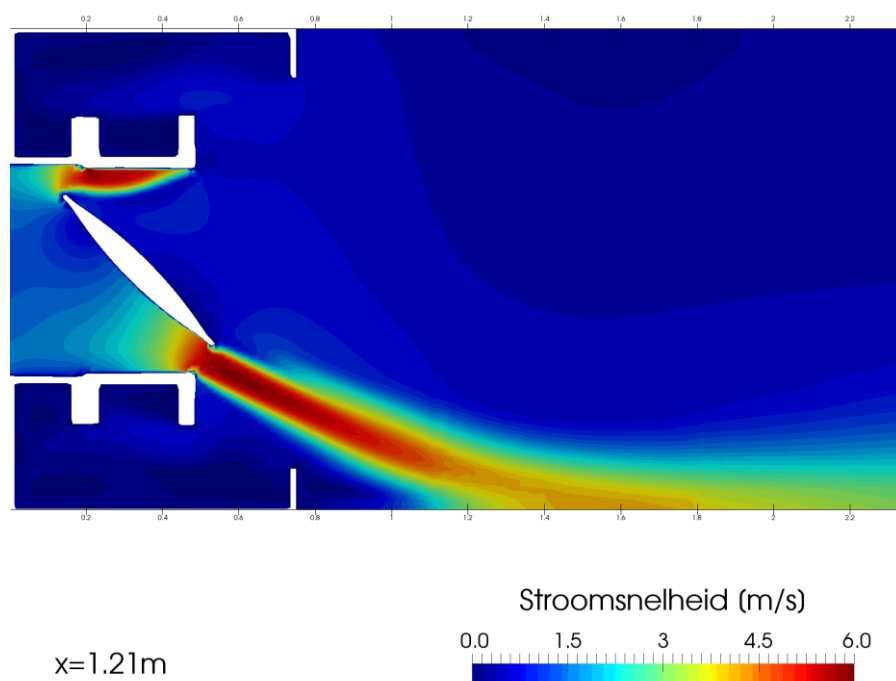
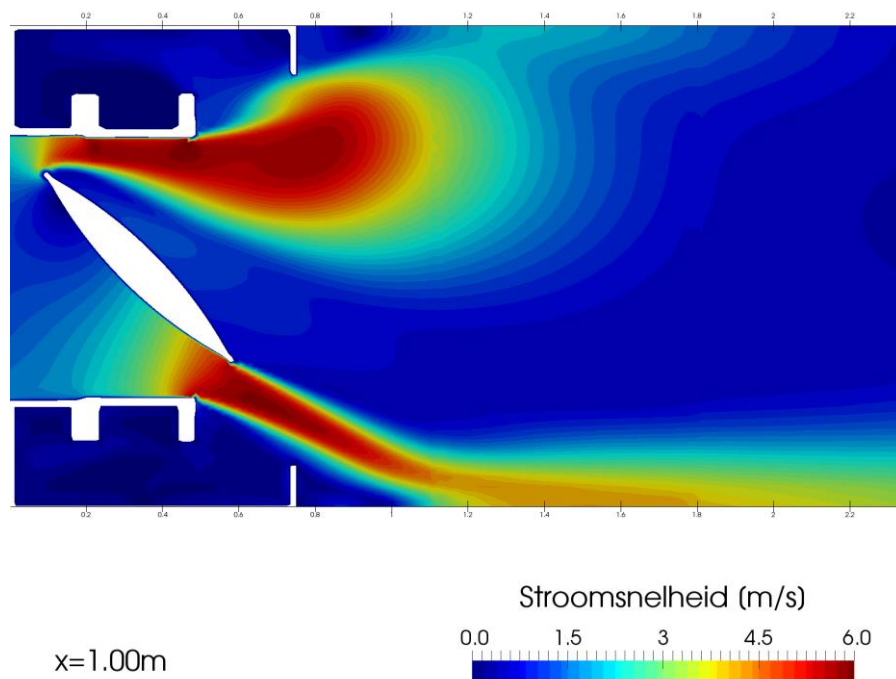
Stroomsnelheid (m/s)

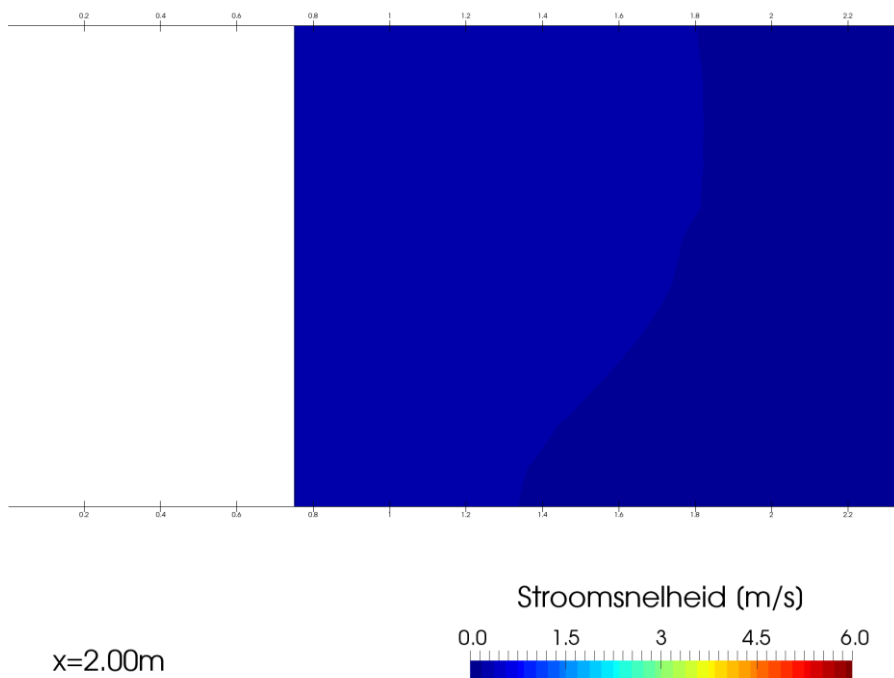
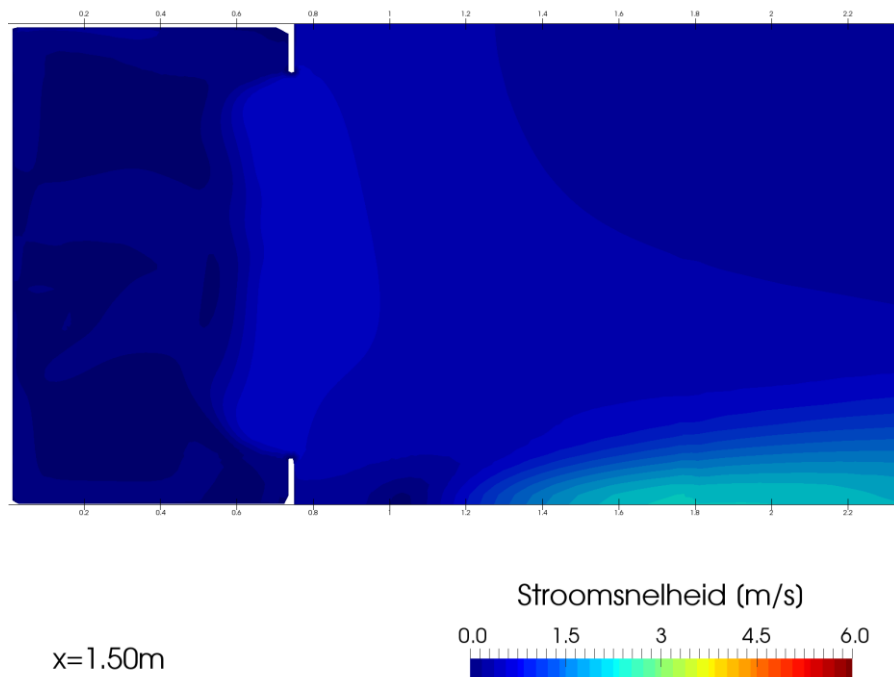


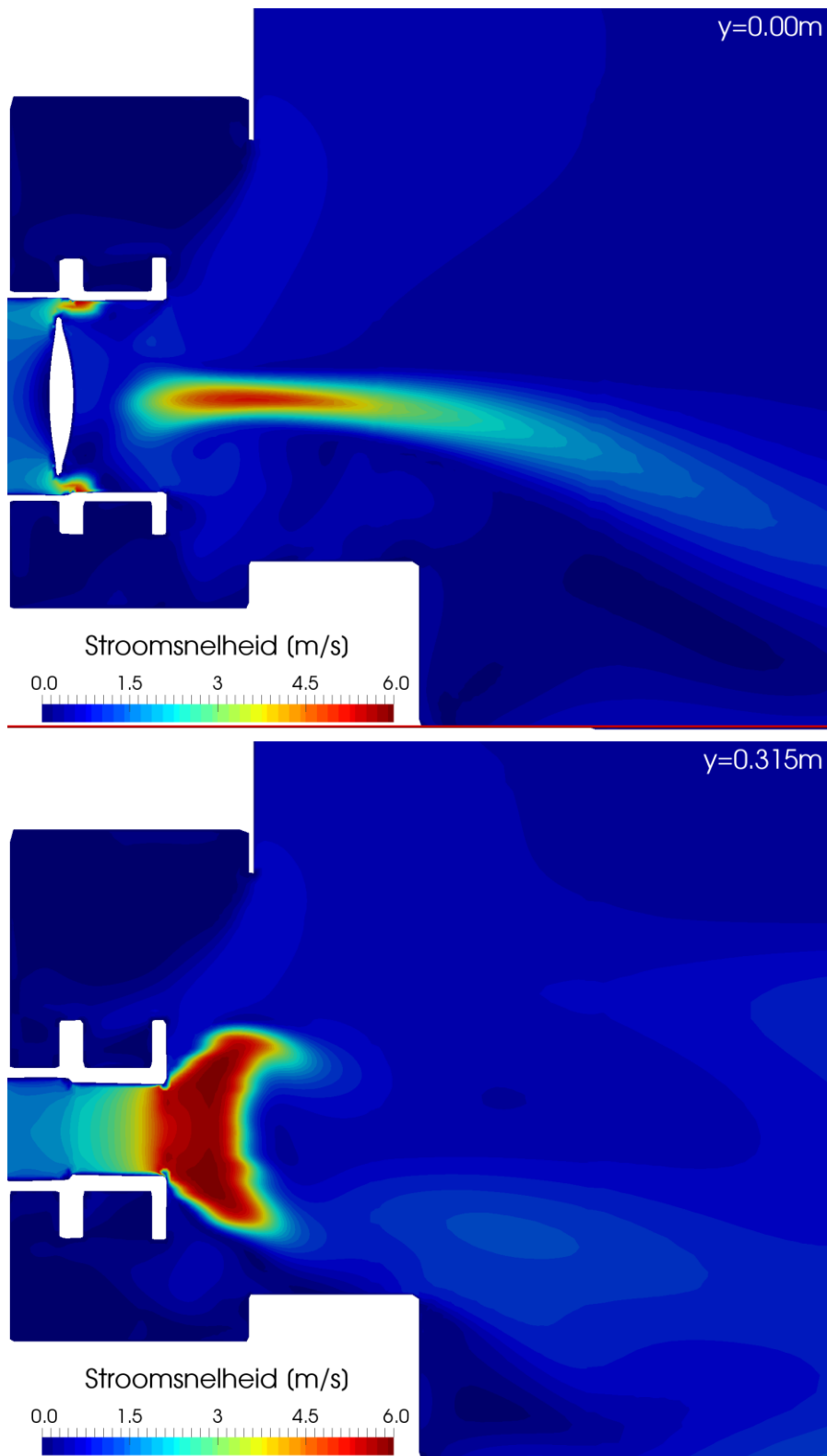


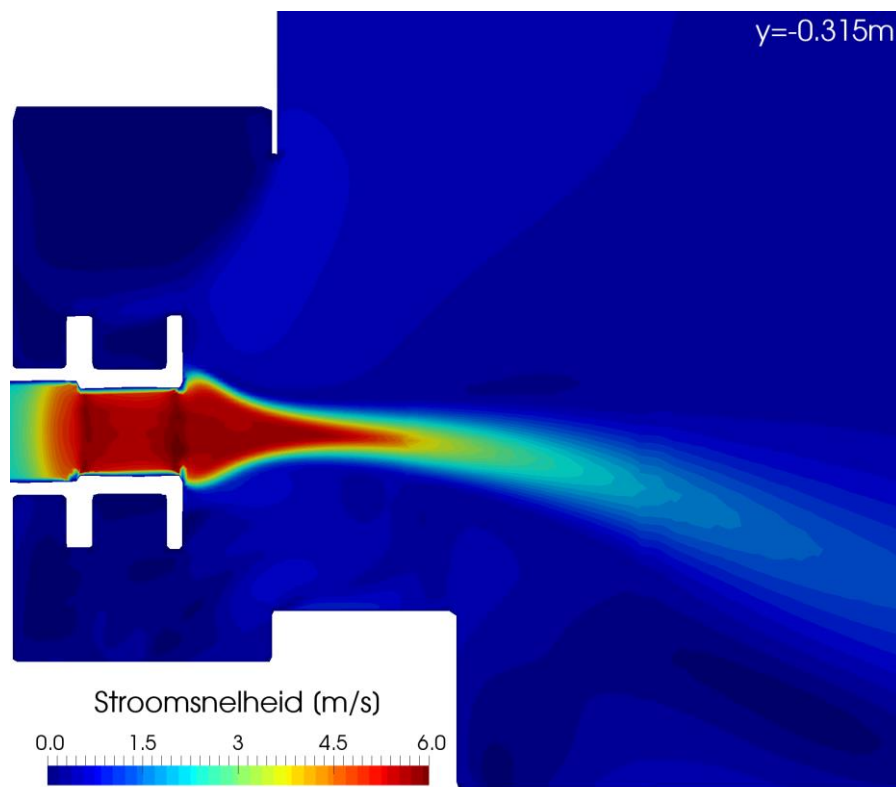
A.2.2 Afwaarts











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