



Kennisprogramma Natte Kunstwerken  
*Kennisplan 2017*

# **Veranderende belasting door veranderend gebruik**

Vergelijking schroefstraalstroombeelden –  
CFD en empirische formules

Tom O'Mahoney (Deltares)  
Wim Kortlever (Rijkswaterstaat)

Kenmerk : KpNK-2017-BKW-01a001  
Versie : 1.0  
Datum publicatie : 21 juli 2019





In het **Kennisprogramma Natte Kunstwerken** (KpNK) werken Deltares, MARIN, Rijkswaterstaat en TNO samen aan de kennisontwikkeling om de vervangings- en renovatieopgave bij natte kunstwerken (stuwen, sluizen, gemalen en stormvloedkeringen) efficiënt en kostenbesparend aan te pakken.

**Deltares**

**MARIN**



**TNO**

Voor het kennisprogramma wordt er jaarlijks een inhoudelijk **Kennisplan** inclusief bijbehorend financieringsplan opgesteld. Andere partijen (zoals waterschappen en marktpartijen) worden nadrukkelijk uitgenodigd om deel te nemen.

Meer informatie over het Kennisprogramma Natte Kunstwerken vindt op [www.nattekunstwerkenvandetoekomst.nl](http://www.nattekunstwerkenvandetoekomst.nl) waar ook de onderzoeksresultaten ter beschikking worden gesteld.

**NKWK**

De samenwerking binnen het Kennisprogramma Natte Kunstwerken vormt de uitwerking van de onderzoekslijn “Toekomstbestendige Natte Kunstwerken” binnen het **Nationaal Kennisplatform voor Water en Klimaat** (NKWK). Dit kennisplatform brengt Nederlandse overheden, kennisinstellingen en bedrijven bij elkaar om samen te werken aan pilots, actuele vraagstukken en lange termijnontwikkelingen op gebied van water- en klimaatvraagstukken.

Meer informatie staat op [www.waterenklimaat.nl](http://www.waterenklimaat.nl).

Voor vragen met betrekking tot het rapport kunt u terecht bij de auteur:

Tom O'Mahoney - [tom.omahoney@deltares.nl](mailto:tom.omahoney@deltares.nl)

Voor vragen over Kennisprogramma Natte Kunstwerken en Kennisplan 2017 kunt u terecht bij:

Maarten van der Vlist - [maarten.vander.vlist@rws.nl](mailto:maarten.vander.vlist@rws.nl)

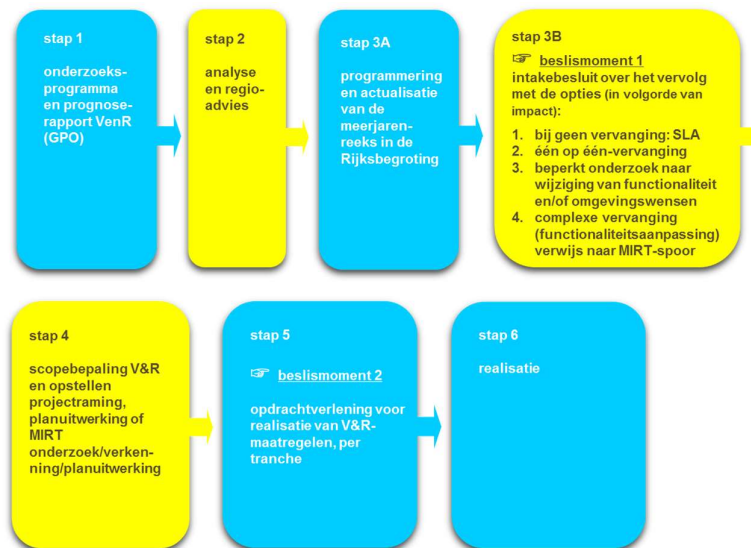




## Voorwoord

Sluizen, stuwen, gemalen en stormvloedkeringen zijn belangrijke assets van beheerders zoals Rijkswaterstaat en de waterschappen. Een groot deel van deze natte kunstwerken bereikt komende decennia het einde van de (technische) levensduur waarvoor het is ontworpen. Er dient zich dan ook een aanzienlijke vervangings- en renovatieopgave van deze kunstwerken aan.

De laatste jaren wordt steeds meer gezocht naar mogelijkheden om levensduur van kunstwerken te verlengen, en om bij einde levensduur (noodzakelijke) ingrepen aan gebiedsontwikkelingen en/of functionele/netwerk ontwikkelingen te koppelen. Rijkswaterstaat heeft daartoe als asset manager een vernieuwde werkwijze voor het Vervanging en Renovatie (VenR) proces opgesteld, welke de basis vormt voor de inrichting van het Kennisprogramma Natte Kunstwerken (zie Figuur 1).



Figuur 1. Vernieuwde RWS-werkwijze Vervanging en Renovatie.

In het Kennisprogramma Natte Kunstwerken wordt kennis ontwikkeld die bijdraagt aan de verschillende stappen binnen deze vernieuwde VenR-werkwijze, met als focuspunten stap 1 (prognoserapport) en stap 2 (regio-analyse en -advies). Het prognoserapport richt zicht op de (einde) technische levensduur, het regio-advies brengt met name de relatie object-netwerk-gebied in kaart.

Het onderzoek in het Kennisprogramma Natte Kunstwerken vindt plaats langs de onderstaande 3 onderzoekssporen en heeft tot doel om een effectieve en efficiënte aanpak van de vervanging- en renovatie-opgave en nieuwbouw van natte kunstwerken mogelijk te maken:

- bestaand object
  - inzicht in (einde) technische levensduur
  - levensduurverlenging
- object-systeem
  - inzicht in (einde) functionele levensduur en object-systeemrelaties
- nieuw(e) object/objectonderdelen
  - toepassen innovaties
  - inspelen op toekomstige ontwikkelingen.



## Kennisprogramma Natte Kunstwerken *Kennisplan 2017*

Sinds enkele jaren is er het Nationaal Kennisplatform voor Water en Klimaat (NKWK). Hieronder lopen diverse onderzoekslijnen. Eén van de onderzoekslijnen is “Toekomstbestendige Natte Kunstwerken”. Voor het praktisch laten functioneren van deze onderzoekslijn is er een Samenwerkingsovereenkomst Natte Kunstwerken en een Kennisprogramma Natte Kunstwerken opgesteld:

- Samenwerkingsovereenkomst Natte Kunstwerken. De partijen die momenteel binnen deze overeenkomst samenwerken aan onderwerpen rondom de vervangings- en renovatieopgave bij natte kunstwerken zijn Deltares, MARIN, Rijkswaterstaat en TNO.
- In het kader van de bovengenoemde Samenwerkingsovereenkomst Natte Kunstwerken en de 3 onderzoekssporen van het Kennisprogramma Natte Kunstwerken wordt er jaarlijks een inhoudelijk Kennisplan inclusief bijbehorend financieringsplan opgesteld.

Naast de genoemde partijen zijn en worden andere partijen nadrukkelijk uitgenodigd om deel te nemen aan de Samenwerkingsovereenkomst Natte Kunstwerken en/of het Kennisplan. Inzet kan zowel in kind en/of financieel zijn. In het Kennisplan 2017 is er binnen het kader van Kennisprogramma Natte Kunstwerken samengewerkt met Lock2Twente en Acotec BV.

Resultaten uit het Kennisprogramma Natte Kunstwerken worden gedeeld met de gehele sector, onder andere via de website [www.nattekunstwerkenvandetoekomst.nl](http://www.nattekunstwerkenvandetoekomst.nl).

De hierop volgende samenvatting heeft betrekking op het onderliggende onderzoeksrapport “Vergelijking van schroefstraalstroombeelden – CFD en empirische formules”. Dit onderzoek is geleid door Deltares in het kader van het Kennisplan 2017. In verband met de Algemene Verordening Gegevensbescherming is het originele Deltares rapport ten behoeve van het publiceren op de website alleen qua persoonsgegevens, maar niet qua inhoud aangepast.



## Samenvatting

# Vergelijking schroefstraalstroombeelden – CFD en empirische formules

### Aanleiding

Bestaande sluisen worden door de ontwikkeling van de scheepvaart zwaarder belast door schroefstralen dan waar bij het ontwerp vanuit is gegaan. Het effect kan bepalend zijn voor de levensduur van een sluis. De grootte van dit effect is onbekend. De schaalvergroting in de scheepvaart zorgt ook voor een toename in belasting door schroefstralen waarmee nieuwe ontwerpen van sluisen en havens rekening moeten houden. Huidige richtlijnen voor het ontwerpen van bodembescherming zijn gebaseerd op experimenten<sup>1</sup>. Recentelijk zijn ook verkenningen<sup>2</sup> gemaakt in het gebruik van numerieke modellen voor het voorspellen van stroomsnelheden als gevolg van schroefstralen langs de bodem en kademuren.

### Onderzoeksvraag en -opzet (WAT)

In dit project is er met behulp van Computational Fluid Dynamics (CFD) berekeningen van een groot zeeschip in een sluis (gesloten omgeving) inzicht gekregen in de belastingen op de bodembescherming en op de stroming in de kolk. Vervolgens zijn de resultaten van CFD-berekeningen vergeleken met de beschikbare empirische formules voor stroomsnelheden bij de bodem:

- Rock Manual formules
- PIANC werkgroep 180 formules

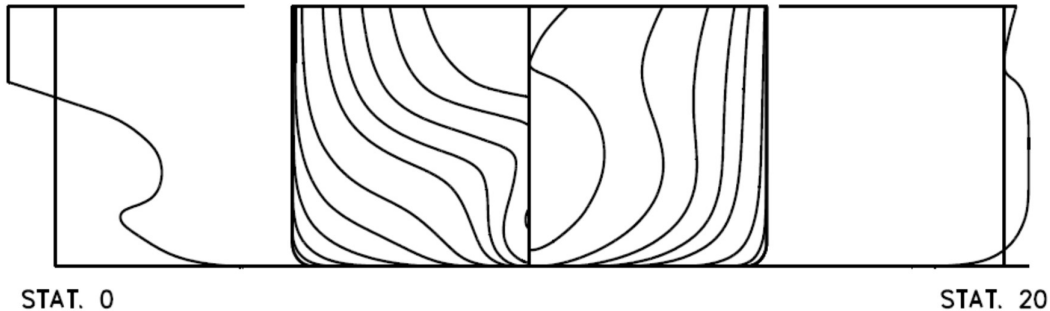
### Onderzoeksaanpak en -methode (HOE)

In het onderzoek zijn er voor de CFD-modellen een sluisgeometrie en scheepsvorm overeenkomend met de situatie bij de nieuwe Zeesluis IJmuiden gekozen. Het gebruikte modelschip is vormgegeven als een typische bulkcarrier. De hoofdafmetingen van het schip, waarvan het spantenraam en de contour in Figuur 1 en de gebruikte schroefvermogens in Tabel 1 worden weergegeven, zijn als volgt:

lengte Zeesluis IJmuiden	545 m	breedte Zeesluis IJmuiden	70 m
niveau kolkbodem t.o.v NAP	-17,75 m	diepgang schip in model	12,5 m
lengte schip over alles $L_{oa}$	330 m	ontwerpdiepgang schip	19,00 m
lengte schip tussen loodlijnen $L_{pp}$	320,75 m	positie zwaartepunt schip $x_{COG}$	14,325 m voor $L_{pp}/2$
breedte schip	52 m		

<sup>1</sup> **BAW (2005)**, *Principals for the Design of Bank and Bottom Protection for Inland waterways, Bulletin 85, Karlsruhe*;  
**PIANC werkgroep 22 (1997)**, *Guidelines for design of armoured slopes under open piled quay walls, Bulletin no 96*;

<sup>2</sup> **Hawkwood, M., Lafeber, F., and Hawkwood, G (2014)**, *Berth Scour Protection for Modern Vessels, PIANC World Congress San Francisco USA*;



Figuur 1: Spantenraam en contour van de gebruikte bulkcarrier

Situatie	Vermogen [kW]	RPM [s <sup>-1</sup> ]	Stuwkracht [kN]	Koppel [kNm]	Vermogen [%]	Koppel [%]
Full power	19.000	75,0			100	100
Half ahead	9.507	49,0	1.817	1.854	50	43
Dead slow	1.902	28,6	621	634	10	15

Tabel 1: Definities van de gebruikte schroefvermogens

Met deze uitgangspunten zijn in overleg de cases in Tabel 2 gedefinieerd.

Case	Scenario	Waterniveau [mNAP]	Afstand schip – deur [m]	Afstand schip – wand [m]	Roerhoek [°]	Vermogen
1	Na Invaren	-1,65	50	1,5	0	Dead slow
2	Na Invaren	-1,65	50	9	0	Dead slow
3	Na Invaren	-1,65	100	9	0	Half ahead
4	Voor Uitvaren	-0,4	50	1,5	0	Half ahead
5	Voor Uitvaren	-0,4	100	1,5	0	Half ahead
6	Voor Uitvaren	-0,4	50	1,5	20	Half ahead

Tabel 2 Samenvatting van de doorgerekende cases

Bij het doorrekenen van de cases in Tabel 2 zijn verder de volgende modelinstellingen gebruikt:

- Een 'na invaren' berekening betreft een situatie waarin het schip in de kolk ligt met de deur achter het hek open en de deur voor de boeg dicht. Het schip beweegt niet in de berekening. De afstand tot de deur is vervolgens tussen boeg en deur, gerekend vanaf de bulbsteven.
- Een 'voor uitvaren' berekening betreft een situatie waarin het schip in de kolk ligt met de deur achter het hek dicht en de deur voor de boeg open. Het schip beweegt niet in de berekening. De afstand tot de deur is vervolgens tussen hek en deur, gerekend vanaf de spiegel.
- Het vrijwateroppervlak wordt als een rigidlid gemodelleerd.

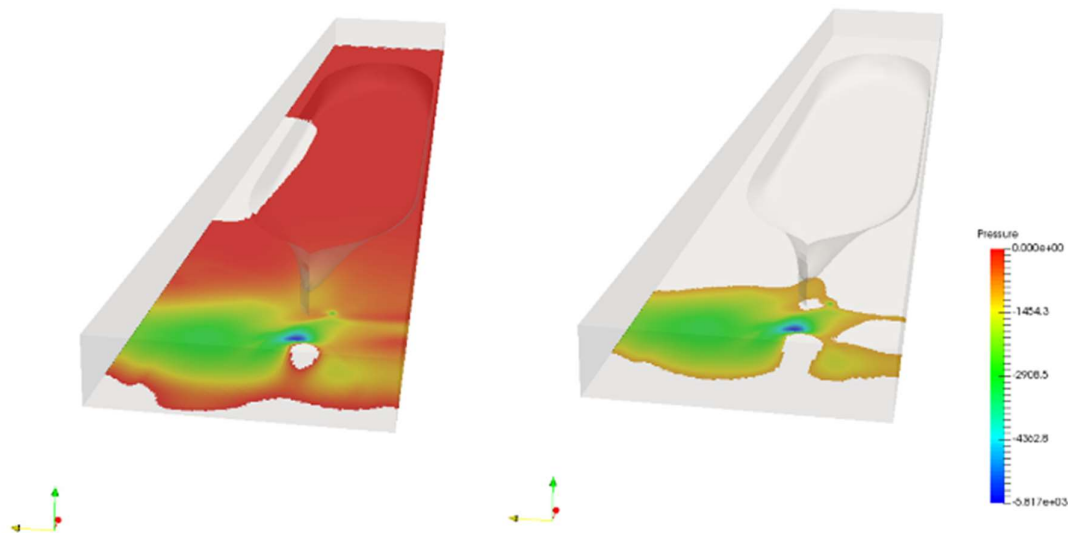




- De schroefwerking wordt met een actuator schijf gemodelleerd. De actuator disc model van MARIN stelt de voortstuwingskracht en koppel vast en definieert met een verdeling als functie van de radiale coördinaat van de actuator schijf. Voor details wordt naar de memo verwezen.
- Er is een roer aanwezig en in een berekening is een roerhoek, ten opzichte van de langsas van het schip toegepast. Deze hoek is 20° gedraaid zodat het achterste punt van de roer naar de dichtstbijzijnde kolkwand gericht wordt.

### Onderzoeksresultaten en synthese

De resultaten van de CFD berekeningen in dit onderzoek (in de presentatie achter de memo weergegeven) zijn stroombeelden in de sluis kolk en contouren van druk op de sluisbodembodem zoals in het voorbeeldfiguur beneden (voor case 6). In Figuur 2 is een voorbeeld van een resultaat (in de vorm van berekende resulterende drukken op de sluisbodembodem) weergegeven. De contouren zijn beperkt tot de delen van de sluisbodembodem waar er onderdruk ontstaat. Links is het gebied van onderdruk volledig weergegeven en rechts het gebied waar de onderdruk hoog is (drukken onder -1000 Pa).



*Figuur 2: Voorbeeld plot van drukcontouren op de sluisbodembodem*



In Tabel 3 zijn alle resultaten van de CFD berekeningen samengevat wat betreft het berekende oppervlak van de gebieden van onderdruk en de berekende kracht over elk gebied.

Case	Oppervlak ( $p < 0\text{Pa}$ ) [ $\text{m}^2$ ]	Kracht ( $p < 0\text{Pa}$ ) [kN]	Oppervlak ( $p < -1000\text{Pa}$ ) [ $\text{m}^2$ ]	Kracht ( $p < -1000\text{Pa}$ ) [kN]
1	36.198	18.601	1.420	1.633
2	35.102	15.574	220	255
3	37.725	28.917	3.114	5.007
4	30.386	12.210	4.991	10.203
5	15.612	4.138	998	1.161
6	34.714	8.344	3.243	6.260

Tabel 3: Samenvatting van de resultaten van de berekeningen

De conclusies van de CFD-berekeningen in dit onderzoek kunnen als volgt worden samengevat:

1. De maatgevende situaties van de geteste cases zijn Case 4 en Case 6. Deze cases komen overeen met de grootste schroefvermogen in samenhang met de kleinste ruimte achter het hek (tussen de schroef en de sluisdeur).
2. Als de roer op een hoek staat (zoals in Case 6) wordt de situatie niet erger. Er is zelfs sprake van een kleine verbetering.
3. In de maatgevende situaties komt een gemiddeld kracht van  $\sim 2\text{kN/m}^2$  of 20 cm onderdruk op de sluisbodem. Deze kracht wordt over een groot oppervlak achter het hek gezet.

De conclusies van de vergelijking tussen de CFD resultaten en de empirische formules voor stroomsnelheden bij de bodem kunnen als volgt worden samengevat:

4. De empirische formules voor stroomsnelheden bij de bodem houden geen rekening nog met een roer nog met een naastgelegen kolkmuur.
5. Het roer lijkt een significant effect te hebben op het stroombeeld – dit is al bekend van de literatuur.
6. De beperking van de ruimte achter het hek door de kolkmuur en de sluisdeur achter in de kolk maakt het stroombeeld zeer asymmetrisch.
7. De asymmetrie van de ligging van het schip in de kolk betekent dat de maximale snelheid niet in het verlengde van de schroef as zich bevindt.
8. De CFD-berekeningen geven geen consequent verschil ten opzicht van de empirische formules voor snelheden in het verlengde van de schroef as. Echter, als over een groter gebied gekeken wordt lijkt de CFD altijd hogere snelheden te voorspellen.
9. Zonder kwantitatieve validatie van de CFD resultaten kan de nauwkeurigheid van de voorspelde snelheid niet worden geschat.



### Evaluatie en vooruitblik

In de discussies met experts om de resultaten te evalueren werden er vragen gesteld of de hier beschouwde scenario's maatgevend zijn en de aanname van een actuator schijf voldoende is voor de aanval op de sluisvloer of bodembescherming als gevolg van schroefstralen. De conclusie werd getrokken dat voor een betonnen sluisbodem met betonnen platen van ongeveer 10 m breedte een actuator schijf voldoende is. Indien de bodembescherming echter van stortstenen is, dan is een draaiende schijf nodig. De wervels van de schroefbladeren kunnen onderdruk zones in de orde van grootte van de stenen creëren. Ook het scenario dat de schroef opstart zou ook hoge belasting kunnen veroorzaken. Er is besloten om deze vraagstukken in vervolgonderzoek (binnen het kennisprogramma) te beantwoorden. De validatie van deze numerieke methoden is ook nodig.





## Memo

<b>Datum</b> 17 december 2018	<b>Ons kenmerk</b> 11200548-000-GEO-0002	<b>Aantal pagina's</b> 16
<b>Contactpersoon</b> Tom O'Mahoney	<b>Doorkiesnummer</b> +31(0)88 335 7206	<b>E-mail</b> Tom.OMahoney@deltares.nl

**Onderwerp**  
Vergelijking van schroefstraalstroombeelden - CFD en empirische formules

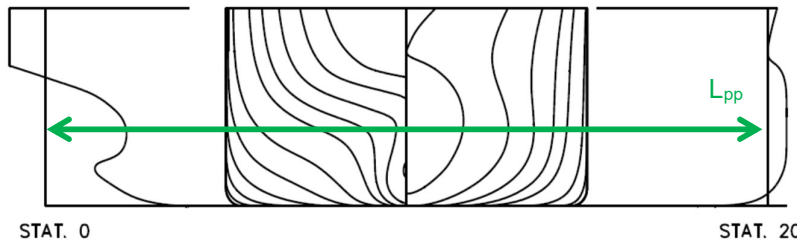
## 1 Inleiding

Bestaande sluisen worden door de ontwikkeling van de scheepvaart zwaarder belast door schroefstralen dan waar bij het ontwerp vanuit is gegaan. Het effect kan bepalend zijn voor de levensduur van een sluis. De grootte van dit effect is onbekend. De schaalvergroting in de scheepvaart zorgt ook voor een toename in belasting door schroefstralen waarmee nieuwe ontwerpen van sluisen en havens rekening moeten houden. Huidige richtlijnen voor het ontwerpen van bodembescherming zijn voornamelijk gebaseerd op experimenten (BAW (2005), PIANC WG22 (1997), PIANC WG180 (2015)). Recentelijk zijn ook verkenningen gemaakt in het gebruik van numerieke modellen voor het voorspellen van stroomsnelheden als gevolg van schroefstralen langs de bodem en kademuuren (Hawkswood 2014).

In dit project is er met behulp van CFD berekeningen van een groot zeeschip in een sluis (gesloten omgeving) inzicht gekregen in de belastingen op de bodembescherming en op de stroming in de kolk. De opzet van de CFD simulaties en de resultaten hiervan staan beschreven in Deltares, 2017. In de voorstaande memo worden de resultaten van CFD berekeningen vergeleken met de beschikbare empirische formules voor stroomsnelheden bij de bodem.

### 1.1 Uitgangspunten

Een sluisgeometrie en scheepsvorm overeenkomend met de situatie bij de Nieuwe Zeesluis IJmuiden zijn gekozen. Het modelschip dat tijdens deze berekeningen gebruikt wordt is vormgegeven als een typische bulkcarrier. De hoofdafmetingen van het schip en sluis zijn:



Figuur 1.1 Spantenraam en contour van de gebruikte bulkcarrier.

Tabel 1.1 Sluis- en scheepsdimensies

Dimensie	Afmetingen
Lengte sluis	545 m
Breedte sluis	70 m
Niveau kolkbodem	-17,75 mNAP

Schip Lengte over alles $L_{oa}$	330 m
Schip Lengte tussen loodlijnen $L_{pp}$	320.75 m
Breedte schip	52 m
Diepgang	12.5 m
Ontwerpdiepgang	19 m
Positie zwaartepunt $x_{COG}$	14.325 m voor $L_{pp}/2$

Voor de CFD berekeningen zijn 6 scenario's gekozen representatief voor verschillende situaties. Het schip ligt in de simulaties op verschillende locaties in de sluiskolk en gebruikt verschillende schroefvermogens en roerhoeken. Een samenvatting van de condities is te vinden in Tabel 1.2. De afstand schip – deur is gemeten in het scenario *na invaren* van huidplaat van de sluisdeur tot het voorste punt van het onderwaterschip en in het scenario *voor uitvaren* van de huidplaat van de sluisdeur tot het hek van het schip. De afstand schip – wand is gemeten van de buitenkant van de scheepsromp tot de sluiskolkwand, waarbij een afstand van 1,5 m overeenkomt met de dikte van de drijfrahmen. Bij een schip – wand afstand van 9 m ligt het schip gecentreerd in de sluiskolk.

Tabel 1.2 Samenvatting van het berekeningsprogramma

Case	Scenario	Waterniveau [mNAP]	Afstand schip – deur [m]	Afstand schip – wand [m]	Roerhoek [°]	Vermogen
1	Na Invaren	-1,65	50	1,5	0	Dead slow
2	Na Invaren	-1,65	50	9	0	Dead slow
3	Na Invaren	-1,65	100	9	0	Half ahead
4	Voor Uitvaren	-0,4	50	1,5	0	Half ahead
5	Voor Uitvaren	-0,4	100	1,5	0	Half ahead
6	Voor Uitvaren	-0,4	50	1,5	20	Half ahead

Tabel 1.3 Definities van de gebruikte schroefvermogens

Situatie	Vermogen [kW]	RPM [min <sup>-1</sup> ]	Stuwkracht [kN]	Koppel [kNm]	Vermogen [%]	Koppel [%]
Full power	19000	75.0			100	100
Half ahead	9507	49.0	1817	1854	50	43
Dead slow	1902	28.6	621	634	10	15

Tabel 1.4 Afmetingen van de schroef

Dimensie	Afmetingen
Diameter $D_p$	4.7 m
Locatie as boven kiel	5 m

## 1.2 Empirische formules

### 1.2.1 Rock Manual formules

In Nederland wordt vaak gebruik gemaakt van de formules in de Rock Manual [1]. Deze formules berekenen de belasting als gevolg van schroefstralen door de stroomsnelheid aan de bodem te bepalen. De straal waaiert en dempt uit naarmate de afstand tot de schroef wordt

vergroot. Onderstaande vergelijking geeft een uitdrukking voor de stroomsnelheid nabij de hoofdschroef [1]:

$$U_{p,0} = 1,15 \left( \frac{\eta P}{\rho D_0^2} \right)^{1/3}$$

Waarin:

- P het geïnstalleerde vermogen (W)
- $\eta$  het toegepaste percentage van het geïnstalleerde vermogen (-)
- $\rho$  de dichtheid van het water ( $\text{kg/m}^3$ ),  $1000 \text{ kg/m}^3$ , bij zoetwater
- $D_0$  de effectieve diameter van de schroef (m)

Theoretisch en experimenteel is bepaald dat de maximale snelheid aan een vlakke bodem achter het schip als gevolg van de hoofdschroef plaatsvindt op een horizontale afstand  $x_{\text{max}} = z_p / 0,18$ , waarin  $z_p$  de verticale afstand voorstelt van schroefas tot de bodem, waaruit volgt:

$$U_{p,\text{max,bed}} = 0,3U_{p,0} \frac{D_0}{z_p}$$

Bovenstaande vergelijking voor  $U_{p,\text{max,bed}}$  is geldig voor stilliggende schepen. Hierbij moet ook de relatie tussen de effectieve diameter,  $D_p$ , en de geometrische diameter van de schroef genoteerd worden, namelijk:

$$D_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} D_p \text{ voor schroeven zonder straalbuis, en}$$

$$D_0 = D_p \text{ voor schroeven met straalbuis.}$$

### 1.2.2 PIANC Working Group 180 formules

De PIANC formules zijn vergelijkbaar in vorm tot die van de Rock Manual. Alleen de empirische coëfficiënten zijn geüpdatet. Opgemerkt wordt dat hier de Nederlandse methode wordt hier aangehouden. In het PIANC rapport wordt ook een Duitse methode ook beschreven. De toegepaste formules maken alleen gebruik van de geometrische schroefdiameter en niet van de effectieve diameter. De formule voor de stroomsnelheid nabij de hoofdschroef is

$$U_{p,0} = C_1 \left( \frac{\eta P}{\rho D_p^2} \right)^{1/3}$$

Waar  $C_1$  is 1.17 voor schroeven zonder straalbuis en 1.48 voor schroeven met straalbuis.

De maximale snelheid aan een vlakke bodem achter het schip als gevolg van de hoofdschroef is:

$$U_{p,\text{max,bed}} = C_2 U_{p,0} \frac{D_p}{z_p}$$

Waar  $C_2$  is 0.216 voor schroeven zonder straalbuis en 0.306 voor schroeven met straalbuis.

## 2 Vergelijking resultaten

### 2.1 Empirische formules

Tabel 2.1 toont de resultaten van het toepassen van de formules van de Rock Manual en het PIANC Rapport. Hiervoor zijn 4 belangrijke fysische aspecten van belang, namelijk:

- 1 Ondiep water rondom het schip
- 2 Het effect van de kolkmuur
- 3 Het dynamische gedrag van de schroef
- 4 Het effect van het roer

De empirische formules die hier toegepast zijn nemen alleen aspecten 1 en 3 mee in de beschouwing van het stroombeeld. Theoretisch gezien zijn deze formules echter niet van toepassing voor de scenario's die in de CFD berekeningen beschouwd zijn want de afstanden tussen muur en schip en het schip en de bodem zijn hier kleiner dan in de onderliggende studies van de empirische formules. Het dynamische gedrag van de schroef wordt in gemiddelde zin meegenomen, d.w.z. een tijdsgemiddeld stroomveld over één revolutie van de schroef. De beschouwde CFD berekeningen, beschreven in Deltares 2017, zijn uitgevoerd met een met actuator schijf en nemen ook alleen het effect van de schroef in gemiddelde zin mee.

Tabel 2.1 Berekening van stroomsnelheid op bodemniveau met Rock Manual en PIANC formules

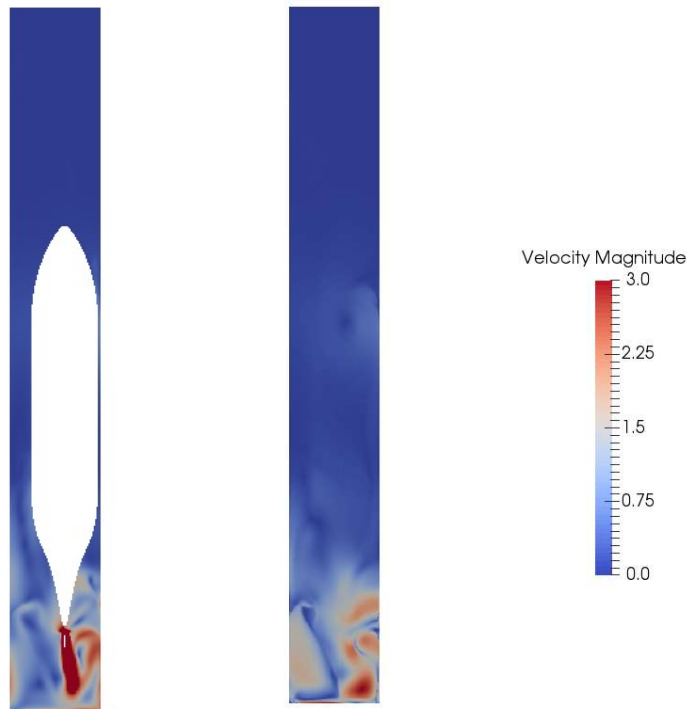
		Diepgang schip (m)	Maximum vermogen per schroef (kW)	diameter schroef, $D_p$ (m)	aantal schroeven (n)	hoogte schroefas boven de kiel (m)	$Z_p$ (m)	$U_{p,max,bed}$ (m/s) Rock Manual	$U_{p,max,bed}$ (m/s) PIANC WG180
Bulkcarrier	Case 1	12.5	1902	4.70	1	5.00	8.60	0.74	0.77
	Case 2	12.5	1902	4.70	1	5.00	8.60	0.74	0.77
	Case 3	12.5	9507	4.70	1	5.00	8.60	1.26	1.32
	Case 4	12.5	9507	4.70	1	5.00	9.85	1.10	1.15
	Case 5	12.5	9507	4.70	1	5.00	9.85	1.10	1.15
	Case 6	12.5	9507	4.70	1	5.00	9.85	1.10	1.15

Voor de 6 cases zijn de snelheden bij de bodem, volgens de formules in de orde van 1m/s. Opgemerkt wordt dat de maatgevende situatie volgens de handboekformules Case 3 is, omdat dit de situatie is met het hoogste vermogen en de laagste waterstand. De formule houdt geen rekening met de afstand van het schip tot de kolkmuur of de afstand tussen het hek van het schip en sluisdeur achter het schip.



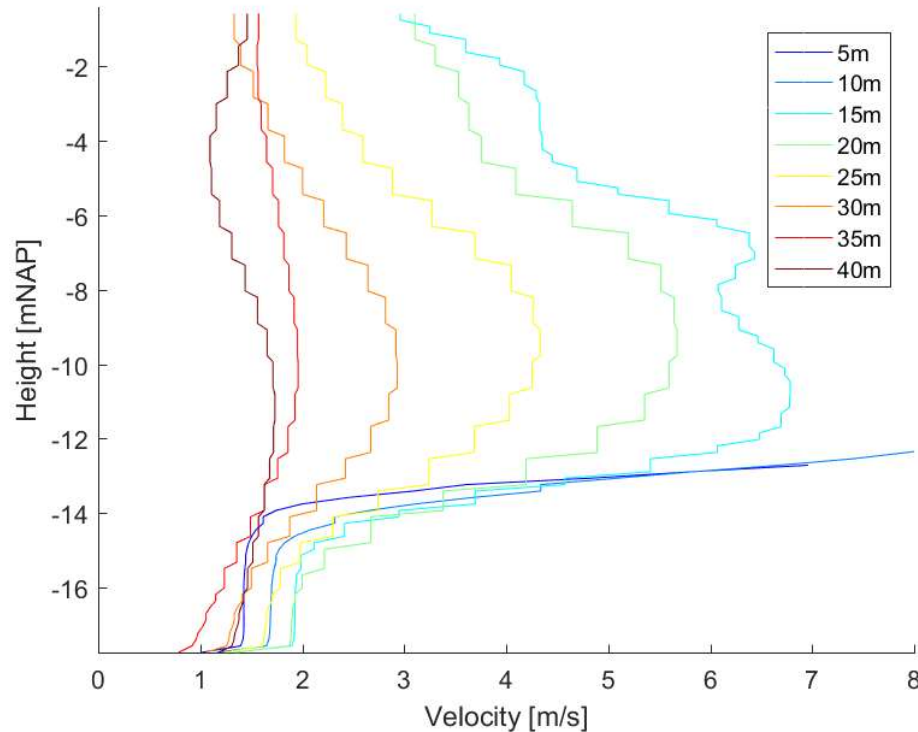
## 2.2 CFD resultaten

De CFD resultaten (voor details, zie Deltares 2017) geven een veel grotere ruimtelijke resolutie van het stroombeeld en een complex stromingspatroon weer. Een voorbeeld van een tijdsgemiddeld stroombeeld 5cm boven de sluisbodembodem is in Figuur 2.1 te zien. De figuren voor de andere cases zijn in de Appendix te zien. Alleen een deel van de kolk wordt in de figuren getoond. Onderaan het figuur is het gebied achter het hek te zien waar neren vormen vlak boven de bodem. Het kwalitatieve stroombeeld van de CFD komt overeen met het verwachte stroombeeld. De maximale snelheid treedt op in de hoek. Deze locatie is niet in het verlengde van de as van de schroef, wat wel het geval is voor een schroefstraal in open water, en waar de empirische formules wel vanuit gaan.



Figuur 2.1 Contour van de tijdsgemiddelde snelheidsmagnitude in een vlak: links, 2m boven de kiel, rechts, 5cm boven de bodem – Case 4

Naast de kwalitatieve beoordeling van het stroomveld, wordt er een kwantitatieve vergelijking van de snelheden gemaakt in het verlengde van de schroefas. Verticale profielen van de snelheden zijn uit de CFD simulaties gehaald op verschillende locaties achter het schip. De verticale snelheidsprofielen voor Case 4 zijn in Figuur 2.2 te zien voor locaties op elke 5 m van het centrum van de schroef, tussen de 5 m en 40 m achter de schroef. De verspringingen van de profielen zijn het resultaat van de grovere resolutie van het rooster op die locaties. De maximale snelheden bij de bodem zijn gepresenteerd met een precisie van 0,5 m/s in Tabel 2.2. Omdat het CFD model niet kwantitatief gevalideerd is kan er geen uitspraak gedaan worden over de nauwkeurigheid van de waardes.



Figuur 2.2 Verticale profielen van snelheid achter het schip – Case 4. De kolk bodem ligt op -17,75 mNAP en de schroefas op -9,15 mNAP.

Uit de CFD resultaten kan geconcludeerd worden dat het schroefvermogen en afstand tot de muur vermoedelijk de parameters zijn met de grootste invloed op de snelheden achter het schip. De grootste snelheden worden geconstateerd als het schip dichtbij de muur ligt en een groot vermogen gebruikt. Ook het gebruik van het roer lijkt een effect te hebben. Hoewel er niet voldoende scenario's zijn om een heel duidelijke conclusie te trekken lijkt het dat de waterstand niet de bepalende factor is voor deze case (snelheden in Case 3 zijn de laagst terwijl de waterstand en dan ook de kielspeling ook de laagst zijn).

Opmerkelijk van de resultaten is dat de Case met de maximale stroomsnelheden nabij de bodem uit de empirische formules de case is met de minimale stroomsnelheden uit de CFD (Case 3). De waterstand heeft in de empirische formules een grote invloed. De CFD resultaten voor Cases 1 en 2 geven ook relatief hoge snelheden terwijl het schroefvermogen veel lager is dan in de andere cases. Dit is te verklaren uit het stroombeeld rondom het roer. Bij de lagere vermogens wordt de schroefstraal in de CFD door het roer naar beneden gericht terwijl in de andere cases dit niet het geval is (zie het verschil tussen Figuur 2.3 (laag vermogen) en Figuur 2.4 (groot vermogen)).

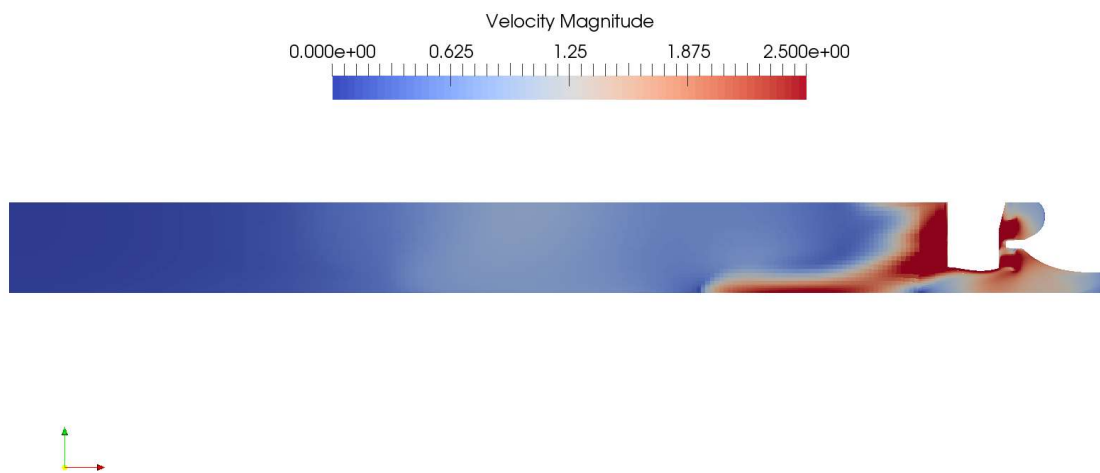
Er wordt nog opgemerkt dat, terwijl de empirische formules geen verschil geven tussen Cases 4-6 omdat zij geen rekening houden met de locatie van de schroefstraal ten opzichte van omringende oevers of kademuuren/sluiswanden, CFD wel een groot verschil laat zien.

Tabel 2.2 Samenvatting van de CFD resultaten voor maximale bodemsnelheid

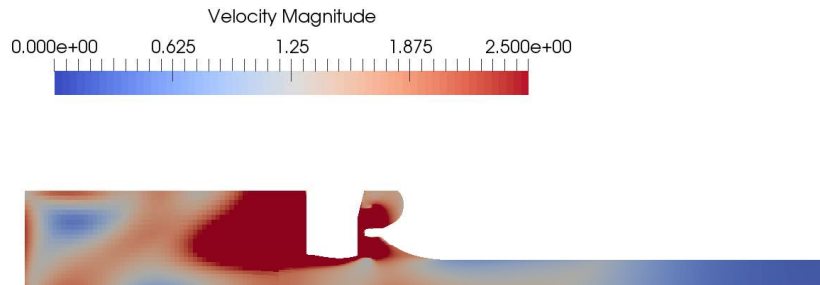


Case	CFD snelheid in het verlengde van de schroefas [m/s]	Empirische waarde [m/s]
1	2.5	0.77
2	2.0	0.77
3	1.0	1.32
4	2.0	1.15
5	2.5	1.15
6	3.0	1.15

De verschillen tussen de CFD resultaten en de empirische formules zijn significant. De CFD resultaten geven geen consequente over- of onderschatting ten opzicht van de empirische formules voor snelheden in het verlengde van de schroefas. Echter als over een groter gebied gekeken wordt, voorspelt CFD altijd hogere snelheden. Opgemerkt wordt dat zonder kwantitatieve validatie van de CFD voor dit type stromingen de nauwkeurigheid van de resultaten niet geschat kan worden. Verwacht wordt dat het toegepaste turbulentiemodel een grote rol kan spelen in de resultaten (in deze berekeningen is de k-omega SST model gebruikt, zie Deltares, 2017). De onzekerheid van deze keuze in turbulentie model en het model van de schroef zijn de grootste bronnen van onzekerheid in het model. Zonder extra validatie is de mate van onzekerheid niet te kwantificeren.



*Figuur 2.3* Contour van snelheidsmagnitude in een vlak in het verlengde van de schroefas- Case 1 (dead slow)



Figuur 2.4 Contour van snelheidsmagnitude in een vlak in het verlengde van de schroefas- Case 4 (half ahead)

### 3 Conclusies

De conclusies van de vergelijking tussen de CFD resultaten en de empirische formules kunnen als volgt samengevat worden:

- 1 De empirische formules houden geen rekening met een roer of met een naastgelegen kolkmuur.
- 2 Het roer lijkt een significant effect te hebben op het stroombeeld – dit was ook al bekend uit de literatuur.
- 3 De beperking van de ruimte achter het hek door de kolkmuur en de sluisdeur achter in de kolk maakt het stroombeeld zeer asymmetrisch.
- 4 De asymmetrie van de ligging van het schip in de kolk betekent dat de maximale snelheid zich niet in het verlengde van de schroef as bevindt.
- 5 De verschillen tussen de CFD resultaten en de empirische formules zijn significant. De CFD resultaten geven geen consequente over- of onderschatting ten opzichte van de empirische formules voor snelheden in het verlengde van de schroefas. Echter, als over een groter gebied gekeken wordt voorspellen de CFD simulaties altijd hogere snelheden.
- 6 Zonder kwantitatieve validatie van de CFD resultaten kan de nauwkeurigheid van de voorspelde snelheid niet bepaald worden.

## 4 Referenties

BAW (2005), Principals for the Design of Bank and Bottom Protection for Inland waterways, Bulletin 85, Karlsruhe.

PIANC Report of Working Group 22, (1997), Guidelines for design of armoured slopes under open piled quay walls, Bulletin no 96.

Hawkswood, M., Lafeber, F., and Hawkswood, G., (2014), Berth Scour Protection for Modern Vessels, PIANC World Congress San Francisco USA.

Deltares (2017) Het effect van schroefstralen op de stroming in de sluiscolk, Natte Kunstwerken van de Toekomst,

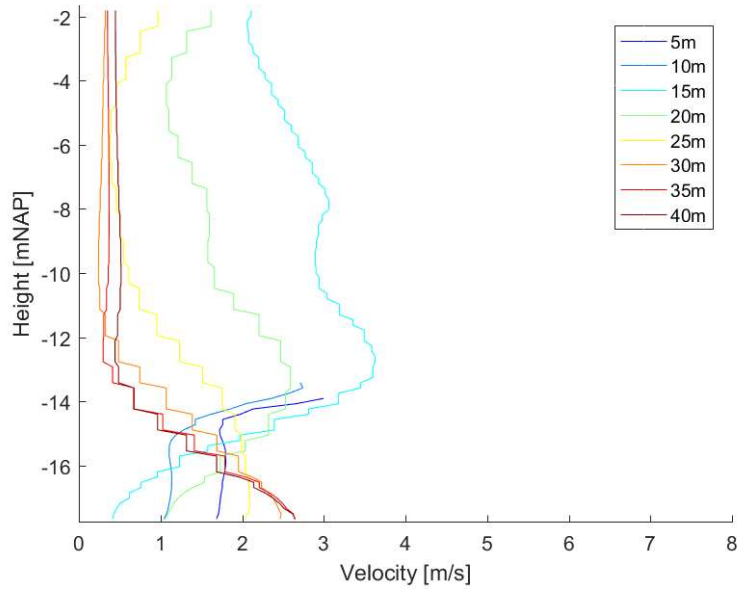
Rock Manual (2007) *The Rock Manual - The use of rock in hydraulic engineering*, CIRIA, CUR, and CETMEF, C683, 2nd ed.

PIANC Report of Working Group 180 (2015) *Guidelines for scour at berthing structures related to thrusters*

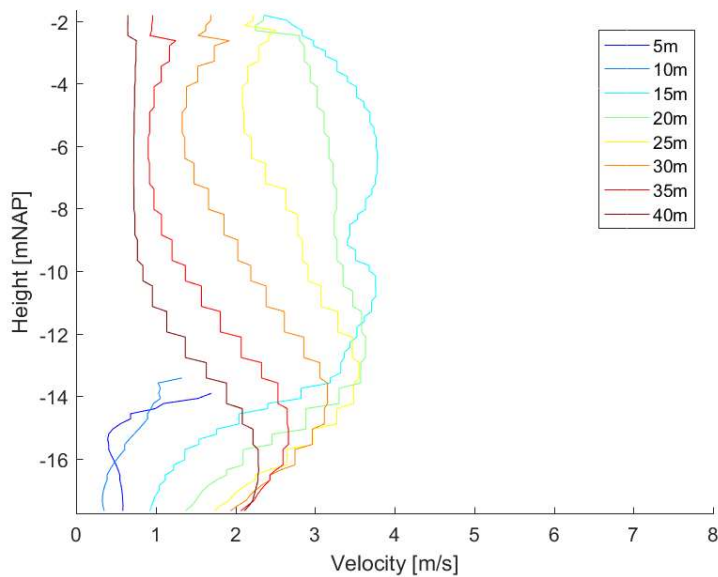
Sluisboek (2000) *Ontwerp van Schutsluizen* R.C.A. Beem, A. Glerum, and P.L. Spits, Rijkswaterstaat



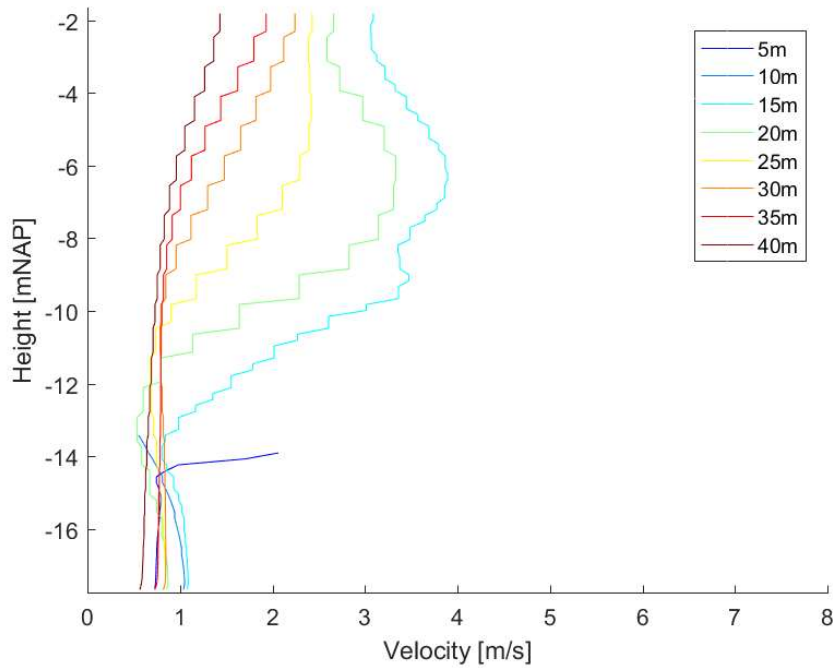
## 5 Appendix



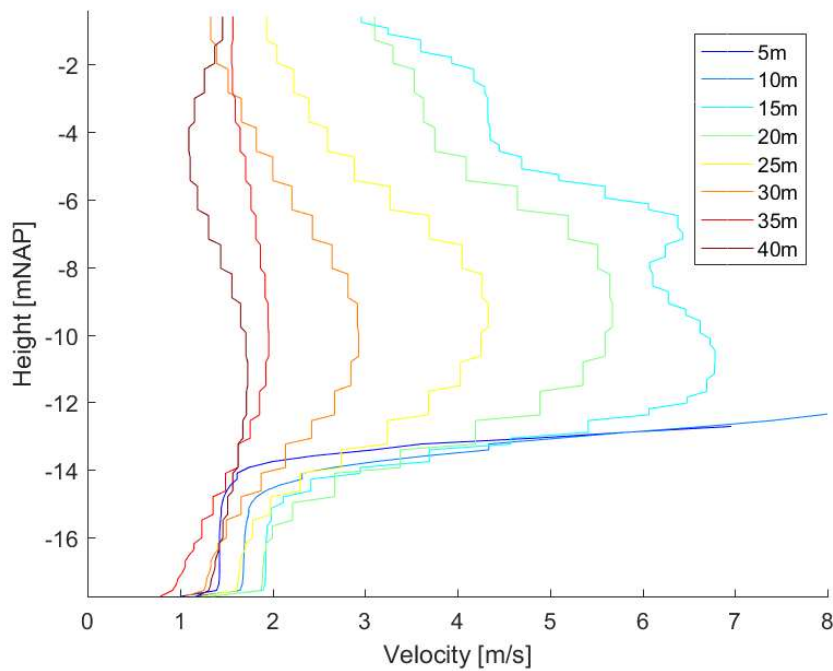
**Figuur 5.1** Verticale profielen van snelheid achter het schip – Case 1. De kolk bodem ligt op -17,75 mNAP en de schroefas op -9,15 mNAP.



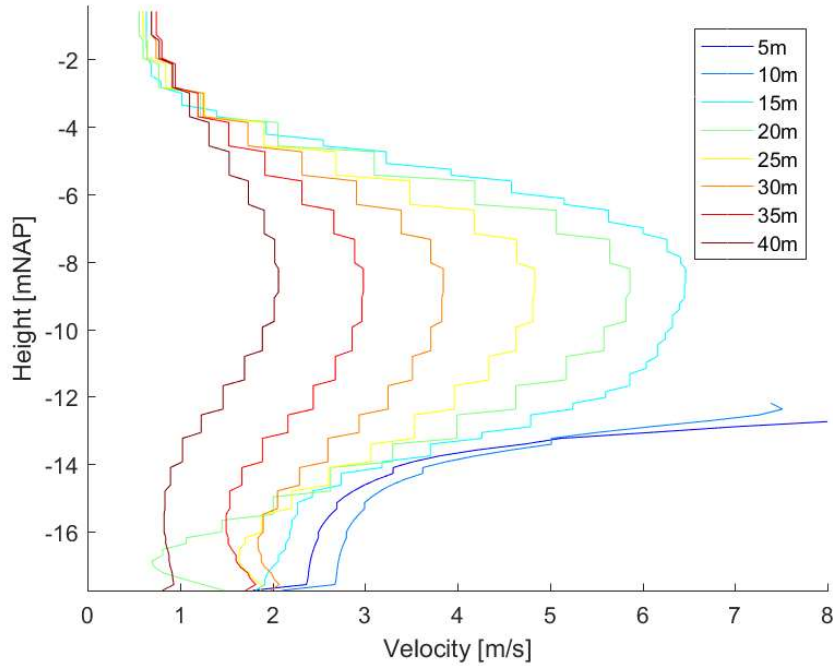
**Figuur 5.2** Verticale profielen van snelheid achter het schip – Case 2. De kolk bodem ligt op -17,75 mNAP en de schroefas op -9,15 mNAP.



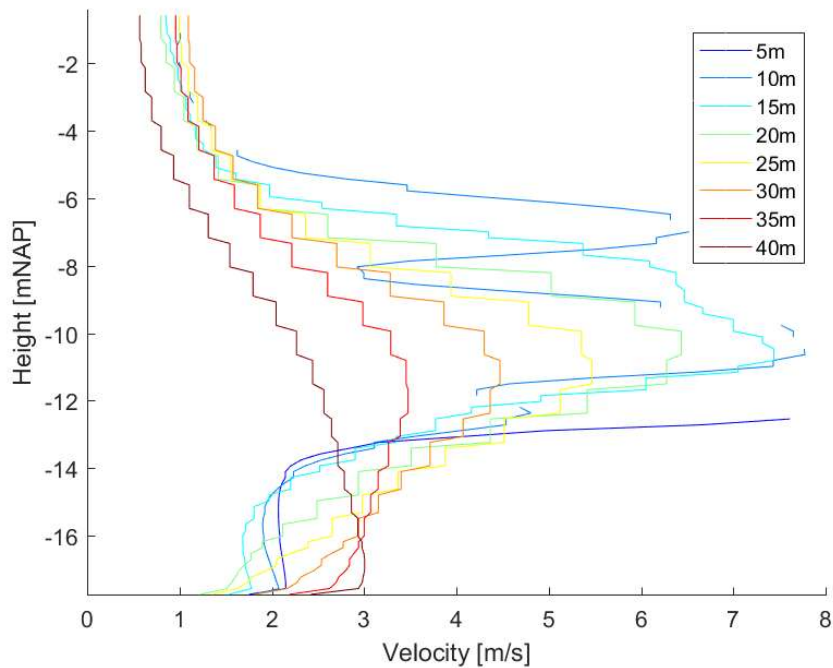
Figuur 5.3 Verticale profielen van snelheid achter het schip – Case 3. De kolk bodem ligt op -17,75 mNAP en de schroefas op -9,15 mNAP.



Figuur 5.4 Verticale profielen van snelheid achter het schip – Case 4. De kolk bodem ligt op -17,75 mNAP en de schroefas op -9,15 mNAP.



Figuur 5.5 Verticale profielen van snelheid achter het schip – Case 5. De kolk bodem ligt op -17,75 mNAP en de schroefas op -9,15 mNAP.



Figuur 5.6 Verticale profielen van snelheid achter het schip – Case 6. De kolk bodem ligt op -17,75 mNAP en de schroefas op -9,15 mNAP.

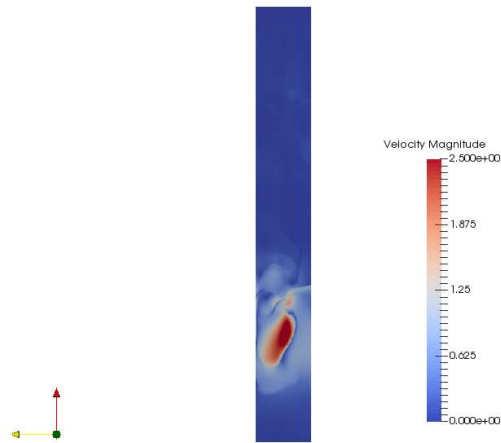




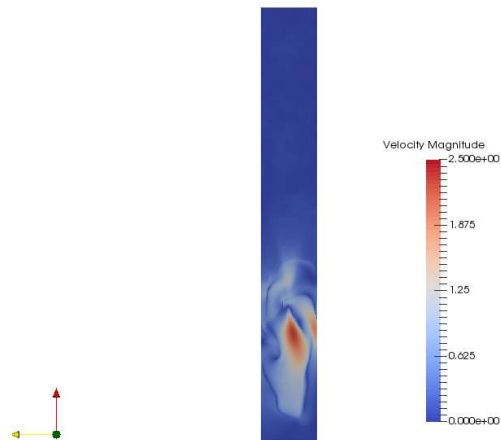
Datum  
17 december 2018

Ons kenmerk  
11200548-000-GEO-0002

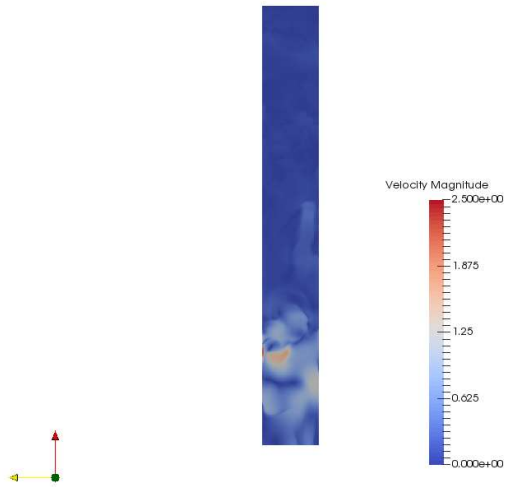
Pagina  
13 van 16



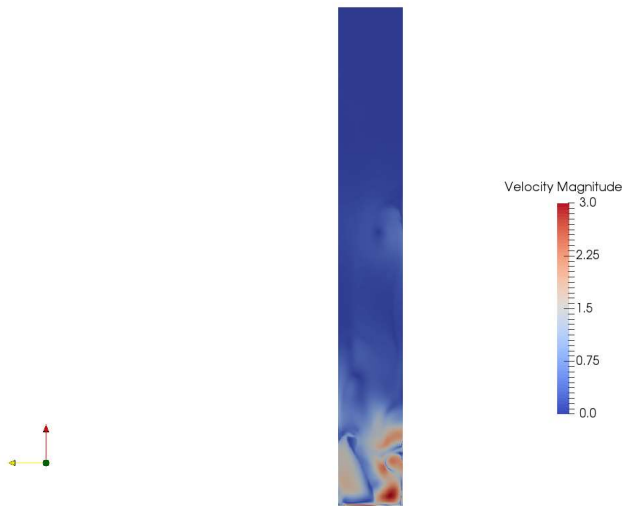
Figuur 5.7 Contour van snelheidsmagnitude in een vlak 5cm boven de bodem – Case 1



Figuur 5.8 Contour van snelheidsmagnitude in een vlak 5cm boven de bodem – Case 2



*Figuur 5.9*      *Contour van snelheidsmagnitude in een vlak 5cm boven de bodem – Case 3*



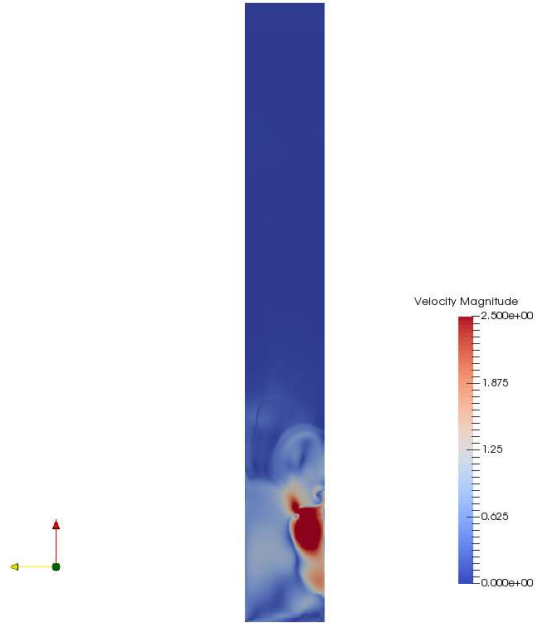
*Figuur 5.10*      *Contour van snelheidsmagnitude in een vlak 5cm boven de bodem – Case 4*



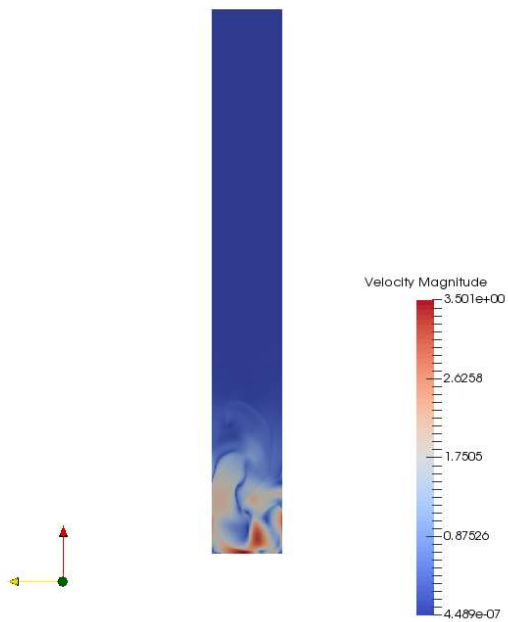
Datum  
17 december 2018

Ons kenmerk  
11200548-000-GEO-0002

Pagina  
15 van 16



Figuur 5.11 Contour van snelheidsmagnitude in een vlak 5cm boven de bodem – Case 5



Figuur 5.12 Contour van snelheidsmagnitude in een vlak 5cm boven de bodem – Case 6



**Datum**

17 december 2018

**Ons kenmerk**

11200548-000-GEO-0002

**Pagina**

16 van 16

**Bijlage(n)**

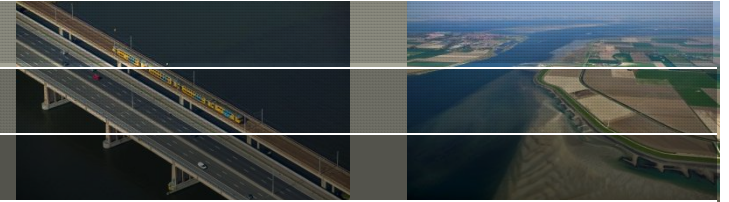
0



## CFD propeller jets in lock chambers

24 March, 2017

# Case study IJmuiden



## Lock dimensions

Length 545m

Breadth 70m

Floor level -17.75mNAP

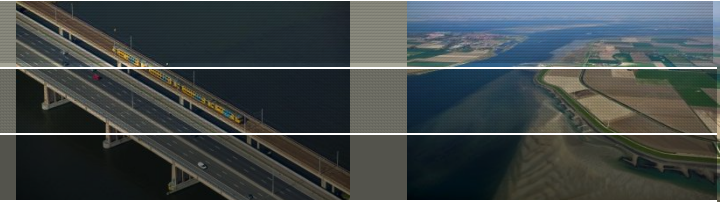
## Ship dimensions (Bulk Carrier)

Length 330m

Breadth 52m

Draught 12.5m

# Assumptions



- The situation “after lock entry” is a situation wherein the vessel is in the lock with the gate behind the stern open and the gate in front of the bow closed. The distance to the gate is then measured between the bow and the front gate
- The situation “before lock exit” is a situation wherein the vessel is in the lock with the gate behind the stern closed and the gate in front of the bow open. The distance to the gate is the measured between the stern and the back gate.
- The watersurface is modelled as a rigidlid
- The propeller is modelled as an actuator disc. The thrust,  $F$ , and moment of the whole disc are defined as constant. There is a distribution of thrust and moment along the radius,  $\hat{r}$ , of the virtual disc defined as

$$\frac{f_x(\hat{r})}{F} = \left( \frac{a + \hat{r}}{a + 1} \right)^m \left( \frac{b + 1 - \hat{r}}{b + 1} \right)^n$$

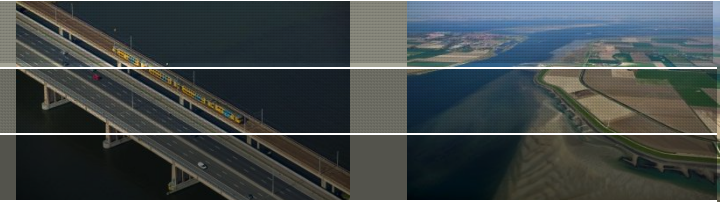
Here  
a=0  
b=0  
m=1  
n=0.5

# Assumptions

- The assumption is that the crucial forcing for the lock floor is the long lasting mean forcing from the propeller, whereby an actuator disc is an appropriate modelling choice
  - In the actuator disc assumption the blades of the propeller are not modelled and the force on the flow is averaged at each time step over the entire revolution. The force does vary in the radial direction according to the formula above.



# Scenarios



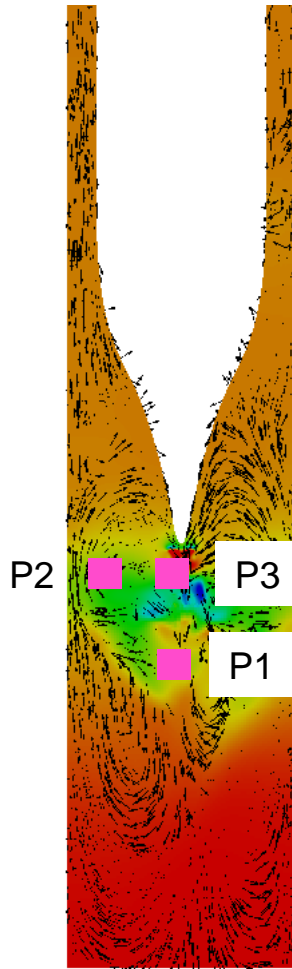
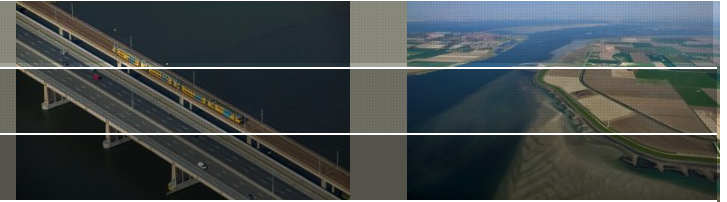
Tabel Samenvatting van het berekeningsprogramma

Berekening	Scenario	Waterniveau [mNAP]	Afstand schip – deur [m]	Afstand schip – wand [m]	Roer hoek [°]	Vermogen
1	Na Invaren	-1,65	50	1,5	0	Dead slow
2	Na Invaren	-1,65	50	9	0	Dead slow
3	Na Invaren	-1,65	100	9	0	Half ahead
4	Voor Uitvaren	-0,4	50	1,5	0	Half ahead
5	Voor Uitvaren	-0,4	100	1,5	0	Half ahead
6	Voor Uitvaren	-0,4	50	1,5	20	Half ahead

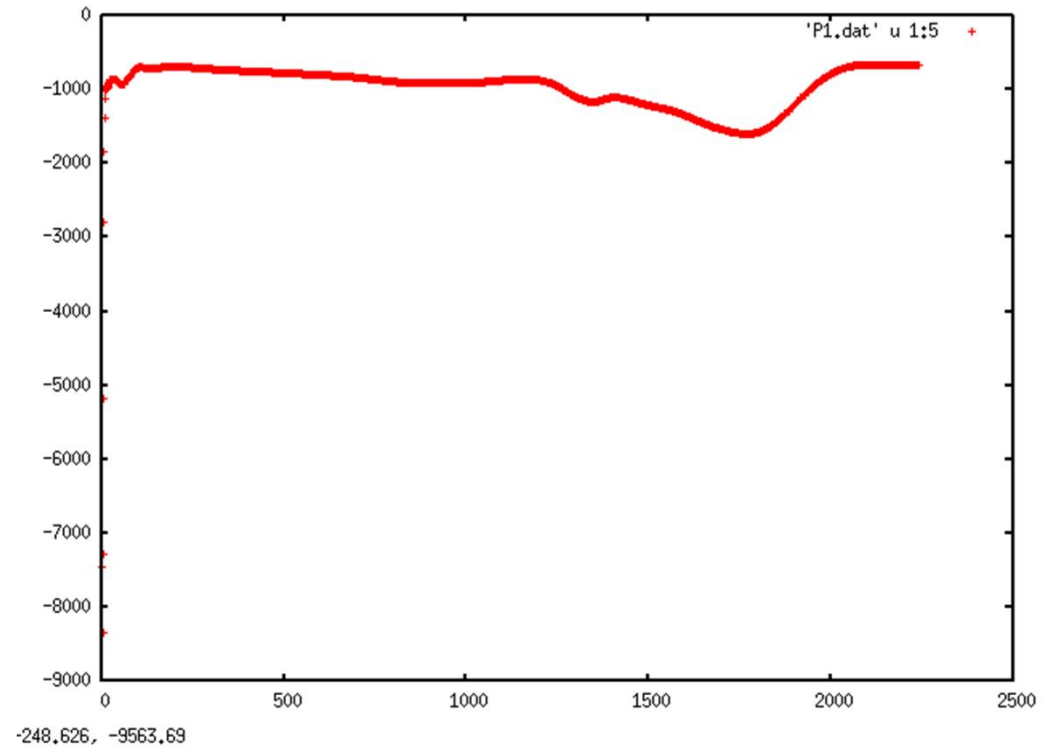
Tabel Definities van de gebruikte schroefvermogens

Situatie	Vermogen [kW]	RPM [s <sup>-1</sup> ]	Stuwkracht [kN]	Koppel [kNm]	Vermogen [%]	Koppel [%]
Full power	19000	75.0			100	100
Half ahead	9507	49.0	1817	1854	50	43
Dead slow	1902	28.6	621	634	10	15

# Convergence



Pressure (Pa)

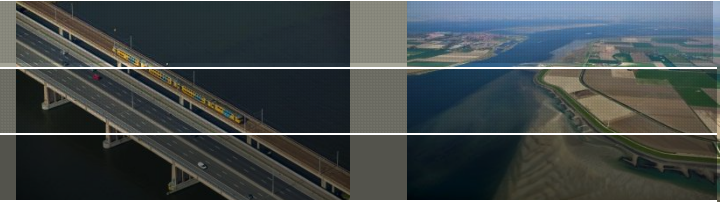


Timesteps      Each timestep is 0.1s

Pressure monitors along the bottom 10cm from the lock floor show some variation in time but this variation is limited at the floor. In the wake of the rudder the variations are larger

This shows convergence of the solution for the bottom pressure

# Case 1



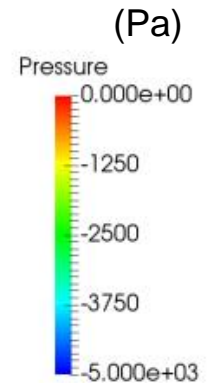
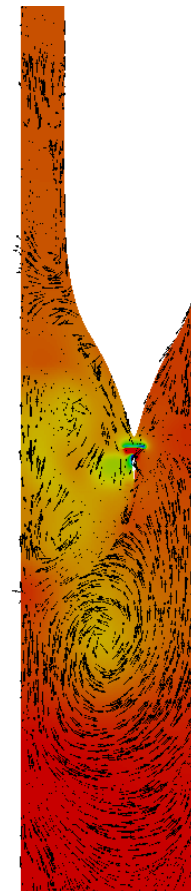
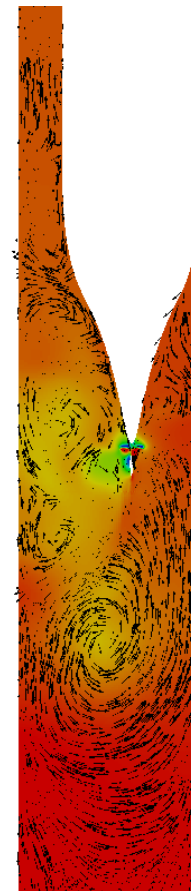
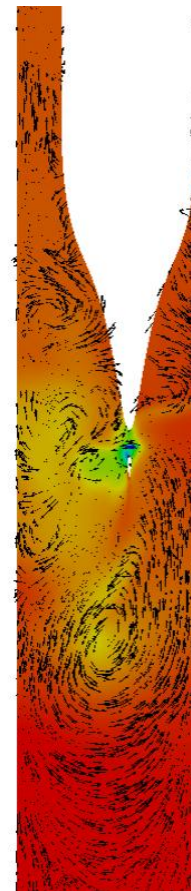
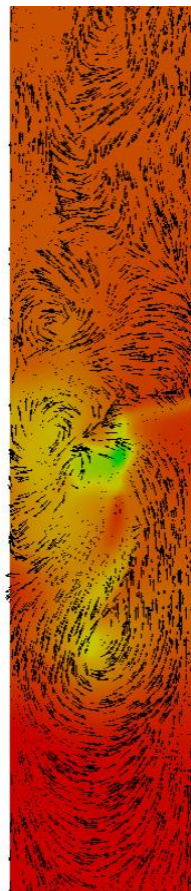
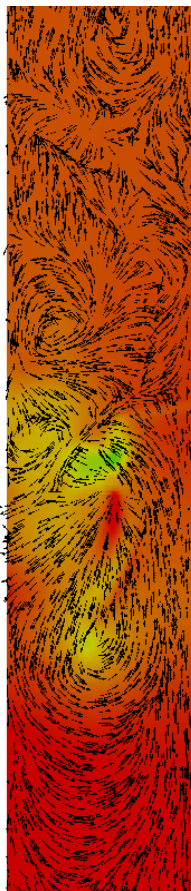
Floor

-15,5mNAP

-13,5mNAP

-10,5mNAP

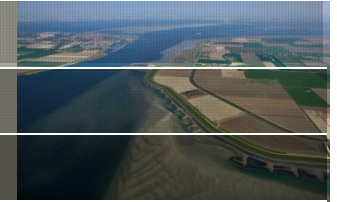
-7,5mNAP



These contours show the underpressure relative to the hydrostatic pressure profile. That is to say that the hydrostatic pressure has been removed such that pressure at different water depths can be compared with each other more easily.

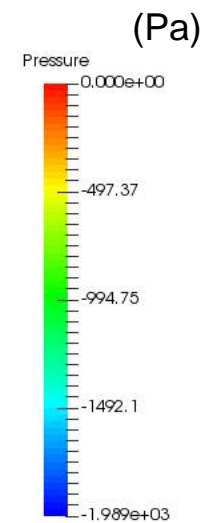
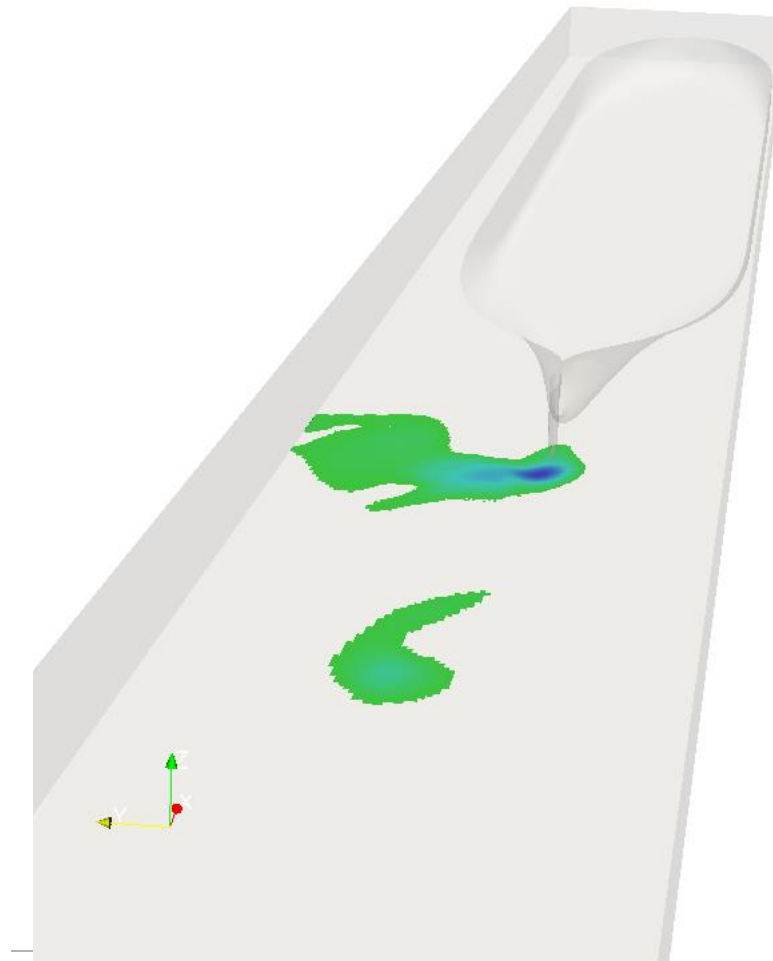
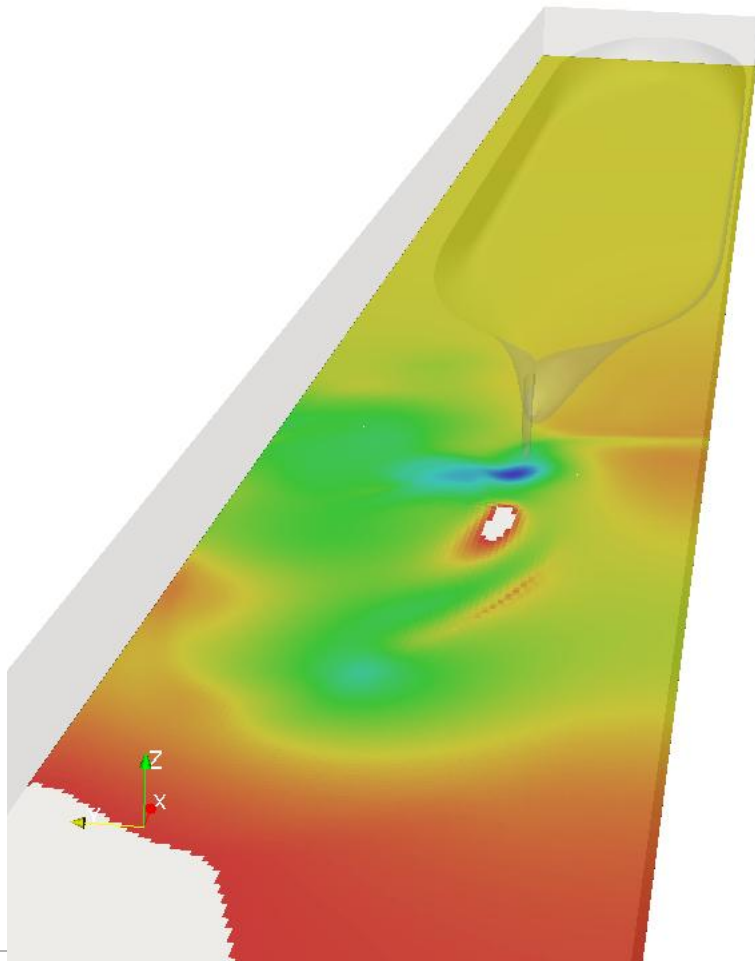
The vessel is viewed from beneath and areas of overpressure are shown as red

# Underpressure – Case 1

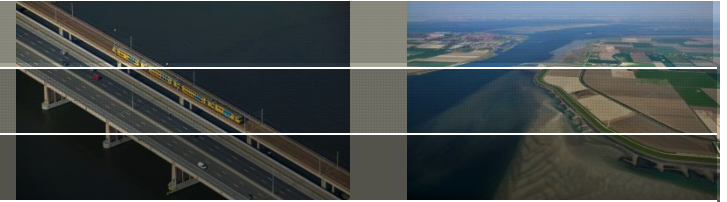


< 0 Pa

< -1000 Pa



# Case 2



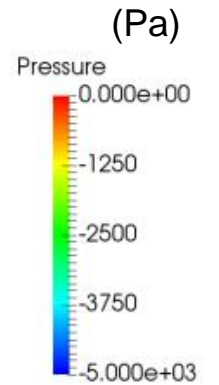
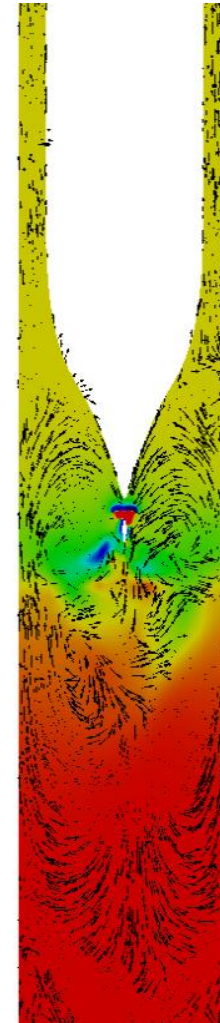
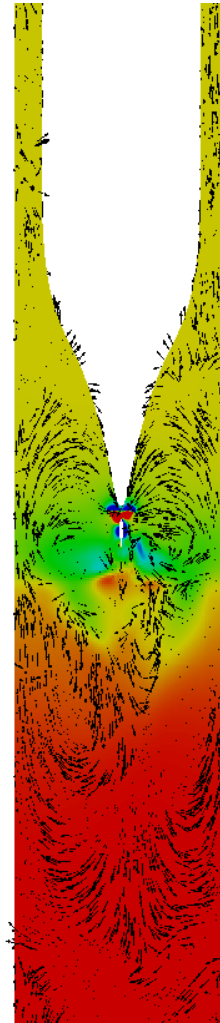
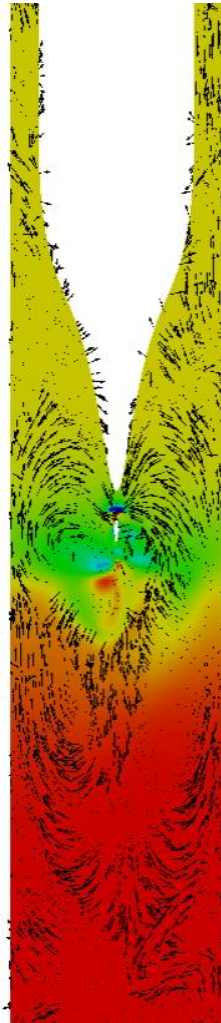
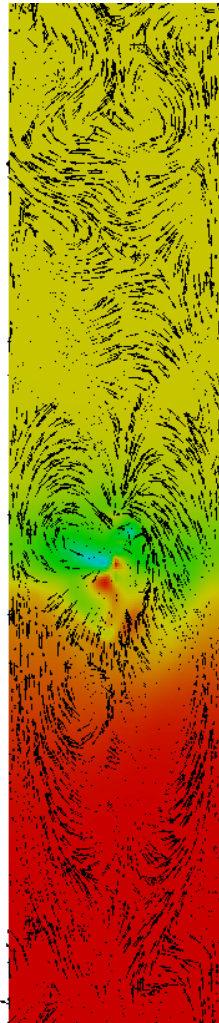
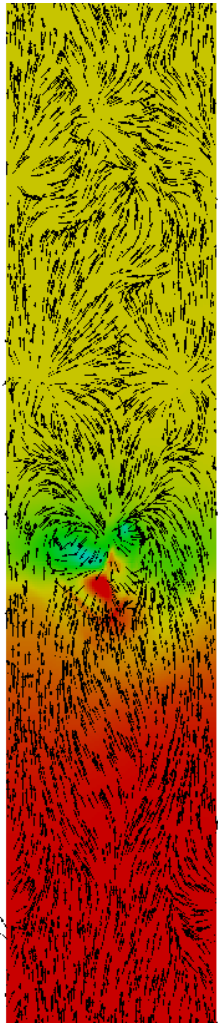
Floor

-15,5mNAP

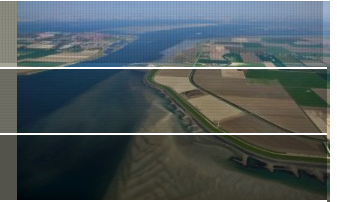
-13,5mNAP

-10,5mNAP

-7,5mNAP

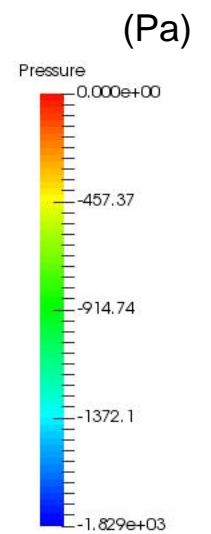
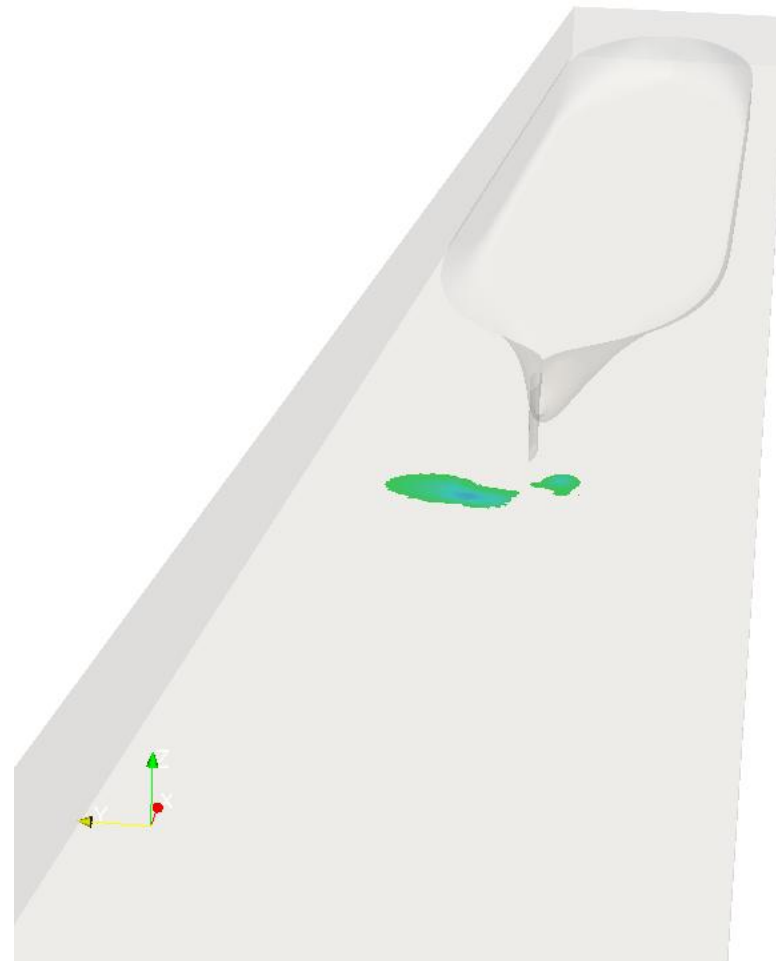
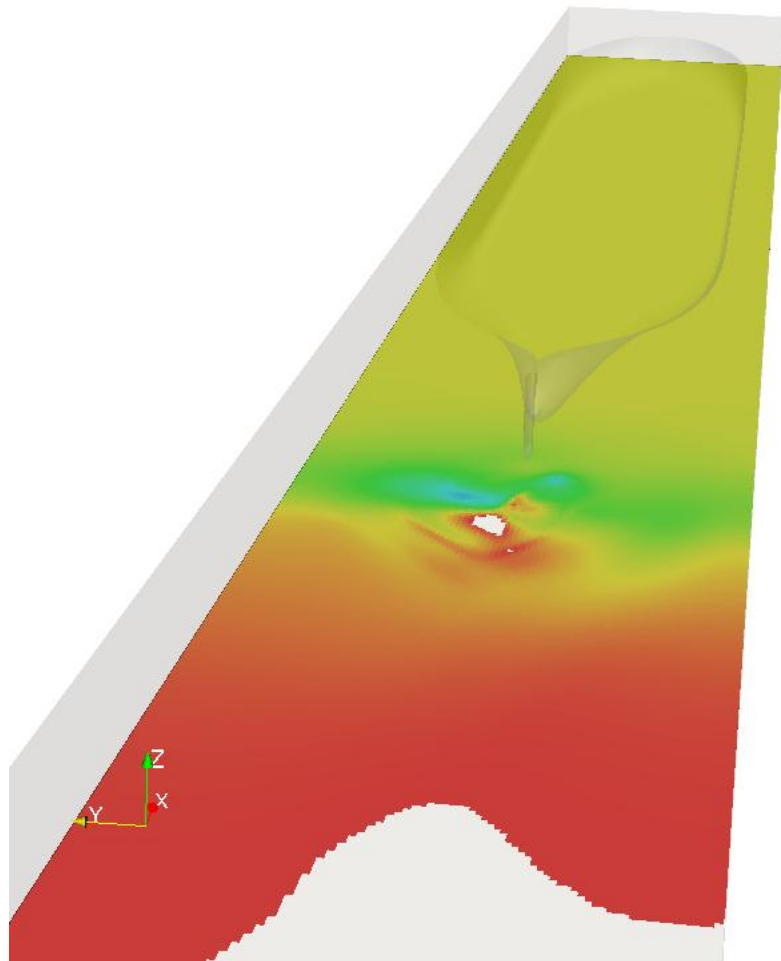


# Underpressure – Case 2

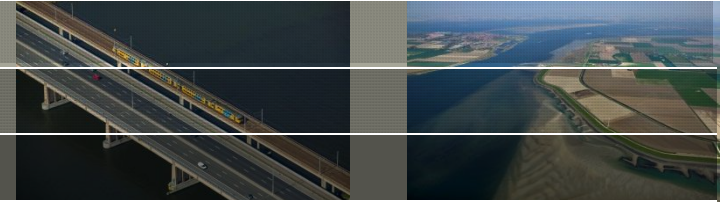


< 0 Pa

< -1000 Pa



# Case 3



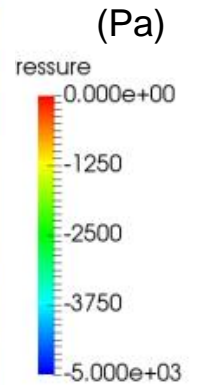
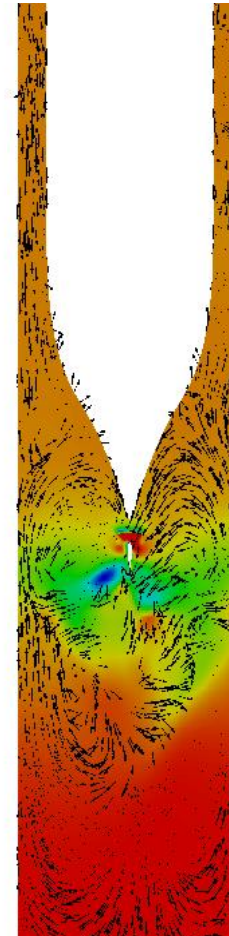
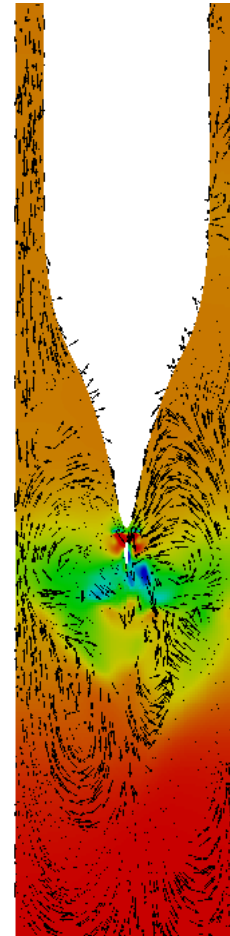
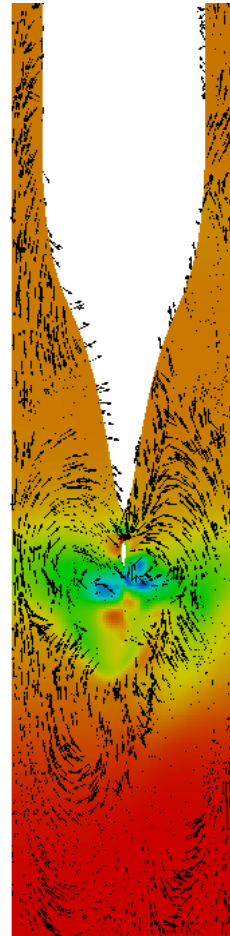
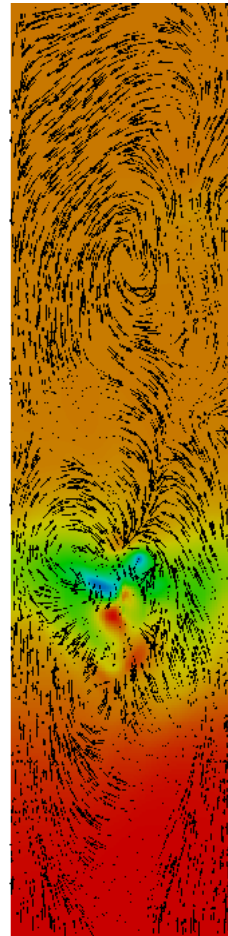
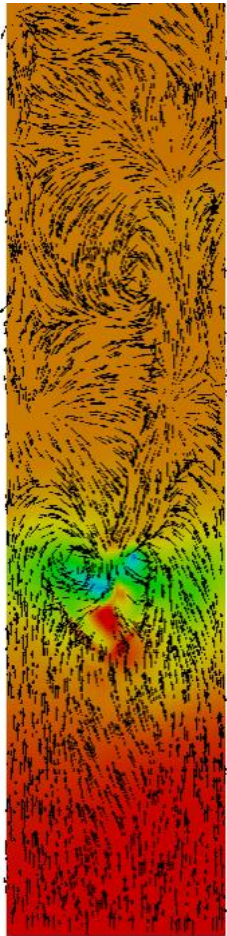
Floor

-15,5mNAP

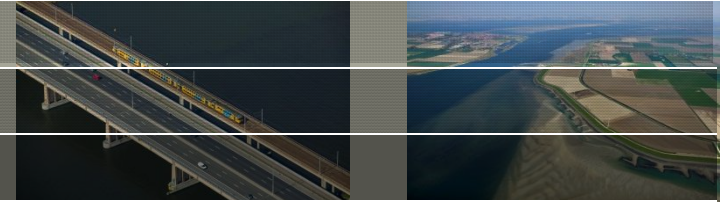
-13,5mNAP

-10,5mNAP

-7,5mNAP

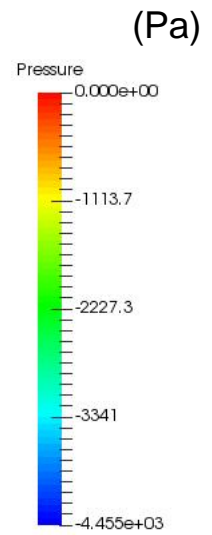
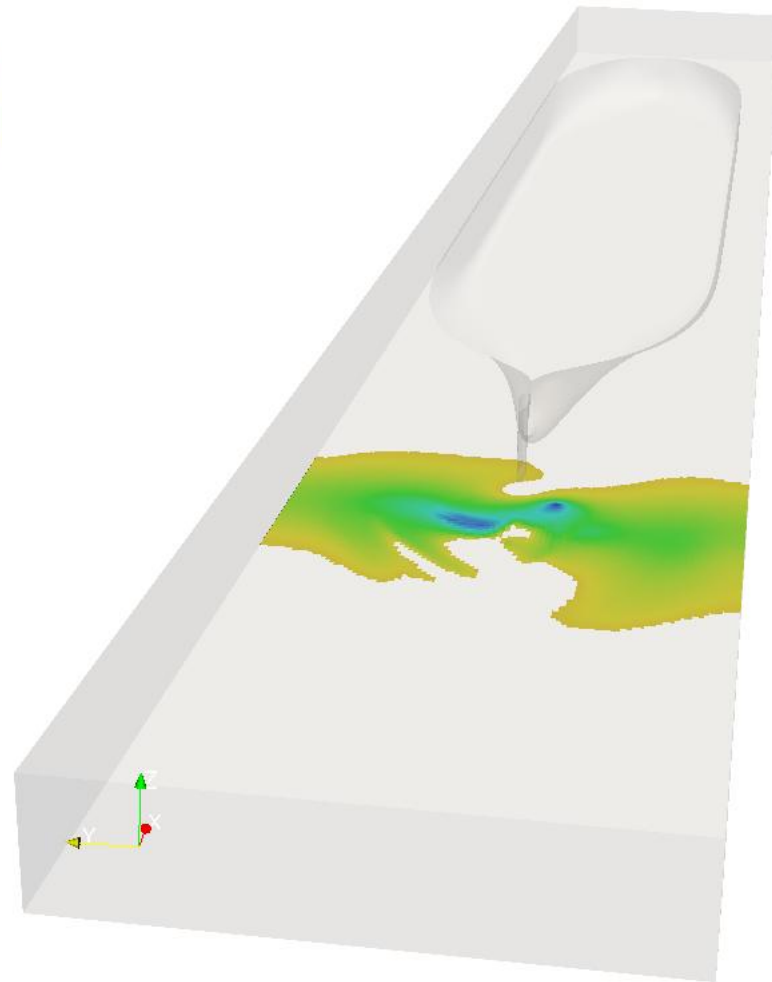
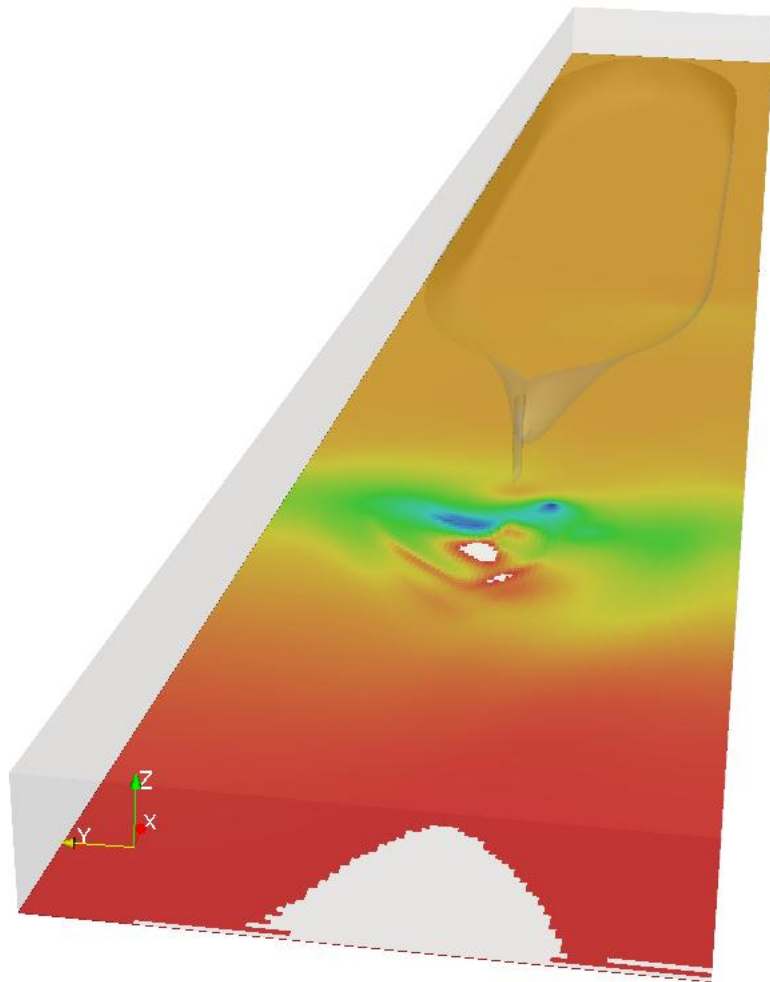


# Underpressure – Case 3



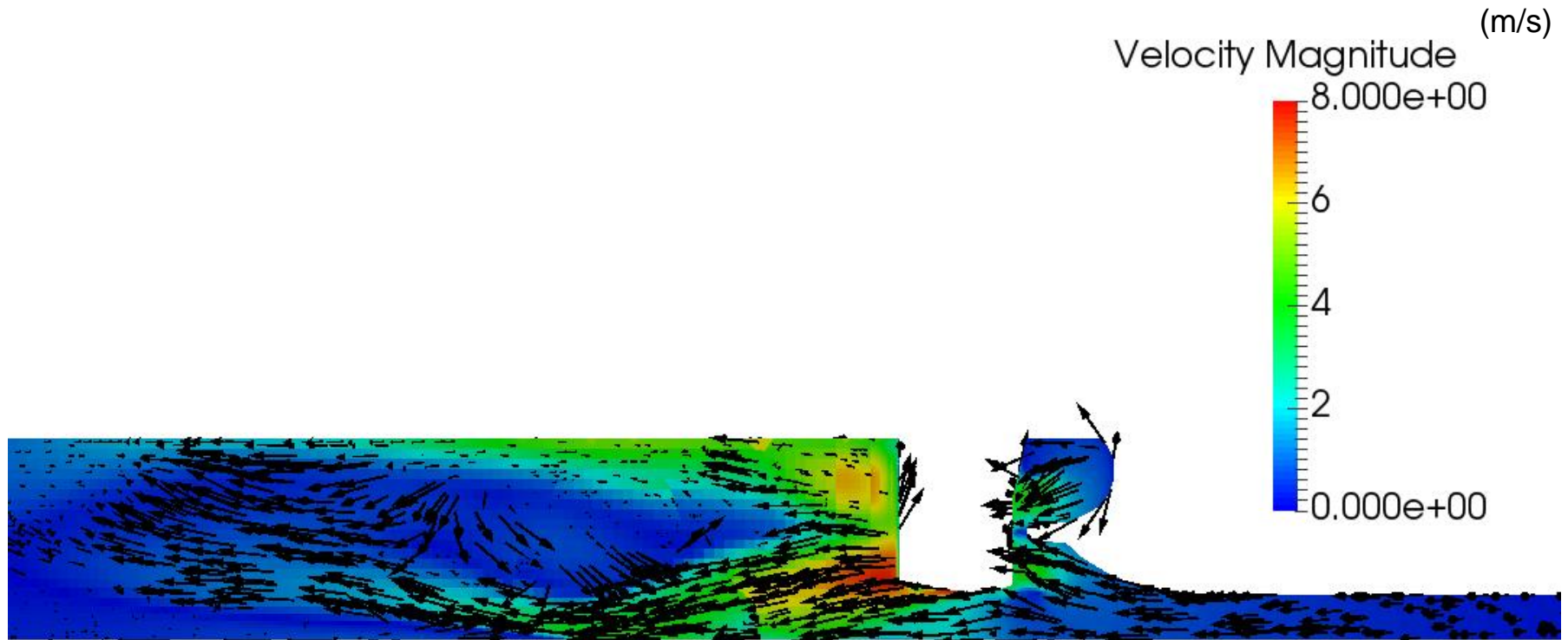
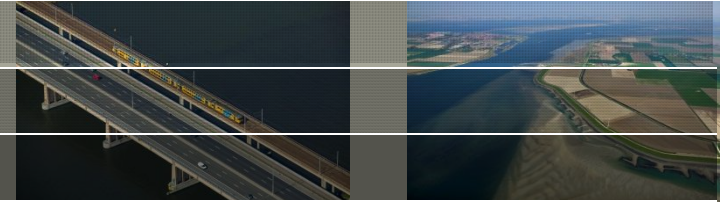
< 0 Pa

< -1000 Pa

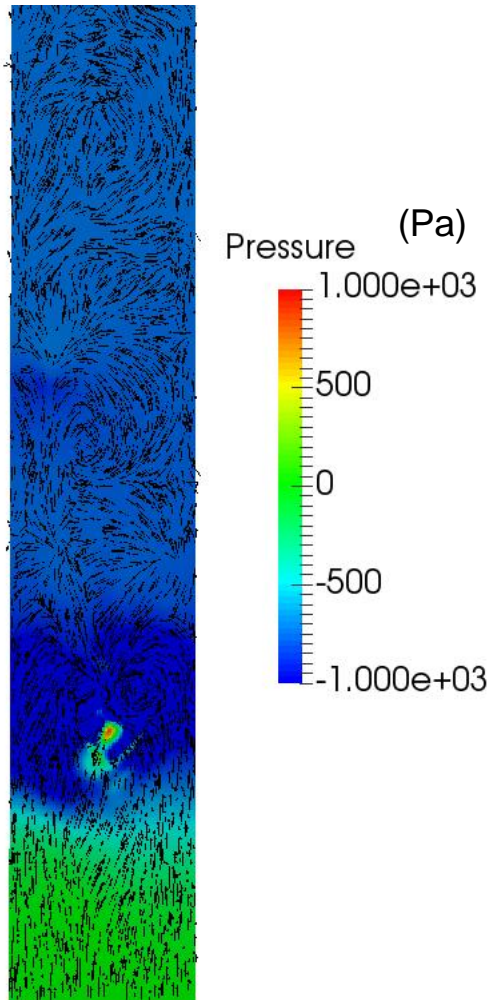
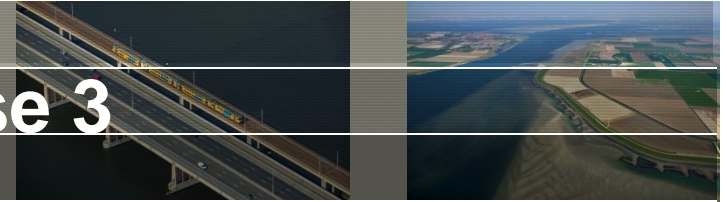




# Case 3

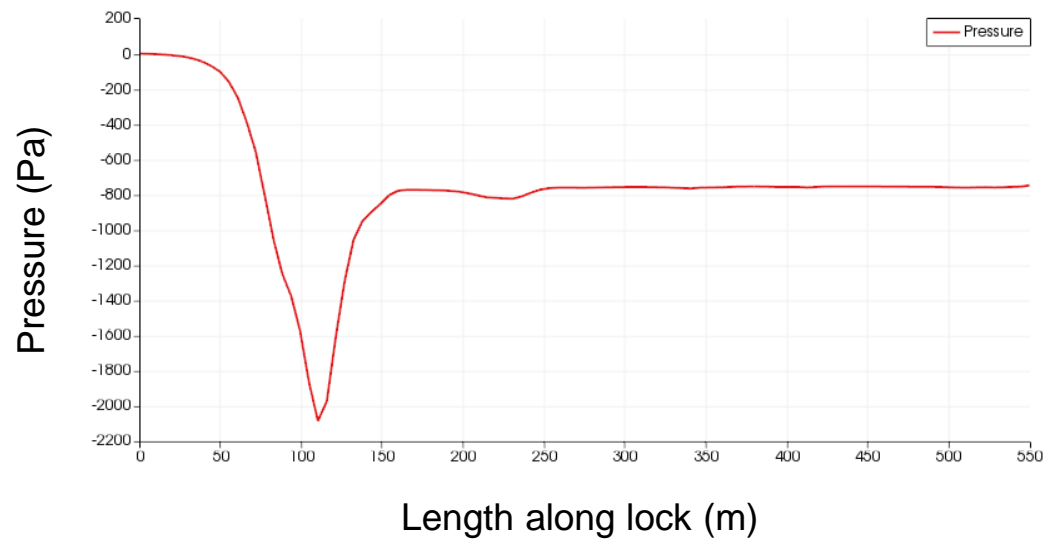


# Pressure along the lock – Case 3

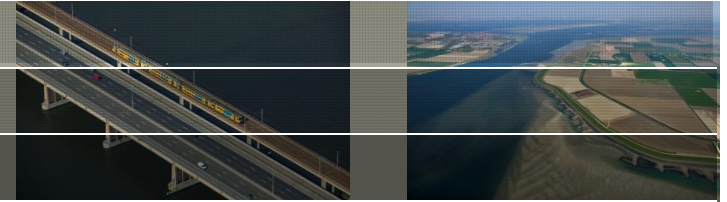


The pressure along the lock floor shows a large area of under pressure by the ship, as the flow is drawn towards the propeller. At the propeller and downstream the underpressure is greatest.

The pressure rises again in the part of the lock behind the stern



# Case 4



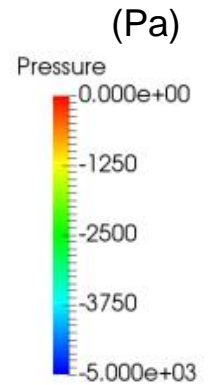
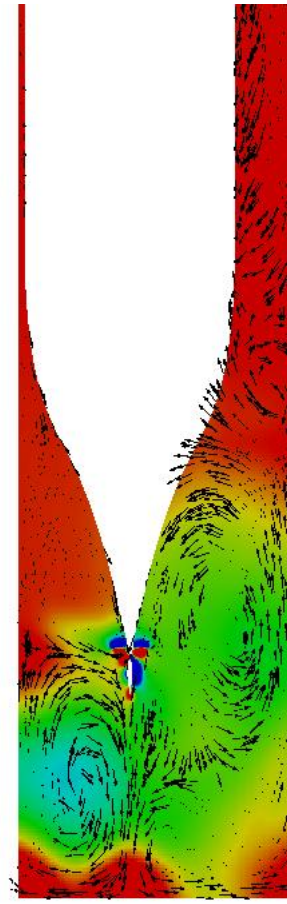
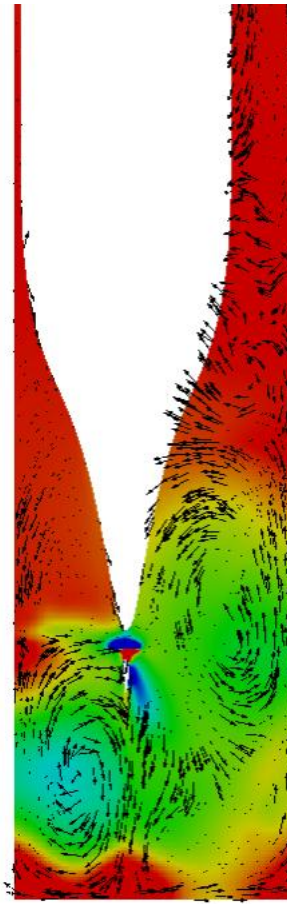
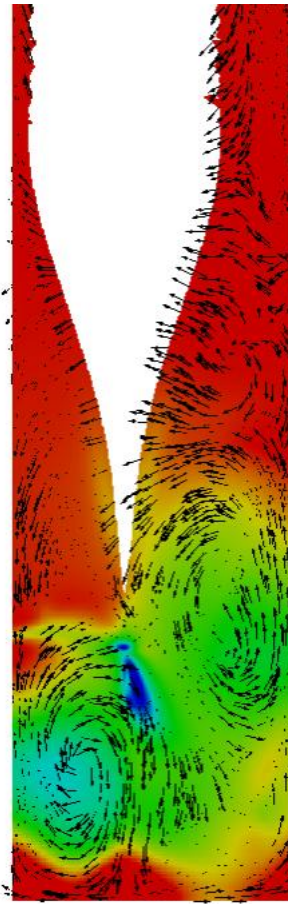
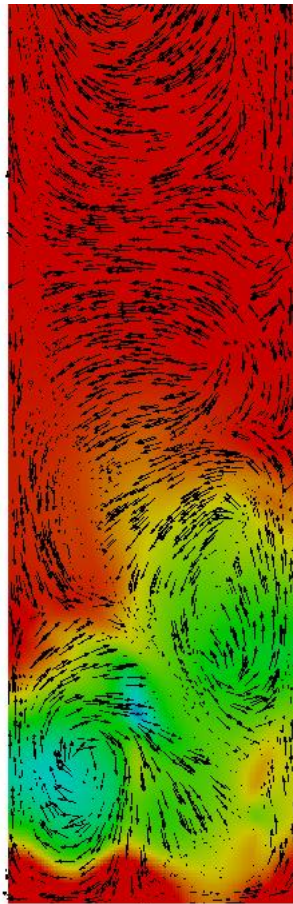
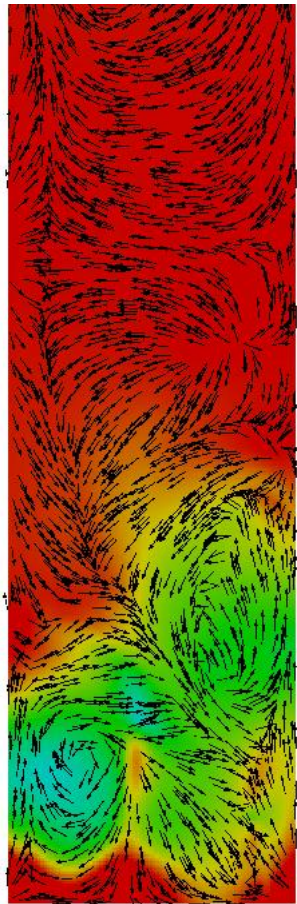
Floor

-16mNAP

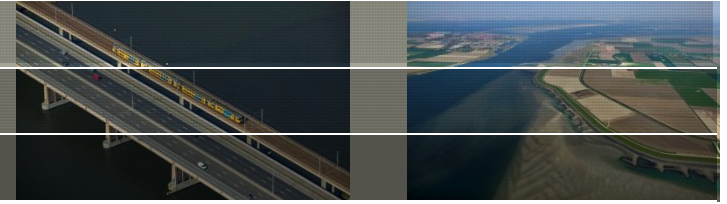
-13mNAP

-11mNAP

-8mNAP

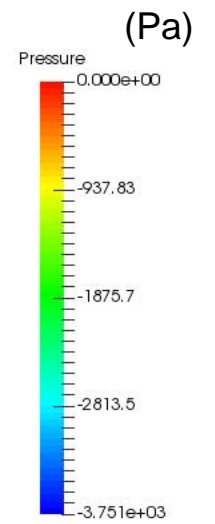
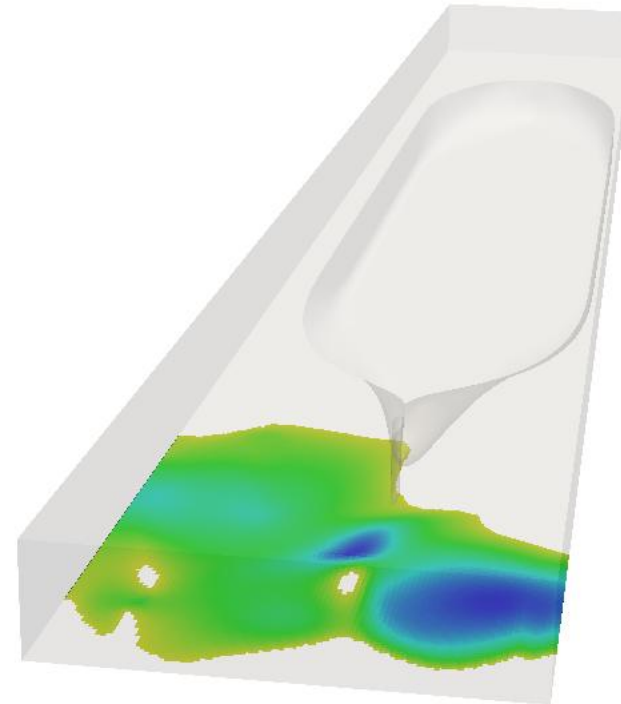
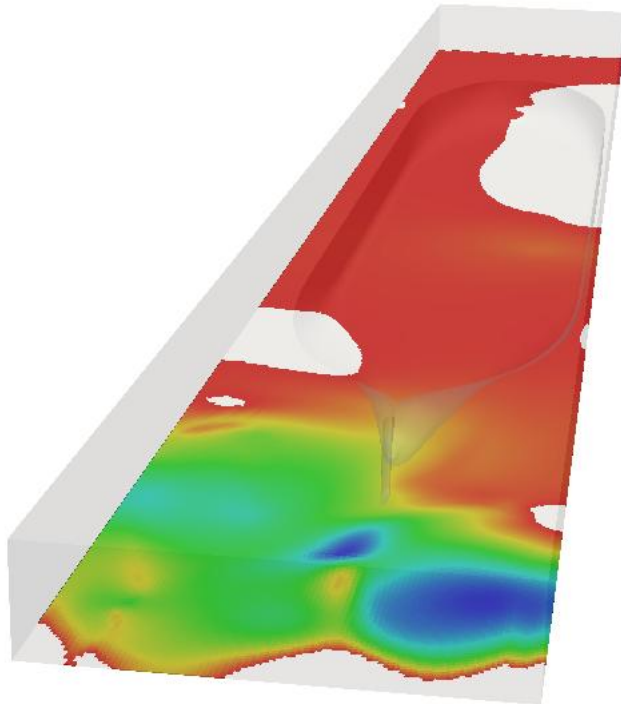


# Underpressure Case 4

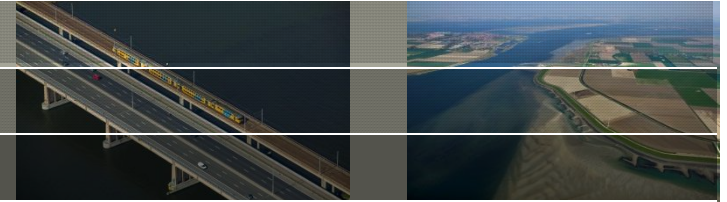


< 0 Pa

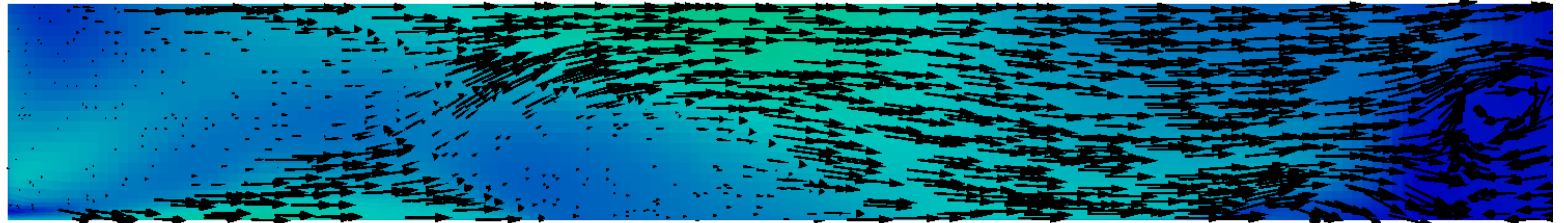
< -1000 Pa



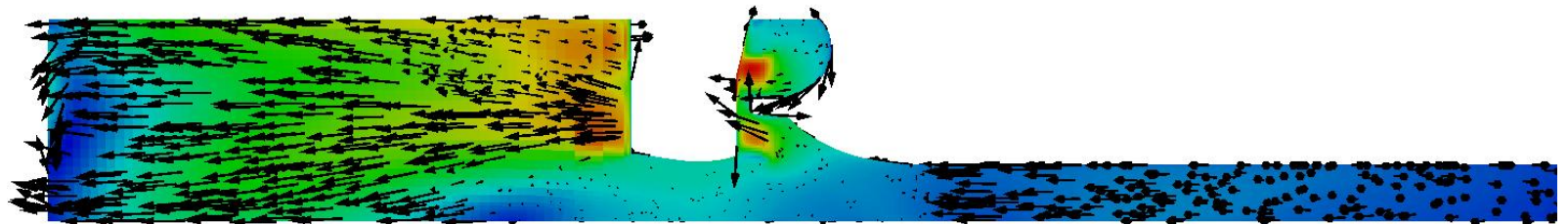
# Case 4 vertical cross section



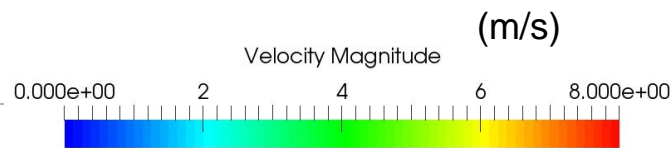
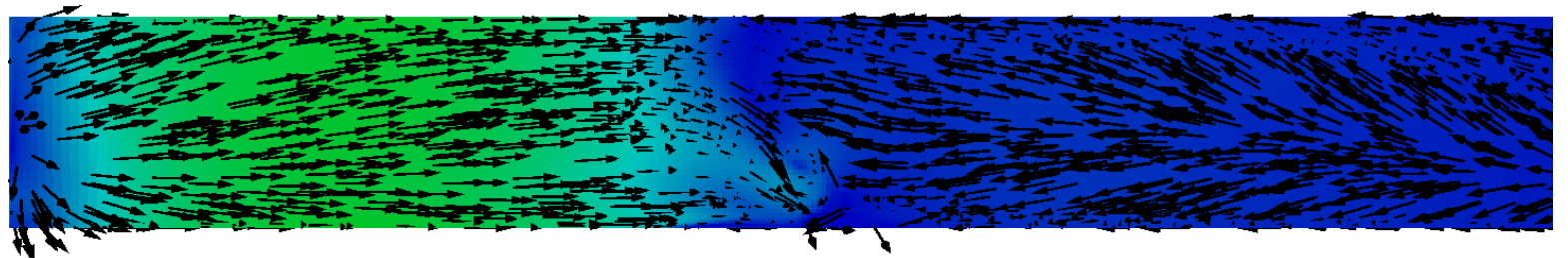
Wide side



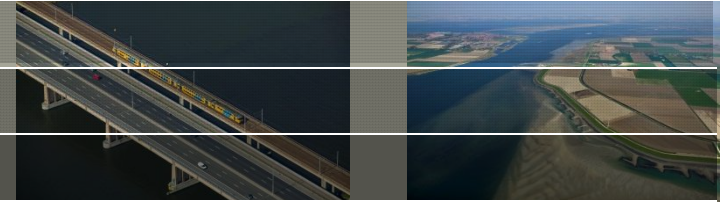
Ship axis



Narrow side



# Case 5



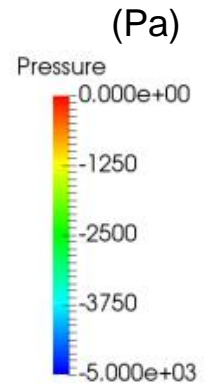
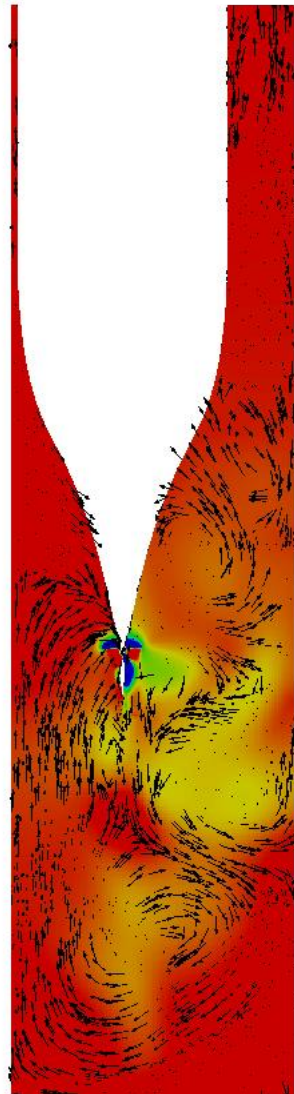
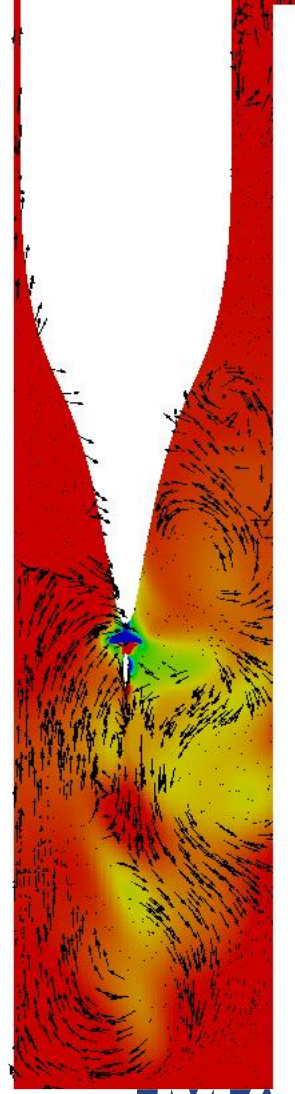
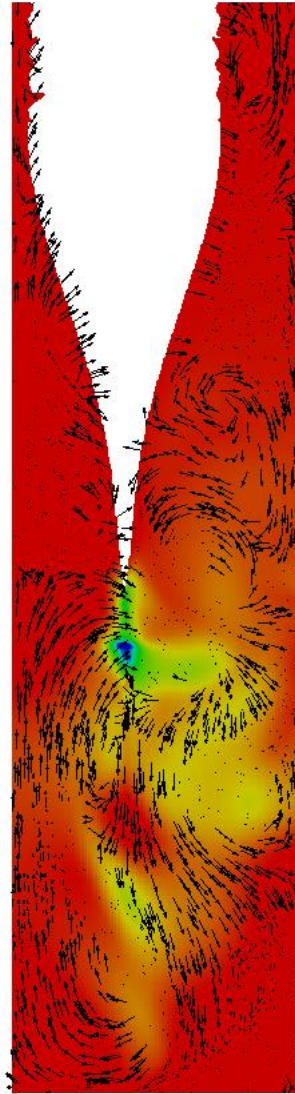
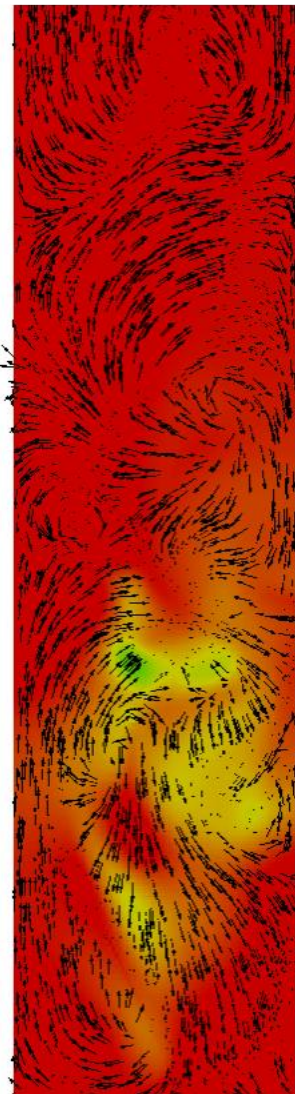
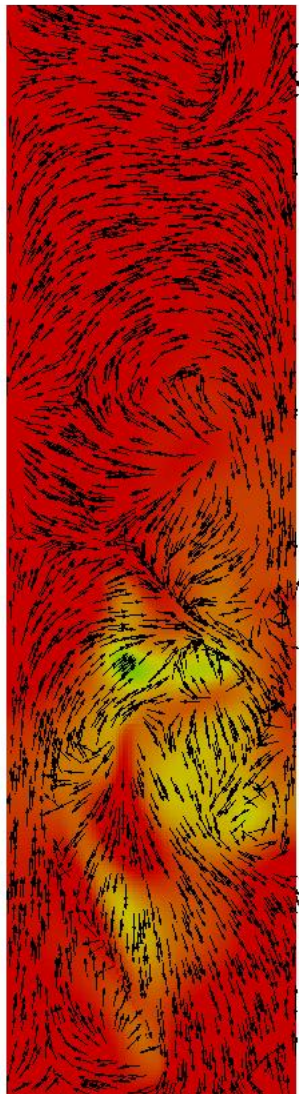
Floor

-16mNAP

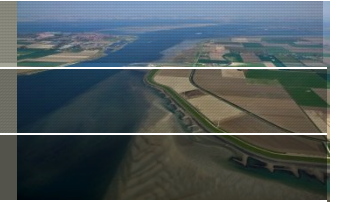
-13mNAP

-11mNAP

-8mNAP

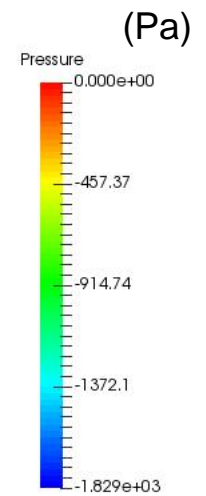
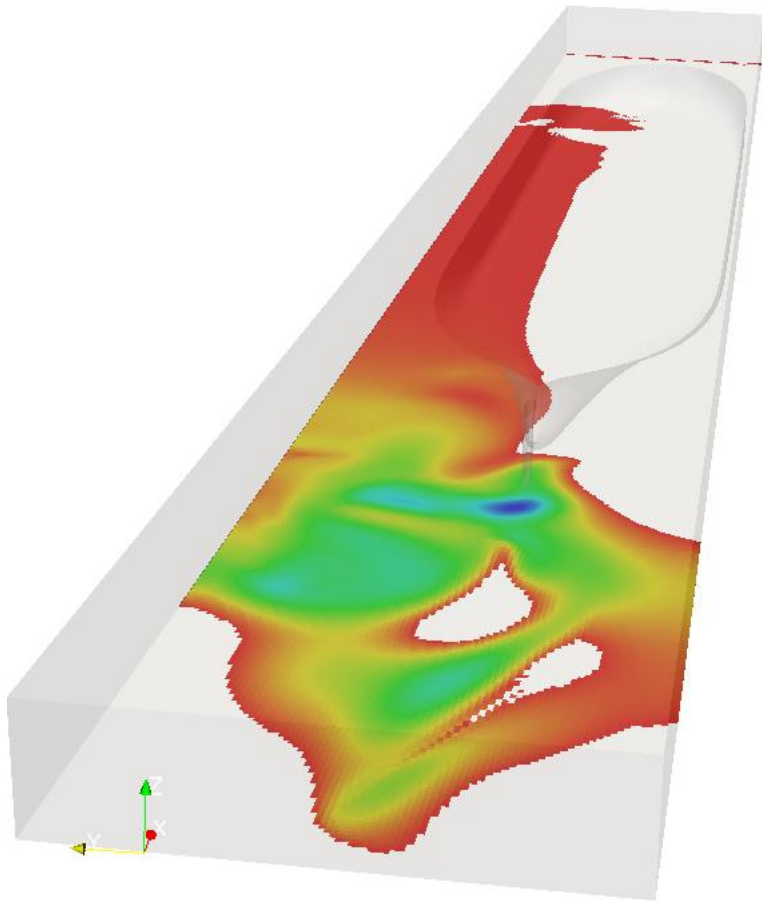


# Underpressure Case 5

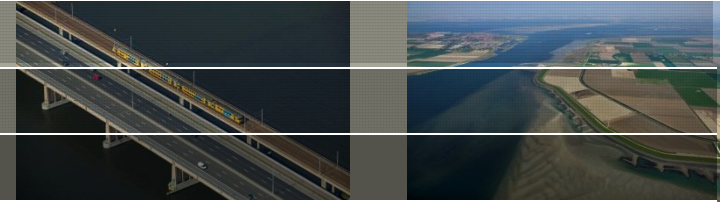


< 0 Pa

< -1000 Pa



# Case 6



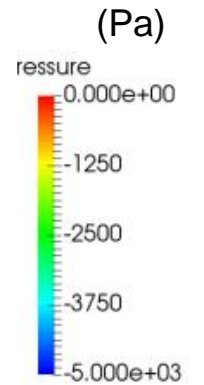
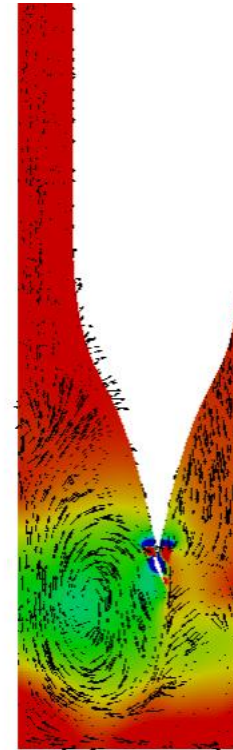
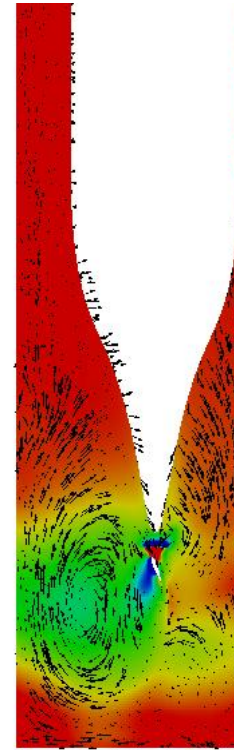
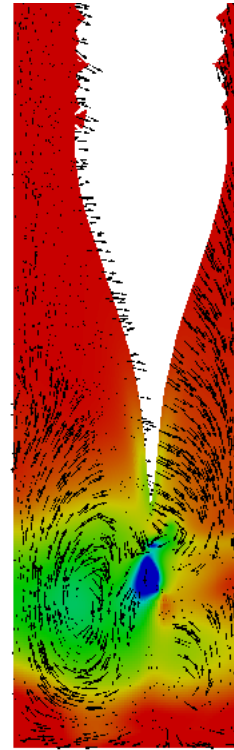
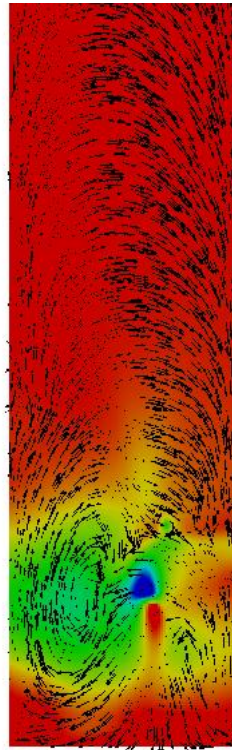
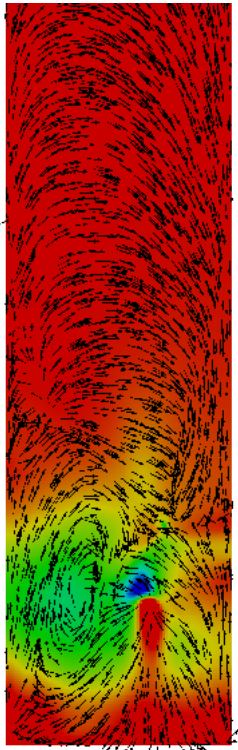
Floor

-16mNAP

-13mNAP

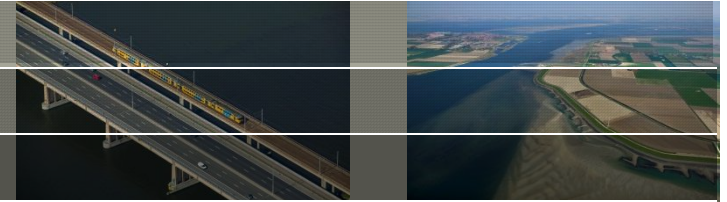
-11mNAP

-8mNAP



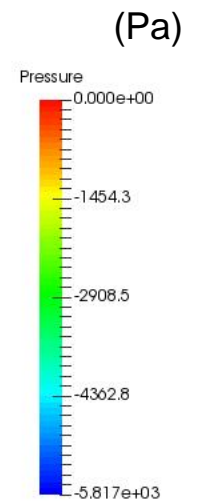
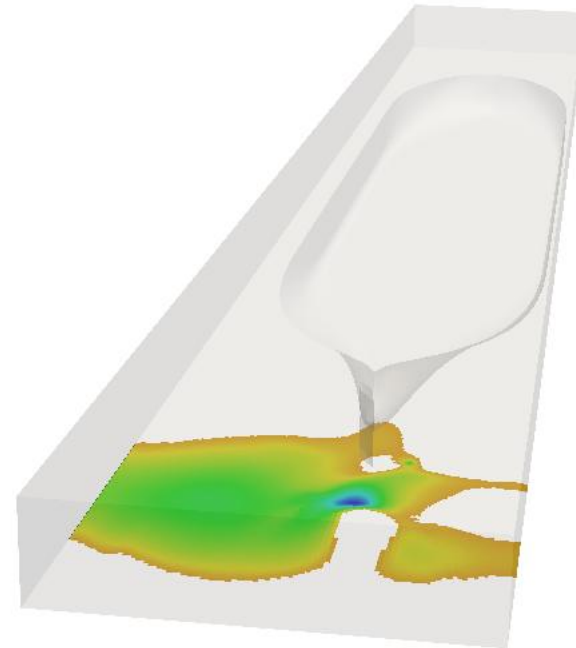
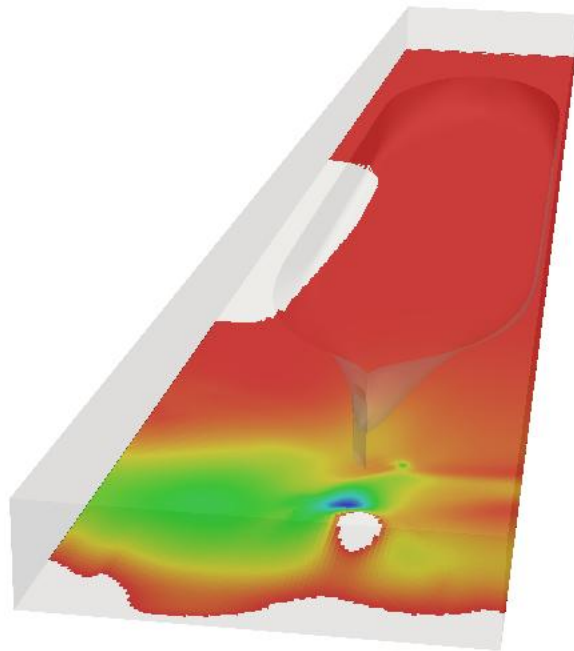


# Underpressure Case 6

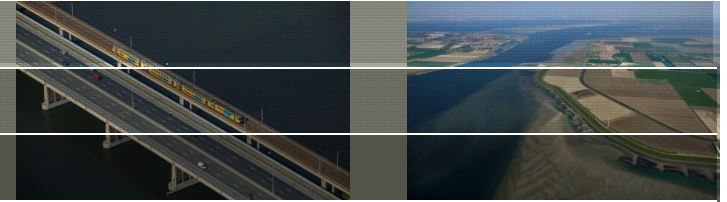


< 0 Pa

< -1000 Pa



# Areas of under pressure



Case	Area [m <sup>2</sup> ] (<0Pa)	Force [kN] (<0Pa)	Area [m <sup>2</sup> ] (<-1000Pa)	Force [kN] (<-1000Pa)	Area [m <sup>2</sup> ] (<-2000Pa)	Force [kN] (<-2000Pa)
1	36,198	18,601	1,420	1,633	-	-
2	35,102	15,574	220	255	-	-
3	37,725	28,917	3,114	5,007	597	1,541
4	30,386	12,210	4,991	10,203	2,391	6,263
5	15,612	4,138	998	1,161	-	-
6	34,714	8,344	3,243	6,260	1,379	3,668

The areas of underpressure are quantified by integrating the pressure over the area for which the pressure is below certain threshold values (0Pa, -1000Pa, -2000Pa). For the columns <-2000Pa for example the lock floor is clipped to the area for which the pressure is less than -2000Pa (that is to say an underpressure greater than 2000Pa). This area is calculated and the pressure integrated over this area to give a force on this area.

For the extreme cases of Case 4 and 6 we then get that a mean force of ~2kN/m<sup>2</sup> (mean ~20cm underpressure) is exerted over a large area (~3000m<sup>2</sup>) behind the stern of the ship.