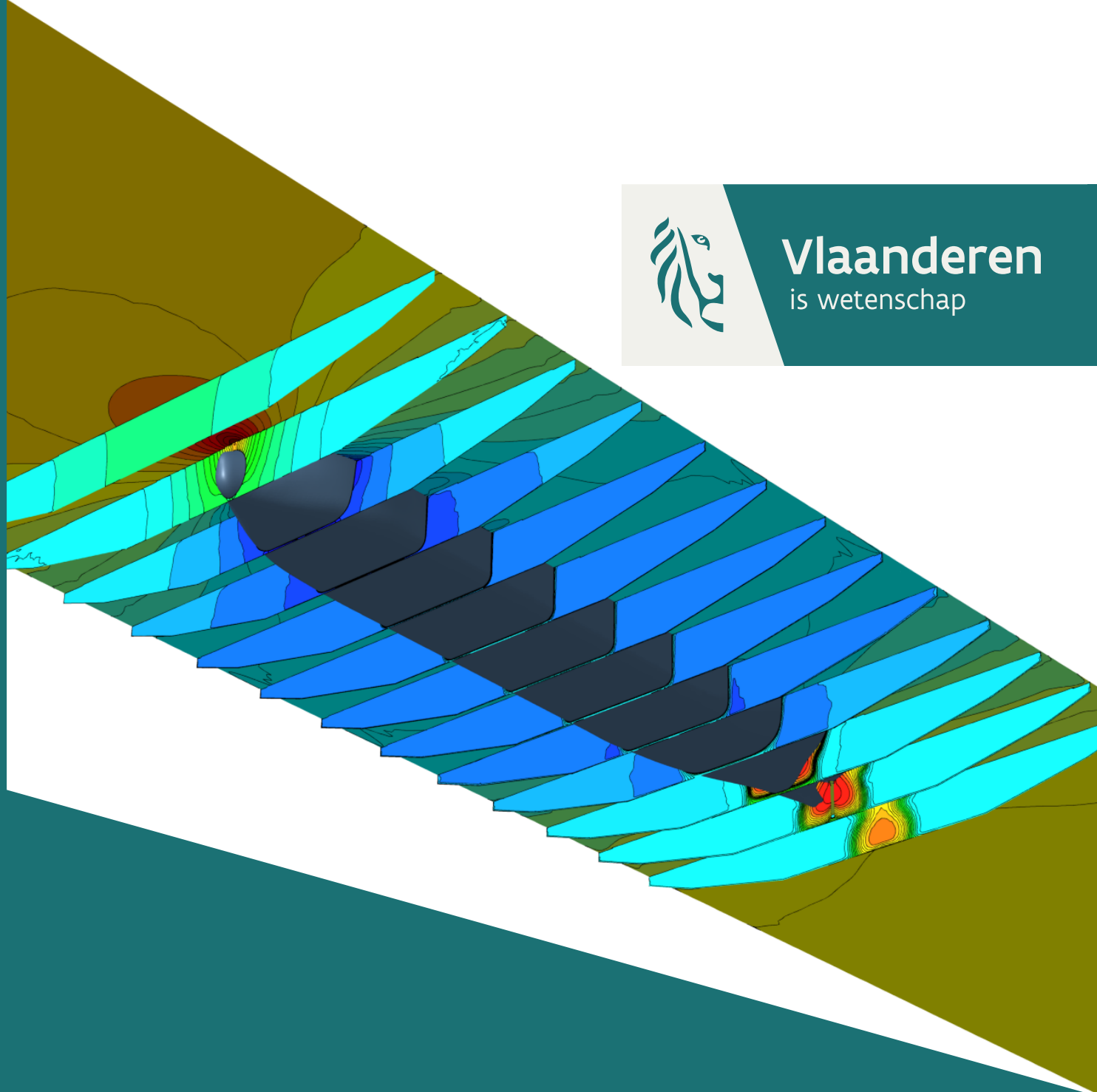




Vlaanderen
is wetenschap



26_025_1
WL Rapporten

Zelzate tunnel KGT: CFD simulaties scheepspassages

DEPARTEMENT
MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

Zelzatetunnel KGT: CFD simulaties scheepspassages

Van Hoydonck, W.; Verwilligen, J.; Meire, D.

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, 2026

D/2026/3241/235

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Van Hoydonck, W.; Verwilligen, J.; Meire, D. (2026). Zelzatatunnel KGT: CFD simulaties scheepspassages. Versie 2.0. WL Rapporten, 26_025_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

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

Documentidentificatie

Opdrachtgever:	Agentschap Maritieme Toegang - Investeren en Infrastructuur		Ref.:	WL2026R26_025_1
Trefwoorden (3-5):	Kanaal Gent-Terneuzen, Zelzatatunnel, CFD, scheepspassage, bodembescherming			
Kennisdomeinen:	Havens en waterwegen > Manoeuvreergedrag > Invloed kielspeling > Numerieke berekeningen Havens en waterwegen > Manoeuvreergedrag > Oevers > Numerieke berekeningen			
Tekst (p.):	36		Appendices (p.):	15
Vertrouwelijk:	Nee	☒ Online beschikbaar		
Auteur(s):	Van Hoydonck, W.			

Controle

	Name	Handtekening
Revisor(en):	Verwilligen, J.; Meire, D.	<div> <div>Signed by: Verwilligen Jeroen Raphaël L</div> <div>Signed at: 2026-09-14 12:23:41 +02:00</div> <div>Reason: Ik keur dit document goed</div> <div>Verwilligen Jeroen</div> <div>Vlaamse overheid</div> </div> <div> <div>Signed by: Meire Dieter Willy S</div> <div>Signed at: 2026-09-18 10:11:47 +02:00</div> <div>Reason: Ik keur dit document goed</div> <div>Meire Dieter</div> <div>Vlaamse overheid</div> </div>
Projectleider:	Van Hoydonck, W.	<div> <div>Signed by: Wim Van Hoydonck (Signature)</div> <div>Signed at: 2026-09-14 11:24:11 +02:00</div> <div>Reason: Ik keur dit document goed</div> <div>Van Hoydonck Wim</div> <div>Vlaamse overheid</div> </div>

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Bellafkih, A.	<div> <div>Signed by: Bellafkih Abdelkarim</div> <div>Signed at: 2026-09-14 11:42:17 +02:00</div> <div>Reason: Ik keur dit document goed</div> <div>Bellafkih Abdelkarim</div> <div>Vlaamse overheid</div> </div>
-----------------	---------------	---

Abstract

Een deel van de deklaag boven de Zelzatetunnel in het Kanaal Gent-Terneuzen is door scheepvaartverkeer geërodeerd. Dit rapport begroot met behulp van Computational Fluid Dynamics (CFD) de belasting op de kanaalbodem door passage van maatgevende schepen ($B = 32.2$ m en $B = 38$ m bij diepgangen van $T = 10$ m en $T = 12.5$ m) voor vier vaste percentages van de kritische snelheid. De invloed van diepgang, passeersnelheid, kanaalprofiel en voortstuwing wordt onderzocht. Belasting op de centrale tunnelmoten veroorzaakt door de hydrodynamische druk van een passerend schip resulteert in een significante opwaartse kracht (zuiging) en een moment om de langsas van de tunnel. De dusdanig berekende piekbelastingen werden uitgezet tegen de passeersnelheid. De resultaten tonen duidelijk de belangrijke impact van vaarsnelheid op de tunnelbelasting.

Op basis van de snelheid in de dwarssectie bij het scheepsmidden werd de gemiddelde retourstroming bepaald met de CFD resultaten en vergeleken met een simpele 1D schatting (zonder waterspiegeldaling) en literatuurformules die de waterspiegeldaling naast het schip in rekening brengt. Uit deze resultaten volgt dat de retourstroming berekend met CFD een goede overeenkomst geeft met de literatuurformules en dat de 1D schatting steeds een significante onderschatting geven van de retourstroming.

De waterspiegeldaling nabij de oever bij passage van een schip werd vergeleken met recent uitgevoerde in-situ metingen (Meire *e.a.*, 2026) en een gemiddelde waterspiegeldaling naast het schip op basis van literatuur. Uit de CFD-berekeningen volgt dat voor gelijke percentages van de kritische snelheid, de waterspiegeldalingen zeer vergelijkbaar zijn. De CFD-resultaten komen goed overeen met de in-situ metingen, waar opgemerkt moet worden dat voor deze laatste weinig data beschikbaar is voor de grootste blockages. Voor de kleinste diepgang en breedte komen de waarden goed overeen met schattingen op basis van literatuur, terwijl voor grotere diepgangen en/of scheepsbreedtes, de afwijkingen iets groter worden (tot maximaal 0.04 m).

De schuifspanning op de bodem veroorzaakt door een scheepspassage werd ook onderzocht. Bij kleine kielspelingen vermindert de schuifspanning op de bodem onder de romp doordat de grenslaag onder de romp interageert met de bodem waardoor de retourstroming onder de romp door deels geblokkeerd wordt. Erosie van de deklaag boven de Zelzatetunnel vergroot de ruimte tussen romp en bodem, waardoor de retourstroming onder de romp meer vrij spel krijgt. Een nadeel van varen bij hoge diepgangen is dat het zog achter het schip zich vanaf het wateroppervlak tot de bodem uistrekt en nabij de bodem resulteert in significante snelheidsgradienten en schuifspanningen.

De resultaten uit dit rapport kunnen meegenomen te worden in het ontwerp van de bescherming boven de Zelzatetunnel.

Inhoudsopgave

Abstract	III
Lijst van figuren	VI
Lijst van tabellen	VIII
Nomenclatuur	IX
1 Inleiding	1
2 Simulatie condities	2
2.1 Scheepsgeometrie	2
2.2 Kanaalgeometrie	2
2.3 Kritische snelheden en retourstroom	5
2.4 Vaarsnelheden	5
2.5 Simulatie condities en aannames	6
3 Grid generatie en solver settings	9
3.1 Domein afmetingen	9
3.2 Grid generatie	10
3.2.1 Initieel Cartesisch grid	10
3.2.2 Grid verfijningen	10
3.2.3 Viscieuze lagen	11
3.2.4 Grid extrusie	13
3.3 Solver instellingen	13
3.3.1 Randvoorwaarden	14
3.3.2 Actuator disk instellingen	14
3.3.3 Tijdstap en aantal stappen	15
3.3.4 Output	15
4 Resultaten	16
4.1 Waterspiegelstand rondom het schip	16
4.2 Drukverdeling op bodem en oevers	18
4.3 Kracht- en momentverloop op de tunnelmoten bij passage van een schip	19
4.4 Schuifspanning op de bodem	23
4.5 Retourstroming	24
4.6 Invloed van voortstuwing	30
4.7 Invloed van kanaalsectie profiel	30
5 Conclusies	34
Referenties	36
B1 Resultaten	B1
B1.1 Waterstandsdeling bij passage van een schip	B1
B1.2 Drukverdeling op de bodem en oevers	B4
B1.3 Verloop in de tijd van krachten en momenten op het dak van tunnelmoten 13 en 14 bij passage van een schip	B6

B1.4 Schuifspanning op de bodem	B10
B1.5 Retourstroming	B12
B1.6 Maximale belastingen op moten 13 en 14	B12

Lijst van figuren

Figuur 1	Zijaanzicht van de naakte romp van het bulkschip Mexico (T01) en het vereenvoudigde roer (met afmetingen voor het prototype schip met $B = 45$ m).....	2
Figuur 2	Nominale sectie kanaal Gent-Terneuzen met oud en nieuw profiel van de doortocht van Zelzate (Ministerie van Openbare Werken/Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1968).	3
Figuur 3	Theoretische sectie van het kanaal Gent-Terneuzen ter plaatse van de Zelzatetunnel met dwarsprofielen van maatgevende schepen.	3
Figuur 4	Dieptelijnen peiling 12/2025 ten opzichte van kanaalpeil (4.45 mTAW) met aanduiding van secties met kleinste vaarwegsectie ($s = 1920$ m, groen) en kleinste breedte op diepte 12.5 m ($s = 2015$ m, blauw).	4
Figuur 5	Sectie 1920 ter plaatse van de Zelzatetunnel met dwarsprofielen van maatgevende schepen.	4
Figuur 6	Sectie 2015 ter plaatse van de Zelzatetunnel met dwarsprofielen van maatgevende schepen.	4
Figuur 7	Zijaanzicht van het rekendomein voor beide scheepslengtes (bij $T = 10$ m). De streeplijn geeft het waterniveau aan in het kanaal.....	9
Figuur 8	Visualisatie van het grid bij het voorschip (links) en het achterschip (rechts) voor cases 1 tot 4.	11
Figuur 9	Visualisatie van het grid nabij de steven van het schip met extra verfijningssectoren bij de propeller en het propeller zog voor case 18 ($B = 38$ m & $T = 10$ m).	12
Figuur 10	Vergelijking van de rekenroosters in een dwarssectie van het rekendomein voor de theoretische sectie en sectie 1920 voor $T = 10$ m en $B = 32.2$ m.....	12
Figuur 11	Illustratie van de extrusies van het korte domein voor $B = 32.2$ m	13
Figuur 12	T01 propeller open-water karakteristieken.....	15
Figuur 13	Waterspiegel rond het schip voor case 11.....	16
Figuur 14	Invloed van de snelheid op de waterstand bij passage van een schip.....	17
Figuur 15	Vergelijking van waterstandsverlaging gemeten nabij de kade voor de numerieke resultaten, in-situ metingen (Meire <i>e.a.</i> , 2026) en schattingen op basis van literatuur (Waterloopkundig Laboratorium, 1997).	17
Figuur 16	Hydrodynamische drukcoëfficiënt C_p op de bodem en oevers voor cases 3 en 7.....	18
Figuur 17	Hydrodynamische drukcoëfficiënt C_p op de bodem en oevers voor cases 11 en 15.....	19
Figuur 18	Vergelijking van de relatieve snelheid in het symmetrievlak van het schip voor $B = 32.2$ m bij kleine (boven) en grote diepgang (onder), respectievelijk case 3 en 11. Bij $T = 10$ m is er significante retourstroming onder de romp welke bij $T = 12.5$ m vrijwel ontbreekt.	19
Figuur 19	Bovenaanzicht en lengteprofiel van de tunnel met nummering van de tunnelmoten, uit Maes <i>e.a.</i> (2026).	20
Figuur 20	Opdeling bodemvlak rekendomein in delen die overeenkomen met tunnelmoten 13 en 14 voor de bepaling van krachten en momenten ten gevolge van hydrodynamische belasting bij een scheepspassage.....	21
Figuur 21	Verloop in de tijd van verticale kracht F_z en momenten M_x en M_y ten gevolge van de hydrodynamische belasting bij een scheepspassage voor cases 3, 7, 11 en 15.	22
Figuur 22	Maximale waarde van verticale kracht F_z en extremen van momenten M_y op tunnelmoot 13 veroorzaakt door de hydrodynamische belasting bij een scheepspassage.	22
Figuur 23	Maximale waarde van verticale kracht F_z en extremen van momenten M_y op tunnelmoot 14 veroorzaakt door de hydrodynamische belasting bij een scheepspassage.	23
Figuur 24	Schuifspanning op de bodem en oevers bij passage van een schip voor cases 3 en 7.	24
Figuur 25	Schuifspanning op de bodem en oevers bij passage van een schip voor cases 11 en 15.	25
Figuur 26	Vergelijking tussen theoretische sectie van het kanaal ter plaatse van de Zelzatetunnel en een vereenvoudigde sectie met zelfde oppervlak en breedte bij de waterspiegel.....	25

Figuur 27	Longitudinale component van de retourstroming rond het schip voor cases 3 en 7 (V_2 en $T = 10$ m). Negatieve snelheden betekenen dat water in tegengestelde richting van het schip in het kanaal beweegt (retourstroming), water met een positieve snelheid beweegt met het schip mee.	27
Figuur 28	Longitudinale component van de retourstroming rond het schip voor cases 11 en 15 (V_2 en $T = 12.5$ m). Negatieve snelheden betekenen dat water in tegengestelde richting van het schip in het kanaal beweegt (retourstroming), water met een positieve snelheid beweegt met het schip mee.	28
Figuur 29	Vergelijking tussen 1D, literatuur en CFD berekening van de gemiddelde retourstroming voor cases 1 tot 16 als functie van de scheepssnelheid.....	29
Figuur 30	Drukverdeling op de bodem voor case 18 ($B = 38$ m en $T = 10$ m) met voortstuwing.	30
Figuur 31	Verdeling van de schuifspanning op de bodem voor case 18 ($B = 38$ m en $T = 10$ m) met voortstuwing.	31
Figuur 32	Retourstroming rond het schip voor case 18 ($B = 38$ m en $T = 10$ m) met voortstuwing.	31
Figuur 33	Vergelijking tussen de schuifspanning op de bodem voor dezelfde conditie in de theoretische kanaalsectie en sectie 1920.	32
Figuur 34	Retourstroming rond het schip voor cases 24 en 26.	33
Figuur 35	Waterstandsaling rond het schip voor cases 1 tot 8.	B1
Figuur 36	Waterstandsaling rond het schip voor cases 9 tot 16.....	B2
Figuur 37	Waterstandsaling rond het schip voor cases 17 tot 20 (inclusief voortstuwing).....	B3
Figuur 38	Waterstandsaling rond het schip voor cases 21 en 22 (sectie 1920) en 23 tot 26 (sectie 2015).	B3
Figuur 39	Verdeling van C_p op bodem en oevers voor $T = 10$ m.....	B4
Figuur 40	Verdeling van C_p op bodem en oevers voor $T = 12.5$ m.....	B4
Figuur 41	Verdeling van C_p op bodem en oevers voor cases 17 tot 20 (inclusief voortstuwing).	B5
Figuur 42	Verdeling van C_p op bodem en oevers voor cases 21 en 22 (sectie 1920) en 23 tot 26 (sectie 2015).....	B5
Figuur 43	Verloop in de tijd van verticale kracht F_z en momenten M_x en M_y ten gevolge van de hydrodynamische belasting bij een scheepspassage voor cases 1, 2, 3 en 4 ($T = 10$ m & $B = 32.2$ m).	B6
Figuur 44	Verloop in de tijd van verticale kracht F_z en momenten M_x en M_y ten gevolge van de hydrodynamische belasting bij een scheepspassage voor cases 5, 6, 7 en 8 ($T = 10$ m & $B = 38$ m).	B7
Figuur 45	Verloop in de tijd van verticale kracht F_z en momenten M_x en M_y ten gevolge van de hydrodynamische belasting bij een scheepspassage voor cases 9, 10, 11 en 12 ($T = 12.5$ m & $B = 32.2$ m).	B7
Figuur 46	Verloop in de tijd van verticale kracht F_z en momenten M_x en M_y ten gevolge van de hydrodynamische belasting bij een scheepspassage voor cases 13, 14, 15 en 16 ($T = 12.5$ m & $B = 38$ m).....	B8
Figuur 47	Verloop in de tijd van verticale kracht F_z en momenten M_x en M_y ten gevolge van de hydrodynamische belasting bij een scheepspassage voor cases 17 tot 20 (met propulsie).	B8
Figuur 48	Verloop in de tijd van verticale kracht F_z en momenten M_x en M_y ten gevolge van de hydrodynamische belasting bij een scheepspassage voor cases 21 en 22 (sectie 1920) en 23 tot 26 (sectie 2015).	B9
Figuur 49	Verdeling van schuifspanning op bodem en oevers voor $T = 10$ m.....	B10
Figuur 50	Verdeling van schuifspanning op bodem en oevers voor $T = 12.5$ m.	B10
Figuur 51	Verdeling van schuifspanning op bodem en oevers voor cases 17 tot 20 (incl. voortstuwing).	B11
Figuur 52	Verdeling van schuifspanning op bodem en oevers voor cases 21 en 22 (sectie 1920) en 23 tot 26 (sectie 2015).	B11
Figuur 53	Verdeling van retourstroming rond het schip voor $T = 10$ m.....	B12
Figuur 54	Verdeling van retourstroming rond het schip voor $T = 12.5$ m.	B13
Figuur 55	Verdeling van retourstroming rond het schip met voortstuwing.	B14
Figuur 56	Verdeling van retourstroming rond het schip in secties gebaseerd op peilingen.	B14

Lijst van tabellen

Tabel 1	Kritische snelheid in theoretische sectie Kanaal Gent-Terneuzen ter plaatse van de Zelzatetunnel.	5
Tabel 2	Selectie van snelheden voor de verschillende maatgevende schepen.	6
Tabel 3	Naamgeving CFD berekeningen in theoretische en werkelijke kanaalsectie met voor CFD relevante karakteristieken.....	7
Tabel 4	Cel grootte als functie van verfijningsniveau.	10
Tabel 5	Surface refinement settings.	11
Tabel 6	Finale groottes van de rekenroosters.	13
Tabel 7	Actuator disk instellingen (alle afmetingen in m).	15
Tabel 8	Relevante afmetingen van de tunnelmoten centraal onder het kanaal Gent-Terneuzen (Sweco bv, 2026).	20
Tabel 9	Retourstroming (m/s) en hydrodynamische druk (Pa) berekend met de wet van Bernoulli (Maes <i>e.a.</i> , 2026)) en hydrodynamische druk gebaseerd op scheepssnelheid voor de eerste 16 CFD-berekeningen. Kolom $\bar{V}_{cf\bar{d}}$ toont de gemiddelde retoursnelheid in een dwarssectie van het kanaal bij het scheepsmidden op basis van de CFD resultaten en de laatste twee kolommen tonen de resultaten op basis van literatuur formules (gemiddelde retourstroming en waterspiegeldaling (m)) (Waterloopkundig Laboratorium, 1997).....	26
Tabel 10	Extreme belastingen F_z , M_x en M_y op tunnelmoten 13 en 14.....	B15

Nomenclatuur

Afkortingen

AD	Actuator Disk (trekkende schijf)
aMT	Agentschap Maritieme Toegang
CAD	Computer Aided Design
CFD	Computational Fluid Dynamics
ISA	International Standard Atmosphere
ITTC	International Towing Tank Conference
WL	Waterbouwkundig Laboratorium

Latijnse symbolen

$\mathcal{R}$	Slankheid, $\frac{b^2}{S}$	—
A_s	Dwarsoppervlak schip ($B \times T$)	m^2
A_w	Oppervlakte kanaaldoorsnede	m^2
B	Scheepsbreedte	m
b	Spanwijdte/roerhoogte	m
Fr	Froude number, $\frac{V_{ref}}{\sqrt{gL_{ref}}}$	—
$Fr_{h,crit}$	Diepte-gebaseerd kritisch Froude getal	—
g	Zwaartekrachtversnelling	m/s^2
h	Waterdiepte	m
L_{pp}	Lengte tussen de loodlijnen	m
L_{ref}	Referentie lengte	m
m_1	blockage	—
Re	Reynolds number, $\frac{\rho V_{ref} L_{ref}}{\mu}$	—
T	Diepgang	m
UKC	Kielspeling	—
V_1	Vaarsnelheid bij $0.610V_{crit}$	m/s
V_2	Vaarsnelheid bij $0.586V_{crit}$	m/s
V_3	Vaarsnelheid bij $0.521V_{crit}$	m/s
V_4	Vaarsnelheid bij $0.463V_{crit}$	m/s
V_{crit}	Kritische snelheid	m/s
V_i	Vaarsnelheid i	m/s
V_{ref}	Referentie snelheid	m/s
$V_{w,1d}$	Retourstroomsnelheid, 1-dimensionaal	m/s

1 Inleiding

Agentschap Maritieme Toegang (aMT) vraagt Waterbouwkundig Laboratorium (WL) om op korte termijn de invloed op bodem en oevers te bepalen van passeersnelheid en diepgang van maatgevende schepen in het Kanaal Gent-Terneuzen ter plaatse van de Zelzatetunnel voor een aantal maatgevende condities. Het onderzoek dient inzicht te geven in de impact van de scheepsbreedte, scheepsdiepgang, vaarsnelheid, voortstuwing en beschikbare vaarwegsectie. Het hydrodynamische drukveld, de schuifspanning op de bodem en de oevers en de retourstroming rond het schip worden bepaald. Die eerste kan gerelateerd worden aan de vervorming van de tunnel en de tweede aan erosie van de bodem. Resultaten van deze oefening kunnen oa. gebruikt worden om bodembescherming boven de Zelzatetunnel te dimensioneren.

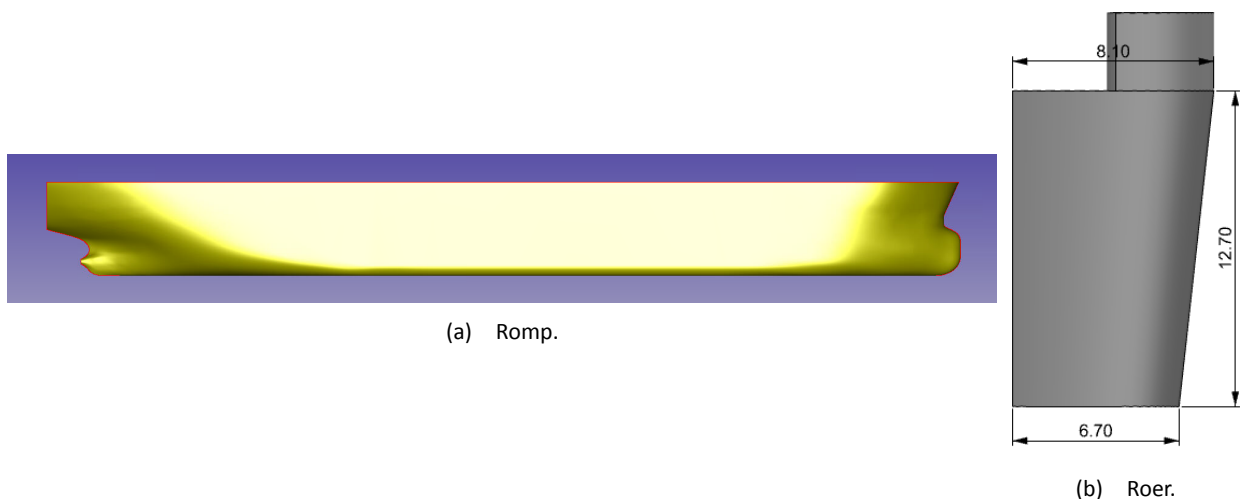
2 Simulatie condities

2.1 Scheepsgeometrie

De rompvorm die gebruikt wordt is die van het bulkschip Mexico (WL code T01, met $B = 45$ m op prototype-schaal), zie Fig. 1a. Deze wordt verschaald naar ware grootte, met breedtes $B_1 = 32.2$ m en $B_2 = 38.0$ m (met respectievelijke schaalfactoren 50.070 en 59.0888), en wordt geëvalueerd bij diepgangen $T_1 = 10$ m en $T_2 = 12.5$ m. Bij deze diepgangen en een waterdiepte $h = 13.5$ m (de ontwerpdiepte van Kanaal Gent-Terneuzen) is de minimale en maximale kielspeling $UKC = \frac{h-T}{T} \times 100\%$ gelijk aan 8 % en 35 %.

De scheepsbreedte 32.2 m stemt overeen met een Panamax bulkschip en is het grootste schip dat op regelmatige basis (meerdere keren per week) de tunnel te Zelzate passeert. De scheepsbreedte 38 m stemt overeen met het grootste schip dat op heden de tunnel van Zelzate gepasseerd is (Piavia op 29/12/2025 by $T = 12.2$ m). De diepgang 12.5 m is de maximale diepgang die toegelaten wordt op het kanaal. De diepgang 10 m stemt overeen met de ondergrens voor bovenmaatse schepen zoals gedefinieerd op kanaal Gent Terneuzen.

De romp wordt voorzien van een vereenvoudigde roergeometrie uit 1 stuk (zie Fig. 1b) met dikte 20 % (profiel NACA0020, hoogte $b = 12.7$ m en slankheid $R = 1.71$). De roerhoogte b voor de geschaalde scheepsrompen bedragen respectievelijk 9.08 m en 10.72 m. Simulaties worden in eerste instantie uitgevoerd zonder voortstuwing. Voor enkele relevante cases wordt daarna de invloed van voortstuwing op de resultaten bepaald. Deze wordt vereenvoudigd gemodelleerd door middel van een Actuator Disk (trekkende schijf) (AD), de eigenlijke propeller geometrie wordt hierbij niet gebruikt.

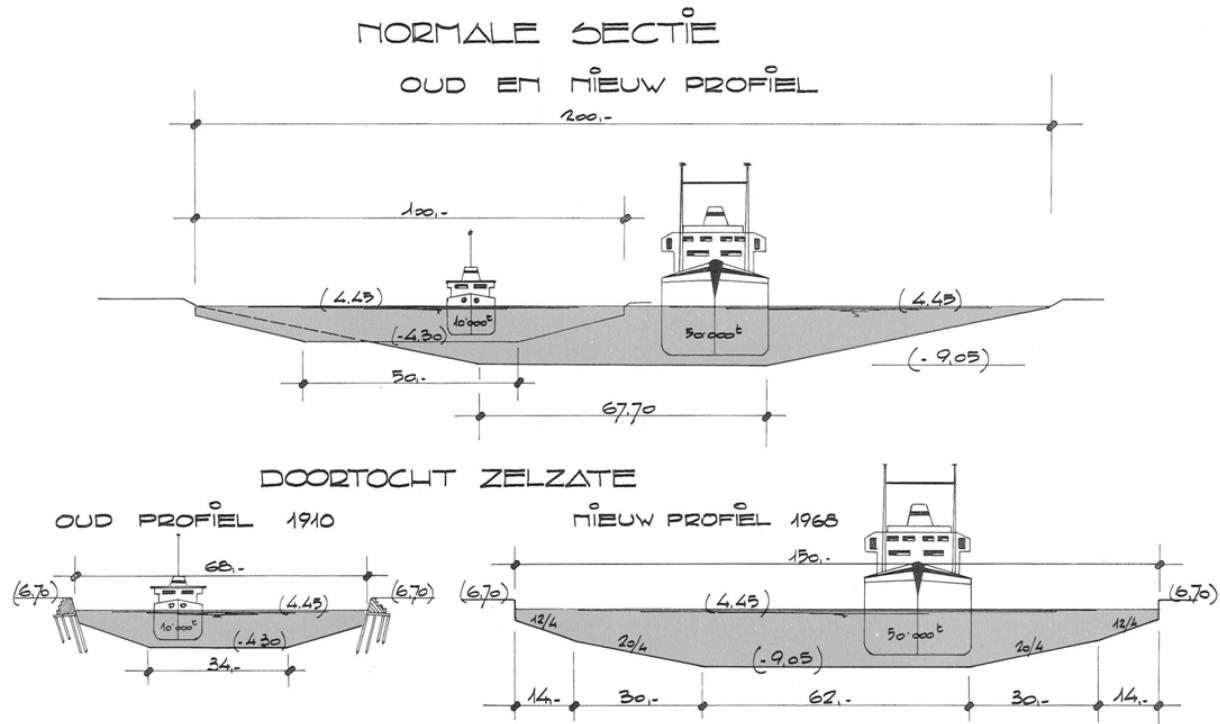


Figuur 1 – Zijaanzicht van de naakte romp van het bulkschip Mexico (T01) en het vereenvoudigde roer (met afmetingen voor het prototype schip met $B = 45$ m).

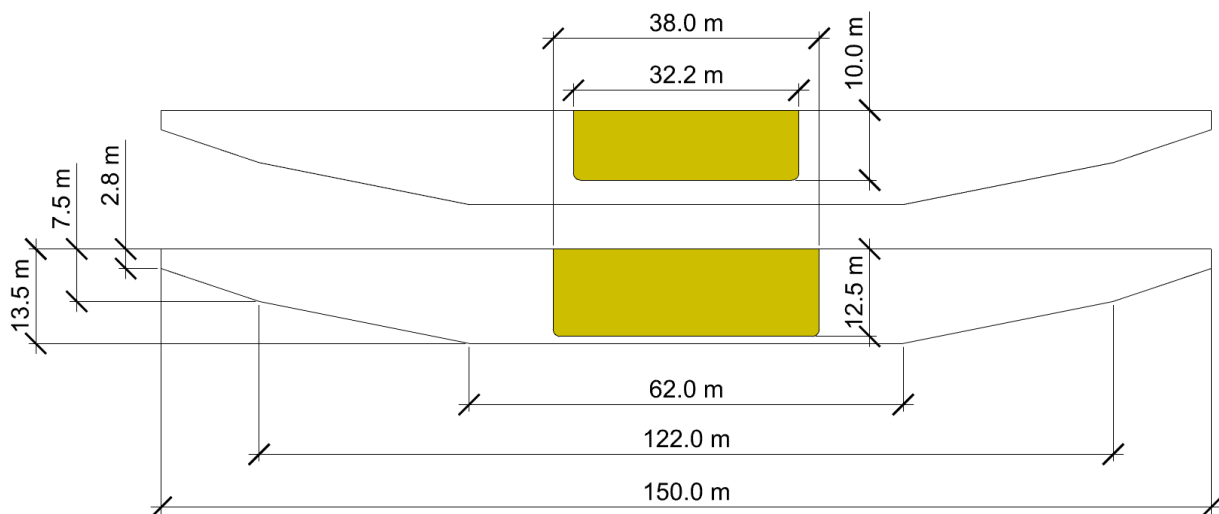
2.2 Kanaalgeometrie

Voor het huidige onderzoek zullen, naast de theoretische kanaalsectie (zie Figuur 2, uit Ministerie van Openbare Werken/Ministerie van Verkeer en Waterstaat (1968)), ook twee secties gebruik worden op basis van recente peilingen. De theoretische kanaalgeometrie nabij de tunnel wordt weergegeven in Figuur 3 inclusief een dwarsdoorsnede van huidige maatgevende schepen. Deze geometrie is gebaseerd op het profiel zoals

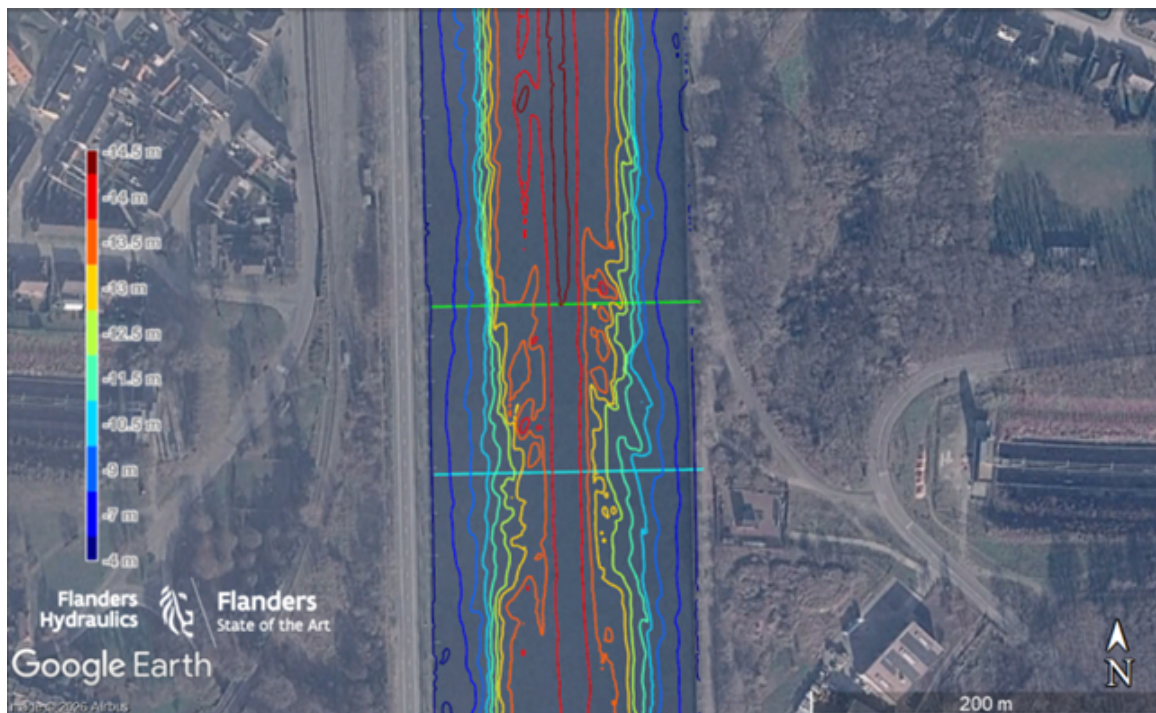
weergegeven rechtsonder in Fig. 2. Voor de definitie van werkelijke kanaalsecties werden, op basis van een peiling uit december 2025, elke 5 m langs het kanaal, de vaarwegsectie en de vaarwegbreedte op diepte 12.5 m geëvalueerd. De meest beperkende secties werden geïdentificeerd op afstand 1920 m ($A_w = 1602 \text{ m}^2$) en afstand 2015 m ($W_{125 \text{ dm}} = 52.3 \text{ m}$) van de Belgisch-Nederlandse grens. De posities van deze secties ten opzichte van de onderzochte bathymetrie worden weergegeven in Fig. 4, terwijl dwarsdoorsneden van de secties zelf te zien zijn in Fig. 5 en 6.



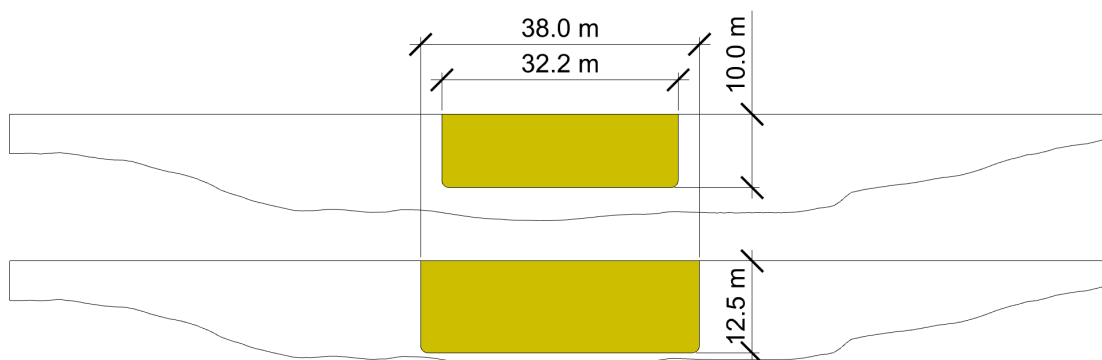
Figuur 2 – Nominale sectie kanaal Gent-Terneuzen met oud en nieuw profiel van de doortocht van Zelzate (Ministerie van Openbare Werken/Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1968).



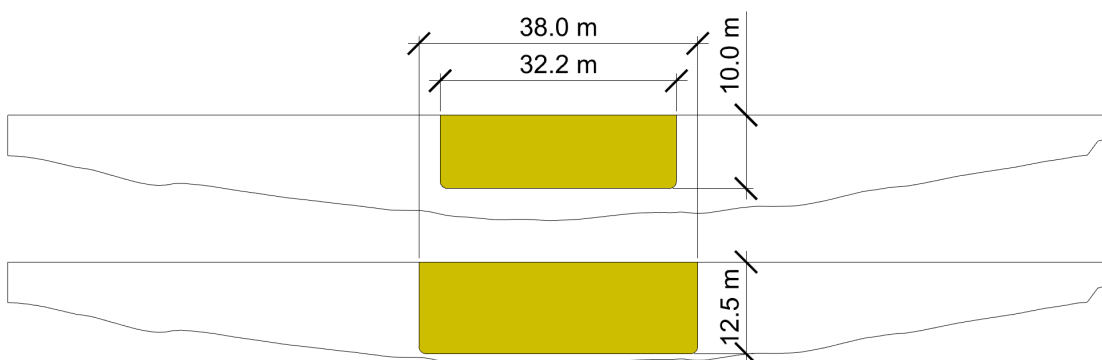
Figuur 3 – Theoretische sectie van het kanaal Gent-Terneuzen ter plaatse van de Zelzatetunnel met dwarsprofielen van maatgevende schepen.



Figuur 4 – Dieptelijnen peiling 12/2025 ten opzichte van kanaalpeil (4.45 mTAW) met aanduiding van secties met kleinste vaarwegsectie ($s = 1920$ m, groen) en kleinste breedte op diepte 12.5 m ($s = 2015$ m, blauw).



Figuur 5 – Sectie 1920 ter plaatse vande Zelzatetunnel met dwarsprofielen van maatgevende schepen.



Figuur 6 – Sectie 2015 ter plaatse vande Zelzatetunnel met dwarsprofielen van maatgevende schepen.

2.3 Kritische snelheden en retourstroom

Voor bovenvermelde combinaties van scheepsbreedtes en diepgangen wordt voor de theoretische sectie (Fig. 3) met een oppervlakte $A_w = 1611.2 \text{ m}^2$, de kritische snelheid (volgens Schijf (1949)) V_{crit} bepaald (Tabel 1) met behulp van

$$m_1 = \frac{B \cdot T}{A_w}, \quad (1)$$

$$Fr_{h,crit} = \left(2 \sin \frac{\arcsin(1 - m_1)}{3} \right)^{3/2}, \quad (2)$$

$$V_{crit} = Fr_{h,crit} \sqrt{gh}, \quad (3)$$

waarbij m_1 en g respectievelijk de blockage en zwaartekrachtsversnelling zijn. Meerdere equivalente vergelijkingen voor de kritische snelheid (Vgl. 2) van een schip varend in een kanaal zijn beschikbaar (Delefortrie *e.a.*, 2024; Waterloopkundig Laboratorium, 1997).

De gemiddelde retourstroming en waterspiegeldaling naast het schip worden bepaald aan de hand van de formulering in Waterloopkundig Laboratorium (1997) (zie ook Verelst en Visser (2024)), welke gebruikt zullen worden als validatiedata voor de numeriek bepaalde waarden.

Tabel 1 – Kritische snelheid in theoretische sectie Kanaal Gent-Terneuzen ter plaatse van de Zelzatetunnel.

Schip		Omgeving		Conditie theoretische sectie				
B	T	h	UKC	m_1	$Fr_{h,crit}$	$V_{crit}/\text{m/s}$	$V_{crit}/\text{km/h}$	V_{crit}/kn
38	12.5	13.5	8 %	0.295	0.371	4.26	15.35	8.28
32.2	12.5	13.5	8 %	0.250	0.417	4.80	17.27	9.33
38	10	13.5	35 %	0.236	0.432	4.97	17.91	9.66
32.2	10	13.5	35 %	0.200	0.475	5.46	19.67	10.61

2.4 Vaarsnelheden

Op basis van vier vaste percentages (61 % tot 46 %) ten opzichte van de in Tabel 1 getoonde kritische snelheden, worden voor de gegeven combinaties van diepgang T en breedte B , vaarsnelheden V_1 , V_2 , V_3 en V_4 bepaald (zie Tabel 2). Momenteel geldt voor bovenmaatse schepen ($B > 10 \text{ m}$) op het kanaal een maximale vaarsnelheid gelijk aan 9 km/h (4.8 kn). Hoewel deze snelheden niet toegestaan wordt tijdens de proefvaarten met $B = 38 \text{ m}$, wordt deze conditie (V_2) beschouwd als een relevant percentage van de kritische snelheid voor de evaluatie van schepen met maximale diepgang (58.6 %). Wanneer dit percentage toegepast wordt op een panamax schip ($B = 32.2 \text{ m}$), dan wordt een vaarsnelheid gelijk aan 5.5 kn bekomen bij diepgang 12.5 m. Deze snelheid is hoger dan de huidige maximale waarde, maar blijkt op basis van een recente AIS-studie uitzonderlijk toegepast te worden (Panahi en Verwilligen, 2026). Wanneer V_2 toegepast wordt op een panamax schip met diepgang 10 m dan wordt een vaarsnelheid gelijk aan 11.5 km/h (6.2 kn) bekomen.

Voor schepen met diepgang tot 10 m (strikt genomen exclusief 10 m) bedraagt de maximale vaarsnelheid op het kanaal 12 km/h (6.5 kn). Deze snelheid stemt overeen met een percentage gelijk aan 61 % van de kritische snelheid en wordt in de evaluatie meegenomen als snelheidsconditie V_1 . Op basis van dezelfde AIS-analyse blijkt dat ook panamax schepen met diepgang groter dan 10 m, gebeurlijk een vaarsnelheid hanteren die tot maximaal 61 % van hun kritische snelheid kan bedragen (en die dus in strijd is met de maximale kanaalsnelheid voor deze schepen (9 km/h)). Bijgevolg wordt de conditie V_1 ook onderzocht voor diepgang $T = 12.5 \text{ m}$.

Wanneer de maximale kanaalsnelheid voor een diepgeladen schip (9 km/h) toegepast wordt op een panamax schip, dan wordt de snelheidsconditie V_3 bekomen bij een percentage 52.1 % van de kritische snelheid. Wanneer V_3 toegepast wordt op een schip met breedte 38.0 m, dan wordt een vaarsnelheid gelijk aan 8.0 km/h (4.3 kn) bekomen. Dit is exact de maximale kanaalsnelheid die opgelegd wordt tijdens de proefvaarten met dit scheepstype.

Tenslotte wordt ook een snelheid geselecteerd (V_4) die overeenstemt met een snelheidsreductie (8 km/h) voor diepgeladen panamax schepen. Deze conditie stemt overeen met 46.3 % van de kritische snelheid. V_4 laat toe om de impact van lagere vaarsnelheden boven de tunnel te evalueren en stemt voor een schip met breedte 38.0 m overeen met een vaarsnelheid gelijk aan 7.1 km/h (3.8 kn).

Tabel 2 – Selectie van snelheden voor de verschillende maatgevende schepen.

Schip			V_1 61.0 % V_{crit}			V_2 58.6 % V_{crit}			V_3 52.1 % V_{crit}			V_4 46.3 % V_{crit}		
L_{ref}	B	T	Snelheid			Snelheid			Snelheid			Snelheid		
m	m	m	m/s	kn	km/h	m/s	kn	km/h	m/s	kn	km/h	m/s	kn	km/h
246.6	38	12.5	2.60	5.06	9.37	2.50	4.86	9.00	2.22	4.32	8.00	1.98	3.84	7.11
208.9	32.2	12.5	2.93	5.69	10.54	2.81	5.47	10.13	2.50	4.86	9.00	2.22	4.32	8.00
246.6	38	10	3.04	5.90	10.93	2.92	5.67	10.50	2.59	5.04	9.33	2.30	4.48	8.30
208.9	32.2	10	3.33	6.48	12.0	3.20	6.23	11.53	2.85	5.53	10.25	2.53	4.92	9.11

2.5 Simulatie condities en aannames

CFD simulaties worden uitgevoerd zonder wind en stroming, met uniforme waterdichtheid¹. Er wordt uitgegaan van standaard (International Towing Tank Conference (ITTC)) zoet water en International Standard Atmosphere (ISA) lucht bij een temperatuur van 15 °C. De dichtheid en dynamische viscositeit van water zijn daarmee $\rho_w = 999.1024 \text{ kg/m}^3$ en $\mu_w = 0.001138 \text{ Pa s}$, terwijl die van lucht gelijk zijn aan $\rho_w = 1.225 \text{ kg/m}^3$ en $\mu_w = 1.7894 \times 10^{-5} \text{ Pa s}$. Simulaties worden uitgevoerd op ware grootte met inbegrip van de vervorming van het vrije vloeistofoppervlak. Hier zal de focus liggen op de voorspelling van het primaire golfsysteem. Volgens de relatief lage scheepssnelheid (Froude getal) is het aannemelijk dat de golven van het secundaire (Kelvin) systeem relatief kort zijn. Om deze door het rekendomein te transporteren tot bij de oever zijn daarvoor significant meer cellen nodig nabij het wateroppervlak dan voor het primaire golfsysteem, wat de rekenduur van de simulaties sterk zou vergroten.

Voorspelling van de scheepsweerstand op zich is niet het doel van deze oefening. Er zal daarom gebruik gemaakt worden van de wandwet (wall functions) om de wrijvingsweerstand van het schip te bepalen. De grenslaag rond de romp die daarmee ontstaat, is wel van belang voor het nauwkeurige voorspellen van de retourstroming en druk rond het schip, omdat deze grenslaag resulteert in een vergroting van de (geometrische) blockage berekend met Vgl. 1.

De inzinking en vertrimming van het schip (squat) zijn vrijheidsgraden die tijdens de simulaties bepaald worden, de longitudinale snelheid wordt opgelegd en de overige vrijheidsgraden worden vast gehouden. De inzinking beschouwen als vrijheidsgraad kan – in beperkt vaarwater – een significante invloed hebben op de resultaten, omdat hiermee de blockage vergroot wordt en de daarmee gepaard gaande verhoging van de maximale waarde van de retourstroming en de hydrodynamische druk.

Voor de zandbodem en oevers van het kanaal en de romp van het schip wordt aangenomen dat deze hydrody-

¹Dit is een vereenvoudiging van de werkelijkheid, omdat stratificatie kan voorkomen met name voor zomercondities (bij lage bovenafvoer).

namisch glad zijn (geen ruwheid). Er wordt aangenomen dat er geen stroming aanwezig is in het kanaal, dus grenslagen ontstaan enkel door passage van het schip.

Voor de CFD berekeningen wordt verder aangenomen dat in de lengterichting van het kanaal ter plaatse van de tunnel de kanaalsectie constant is en geen bocht beschrijft. Hierdoor kunnen de simulaties steady-state uitgevoerd worden.

Simulaties worden uitgevoerd beginnende bij de combinaties van kleinste diepgangen en laagste snelheden. De 16 uit te voeren simulaties in de theoretische sectie bij de Zelzatetunnel worden nogmaals weergegeven in Tabel 3 (cases 1 t.e.m. 16), deze gelden als basis voor verdere simulaties. Voor deze 16 simulaties wordt aangenomen dat de oplossing lateraal symmetrisch is, m.a.w., slechts één helft van het rekendomein wordt in rekening gebracht. Op het symmetrievlak wordt een symmetrie randvoorwaarde opgelegd. Hierdoor zal de doorlooptijd voor deze 16 berekeningen significant lager zijn dan alle daaropvolgende berekeningen (cases 17 tot 26) waar geen symmetrieconditie gebruikt kan worden.

Tabel 3 – Naamgeving CFD berekeningen in theoretische en werkelijke kanaalsectie met voor CFD relevante karakteristieken

case	sectie	V_i	B	T	voortstuwing	L_{ref}	V_{ref}	Re	Fr
1	T	V_4	32.2	10	-	208.8	2.529	4.6362×10^8	0.056
2	T	V_3	32.2	10	-	208.8	2.846	5.2169×10^8	0.063
3	T	V_2	32.2	10	-	208.8	3.201	5.8678×10^8	0.071
4	T	V_1	32.2	10	-	208.8	3.332	6.1081×10^8	0.074
5	T	V_4	38	10	-	246.409	2.303	4.9822×10^8	0.047
6	T	V_3	38	10	-	246.409	2.591	5.6063×10^8	0.053
7	T	V_2	38	10	-	246.409	2.915	6.3057×10^8	0.059
8	T	V_1	38	10	-	246.409	3.034	6.5640×10^8	0.062
9	T	V_4	32.2	12.5	-	208.8	2.221	4.0712×10^8	0.049
10	T	V_3	32.2	12.5	-	208.8	2.499	4.5812×10^8	0.055
11	T	V_2	32.2	12.5	-	208.8	2.811	5.1527×10^8	0.062
12	T	V_1	32.2	12.5	-	208.8	2.926	5.3638×10^8	0.065
13	T	V_4	38	12.5	-	246.409	1.974	4.2704×10^8	0.040
14	T	V_3	38	12.5	-	246.409	2.221	4.8054×10^8	0.045
15	T	V_2	38	12.5	-	246.409	2.498	5.4049×10^8	0.051
16	T	V_1	38	12.5	-	246.409	2.601	5.6263×10^8	0.053
17	T	V_2	32.2	10	✓	208.8	3.201	5.8678×10^8	0.071
18	T	V_2	38	10	✓	246.409	2.915	6.3057×10^8	0.059
19	T	V_2	32.2	12.5	✓	208.8	2.811	5.1527×10^8	0.062
20	T	V_2	38	12.5	✓	246.409	2.498	5.4049×10^8	0.051
21	1920	V_2	32.2	10	-	208.8	3.201	5.8678×10^8	0.071
22	1920	V_2	38	10	-	246.409	2.915	6.3057×10^8	0.059
23	1920	V_2	32.2	12.5	-	208.8	2.811	5.1527×10^8	0.062
24	1920	V_2	38	12.5	-	246.409	2.498	5.4049×10^8	0.051
25	2015	V_2	32.2	12.5	-	208.8	2.811	5.1527×10^8	0.062
26	2015	V_2	38	12.5	-	246.409	2.498	5.4049×10^8	0.051

Voor de berekeningen met diepgang $T = 12.5$ m worden de scheepsrompen gemeshed bij een diepgang die groter is dan de hydrostatische diepgang, zodat de vervorming van het grid ten gevolge van de vrijheidsgraden van de romp (inzinking en vertrimming) verminderd wordt. Een inschatting van het bereik van inzinkingen is 0.3 m tot 0.5 m.

Voor elk van de unieke combinaties van T en B in Tabel 3 zal één grid gegenereerd worden voor de 4 scheepssnelheden om de engineering tijd (generatie rekenrooster & solver instellingen) te minimaliseren, waardoor het aantal te creëren grids voor de eerste 16 berekeningen vier bedraagt.

Voor snelheidsconditie V_2 zullen tevens CFD-berekeningen uitgevoerd worden met voortstuwing (cases 17 t.e.m. 20). Hiervoor zijn aanpassingen aan het rekenrooster nodig ter plaatse van propeller en propeller zog en

kan bovendien de symmetrie conditie niet meer toegepast worden. Daarna worden zes simulaties uitgevoerd zonder voortstuwing in reële secties: eerst vier simulaties bij snelheid V_2 voor elk van de vier scheepscondities in de sectie met de kleinste oppervlakte (sectie 1920, $A = 1602 \text{ m}^2$) en als laatste twee simulaties bij snelheid V_2 bij de maximale diepgang van $T = 12.5 \text{ m}$ in de sectie met de smalste breedte op $h = 12.5 \text{ m}$ (sectie 2015). Resultaten (zoals inzinking) van de basis berekeningen bij snelheid V_2 (cases 3, 7, 11 en 15) worden gebruikt bij het meshen van de cases uitgevoerd in secties op basis van peilingen om de romp zo dicht mogelijk bij de dynamische positie te meshen.

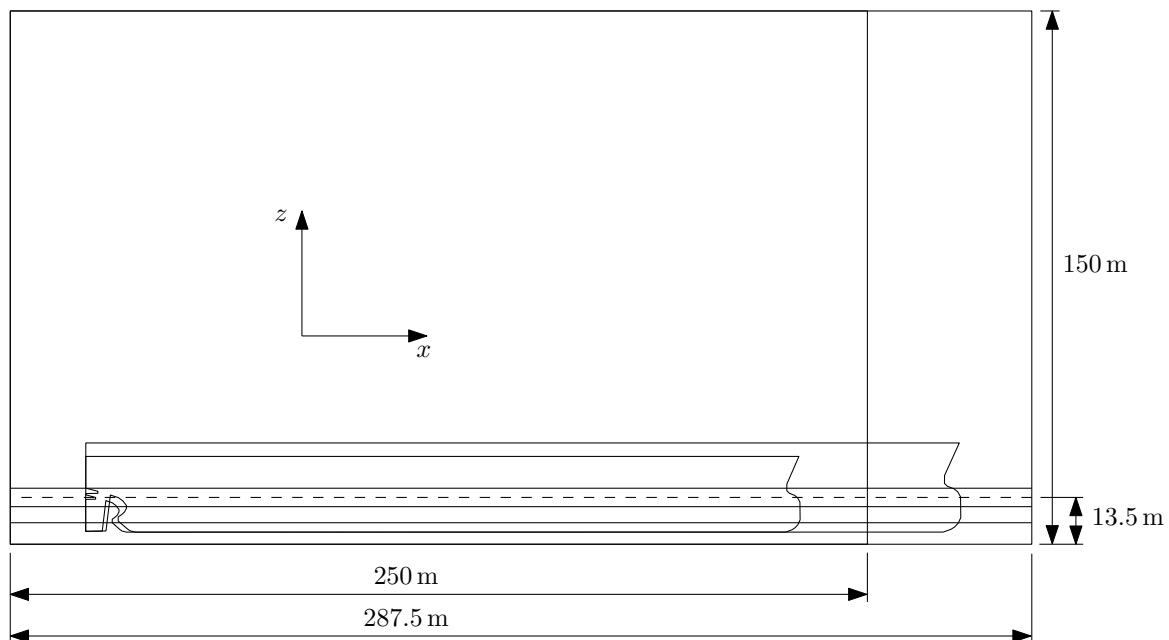
3 Grid generatie en solver settings

Voor de in dit onderzoek uitgevoerde CFD berekeningen werd gebruik gemaakt van de CFD software FINE/Marine 2025.3. Rekenroosters werden met HEXPRESS gegenereerd. Er is gebruik gemaakt van Rhinoceros 7 om het 3D model van het vereenvoudigde roer van het schip te construeren en Blender 4.5 is gebruikt voor het genereren van de domein geometrie op basis van een STL triangulatie van de romp van de T01.

3.1 Domein afmetingen

Recent CFD werk met HEXPRESS heeft geleerd dat voor cases in beperkt water met hellende oevers, het voordelig is om het grid te genereren in een kort domein (iets langer dan de scheepslengte) omdat dit resulteert in een kwalitatief beter rekenrooster. Het volledige rekendomein wordt bekomen met een extrusie van het rekenrooster bij de in- en uitlaat.

Voor de twee rompen ($B = 32.2$ m en $B = 38$ m), wordt het domein weergegeven in Fig. 7. Omdat de focus van het huidige project ligt op de belasting van de bodem van het kanaal en niet op de belasting op het passerende schip, werd ervoor gekozen om voor beide scheepsgroottes uit te gaan van initiële cellen met vaste absolute afmetingen, namelijk cubische cellen met ribbe 12.5 m. De hoogte van het domein is telkens 150 m en de breedte van het halve kanaal (voor cases 1 tot 16) is 75 m. De lengte is afhankelijk van de scheepslengte: 250 m voor $B = 32.2$ m en 287.5 m voor $B = 38$ m.



Figuur 7 – Zijaanzicht van het rekendomein voor beide scheepslengtes (bij $T = 10$ m). De streeplijn geeft het waterniveau aan in het kanaal.

Voor de gevallen waarbij $T = 10$ m wordt de romp gemeshed bij de hydrostatische positie, terwijl bij $T = 12.5$ m, de romp onder de hydrostatische positie wordt gemeshed, rekening houdend met de verwachte squat van het schip. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de resultaten van de CFD berekeningen bij $T = 10$ m om de inzinking in te schatten.

3.2 Grid generatie

3.2.1 Initieel Cartesisch grid

Het initieel Cartesisch grid bevat $20 \times 6 \times 12 = 1440$ cellen ($B = 32.2$ m) en $23 \times 6 \times 12 = 1656$ cellen ($B = 38$ m) voor cases 1 tot 16 (halve kanaalbreedte). Voor cases 17 tot 26 is dit het dubbele, respectievelijk 2880 en 3312. Tabel 4 toont de celgrootte als functie van het verfijningsniveau. De kortste topologische rand van het Computer Aided Design (CAD) model van het schip voor $B = 32.2$ m is de halve breedte van het achtervlak van het roer, en deze is 0.0122 m breed. Hieruit volgt dat een maximum van 11 verfijningen voldoende zou moeten zijn om de romp adequaat te meshen.

Tabel 4 – Cel grootte als functie van verfijningsniveau.

verfijning	celgrootte / m	verfijning	celgrootte / m
0	12.5	7	0.097 656
1	6.25	8	0.048 828
2	3.125	9	0.024 414
3	1.5625	10	0.012 207
4	0.781 25	11	0.006 104
5	0.390 625	12	0.003 052
6	0.195 313	13	0.001 526

3.2.2 Grid verfijningen

De globale refinement diffusion wordt verhoogd van 2 naar 3. Details van de toegepaste grid adaptatie (maximale verfijning, target cell grootte, maximale cell aspect ratio, refinement diffusie) voor de verschillende topologische vlakken voor cases 1 tot 4 ($B = 32.2$ m en $T = 10$ m) worden weergegeven in Tabel 5. Het vrije vloeistof oppervlakte wordt verfijnd met een intern vlak (ISurface_Z=0.0) met 6 verfijningen in de Z-richting ($\frac{L_{ref}}{1024}$) en maximale aspect ratio $\mathcal{R} = 64$.

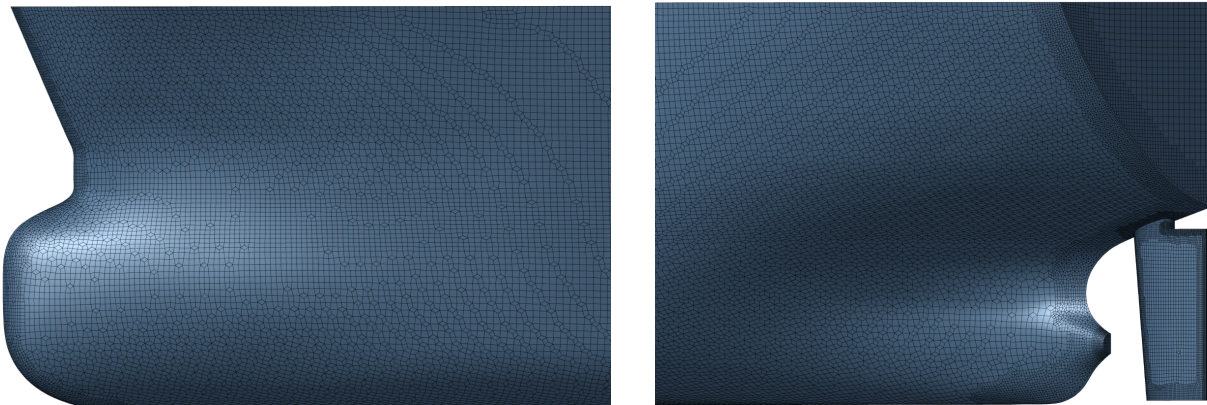
Verder wordt een volume verfijning toegevoegd om de cellen in het water rond de romp een uniforme verfijning te geven. Ook worden voor enkele specifieke randen (edges) van het domein verfijning geactiveerd: het gaat hierbij o.a. om delen van de romp in het symmetrievlak bij de boeg en steven waar 1 extra verfijning toegepast wordt ten opzichte van de verfijning van de romp (hull.prt in Tabel 5), de rand tussen romp en achtersteven en de rand tussen de kanaalbodem en eerste oever. Figuur 8 toont een visualisatie van het grid bij het voor- en achterschip voor de eerst vier cases.

Voor de cases met voortstuwing (case 17 tot 20) worden twee verfijningssectoren toegevoegd om de gradienten in de stroming door het propellervlak en in het propellerzog voldoende nauwkeurig te modelleren, een voorbeeld hiervan wordt getoond in Figuur 9.

Voor de laatste zes cases (met bodemprofiel gebaseerd op in-situ peilingen) is er geen verschil meer tussen de domein bodem en de hellingen, de individuele topologische oppervlakken worden er vervangen door één topologisch vlak met vergelijkbare verfijningen. Een vergelijking van het rekenrooster in een dwarsdoorsnede van het domein bij het scheepsmidden voor cases 1 en 21 wordt weergegeven in Figuur 10.

Tabel 5 – Surface refinement settings.

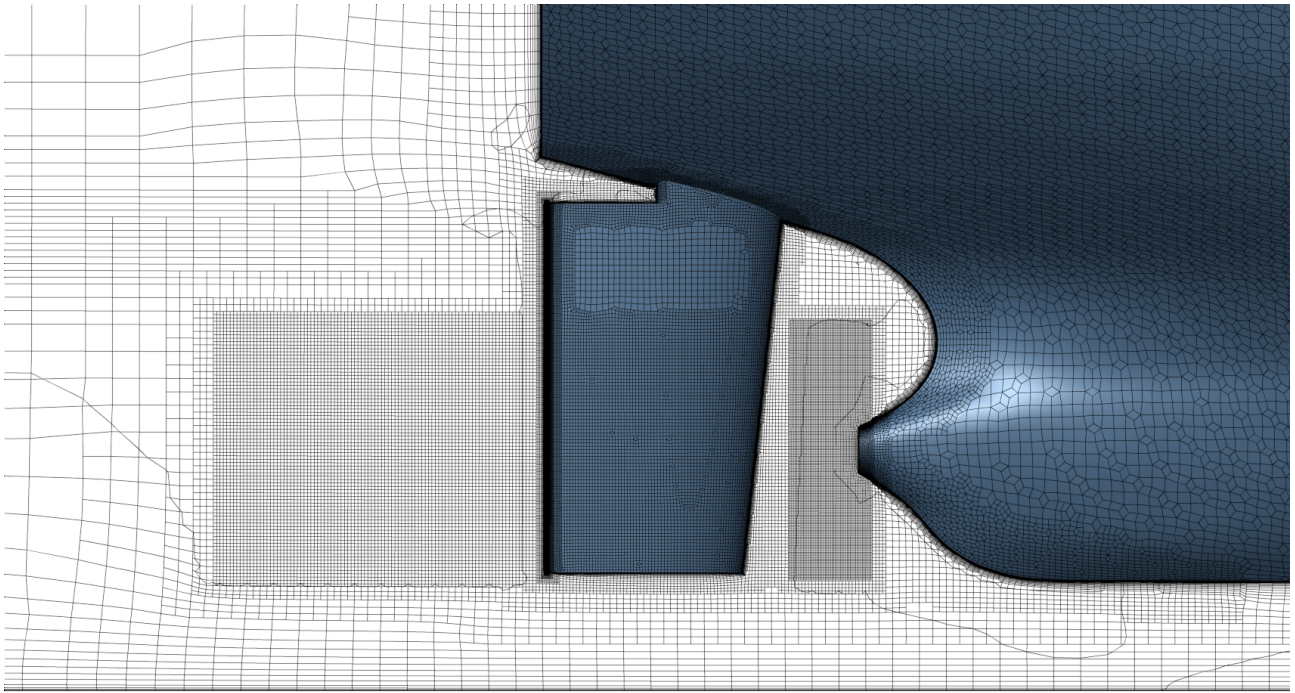
face	nb. refinements	target cell sizes	max AR	diffusion depth
hull.prt	5	(0.0, 0.0, 0.0)	2.0	-1
dom.quay	7	(2.0, 0.0, 2.0)	32.0	1
dom.bottom	7	(10.0, 10.0, 0.0)	128.0	1
dom.bank1	6	(3.0, 0.75, 0.0)	32.0	1
dom.bank2	6	(3.0, 0.75, 0.0)	32.0	1
transom	5	(0.0, 0.0, 0.0)	2.0	-1
deck	2	(0.0, 0.0, 0.0)	2.0	-1
prop	7	(0.0, 0.0, 0.0)	2.0	-1
rudder.top	7	(0.0, 0.0, 0.0)	2.0	-1
rudder.TE	11	(0.04, 0.0, 0.04)	8.0	-1
rudder.bottom	7	(0.0, 0.0, 0.0)	2.0	-1
rudder.small	7	(0.0, 0.0, 0.0)	2.0	-1
rudder.side	6	(0.0, 0.0, 0.0)	2.0	-1
ISurface_Z=0.0	6	(2.0, 2.0, 0.0)	64.0	-1



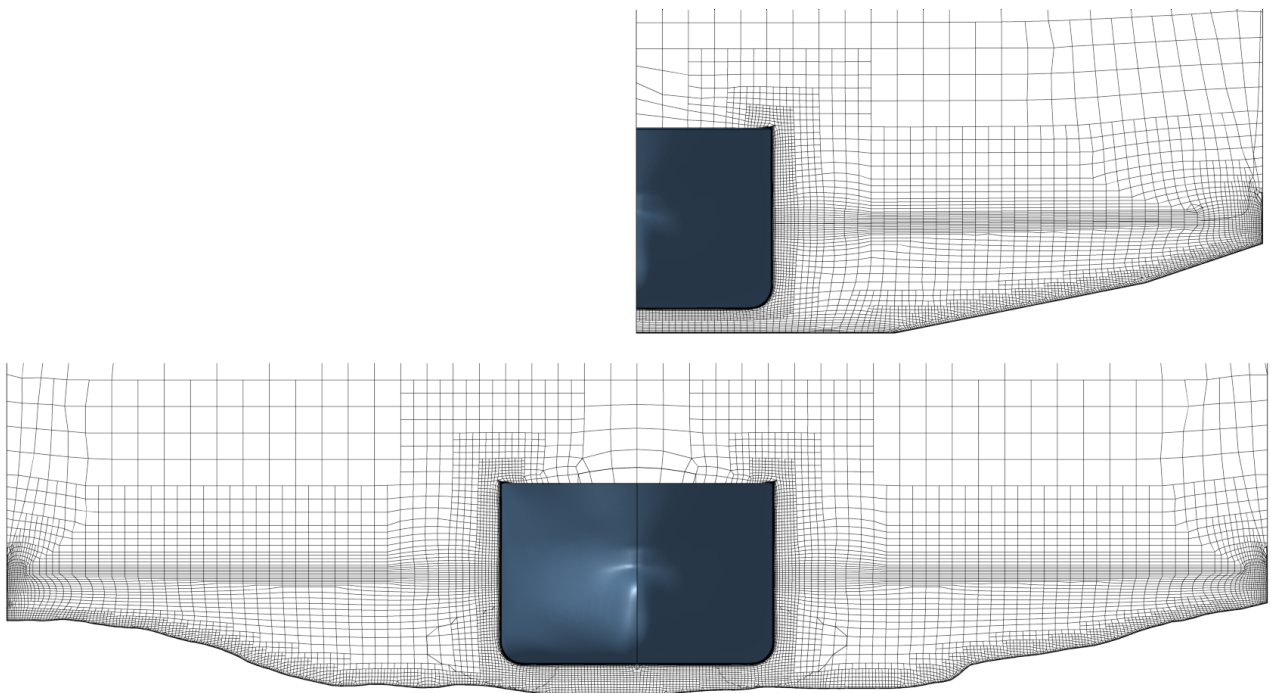
Figuur 8 – Visualisatie van het grid bij het voorschip (links) en het achterschip (rechts) voor cases 1 tot 4.

3.2.3 Viscieuze lagen

Om grenslagen rond de scheepsromp en op de bodem en oevers van het kanaal te modelleren, worden visceuze lagen toegevoegd op het einde van de grid generatie. Zowel voor het schip als het kanaal wordt gebruik gemaakt van wandwetten, met als gevolg dat de Y^+ relatief hoog kan zijn zodat het aantal lagen beperkt blijft. De berekening van het aantal lagen start vanuit een schatting van de eerste laagdikte gebaseerd op de referentiesnelheid en referentielengte, de gewenste Y^+ waarde en de expansiefactor (1.2). Voor de romp varieert het aantal lagen van 3 tot 16 (met eerste laagdikte gelijk aan 0.005 m), terwijl voor de kanaalbodem en oevers 5 lagen toegevoegd worden. Voor deze laatste is de eerste laagdikte gelijk aan 0.007 m. Voor het huidige onderzoek bleek dat betere resultaten bekomen konden worden door een vast aantal lagen te gebruiken in plaats van het aantal te laten variëren.



Figuur 9 – Visualisatie van het grid nabij de sterven van het schip met extra verfijningssectoren bij de propeller en het propeller zog voor case 18 ($B = 38$ m & $T = 10$ m).

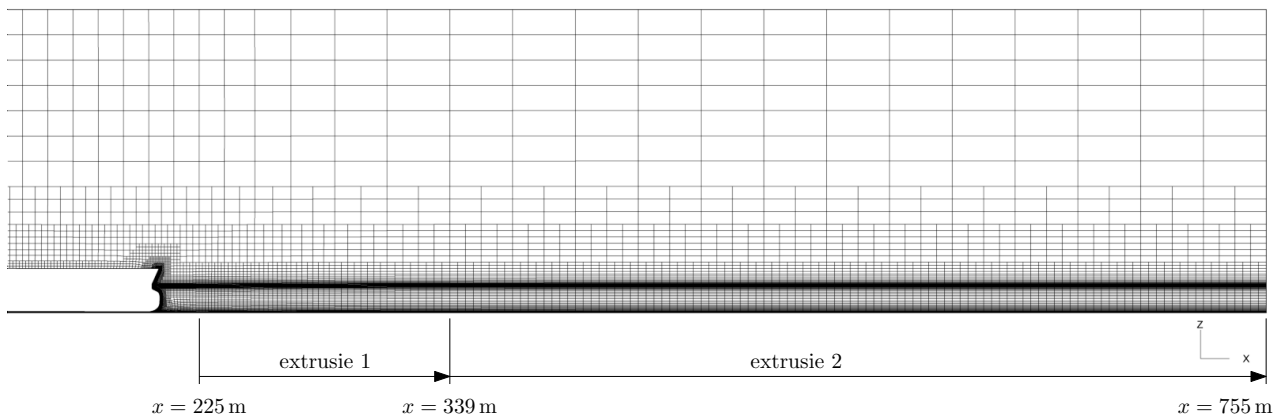


Figuur 10 – Vergelijking van de rekenroosters in een dwarssectie van het rekendomein voor de theoretische sectie en sectie 1920 voor $T = 10$ m en $B = 32.2$ m.

3.2.4 Grid extrusie

Zoals eerder vermeld worden de uiteindelijke rekenroosters bekomen door het grid in het domein bij de inlaat en uitlaat telkens in twee stappen te extruderen zodat de in- en uitlaat zich ver genoeg van het schip bevinden. In een eerste stap wordt het grid bij de inlaat geëxtrudeerd over een lengte van 124.124 m met geometrische expansie van 1.2, waardoor cellen toenemen in lengte in de extrusierichting. Daarna wordt een tweede extrusie uitgevoerd zonder toename van de celgrootte, maar met verschillende waarden voor de twee beschouwde scheepslengtes: 404.4304 m (voor $B = 32.2$ m) en 497.6496 m (voor $B = 38$ m). Het uitvoeren van deze extrusies werd geautomatiseerd met een Python script.

Figuur 11 toont voor een van de cases ($B = 32.2$ m en $T = 12.5$ m) het symmetrievlak van het domein met cellen inclusief een illustratie van de twee extrusies vanaf het originele inlaat vlak.



Figuur 11 – Illustratie van de extrusies van het korte domein voor $B = 32.2$ m

De groottes van de 14 als dusdanig verkregen rekenroosters variëren tussen 4.4×10^6 en 13×10^6 cellen en worden weergegeven in Tabel 6.

Tabel 6 – Finale groottes van de rekenroosters.

Case	# cellen	Case	# cellen
1-4	4 146 230	20	12 841 694
4-8	4 604 443	21	8 235 675
9-12	4 299 279	22	10 531 686
13-16	4 815 382	23	10 430 162
17	9 668 125	24	10 867 601
18	12 461 992	25	8 823 108
19	9 988 671	26	10 790 256

3.3 Solver instellingen

Het EASM turbulentiemodel wordt gebruikt om de Navier-Stokes vergelijkingen te sluiten. Er wordt uitgegaan van een steady (time-marching) oplossing, waarbij een eerste-orde tijdsintegratie gebruikt wordt. De uiteindelijke oplossing wordt bekomen als een middeling over een groot aantal stappen, beginnende vanaf het moment dat het schip met de opgelegde snelheid vaart.

3.3.1 Randvoorwaarden

De randvoorwaarden voor de rompvlakken zijn allemaal van het type *Wall-function* behalve het dek waarvoor een *slip* conditie toegepast wordt. Op de kanaalbodem en oevers wordt ook de randvoorwaarde *Wall function* gebruikt. Voor de bovenkant van het domein wordt een op druk gebaseerde randvoorwaarde gebruikt (*Prescribed pressure - updated hydrostatic pressure*), terwijl voor de overige externe vlakken (inlaat, uitlaat en zijvlakken in contact met de lucht) de *far-field velocity* randvoorwaarde gebruikt wordt.

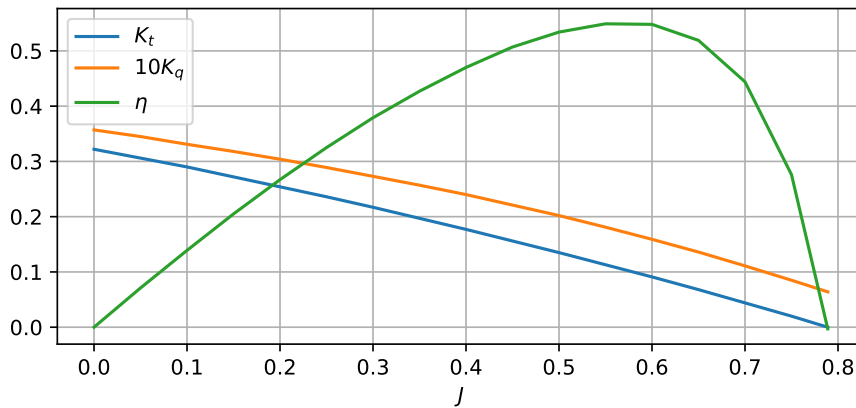
Bij het begin van een simulatie wordt het schip vanuit stilstand versneld naar de in Tabel 3 vermelde referentiesnelheid V_{ref} . Voor cases met hetzelfde schip (bv. cases 1, 2, 3 en 4) wordt de oplossing bij een lagere snelheid (bv. case 1) gebruikt als startconditie voor een berekening bij hogere snelheid (case 2), zodat de acceleratiefase (en rekentijd) verkort kan worden. Voor cases waar de romp op de hydrostatische positie gemeshed wordt, worden de verticale vrijheidsgraden vanaf het begin vrijgelaten. Echter, als het schip onder de hydrostatische positie gemeshed wordt (wat het geval was bij alle cases in het theoretische profiel met $T = 12.5$ m), worden de vrijheidsgraden pas losgelaten bij het einde van de acceleratiefase omdat anders het schip tijdens de acceleratiefase een dompbeweging uitvoert wat een negatief effect heeft op de convergiesnelheid van de simulatie.

Zoals eerder vermeld wordt het schip vrij gelaten om in te zinken en te vertrimmen ten gevolge van de balans van krachten en momenten op de romp. Hiervoor dient het rekenrooster te kunnen vervormen. Voor alle vlakken met uitzondering van de (vlakke en horizontale) domein bodem (voor cases 1 tot 20) wordt de *no-slip* gridvervormingsrandvoorwaarde opgelegd. Voor de bodem wordt de *shallow water* randvoorwaarde gebruikt

Wegens een tijdens dit onderzoek ontdekte fout in de CFD-solver van FINE/Marine (defect FMBZ-3486) was het niet mogelijk om m.b.v. mesh deformatie een correct resultaat te bekomen in de secties gebaseerd op peilingen (cases 21 tot 26) voor de vrijheidsgraden van de romp (inzinking en vertrimming) ten gevolge van de krachtenwerking op de romp. Dit is enkel mogelijk voor de theoretische secties (cases 1 tot 20) waar een deel van het domein een vlakke, horizontale bodem heeft. Voor de laatste 6 cases is daarom geopteerd om de inzinking bekomen bij dezelfde condities in de theoretische sectie te gebruiken om de romp tijdens het meshen verticaal te verplaatsen en de inzinking en vertrimming niet te beschouwen als vrijheidsgraden. Gezien de focus van het huidige onderzoek op de belasting op de kanaalbodem en niet op het schip is dit een acceptabel compromis.

3.3.2 Actuator disk instellingen

Voor de berekeningen met voortstuwing (case 17 tot 20), worden de open-water karakteristieken gebruikt van de (modelschaal) propeller van het schip. Deze worden weergegeven in Figuur 12. Berekeningen worden uitgevoerd bij *self-propulsion*, wat wil zeggen dat de solver de waarden van de open-water karakteristieken dusdanig kiest zodat de rompweerstand gebalanceerd wordt door de stuwkracht van de actuator disk. Het toerental n , de stuwkracht T en het moment Q zijn daardoor vooraf niet bekend. De geometrische gegevens van de trekkende schijf voor de vier cases met voortstuwing staat vermeld in Tabel 7. De as van de actuator disks (in de richting van het zog) is voor de vier gevallen georiënteerd volgens de vector $(-1,0,0)$. Bij de berekeningen met voortstuwing is het doel om de stuwkracht van de actuator disk in balans te krijgen met de weerstand van de romp. Hiervoor wordt de rotatiesnelheid in wijzerzin aangepast (instelling: *Revolution rate: Update clockwise*). De tangentiële kracht wordt ook geactiveerd zodat de actuator disk niet alleen voortstuwing maar ook een moment genereert.



Figuur 12 – T01 propeller open-water karakteristieken.

Tabel 7 – Actuator disk instellingen (alle afmetingen in m).

Case	AD positie	binnenstraal	buitenstraal	dikte
17	(3.8, 0.0, -6.767194)	0.55	2.93	1.0
18	(4.484456, 0.0, -6.18485)	0.65	3.4577	1.18012
19	(3.8, 0.0, -9.567194)	0.55	2.93	1.0
20	(4.484456, 0.0, -9.03485)	0.65	3.4577	1.18012

3.3.3 Tijdstap en aantal stappen

De tijdstap van de berekeningen wordt aangepast aan de referentie snelheid V_{ref} van elke berekening. Deze wordt kleiner genomen dan de standaard suggestie van de software, welke gebaseerd is op V_{ref} en L_{ref} :

$$\Delta t = a \frac{L_{ref}}{V_{ref}}, \quad (4)$$

waarbij $a = 0.01$ voor berekeningen zonder grid vervorming en $a = 0.005$ voor berekeningen met grid vervorming. Gezien de absolute snelheden voor de verschillende scheepsrompen reeds gebaseerd zijn op vaste percentages van de kritische snelheid, wordt voor het huidige onderzoek de tijdstap geschaald gebaseerd op de ratios van de kritische snelheden, waarbij voor V_4 , een tijdstap van $\Delta t = 0.2$ s genomen wordt, wat minder dan de helft is van de standaard waarde op basis van Vgl. 4. Voor de overige snelheden (V_3 , V_2 en V_1) wordt $\Delta t = 0.18$ s, 0.16 s en 0.15 s gebruikt.

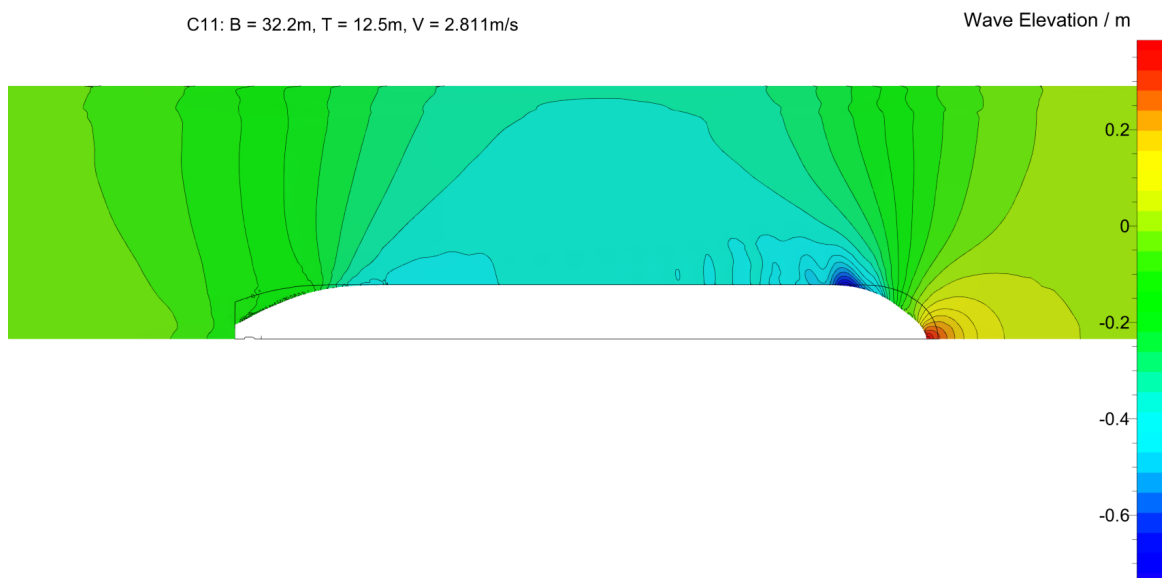
3.3.4 Output

Zoals eerder vermeld zijn voor het huidige onderzoek vooral resultaten nodig die gelinkt kunnen worden aan de belasting op de kanaalbodem. Ervaring leert dat berekeningen uitgevoerd in beperkt water wel eens kunnen resulteren in fluctuerende resultaten, bijvoorbeeld door loslating van stroming bij de achterstevan van de romp. Deze fluctuaties worden niet meegenomen in de bepaling van de belastingen op de kanaalbodem, en voor die reden wordt een middeling uitgevoerd op de resultaten van de CFD-berekeningen vanaf het moment dat het schip de referentiesnelheid bereikt heeft. Zolang de periode van de fluctuaties significant korter is dan de tijd over welke de middeling uitgevoerd wordt, zullen de resulterende gemiddelden correct berekend worden.

4 Resultaten

4.1 Waterspiegelstand rondom het schip

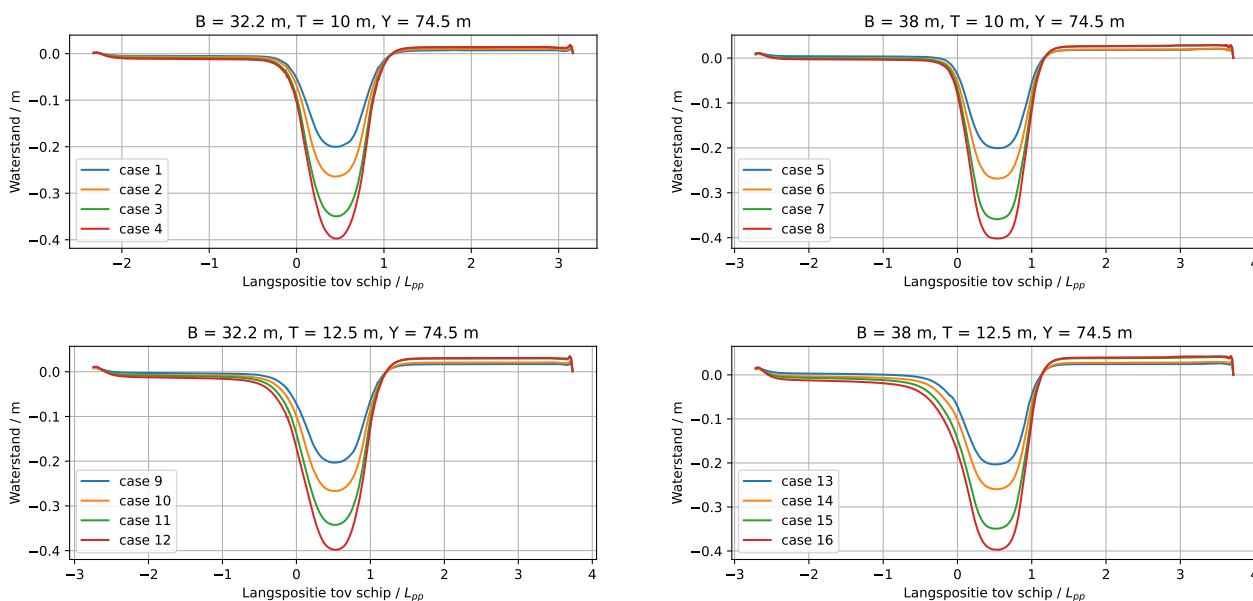
De verlaging van het waterpeil voor de verschillende cases wordt vergeleken met recente in-situ metingen tijdens passages van schepen met vergelijkbare afmetingen (Meire *e.a.*, 2026). Een voorbeeld van de vervorming van het vrije vloeistofoppervlak in de buurt van het schip wordt getoond in Fig. 13 voor case 11. Zoals in § 2.5 reeds aangegeven lag de focus van het onderzoek op de voorspelling van het primaire golfsysteem, met als gevolg dat er van het secundaire golfsysteem (Kelvinscheepsgolven) weinig te zien is.



Figuur 13 – Waterspiegel rond het schip voor case 11.

Van deze data wordt vervolgens een langssnede nabij de kade genomen ($Y = 74.5$ m, op 0.5 m van de theoretische kade) en geplot als functie van de langspositie ten opzichte van het schip. Hierbij wordt opgemerkt een abscissa van 0 overeenkomt met de positie van de achterste loodlijn van het schip en de waarde van 1 met de voorste loodlijn van het schip. De invloed van de snelheid op de resultaten voor de eerste 16 cases wordt weergegeven in Figuur 14. Het valt op dat voor hetzelfde percentage van de kritische snelheid V_{crit} van de verschillende schepen (46.3 % voor cases 1, 5, 9 en 13; 52.1 % voor cases 2, 6, 10 en 14; 58.6 % voor cases 3, 7, 11 en 15; 61.0 % voor cases 4, 8, 12 en 16), de maximale waterspiegeldaling nabij de oever zeer gelijkaardig is.

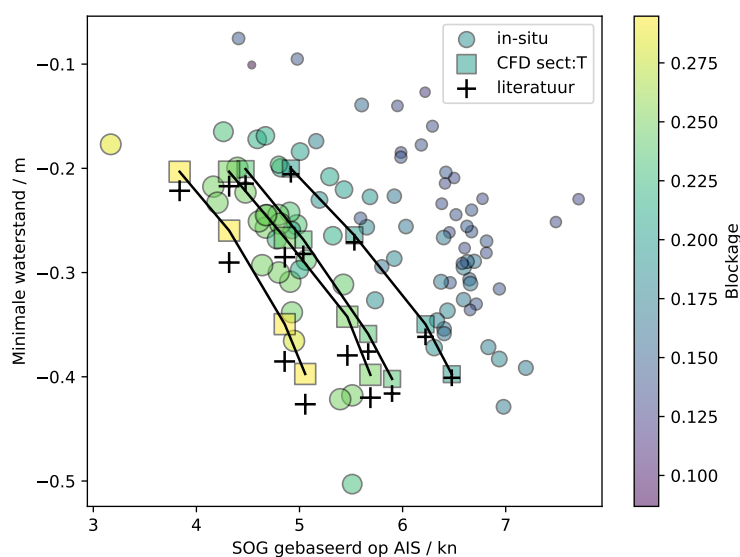
Voor alle cases wordt de minimale waarde van de waterspiegelstand bepaald bij passage van het schip en voor de eerste 16 cases worden deze weergegeven samen met de in-situ data (Meire *e.a.*, 2026) in Figuur 15 als functie van de vaarsnelheid uitgedrukt in knopen. Naast de in-situ data wordt ook een analytische schatting van de gemiddelde waterspiegeldaling naast het schip op basis van literatuurformules (Waterloopkundig Laboratorium, 1997) weergegeven (symbool $+$). De kleur van de symbolen komt overeen met de blockage (Vgl. 1) en de grootte van de symbolen is een maat voor de diepgang. De CFD resultaten (weergegeven als $\square$) zijn de resultaten van de eerste 16 cases uitgevoerd in de theoretische kanaalsectie zonder voortstuwing. Hierbij werden de resultaten van cases met gelijke diepgang en breedte verbonden met lijnen. Hierbij dient opgemerkt te worden dat voor zowel de in-situ metingen als de CFD resultaten de waterspiegeldaling nabij de oever werd bepaald, terwijl de literatuur resultaten de gemiddelde waterspiegeldaling naast het schip geeft



Figuur 14 – Invloed van de snelheid op de waterstand bij passage van een schip.

(welke tevens overeenkomt met de squat van het schip in deze formulering). Zoals eerder zichtbaar in Fig. 13 en de overige figuren in Appendix B1.1, volgt dat de waterspiegeldaling nabij de oever minder is dan de daling nabij het schip. Hieruit volgt dat de gemiddelde waterspiegeldaling naast het schip meer zal zijn dan de waarde nabij de oever, waardoor de analytische waarden een overschatting zijn van de numerieke en in-situ waarden.

De numerieke waarden van de waterspiegeldalingen bepaald in de theoretische sectie komen goed overeen met de experimentele waarden, waar een redelijke spreiding op te merken valt. Voor de overmaatste schepen is er echter weinig experimenteel vergelijkingsmateriaal. De analytische schattingen van de gemiddelde waterspiegeldaling naast het schip tonen een goede overeenkomst met de numerieke resultaten voor de kleinste blockages. De verschillen worden groter bij grotere blockages, maar blijven steeds kleiner dan 0.04 m.



Figuur 15 – Vergelijking van waterstandsverlaging gemeten nabij de kade voor de numerieke resultaten, in-situ metingen (Meire *e.a.*, 2026) en schattingen op basis van literatuur (Waterloopkundig Laboratorium, 1997).

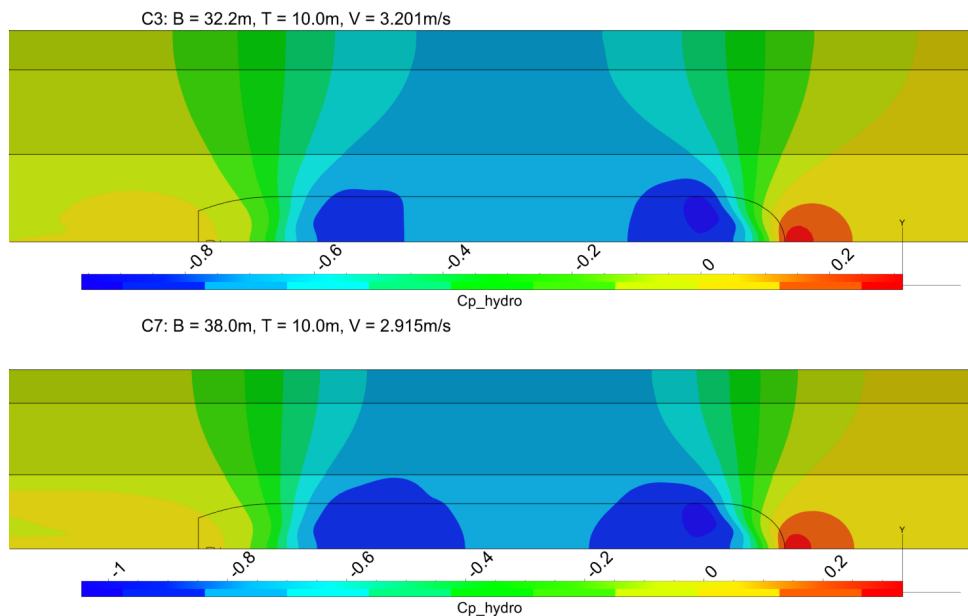
4.2 Drukverdeling op bodem en oevers

Voor de weergave en vergelijking van hydrodynamische druk wordt de dimensieloze waarde C_p berekend door de hydrodynamische druk te delen door de dynamische druk,

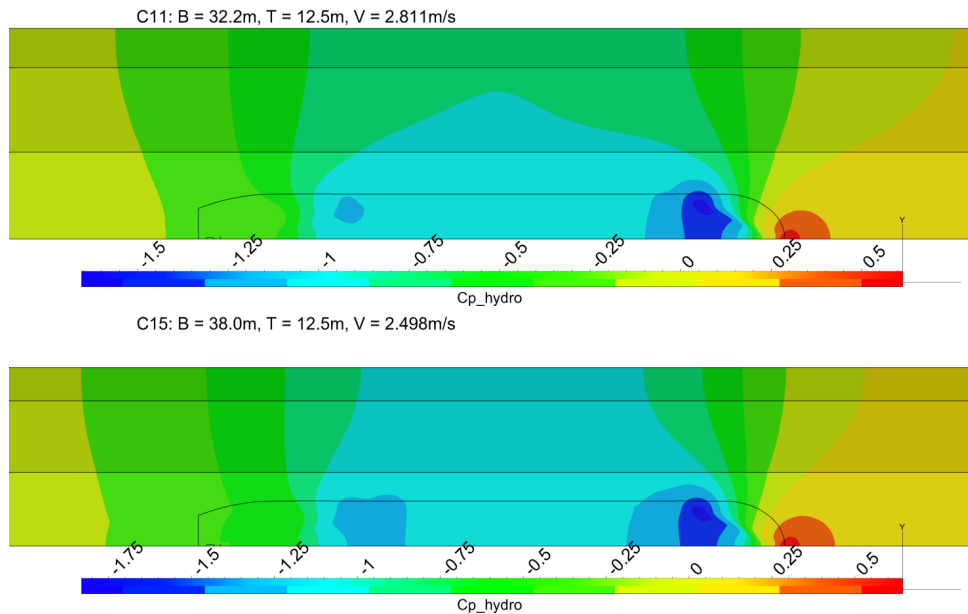
$$C_p = \frac{p}{0.5\rho_w V_{ref}^2}, \quad (5)$$

welke bij het stuwpunt bij de boeg een waarde van 1 heeft. De minima liggen grofweg tussen -0.8 en -2 .

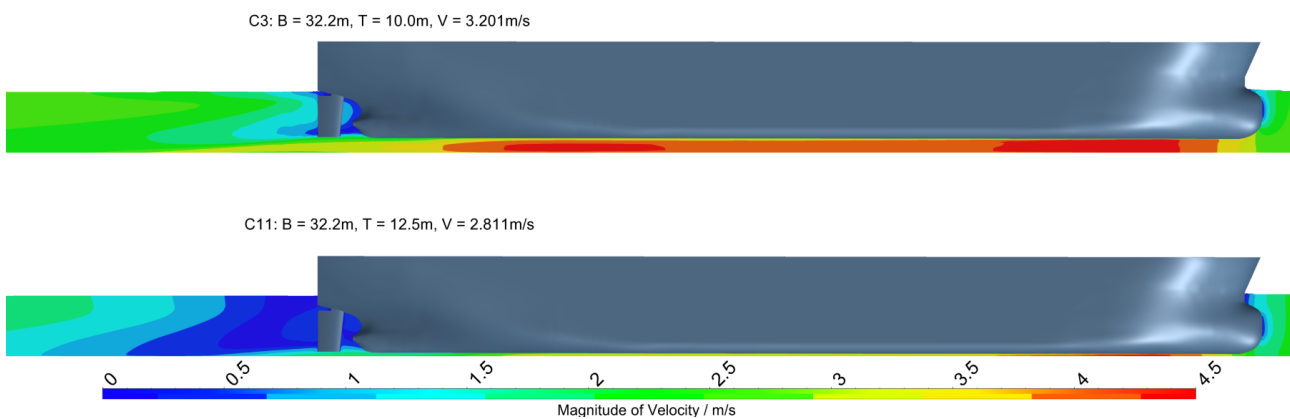
Figuren 16 en 17 geven de verdeling van hydrodynamische druk op de bodem en oevers van het kanaal weer in de nabijheid van het passerende schip voor V_2 . De drukverdelingen voor $T = 10$ m voor beide scheepsbreedtes vertonen een vergelijkbaar patroon. Hetzelfde geldt voor de drukverdelingen voor $T = 12.5$ m. De grootste verschillen tussen $T = 10$ m en $T = 12.5$ m is dat voor deze laatste, de minimale drukken onder de romp significant ($\approx 1.7\times$) lagere waarden bereiken, terwijl ook de maximale waarden (net voor de boeg) een factor twee hogere waarden bereiken voor $T = 12.5$ m in vergelijking met de resultaten voor $T = 10$ m. Aanvullend kan ook opgemerkt worden dat een groot verschil tussen $T = 10$ m enerzijds en $T = 12.5$ m anderzijds is dat het einde van de onderdruk (en dus opwaartse zuiging) zich verder achter het schip bevindt. Dit is een gevolg van de verschillen in het stroombeeld rond het schip waar er bij de grootste kielspeling (en dus kleinste diepgang, $T = 10$ m) een significante retourstroming onder het schip door gaat, wat bij de grotere diepgang veel minder het geval is. Daar gaat de retourstroming voornamelijk langs het schip heen, waardoor het zog dat door het schip wordt meegetrokken, zich van het wateroppervlak tot de kanaalbodem uitstrekt (zie ook Figuur 18).



Figuur 16 – Hydrodynamische drukcoëfficiënt C_p op de bodem en oevers voor cases 3 en 7.



Figuur 17 – Hydrodynamische drukcoëfficiënt C_p op de bodem en oevers voor cases 11 en 15.

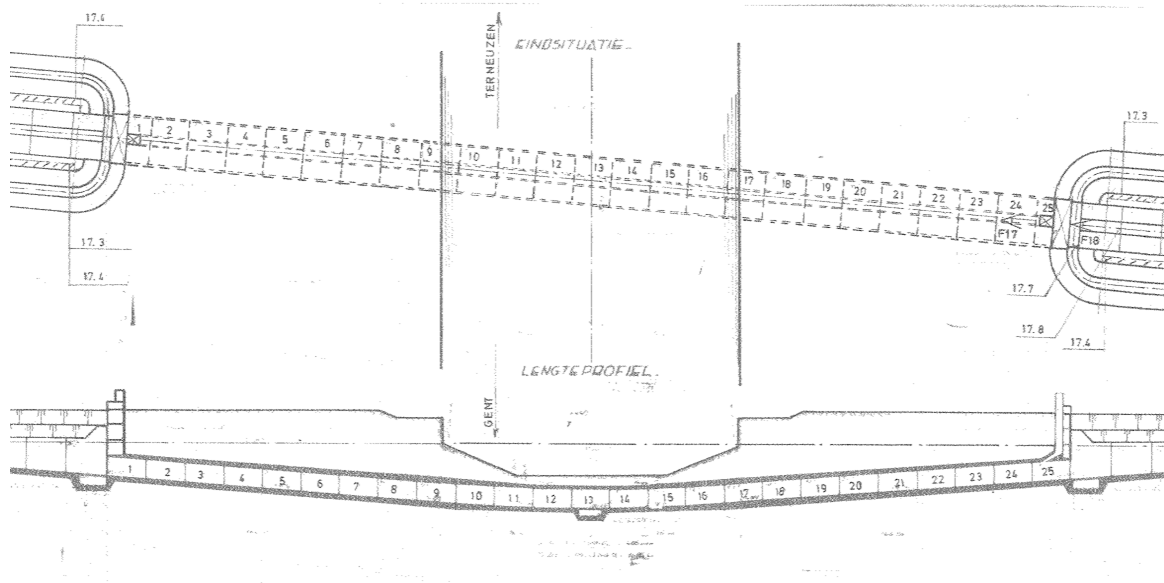


Figuur 18 – Vergelijking van de relatieve snelheid in het symmetrievlak van het schip voor $B = 32.2$ m bij kleine (boven) en grote diepgang (onder), respectievelijk case 3 en 11. Bij $T = 10$ m is er significante retourstroming onder de romp welke bij $T = 12.5$ m vrijwel ontbreekt.

4.3 Kracht- en momentverloop op de tunnelmoten bij passage van een schip

Op de bodem van het kanaal worden de krachten en momenten (ten gevolge van de hydrodynamische druk) bepaald op delen van de bodem die overeenkomen met de posities van individuele tunnelelementen van de Zelzatetunnel. Uit Maes *e.a.* (2026) volgt dat tunnelsectie 13 zich centraal onder het kanaal bevindt, geflankeerd door sectie 12 richting kust (westzijde) en sectie 14 richting Antwerpen (oostzijde), zie Figuur 19. Voor de berekening van de hydrodynamische belasting op de bovenkant van de tunnelmoten wordt aangenomen dat de tunnel loodrecht onder het kanaal doorgaat (dwars op de oever). Hieruit volgt dat voor centrale tunnelmoot 13, de lengte gehalveerd dient te worden, in overeenstemming met de aanname van symmetrie voor de eerste 16 berekeningen. De voor dit onderzoek relevante afmetingen van de tunnelmoten (overgenomen uit (Sweco bv, 2026)) centraal onder het kanaal zijn opgelijst in Tabel 8.

In Figuur 20 wordt een bovenaanzicht van een deel van het rekendomein weergegeven waarbij het bodemvlak opgedeeld is in twee delen die overeenkomen met de halve lengte van tunnelmoot 13 en de volledige lengte van tunnelmoot 14 (of 12). Door deze opdeling te herhalen voor verschillende longitudinale posities in het rekendomein en deze te relateren aan de snelheid waarmee het schip passeert, is het mogelijk om een



Figuur 19 – Bovenaanzicht en lengteprofiel van de tunnel met nummering van de tunnelmooten, uit Maes *e.a.* (2026).

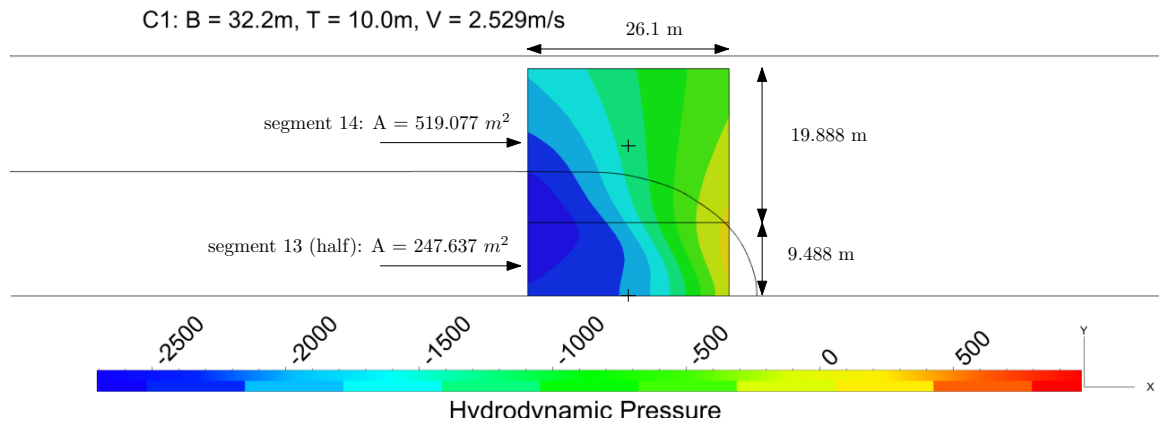
Tabel 8 – Relevante afmetingen van de tunnelmooten centraal onder het kanaal Gent-Terneuzen (Sweco bv, 2026).

Tunnelmoot	breedte	lengte
11	26.1 m	19.483 m
12	26.1 m	19.888 m
13	26.1 m	18.976 m
14	26.1 m	19.888 m
15	26.1 m	19.45 m

tijdsverloop van krachten en momenten te genereren als functie van de relatieve positie van het schip. Het referentiepunt voor de berekening van momenten ligt in X -richting halverwege tussen de de zijanten van de tunnelmooten. Voor tunnelmoot 13 is de laterale referentie $y = 0$ m, terwijl dit voor tunnelmoot 12/14 $y = 19.432$ m is ($= 9.488 \text{ m} + \frac{19.888 \text{ m}}{2}$). Het assenstelsel waarin de resulterende krachten bepaald worden is hetzelfde als gebruikt voor de CFD-berekeningen: X ligt in de lengterichting van het kanaal, Y dwars naar de oever en Z naar boven. De hydrodynamische druk wordt geïntegreerd over het oppervlak van de tunnelmooten zoals weergegeven in Fig. 20. Positieve waarden van de hydrodynamische druk (overdruk) resulteren in een negatieve kracht op de bovenkant van een tunnelmoot, terwijl zuiging (onderdruk) resulteert in een positieve kracht.

Voor de in Figuren 16 en 17 getoonde drukverdelingen wordt in Figuur 21 het verloop van de verticale kracht F_z en momenten M_x en M_y getoond als functie van de tijd. Tijdstip $t = 0$ s komt overeen met de passage van de voorste loodlijn over het midden van de tunnel. Het beeld van het verloop van de verticale kracht op de tunnelmooten is steeds vergelijkbaar: net voor passage van de boeg neemt de druk op de bodem licht toe (wat overeenkomt met een negatieve verticale kracht). Iets later, als de boeg zich voorbij het midden van de tunnelmoot bevindt, verandert de hydrodynamische druk van teken en ondervinden de tunnelmooten een significante opwaartse kracht (zuiging). Als de steven gepasseerd is, gaat de kracht terug naar nul.

Naast de verticale kracht ondervinden de tunnelmooten ook momenten rond de X - en Y -as door gradiënten in de drukverdeling in respectievelijk de y - en x -richting. De belangrijkste hiervan is een moment om de Y -as, wat overeenkomt met een moment om de langsas van de tunnel (dwars op de kanaalrichting). Deze wordt veroorzaakt door gradiënten in de hydrodynamische druk in de langsrichting onder het schip. De pieken hiervan komen voor bij passage van de boeg en steven boven de tunnel. In mindere mate resulteren gradiënten in

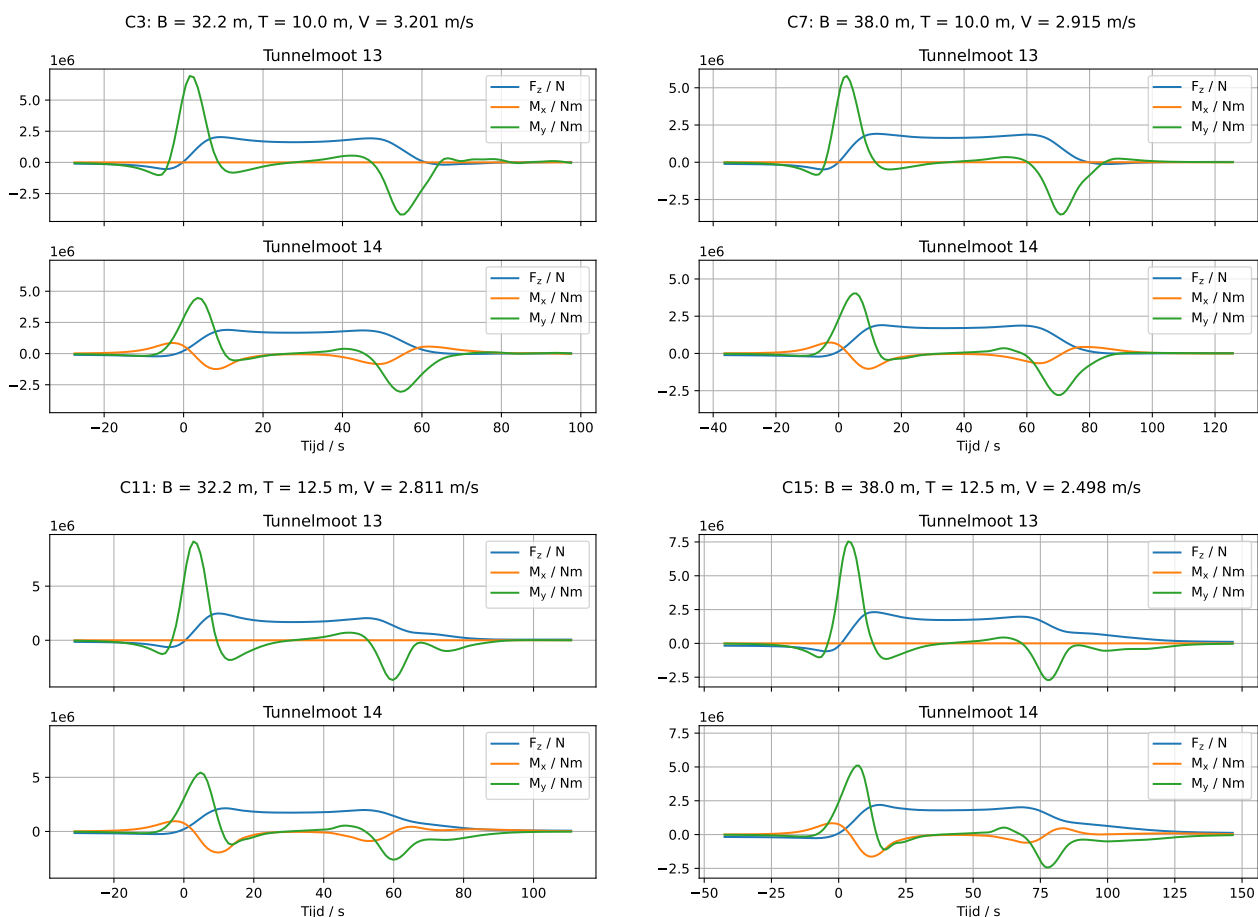


Figuur 20 – Opdeling bodemvlak rekendomein in delen die overeenkomen met tunnelmooten 13 en 14 voor de bepaling van krachten en momenten ten gevolge van hydrodynamische belasting bij een scheepspassage.

de hydrodynamische druk dwars onder het schip in een moment om de dwarsas van de tunnel(moten). Door de aanname van symmetrie voor de meerderheid van de cases (1 tot 16), is het X -moment op de centrale tunnelmoot 13 voor deze gevallen uiteraard 0 Nm. De krachten en momenten die getoond worden voor de centrale moot zijn de totale krachten, waarbij de waarden verkregen uit de CFD-berekeningen voor F_z en M_y vermenigvuldigd worden met twee. Wanneer de maximale waarden van de zuiging (F_z) en de extremen van het moment om de langsas van de tunnel voor moten 13 en 14 worden bepaald en uitgezet tegen de scheepssnelheid, worden de resultaten in Figuren 22 en 23 verkregen. Voor de duidelijkheid wordt voor de maxima van F_z bij elke waarde de specifieke kritische snelheid V_i weergegeven. Numerieke waarden worden in tabelvorm getoond in Appendix B1.6.

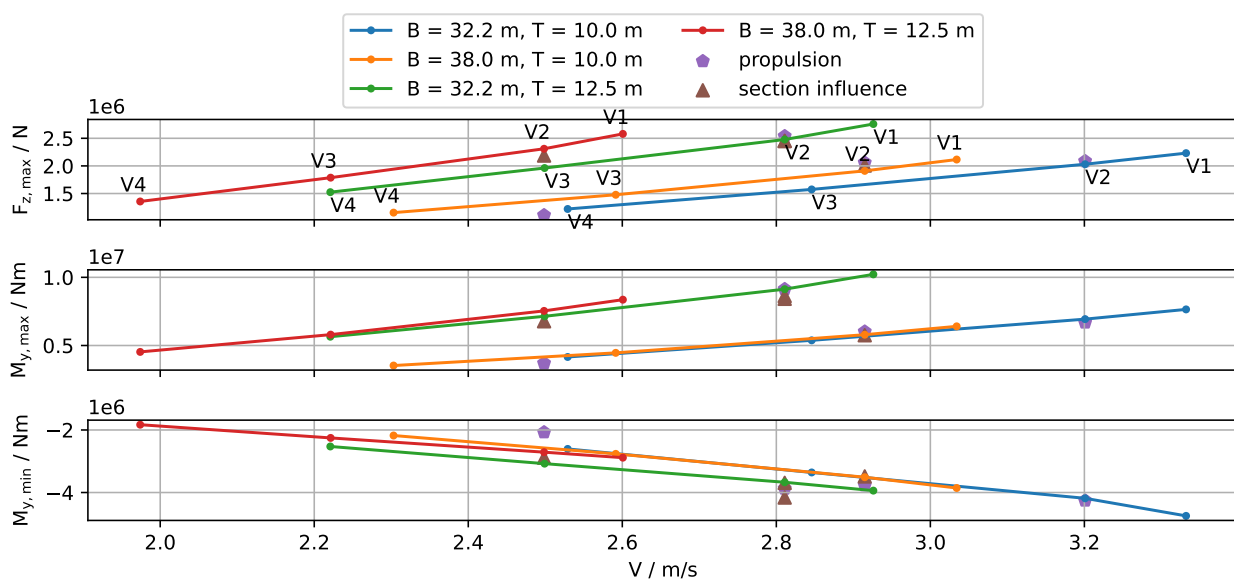
Voor alle cases worden de figuren met het krachtsverloop weergegeven in Appendix B1.3.

Op basis van Figuur 22 blijkt voor eenzelfde snelheid, de scheepsbreedte slechts een beperkte invloed te hebben op het moment M_y van de centrale moot. Dit wordt geïllustreerd door de erg gelijkaardige waarden voor snelheden 2.22 m/s (4.3 kn) en 2.5 m/s (4.9 kn) bij $T = 12.5$ m. De maximale zuiging op de tunnel blijkt wel met 17 % toe te nemen wanneer de scheepsbreedte toeneemt van 32.2 m naar 38 m (bij gelijke scheepssnelheid). Anderzijds dient geconcludeerd dat voor de centrale moot de relatie tussen breedte en zuigkracht minder sterk is dan de relatie met de kritische snelheid. Dit wordt geïllustreerd door de lagere waarden voor V_1 bij $B = 38$ m vergeleken met V_1 bij $B = 32.2$ m. Voor tunnelmoot 12/14 (Figuur 23), geeft breedte 38 m wel een grotere zuigkracht bij eenzelfde percentage van de kritische snelheid. Voor deze moten geldt dus dat de impact groter is dan de relatie op basis van de kritische snelheid. De absolute waarde van de zuiging boven de moten 12/14 is echter lager dan boven de centrale moot, waardoor er gesteld kan worden dat voor de impact van bredere schepen op de drukken op de tunnelmooten de kritische snelheid een conservatieve aanname is (zowel voor F_z als M_y). Voor eenzelfde diepgang blijkt de maximale zuigkracht op de tunnel beïnvloedt te worden door zowel de scheepsbreedte als de vaarsnelheid. Bij maximale diepgang (12.5 m) en maximale toegelaten vaarsnelheid (9 km/h of 2.5 m/s) zal een panamax schip (case 10, V_3) een maximale zuigkracht gelijk aan 2×10^6 N realiseren. Door de beschikbare resultaten bij $B = 38$ m linear te interpoleren blijkt voor deze scheepsbreedte eenzelfde zuiging bekomen te worden bij vaarsnelheid 2.3 m (8.3 km/h of 4.5 kn). Deze snelheidsvermindering is kleiner dan deze bekomen op basis van de kritische snelheid (d.i. 2.22 m/s, zie Tabel 2).

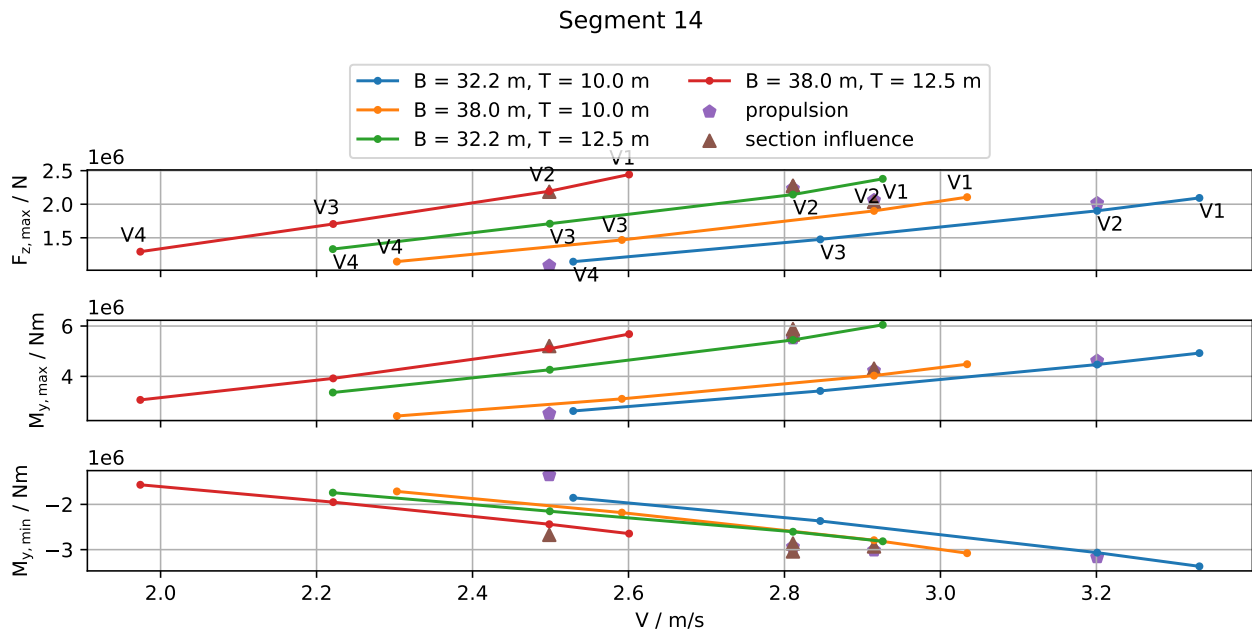


Figuur 21 – Verloop in de tijd van verticale kracht F_z en momenten M_x en M_y ten gevolge van de hydrodynamische belasting bij een scheepspassage voor cases 3, 7, 11 en 15.

Segment 13



Figuur 22 – Maximale waarde van verticale kracht F_z en extremen van momenten M_y op tunnelmoot 13 veroorzaakt door de hydrodynamische belasting bij een scheepspassage.



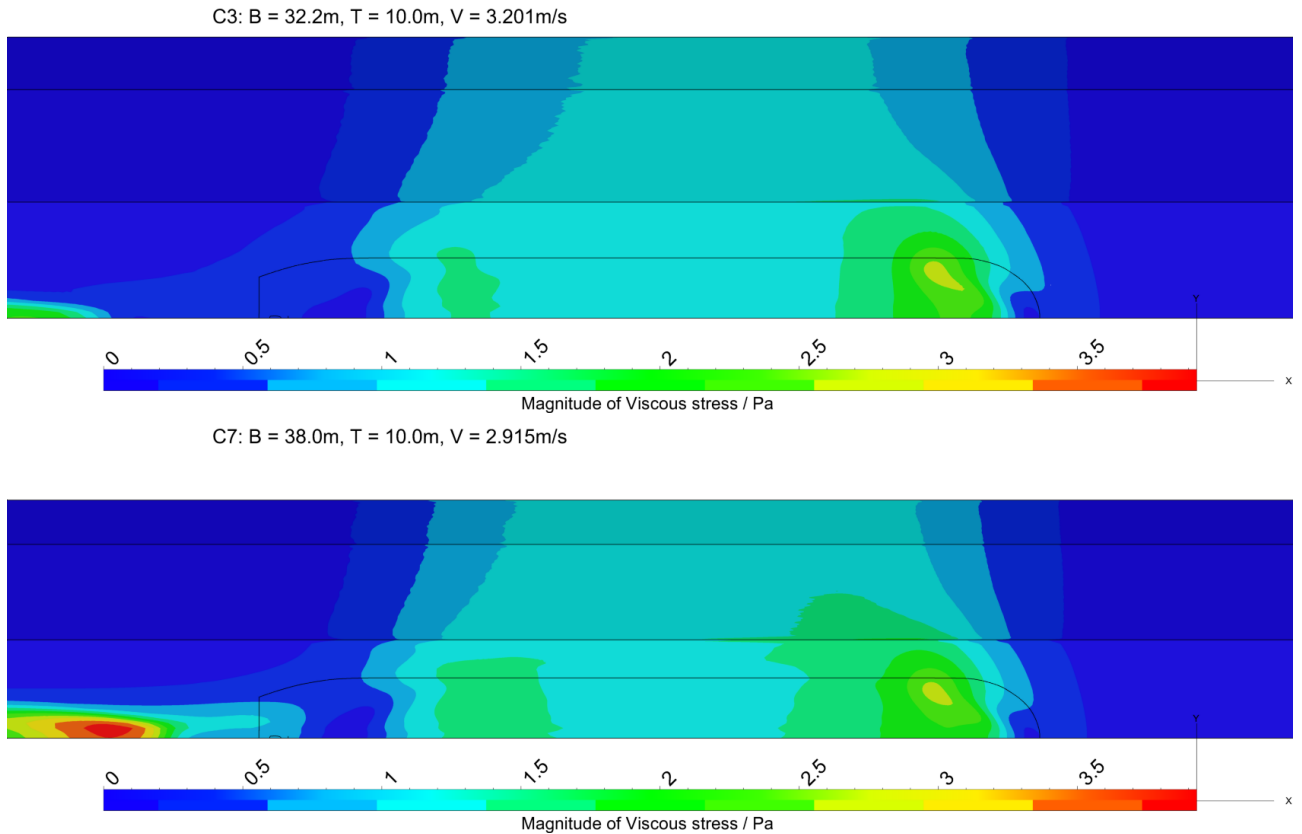
Figuur 23 – Maximale waarde van verticale kracht F_z en extremen van momenten M_y op tunnelmoot 14 veroorzaakt door de hydrodynamische belasting bij een scheepspassage.

4.4 Schuifspanning op de bodem

Naast de hydrodynamische druk op bodem en oevers, heeft de schuifspanning gegenereerd door de passage van een schip een invloed op de stabiliteit van de bodem. (Te) hoge waarden kunnen leiden tot erosie van een deel van de bodembedekking. Uit recente peilingen blijkt dat ter plaatse van de Zelzatetunnel in het midden van het kanaal, een deel van de zandlaag op de tunnel geërodeerd is.

Voor de vier schepen bij V_2 in het theoretische kanaalprofiel wordt de schuifspanning op de bodem en oevers nabij het passerende schip weergegeven in Figuren 24 en 25, waarbij per paar, het bereik van waarden gelijk genomen werd. Niet alleen naast en onder het schip zijn hoge waarden waar te nemen zijn, maar ook achter het schip, onder het zog. Vooral voor de resultaten bij $T = 12.5 \text{ m}$ is de schuifspanning op de bodem achter het schip significant (voor $B = 32.2 \text{ m}$ verdrievoudigt de waarde, terwijl voor $B = 38 \text{ m}$, het maximum meer dan verdubbelt in vergelijking met de resultaten bij $T = 10 \text{ m}$). Deze pieken worden veroorzaakt door de zog dat het schip achter zich meetrekt, en dat zich van het kanaalpeil tot de bodem uitstrekt (zie ook Figuur 18 waar reeds de grootte van de relatieve snelheid werd getoond in het symmetrievlak). Doordat het zog zich tot de bodem van het kanaal uitstrekt, ontstaat er op die plaats een grote gradient in de snelheid, welke de directe oorzaak is van de hoge schuifspanningen op de bodem op die plaats.

Voor de cases bij $T = 12.5 \text{ m}$ bereikt de schuifspanning onder de romp een maximum nabij de boeg (zoals bij $T = 10 \text{ m}$), en neemt dan af tot het achterschip bereikt wordt. De reden hiervoor wordt in § 4.5 verder toegelicht.



Figuur 24 – Schuifspanning op de bodem en oevers bij passage van een schip voor cases 3 en 7.

4.5 Retourstroming

Met behulp van de wet van Bernoulli (Maes *e.a.*, 2026) kan een ruwe inschatting gemaakt worden van de grootte van de retourstroming rond het schip en de daarbij horende drukverlaging,

$$p = \rho_w g h - \frac{1}{2} \rho_w V_w^2, \quad (6)$$

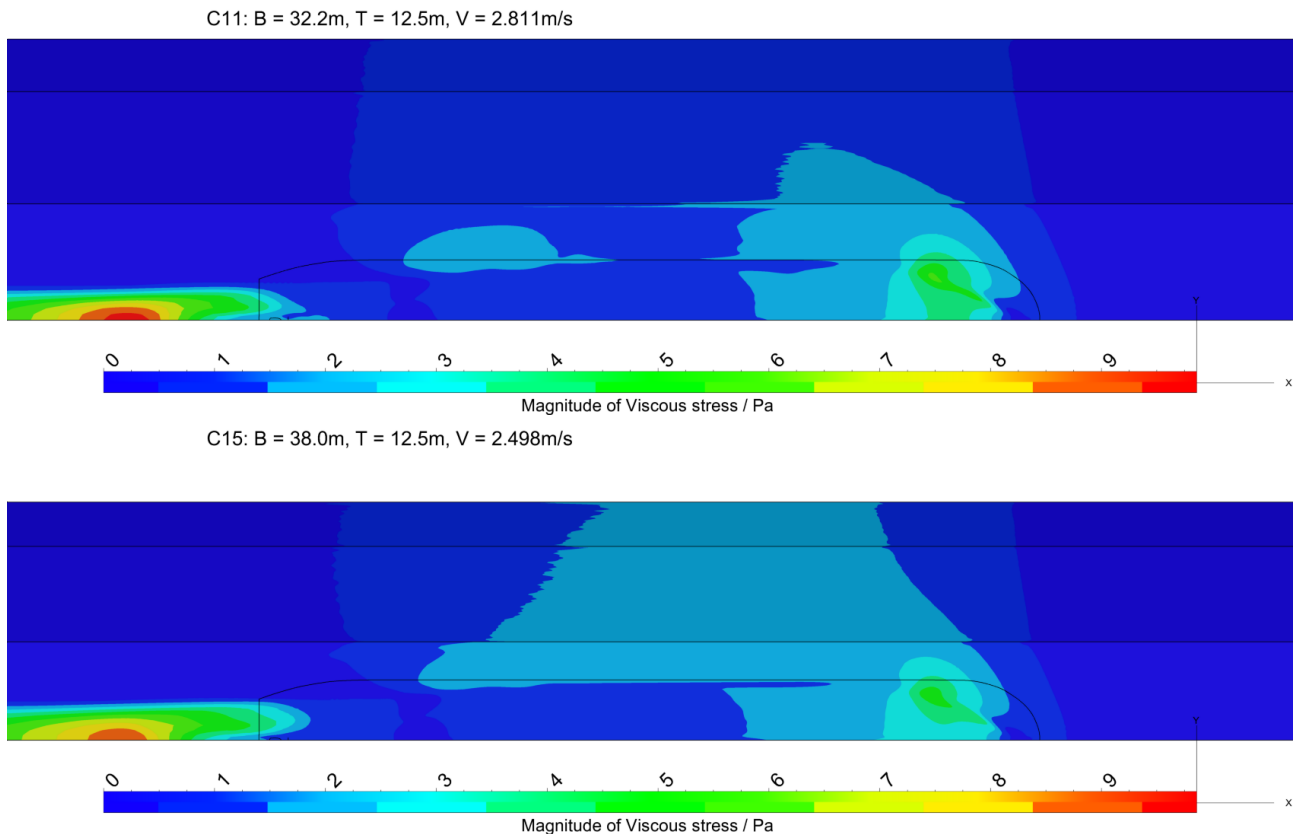
waarbij het eerste deel rechts de invloed is van de hoogte van de waterkolom in het kanaal en het tweede deel daar een vermindering (zuiging) op geeft door de retourstroming rondom het schip. Hierbij wordt geen rekening gehouden met de waterspiegeldaling rondom en inzinking van het passerende schip, welke wel een invloed hebben op de retourstroming (Waterloopkundig Laboratorium, 1997).

Onder aanname van een uniforme retourstroming volgt

$$(A_w - A_s) V_{w,1d} = A_s V_{ref}, \quad (7)$$

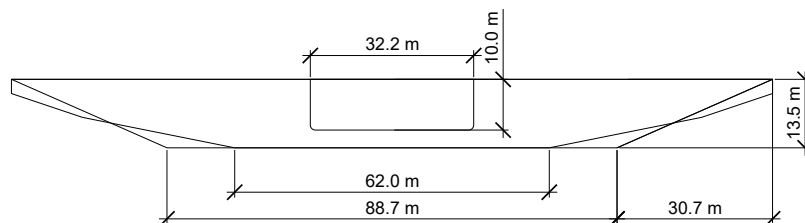
waarbij $V_{w,1d}$ de onbekende (1-dimensionale) retourstroming is, $A_s = B \times T$ het grootspantoppervlak van het schip en A_w het dwarsoppervlak van het kanaal is. De waarden van de retoursnelheid berekend met Vgl. 7 voor cases 1 tot 16 worden in Tabel 9 weergegeven.

De methode uit Waterloopkundig Laboratorium (1997) wordt op WL gebruikt voor de dimensionering van bodembescherming in kanalen en sluiscolken ten gevolge van belasting door schepen (Verelst en Visser, 2024). Met deze methode kan een nauwkeurigere schatting van de gemiddelde retourstroming (en waterspiegeldaling) rondom het schip bepaald worden in een vaarweg die ofwel een rechthoekige dan wel een trapeziumvormige doorsnede heeft. Het theoretische profiel van het kanaal ter plaatse van de Zelzatetunnel heeft geen van beide en wordt daarom aangepast voor deze berekening, waarbij de dubbel helling en verticale wand



Figuur 25 – Schuifspanning op de bodem en oevers bij passage van een schip voor cases 11 en 15.

vervangen wordt één helling vanaf de bodem tot de waterspiegel en het oppervlak van de natte sectie behouden blijft. Het resulterende kanaalprofiel wordt weergegeven in Figuur 26. De methode uit Waterloopkundig Laboratorium (1997) bevat een correctie α_s welke gebruikt wordt om niet-uniforme retourstroming te verkrijgen (hogere retourstroming dicht bij het schip), maar gezien de vrij uniforme snelheden in secties nabij het scheepsmidden (zie o.a. Fig. 27), werd deze parameter gelijk gesteld aan 1. De resulterende retourstroom-snelheden en waterspiegeldalingen voor de eerste 16 cases werden ook toegevoegd aan Tabel 9 (subscript *lit*).



Figuur 26 – Vergelijking tussen theoretische sectie van het kanaal ter plaatse van de Zelzatetunnel en een vereenvoudigde sectie met zelfde oppervlak en breedte bij de waterspiegel.

Voor de vier cases by V_2 wordt de retourstroming rond het schip gevisualiseerd in Figuren 27 ($T = 10$ m) en 28 ($T = 12.5$ m) in 13 dwarssecties die $\frac{L_{pp}}{10}$ uit elkaar staan. Hierbij valt op dat er bij $T = 10$ m retourstroming onder de romp doorgaat met snelheden die vergelijkbaar zijn met de snelheden naast het schip in de secties dicht bij het scheepsmidden. Er is een vrijwel uniforme snelheid zichtbaar in vier van de dwarssecties het dichtst bij het scheepsmidden. Voor deze cases worden de hoogste snelheden opgemerkt bij de overgang van boeg naar midscheepse sectie en de overgang van die laatste naar het achterschip. Deze plaatsen komen overeen met de

Tabel 9 – Retourstroming (m/s) en hydrodynamische druk (Pa) berekend met de wet van Bernoulli (Maes *e.a.*, 2026)) en hydrodynamische druk gebaseerd op scheepssnelheid voor de eerste 16 CFD-berekeningen. Kolom $\bar{V}_{cf}$ toont de gemiddelde retourssnelheid in een dwarssectie van het kanaal bij het scheepsmidden op basis van de CFD resultaten en de laatste twee kolommen tonen de resultaten op basis van literatuur formules (gemiddelde retourstroming en waterspiegeldaling (m)) (Waterloopkundig Laboratorium, 1997).

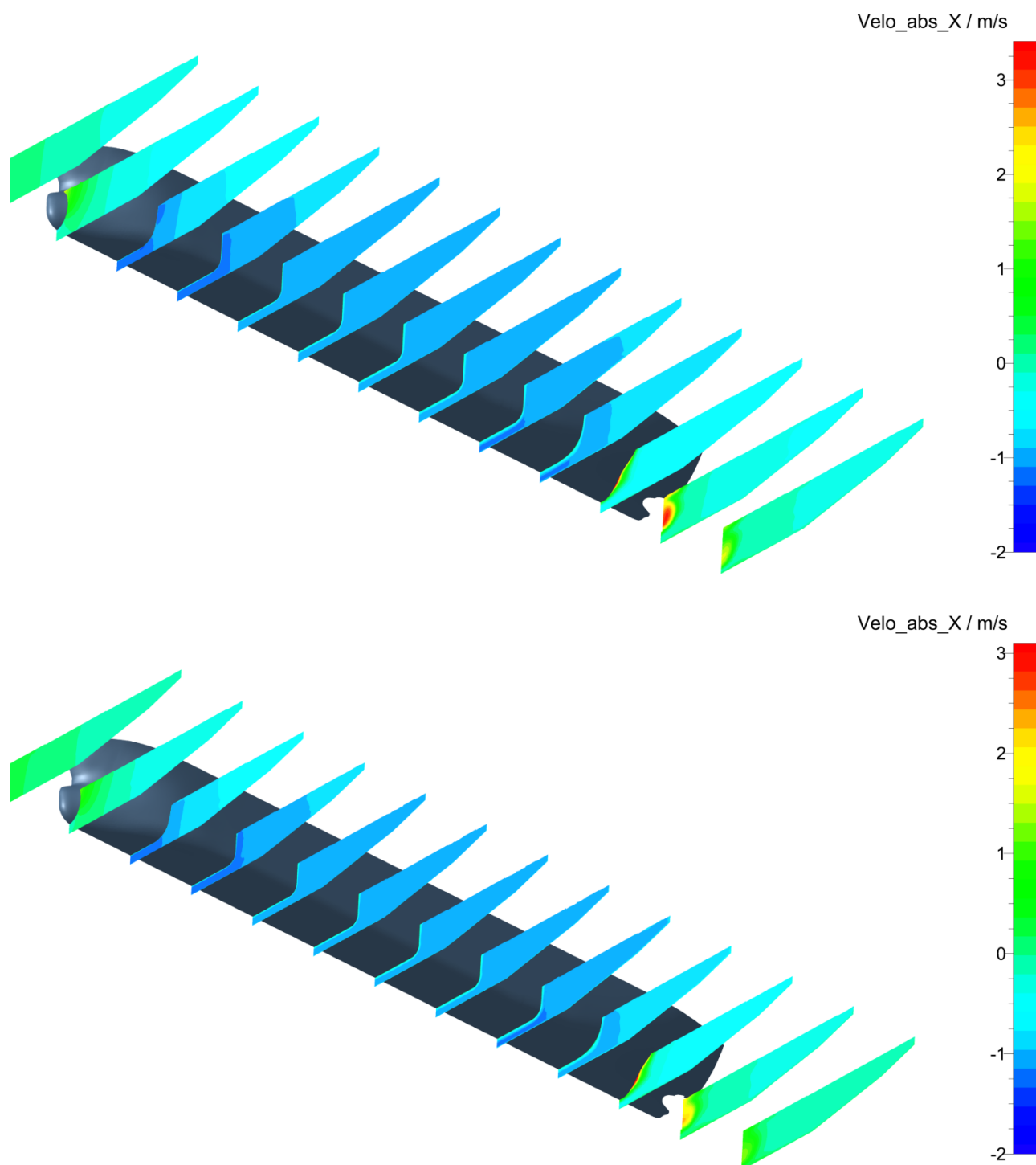
Case	B	T	V_{ref}	A_s	$V_{w,1d}$	$P_{hyd,1d}$	P_{hyd}	$\bar{V}_{cf}$	$\bar{V}_{lit}$	Δh_{lit}
1	32.2	10	2.529	322	0.632	199.3	3195	0.704	0.701	0.206
2	32.2	10	2.846	322	0.711	252.4	4046	0.820	0.817	0.271
3	32.2	10	3.201	322	0.799	319.3	5118	0.965	0.963	0.362
4	32.2	10	3.332	322	0.832	346.0	5546	1.028	1.023	0.401
5	38	10	2.303	380	0.711	252.4	2650	0.780	0.782	0.215
6	38	10	2.591	380	0.800	319.6	3355	0.901	0.909	0.282
7	38	10	2.915	380	0.900	404.3	4244	1.044	1.069	0.376
8	38	10	3.034	380	0.936	438.1	4599	1.120	1.134	0.416
9	32.2	12.5	2.221	402.5	0.740	273.2	2464	0.813	0.811	0.217
10	32.2	12.5	2.499	402.5	0.832	346.0	3120	0.938	0.942	0.285
11	32.2	12.5	2.811	402.5	0.936	437.7	3947	1.081	1.107	0.379
12	32.2	12.5	2.926	402.5	0.974	474.3	4277	1.163	1.173	0.420
13	38	12.5	1.974	475	0.825	340.2	1947	0.895	0.897	0.222
14	38	12.5	2.221	475	0.929	430.8	2465	1.016	1.039	0.290
15	38	12.5	2.498	475	1.044	545.0	3118	1.181	1.217	0.385
16	38	12.5	2.601	475	1.087	590.5	3379	1.269	1.289	0.426

locaties waar de hydrodynamische drukken op de bodem minimale waarden bereiken (zie Figuren. 16 en 17). Verder is er in Figuur 27 een grenslaag zichtbaar die dikker wordt naar het achterschip toe. De grenslaag blijft echter dunner dan de beschikbare ruimte onder de romp. Achter het schip is een zog aanwezig waarin water mee met het schip beweegt met snelheden die evenwel lager zijn dan de scheepssnelheid.

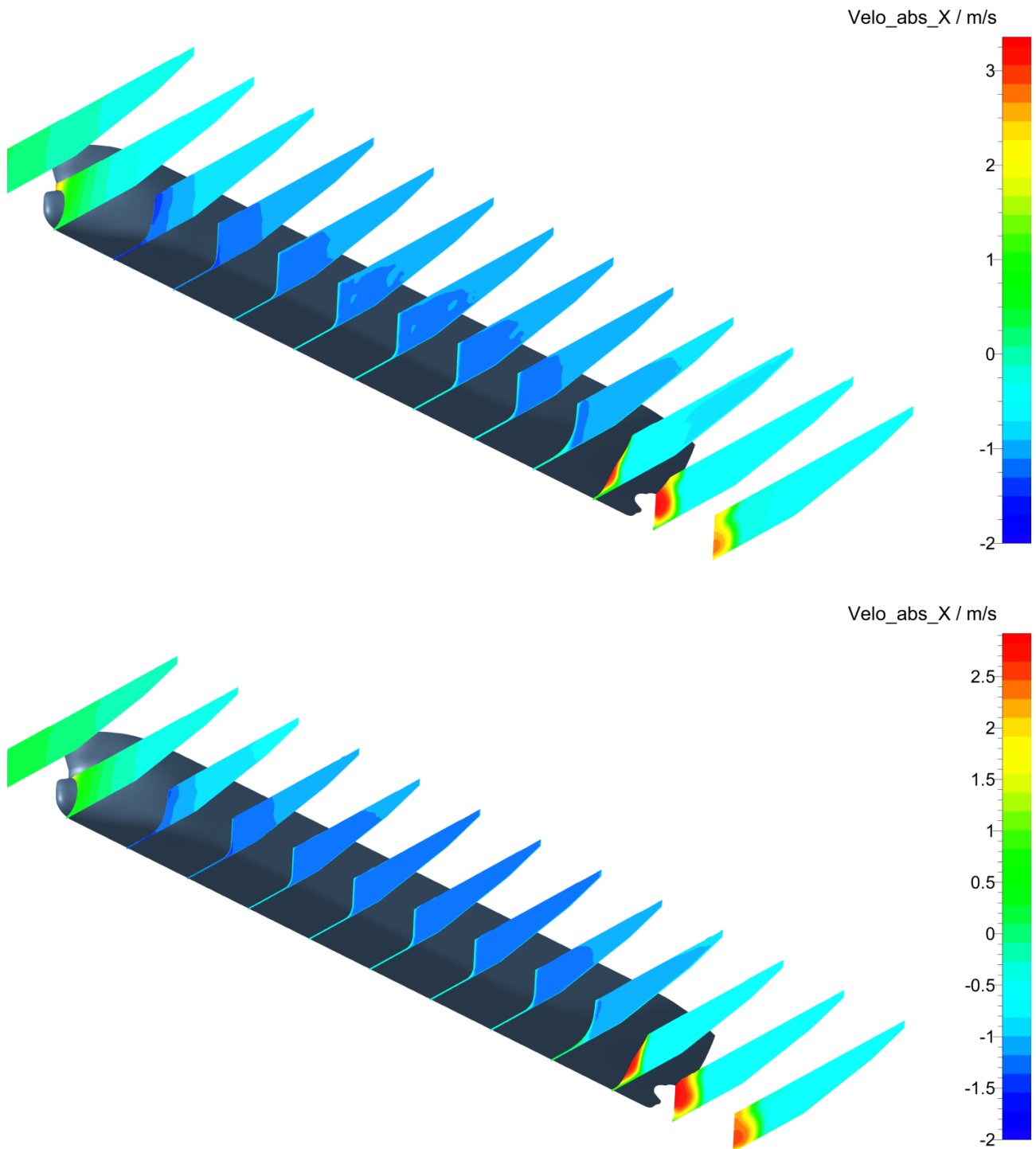
Het stroombeeld bij $T = 12.5$ m vertoont enkele opvallende verschillen. Er ontstaat ook hier een grenslaag die dikker wordt naar het achterschip toe, maar alvorens de midscheepse positie bereikt wordt, interageert de grenslaag met de bodem, waarna de langssnelheid onder het schip afneemt en zelfs positieve waarden aanneemt (stroming naar voren). Dit effect is ook zichtbaar in de visualisaties van de schuifspanning op de bodem voor $T = 12.5$ m zoals getoond in Figuur 25 waar vanaf de midscheepse positie tot het achterschip geen toename meer is van de schuifspanning zoals zichtbaar bij $T = 10$ m. Wegens het gebrek aan plaats onder het schip, bereikt de retourstroming ernaast hogere waarden dan bij $T = 10$ m (Figuur 27). Het zog achter de schepen is bij deze diepgang significant groter en er worden voorwaartse snelheden bereikt die hoger zijn dan de scheepssnelheid. De gemiddelde waarde van de retourstroming werd berekend voor de sectie doorheen het scheepsmidden voor de eerste 16 cases en deze worden ook in Tabel 9 weergegeven. De 1D resultaten zonder correctie voor waterspiegeldaling (label $V_{w,1d}$) en met correctie voor waterspiegeldaling (label *literature*) en de CFD voorspelling worden grafisch weergegeven in Figuur 29. Voor de vier vaste percentages van de kritische snelheden werden lineaire benaderingen van de CFD resultaten toegevoegd en voor elke van de vier beschouwde combinaties van diepgang en breedte werden kwadratische benaderingen bepaald. Uit deze resultaten blijkt dat de numeriek bepaalde retourssnelheden een goede overeenkomst geven met analytische resultaten uit de literatuur (Waterloopkundig Laboratorium, 1997). De vereenvoudigde benadering (Vgl. 7) geeft altijd een significante onderschatting van de retourstroming. Hieruit volgt dat de waterspiegeldaling en inzinking van het schip in rekening gebracht dienen te worden om retourstroming correct in te schatten.

Zoals in Maes *e.a.* (2026) wordt de druk geschat met Vgl. 6 en 7,

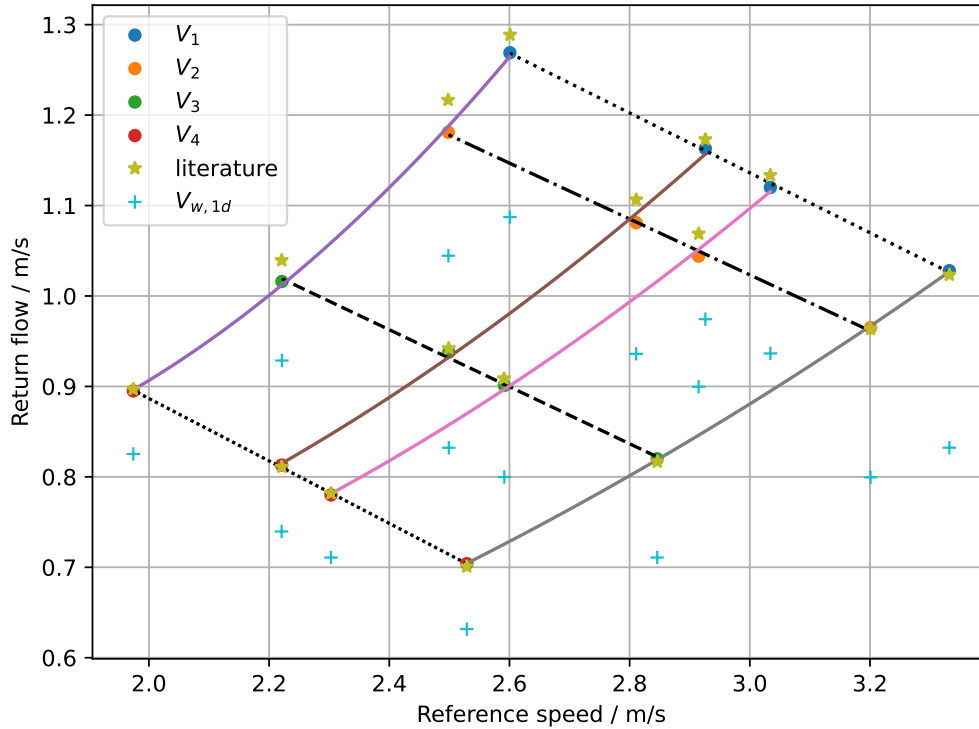
$$p = \rho_w g h - \frac{\rho_w}{2} \left(\frac{A_s V_{ref}}{A_w - A_s} \right)^2. \quad (8)$$



Figuur 27 – Longitudinale component van de retourstroming rond het schip voor cases 3 en 7 (V_2 en $T = 10$ m). Negatieve snelheden betekenen dat water in tegengestelde richting van het schip in het kanaal beweegt (retourstroming), water met een positieve snelheid beweegt met het schip mee.



Figuur 28 – Longitudinale component van de retourstroming rond het schip voor cases 11 en 15 (V_2 en $T = 12.5$ m). Negatieve snelheden betekenen dat water in tegengestelde richting van het schip in het kanaal beweegt (retourstroming), water met een positieve snelheid beweegt met het schip mee.



Figuur 29 – Vergelijking tussen 1D, literatuur en CFD berekening van de gemiddelde retourstroming voor cases 1 tot 16 als functie van de scheepssnelheid.

De op deze manier berekende hydrodynamische (onder)drukken variëren van -200 Pa tot -590 Pa bij aanname van zoet water (zie Tabel 9). Deze range van waarden is significant lager dan de hydrodynamische drukken die uit de CFD berekeningen volgen, waar de minima op de bodem onder het voorschip voor de eerste 16 cases variëren van (bij benadering) -2600 Pa (case 5) tot -7500 Pa (case 12). In vergelijking met de hydrodynamische druk gebaseerd op de scheepssnelheid zijn hydrodynamische drukken gebaseerd op de retourstroming grofweg een orde lager. Hieruit volgt dat de aanname in Maes *e.a.* (2026) waarbij de retourstroming gebruikt wordt om drukverlaging te berekenen, een onderschatting is van de werkelijke fysische effecten. Met een simpel voorbeeld uit de vloeistofdynamica kan dit geïllustreerd worden. Voor potentiaalstroming rond een bol in een uniform snelheidsveld (Katz en Plotkin, 2001) bestaat een analytische oplossing voor de drukverdeling op het boloppervlak. Voor de laterale extrema volgt

$$p_{bol,min} = \frac{\rho_w V_{ref}^2}{2} \left(1 - \frac{9}{4}\right) = -\frac{\rho_w V_{ref}^2}{2} \frac{5}{4}. \quad (9)$$

De maximale snelheid op deze plaats is (Katz en Plotkin, 2001, p. 68),

$$V_{bol,max} = \frac{3}{2} V_{ref}, \quad (10)$$

wat overeenkomt met een retoursnelheid van $\frac{V_{ref}}{2}$. Deze laatste formule geeft qua ordegrrootte een redelijke schatting van de eigenlijke retoursnelheid, maar is minder nauwkeurig dan een schatting met behulp van Vgl. 7.

Uit Vgl. 9 volgt dat de minimale druk bij de laterale extremen in waarde een kwart groter is dan de druk bij het stuwpunt. De drukcoëfficiënt in het voorste stuwpunt van het schip is $C_p = 1$, wat resulteert in stuwpuntdrukken van 2000 Pa tot 5400 Pa (bij referentiesnelheden van 2.0 m/s tot 3.3 m/s). Als die waarden dan vermenigvuldigd worden met dezelfde factor ($-5/4$) als volgt uit het voorbeeld van de potentiaalstroming rond de bol, dan krijgt men als eerste schatting van minimale drukken waarden van -2500 Pa tot -6750 Pa, welke

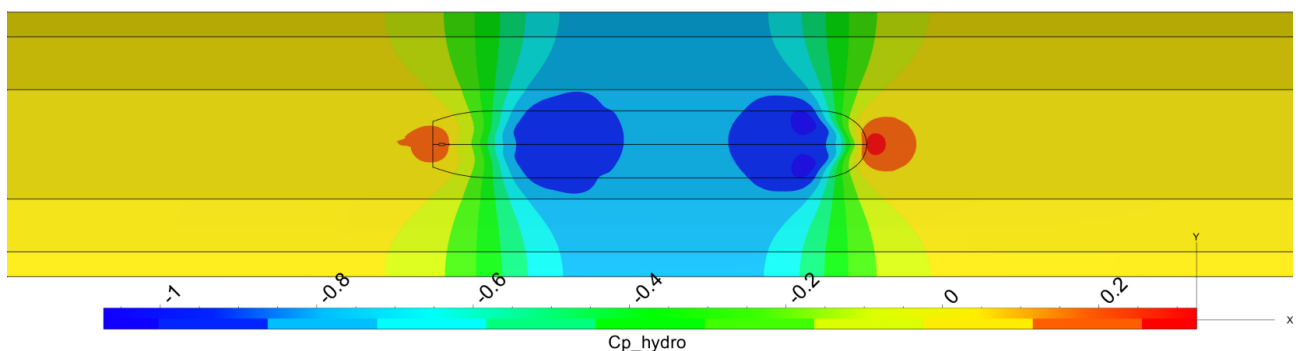
redelijk in de buurt komen van de waarden uit de CFD-resultaten. Meer onderzoek is echter nodig of een methode gebaseerd op potentiaaltheorie (met scheepsromp) sneller dan met CFD een nauwkeuriger resultaat kan geven dan met Vgl. 9.

4.6 Invloed van voortstuwing

Wegens moeilijkheden met convergentie van de resultaten met propulsie voor de kleinste kielspelingen worden deze resultaten (bij $T = 12.5$ m, cases 19 en 20) verder niet besproken. Er is meer tijd nodig om relevante solver instellingen te tunen die invloed hebben op de manier waarop de aanpassing van de stuwkracht aan de weerstand van de romp wordt uitgevoerd en de interactie daarvan met de vrijheidsgraden van de romp om tot een stabiel evenwicht te komen. De moeilijkheden om een stabiel evenwicht te vinden hebben mogelijk te maken met de stroming waarin de trekkende schijf zich bevindt.

Voor cases 17 en 18 (bij $T = 10$ m) had de solver geen probleem om tot een voldoende geconvergeerde oplossing te komen. In deze gevallen is het zog achter het schip significant kleiner. Een vergelijking van de resulterende drukverdeling op de bodem van het kanaal met voortstuwing (Figuur 30) en zonder voortstuwing (case 7 in Figuur 39) toont slechts kleine verschillen: enkel bij het achterschip is een kleine invloed van de propeller zichtbaar. De schuifspanning op de bodem toont wel wat verschillen bij het achterschip, vergelijk hiervoor de visualisatie in Figuur 31 met de eerder getoonde resultaten voor dezelfde conditie in Figuur 49: de maximale waarde van de schuifspanning op de bodem achter het schip is nu lager dan voor de berekening zonder voortstuwing.

C18: $B = 38.0$ m, $T = 10.0$ m, $V = 2.915$ m/s



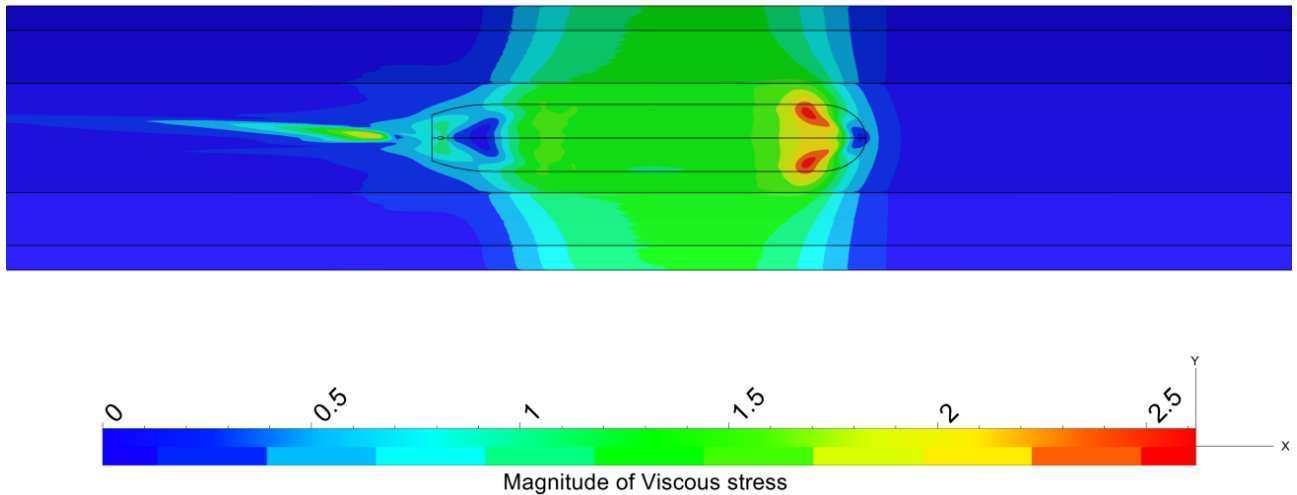
Figuur 30 – Drukverdeling op de bodem voor case 18 ($B = 38$ m en $T = 10$ m) met voortstuwing.

De retourstroming rond het schip voor case 18 wordt getoond in Figuur 32. Merk op dat de schaal van de getoonde snelheid niet hetzelfde is als in Figuur 27, de oorzaak hiervan is de aanwezigheid van voortstuwing in case 18. De gemiddelde retourstroming in het dwarsvlak bij het scheepsmidden is voor beide gevallen zeer gelijkaardig: 1.044 m/s (case 7) en 1.03 m/s (case 18).

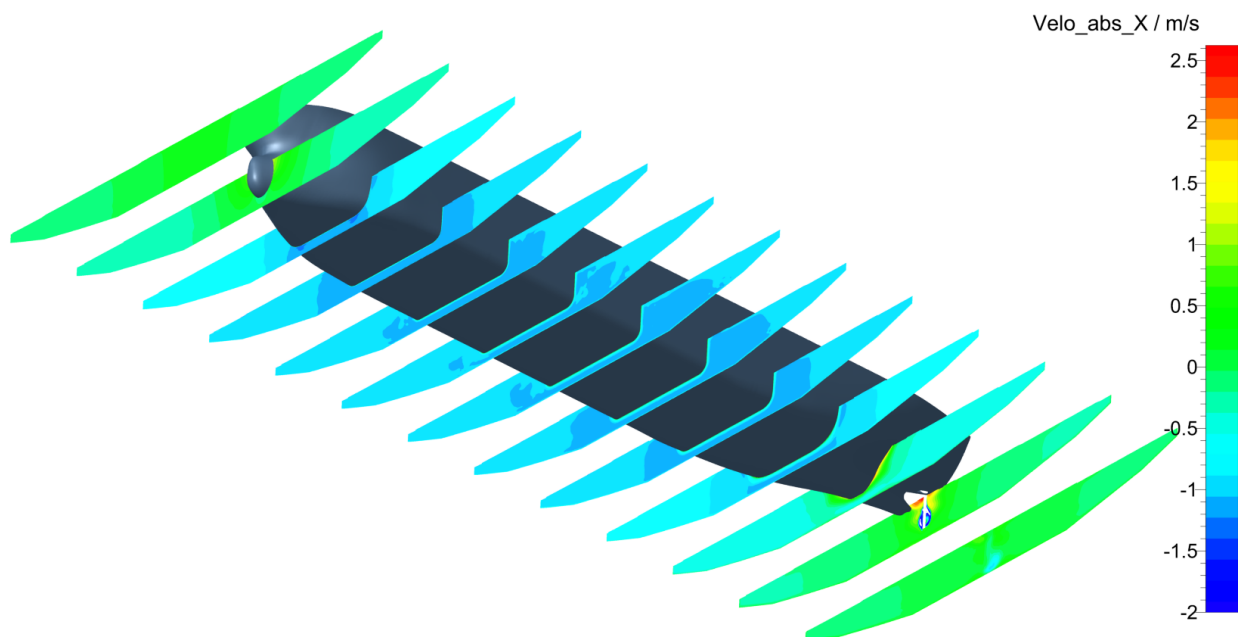
4.7 Invloed van kanaalsectie profiel

Resultaten van simulaties uitgevoerd in op peilingen gebaseerde kanaalsecties tonen enkele verschillen met de resultaten uitgevoerd in de theoretische kanaalsectie. De belangrijkste zullen hier kort besproken worden, waarbij enkel resultaten bij $T = 12.5$ m worden gebruikt. Zoals eerder opgemerkt, werden de schepen gemeshed bij de inzinking zoals bepaald in het theoretische kanaal wegens een bug in de solver van FINE/Marine gerelateerd aan de vervorming van het rekenrooster bij een niet-vlakke bodem. Een mogelijk gevolg hiervan

C18: $B = 38.0\text{m}$, $T = 10.0\text{m}$, $V = 2.915\text{m/s}$



Figuur 31 – Verdeling van de schuifspanning op de bodem voor case 18 ($B = 38\text{ m}$ en $T = 10\text{ m}$) met voortstuwing.



Figuur 32 – Retourstroming rond het schip voor case 18 ($B = 38\text{ m}$ en $T = 10\text{ m}$) met voortstuwing.

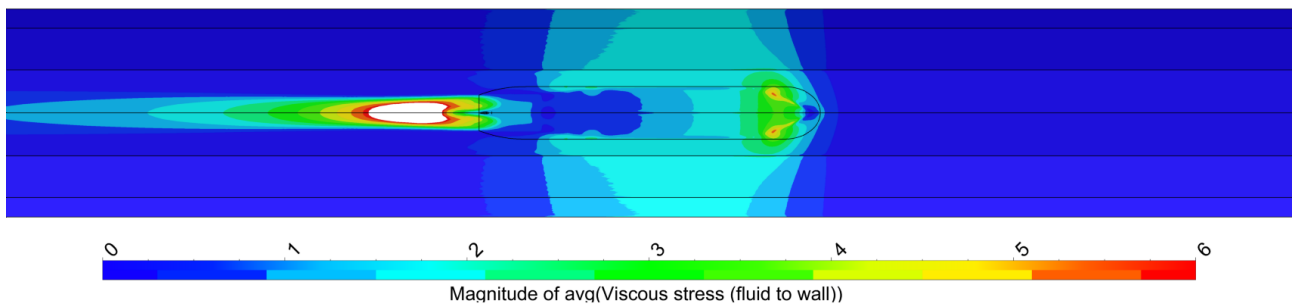
is dat de balans van verticale krachten niet exact in evenwicht is, een voordeel is wel dat convergentie over het algemeen beter is. Een bron van verschillen is de ongelijkheid van de doorstroomsecties aan bakboord en stuurboordzijde van de schepen, wat kan leiden tot verschillen in retourstroming en waterspiegelstand tussen beide zijden. Evenzeer zal een vermindering van het natte oppervlak van de kanaalsectie zorgen voor een verhoging van de retourstroming.

Voor de berekeningen uitgevoerd in secties 1920 en 2015 bij $T = 12.5\text{ m}$ is er iets meer ruimte tussen schip en

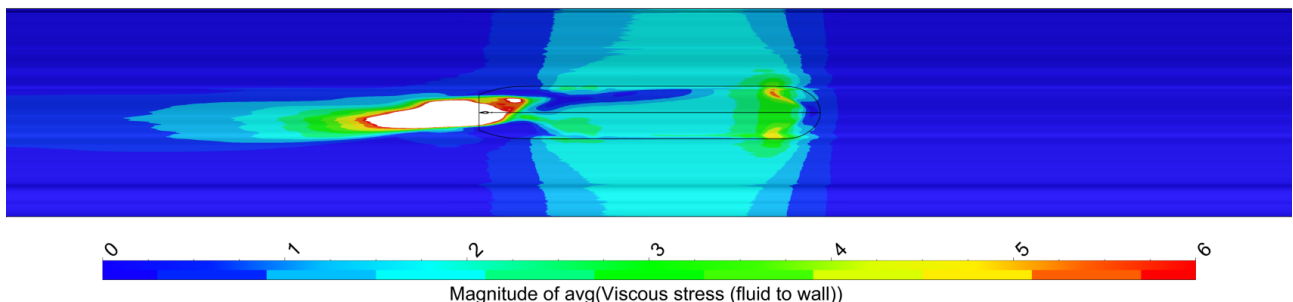
kanaalbodem door de erosie van een deel van de bodembedekking. Hierdoor wordt de retourstroming onder de romp in mindere mate geblokkeerd door aanwezigheid van de grenslaag die zich ontwikkelt onderaan de romp. In Figuur 33 wordt de bodemschuifspanning vergeleken tussen de theoretische kanaalsectie en sectie 1920 (respectievelijk cases 15 en 24). Hierbij is zichtbaar dat onder de romp aan bakboordzijde, een smalle strook met lage schuifspanning zichtbaar is (donkerblauw gekleurd), terwijl in het midden aan aan stuurboordzijde, hogere waarden bereikt worden. De smalle strook komt overeen met een hoge bodemligging (wat ook zichtbaar is in Figuur 5 aan de rechterzijde van de romp). De verhoogde snelheid onder de romp in de erosiekuil is zichtbaar in Figuur 34 (vergelijk bijvoorbeeld met Figuur 28).

Bij deze kleine kielspelingen levert het zog achter het schip de grootste bijdrage aan de bodemschuifspanning. In dit geval is het zog ook niet symmetrisch, maar lijkt het voornamelijk invloed te hebben in die zone waar de bodem door erosie reeds het meest is uitgesleten. Dit is ook het geval voor de andere cases.

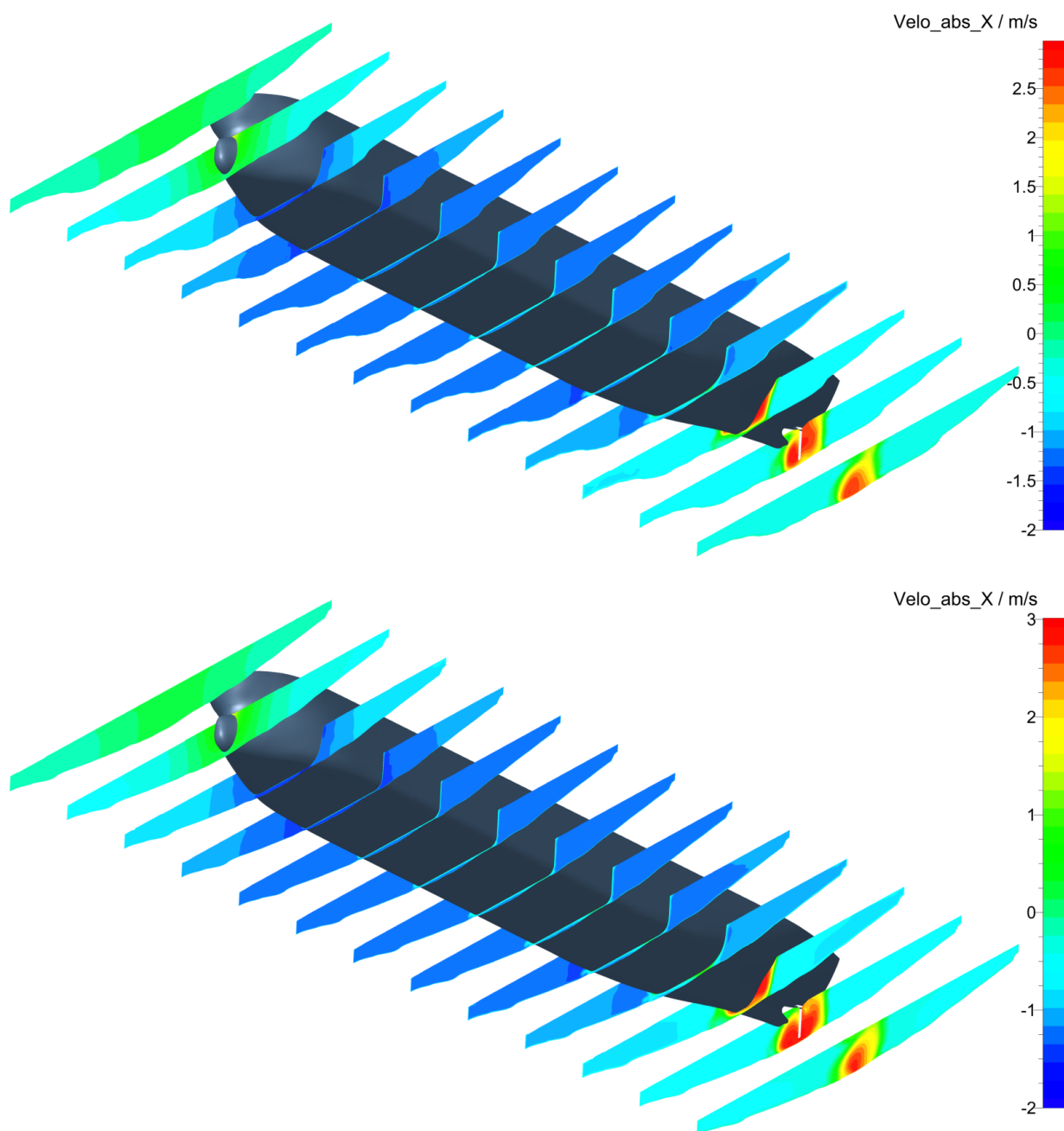
C15: B = 38 m, T=12.5 m, theoretische kanaalsectie



C24: B = 38 m, T=12.5 m, sectie 1920



Figuur 33 – Vergelijking tussen de schuifspanning op de bodem voor dezelfde conditie in de theoretische kanaalsectie en sectie 1920.



Figuur 34 – Retourstroming rond het schip voor cases 24 en 26.

5 Conclusies

Dit rapport beschrijft het CFD-onderzoek gerelateerd aan de passage van schepen in het kanaal Gent-Terneuzen ter plaatse van de Zelzatetunnel dat op vraag van aMT uitgevoerd werd bij WL. Op basis van een bij WL beschikbaar scheepsmodel (T01) werden twee schepen gedefinieerd met breedtes $B = 32.2$ m en $B = 38$ m varende bij diepgangen $T = 10$ m en $T = 12.5$ m. Voor de vier combinaties van diepgang en breedte werden vier vaste percentages van de kritische snelheid bepaald, resulterend in 16 cases. In eerste instantie werden deze cases in de theoretische kanaalsectie ter plaatse van de Zelzatetunnel doorgererekend. Daarna werden voor vier van deze cases de invloed van voortstuwing op de resultaten onderzocht. Finaal werden nog zes extra berekeningen uitgevoerd in twee kanaalsecties gebaseerd op recente peilingen.

De watespiegel rond het schip werd bepaald en nabij de kade werd de maximale waterspiegeldaling bepaald. Deze resultaten zijn vervolgens vergeleken met waarden bekomen uit in-situ metingen (Meire *e.a.*, 2026) en analytische schattingen gebaseerd op 1D-vergelijkingen. Een interessante conclusie uit de CFD-resultaten is dat voor hetzelfde percentage van de kritische snelheid, de maximale waterspiegeldaling nabij de oever zeer vergelijkbaar is voor de vier verschillende schepen. De CFD-resultaten geven waterspiegeldalingen die een goede overeenkomst tonen met de metingen. Voor de kleinste blockages komen de numeriek bepaalde waterspiegeldalingen goed overeen met analytische (literatuur) resultaten, bij grotere blockages worden de verschillen iets groter, maar blijven steeds kleiner dan 0.04 m.

Vervolgens is de drukverdeling op de kanaalbodem en oevers bepaald en met deze resultaten werd het verloop van krachten en momenten in de tijd op de centraal gelegen tunnelmoten bepaald bij passage van een schip. Naast de (verticale) zuiging op de tunnelmoten als gevolg van de onderdruk gegenereerd door passage van de scheepsromp, ondervinden de tunnelmoten ook momenten om de langs- en dwarsas van de tunnel door gradienten in de drukverdeling. Hierbij geeft het moment om de langsas van de tunnel de grootste moment waarden. De extreme waarden van de verticale kracht en het moment om de langsas van de tunnel werden vervolgens uitgezet tegen de scheepssnelheid voor de eerste 16 cases. Voor de maatgevende tunnelbelastingen bij toename van diepgang of breedte blijkt een relatief goede overeenstemming met de kritische snelheid. De bekomen tunnelbelastingen kunnen als input dienen voor een bouwkundige analyse van de tunnel van Zelzate.

Naast hydrodynamische druk genereert een passerend schip ook schuifspanning op de bodem die kan zorgen voor erosie van bodembedekking. Uit de CFD-resultaten blijkt dat de romp van een schip niet de enige bron van schuifspanning is, maar dat ook het zog achter het schip (bij $T = 12.5$ m) significant kan bijdragen aan bodemerosie. Dit is een gevolg van de kleine kielspeling tussen bodem en schip, welke er bij $T = 12.5$ m voor zorgt dat de retourstroming onder de romp afneemt achter de midscheepse langspositie, maar waarbij het zog (dat zich van het wateroppervlak tot de bodem uitstrekt), significante snelheidsgradienten nabij de bodem oplevert als het schip reeds gepasseerd is. De bekomen schuifspanningen kunnen toegepast worden voor de dimensionering van een gepaste bodem- en oeverbescherming van het kanaal.

In overeenstemming met Maes *e.a.* (2026) werd op basis van 1D-berekeningen met behulp van de wet van Bernoulli een schatting gemaakt van de retourstroming rond een schip en de druk op de bodem. Een vergelijking van de aldus berekende retoursnelheden toont aan dat deze een onderschatting geven van ongeveer 12 %. Literatuurformules die de gemiddelde waterspiegeldaling naast het schip in rekening brengen om de retourstroming in te schatten geven resultaten die zeer dicht liggen bij de numerieke waarden.

Hydrodynamische druk berekend met de retoursnelheid om de belasting op tunnelmoten te bepalen geeft een onderschatting van de druk op de bodem met een factor tussen 5 en 15. Met behulp van het simpelste voorbeeld in drie dimensies uit de potentiaalstroming (uniforme stroming rond een bol) kan een betere schatting gemaakt worden van de druk op de bodem door passage van een schip. Meer onderzoek is echter nodig om te bepalen of een potentiaalmethode waarbij de eigenlijke scheepsromp gebruikt wordt, een vergelijkbare

waarde kan geven van de onderdruk op de bodem zonder een tijdsintensieve CFD-berekening.

Over het algemeen kan gesteld worden dat voor de onderzochte condities, de belasting van het kanaal een goede relatie vertoont met de kritische snelheid, waarbij een zelfde belasting bekomen wordt bij een vaarsnelheid overeenkomstig eenzelfde verhouding tot de kritische snelheid. Deze relatie kan gebruikt worden om de impact van schaalvergroting van schepen op het kanaal te begroten.

De berekeningen uitgevoerd met voortstuwing vertoonden bij $T = 12.5$ m convergentie issues die onder andere een gevolg zijn van de interacties tussen de verschillende vrijheidsgraden: de aanpassing van de voortstuwing aan de rompweerstand, en de invloed daarvan op de evolutie van rompvrijheidsgraden (inzinking en vertrimming). Bij deze condities opereert de propeller in een groot en instabiel zog dat de convergentie lijkt te bemoeilijken. De resultaten bij $T = 12.5$ m met voortstuwing zijn daarom niet verder besproken. Meer onderzoek is nodig om voor dit soort cases resultaten te verkrijgen met betere convergentie. Bij kleinere diepgangen werden geen convergentie issues ondervonden. De resultaten bij $T = 10$ m laten zien dat voortstuwing geen negatieve invloed heeft.

De invloed van kanaalsecties gebaseerd op peilingen tonen onder andere aan dat schuifspanning op de bodem onder de romp hoger wordt bij $T = 12.5$ m dan wat volgt uit de CFD-berekeningen in de theoretische kanaalsectie bij dezelfde diepgang. Omdat er onder de romp door erosie van de bodembedekking meer plaats is, wordt de retourstroming onder de romp minder afgeremd met hogere schuifspanningen tot gevolg. Uit de CFD-berekeningen volgt evenwel dat het zog achter het schip resulteert in grote snelheidsgradienten (en significante schuifspanningen) bij de bodem, die in de extreme gevallen hoger zijn dan de schuifspanning onder het schip.

Referenties

Delefortrie, G.; Verwilligen, J.; Vantorre, M.; Lataire, M. (2024). Exact and Approximated Solutions to the Critical Ship Speeds in Canals. *in*: PIANC (Ed.). *Proceedings of the 35th PIANC World Congress*. Cape Town, South Africa, 29 april 2024. 649–654 pp.

Katz, J.; Plotkin, A. (2001). *Low-Speed Aerodynamics*. 2de ed. Cambridge University Press: Cambridge, UK. ISBN: 0-521-66552-3. 613 p.

Maes, K.; Van De Velde, M.; Francois, S. (2026). Vervormingsmetingen in de Zelzatetunnel bij passage van Zeeschepen in het kanaal Gent-Terneuzen. BWM-2026-02. KU Leuven - Afdeling Bouwmechanica: Leuven, Belgium

Meire, D.; Panahi, S.; Verwilligen, J. (2026). Scheepsgolven op het Kanaal Gent Terneuzen ter hoogte van de Zelzatetunnel [DRAFT]. Versie 0.1. *WL Rapporten*, 25_118_2. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Ministerie van Openbare Werken/Ministerie van Verkeer en Waterstaat (1968). Zeekanaal Gent-Terneuzen. Brussel, België

Panahi, S.; Verwilligen, J. (2026). AIS Analysis of the impact of Governing Vessel Traffic on the Zelzate Tunnel Surroundings [DRAFT]. Versie 1.0. *WL Memo*, 25_118_1. Flanders Hydraulics: Antwerp

Schijf, J. (1949). Protection of embankments and bed in inland and maritime waters, and in overflows or weirs. *in*: PIANC (Ed.). *XVII International Navigation Congress, Section I*. Lisbon, Portugal. 61–78 pp.

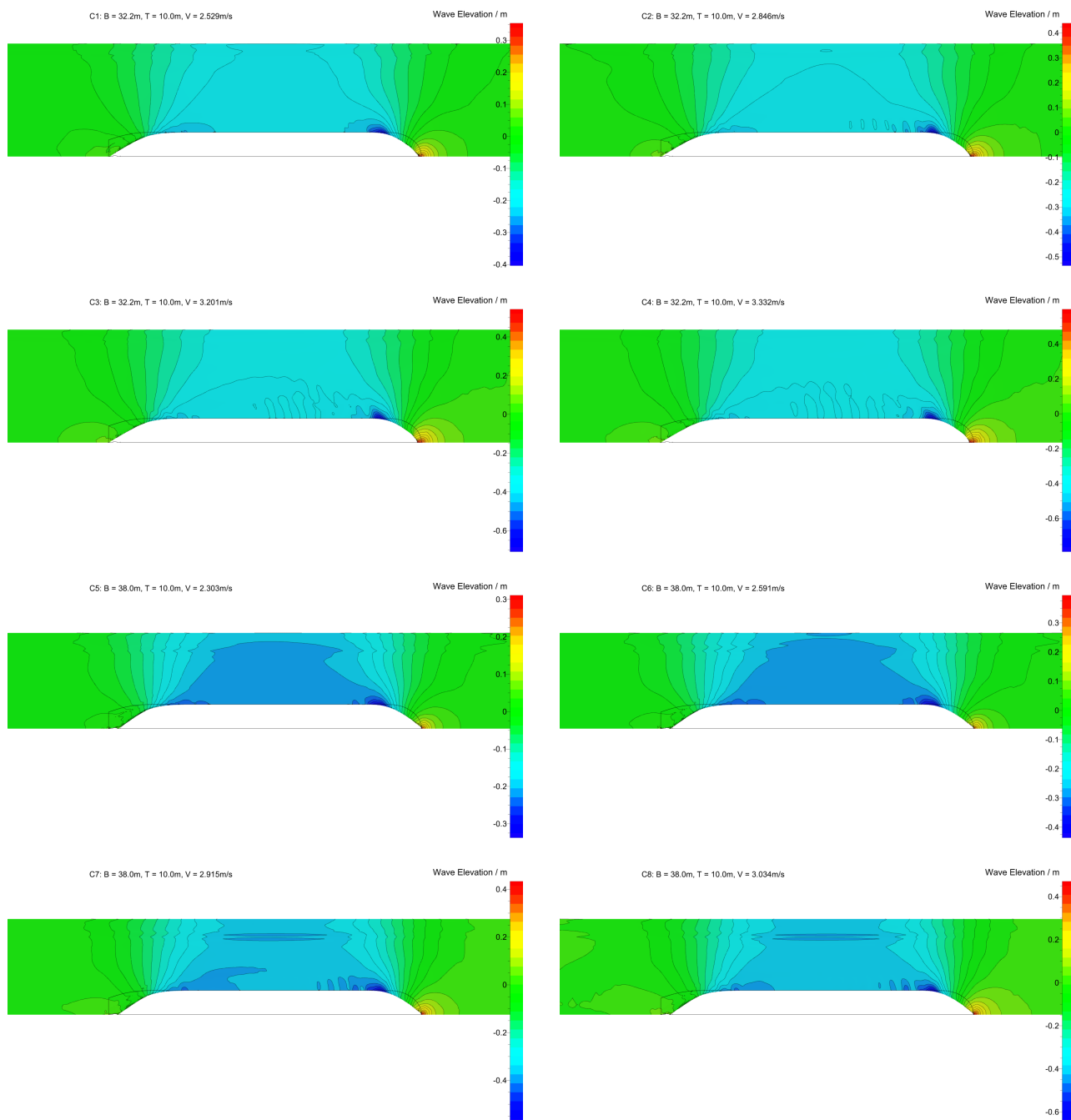
Sweco bv (2026). Bijlage A: Opdrijfanalyse Zelzatetunnel

Verelst, K.; Visser, K. (2024). Dimensionering bodembescherming glooiingen stormvloedkering Nieuwpoort. Versie 3.0. *WL Rapporten*, 24_007_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

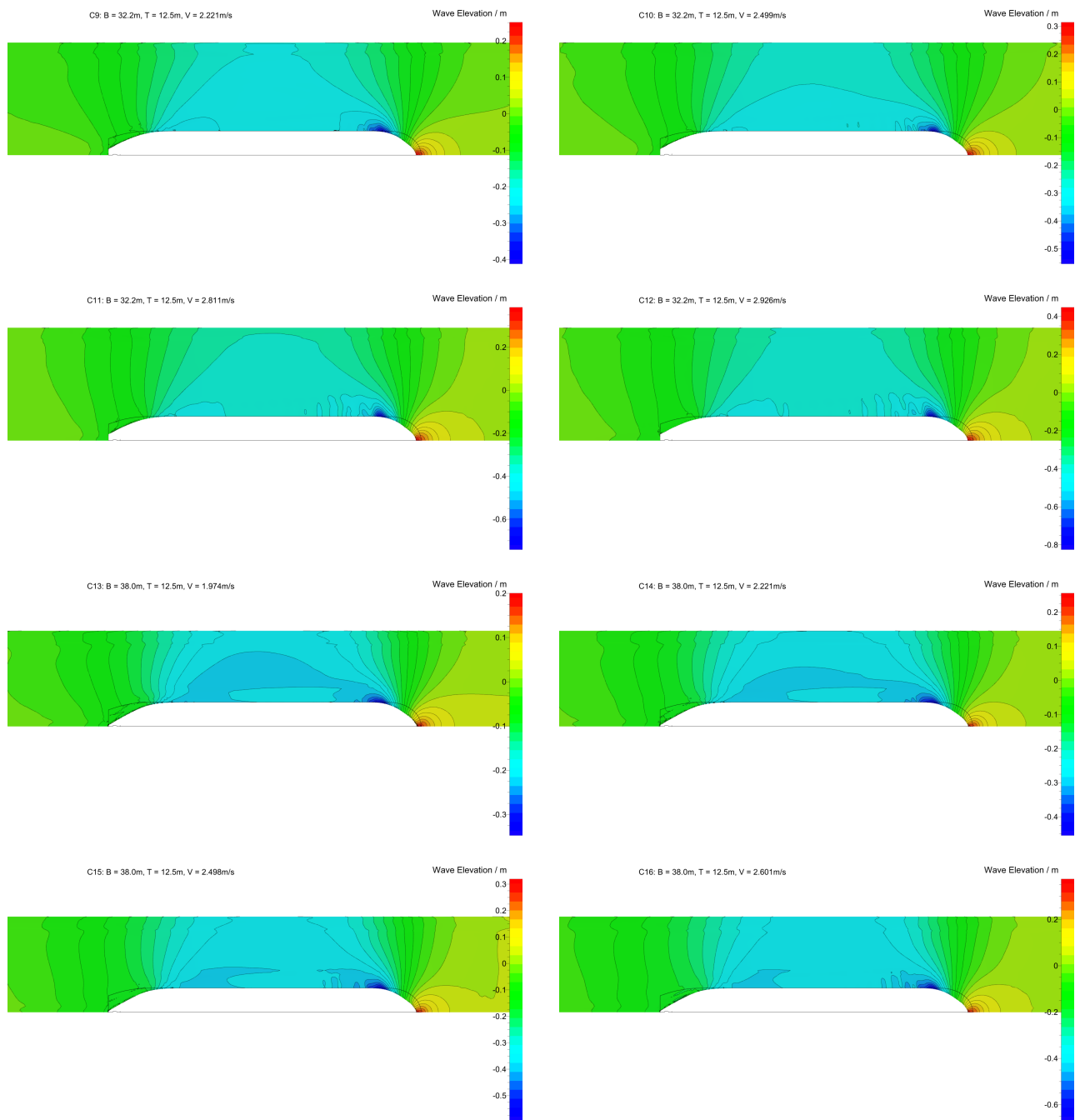
Waterloopkundig Laboratorium (1997). DIPRO 3.02n – Gebruikershandleiding

B1 Resultaten

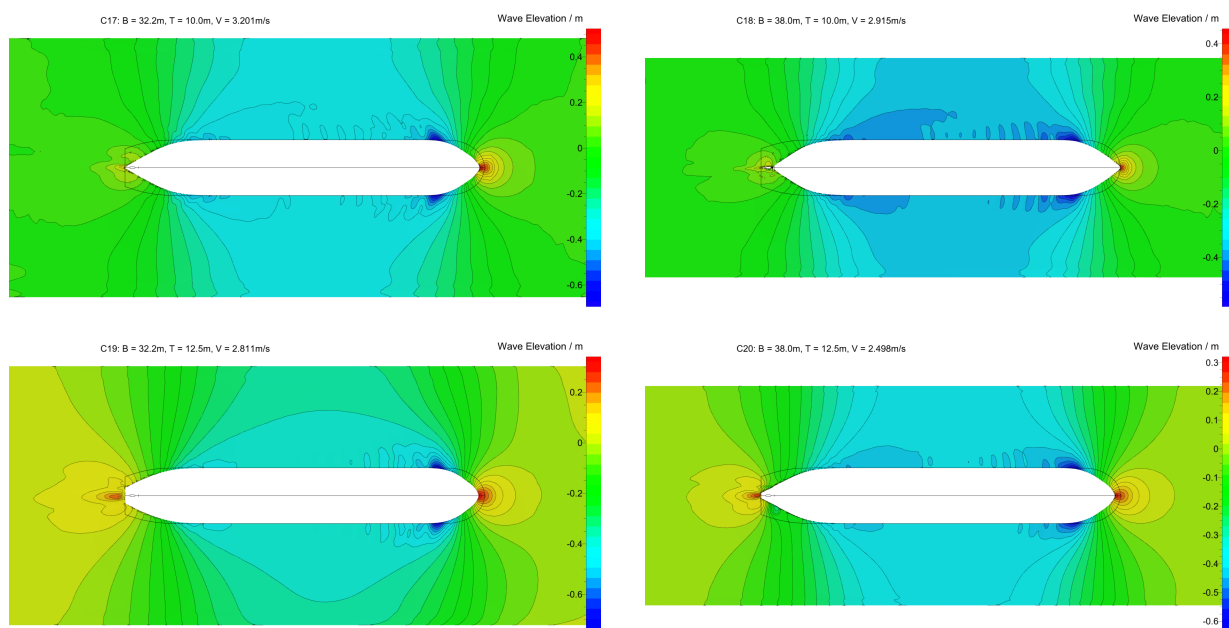
B1.1 Waterstandsdeling bij passage van een schip



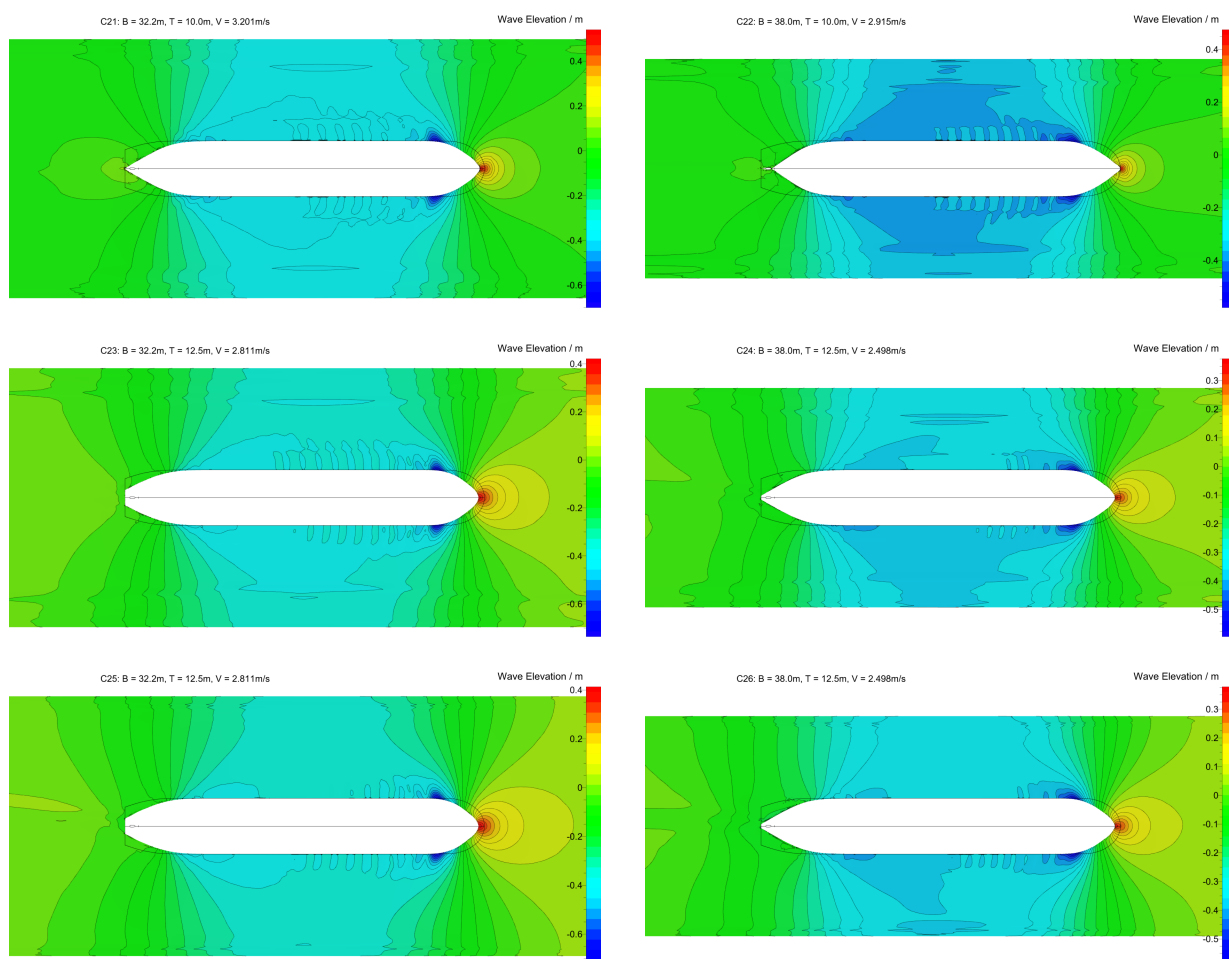
Figuur 35 – Waterstandsdeling rond het schip voor cases 1 tot 8.



Figuur 36 – Waterstandsdeling rond het schip voor cases 9 tot 16.

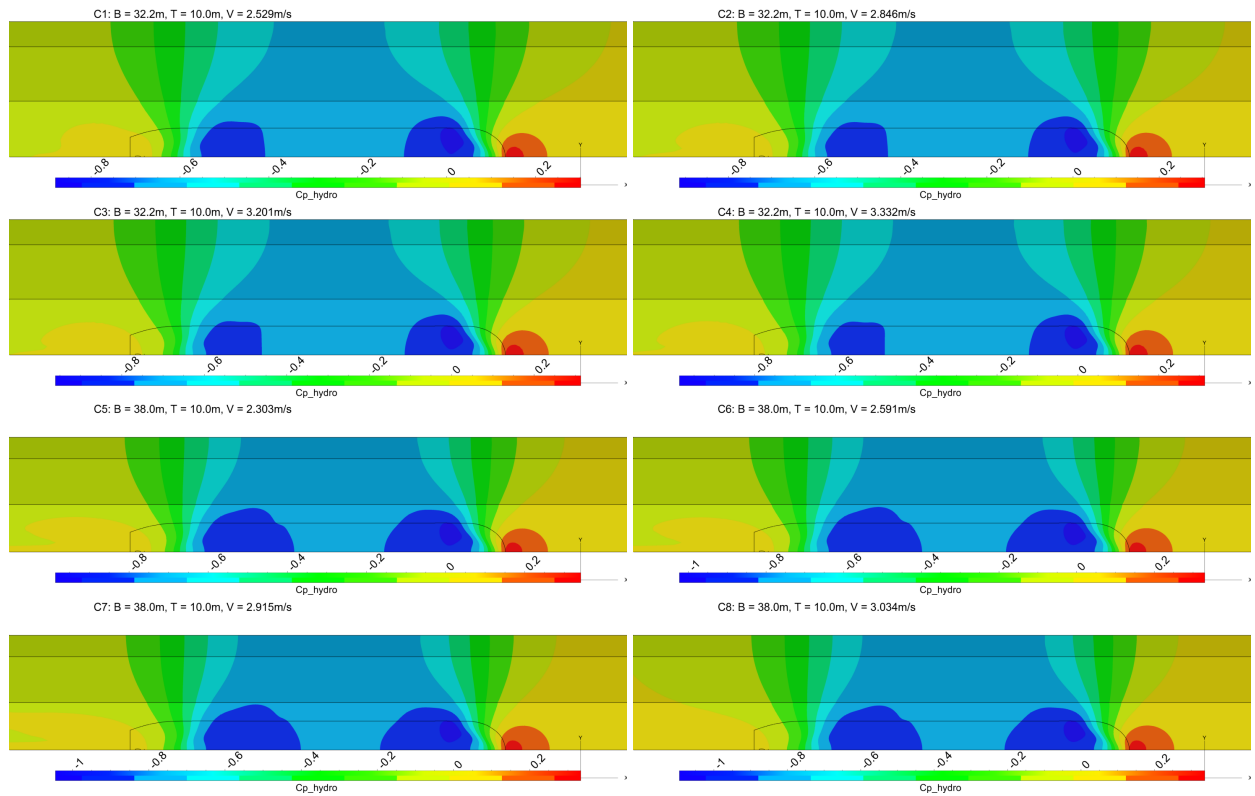


Figuur 37 – Waterstandsdeling rond het schip voor cases 17 tot 20 (inclusief voortstuwing).

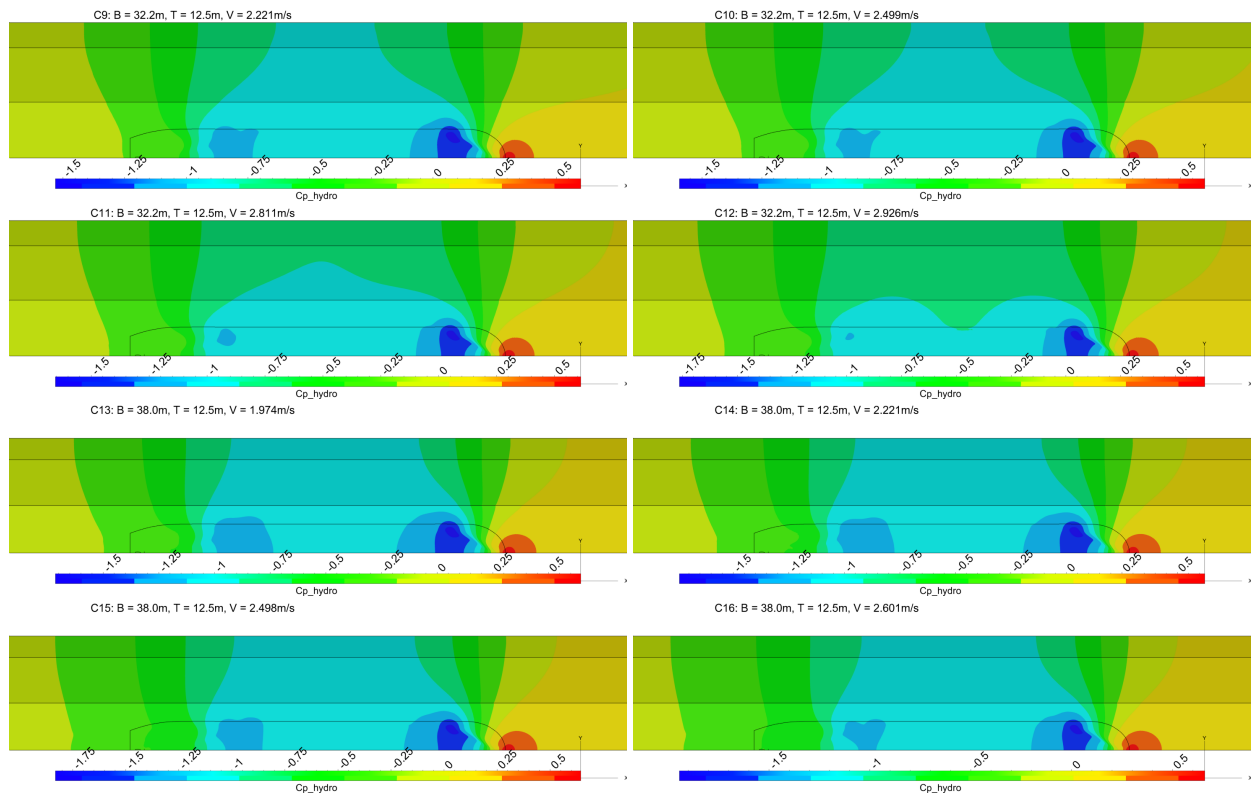


Figuur 38 – Waterstandsdeling rond het schip voor cases 21 en 22 (sectie 1920) en 23 tot 26 (sectie 2015).

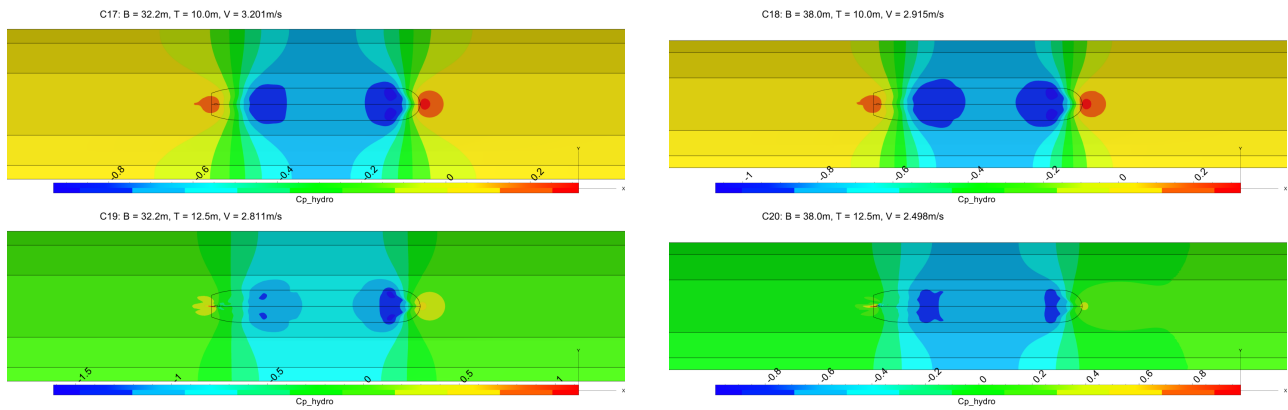
B1.2 Drukverdeling op de bodem en oevers



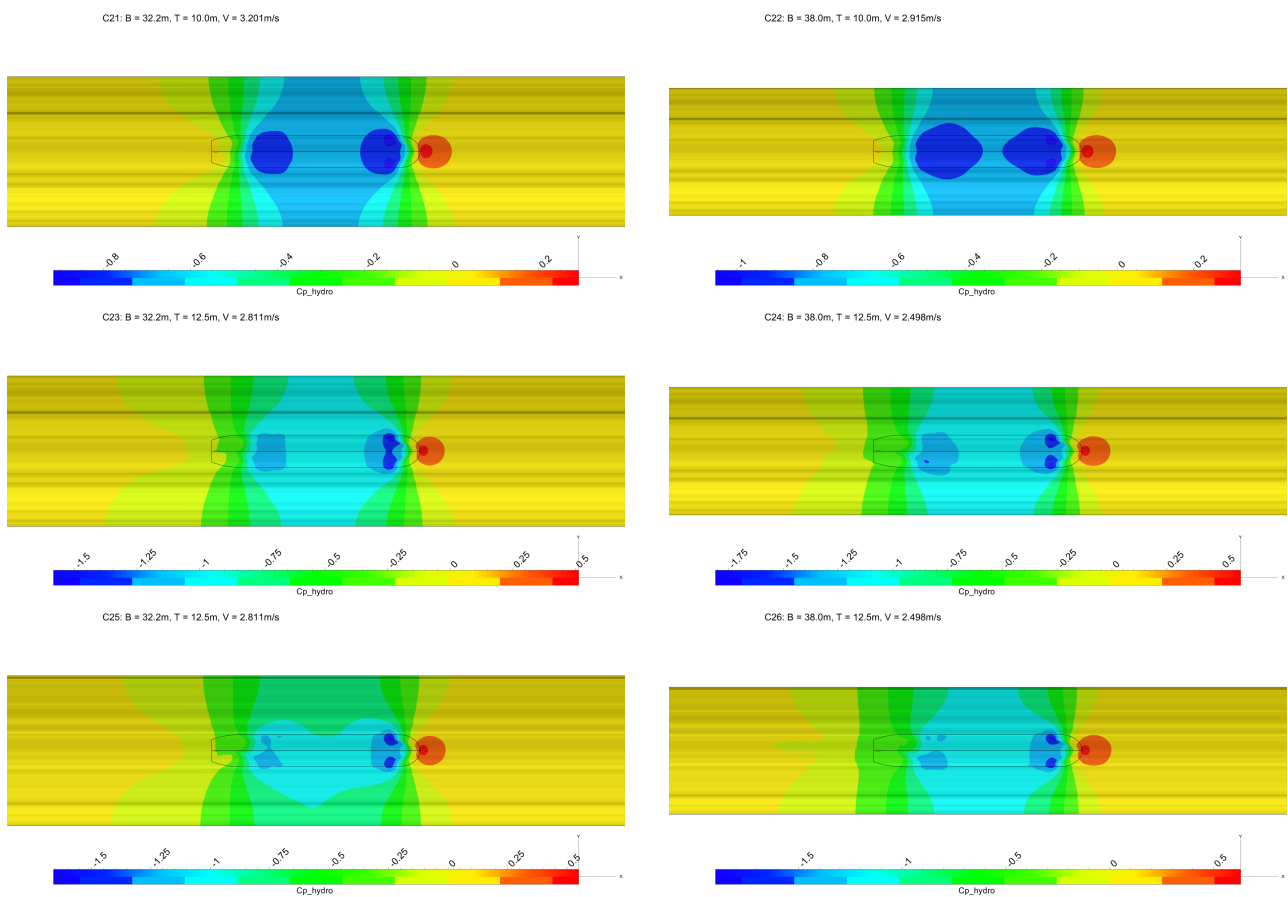
Figuur 39 – Verdeling van C_p op bodem en oevers voor $T = 10$ m.



Figuur 40 – Verdeling van C_p op bodem en oevers voor $T = 12.5$ m.

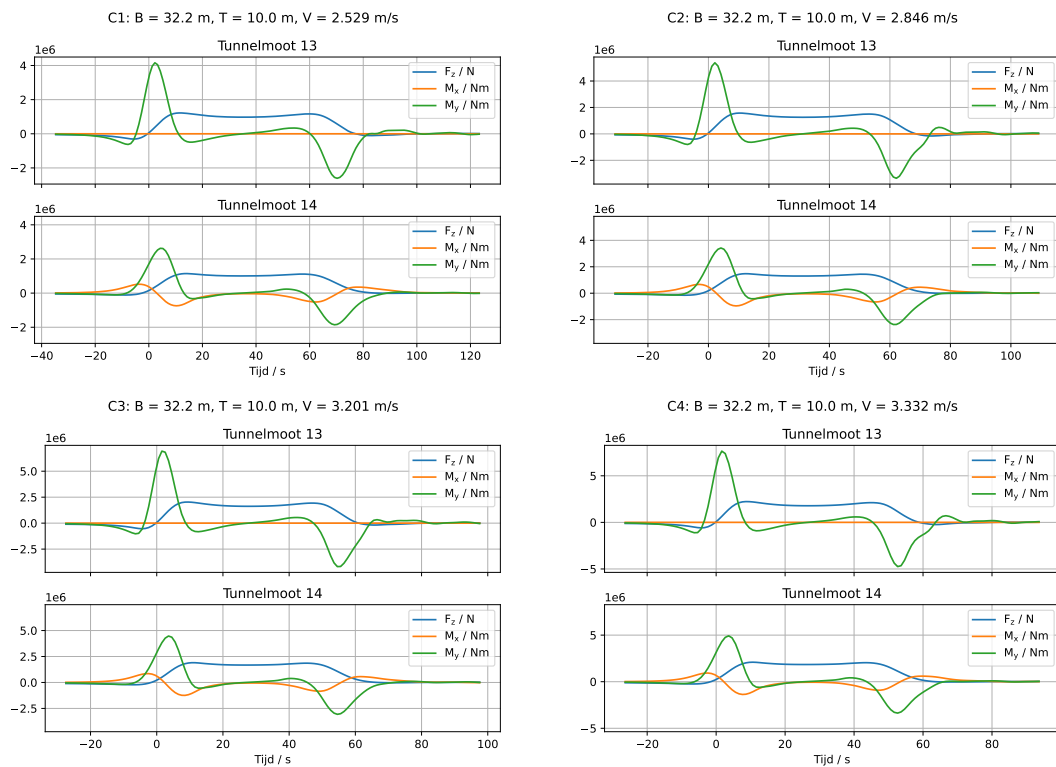


Figuur 41 – Verdeling van C_p op bodem en oevers voor cases 17 tot 20 (inclusief voortstuwing).

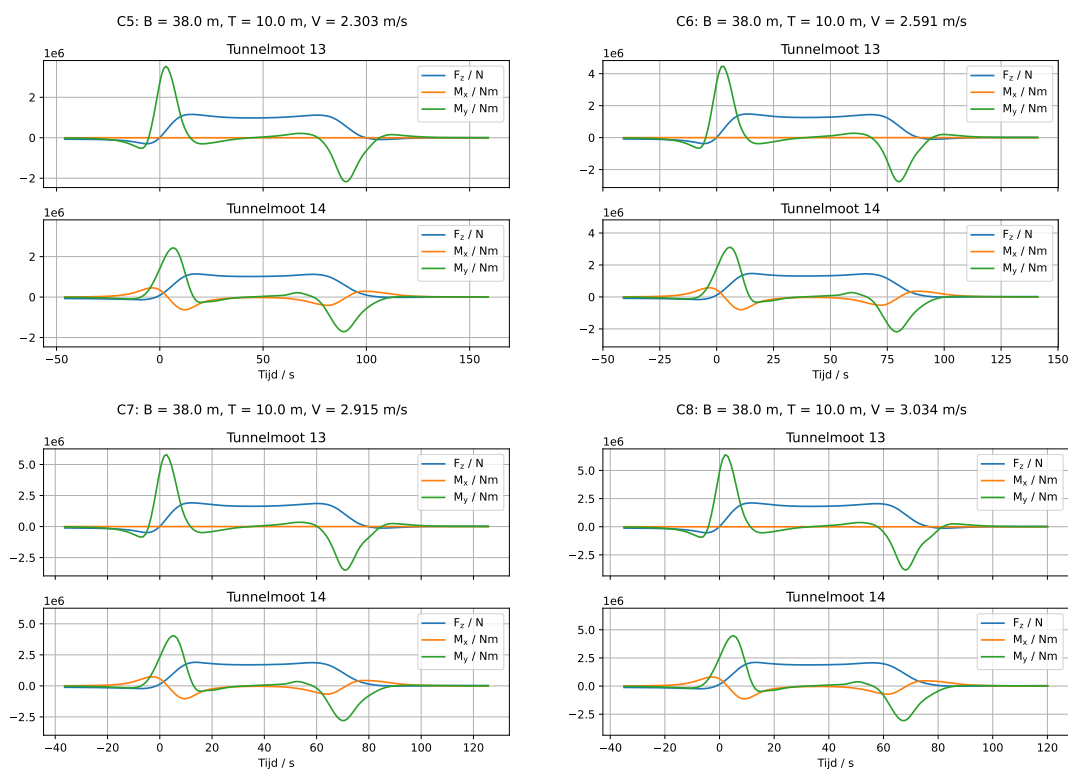


Figuur 42 – Verdeling van C_p op bodem en oevers voor cases 21 en 22 (sectie 1920) en 23 tot 26 (sectie 1915).

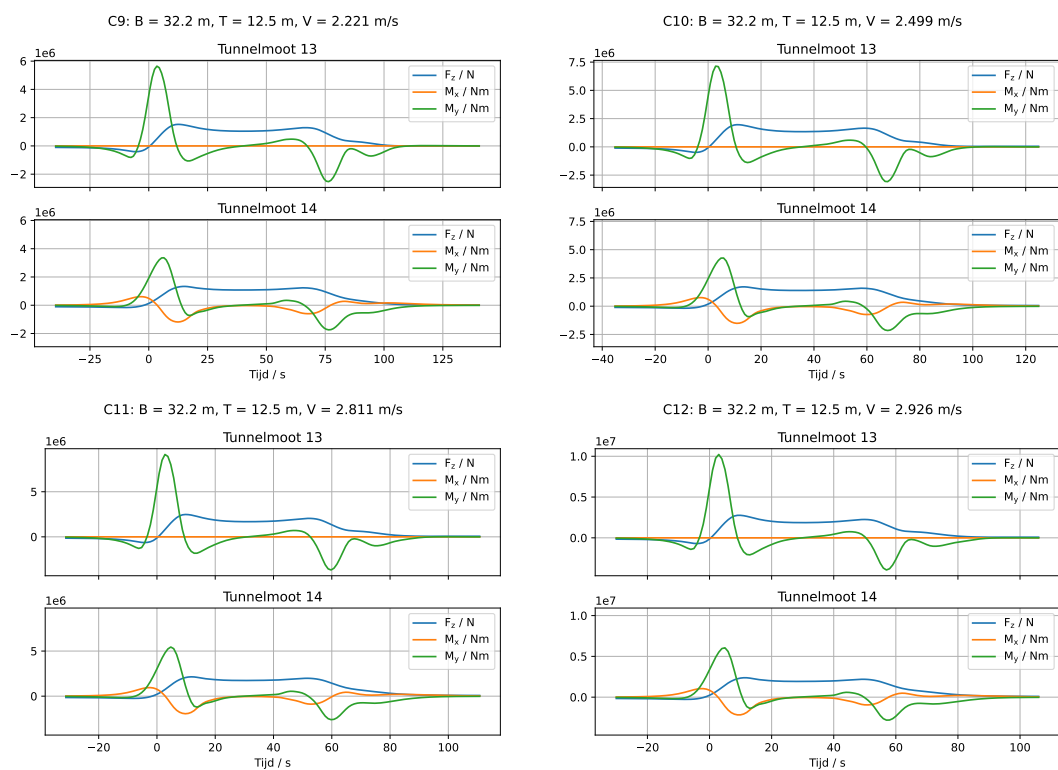
B1.3 Verloop in de tijd van krachten en momenten op het dak van tunnelmooten 13 en 14 bij passage van een schip



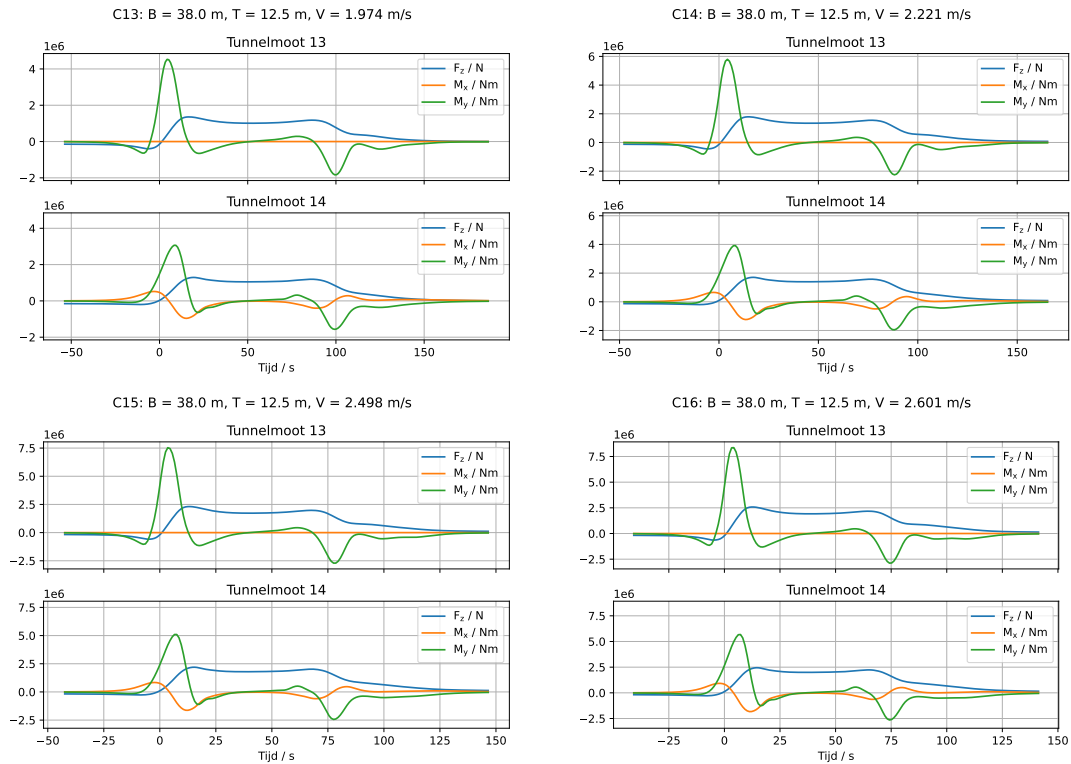
Figuur 43 – Verloop in de tijd van verticale kracht F_z en momenten M_x en M_y ten gevolge van de hydrodynamische belasting bij een scheepspassage voor cases 1, 2, 3 en 4 ($T = 10$ m & $B = 32.2$ m).



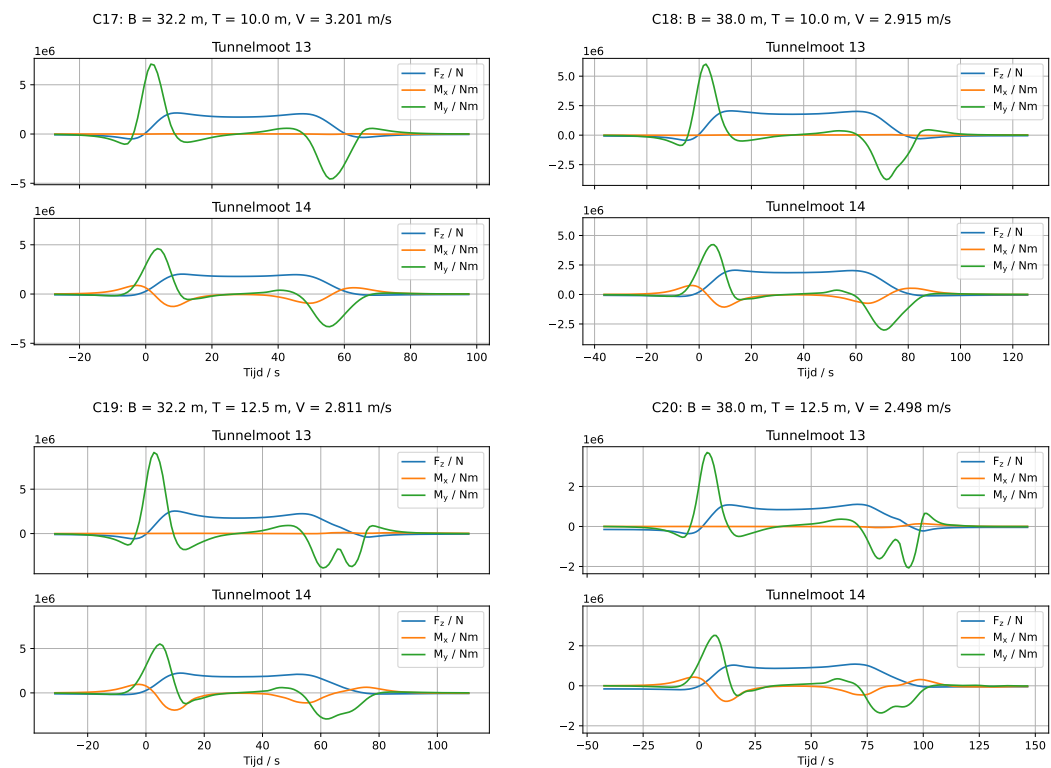
Figuur 44 – Verloop in de tijd van verticale kracht F_z en momenten M_x en M_y ten gevolge van de hydrodynamische belasting bij een scheepspassage voor cases 5, 6, 7 en 8 ($T = 10$ m & $B = 38$ m).



Figuur 45 – Verloop in de tijd van verticale kracht F_z en momenten M_x en M_y ten gevolge van de hydrodynamische belasting bij een scheepspassage voor cases 9, 10, 11 en 12 ($T = 12.5$ m & $B = 32.2$ m).



Figuur 46 – Verloop in de tijd van verticale kracht F_z en momenten M_x en M_y ten gevolge van de hydrodynamische belasting bij een scheepspassage voor cases 13, 14, 15 en 16 ($T = 12.5$ m & $B = 38$ m).

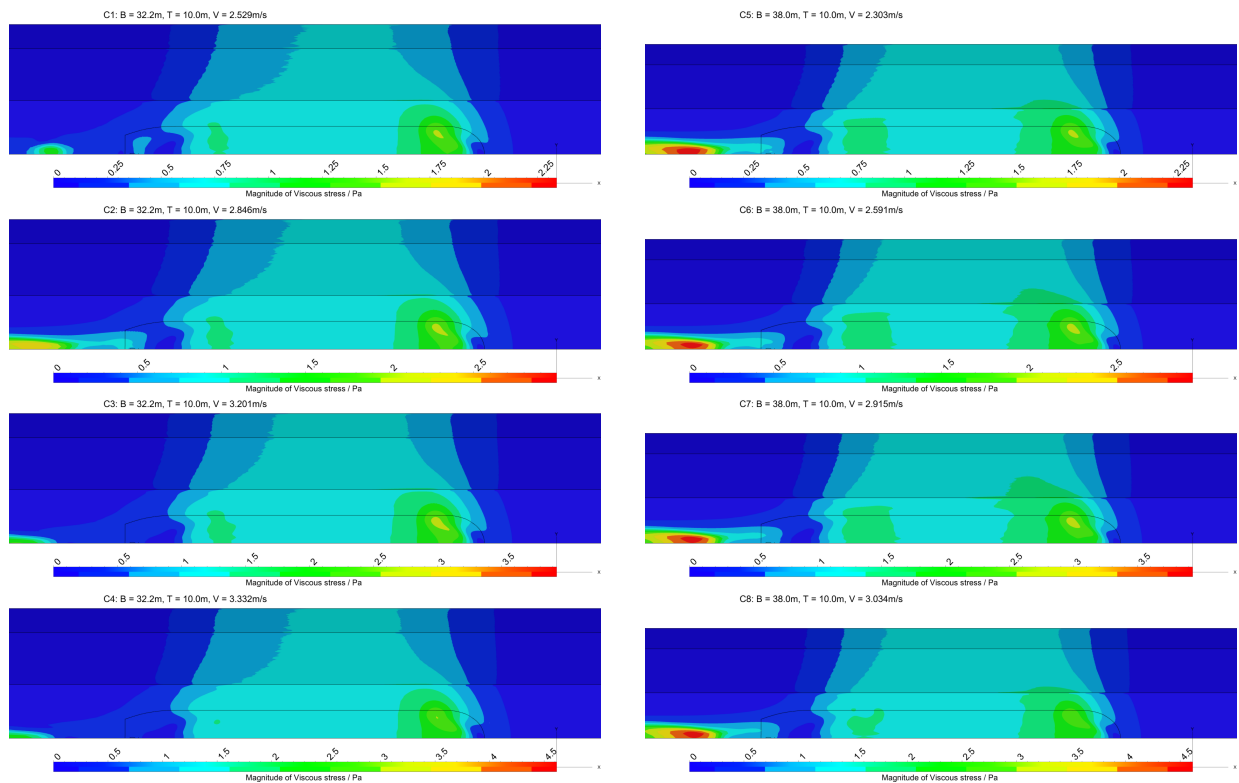


Figuur 47 – Verloop in de tijd van verticale kracht F_z en momenten M_x en M_y ten gevolge van de hydrodynamische belasting bij een scheepspassage voor cases 17 tot 20 (met propulsie).

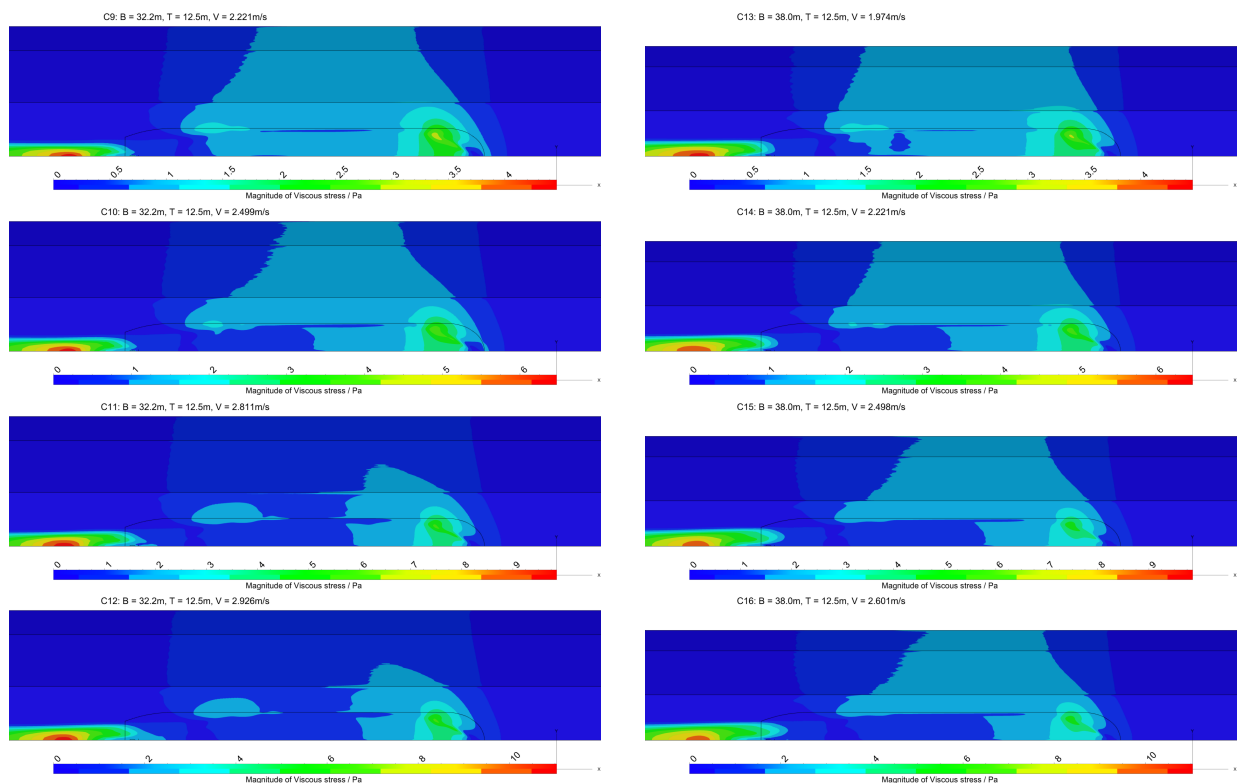


Figuur 48 – Verloop in de tijd van verticale kracht F_z en momenten M_x en M_y ten gevolge van de hydrodynamische belasting bij een scheepspassage voor cases 21 en 22 (sectie 1920) en 23 tot 26 (sectie 2015).

B1.4 Schuifspanning op de bodem



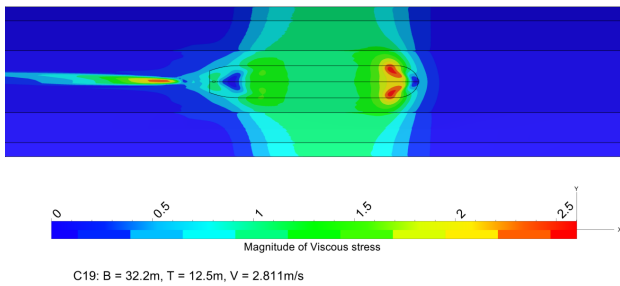
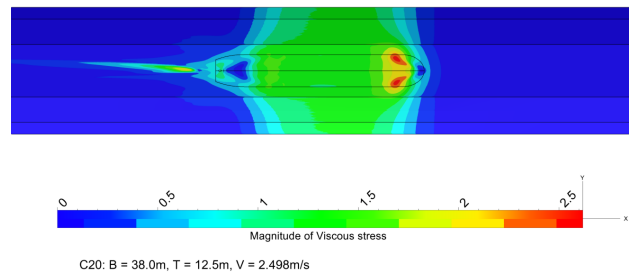
Figuur 49 – Verdeling van schuifspanning op bodem en oevers voor $T = 10$ m.



Figuur 50 – Verdeling van schuifspanning op bodem en oevers voor $T = 12.5$ m.

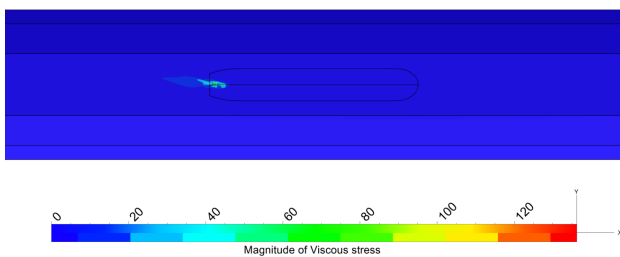
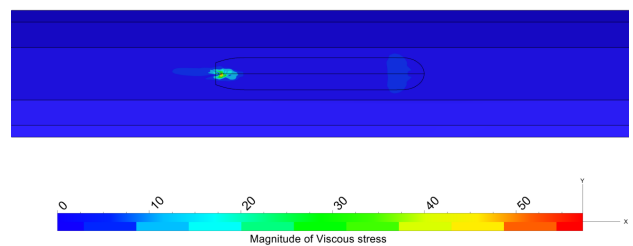
C17: B = 32.2m, T = 10.0m, V = 3.201m/s

C18: B = 38.0m, T = 10.0m, V = 2.915m/s



C19: B = 32.2m, T = 12.5m, V = 2.811m/s

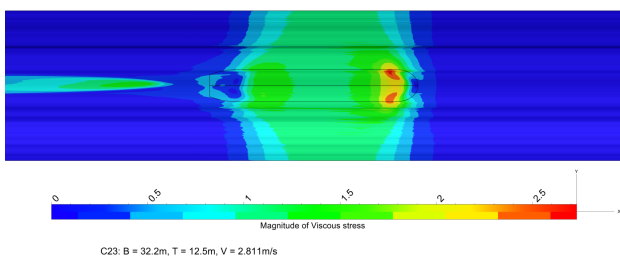
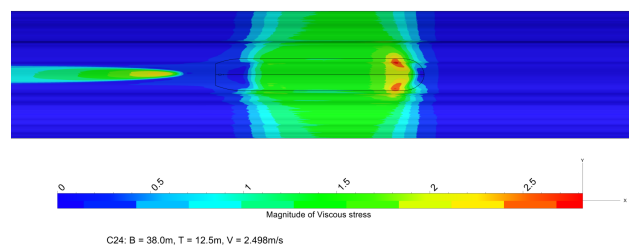
C20: B = 38.0m, T = 12.5m, V = 2.498m/s



Figuur 51 – Verdeling van schuifspanning op bodem en oevers voor cases 17 tot 20 (incl. voortstuwing).

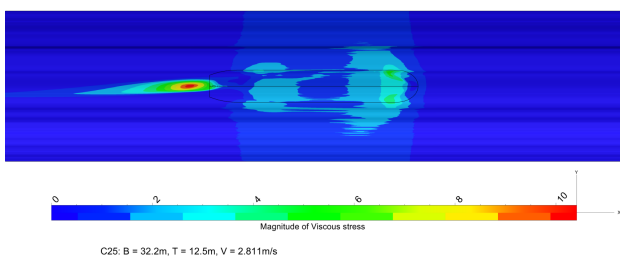
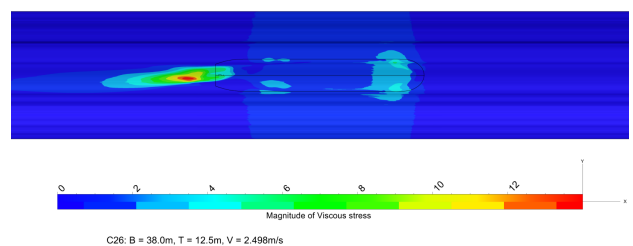
C21: B = 32.2m, T = 10.0m, V = 3.201m/s

C22: B = 38.0m, T = 10.0m, V = 2.915m/s



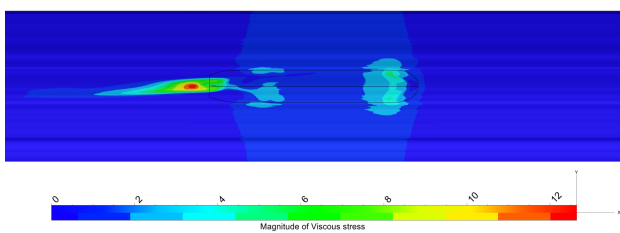
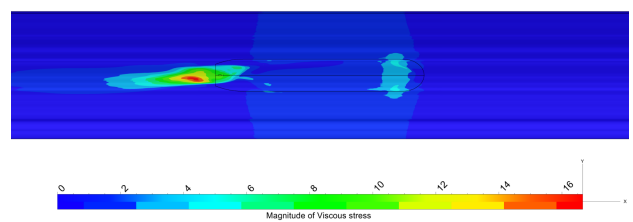
C23: B = 32.2m, T = 12.5m, V = 2.811m/s

C24: B = 38.0m, T = 12.5m, V = 2.498m/s



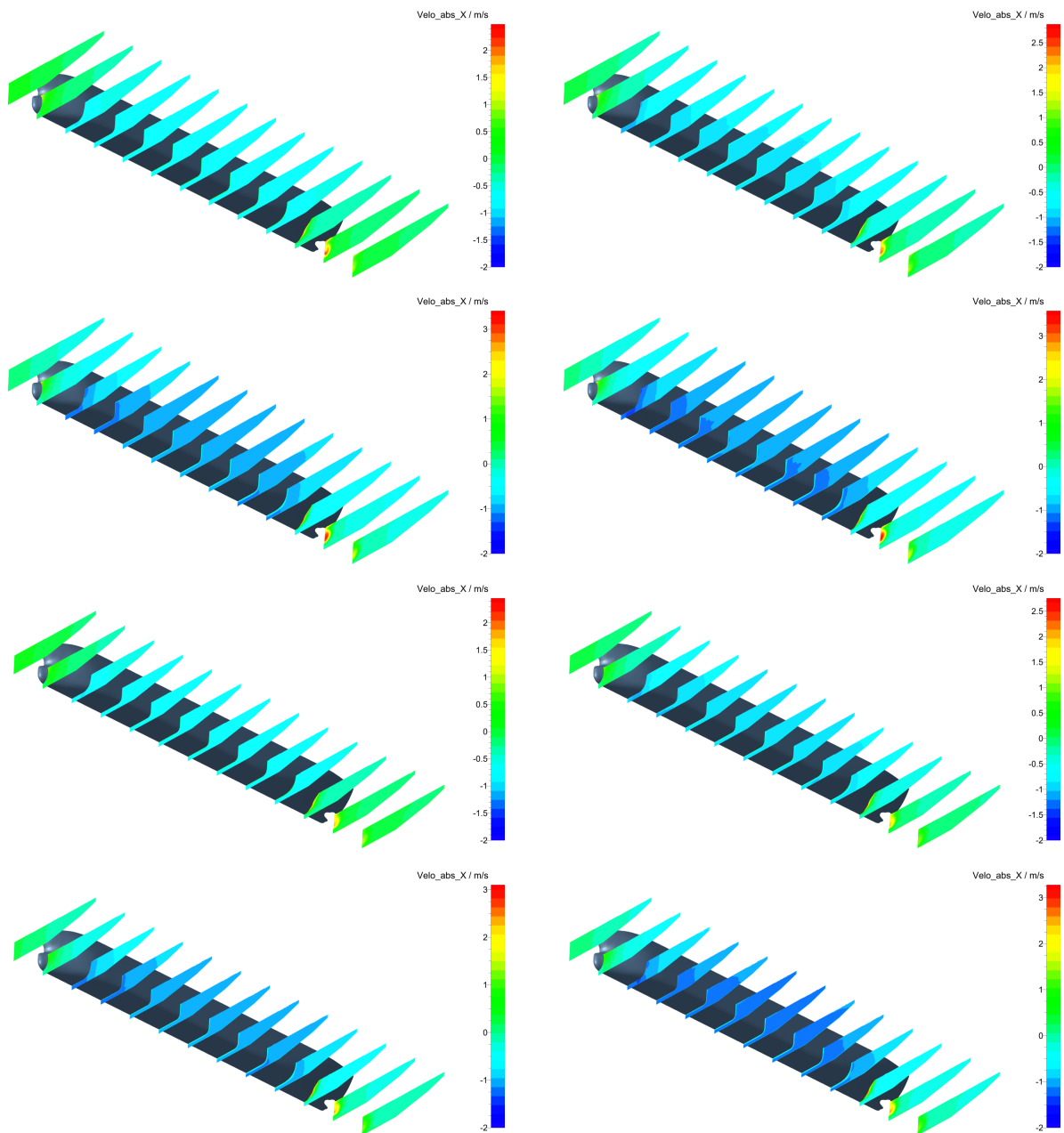
C25: B = 32.2m, T = 12.5m, V = 2.811m/s

C26: B = 38.0m, T = 12.5m, V = 2.498m/s



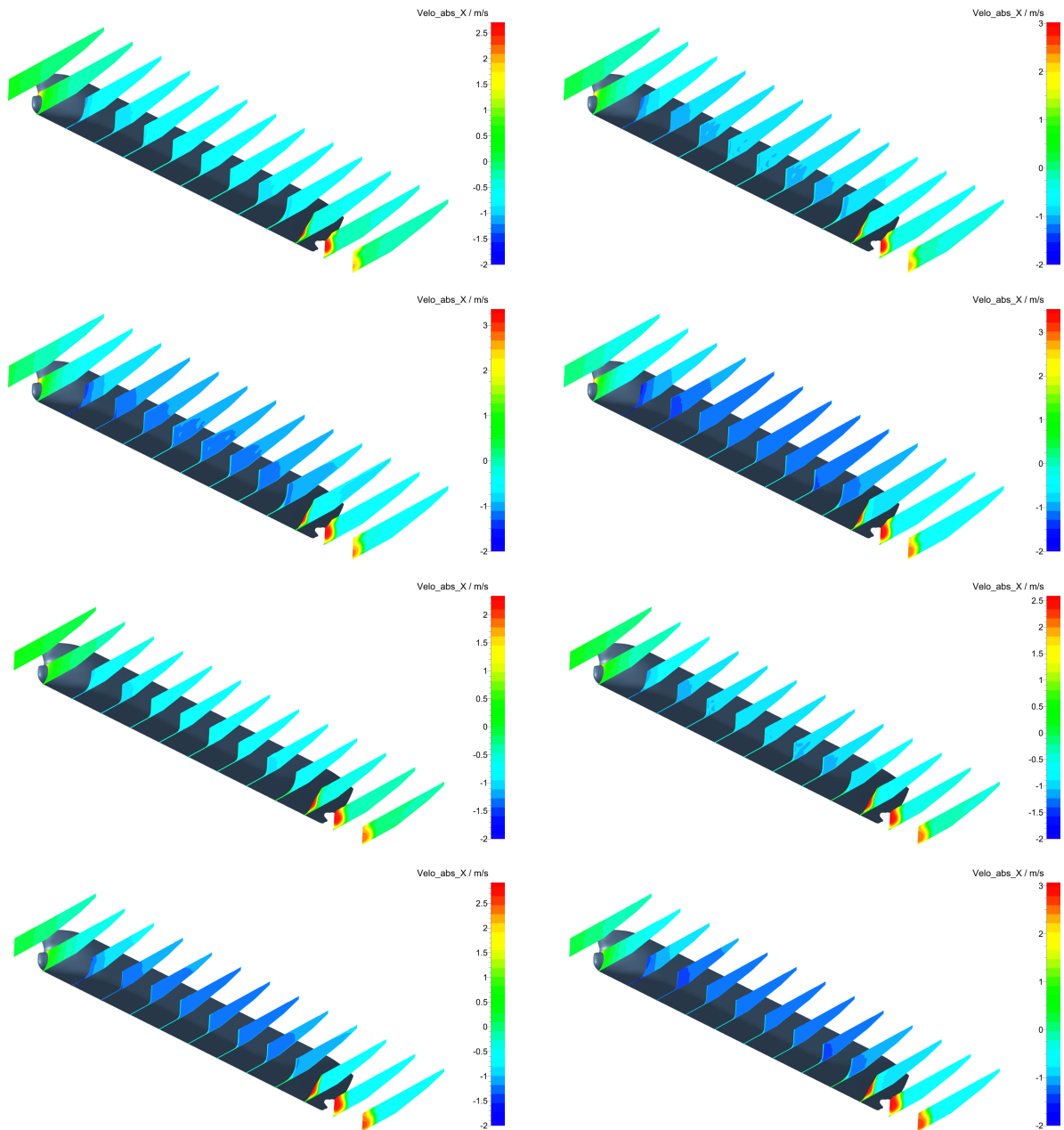
Figuur 52 – Verdeling van schuifspanning op bodem en oevers voor cases 21 en 22 (sectie 1920) en 23 tot 26 (sectie 1915).

B1.5 Retourstroming

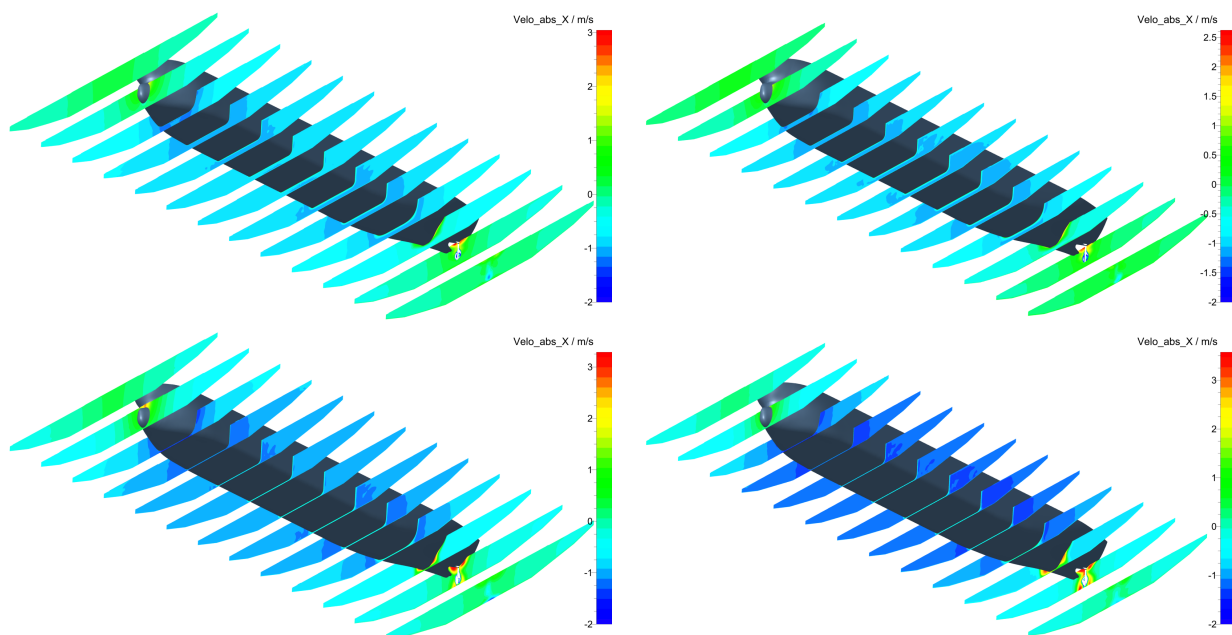


Figuur 53 – Verdeling van retourstroming rond het schip voor $T = 10$ m.

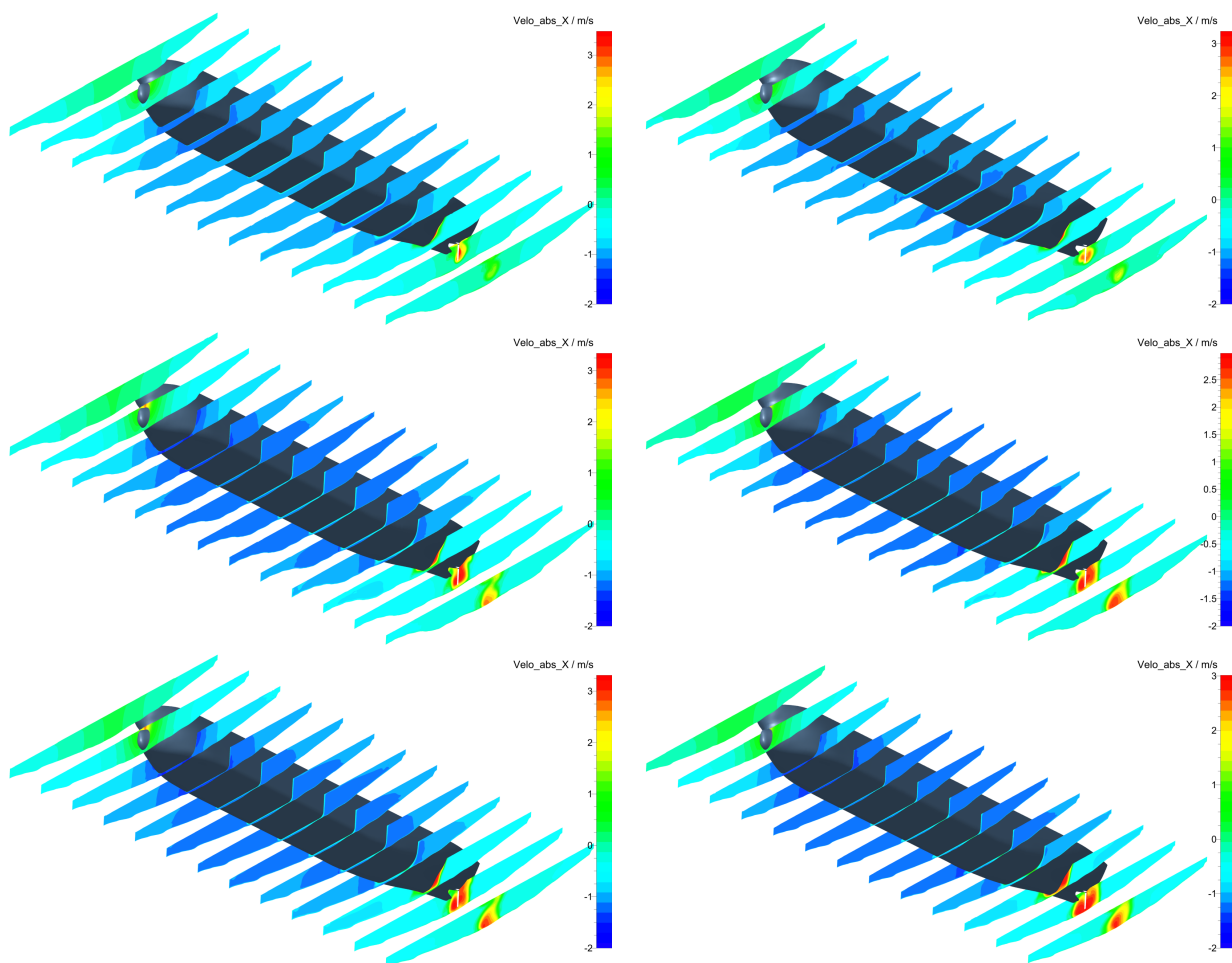
B1.6 Maximale belastingen op moten 13 en 14



Figuur 54 – Verdeling van retourstroming rond het schip voor $T = 12.5$ m.



Figuur 55 – Verdeling van retourstroming rond het schip met voortstuwing.



Figuur 56 – Verdeling van retourstroming rond het schip in secties gebaseerd op peilingen.

Tabel 10 – Extreme belastingen F_z , M_x en M_y op tunnelmoten 13 en 14.

Case	section	V_i	B	T	prop.	V_{ref}	Moot 13			Moot 14		
							$F_{z,e}/10^6$ N	$M_{x,e}/10^6$ Nm	$M_{y,e}/10^6$ Nm	$F_{z,e}/10^6$ N	$M_{x,e}/10^6$ Nm	$M_{y,e}/10^6$ Nm
1	T	V_4	32.2	10	-	2.5291	1.220	0	4.158	1.144	-0.7433	2.624
2	T	V_3	32.2	10	-	2.8459	1.574	0	5.379	1.476	-0.9608	3.421
3	T	V_2	32.2	10	-	3.2009	2.030	0	6.934	1.902	-1.244	4.470
4	T	V_1	32.2	10	-	3.3320	2.231	0	7.648	2.094	-1.370	4.925
5	T	V_4	38	10	-	2.3030	1.154	0	3.530	1.145	-0.6288	2.424
6	T	V_3	38	10	-	2.5915	1.477	0	4.461	1.468	-0.7974	3.107
7	T	V_2	38	10	-	2.9148	1.910	0	5.792	1.901	-1.035	4.030
8	T	V_1	38	10	-	3.0342	2.115	0	6.405	2.105	-1.144	4.483
9	T	V_4	32.2	12.5	-	2.2209	1.525	0	5.644	1.331	-1.185	3.358
10	T	V_3	32.2	12.5	-	2.4991	1.961	0	7.141	1.710	-1.516	4.262
11	T	V_2	32.2	12.5	-	2.8109	2.478	0	9.130	2.144	-1.947	5.446
12	T	V_1	32.2	12.5	-	2.9260	2.758	0	10.22	2.378	-2.172	6.048
13	T	V_4	38	12.5	-	1.9740	1.356	0	4.530	1.293	-0.9613	3.065
14	T	V_3	38	12.5	-	2.2213	1.787	0	5.797	1.706	-1.238	3.920
15	T	V_2	38	12.5	-	2.4984	2.310	0	7.538	2.194	-1.629	5.097
16	T	V_1	38	12.5	-	2.6007	2.580	0	8.360	2.443	-1.828	5.680
17	T	V_2	32.2	10	✓	3.2009	2.138	-0.03148	7.096	2.020	-1.261	4.611
18	T	V_2	38	10	✓	2.9148	2.058	0.04776	6.018	2.060	-1.069	4.225
19	T	V_2	32.2	12.5	✓	2.8109	2.538	0.1230	9.135	2.232	-1.941	5.513
20	T	V_2	38	12.5	✓	2.4984	1.107	0.1439	3.699	1.084	-0.7747	2.518
21	1920	V_2	32.2	10	-	3.2009	2.086	-0.3175	6.684	2.015	-1.232	4.618
22	1920	V_2	38	10	-	2.9148	2.008	-0.1237	5.754	2.035	-1.048	4.307
23	1920	V_2	32.2	12.5	-	2.8109	2.451	-0.6352	8.427	2.276	-1.875	5.663
24	1920	V_2	38	12.5	-	2.4984	2.188	-0.8672	6.779	2.186	-1.514	5.204
25	2015	V_2	32.2	12.5	-	2.8109	2.453	-1.080	8.638	2.269	-1.857	5.880
26	2015	V_2	38	12.5	-	2.4984	2.204	-1.218	7.031	2.212	-1.509	5.492

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