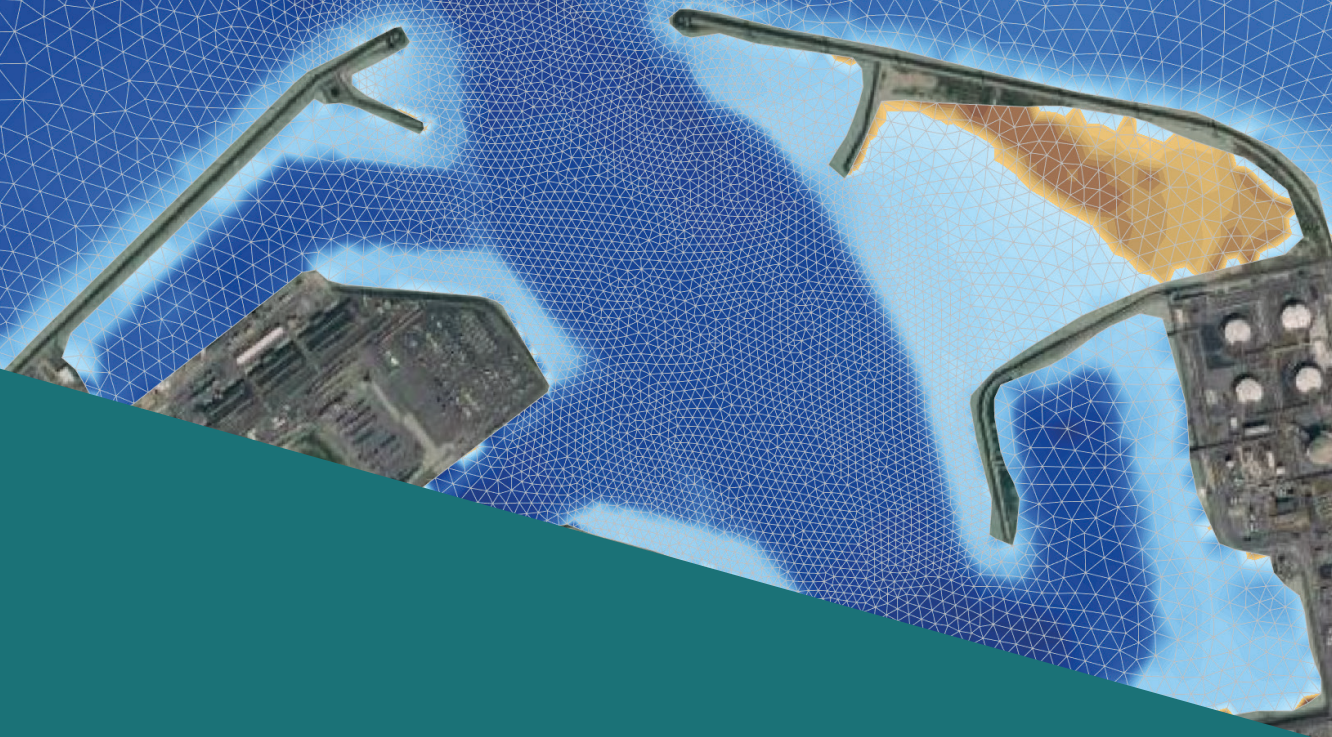




Vlaanderen
is wetenschap



23_063_16
WL rapporten

Stroomatlas Zeebrugge

Deelrapport 16 – Validatierapport
Telemac-3D Zeebrugge model

DEPARTEMENT
MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

Stroomatlas Zeebrugge

Deelrapport 16 – Validatierapport Telemac-3D Zeebrugge model

Stark, J.; Plancke, Y.; De Maerschallck, B.

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 2024
D/2024/3241/093

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Stark, J.; Plancke, Y.; De Maerschalc, B. (2024). Stroomatlas Zeebrugge: Deelrapport 16 – Validatierapport Telemac-3D Zeebrugge model. Versie 4.0. WL Rapporten, 23_063_16. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

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

Documentidentificatie

Oprachtgever:	Port of Antwerp Bruges	Ref.:	WL2024R23_063_16
Trefwoorden (3-5):	Stroming, TELEMAC-3D, numerieke modellering, Zeebrugge		
Kennisdomeinen:	Hydraulica en sediment > Hydrodynamica > Stroomsnelheden -en patronen > Numerieke modellering		
Tekst (p.):	45	Bijlagen (p.):	2
Vertrouwelijk:	<input checked="" type="checkbox"/> Nee	<input checked="" type="checkbox"/> Online beschikbaar	

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

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Plancke, Y.	Getekend door: Yves Plancke (Signature) Getekend op: 2024-09-16 13:55:27 +02:00 Reden: Ik keur dit document goed  
Projectleider:	De Maerschalc, B.	Getekend door: Bart De Maerschalc (Sig) Getekend op: 2024-08-08 09:43:55 +02:00 Reden: Ik keur dit document goed  

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Bellafkih, K.	Getekend door: Abdelkarim Bellafkih (Sig) Getekend op: 2024-08-09 10:07:29 +02:00 Reden: Ik keur dit document goed  
-----------------	---------------	--

Abstract

De meest recente stroomatlas van de haven van Zeebrugge dateert van 2011. Vanuit Port of Antwerp-Bruges is de vraag gekomen om een update te maken. Het Waterbouwkundig Laboratorium heeft hier gekozen voor een hybride aanpak van terreinmetingen en numerieke modellering.

Voorliggend rapport beschrijft de update van het bestaande TELEMACH3D Zeebrugge model en de kalibratie en validatie van het model waarbij gebruik gemaakt is van de varende en stationaire ADCP metingen die in het kader van dit project uitgevoerd werden in augustus 2023.

Het Waterbouwkundig Laboratorium beschikt over een TELEMACH3D detail model voor Zeebrugge en omgeving. In kader van voorliggend opdracht werd het model up-to-date gebracht. De bathymetrie binnen en buiten de haven werd geüpdatet op basis van de meest recente peilingen. Ook werden de geometrie en rekenrooster binnen de haven aangepast aan de huidige lay-out van de dokken en kades en het sterneneiland. Maar de grootste impact was nog de update van de model-software naar de meest recente release van de TELEMACH-MASCARET software suite. Het geüpdatet model werd gevalideerd aan de hand van de varende en vaste Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) meetcampagnes van Augustus 2023. Daarbij bleek vooral dat een geavanceerder numeriek advection-schema (NUMB-PSI) voor een betere representatie van de neervorming in het Centraal Deel van de Nieuwe Buitenhaven (CDNB) en dwarsstroming bij de vaargeul Pas van het Zand zorgt.

De reguliere vloedstroming langs de kust wordt ook goed gerepresenteerd in de modelsimulaties, met uitzondering van een lokale dip in de vloedstroming nabij de havenkoppen die bij maximum vloed optreedt en waarvan de fysische oorzaak op basis van de metingen niet kan worden vastgesteld. Hierdoor is in het model sprake van een lokale overschatting van de vloedstroming van gemiddeld ongeveer +15% in een zone net buiten de havenkoppen. Voor de aanmaak van de stroomatlas op basis van de numerieke modelresultaten wordt daarom een lokale correctie uitgevoerd voor de stroombeelden bij maximum vloed.

De ebstroming langs de kust wordt in algemene zin onderschat in de modelsimulaties. Deze onderschatting is variërend over het getij, maar kan langs de meetraaien oplopen tot bijna -30%. Derhalve is een algehele correctie van de gemodelleerde stroomsnelheden bij eb noodzakelijk voor de aanmaak van de stroomatlas.

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	IV
Lijst van de tabellen.....	VI
Lijst van de figuren	VII
1 Introductie	1
2 Modelbeschrijving	2
2.1 Telemac-3D Zeebrugge model	2
2.2 Model updates	4
2.2.1 Toepassing recentere versie Telemac-3D.....	4
2.2.2 Aanpassingen van het rekenrooster	4
2.3 Bathymetrie	5
2.4 Randvoorwaarden.....	6
2.4.1 Simulatieperiode.....	6
2.4.2 Afwartse randvoorwaarden: Nesting in DCSM-ZUNO	6
2.4.3 Opwaartse randvoorwaarden.....	7
2.5 Overige modelinstellingen	8
3 Modelkalibratie en modelvalidatie	10
3.1 Opzet modelkalibratie	10
3.1.1 Verwerking modelresultaten en vergelijking met stroomsnelheidsmetingen.....	13
3.2 Representatie algemene waterbeweging.....	15
3.3 Getijstroming toegangsgeul.....	16
3.3.1 Vergelijking met stroming op vaste meetpunten.....	16
3.3.2 Vergelijking met stroming langs meetraaien.....	16
3.4 Neerpatroon in de voorhaven.....	30
3.4.1 Geobserveerd stroompatroon.....	30
3.4.2 Representatie neerpatroon in kalibratieruns	31
3.5 Conclusie modelkalibratie.....	39
4 Correctie van gemodelleerde stroomsnelheden voor opmaak stroomatlas	40
4.1 Bepaling correctiefactoren.....	40
4.2 Implementatie correctiefactoren op stroomvelden	41

5	Conclusies	43
	Referenties	44
Bijlage 1	Brondata bathymetrische peilingen	B1

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Opwaartse randvoorwaarden.....	8
Tabel 2 – Algemene modelinstellingen: numerieke en fysische parameters.	9
Tabel 3 – Overzicht kalibratieruns.....	12
Tabel 4 – Foutenstatistiek voor waterstandsverloop te Zeebrugge.	15
Tabel 5 – BIAS en RMSE van kalibratieruns voor snelheidsmetingen op vaste meetpunten ZBRdam_oost en ZBRdam_west.....	18
Tabel 6 – BIAS en RMSE van kalibratieruns voor geprojecteerde snelheidsmetingen langs meetraai ZBR_zee_west.....	27
Tabel 7 – BIAS en RMSE van kalibratieruns voor geprojecteerde snelheidsmetingen langs meetraai ZBR_zee_mid.....	28
Tabel 8 – BIAS en RMSE van kalibratieruns voor geprojecteerde snelheidsmetingen langs meetraai ZBR_zee_oost.....	29
Tabel 9 – BIAS en RMSE van kalibratieruns voor geprojecteerde snelheidsmetingen langs raaien in de voorhaven.....	38
Tabel 10 – Overzicht brondata voor bathymetrisch grid Belgische kustvlakte 2017-2021.	B1
Tabel 11 – Overzicht brondata voor bathymetrisch grid Zeebrugge 2022.	B2

Lijst van de figuren

Figuur 1 – Modeldomein Telemac-3D Zeebruggemodel.....	3
Figuur 2 – Detail van het originele rekenrooster te Zeebrugge. Binnen de havendammen varieert de resolute van 25 tot 50 meter.....	3
Figuur 3 – Aanpassingen van het rekenrooster bij Zeebrugge. Modelrand van origineel rooster in geel en van nieuw rooster in rood.....	5
Figuur 4 – Overzichtskaart van de zones waar nieuwe bathymetrische data werd geïmplementeerd: dataset van de kustvlakte in blauw en dataset voor de zone rond Zeebrugge in rood.....	6
Figuur 5 – Locatie van de modelrand van het Telemac-3D Zeebrugge model (rood)in het ZUNO modelrooster (zwart).	7
Figuur 6 – Afvoer Leopoldskanaal augustus 2023.....	8
Figuur 7 – Verhoogde Manning coefficient van $n = 0,040 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ voor havendammen (rood) t.o.v. $n = 0,020 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ in omliggend modeldomein (blauw).....	9
Figuur 8 – Overzichtskaart met meetlocaties.....	13
Figuur 9 – Overzichtskaart met vooraf geplande meetraaien.	14
Figuur 10 – Gevaren meetraaien voor alle meetdagen.....	14
Figuur 11 – Geobserveerde en met simulatie ZBR_cal202 gemodelleerde stroming op meetpunt ZBRdam_oost.	19
Figuur 12 – Geobserveerde en met simulatie ZBR_cal202 gemodelleerde stroming op meetpunt ZBRdam_west.....	19
Figuur 13 – Gemodelleerd stroombeeld met run ZB_cal202 en geobserveerde vloedstroming langs meetraai ZBR_zee_mid omstreeks 0u30 voor HW op 16 augustus 2023.....	20
Figuur 14 – Gemodelleerd stroombeeld met run ZB_cal202 en geobserveerde vloedstroming langs meetraai ZBR_zee_mid 0u30 na HW op 16 augustus 2023.....	21
Figuur 15 – Gemodelleerd stroombeeld met run ZB_cal202 en geobserveerde vloedstroming langs meetraai ZBR_zee_mid omstreeks 1u30 na HW op 16 augustus 2023.....	22
Figuur 16 – Gemodelleerd stroombeeld met run ZB_cal202 en geobserveerde ebstroming langs meetraai ZBR_zee_west omstreeks 2u00 voor LW op 24 augustus 2023.....	23
Figuur 17 – Gemodelleerd stroombeeld met run ZB_cal202 en geobserveerde ebstroming langs meetraai ZBR_zee_west omstreeks 1u00 voor LW op 24 augustus 2023.....	24
Figuur 18 – Gemodelleerd stroombeeld met run ZB_cal202 en geobserveerde ebstroming langs meetraai ZBR_zee_west bij LW op 24 augustus 2023.	25
Figuur 19 – BIAS voor eb- en vloedstroming afzonderlijk langs de drie meetraaien buiten de havendammen voor run ZB_cal202.....	26
Figuur 20 – Geobserveerd stroombeeld in de voorhaven met vorming van neren rond het moment van hoogwater. De figuren bevatten informatie gemeten in een periode van 15' voor en na het tijdstip A: HW-60' B: HW C: HW+60'	30

Figuur 21 – Gemodelleerde en geobserveerde stroming tijdens hoogwater op 14 aug 2023 (GF = 0,87) voor runs 001 (ref), 202 (MURD-PSI schema / Smagorinsky model), 211 (MURD-PSI schema / k-ε model) en 212 (MURD-PSI schema / viscositeit = 1 m ² /s).....	32
Figuur 22 – Gemodelleerde en geobserveerde stroming 1u00 na hoogwater op 14 aug 2023 (GF = 0,87) voor runs 001 (ref), 202 (MURD-PSI schema / Smagorinsky model), 211 (MURD-PSI schema / k-ε model) en 212 (MURD-PSI schema / viscositeit = 1 m ² /s).....	33
Figuur 23 – Gemodelleerde en geobserveerde stroming 0u30 na hoogwater op 16 aug 2023 (GF = 0,97) voor runs 001 (ref), 202 (MURD-PSI schema / Smagorinsky model), 211 (MURD-PSI schema / k-ε model) en 212 (MURD-PSI schema / viscositeit = 1 m ² /s).....	34
Figuur 24 – Gemodelleerde en geobserveerde stroming 1u30 na hoogwater op 16 aug 2023 (GF = 0,97) voor runs 001 (ref), 202 (MURD-PSI schema / Smagorinsky model), 211 (MURD-PSI schema / k-ε model) en 212 (MURD-PSI schema / viscositeit = 1 m ² /s).....	35
Figuur 25 – Gemodelleerde en geobserveerde stroming tijdens hoogwater op 18 aug 2023 (GF = 1,06) voor runs 001 (ref), 202 (MURD-PSI schema / Smagorinsky model), 211 (MURD-PSI schema / k-ε model) en 212 (MURD-PSI schema / viscositeit = 1 m ² /s).....	36
Figuur 26 – Gemodelleerde en geobserveerde stroming één uur na hoogwater op 18 aug 2023 (GF = 1,06) voor runs 001 (ref), 202 (MURD-PSI schema / Smagorinsky model), 211 (MURD-PSI schema / k-ε model) en 212 (MURD-PSI schema / viscositeit = 1 m ² /s).....	37
Figuur 27 – Berekende correctiefactoren per blok van 200 m (afstand vanaf havenkoppen) en 60 min (t.o.v. HW).....	41
Figuur 28 – Ruimtelijk beeld van de toegepaste correctiefactoren tijdens eb.	42
Figuur 29 – Ruimtelijk beeld van de toegepaste correctiefactoren tijdens maximum vloed (-1u20 voor HW tot 0u40 voor HW).	42

1 Introductie

Port of Antwerp-Bruges is de tweede grootste haven van Europa, waar jaarlijks zo'n 290 miljoen ton internationale maritieme lading wordt behandeld. De nautische toegankelijkheid van de haven van Zeebrugge verloopt via de Pas van 't Zand naar de voorhaven. Dit gebied wordt gekenmerkt door getijden en bijbehorende stromingen. Daarnaast kunnen schepen via de Pierre Vandammesluis of de Visartsluis de achterhaven bereiken, waar er geen getij is.

De stromingen in de voorhaven en met name ter hoogte van de koppen kunnen een uitdaging vormen voor de scheepvaart. Voor containerschepen en LNG tankers is er dit moment een vaarbepanking wat betreft de maximale dwarsstroming ter hoogte van de haventoeegang (2 knoop voor containerschepen en 1,5 knoop voor LNG). Een accuraat beeld van de mogelijke stromingen is daarom cruciaal voor de vaarweggebruikers. Dergelijke reeks van stroombeelden wordt gebundeld in een "stroomatlas". De meest recente stroomatlas van de haven van Zeebrugge dateert al van 2011 (Agentschap voor Maritieme Dienstverlening en Kust. Afdeling Kust. Vlaamse Hydrografie, 2012). Deze voorgaande stroomatlas is tot stand gekomen met behulp van stroomsnelheidsmetingen (Acoustic Doppler Current Profiler) in de periode 2010-2011. Sinds de uitbouw van de voorhaven begin jaren 80 is zeebodem in de directe omgeving van Zeebrugge onderhevig aan continue morfologische veranderingen waaronder erosie voor de havendammen en verflauwen van de flanken van de havengeul. Deze bodemveranderingen hebben een invloed op de stroming. Vanuit Port of Antwerp-Bruges is dan ook de vraag gekomen om hiervan een update te maken en de dwarsstroming ter hoogte van de koppen van de havendammen in Zeebrugge en de neer in de voorhaven opnieuw in kaart te brengen.

Vanuit het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) is ervoor gekozen om deze vraag te beantwoorden door middel van een hybride aanpak: de nieuwe stroomatlas zal opgemaakt worden door terreinmetingen te combineren met numerieke modelsimulaties. De metingen brengen de stromingen in situ in kaart, maar het is onmogelijk om alle getijcondities op alle locaties gelijktijdig te bemeten. Vandaar dat een numerieke model ingezet wordt. Dit model wordt eerst gevalideerd aan de hand van de terreinmetingen, en vervolgens zullen de ruimtelijk dekkende stroombeelden gegenereerd worden voor de verschillende getijcondities die de nieuwe stroomatlas zullen vormen.

Het WL beschikt over een Telemac-3D detail model van de haven van Zeebrugge en omgeving. In kader van het voorliggende project werd het model geüpdatet en numerieke simulaties werden vergeleken met de varende en stationaire metingen uitgevoerd in augustus 2023 door het WL in samenwerking met DAB Vloot en afdeling Kust (Plancke et al., 2024a; Plancke et al., 2024b). Voorliggend rapport beschrijft de update van het model en de kalibratie en validatie van het model aan de hand van deze metingen.

2 Modelbeschrijving

2.1 Telemac-3D Zeebrugge model

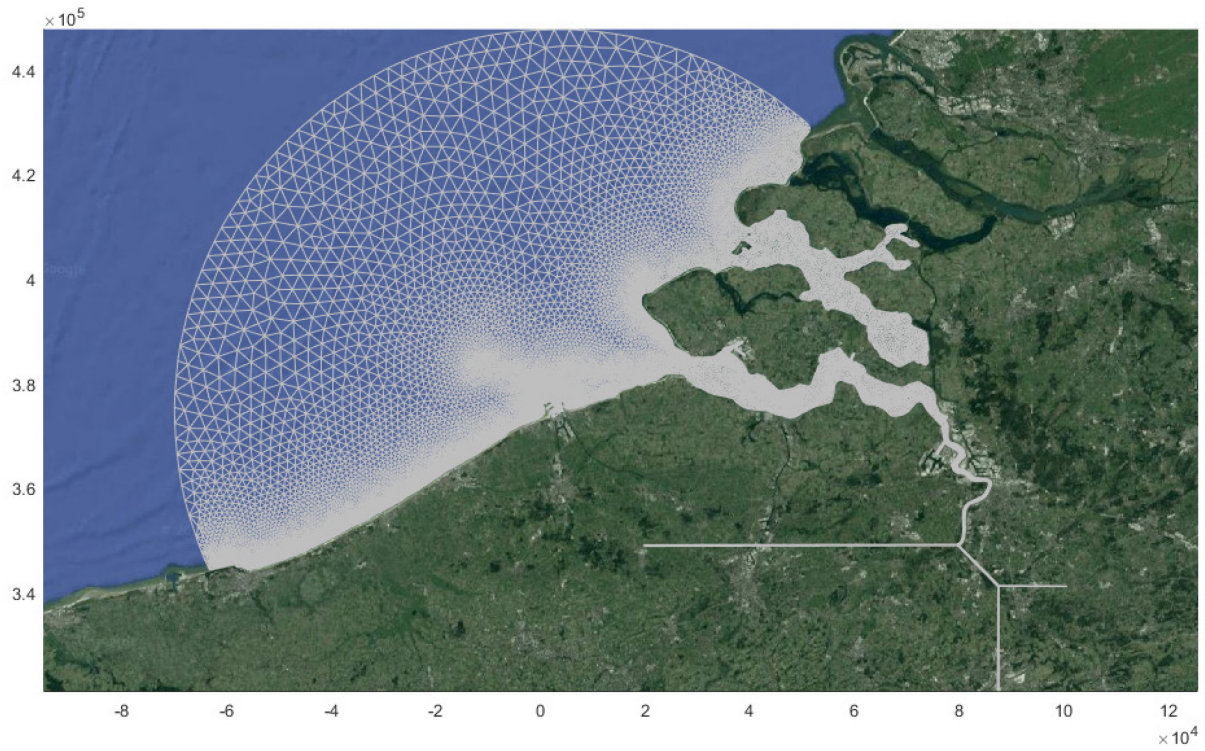
Voor de opmaak van de nieuwe stroomatlas zal het Telemac-3D Zeebrugge model gebruikt worden. Het model werd in opdracht van de afdeling Maritieme Toegang (MT) in 2015 door IMDC n.v. ontwikkeld om de toegankelijkheid van de haven en potentiële havenuitbreidingen te onderzoeken (IMDC, 2015). Ook in kader van Complex Project Kustvisie werd het model gebruikt voor scenario-berekeningen en impactstudies van zeespiegelstijging (De Maerschalck *et al.*, 2017). Het model wordt door het Waterbouwkundig Laboratorium in opdracht van MT beheerd. Bij de ontwikkeling van het model is extra aandacht besteed aan de neervorming binnen het Centraal Deel van de Nieuwe Buitenhaven (CDNB).

Het Zeebruggemodel is ontwikkeld binnen de open-source TELEMAC-MASCARET modelsoftware. Telemac3D maakt gebruik van ongestructureerde triangulaire roosters (Hervouet, 2007). Dit laat toe om de geometrie en bathymetrie nauwkeurig te construeren in het model. Ongestructureerde roosters laten ook toe om lokaal, in het interessegebied, de resolutie te verhogen. Figuur 1 toont het volledige modeldomein. Om de getijstroming in het mondingsgebied van het Schelde-estuarium en rond de haven van Zeebrugge goed te kunnen modeleren, bevat het model niet enkel de Belgische kust, maar ook een deel van de Franse en Nederlandse kust en de volledige Westerschelde. Om het effect van de getijvoortplanting verder opwaarts in het Schelde-estuarium te representeren, is de Zeeschelde geschematiseerd toegevoegd aan het model.

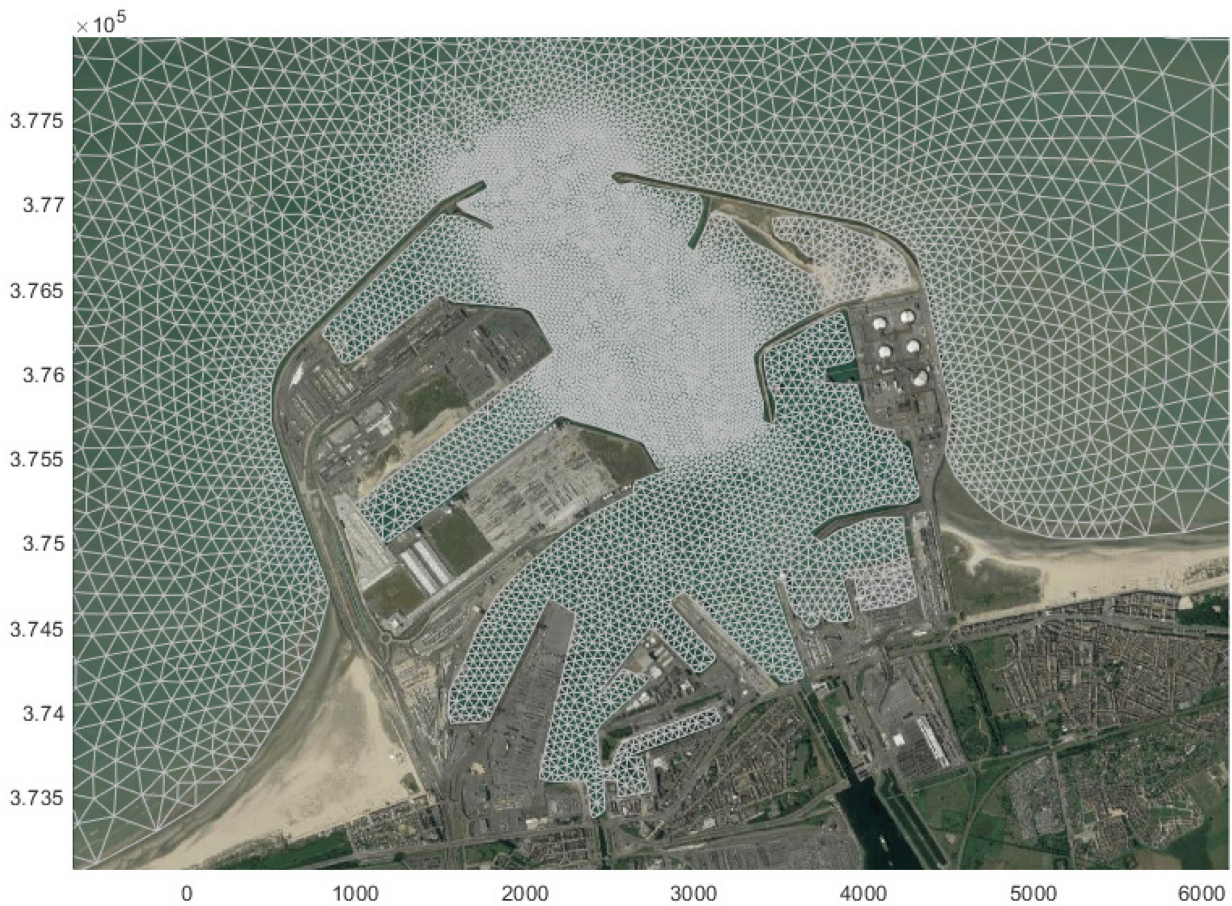
De horizontale resolutie van het originele model varieert van bijna 4 km offshore tot 25 m binnen het CDNB. Het model bestaat uit 44 500 driehoeken, gekoppeld door 23 695 *nodes* horizontaal, en verticaal 10 lagen, dus 236 950 punten in het totaal. Per tijdstap van 20 seconden wordt voor elke punt de snelheid (u , v , w), waterdiepte en saliniteit berekend. De bathymetrie in het originele model dateert van 2009-2010 (IMDC, 2015; Dujardin *et al.*, 2010a,b), maar is binnen het huidige project up to date gebracht.

De offshore randvoorwaarden voor het model worden gegenereerd aan de hand het Continental Shelf Model (CSM) en het Zuidelijke Noordzeemodel (ZUNO). Typisch wordt een volledig springtij/doodtij cyclus gemodelleerd (5/4/2009 – 21/4/2009 in het originele model). Voor de validatie beschreven in Hoofdstuk 3 zijn nieuwe randvoorwaarden gegenereerd overeenkomst de hydraulische en meteorologische condities voor de maand augustus 2023, waarin de nieuwe metingen werden uitgevoerd.

Het model rekent op het WL-rekencluster typisch op 48 processoren. Een modelberekening met een simulatieduur van één volledige maand heeft op het rekencluster een rekestijd van ongeveer één a twee uur.



Figuur 1 – Modeldomein Telemac-3D Zeebruggemodel



Figuur 2 – Detail van het originele rekenrooster te Zeebrugge. Binnen de havendammen varieert de resolute van 25 tot 50 meter.

2.2 Model updates

2.2.1 Toepassing recentere versie Telemac-3D

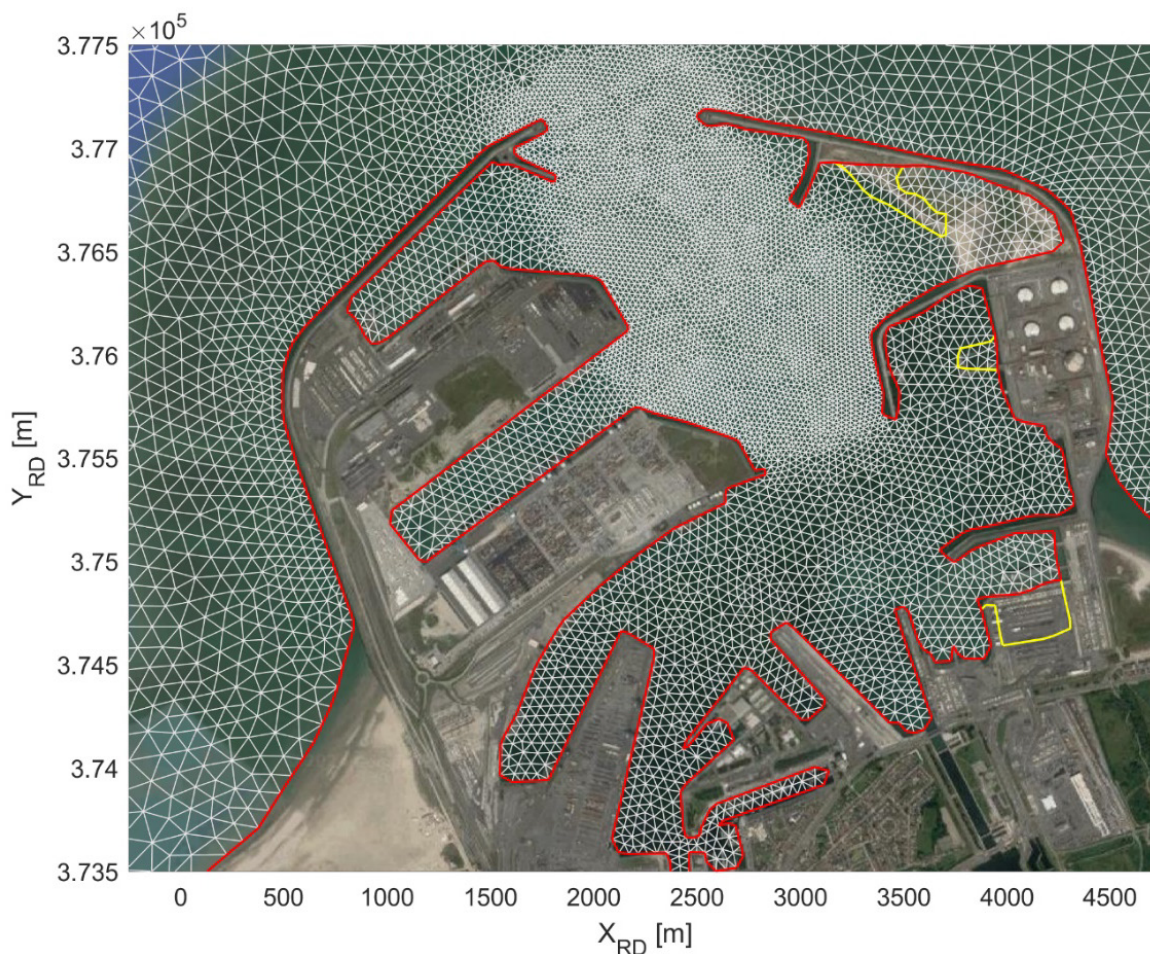
Het originele Zeebrugge model in Telemac-3D werd opgezet in Telemac versie v6p3. Voor de huidige studie werd het model aangepast naar de meest recente Telemac-3D versie v8p4. Deze update impliceert enkele wijzigingen in de modelinstellingen waaronder een hogere nauwkeurigheid in de numerieke solvers, een nieuwe (snelheidsafhankelijke) methodiek om wind-effecten mee te nemen en de mogelijkheid om recent ontwikkelde modeltoepassingen te implementeren (zoals nieuw geïmplementeerde turbulentieschema's, nieuwe sedimenttransportmodule, vernieuwde waterkwaliteitsmodule). Een volledig overzicht van alle wijzigingen in modelinstellingen per versie-update kan worden teruggevonden op de website van openTelemac¹.

Hoewel de standaardinstellingen van Telemac-3D v8p4 deels gewijzigd zijn t.o.v. de eerdere versie(s) is ervoor gekozen om de modelinstellingen bij het startpunt van de kalibratie zoveel als mogelijk gelijk te houden aan het originele Zeebrugge model.

2.2.2 Aanpassingen van het rekenrooster

Tussen de ontwikkeling van het originele Zeebrugge model in 2015 en de huidige studie is de geometrie van het havengebied op een aantal punten gewijzigd. Hiervoor is de modelrand in het havengebied aangepast op volgende punten: (1) het Britanniadok is deels gedempt; (2) de geometrie van het Sterneneiland is sindsdien sterk gewijzigd waardoor de originele modelrand niet overeenstemt met de huidige situatie (De Maerschack *et al.*, 2023); en (3) de Fluxys terminal was niet correct geïmplementeerd in het originele model. Figuur 3 toont de wijzigingen aan de modelrand die voor de huidige studie zijn toegepast.

¹ www.opentelemac.org



Figuur 3 – Aanpassingen van het rekenrooster bij Zeebrugge. Modelrand van origineel rooster in geel en van nieuw rooster in rood.

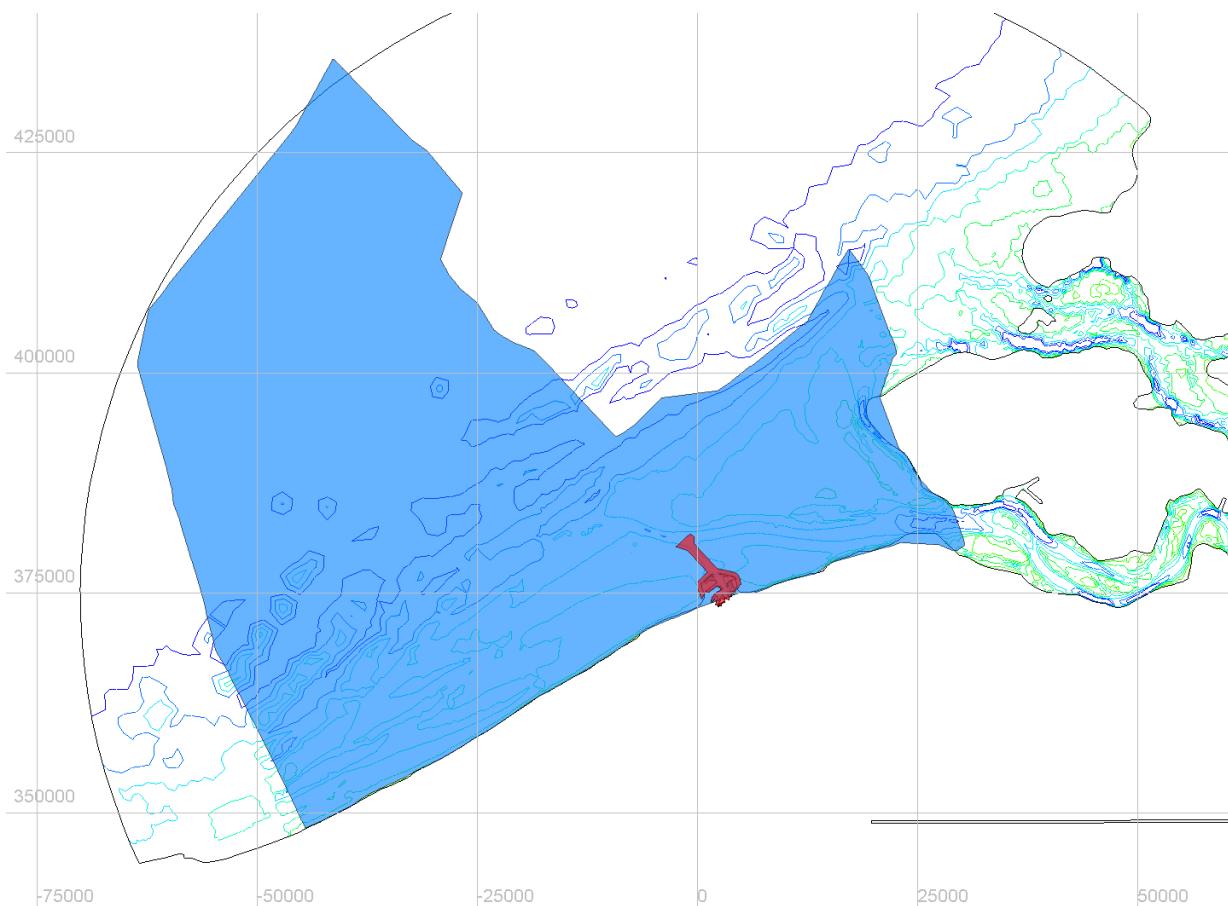
2.3 Bathymetrie

In het kader van de voorliggende studie is de bodemligging van het Zeebrugge model eveneens geüpdatet naar een meer recente situatie. Voor de kustvlakte en Scheldemonding is de bodemligging gelijk genomen met deze die werd samengesteld in het kader van de meest recente update van het Scaldis-model (Vanlede et al., 2020). Dit betekent concreet dat een mozaïek van bathymetrische data uit 2018-2021 is geïmplementeerd (Tabel 10).

In de omgeving van de haven van Zeebrugge zelf is de volgende bathymetrische data van de periode 2020-2022 toegepast: een mozaïek van peilingen binnen de voorhaven van Zeebrugge en Pas van het Zand (SB33 en waar mogelijk ook SB210; zie Tabel 11 in Bijlage 1) en Lidar data van 2021 voor het Sterneneiland. Ontbrekende zones zijn opgevuld met bathymetrische data uit de eerder genoemde dataset van de Belgische kustvlakte.

Figuur 4 toont de zones waarvoor de nieuwe bathymetrische data werd geïmplementeerd.

In het Schelde estuarium en overige zones van de kustvlakte werd de originele (2009) bodemligging behouden, zoals beschreven in IMDC (2015). De invloed van de bathymetrische wijzigingen in deze gebieden op de getijvoortplanting en stroming in het interessegebied rond Zeebrugge wordt als nihil beschouwd.



Figuur 4 – Overzichtskartaal van de zones waar nieuwe bathymetrische data werd geïmplementeerd: dataset van de kustvlakte in blauw en dataset voor de zone rond Zeebrugge in rood.

2.4 Randvoorwaarden

2.4.1 Simulatieperiode

De simulatieperiode is gekozen op basis van de duur van de meetcampagnes in augustus 2023 en loopt van 4/08/2023 0:00 tot 01/09/2023 0:00. Aangezien de eerste metingen dateren van 7/08/2023, is er een inspeeltijd van 3 dagen in het model. De gegevens in deze inspeelperiode worden niet gebruikt voor verdere analyse.

2.4.2 Afwaartse randvoorwaarden: Nesting in DCSM-ZUNO

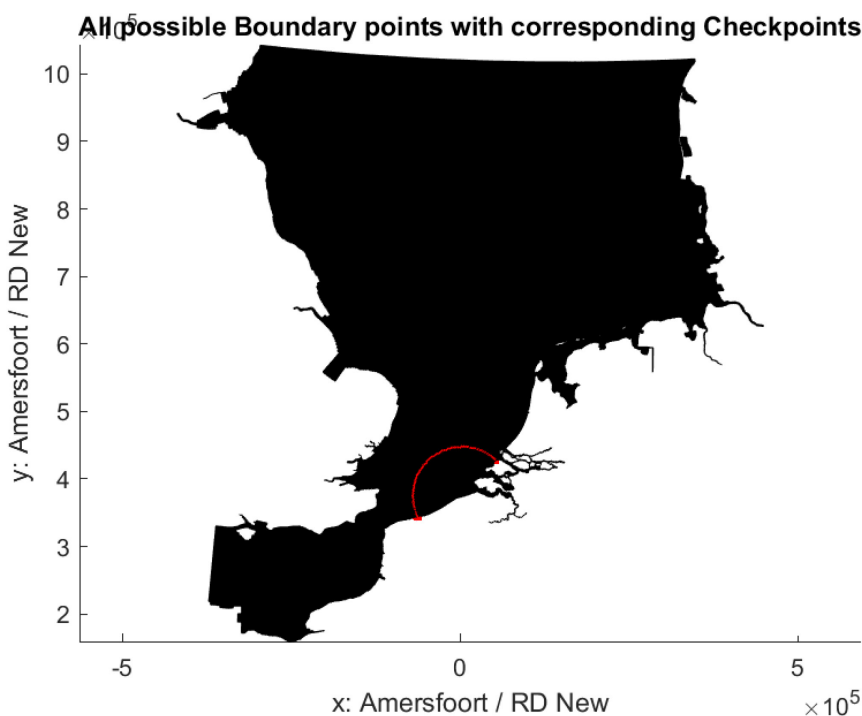
Waterbeweging

De afwaartse randvoorwaarden betreffen waterstanden en stroomsnelheden, die met behulp van nesting in een Noordzeemodel worden opgelegd. Het toegepaste Noordzeemodel uit de DCSM-ZUNO modeltrein. Voor meer informatie over het DCSM-model en het ZUNO model wordt verwezen naar: Leyssen et al. (2011) en Chu et al. (2020).

Het ruimste model, het Dutch Continental Shelf model (DCSM), wordt aangestuurd door een harmonische getijrand. Het is een rechtlijnig model op de bol (in bolcoördinaten). ECMWF ERA5 windvelden worden gebruikt als bron voor het genereren van opzet bovenop het astronomisch getij.

Het Zuidelijk Noordzee Model (ZUNO) is genest in het DCSM model met gebruik van twee waterstandsranden bij (1) de lijn Cherbourg (F) – Bournemouth (UK) en (2) de lijn Aberdeen (UK) – Løkken (DK). Het ZUNO model is een kromlijnig model dat de zuidelijke Noordzee en het Kanaal bevat, met inbegrip van onder meer de Westerschelde. De resolutie bedraagt ongeveer een tweetal kilometer voor de Belgische kust. De ECMWF ERA5 windvelden worden ook in het ZUNO model gebruikt voor het aandrijven van de opzet.

In het kader van deze modeloefening is een nieuwe DCSM-ZUNO run worden uitgevoerd voor het jaar 2023. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de versies DCSMv6 en ZUNOv4.



Figuur 5 – Locatie van de modelrand van het Telemac-3D Zeebrugge model (rood) in het ZUNO modelrooster (zwart).

Saliniteit

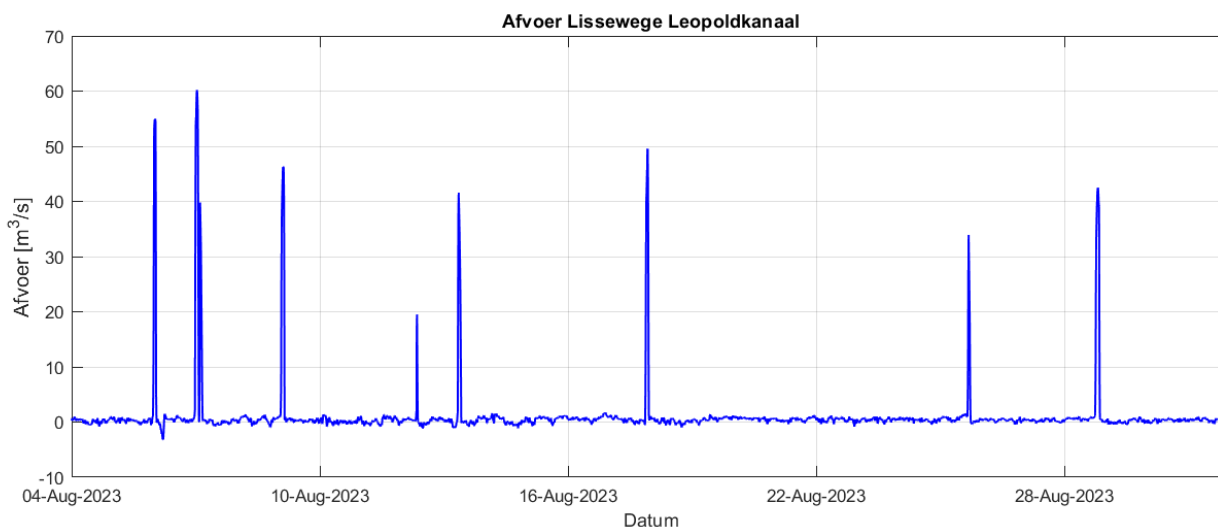
Naast de waterstanden en stroomsnelheden worden ook saliniteitswaarden opgelegd aan de afwaartse zeerand. Omdat de temporele variatie in saliniteit niet door het ZUNO model wordt berekend is ervoor gekozen om springtij-doodtij gemiddelde saliniteitswaarden op te leggen, die enkel ruimtelijk variëren van 22-30 PSU lokaal aan de noordrand van het model nabij de Maasmonding tot 32-34 PSU verder offshore en langs de westelijke en zuidelijke modelrand. De ruimtelijke variatie in saliniteitswaarden werd bepaald aan de hand van de randvoorwaarden van het originele Zeebrugge model (i.e., afkomstig uit een ZUNO run met saliniteit voor het jaar 2009).

2.4.3 Opwaartse randvoorwaarden

Tabel 1 geeft de geïmplementeerde bovenstroomse randvoorwaarden (i.e., debieten) weer. Voor de debietsrand bij Zeebrugge zijn geobserveerde afvoeren van Lissewege Leopoldkanaal gebruikt (Figuur 6). Aan de overige randen is het opgelegd debiet constant en gebaseerd op P50-waarden uit het Hydrologisch Jaarboek van 2019 (Vandenbruwaene et al., 2020).

Tabel 1 – Opwaartse randvoorwaarden.

Locatie	Debiet [m ³ /s]
Zeebrugge	Geobserveerd [aug 2023]
Terneuzen	31,10
Boven-Zeeschelde	22,46
Dender	3,20
Dijle + Zenne	18,44
Grote Nete + Kleine Nete	8,62
Bath	10,20



Figuur 6 – Afvoer Leopoldskanaal augustus 2023.

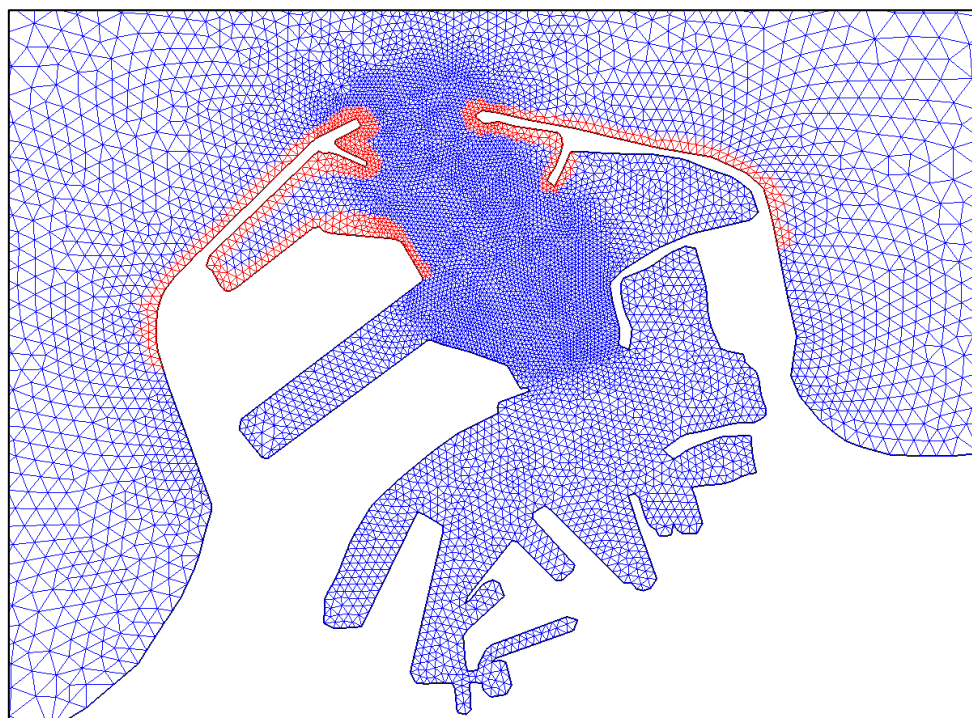
2.5 Overige modelinstellingen

Tabel 2 geeft een opsomming van de belangrijkste generieke modelinstellingen waaronder instellingen voor fysische parameters, turbulentiemodellering en numerieke instellingen.

Het geïmplementeerde bodemruwheidsveld na kalibratie door IMDC (2015) bestaat uit verschillende zones. In het offshore deel en in de Westerschelde is de ruwheidscoëfficiënt $n = 0,020 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$. In de Beneden-Zeeschelde wordt een coëfficiënt van $n = 0,010 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ toegepast en in de sterk geschematiseerde Boven-Zeeschelde en het Rupelbekken wordt gerekend met een coëfficiënt van $n = 0,040 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$. Voor de havendammen van Zeebrugge werd lokaal nog een verhoogde ruwheidscoëfficiënt van $n = 0,040 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ toegepast (Figuur 7).

Tabel 2 – Algemene modelinstellingen: numerieke en fysische parameters.

Parameter	Instelling
Telemac versie	v8p4r0
Coördinatenstelsel	Horizontaal: RD Parijs Verticaal: NAP
Verticale lagen	10 sigmalagen
Tijdzone	GMT+1
Tijdstap	20 s
Initiële condities	Constante waterstand: 0,0 m NAP Ruimtelijk variërende saliniteit na 3 maanden inspeeltijd
Randvoorwaarden	Waterstanden + snelheden + saliniteit aan zeerand. Debieten aan bovenstroomse randen
Coriolis	Aan (constante coëfficiënt $1,134 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$)
Wind	Aan (coëfficiënt variërend met windsnelheid)
Bodemruwheid	Manning (ruimtelijk variërende ruwheidscoëfficiënt)
Horizontaal turbulentiemodel	Smagorinsky model (coëfficiënt $C_s = 0,1$)
Verticaal turbulentiemodel	2: Mixing Length model 3: Nezu & Nakagawa
Numerieke settings	
Advectieschema	1: Method of characteristics
Advectieschema tracers	13: N-scheme
Matrix solver advection	7: Generalized Minimum Residual (GMRES) method
Matrix solver tracers	7: Generalized Minimum Residual (GMRES) method
Mass lumping	water levels + velocities
Implication for depth + velocities	1,0
Numerical accuracy	$1 \cdot 10^{-5}$
Drying /wetting	Flux correction method



Figuur 7 – Verhoogde Manning coëfficiënt van $n = 0,040 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ voor havendammen (rood) t.o.v. $n = 0,020 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ in omliggend modeldomein (blauw).

3 Modelkalibratie en modelvalidatie

Binnen de modelkalibratie wordt getracht de representatie van de stroomsnelheden en stroompatronen in en nabij de voorhaven van Zeebrugge te optimaliseren. Er wordt hierbij zowel aandacht besteed aan de temporele (zowel binnen een getijcyclus als binnen de springtij-doodtij-cyclus) en ruimtelijke variatie in stroomsnelheden in de toegangsgeul naar de haven van Zeebrugge (§3.2). Ook wordt getracht om de representatie van het neerpatroon in de voorhaven, dat typisch optreedt omstreeks hoogwater, te optimaliseren (§3.4).

De modelkalibratie gebeurt aan de hand van de stroomsnelheidsmetingen die in het kader van dit project zijn uitgevoerd (zie: Deelrapporten 1-15). Dit betreft zowel de stationaire Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) metingen (Plancke *et al.*, 2024a) als de gevaren ADCP-metingen in de toegangsgeul en voorhaven (Plancke *et al.*, 2024b).

De onderlinge vergelijking tussen de modellen tonen aan dat de aanpassingen van de bathymetrie en rekenrooster geen significante effecten hebben op de waterstanden. Er wordt in de huidige kalibratieoefening ook niet verder geoptimaliseerd voor de representatie van de saliniteit te Zeebrugge. De kalibratie voor deze parameters werd door IMDC (2015) al uitgevoerd en wordt voor de huidige doeleinden van het model als voldoende nauwkeurig ingeschat. Ook wordt er niet geoptimaliseerd voor de representatie van de getijstrooming elders in het modeldomein, zoals de Belgische kuststrook of het Schelde-estuarium. Bovendien, voor modellering van deze gebieden worden bij voorkeur andere numerieke modelschematiseringen gebruikt, zoals Scaldis (Vanlede *et al.*, 2020) of Scaldis-Kust (De Maerschallck *et al.*, 2023).

Ook voor de getijvoortplanting langs de Belgische kust werd een kalibratie uitgevoerd door IMDC (2015) waarbij verschillende Manning coëfficiënten voor bodemruwheid werden getest. Hieruit volgde dat het toepassen van een constante ruwheidscoëfficiënt van $n = 0,020 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ in het grootste deel van het modeldomein (i.e., offshore deel en Westerschelde) tot de beste representatie van de getijvoortplanting door het modeldomein leidt. In de huidige modelkalibratie zal enkel nog worden nagegaan of veranderingen in modelinstellingen niet leiden tot significante veranderingen in de getijvoortplanting door het modeldomein met een speciale focus op de representatie van het getij te Zeebrugge.

3.1 Opzet modelkalibratie

Binnen deze kalibratie wordt getracht de representatie van de stroomsnelheden en stroompatronen in de toegangsgeul en in de voorhaven van Zeebrugge te verbeteren door enkele modelinstellingen aan te passen ten opzichte van het bestaande Zeebrugge model. In een eerste fase binnen de kalibratie wordt gevarieerd in één bepaalde modelparameter. Als meerdere van deze kalibratieruns een (positieve) invloed hebben op de representatie van het neerpatroon of de reguliere vloed- en ebstroming, dan worden in een tweede set van kalibratieruns ook combinaties van modelinstellingen geprobeerd.

Tabel 3 geeft een overzicht van de uitgevoerde kalibratieruns. ZB_cal001 is de referentierun waarin de modelinstellingen identiek zijn aan het originele model, zoals gekalibreerd en gevalideerd door IMDC (2015), behoudens de updates die in hoofdstuk 2 zijn beschreven. Op voorhand wordt, deels op basis van bevindingen uit IMDC (2015), verwacht dat de bodemruwheid in de voorhaven en voor de havendammen en het horizontale turbulentiemodel het meeste invloed hebben op de lokale stroompatronen, waaronder de neervorming in de voorhaven. Daarom zijn er in deze kalibratie simulaties uitgevoerd met een aangepaste bodemruwheid in de voorhaven (*ZB_cal011-013*), een aangepaste bodemruwheid voor de havendammen (*ZB_cal021-022*), met verschillende instellingen voor de horizontale en verticale turbulentiemodellen (*ZB_cal101-111*) en met enkele verschillende instellingen het advectionschema, waaronder de toepassing van het Multidimensional Upwind Residual Distribution of MURD schema (i.e., nieuwe default setting in Telemac-3D v8p4) die de invloed van numerieke diffusie op de ruimtelijke gradiënten in de stroomsnelheid wellicht kan verminderen (*ZB_cal201-204*). Een verdere verfijning van de roosterresolutie vormt geen onderdeel van de modelkalibratie, dit is in IMDC (2015) uitvoerig onderzocht. Uiteindelijk zijn er nog enkele combinaties van bovenstaande aanpassingen geprobeerd (*ZB_cal211-213*). Voor achtergrondinformatie over de verschillende turbulentschema's en numerieke instellingen wordt verwezen naar de Telemac-3D user manual en Telemac-3D theory guide².

² www.opentelemac.org

Tabel 3 – Overzicht kalibraties.

Simulatie	Beschrijving
ZB_cal001	Referentierun na modelupdate zoals beschreven in hoofdstuk §2.
ZB_cal011	Verlaging bodemruwheid voorhaven van $n = 0,020 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ naar $n = 0,012 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$
ZB_cal012	Verlaging bodemruwheid voorhaven van $n = 0,020 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ naar $n = 0,016 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$
ZB_cal013	Verhoging bodemruwheid voorhaven van $n = 0,020 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ naar $n = 0,024 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$
ZB_cal021	Verhoging bodemruwheid havendammen van $n = 0,040 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ naar $n = 0,060 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$
ZB_cal022	Verlaging bodemruwheid havendammen van $n = 0,040 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ naar $n = 0,020 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$
ZB_cal101	Horizontaal turbulentiemodel Smagorinsky met $C_s = 0,2$ i.p.v. $C_s = 0,1$.
ZB_cal102	Horizontaal turbulentiemodel 1: constant COEFFICIENT FOR HORIZONTAL DIFFUSION OF VELOCITIES = $0,2 \text{ m}^2/\text{s}$
ZB_cal103	Horizontaal turbulentiemodel 1: constant COEFFICIENT FOR HORIZONTAL DIFFUSION OF VELOCITIES = $1,0 \text{ m}^2/\text{s}$
ZB_cal104	Horizontaal turbulentiemodel 1: constant COEFFICIENT FOR HORIZONTAL DIFFUSION OF VELOCITIES = $5 \text{ m}^2/\text{s}$
ZB_cal105	Horizontaal turbulentiemodel 1: constant COEFFICIENT FOR HORIZONTAL DIFFUSION OF VELOCITIES = $25 \text{ m}^2/\text{s}$
ZB_cal106	Horizontaal turbulentiemodel 1: constant, Verticaal turbulentiemodel 1: constant COEFFICIENT FOR HORIZONTAL + VERTICAL DIFFUSION OF VELOCITIES = $1,0 \text{ m}^2/\text{s}$
ZB_cal107	Verticaal turbulentiemodel 2: Mixing Length model met Prandtl formulering Mixing Length coëfficiënt: $C_F=0.26$
ZB_cal108	Verticaal turbulentiemodel 2: Mixing Length model, 3: Nezu & Nakagawa, Damping function: 3 (Munk & Anderson)
ZB_cal109	Horizontaal + verticaal turbulentiemodel 3: k- ϵ COEFFICIENT FOR HORIZONTAL + VERTICAL DIFFUSION OF VELOCITIES = $1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
ZB_cal110	Horizontaal + verticaal turbulentiemodel 5: Spalart-Allmaras COEFFICIENT FOR HORIZONTAL + VERTICAL DIFFUSION OF VELOCITIES = $1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
ZB_cal111	Horizontaal + verticaal turbulentiemodel 9: Detached Eddy Simulation (DES) COEFFICIENT FOR HORIZONTAL + VERTICAL DIFFUSION OF VELOCITIES = $1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
ZB_cal201	Advectieschema 5: MURD (Multidimensional Upwind Residual Distribution) PSI scheme, met optie 4: locally semi-implicit predictor-corrector scheme (for tidal flats) IMPLICATION FOR DEPTH/VELOCITIES = 0,55 ipv. 1,0 Numerical accuracy $1 \cdot 10^{-8}$ ipv. $1 \cdot 10^{-5}$
ZB_cal202	Advectieschema 5: MURD (Multidimensional Upwind Residual Distribution) PSI scheme, met optie 4: locally semi-implicit predictor-corrector scheme (for tidal flats)
ZB_cal203	IMPLICATION FOR DEPTH/VELOCITIES = 0,55 ipv. 1,0
ZB_cal204	Numerical accuracy $1 \cdot 10^{-8}$ ipv. $1 \cdot 10^{-5}$
ZB_cal211	Advectieschema 5: MURD-PSI + optie 4: LIPS Horizontaal + verticaal turbulentiemodel 3: k- ϵ COEFFICIENT FOR HORIZONTAL + VERTICAL DIFFUSION OF VELOCITIES = $1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
ZB_cal212	Advectieschema 5: MURD-PSI + optie 4: LIPS Horizontaal turbulentiemodel 1: constant COEFFICIENT FOR HORIZONTAL DIFFUSION OF VELOCITIES = $1,0 \text{ m}^2/\text{s}$
ZB_cal213	Advectieschema 5: MURD-PSI + optie 4: LIPS Horizontaal turbulentiemodel 1: constant, Verticaal turbulentiemodel 1: constant COEFFICIENT FOR HORIZONTAL + VERTICAL DIFFUSION OF VELOCITIES = $1,0 \text{ m}^2/\text{s}$

3.1.1 Verwerking modelresultaten en vergelijking met stroomsnelheidsmetingen

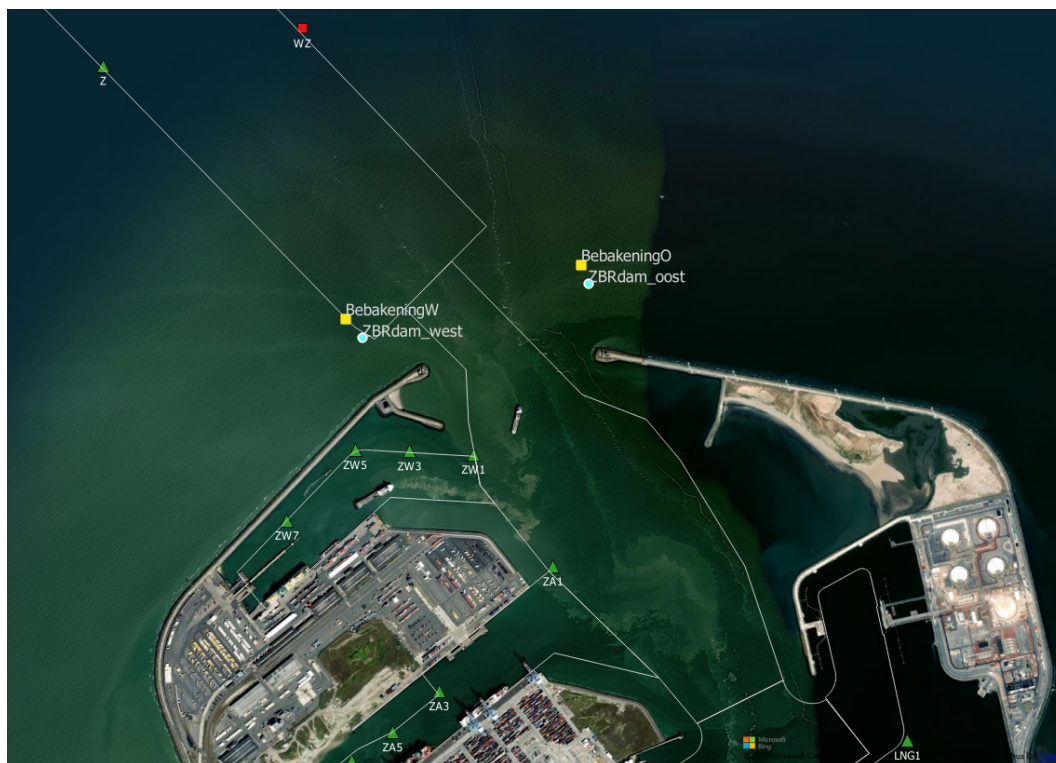
De gemodelleerde stroomvelden worden vergeleken met geobserveerde waterstanden in de haven van Zeebrugge, met geobserveerde snelheden op de vaste meetpunten net buiten de havendammen (Figuur 8; Plancke *et al.*, 2024a) en met de gevaren ADCP-raaien van de verschillende meetcampagnes uit augustus 2023 (Figuur 10; Plancke *et al.*, 2024b).

Voor de vaste meetpunten kunnen model en meting rechtstreeks worden vergeleken.

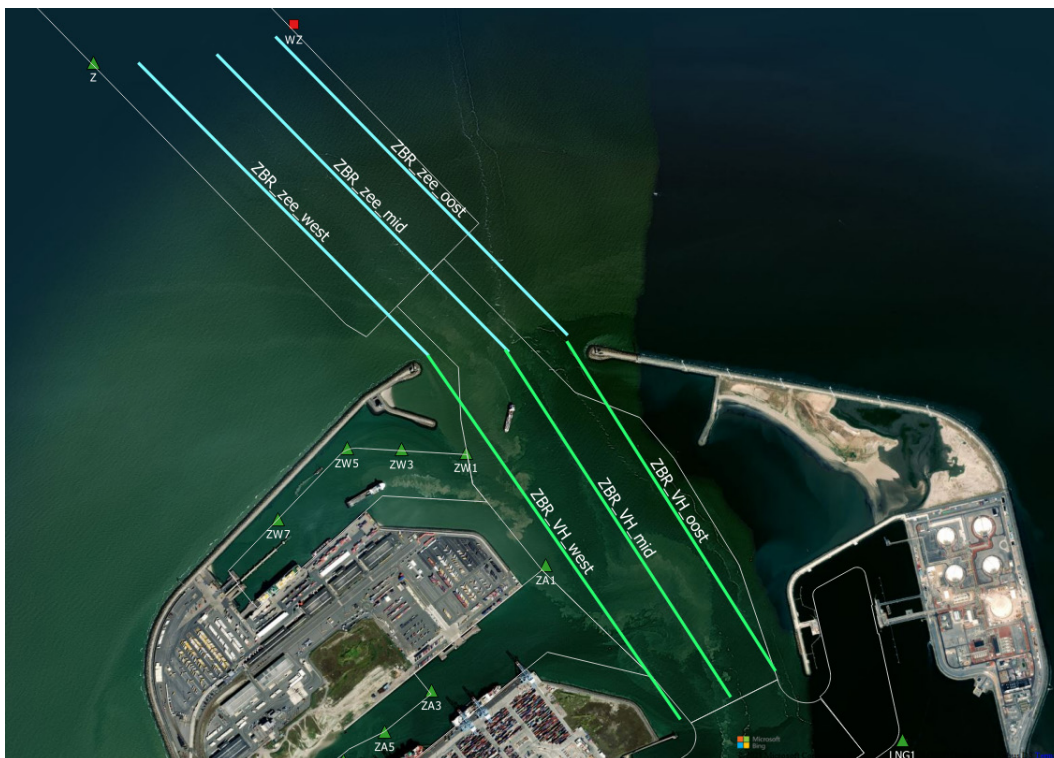
Voor de gevaren meetraaien worden de modelresultaten en geobserveerde raaien eerst geprojecteerd op de zes vooraf vastgestelde raaien (Figuur 9), zodat model en meting voor verschillende getijcycli op dezelfde locaties vergeleken kunnen worden. De modelresultaten worden (per uitvoerstap van 10 minuten) triangulair geïnterpoleerd op punten langs deze raaien met een horizontaal interval van 40 m. Ook de daadwerkelijk gevaren ADCP-raaien worden geïnterpoleerd op de vooraf vastgestelde raaien. Hiervoor wordt binnen een polygoon van 75 m rondom de vooraf vastgestelde raai gezocht naar gemeten punten in de dataset van gevaren ADCP-raaien. Als er voldoende overlap is tussen de daadwerkelijk gevaren meetraai en één van de vooraf vastgestelde raaien worden de ADCP-metingen geprojecteerd op de meetraai, eveneens met een horizontaal interval van 40 m. Hiervoor wordt alle ADCP-data (i.e., met een interval van 4 sec) per punt langs de vastgestelde raai geaggregeerd en gemiddeld op basis van een 'nearest-neighbour'-methode. Na interpolatie op de vooraf vastgestelde raaien kunnen model en meting dan onderling worden vergeleken.

Voor alle meetpunten en meetraaien wordt een foutenstatistiek berekend aan de hand van de gemiddelde afwijking BIAS en RMSE. Voor de meetraaien buiten de haven wordt aanvullend een onderscheid gemaakt tussen de vloed- en ebstroming.

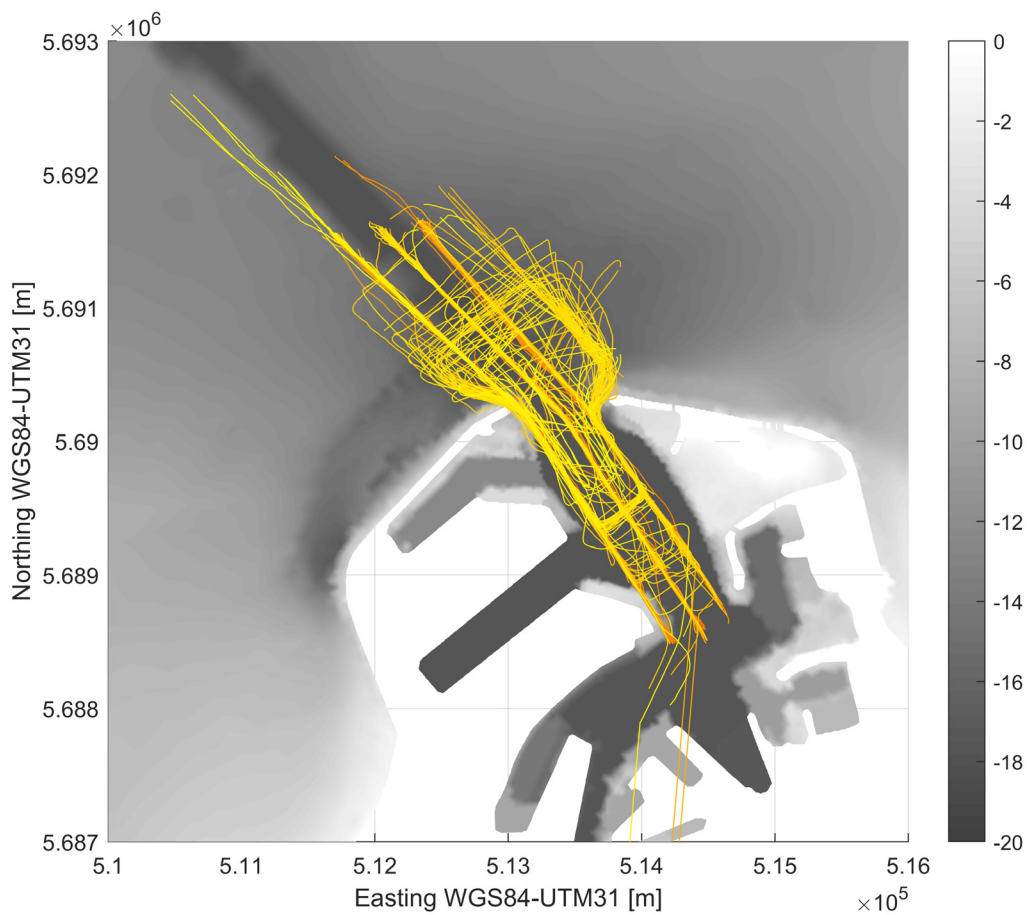
Vervolgens wordt voor de simulaties die de beste overeenstemming geven met de eb- en vloedstroming buiten de haven gekeken naar de representatie van het neerpatroon binnen de voorhaven van Zeebrugge. De representatie van het neerpatroon in de voorhaven kan worden vergeleken aan de hand van de foutenstatistiek voor de gevaren meetraaien in de voorhaven, maar zal vooral worden beoordeeld op basis van een visuele vergelijking van de gemodelleerde en geobserveerde stroomvelden in dit gebied.



Figuur 8 – Overzichtskarta met meetlocaties.



Figuur 9 – Overzichtskaat met vooraf geplande meetraaien.



Figuur 10 – Gevaren meetraaien voor alle meetdagen.

3.2 Representatie algemene waterbeweging

Verbetering van de globale getijbeweging door het modeldomein ten opzichte van het originele Zeebrugge model is binnen de huidige kalibratie geen vooropgesteld doel, maar voor elke kalibratierun is wel nagegaan of de getijvoortplanting nog steeds representatief is. Hiervoor werd de representatie van het verticaal getij op verschillende tijposten in het modeldomein vergeleken. Tabel 4 toont ter illustratie de foutenstatistiek voor de representatie van het verticaal getij in Zeebrugge.

Uit deze analyse blijkt dat de verschillende modelinstellingen die in deze kalibratieoefening werden getest niet of nauwelijks invloed hebben op de getijbeweging, met uitzondering van kalibratieruns ZB_cal110 en ZB_cal111 waarin andere modellen voor turbulentiemodellering zijn toegepast. In deze runs verslechtert de representatie van de globale getijbeweging en daarom zijn deze runs voor verdere analyses van de gemodelleerde stroompatronen buiten beschouwing gelaten. Verder valt enkel op dat het faseverschil tussen de gemodelleerde en geobserveerde hoogwaters iets kleiner is in runs ZB_cal211 en ZB_cal212, waarin het MURD-PSI advectionschema werd toegepast in combinatie met het k-ε model voor turbulentiemodellering of met een constante diffusiviteit van 1,0 m²/s.

Tabel 4 – Foutenstatistiek voor waterstandsverloop te Zeebrugge.

Run	Gehele tijdserie		Hoogwaters				Laagwaters			
	BIAS [m]	RMSE [m]	BIAS [m]	RMSE [m]	BIAS [min]	RMSE [min]	BIAS [m]	RMSE [m]	BIAS [min]	RMSE [min]
ZB_cal001	0.00	0.08	0.00	0.08	12	15	-0.03	0.07	-2	9
ZB_cal011	0.00	0.08	0.00	0.08	12	16	-0.03	0.07	-2	9
ZB_cal012	0.00	0.08	0.01	0.08	12	16	-0.03	0.07	0	9
ZB_cal013	0.00	0.08	0.00	0.08	12	16	-0.03	0.07	-2	9
ZB_cal021	0.00	0.08	0.00	0.08	12	16	-0.03	0.07	-2	9
ZB_cal022	0.00	0.08	0.01	0.08	15	18	-0.03	0.07	-1	9
ZB_cal101	0.00	0.08	0.00	0.08	12	15	-0.03	0.07	-1	9
ZB_cal102	0.00	0.08	0.01	0.08	11	15	-0.03	0.07	-1	9
ZB_cal103	0.00	0.08	0.01	0.08	12	16	-0.03	0.07	0	9
ZB_cal104	0.00	0.08	0.01	0.08	11	14	-0.03	0.07	0	9
ZB_cal105	0.00	0.09	0.04	0.09	13	19	-0.05	0.08	0	11
ZB_cal106	0.01	0.08	0.01	0.08	13	17	-0.02	0.07	0	9
ZB_cal107	0.00	0.08	0.01	0.08	12	15	-0.03	0.07	-2	9
ZB_cal108	0.00	0.08	0.01	0.08	12	16	-0.03	0.07	-2	9
ZB_cal109	0.00	0.08	0.01	0.08	11	17	-0.03	0.07	-1	9
ZB_cal110	-0.02	0.11	0.06	0.11	19	22	-0.14	0.16	-3	10
ZB_cal111	-0.02	0.11	0.07	0.12	22	23	-0.14	0.16	-2	9
ZB_cal201	0.00	0.08	0.01	0.08	14	18	-0.04	0.08	-1	8
ZB_cal202	0.00	0.08	0.01	0.08	11	15	-0.04	0.08	-1	10
ZB_cal203	0.00	0.08	0.01	0.08	14	18	-0.03	0.07	-2	10
ZB_cal204	0.00	0.08	0.00	0.08	12	16	-0.03	0.07	-2	9
ZB_cal211	0.00	0.08	0.02	0.07	8	14	-0.05	0.08	-3	10
ZB_cal212	0.00	0.08	0.01	0.08	7	14	-0.04	0.08	-2	9
ZB_cal213	0.00	0.08	0.02	0.08	10	14	-0.03	0.07	-1	8

3.3 Getijstroming toegangseul

De gemodelleerde getijstroming buiten de havendammen, ofwel de reguliere eb- en vloedstroming langs de kust, verschilt eveneens weinig tussen de kalibratieruns. Hieronder worden de resultaten en verschillen tussen de kalibratieruns besproken op basis van de modelprestatie op de vaste meetpunten en voor de gevaren ADCP-raaien.

3.3.1 Vergelijking met stroming op vaste meetpunten

Figuur 11 en Figuur 12 geven het stroomsnelheidsverloop bij de vaste meetpunten ZBRdam_oost en ZBRdam_west weer voor de observaties en voor kalibratierun ZBR_cal202, waarmee het neerpatroon in de voorhaven het best wordt gerepresenteerd (de representatie van de neer wordt verder in detail besproken in §3.4.2). Dit gemodelleerd stroomsnelheidsverloop is illustratief voor de overige kalibratieruns, uitgezonderd de eerder aangehaalde runs ZBR_cal110 en ZBR_cal111 met andere turbulentieschema's en runs ZBR_cal104 en ZBR_cal105 met een relatief hoge constante viscositeit van 5 of 25 m²/s, waarin de stroming meer afwijkt. Uit de figuren met het stroomsnelheidsverloop volgt dat op beide meetpunten de hoogste pieksnelheden worden onderschat. Dit geldt vooral voor de korte ebpiek die wel zichtbaar is in de observaties, het sterkst bij de oost-dam, maar niet in het gemodelleerd stroomsnelheidsverloop. In het algemeen wordt ook de maximale vloed onderschat. Tabel 5 geeft de foutenstatistiek weer voor de representatie van de getijstroming op deze vaste meetpunten. Hieruit blijkt ook dat er nauwelijks verschil zit tussen de meeste kalibratieruns. Enkel voor de simulaties waarin het MURD-PSI advectionschema werd toegepast (i.e., ZBR_cal201, ZBR_cal202, ZBR_cal211, ZBR_cal212 en ZBR_cal213) is de gemiddelde afwijking ten opzichte van de gemeten stroming iets kleiner.

3.3.2 Vergelijking met stroming langs meetraaien

Figuur 13, Figuur 14 en Figuur 15 tonen de gemodelleerde stroombeelden tijdens de vloedfase voor simulatie ZBR_cal202, gecombineerd met bijbehorende ADCP-metingen voor één van de meetraaien langs de toegangseul. Figuur 16, Figuur 17 en Figuur 18 tonen op een gelijkaardige manier de stroombeelden tijdens de ebfase. Hoewel de stroombeelden slechts voor een enkel getij en voor een enkele simulatie worden getoond kunnen het gemodelleerd stroompatroon en de afwijking t.o.v. de meetraaien buiten de havendammen als illustratief worden beschouwd voor de gemodelleerde stroming voor andere getijden en voor andere kalibratieruns (m.u.v. de eerder genoemde simulaties ZBR_cal104, ZBR_05 ZBR_cal110 en ZBR_cal111 die sterker afwijken). De verschillen in stroombeelden binnen de voorhaven zijn wel groter. Deze worden in §3.4.2 besproken. In Figuur 19 wordt het ruimtelijk patroon van de gemiddelde afwijking of BIAS van de ebstroming en de gemiddelde afwijking of BIAS van de vloedstroming ten opzichte van de geobserveerde stroming langs de meetraai geïllustreerd op basis van kalibratierun ZB_cal202. Het onderscheid tussen eb en vloedstroming is gemaakt op basis van de gemiddelde stroomrichting langs de meetraai. In Tabel 6, Tabel 7 en Tabel 8 wordt voor elk van de meetraaien buiten de havendammen de foutenstatistiek getoond op basis van de gemiddelde afwijking of BIAS en de RMSE. In deze tabellen wordt ook een onderscheid gemaakt tussen de eb- en vloedfase.

Vloedstroming

De reguliere vloedstroming langs de Belgische kust wordt goed gecapteerd door het model, waarbij de variërende modelinstellingen tussen de kalibratieruns net als op de vaste meetpunten nauwelijks verschil maken. De gemiddelde afwijking van de gemodelleerde stroming ten opzichte van de geobserveerde stroming langs de meetraaien is tijdens de vloedfase ook beperkt voor het grootste deel van de drie raaien.

Tijdens maximum vloedstroming (i.e., ong. één uur voor hoogwater) is echter wel een opvallend verschil tussen model en meting zichtbaar. Op dat moment wordt op alle meetraaien buiten de havendammen, en ongeacht de getijfactor of meteo-condities, een lokale vermindering van de stroomsnelheid geobserveerd in een zone van 200 tot 400 m buiten de koppen van de havendammen (Figuur 13). Deze lokale 'dip' in de vloedstroming langs de kust wordt niet gereproduceerd door de kalibratieruns. Daardoor is de gemiddelde afwijking van de stroomsnelheid tijdens de vloedfase ook groter in de zone nabij de havendammen (Figuur 19). Welk fysisch proces de lokale dip in de vloedstroming veroorzaakt, is momenteel niet met zekerheid vast te stellen. De zone waarin de dip in de stroming bij maximum vloed zich manifesteert wordt wel gekenmerkt door lokale gradiënten in bathymetrie. Doch, zijn deze gradiënten op zich waarschijnlijk niet enige verklaring en is het waarschijnlijk een complexe samenhang van de geometrie van de havendammen in combinatie met de wateruitwisseling met het CDNB.

Daarnaast blijkt ook uit de vergelijking tussen model en meting op de vaste meetpunten dat de vloedpiek wordt onderschat, gemiddeld 10 tot 15 cm/s. Het aanpassen van de modelinstellingen heeft hier weinig tot geen verbeterend effect op.

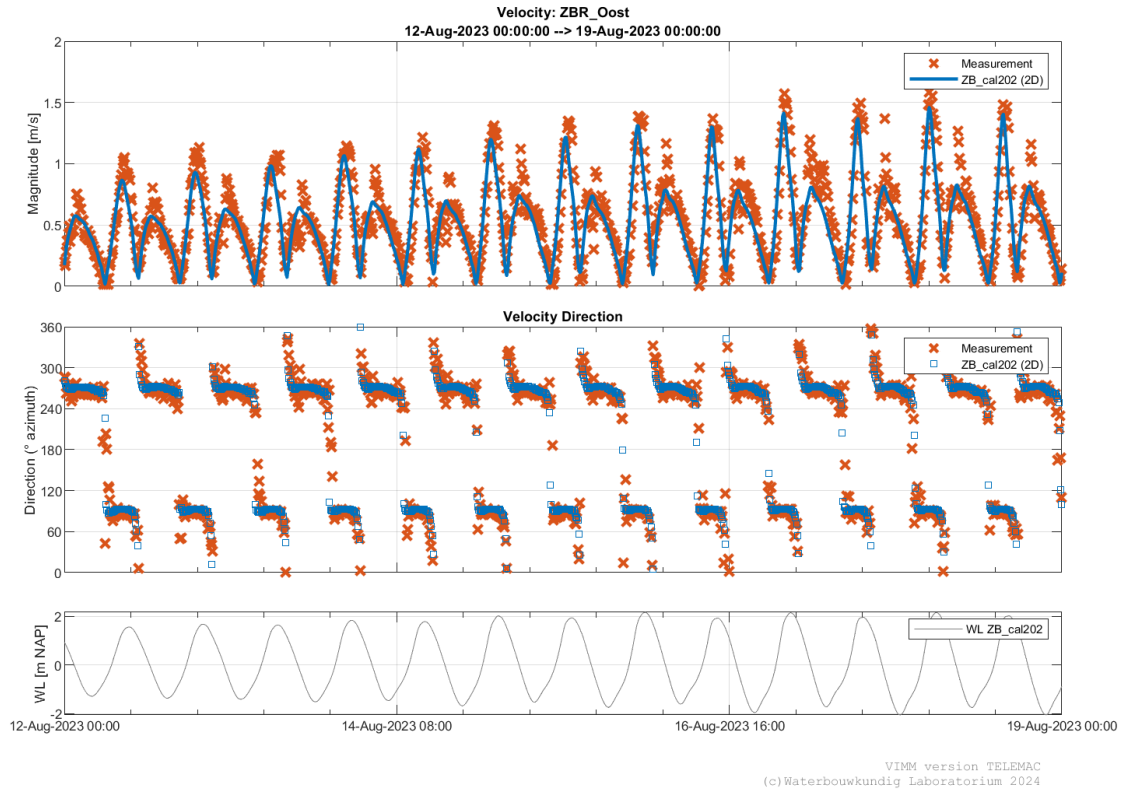
Ebstroming

De overeenkomst tussen de gemodelleerde en gesimuleerde stroomsnelheden langs de meetraaien is tijdens de eb fase minder goed dan tijdens de vloedfase. Er is sprake van een algemene onderschatting van de geobserveerde ebstroming langs de drie meetraaien. Hoewel de gemiddelde afwijking ongeveer -0,15 m/s bedraagt (Figuur 19), kunnen deze onderschattingen afhankelijk van de fase in het getij of in de springtij-doodtij-cyclus ook groter zijn. Uit de vergelijking tussen model en meting op de vaste meetpunten volgt dat met name de ebpiek wordt onderschat (zie: §3.3.1). Zoals eerder al opgemerkt hebben de variërende modelinstellingen tussen de kalibratieruns geen merkbare invloed op de representatie van de ebstroming langs de haven van Zeebrugge, uitgezonderd enkele runs waarin de globale getijvoortplanting minder adequaat wordt weergegeven.

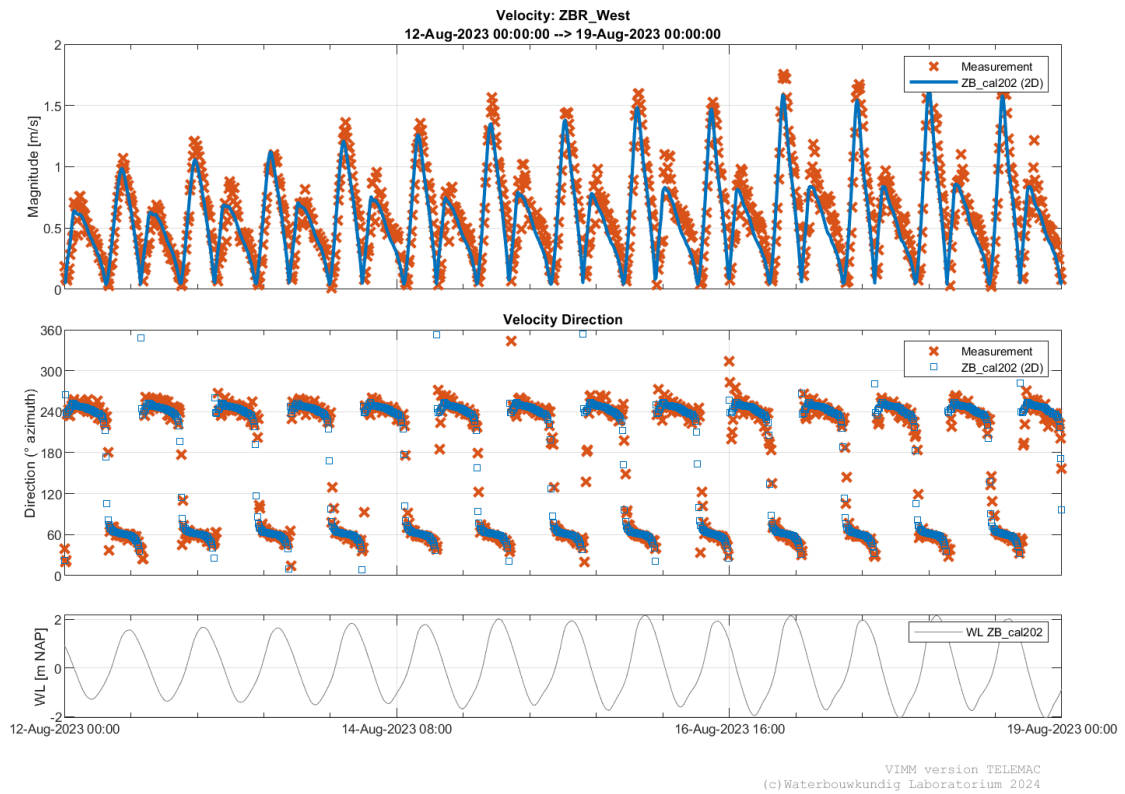
De onderschatting van de ebsnelheid is niet enkel lokaal bij de havendammen, maar manifesteert zich langs de volledige meetraaien, uitgezonderd een zone van ongeveer 500 m nabij de havendammen. Uit het originele kalibratierapport van het model (IMDC, 2015) blijkt bovendien dat de ebstroming ook wordt onderschat op enkele meetpunten die verder uit de kust liggen. Voor het verbeteren van de weergave van de ebstroming langs de Belgische kust kan daarom niet worden volstaan met lokale aanpassingen aan bodemruwheid of aanpassingen van de turbulentieschema's en lijkt een grootschalige herkalibratie van het Telemac-3D model noodzakelijk.

Tabel 5 – BIAS en RMSE van kalibratieruns voor snelheidsmetingen op vaste meetpunten ZBRdam_oost en ZBRdam_west.

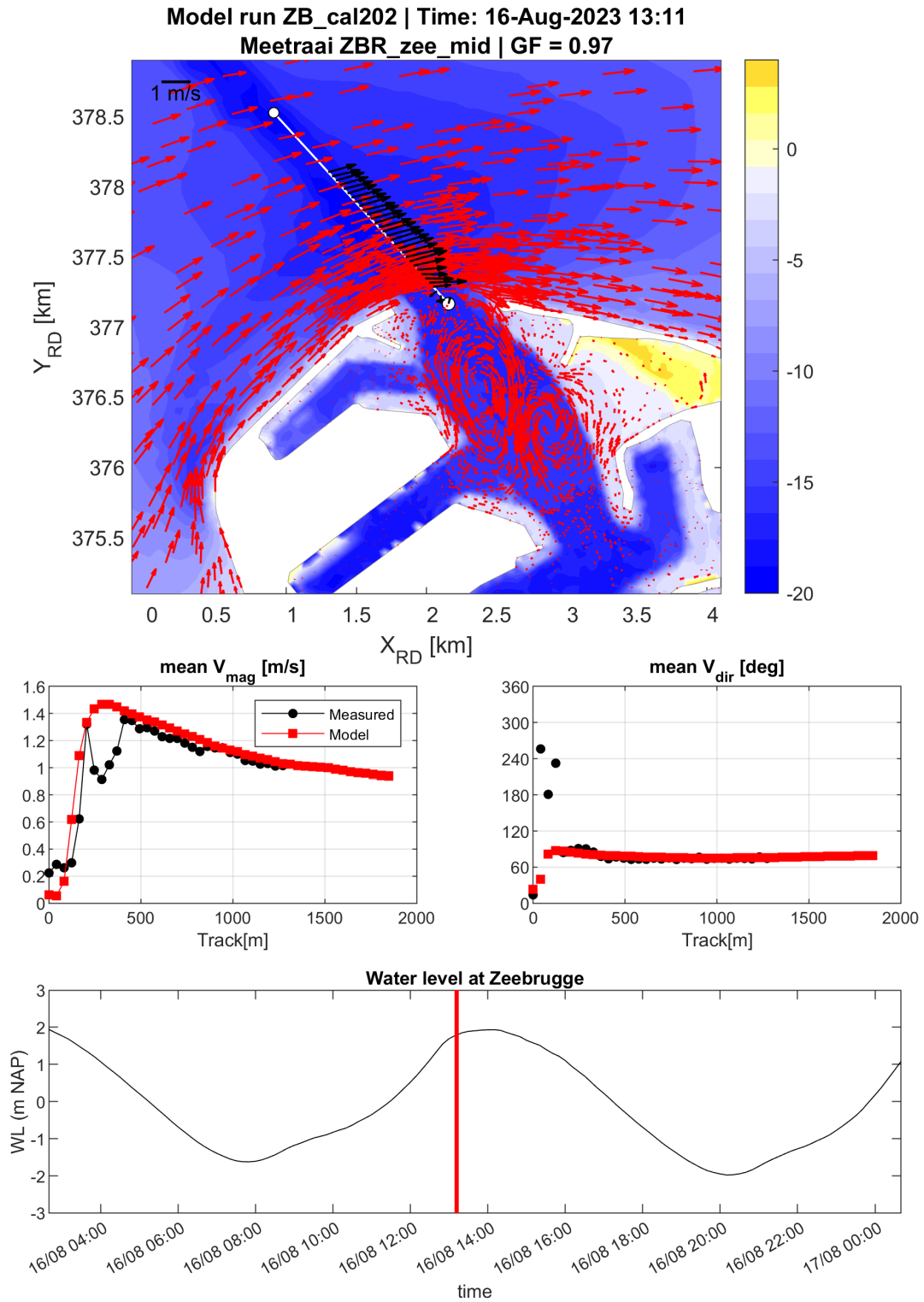
Run	ZBRdam_oost				ZBRdam_west			
	BIAS [m/s]	RMSE [m/s]	BIAS [°]	RMSE [°]	BIAS [m/s]	RMSE [m/s]	BIAS [°]	RMSE [°]
ZB_cal001	-0.04	0.14	0	26	-0.05	0.16	-7	33
ZB_cal011	-0.04	0.14	0	26	-0.05	0.16	-7	33
ZB_cal012	-0.04	0.14	0	26	-0.05	0.16	-7	33
ZB_cal013	-0.04	0.14	0	26	-0.05	0.16	-7	33
ZB_cal021	-0.04	0.14	0	26	-0.05	0.16	-7	34
ZB_cal022	-0.03	0.14	0	27	-0.04	0.15	-5	29
ZB_cal101	-0.04	0.14	0	26	-0.05	0.16	-7	33
ZB_cal102	-0.04	0.14	0	26	-0.05	0.16	-6	31
ZB_cal103	-0.05	0.14	2	26	-0.05	0.15	-5	27
ZB_cal104	-0.09	0.17	8	31	-0.09	0.15	-1	20
ZB_cal105	-0.17	0.29	21	46	-0.19	0.26	3	35
ZB_cal106	-0.04	0.14	3	25	-0.05	0.14	-5	26
ZB_cal107	-0.04	0.15	0	27	-0.05	0.16	-7	33
ZB_cal108	-0.03	0.14	0	26	-0.05	0.16	-7	33
ZB_cal109	-0.04	0.15	0	27	-0.05	0.16	-7	34
ZB_cal110	-0.03	0.30	11	47	-0.03	0.28	11	42
ZB_cal111	-0.03	0.30	11	46	-0.03	0.27	10	41
ZB_cal201	-0.01	0.13	1	27	-0.01	0.14	-5	28
ZB_cal202	-0.01	0.13	1	26	-0.01	0.13	-5	27
ZB_cal203	-0.04	0.14	0	27	-0.05	0.16	-7	33
ZB_cal204	-0.03	0.14	0	26	-0.05	0.16	-7	33
ZB_cal211	-0.02	0.14	0	29	-0.02	0.13	-6	29
ZB_cal212	-0.02	0.13	2	26	-0.02	0.13	-4	24
ZB_cal213	-0.02	0.13	3	26	-0.02	0.12	-4	23



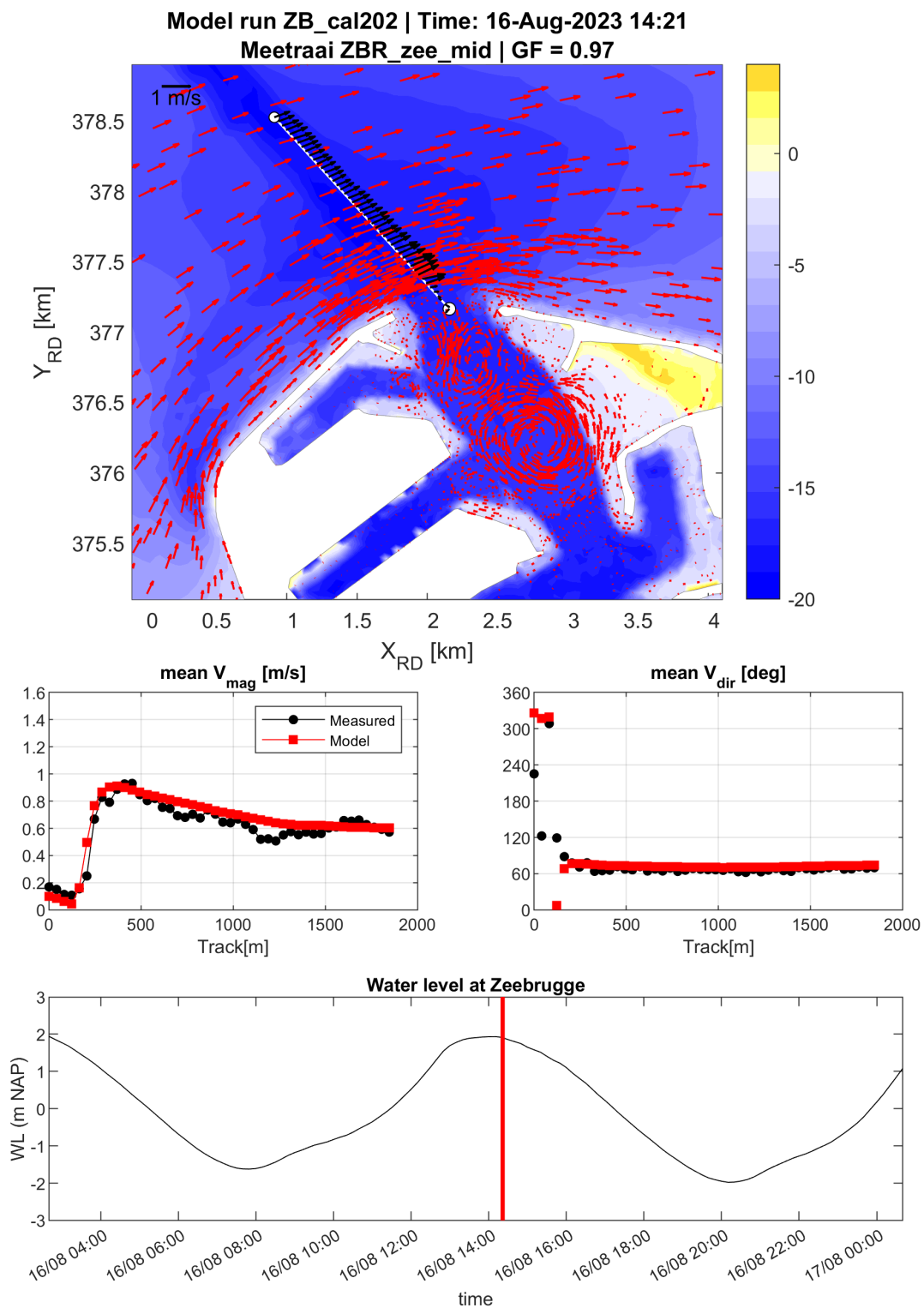
Figuur 11 – Geobserveerde en met simulatie ZBR_cal202 gemodelleerde stroming op meetpunt ZBRdam_oost.



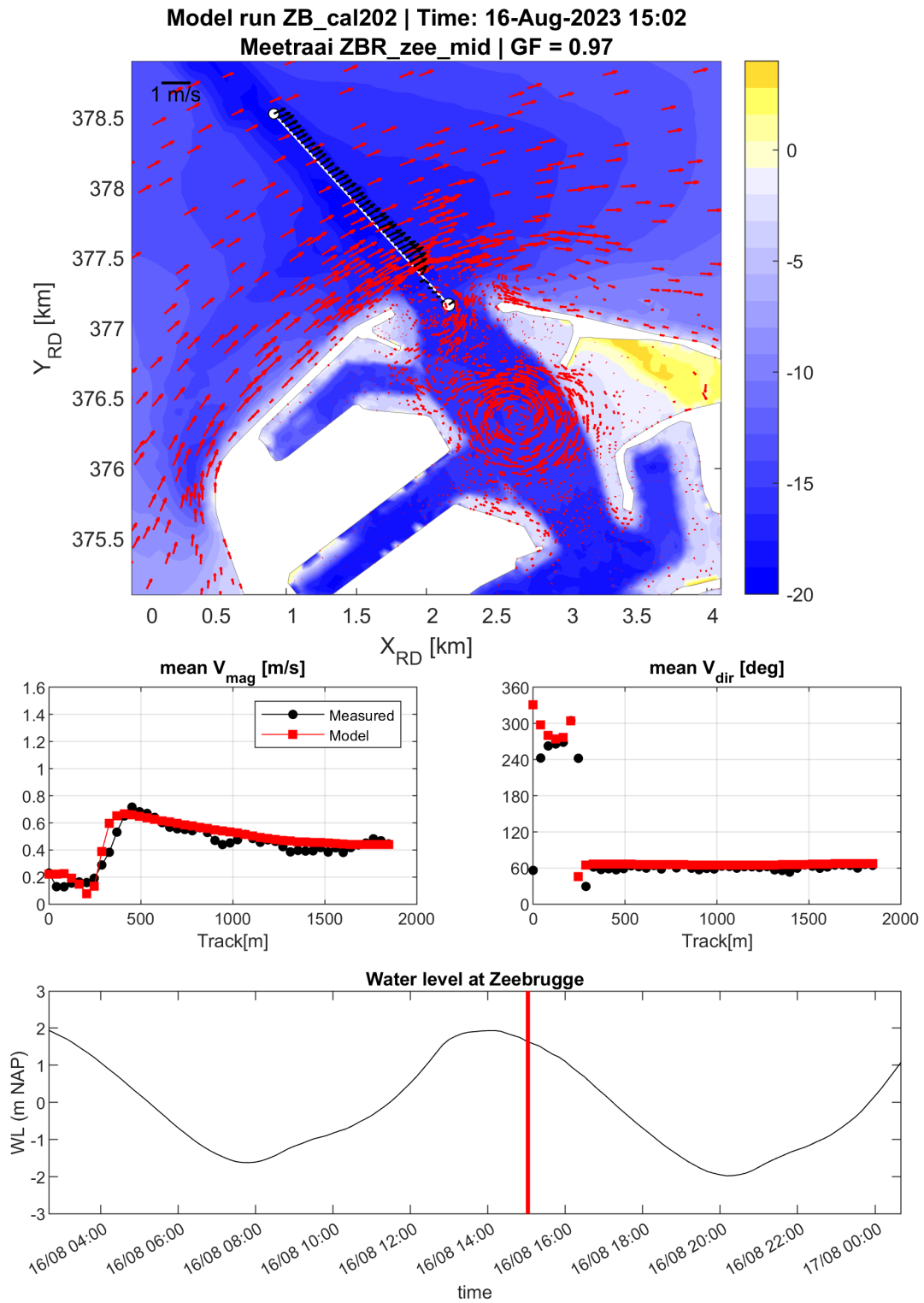
Figuur 12 – Geobserveerde en met simulatie ZBR_cal202 gemodelleerde stroming op meetpunt ZBRdam_west.



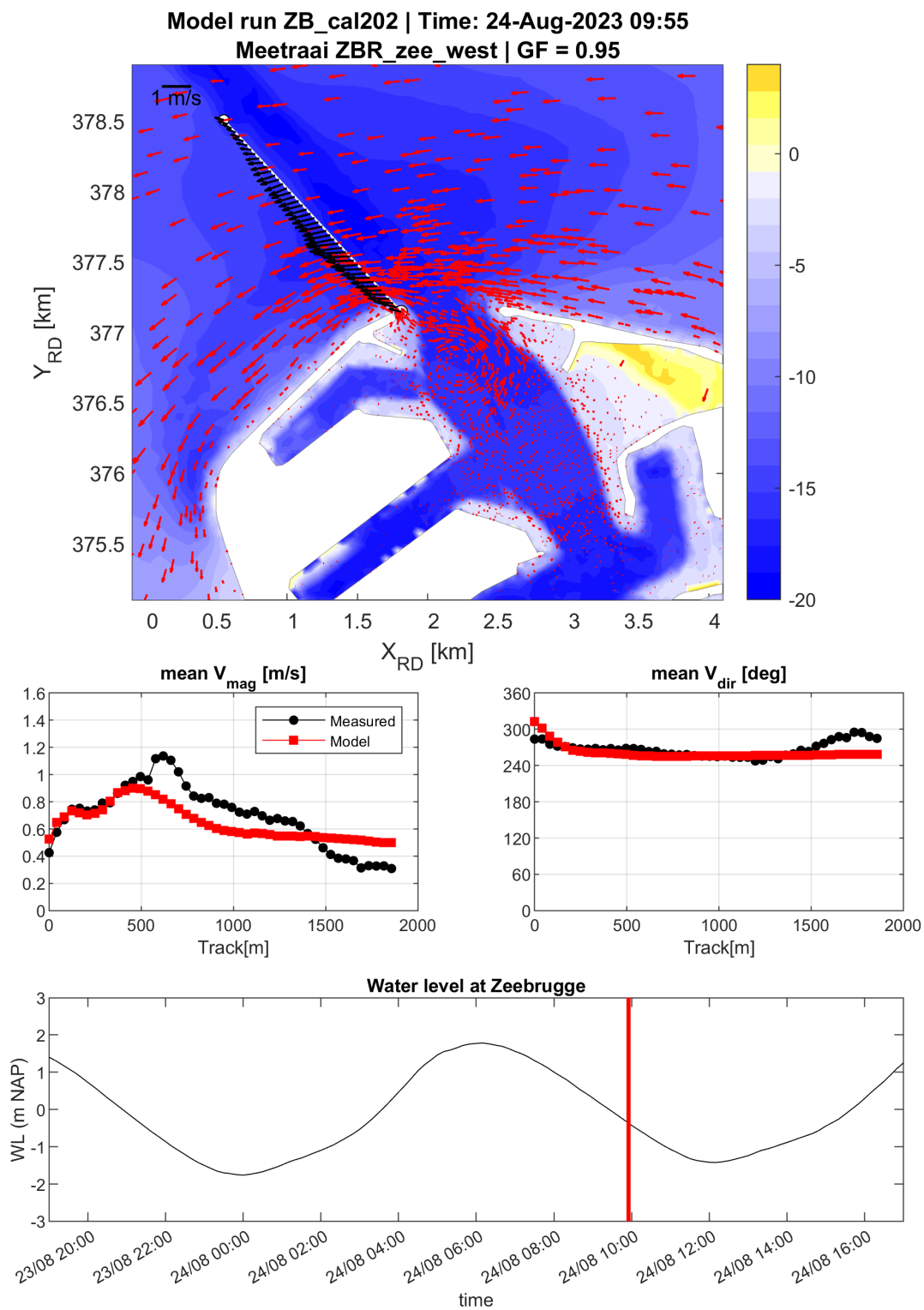
Figuur 13 – Gemodelleerd stroombeeld met run ZB_cal202 en geobserveerde vloedstroming langs meetraai ZBR_zee_mid omstreeks 0u30 voor HW op 16 augustus 2023.



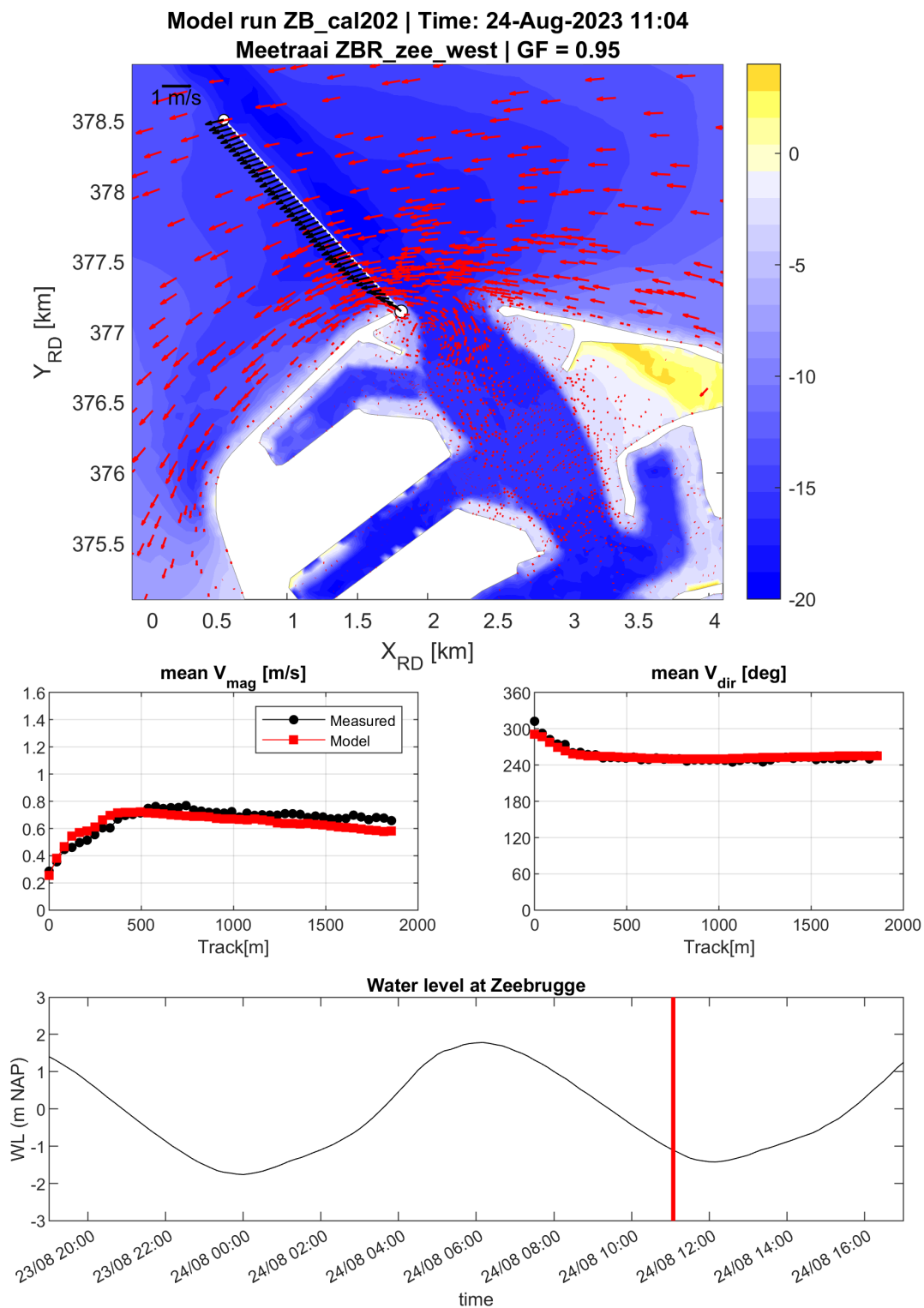
Figuur 14 – Gemodelleerd stroombeeld met run ZB_cal202 en geobserveerde vloedstroming langs meetraai ZBR_zee_mid 0u30 na HW op 16 augustus 2023.



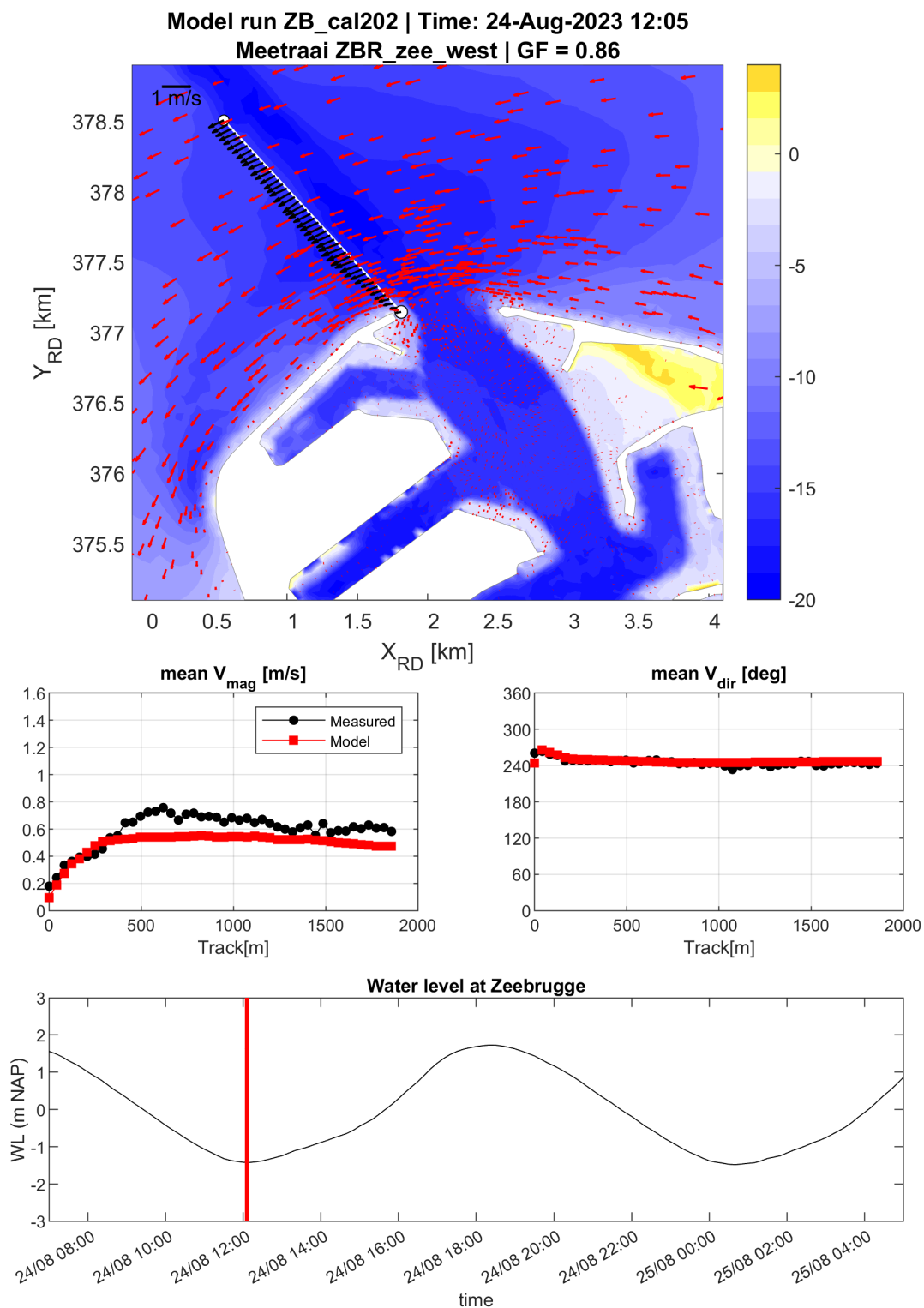
Figuur 15 – Gemodelleerd stroombeeld met run ZB_cal202 en geobserveerde vloedstroming langs meetraai ZBR_zee_mid omstreeks 1u30 na HW op 16 augustus 2023.



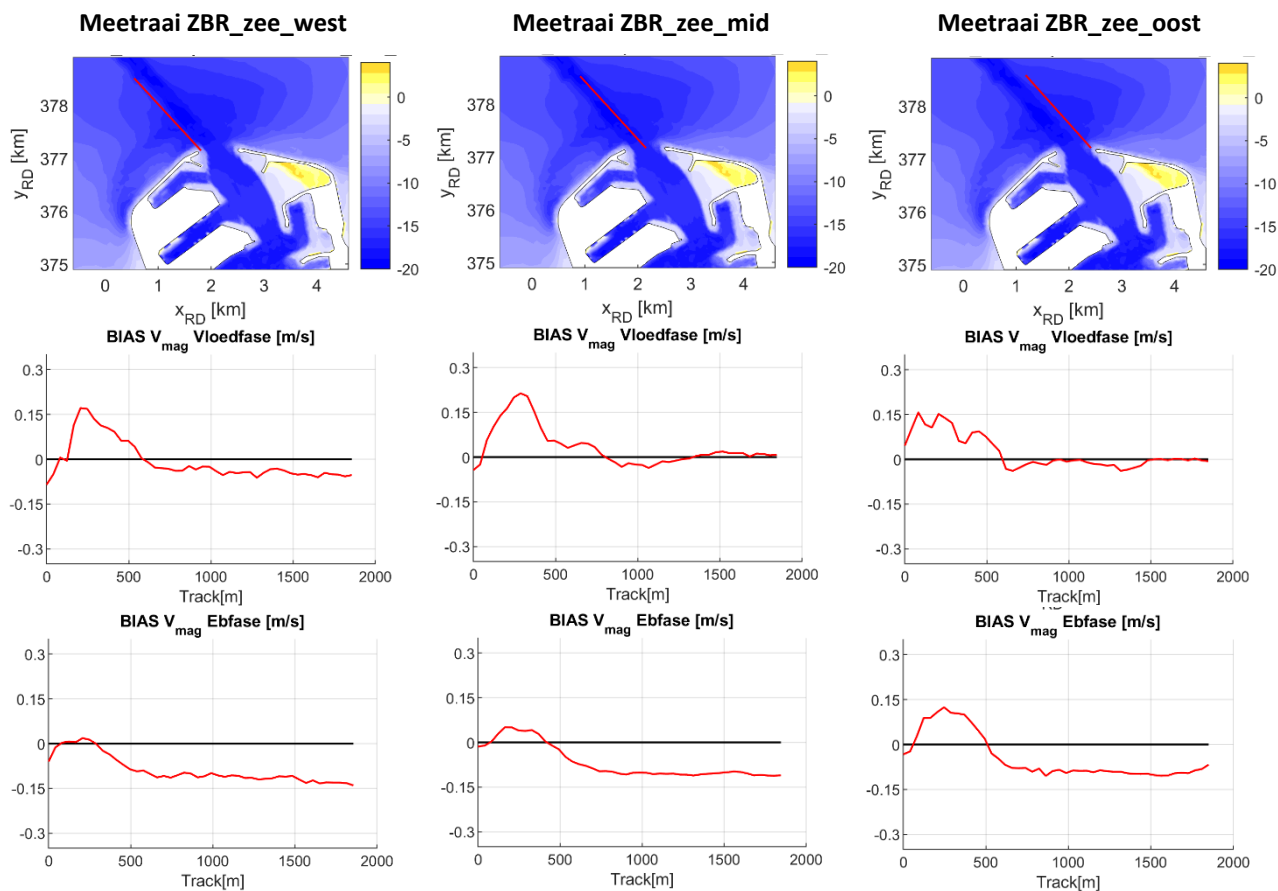
Figuur 16 – Gemodelleerd stroombeeld met run ZB_cal202 en geobserveerde ebstroming langs meetraai ZBR_zee_west omstreeks 2u00 voor LW op 24 augustus 2023.



Figuur 17 – Gemodelleerd stroombeeld met run ZB_cal202 en geobserveerde ebstroming langs meetraai ZBR_zee_west omstreeks 1u00 voor LW op 24 augustus 2023.



Figuur 18 – Gemodelleerd stroombeeld met run ZB_cal202 en geobserveerde ebstroming langs meetraai ZBR_zee_west bij LW op 24 augustus 2023.



Figuur 19 – BIAS voor eb- en vloedstroming afzonderlijk langs de drie meetraaien buiten de havendammen voor run ZB_cal202.

Tabel 6 – BIAS en RMSE van kalibratieruns voor geprojecteerde snelheidsmetingen langs meetraai ZBR_zeewest.

Run	Gehele tijdserie				Vloedfase				Ebfase			
	BIAS [m/s]	RMSE [m/s]	BIAS [°]	RMSE [°]	BIAS [m/s]	RMSE [m/s]	BIAS [°]	RMSE [°]	BIAS [m/s]	RMSE [m/s]	BIAS [°]	RMSE [°]
ZB_cal001	-0.06	0.14	-6	22	0.00	0.15	-2	14	-0.08	0.13	-8	25
ZB_cal011	-0.06	0.14	-6	22	0.00	0.15	-2	13	-0.08	0.13	-8	25
ZB_cal012	-0.06	0.14	-6	22	0.00	0.15	-2	15	-0.08	0.13	-8	25
ZB_cal013	-0.06	0.14	-6	22	0.00	0.15	-2	14	-0.08	0.13	-8	25
ZB_cal021	-0.06	0.14	-6	22	-0.01	0.15	-2	14	-0.09	0.13	-8	26
ZB_cal022	-0.05	0.13	-6	22	0.01	0.14	-2	14	-0.08	0.13	-8	26
ZB_cal101	-0.06	0.14	-6	22	0.00	0.15	-2	13	-0.08	0.13	-8	25
ZB_cal102	-0.05	0.14	-6	22	0.00	0.14	-2	13	-0.08	0.13	-8	25
ZB_cal103	-0.06	0.13	-5	22	0.00	0.14	-2	14	-0.08	0.13	-7	25
ZB_cal104	-0.07	0.13	-4	23	-0.02	0.13	0	22	-0.09	0.13	-6	23
ZB_cal105	-0.11	0.17	0	24	-0.09	0.19	1	28	-0.12	0.16	0	21
ZB_cal106	-0.06	0.13	-5	21	0.00	0.14	-2	13	-0.08	0.13	-7	24
ZB_cal107	-0.06	0.14	-6	22	0.00	0.15	-2	14	-0.08	0.13	-8	26
ZB_cal108	-0.06	0.14	-6	22	0.00	0.15	-2	13	-0.08	0.13	-8	25
ZB_cal109	-0.06	0.14	-6	22	-0.01	0.15	-3	14	-0.08	0.13	-8	26
ZB_cal110	0.08	0.22	16	36	0.00	0.20	8	29	0.13	0.23	20	39
ZB_cal111	0.08	0.22	16	36	0.00	0.19	8	29	0.13	0.23	20	39
ZB_cal201	-0.05	0.14	-6	22	0.01	0.15	-2	13	-0.08	0.14	-8	26
ZB_cal202	-0.05	0.14	-6	22	0.01	0.15	-2	14	-0.08	0.13	-8	25
ZB_cal203	-0.06	0.14	-6	23	0.00	0.15	-3	13	-0.08	0.13	-8	26
ZB_cal204	-0.06	0.14	-6	22	0.00	0.15	-2	13	-0.08	0.13	-8	25
ZB_cal211	-0.05	0.14	-6	23	0.00	0.14	-2	14	-0.08	0.13	-9	26
ZB_cal212	-0.05	0.14	-6	22	0.01	0.14	-2	14	-0.08	0.13	-8	25
ZB_cal213	-0.05	0.14	-5	22	0.01	0.14	-2	15	-0.08	0.13	-7	25

Tabel 7 – BIAS en RMSE van kalibratieruns voor geprojecteerde snelheidsmetingen langs meetraai ZBR_ze_mid.

Run	Gehele tijdserie				Vloedfase				Ebfase			
	BIAS [m/s]	RMSE [m/s]	BIAS [°]	RMSE [°]	BIAS [m/s]	RMSE [m/s]	BIAS [°]	RMSE [°]	BIAS [m/s]	RMSE [m/s]	BIAS [°]	RMSE [°]
ZB_cal001	-0.04	0.14	-5	26	0.02	0.14	2	24	-0.06	0.14	-7	27
ZB_cal011	-0.04	0.14	-5	26	0.02	0.14	2	23	-0.06	0.14	-7	27
ZB_cal012	-0.04	0.14	-5	26	0.02	0.14	2	24	-0.07	0.13	-7	27
ZB_cal013	-0.04	0.14	-5	26	0.02	0.14	2	24	-0.06	0.14	-7	27
ZB_cal021	-0.04	0.14	-5	26	0.02	0.14	2	23	-0.06	0.14	-7	27
ZB_cal022	-0.04	0.14	-4	27	0.02	0.15	2	27	-0.06	0.14	-7	28
ZB_cal101	-0.04	0.14	-5	26	0.02	0.14	2	24	-0.06	0.14	-7	27
ZB_cal102	-0.04	0.14	-5	27	0.02	0.14	1	25	-0.06	0.13	-7	28
ZB_cal103	-0.04	0.13	-5	29	0.02	0.14	0	30	-0.07	0.13	-6	29
ZB_cal104	-0.05	0.13	-4	31	0.01	0.14	0	34	-0.07	0.13	-5	30
ZB_cal105	-0.08	0.15	0	31	-0.04	0.17	1	35	-0.10	0.14	0	29
ZB_cal106	-0.04	0.13	-4	29	0.02	0.14	1	31	-0.07	0.13	-6	28
ZB_cal107	-0.04	0.14	-5	27	0.02	0.14	1	24	-0.06	0.14	-7	28
ZB_cal108	-0.04	0.14	-5	26	0.02	0.14	2	23	-0.06	0.14	-7	27
ZB_cal109	-0.04	0.14	-5	28	0.02	0.14	1	26	-0.06	0.13	-8	29
ZB_cal110	0.08	0.20	11	34	0.02	0.22	1	35	0.10	0.19	15	34
ZB_cal111	0.08	0.20	10	34	0.03	0.22	0	35	0.10	0.19	14	34
ZB_cal201	-0.03	0.15	-5	27	0.03	0.16	3	26	-0.06	0.14	-8	28
ZB_cal202	-0.04	0.15	-5	27	0.03	0.16	3	25	-0.06	0.14	-8	27
ZB_cal203	-0.04	0.14	-5	27	0.02	0.14	2	24	-0.06	0.14	-7	28
ZB_cal204	-0.04	0.14	-5	26	0.02	0.14	2	23	-0.06	0.13	-7	27
ZB_cal211	-0.04	0.14	-5	29	0.03	0.15	1	31	-0.06	0.14	-8	29
ZB_cal212	-0.04	0.14	-5	28	0.03	0.16	0	27	-0.06	0.14	-7	28
ZB_cal213	-0.04	0.14	-5	28	0.03	0.16	0	28	-0.06	0.14	-7	28

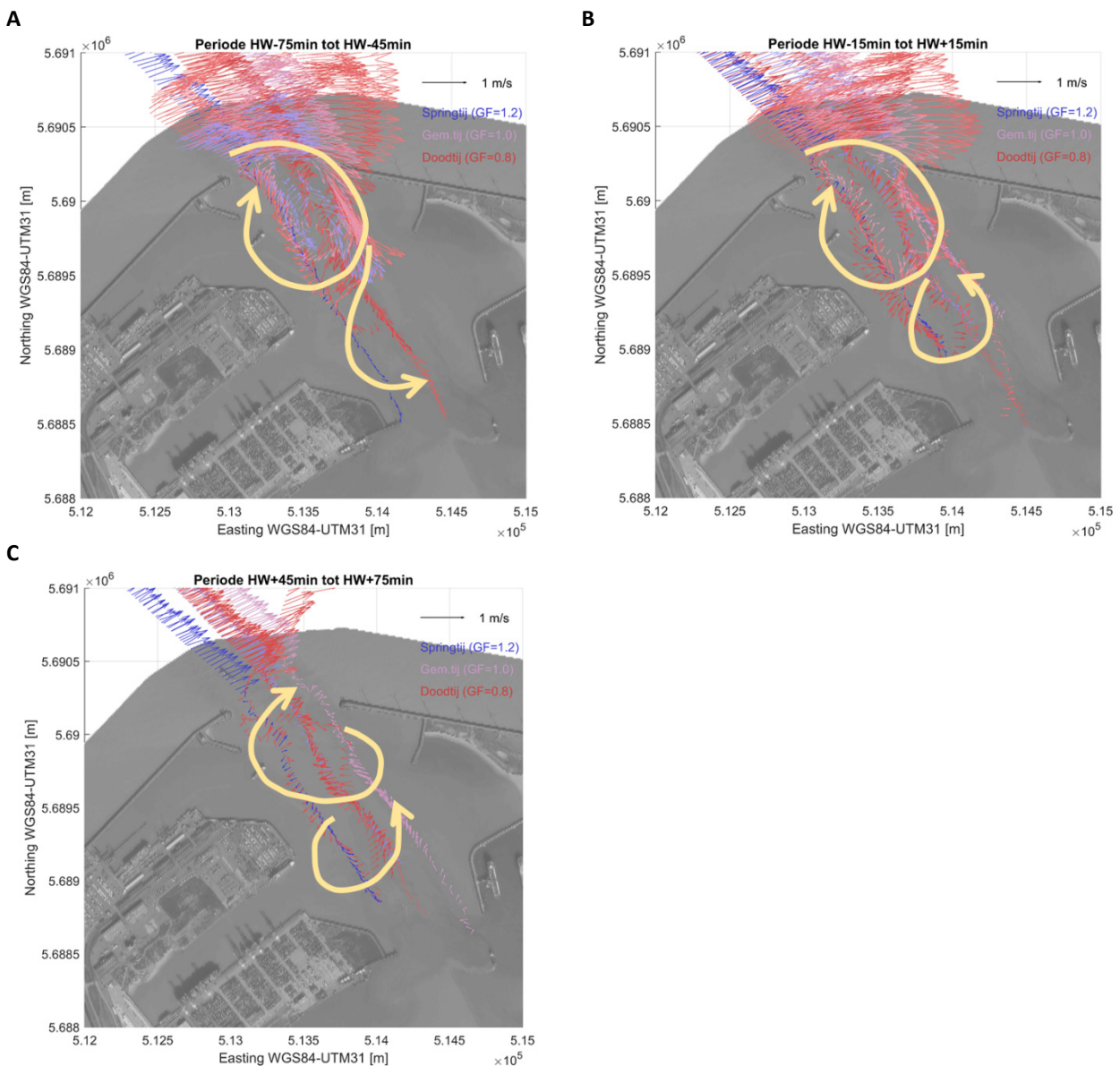
Tabel 8 – BIAS en RMSE van kalibratieruns voor geprojecteerde snelheidsmetingen langs meetraai ZBR_zee_oost.

Run	Gehele tijdserie				Vloedfase				Ebfase			
	BIAS [m/s]	RMSE [m/s]	BIAS [°]	RMSE [°]	BIAS [m/s]	RMSE [m/s]	BIAS [°]	RMSE [°]	BIAS [m/s]	RMSE [m/s]	BIAS [°]	RMSE [°]
ZB_cal001	-0.02	0.15	-1	29	0.01	0.12	3	29	-0.04	0.16	-3	29
ZB_cal011	-0.02	0.15	-1	29	0.01	0.12	3	28	-0.04	0.16	-3	29
ZB_cal012	-0.02	0.15	-1	29	0.01	0.12	3	28	-0.04	0.16	-3	29
ZB_cal013	-0.02	0.15	-1	29	0.01	0.12	3	29	-0.04	0.16	-3	29
ZB_cal021	-0.03	0.15	-1	28	0.00	0.12	3	27	-0.04	0.16	-3	29
ZB_cal022	-0.02	0.15	0	30	0.01	0.13	3	31	-0.04	0.16	-2	30
ZB_cal101	-0.02	0.15	-1	29	0.01	0.12	3	29	-0.04	0.16	-3	29
ZB_cal102	-0.02	0.15	-1	29	0.01	0.13	3	27	-0.04	0.16	-3	29
ZB_cal103	-0.03	0.14	-1	29	0.00	0.13	0	26	-0.05	0.15	-2	30
ZB_cal104	-0.04	0.15	0	30	-0.01	0.14	-2	29	-0.06	0.15	1	31
ZB_cal105	-0.09	0.19	1	34	-0.06	0.20	-4	32	-0.11	0.19	4	35
ZB_cal106	-0.03	0.15	-1	28	0.01	0.13	0	26	-0.05	0.15	-2	29
ZB_cal107	-0.02	0.15	-1	29	0.01	0.12	3	29	-0.04	0.16	-2	29
ZB_cal108	-0.02	0.15	0	29	0.01	0.12	3	29	-0.04	0.16	-2	29
ZB_cal109	-0.03	0.14	0	28	0.01	0.12	2	25	-0.04	0.16	-2	29
ZB_cal110	-0.02	0.25	20	50	-0.01	0.23	10	53	-0.03	0.26	25	48
ZB_cal111	-0.02	0.25	19	49	0.00	0.23	9	51	-0.03	0.26	24	47
ZB_cal201	-0.02	0.16	0	30	0.02	0.14	4	30	-0.04	0.17	-2	30
ZB_cal202	-0.02	0.16	0	29	0.02	0.15	3	28	-0.04	0.16	-2	30
ZB_cal203	-0.02	0.15	-1	29	0.01	0.12	3	29	-0.04	0.16	-3	29
ZB_cal204	-0.02	0.15	-1	29	0.01	0.12	3	28	-0.04	0.16	-3	29
ZB_cal211	-0.01	0.15	0	30	0.02	0.13	3	29	-0.03	0.16	-2	31
ZB_cal212	-0.02	0.15	0	29	0.02	0.14	2	27	-0.04	0.16	-2	30
ZB_cal213	-0.02	0.16	-1	29	0.02	0.15	0	27	-0.04	0.16	-2	30

3.4 Neerpatroon in de voorhaven

3.4.1 Geobserveerd stroompatroon

Uit de gemeten stroomsnelheden op basis van de gevaren ADCP-raaien kan een neerpatroon in de voorhaven worden afgeleid (Plancke *et al.*, 2024b). De stroming binnen de voorhaven wordt, vooral rond het moment van maximum vloed (HW-60' – HW) en kort daarna (HW – HW+60'), gekenmerkt door de vorming van grote neren. De vloedstroming stroomt de voorhaven in langs de kop van de oostelijke strekdam met snelheden die kunnen oplopen tot ca. 1 m/s. Deze instroom vormt de drijvende kracht achter de vorming van een grote neer (diameter ca. 600 m - Figuur 20-A) die met de klok mee roteert in het noordelijke deel van de voorhaven. Deze primaire neer vormt op haar beurt de drijvende kracht voor de vorming van een secundaire neer, meer zuidelijk in de voorhaven gelegen. Deze tweede neer draait in tegengestelde richting, dus tegen de klok in. Tijdens de periode van maximum vloed (HW-60' – HW) blijft de noordelijke neer redelijk stabiel, terwijl de zuidelijke neer zich intensifieert (Figuur 20-B). Na hoogwater zorgt de uitstroom van water uit de voorhaven ervoor dat beide neren mee opschuiven (Figuur 20-C).



Figuur 20 – Geobserveerd stroombeeld in de voorhaven met vorming van neren rond het moment van hoogwater. De figuren bevatten informatie gemeten in een periode van 15' voor en na het tijdstip A: HW-60' | B: HW | C: HW+60'

3.4.2 Representatie neerpatroon in kalibratieruns

In de huidige kalibratieoefening wordt getracht de representatie van het hierboven beschreven neerpatroon te optimaliseren. Hiervoor wordt voor een aantal kenmerkende momenten in het getij een visuele vergelijking gemaakt tussen het gemodelleerde stroompatroon en de geobserveerde stroomsnelheden in de voorhaven. In dit rapport worden enkel de stroompatronen getoond voor de referentierun en enkele kalibratieruns waarin het neerpatroon in de voorhaven verschillend wordt gesimuleerd. Dit betreft simulaties waarin het advectionschema en/of het horizontale turbulentiemodel werd aangepast: ZB_cal001 (referentierun met Smagorinsky model voor horizontale turbulentie), ZB_cal202 (MURD-PSI schema en Smagorinsky model), ZB_cal211 (MURD-PSI schema en $k-\epsilon$ turbulentiemodel) en ZB_cal212 (MURD-PSI schema en constante horizontale diffusiviteit van $1,0 \text{ m}^2/\text{s}$). In de andere kalibratieruns is de representatie van de neer ofwel quasi-identiek aan één van bovenstaande runs, of was de representatie van de eb- en vloedstroming buiten de havendammen al minder nauwkeurig. Aanvullend wordt in Tabel 9 de foutenstatistiek voor de representatie van de meetraaien in de voorhaven weergegeven. Hierbij wordt opgemerkt dat de stroomsnelheden in de voorhaven over het algemeen klein zijn, zodat daar weinig tot geen absoluut verschil verwacht kan worden. Ook kan worden gekeken naar de representatie van de stroomrichting, die samenhangt met een correcte weergave van het neerpatroon. Desalniettemin is de analyse van de modelprestatie voor wat betreft de weergave van het neerpatroon voornamelijk gebaseerd op de visuele vergelijkingen.

De representatieve stroombeelden zijn tijdens hoogwater en ongeveer één uur na hoogwater bij doortij ($GF = 0,87$, Figuur 21 en Figuur 22), gemiddeld tij ($GF = 0,97$, Figuur 23 en Figuur 24) en een beperkt springtij ($GF=1,06$, Figuur 25 en Figuur 26). Er zijn geen representatieve meetraaien in de voorhaven beschikbaar bij een springtij met een hogere getijfactor om de modelresultaten mee te vergelijken. Er wordt opgemerkt dat de gevaren meetraaien steeds één snede op één moment in de tijd weergeven en dat het op basis hiervan niet mogelijk is de intensiteit van de neer of de maximale stroming in de neer te bepalen. Bovendien verandert de ruimtelijke positie van beide neren sterk over een relatief korte tijdsperiode. Hier dient bij de interpretatie van de gemodelleerde stroompatronen rekening mee te worden gehouden.

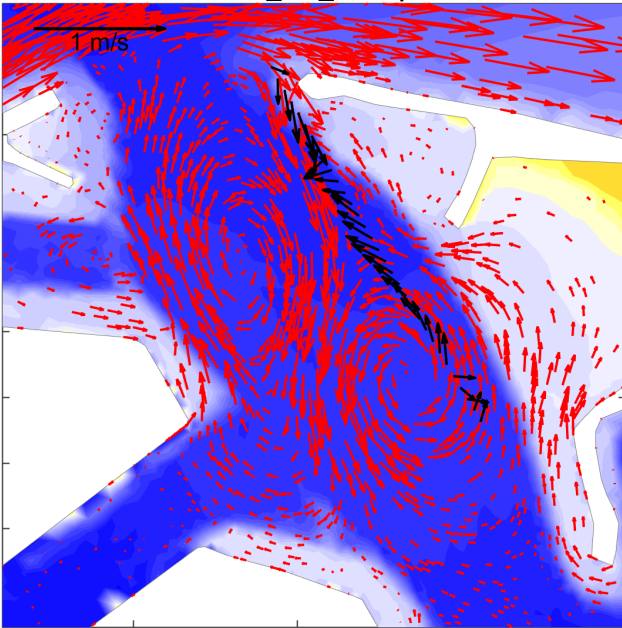
Uit de visuele vergelijking tussen de gemodelleerde en geobserveerde stroming in de voorhaven volgt dat de modelsimulaties in staat zijn om het geobserveerde neerpatroon met primaire neer nabij de havendammen en secundaire neer verder zuidelijk gelegen te simuleren. De intensiteit en ruimtelijke positie van de neren verschilt echter tussen de kalibratieruns.

In het referentiemodel (ZB_cal001) wordt de intensiteit van de stroming in de neer onderschat, met name gedurende de fase na hoogwater. Het toepassen van het MURD-PSI advectionschema in ZB_cal202, ZB_cal211 en ZB_cal212 leidt tot sterkere stromingen en grotere ruimtelijke gradiënten in het neerpatroon. Deze grotere gradiënten komen beter overeen met de geobserveerde stroming in de gevaren ADCP-meetraaien.

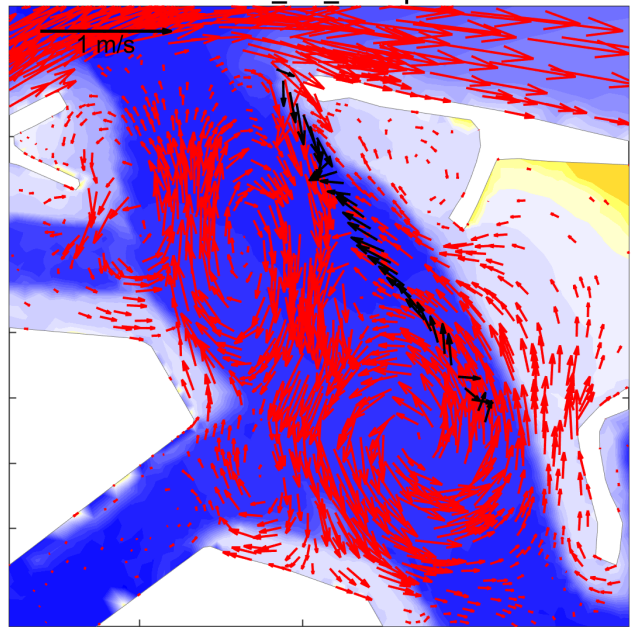
De implementatie van het $k-\epsilon$ turbulentiemodel (ZB_cal211) geeft echter een foutief neerpatroon. De ligging van de neren wijkt in deze kalibratierun dusdanig af dat de primaire neer, die met de klok mee draait, op een meer zuidelijkere positie komt te liggen waar in werkelijkheid de secundaire neer, die tegen de klok in draait, wordt geobserveerd. Hierdoor draait de gemodelleerde neer in omgekeerde richting en is de stroomrichting in de modelsimulatie dus ook omgekeerd gericht ten opzichte van de metingen.

De resultaten van kalibratieruns ZB_cal202 (Smagorinsky turbulentiemodel) en ZB_cal212 (constante diffusiviteit van $1,0 \text{ m}^2/\text{s}$) geven het neerpatroon en de posities van de primaire en secundaire neer wel goed weer. De gesimuleerde stroomsnelheden in de neer zijn in ZB_cal202 iets hoger dan in ZB_cal212. Deze hogere snelheden in ZB_cal202 zorgen voor een iets betere representatie van het stroombeeld in de periode na HW, met name voor de hogere getijden (i.e., Figuur 24 en Figuur 26).

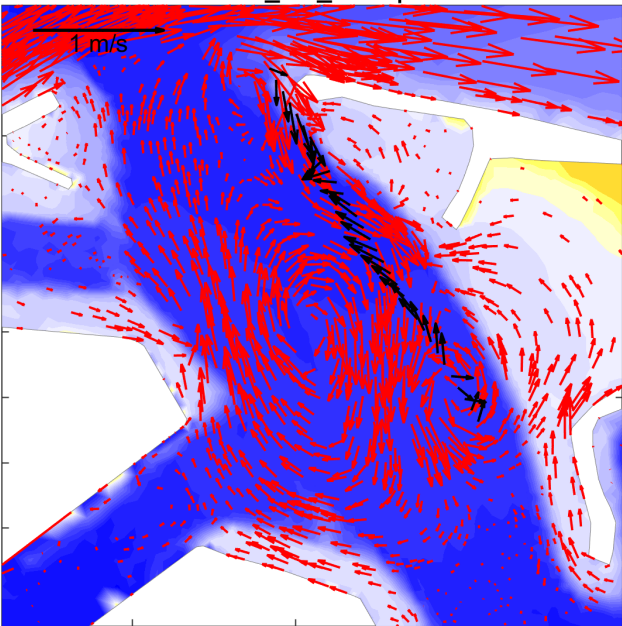
Model run ZB_cal001 | Time: 14-Aug-2023 12:33
Meetraai ZBR_VH_oost | GF = 0.87



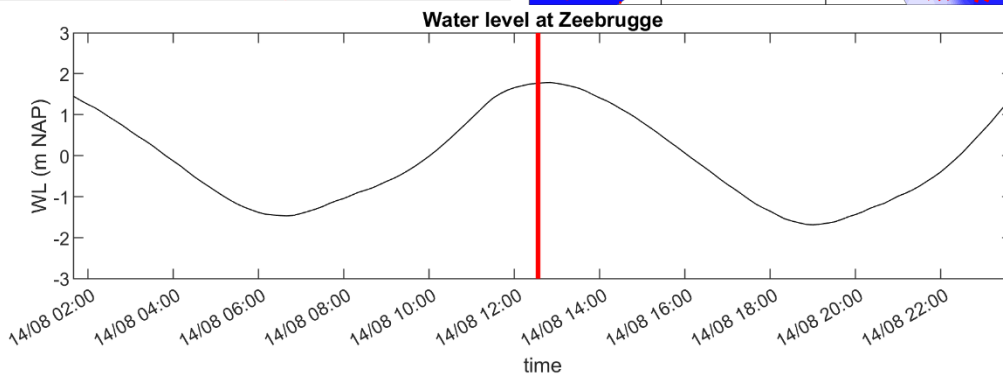
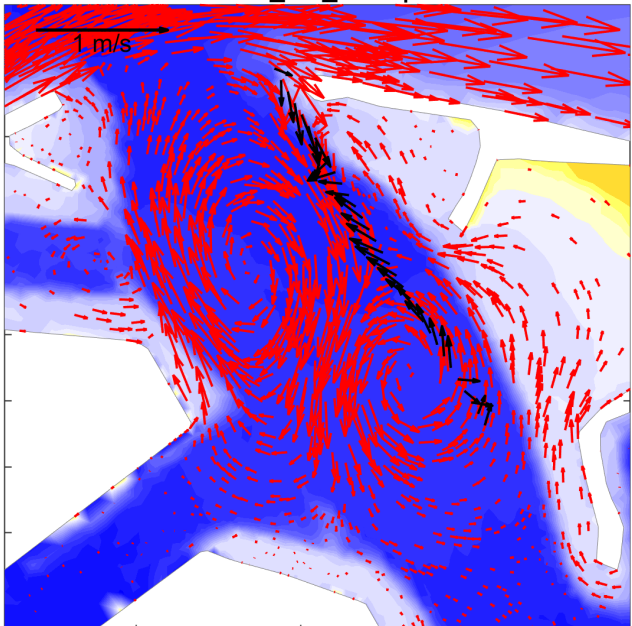
Model run ZB_cal202 | Time: 14-Aug-2023 12:33
Meetraai ZBR_VH_oost | GF = 0.87



Model run ZB_cal211 | Time: 14-Aug-2023 12:33
Meetraai ZBR_VH_oost | GF = 0.87

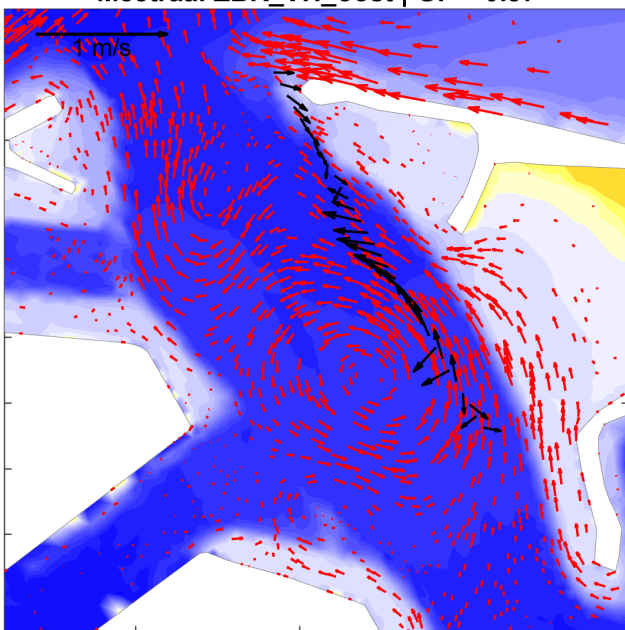


Model run ZB_cal212 | Time: 14-Aug-2023 12:33
Meetraai ZBR_VH_oost | GF = 0.87

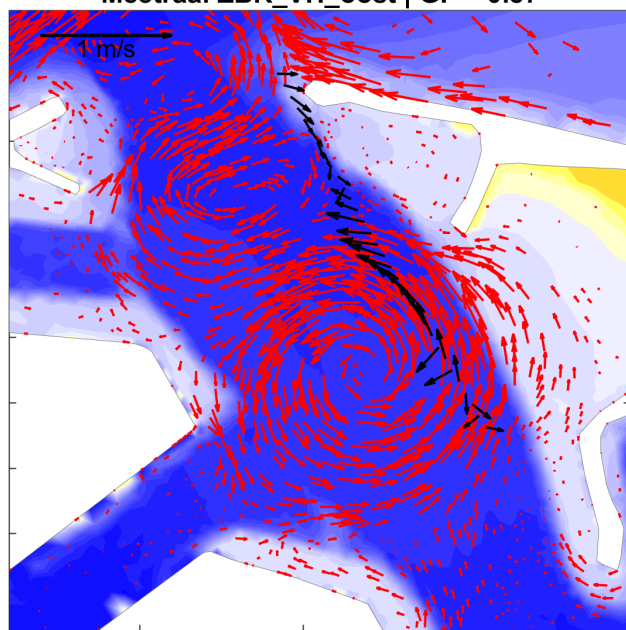


Figuur 21 – Gemodelleerde en geobserveerde stroming tijdens hoogwater op 14 aug 2023 (GF = 0,87) voor runs 001 (ref), 202 (MURD-PSI schema / Smagorinsky model), 211 (MURD-PSI schema / k-ε model) en 212 (MURD-PSI schema / viscositeit = 1 m²/s).

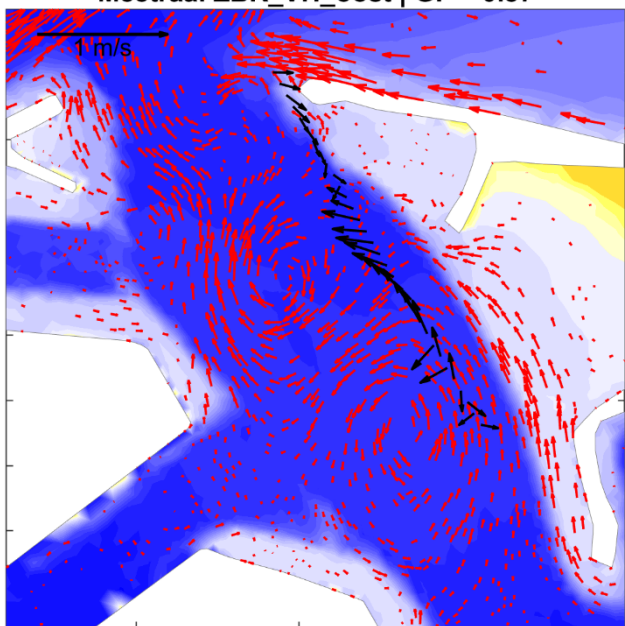
Model run ZB_cal001 | Time: 14-Aug-2023 14:00
Meetraai ZBR_VH_oost | GF = 0.87



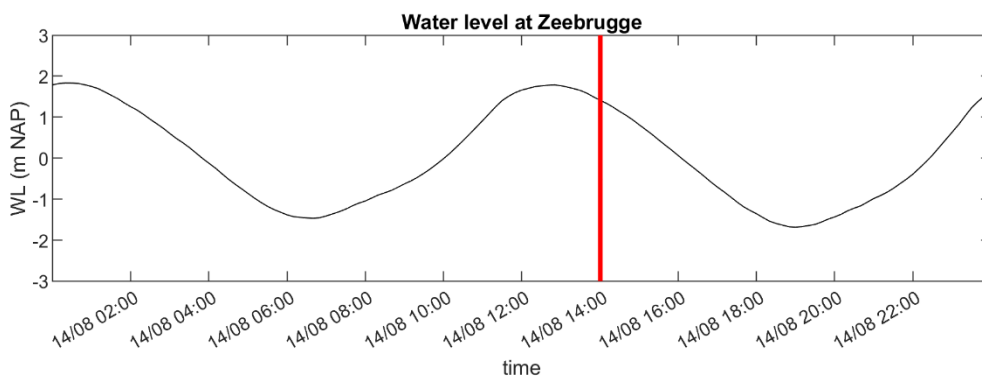
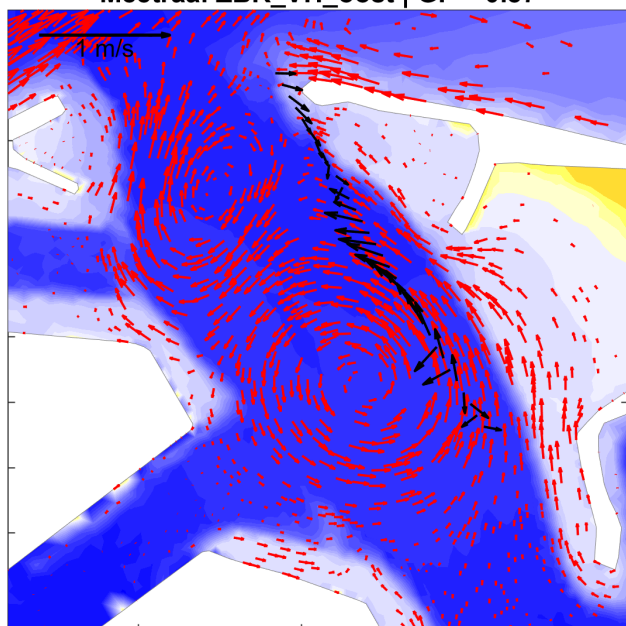
Model run ZB_cal202 | Time: 14-Aug-2023 14:00
Meetraai ZBR_VH_oost | GF = 0.87



Model run ZB_cal211 | Time: 14-Aug-2023 14:00
Meetraai ZBR_VH_oost | GF = 0.87

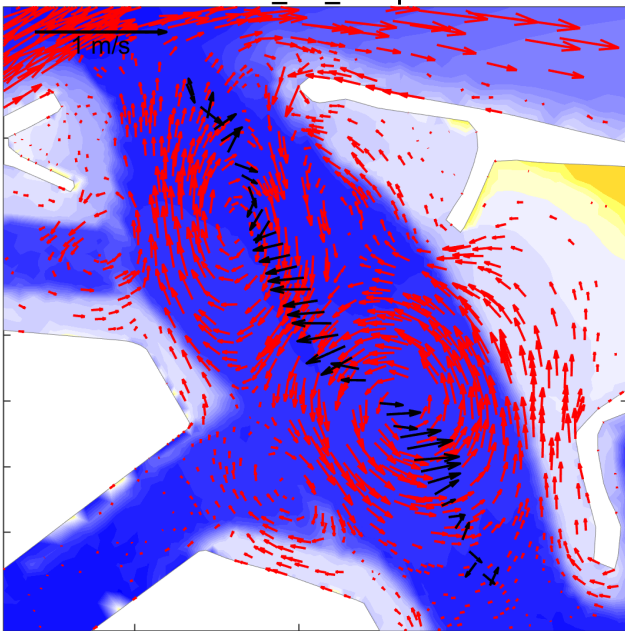


Model run ZB_cal212 | Time: 14-Aug-2023 14:00
Meetraai ZBR_VH_oost | GF = 0.87

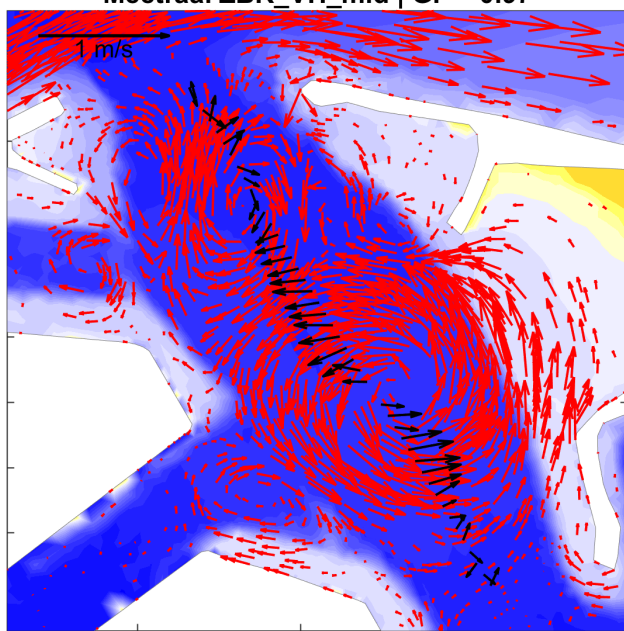


Figuur 22 – Gemodelleerde en geobserveerde stroming 1u00 na hoogwater op 14 aug 2023 (GF = 0,87) voor runs 001 (ref), 202 (MURD-PSI schema / Smagorinsky model), 211 (MURD-PSI schema / k-ε model) en 212 (MURD-PSI schema / viscositeit = 1 m²/s).

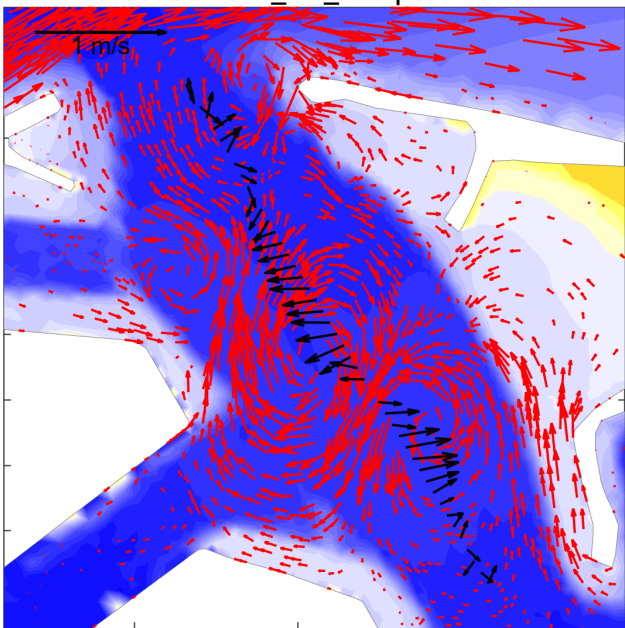
Model run ZB_cal001 | Time: 16-Aug-2023 14:21
Meetraai ZBR_VH_mid | GF = 0.97



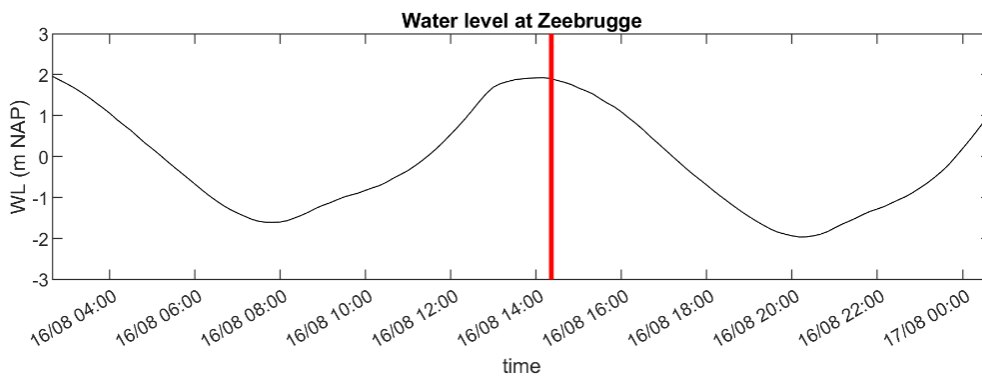
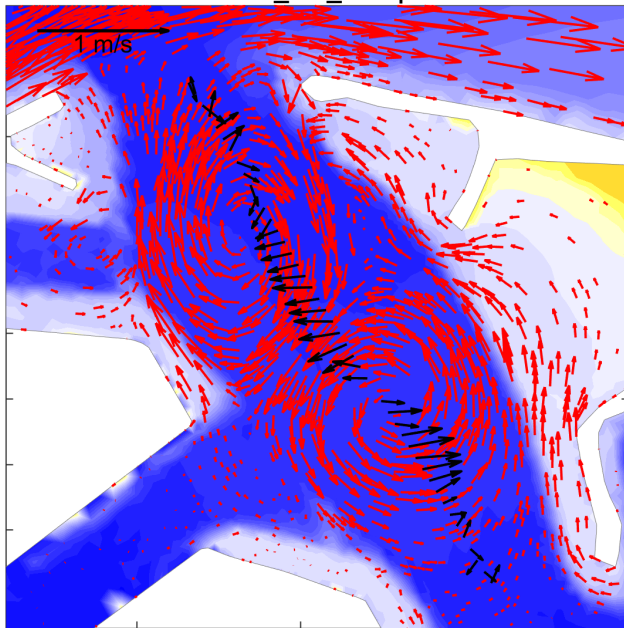
Model run ZB_cal202 | Time: 16-Aug-2023 14:21
Meetraai ZBR_VH_mid | GF = 0.97



Model run ZB_cal211 | Time: 16-Aug-2023 14:21
Meetraai ZBR_VH_mid | GF = 0.97

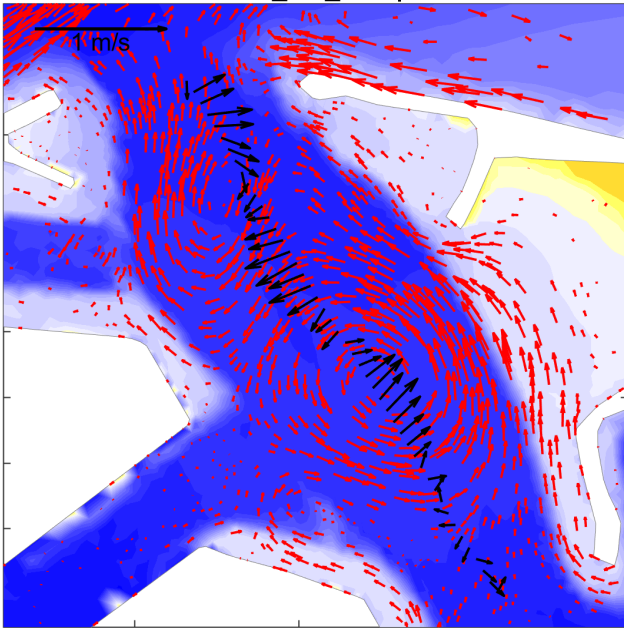


Model run ZB_cal212 | Time: 16-Aug-2023 14:21
Meetraai ZBR_VH_mid | GF = 0.97

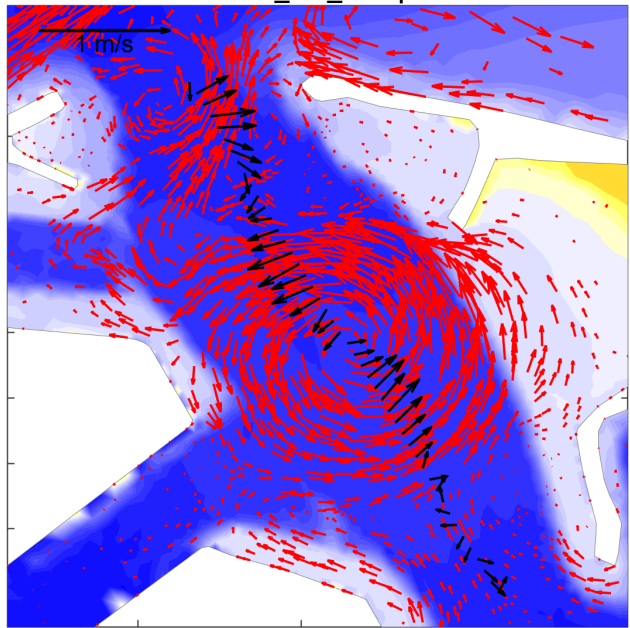


Figuur 23 – Gemodelleerde en geobserveerde stroming 0u30 na hoogwater op 16 aug 2023 (GF = 0,97) voor runs 001 (ref), 202 (MURD-PSI schema / Smagorinsky model), 211 (MURD-PSI schema / k-ε model) en 212 (MURD-PSI schema / viscositeit = 1 m²/s).

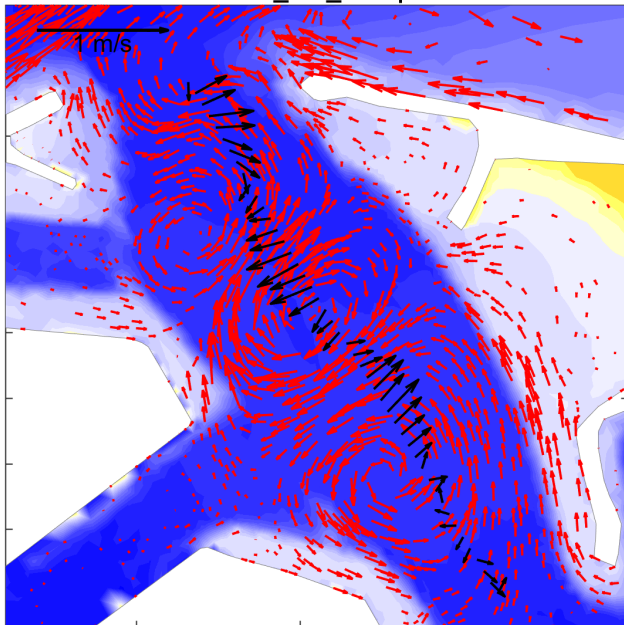
Model run ZB_cal001 | Time: 16-Aug-2023 15:02
Meetraai ZBR_VH_mid | GF = 0.97



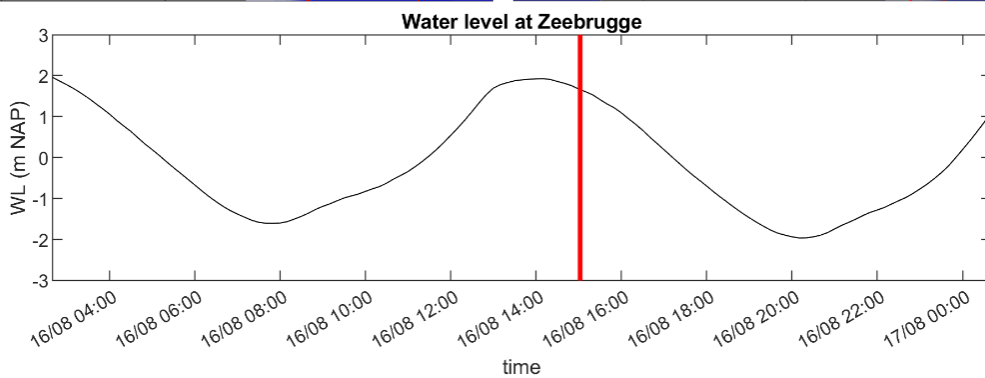
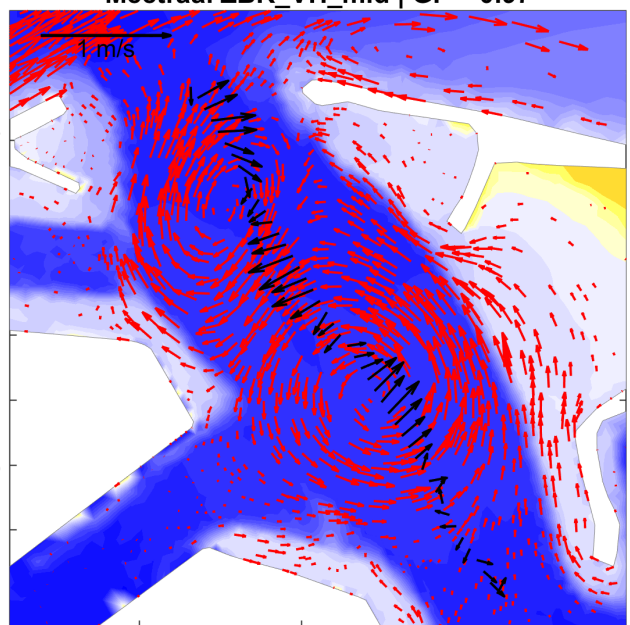
Model run ZB_cal202 | Time: 16-Aug-2023 15:02
Meetraai ZBR_VH_mid | GF = 0.97



Model run ZB_cal211 | Time: 16-Aug-2023 15:02
Meetraai ZBR_VH_mid | GF = 0.97

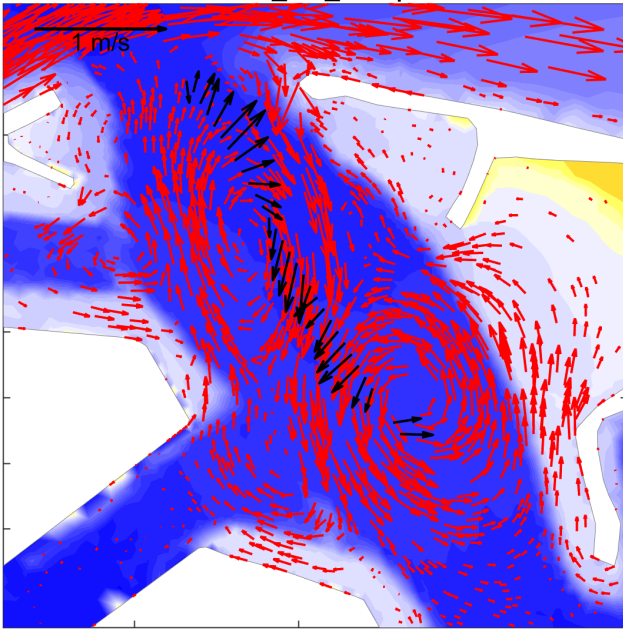


Model run ZB_cal212 | Time: 16-Aug-2023 15:02
Meetraai ZBR_VH_mid | GF = 0.97

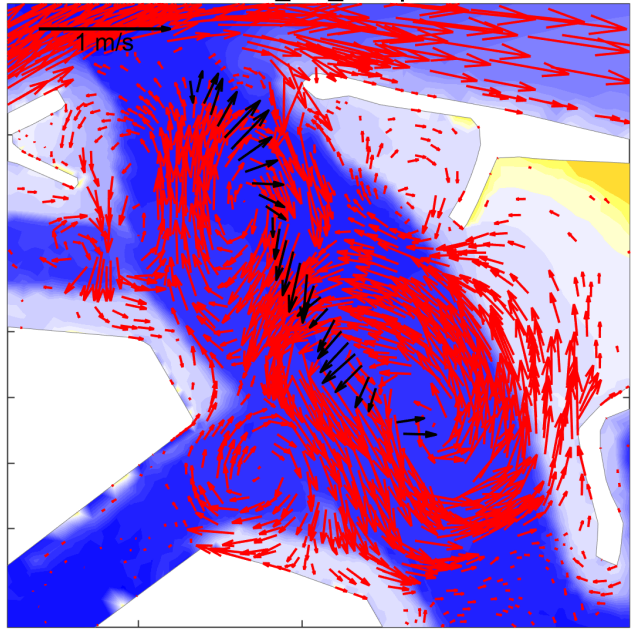


Figuur 24 – Gemodelleerde en geobserveerde stroming 1u30 na hoogwater op 16 aug 2023 (GF = 0,97) voor runs 001 (ref), 202 (MURD-PSI schema / Smagorinsky model), 211 (MURD-PSI schema / k-ε model) en 212 (MURD-PSI schema / viscositeit = 1 m²/s).

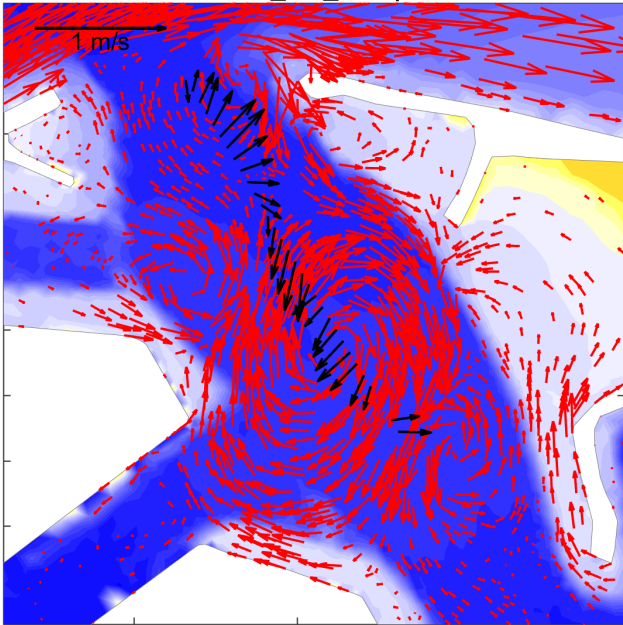
Model run ZB_cal001 | Time: 18-Aug-2023 14:58
Meetraai ZBR_VH_mid | GF = 1.06



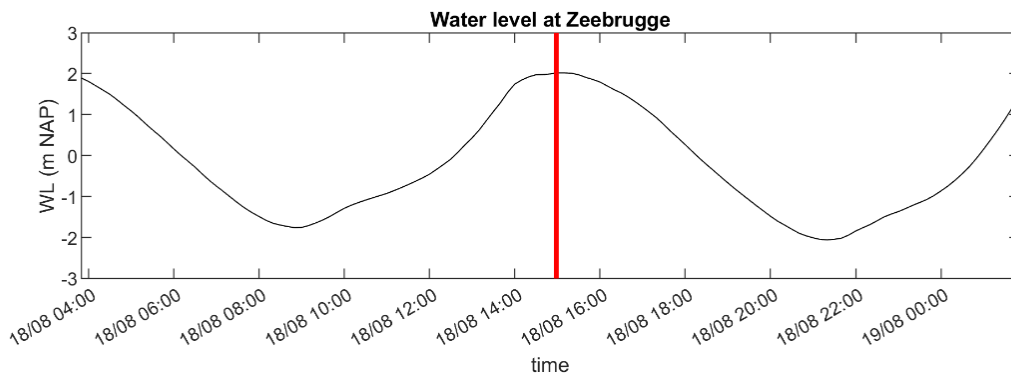
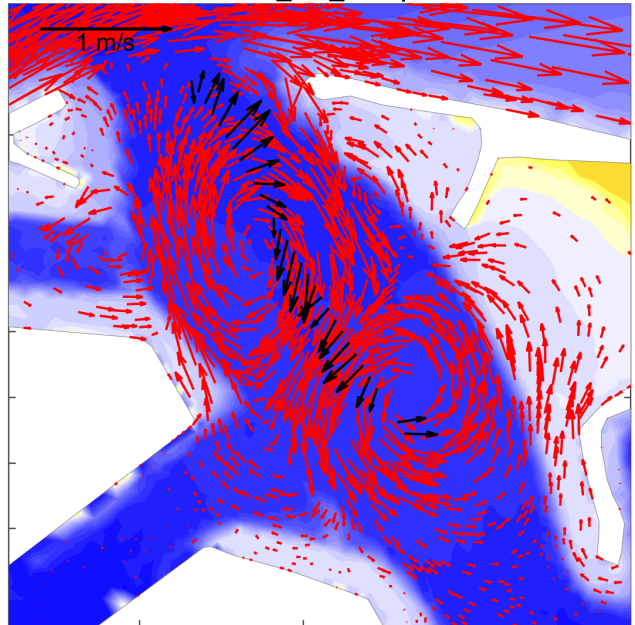
Model run ZB_cal202 | Time: 18-Aug-2023 14:58
Meetraai ZBR_VH_mid | GF = 1.06



Model run ZB_cal211 | Time: 18-Aug-2023 14:58
Meetraai ZBR_VH_mid | GF = 1.06

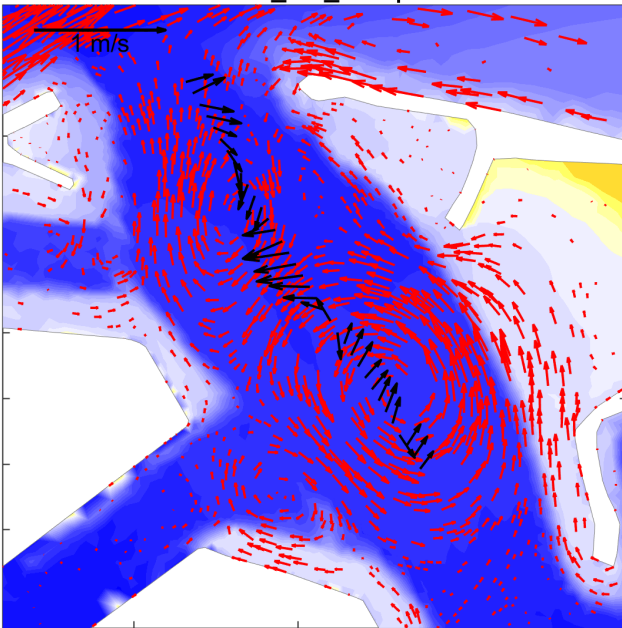


Model run ZB_cal212 | Time: 18-Aug-2023 14:58
Meetraai ZBR_VH_mid | GF = 1.06

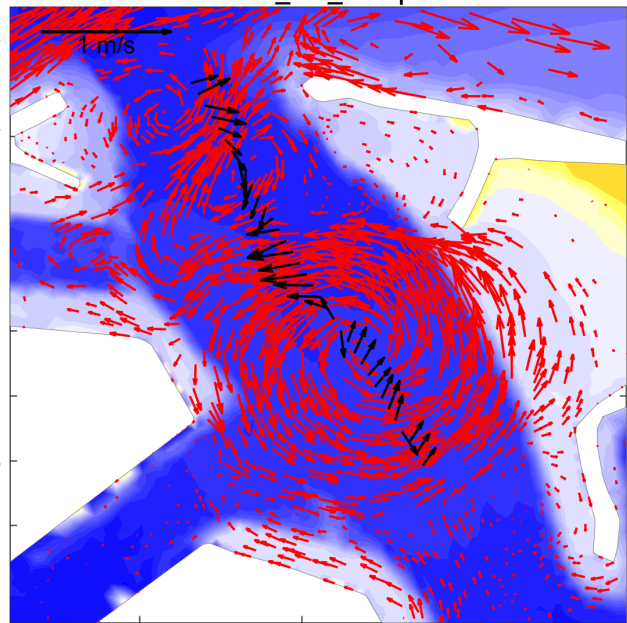


Figuur 25 – Gemodelleerde en geobserveerde stroming tijdens hoogwater op 18 aug 2023 (GF = 1,06) voor runs 001 (ref), 202 (MURD-PSI schema / Smagorinsky model), 211 (MURD-PSI schema / k-ε model) en 212 (MURD-PSI schema / viscositeit = 1 m²/s).

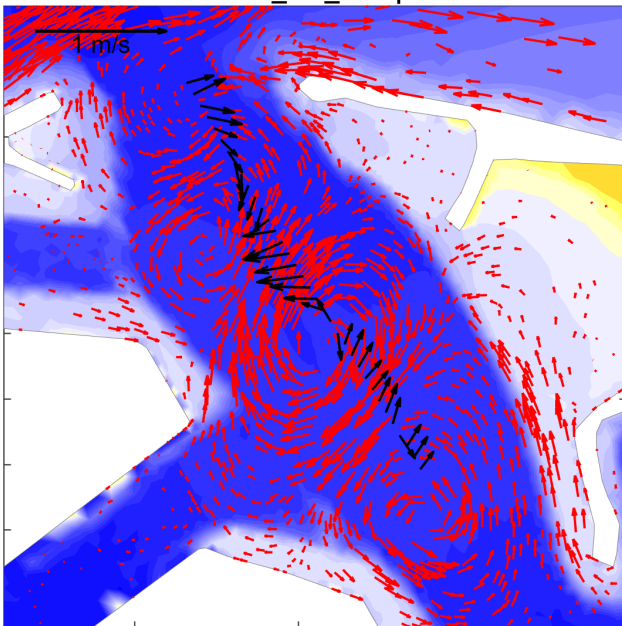
Model run ZB_cal001 | Time: 18-Aug-2023 15:52
Meetraai ZBR_VH_mid | GF = 1.06



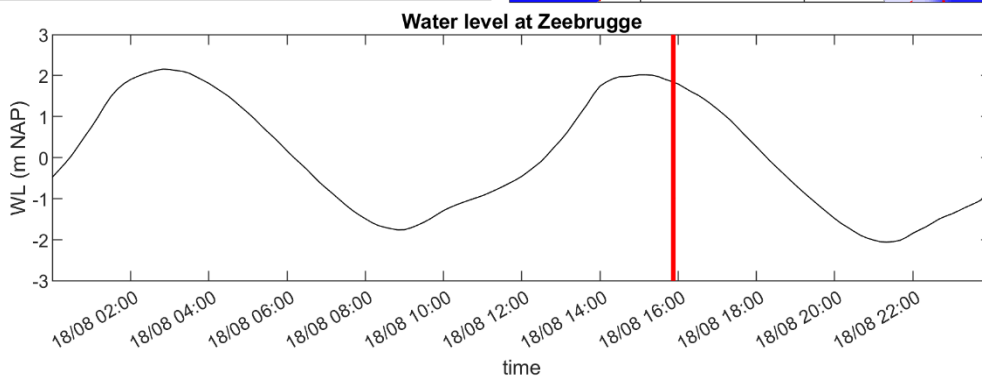
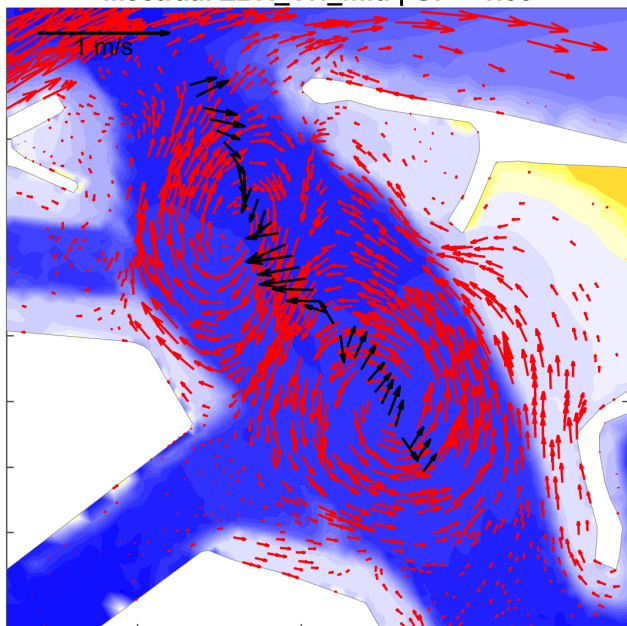
Model run ZB_cal202 | Time: 18-Aug-2023 15:52
Meetraai ZBR_VH_mid | GF = 1.06



Model run ZB_cal211 | Time: 18-Aug-2023 15:52
Meetraai ZBR_VH_mid | GF = 1.06



Model run ZB_cal212 | Time: 18-Aug-2023 15:52
Meetraai ZBR_VH_mid | GF = 1.06



Figuur 26 – Gemodelleerde en geobserveerde stroming één uur na hoogwater op 18 aug 2023 (GF = 1,06) voor runs 001 (ref), 202 (MURD-PSI schema / Smagorinsky model), 211 (MURD-PSI schema / k-ε model) en 212 (MURD-PSI schema / viscositeit = 1 m²/s).

Tabel 9 – BIAS en RMSE van kalibratieruns voor geprojecteerde snelheidsmetingen langs raaien in de voorhaven.

Run	ZBR_VH_west				ZBR_VH_mid				ZBR_VH_oost			
	BIAS [m/s]	RMSE [m/s]	BIAS [°]	RMSE [°]	BIAS [m/s]	RMSE [m/s]	BIAS [°]	RMSE [°]	BIAS [m/s]	RMSE [m/s]	BIAS [°]	RMSE [°]
ZB_cal001	-0.06	0.09	18	35	-0.07	0.11	12	31	-0.07	0.12	8	30
ZB_cal011	-0.05	0.09	16	35	-0.07	0.11	10	34	-0.07	0.12	10	31
ZB_cal012	-0.06	0.09	17	35	-0.07	0.11	10	32	-0.07	0.12	10	31
ZB_cal013	-0.06	0.10	20	36	-0.08	0.11	11	29	-0.07	0.13	6	30
ZB_cal021	-0.06	0.09	16	34	-0.07	0.11	10	30	-0.08	0.13	10	30
ZB_cal022	-0.06	0.10	24	41	-0.07	0.10	23	42	-0.05	0.13	-5	38
ZB_cal101	-0.06	0.09	19	36	-0.07	0.11	11	31	-0.07	0.12	8	31
ZB_cal102	-0.06	0.10	20	36	-0.08	0.11	11	29	-0.07	0.12	5	31
ZB_cal103	-0.07	0.10	18	36	-0.08	0.11	7	24	-0.07	0.12	-4	30
ZB_cal104	-0.08	0.10	24	36	-0.10	0.12	10	24	-0.10	0.15	-19	26
ZB_cal105	-0.10	0.11	12	32	-0.10	0.13	6	22	-0.14	0.21	-13	18
ZB_cal106	-0.06	0.09	11	33	-0.07	0.10	7	26	-0.07	0.11	7	29
ZB_cal107	-0.06	0.10	19	36	-0.08	0.11	14	33	-0.07	0.13	2	31
ZB_cal108	-0.06	0.09	18	36	-0.07	0.11	11	31	-0.07	0.13	10	31
ZB_cal109	-0.07	0.10	19	35	-0.08	0.11	13	29	-0.08	0.13	0	31
ZB_cal110	-0.05	0.10	16	46	-0.09	0.13	17	36	0.05	0.27	8	62
ZB_cal111	-0.05	0.10	16	46	-0.09	0.12	24	38	0.05	0.26	7	63
ZB_cal201	-0.02	0.10	19	47	-0.03	0.11	17	47	-0.03	0.13	10	41
ZB_cal202	-0.02	0.10	21	46	-0.03	0.11	17	49	-0.03	0.13	6	41
ZB_cal203	-0.06	0.10	18	36	-0.07	0.11	13	33	-0.07	0.13	8	31
ZB_cal204	-0.06	0.09	18	35	-0.07	0.11	11	31	-0.07	0.12	9	30
ZB_cal211	-0.06	0.09	29	44	-0.08	0.11	22	40	-0.03	0.14	-2	47
ZB_cal212	-0.05	0.09	20	38	-0.07	0.10	8	35	-0.05	0.11	1	34
ZB_cal213	-0.04	0.09	15	38	-0.05	0.10	8	37	-0.05	0.11	10	32

3.5 Conclusie modelkalibratie

Op basis van de in dit hoofdstuk gepresenteerde resultaten van de kalibratieruns kan een keuze worden gemaakt voor de modelinstellingen waarmee stroomveldberekeningen voor de aanmaak van de nieuwe stroomatlas kunnen worden uitgevoerd. Enkele kalibratieruns vallen hiervoor af vanwege een verslechtering van de representatie van de globale waterbeweging door het modeldomein. Voor de meeste kalibratieruns geldt echter dat de globale waterbeweging en de stroomsnelheden buiten de havendammen zeer gelijkaardig worden gesimuleerd. De finale keuze voor de modelinstellingen is daarom vooral gebaseerd op de representatie van het neerpatroon binnen de voorhaven dat zich rond hoogwater manifesteert. Dit neerpatroon wordt afhankelijk van het horizontale turbulentieschema en het toegepaste numerieke advectionschema wel verschillend weergegeven in de kalibratieruns, terwijl de coëfficiënten voor bodemruwheid in de voorhaven en bij de havendammen een kleiner effect blijken te hebben. Het neerpatroon wordt het meest correct weergegeven in kalibratierun ZB_cal202 waarin het MURD-PSI advectionschema en het Smagorinsky model voor horizontale turbulentie worden toegepast, al zijn er slechts subtiele verschillen met kalibratieruns waarin een constante horizontale (en verticale) diffusiviteit van $1,0 \text{ m}^2/\text{s}$ wordt toegepast. Met name de toepassing van het hogere orde advectionschema leidt er toe dat, door een vermindering van de numerieke diffusie, de lokale ruimtelijke snelheidsgradiënten die zich als gevolg van de neervorming in de voorhaven voordoen beter worden gerepresenteerd.

4 Correctie van gemodelleerde stroomsnelheden voor opmaak stroomatlas

De nieuwe stroomatlas voor Zeebrugge wordt binnen dit project opgesteld op basis van de met het TELEMAC3D model gesimuleerde stroomsnelheden. Uit de modelvalidatie in Hoofdstuk 3 blijkt echter dat er tijd- en plaats-afhankelijke afwijkingen bestaan tussen de gemodelleerde en de geobserveerde stroomsnelheden langs de Pas van het Zand. De meest significante afwijkingen zijn de algemene onderschatting van de ebstroming langs de Belgische kust en de lokale en kortdurende overschatting van de vloedpiek in een specifieke zone net buiten de havenkoppen, gerelateerd aan een lokale dip in de vloedstroming die enkel rond maximum vloed in de meetraaien waarneembaar is en die niet door het model wordt gereproduceerd. Daarom worden voor de aanmaak van de stroomatlas ruimtelijk en temporeel variërende correctiefactoren toegepast op de gemodelleerde stroomsnelheden.

4.1 Bepaling correctiefactoren

Voor de bepaling van deze correctiefactoren worden eerst de afwijkingen tussen de gemodelleerde en geobserveerde stroomsnelheden (i.e., V_{meting}/V_{model}) gebundeld per sectie van 200 m langs de meetraaien in de Pas van het Zand en per temporeel blok van 60 minuten. De correctiefactor wordt enkel berekend voor stroomsnelheden hoger dan 0,50 m/s om onrealistisch hoge waarden, bijvoorbeeld als gevolg van de minimale snelheden rond kentering, te vermijden.

In Figuur 27 worden de op deze manier verkregen correctiefactoren getoond met op de horizontale as de afstand langs de meetraaien door de Pas van het Zand (i.e., afstand vanaf de havenkoppen) en op de verticale as de getijfase (i.e., per tijdsblok ten opzichte van hoogwater).

De ebstroming wordt langs een deel van de meetraaien met -10% tot -30% onderschat. Op basis daarvan zijn ruimtelijk en temporeel variërende correctiefactoren berekend tussen de 1,1 en 1,4. Langs de eerste 500 m vanaf de havenkoppen blijkt in de ebfase overigens geen correctie nodig.

Tijdens de vloedfase is slechts een lokale correctie nodig in de periode rond één uur voor HW. Dan worden in een zone tussen de 100 en 500 m buiten de havenkoppen de stroomsnelheden met 10-35% overschat, waardoor een correctiefactor van ongeveer 0,8 á 0,9 nodig is. Verder buitengaats of direct langs de havenkoppen is voor de vloedstroming geen correctie nodig.



Figuur 27 – Berekende correctiefactoren per blok van 200 m (afstand vanaf havenkoppen) en 60 min (t.o.v. HW).

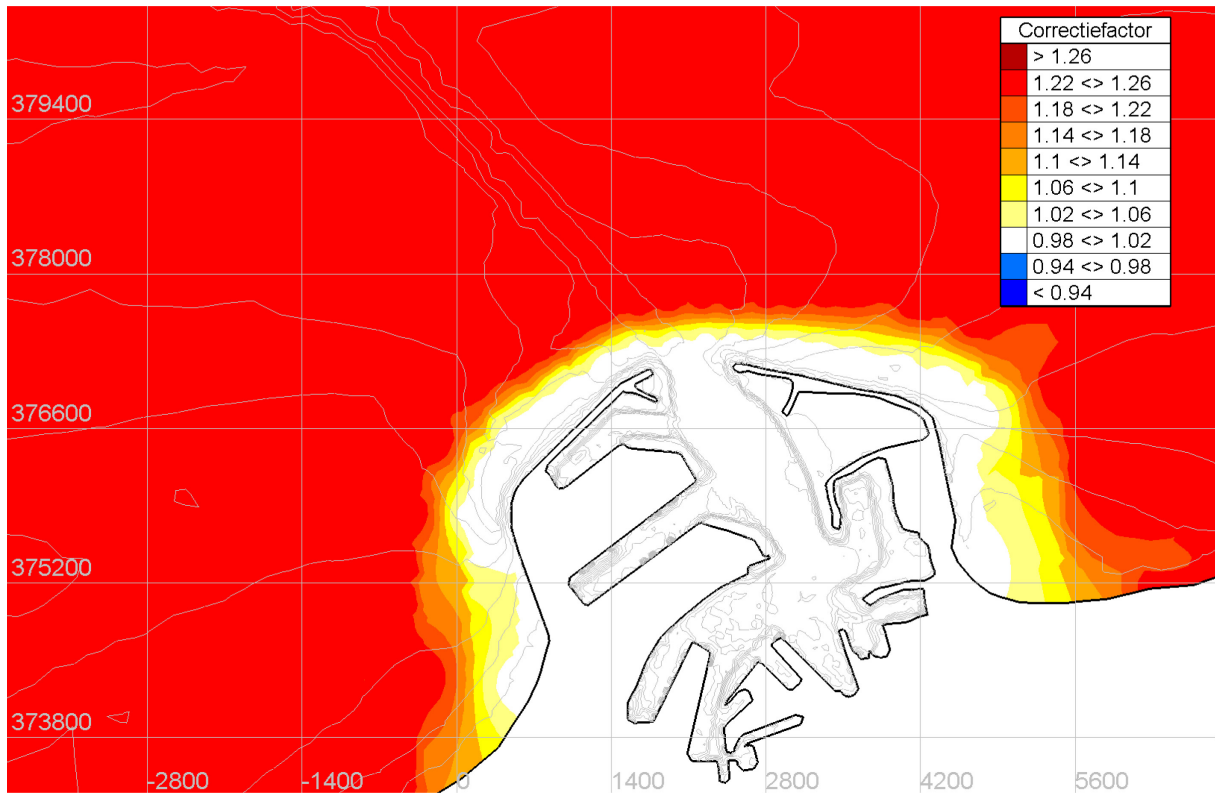
4.2 Implementatie correctiefactoren op stroomvelden

Er wordt uit praktische overwegingen voor gekozen om 2 correcties te implementeren voor de aanmaak van de stroomatlas:

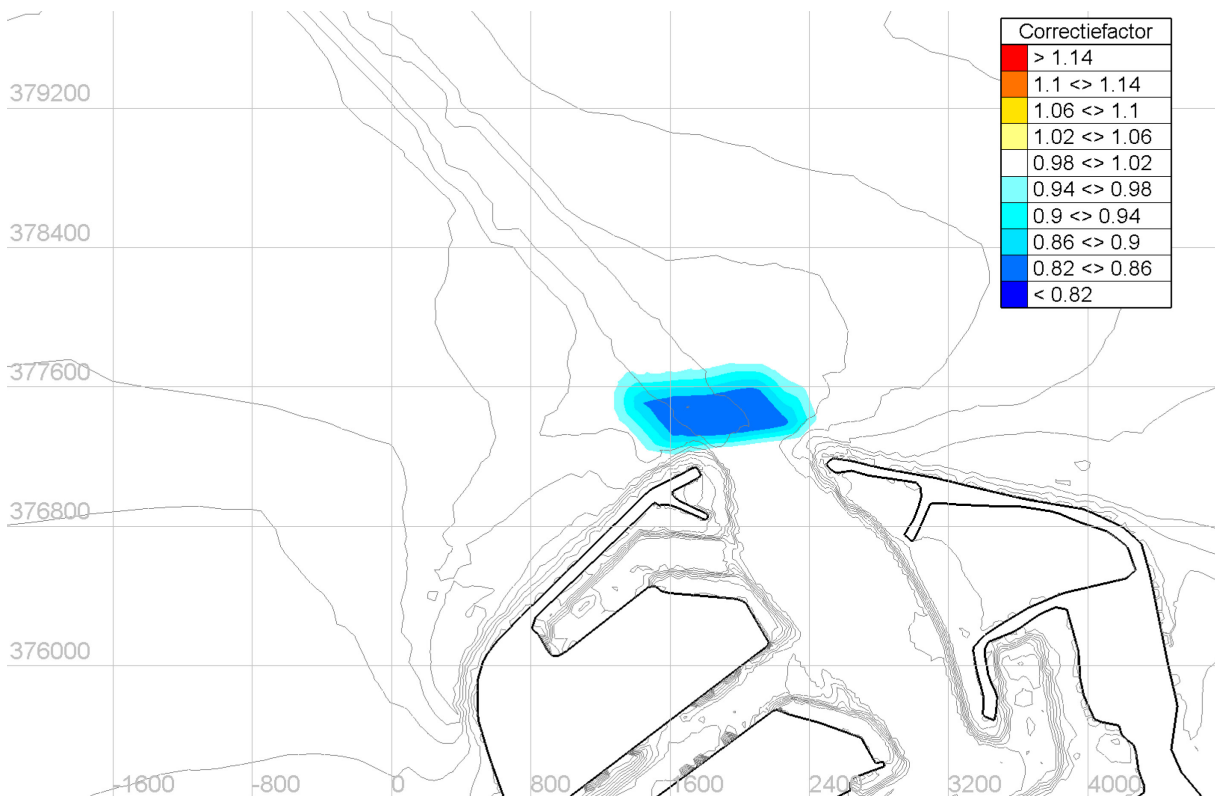
- Tijdens eb worden alle gemodelleerde stroomsnelheden verder dan 500 m buiten de havendammen gecorrigeerd met een constante correctiefactor van 1,25 (i.e., gebaseerd op de gemiddelde afwijking tijdens eb).
- Tijdens maximum vloed worden de gemodelleerde stroomsnelheden in een lokale zone net buiten de havenkoppen gecorrigeerd met een correctiefactor van 0,85.

Voor de implementatie van beide correcties worden de zones waarin de correctiefactor wordt toegepast eerst geprojecteerd op het TELEM3D modelrooster. Zo kan voor alle uitvoerpunten van het model de juiste correctiefactor worden gebruikt. Hierbij is tevens gebruik gemaakt van een ruimtelijke lineaire interpolatie om abrupte overgangen in de correctiefactoren te vermijden. Figuur 28 en Figuur 29 tonen de ruimtelijk variërende correctiefactoren die worden toegepast op resp. de ebstroming (voor stroomvelden van -3u30 voor tot 2u30 na LW) en de vloedstroming (i.e., enkel voor de stroomvelden van -1u20 voor HW tot 0u40 voor HW).

Om een correcte overgang tussen het stroombeeld tijdens maximum vloed (met correctiefactor) en de overige stroombeelden in de vloedfase (zonder correctiefactor) te verkrijgen worden de omliggende stroombeelden (tussen -1u40 en -1u21 voor HW en tussen -0u39 voor HW en 0u15 na HW) gecorrigeerd met een factor van 0,94.



Figuur 28 – Ruimtelijk beeld van de toegepaste correctiefactoren tijdens eb.



Figuur 29 – Ruimtelijk beeld van de toegepaste correctiefactoren tijdens maximum vloed (-1u20 voor HW tot 0u40 voor HW).

5 Conclusies

In dit rapport werd het door IMDC (2015) ontwikkelde Telemac-3D modelinstrumentarium van de haven van Zeebrugge geüpdatet en gevalideerd voor de representatie van geobserveerde stroompatronen in de voorhaven en in de toegangseul naar de haven. De update van het model omvat het toepassen van de meest recente versie van de Telemac-3D (v8p4), enkele aanpassingen aan het modelrooster om de huidige geometrie van de haven van Zeebrugge correct weer te geven, de implementatie van recente bathymetrische gegevens in het interessegebied en het genereren en implementeren van offshore randvoorwaarden voor het jaar 2023 door nesting in de DCSM-ZUNO modellen van de Noordzee.

Volgend op de modelupdates is getracht de representatie van de stroming in en nabij de haven van Zeebrugge te verbeteren door in een set van kalibratieruns enkele modelinstellingen, zoals het turbulentieschema, de lokale bodemruwheid en het advectionschema, aan te passen. De focus van deze kalibratie lag op de representatie van de stroomsnelheden in de toegangseul en de representatie van het neerpatroon in de voorhaven. Hiervoor is de gesimuleerde stroming vergeleken met gemeten stroomsnelheden op vaste meetpunten nabij de havenkoppen (Plancke *et al.*, 2024a) en langs gevaren ADCP-meetraaien binnen en buiten de havendammen (Plancke *et al.*, 2024b).

Door de kalibratieoefening is de modelprestatie verbeterd ten opzichte van de originele versie van het model. Met name de stroompatronen als gevolg van de neervorming binnen de havendammen worden na de modelkalibratie beter gerepresenteerd, waarbij het toepassen van een ander advectionschema (i.e., MURD-PSI advectionschema) om de numerieke berekening uit te voeren de grootste positieve invloed blijkt te hebben. Zowel de primaire neer, die met de klok mee draait, als de secundaire neer die iets zuidelijker is gelegen, en tegen de klok in draait, worden qua positie en intensiteit goed gesimuleerd door het Telemac-3D model.

De reguliere vloedstroming langs de kust wordt ook goed gerepresenteerd in de modelsimulaties, met uitzondering van een lokale dip in de vloedstroming nabij de havenkoppen die bij maximum vloed optreedt en waarvan de fysische oorzaak op basis van de metingen niet kan worden vastgesteld. Hierdoor is in het model sprake van een lokale overschatting van de vloedstroming van gemiddeld ongeveer +15% in een zone net buiten de havenkoppen. Voor de aanmaak van de stroomatlas op basis van de numerieke modelresultaten wordt daarom een lokale correctie uitgevoerd voor de stroombeelden bij maximum vloed.

De ebstroming langs de kust wordt in algemene zin onderschat in de modelsimulaties. Deze onderschatting is variërend over het getij, maar kan langs de meetraaien oplopen tot bijna -30%. Derhalve is een algehele correctie van de gemodelleerde stroomsnelheden bij eb noodzakelijk voor de aanmaak van de stroomatlas.

Referenties

Agentschap voor Maritieme Dienstverlening en Kust. Afdeling Kust. Vlaamse Hydrografie. (2012). Stroomatlas Pas van het Zand en Haven Zeebrugge – 2011.

Chu, K.; Vanlede, J.; Decrop, B.; Mostaert, F. (2020). Validation of North Sea models: sub report 1. Validation and sensitivity analysis. Version3.0. FHR reports, 19_058_1. Flanders Hydraulics Research: Antwerp.

De Maerschallck, B.; Renders, D.; Vanlede, J.; Gourgue, O.; Willems, M.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2017). Modelling Vlaamse Baaien: Deelrapport 1: Hydrodynamische Modelling Scenario's Oostkust. Versie 6.0. WL Rapporten, 15_068. Waterbouwkundig Laboratorium & afdeling Maritieme Toegang: Antwerpen, België.

De Maerschallck, B.; Breugem, W. A.; Kolokythas, G.; Wang, L. (2023): Scaldis Coast: Numerical modelling of 10 years for long-term morphology in the surf zone of the Belgian coast using the TELEMAC-MASCARET system. In: Kopmann, Rebekka; Folke, Frederik (Hg.): Proceedings of the XXIXth TELEMAC Users Conference 12-13 October 2023. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 108-115.

De Maerschallck, B.; Plancke, Y. (2023). Relocatie Sterneneiland Zeebrugge: Deelrapport 1 – Hydromorfologische analyse. Versie 5.0. WL Rapporten, 22_080_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Dujardin, A.; De Clercq, B.; Vanlede, J.; Delgado, R.; van Holland, G.; Mostaert, F. (2010a). Verbetering numeriek instrumentarium Zeebrugge: bouw en afregeling detailmodel. Versie 2.0. WL Rapporten, 753_08. Waterbouwkundig Laboratorium/IMDC/Soresma: Antwerpen.

Dujardin, A.; Vanlede, J.; Delgado, R.; Mostaert, F. (2010b). Verbetering numeriek instrumentarium Zeebrugge: deelrapport 2. Bathymetrie aanpassing ter hoogte van de kop van de oostelijke strekdam. versie 2.0. WL Rapporten, 753_08. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

Hervouet, J. M. (2007). Hydrodynamics of Free Surface Flows: Modelling with the finite element method. Wiley.

IMDC (2015). Telemac-Zeebrugge model – Set-up, calibration and validation. I/RA/11401/13.072/JUD, Antwerpen.

Leyssen, G.; Vanlede, J.; Mostaert, F. (2011). Modellentrein CSM-ZUNO: deelrapport 1: opzet en gevoeligheidsanalyse. WL Rapporten, 753_12. Waterbouwkundig Laboratorium/IMDC: Antwerpen

Plancke, Y.; De Maerschallck, B. (2024a). Stroomatlas Zeebrugge: Deelrapport 15 – Resultaten stationaire metingen. Versie 1.0. WL Rapporten, 23_063_15. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

Plancke, Y.; Stark, J.; De Maerschallck, B. (2024b). Stroomatlas Zeebrugge: Deelrapport 14 – Overzicht varende ADCP-metingen. Versie 1.0. WL Rapporten, 23_063_14. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

Trouw, K.; Zimmermann, N.; Wang, Li.; De Maerschallck, B.; Delgado, R.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2015). Scientific support regarding hydrodynamics and sand transport in the coastal zone: Literature and data review coastal zone Zeebrugge - Zwin. Version 4_0. WL Rapporten, 12_107. Flanders Hydraulics Research. Antwerp, Belgium.

Vandenbruwaene, W.; Michielsen, S.; Hertoghs, R.; Boeckx, L.; Vereecken, H.; Deschamps, M.; Mostaert, F. (2020). Hydrologie bevaarbare waterlopen in Vlaanderen: Jaar 2019. Versie 4.0. WL Rapporten, PA026_3. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

Vanlede, J.; Chu, K.; Smolders, S.; Decrop, B.; Mostaert, F. (2020). Update SCALDIS 2019: a 3D hydrodynamic model of the Scheldt Estuary: calibration report. Version 3.. *FHR reports*, PA016_1. Flanders Hydraulics Research: Antwerp.

Bijlage 1 Brondata bathymetrische peilingen

Tabel 10 – Overzicht brondata voor bathymetrisch grid Belgische kustvlakte 2017-2021.

Brondata	
211117_168_WEDH_MB	200417_005_FANH_MB
211110_167_WEDH_MB	200411_008_ODYKW_MB_400
211110_084_WEDH_MB	200407_007_ODYKW_MB_400_new
210922_154_WHVR_MB	200407_006_ODYKW_MB_400
210909_133_WHVR_MB	200407_004_NHZ_MB
210812_132_WHVR_MB	200404_003_FANH_MB
210726_116_WHVR_MB	200331_002_WH_MB
210628_115_STS1_MB	200318_004_WEDH_MB_400
210511_81_WH_MB	200305_005_ZUWE_MB_400
210329_010_BLTH_MB_400	200207_103_WIESCH_MB_300
210322_051_BLI_MB_300	200205_003_WEDH_MB_400
210301_037_WH_MB	200123_028_WH_MB_300
210227_009_GOAK_MB_400	191203_222_WEDH_MB_300
210223_110_WIESCH_MB_2	191121_417_SCHO_MB
210221_008_BLTH_MB_400	191104_216_WIESCH_MB
201216_109_WIESCH_MB	190913_202_WEDH_MB_300
201216_108_WIESCH_MB	190909_399_A1A1B_MB
201209_004_DPOD_MB_400	190726_164_ODYKW_MB_300
201128_003_NHZ_MB_400	190716_385_SCHW_MB
201127_233_BLIN_MB_300	190612_372_AVG1_MB
201123_226_ODYKW_MB	190513_140_ODYKW_MB_300
201002_201_WEDH_MB_300	190424_GOAK_MB_400
200909_200_GOAK_MB_300	190327_095_ODYKW_MB_300
200904_194_PVZ_MB_300	190326_003_BLIN_MB
200902_185_WIESCH_MB_300	190319_002_NHZ_MB
200813_453_ZUWE_MB_400	190214_001_WIESCH_MB
200811_184_RAAN_MB_300	190124_001_FANH_MB
200730_161_RAAN_MB_300	181017_NHND_MB_300
200727_171_RAAN_MB_300	180917_WHBNK_MB
200717_160_GOAK_MB_300	180730_FAIRY_MB
200716_518_NNO_MB_300	180709_WHBNK_MB
200714_159_WHVR_MB_300	180626_ASCH_MB_400
200623_438_HEICDZ_SB_200_Grid_1m	180625_NHND_MB_300
200602_120_WIESCH_MB_300	180504_BLI_MB
200526_433_BKZB_SB_200_ETRS_2_Grid_1m	180421_VG1_MB_300
200525_423_DHWD_SB_200_Grid_1m	180326_WHBO_MB_300
200520_418_OSTBR_SB_200_Grid_1m	
200519_413_MKOST_SB_200_GRID_1m	
200519_104_WIESCH_MB_300	
200517_408_ODMK_SB_200_Grid_1m	
200516_398_DPOD_SB_200_Grid_1m	

Tabel 11 – Overzicht brondata voor bathymetrisch grid Zeebrugge 2022.

Brondata	
221017_404_ZBA2_SB_210	221017_402_ZBHKBD_SB_33
221017_202_PVZ_SB_210	221017_202_PVZ_SB_33
221004_385_ZBZP2_SB_210	221010_392_ZBGW_MB_DET
221004_383_ZBZP1_SB_210	221005_387_TGVDM_SB_33
221003_381_ZBCDNB_SB_210	221004_385_ZBZP2_SB_33
220809_320_ZBWH_SB_210	221004_383_ZBZP1_SB_33
220426_158_ZBGW_SB_210	221003_381_ZBCDNB_SB_33
151015_ZB_STERN_SB_210	220928_374_ZBWDOK_SB_33
	220909_283_ZBVSH_MB
	220809_320_ZBWH_SB_33
	220705_273_ZBLNG_MB
	220609_231_ZBMD2_SB_33
	220426_158_ZBGW_SB_33
	220321_121_ZBSTR_MB
	210830_279_ZBMD1_SB_33
	190517_465_ZBLNG_MB_DET
	151015_ZB_STERN_SB_33

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