Bijlage 3 Svašek Hydraulics (2014).

Stroming in de Westbuitenhaven Terneuzen.

3-D stromingsberekingen en analyse sedimentatie.

vlaams nederlandse Schelde commissie

Stroming in de Westbuitenhaven Terneuzen

3D-stromingsberekeningen en analyse sedimentatie

planuitwerkingsfase

Grote Zeesluis Kanaal Gent-Terneuzen

Rapport Vlaams Nederlandse Scheldecommissie

Onderwerp
3D stroming WBHT

Auteur
S.E. Poortman

Datum
23 januari 2015

Status
concept

Documentnummer
VNZT-R-203-0

Stroming in de Westbuitenhaven Terneuzen

3D-stromingsberekeningen en analyse sedimentatie

Concept

VNZT-R-203-0

1724/U14416/B/SPo

23 januari 2015

EK
LICS
CONSULTANTS

Schiehaven 13G
3024 EC Rotterdam
Nederland
T +31 - 10 - 467 13 61
F +31 - 10 - 467 45 59
E info@svasek.com
I www.svasek.com

Document titel	Stroming in de Westbuitenhaven Terneuzen
	3D-stromingsberekeningen en analyse sedimentatie
Verkorte Titel	3D stroming WBHT
Status	Concept
Datum	23 januari 2015
Project naam	Nieuwe zeesluis Terneuzen
Project nummer	1724
Opdrachtgever	LievenseCSO
Referentie LievenseCSO	VNZT-R-203-0
Referentie Svasek	1724/U14416/B/SPo

Auteur	S.E. Poortman
Gecontroleerd door	B. van Leeuwen

INHOUDSOPGAVE

			Pag.
1	ALGEMEEN		1
	1.1	Achtergrond	1
	1.2	Opdrachtomschrijving	1
	1.3	Leeswijzer	1
2	MODELOPZET FINEL3D WESTERSCHELDE		2
	2.1	FINEL3D	2
	2.2	FINEL3D Westbuitenhaven	2
	2.2.1	Modeldomein en randvoorwaarden	2
	2.2.2	Rekenrooster	2
	2.2.3	Bodemligging	5
	2.2.4	Turbulentie	6
	2.2.5	Dichtheid en saliniteit	6
	2.3	Kalibratie	8
	2.3.1	Gebruikte meetdata	8
	2.3.2	Modelkalibratie	11
	2.4	Validatie	15
	2.4.1	Gebruikte meetdata	15
	2.4.2	Modelvalidatie	15
	2.5	Conclusies	18
3	SCENARIOBEREKENINGEN FINEL3D		19
	3.1	Overzicht scenario's	19
	3.2	A. Referentiesituatie	19
	3.3	B. Voorkeursvariant zonder spuimiddel	23
	3.4	C. Voorkeursvariant met spuien via de Nieuwe Sluis	26
	3.5	D. Referentiesituatie met spuien via de Middensluis	30
	3.6	Conclusies	33
4	ANALYSE SEDIMENTATIE		34
	4.1	Definitie uitwisselingskengetal en toenamekengetal	34
	4.2	A. Kengetallen voor de referentiesituatie	35
	4.3	B. Kengetallen voor de voorkeursvariant	36
	4.4	H. Invloed van spuien op de wateruitwisseling	37
	4.5	Vertaling resultaten naar baggerbezwaar VKV	38
	4.6	Conclusies sedimentatie	40
5	CONCLUSIES		41
LITERATUUR			42
A	VERGELIJKING METING EN FINEL3D		
B	TUDFLOW3D		

1 ALGEMEEN

1.1 Achtergrond

Svašek Hydraulics heeft gedurende 2014 geassisteerd bij de MER voor de Nieuwe Zeesluis Terneuzen. Deze ondersteuning bestond onder andere uit het inschatten van de toename van het baggerbezwaar en het genereren van stroombeelden voor nautische analyses in het geval van een nieuw vormgegeven Westbuitenhaven. Op beide gebieden zijn eerder op basis van 2DH simulaties (met FINEL2D) uitgevoerd.

Op het gebied van baggerbezwaar konden FINEL2D simulaties tot snelle en onderscheidende resultaten leiden. Voor de voorkeursvariant was behoefte aan een nauwkeuriger inschatting van de toename van het baggerbezwaar. Aanvullend op de 2D modellering is er behoefte aan het inschatten van de bijdrage van dichtheidsstroming (3D) aan het baggerbezwaar

In een eerder stadium van dit project is op basis van het genoemde FINEL2D model (opgezet voor de slibberekeningen) ook een set stroombeelden voor verschillende scenario's gegenereerd. Deze stroombeelden zijn vervolgens door MARIN toegepast in scheepssimulaties met loodsen om de toegankelijkheid van de nieuwe sluis te onderzoeken. Aangezien het slibmodel niet is gekalibreerd op stroming en metingen op dat moment nog niet beschikbaar waren, was de stroming in de haven onzeker. Gegeven het belang van de vaarsimulaties voor het havenontwerp is nu behoefte aan gevalideerde stromingsvoorspellingen voor de scheepvaart.

1.2 Opdrachtomschrijving

Er zal een 3D model worden opgezet met behulp van FINEL3D welke wordt gevalideerd met recentelijk bij Svašek Hydraulics beschikbaar gekomen metingen van Rijkswaterstaat (van zowel binnen als buiten de haven). Met dit gevalideerde 3D model kan vervolgens worden voorzien in de informatiebehoefte zoals in voorgaande paragraaf beschreven:

1. Het effect van 3D stroming op de wateruitwisseling van de haven (slibarm) met de Westerschelde (slibrijk) wordt onderzocht. Deze uitwisseling is indicatief voor de toevoer van slib naar de haven.
2. Op basis van het 3D model worden stroombeelden gegenereerd die kunnen wordt toegepast in de MARIN scheepssimulaties. (Dit maakt geen deel uit van deze rapportage)

1.3 Leeswijzer

Na deze inleiding start dit rapport met modelopzet en validatie van het FINEL3D model van de Westbuitenhaven in Hoofdstuk 2. Daarna worden in Hoofdstuk 3 de verschillende scenario's gepresenteerd die zijn uitgevoerd, zowel ten behoeve van de sedimentstudie als nautische doeleinden. Het effect van dichtheidstromen wordt vertaald in nieuwe schattingen voor het baggerbezwaar in Hoofdstuk 4 (doel 1 van deze studie). Tot slot wordt een korte samenvatting van de conclusies gegeven in Hoofdstuk 5.

2 MODELOPZET FINEL3D WESTERSCHELDE

Dit hoofdstuk bespreekt het gebruikte numerieke model voor stromingsberekeningen in de Westbuitenhaven van Terneuzen. Er wordt kort ingegaan op de achtergrond van het model. Daarnaast worden de opzet van het model en de kalibratie en validatie van het model behandeld.

2.1 FINEL3D

FINEL3D is een volledig driedimensionaal numeriek stromingsmodel, gebaseerd op de eindige elementenmethode. Het model is ontwikkeld door Svašek Hydraulics. De wetenschappelijke basis is gegeven door Labeur (2009) en Labeur & Wells (2011). FINEL3D rekent met behulp van ongestructureerde rekenroosters, waarbij de tetraëder elementen in het modeldomein in grootte en vorm variëren. Hierdoor bestaat de mogelijkheid om in de interessegebieden lokaal de resolutie van de elementen te vergroten, zowel in horizontale als verticale richting, waardoor er waar het telt met meer detail kan worden gerekend.

Svašek Hydraulics heeft recentelijk een basismodel van het Schelde-estuarium ontwikkeld. Dit basismodel is voor waterstanden en stroming in de Westerschelde volledig gekalibreerd, en zal daarom als basis dienen voor het model dat in voorliggende studie is gebruikt.

2.2 FINEL3D Westbuitenhaven

Om de stroming in de Westbuitenhaven te kunnen berekenen is uitgegaan van het FINEL3D basismodel van de Westerschelde. Dit model is aangepast door zowel in de horizontaal als verticaal een verfijning in het rekenrooster ter plaatse van de Westbuitenhaven aan te brengen. Deze paragraaf gaat in op de verschillende aspecten van het FINEL3D model van de Westbuitenhaven.

2.2.1 Modeldomein en randvoorwaarden

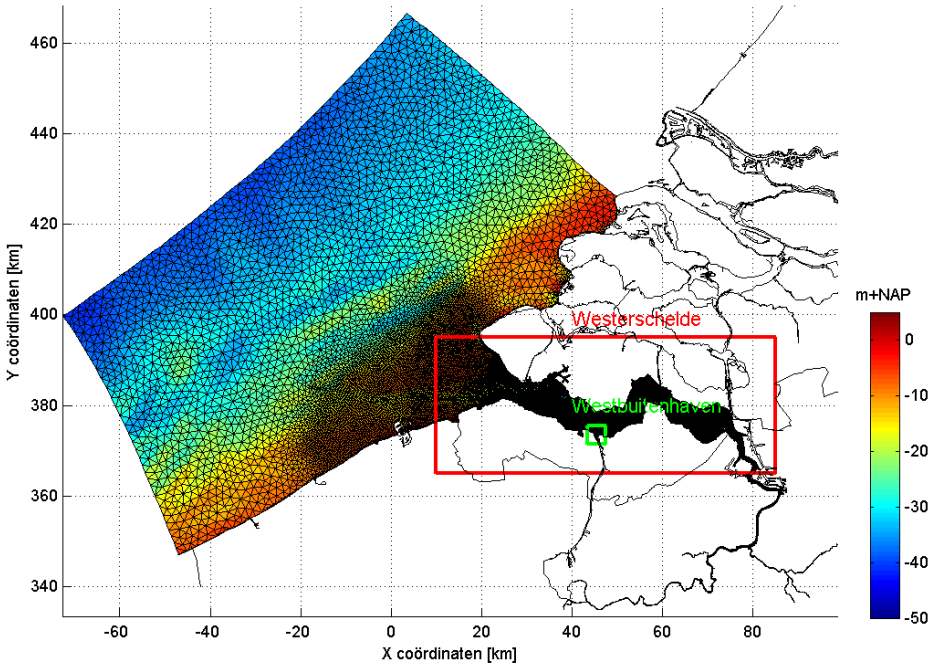
Het modeldomein van het FINEL3D model omvat de Westerschelde, de Beneden-Zeeschelde, de Boven-Zeeschelde en een deel van de Noordzee, zie Figuur 2.1 en Figuur 2.4. Op de randen van het model worden randvoorwaarden opgelegd. Voor de Noordzeeranden betreft dit de waterstand in de vorm van harmonische getijrandvoorwaarden, gebaseerd op 94 componenten. De Belgische rivieren de Schelde, de Nete, de Zenne en de Dijle zijn als constante debietranden geschematiseerd.

2.2.2 Rekenrooster

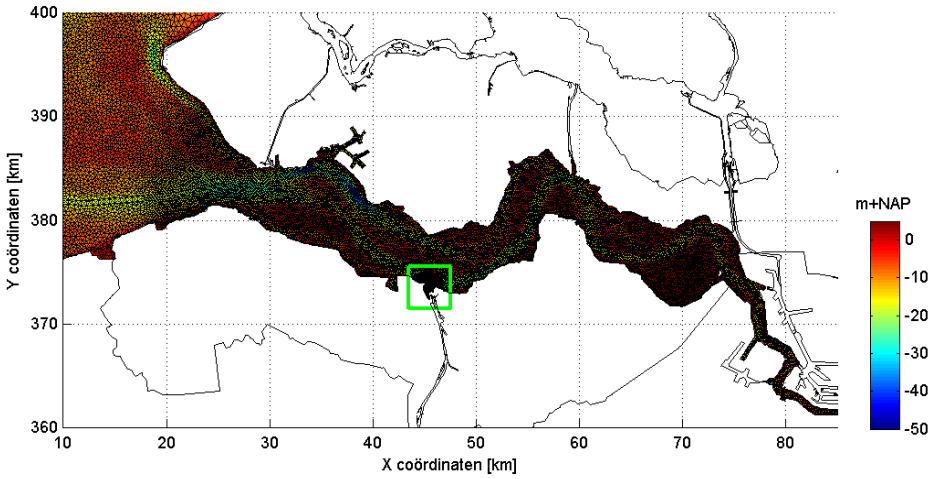
Het rekenrooster van het FINEL3D stromingsmodel wordt getoond in Figuur 2.1. De grootte van de elementen varieert door het modeldomein. In de figuur is zichtbaar dat de elementen in de Noordzee groter zijn dan in de Westerschelde. In Figuur 2.2 wordt ingezoomd op het rekenrooster in de Westerschelde, en in Figuur 2.3 op het rekenrooster ter plaatse van de Westbuitenhaven. In de Westbuitenhaven zijn de elementen het kleinst, met in horizontale richting elementzijden van ca. 15 m. Het rekenrooster telt in het horizontale vlak ongeveer 52.500 elementen.

In de verticaal wordt het rooster verdeeld in verschillende roosterlagen. De hoeveelheid lagen varieert door het modeldomein, zie Figuur 2.4. In de Noordzee en de Zeeschelde is gekozen voor twee lagen in de verticaal. In de Westerschelde varieert het aantal lagen tussen één en vijf, afhankelijk van de diepte. Voor de haveningang van de Westbuitenhaven zijn zes lagen in de

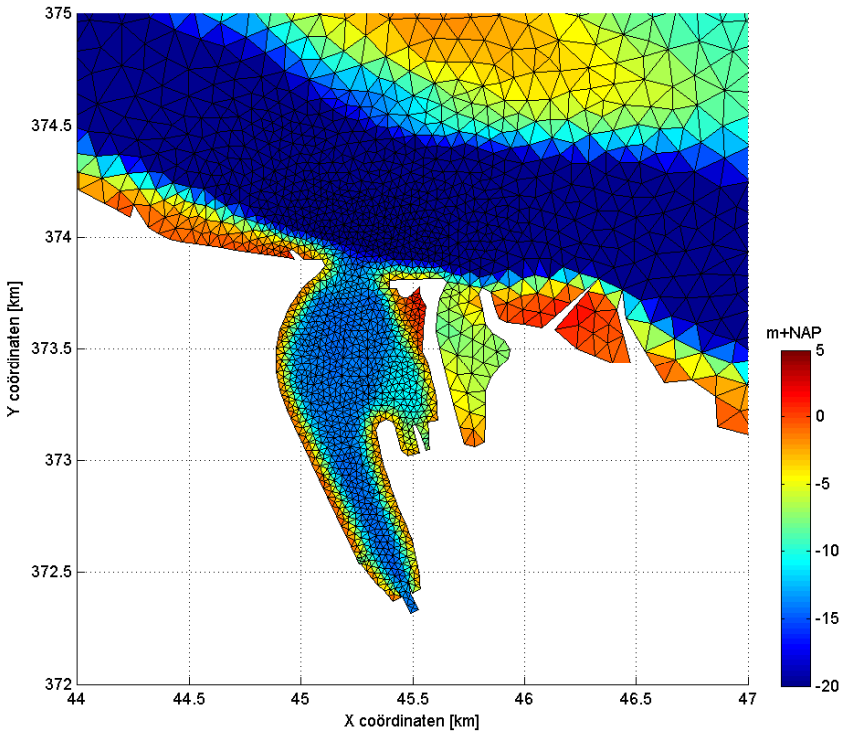
verticaal aanwezig. Ter plaatse van de Westbuitenhaven is meer detail gewenst en loopt het aantal lagen in de verticaal op tot acht, zie Figuur 2.5.



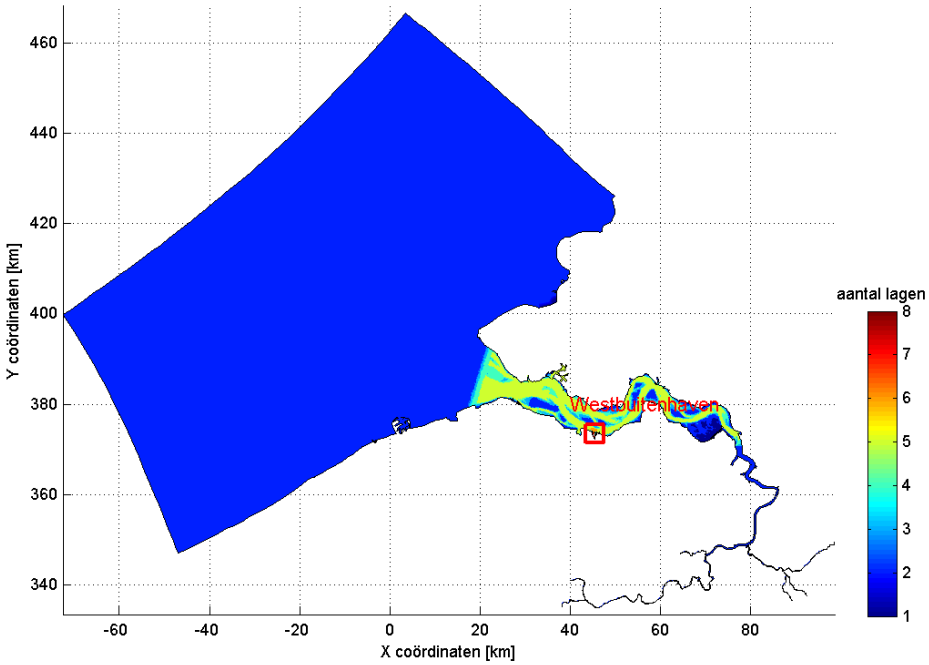
Figuur 2.1: Rekenrooster van FINEL3D model. In Figuur 2.2 wordt het deel van het rekenrooster in het rode kader weergegeven; in Figuur 2.3 het deel in het groene kader.



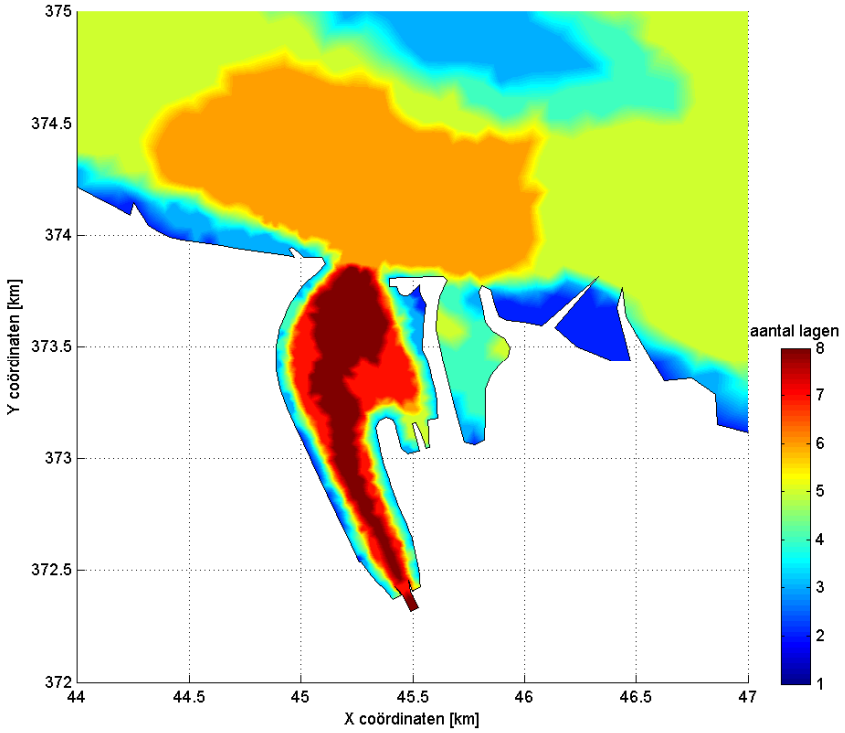
Figuur 2.2: Rekenrooster van FINEL3D model, ingezoomd op de Westerschelde. In Figuur 2.3 wordt het deel van het rekenrooster in het groene kader weergegeven



Figuur 2.3: Rekenrooster van het FINEL3D model ter plaats van de Westbuitenhaven van Terneuzen.



Figuur 2.4: Aantal roosterlagen in de verticaal in het FINEL3D model.



Figuur 2.5: Aantal roosterlagen in de verticaal in het FINEL3D model ter plaatse van de Westbuitenhaven.

2.2.3 Bodemligging

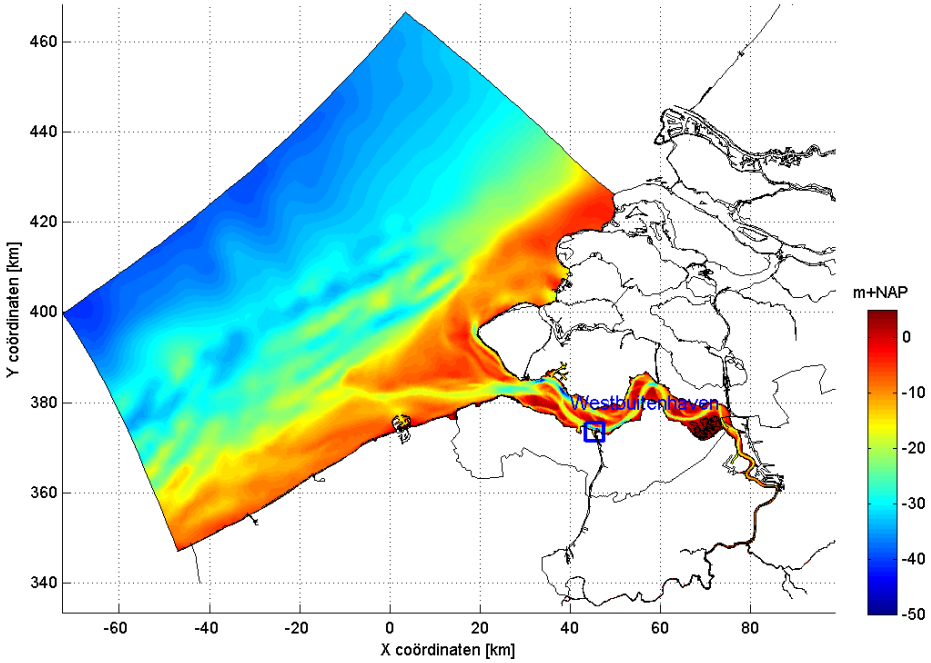
De modelbodem die toegepast wordt voor de kalibratie is samengesteld uit verschillende datasets welke zoveel mogelijk bij 2007 passen (het jaar dat de metingen zijn uitgevoerd). De bodemligging in de Westerschelde zelf is gebaseerd op de peiling van 2007 (Rijkswaterstaat). In de monding van de Westerschelde is gebruik gemaakt van een bodembestand uit 2011 en in de Zeeschelde van een bodembestand uit 2010. De rest van het gebied is aangevuld met de NEVLA bodem uit 2006, zie Maximova et al. (2009).

Voor de Westbuitenhaven is de huidige bodemligging zoals geleverd door LievenseCSO toegepast, deze is gebaseerd op het “baseline model” van Deltares (een verzameling van bodemgegevens van rivieren). De precieze datum van deze bodemligging is niet bekend, maar vergelijking met de diepteprofielen in de gemeten raaien laat goede overeenkomst zien. Dit is in minder mate het geval voor de – waarschijnlijk recentere - dieptemetingen uit 2011-1013 uitgevoerd door Baggerbedrijf de Boer & van der Kamp (2011-2013), welke voor de kalibratiesommen dus *niet* zijn toegepast.

Bovenstaande data is geïnterpoleerd naar het FINEL3D rooster om de modelbodem te verkrijgen. Het resultaat wordt getoond in Figuur 2.6 en in Figuur 2.7 wordt ingezoomd op de modelbodem in de Westbuitenhaven van Terneuzen.

2.2.4 Turbulentie

Om de turbulentie in de modelberekeningen in beschouwing te kunnen nemen, worden de wervels gemodelleerd door middel van een turbulentiemodel. Er is gekozen om voor de bepaling van de verticale viscositeit gebruik te maken van het k-epsilon turbulentiemodel, dat een van de meest gebruikte turbulentiemodellen is. In het horizontale vlak wordt een constante viscositeit van 1 m^2/s toegepast.



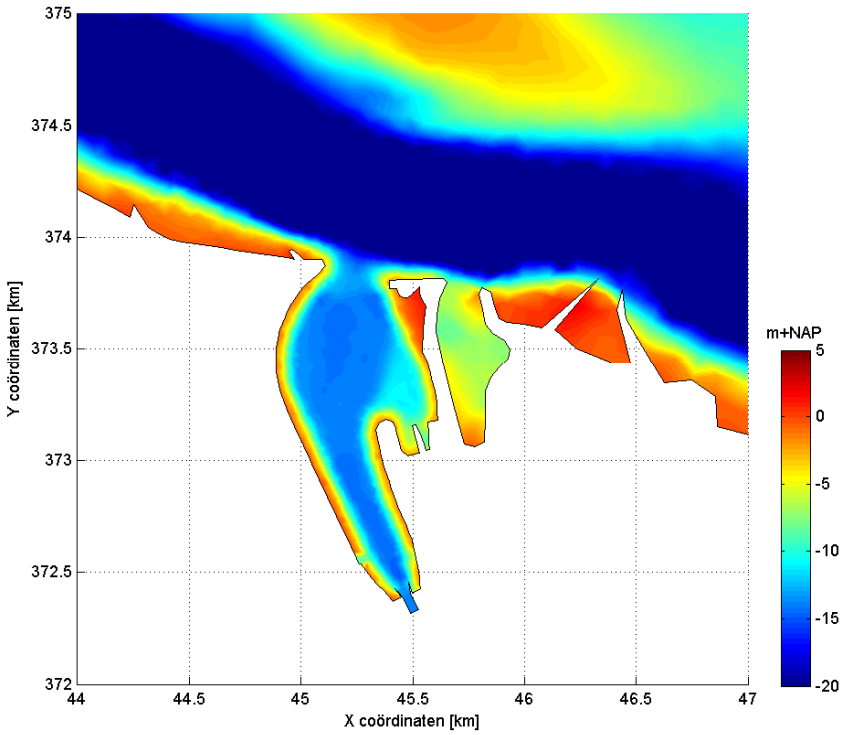
Figuur 2.6: Modelbodem van het FINEL3D model. Het deel van de modelbodem in het blauwe kader is weergegeven in Figuur 2.7.

2.2.5 Dichtheid en saliniteit

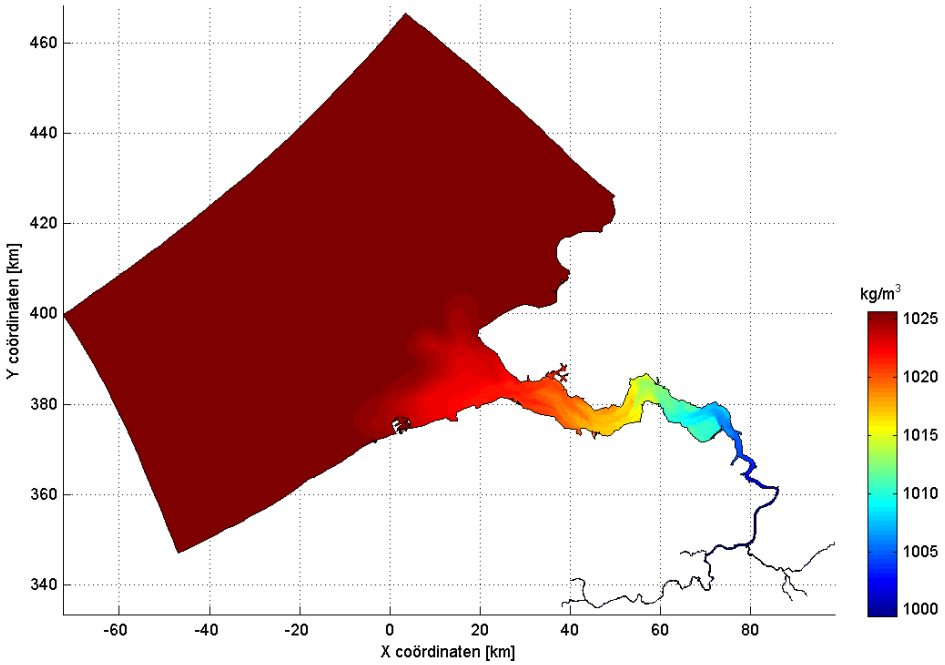
De Westerschelde staat bekend als een goedgemengd estuarium, waarbij de dichtheidsverschillen over de verticaal klein zijn. Over de lengte van de Westerschelde zijn echter wel dichtheidsverschillen aanwezig, veroorzaakt door verschillen in saliniteit, waarbij het zeewater op de Noordzee zout is, en het rivierwater bij Gent zoet is.

De verschillen in dichtheid worden meegenomen in de modelberekeningen door deze te verwerken in de opgelegde randvoorwaarden. Op de Noordzeerand bedraagt de saliniteit 34 PSU (practical salinity units) en op de randen van de Vlaamse rivieren is de saliniteit gelijk aan nul. Daarnaast wordt een initieel saliniteitsveld opgelegd, dat is gebaseerd op metingen. Het initiële saliniteitsveld wordt weergegeven in Figuur 2.8.

Het initiële dichtheidsverloop vertoont dezelfde variatie als de saliniteit. De dichtheid op de Noordzeerand bedraagt 1025,6 kg/m^3 bij een watertemperatuur van 13 graden Celsius. In de Boven-Zeeschelde bedraagt de dichtheid 999,5 kg/m^3.



Figuur 2.7: Modelbodem van het FINEL3D model ter plaatse van de Westbuitenhaven van Terneuzen.



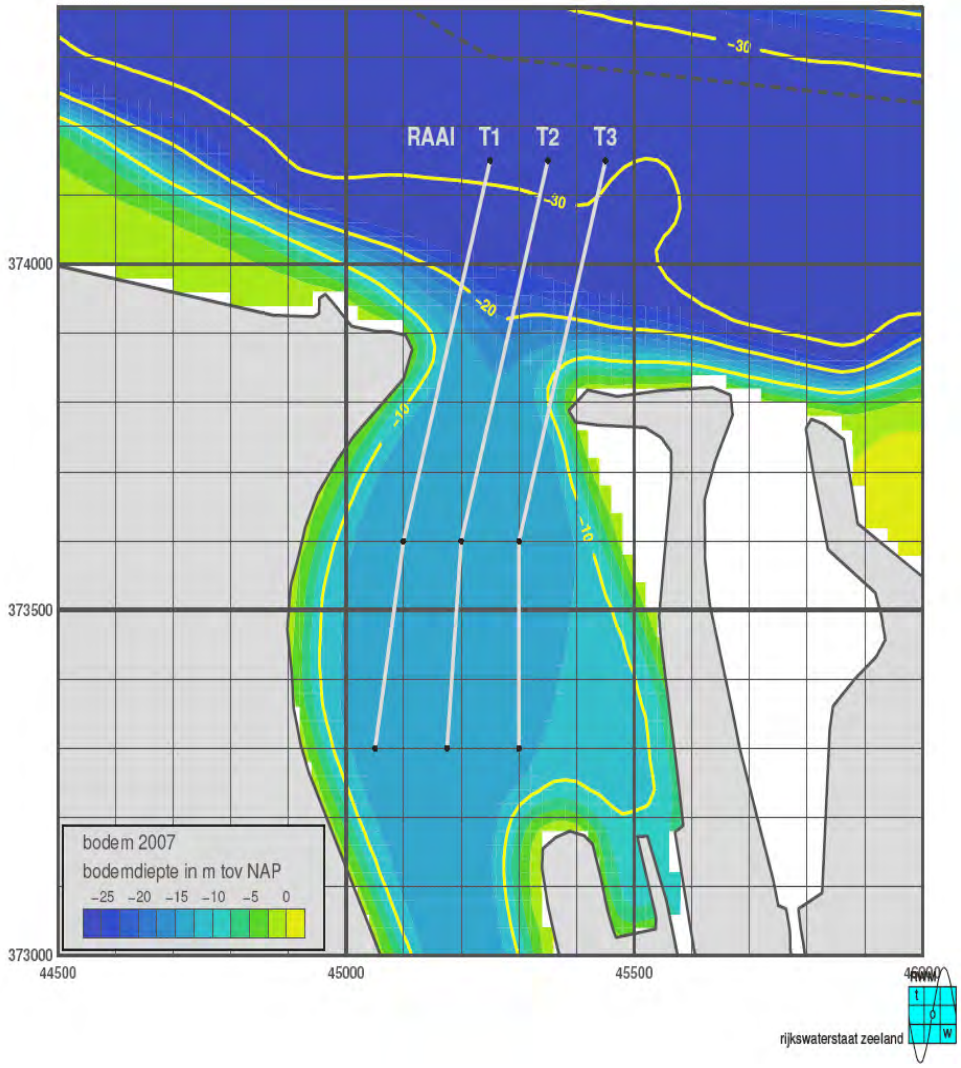
Figuur 2.8: Verloop van de saliniteit in het FINEL3D model.

2.3 Kalibratie

Om tijdens de kalibratie van het FINEL3D stromingsmodel van de Westbuitenhaven de modelresultaten goed te kunnen beoordelen, dienen deze vergeleken te worden met gemeten stroomsnelheden. De modelinstellingen worden vervolgens aangepast tot de modeluitkomsten goed overeenkomen met de meetgegevens. Deze paragraaf behandelt eerst kort de gebruikte stroommetingen en gaat daarna in op de kalibratie van het FINEL3D model zelf.

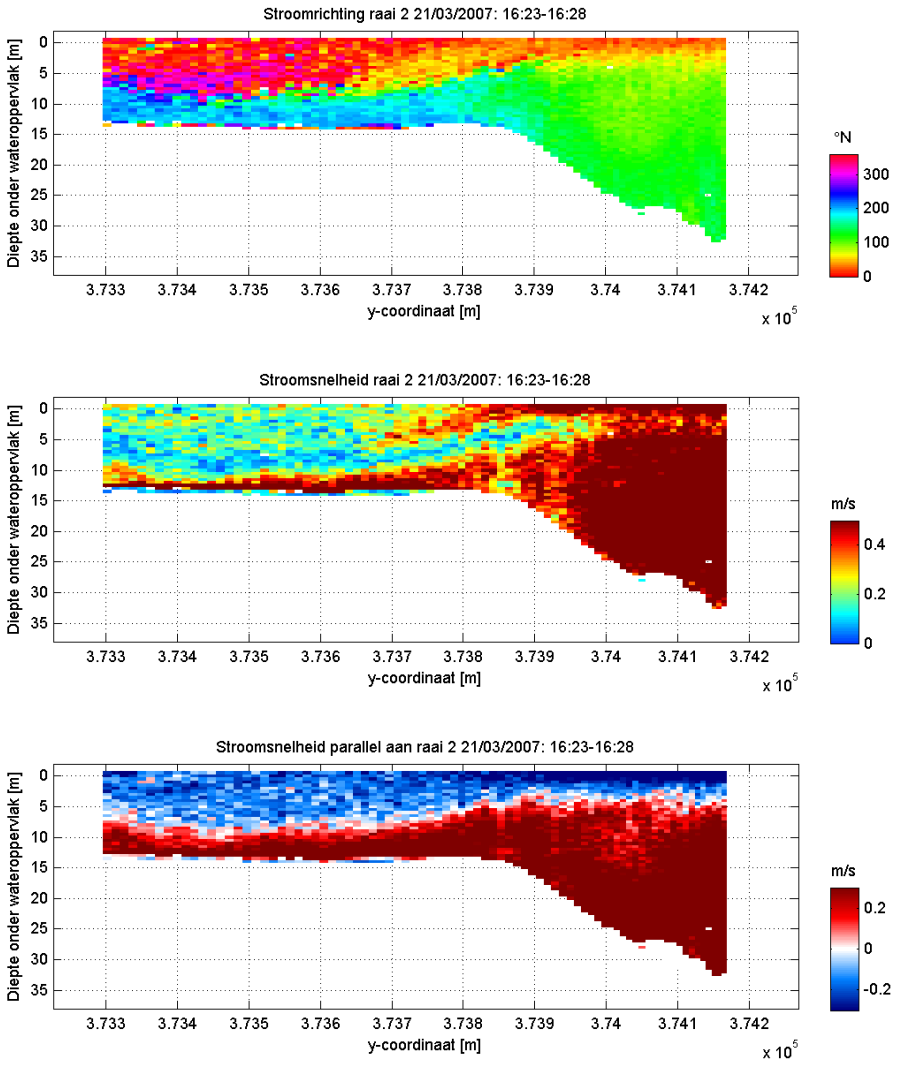
2.3.1 Gebruikte meetdata

Op 21 maart 2007 heeft Rijkswaterstaat (RWS) varende stroommetingen in de Westbuitenhaven van Terneuzen uitgevoerd. Gedurende 13 uur is de stroming langs drie verschillende raaien gemeten. Een overzicht van de locaties van de raaien is gegeven in Figuur 2.9. De meetresultaten worden in voorliggende rapportage niet gepresenteerd, maar kunnen desgewenst opgevraagd worden via de Servicedesk Data van RWS. Deze data is gebruikt om het FINEL3D model te kalibreren.



Figuur 2.9: Overzicht meetraaien varende stroommetingen Terneuzen op 21 maart 2007. Bron: RWS

Om inzicht te verkrijgen in de stromingssituatie in de Westbuitenhaven heeft Svašek Hydraulics de stromingsdata op verschillende wijzen gepresenteerd en geanalyseerd, zodat de verschillende stromingsverschijnselen in de metingen goed geïdentificeerd kunnen worden. Er zijn onder andere figuren opgesteld waarin de stroomsnelheid per vaarronde en verschillende dieptes ruimtelijk gepresenteerd wordt, zie Figuur 2.11. Daarnaast zijn er per raai dwarsdoorsneden opgesteld, zie Figuur 2.10, waarin de stoomrichting (bovenste paneel), stroomsnelheid (middelste paneel) en de stroomsnelheidcomponent in de langsrichting van de meetraai (onderste paneel) gepresenteerd wordt.

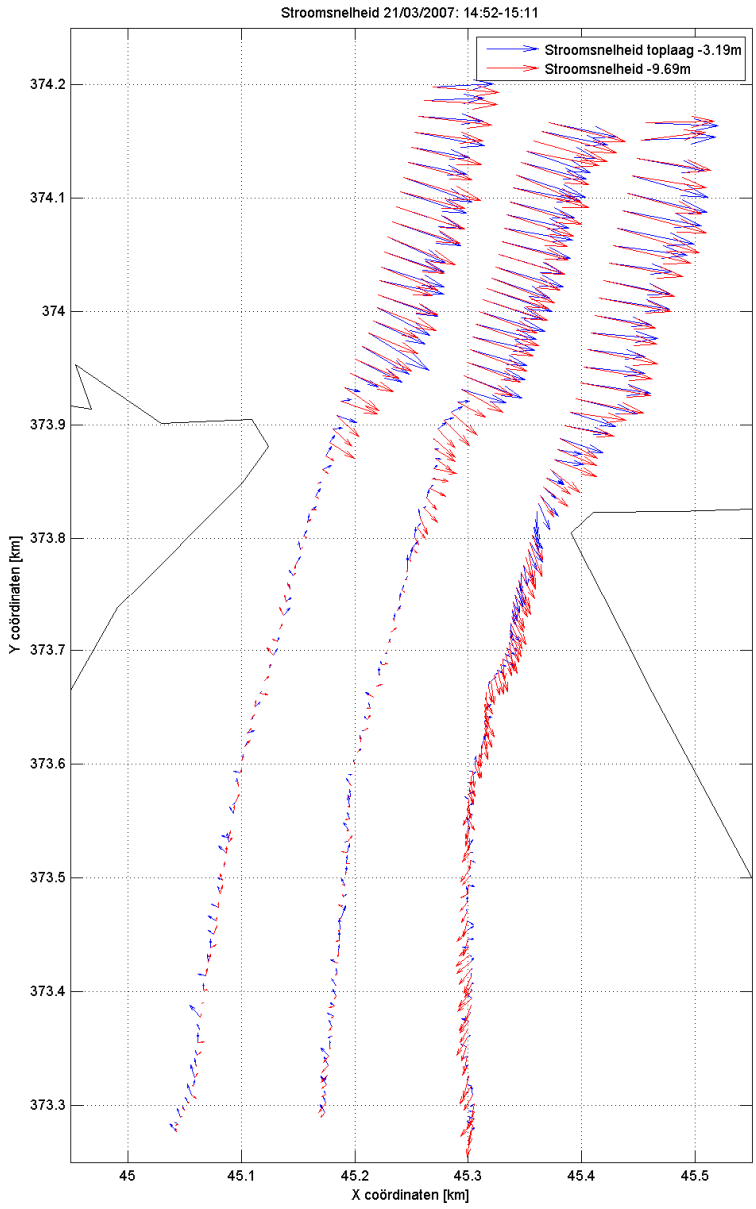


Figuur 2.10: Stroomrichting, stroomsnelheid en langscomponent van de stroomsnelheid van een gemeten raai in de Westbuitenhaven.

Aan de hand van de bewerking en analyse van de aangeleverde meetdata kunnen de onderstaande conclusies met betrekking tot de stroming in de Westbuitenhaven van Terneuzen worden getrokken. In de modelberekeningen zal aandacht worden besteed aan het goed reproduceren van deze afzonderlijke verschijnselen.

- De stroomsnelheden in de haven zijn relatief laag (<0,5 m/s), zie Figuur 2.11 en Figuur 2.10 (middelste paneel).
- Op bepaalde momenten in de getijcyclus is sprake van horizontale neerstroming in haven, zie Figuur 2.11.
- Op bepaalde momenten in de getijcyclus, voornamelijk rondom kentering in de Westerschelde, is sprake van driedimensionale stroming, waarbij in de bovenste laag uitstroming optreedt en in de onderste laag instroming, zie Figuur 2.10 (bovenste en onderste paneel). Ook de omgekeerde situatie, waarbij in de bovenste laag instroming optreedt en in de onderste laag uitstroming, is in de meetgegevens zichtbaar.

NB. De volledige set van verwerkte meetdata wordt in voorliggende rapportage niet gepresenteerd, maar kan desgewenst bij Svašek Hydraulics worden opgevraagd.



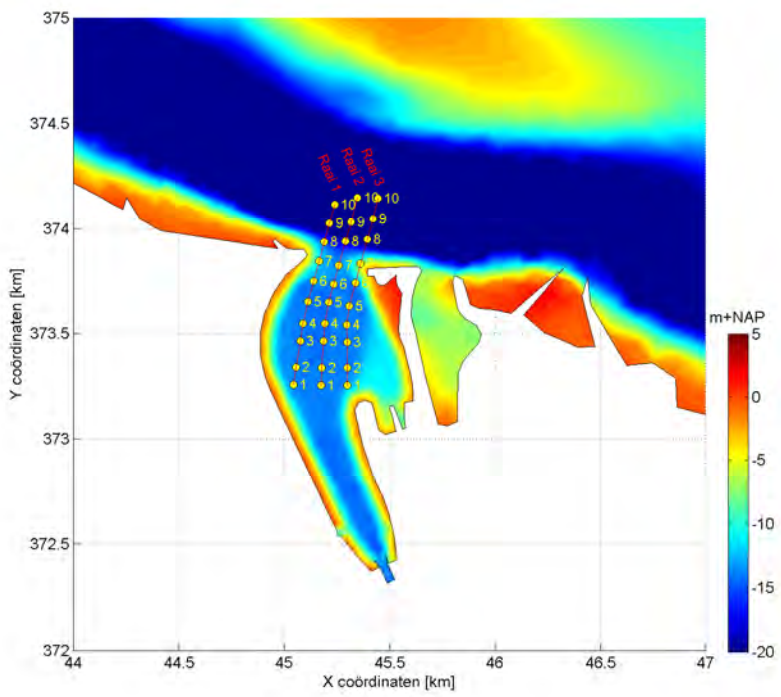
Figuur 2.11: Stroming langs gevaren raaien in de Westbuitenhaven tijdens vloed op twee verschillende diepten. De aangegeven diepte is de diepte ten opzichte van het meetinstrument.

2.3.2 Modelkalibratie

Tijdens de kalibratie worden de modelinstellingen van het FINEL3D model aangepast zodat de modelresultaten en metingen goed overeenkomen. Daartoe is eerst gekeken naar waterstanden in de gehele Westerschelde om de eerste stappen naar de juiste instellingen te kunnen zetten. De waterstanden, waarbij zowel naar de amplitude als de fase gekeken is, komen in de gehele

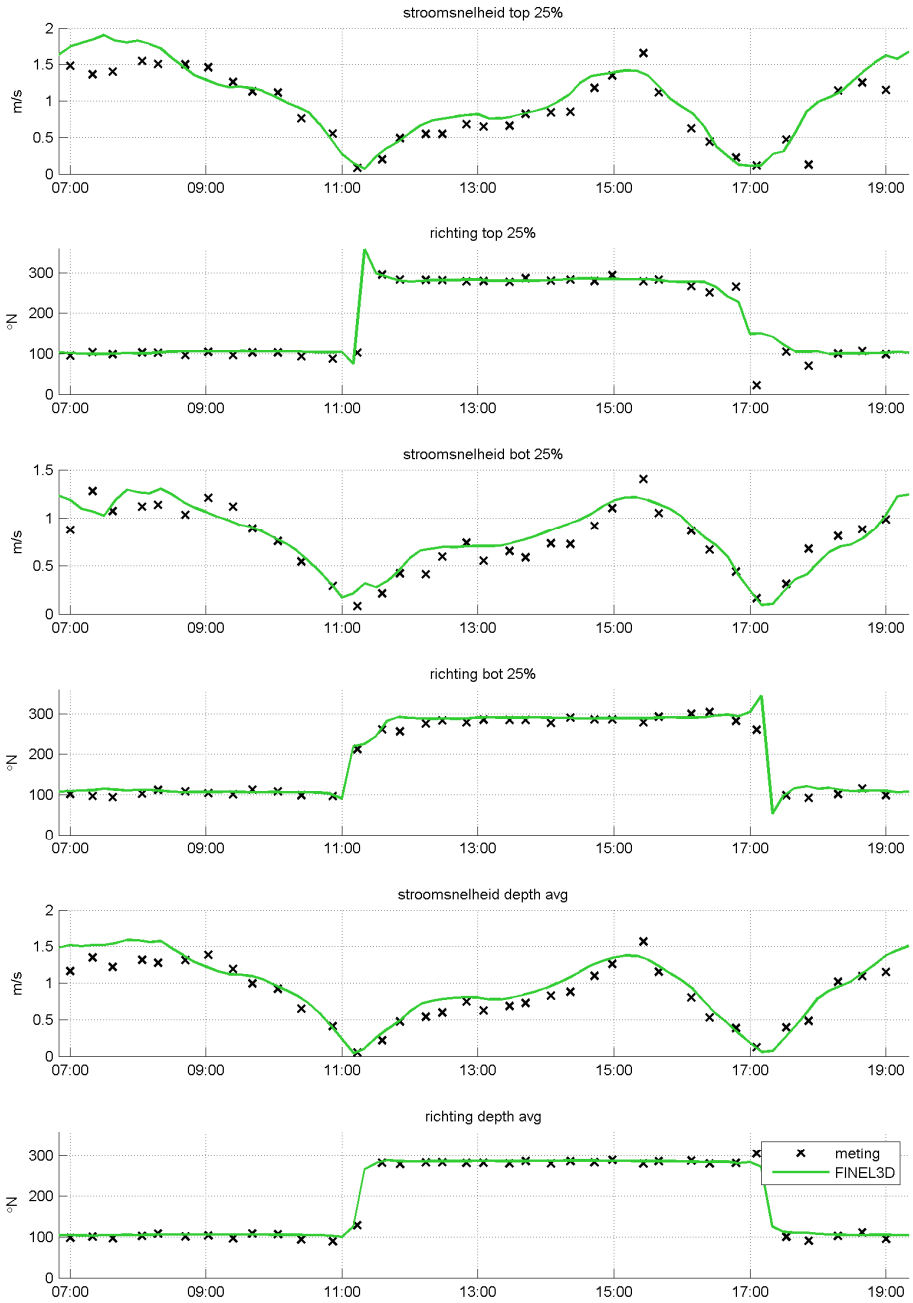
Westerschelde goed overeen met de werkelijkheid. Bovenstrooms vanaf Antwerpen wijken de waterstanden wat meer af. (Deze kalibratieresultaten zijn niet weergegeven maar kunnen desgewenst bij Svašek Hydraulics worden opgevraagd.)

Vervolgens zijn stroomsnelheden in de Westbuitenhaven vergeleken om het model verder af te regelen. Hiertoe is gebruik gemaakt van de meetresultaten van de varende stroommetingen die RWS op 21 maart 2007 in de haven heeft uitgevoerd, zie paragraaf 2.3.1. Om de metingen goed met de modelresultaten te kunnen vergelijken, zijn voor 30 punten in de haven tijdseries gegenereerd. De locaties van deze punten zijn weergegeven in Figuur 2.12.

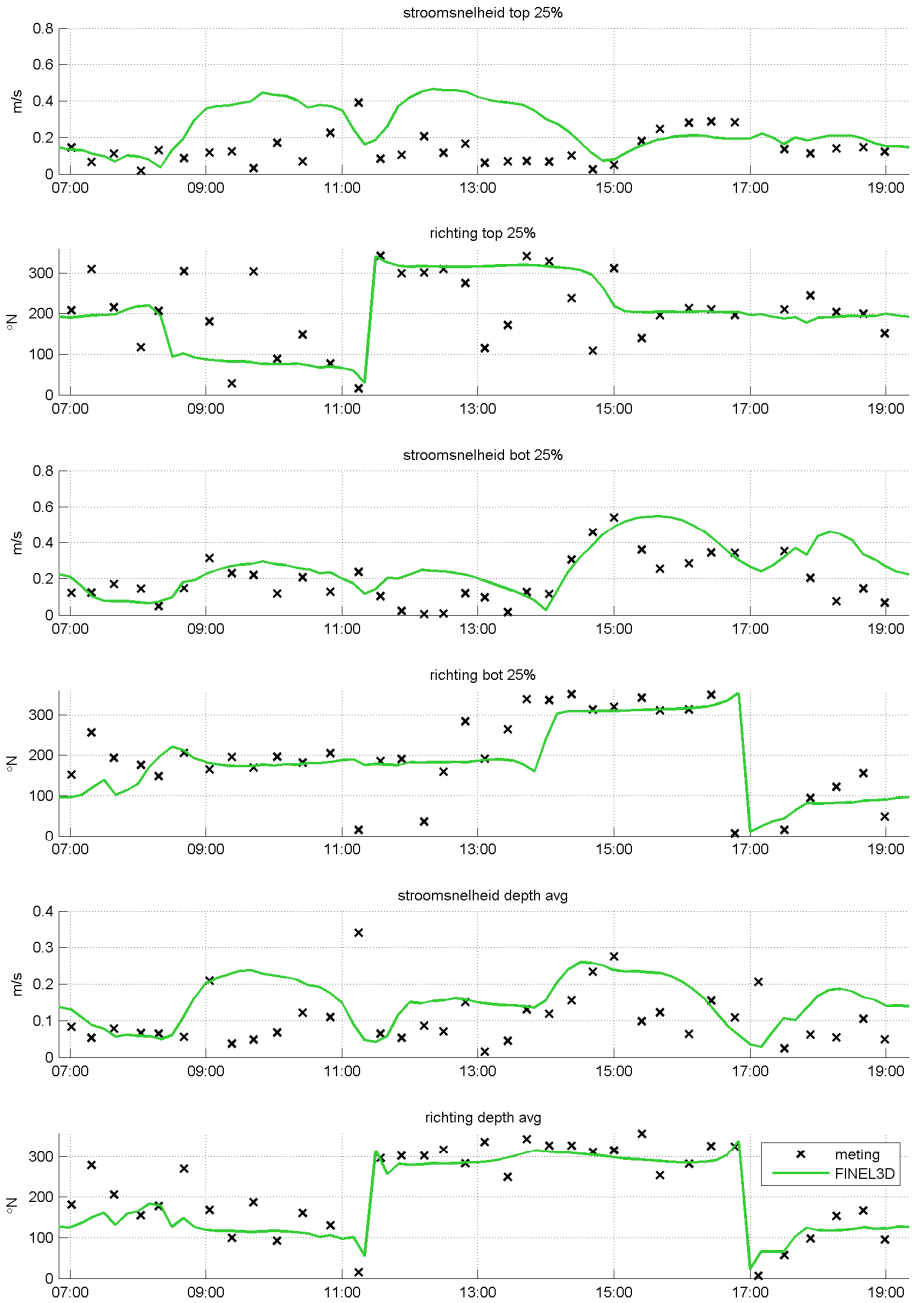


Figuur 2.12: Uitvoerpunten in de modelberekening ten behoeve van de kalibratie. Op de uitvoerpunten zijn voor zowel de meet- en modelresultaten tijdreeksen opgesteld.

De vergelijking tussen de meting en de modelresultaten op punt 9 van raai 2 in de haven wordt gepresenteerd in Figuur 2.13. Dit punt is gelegen in de Westerschelde. De bovenste twee panelen tonen de vergelijking van de stroomsnelheid en stroomrichting in het bovenste kwart van de waterkolom. De middelste twee panelen tonen de stroomsnelheid en stroomrichting in het onderste kwart van de waterkolom, en de onderste twee panelen tonen de dieptegemiddelde stroomsnelheid en stroomrichting. Zowel de gemodelleerde stroomsnelheid als stroomrichting komt in de figuur goed overeen met de meting.



Figuur 2.13: Vergelijking van de gemeten en gemodelleerde stroomsnelheid en stroomrichting op punt 9 van raai 2 in de Westbuitenhaven ten behoeve van de kalibratie van het FINEL3D model op 21 maart 2007. De locatie van het punt is getoond in Figuur 2.12.



Figuur 2.14: Vergelijking van de gemeten en gemodelleerde stroomsnelheid en stroomrichting op punt 7 van raai 2 in de Westbuitenhaven ten behoeve van de kalibratie van het FINEL3D model op 21 maart 2007. De locatie van het punt is getoond in Figuur 2.12.

Figuur 2.14 toont de gemeten en gemodelleerde stroming op punt 7 van raai 2. Dit punt bevindt zich in de monding van de haven. Uit de figuur is af te lezen dat het model de stroomsnelheid overschat. De oorzaak van deze overschatting is dat de hoofdstroming op de Westerschelde in het model iets dieper de haven indringt dan in de metingen het geval is.

Voor de overige punten in de haven worden de resultaten gepresenteerd in Bijlage A. De stroomsnelheid en stroomrichting vertonen ook voor de overige punten grotendeels goede overeenstemming. Bij lage snelheden (<0,2 m/s) is het verloop wat grilliger. Dit is voornamelijk in de stroomrichting duidelijk zichtbaar en wordt veroorzaakt door het feit dat de meetfout bij lage snelheden van vrijwel dezelfde orde is als de gemeten snelheden, en de stroomsnelheid en stroomrichting bij lage snelheden minder nauwkeurig te bepalen zijn.

Uit de vergelijking van de meetresultaten en de modelresultaten (Bijlage A) kan worden geconcludeerd dat het FINEL3D model van de Westerschelde goed in staat is om de gemeten stroomsnelheden en stroomrichtingen in de Westbuitenhaven van Terneuzen goed te reproduceren. Ook de driedimensionale stroming, waarbij er aan de bodem instroming plaatsvindt en aan het oppervlakte uitstroming en vice versa, wordt door het model goed gereproduceerd. Wel dringt de hoofdstroming op de Westerschelde te diep de haven in, waardoor in de monding kleine afwijkingen tussen de meting en het model zichtbaar zijn. Ondanks deze verschillen presteert het model goed en kan het model goed worden ingezet om de stroming in de Westbuitenhaven te modelleren en de effecten van diverse ingrepen op de complexe driedimensionale stroming te onderzoeken.

2.4 Validatie

Wanneer het model gekalibreerd is, wordt het nogmaals met metingen vergeleken voor een validatie op basis van een aparte meetset. Deze paragraaf behandelt eerst kort de gebruikte stroommetingen en gaat daarna in op de validatie van het FINEL3D model.

2.4.1 Gebruikte meetdata

Rijkswaterstaat heeft in 2011, 2012 en 2013 een puntmeting uitgevoerd in de monding van de Westbuitenhaven. De locatie van de puntmeting is weergegeven in Figuur 2.15. Op deze locatie is steeds een periode van enkele weken de stroomsnelheid en stroomrichting gemeten. De meetresultaten worden in voorliggende rapportage niet gepresenteerd, maar kunnen desgewenst opgevraagd worden via de Servicedesk Data van RWS. Deze data is gebruikt om het FINEL3D model te valideren.

2.4.2 Modelvalidatie

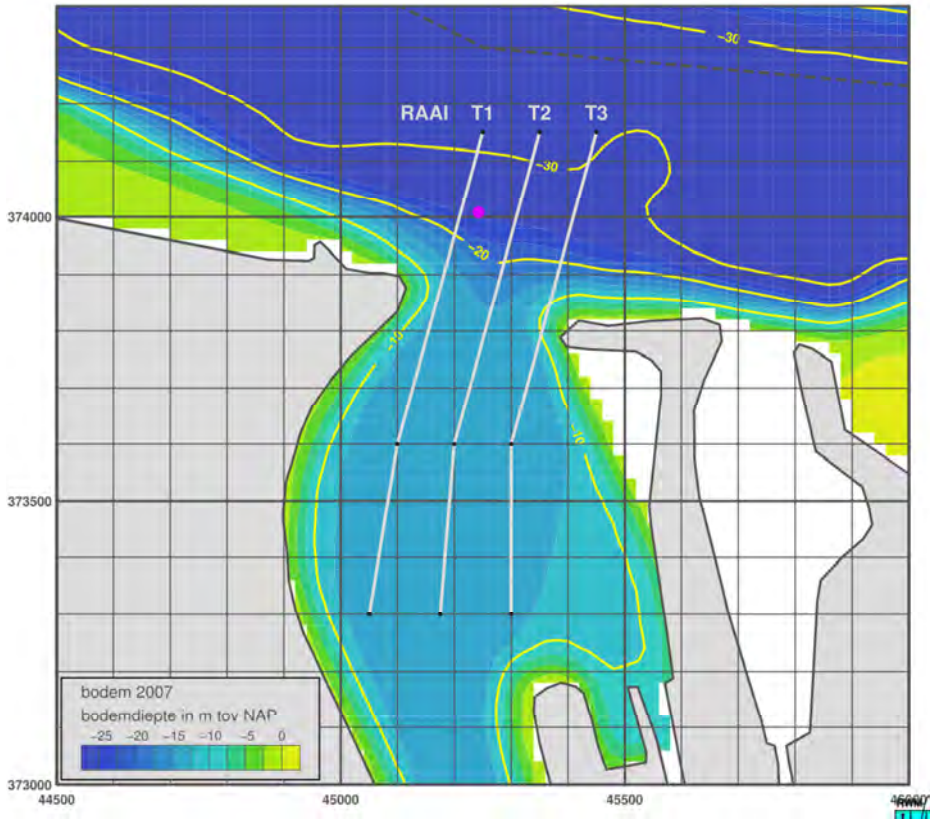
Om het vertrouwen in de tijdens de kalibratie gevonden modelinstellingen van het FINEL3D model toe te laten nemen, worden de modelresultaten vergeleken met metingen uit een andere periode. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de hierboven beschreven puntmetingen. Er is gekozen uit de drie beschikbare meetseries gebruik te maken van de serie uit 2012, omdat er van dit jaar een betrouwbare peiling van de Westerschelde beschikbaar is.

Om de meetresultaten met de modelresultaten in deze periode te kunnen vergelijken is een modelbodem gekozen die zo goed mogelijk overeenkomt met de werkelijke bodemligging in 2012. Hiertoe is de bodem toegepast zoals die is gepresenteerd in paragraaf 3.2.

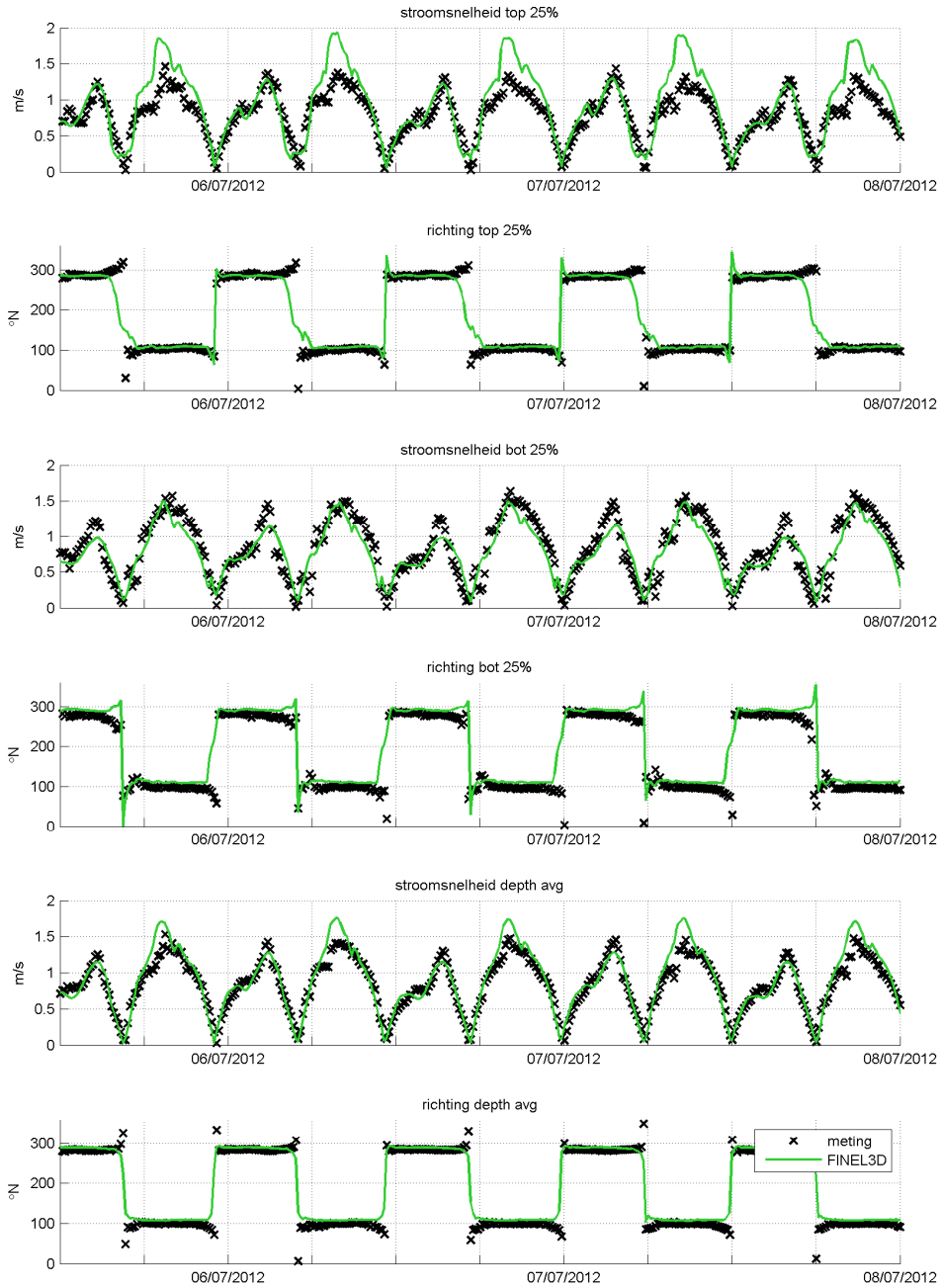
De vergelijking tussen de puntmeting en de modelresultaten wordt gepresenteerd in Figuur 2.16. Dit punt is gelegen in de Westerschelde. De bovenste twee panelen tonen de vergelijking van de stroomsnelheid en stroomrichting in het bovenste kwart van de waterkolom. De middelste twee panelen tonen de stroomsnelheid en stroomrichting in het onderste kwart van de waterkolom, en de onderste twee panelen tonen de dieptegemiddelde stroomsnelheid en stroomrichting.

Zowel de gemodelleerde stroomsnelheid tijdens eb als stroomrichting tijdens eb en vloed komt in de figuur goed overeen met de meting. Tijdens vloed wordt de maximale stroomsnelheid wat overschat. Van deze overschatting is alleen sprake in het bovenste deel van de waterkolom. In het onderste deel van de waterkolom komen de gemeten en gemodelleerde stroomsnelheid goed overeen. Deze overschatting is conform de voor de kalibratie vastgestelde afwijking dat de vloedstroom te ver de haven binnendringt.

Uit de vergelijking kan worden geconcludeerd dat het FINEL3D model, ondanks een enkele afwijking, ook voor een andere periode goed in staat is om de stroomsnelheid en stroomrichting in de Westerschelde bij Terneuzen goed te reproduceren.



Figuur 2.15: Het magenta punt geeft de locatie van de puntmetingen weer. Op deze locatie zijn voor zowel de meet- en modelresultaten tijdreeksen opgesteld.



Figuur 2.16: Vergelijking van de gemeten en gemodelleerde stroomsnelheid en stroomrichting in de monding van de Westbuitenhaven ten behoeve van de kalibratie van het FINEL3D model. De meting betreft een puntmeting. De locatie van het punt is getoond in Figuur 2.15.

2.5 Conclusies

Het FINEL3D model dat is opgezet om de stroming in de Westbuitenhaven van Terneuzen te kunnen berekenen presteert goed. Zowel met betrekking tot de waterstand in de gehele Westerschelde als de stroming in de Westbuitenhaven zelf komen meetresultaten en modelresultaten goed overeen. Het complexe driedimensionale stromingspatroon is in de modelresultaten goed zichtbaar. Een enkele afwijking treedt in de monding van de haven op, waar de stroomsnelheid in het model iets wordt overschat. Ondanks deze beperkte afwijkingen kan worden geconcludeerd dat het FINEL3D model goed presteert en kan worden ingezet om de stroming in de Westbuitenhaven te modelleren en de effecten van diverse ingrepen op de stroming in de haven te onderzoeken.

3 SCENARIOBEREKENINGEN FINEL3D

Het FINEL3D model van de Westerschelde is ingezet om de effecten van de verschillende ontwerpvarianten van de Westbuitenhaven op stroming in deze haven in kaart te brengen. De verschillende scenario's en het effect van de ingrepen op het stroombeeld worden in dit hoofdstuk behandeld.

3.1 Overzicht scenario's

Om de effecten van de verschillende varianten op de stroming in de Westbuitenhaven in kaart te brengen zijn diverse scenario's met het FINEL3D stromingsmodel doorgerekend. Om het verschil met de huidige situatie te kunnen bepalen is ook een zogenaamde referentiesituatie doorgerekend. De varianten die zijn doorgerekend zijn op basis van de voorkeursvariant. In deze berekeningen is uitgegaan van de situatie zonder spuien.

Daarnaast is een scenario doorgerekend waarbij is uitgegaan van de voorkeursvariant en een maximaal spuidebiet. Er wordt gespuid via het spuimiddel dat in de voorkeursvariant is opgenomen, via de Nieuwe Sluis. Het maximaal debiet van de Nieuwe Sluis bedraagt 230 m^3/s. Ook voor de referentiesituatie is een berekening met spuien uitgevoerd. Dit betreft een debiet van 50 m^3/s door de bestaande Middensluis.

Samenvattend zijn de volgende scenario's doorgerekend:

A. Referentie situatie, zonder spuien;
B. Voorkeursvariant, variant zonder spuimiddel, zonder spuien;
C. Voorkeursvariant, met spuidebiet van 230 m^3/s via de Nieuwe Sluis;
D. Referentiesituatie, met spuidebiet van 50 m^3/s via de bestaande Middensluis.

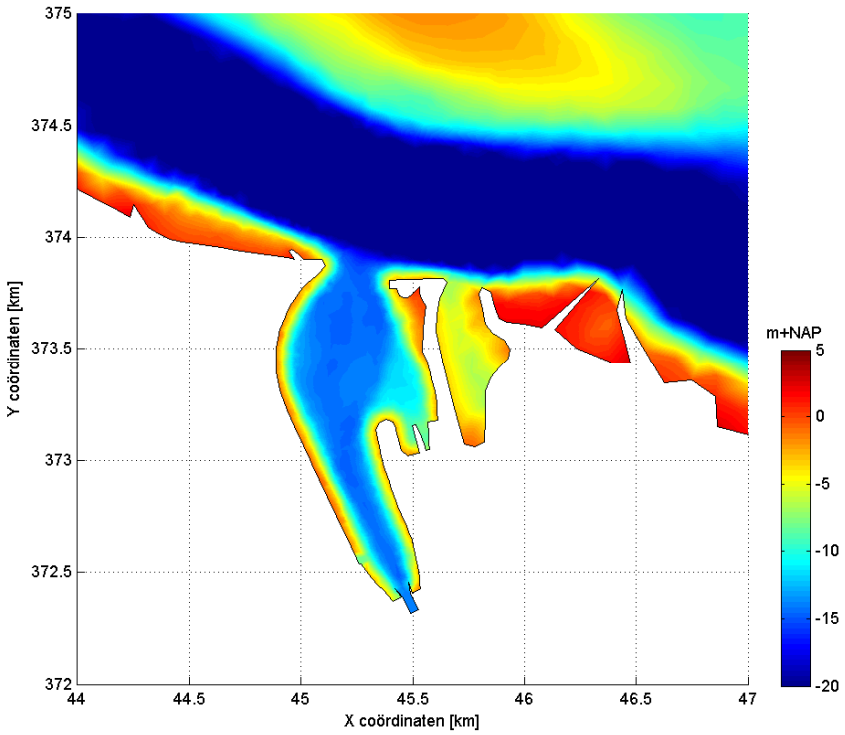
Van bovenstaande scenario's zijn scenario A tot en met C van belang voor het bepalen van de nautische omstandigheden in de haven. Scenario A is daarnaast van belang voor het bepalen van het baggerbezwaar in de haven, evenals scenario D.

3.2 A. Referentiesituatie

De referentiesituatie is gelijk aan de huidige situatie. Om dit scenario door te rekenen is hetzelfde rekenrooster gebruikt als tijdens de validatie van het model, zie paragraaf 2.4. Om de huidige situatie door te rekenen is uitgegaan van de bodemligging in 2013. Hiertoe zijn twee wijzigingen doorgevoerd ten opzichte van de modelbodem die in de kalibratie is gebruikt:

- De bodemliggingen van de Westerschelde is gebaseerd op de peiling van 2012 in plaats van de peiling van 2007 (RWS).
- De bodemligging in de Westbuitenhaven is gebaseerd op dieptemetingen van 2013, uitgevoerd door Baggerbedrijf de Boer & Van der Kamp (2011-2013).

Een zeer beperkt aantal locaties (vooral langs de rand van de haven) zijn conform de onderhoudsbaggervakken (zie Rijkswaterstaat Zeeland, 2011) op diepte gebracht. De resulterende bodemligging is weergegeven in Figuur 3.1.



Figuur 3.1: Modelbodem van het FINEL3D model ter plaatse van de Westbuitenhaven van Terneuzen voor de referentiesituatie.

De modelresultaten worden getoond in Figuur 3.2 tot en met Figuur 3.5, waarin de stroomsnelheden gemiddeld over de bovenste en onderste vijf meter van de waterkolom worden gepresenteerd. De figuren tonen de stroomsnelheid en richting tijdens maximale ebstroming (Figuur 3.2), de kentering van eb naar vloed (Figuur 3.3), maximale vloedstroming (Figuur 3.4) en de kentering van vloed naar eb (Figuur 3.5).

Tijdens eb zijn de stroomsnelheden in de haven laag en is geen duidelijk patroon in de stroming zichtbaar. Tijdens vloed zijn de stroomsnelheden beduidend hoger en draait er een horizontale neer in de haven. Opvallend hierbij is dat de hoogte stroomsnelheden in het onderste deel van de waterkolom voorkomen. Daarnaast vindt in het onderste deel van de waterkolom hoofdzakelijk instroming plaats, en in het bovenste deel van de waterkolom voornamelijk uitstroming. Desondanks is de horizontale neer zowel onder- als bovenin de waterkolom duidelijk zichtbaar.

Rondom kentering is de stroomrichting in het bovenste en onderste deel van waterkolom tegenovergesteld. Dit is zowel het geval bij de kentering van eb naar vloed als de kentering van vloed naar eb. Bij de kentering van eb naar vloed vindt aan het oppervlak instroming plaats en aan de bodem uitstroming. Bij de kentering van vloed naar eb, treedt juist aan de bodem instroming op en aan het oppervlak uitstroming.

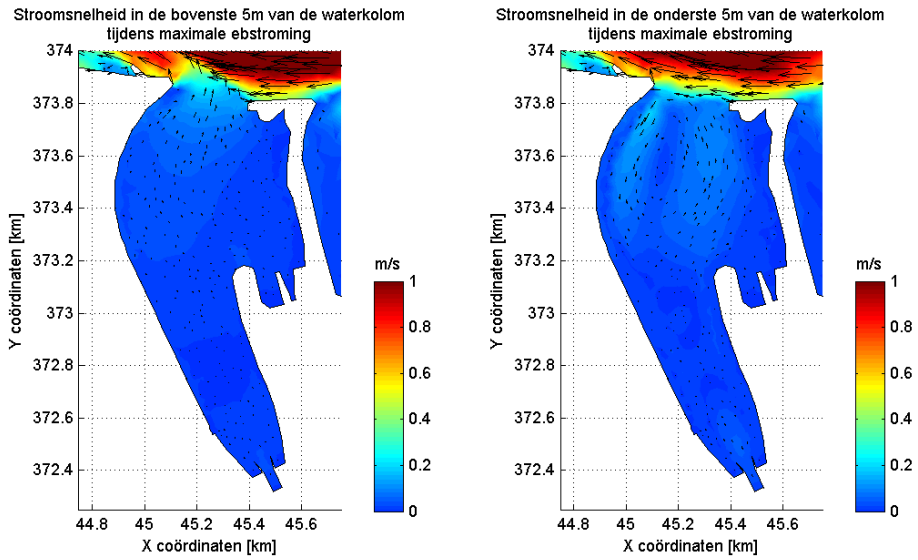
De oorzaak van deze driedimensionale stroming met instroming aan het oppervlak en uitstroming aan de bodem, en vice versa, zijn de dichtheidsverschillen in de Westerschelde. Tijdens vloed neemt de dichtheid in de Westerschelde bij Terneuzen toe door de aanvoer van zouter water uit de Noordzee. De dichtheid van het water in de Westerschelde is maximaal op het moment van de kentering van vloed naar eb. Tijdens eb neemt de dichtheid van het water weer langzaam af door

toevoer van zoeter water. Het water heeft de laagste dichtheid op het moment van de kentering van eb naar vloed, wanneer de aanvoer van zoeter water stopt.

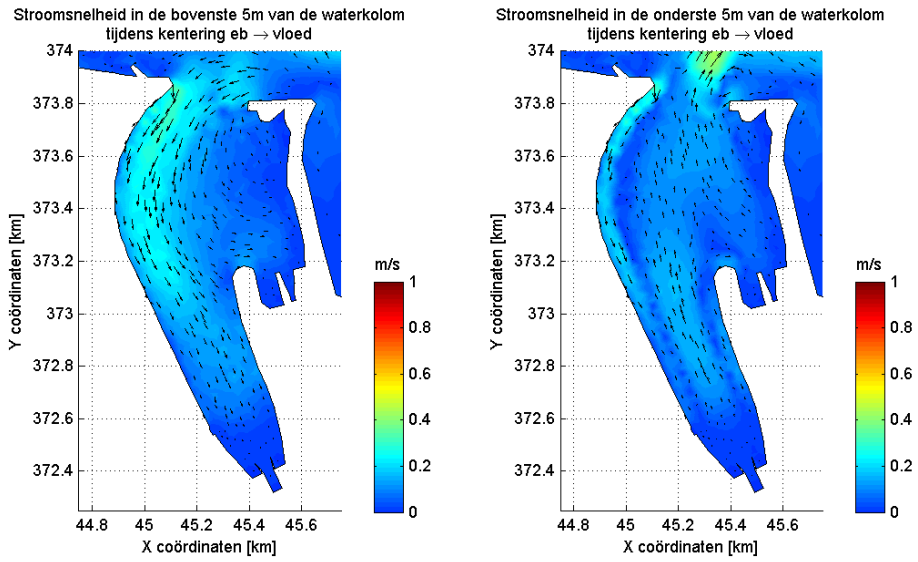
De dichtheid in de Westbuitenhaven is vaak hoger dan de dichtheid in de Westerschelde. Rond de kentering tijdens hoogwater is de dichtheid van het water in de Westerschelde echter hoger dan de dichtheid van het water in de Westbuitenhaven. Exact op dat moment vindt er in de Westbuitenhaven instroming aan de bodem plaats, terwijl aan het oppervlak sprake is van uitstroming als gevolg van de eb. Dat juist op dit moment instroming aan de bodem plaatsvindt, geeft aan dat deze instroming het gevolg is van het verschil in dichtheid tussen het water van de Westbuitenhaven en het water van de Westerschelde, ofwel dat er sprake is van dichtheidsstroming.

Er kan worden gesteld dat er sprake is van meerdere mechanismen die de stroming in de monding van de Westbuitenhaven bepalen:

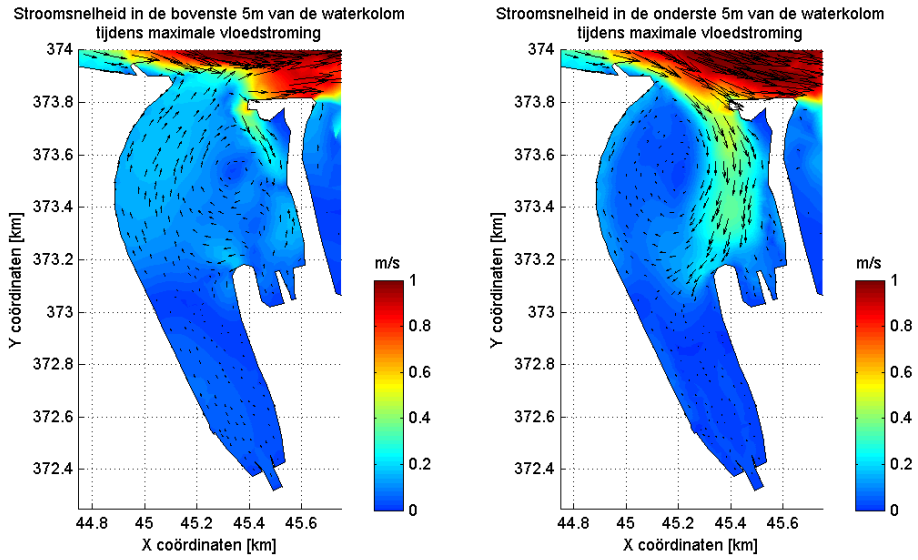
- Getijdestroming: de waterstand in de Westbuitenhaven volgt de waterstand in de Westerschelde. Dit proces blijkt voornamelijk dominant in het bovenste deel van de waterkolom. Tijdens vloed stroomt er water de Westbuitenhaven in en stijgt de waterspiegel. Tijdens eb stroomt er water de Westbuitenhaven uit en daalt de waterspiegel.
- Dichtheidsstroming: water met een hoge dichtheid stroomt naar plaatsen met water met een lage dichtheid. Dit proces is voornamelijk dominant in het onderste deel van de waterkolom. Tijdens de eerste helft van de eb is de dichtheid in de Westerschelde hoger dan de dichtheid in de Westbuitenhaven, en is de stroming de haven in gericht. Tijdens het eerste deel van de vloed is de dichtheid in de Westbuitenhaven hoger dan in de Westerschelde, en is de stroming de haven uit gericht.



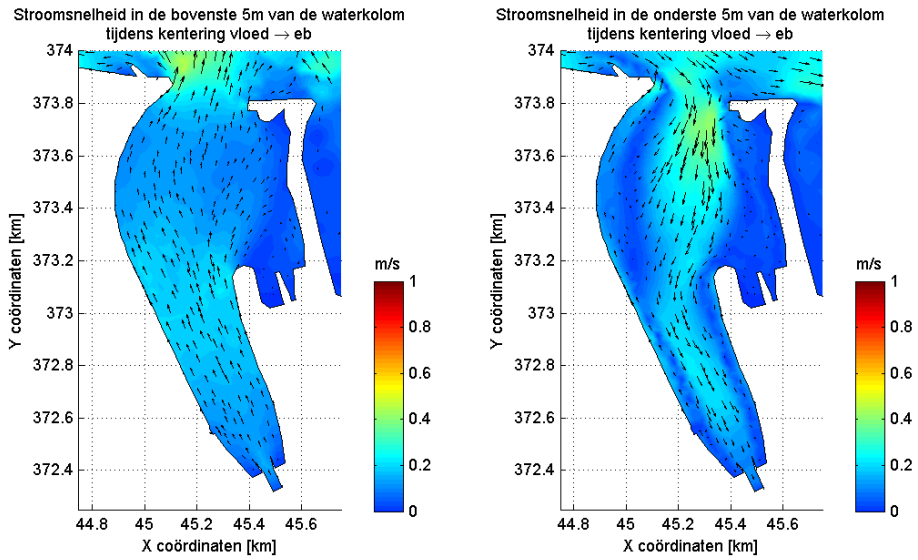
Figuur 3.2: Stroomsnelheid voor de referentiesituatie tijdens maximale ebstroming boven- en onderin de waterkolom.



Figuur 3.3: Stroomsnelheid voor de referentiesituatie tijdens de kentering van eb naar vloed boven- en onderin de waterkolom.



Figuur 3.4: Stroomsnelheid voor de referentiesituatie tijdens maximale vloedstroming boven- en onderin de waterkolom.



Figuur 3.5: Stroomsnelheid voor de referentiesituatie tijdens de kentering van vloed naar eb boven- en onderin de waterkolom.

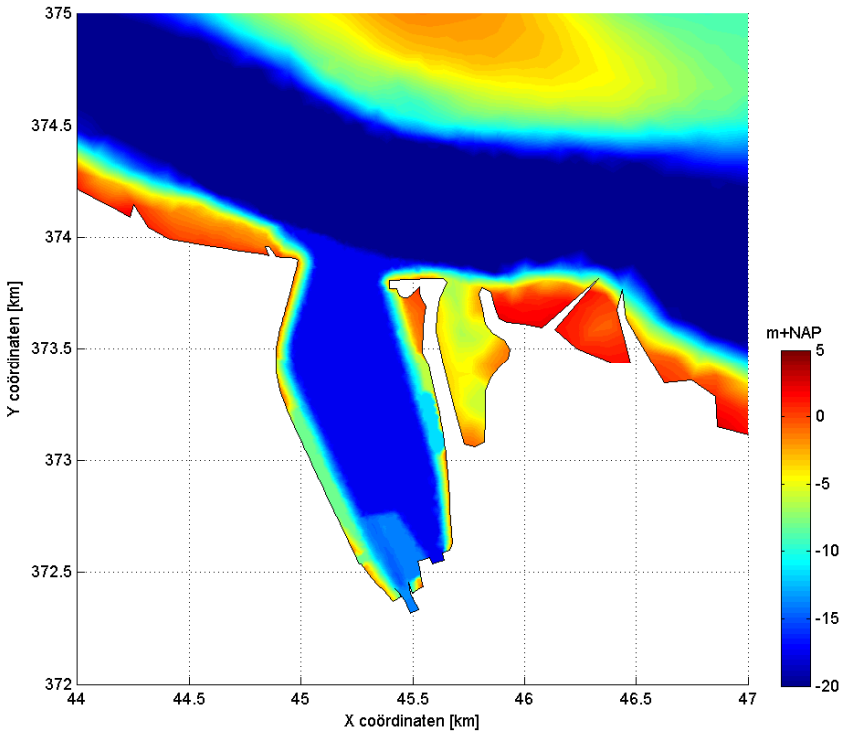
3.3 B. Voorkeursvariant zonder spuimiddel

De aanleg van een nieuwe zeesluis tussen de Westbuitenhaven en het Kanaal Gent-Terneuzen heeft gevolgen voor de geometrie van de haven. Ten opzichte van de huidige situatie worden in het ontwerp van de voorkeursvariant zonder spuimiddel diverse wijzigingen voorgesteld, en wordt de haveningang breder, de haven dieper, en neemt het oppervlak van (het zuidelijke deel van) de haven significant toe.

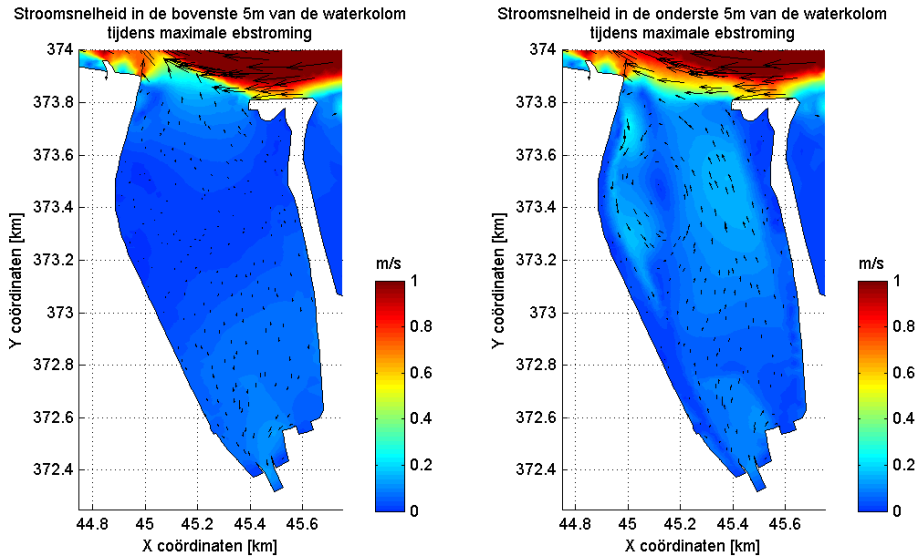
Om de voorkeursvariant zonder spuimiddel met het FINEL3D model door te kunnen rekenen zijn enkele aanpassingen in de modelschematisatie aangebracht, waaronder het aanpassen van de modeloutline en het uitbreiden van het rooster en een lokale aanpassing van het rooster ter plaatse van het spuimiddel (t.o.v. oorspronkelijk VKV met spuimiddel). Deze is uitgevoerd op basis van de door LievenseCSO geleverde tekening en verder modeling doorgegeven (Voorkeursvariant Alternatief, VNZT-00-T-SO-00-D007). Daarnaast is de bodemligging aangepast.

De modelinstellingen zijn gelijk gebleven. De geometrie van de voorkeursvariant zonder spuimiddel en de bijbehorende bodemligging wordt gepresenteerd in Figuur 3.6.

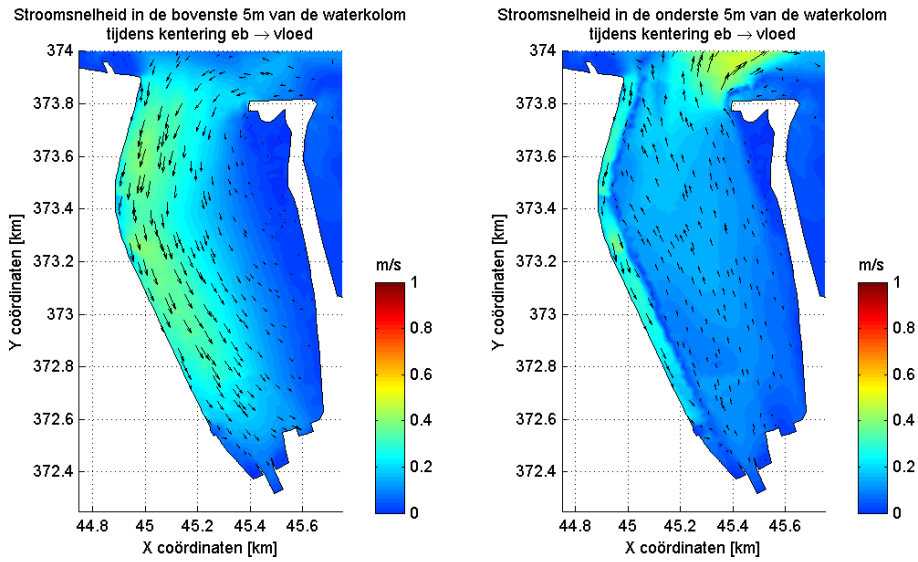
De modelresultaten worden getoond in Figuur 3.7 tot en met Figuur 3.10, waarin de stroomsnelheden gemiddeld over de bovenste en onderste vijf meter van de waterkolom worden gepresenteerd. De figuren tonen de stroomsnelheid en richting tijdens maximale ebstroming (Figuur 3.7), de kentering van eb naar vloed (Figuur 3.8), maximale vloedstroming (Figuur 3.9) en de kentering van vloed naar eb (Figuur 3.10).



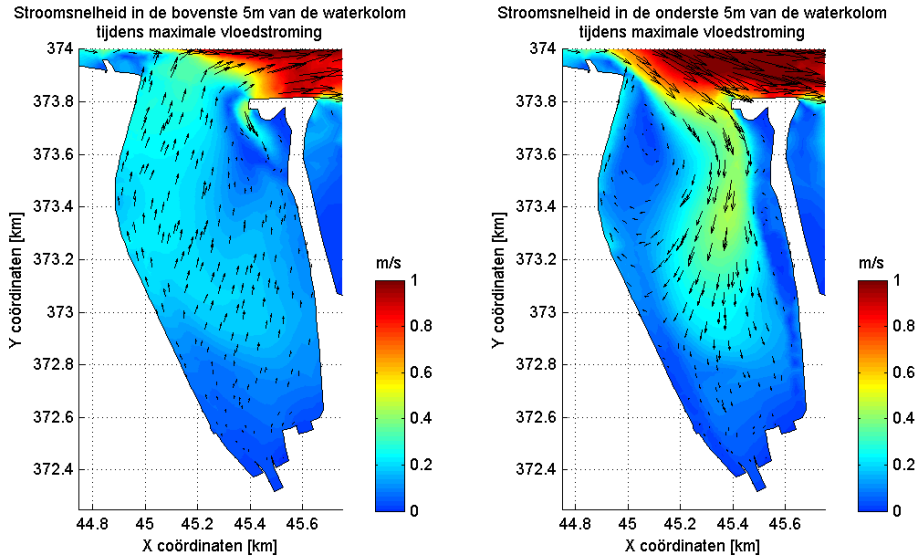
Figuur 3.6: Modelbodem van het FINEL3D model ter plaatse van de Westbuitenhaven van Terneuzen voor de voorkeursvariant zonder spuimiddel.



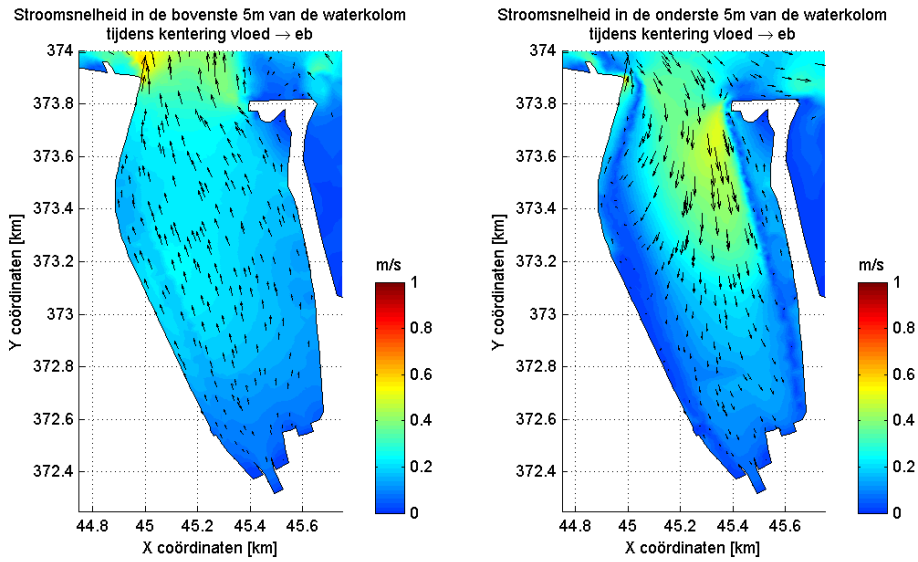
Figuur 3.7: Stroomsnelheid in het geval van de voorkeursvariant zonder spuimiddel tijdens maximale ebstroming boven- en onderin de waterkolom.



Figuur 3.8: Stroomsnelheid in het geval van de voorkeursvariant zonder spuimiddel tijdens de kentering van eb naar vloed boven- en onderin de waterkolom.



Figuur 3.9: Stroomsnelheid in het geval van de voorkeursvariant zonder spuimiddel tijdens maximale vloedstroming boven- en onderin de waterkolom.

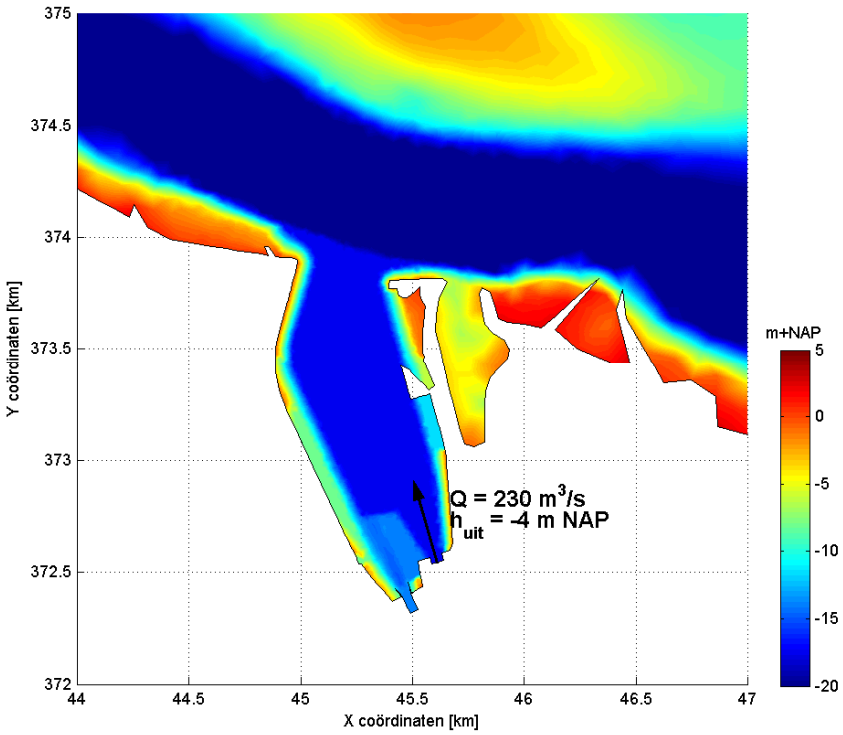


Figuur 3.10: Stroomsnelheid in het geval van de voorkeursvariant zonder spuimiddel tijdens de kentering van vloed naar eb boven- en onderin de waterkolom.

3.4 C. Voorkeursvariant met spuien via de Nieuwe Sluis

Naast een variant zonder spuien, is het ook mogelijk om te spuien via de aanwezige sluizen. Ook het spuien via een van de sluizen beïnvloedt de stroming in de Westbuitenhaven, en kan hinder voor de scheepvaart veroorzaken. Wanneer er gespuid wordt via de Nieuwe Sluis, kan bijvoorbeeld het veilig benaderen van de naastgelegen Westsluis in het geding komen en vice versa. Om te onderzoeken wat de stroomsnelheden in de haven zijn wanneer er gespuid wordt via de Nieuwe Sluis, wordt de stroming in het geval van de voorkeursvariant met een maximaal spuidebiet van 230 m^3/s met het FINEL3D model berekend.

Het spuidebiet wordt gemodelleerd door het toepassen van een puntbron op de hoogte waar de kleppen in de sluis gepland zijn, op -4 m NAP. Het spuiwater is zoeter dan het water in de haven, en heeft een PSU-waarde van 5. Omdat de gradiënten in de stroming tijdens spuien naar verwachting hoog zijn, is het modelrooster ter plaatse van het spuimiddel verfijnd. Voor de geometrie en bijbehorende bodemligging wordt verwezen naar Figuur 3.11. Ook voor deze berekening is met TUDflow3D berekeningen voor het gebied rondom de sluis gecontroleerd of de resulterende stroming uit de FINEL3D berekeningen correct is, en is het FINEL3D model voldoende accuraat om het effect van spuien op de stroming in de haven te berekenen.

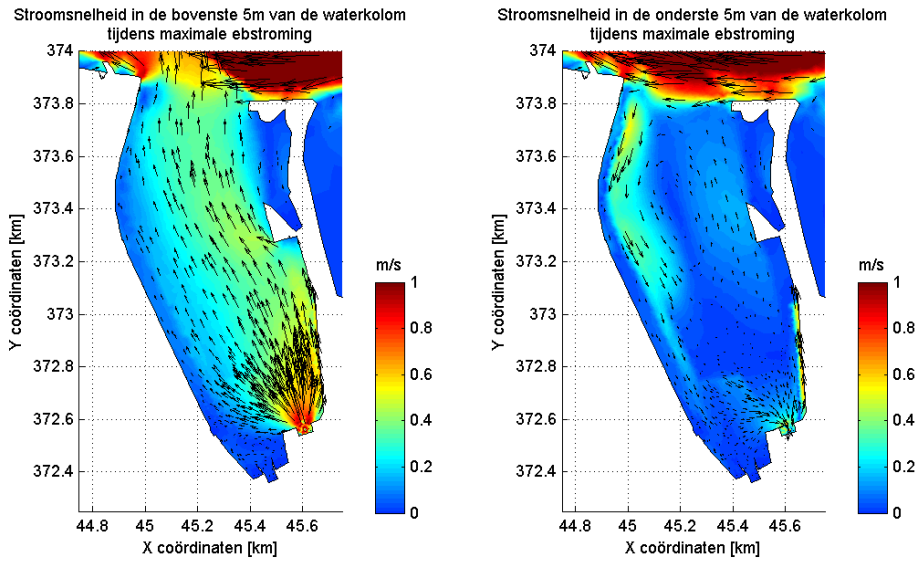


Figuur 3.11: Modelbodem van het FINEL3D model ter plaatse van de Westbuitenhaven van Terneuzen voor de voorkeursvariant. De pijl geeft de locatie en richting van het spuidebiet uit de Nieuwe Sluis aan.

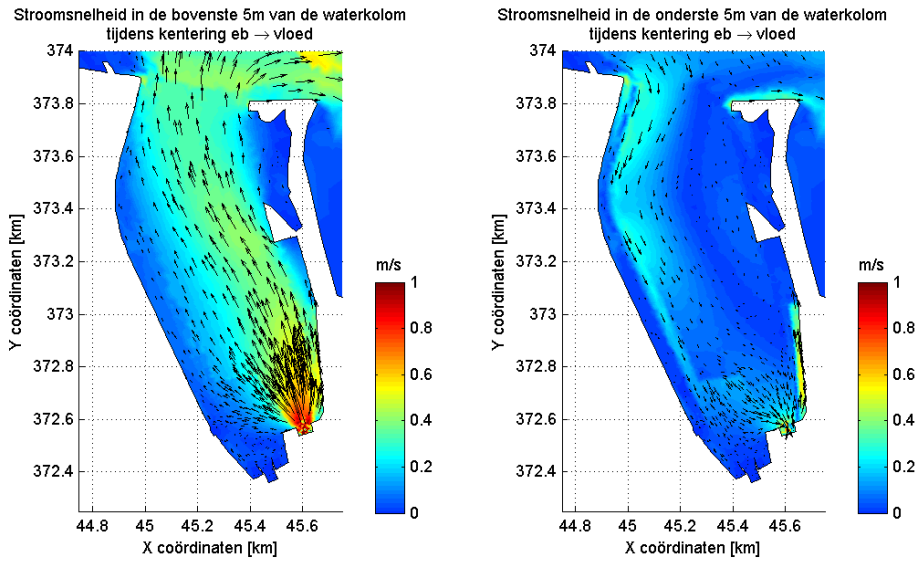
De modelresultaten worden getoond in Figuur 3.12 tot en met Figuur 3.15, waarin de stroomsnelheden gemiddeld over de bovenste en onderste vijf meter van de waterkolom worden gepresenteerd. De figuren tonen de stroomsnelheid en richting tijdens maximale ebstroming (Figuur 3.12), de kentering van eb naar vloed (Figuur 3.13), maximale vloedstroming (Figuur 3.14) en de kentering van vloed naar eb (Figuur 3.15).

In de figuren is te zien dat de spuistroming de oppervlaktestroming domineert. In alle fasen van het getij is in de gehele haven een uitgaande stroming zichtbaar, met snelheden van 0,4 m/s tot 0,5 m/s. Langs de vaarroute naar de Westsluis kan scheepvaart een dwarsstroming van maximaal 0,25 m/s ervaren. De stroomsnelheden zijn tijdens vloed wat hoger dan tijdens eb. De modeluitkomsten tonen dat het zoetere spuiwater zich naar het oppervlak verplaatst en als relatief dunne laag aan het oppervlak uitstroomt. Tijdens eb en de kentering na eb zijn de stroomsnelheden aan de bodem laag, en tijdens vloed en de kentering na vloed zijn de snelheden van de inkomende stroming aanzienlijk. Omdat tijdens vloed de waterspiegel in de haven stijgt, en er aan het oppervlakte uitstroming plaatsvindt als gevolg van spuien, wordt de aanvoer van water volledig via de bodem gestuurd.

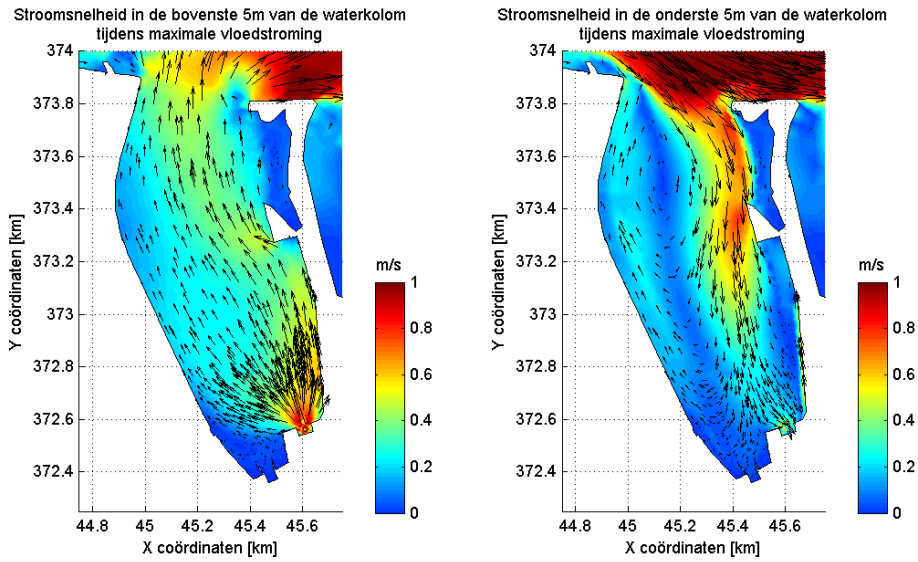
Ook hier geldt dat in het model gedurende de hele tijcyclus een constant spuidebiet van 230 m^3/s is opgelegd. In werkelijkheid is het spuidebiet afhankelijk van de buitenwaterstand en enkel bij laag water 230 m^3/s. Bij hoog water is het spuidebiet zelfs 0 m^3/s. De resultaten bij hoogwater zijn daarmee niet representatief voor de werkelijke situatie.



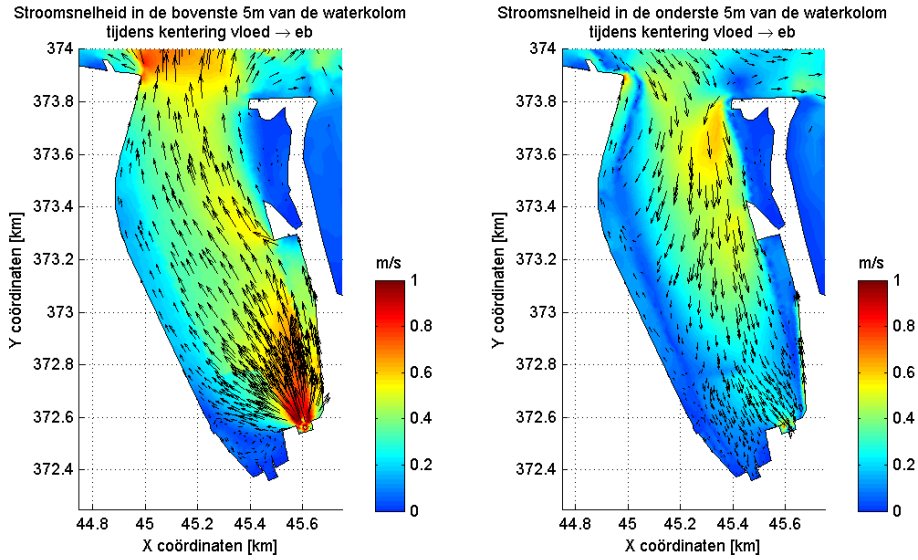
Figuur 3.12: Stroomsnelheid in het geval van de voorkeursvariant met spuien van 230 m^3/s via de Nieuwe Sluis tijdens maximale ebstroming boven- en onderin de waterkolom.



Figuur 3.13: Stroomsnelheid in het geval van de voorkeursvariant met spuien van 230 m^3/s via de Nieuwe Sluis tijdens de kentering van eb naar vloed boven- en onderin de waterkolom.



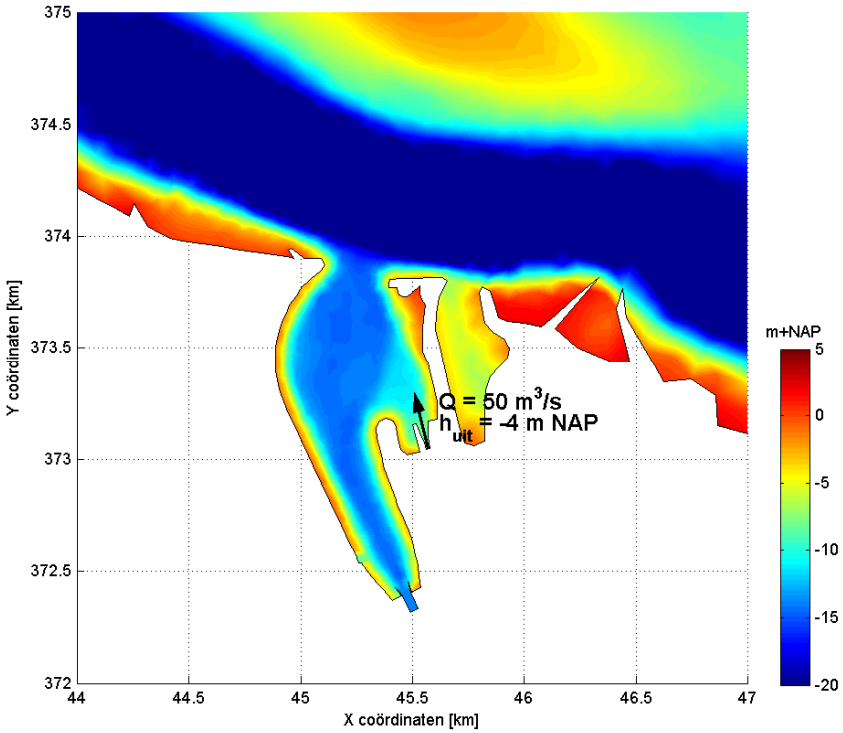
Figuur 3.14: Stroomsnelheid in het geval van de voorkeursvariant met spuien van 230 m^3/s via de Nieuwe Sluis tijdens maximale vloedstroming boven- en onderin de waterkolom.



Figuur 3.15: Stroomsnelheid in het geval van de voorkeursvariant met spuien van 230 m^3/s via de Nieuwe Sluis tijdens de kentering van vloed naar eb boven- en onderin de waterkolom.

3.5 D. Referentiesituatie met spuien via de Middensluis

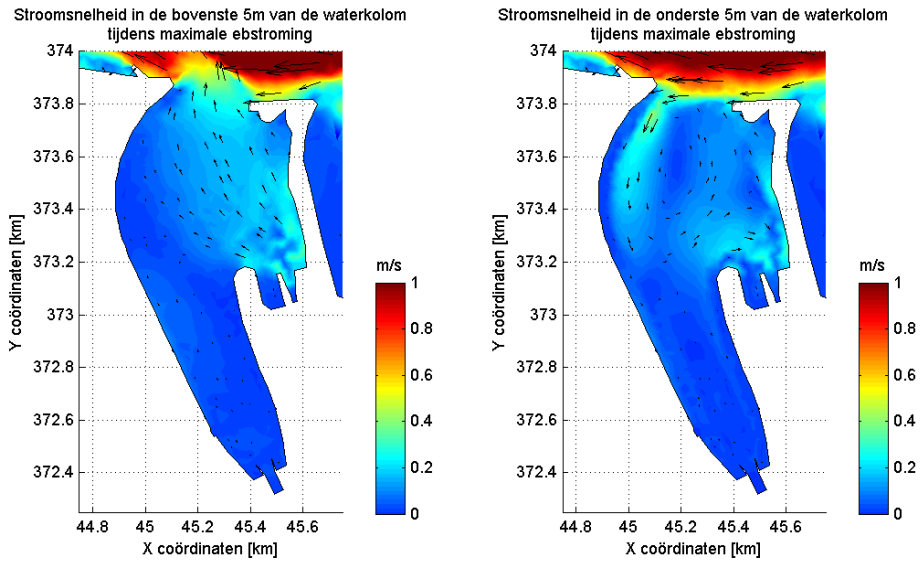
Om te onderzoeken in hoeverre spuien de sedimentatie in de Westbuitenhaven beïnvloedt is de referentiesituatie doorgerekend met een jaargemiddeld spuidebiet van 50 m^3/s via de Middensluis. Het spuidebiet wordt gemodelleerd door het toepassen van een puntbron op -4 m NAP. Het spuiwater is zoeter dan het water in de haven, en heeft een PSU-waarde van 5. Er is gebruik gemaakt van hetzelfde rooster als in scenario A. Voor de geometrie en bijbehorende bodemligging wordt verwezen naar Figuur 3.16.



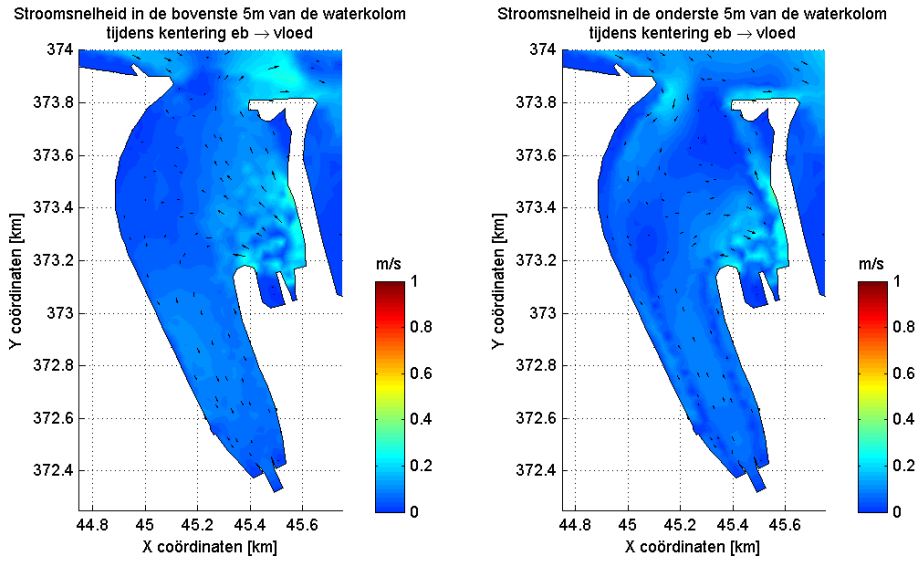
Figuur 3.16: Modelbodem van het FINEL3D model ter plaatse van de Westbuitenhaven van Terneuzen voor de referentiesituatie. De pijl geeft de locatie en richting van het spuidebiet uit de Middensluis aan.

De modelresultaten worden getoond in Figuur 3.17 tot en met Figuur 3.20, waarin de stroomsnelheden gemiddeld over de bovenste en onderste vijf meter van de waterkolom worden gepresenteerd. De figuren tonen de stroomsnelheid en richting tijdens maximale ebstroming (Figuur 3.17), de kentering van eb naar vloed (Figuur 3.18), maximale vloedstroming (Figuur 3.19) en de kentering van vloed naar eb (Figuur 3.20).

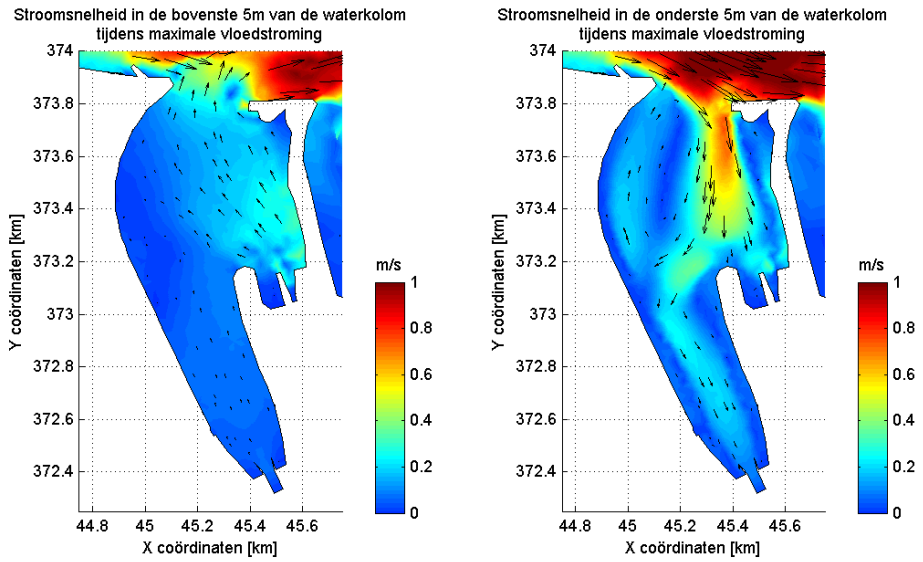
Als gevolg van het spuien vindt er aan het oppervlak in alle fasen van het getij uitstroming plaats, doordat het zoete spuiwater over het zoutere havenwater heen stroomt. De bijbehorende stroomsnelheden zijn echter beperkt. De stroming in het onderste deel van de waterkolom wordt nauwelijks beïnvloed.



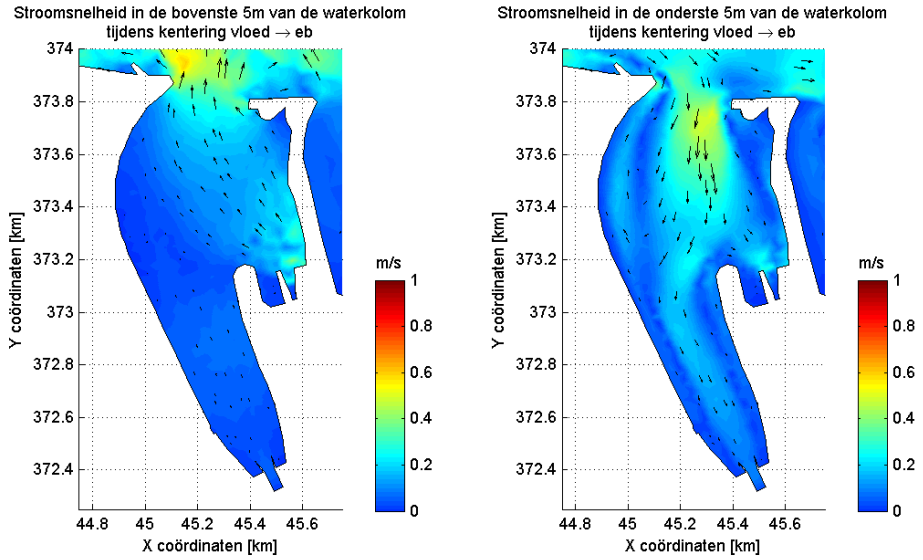
Figuur 3.17: Stroomsnelheid voor de referentiesituatie met spuien van 50 m^3/s via de Middensluis tijdens maximale ebstroming boven- en onderin de waterkolom.



Figuur 3.18: Stroomsnelheid voor de referentiesituatie met spuien van 50 m^3/s via de Middensluis tijdens kentering van eb naar vloed boven- en onderin de waterkolom.



Figuur 3.19: Stroomsnelheid voor de referentiesituatie met spuien van 50 m^3/s via de Middensluis tijdens maximale vloedstroming boven- en onderin de waterkolom.



Figuur 3.20: Stroomsnelheid voor de referentiesituatie met spuien van 50 m^3/s via de Middensluis tijdens kentering van vloed naar eb boven- en onderin de waterkolom.

3.6 Conclusies

Aan de hand van de FINEL3D modelberekeningen kan worden gesteld dat er sprake is van meerdere mechanismen die de stroming in de monding van de Westbuitenhaven bepalen:

- Getijdestroming: de waterstand in de Westbuitenhaven volgt de waterstand in de Westerschelde. Dit proces blijkt voornamelijk dominant in het bovenste deel van de waterkolom. Tijdens vloed stroomt er water de Westbuitenhaven in en stijgt de waterspiegel. Tijdens eb stroomt er water de Westbuitenhaven uit en daalt de waterspiegel.
- Dichtheidsstroming: water met een hoge dichtheid stroomt naar plaatsen met water met een lage dichtheid. Dit proces is voornamelijk dominant in het onderste deel van de waterkolom. Tijdens de eerste helft van de eb is de dichtheid in de Westerschelde hoger dan de dichtheid in de Westbuitenhaven, en is de stroming de haven in gericht. Tijdens het eerste deel van de vloed is de dichtheid in de Westbuitenhaven hoger dan in de Westerschelde, en is de stroming de haven uit gericht.

In de voorkeursvariant (VKV), waarbij de havenmond verbreedt en de haven verdiept is, neemt de dichtheidsstroming een meer prominente rol in dan in de referentiesituatie het geval is. Zowel boven als onderin de waterkolom zijn de stroomsnelheden in de voorkeursvariant hoger dan in de referentiesituatie. Dit gaat op voor alle fasen van het getij. De voorkeursvariant met en zonder spuimiddel zijn wat dit betreft niet onderscheidend.

Spuien van overtollig (zoet) water via de Nieuwe Sluis heeft een uit de haven gerichte stroming aan het oppervlak tot gevolg. Het zoete spuiwater stroomt als een relatief dunne laag over het zoutere water in de haven heen. Dit is onafhankelijk van de diepte waarop het spuiwater de haven inkomt.

4 ANALYSE SEDIMENTATIE

In eerdere fasen van de MER van de Nieuwe Zeesluis is voor het uitrekenen van het toekomstige baggerbezwaar van de Westbuitenhaven uitgegaan van een 2D benadering. Op basis van deze berekeningen en een *expert judgement* werd het verwachte jaarlijks baggervolume geschat op 700 duizend m^3/jaar voor de voorkeurvariant (VKV), in vergelijking met het huidige gemiddelde van 440 duizend m^3/jaar. De 2D aanpak kwam voort uit de overweging dat door de relatieve ondiepte van de Westbuitenhaven ten opzichte van de Westerschelde, dichtheidstroming van ondergeschikt belang is. Doordat in geval van de Nieuwe Zeesluis de WBH significant dieper wordt is het mogelijk dat dichtheidstroming toch een belangrijkere rol gaat spelen.

In dit hoofdstuk wordt het belang van dichtheidstroming voor het baggerbezwaar geschat op basis van een tweetal kentallen, welke worden gebruikt om een verbeterde inschatting van het verwachte jaarlijkse baggerbezwaar voor de VKV te maken.

4.1 Definitie uitwisselingskengetal en toenamekengetal

De waterstand in de Westbuitenhaven volgt de waterstand in de Westerschelde. Om de waterstand in de Westbuitenhaven gelijk te houden aan die in de Westerschelde stroomt elke getijcyclus water de haven in en weer uit. Het volume water dat benodigd is om de waterstand in de Westerschelde te kunnen volgen is het kombergingsvolume. In werkelijkheid spelen andere processen echter ook vaak een rol, en is het volume water dat tijdens een getijcyclus de haven in en uit stroomt, het uitwisselingsvolume, groter dan het kombergingsvolume. Een voorbeeld hiervan is neerstroming. Wanneer er een neer in de haveningang draait, stroomt er aan de ene kant van de ingang water de haven in, en aan de andere kant van de ingang water uit.

De wateruitwisseling in de Westbuitenhaven is van belang omdat het water van de Westerschelde sediment de haven in transporteert. Hoe hoger de wateruitwisseling, hoe hoger de sedimentaanvoer en hoe hoger de aanslibbing in de haven. Omdat het sedimenttransport en de wateruitwisseling aan elkaar gekoppeld zijn, kan de verhouding tussen het kombergingsvolume en het werkelijke uitwisselingsvolume worden gebruikt als maat voor het sedimenttransport de haven in. Wanneer deze verhouding voor de verschillende scenario's bepaald worden, kan het effect van de ingreep op het uitwisselingsvolume en daarmee de sedimentatie in de haven worden bepaald.

De komberging van de haven, ofwel de hoeveelheid water die elk getij de haven in en uit stroomt om waterbeweging op de Westerschelde te volgen, is gelijk aan het verschil tussen de laagwaterstand en hoogwaterstand, vermenigvuldigd met het oppervlak van de haven:

$$V_{komberging} = dh * A_{komberging}$$

In bovenstaande formulering wordt er van uitgegaan dat tijdens vloed het water over de gehele dwarsdoorsnede van de haveningang instroomt en dat het water tijdens eb over de gehele dwarsdoorsnede van de haveningang uitstroomt.

Tijdens bijvoorbeeld neerstroming is er sprake van instroming en uitstroming tegelijk. Wanneer het netto volume door de ingang wordt bepaald door het instroomvolume en uitstroomvolume bij elkaar op te tellen, is dit gelijk aan $V_{komberging}$. Immers, de waterstand in de haven volgt nog steeds de waterstand in de Westerschelde.

$$V_{netto} = V_{komberging} = \frac{V_{in} + V_{uit}}{2}$$

De totale wateruitwisseling in de haven is echter veel hoger dan $V_{komberging}$:

$$V_{uitwisseling} = \frac{|V_{in}| + |V_{uit}|}{2}$$

De verhouding r_V tussen het kombergingsvolume $V_{komberging}$ en het werkelijke uitwisselingsvolume $V_{uitwisseling}$ wordt gebruikt om te bepalen hoe belangrijk driedimensionale effecten zoals dichtheidsstroming op de haven zijn:

$$r_V = \frac{V_{uitwisseling}}{V_{komberging}}$$

Hoe groter de waarde van r_V is, hoe meer water er de haven in getransporteerd wordt. Wanneer de waarde van het kengetal bijvoorbeeld 5 bedraagt, vindt er vijf keer meer wateruitwisseling in de haven plaats dan voor komberging strikt noodzakelijk is. De laagste waarde die r_V kan bereiken is gelijk aan 1. De werkelijke uitwisseling en de minimale uitwisseling benodigd voor komberging zijn in dat geval aan elkaar gelijk.

Om het effect van de verschillende ingrepen op de driedimensionaliteit in de haven de onderzoeken, zal de waarde van r_V in de volgende paragrafen voor verschillende modelberekeningen worden vergeleken met de waarde van r_V van de referentiesituatie.

Wanneer een ontwerpvariant een waarde van r_V lager dan de waarde van r_V van de referentiesituatie heeft, hebben de aanpassingen in de geometrie waarschijnlijk een positief effect op de driedimensionaliteit, dat wil zeggen, de hoeveelheid water die als gevolg van bijvoorbeeld dichtheidseffecten in verhouding bovenop de komberging de haven in getransporteerd wordt, neemt af. Dit is vervolgens gunstig voor het sedimenttransport de haven in. Levert een ontwerpscenario juist een hogere r_V, dan heeft de gewijzigde geometrie een negatief effect op de driedimensionale stroming in de haven.

Naast het uitwisselingskengetal r_V wordt een tweede kengetal gedefinieerd, het toenamekengetal r_T. Dit toenamekengetal geeft de verhouding tussen de totale wateruitwisseling in de referentiesituatie en verschillende scenario's:

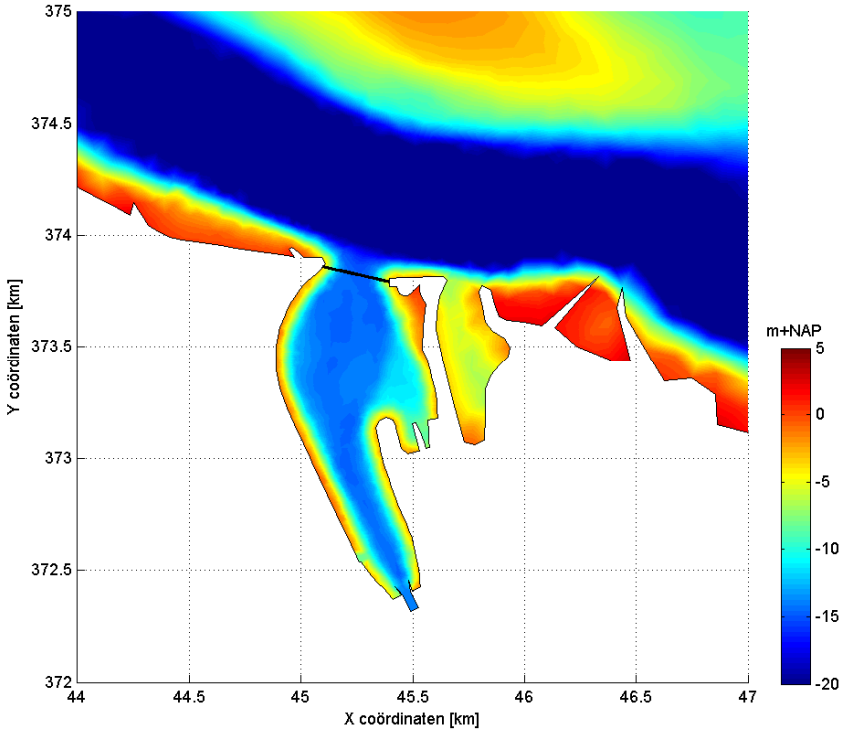
$$r_T = \frac{V_{uitwisseling,scenario}}{V_{uitwisseling,ref}}$$

Omdat wateruitwisseling en sedimentatie gerelateerd zijn, wordt het toenamekengetal gebruikt om een indicatie te geven van het effect van de ingrepen in de haven op de sedimentatie. Wanneer de waarde van r_T hoger is dan 1, dan leidt de ingreep tot meer sedimentatie in de haven. In de waarde van r_T kleiner dan 1, dan leidt de ingreep juist tot minder sedimentatie in de haven.

4.2 A. Kengetallen voor de referentiesituatie

Het uitwisselingskengetal voor de Westbuitenhaven wordt bepaald aan de hand van het debiet door de monding van de haven. De doorsnede waardoor het debiet in de referentiesituatie bepaald wordt is weergegeven in Figuur 4.1.

In de referentiesituatie treden verschillende stromingsverschijnselen op, waaronder horizontale neerstroming als gevolg van de havengeometrie, en dichtheidsstroming als gevolg van natuurlijke dichtheidsverschillen in de Westerschelde. In een getijcyclus zijn er daardoor meerdere momenten waarop instroming en uitstroming tegelijk optreedt. De waarde van uitwisselingskengetal r_V is daardoor groter dan 1. Voor de referentiesituatie bedraagt r_V 3,5, wat inhoudt dat de wateruitwisseling in de haven 3,5 keer groter is dan voor komberging strikt noodzakelijk.



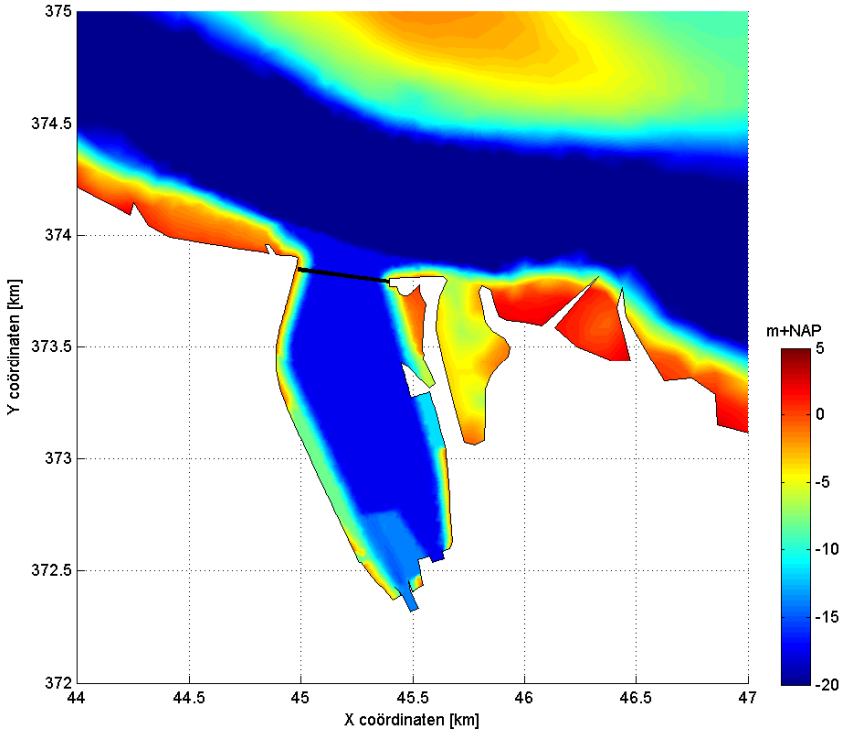
Figuur 4.1: Modelbodem van het FINEL3D model ter plaatse van de Westbuitenhaven van Terneuzen voor de referentiesituatie. De doorsnede waardoor het debiet van de haven bepaald wordt is weergegeven met een zwarte lijn in de havenmonding.

4.3 B. Kengetallen voor de voorkeursvariant

Het uitwisselingskengetal en toenamekengetal voor de Westbuitenhaven wordt ook voor de voorkeursvariant bepaald aan de hand van het debiet door de monding van de haven. In de voorkeursvariant is deze monding breder dan in de referentiesituatie. De doorsnede waardoor het debiet in de voorkeursvariant bepaald wordt is weergegeven in Figuur 4.2.

Net als in de referentiesituatie treden bij de voorkeursvariant verschillende stromingsverschijnselen, zoals dichtheidsstroming op, waardoor er in een getijcyclus momenten zijn waarop instroming en uitstroming tegelijk opreden en de waarde van uitwisselingskengetal r_V daardoor groter dan 1 is. Voor de voorkeursvariant bedraagt r_V 6,7, wat inhoudt dat de wateruitwisseling in de haven 6,7 keer groter is dan voor komberging strikt noodzakelijk. Dit is bijna een verdubbeling ten opzichte van het uitwisselingskengetal in de referentiesituatie. Deze toename wordt veroorzaakt door een versterking van de dichtheidsstroming in de haven, zie paragraaf **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.**.

Het toenamekengetal, de verhouding tussen de wateruitwisseling in de referentiesituatie en de ontwerpvariant, bedraagt voor de voorkeursvariant 2,3. Dit houdt in dat de totale wateruitwisseling tussen de Westerschelde en de Westbuitenhaven in de voorkeursvariant 2,3 keer zo hoog is. Omdat water sediment transporteert dat vervolgens in de haven kan bezinken, zijn de wateruitwisseling in de haven en de te verwachten sedimentatie in de haven gerelateerd. Doordat het toenamekengetal verdubbelt, zal de sedimentatie in haven naar verwachting ook verdubbelen.

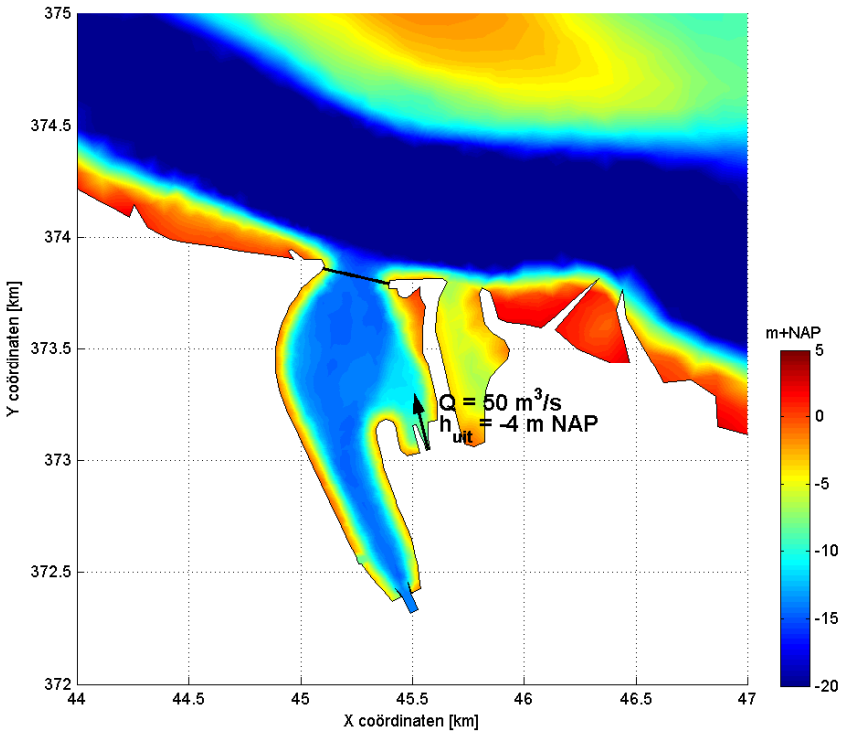


Figuur 4.2: Modelbodem van het FINEL3D model ter plaatse van de Westbuitenhaven van Terneuzen voor de voorkeursvariant. De doorsnede waardoor het debiet van de haven bepaald wordt is weergegeven met een zwarte lijn in de havenmonding.

4.4 H. Invloed van spuien op de wateruitwisseling

Om het effect van spuien op de wateruitwisseling in de haven te bepalen is het uitwisselingskengetal in de referentiesituatie bepaald voor de situatie met een jaargemiddeld spuidebiet van 50 m^3/s via de Middensluis, zie Figuur 4.3.

Omdat het spuiwater significant zoeter is dan het water in de haven en Westerschelde, nemen de dichtheidsverschillen en daarmee de sterkte van de dichtheidstroming wat toe. Daardoor neemt ook het uitwisselingskengetal r_V iets toe. In de situatie met een jaargemiddeld spuidebiet bedraagt het uitwisselingskengetal 3,7, ten opzichte van 3,5 in de situatie zonder spuien. De toename is echter beperkt. Het toenamekengetal bedraagt 1,1, wat een beperkte toename van de wateruitwisseling ten opzichte van situatie zonder spuien inhoudt. Hieruit kan worden geconcludeerd dat ook het effect van spuien op de aanslibbing in de haven beperkt is.



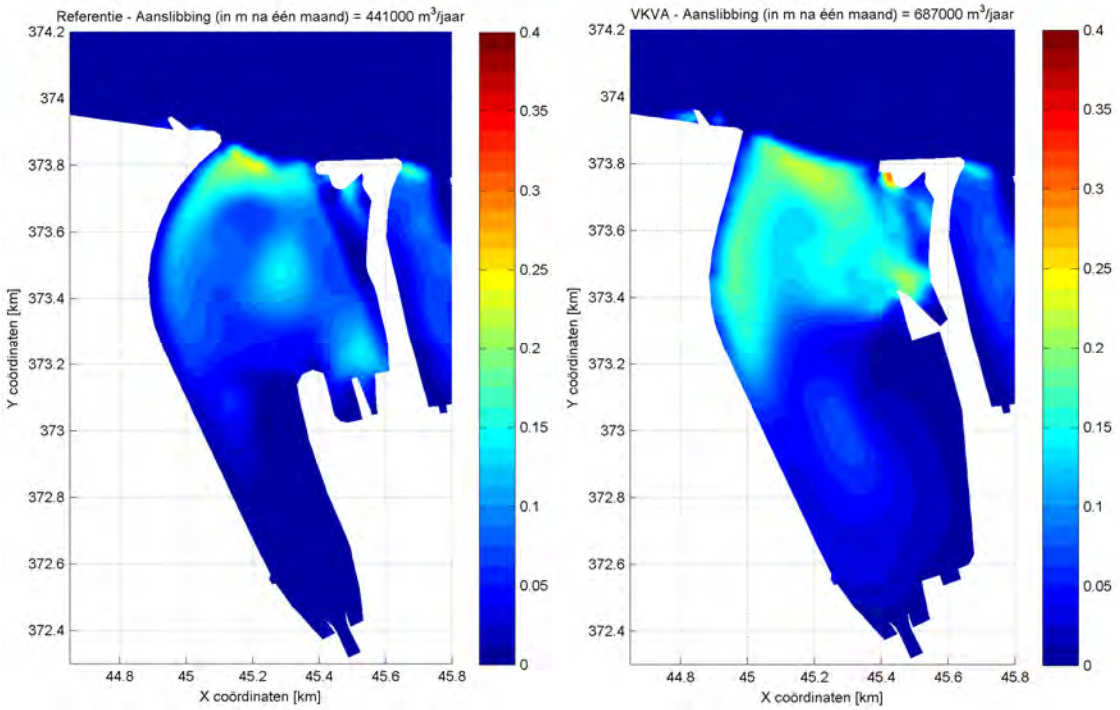
Figuur 4.3: Modelbodem van het FINEL3D model ter plaatse van de Westbuitenhaven van Terneuzen voor de referentiesituatie. De doorsnede waardoor het debiet van de haven bepaald wordt is weergegeven met een zwarte lijn in de havenmonding. In dit scenario wordt er gespuid via de Middensluis met een jaargemiddeld debiet van 50 m^3/s.

4.5 Vertaling resultaten naar baggerbezwaar VKV

In FINEL3D is niet met sediment gerekend. Dit is wel gedaan in het bestaande FINEL2D model. Specifiek voor dit rapport is in dit model naast de eerder uitgevoerde referentiesituatie ook het VKV doorgerekend. Voor die situatie was als eerder op basis van *expert judgement* het toekomstige baggerbezwaar geschat op 700 000 m^3/jaar, uit de berekening komt 687 000 m^3/s, zie Figuur 4.4.

Ook met het 2D model zijn kengetallen te bepalen. Het uitwisselingsdebiet wordt dan puur bepaald door de horizontale neer die tegelijkertijd naar binnen en naar buiten stroomt. Zoals te zien is in Tabel 4.1 neemt ook in geval van de 2D berekening het uitwisselingskengetal toe, van 1,8 tot 2,7. Wat betreft de uitwisseling van water met de Westerschelde spelen dichtheidstromen dus ook in de referentiesituatie een belangrijkere rol dan eerder gedacht.

Zoals voorspelt spelen die 3D stromingen echter een nog grotere rol bij het diepere VKV scenario. Als er dan ook wordt gekeken naar het toenamekengetal (welke iets zegt over de toename van uitwisselingsdebiet ten opzichte van de referentie) dan is deze voor de 3D simulatie significant groter dan voor 2D; 2,3 ten opzichte van 1,8.



Figuur 4.4: Baggerbezwaar zoals voorspeld door het FINEl2D model, links in geval van de referentiesituatie (eerder verschenen in MER deelrapport Bodem (VNZT-R-123)) en rechts in geval van de VKV.

Tabel 4.1: Kentallen voor 3D en 2D simulaties

	Uitwisselings-kental 3D	Toename-kental 3D	Uitwisselings-kental 2D	Toename-kental 2D	Sediments-toename 2D
Referentie	3,5	(1)	1,8	(1)	(1)
VKV	6,7	2,3	2,7	1,8	1,55

Een toename in wateruitwisseling met de Westerschelde is niet één op één te vertalen naar een toename in sedimentinvang. Hoe meer water uitgewisseld wordt, hoe meer sediment ook weer met dat water de haven verlaat. Dit is te zien als voor de 2D benadering te toename in wateruitwisseling wordt vergeleken met de toename in sedimentinvang (1,8 versus 1,55). Aan andere kant zijn er op verschillende afstanden van de bodem verschillende sedimentconcentraties en kan uitwisseling dicht bij de bodem een veel groter effect hebben dan bij het wateroppervlak.

In dit geval wordt de verhouding tussen toename in wateruitwisseling en sedimentinvang zoals die bestaat in de 2D benadering aangehouden. Dit zou betekenen dat de toename van de sedimentinvang en dus baggerbezwaar kan worden gegeven door:

$$\frac{toenamekengetal_{3D}}{toenamekengetal_{2D}} * Sedimentstoename_{2D} = 1{,}98$$

Het verwachte baggerbezwaar voor de VKV zoals gebaseerd op de 3D stromingssommen is zodoende 1,98 * 441.000 = 873 duizend m^3/jaar.

4.6 Conclusies sedimentatie

Door met het toenamekengetal de verhouding tussen de wateruitwisseling in de referentiesituatie en de wateruitwisseling in de verschillende scenario's te bepalen, kan voor de verschillende varianten het effect op de aanslibbing van de haven worden bepaald. Hierbij wordt er vanuit gegaan dat hoe meer wateruitwisseling er optreedt, hoe meer sediment er de haven in getransporteerd wordt en daar vervolgens kan bezinken.

De voorkeursvariant heeft een verdubbeling van het toenamekengetal tot gevolg. Om de wateruitwisseling en het sedimentatie in de haven gerelateerd zijn, houdt dit in dat de verwachtte aanslibbing in de Westbuitenhaven ongeveer verdubbeld.

Het effect van spuien op de wateruitwisseling is eveneens onderzocht. Hierbij is uitgegaan van de referentiesituatie. De verhoging van het uitwisselingskengetal en toenamekengetal is beperkt, waarmee geconcludeerd kan worden dat ook het effect van spuien of de aanslibbing beperkt is.

Op basis van resultaten van het FINEL3D stromingsmodel en het FINEL2D sedimentmodel is voor de VKV een baggerbezwaar geschat van 873 duizend m^3/jaar, wat ongeveer een verdubbeling is van het huidige gemiddelde baggerbezwaar van 441 duizend m^3/jaar.

5 CONCLUSIES

In deze studie is een gekalibreerd en gevalideerd 3D model van de Westbuitenhaven Terneuzen opgezet. Het model kan de metingen doorgaans goed representeren. In het model lijkt de vloedstroom te ver naar binnen te stromen, daarnaast zijn stromingen kleiner dan 0,2 m/s moeilijk te vergelijken aangezien meetinstrumenten dan moeite hebben om vooral richting correct te registreren.

Op basis van het 3D model is vastgesteld dat dichtheidstromen zoals verwacht een grotere invloed hebben in geval van de VKV dan in de huidige (referentie) situatie. Wat ook is gebleken is dat ook in de referentiesituatie dichtheidstroming tot een grotere wateruitwisseling leiden dan tot nu toe berekend. Spuien heeft slechts een beperkt invloed op het uitwisselingsdebiet. Op basis van de bepaalde debieten en nieuwe 2D berekeningen is het baggerbezwaar in geval van de VKV geschat op 873 duizend m^3/jaar.

LITERATUUR

Baggerbedrijf de Boer & van der Kamp (2011-2013). Bathymetrie Terneuzen WBH – Termijnpeiling. Als diverse pdf's en ook beschikbaar gemaakt als ascii data.

Labeur, R.J., Wells, G.N. (2012). Energy stable and momentum conservative interface stabilised Finite Element Method for the incompressible Navier-Stokes equations. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 34(2), A889-A913.

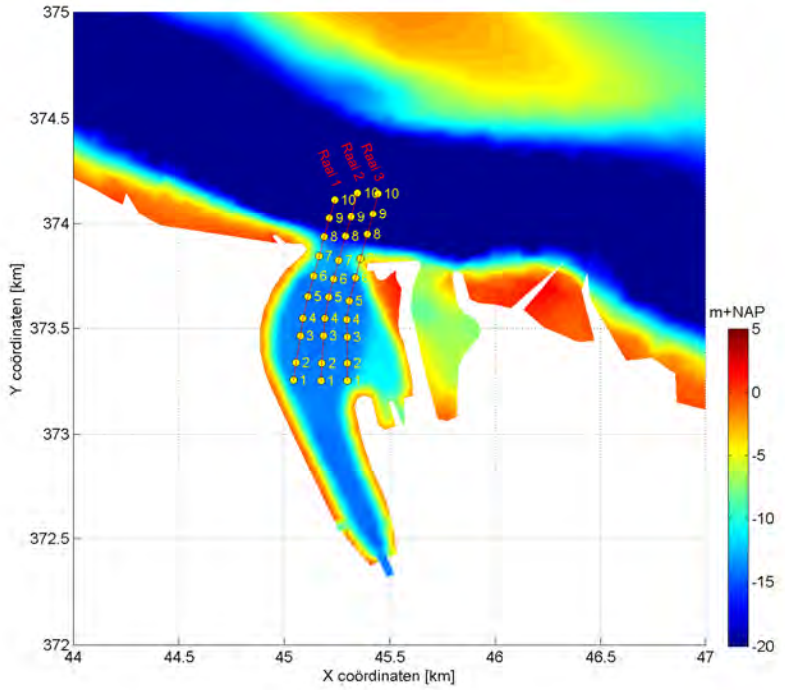
Labeur, R.J. (2009). *Finite element modelling of transport and non-hydrostatic flow in environmental fluid mechanics*. Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, Delft.

Maximova, T., S. Ides, T. de Mulder en F. Mostaert (2009). LTV O&M thema veiligheid: deelproject 1. Verbetering hydrodynamisch NEVLA model ten behoeve van scenario-analyse. Rapport, referentie: 756_05 (Deltares/Waterbouwkundig Laboratorium).

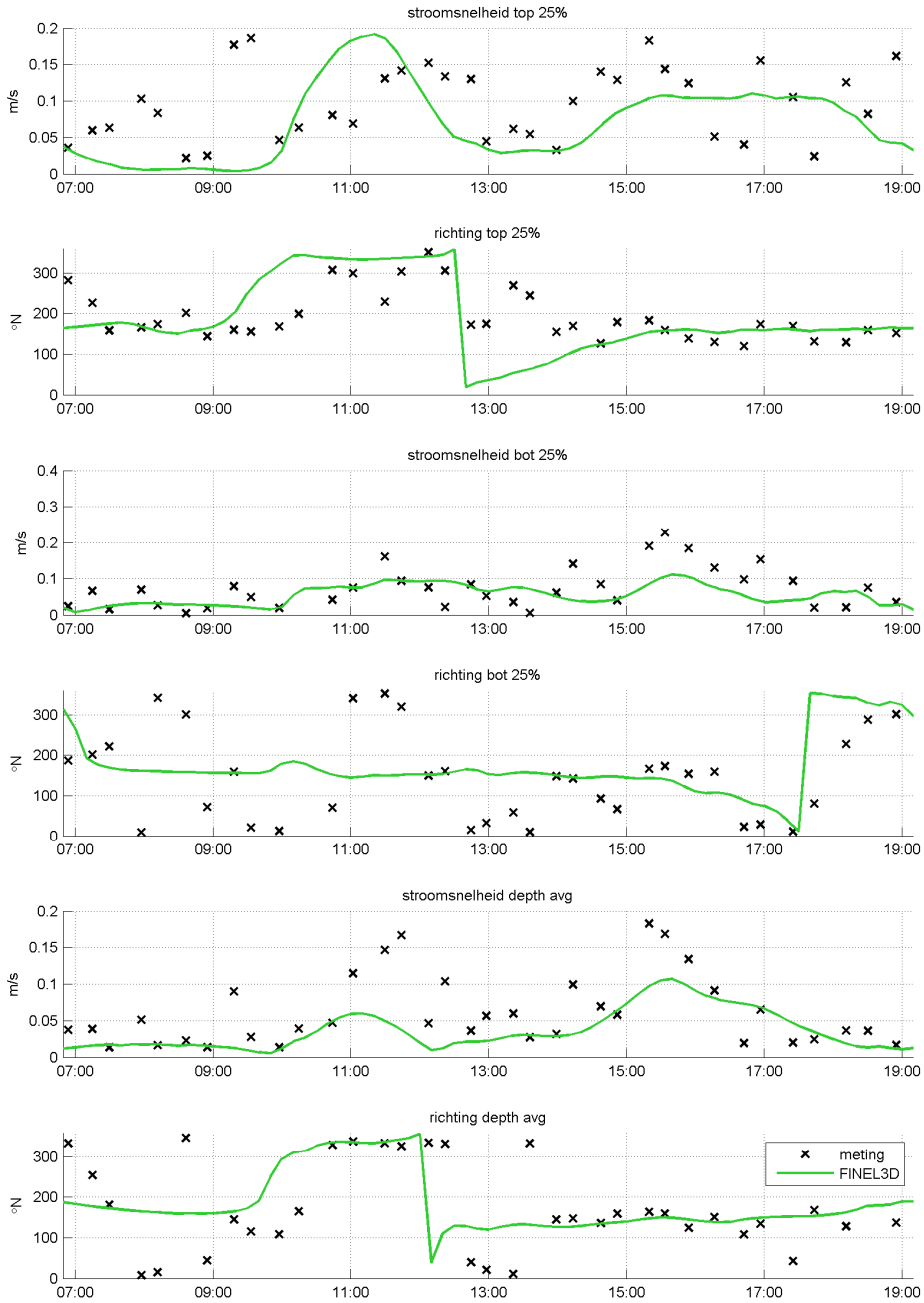
Rijkswaterstaat Zeeland (2011). 'Onderhoudsbaggerwerk zaaknummer 31046727. Detailkaart areaal DZL: baggerkaart. Detailblad 6/16. Datum: 21 april 2011. Tekeningnr: NZMDB 2011-0084 GG 4.1.6.

A VERGELIJKING METING EN FINEL3D

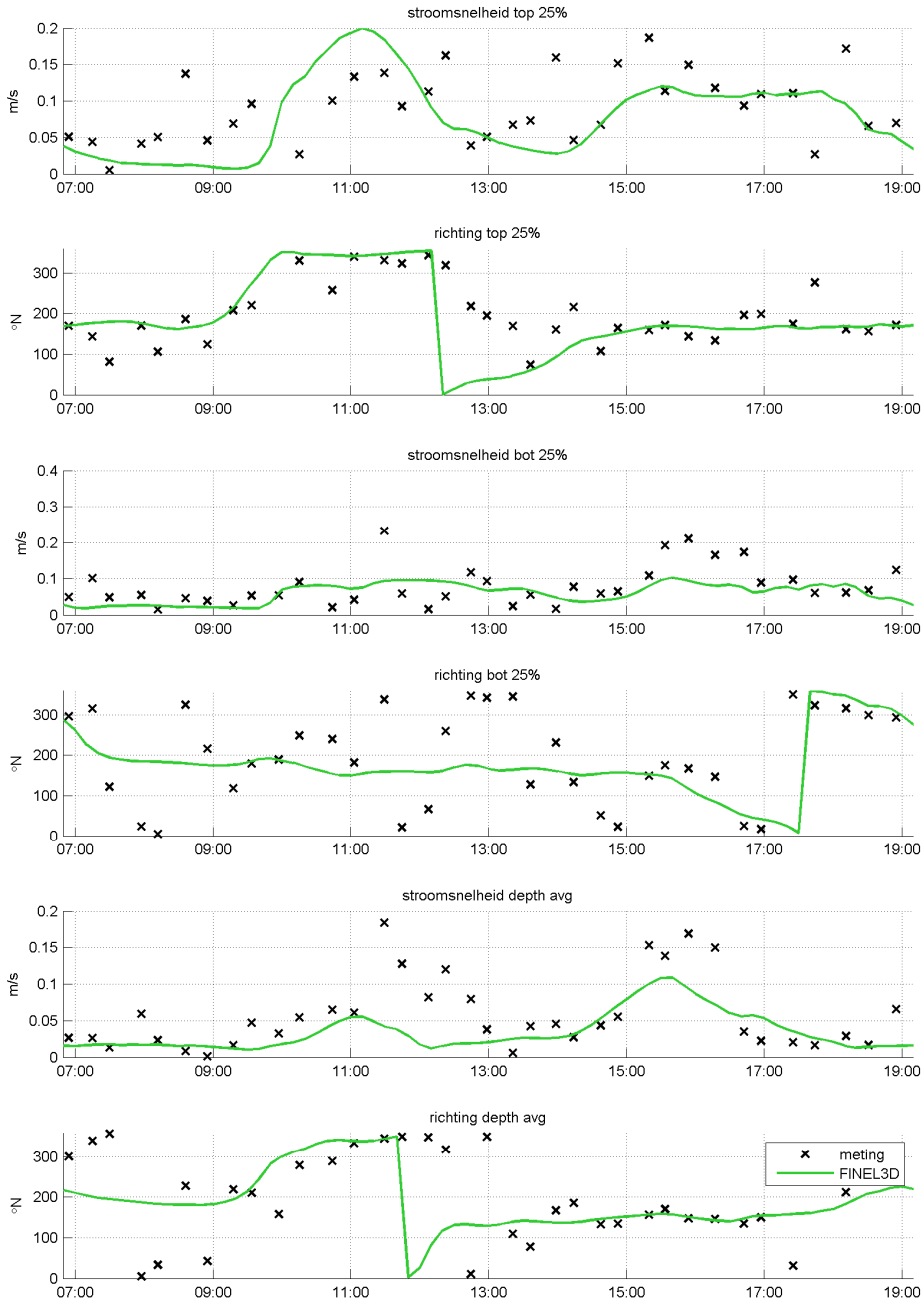
De figuren in deze bijlage tonen de vergelijking tussen de gemeten en gemodelleerde stroming in de Westbuitenhaven van Terneuzen op 21 maart 2007. De meetresultaten en modelresultaten worden op 30 punten in de haven vergeleken. De locaties van deze punten worden weergegeven in Figuur A.1. Elke figuur bestaat uit zes panelen, waarvan de bovenste twee panelen de stroomsnelheid en stroomrichting in het bovenste kwart van de waterkolom tonen, de twee middelste panelen de stroomsnelheid en stroomrichting in het onderste kwart van de waterkolom tonen en de twee onderste panelen de dieptegemiddelde stroomsnelheid en stroomrichting weergegeven.



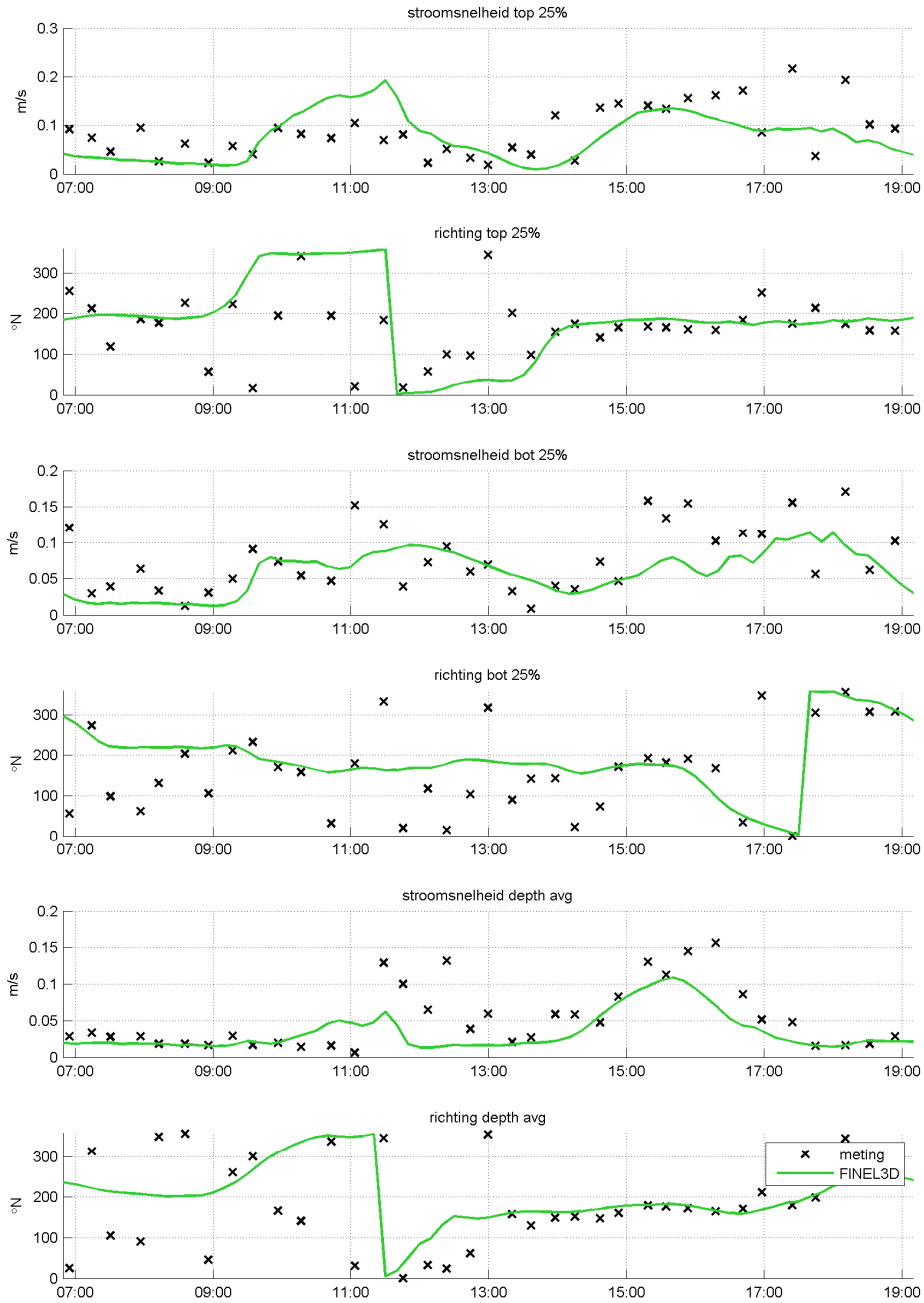
Figuur A.1: Uitvoerpunten in de modelberekening ten behoeve van de kalibratie. Op de uitvoerpunten zijn voor zowel de meet- en modelresultaten tijdreeksen opgesteld.



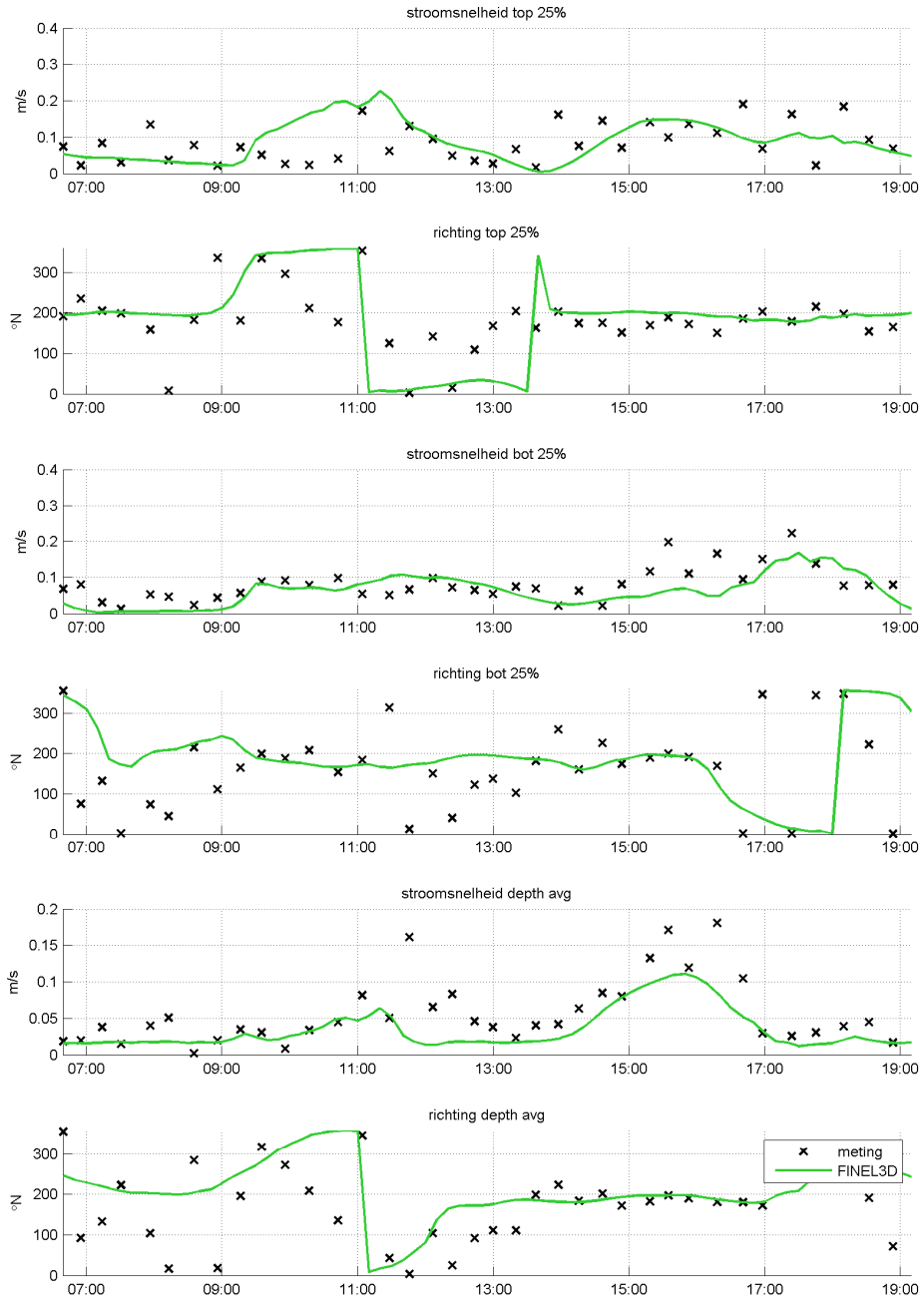
Figuur A.2: Vergelijking van de gemeten en gemodelleerde stroomsnelheid en stroomrichting op punt 1 van raai 1 in de Westbuitenhaven ten behoeve van de kalibratie van het FINEL3D model op 21 maart 2007.



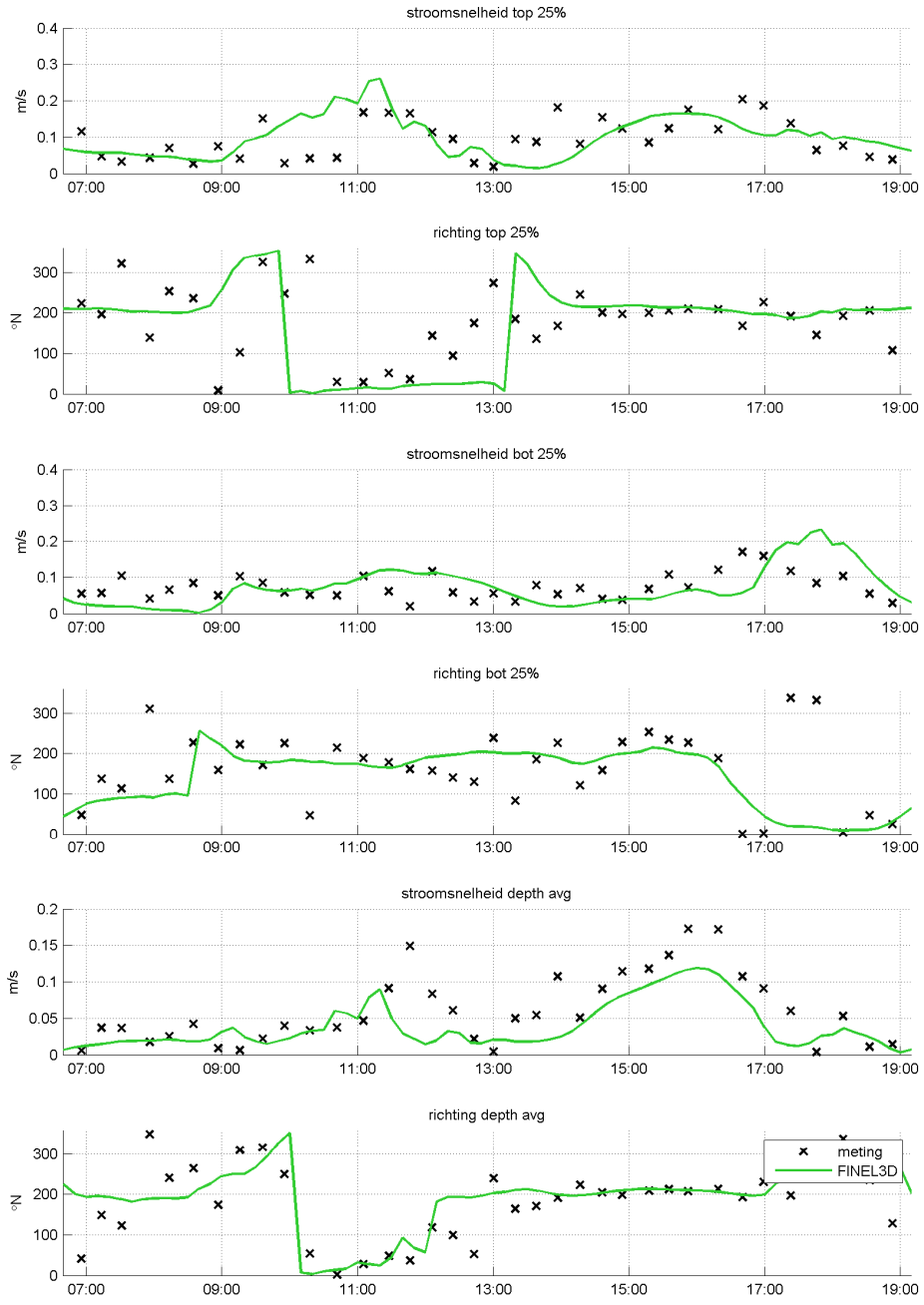
Figuur A.3: Vergelijking van de gemeten en gemodelleerde stroomsnelheid en stroomrichting op punt 2 van raai 1 in de Westbuitenhaven ten behoeve van de kalibratie van het FINEL3D model op 21 maart 2007.



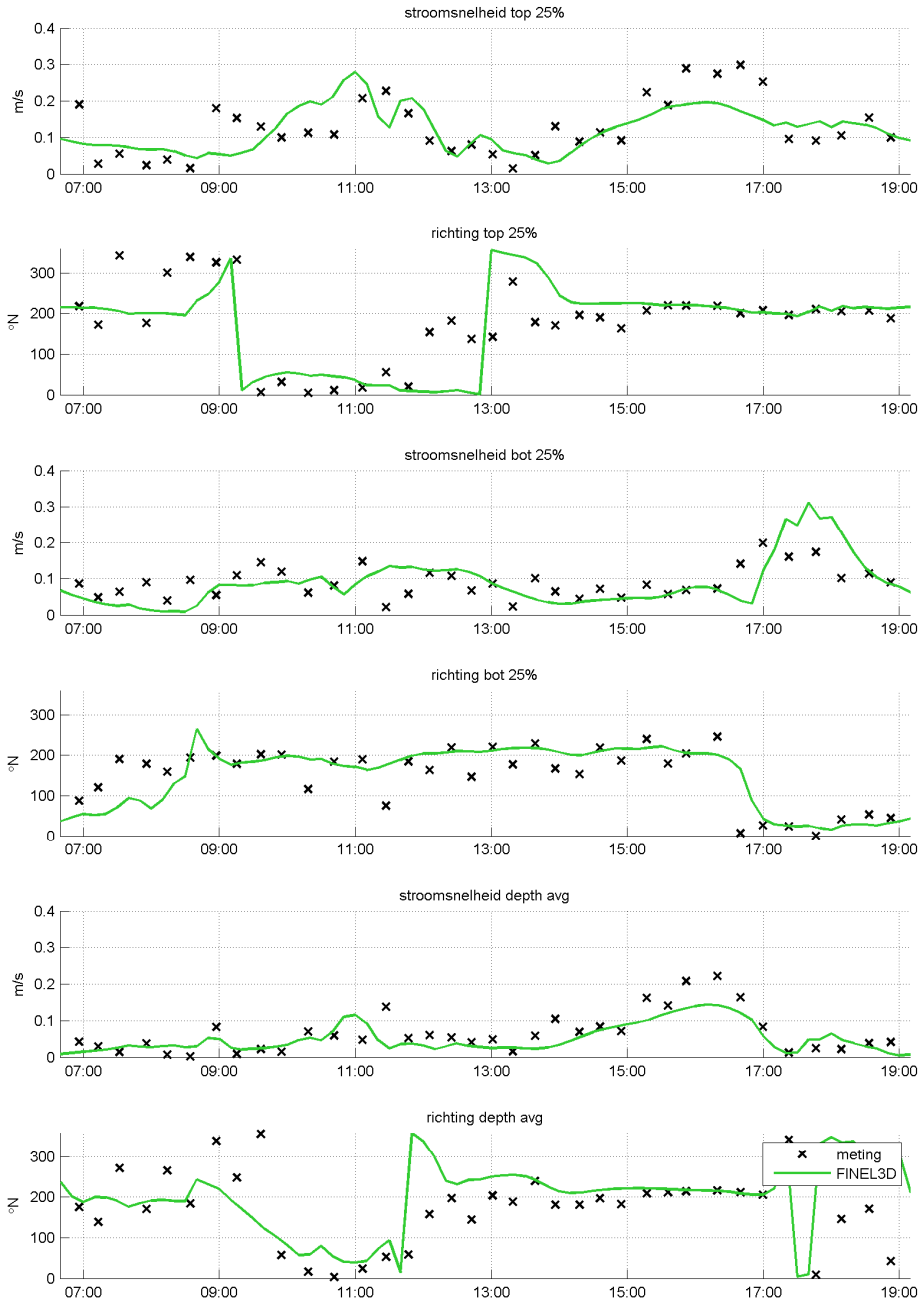
Figuur A.4: Vergelijking van de gemeten en gemodelleerde stroomsnelheid en stroomrichting op punt 3 van raai 1 in de Westbuitenhaven ten behoeve van de kalibratie van het FINEL3D model op 21 maart 2007.



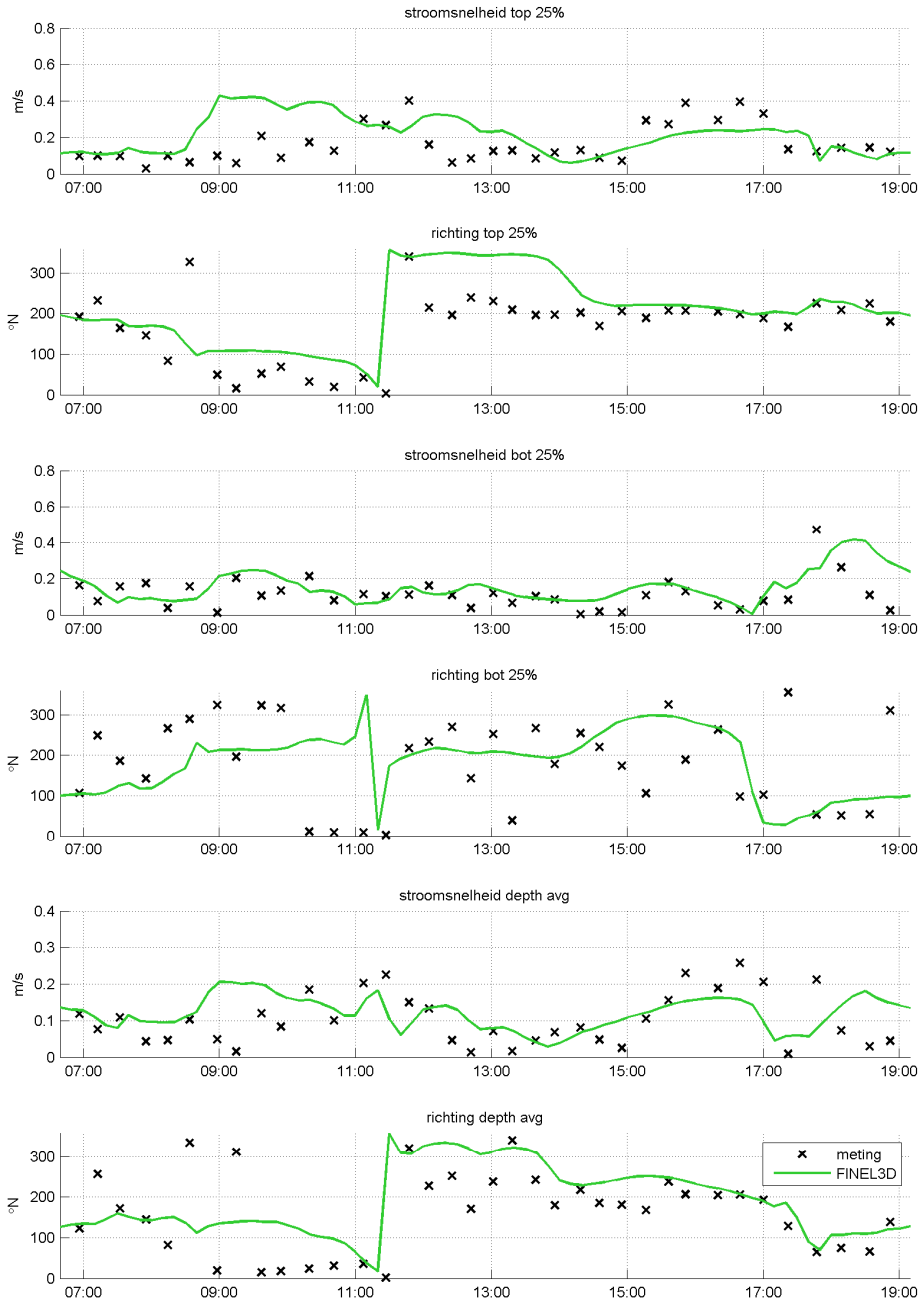
Figuur A.5: Vergelijking van de gemeten en gemodelleerde stroomsnelheid en stroomrichting op punt 4 van raai 1 in de Westbuitenhaven ten behoeve van de kalibratie van het FINEL3D model op 21 maart 2007.



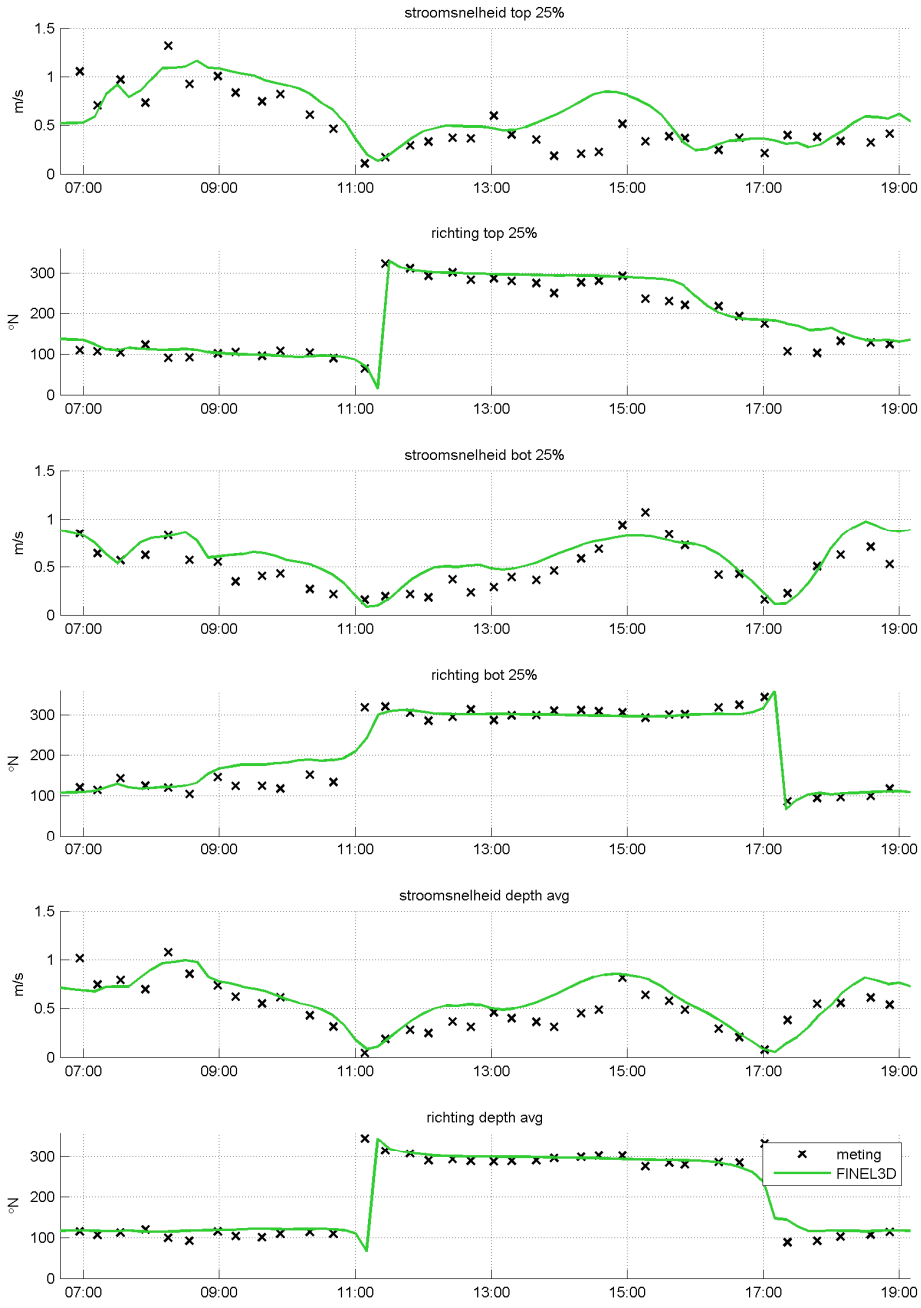
Figuur A.6: Vergelijking van de gemeten en gemodelleerde stroomsnelheid en stroomrichting op punt 5 van raai 1 in de Westbuitenhaven ten behoeve van de kalibratie van het FINEL3D model op 21 maart 2007.



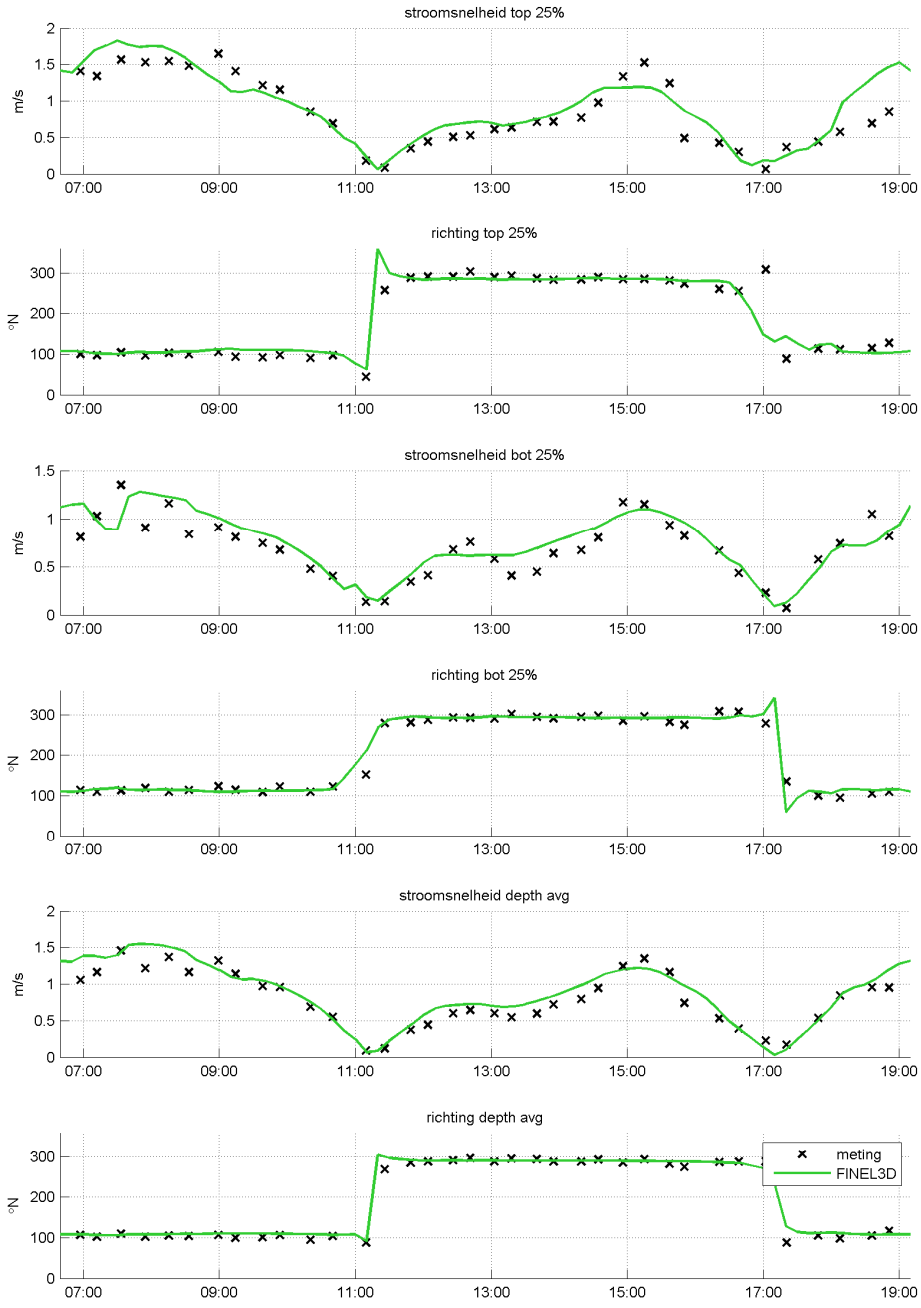
Figuur A.7: Vergelijking van de gemeten en gemodelleerde stroomsnelheid en stroomrichting op punt 6 van raai 1 in de Westbuitenhaven ten behoeve van de kalibratie van het FINEL3D model op 21 maart 2007.



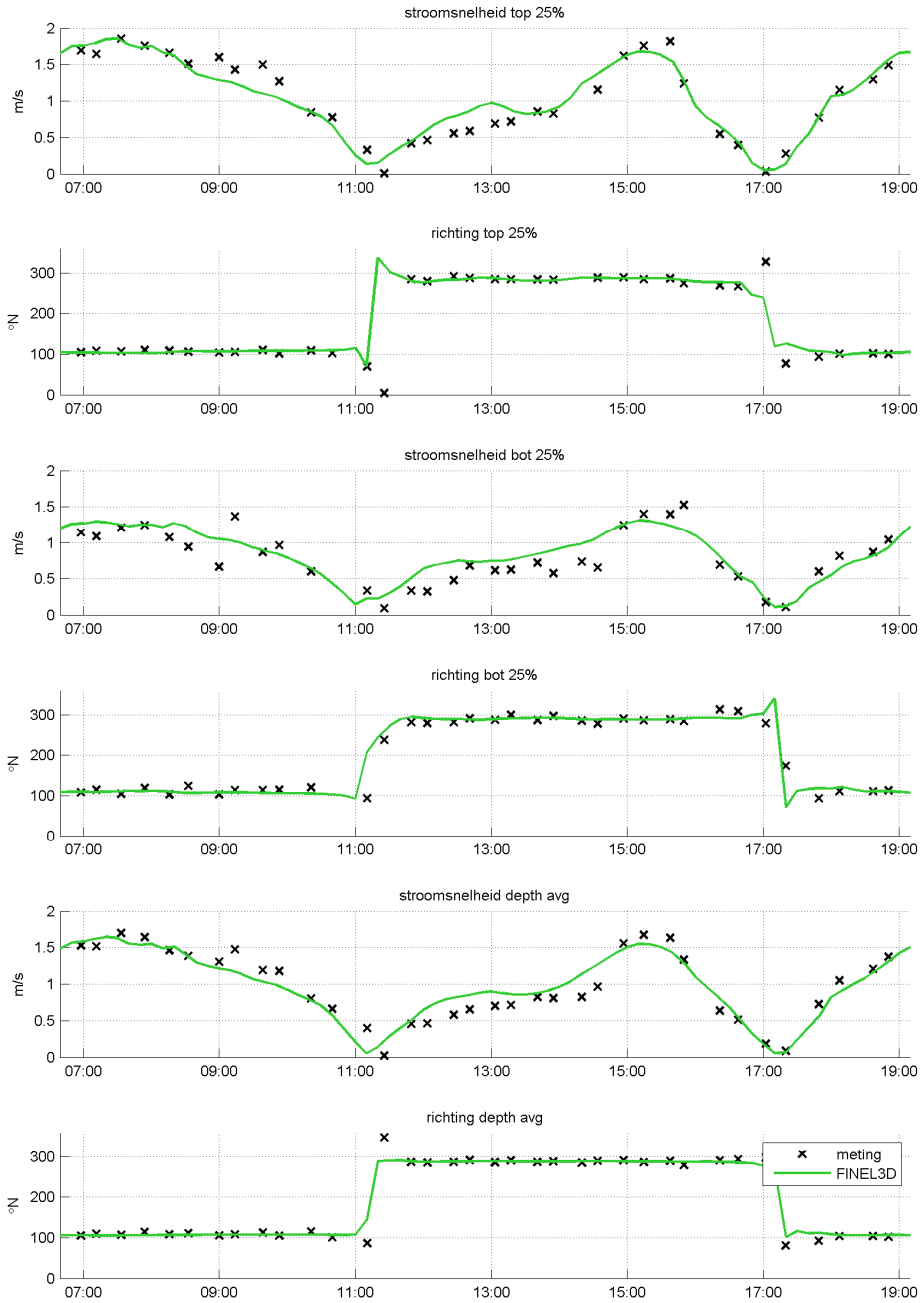
Figuur A.8: Vergelijking van de gemeten en gemodelleerde stroomsnelheid en stroomrichting op punt 7 van raai 1 in de Westbuitenhaven ten behoeve van de kalibratie van het FINEL3D model op 21 maart 2007.



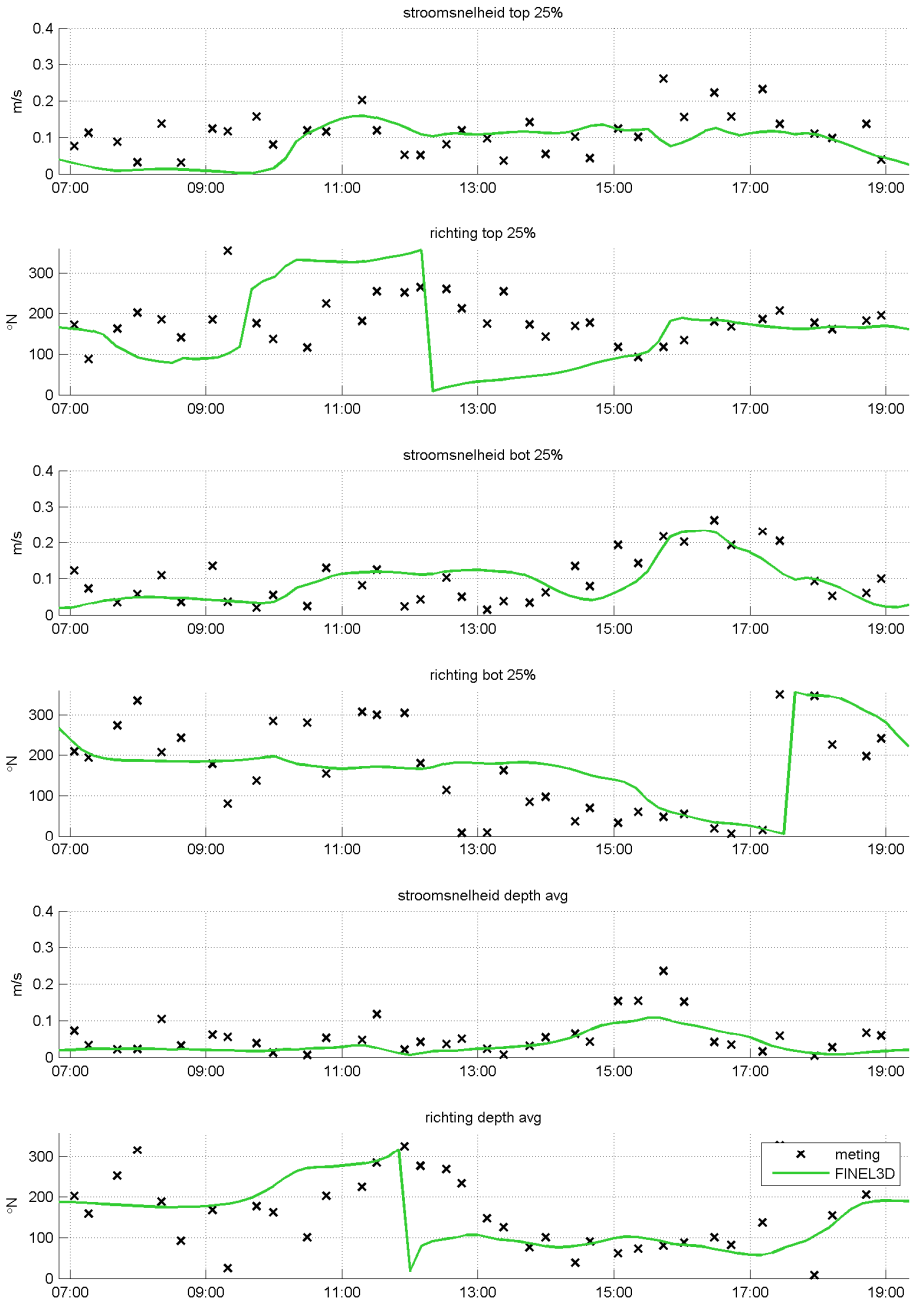
Figuur A.9: Vergelijking van de gemeten en gemodelleerde stroomsnelheid en stroomrichting op punt 8 van raai 1 in de Westbuitenhaven ten behoeve van de kalibratie van het FINEL3D model op 21 maart 2007.



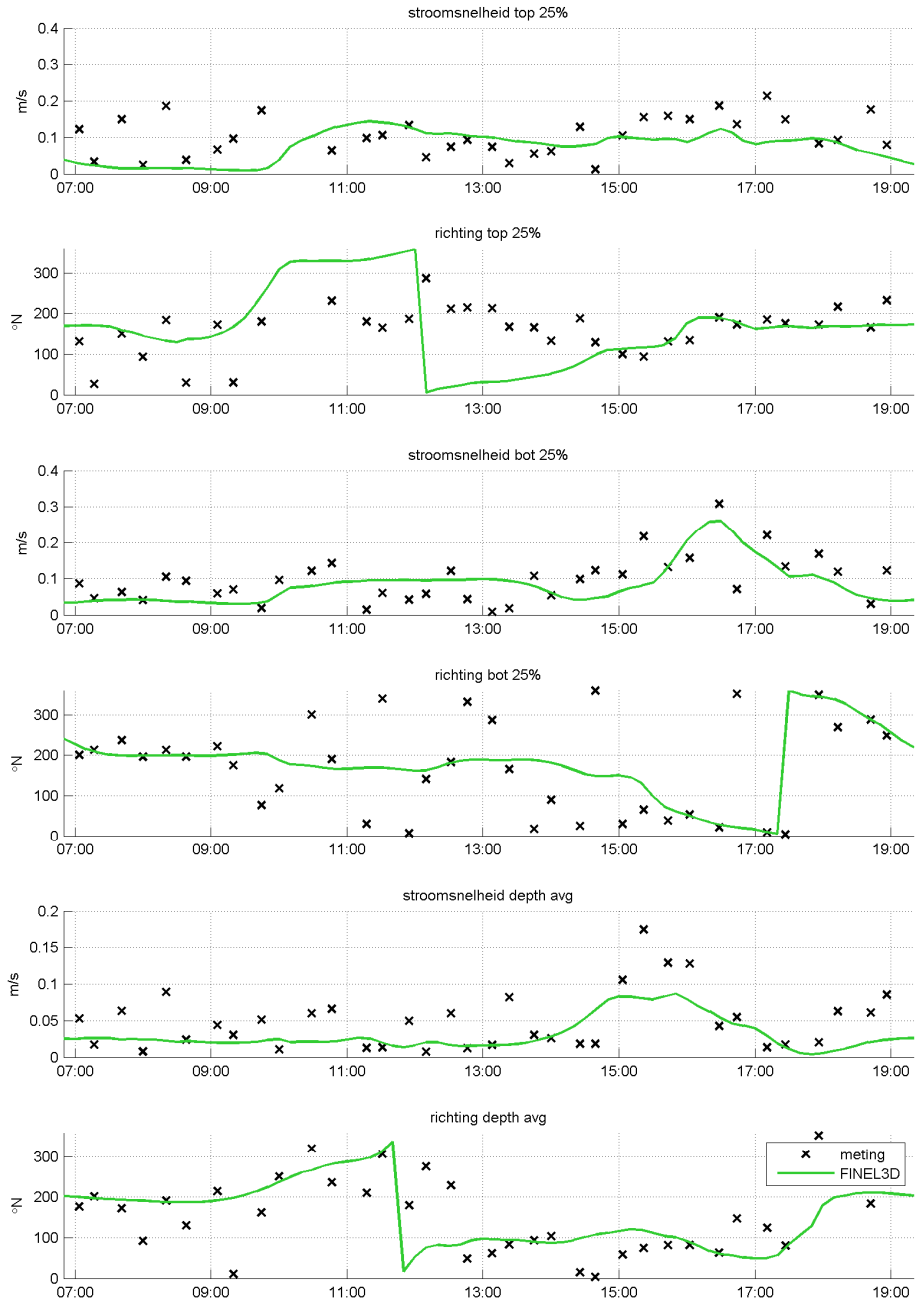
Figuur A.10: Vergelijking van de gemeten en gemodelleerde stroomsnelheid en stroomrichting op punt 9 van raai 1 in de Westbuitenhaven ten behoeve van de kalibratie van het FINEL3D model op 21 maart 2007.



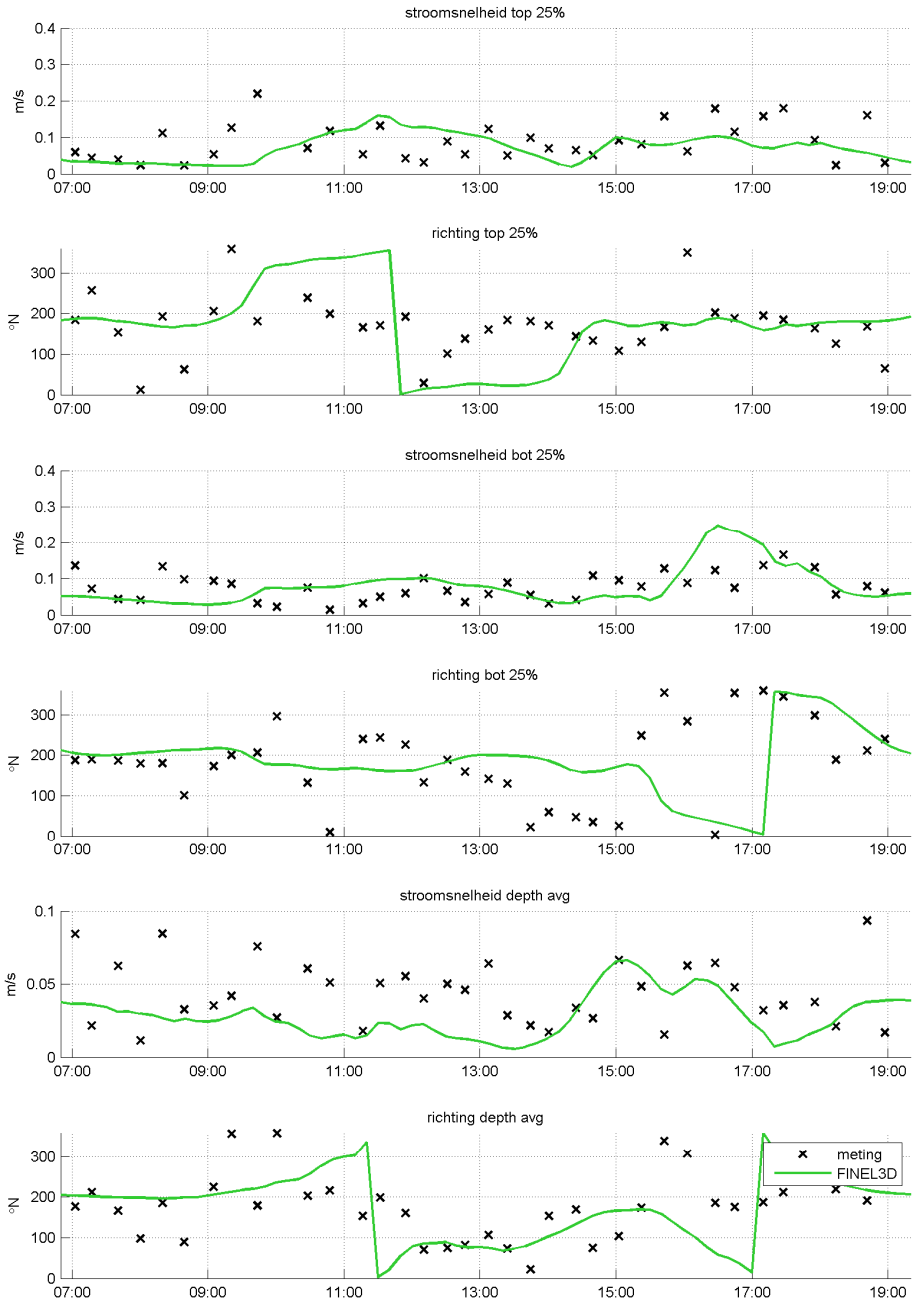
Figuur A.11: Vergelijking van de gemeten en gemodelleerde stroomsnelheid en stroomrichting op punt 10 van raai 1 in de Westbuitenhaven ten behoeve van de kalibratie van het FINEL3D model op 21 maart 2007.



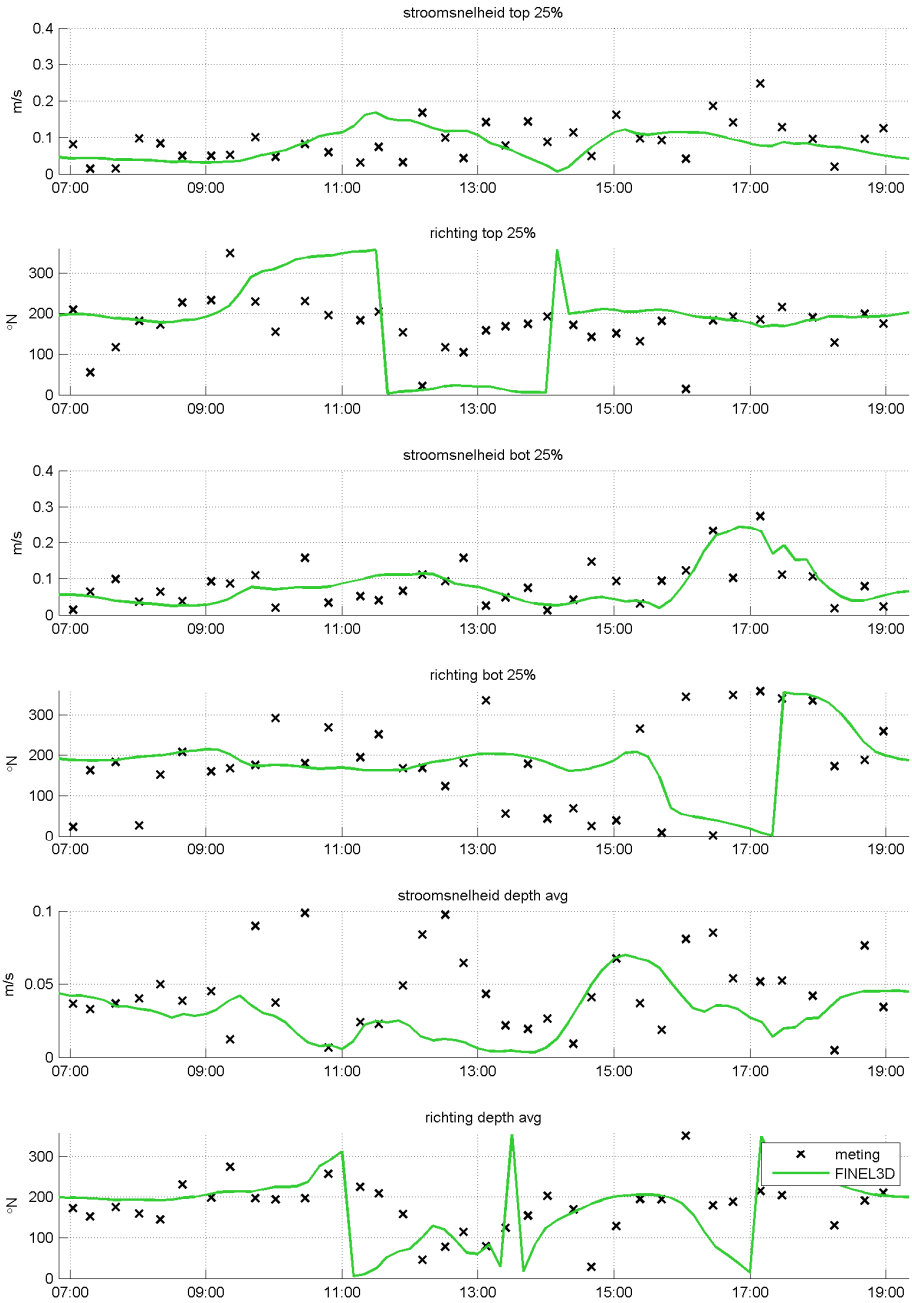
Figuur A.12: Vergelijking van de gemeten en gemodelleerde stroomsnelheid en stroomrichting op punt 1 van raai 2 in de Westbuitenhaven ten behoeve van de kalibratie van het FINEL3D model op 21 maart 2007.



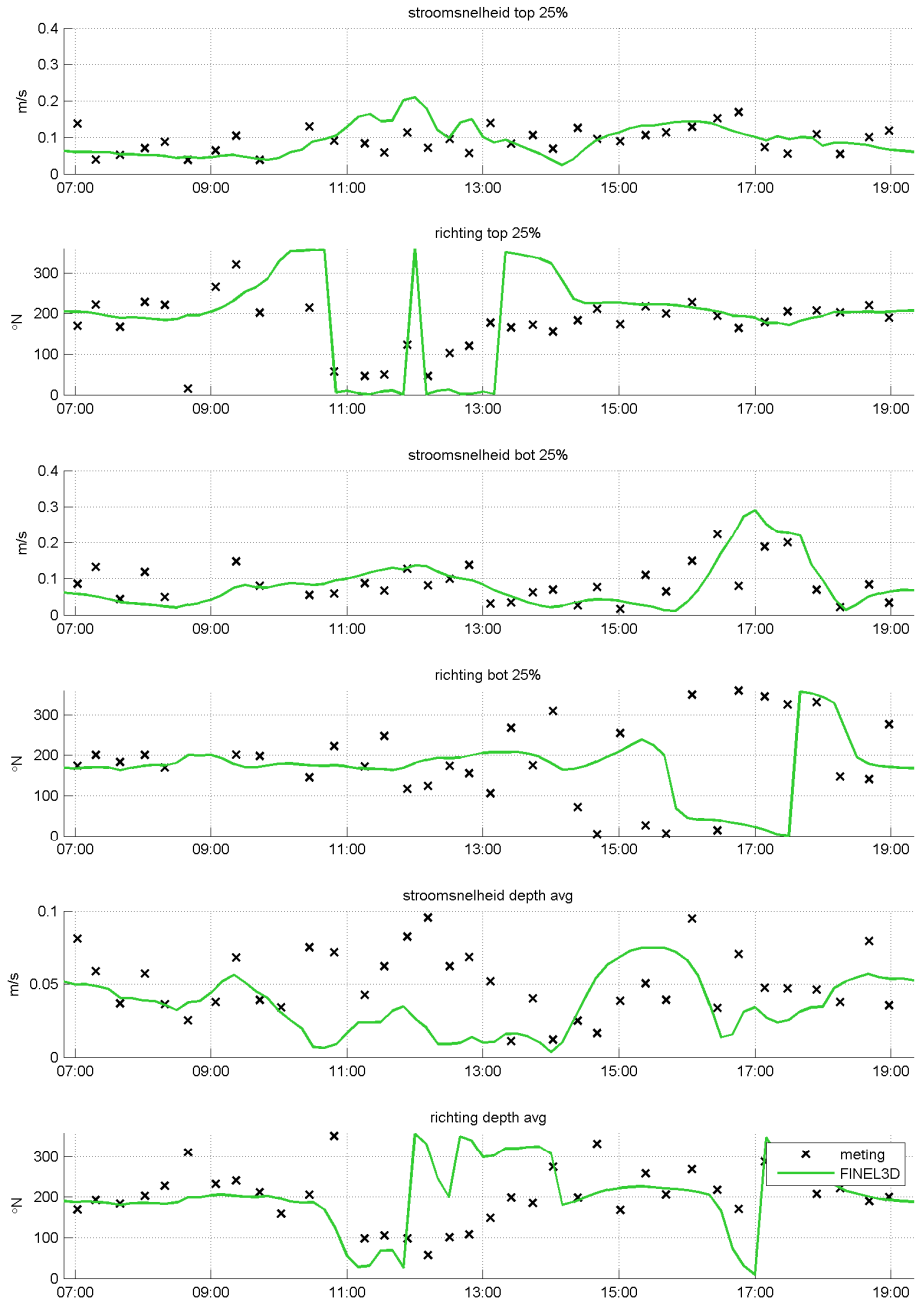
Figuur A.13: Vergelijking van de gemeten en gemodelleerde stroomsnelheid en stroomrichting op punt 2 van raai 2 in de Westbuitenhaven ten behoeve van de kalibratie van het FINEL3D model op 21 maart 2007.



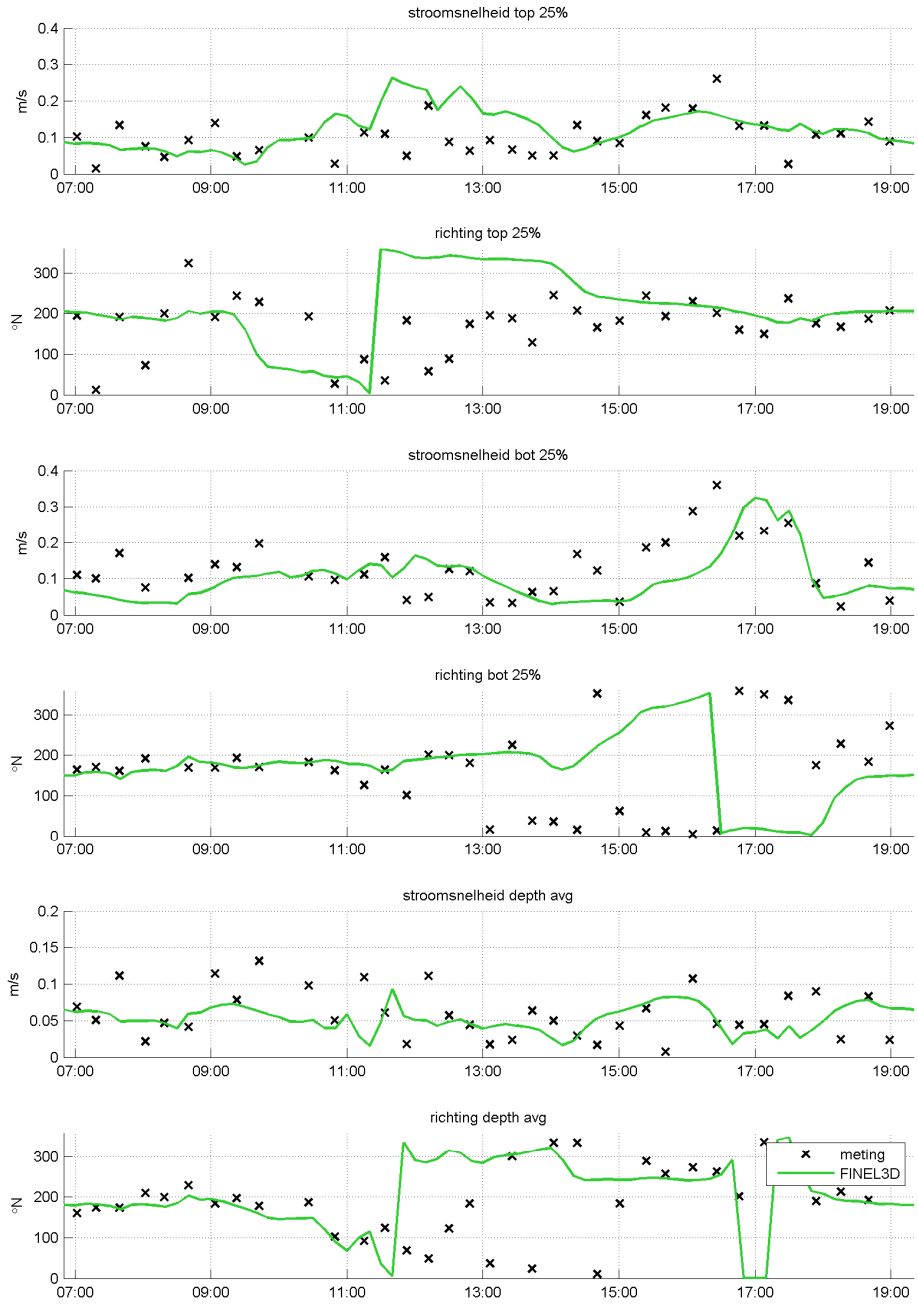
Figuur A.14: Vergelijking van de gemeten en gemodelleerde stroomsnelheid en stroomrichting op punt 3 van raai 2 in de Westbuitenhaven ten behoeve van de kalibratie van het FINEL3D model op 21 maart 2007.



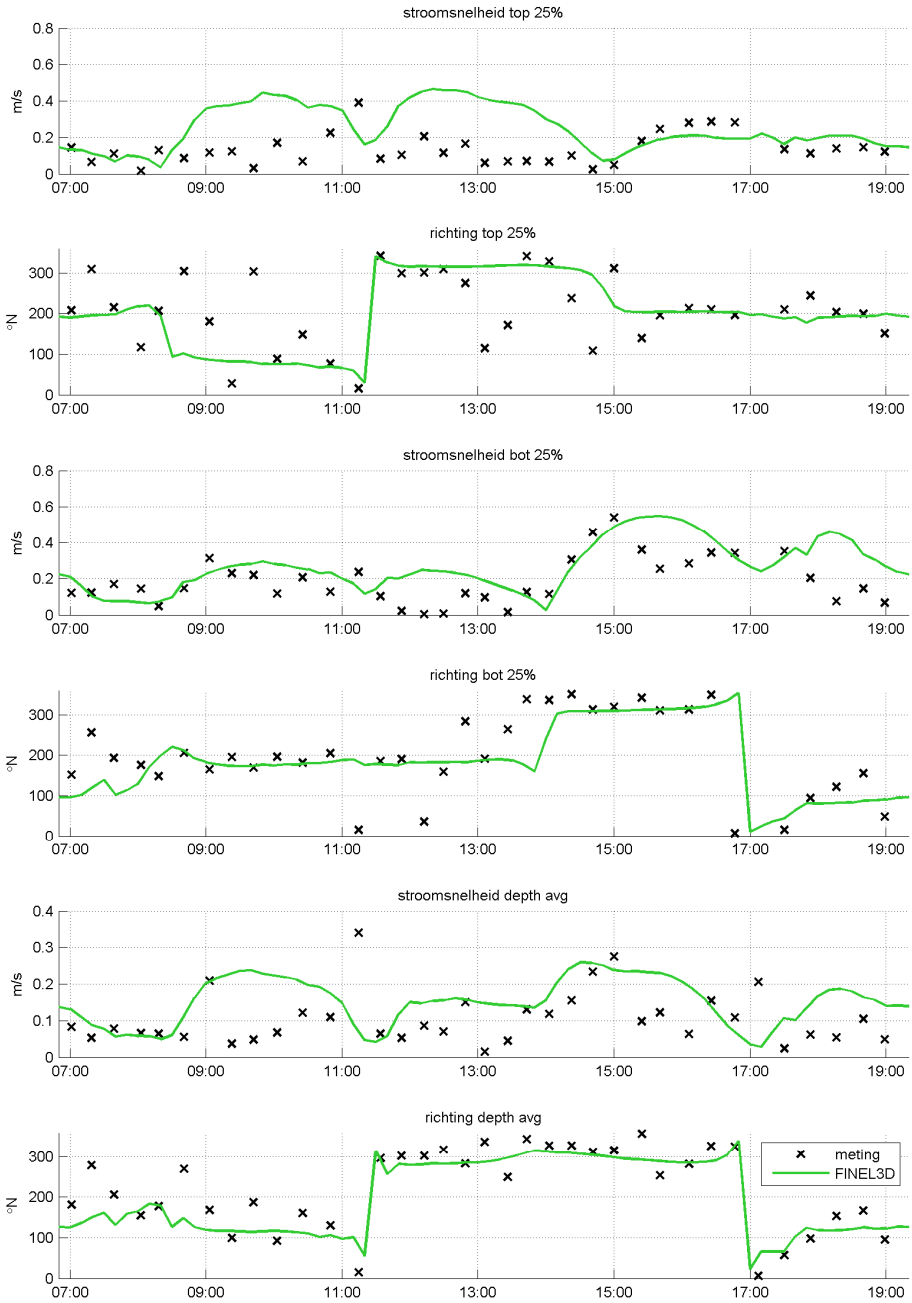
Figuur A.15: Vergelijking van de gemeten en gemodelleerde stroomsnelheid en stroomrichting op punt 4 van raai 2 in de Westbuitenhaven ten behoeve van de kalibratie van het FINEL3D model op 21 maart 2007.



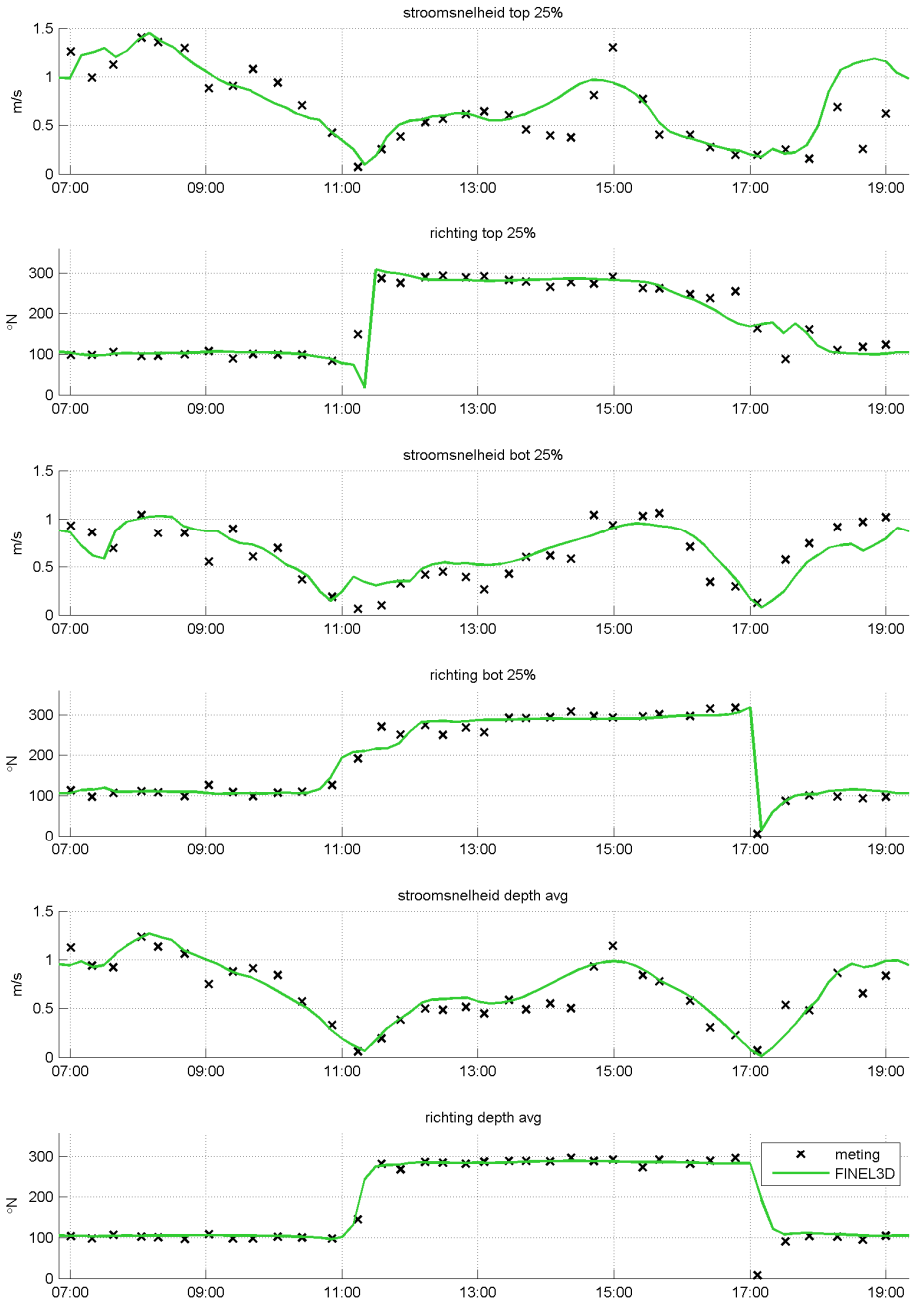
Figuur A.16: Vergelijking van de gemeten en gemodelleerde stroomsnelheid en stroomrichting op punt 5 van raai 2 in de Westbuitenhaven ten behoeve van de kalibratie van het FINEL3D model op 21 maart 2007.



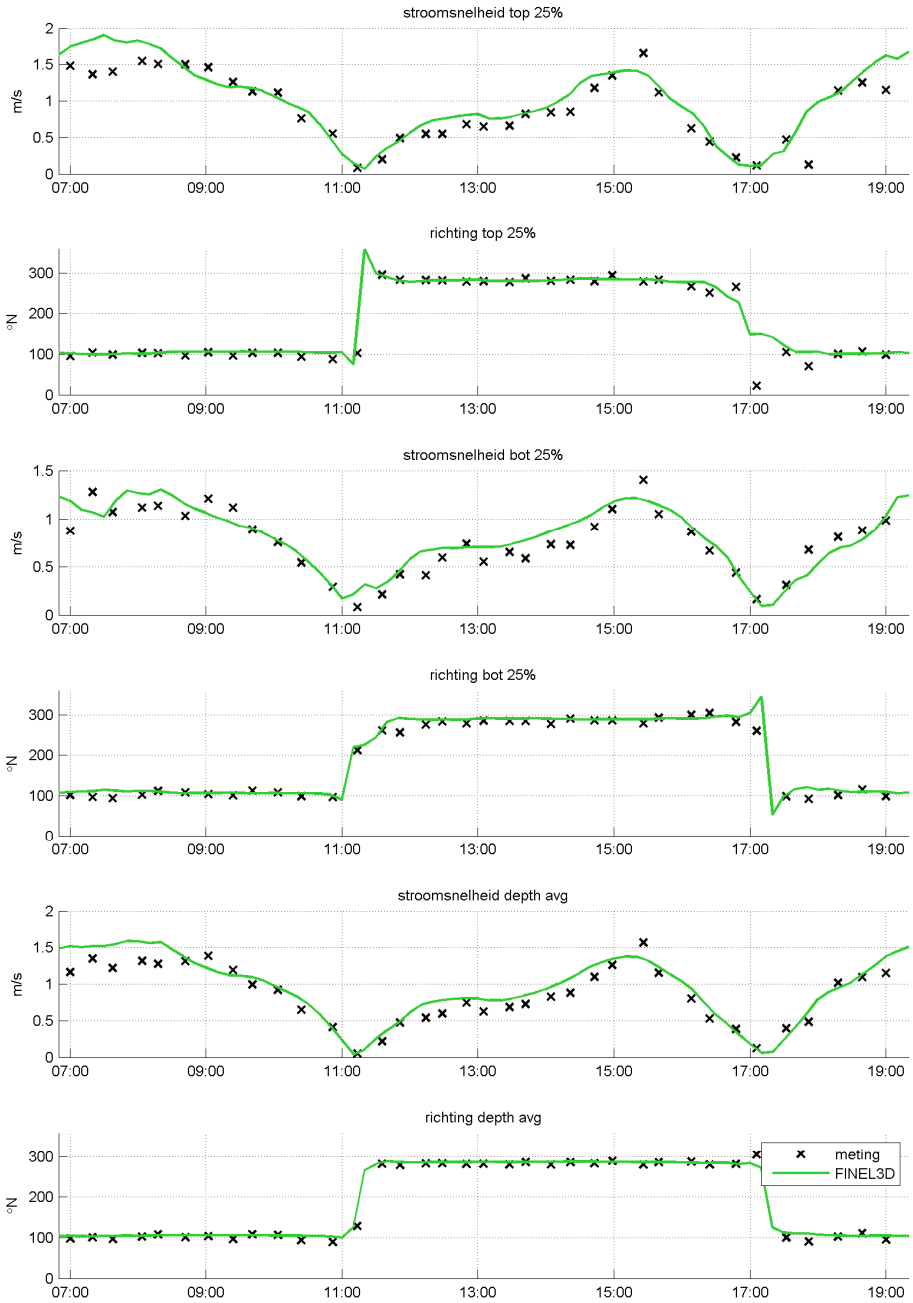
Figuur A.17: Vergelijking van de gemeten en gemodelleerde stroomsnelheid en stroomrichting op punt 6 van raai 2 in de Westbuitenhaven ten behoeve van de kalibratie van het FINEL3D model op 21 maart 2007.



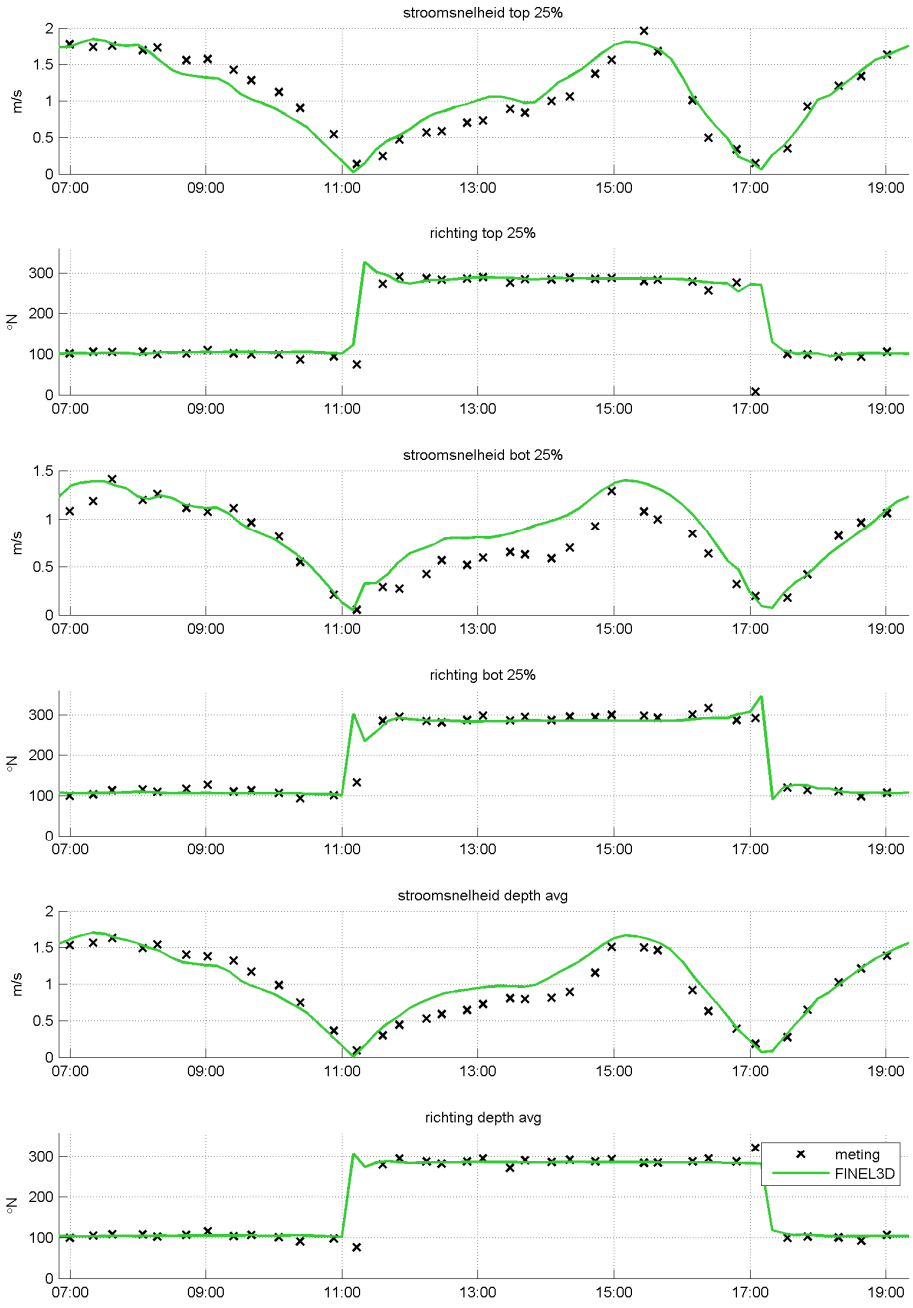
Figuur A.18: Vergelijking van de gemeten en gemodelleerde stroomsnelheid en stroomrichting op punt 7 van raai 2 in de Westbuitenhaven ten behoeve van de kalibratie van het FINEL3D model op 21 maart 2007.



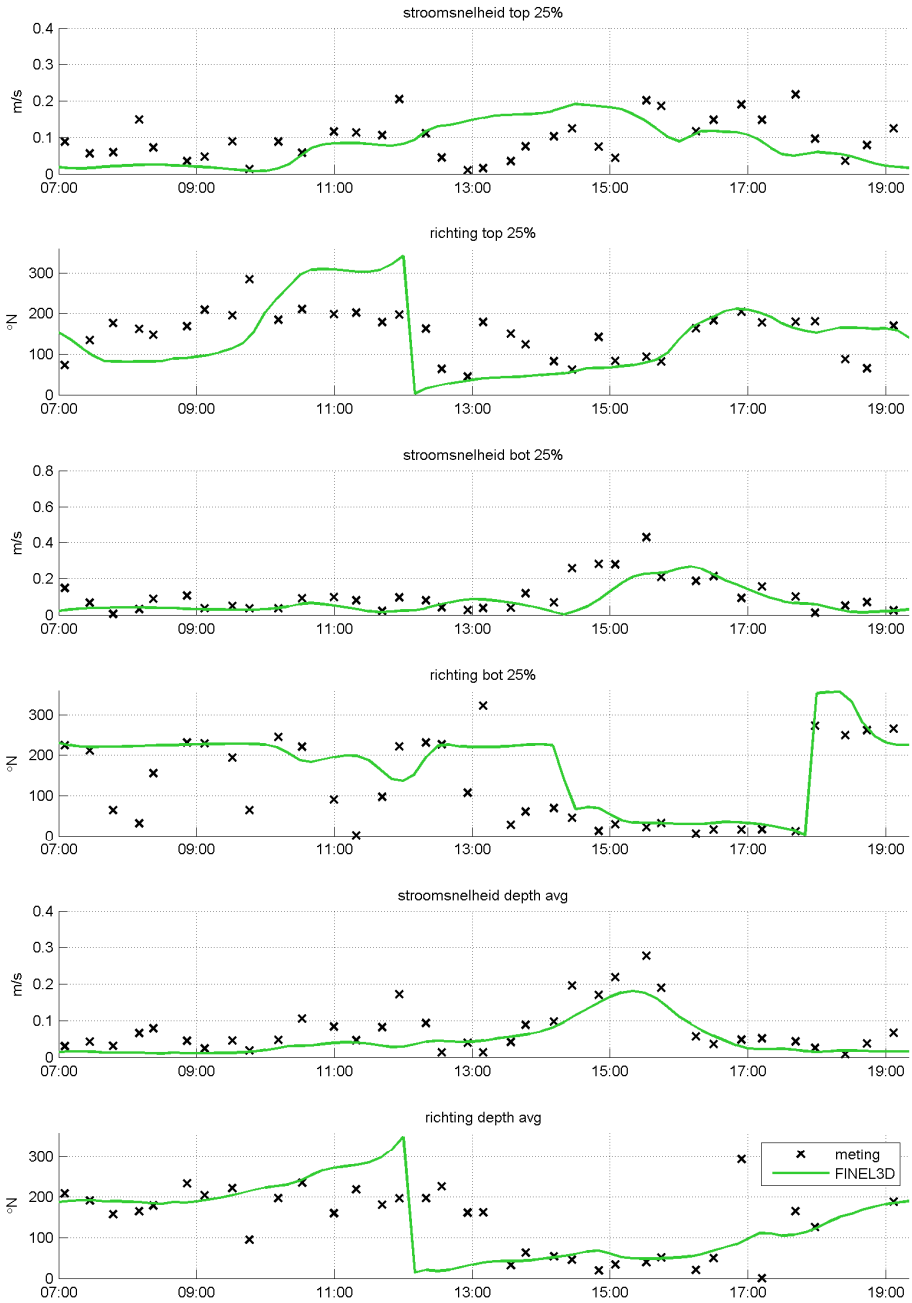
Figuur A.19: Vergelijking van de gemeten en gemodelleerde stroomsnelheid en stroomrichting op punt 8 van raai 2 in de Westbuitenhaven ten behoeve van de kalibratie van het FINEL3D model op 21 maart 2007.



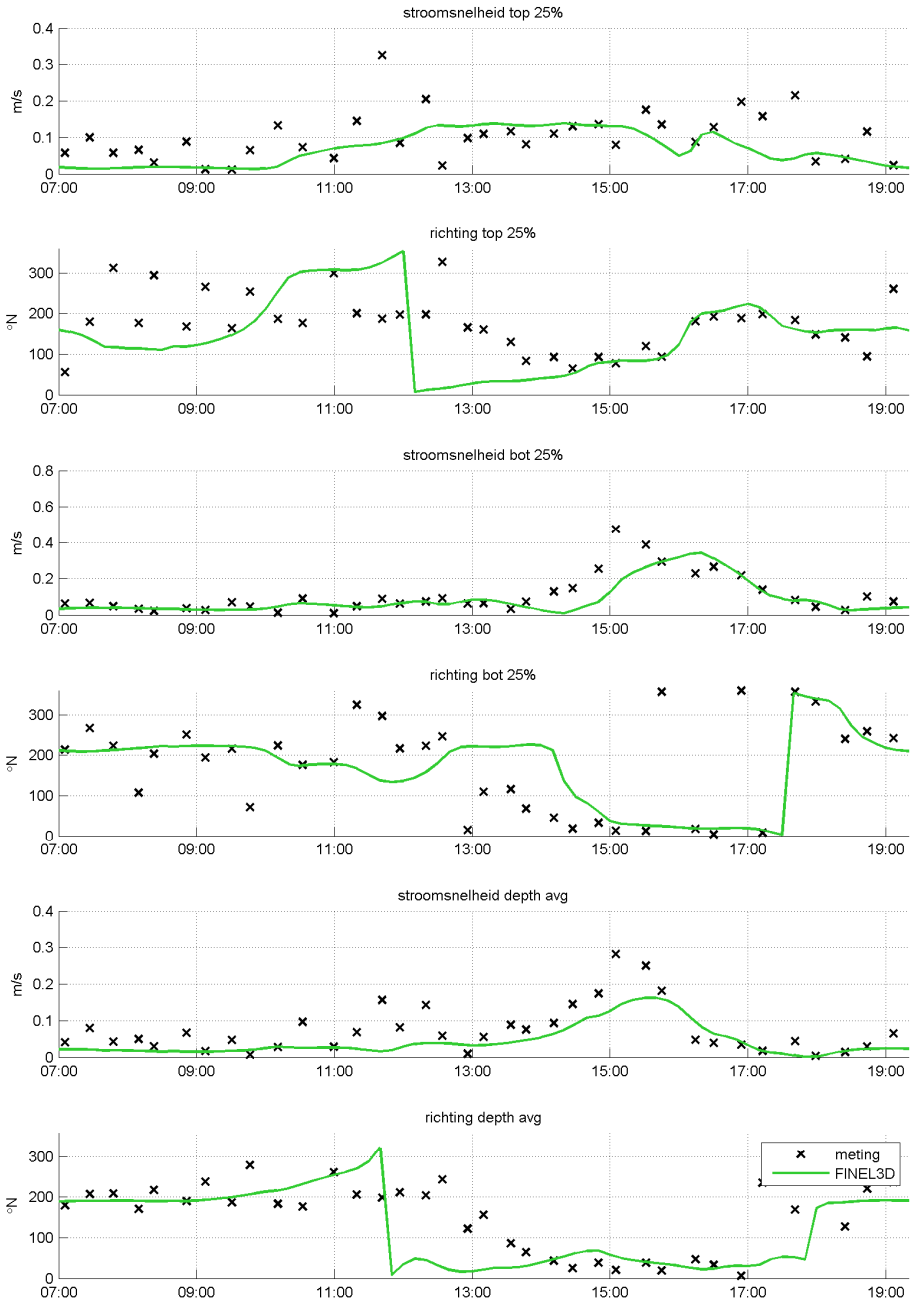
Figuur A.20: Vergelijking van de gemeten en gemodelleerde stroomsnelheid en stroomrichting op punt 9 van raai 2 in de Westbuitenhaven ten behoeve van de kalibratie van het FINEL3D model op 21 maart 2007.



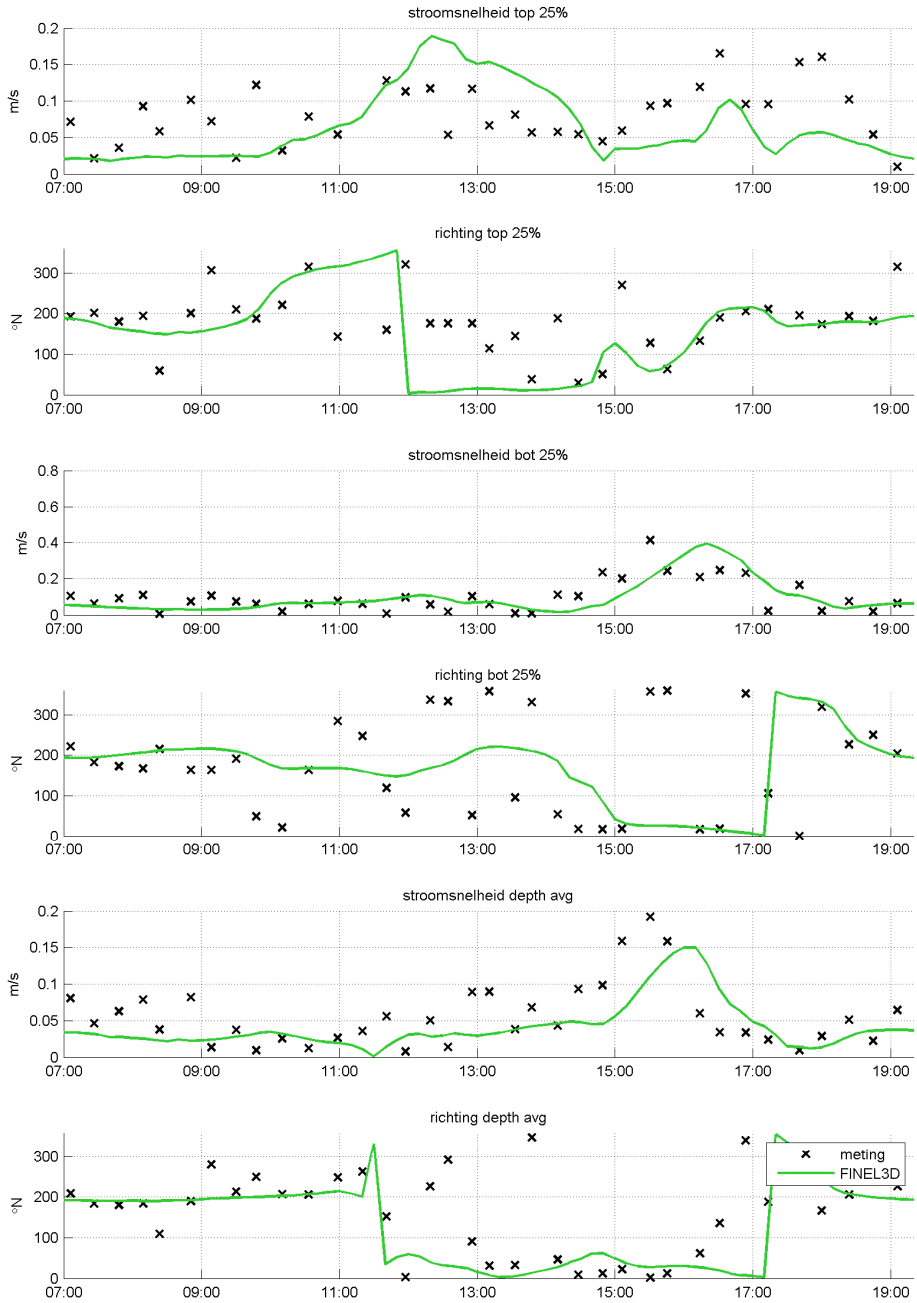
Figuur A.21: Vergelijking van de gemeten en gemodelleerde stroomsnelheid en stroomrichting op punt 10 van raai 2 in de Westbuitenhaven ten behoeve van de kalibratie van het FINEL3D model op 21 maart 2007.



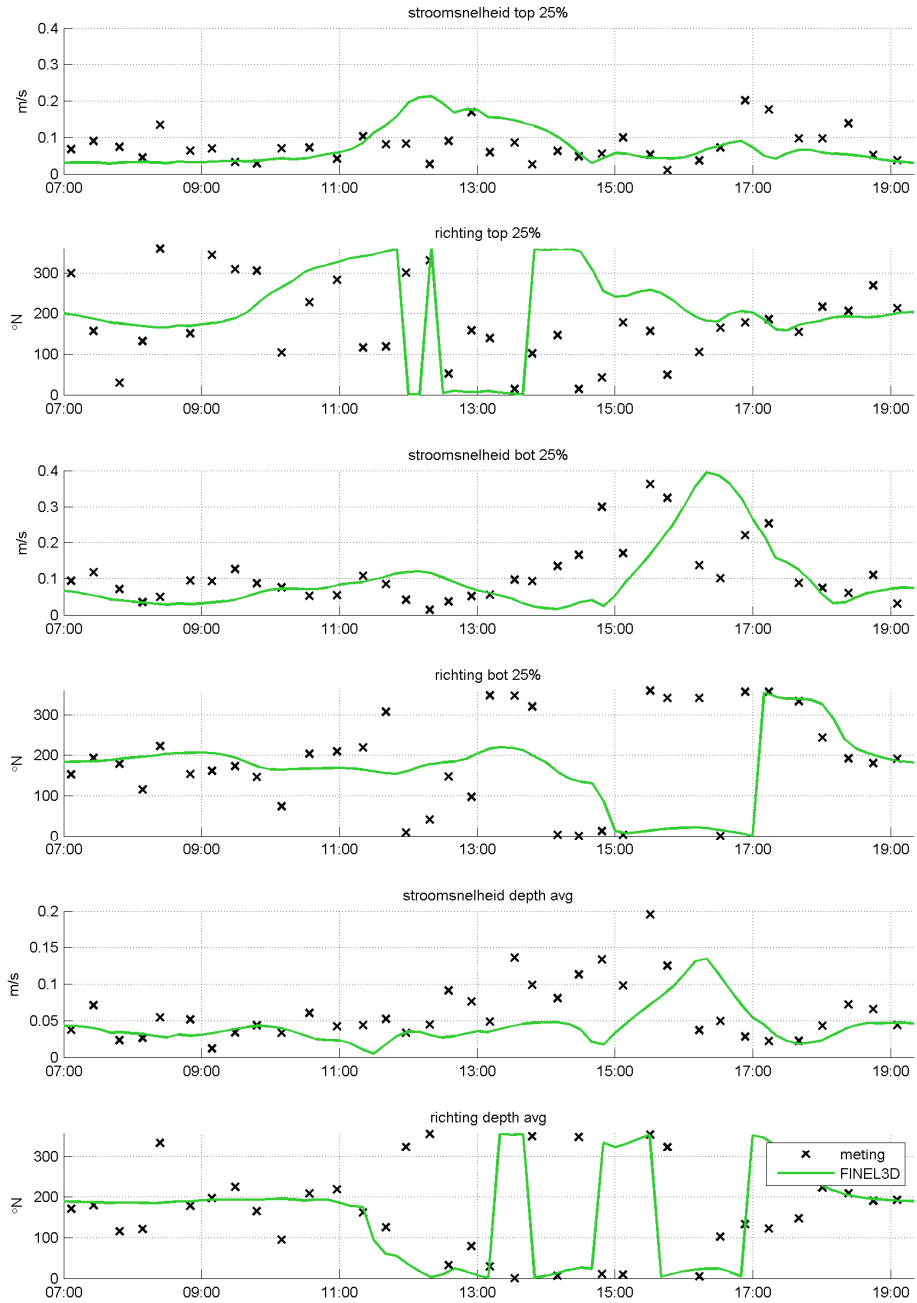
Figuur A.22: Vergelijking van de gemeten en gemodelleerde stroomsnelheid en stroomrichting op punt 1 van raai 3 in de Westbuitenhaven ten behoeve van de kalibratie van het FINEL3D model op 21 maart 2007.



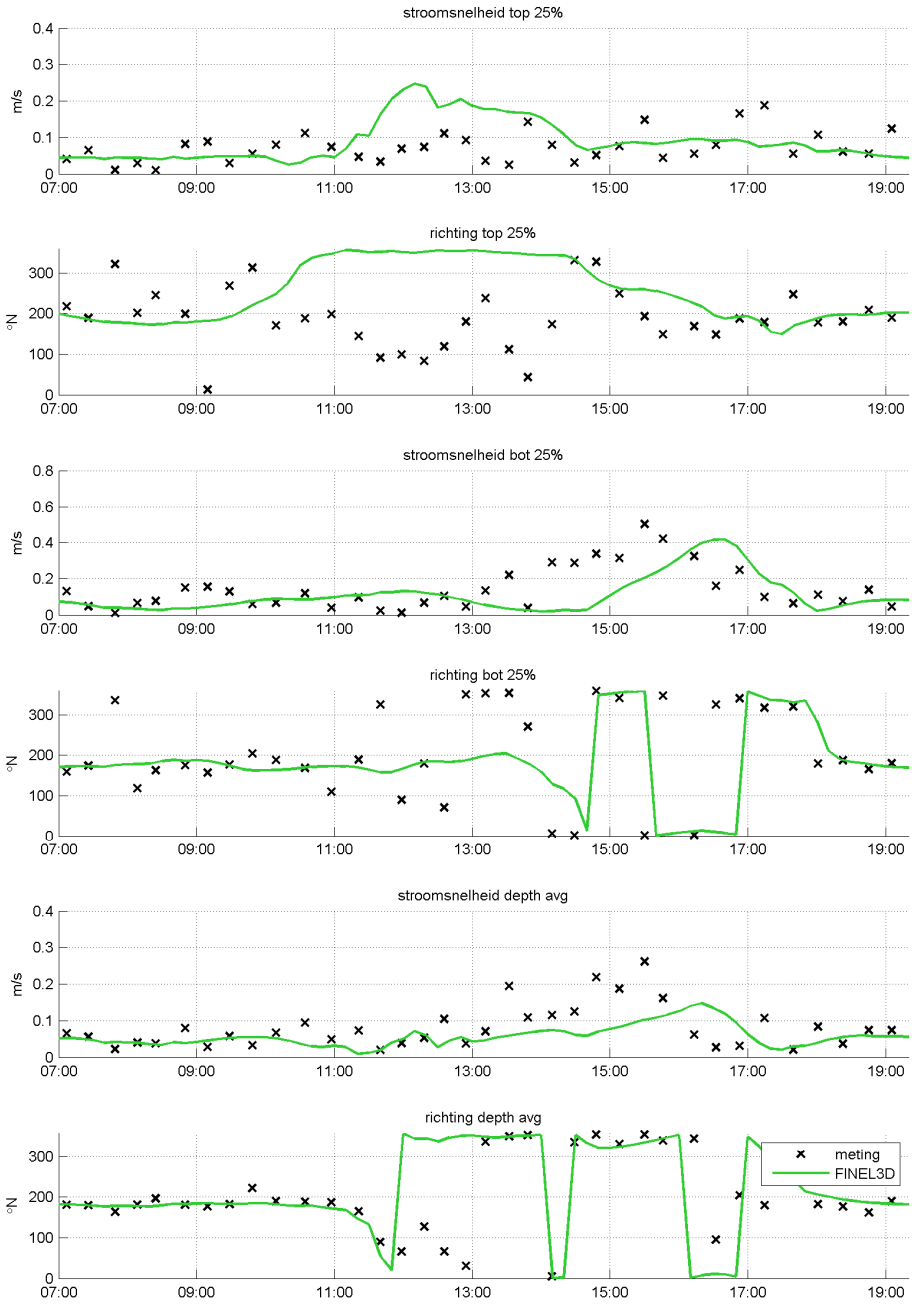
Figuur A.23: Vergelijking van de gemeten en gemodelleerde stroomsnelheid en stroomrichting op punt 2 van raai 3 in de Westbuitenhaven ten behoeve van de kalibratie van het FINEL3D model op 21 maart 2007.



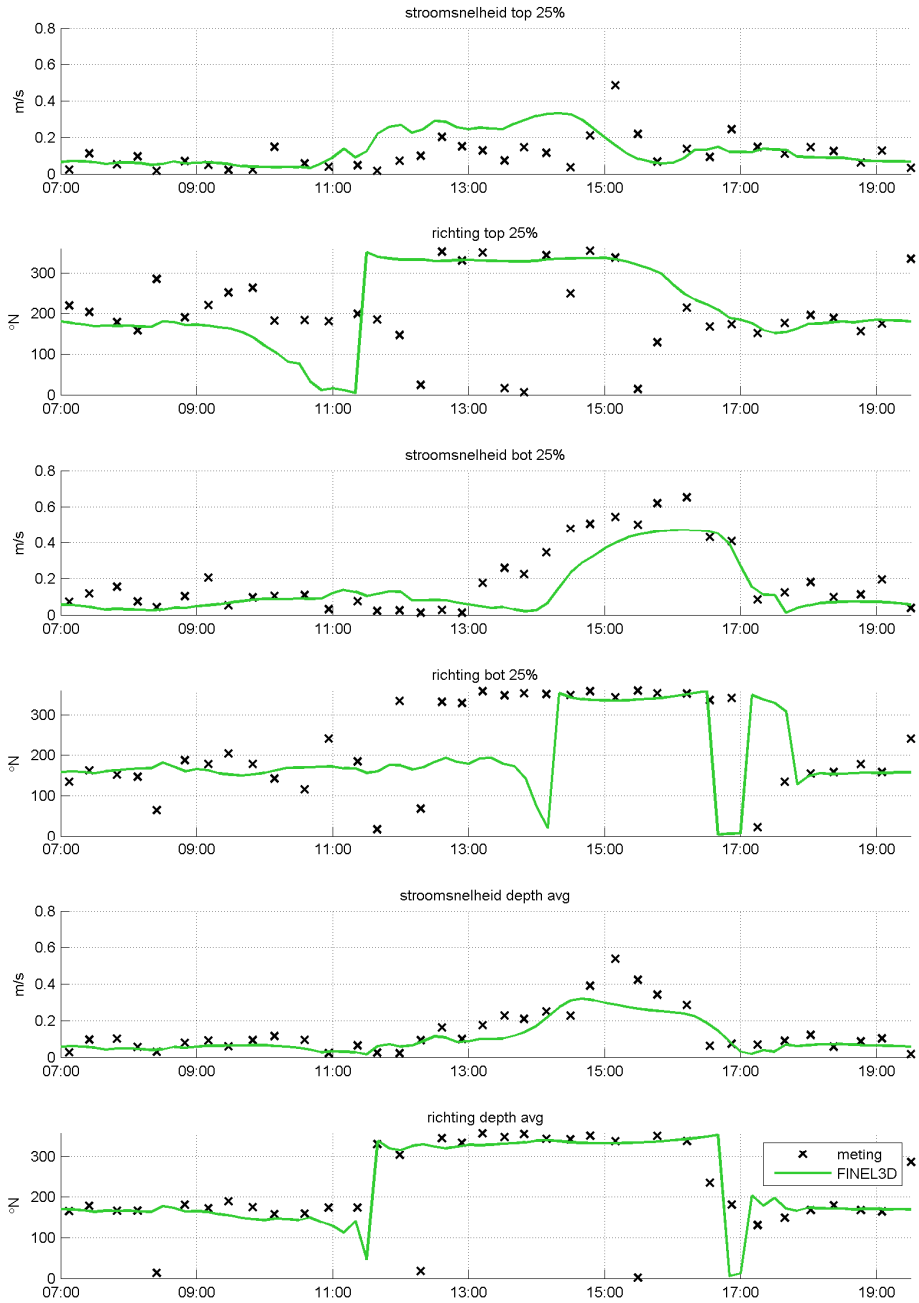
Figuur A.24: Vergelijking van de gemeten en gemodelleerde stroomsnelheid en stroomrichting op punt 3 van raai 3 in de Westbuitenhaven ten behoeve van de kalibratie van het FINEL3D model op 21 maart 2007.



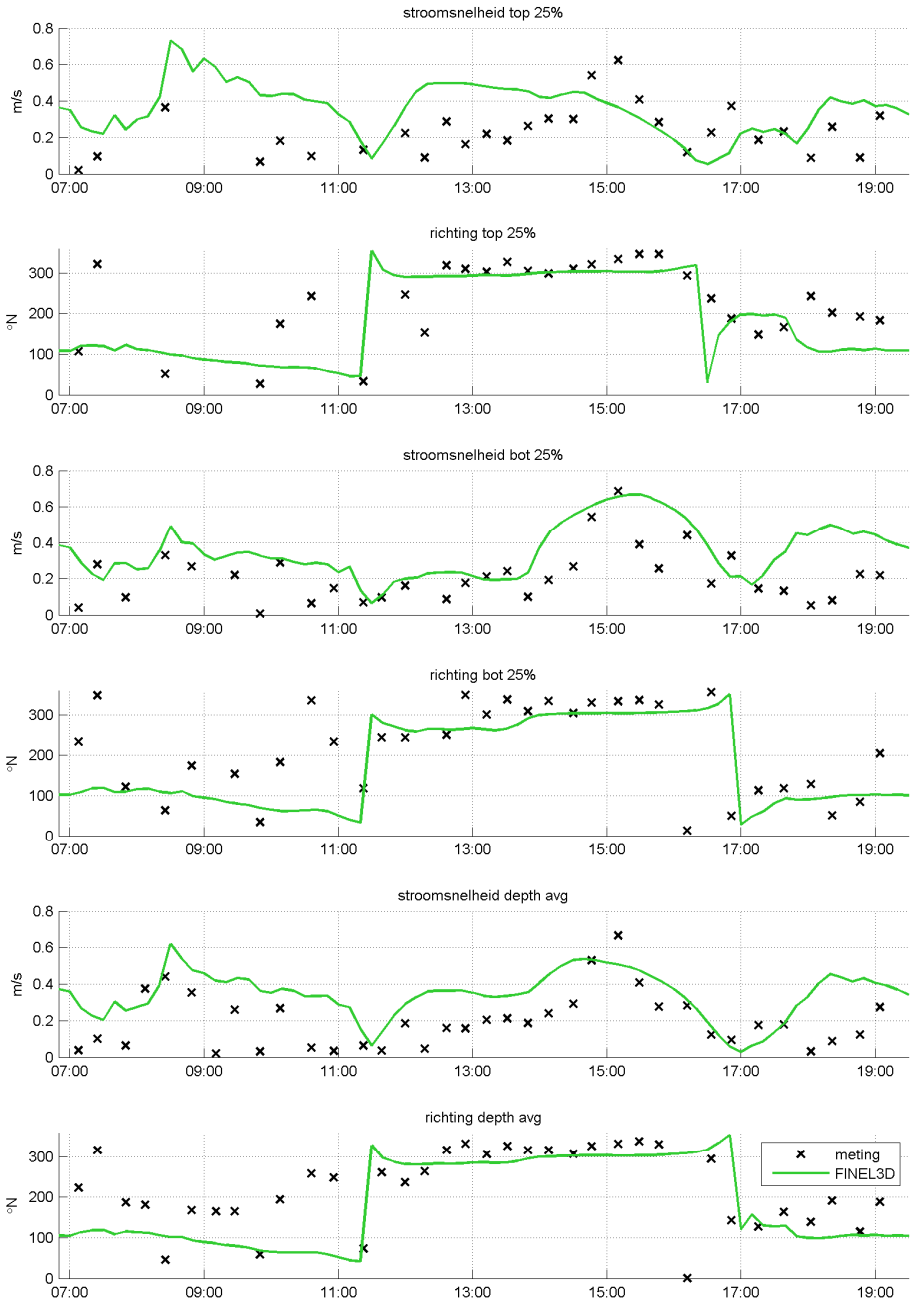
Figuur A.25: Vergelijking van de gemeten en gemodelleerde stroomsnelheid en stroomrichting op punt 4 van raai 3 in de Westbuitenhaven ten behoeve van de kalibratie van het FINEL3D model op 21 maart 2007.



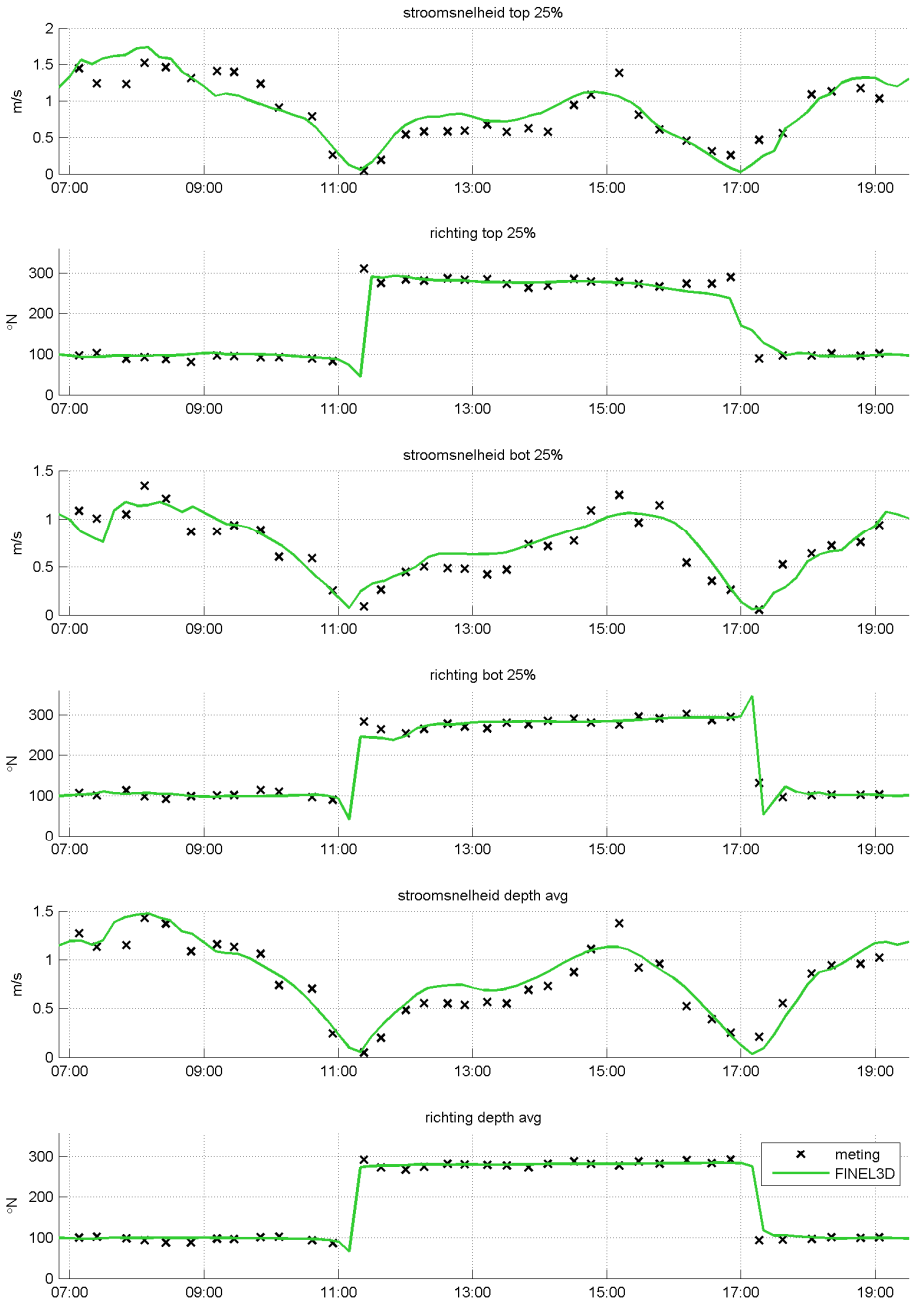
Figuur A.26: Vergelijking van de gemeten en gemodelleerde stroomsnelheid en stroomrichting op punt 5 van raai 3 in de Westbuitenhaven ten behoeve van de kalibratie van het FINEL3D model op 21 maart 2007.



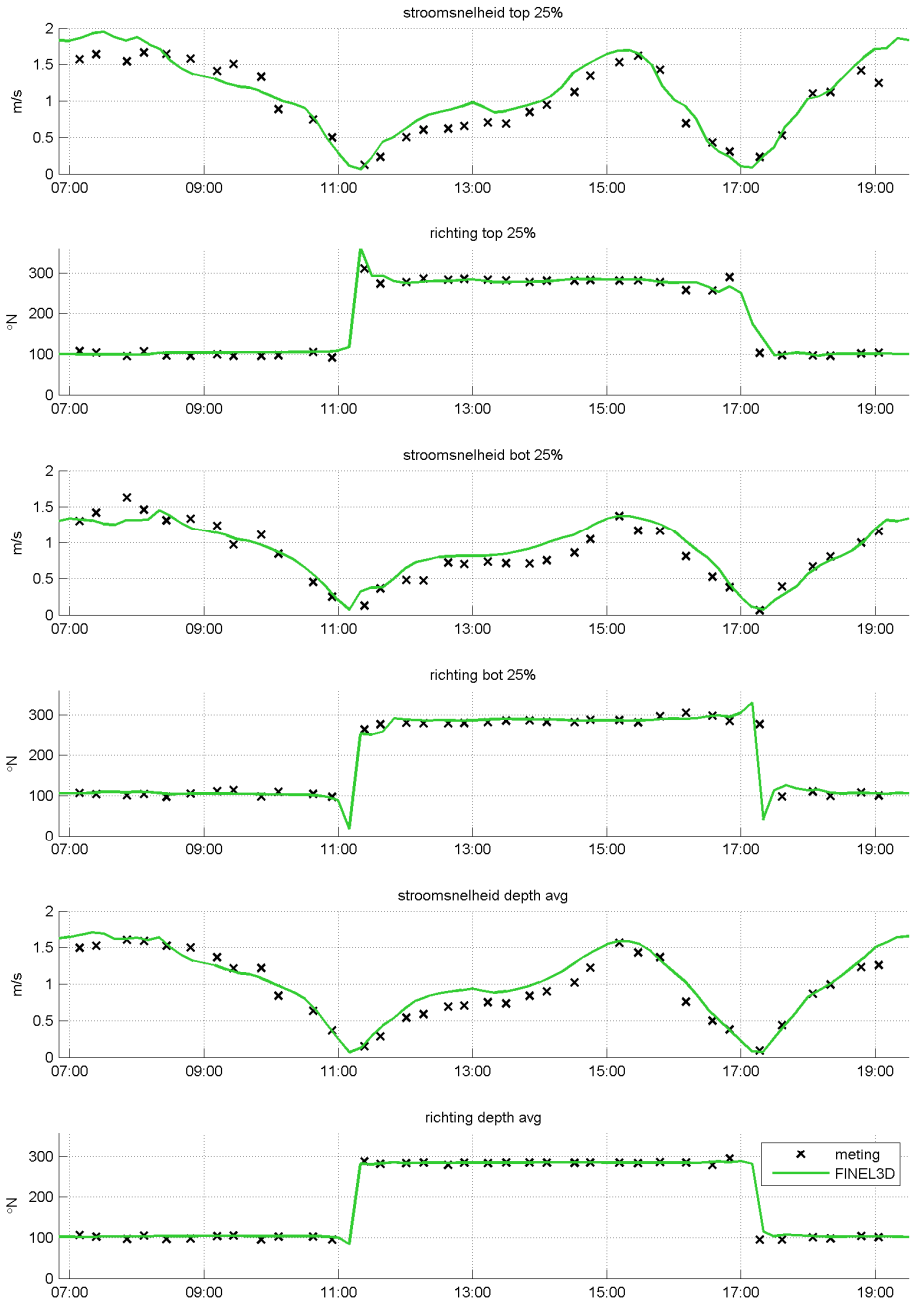
Figuur A.27: Vergelijking van de gemeten en gemodelleerde stroomsnelheid en stroomrichting op punt 6 van raai 3 in de Westbuitenhaven ten behoeve van de kalibratie van het FINEL3D model op 21 maart 2007.



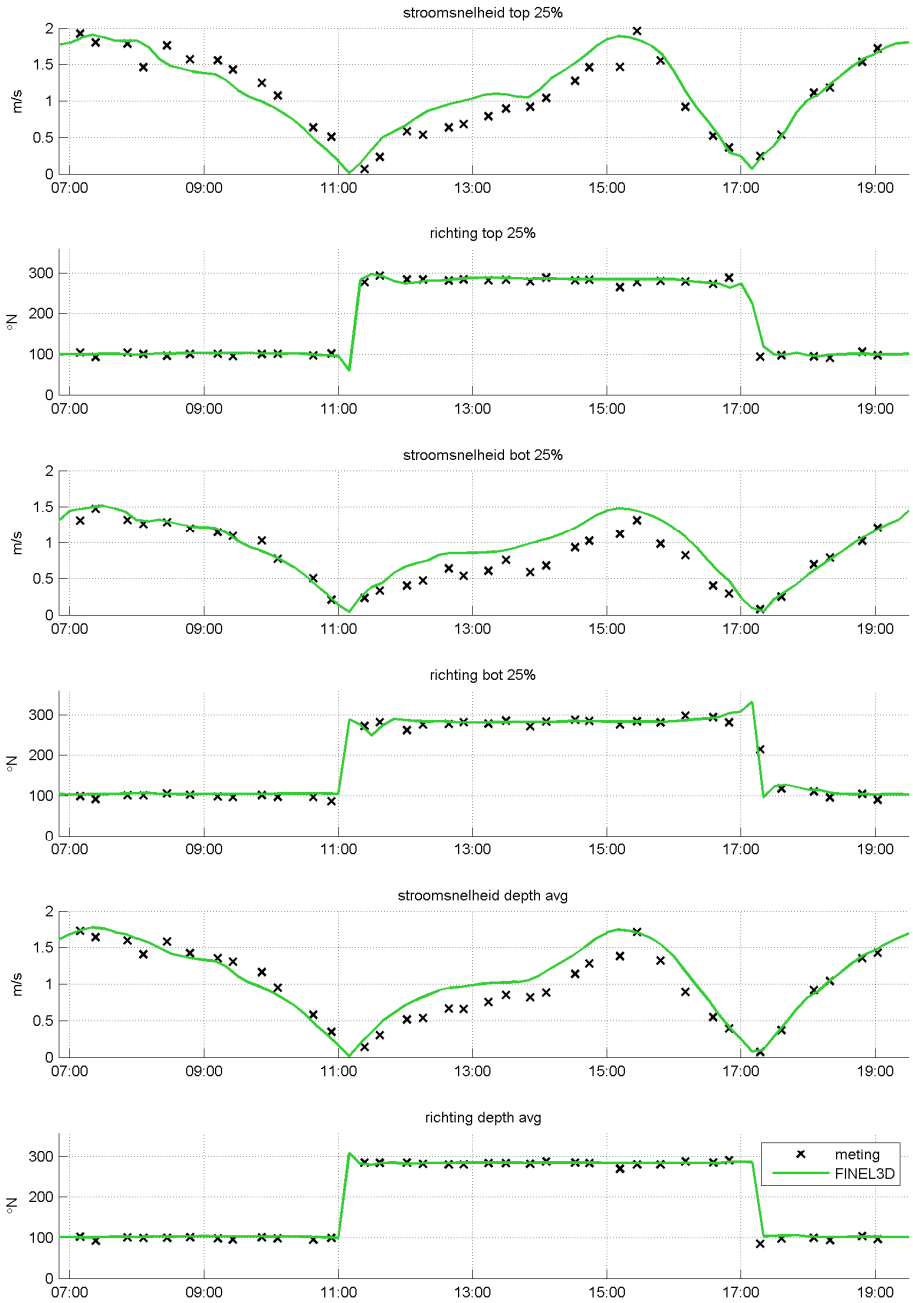
Figuur A.28: Vergelijking van de gemeten en gemodelleerde stroomsnelheid en stroomrichting op punt 7 van raai 3 in de Westbuitenhaven ten behoeve van de kalibratie van het FINEL3D model op 21 maart 2007.



Figuur A.29: Vergelijking van de gemeten en gemodelleerde stroomsnelheid en stroomrichting op punt 8 van raai 3 in de Westbuitenhaven ten behoeve van de kalibratie van het FINEL3D model op 21 maart 2007.



Figuur A.30: Vergelijking van de gemeten en gemodelleerde stroomsnelheid en stroomrichting op punt 9 van raai 3 in de Westbuitenhaven ten behoeve van de kalibratie van het FINEL3D model op 21 maart 2007.



Figuur A.31: Vergelijking van de gemeten en gemodelleerde stroomsnelheid en stroomrichting op punt 10 van raai 3 in de Westbuitenhaven ten behoeve van de kalibratie van het FINEL3D model op 21 maart 2007.

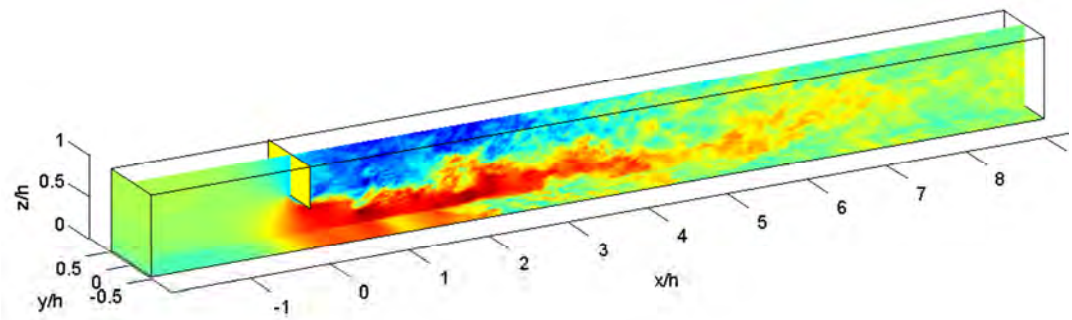
B TUDFLOW3D

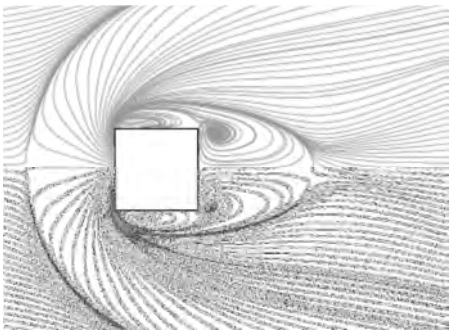
TUDflow3d is een volledig driedimensionale numeriek stromingsmodel dat gedetailleerde resultaten met betrekking tot turbulentie geeft, op prototypeschaal. De Large Eddy Simulation (LES) benadering is gebruikt om de invloed van turbulentie mee te nemen, wat inhoudt dat de meest belangrijke wervelingen op grote schaal daadwerkelijk opgelost worden, in plaats van benaderd met een model zoals in RANS. Met het model kunnen dichtheidsstroming, bijvoorbeeld bij warm/koudwateruitlaten veroorzaakt door temperatuur, of door verschillen in saliniteit, en sedimenttransport worden bepaald.

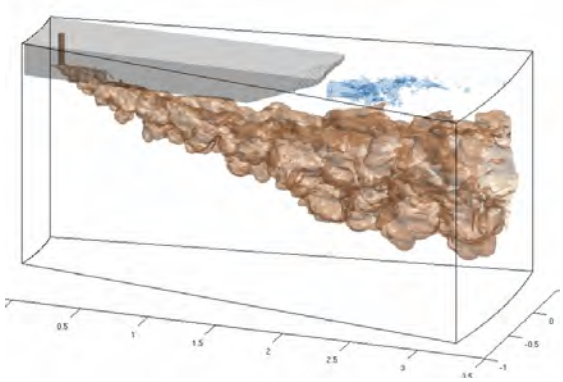
TUDflow3d is gebaseerd op een numerieke code afkomstig van TU Delft en is door Svašek Hydraulics verder ontwikkeld voor toepassingen op prototypeschaal. Het model gebruikt een snelle solver op gestructureerde rekenroosters en rekent parallel via MPI. Op een 8 core machine kunnen prototypeschaal stromingsberekeningen met hoge Reynoldsgetallen gesimuleerd worden binnen uren-dagen op rekenroosters bestaande uit 1-50 miljoen elementen.

TUDflow3d is succesvol toegepast op:

- Loslating van sedimentpluimen van een varend baggervaartuig
- Loslating van staartpluimen nabij de zeebodem
- Zoutpluimen in dwarsstromingen
- Turbulente stroming in waterlopen
- Turbulente stroming in waterlopen met hoge en lage sediment concentraties (wel of geen invloed van concentratie op dichtheid en snelheden)
- Dichtheidsstroming met en zonder sedimentatie







SVAŠEK HYDRAULICS

SVAŠEK HYDRAULICS

SVAŠEK HYDRAULICS

COASTAL, HARBOUR AND RIVER CONSULTANTS