



Vlaanderen
is wetenschap

20_060_3
WL rapporten

Operationele voorspelling dwarsstromingen Platen van Ossense

Deelrapport 3
Validatie NeVla model voor representatie dwarsstromingen Ossense

DEPARTEMENT
MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

Operationele voorspelling dwarsstroming Platen van Ossenisse

Deelrapport 3 – Validatie NeVla model voor representatie dwarsstromingen Ossenisse

Stark, J.; Vanlede, J.; Plancke, Y.

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 2022
D/2022/3241/198

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Stark, J.; Vanlede, J.; Plancke, Y. (2022). Operationele voorspelling dwarsstroming Platen van Ossensisse: Deelrapport 3 – Validatie NeVla model voor representatie dwarsstromingen Ossensisse. Versie 2.0. WL Rapporten, 20_060_3. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

Overname uit of verwijzen naar deze publicatie kan enkel mits uitdrukkelijke en schriftelijke toestemming van de opdrachtgever of van het Waterbouwkundig Laboratorium.

Documentidentificatie

Opdrachtgever:	GNA	Ref.:	WL2022R20_060_3
Trefwoorden (3-5):	Neervorming; Dwarsstroming; Westerschelde; Platen van Ossensisse; Delft3D		
Kennisdomeinen	Hydraulica en Sediment > Hydrodynamica > Stroomsnelheden -en patronen > Numerieke modelleringen		
Tekst (p.):	47	Bijlagen (p.):	21
Vertrouwelijk:	<input checked="" type="checkbox"/> Nee	<input checked="" type="checkbox"/> Online beschikbaar	

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

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Vanlede, J.	Getekend door:Joris Vanlede (Signature) Getekend op:2022-12-12 09:31:14 +01:0 Reden:Ik keur dit document goed 
Projectleider:	Plancke, Y.	Getekend door:Yves Plancke (Signature) Getekend op:2022-12-06 08:54:35 +01:0 Reden:Ik keur dit document goed 

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Bellafkih, K.	Getekend door:Abdelkarim Bellafkih (Sign) Getekend op:2022-11-29 21:11:35 +01:0 Reden:Ik keur dit document goed 
-----------------	---------------	--



Abstract

In deze studie is de modelprestatie van het Delft3D-NeVla model onderzocht voor de representatie van dwarsstromingen als gevolg van neervorming aan de oostzijde van de Platen van Ossensisse. Hiervoor werd het numeriek model NeVla in verschillende versies (i.e., in Simona/Waqua en Delft3D) en met verschillende eerder gekalibreerde ruwheidsvelden getest.

Uit een beschikbare dataset aan gevaren ADCP-metingen is een selectie van enkele getijden gemaakt voor deze validatieoefening. De beschikbare dataset bevatte aanvankelijk enkel metingen tijdens hoge springtijden en stormtijden. In het kader van deze studie is ook een recente meetcampagne tijdens doottij aan de dataset toegevoegd.

Voorafgaand aan de validatieoefening is eerst de springtij-doottij-variantie onderzocht voor de gemodelleerde dwarsstroming, alsmede de representatie van de springtij-doottij-variantie van het verticaal getij in het studiegebied. Vervolgens is de representatie van de dwarsstroming en het verticaal getij voor de geselecteerde meetcampagnes gevalideerd.

In alle configuraties is het model in staat de neervorming en bijbehorende circulaire stromingspatronen rond de Platen van Ossensisse kwalitatief te representeren. De sterke dwarsstromingen tijdens springtij worden echter onderschat door de modelsimulaties. Hetzelfde geldt voor de aan de dwarsstroming gecorreleerde maximum stijgsnelheid in Hansweert, die ook juist voor de hoogste getijden wordt onderschat. Ondanks deze onderschatting hebben simulaties waarin het ruwheidsveld uit het operationeel model is gebruikt toch een geringe voorspellende waarde voor de sterkte van de dwarsstroming tijdens de geselecteerde (spring)tijden ($R^2 = 0,56-0,75$). Er wordt door de modellen wel een duidelijke springtij-doottij-variantie in sterkte van de dwarsstroming gesimuleerd. Vanwege het ontbreken van voldoende meetdata tijdens reguliere tij-condities kon deze springtij-doottij-variantie nog niet worden gevalideerd.

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	V
Lijst van de tabellen.....	VII
Lijst van de figuren	VIII
1 Introductie	1
1.1 Situering.....	1
1.2 Doelstelling	1
1.3 Leeswijzer	2
2 Studiegebied.....	3
3 Bestaand onderzoek.....	4
3.1 Ontstaan van de neer	4
3.2 Voorspelling van dwarsstroming en waarschuwingen door RWS.....	4
3.3 Analyse van de ADCP-stroommetingen.....	5
3.4 Modelonderzoek	6
3.4.1 Onderzoek in het kader van LTV – Veiligheid en toegankelijkheid	6
3.4.2 Onderzoek in het kader van Agenda voor de Toekomst	6
3.4.3 Scenario-onderzoek naar morfologische ingrepen	6
4 Meetcampagnes	8
4.1 Overzicht gevaren ADCP-metingen	8
4.2 Analyse verticaal getij en dwarsstromingen.....	10
4.3 Selectie meetcampagnes.....	12
5 Modelopzet	13
5.1 Operationeel NeVla model in Waqua/SIMONA	13
5.2 Delft3D-NeVla.....	14
5.3 Modelrooster.....	14
5.4 Topo-bathymetrische gegevens	15
5.5 Randvoorwaarden	15
5.5.1 Afwaartse randvoorwaarden.....	15
5.5.2 Opwaartse randvoorwaarden	16
5.5.3 Randvoorwaarden saliniteit	17

5.6	Bodemruwheid	17
5.6.1	Ruwheidsveld operationeel model.....	17
5.6.2	Ruwheidsveld uit AvdT-studie naar sedimenttransport rondom de Drempel van Hansweert	18
5.7	Overige modelinstellingen.....	19
6	Modelresultaten	21
6.1	Springtij-doodtij variatie.....	21
6.1.1	Validatie omgevingsparameters verticaal getij	22
6.1.2	Voorspellende waarde van gesimuleerde stijgsnelheid voor springtij-doodtij variatie dwarsstroming.....	28
6.2	Validatie voor geselecteerde meetcampagnes	30
6.2.1	Dwarsstroming	30
6.2.2	Omgevingsparameters verticaal getij.....	32
6.3	Invloed afwaartse randvoorwaarden: astronomisch getij vs. geobserveerd getij.....	40
7	Conclusies en aanbevelingen	44
7.1	Aanbevelingen	45
8	Referenties	46
	Bijlage A – Waterstandsreeksen afwaartse rand	B1
	Bijlage B – Geobserveerde en gemodelleerde dwarsstroming	B5
	Bijlage C - Geobserveerde en gemodelleerde getijkaracteristieken	B17

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Geselecteerde meetcampagnes en tij-condities.	12
Tabel 2 – Opwaartse randvoorwaarden.....	16
Tabel 3 – Basisinstellingen Simona-NeVla model.....	19
Tabel 4 – Basisinstellingen Delft3D-NeVla model	20
Tabel 5 – Modelconfiguraties.....	21
Tabel 6 – Getijparameters voor het getij van 02/02/2014 in verschillende modelconfiguraties.	B17
Tabel 7 – Getijparameters voor het getij van 22/10/2014 in verschillende modelconfiguraties.	B17
Tabel 8 – Getijparameters voor het getij van 22/03/2015 in verschillende modelconfiguraties.	B18
Tabel 9 – Getijparameters voor het getij van 28/11/2015 in verschillende modelconfiguraties.	B18
Tabel 10 – Getijparameters voor het getij van 30/11/2015 in verschillende modelconfiguraties.	B18
Tabel 11 – Getijparameters voor het getij van 11/03/2016 in verschillende modelconfiguraties.	B19
Tabel 12 – Getijparameters voor het getij van 02/03/2017 in verschillende modelconfiguraties.	B19
Tabel 13 – Getijparameters voor het getij van 05/10/2017 in verschillende modelconfiguraties.	B19
Tabel 14 – Getijparameters voor het getij van 03/03/2018 in verschillende modelconfiguraties.	B20
Tabel 15 – Getijparameters voor het getij van 21/02/2019 in verschillende modelconfiguraties.	B20
Tabel 16 – Getijparameters voor het getij van 23/02/2019 in verschillende modelconfiguraties.	B20
Tabel 17 – Getijparameters voor het getij van 21/05/2021 in verschillende modelconfiguraties.	B21

Lijst van de figuren

Figuur 1 – Overzichtsk kaart van geulen en platen in het studiegebied.....	3
Figuur 2 – Ligging gevaren ADCP-transecten.....	5
Figuur 3 – Resultaten van de modelkalibratie van het Delft3D-NeVla model en TELEMAC-3D model op twee meetpunten op het ondiepe plateau langs de Platen van Ossenisse tijdens hoogwater springtij op 08/05/2016	7
Figuur 4 – Modelresultaten van het gekalibreerde Delft3D-NeVla model op het ondiepe plateau langs de Platen van Ossenisse bij neervorming tijdens hoogwater springtij op 08/05/2016	7
Figuur 5 – Hoogwaters tijdens de beschikbare meetcampagnes sinds 2011.	8
Figuur 6 – Segment langs de groene boeienlijn waarop de gemeten stroomsnelheden worden geprojecteerd.	9
Figuur 7 – Maximaal verschil in dwarsstroming tijdens de beschikbare meetcampagnes sinds 2011.....	9
Figuur 8 – Maximaal verschil in dwarsstroming ten opzichte van de bijbehorende hoogwaterniveaus te Hansweert tijdens de beschikbare meetcampagnes sinds 2011.	10
Figuur 9 – Maximaal verschil in dwarsstroming ten opzichte van de maximale stijgsnelheid te Hansweert tijdens de beschikbare meetcampagnes sinds 2011.....	11
Figuur 10 – Waterstandsverloop te Hansweert tijdens de beschikbare meetcampagnes sinds 2011.	11
Figuur 11 – Illustratie van het Delft3D-NeVla rooster met locatie van de afgeknipte rand bij Westkapelle-Cadzand	14
Figuur 12 – Toevoeging van GOG/GGG's aan het NeVla grid door Chu et al. (2016).	15
Figuur 13 – Geïmplementeerd waterstandsverloop aan afwaartse rand voor langdurige simulatie.	16
Figuur 14 – Manning's ruwheidsveld zoals gekalibreerd bij afregeling van het 2D NeVla model door Vanlede et al. (2009).....	17
Figuur 15 – Manning's ruwheidsveld Delft3D-NeVla model zoals gekalibreerd in AvdT-studie Stark et al. (2019).	18
Figuur 16 – Gesimuleerde en geobserveerde hoogwaters te Hansweert voor lange termijn Simona run. ...	22
Figuur 17 – Gesimuleerde en geobserveerde hoogwaters te Hansweert voor lange termijn Delft3D run met ruwheidsveld uit operationeel model.	23
Figuur 18 – Gesimuleerde en geobserveerde hoogwaters te Hansweert voor lange termijn Delft3D run met ruwheidsveld uit AvdT-studie "Sedimentatie Drempels".	23
Figuur 19 – Gesimuleerde en geobserveerde maximale stijgsnelheid te Hansweert voor lange termijn Simona run.	24
Figuur 20 – Gesimuleerde en geobserveerde maximale stijgsnelheid te Hansweert voor lange termijn Delft3D run met ruwheidsveld uit operationeel model.	25
Figuur 21 – Gesimuleerde en geobserveerde maximale stijgsnelheid te Hansweert voor lange termijn Delft3D run met ruwheidsveld uit AvdT-studie "Sedimentatie Drempels"	25

Figuur 22 – Gesimuleerd en geobserveerd maximaal verhang tussen Terneuzen en Hansweert voor lange termijn Simona run.....	26
Figuur 23 – Gesimuleerd en geobserveerd maximaal verhang tussen Terneuzen en Hansweert voor lange termijn Delft3D run met ruwheidsveld uit operationeel model.....	27
Figuur 24 – Gesimuleerd en geobserveerd maximaal verhang tussen Terneuzen en Hansweert voor lange termijn Delft3D run met ruwheidsveld uit AvdT-studie “Sedimentatie Drempels”.....	27
Figuur 25 – Maximale dwarsstromingen ten opzichte van maximale stijgsnelheid Hansweert voor Simona run (operationeel model).....	28
Figuur 26 – Maximale dwarsstromingen ten opzichte van maximale stijgsnelheid Hansweert voor Delft3D run met ruwheidsveld uit operationeel model.....	29
Figuur 27 – Maximale dwarsstromingen ten opzichte van maximale stijgsnelheid Hansweert voor Delft3D run met ruwheidsveld uit AvdT-studie “Sedimentatie Drempels”.....	29
Figuur 28 – Gesimuleerde en geobserveerde dwarsstroming voor Simona run geforceerd met gemeten waterstandsverloop bij Cadzand-Westkapelle	31
Figuur 29 – Gesimuleerde en geobserveerde dwarsstroming voor Delft3D run met ruwheidsveld uit operationeel model.....	31
Figuur 30 – Gesimuleerde en geobserveerde dwarsstroming voor Delft3D run met ruwheidsveld uit AvdT-studie “Sedimentatie Drempels”.....	32
Figuur 31 – Gesimuleerde en geobserveerde hoogwaters te Hansweert tijdens meetcampagnes voor Simona run.....	33
Figuur 32 – Gesimuleerde en geobserveerde hoogwaters te Hansweert tijdens meetcampagnes voor Delft3D run met ruwheidsveld uit operationeel model.....	33
Figuur 33 – Gesimuleerde en geobserveerde hoogwaters te Hansweert tijdens meetcampagnes voor Delft3D run met ruwheidsveld uit AvdT-studie “Sedimentatie Drempels”.....	34
Figuur 34 – Correlatie tussen gesimuleerde en geobserveerde maximale stijgsnelheid te Hansweert tijdens meetcampagnes voor Simona run.....	35
Figuur 35 – Correlatie tussen gesimuleerde en geobserveerde maximale stijgsnelheid te Hansweert tijdens meetcampagnes voor Delft3D run met ruwheidsveld uit operationeel model.....	36
Figuur 36 – Correlatie tussen gesimuleerde en geobserveerde maximale stijgsnelheid te Hansweert tijdens meetcampagnes voor Delft3D run met ruwheidsveld uit AvdT-studie “Sedimentatie Drempels”.....	36
Figuur 37 – Correlatie tussen de geobserveerde dwarsstroming en de maximale stijgsnelheid te Hansweert.....	37
Figuur 38 – Correlatie tussen gesimuleerd en geobserveerd maximaal verhang tussen Terneuzen en Hansweert tijdens meetcampagnes voor Simona run.....	38
Figuur 39 – Correlatie tussen gesimuleerd en geobserveerd maximaal verhang tussen Terneuzen en Hansweert tijdens meetcampagnes voor Delft3D run met ruwheidsveld uit operationeel model.....	39
Figuur 40 – Correlatie tussen gesimuleerd en geobserveerd maximaal verhang tussen Terneuzen en Hansweert tijdens meetcampagnes voor Delft3D run met ruwheidsveld uit AvdT-studie “Sedimentatie Drempels”.....	39
Figuur 41 – Verschil in hoogwater te Hansweert tussen simulaties geforceerd met astronomisch en geobserveerd getij.....	41

Figuur 42 – Verschil in stijgsnelheid te Hansweert tussen simulaties geforceerd met astronomisch en geobserveerd getij.....	42
Figuur 43 – Verschil in maximaal verhang tussen Terneuzen en Hansweert voor simulaties geforceerd met astronomisch en geobserveerd getij.....	42
Figuur 44 – Verschil in maximale dwarsstroming tussen simulaties geforceerd met astronomisch en geobserveerd getij.....	43
Figuur 45 – Waterstandreeksen afwaartse rand bij Cadzand voor meetcampagne 2/2/2014.....	B1
Figuur 46 – Waterstandreeksen afwaartse rand bij Cadzand voor meetcampagne 22/10/2014.....	B1
Figuur 47 – Waterstandreeksen afwaartse rand bij Cadzand voor meetcampagne 22/3/2015.....	B1
Figuur 48 – Waterstandreeksen afwaartse rand bij Cadzand voor meetcampagne 28/11/2015.....	B2
Figuur 49 – Waterstandreeksen afwaartse rand bij Cadzand voor meetcampagne 30/11/2015.....	B2
Figuur 50 – Waterstandreeksen afwaartse rand bij Cadzand voor meetcampagne 11/3/2016.....	B2
Figuur 51 – Waterstandreeksen afwaartse rand bij Cadzand voor meetcampagne 2/3/2017.....	B3
Figuur 52 – Waterstandreeksen afwaartse rand bij Cadzand voor meetcampagne 5/10/2017.....	B3
Figuur 53 – Waterstandreeksen afwaartse rand bij Cadzand voor meetcampagne 3/3/2018.....	B3
Figuur 54 – Waterstandreeksen afwaartse rand bij Cadzand voor meetcampagne 21/2/2019.....	B4
Figuur 55 – Waterstandreeksen afwaartse rand bij Cadzand voor meetcampagne 23/2/2019.....	B4
Figuur 56 – Waterstandreeks afwaartse rand bij Cadzand voor meetcampagne 21/5/2021.....	B4
Figuur 57 – Gemeten en gemodelleerde dwarsstromingen voor getij van 02/02/2014.	B5
Figuur 58 – Gemeten en gemodelleerde dwarsstromingen voor getij van 22/10/2014.	B6
Figuur 59 – Gemeten en gemodelleerde dwarsstromingen voor getij van 22/03/2015.	B7
Figuur 60 – Gemeten en gemodelleerde dwarsstromingen voor getij van 28/11/2015.	B8
Figuur 61 – Gemeten en gemodelleerde dwarsstromingen voor getij van 30/11/2015.	B9
Figuur 62 – Gemeten en gemodelleerde dwarsstromingen voor getij van 11/03/2016.	B10
Figuur 63 – Gemeten en gemodelleerde dwarsstromingen voor getij van 02/03/2017.	B11
Figuur 64 – Gemeten en gemodelleerde dwarsstromingen voor getij van 05/10/2017.	B12
Figuur 65 – Gemeten en gemodelleerde dwarsstromingen voor getij van 03/03/2018.	B13
Figuur 66 – Gemeten en gemodelleerde dwarsstromingen voor getij van 21/02/2019.	B14
Figuur 67 – Gemeten en gemodelleerde dwarsstromingen voor getij van 23/02/2019.	B15
Figuur 68 – Gemeten en gemodelleerde dwarsstromingen voor getij van 21/05/2021.	B16

1 Introductie

1.1 Situering

In navolging van de stranding van de Fowairet ter hoogte van de Platen van Ossensisse in 2005 werden verschillende onderzoeken opgestart om meer inzicht te krijgen in de oorzaak van dit ongeval. Er werden zowel stroomsnelheidsmetingen uitgevoerd door Rijkswaterstaat (RWS) als numerieke modellen opgezet (Decrop *et al.*, 2009) om de lokale stroompatronen nabij de oostrand van de Platen van Ossensisse in beeld te brengen. Dit onderzoek toonde aan dat bij sterke springtijden er ter hoogte van de rand van de vaargeul aan de oostzijde van de Platen van Ossensisse een aanzienlijke stromingscomponent dwars op de vaargeul aanwezig kan zijn. De dwarsstroming wordt veroorzaakt door een grote neer die bij hoge (spring)tijden aanwezig is in dit gebied.

In het kader van de onderzoeksagenda *Agenda voor de Toekomst II* vanuit de VNSC werd het aspect “dwarsstroming” als prioritair topic geïdentificeerd. Door het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) werden reeds verschillende onderzoeken uitgevoerd om (1) het inzicht in de aandrijvende processen te verbeteren, (2) de numerieke modellen te verbeteren zodat zij in staat zijn de complexe stroompatronen nabij de oostrand van de Platen van Ossensisse te reproduceren en (3) mitigerende maatregelen te onderzoeken naar hun effectiviteit om de dwarsstroming te reduceren. Aansluitend op dit onderzoek, is vanuit de Gemeenschappelijke Nautische Autoriteit (GNA) het verzoek geformuleerd om de haalbaarheid van stromingsvoorspellingen ten behoeve van de potentiële dwarsstroming op te nemen.

Binnen dit project zal ingegaan worden op de performantie van de bestaande numerieke modellen voor het reproduceren van de dwarsstromingen nabij de Platen van Ossensisse. Er zal nagegaan worden of de klassieke voorspelmodellen ingezet kunnen worden voor het reproduceren van de dwarsstroming, of dat een specifiek model noodzakelijk is. Hierbij zal nagegaan worden hoe de modelinstellingen die nodig zijn om de neer te voorspellen, de voorspellingen van de waterstanden beïnvloeden. De neervorming aan de oostzijde van de Platen van Ossensisse is al meermaals modelmatig onderzocht met het 2Dh Delft3D-NeVla model (e.g. Decrop *et al.*, 2009; Vanlede *et al.*, 2009; Stark *et al.*, 2020). Naast dit Delft3D model, wordt in de reguliere voorspellingen Het NeVla model in SIMONA Waqua – 2D ingezet.

Bij de performantie-oefening voor de bestaande numerieke modellen voor het voorspellen van de dwarsstroming zal getracht worden om de selectie uit te voeren op de beschikbare dataset van uitgevoerde gevaren ADCP metingen door RWS Zee en Delta.

1.2 Doelstelling

Dit rapport heeft als doel om de modelprestatie van het NeVla model te onderzoeken voor de representatie van gemeten dwarsstromingen als gevolg van neervorming aan de oostzijde van de Platen van Ossensisse.

De modelvalidatie wordt uitgevoerd voor verschillende modellen (i.e., Delft3D en Simona) met in eerdere studies gekalibreerde ruwheidsvelden om de prestatie van het NeVla model in verschillende configuraties te onderzoeken.

Het uiteindelijke doel is om de voorspelling van de dwarsstroming in een operationele context in te zetten. In de huidige studie wordt de kwaliteit van de modellen nog onderzocht in een configuratie waarbij de modellen worden aangedreven door geobserveerde waterstanden. De implementatie van de modellen in de modeltrein van het voorspelinstrumentarium valt niet binnen deze studie.

1.3 Leeswijzer

Dit rapport is verder als volgt ingedeeld:

Hoofdstuk 2 bevat een beknopte beschrijving van het studiegebied.

Vervolgens wordt in Hoofdstuk 3 een overzicht gegeven van eerder (model)onderzoek naar de neervorming langs de oostrand van de Platen van Ossensisse.

Hoofdstuk 4 bevat een overzicht van de meetcampagnes waarin gevaren ADCP-metingen zijn gedaan om de neervorming en dwarsstroming in beeld te brengen. Ook wordt een selectie gemaakt van de meetcampagnes die voor de modelvalidatie worden gebruikt.

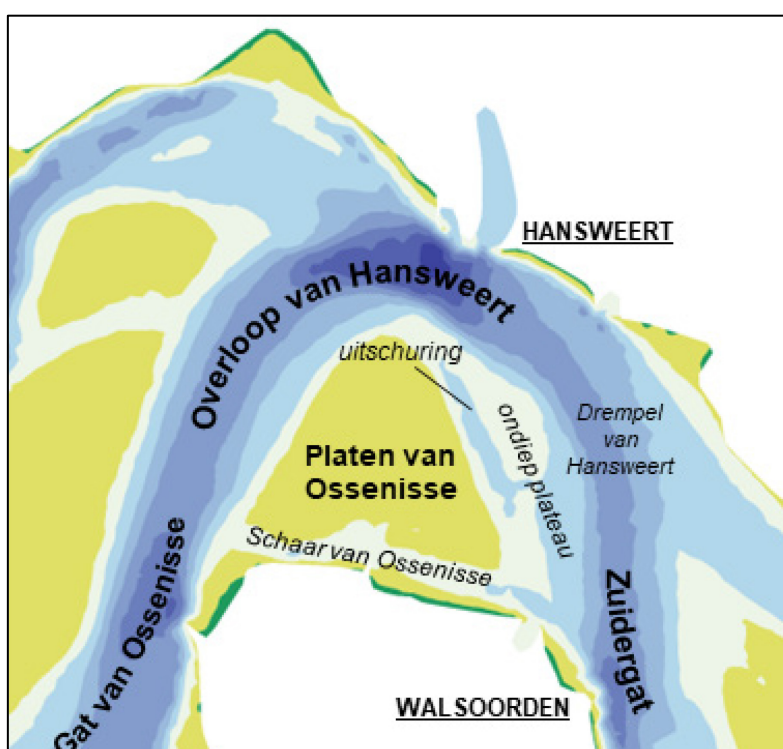
In Hoofdstuk 5 worden de gebruikte instellingen voor het NeVla model beschreven voor de verschillende modelconfiguraties.

Hoofdstuk 6 bevat de resultaten van validatieoefening. Hierin wordt eerst de springtij-doodtij variatie onderzocht voor de gemodelleerde dwarsstroming, alsmede de representatie van het verticaal getij in het studiegebied. Vervolgens wordt de representatie van de dwarsstroming en het verticaal getij voor de geselecteerde meetcampagnes gevalideerd. Tot slot omvat dit Hoofdstuk ook een vergelijking tussen modelvoorspellingen op basis van enerzijds het astronomisch getij of anderzijds een geobserveerd waterstandsverloop aan de afwaartse rand.

Uiteindelijk bevat Hoofdstuk 7 de conclusies en aanbevelingen naar aanleiding van deze validatieoefening.

2 Studiegebied

De focus van dit onderzoek ligt op de omgeving van de oostrand van de Platen van Ossensisse. Deze plaat wordt omringd door de Overloop van Hansweert, de Drempel van Hansweert, het Zuidergat en de Schaar van Ossensisse (Figuur 1). Dit deel van de Westerschelde omvat verschillende momenteel vergunde en potentiële toekomstige stortlocaties, alsmede de Drempel van Hansweert waar doorgaans intensieve onderhoudsbaggerwerken plaatsvinden (Vos *et al.*, 2017). Ten oosten van de Platen van Ossensisse bevindt zich een ondiep plateau dat zich de laatste decennia heeft ontwikkeld (Decrop *et al.*, 2009). Op dit ondiepe plateau vindt de initiële neervorming plaats die dwarsstromingen in de vaargeul kan veroorzaken. Tussen het ondiepe plateau en de Platen van Ossensisse heeft zich een diepe geul of uitschuring ontwikkeld. Ook ten zuiden van de plaat bevindt zich een ondiepe geul: de Schaar van Ossensisse.



Figuur 1 – Overzichtskaart van geulen en platen in het studiegebied.

3 Bestaand onderzoek

Naar aanleiding van de stranding van de Fowairet ter hoogte van de Platen van Ossensisse in 2005, werden specifieke onderzoeken opgestart om meer inzicht te krijgen in de oorzaak van dit ongeval. Er werden zowel stroomsnelheidsmetingen uitgevoerd (RWS) als numerieke modellen opgezet (e.g. Decrop *et al.*, 2009; Stark *et al.*, 2020) om meer inzicht te krijgen in de lokale stroompatronen nabij de oostrand van de Platen van Ossensisse. Door Deltares (van Weerdenburg & van der Werf, 2019) werd een uitgebreide analyse uitgevoerd van de beschikbare ADCP-metingen van RWS. Daarnaast wordt door RWS op basis van de voorspelde waterstanden, een voorspelling gemaakt voor de optredende dwarsstromingen.

3.1 Ontstaan van de neer

In bovengenoemde studies werd de vorming van de neer bij de Platen van Ossensisse al uitvoerig beschreven. De grote neer op de Platen van Ossensisse ontstaat in de late vloedfase van hoge (spring)tijden. De Platen van Ossensisse (en het ondiepe plateau ten oosten van de plaat) bevinden zich in de binnenbocht van de vaargeul (Figuur 1) en kennen door verschillen in waterdiepte en bodemwrijving een langzamere waterstandsstijging dan de vaargeul. De waterstanden stijgen het langzaamst op het noordelijk deel van het ondiepe plateau, welke in de luwte ligt van het hoogste deel van de plaat. De waterstandsgradiënt die dientengevolge ontstaat tussen het zuidelijk deel van de plaat (i.e., inclusief de Schaar van Ossensisse) en het noordelijk deel van het ondiep plateau zorgt voor een noordwaartse tegenstroom over het ondiepe plateau. Daarnaast zorgt het verschil in traagheid tussen de vloedstroom in de vaargeul en de vloedstroom over de ondiepte er na de kentering ook voor dat de eb op het ondiepe plateau eerder gepaard gaat met zeewaarts gerichte stroming dan in de vaargeul zelf. Als de twee tegengestelde stromingen (i.e., zuidwaarts in de vaargeul en noordwaarts op het ondiep plateau) de waterstandsdepressie op het plateau omsluiten zorgen drukgradiënten voor een afbuiging van de twee stromingen en ontstaat er een neer. Deze wordt gekenmerkt door een lokale waterstandsdepressie en een circulair stromingsveld (i.e., met de klok mee) rondom deze depressie. Nadat de neer boven de ondiepte is gevormd kan deze zich onder invloed van de vloedstroming in de vaargeul nog enkele kilometers richting de vaargeul en landinwaarts verplaatsen. Als de stroomrichting in de vaargeul tijdens eb omkeert beweegt de neer zich juist stroomafwaarts. Vervolgens neemt de neer snel in intensiteit af omdat er geen sprake meer is van tegengestelde stroomrichtingen.

3.2 Voorspelling van dwarsstroming en waarschuwingen door RWS

Rijkswaterstaat gebruikt het vervalcriterium waarbij op basis van astronomische voorspellingen een inschatting wordt gemaakt van het voorkomen van “matige” en “sterke” dwarsstromingen. Het criterium dat RWS hanteert is gebaseerd op het voorspelde maximale verhang tussen Terneuzen en Hansweert tijdens de vloedfase voorafgaand aan het hoogwater te Hansweert. Als dit verhang groter is dan 0,80 m wordt een waarschuwing voor een “sterke” dwarsstroming van > 3,5 mph in het Zuidergat gegeven. Als het maximale verhang tussen Terneuzen en Hansweert tussen 0,75 m en 0,80 m blijft, wordt een waarschuwing gegeven voor een “matige” dwarsstroom van < 3,5 mph in het Zuidergat. Bij een lager maximaal verhang wordt geen waarschuwing gegeven.

Naast de waarschuwing op basis van de astronomische voorspelling, wordt deze “herzien” op basis van de waterstandsvoorspellingen (HMC). Hierbij wordt enkele (2 à 3) uren voorafgaand aan het optredende hoogwater een bijgestelde waarschuwing opgemaakt. Sinds mei 2012 wordt een maximaal verhang tussen Terneuzen en Hansweert tussen 90 en 95 cm als ‘matig’ beoordeeld, een verhang groter dan 95 cm als ‘sterk’. Tevens wordt ook een hoogwatercriterium gehanteerd (i.e., andere grenswaarden als HW Hansweert > 335 cm NAP, zie: van Weerdenburg & van der Werf, 2019). Merk hierbij op dat de grenswaarden van de modelvoorspellingen afwijken van de grenswaarden bij de astronomische voorspellingen.

3.3 Analyse van de ADCP-stroommetingen

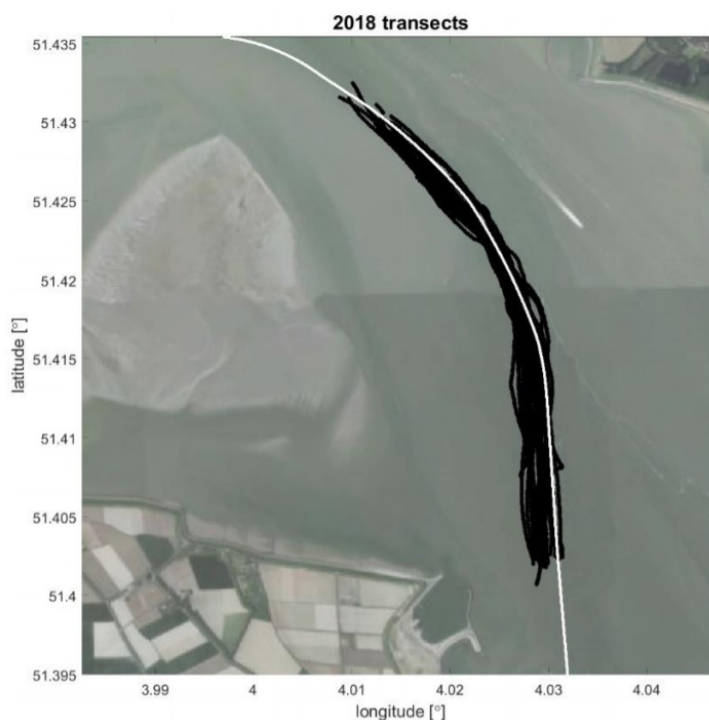
Deltares (van Weerdenburg & van der Werf, 2019) voerde een uitgebreide analyse uit van de beschikbare stroommetingen in het studiegebied. Sinds 2005 worden er door Rijkswaterstaat varende stroommetingen (Figuur 2) uitgevoerd wanneer een sterke dwarsstroming voorspeld wordt op basis van het gehanteerde voorspelcriterium. Tot en met 2019 zijn er 160 meetcampagnes uitgevoerd waarbij de stroming gemeten werd met behulp van ADCP. Telkens wordt een raai langs de groene boeienzijde van de vaargeul nabij de oostrand van de Platen van Ossensisse meerdere keren gevaren en wordt een snelheidsprofiel onder het vaartuig gemeten. De stromingsdata verkregen tijdens de meetcampagnes werden door Deltares geanalyseerd. De studie had tot doel enerzijds het voorspelcriterium te evalueren en anderzijds om de fysica rondom het ontstaan en de ontwikkeling van de neer beter te begrijpen.

In de studie wordt de gemeten dwarsstroming vergeleken met enkele criteria op basis van de waterstanden (zowel gemeten als voorspeld):

- Vervalcriterium: maximale verval tussen de stations Terneuzen en Hansweert, vooraf aan het hoogwater te Hansweert
- Stijgsnelheid: maximale stijgsnelheid van de waterstand te Hansweert
- Criterium Decrop *et al.* (2010): $cr = (1 + k_a(HWL - k_b)) \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right) \geq 4 \text{ cm/min}$

waarin HWL het hoogwaterniveau bij Hansweert voorstelt, $dhd t^{-1}$ is de maximale stijgsnelheid bij Hansweert en $k_a [m^{-1}]$ en $k_b [m]$ zijn kalibratieparameters die door Decrop *et al.* (2010) op 1,0 en 0,55 bepaald werden (i.e., mits waterstanden in m NAP worden uitgedrukt).

Uit de analyse blijkt dat de stijgsnelheid van de waterstand bij Hansweert een redelijke indicator is voor de sterkte van de neer. Voor de beschikbare dataset functioneert de maximale stijgsnelheid beter als indicator dan het vervalcriterium. Er moet echter ook rekening gehouden worden met de beperkte nauwkeurigheid van voorspellingen voor deze twee indicatoren met het huidige modelinstrumentarium.



Figuur 2 – Ligging gevaren ADCP-transecten
[bron: (van Weerdenburg & van der Werf, 2019)]

3.4 Modelonderzoek

3.4.1 Onderzoek in het kader van LTV – Veiligheid en toegankelijkheid

In het kader van het onderzoek binnen LTV - V&T, werden door IMDC *et al.* (2013) verschillende potentiële morfologische ingrepen onderzocht met als doel de dwarsstroming bij het Zuidergat te reduceren. Voor dit scenario-onderzoek werd gerekend met het NeVla-2006 model dat eerder door Vanlede *et al.*, (2009) in de SIMONA software werd geoptimaliseerd. Er werd voor deze studie wel nog een aangepast ruwheidsveld gebruikt ten behoeve van de modelvalidatie. Voor de scenario-analyse werd gerekend op basis van de lokale bathymetrie van 2011.

Enkel de intensiteit van de dwarsstroming en de exacte locatie en ruimtelijke voortplanting van de neer varieert tussen de simulaties waarin morfologische veranderingen werden geïmplementeerd. In alle morfologische scenario's was namelijk steeds sprake van gelijkaardige neervorming op de ondiepte ten oosten van de plaat.

3.4.2 Onderzoek in het kader van Agenda voor de Toekomst

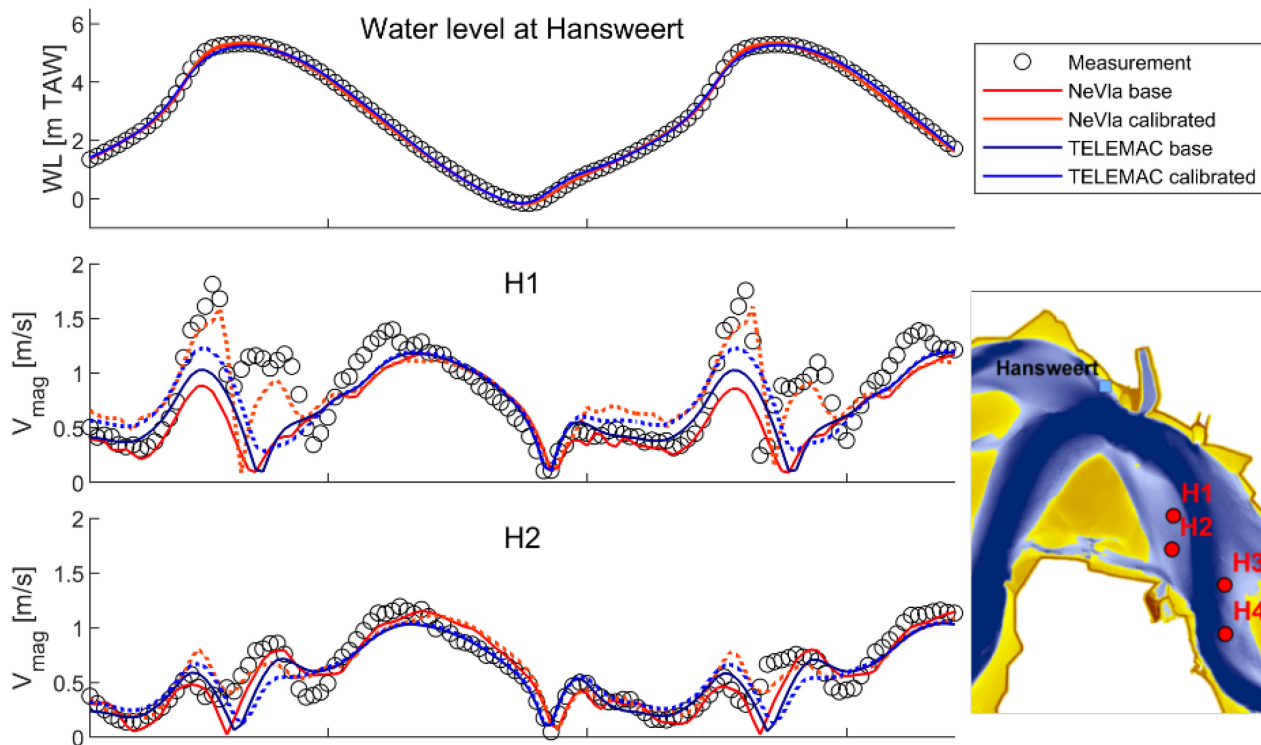
In het kader van het Agenda voor de Toekomst (AvdT) onderzoek "*Hydro- en sedimentdynamische en morfologische processen op mesoschaal*" werd door het Waterbouwkundig Laboratorium het modelinstrumentarium voor hydrodynamica en sedimenttransport geoptimaliseerd, bijvoorbeeld om de processen verantwoordelijk voor de sedimentatie ter hoogte van de Drempel van Hansweert te onderzoeken (Stark *et al.*, 2019). Deze drempel is gelegen aangrenzend aan de Platen van Ossensisse waardoor de neervorming en bijbehorende stromingspatronen eveneens relevant zijn. Binnen dit onderzoek werd het Delft3D-NeVla model geoptimaliseerd voor de representatie van stroomsnelheden en sedimenttransport op de ondiepte tussen de Platen van Ossensisse en de Drempel van Hansweert door middel van een herkalibratie van de (lokale) bodemruwheid. Hierbij werd ook specifiek aandacht besteed aan de representatie van de neer. Na kalibratie bleek het Delft3D-NeVla model in staat om de hoge snelheidspieken op dit plateau goed te representeren (Figuur 3 en Figuur 4). Bovendien suggereren Stark *et al.* (2019) op basis van een beperkte set meetgegevens en modelresultaten dat de frequentie van voorkomen van neren en dwarsstromingen in de vaargeul is toegenomen sinds de eerste studie door Decrop *et al.* (2009). De resultaten van het AvdT-onderzoek met betrekking tot de neervorming bij de Platen van Ossensisse zijn samengevat in Plancke *et al.* (2020).

3.4.3 Scenario-onderzoek naar morfologische ingrepen

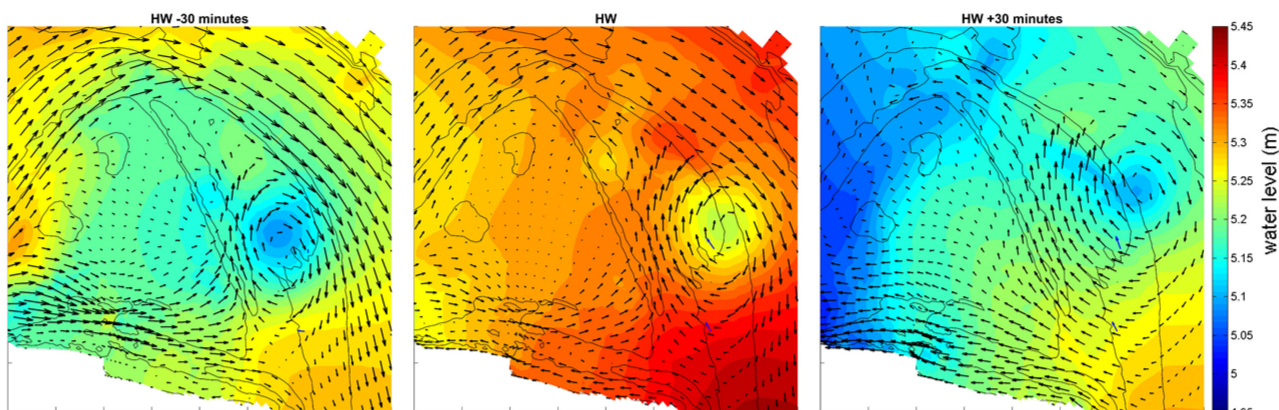
Recentelijk werd de dwarsstroming in het gebied nog modelmatig onderzocht door Stark *et al.* (2020). In een scenario-onderzoek naar mitigerende maatregelen ter voorkoming of vermindering van de dwarsstroming in de vaargeul die ontstaat als gevolg van neervorming bij de Platen van Ossensisse werd met behulp van het Delft3D-NeVla model het effect van enkele morfologische ingrepen op deze neervorming en bijbehorende dwarsstromingen doorgerekend. Hierbij werd de door Stark *et al.* (2019) gekalibreerde versie van het NeVla model gebruikt.

Uit deze modelstudie volgt dat morfologische ingrepen (e.g. verdiepen/verondiepen van delen van de plaat, baggeren van kortsluitgeulen) op de Platen van Ossensisse enkel leiden tot kleine veranderingen in de sterkte van de waterstandsdepressie die ten grondslag ligt aan het ontstaan van de neer. Ook leiden morfologische veranderingen tot kleine ruimtelijke verschuivingen in de locatie van de neer (i.e., orde grootte van enkele honderden meters). Dergelijke kleine veranderingen in de positie van de neer kunnen echter een grote invloed hebben op de sterkte van de dwarsstroming in de vaargeul. Morfologische ingrepen die de dwarsstroming in de vaargeul in de simulaties door Stark *et al.* (2020) enigszins verminderen zijn een plaatrandstorting aan de noordwest- en noordoostkant van de Platen van Ossensisse, een ophoging van de zuidoostkant van de Platen van Ossensisse, een kortsluitgeul door de Platen van Ossensisse of een algehele bodemverlaging van de intertidale plaat. Voor deze ingrepen geldt volgens Stark *et al.* (2020) echter dat de

gesimuleerde sterkte van de neer en bijbehorende dwarsstroming in de vaargeul zeer gevoelig zijn voor de exacte hoogteligging in deze gebieden. Ook bleek dat potentiële ingrepen die in eerder onderzoek door IMDC *et al.* (2013) nog het meest veelbelovend leken (i.e., het opvullen en verondiepen van de bodem in de uitschuring tussen de Platen van Ossensisse en het ondiepe plateau ten oosten van deze plaat), op basis van de simulaties met een meer recente bathymetrie geen positief effect op het stromingspatroon zouden bewerkstelligen.



Figuur 3 – Resultaten van de modelkalibratie van het Delft3D-NeVla model en TELEMAC-3D model op twee meetpunten op het ondiepe plateau langs de Platen van Ossensisse tijdens hoogwater springtij op 08/05/2016 (bron: Stark *et al.*, 2019).



Figuur 4 – Modelresultaten van het gekalibreerde Delft3D-NeVla model op het ondiepe plateau langs de Platen van Ossensisse bij neervorming tijdens hoogwater springtij op 08/05/2016 (bron: Stark *et al.*, 2019).

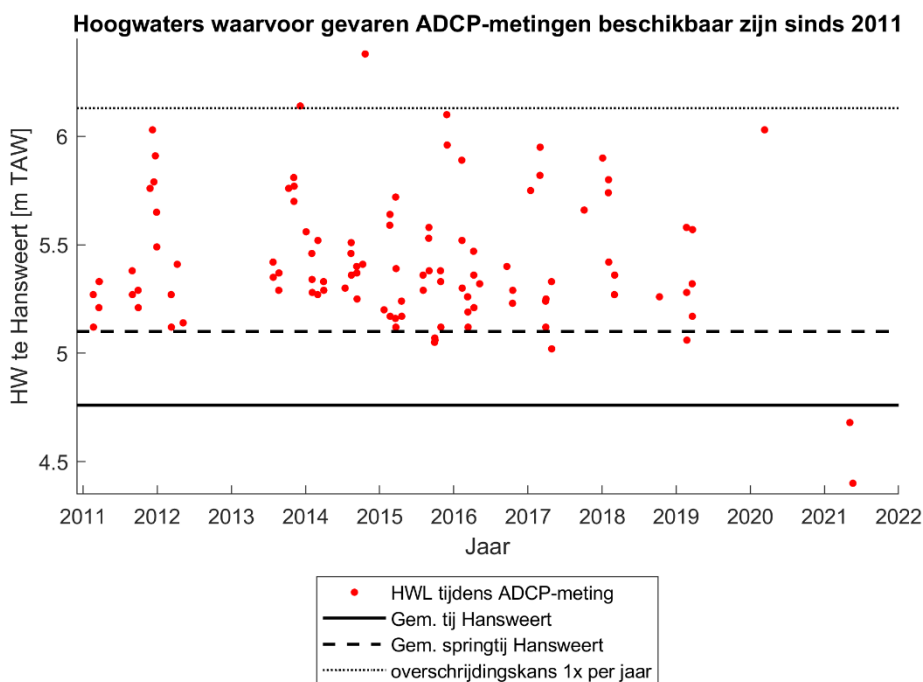
4 Meetcampagnes

In dit hoofdstuk wordt een beknopt overzicht gegeven van de beschikbare dataset aan gevaren ADCP-metingen. De analyses zijn gelijkaardig aan de data-analyse door van Weerdenburg & van der Werf (2019). Recent werden in mei 2021 nieuwe meetcampagnes uitgevoerd tijdens doottij. Deze meetcampagnes zijn aan onderstaande analyse toegevoegd. Uit deze dataset wordt uiteindelijk een selectie gemaakt voor de validatieoefening in de volgende hoofdstukken.

4.1 Overzicht gevaren ADCP-metingen

Hoogwaters

Figuur 5 toont de hoogwaters te Hansweert voor alle beschikbaar gestelde gevaren ADCP-metingen tussen 2011 en begin 2020. Opvallend is dat er nagenoeg enkel ADCP-metingen beschikbaar zijn voor hoge springtij. Op een enkele meting na gaat het zelfs om hoogwaterniveaus boven gemiddeld springtij. De meetcampagnes met de hoogste hoogwaters zijn die van 06/12/2013 en 28/11/2015 met een hoogwaterniveau van ongeveer 6,10 m TAW in Hansweert. Tijdens de meest recente meetcampagnes in mei 2021 werden ook ADCP-metingen uitgevoerd tijdens lagere tijcondities met hoogwaters tot 4,75 m TAW.



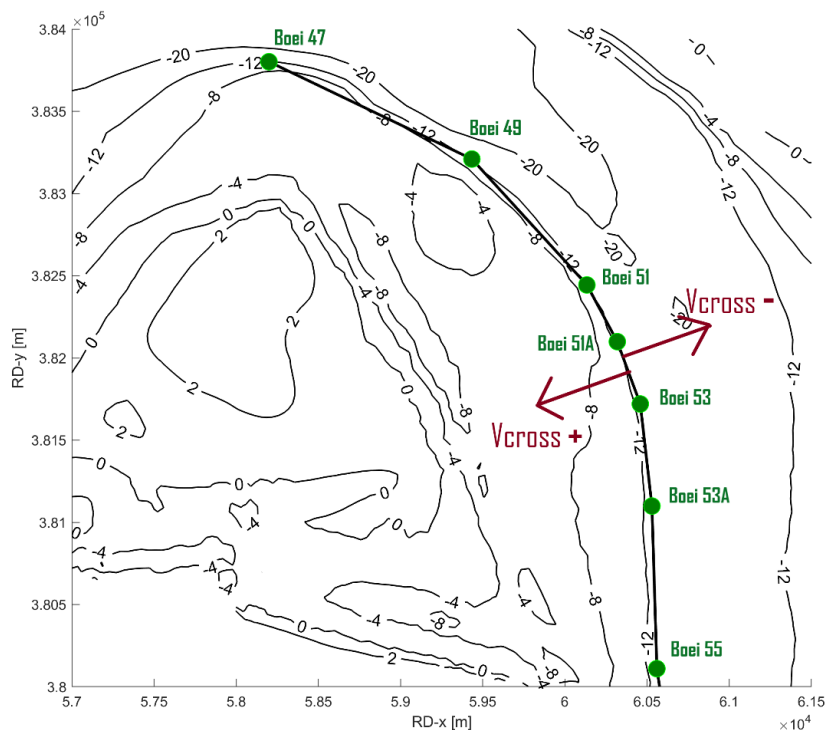
Figuur 5 – Hoogwaters tijdens de beschikbare meetcampagnes sinds 2011.

Dwarsstroming

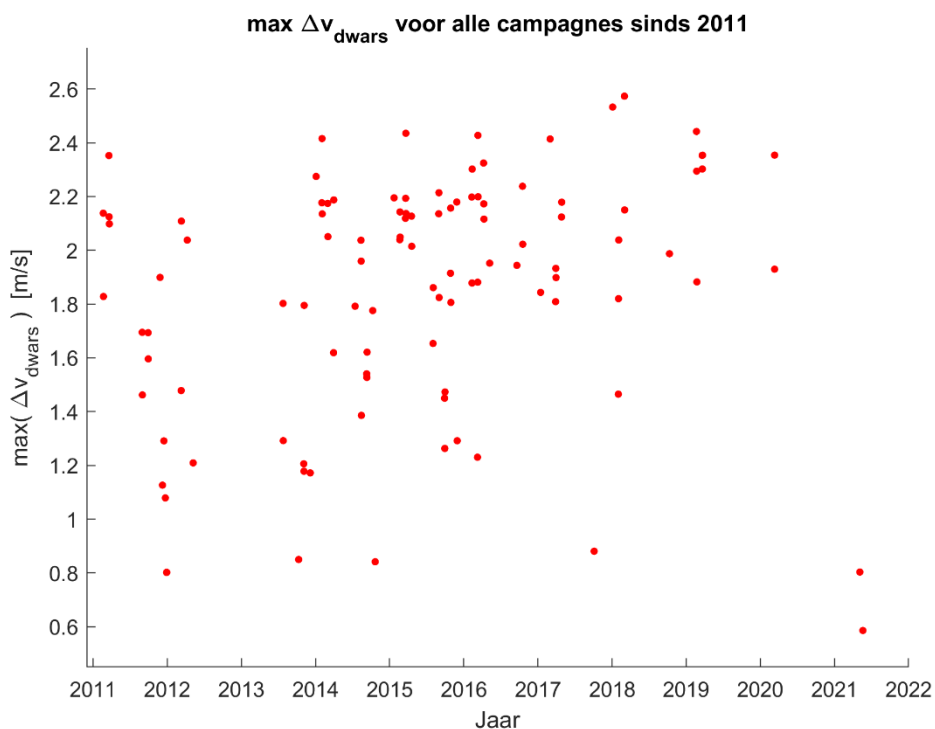
Voor elke meetcampagne is de dwarsstroming per gevaren transect bepaald door de gemeten stroming te projecteren op de groene boeienlijn in Figuur 6. Op deze manier wordt een dwarscomponent verkregen die in deze studie met positieve waarden wordt aangeduid als de stroomrichting van de vaargeul af is en als negatief als de stroomrichting naar de vaargeul toe is. Alle meetcampagnes zijn gevaren tussen Boei 49 en

Boei 55, al verschilt het gevaren transect per campagne. Overigens zijn de gevaren transecten niet exact langs de groene boeienlijn gevaren, maar in de vaargeul op een geringe afstand van deze lijn.

De maximum dwarsstroming in Figuur 7 wordt vervolgens bepaald als het maximale instantaan verschil tussen de hoogste dwarsstromingen in positieve richting (i.e., van de vaargeul af) en negatieve richting (i.e., naar de vaargeul toe). Tijdens de meeste meetcampagnes was dit maximum verschil in dwarsstroming tussen 1,8 m/s en 2,4 m/s. De hoogste gemeten dwarsstroming bedraagt 2,6 m/s.



Figuur 6 – Segment langs de groene boeienlijn waarop de gemeten stroomsnelheden worden geprojecteerd.



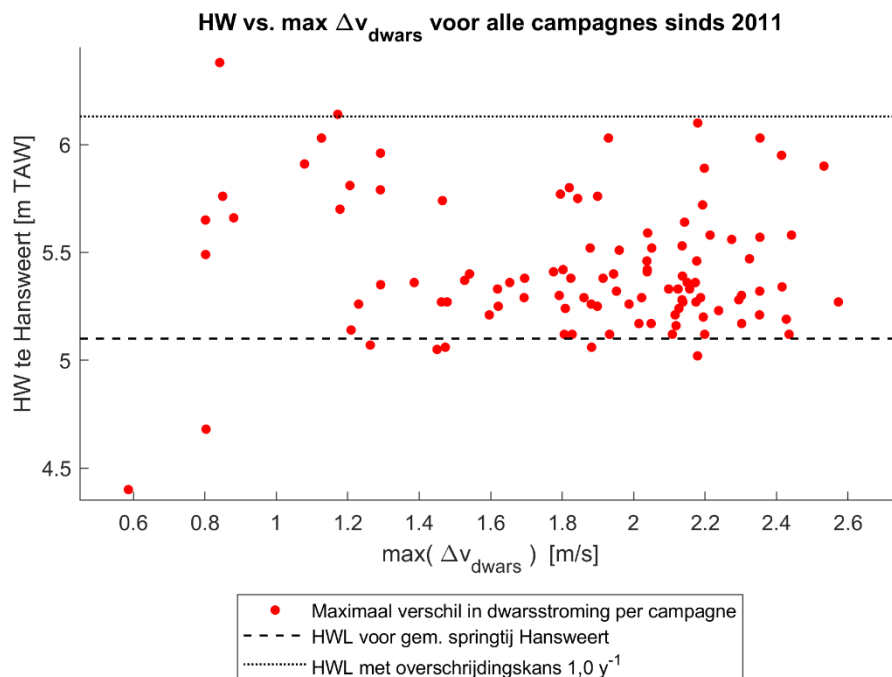
Figuur 7 – Maximaal verschil in dwarsstroming tijdens de beschikbare meetcampagnes sinds 2011.

4.2 Analyse verticaal getij en dwarsstromingen

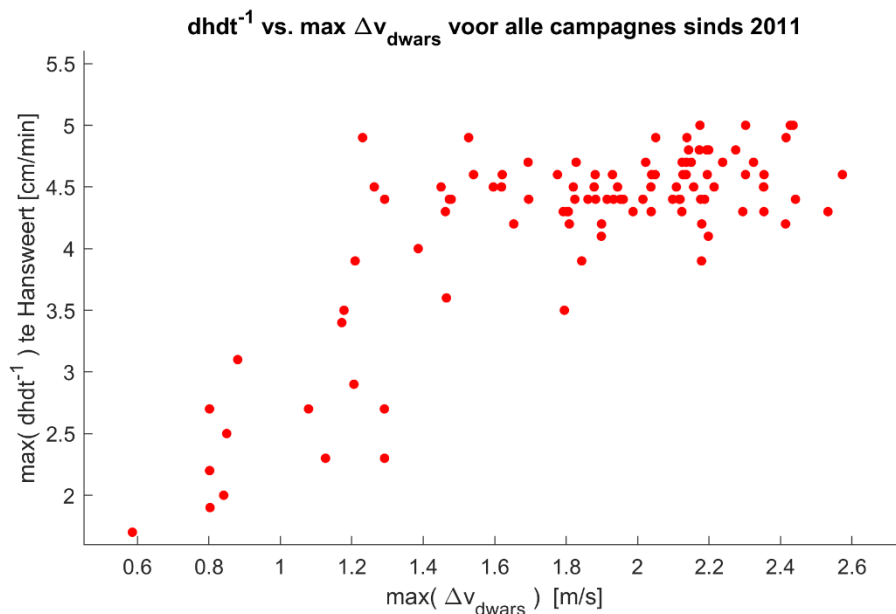
Een analyse van de gemeten dwarsstromingen en getijcondities voor alle meetcampagnes vanaf 2005 werd al eerder uitgevoerd door Deltares (Van Weerdenburg & Van der Werf, 2019). In onderstaande figuren zijn ook de campagnes van mei 2021 (tijdens doottij) in de analyse meegenomen.

Figuur 8 weergeeft de gemeten maximale verschillen in dwarsstroming voor alle meetcampagnes vanaf 2015 ten opzichte van het geobserveerde hoogwater in Hansweert. Figuur 9 toont de maximale dwarsstroming voor elke meetcampagne ten opzichte van de maximale stijgsnelheid te Hansweert voor het desbetreffende getij. Er lijkt op het eerste gezicht geen sprake van een duidelijke correlatie tussen het maximaal verschil in dwarsstroming en de hoogwaterstand in Hansweert. Wel blijkt dat voor alle getijden met een sterke dwarsstroming van $>1,4$ m/s de maximale stijgsnelheid in Hansweert groter is dan $3,5$ cm/min. De correlatie tussen de maximum dwarsstroming en de maximum stijgsnelheid is echter gering ($R^2 = 0,58$). Hierbij wordt opgemerkt dat nagenoeg enkel data beschikbaar is voor hoge springtijden. Wellicht worden bij een dergelijke vergelijking voor een breder spectrum aan getij-condities (i.e., dataset met springtij-doottij-variatie) sterkere correlaties gevonden.

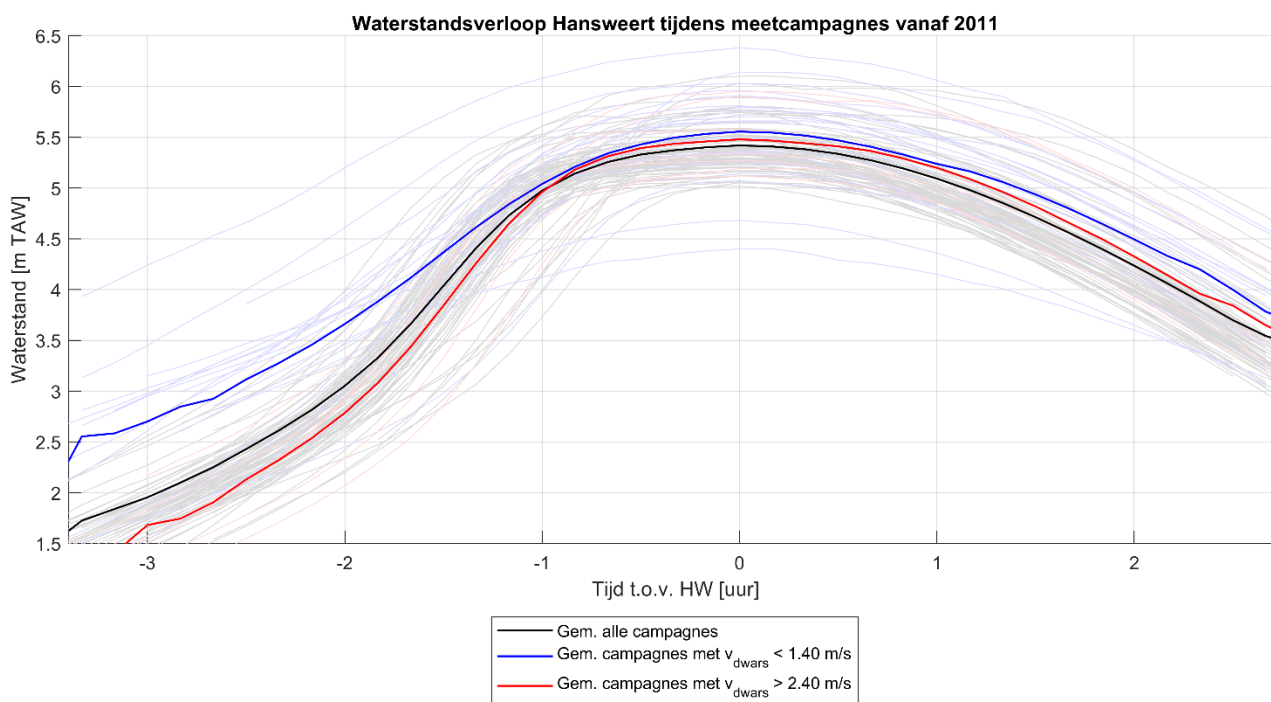
Figuur 10 toont het waterstandsverloop te Hansweert voor alle meetcampagnes, waarbij het gemiddeld verloop voor de campagnes met zeer hoge ($>2,40$ m/s) en matige ($<1,40$ m/s) dwarsstromingen is aangeduid. Hieruit volgt dat de een getij met een matige dwarsstroom doorgaans een minder steile curve vertoont dan het gemiddelde van alle meetcampagnes, terwijl de getijcurve voorafgaand aan de campagnes met de hoogste dwarsstroming juist iets steiler is.



Figuur 8 – Maximaal verschil in dwarsstroming ten opzichte van de bijbehorende hoogwaterniveaus te Hansweert tijdens de beschikbare meetcampagnes sinds 2011.



Figuur 9 – Maximaal verschil in dwarsstroming ten opzichte van de maximale stijgsnelheid te Hansweert tijdens de beschikbare meetcampagnes sinds 2011.



Figuur 10 – Waterstandsverloop te Hansweert tijdens de beschikbare meetcampagnes sinds 2011.

4.3 Selectie meetcampagnes

Voor de modelvalidatie wordt een selectie gemaakt uit de beschikbare meetcampagnes. Er worden zes campagnes geselecteerd met een zeer sterke dwarsstroming van $\Delta v_{dwars} > 2,40$ m/s langs de groene boeienlijn. Daarnaast worden drie campagnes geselecteerd waarvoor Δv_{dwars} tijdens het springtij juist lager was dan 1,40 m/s. Deze getijden worden tevens gekenmerkt door een lagere maximale stijgsnelheid in Hansweert. Deze stijgsnelheid werd door Van Weerdenburg & Van der Werf (2019) geïdentificeerd als de beste voorspellende indicator voor de sterkte van de dwarsstroming. Aanvullend wordt nog één hoog springtij met een hoog hoogwater toegevoegd en één springtij met een relatief laag hoogwater (i.e., ten opzichte van de rest van de meetcampagnes). Tot slot wordt ook de meest recente meetcampagne tijdens doortij in de validatie meegenomen. Idealiter volgt later nog meer data uit een meetcampagne tijdens gemiddelde tij-condities om de modelprestatie te valideren voor situaties waarin de neervorming de stroming in de vaargeul niet of minder sterk beïnvloedt. Dergelijke meetcampagnes zijn ten tijde van de huidige studie echter niet beschikbaar.

Tabel 2 geeft een overzicht van de geselecteerde meetcampagnes met de geobserveerde maximale dwarsstromingen en de geobserveerde getijcondities (i.e., maximale stijgsnelheid en hoogwaterniveau in Hansweert) die zich tijdens de geselecteerde meetcampagnes voordeden.

Tabel 1 – Geselecteerde meetcampagnes en tij-condities.

Selectie criterium	Meetcampagne	$\max(\Delta v_{dwars})$	HWL	$\max(dh \cdot dt^{-1})$
Springtij met sterke dwarsstroming (>2,40 m/s)	21 februari 2019	2,44 m/s	5,58 m TAW	4,4 cm/min
	3 maart 2018	2,57 m/s	5,27 m TAW	4,6 cm/min
	2 maart 2017	2,41 m/s	5,95 m TAW	4,2 cm/min
	11 maart 2016	2,43 m/s	5,19 m TAW	5,0 cm/min
	28 november 2015	2,18 m/s	6,10 m TAW*	4,2 cm/min
	22 maart 2015	2,44 m/s	5,12 m TAW	5,0 cm/min
	2 februari 2014	2,42 m/s	5,34 m TAW	4,9 cm/min
Springtij met matige dwarsstroming (<1,40 m/s)	5 oktober 2017	0,88 m/s	5,66 m TAW*	3,1 cm/min
	30 november 2015	1,29 m/s	5,96 m TAW*	2,3 cm/min
	22 oktober 2014	0,84 m/s	6,38 m TAW*	2,0 cm/min
Laag springtij (<5,10 m TAW)	23 februari 2019	1,88 m/s	5,06 m TAW	4,4 cm/min
Doodtij	21 mei 2021	0,59 m/s	4,40 m TAW	1,8 cm/min

* Voor deze springtijden was sprake van een (storm)opzet van > 0,5 m.

5 Modelopzet

Er worden in het kader van de validatie simulaties uitgevoerd in verschillende configuraties van het 2D NeVla model in Simona en Delft3D. Het 2D NeVla model is gebaseerd op het Scalwest 2000 model waarin de Belgische roosterschematisering verbeterd werd (Hartsuiker *et al.*, 2004). Het domein omvat de kuststrook, de Westerschelde, de Zeeschelde en de aansluitende Vlaamse getijrivieren.

Er wordt voor de validatieoefening in deze studie gebruik gemaakt van (1) het NeVla model in Waqua/Simona, van (2) hetzelfde model (zonder GOG's) in Delft3D en (3) van de door Stark *et al.* (2019) gekalibreerde versie van het NeVla model in de Delft3D. Voor alle modelconfiguraties wordt een set van simulaties uitgevoerd voor de in Hoofdstuk 4 geselecteerde getijden. In dit hoofdstuk wordt eerst een overzicht gegeven van de modelschematisering. Vervolgens worden in Hoofdstuk 6 voor de drie hierboven genoemde NeVla modelconfiguraties validatieruns uitgevoerd om de representatie van de dwarsstroming en verticale getijparameters in het studiegebied te onderzoeken.

5.1 Operationeel NeVla model in Waqua/SIMONA

Het Voorspellingssysteem voor Kust en Schelde (VSSKS) is een operationeel (2D) hydrodynamisch voorspellingssysteem dat bestaat uit meerdere geneste Simona (Waqua) modellen die automatisch en op vaste tijdstippen draaien met de meest recent beschikbare randvoorwaarden (i.e., bovenafvoer en windvelden).

De modellen die op het VSSKS draaien en het NeVla model van randvoorwaarden voorzien zijn (van grof naar fijner) het Dutch Continental Shelf model (DCSM) en het Zuidelijke Noordzee model (ZUNO). Voor meer informatie over de modellen wordt verwezen naar Depreiter *et al.* (2012). Het ruimste model, DCSM (Rijkswaterstaat & Deltares, 2009a), wordt aangestuurd door een harmonische getijrand. Hirlam windvelden (bron: KNMI) worden gebruikt als bron voor het genereren van stormopzet bovenop het astronomisch getij. Zuno is genest in het DCSM model en bevat de zuidelijke Noordzee, met inbegrip van onder meer de Westerschelde. De Hirlam windvelden worden ook in het Zuno model gebruikt voor het aandrijven van de opzet. Voor meer informatie over het Zuno model wordt eveneens verwezen naar Rijkswaterstaat & Deltares (2009b). Het NeVla model is een hoge-resolutie model dat de Belgische kuststrook, een deel van de Nederlandse Kuststrook en het Schelde-estuarium dat onder getijden-invloed staat, omvat. In de modellentrein wordt het NeVla model genest in het ZUNO model.

Voor de inbouw van NeVla in de operationele modellentrein is de gekalibreerde versie “simT31Cm” van het model gebruikt (Depreiter *et al.*, 2013). Dit komt overeen met de “Run 5” zoals beschreven in Maximova *et al.* (2009c), met enkele aanpassingen. Details over deze afregeling van het model zijn terug te vinden in Vanlede *et al.* (2009) of Maximova *et al.* (2009a-c). Later werd door Vanlede *et al.* (2015) nog verbeteringen en een herkalibratie uitgevoerd. Ook werd het model nog uitgebreid met GOG- en GGG-functionaliteit (Chu *et al.*, 2016). Ook

Gedetailleerde informatie over het Simona/Waqua modelsysteem wordt verwezen naar de gebruikshandleiding (zie: www.helpdeskwater.nl/waqua).

Modelconfiguratie in huidige studie

Voor de validatieoefening in de huidige studie wordt het operationele NeVla model afgeknipt bij de monding van het estuarium en worden er geobserveerde waterstandsreeksen opgelegd (zie §5.3). Hiermee wijkt de modelconfiguratie dus af van het eigenlijke operationeel model in VSSKS.

5.2 Delft3D-NeVla

De huidige validatie wordt onder andere uitgevoerd met het tweedimensionale Delft3D-NeVla model van het Schelde-estuarium. De Delft3D simulaties worden uitgevoerd in de modelconfiguratie zoals door Stark *et al.* (2019) werd gekalibreerd en met het ruwheidsveld uit het operationeel model (i.e., zoals afgeregeld door Vanlede *et al.*, 2015).

Gedetailleerde informatie over de Delft3D software is beschikbaar in de Delft3D-FLOW user manual (Deltares, 2011).

5.3 Modelrooster

Het originele NeVla-rooster omvat het volledige Schelde estuarium van de Noordzee, de Vlake van de Raan, de Westerschelde, de Zeeschelde, en de getijgebonden zijrivieren (Figuur 11). De afwaartse rand van het originele NeVla-model is gelegen in de Noordzee, de opwaartse randen zijn gelegen aan de grenzen van het tijgebied. De resolutie van het rekenrooster varieert van ongeveer 400 m op de Noordzee en neemt geleidelijk af tot ongeveer 30 meter in de buurt van Schelle. Ter plaatse van het studiegebied rondom de Platen van Ossensisse bedraagt de roosterresolutie ongeveer 100 m.

Voor de huidige validatie-oefening worden de modelroosters in eerste instantie afgeknipt bij de monding van de Westerschelde ter hoogte van de lijn Westkapelle – Cadzand (witte lijn op Figuur 11) om de rekentijd te reduceren en zodat er simulaties met geobserveerde waterstandsreeksen uitgevoerd kunnen worden.

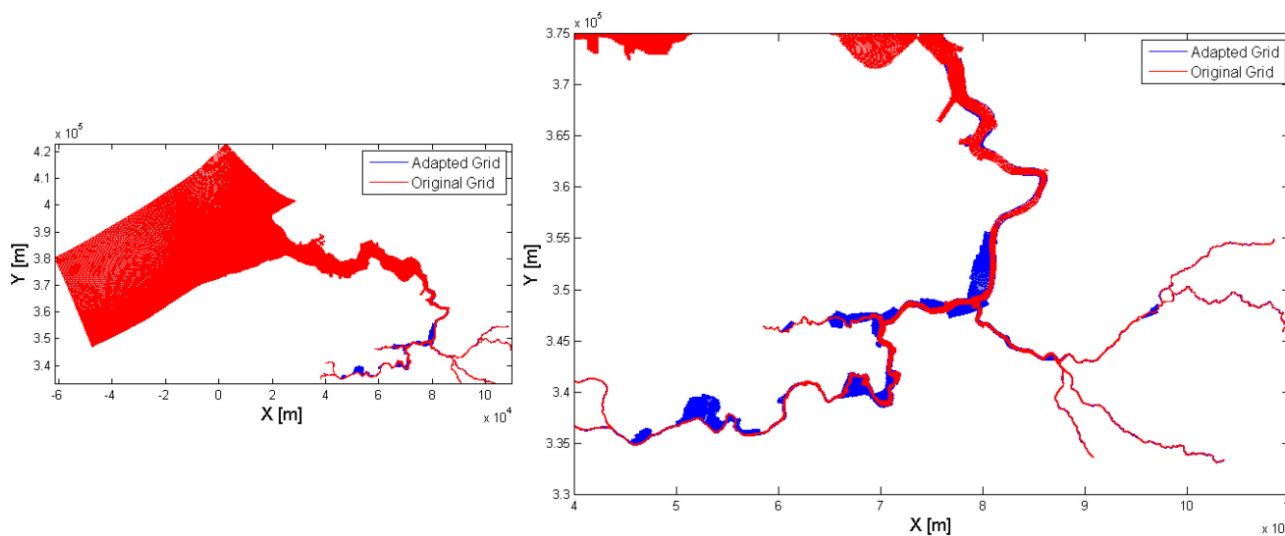


Figuur 11 – Illustratie van het Delft3D-NeVla rooster met locatie van de afgeknipte rand bij Westkapelle-Cadzand (witte lijn).

Toevoeging GOG's en GGG's in operationeel model

Het operationeel 2D NEVLA-model in Simona werd door Chu *et al.* (2016) geactualiseerd. Het model werd uitgebreid met GOG- en GGG-functionaliteit. Het grid van het NEVLA-model werd uitgebreid met de gecontroleerde overstromingsgebieden en gereduceerde getijgebieden van zoals voorzien in het Sigmaplan (zie Figuur 12). Bovendien werd voor de Westerschelde en Zeeschelde de bathymetrie van 2013 geïmplementeerd. Daarnaast werd door Chu *et al.* (2016) een update van de bathymetrie doorgevoerd en werd een herkalibratie van het ruwheidsveld uitgevoerd.

De GOG/GGG's zijn niet geïmplementeerd in de Delft3D versie van het NeVla model die in deze studie wordt gebruikt.



Figuur 12 – Toevoeging van GOG/GGG's aan het NeVla grid door Chu et al. (2016).

5.4 Topo-bathymetrische gegevens

De bathymetrische data voor de Westerschelde verschilt tussen de simulaties, afhankelijk van het jaar van de meetcampagne die gemodelleerd wordt. Validatieruns voor de meetcampagnes in 2014 worden dus uitgevoerd met een geïmplementeerde bathymetrie van 2014 in de Westerschelde, validatieruns voor campagnes in 2015 met een bathymetrische data uit 2015, enz. De implementatie van bathymetrische data is gedaan in QUICKIN middels triangulatie. Enkel voor de meest recente validatierun voor de meetcampagne van 21/05/2021 werd geen bathymetrische data uit 2021 gebruikt, maar uit 2019.

Voor de Delft3D simulaties is de bathymetrische data in de Zeeschelde identiek aan de data die werd gebruikt in eerder modelonderzoek naar dwarsstromingen bij de Platen van Ossensisse door Stark *et al.* (2019, 2020). Voor de simulaties met het operationeel model in Simona blijft de bathymetrie in de overige delen van het estuarium ook ongewijzigd. Dit houdt in dat bathymetrische data uit de periode 2011-2014 is geïmplementeerd voor de overige delen van het estuarium.

5.5 Randvoorwaarden

5.5.1 Afwaartse randvoorwaarden

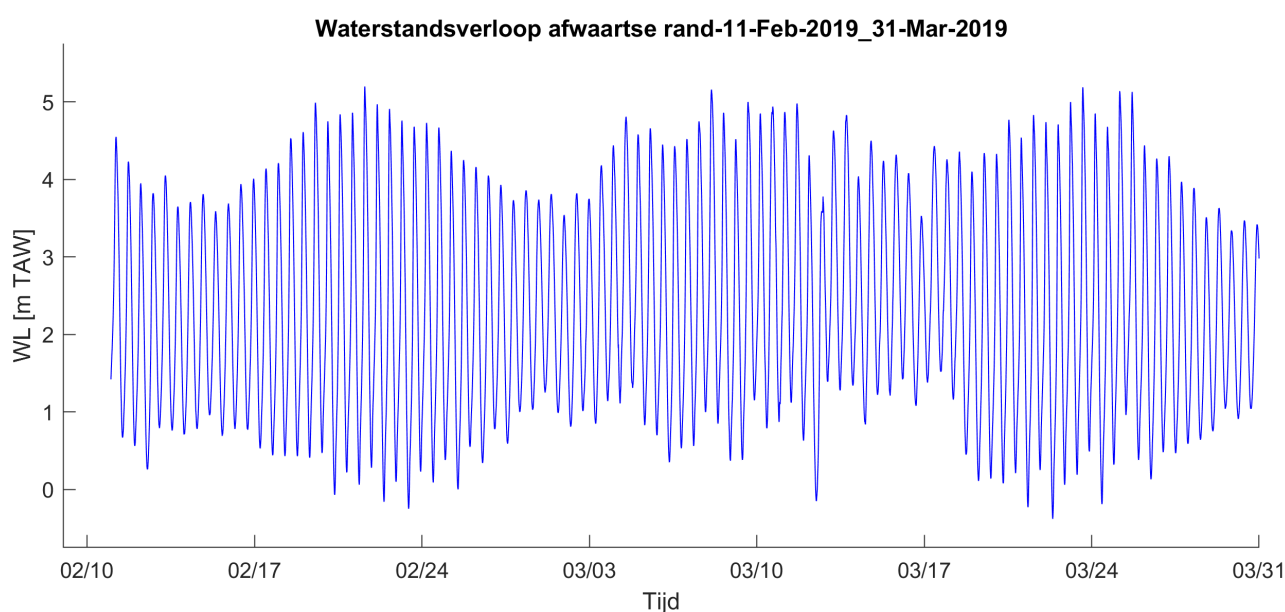
Voor elke geselecteerde meetcampagne worden afzonderlijke simulaties uitgevoerd met de bijbehorende afwaartse randvoorwaarden van die periode. De simulaties starten steeds ongeveer zeven dagen voor de meetperiode. Zo is er voldoende inspeeltijd voor het numeriek model.

De Delft3D en Simona simulaties worden uitgevoerd met een afwaartse rand ter hoogte van de lijn Westkapelle-Cadzand (Figuur 11). Hier worden geobserveerde waterstandreeksen of waterstandsreeksen van het astronomische getij opgelegd voor de desbetreffende simulatieperiodes. Door gebruik te maken van geobserveerde waterstandsreeksen dichtbij het studiegebied wordt de representatie van het getij beter geacht dan wanneer nesting van het NeVla model in de CSM-ZuNo modeltrein zou worden toegepast. De invloed van nesting op de voorspellende waarde van het model kan later worden onderzocht. De opgelegde waterstandsreeksen worden voor meetstation Cadzand getoond in: Bijlage A – Waterstandsreeksen afwaartse rand.

In overeenstemming met bevindingen van Vanlede *et al.* (2009) en Maximova *et al.* (2009) wordt een faseverschuiving van +10 minuten toegepast op de gemeten waterstanden te Cadzand. Deze correctie is noodzakelijk in verband met een locatieverschil van ongeveer 5200 m tussen het werkelijke meetpunt Cadzand en de afwaartse rand van de modellen waar de in Cadzand gemeten waterstanden worden opgelegd.

Randvoorwaarden langdurige simulatie

Om de springtij-doodtij-variatie van de dwarsstroming te analyseren worden ook langdurige simulaties gestart met de drie modelconfiguraties. De simulatieperiode voor deze runs loopt van 11-02-2019 tot en met 31-03-2019, deels overlappend met enkele van de geselecteerde meetcampagnes. Figuur 13 toont het geïmplementeerd waterstandsverloop aan de afwaartse rand (i.e., voor Cadzand) voor deze langere simulatieperiode.



Figuur 13 – Geïmplementeerd waterstandsverloop aan afwaartse rand voor langdurige simulatie.

5.5.2 Opwaartse randvoorwaarden

Aan de opwaartse rand worden gemiddelde afvoeren (i.e., P50-waarden) opgelegd zoals opgesomd in Tabel 2. De data is verkregen vanuit het HIC Hydrologisch Jaarboek 2019 (Vandenbruwaene *et al.*, 2020). Aangezien het interessegebied hier voornamelijk de Westerschelde is, beïnvloeden de opwaartse randvoorwaarden de resultaten nauwelijks.

Tabel 2 – Opwaartse randvoorwaarden.

Locatie	Debiet [m ³ /s]
Boven-Zeeschelde	30,9
Dender	9,8
Zenne	10,0
Dijle	19,8
Grote Nete	4,0
Kleine Nete	5,3

5.5.3 Randvoorwaarden saliniteit

Delft3D

In het Delft3D model wordt rekening gehouden met de invloed van saliniteit. Aan de afwaartse rand (Westkapelle-Cadzand) wordt een constante saliniteitswaarde van 31 PSU opgelegd. Aan de bovenstroomse zijrivieren wordt een saliniteitswaarde van 0 PSU opgelegd (i.e., gelijkaardig aan zoetwater).

Simona

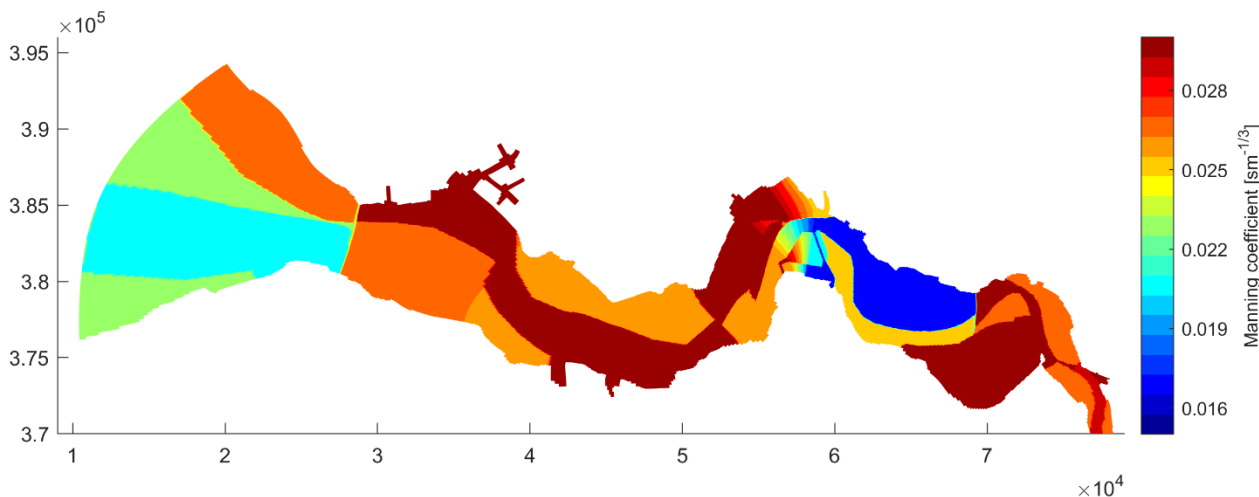
In het operationeel NeVla model in Simona/Waqua wordt saliniteit niet meegenomen in de berekeningen.

5.6 Bodemruwheid

De huidige modelvalidatie heeft betrekking op de representatie van geobserveerde dwarsstromingen ten gevolge van neervorming aan de oostzijde van de Platen van Ossensisse. Deze neervorming is al meermaals modelmatig onderzocht met het NeVla model (e.g. Decrop *et al.*, 2009; Vanlede *et al.*, 2009; Stark *et al.*, 2019; 2020). Aangezien er in die studies verschillende bodemruwheidsvelden werden gebruikt worden in de huidige validatieoefening ook meerdere simulaties uitgevoerd met deze eerder gekalibreerde ruwheidsvelden. Dit gaat concreet om het door Vanlede *et al.* (2009) gekalibreerde ruwheidsveld in het kader van de afregeling van het 2D NeVla randvoorwaardenmodel (i.e., in SIMONA) en het door Stark *et al.* (2019) gekalibreerde ruwheidsveld in het kader van het AvdT-onderzoek naar sedimenttransport op meso-schaal.

5.6.1 Ruwheidsveld operationeel model

Figuur 14 toont het ruwheidsveld zoals dat werd gekalibreerd door Vanlede *et al.* (2009). Dit ruwheidsveld wordt gebruikt in deze studie voor de simulaties met het Simona model en in één van de twee Delft3D configuraties. Het ruwheidsveld kent een grote variatie in bodemruwheid, waarbij een onderscheid wordt gemaakt tussen ebgeulen en vloedgeulen in de Westerschelde. Voor de Platen van Ossensisse is de ruwheid lokaal aangepast (i.e., hogere ruwheid op de westelijke helft en lagere ruwheid op de oostelijke helft van de plaat) ten behoeve van de representatie van de neervorming en dwarsstromingen. Meer recent werd door Chu *et al.* (2016) nog een herkalibratie van het ruwheidsveld voor het operationeel model uitgevoerd. Deze herkalibratie betrof voornamelijk aanpassingen in de Zeeschelde die slechts een gering effect hebben op de getijstroming in de Westerschelde. In het studiegebied rondom de Platen van Ossensisse werden geen aanpassingen gedaan.



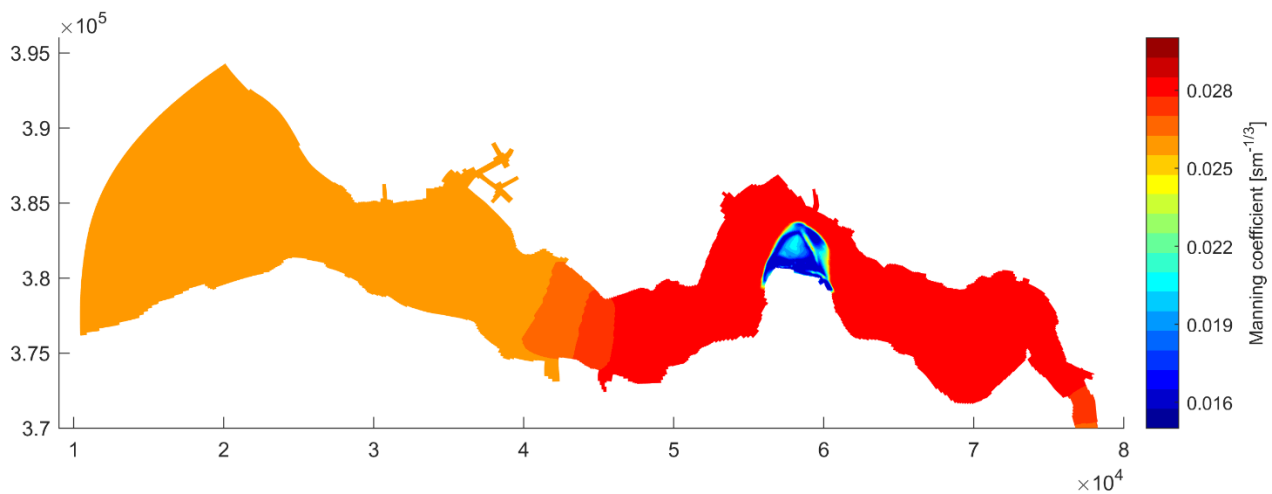
Figuur 14 – Manning's ruwheidsveld zoals gekalibreerd bij afregeling van het 2D NeVla model door Vanlede *et al.* (2009).

5.6.2 Ruwheidsveld uit AvdT-studie naar sedimenttransport rondom de Drempel van Hansweert

In het kader van een voorgaande AvdT-studie (i.e., “Hydro- en sedimentdynamische en morfologische processen op mesoschaal”) werd het tweedimensionale NeVla model in Delft3D specifiek gekalibreerd om gemeten stroomsnelheden en sedimenttransporten op de ondiepte tussen de Platen van Ossenisse en de Drempel van Hansweert te simuleren (Stark *et al.*, 2019; Figuur 3). Bij deze modelkalibratie werd ook aandacht besteed aan de representatie van de neervorming op het ondiep plateau ten oosten van de Platen van Ossenisse. Na kalibratie bleek het model goed in staat het geobserveerd stroomsnelheidsverloop ten gevolge van de neervorming op het ondiep plateau te reproduceren. Op en rondom de Platen van Ossenisse is een diepte-afhankelijke verlaging van de bodemruwheid toegepast om tot een betere representatie van de vloedpiek en neervorming en bijbehorende circulaire stroming te komen (zie Figuur 3). De Manning’s ruwheidscoëfficiënten n in dit gebied worden als volgt geschematiseerd op basis van het bodemniveau z_b :

- $n = 0,015 - 0,002 \cdot (z_b + 2,5)$ voor $-7,5 \text{ m TAW} < z_b < -2,5 \text{ m TAW}^1$
- $n = 0,015$ voor $-2,5 \text{ m TAW} < z_b < 2,5 \text{ m TAW}$
- $n = 0,015 + 0,002 \cdot (z_b - 2,5)$ voor $z_b > 2,5 \text{ m TAW}$

Bovenstaande schematisering van het ruwheidsveld wordt alleen toegepast op de Platen van Ossenisse en omringende ondiepe delen en plateaus omdat het ruwheidsveld enkel voor deze locatie werd gevalideerd door Stark *et al.* (2019). Voor de overige delen van de Westerschelde werd door Stark *et al.* (2019) een vereenvoudigd ruwheidsveld toegepast dat enkel werd gekalibreerd voor de representatie van het verticaal getij. In de Westerschelde verloopt de bodemruwheid gradueel van $n = 0,025 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$ bij Vlissingen tot $n = 0,027 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$ bij Terneuzen. Tussen Terneuzen en de Nederlands-Belgische grens blijft de bodemruwheid gelijk. In de Beneden-Zeeschelde is de ruwheid iets lager met $n = 0,026 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$ en in de Boven-Zeeschelde geldt $n = 0,025 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$. Het door Stark *et al.* (2019) gekalibreerde bodemruwheidsveld wordt getoond in Figuur 15.



Figuur 15 – Manning’s ruwheidsveld Delft3D-NeVla model zoals gekalibreerd in AvdT-studie Stark *et al.* (2019).

¹ De bodemhoogte in TAW komt overeen met de bodemhoogte in NAP + 2,33 m.

5.7 Overige modelinstellingen

SIMONA

De overige modelinstellingen voor het tweedimensionale SIMONA-NeVla model zijn opgesomd in Tabel 3.

Tabel 3 – Basisinstellingen Simona-NeVla model

Parameter	Waarde
Time step	0,125 min
Gravity	9,813 m/s ²
Water density	1023 kg/m ³
Air density	1,2050 kg/m ³
Temperature	16 °C
constant in the equation of state	0,6980
Eddy Viscosity Coef.	1,0 m ² /s
Diffusion coefficient	10,0 m ² /s
Dynamic viscosity of water	0,001 kg/m·s
Reference density	1,0000 kg/L
Local depths at water level points	Mean
Threshold depth for flooding	0,3 m
Smoothing time	1440 min
Map results Interval	10 min
History output interval	10 min

Delft3D

De overige modelinstellingen voor het tweedimensionale Delft3D-NeVla model zijn opgesomd in Tabel 4.

Tabel 4 – Basisinstellingen Delft3D-NeVla model

Parameter	Waarde
Time step	0,05 min
Salinity	True
Sediment	False
Secondary Flow	True
Feedback of secondary flow onto main flow	False
Reflection parameter	100 s ²
Gravity	9,81 m/s ²
Water density	1023 kg/m ³
Air density	1 kg/m ³
Temperature	15 °C
Wall roughness	Free
Horizontal eddy viscosity	0,1 m ² /s
Horizontal eddy diffusivity	1,0 m ² /s
Drying and flooding	Centres and faces
Depth specified at	Grid cell corners
Depth at centre	Max
Depth at faces	Mor
Threshold depth	0,05 m
Marginal depth	0,05 m
Smoothing time	120 min
Advection scheme for momentum	cyclic
Advection scheme for Transport	cyclic
Horizontal Forester filter	True
Map results Interval	10 min
History output interval	10 min

6 Modelresultaten

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de modelsimulaties besproken. De gemodelleerde dwarsstromingen worden vergeleken met de meetcampagnes en er wordt een correlatie berekend tussen de gemeten en gemodelleerde maximum dwarsstroming. Voor het verticaal getij wordt ook een dergelijke vergelijking gemaakt en worden de hoogwaters en maximale stijgsnelheden te Hansweert en het maximum verhang tussen Terneuzen en Hansweert geanalyseerd.

Eerst worden de gemodelleerde dwarsstroming en het verticaal getij voor een volledige springtij-doodtij-cyclus beschouwd om, bij gebrek aan voldoende meetdata voor gemiddelde getijcondities, de gevoeligheid van de modelresultaten voor een breder spectrum aan getijcondities te onderzoeken (§6.1). Daarna worden de resultaten van de validatieoefening voor de geselecteerde getijden (zie Tabel 1) getoond in §6.2. Deze paragraaf bevat de daadwerkelijke vergelijking tussen gesimuleerde en geobserveerde dwarsstromingen. Tot slot wordt een vergelijking gemaakt tussen simulaties waarin de afwaartse rand wordt geforceerd met een geobserveerd waterstandsverloop en met een astronomisch getij (§6.3). De validatieoefening wordt uitgevoerd voor de drie modelconfiguraties die in Hoofdstuk 5 werden gepresenteerd (Tabel 5).

Tabel 5 – Modelconfiguraties

Configuratie	Modelsoftware	Oorsprong ruwheidsveld	Afwaartse rand
<i>Simona (operationeel model)</i>	Waqua/Simona	Vanlede <i>et al.</i> (2009)	WKAP-CADZ
<i>Delft3D (ruwheidsveld uit operationeel model)</i>	Delft3D	Vanlede <i>et al.</i> (2009)	WKAP-CADZ
<i>Delft3D (ruwheidsveld uit AvdT-studie "Sedimentatie Drempels")</i>	Delft3D	Stark <i>et al.</i> , 2019	WKAP-CADZ

6.1 Springtij-doodtij variatie

Aangezien er tot op heden onvoldoende data beschikbaar is om de voorspelkracht van de numerieke modellen te onderzoeken voor een breed spectrum aan getijcondities (i.e., springtij-doodtij variatie) worden langdurige simulaties uitgevoerd om de gemodelleerde dwarsstroming langs de Platen van Ossensisse en verticale getijcondities in het studiegebied voor een volledige springtij-doodtij-cyclus te illustreren. Met dergelijke simulaties kan ook de correlatie tussen het verticaal getij en de voorspelde dwarsstroming worden geanalyseerd voor een breder spectrum aan getijcondities. Bovendien kan wel een vergelijking worden gemaakt tussen het gesimuleerde verticaal getij en de geobserveerde getijcondities bij meetstation Hansweert.

In de langdurige simulaties is de bathymetrie van 2019 geïmplementeerd voor de Westerschelde. Dit betekent dat er andere bathymetrische data wordt gebruikt dan de data waarvoor de modellen eerder gekalibreerd en gevalideerd werden. Dit leidt mogelijk tot afwijkingen in modelprestatie ten opzichte van de originele validatieoefeningen. Voor deze simulaties wordt voor elk getij, uitgezonderd een inspeeltijd van drie dagen, de gemodelleerde dwarsstroming en de omgevingsparameters van het verticaal getij (i.e., hoogwater Hansweert, maximum stijgsnelheid Hansweert, maximum verhang Terneuzen-Hansweert) geanalyseerd.

Overigens wordt opgemerkt dat Stark *et al.* (2019) en Plancke *et al.* (2020) de voorspelkracht van het Delft3D model al wel hebben gevalideerd voor een volledige springtij-doodtij-cyclus op basis van puntmetingen langs de ooststrand van de Platen van Ossensisse (Figuur 3). De voorspelkracht van het Delft3D model, met

ruwheidsveld dat werd gekalibreerd in het kader van deze AvdT-studie, voor de maximale dwarsstroming op de ondiepte ten oosten van de Platen van Ossensisse bleek goed te zijn, al werd er voor een groter aantal getijden een dwarsstroming gemodelleerd dan in de metingen zichtbaar was. Overigens werden desondanks de goede overeenkomst tussen model en meting op de ondiepte ook voor deze getijden de dwarsstromingen in de vaargeul, i.e., langs de groene boeienlijn, onderschat.

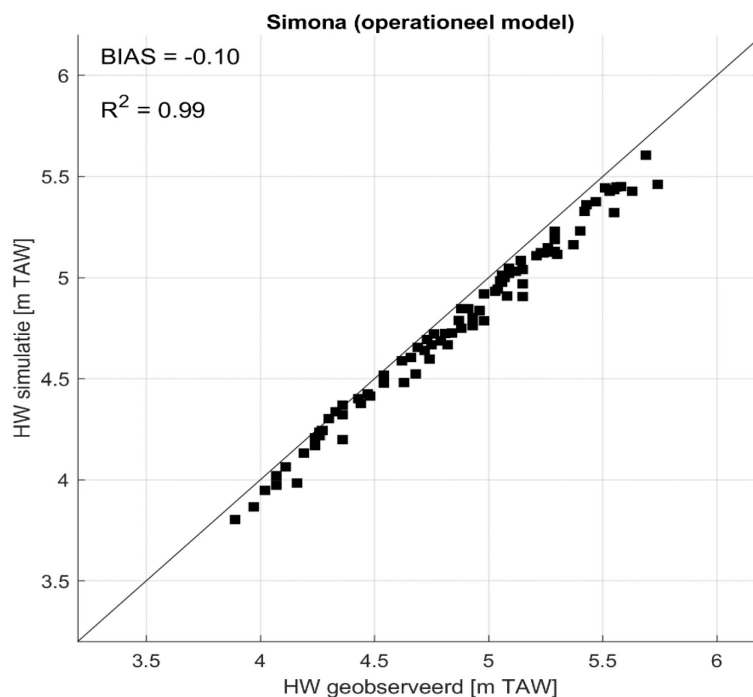
6.1.1 Validatie omgevingsparameters verticaal getij

Hieronder worden de resultaten van de huidige validatieoefening voor de representatie van omgevingsparameters met betrekking tot het verticaal getij in het studiegebied (i.e., in Hansweert) getoond. De modelprestatie voor het reproduceren van hoogwaterniveaus en stijgsnelheden in Hansweert, alsmede het verhang tussen Terneuzen en Hansweert wordt voor de simulatieperiode van ongeveer drie springtij-doodtij-cycli getest. Voor een volledige en meer gedetailleerde validatie van het NeVla model wordt verwezen naar de desbetreffende validatierapporten (e.g. Vanlede *et al.*, 2009; Vanlede *et al.*, 2015; Chu *et al.*, 2016).

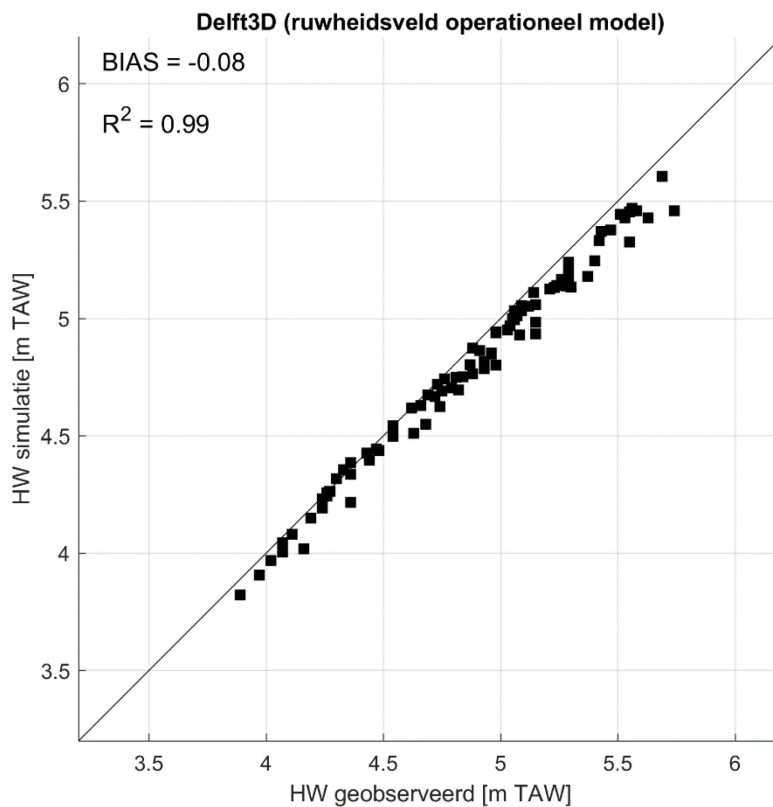
Hoogwater Hansweert

De correlatie tussen de gemodelleerde en geobserveerde hoogwaters in Hansweert wordt geïllustreerd in Figuur 16, Figuur 17 en Figuur 18 voor de drie modelconfiguraties. Deze correlatie is in het algemeen goed met $R^2 = 0,99$ voor de drie modelconfiguraties. Afhankelijk van de modelconfiguratie is wel sprake van een onderschatting van de hoogwaters in Hansweert. In het operationeel Waqua/Simona model is deze onderschatting gemiddeld -0,10 m, waarbij de hoogste getijden het sterkst onderschat worden. In de Delft3D simulatie met het ruwheidsveld uit het operationeel model is de gemiddelde onderschatting van de hoogwaters in Hansweert met -0,08 m iets kleiner. De beste representatie van de hoogwaterniveaus in Hansweert wordt echter bereikt in het Delft3D model met het ruwheidsveld uit de AvdT-studie "Sedimentatie op Drempels". Voor deze modelconfiguratie is de gemiddelde onderschatting slechts -0,04 m.

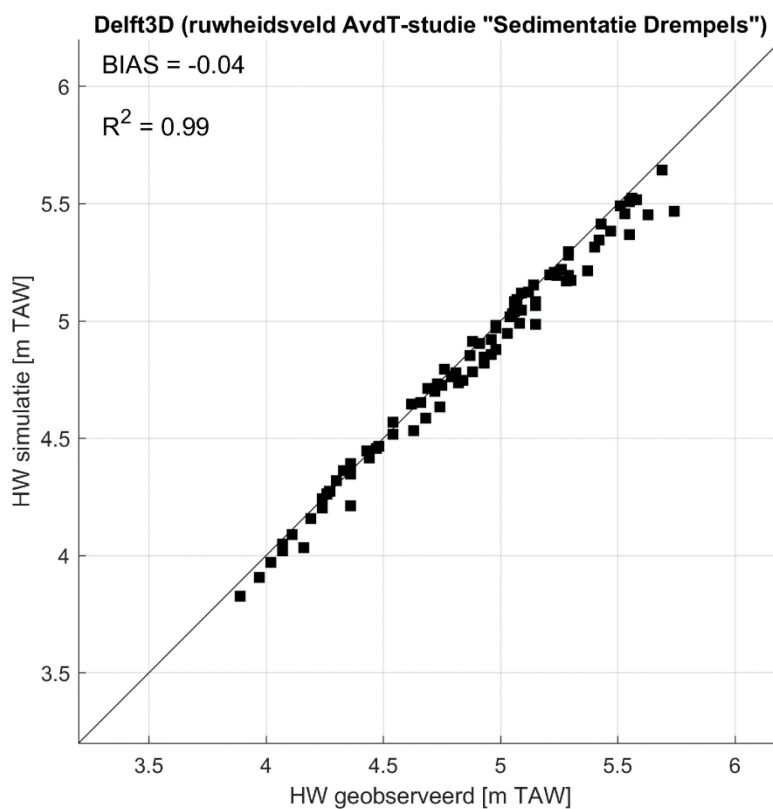
Overigens werd tijdens de kalibratie in het kader van de implementatie van de GOG/GGG's in het NeVla model door Chu *et al.* (2016) ook een onderschatting van de hoogwaters in Hansweert vastgesteld. Afhankelijk van de versie en de validatierun (i.e., origineel rooster of rooster met overstromingsgebieden) ging dit om een BIAS van -0,07 m tot -0,10 m.



Figuur 16 – Gesimuleerde en geobserveerde hoogwaters te Hansweert voor lange termijn Simona run.



Figuur 17 – Gesimuleerde en geobserveerde hoogwaters te Hansweert voor lange termijn Delft3D run met ruwheidsveld uit operationeel model.

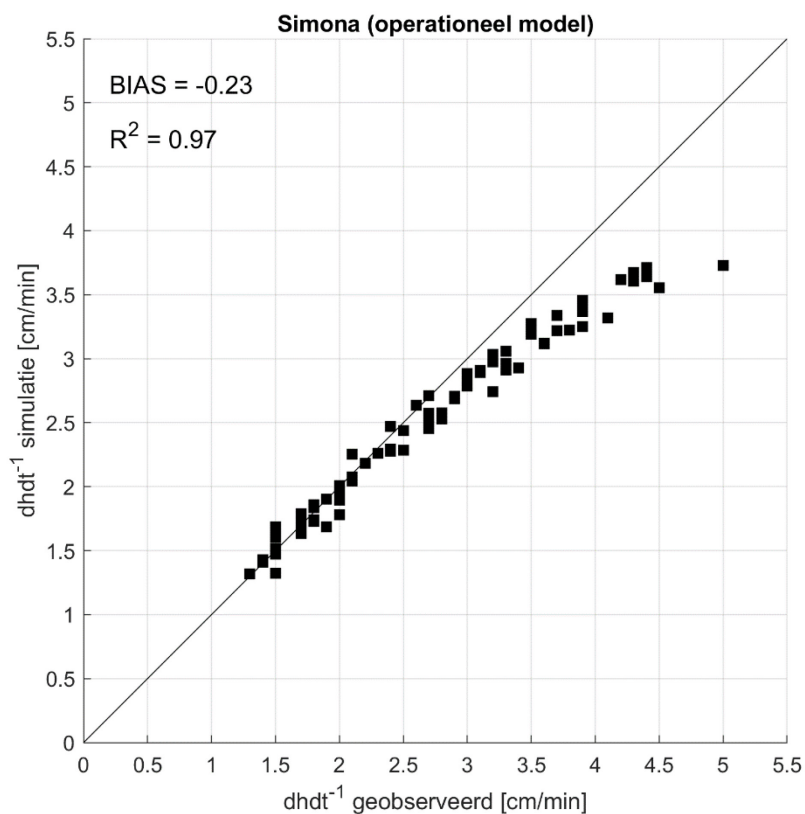


Figuur 18 – Gesimuleerde en geobserveerde hoogwaters te Hansweert voor lange termijn Delft3D run met ruwheidsveld uit AvdT-studie "Sedimentatie Drempels".

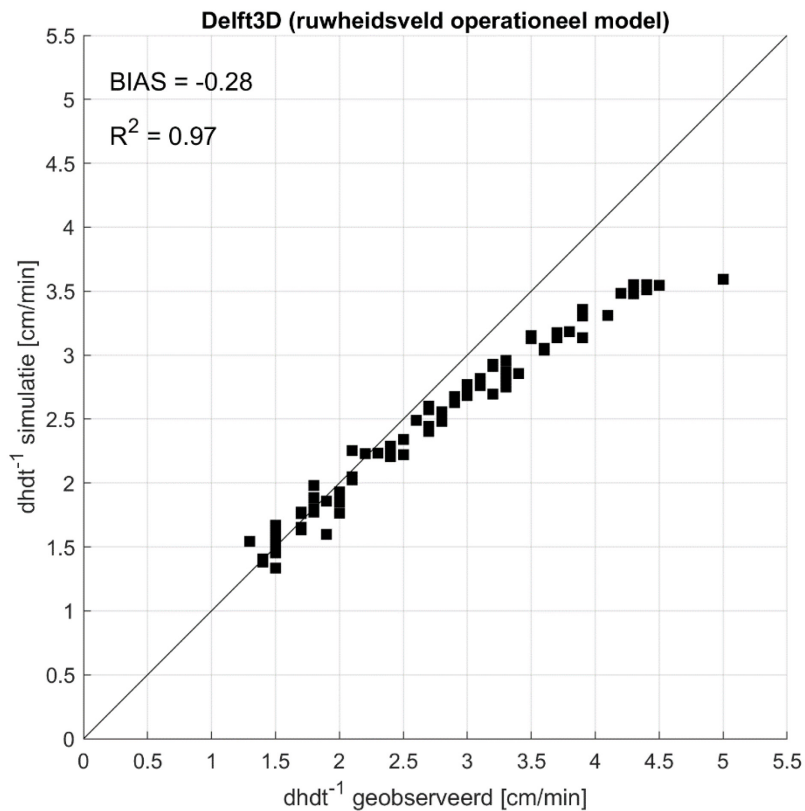
Stijgsnelheid Hansweert

In Figuur 19, Figuur 20 en Figuur 21 wordt een vergelijking gemaakt tussen de geobserveerde en gemodelleerde maximum stijgsnelheden voor alle getijden in de validatieruns. De correlatie tussen de gemeten en gesimuleerde waarden is goed met $R^2 = 0,97-0,98$ afhankelijk van de modelconfiguratie. De hoogste correlatie wordt wederom gevonden voor de Delft3D run met het ruwheidsveld uit de AvdT-studie "Sedimentatie op Drempels".

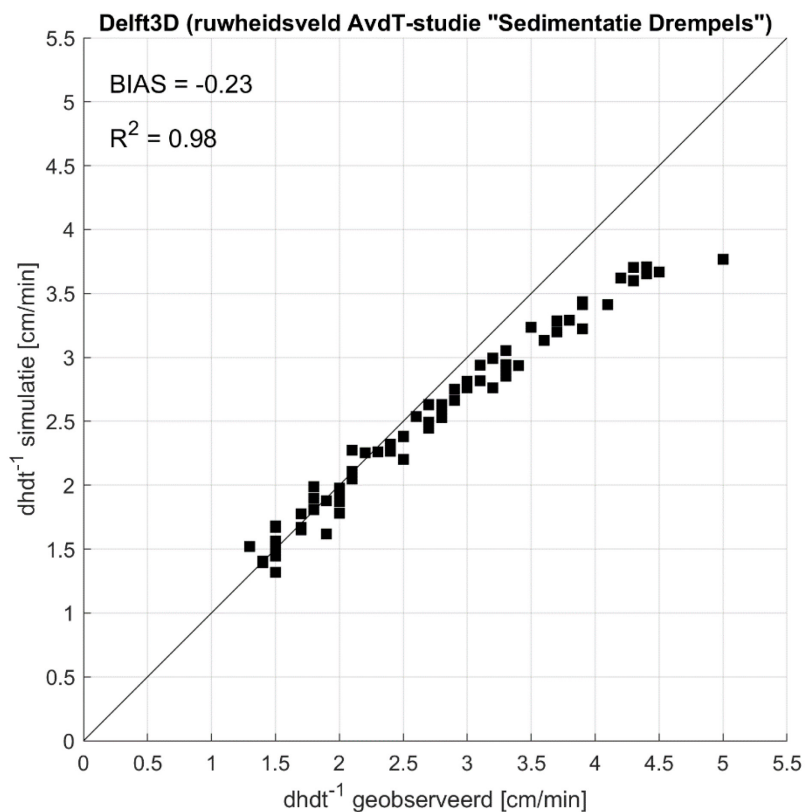
De maximum stijgsnelheden in Hansweert worden, evenals de hoogwaters, onderschat in alle drie de modelsimulaties. De gemiddelde afwijking varieert van -0,23 cm/min tot -0,28 cm/min, afhankelijk van de modelconfiguratie. In alle modelconfiguraties is een patroon zichtbaar waarbij juist de hogere stijgsnelheden worden onderschat. De maximale geobserveerde stijgsnelheden nemen toe tot 5,0 cm/min, terwijl de gesimuleerde stijgsnelheden gelimiteerd blijven tot ongeveer 3,8 cm/min. Lagere stijgsnelheden worden daarentegen wel goed gerepresenteerd in de modelsimulaties.



Figuur 19 – Gesimuleerde en geobserveerde maximale stijgsnelheid te Hansweert voor lange termijn Simona run.



Figuur 20 – Gesimuleerde en geobserveerde maximale stijgsnelheid te Hansweert voor lange termijn Delft3D run met ruwheidsveld uit operationeel model.

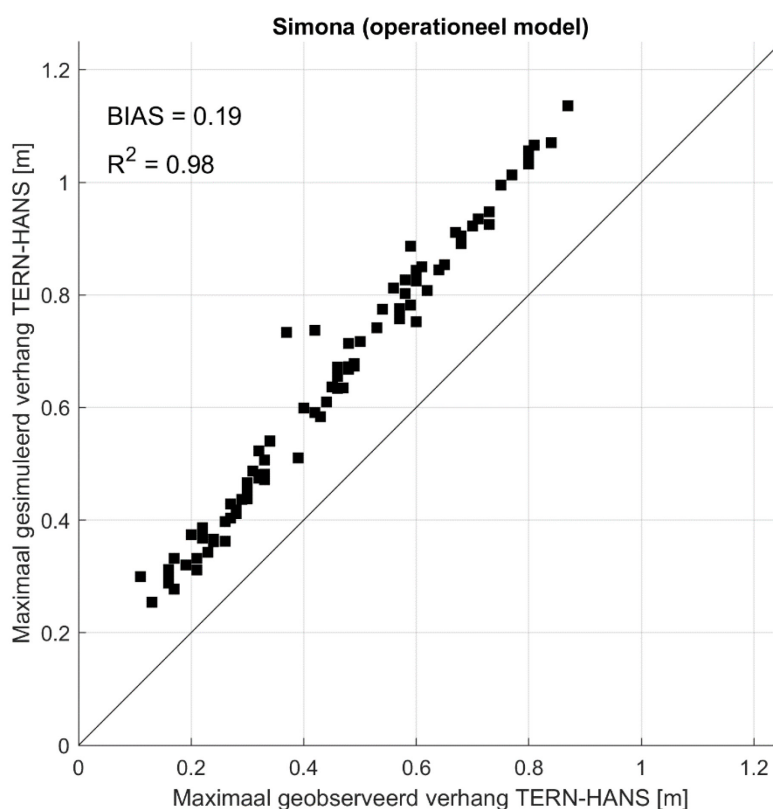


Figuur 21 – Gesimuleerde en geobserveerde maximale stijgsnelheid te Hansweert voor lange termijn Delft3D run met ruwheidsveld uit AvdT-studie "Sedimentatie Drempels".

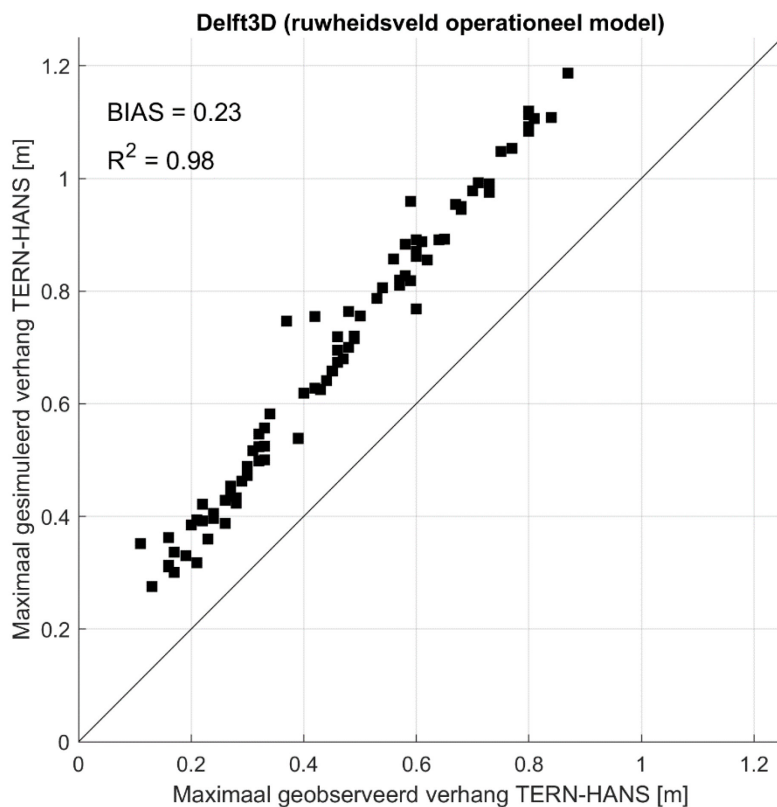
Verhang Terneuzen-Hansweert

Tot slot wordt in Figuur 22, Figuur 23 en Figuur 24 de vergelijking tussen het gesimuleerd en geobserveerd maximaal verhang tussen Terneuzen en Hansweert getoond voor de drie modelconfiguraties. In tegenstelling tot de hoogwaters en de maximum stijgsnelheden in Hansweert wordt het maximum verhang juist overschat in de modelsimulaties. De gemiddelde overschatting varieert tussen de +0,15 m en +0,23 m afhankelijk van de modelconfiguratie.

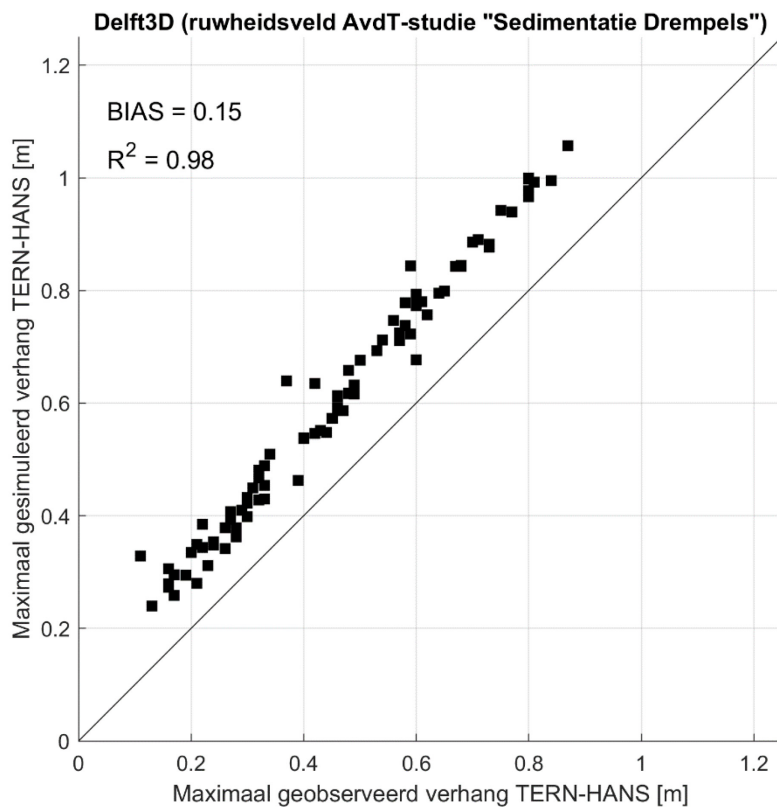
De combinatie van een overschatting van het maximum verhang en een onderschatting van de maximum stijgsnelheid in Hansweert suggereert dat de modellen de snelheid van de getijvoortplanting tussen Terneuzen en Hansweert onderschatten en dan met name voor de hogere getijden.



Figuur 22 – Gesimuleerd en geobserveerd maximaal verhang tussen Terneuzen en Hansweert voor lange termijn Simona run.



Figuur 23 – Gesimuleerd en geobserveerd maximaal verhang tussen Terneuzen en Hansweert voor lange termijn Delft3D run met ruwheidsveld uit operationeel model.



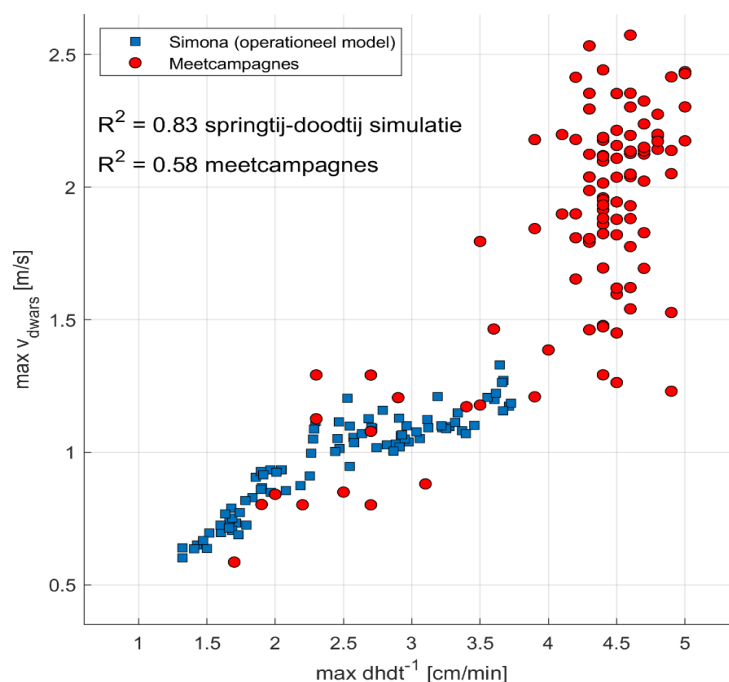
Figuur 24 – Gesimuleerd en geobserveerd maximaal verhang tussen Terneuzen en Hansweert voor lange termijn Delft3D run met ruwheidsveld uit AvdT-studie "Sedimentatie Drempels".

6.1.2 Voorspellende waarde van gesimuleerde stijgsnelheid voor springtij-doottij variatie dwarsstroming

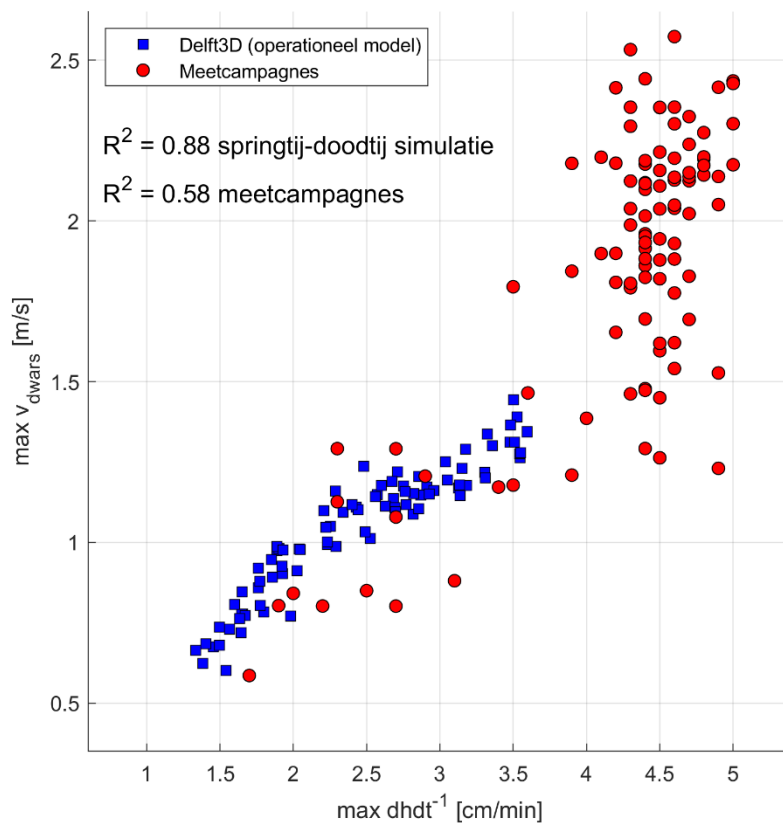
Uit Van Weerdenburg & Van der Werf (2019) is gebleken dat de stijgsnelheid in Hansweert de hoogste voorspellende waarde heeft voor de maximum dwarsstroming zoals die ook in deze studie wordt gedefinieerd. Daarom wordt in deze paragraaf de voorspellende waarde van de gesimuleerde stijgsnelheid voor de gesimuleerde dwarsstromingen geanalyseerd. In Figuur 25, Figuur 26 en Figuur 27 wordt de correlatie tussen beide parameters gegeven voor de drie modelconfiguraties. In deze figuren stellen de blauwe markers individuele getijden uit de gesimuleerde springtij-doottij-cycli voor. In deze figuren zijn ook de geobserveerde dwarsstromingen en maximale stijgsnelheden tijdens de meetcampagnes geplot (rode markers). Voor de gesimuleerde springtij-doottij-cycli wordt een duidelijke correlatie gevonden tussen de maximum stijgsnelheid in Hansweert en de maximum dwarsstroming. De sterkste correlatie wordt gevonden voor de Simona en Delft3D runs met het ruwheidsveld uit het operationeel model (i.e., $R^2 = 0,83-0,88$). Voor de Delft3D simulatie met het ruwheidsveld uit de AvdT-studie "*Sedimentatie op Drempels*" wordt een minder sterke correlatie gevonden ($R^2 = 0,57$).

Uit de figuren volgt ook dat de correlatie tussen de stijgsnelheid en de maximum dwarsstroming hoger is als een volledige springtij-doottij cyclus in beschouwing wordt genomen, dan wanneer enkel naar de hoogste springtijden wordt gekeken. De correlatie die op basis van de meetcampagnes tijdens dergelijke tij-condities wordt gevonden ($R^2 = 0,58$) is immers een stuk lager dan de correlatie in de simulatieresultaten met het ruwheidsveld uit het operationeel model.

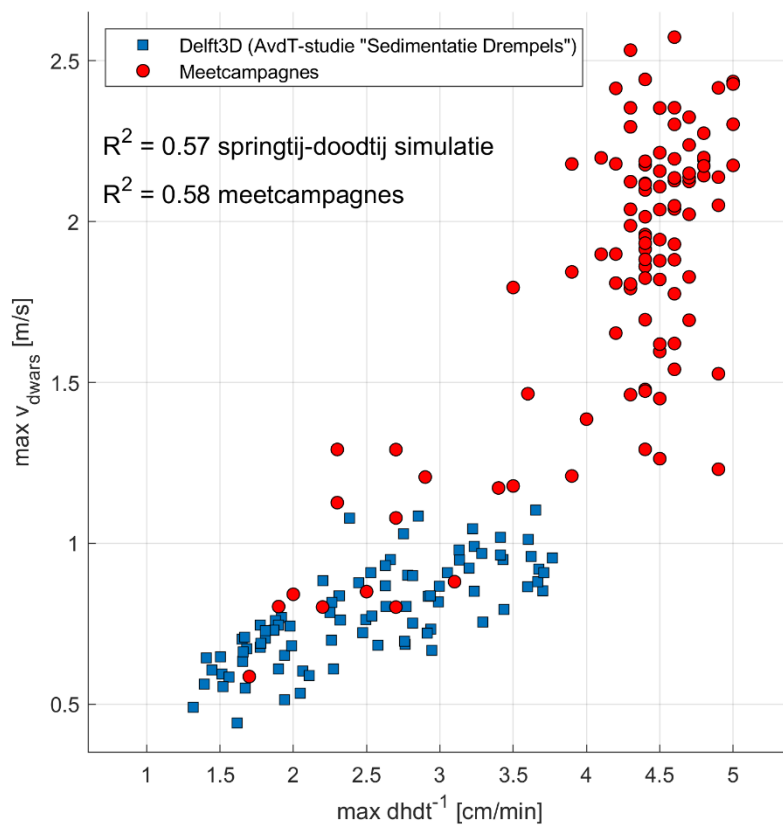
Tot slot blijkt uit de figuren dat de gesimuleerde maximum stijgsnelheden in Hansweert gelimiteerd blijven tot maximaal 3,5-4,0 cm/min, terwijl de geobserveerde maximum stijgsnelheden voor getijden waarin de dwarsstroming zeer sterk was juist hoger waren (4,0-5,0 cm/min). In de springtij-doottij simulaties komen overigens twee van de geselecteerde springtijden voor (i.e., 21/02/2019 en 23/02/2019), waarvoor de geobserveerde maximum stijgsnelheid van 4,4 cm/min (zie: Tabel 1) inderdaad niet wordt benaderd. Een onderschatting van de hoogste stijgsnelheden werd ook in de vorige paragraaf al geïdentificeerd en blijkt in alle drie de geteste modelconfiguraties voor te komen (Figuur 19, Figuur 20 en Figuur 21). Gegeven de correlatie tussen de maximum stijgsnelheid in Hansweert en de maximum dwarsstroming langs de Platen van Ossenisse kan deze onderschatting leiden tot het onderschatten van de maximum dwarsstroming in de modelsimulaties. Hierbij dient wel te worden opgemerkt dat juist voor de getijden met de hoogste stijgsnelheden, de stijgsnelheid verder geen voorspellende waarde meer heeft voor de grootte van de dwarsstroming (i.e., verticale rode puntenwolk aan rechterzijde figuren).



Figuur 25 – Maximale dwarsstromingen ten opzichte van maximale stijgsnelheid Hansweert voor Simona (operationeel model).



Figuur 26 – Maximale dwarsstromingen ten opzichte van maximale stijgsnelheid Hansweert voor Delft3D run met ruwheidsveld uit operationeel model.



Figuur 27 – Maximale dwarsstromingen ten opzichte van maximale stijgsnelheid Hansweert voor Delft3D run met ruwheidsveld uit AvdT-studie "Sedimentatie Drempels".

6.2 Validatie voor geselecteerde meetcampagnes

De maximum dwarsstroming langs de Platen van Ossenisse wordt voor de modelsimulaties bepaald als het maximale instantaan verschil tussen de hoogste dwarsstromingen in positieve richting (i.e., van de vaargeul af) en negatieve richting (i.e., naar de vaargeul toe) zoals in Figuur 7 wordt geïllustreerd. De gevonden correlaties in deze paragraaf zijn gebaseerd op enkele geselecteerde springtijden en daardoor niet representatief voor de modelprestatie voor het reproduceren van reguliere springtij-doodtij-cycli. Daarvoor wordt verwezen naar §6.1.1 of eerdere validatierapporten van het NeVla model (e.g. Vanlede *et al.*, 2009; Vanlede *et al.*, 2015; Chu *et al.*, 2016).

Bij de interpretatie van de modelresultaten en de gevonden correlaties tussen gemodelleerde en gemeten dwarsstromingen moet in het achterhoofd worden gehouden dat deze enkel gebaseerd zijn op een select aantal hoge springtijden en stormtijden, aangevuld met slechts één lager getij. De capaciteit van de modellen om de springtij-doodtij-variatie in sterkte van de dwarsstroming te reproduceren kan op basis van de huidige simulaties en beschikbare data niet expliciet worden onderzocht.

6.2.1 Dwarsstroming

In onderstaande figuren wordt voor elk van de drie modelconfiguraties de correlatie tussen de gemodelleerde en geobserveerde maximum dwarsstroming getoond (i.e., operationeel model in Waqua/Simona in Figuur 28, Delft3D-model met ruwheidsveld uit het operationeel model in Figuur 29 en Delft3D-model met het ruwheidsveld uit de AvdT-studie door Stark *et al.* (2019) in Figuur 30).

In alle modelconfiguraties zijn de gemodelleerde dwarsstromingen minder variabel dan werd geobserveerd. Waar de geobserveerde maximale dwarsstromingen voor de meetcampagnes variëren tussen 0,5-2,6 m/s, is de variatie in gemodelleerde dwarsstroming een stuk kleiner: 0,7-1,7 m/s voor de Simona runs en de Delft3D-runs met het ruwheidsveld uit het operationeel model en 0,6-1,5 m/s voor de Delft3D runs met het ruwheidsveld uit de AvdT-studie door Stark *et al.* (2019). De correlatie tussen de gemodelleerde en geobserveerde maximale dwarsstroming is niet heel groot. De hoogste correlatie met $R^2 = 0,75$ wordt gevonden voor de Delft3D run met het ruwheidsveld uit het operationeel model. Hoewel met name de sterkte van de hogere dwarsstromingen wordt onderschat heeft het model in deze configuratie toch enige voorspellende waarde. Dat wil zeggen dat getijden waarvoor de geobserveerde dwarsstroming het sterkst was ook in de modelsimulatie een (iets) sterkere dwarsstroming opleveren.

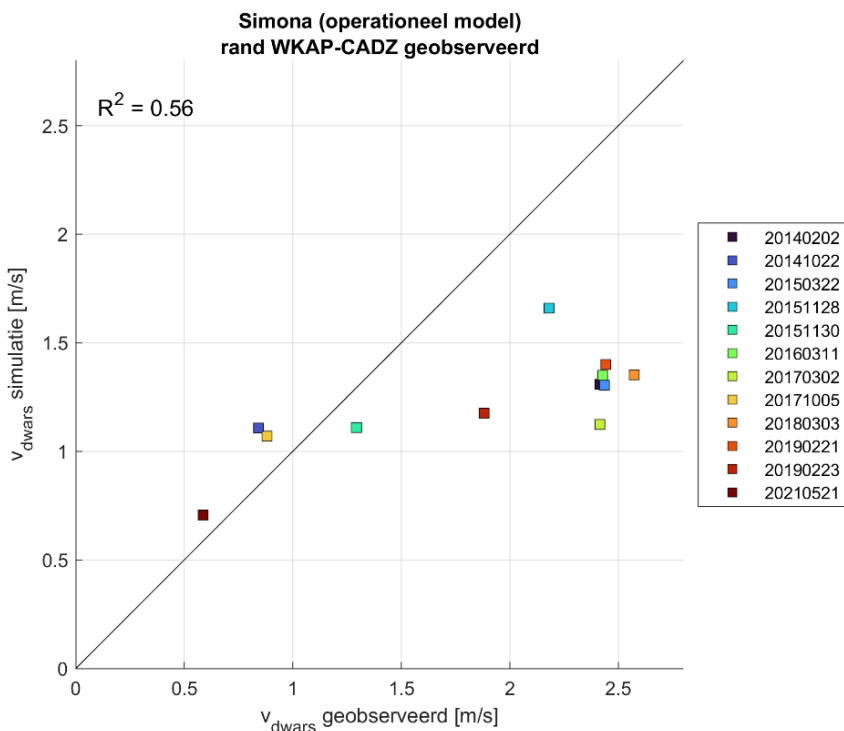
Ruimtelijk beeld

De hiervoor besproken maximum dwarsstroming betreft een instantaan verschil in snelheidscomponenten en vormt dus een momentopname. Daarom worden in “Bijlage B – Geobserveerde en gemodelleerde dwarsstroming” ook de geobserveerde en gemodelleerde dwarsstromingen per tijdstap getoond. Voor de modelresultaten hebben deze een interval van 10 minuten. Voor de gevaren transecten is het interval variabel, afhankelijk van de meetcampagne. Uit deze figuren kan meer informatie worden gehaald over de sterkte van de verschillende componenten van de dwarsstroming en de gemodelleerde en geobserveerde locaties van de neer.

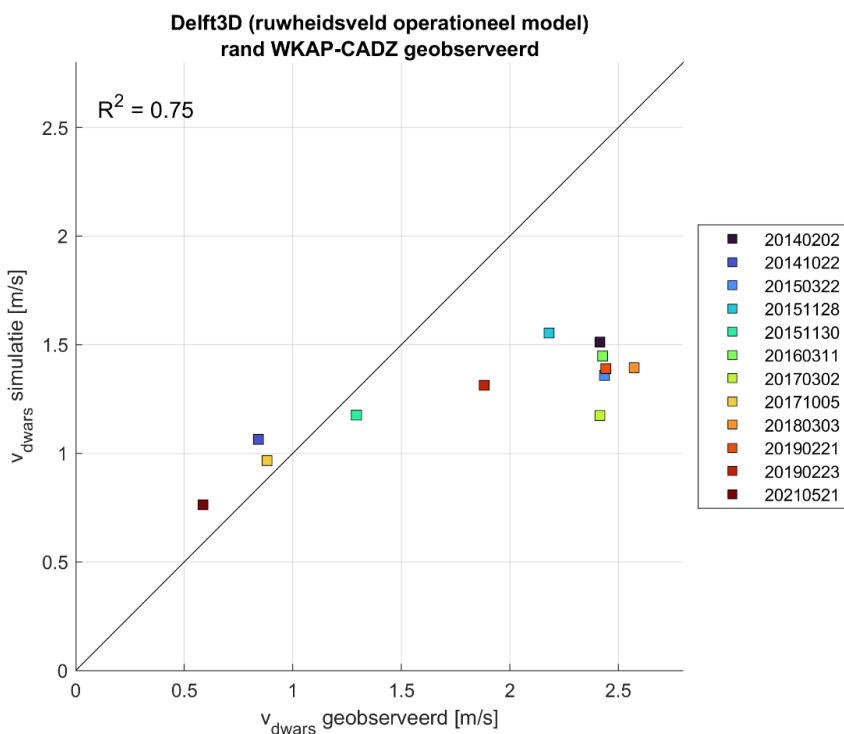
Deze locatie van de neer en maximale dwarsstroming verschilt namelijk tussen de verschillende modelconfiguraties. Daarnaast is, in vergelijking met de observaties, de gemodelleerde locatie van de neer minder variabel tussen de onderzochte springtijden. Hierbij wordt opgemerkt dat de geobserveerde locatie van de neer ook meer verschuift over de tijd dan de gemodelleerde locatie van de neer. In de Simona runs en de Delft3D runs met het ruwheidsveld uit het operationeel model bevindt de neer zich steeds zuidelijker dan in de Delft3D simulatie met het ruwheidsveld uit de AvdT-studie. In die laatste configuratie bevindt het centrum van de neer zich vaak ten noorden van Boei 51, terwijl het operationeel model het centrum van de neer veelal ten zuiden van Boei 51 reproduceert.

Tot slot blijkt uit deze figuren ook een faseverschil in de passage van de neer langs de groene boeienlijn. De maximale dwarsstroming komt in de modelsimulaties steeds later voor dan in de meetcampagnes. Dit kan

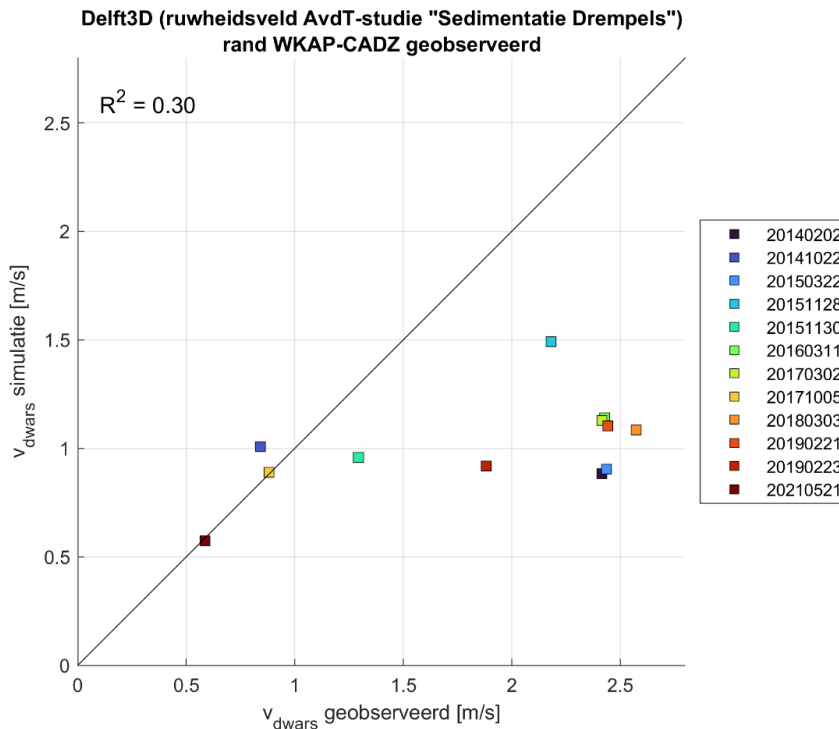
betekenen dat de waterstandsdepressie en de neer minder beweeglijk zijn en dus langer boven de plaat blijven in de modelsimulaties. Hiervoor is een gedetailleerde visuele vergelijking van de modeluitkomst (i.e., map-files) met gemeten ruimtelijke stromingspatronen vereist. Daarbij dient ook in beschouwing te worden genomen dat de sterkte en ruimtelijke beweging van de neer zeer gevoelig blijken te zijn voor morfologische veranderingen (Stark *et al.*, 2020).



Figuur 28 – Gesimuleerde en geobserveerde dwarsstroming voor Simona run geforceerd met gemeten waterstandsverloop bij Cadzand-Westkapelle .



Figuur 29 – Gesimuleerde en geobserveerde dwarsstroming voor Delft3D run met ruwheidsveld uit operationeel model.



Figuur 30 – Gesimuleerde en geobserveerde dwarsstroming voor Delft3D run met ruwheidsveld uit AvdT-studie “Sedimentatie Drempels”.

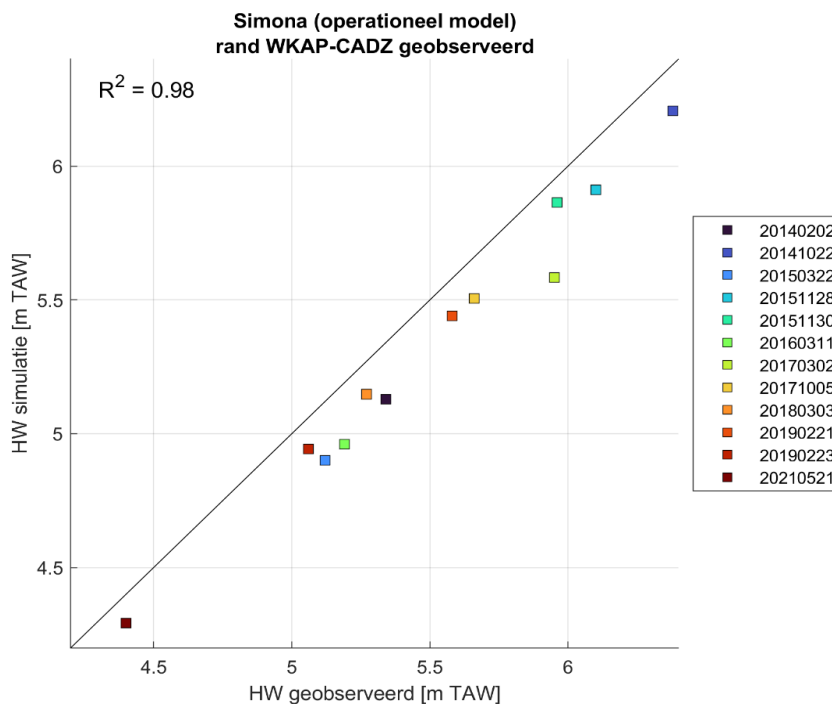
6.2.2 Omgevingsparameters verticaal getij

Het verticaal getij in het studiegebied wordt geanalyseerd aan de hand van drie parameters: het hoogwater te Hansweert, de maximale stijgsnelheid te Hansweert en het maximum verhang tussen Terneuzen en Hansweert. Voor deze drie parameters wordt evenals in de vorige paragraaf per modelconfiguratie de correlatie tussen de gesimuleerde en geobserveerde waarden onderzocht. Zo wordt de voorspellende waarde van het model beschouwd. Hierbij dient uiteraard de bemerking te worden gemaakt dat deze correlatie enkel gebaseerd is op het select aantal springtijden. De algehele kwaliteit van de modellen voor wat betreft de representatie van het verticaal getij kan geanalyseerd worden door een langere tijdserie van verschillende springtij-doodtij-cycli te analyseren.

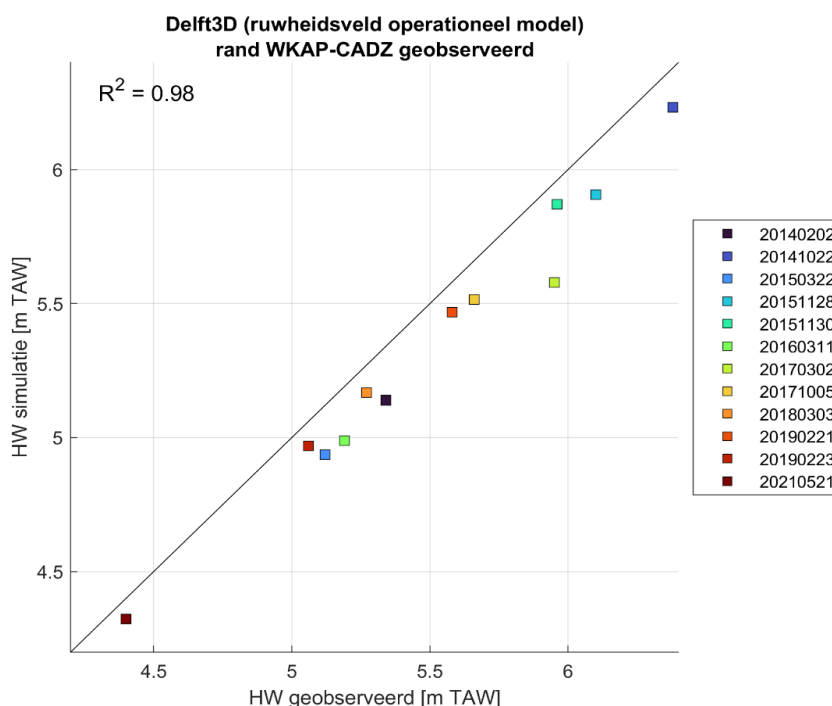
Hieronder wordt de modelprestatie voor de representatie van het verticaal getij tijdens de meetcampagnes per omgevingsparameter besproken voor de drie modelconfiguraties. Aanvullend worden “Bijlage C - Geobserveerde en gemodelleerde getijkarakteristieken” bijbehorende waarden per meetcampagne getoond in Tabel 6 – Tabel 17.

Hoogwater Hansweert

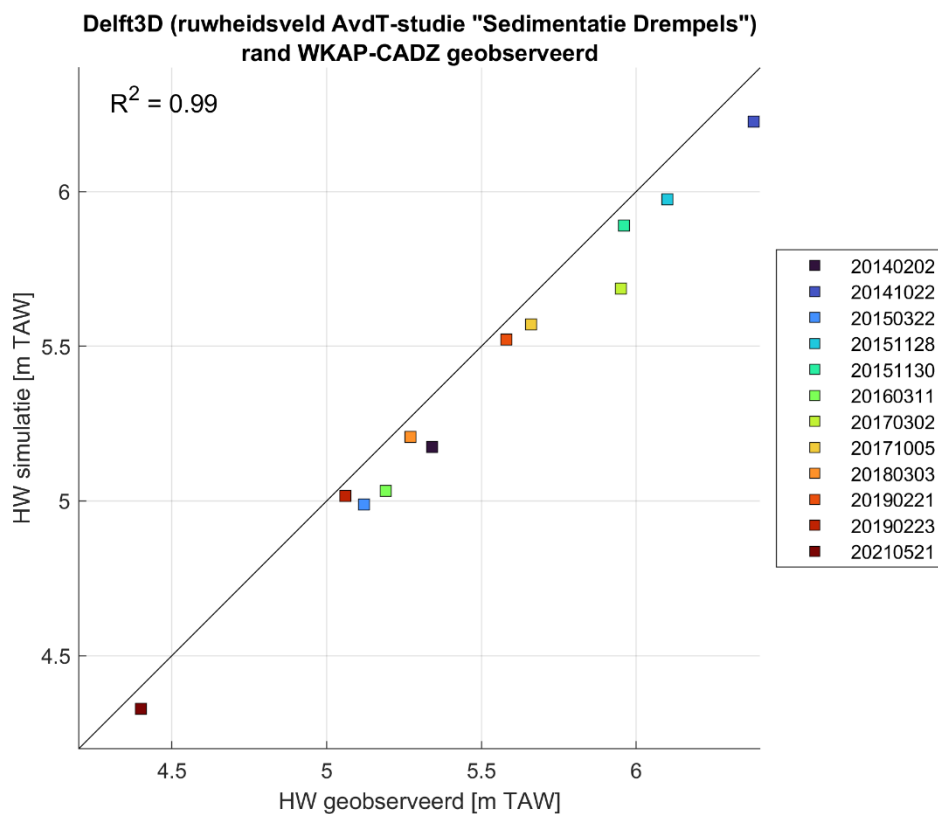
De correlatie tussen de gemodelleerde en geobserveerde hoogwaters in Hansweert wordt voor de drie onderzochte modelconfiguraties getoond in Figuur 31, Figuur 32 en Figuur 33. In alle modellen wordt een goede correlatie behaald van $R^2 \geq 0,98$, al worden de gemeten hoogwaters tijdens de meetcampagnes allemaal licht onderschat in de modelberekeningen. Voor de tijen met stormopzet kan dit deels verklaard worden aan de hand van het ontbreken van windinvloed in de modelsimulaties.



Figuur 31 – Gesimuleerde en geobserveerde hoogwaters te Hansweert tijdens meetcampagnes voor Simona run.



Figuur 32 – Gesimuleerde en geobserveerde hoogwaters te Hansweert tijdens meetcampagnes voor Delft3D run met ruwheidsveld uit operationeel model.

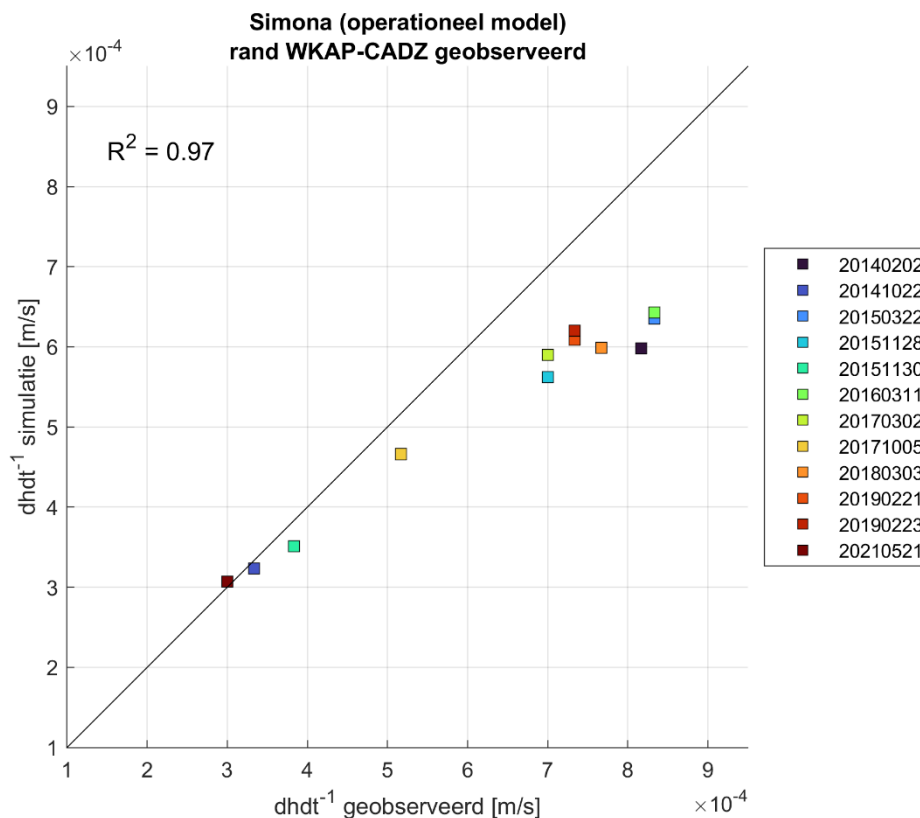


Figuur 33 – Gesimuleerde en geobserveerde hoogwaters te Hansweert tijdens meetcampagnes voor Delft3D run met ruwheidsveld uit AvdT-studie "Sedimentatie Drempels".

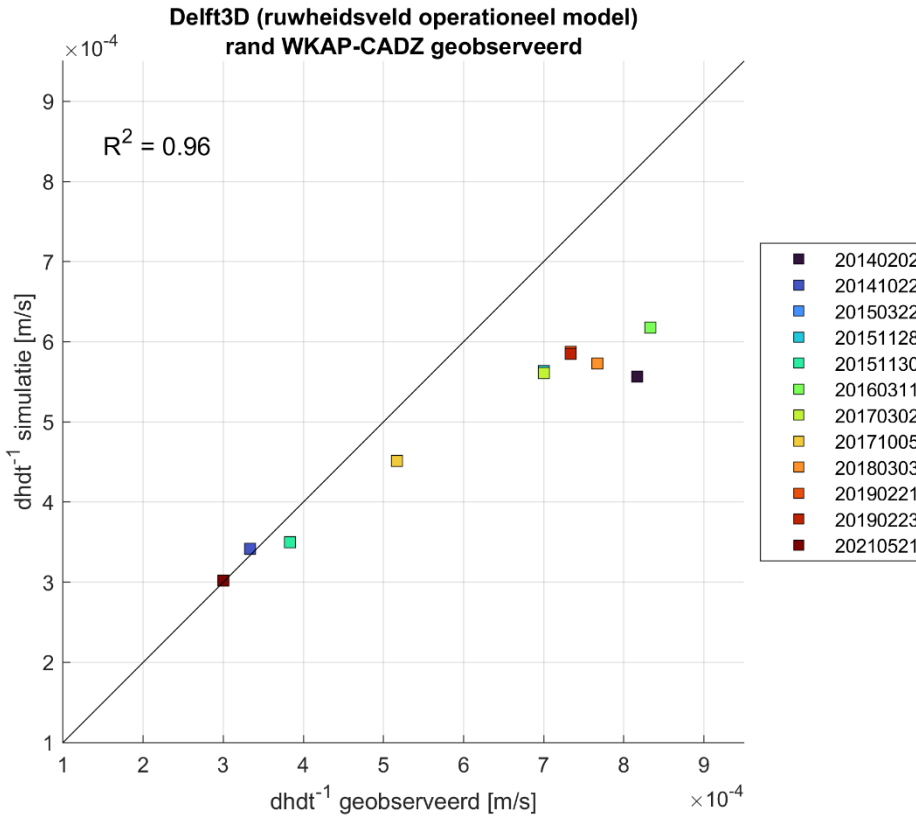
Stijgsnelheid Hansweert

De correlatie tussen de geobserveerde en gemodelleerde maximale stijgsnelheden te Hansweert tijdens de geselecteerde meetcampagnes wordt getoond in Figuur 34, Figuur 35 en Figuur 36. Deze correlatie is van eenzelfde orde als de correlatie van de hoogwaters. Voor alle modelconfiguraties geldt $R^2 \geq 0,96$. De zeer hoge maximale stijgsnelheden worden echter met 20-30% onderschat in de modelsimulaties. Dit zijn juist de getijden waarvoor ook de dwarsstroming het sterkst is (Tabel 1 en Figuur 37). Aangezien de maximum stijgsnelheid in Hansweert als belangrijkste indicator wordt gezien voor de sterkte van de dwarsstroming kan het onderschatten van de stijgsnelheid een verklaring vormen voor het onderschatten van de sterkte van de dwarsstroming.

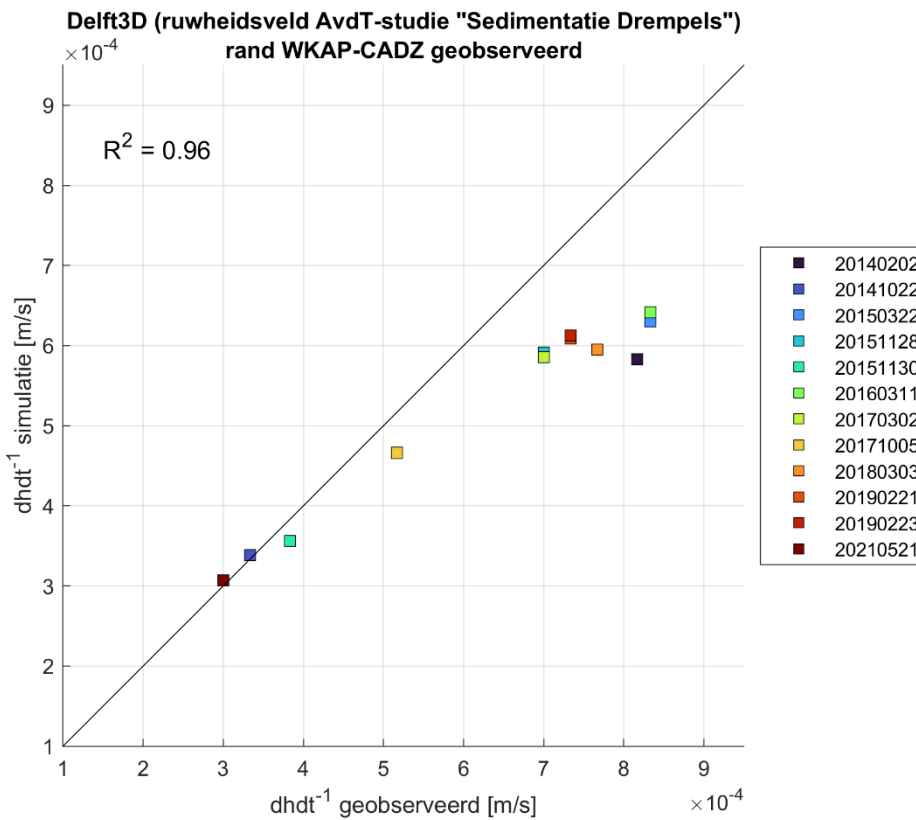
Net als bij de observaties hebben de gemodelleerde stijgsnelheden ook een geringe voorspellende waarde voor de gemodelleerde dwarsstroming tijdens de meetcampagnes. De gemodelleerde stijgsnelheid heeft hierbij de hoogste voorspellende waarde in het Delft3D-model met het ruwheidsveld uit het operationeel model ($R^2 = 0,65$). De voorspellende waarden hebben wederom betrekking op de geselecteerde springtijden en zijn niet representatief voor de voorspellende waarde over een volledige springtij-doodtij-cyclus. Daarvoor wordt verwezen naar §6.1.2.



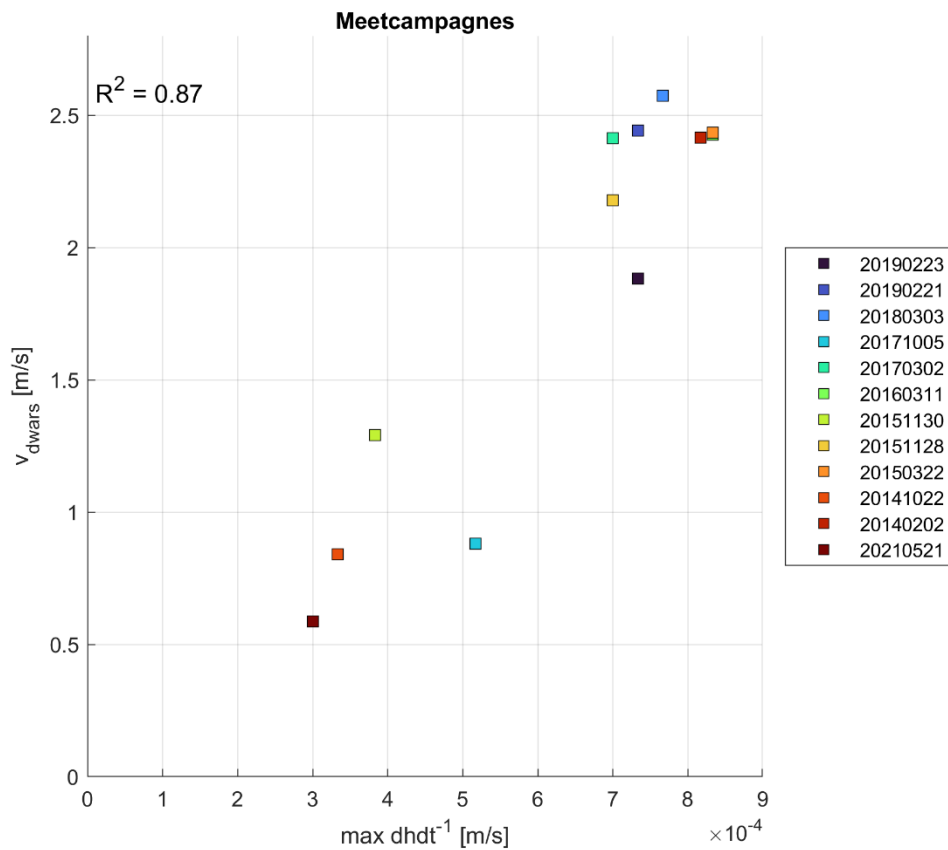
Figuur 34 – Correlatie tussen gesimuleerde en geobserveerde maximale stijgsnelheid te Hansweert tijdens meetcampagnes voor Simona run.



Figuur 35 – Correlatie tussen gesimuleerde en geobserveerde maximale stijgsnelheid te Hansweert tijdens meetcampagnes voor Delft3D run met ruwheidsveld uit operationeel model.



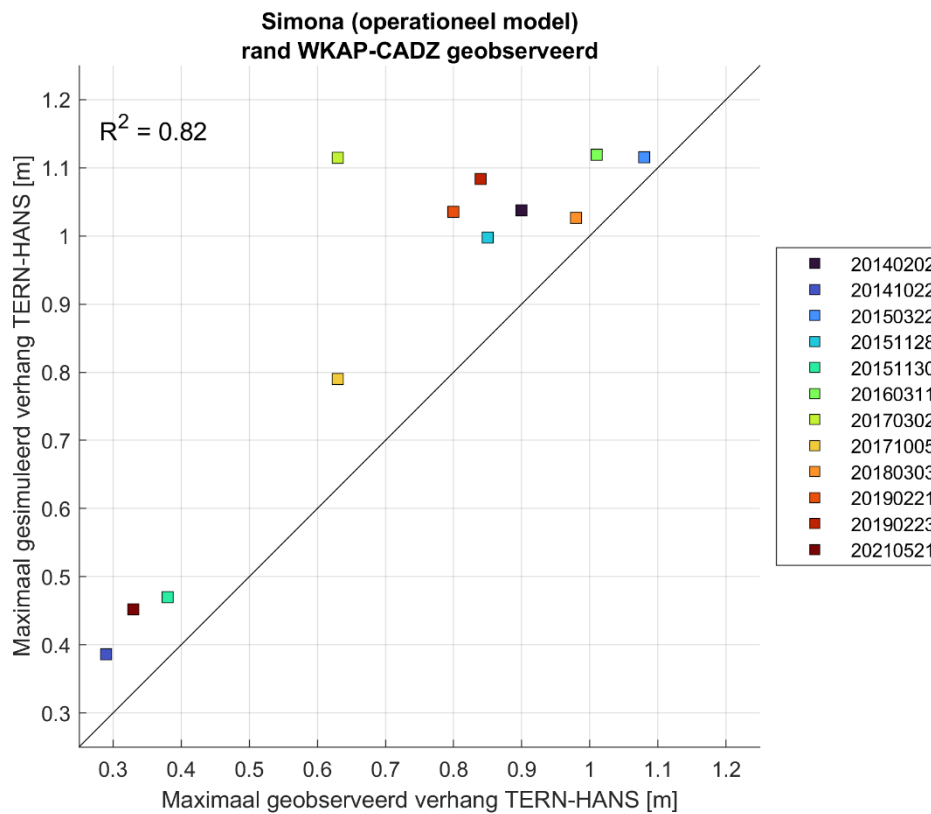
Figuur 36 – Correlatie tussen gesimuleerde en geobserveerde maximale stijgsnelheid te Hansweert tijdens meetcampagnes voor Delft3D run met ruwheidsveld uit AvdT-studie "Sedimentatie Drempels".



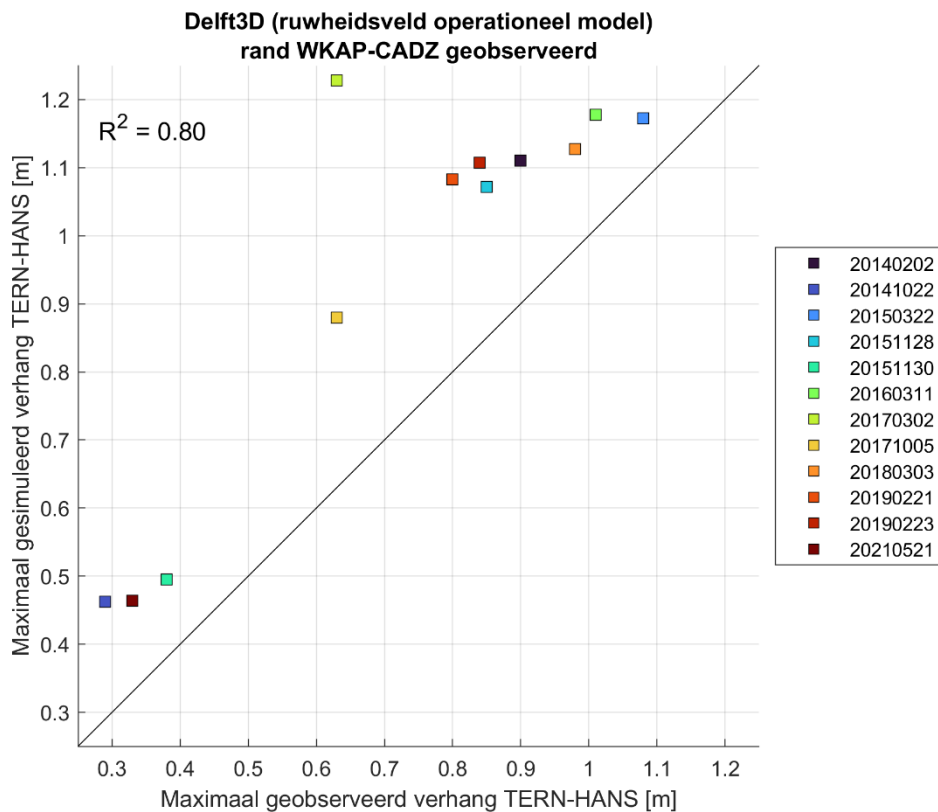
Figuur 37 – Correlatie tussen de geobserveerde dwarsstroming en de maximale stijgsnelheid te Hansweert.

Verhang tussen Terneuzen en Hansweert

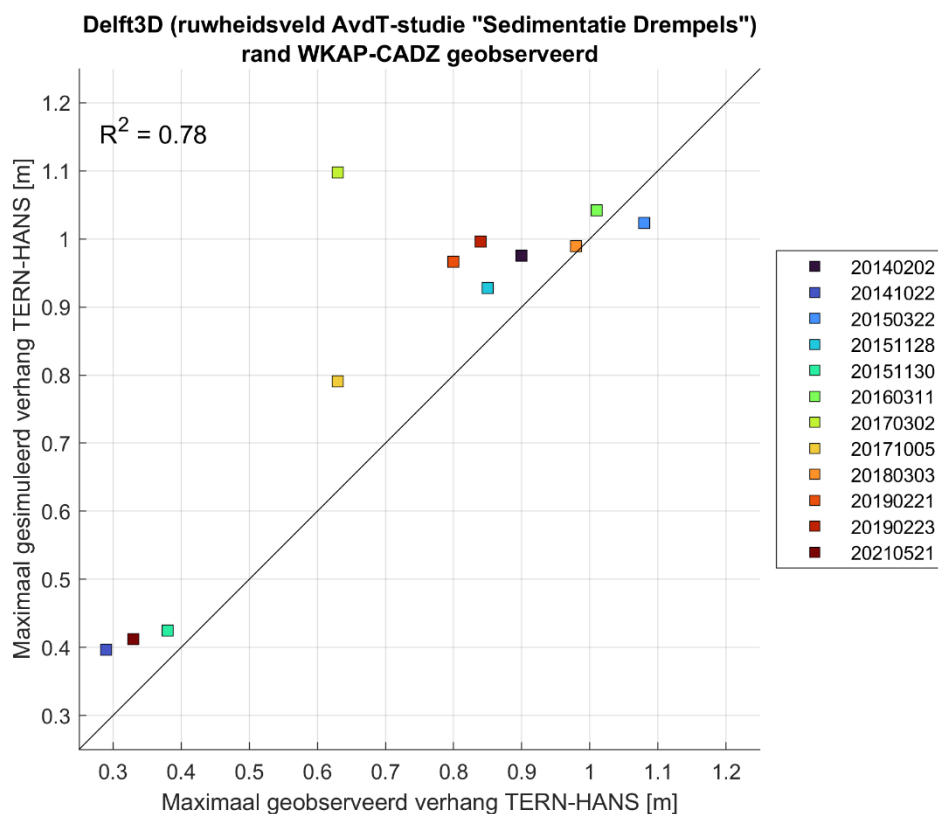
Figuur 38, Figuur 39 en Figuur 40 bevatten de correlatie tussen het gemodelleerde en geobserveerde verhang tussen Terneuzen en Hansweert voor de drie configuraties van het NeVla model. Het verhang tussen Terneuzen en Hansweert wordt in alle configuraties overschat. Deze overschatting is verreweg het sterkst voor het getij van 02/03/2017. Dit is één van de geselecteerde getijden met stormopzet. De correlatie tussen het gesimuleerde en geobserveerde maximaal verhang tijdens de geselecteerde meetcampagnes is lager dan voor de hoogwaterniveaus en de stijgsnelheid (i.e., R^2 varieert tussen 0,78 en 0,82).



Figuur 38 – Correlatie tussen gesimuleerd en geobserveerd maximaal verhang tussen Terneuzen en Hansweert tijdens meetcampagnes voor Simona run.



Figuur 39 – Correlatie tussen gesimuleerd en geobserveerd maximaal verhang tussen Terneuzen en Hansweert tijdens meetcampagnes voor Delft3D run met ruwheidsveld uit operationeel model.



Figuur 40 – Correlatie tussen gesimuleerd en geobserveerd maximaal verhang tussen Terneuzen en Hansweert tijdens meetcampagnes voor Delft3D run met ruwheidsveld uit AvdT-studie "Sedimentatie Drempels".

6.3 Invloed afwaartse randvoorwaarden: astronomisch getij vs. geobserveerd getij

Door de resultaten van simulaties die zijn geforceerd met een astronomisch getij te vergelijken met simulaties die zijn geforceerd met geobserveerde waterstanden kan de invloed van meteo-condities (i.e., opwaaiing en afwaaiing) op de voorspelde dwarsstroming worden onderzocht. Hiermee wordt ook de gevoeligheid of robuustheid van de modelvoorspelling in een operationele context in beeld gebracht. Als de voorspelmodellen in de operationele modeltrein worden geïmplementeerd zullen de randvoorwaarden immers variabel zijn en in een zekere mate afwijken van de geobserveerde waterstanden.

Verskil in randvoorwaarden

In deze paragraaf wordt de invloed van het gebruik van een astronomisch getij ten opzichte van geobserveerde waterstandreeksen aan de afwaartse rand besproken. De opgelegde waterstandsreeksen worden voor meetstation Cadzand getoond in: Bijlage A – Waterstandsreeksen afwaartse rand (Figuur 45 - Figuur 55).

De invloed wordt enkel geanalyseerd op basis van modelresultaten met het Delft3D model met het ruwheidsveld uit het operationeel model. Voor de geselecteerde springtijden zijn wederom individuele simulaties uitgevoerd waarbij de afwaartse rand nu is geforceerd met een astronomisch getij in plaats van een geobserveerde waterstandsreeks. Voor de meest recente meetcampagne (21/05/2021) werd nog geen simulatie uitgevoerd met een astronomisch getij als afwaartse randvoorwaarde. De analyse gebeurt dus op basis van de overige geselecteerde meetcampagnes. De astronomische waterstandsreeksen zijn verkregen van Rijkswaterstaat (<https://waterinfo.rws.nl/>).

Verskil in verticaal getij Hansweert

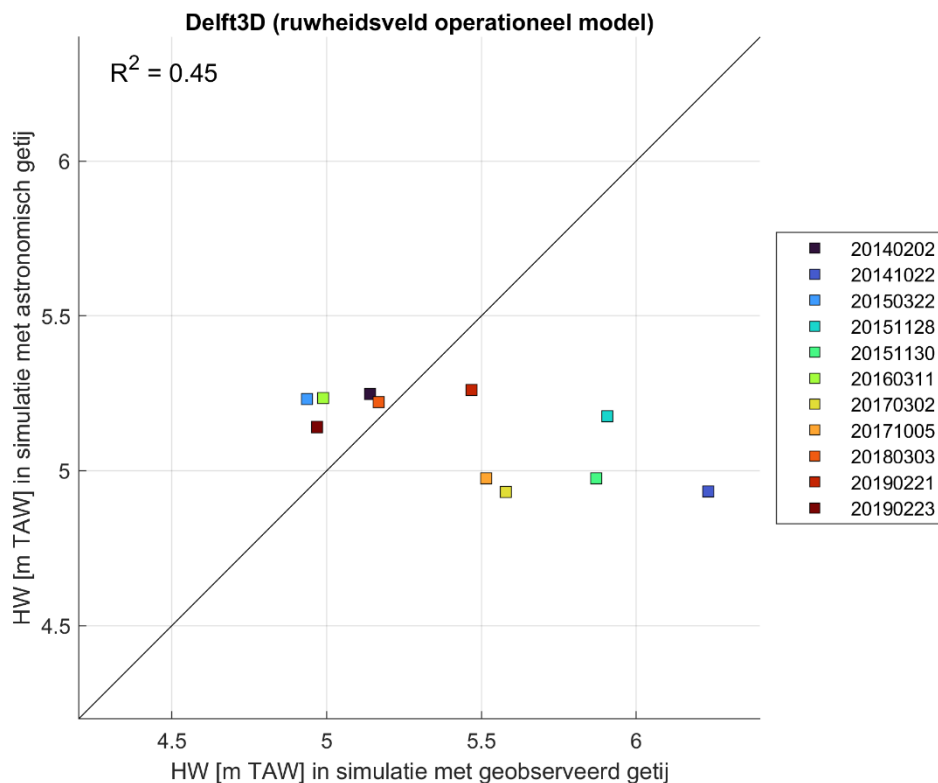
Figuur 41 weergeeft de gesimuleerde hoogwaterstanden in Hansweert voor alle geanalyseerde getijden in runs met het Delft3D model met ruwheidsveld uit het operationeel model en voor simulaties waarin geobserveerde waterstandreeksen dan wel een astronomisch getij werd geïmplementeerd aan de afwaartse rand. Hieruit volgt dat enkele van de geanalyseerde getijden een stormopzet kenden. Het waterstandsverloop ligt daardoor hoger in de geobserveerde reeksen dan op basis van het astronomisch getij. Meer specifiek geldt voor de getijden van 02/02/2014, 28/11/2015, 30/11/2015, 02/03/2017 en 05/10/2017 dat het gemodelleerde hoogwaterniveau in Hansweert meer dan 0,5 m hoger ligt in simulaties met geobserveerde randvoorwaarden ten opzichte van simulaties met het astronomisch getij. Voor de overige campagnes is het verschil kleiner of is de hoogwaterstand zelfs iets hoger op basis van simulaties met het astronomisch getij. Dit resultaat is niet onverwacht, omdat de harmonische runs de invloed van op- en afwaaiing niet meenemen.

In Figuur 42 en Figuur 43 worden aanvullend de gemodelleerde maximale stijgsnelheden te Hansweert en het maximale verhang tussen Terneuzen en Hansweert getoond voor simulaties die zijn geforceerd met een geobserveerd waterstandsverloop en een astronomisch getij. De verschillen zijn voor deze parameters een stuk kleiner dan voor de hoogwaters het geval is. Dit geeft mede aan dat de gevoeligheid van de gemodelleerde maximale stijgsnelheid en het gemodelleerd maximaal verhang voor stormopzet in de afwaartse randvoorwaarden niet heel groot is.

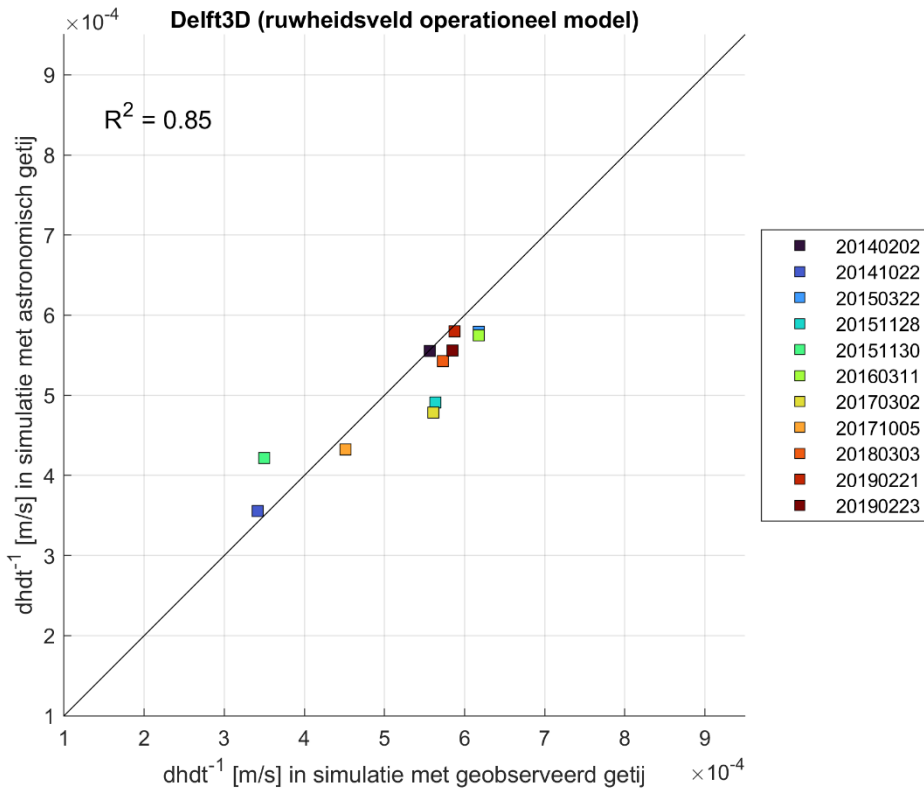
Verskil in dwarsstroming

Het verschil in gesimuleerde dwarsstroming tussen simulaties die worden geforceerd met een geobserveerde waterstandreeks en runs die worden geforceerd met een astronomisch getij (Figuur 44) is kleiner dan de hiervoor getoonde verschillen in verticaal getij. Ook bij deze gevoeligheidsanalyse voor de implementatie van het getij aan de afwaartse rand blijkt dus dat de gemodelleerde sterkte van de dwarsstroming weinig variabel is voor getijden die een stormopzet kennen. Getijden waarvoor het hoogwater in simulaties met de geobserveerde randvoorwaarden hoger was (i.e., 02/02/2014, 30/11/2015, 02/03/2017 en 05/10/2017)

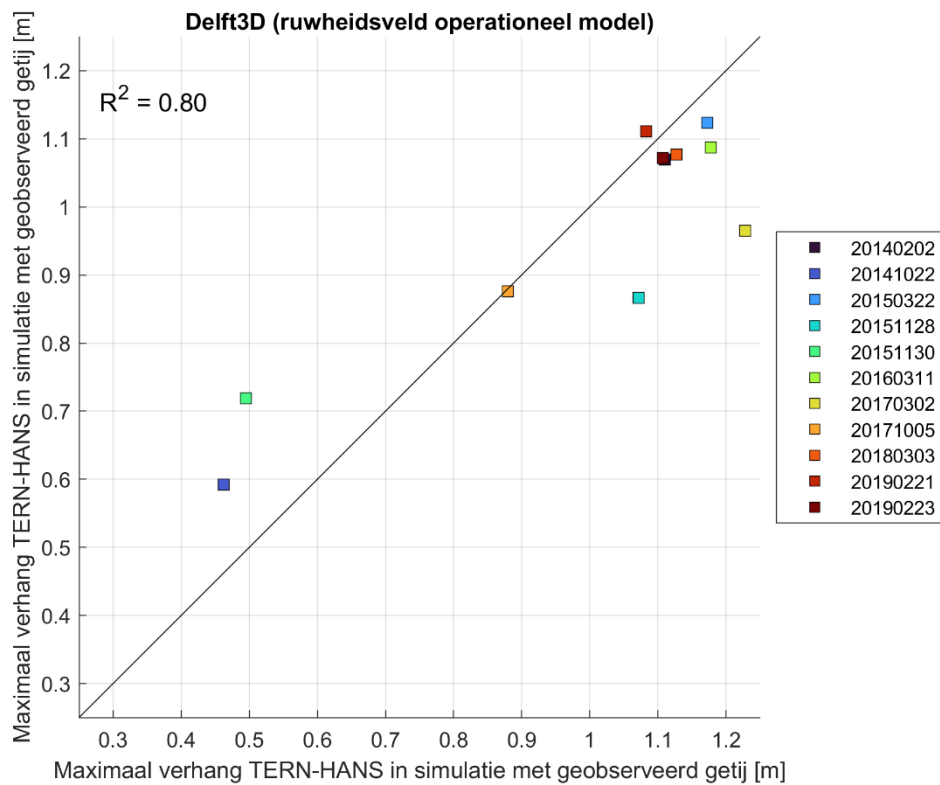
kennen namelijk een gelijkaardige sterkte van de dwarsstroming bij de Platen van Ossensisse. De maximale stijgsnelheid bij Hansweert, die tot op heden wordt gezien als de belangrijkste indicator voor de sterkte van de dwarsstroming, is voor deze getijden wel gelijkaardig. Enkel voor het getij van 28/11/2015 is de dwarsstroming veel sterker bij gebruik van geobserveerde waterstandreeksen aan afwaartse rand. Dit getij heeft bij een geobserveerde randvoorwaarde ook een hoger hoogwater dan bij een astronomisch getij aan de rand. Het getij van 28/11/2015 vormt daarmee een uitzondering. Overigens heeft de gemodelleerde stijgsnelheid in Hansweert een hogere voorspellende waarde voor de gemodelleerde dwarsstroming in simulaties die worden aangedreven met een astronomisch getij ($R^2 = 0,71-0,86$). Dit kan betekenen dat de voorspellende waarde van de stijgsnelheid voor de sterkte van de dwarsstroming afneemt bij stormtijden.



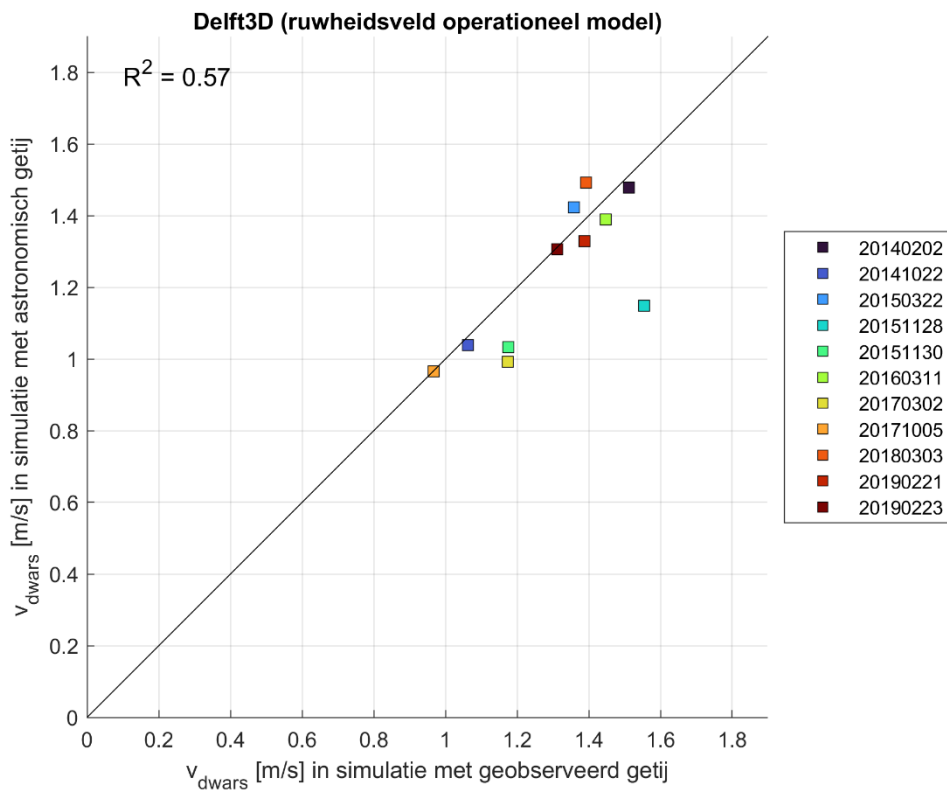
Figuur 41 – Verschil in hoogwater te Hansweert tussen simulaties geforceerd met astronomisch en geobserveerd getij.



Figuur 42 – Verschil in stijgsnelheid te Hansweert tussen simulaties geforceerd met astronomisch en geobserveerd getij.



Figuur 43 – Verschil in maximaal verhang tussen Terneuzen en Hansweert voor simulaties geforceerd met astronomisch en geobserveerd getij.



Figuur 44 – Verschil in maximale dwarsstroming tussen simulaties geforceerd met astronomisch en geobserveerd getij.

7 Conclusies en aanbevelingen

In deze studie is de modelprestatie van het Delft3D-NeVla model onderzocht voor de representatie van dwarsstromingen als gevolg van neervorming aan de oostzijde van de Platen van Ossenis. Hiervoor is het numeriek model NeVla in verschillende versies (i.e., Simona/Waqua en Delft3D) en met verschillende eerder gekalibreerde ruwheidsvelden getest.

Representatie dwarsstroming

In alle configuraties is het model in staat de neervorming en bijbehorende circulaire stromingspatronen rond de Platen van Ossenis te representeren. De modelresultaten in Simona/Waqua en de Delft3D simulatie met eenzelfde ruwheidsveld zijn zeer gelijkaardig. Kwantitatief bestaan er echter grote verschillen tussen de maximum dwarsstromingen in de simulaties en in de meetcampagnes. De sterke dwarsstromingen tijdens springtij worden onderschat door de modelsimulaties, waarbij de afwijking het grootst is voor de getijden met de hoogste dwarsstromingen. De hoogste correlatie voor het representeren van de dwarsstroming wordt behaald met simulaties waarin het ruwheidsveld uit het operationeel model is gebruikt ($R^2 = 0,56-0,75$ voor Simona/Waqua en Delft3D). De variatie in sterkte van de dwarsstroming tussen de verschillende getijden is minder groot in de modellen dan tijdens de meetcampagnes werd geobserveerd. Uit een springtij-doodtij-simulatie blijkt dat in de modellen weldegelijk sprake is van een springtij-doodtij variatie in sterkte van de dwarsstroming. Enkel de hoogste dwarsstromingen (bij springtij) van $>1,5$ m/s worden niet als zodanig door het model gereproduceerd.

Ook de locatie van de neer bij de passage van de groene boeienlijn is meer constant in de modelruns dan in realiteit. De locatie van de neer is volgens eerder modelonderzoek overigens zeer gevoelig voor morfologische wijzigingen. Uit scenario-onderzoek door Stark *et al.* (2020) bleek dat morfologische veranderingen op de Platen van Ossenis invloed hebben op de exacte ligging van de neer en daarmee ook op de intensiteit van de dwarsstroming in de vaargeul. Een relatief kleine verplaatsing in de ligging van de neer kan zo een grote invloed hebben op de gemodelleerde dwarsstroming langs de groen boeienlijn.

Bovenstaande conclusies zijn gebaseerd op de huidige modelvalidatie voor een selectie springtij en een enkel doodtij. De modelprestatie voor het reproduceren van de springtij-doodtij-variantie in sterkte van de dwarsstroming kon niet worden gevalideerd. Hiervoor zijn meer metingen bij reguliere tijcondities nodig.

Representatie getijparameters Hansweert

Aangezien het verticaal getij in Hansweert een voorspellende waarde kan hebben voor de dwarsstroming is ook de representatie van enkele tijparameters in het NeVla model onderzocht. Hieruit blijkt een consequente onderschatting van de hoogwaters in Hansweert, zoals eerder al door Chu *et al.* (2016) werd geconstateerd.

De maximum stijgsnelheid in Hansweert, die volgens eerder onderzoek de hoogste voorspellende waarde heeft voor de sterkte van de dwarsstroming, wordt goed gerepresenteerd voor gemiddelde getijcondities. Voor hogere getijden met een geobserveerde stijgsnelheid van $>4,0$ cm/min wordt de maximum stijgsnelheid in Hansweert echter onderschat. Dit zijn over het algemeen juist de getijden die sterke dwarsstromingen van $>1,5$ m/s veroorzaken. Op basis van de springtij-doodtij-simulaties wordt wel een correlatie gevonden tussen de gesimuleerde stijgsnelheid in Hansweert en de gesimuleerde sterkte van de neer en dwarsstroming. Deze correlatie is voor de runs met het ruwheidsveld uit het operationeel model veel sterker dan de correlatie die wordt gevonden voor de dataset met meetcampagnes die nagenoeg alleen hoge springtij bevatten (i.e., $R^2 = 0,83-0,88$ om $R^2 = 0,58$). Een verklaring voor dit verschil is dat stijgsnelheden boven de 4 cm/min nauwelijks voorspellende waarde meer hebben voor de sterkte van de dwarsstroming.

Het maximum verhang tussen Terneuzen en Hansweert wordt voor diezelfde hogere getijden juist overschat in de modelsimulaties. Dit suggereert dat de voortplantingssnelheid van het getij rondom Hansweert in de

modellen niet hoog genoeg is. Er wordt tot slot opgemerkt dat een deel van de fysica die verantwoordelijk is voor de neervorming en dwarsstromingen niet wordt bepaald door deze verklarende parameters zoals de stijgsnelheid te Hansweert.

Een set van simulaties die worden aangedreven met een astronomisch getij in plaats van geobserveerde waterstandsreeksen illustreert dat getijden met stormopzet weliswaar worden gekenmerkt door hoge hoogwaters, maar ook door relatief lage stijgsnelheden en dientengevolge ook lagere dwarsstromingen. Bovenstaande bevinding is van belang voor de implementatie in operationele context. De harmonische component van de getijvoortplanting wordt in de operationele modellen namelijk typisch beter gerepresenteerd dan de stormopzet of *surge component*.

7.1 Aanbevelingen

Hoewel de gemodelleerde dwarsstroming in het operationeel model slechts een geringe voorspellende waarde heeft voor de gemeten sterkte van de dwarsstroming bij hoge springtijden (zie: §6.2.1) dient deze voorspellende waarde wel vergeleken te worden met de kwaliteit van de huidige voorspel-tools, zoals de waarschuwingen op basis van de astro-voorspelling. De (zwakke) correlatie voor de sterkte van de dwarsstroming zou immers nog beter kunnen zijn dan de correlatie bij het gebruik van proxy's op basis van het verticaal getij (i.e., verhang tussen Ternuezen en Hansweert).

Indien wordt verdergegaan met het onderzoek rond de inzetbaarheid van het operationele model, dient de kwaliteit van het operationeel model verder onderzocht te worden voor een geneste versie van het model. Er valt immers kwaliteitsverlies te verwachten door nesting in de operationele modeltrein DCSM-ZUNO (inclusief meteo) ten opzichte van een modelconfiguratie met randvoorwaarden op basis van geobserveerde waterstanden bij de monding van het estuarium (zoals in deze studie).

De stijgsnelheid in Hansweert wordt voor alle hogere getijden onderschat. Aangezien deze parameter gecorreleerd is aan de sterkte van de dwarsstroming bij de Platen van Ossensisse wordt aanbevolen om bij een volgende modelupdate van NeVla (of een volgend voorspelmodel) de stijgsnelheid in Hansweert mee te nemen in de kalibratie. Een betere representatie van de getijvoortplanting rondom de Platen van Ossensisse lijkt immers essentieel voor een betere representatie van de neer en dwarsstroming. Aanvullend op de stijgsnelheid in Hansweert kan ook het maximum verval tussen Terneuzen en Hansweert deel uitmaken van een volgende modelkalibratie. Beide waterstandsparameters zijn afhankelijk van een geoptimaliseerde representatie van de getijvoortplanting tussen Terneuzen en Hansweert.

Naast het verbeteren van de modelkwaliteit dient ook nog onderzoek te worden gedaan naar de invloed van variabele meteo-condities (opzet/afwaai) op de stijgsnelheid in Hansweert en daarmee op de sterkte van de dwarsstroming. Momenteel is hierover nog weinig bekend.

Een laatste aanbeveling is om tot een gedegen onderbouwing van de waarschuwingsgrenzen voor matige / sterke dwarsstroming te komen. Uit eerder onderzoek en de huidige validatieoefening blijkt dat de voorspelde dwarsstroming een gradueel verloop kent over de springtij-doodtij-cyclus. In het kader van vervolgonderzoek en systeembegrip wordt aanbevolen om meer meetcampagnes uit te voeren bij reguliere tij-condities om deze springtij-doodtij variatie in kaart te brengen.

Het toekennen van grenswaarden aan de sterkte van de dwarsstroming is essentieel voor het inzetten van het operationeel model als waarschuwingstool voor de dwarsstroming. Het is daarbij belangrijk om de sterkte van de dwarsstroming te relateren aan de nautische moeilijkheid. Hiervoor zouden vaarsimulaties kunnen plaatsvinden (auto-pilot of verschillende loodsen om het subjectieve karakter te beperken) voor verschillende stromingscondities en waarbij het vereiste roer-schroef-gebruik op het vaartraject wordt geregistreerd. Op basis hiervan kan een onderbouwing plaatsvinden van de waarschuwingsgrenzen.

8 Referenties

Chu, K.; Buitrago, S.; Depreiter, D.; Deschamps, M. (2016). Ondersteuning en verbetering operationeel voorspellingscluster VSSKS - Uitbreiding van het operationeel 2D Nevla model met GOG en GGG functionaliteit. Versie 1.0. *WL Rapporten*, 13_133_1. Waterbouwkundig Laboratorium/IMDC: Antwerpen

Decrop, B.; De Clercq, B.; Vanlede, J.; Van Holland, G.; Ides, S.; Plancke, Y.; De Mulder, T.; Mostaert, F. (2009). *WL Rapporten*, 753_07. Waterbouwkundig Laboratorium en IMDC rapport nr. I/RA/11313/09.009/BDC, Antwerpen, België

Decrop, B.; Vanlede, J.; De Clercq, B.; Sas, M. (2010). Eddy-induced cross currents in the Westerschelde estuary: numerical simulation, physical driving mechanisms and navigation assistance. *Bull. Perm. Int. Assoc. Navig. Congr.* 138: 29–44

Deltares (2011). Delft3D-FLOW. Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. User Manual. Version 3.15.

Depreiter, D.; Jaspers, N.; Viaene, P.; Mostaert, F. (2012). Exploitatie VSSKS: Deelrapport 3 - Documentatie. Versie 2_0. *WL Rapporten*, 729_09c. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België en IMDC NV: Berchem, België.

Depreiter, D.; Jaspers, N.; Vanlede, J.; Deschamps, M.; Mostaert, F. (2013). Ondersteuning en verbetering voorspellingscluster: Deelrapport 1 - Inbouw van het 2D NEVLA model. Versie 2_0. *WL Rapporten*, 00_044. Waterbouwkundig Laboratorium & IMDC NV: Antwerpen, België.

Hartsuiker, G., van Banning, G. & Meersschout, Y. (2004). 2Dh NEVLA-Scheldemodel (SCALWEST 2000 met verbeterde Belgische roosterschematisatie). Bouw en afregeling stromingsmodel. *WL Rapport MOD 753*. Waterbouwkundig Laboratorium & ALKON : Antwerpen, België en Marknesse, Nederland.

IMDC; Deltares; Svasek; Arcadis. (2013). Mitigatie dwarsstroming Zuidergat. LTV V&T - rapport B-25

Maximova, T.; Ides, S.; De Mulder, T.; Mostaert, F. (2009a). LTV O&M thema Veiligheid - Deelproject 1: Verbetering hydrodynamisch NEVLA model ten behoeve van scenario-analyse. *WL Rapporten*, 756_05. Flanders Hydraulics Research & Deltares: Antwerp, Belgium.

Maximova, T.; Ides, S.; Vanlede, J.; De Mulder, T.; Mostaert, F. (2009b). Verbetering 2D randvoorwaardenmodel. Deelrapport 3: Kalibratie bovenlopen. *WL Rapporten*, 753_09. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België.

Maximova, T.; Ides, S.; De Mulder, T.; Mostaert, F. (2009c). Verbetering randvoorwaardenmodel. Deelrapport 4: Extra aanpassingen Zeeschelde. *WL Rapporten*, 753_09. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België.

Plancke, Y.; Stark, J.; Meire, D.; Schrijver, M. (2020). Complex flow patterns in the Scheldt estuary: field measurements and validation of a hydrodynamic model. *Journal of Hydraulic Engineering*. doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001737

Rijkswaterstaat Waterdienst & Deltares (2009a). Beschrijving Modelschematisatie simona-DCSM-1998-v5, Versie 2009-01.

Rijkswaterstaat Waterdienst & Deltares (2009b). Beschrijving Modelschematisatie simona-ZUNO-1999-v3, Versie 2009-01

Stark, J.; Vandenbruwaene, W.; De Maerschallck, B.; Plancke, Y.; Mostaert, F. (2019). Morfologie mesoschaal: Deelrapport 7 – Sedimentatie ter hoogte van drempels: validatie numeriek model. Versie 4.0. WL Rapporten, 14_024_7. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

Stark, J.; Smolders, S.; Plancke, Y.; Mostaert, F. (2020). Mitigatie dwarsstromingen Platen van Ossensisse: Deelrapport 1 – Scenario onderzoek. Versie 3.0. WL Rapporten, 19_030_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

Van Weerdenburg, R.; Van der Werf, J. (2019). Dwarsstroming in het Zuidergat, Westerschelde. Analyse op basis van metingen tussen 2005 en 2019. Deltares Rapport 11203725-000-ZKS-0009.

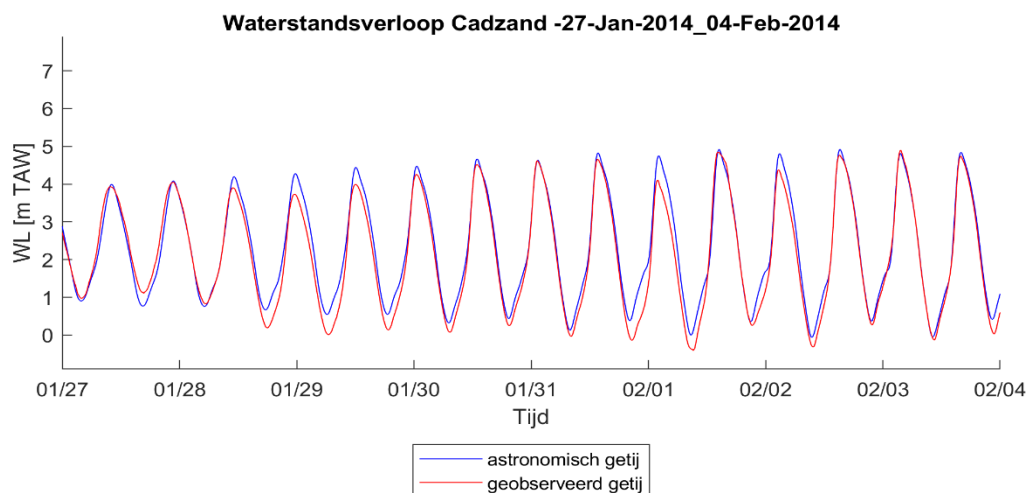
Vandenbruwaene, W.; Michielsen, S.; Hertoghs, R.; Boeckx, L.; Vereecken, H.; Deschamps, M.; Mostaert, F. (2020). Hydrologie bevaarbare waterlopen in Vlaanderen: Jaar 2019. Versie 4.0. *WL Rapporten*, PA026_3. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

Vanlede, J.; De Clercq, B.; Decrop, B.; Ides, S.; van Holland, G.; De Mulder, T.; Mostaert, F. (2009) Permanente verbetering modelinstrumentarium. Verbetering Randvoorwaardenmodel. Deelrapport 2: Afregeling van het 2D Scheldemodel. Waterbouwkundig Laboratorium en IMDC (I/RA/11313/09.012/BOB), Antwerpen, België.

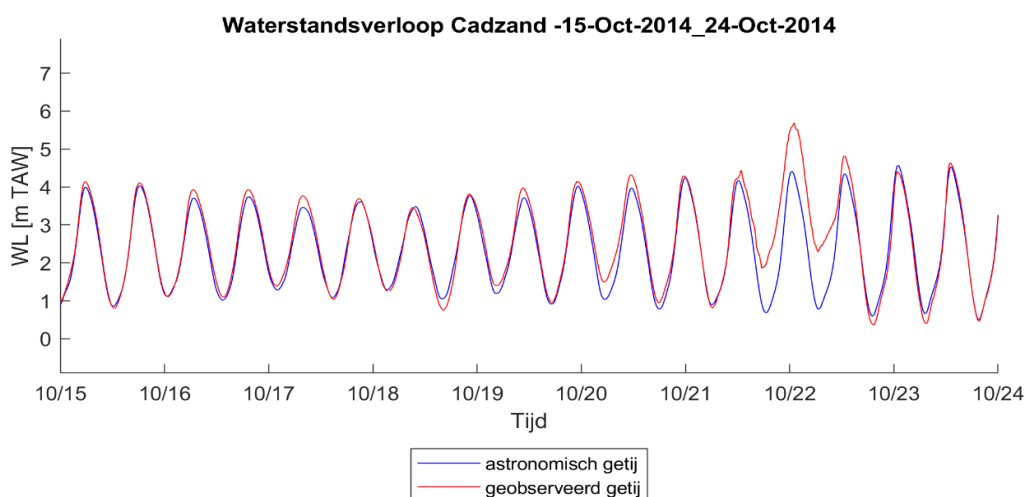
Vanlede, J.; Delecluyse, K.; Primo, B.; Verheyen, B.; Leyssen, G.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2015). Verbetering randvoorwaardenmodel: Subreport 7 - Calibration of NEVLA 3D. Version 4.0. WL Rapporten, 00_018. Flanders Hydraulics Research & IMDC: Antwerp, Belgium.

Vos, G.; Wouters, K.; Deleu, J.; Meire, D.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2017). Agenda voor de toekomst – Stroming en sedimenttransport op de mesoschaal in het Schelde-estuarium: Deelrapport 1. Data-analyse sedimentdynamica ter hoogte van drempels. WL Rapporten, Antea Group, Antwerpen.

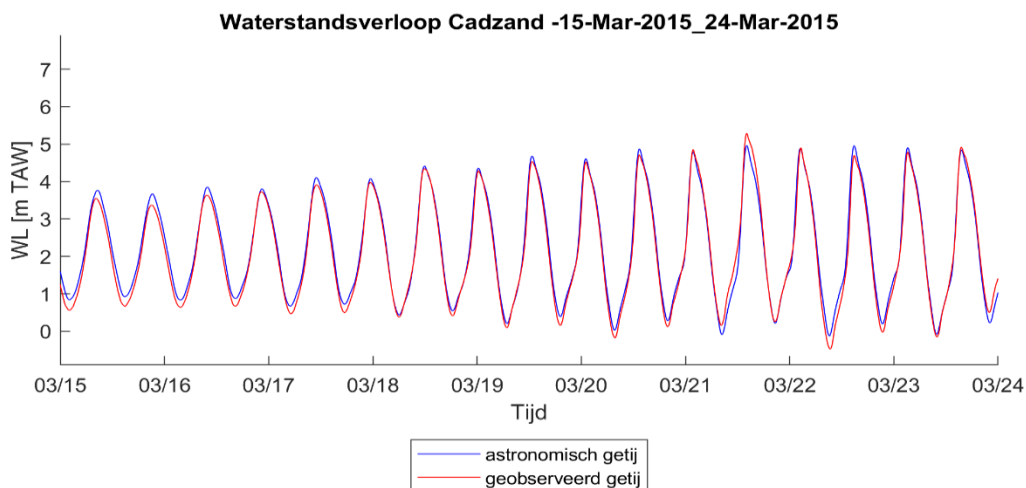
Bijlage A – Waterstandsreeksen afwaartse rand



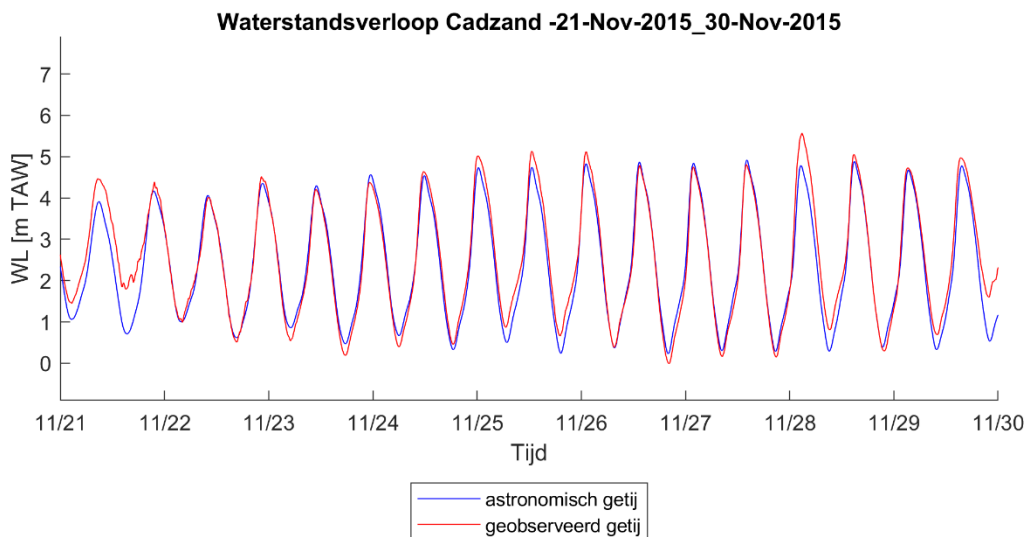
Figuur 45 – Waterstandreeksen afwaartse rand bij Cadzand voor meetcampagne 2/2/2014.



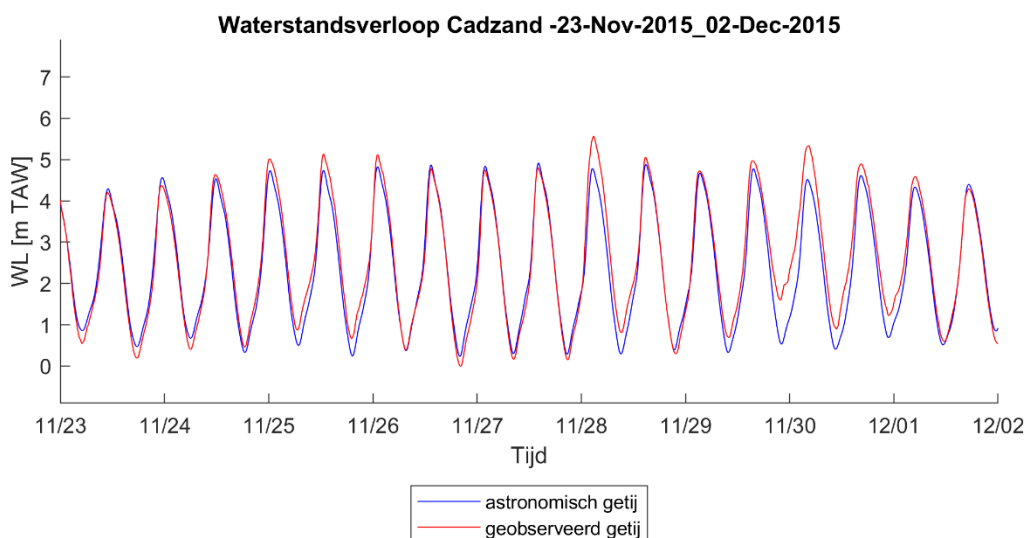
Figuur 46 – Waterstandreeksen afwaartse rand bij Cadzand voor meetcampagne 22/10/2014.



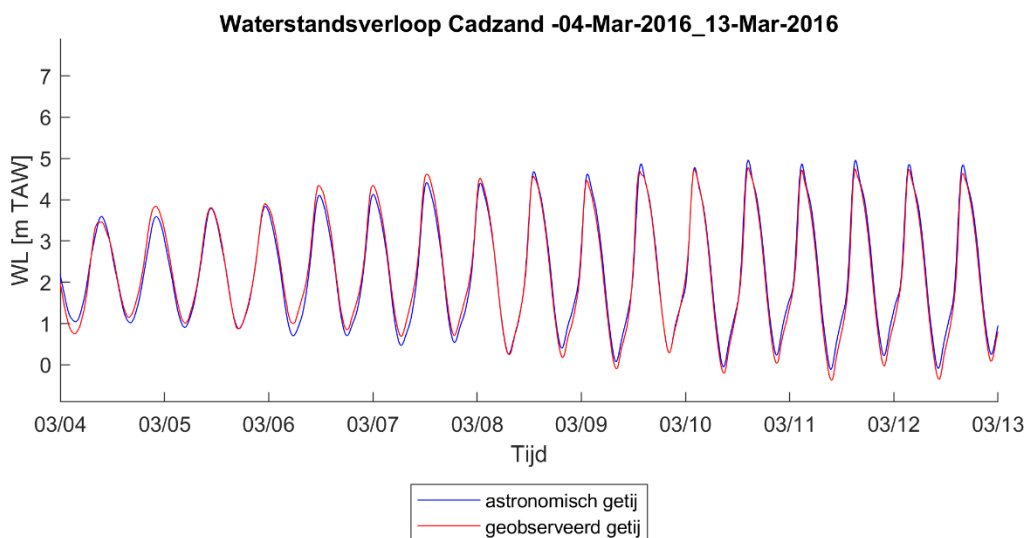
Figuur 47 – Waterstandreeksen afwaartse rand bij Cadzand voor meetcampagne 22/3/2015.



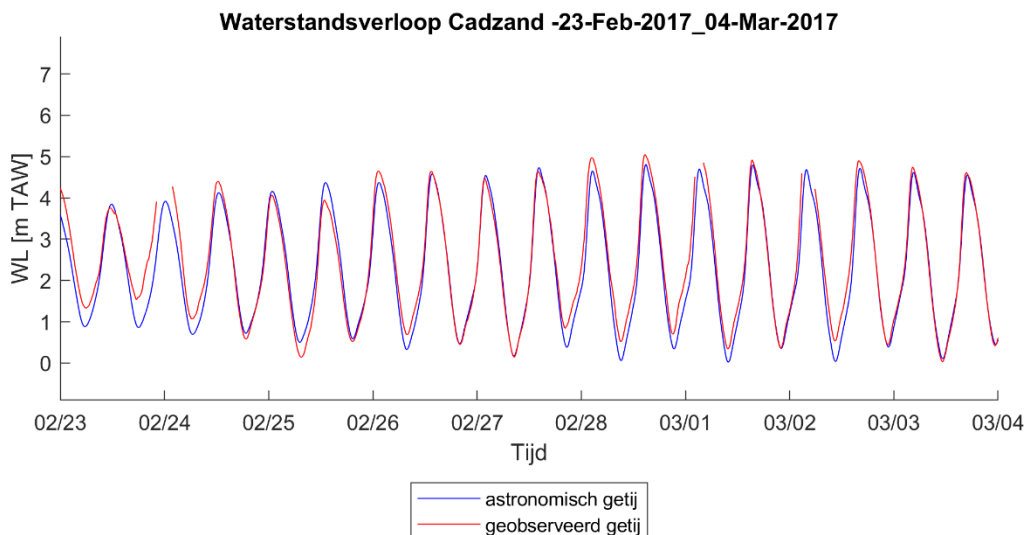
Figuur 48 – Waterstandreeksen afwaartse rand bij Cadzand voor meetcampagne 28/11/2015.



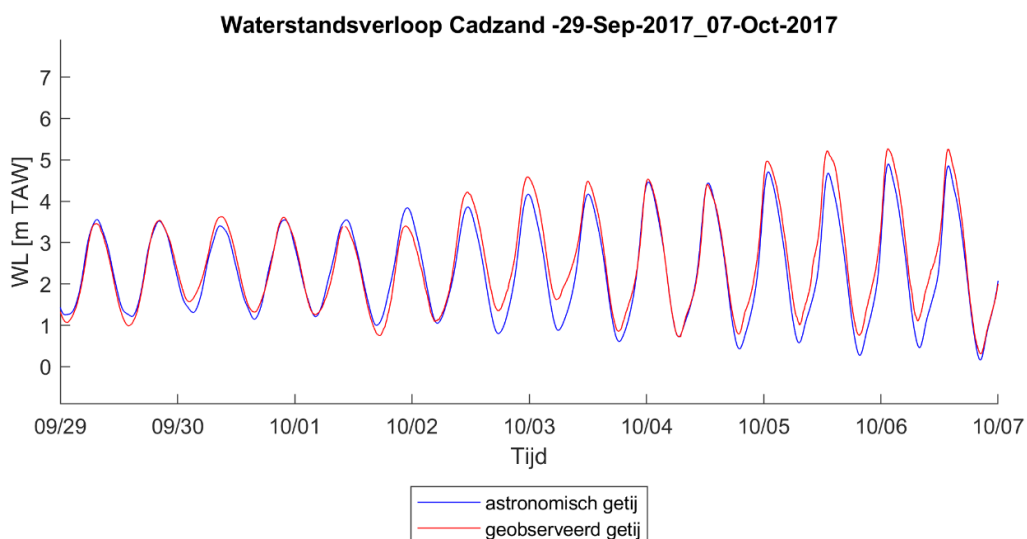
Figuur 49 – Waterstandreeksen afwaartse rand bij Cadzand voor meetcampagne 30/11/2015.



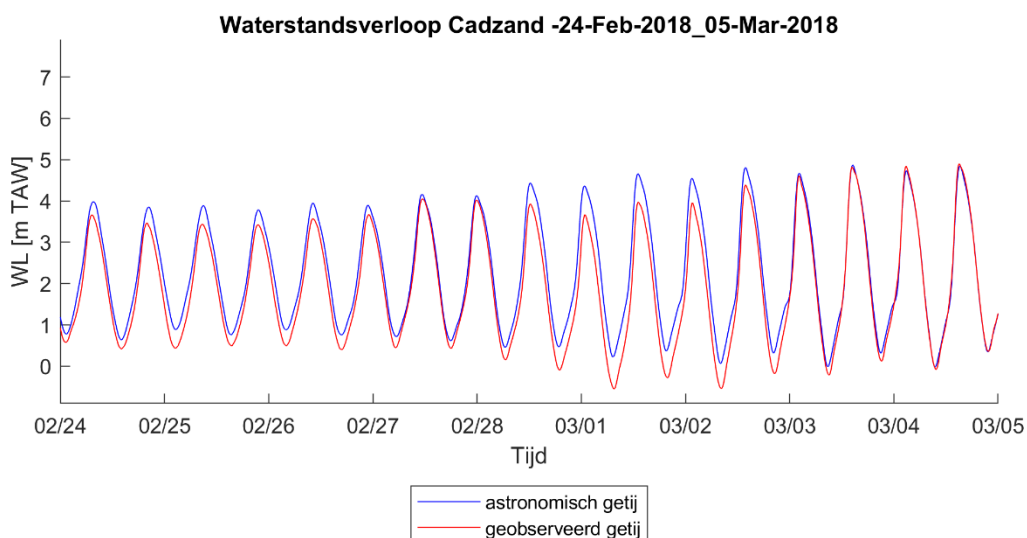
Figuur 50 – Waterstandreeksen afwaartse rand bij Cadzand voor meetcampagne 11/3/2016.



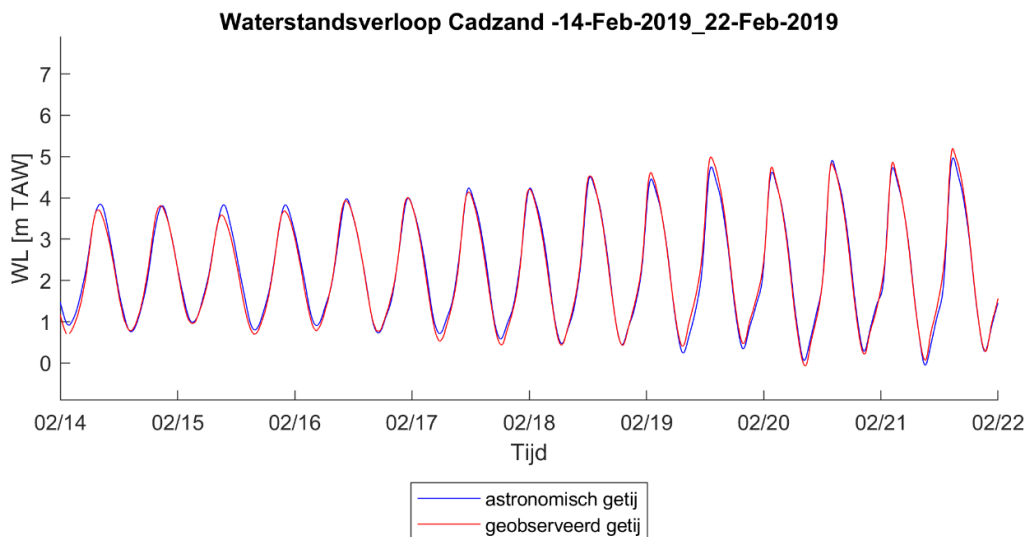
Figuur 51 – Waterstandreeksen afwaartse rand bij Cadzand voor meetcampagne 2/3/2017.



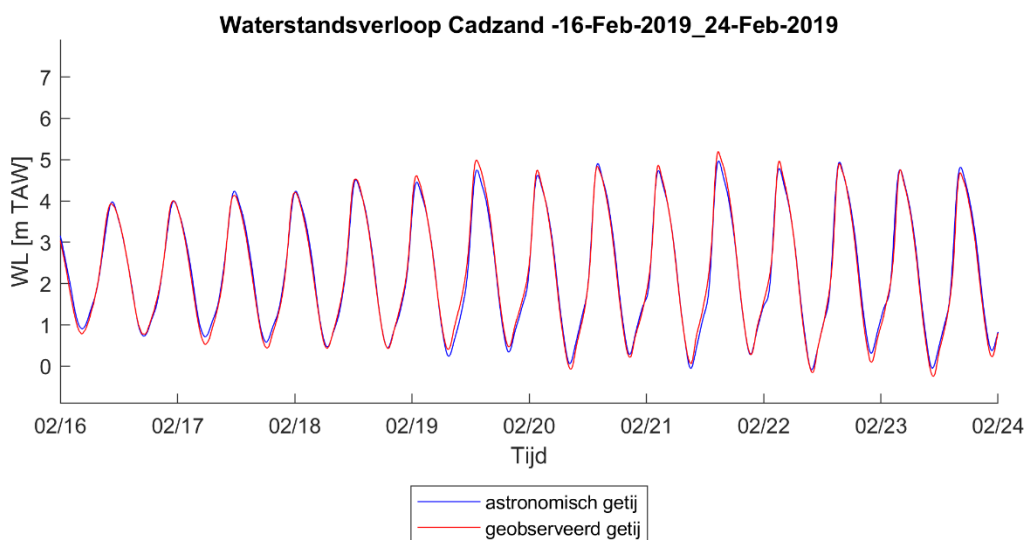
Figuur 52 – Waterstandreeksen afwaartse rand bij Cadzand voor meetcampagne 5/10/2017.



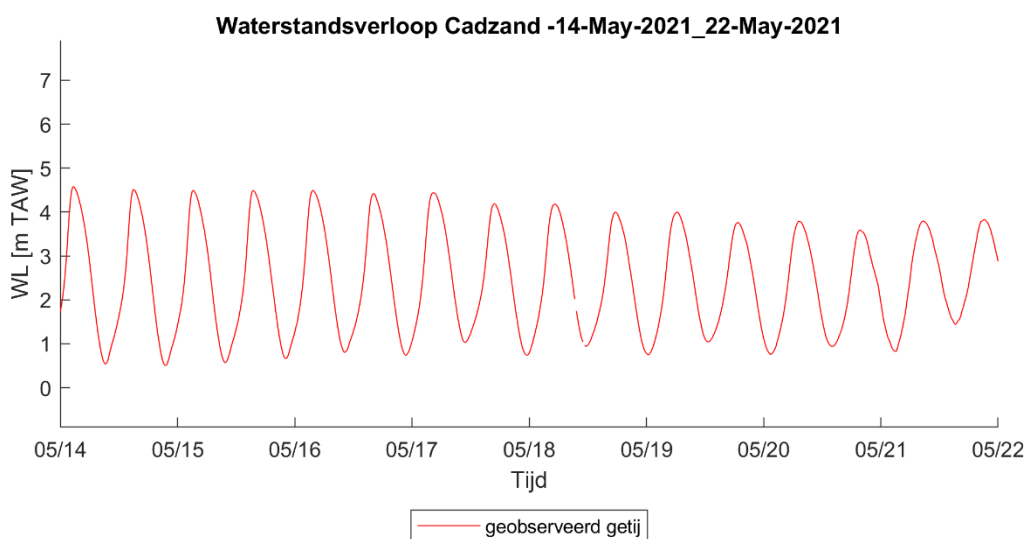
Figuur 53 – Waterstandreeksen afwaartse rand bij Cadzand voor meetcampagne 3/3/2018.



Figuur 54 – Waterstandreeksen afwaartse rand bij Cadzand voor meetcampagne 21/2/2019.

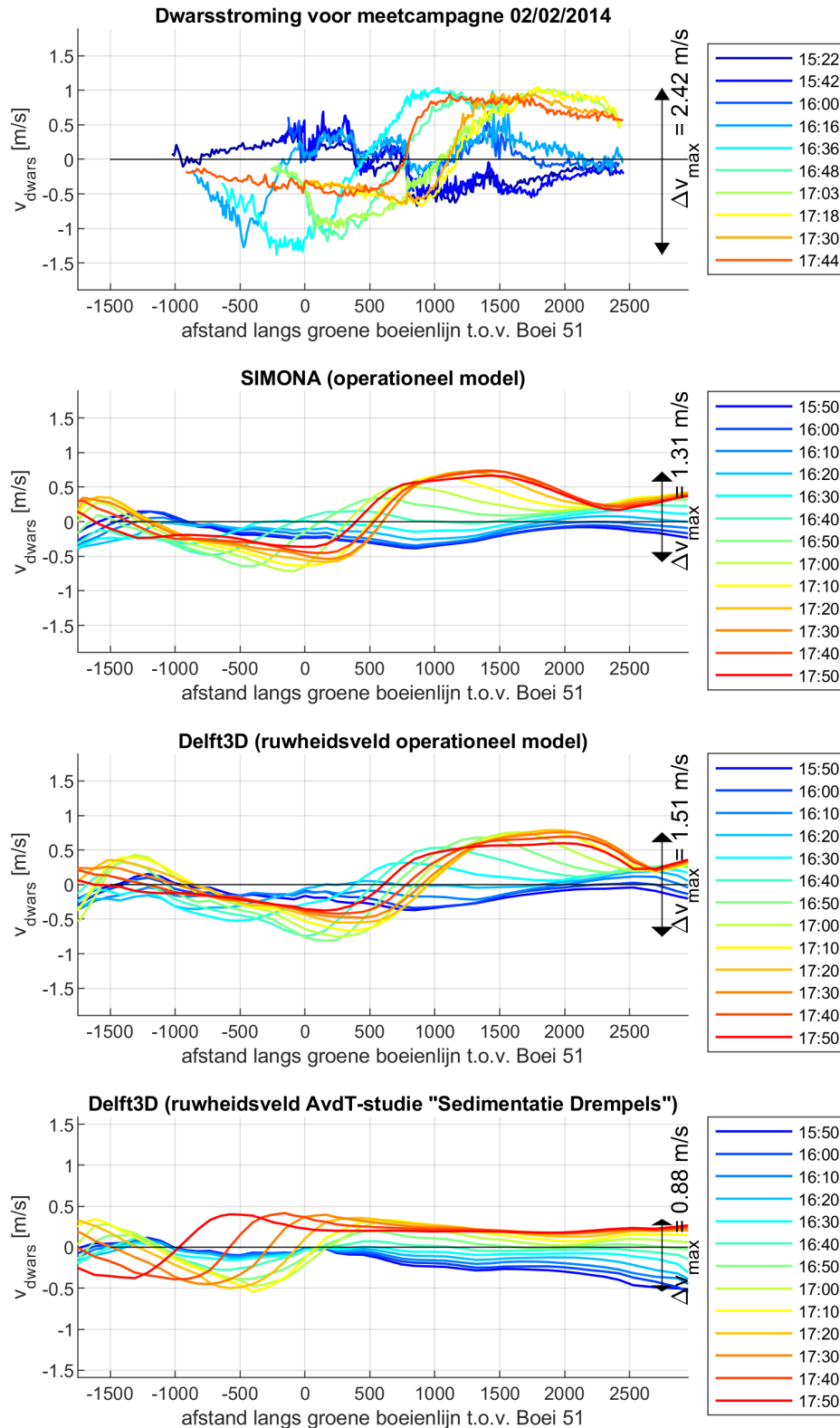


Figuur 55 – Waterstandreeksen afwaartse rand bij Cadzand voor meetcampagne 23/2/2019.

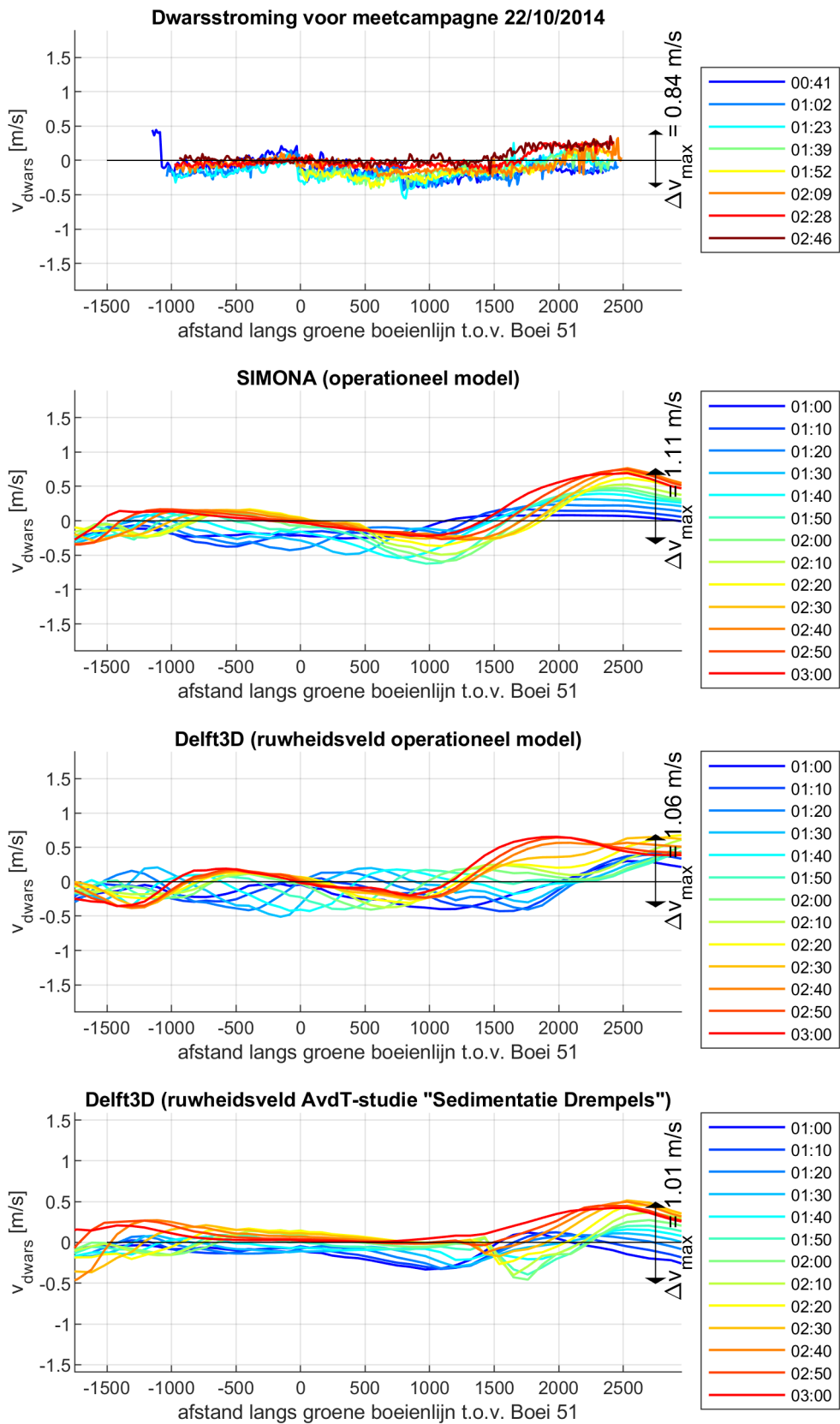


Figuur 56 – Waterstandreeks afwaartse rand bij Cadzand voor meetcampagne 21/5/2021.

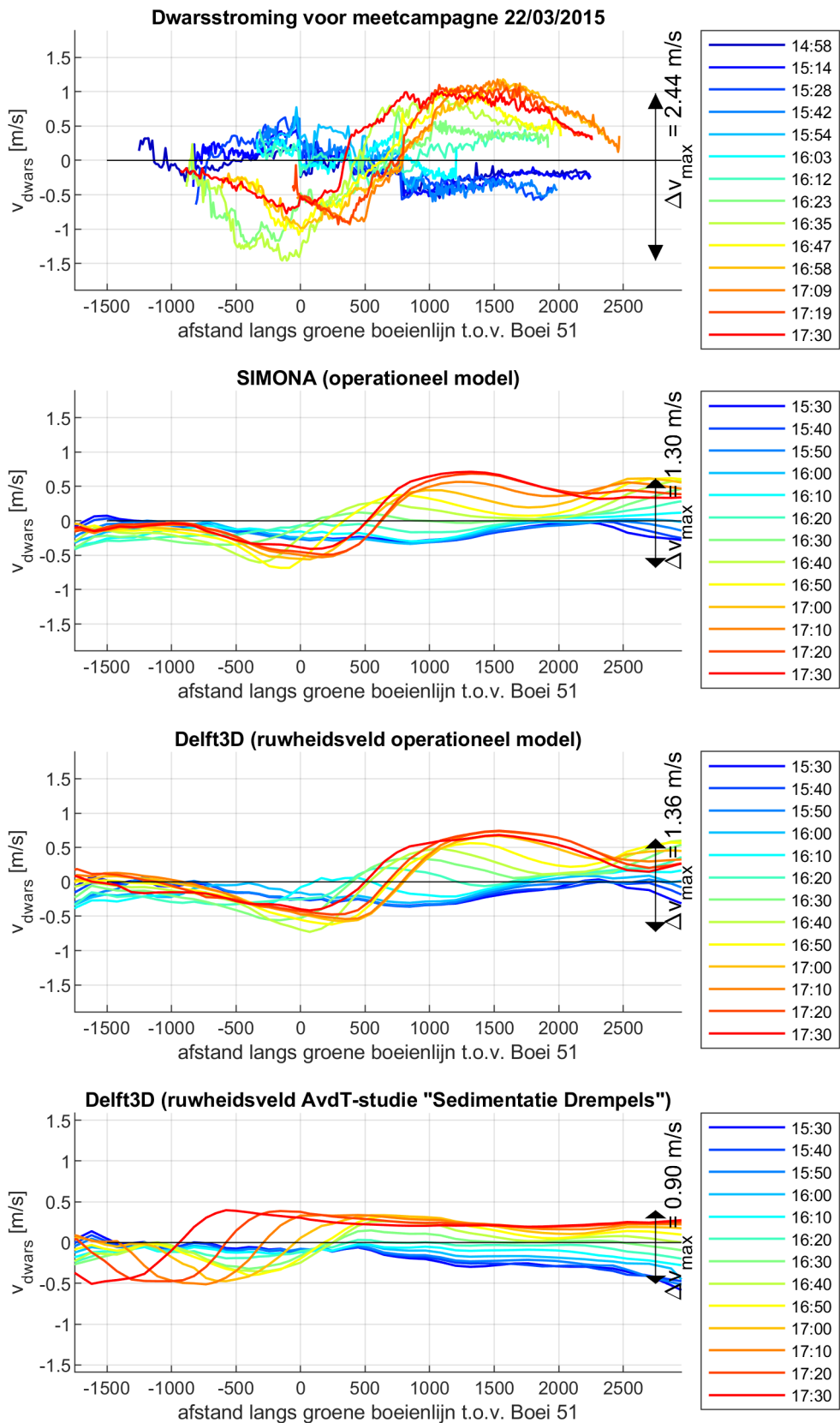
Bijlage B – Geobserveerde en gemodelleerde dwarsstroming



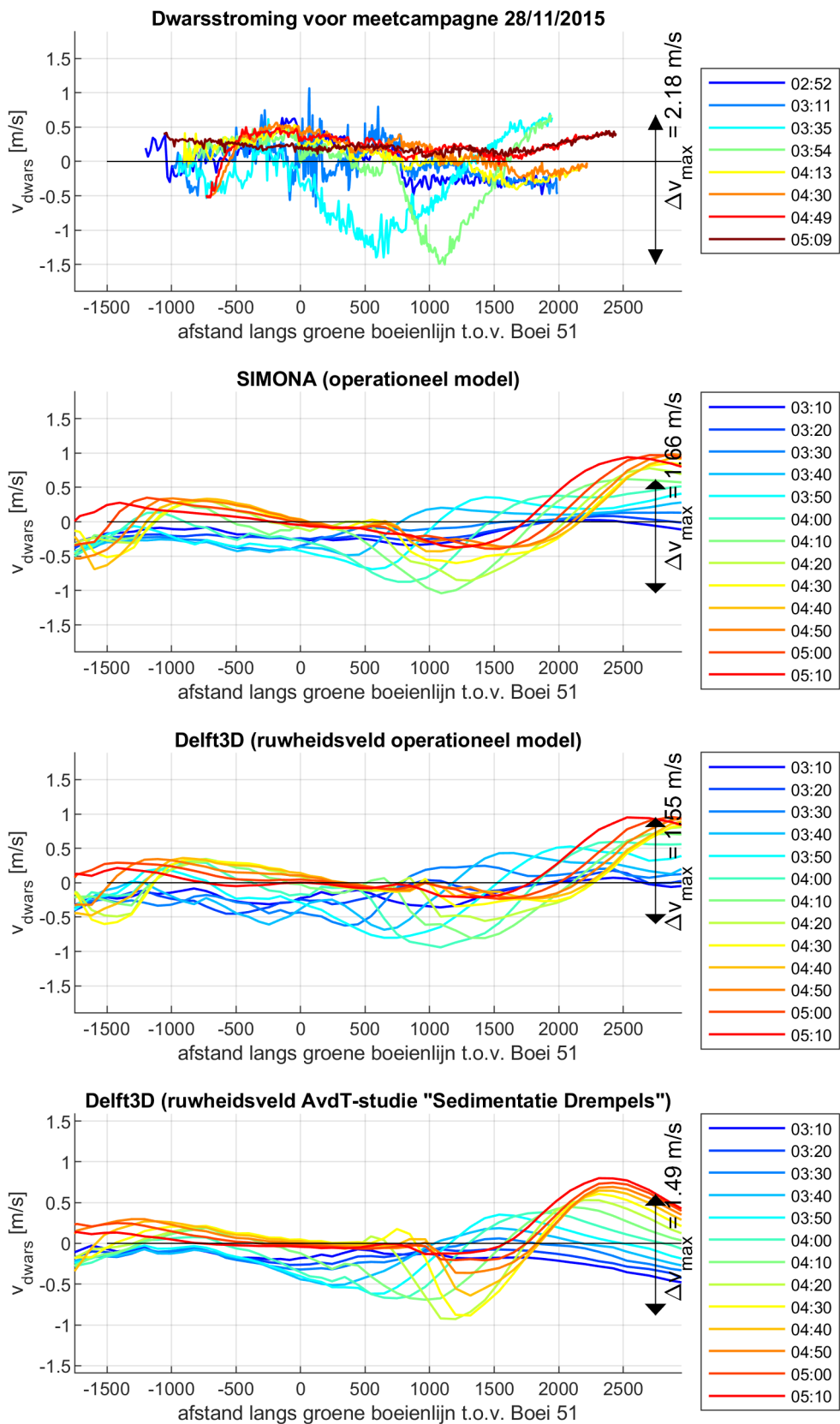
Figuur 57 – Gemeten en gemodelleerde dwarsstromingen voor getij van 02/02/2014.



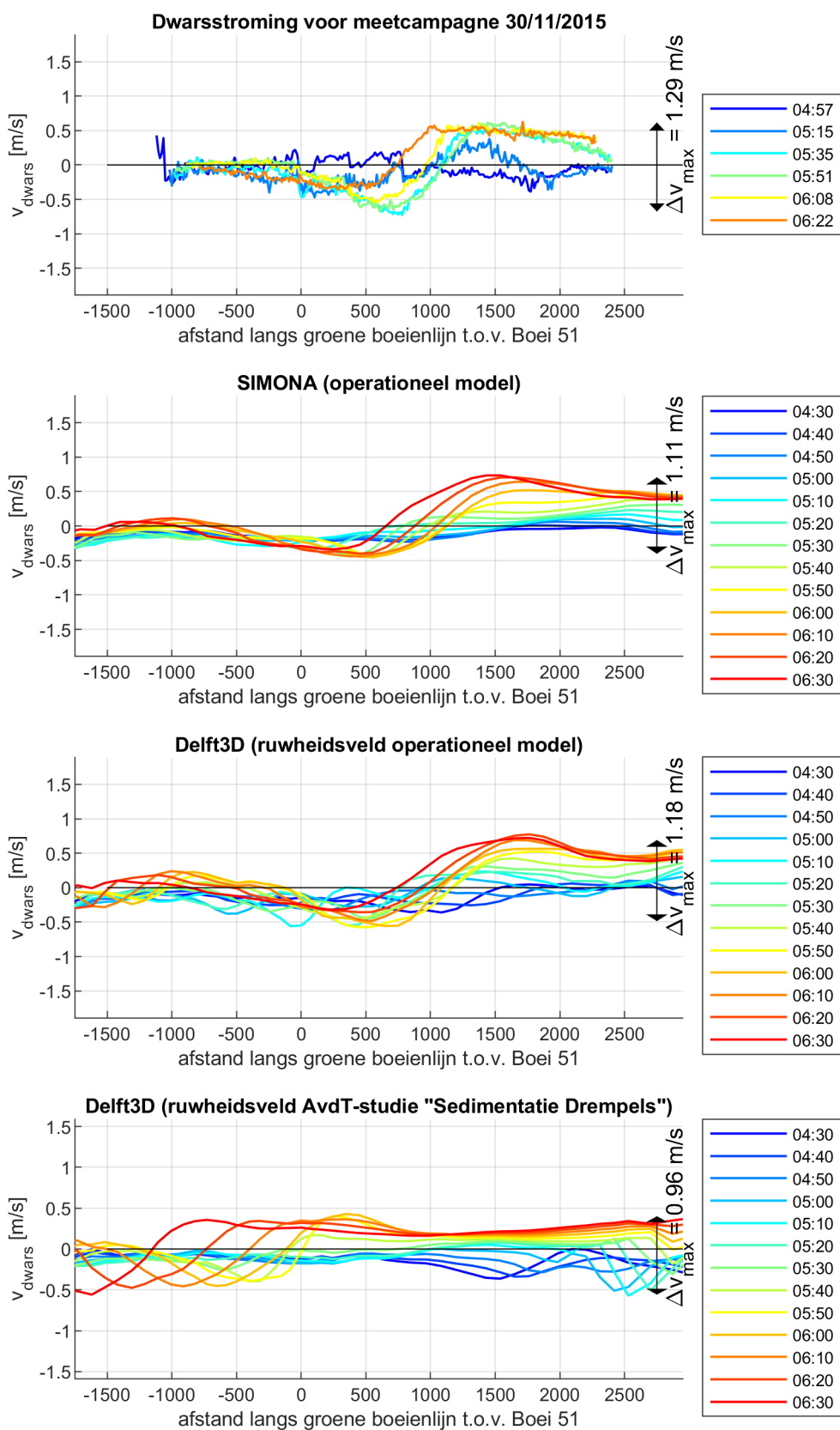
Figuur 58 – Gemeten en gemodelleerde dwarsstromingen voor getij van 22/10/2014.



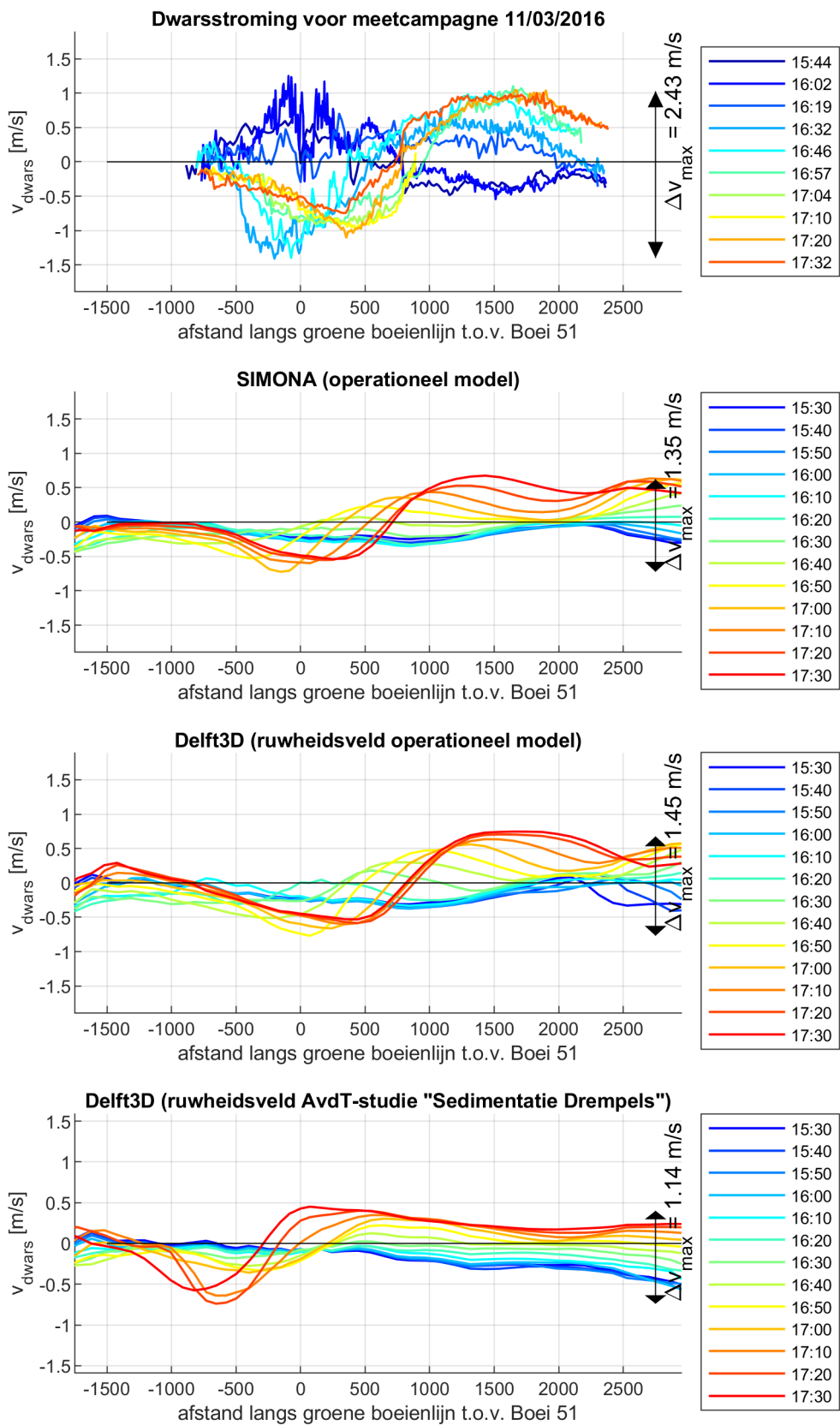
Figuur 59 – Gemeten en gemodelleerde dwarsstromingen voor getij van 22/03/2015.



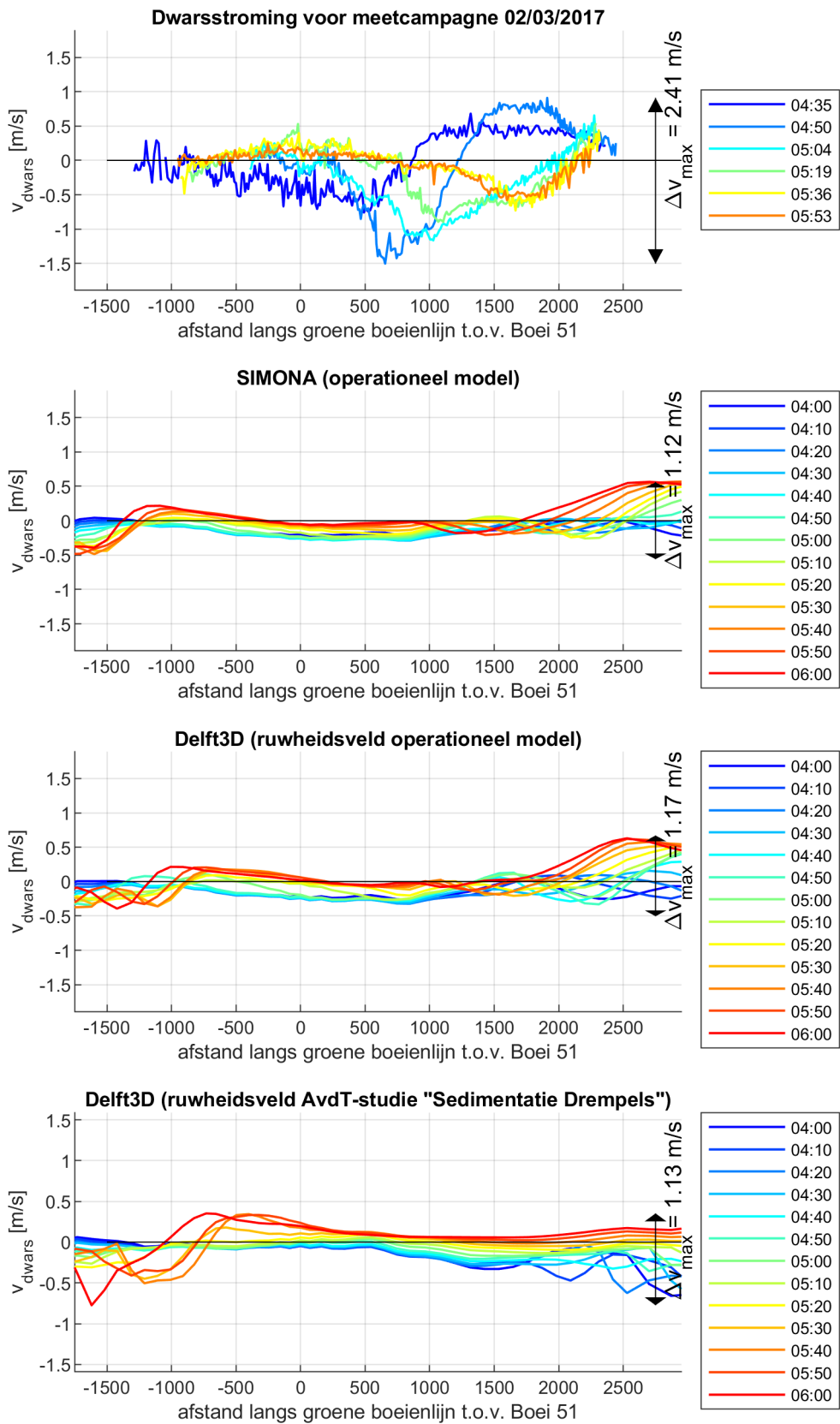
Figuur 60 – Gemeten en gemodelleerde dwarsstromingen voor getij van 28/11/2015.



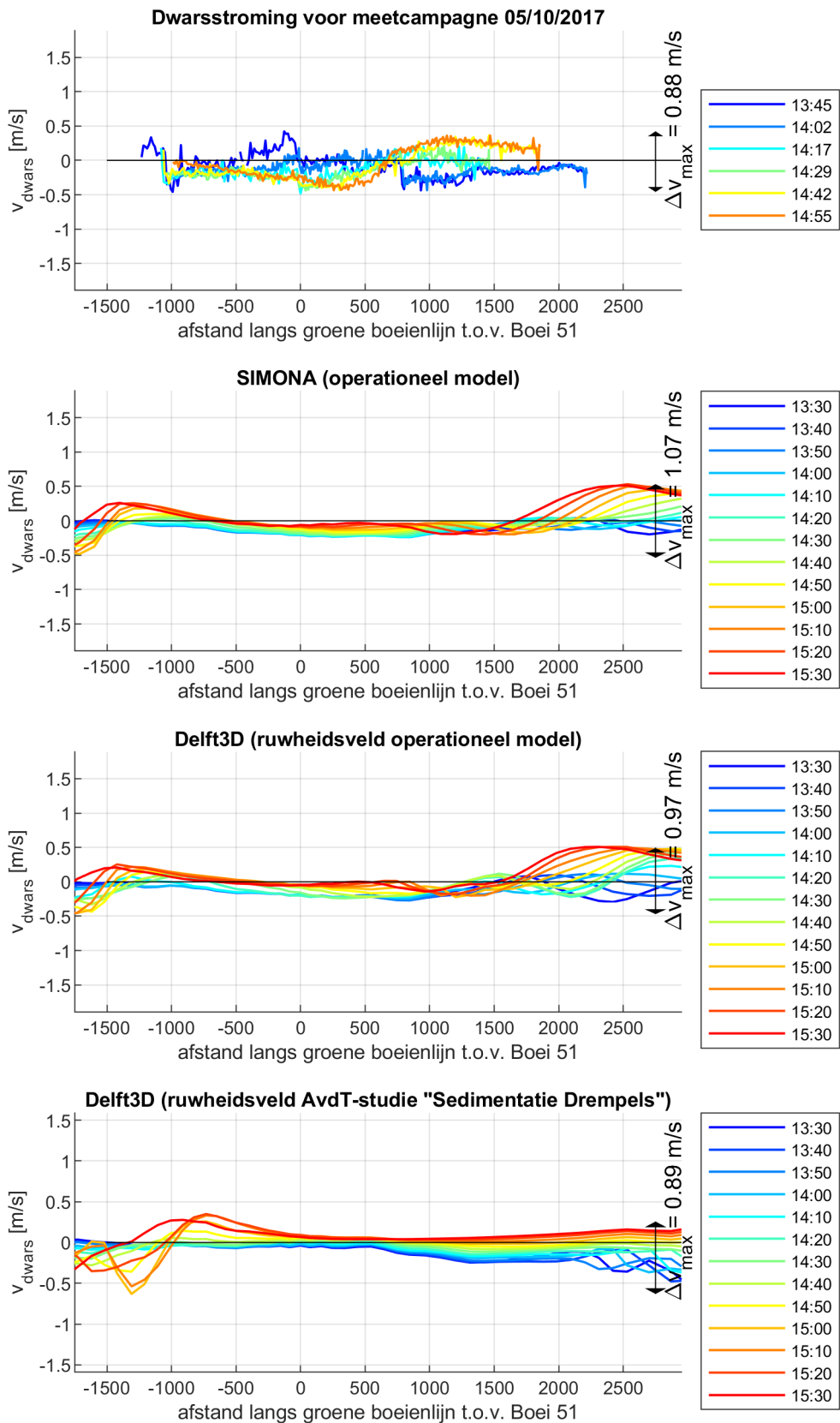
Figuur 61 – Gemeten en gemodelleerde dwarsstromingen voor getij van 30/11/2015.



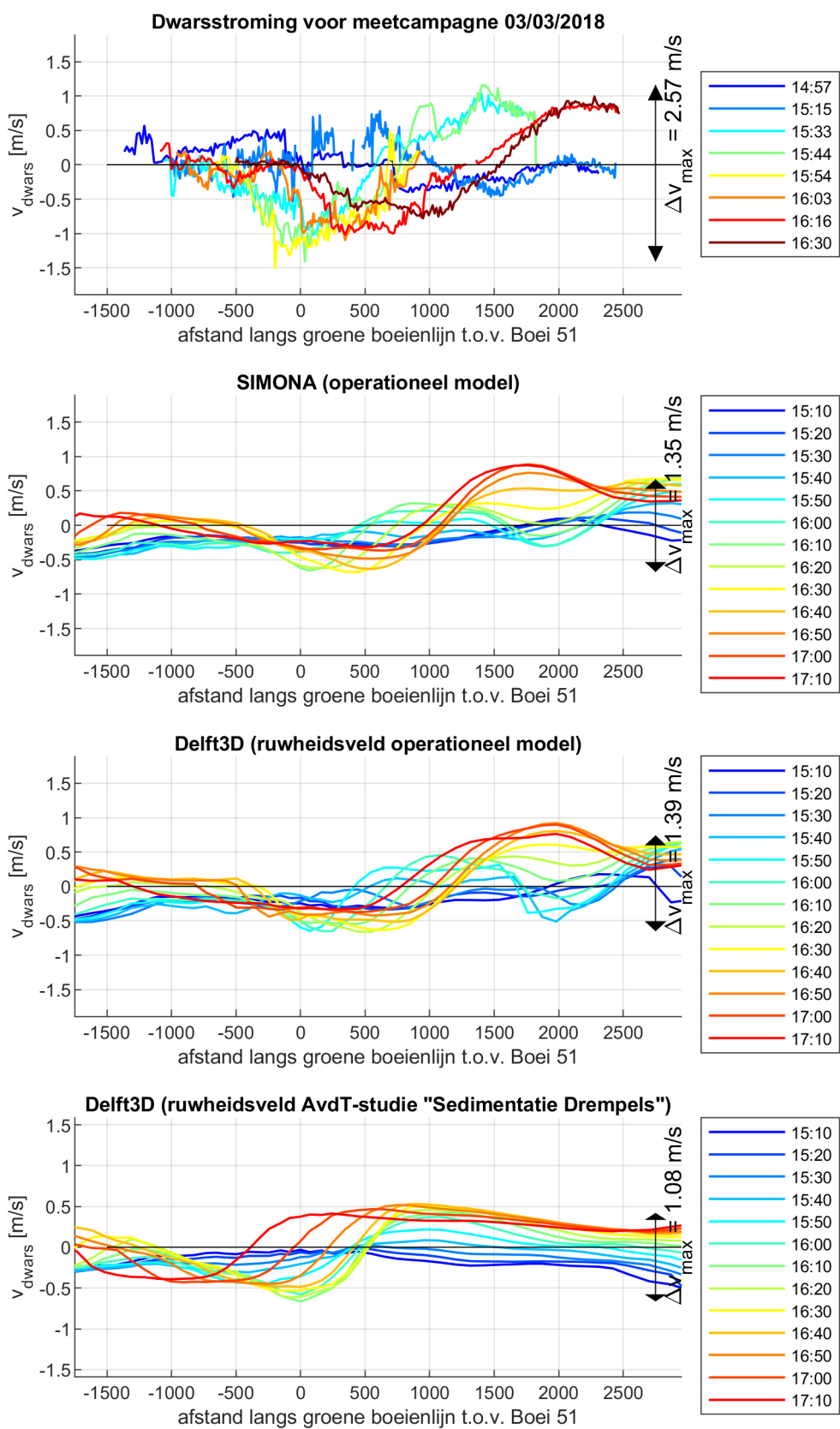
Figuur 62 – Gemeten en gemodelleerde dwarsstromingen voor getij van 11/03/2016.



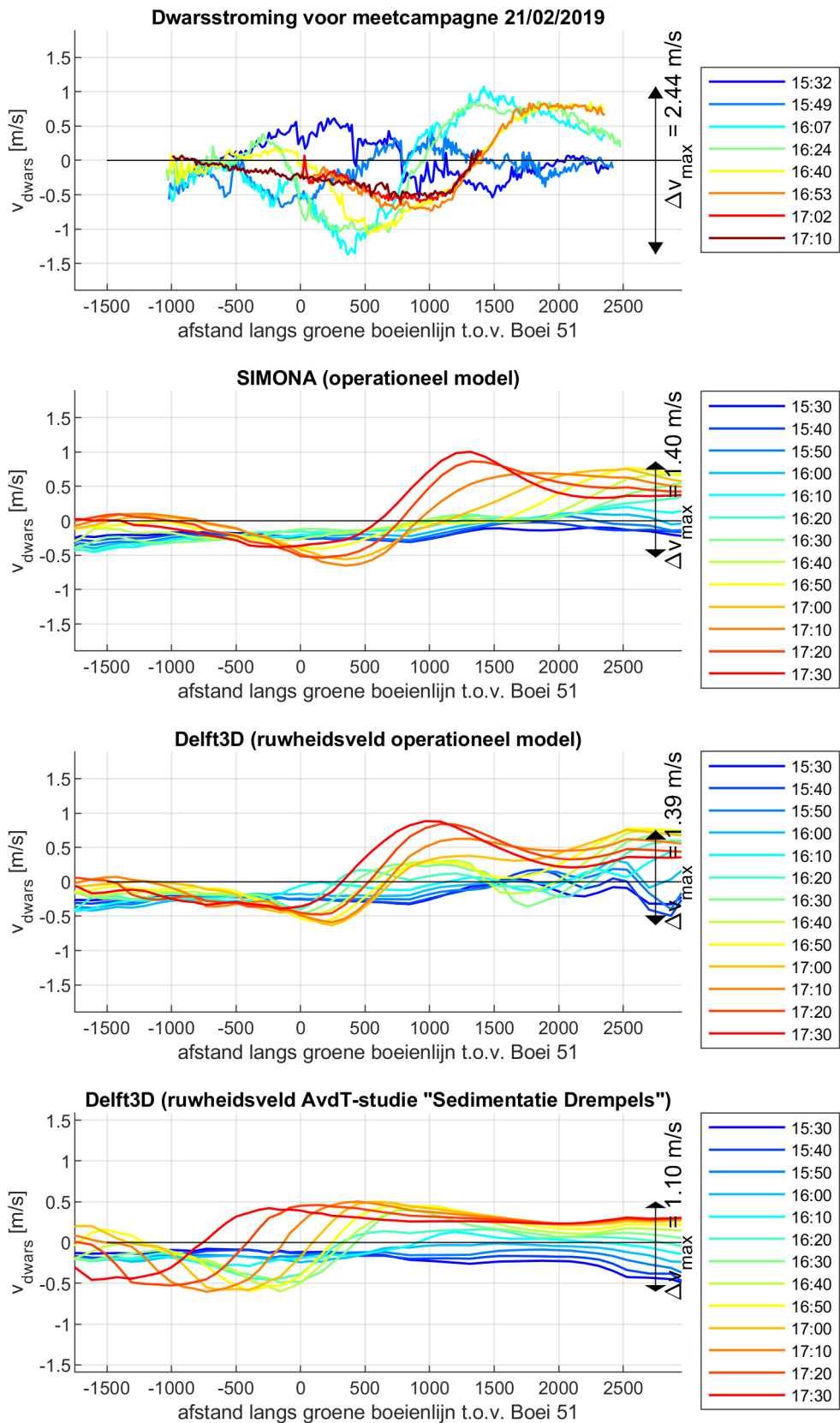
Figuur 63 – Gemeten en gemodelleerde dwarsstromingen voor getij van 02/03/2017.



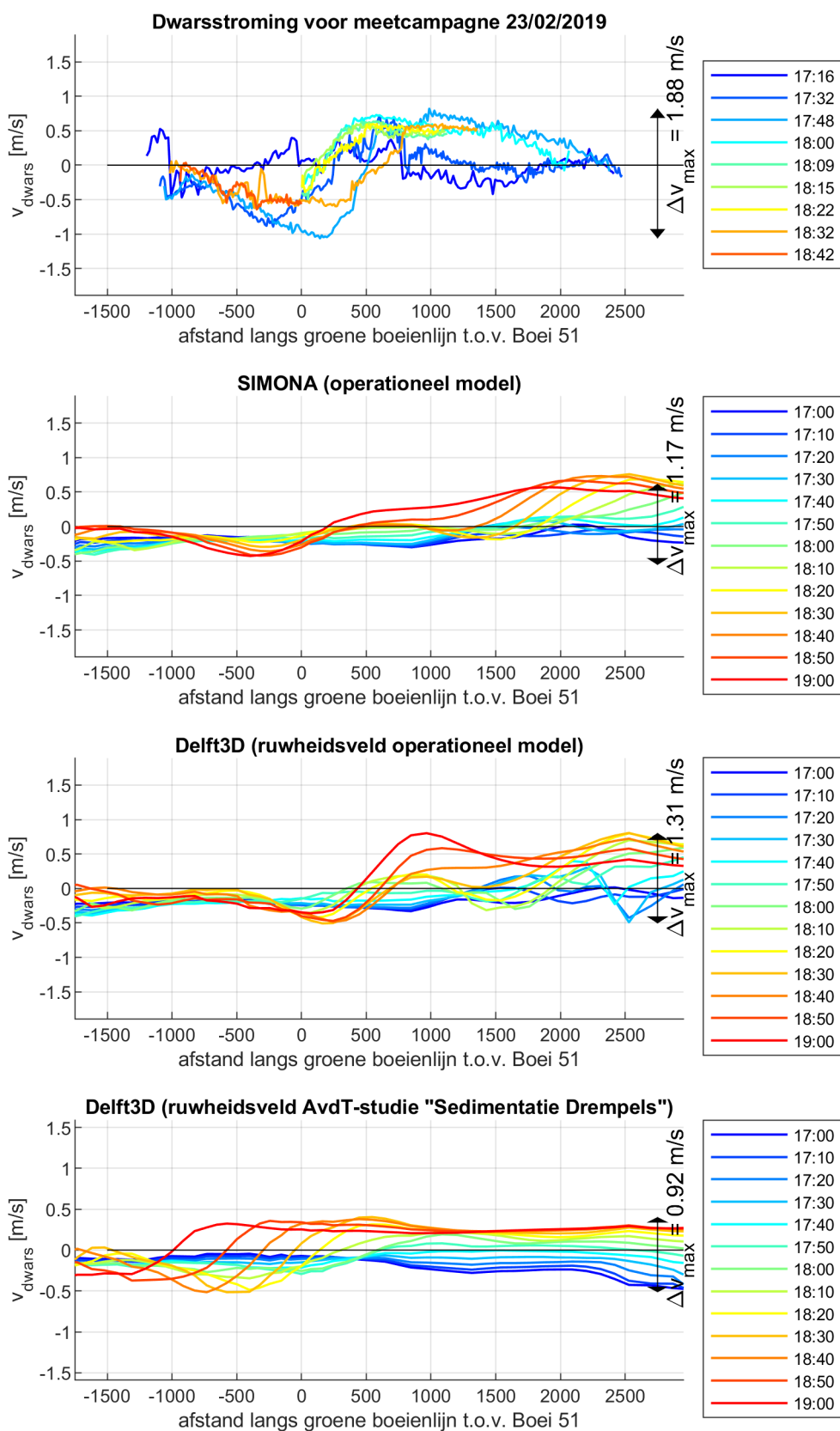
Figuur 64 – Gemeten en gemodelleerde dwarsstromingen voor getij van 05/10/2017.



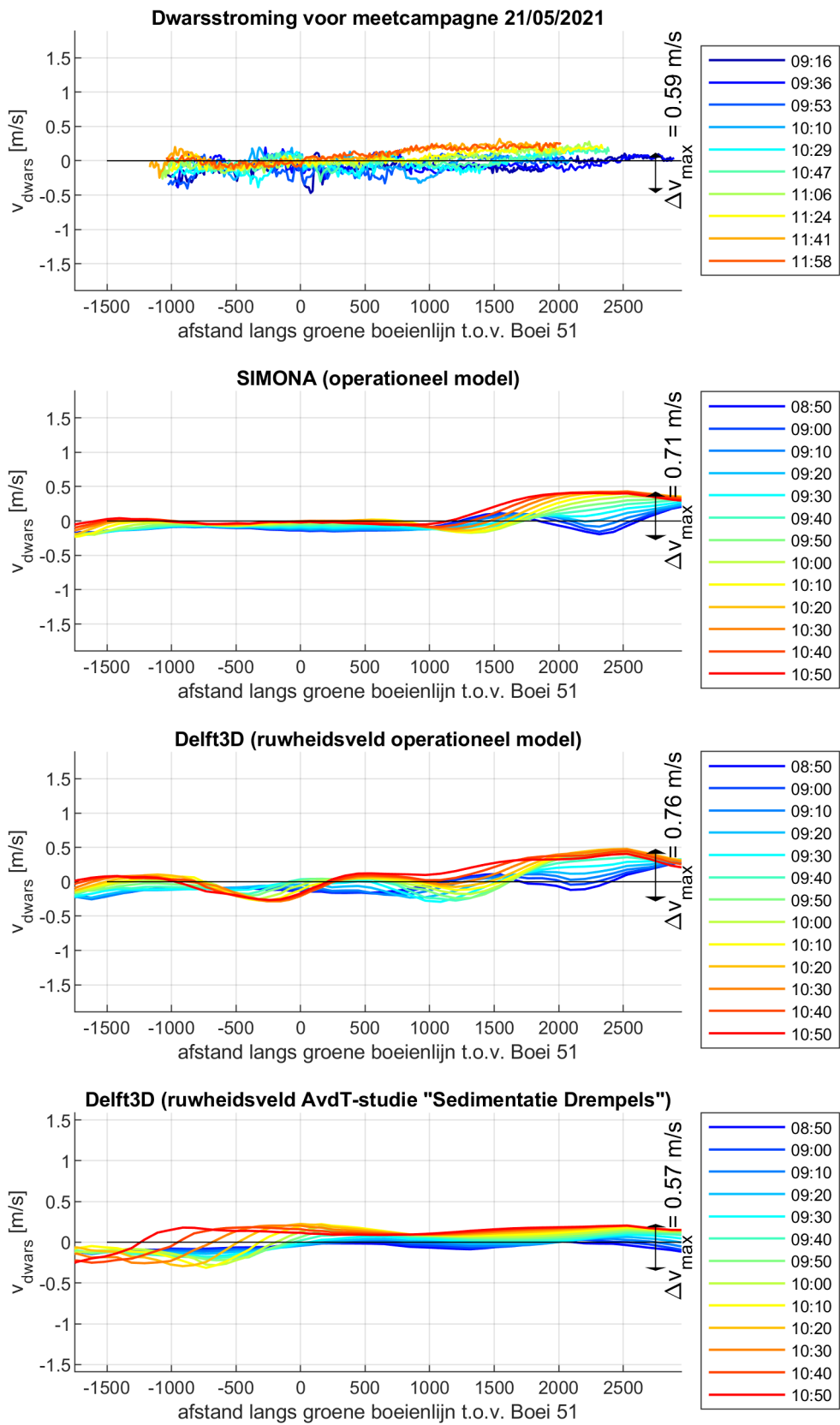
Figuur 65 – Gemeten en gemodelleerde dwarsstromingen voor getij van 03/03/2018.



Figuur 66 – Gemeten en gemodelleerde dwarsstromingen voor getij van 21/02/2019.



Figuur 67 – Gemeten en gemodelleerde dwarsstromingen voor getij van 23/02/2019.



Figuur 68 – Gemeten en gemodelleerde dwarsstromingen voor getij van 21/05/2021.

Bijlage C - Geobserveerde en gemodelleerde getijkarakteristieken

Onderstaande tabellen geven de geobserveerde en gemodelleerde hydrodynamische omgevingsfactoren op basis van het evrticaal getij voor de geselecteerde meetcampagnes. De tabellen bevatten de hoogwaterniveaus in Hansweert (i.e., *HWL*), het maximum verhang tussen Terneuzen en Hanzweert voorafgaand aan het hoogwater (i.e., *Maxvv*) en de maxmum stijgsnelheid te Hansweert voorafgaand aan het hoogwater (i.e., *dhdt*⁻¹). Per simulatie wordt aangegeven welk ruwheidsveld werd gebruikt en hoe de afwaartse rand werd geïmplementeerd (i.e., locatie en getijconditie).

Tabel 6 – Getijparameters voor het getij van 02/02/2014 in verschillende modelconfiguraties.

Scenario	Afwaartse rand	Opgelegd getij	HWL [m]	Maxvv [m]	dhdt ⁻¹ [m/s]
Simona	WKAP-CADZ	<i>obs</i>	5,13	1,04	6,0·10 ⁻⁴
Delft3D <i>ruwheid operationeel model</i>	WKAP-CADZ	<i>obs</i>	5,14	1,11	5,7·10 ⁻⁴
Delft3D <i>ruwheid AvdT-studie</i>	WKAP-CADZ	<i>obs</i>	5,18	0,98	5,8·10 ⁻⁴
Simona	WKAP-CADZ	<i>astro</i>	5,24	1,00	5,9·10 ⁻⁴
Delft3D <i>ruwheid operationeel model</i>	WKAP-CADZ	<i>astro</i>	5.25	1,07	5,5·10 ⁻⁴
Observaties:			5.34	0,90	8,2·10 ⁻⁴

Tabel 7 – Getijparameters voor het getij van 22/10/2014 in verschillende modelconfiguraties.

Scenario	Afwaartse rand	Opgelegd getij	HWL [m]	Maxvv [m]	dhdt ⁻¹ [m/s]
Simona	WKAP-CADZ	<i>obs</i>	6,21	0,39	3,2·10 ⁻⁴
Delft3D <i>ruwheid operationeel model</i>	WKAP-CADZ	<i>obs</i>	6,23	0,46	3,4·10 ⁻⁴
Delft3D <i>ruwheid AvdT-studie</i>	WKAP-CADZ	<i>obs</i>	6,23	0,39	3,4·10 ⁻⁴
Simona	WKAP-CADZ	<i>astro</i>	4,91	0,55	3,7·10 ⁻⁴
Delft3D <i>ruwheid operationeel model</i>	WKAP-CADZ	<i>astro</i>	4.93	0,60	3,6·10 ⁻⁴
Observaties:			6,38	0,29	3,3·10 ⁻⁴

Tabel 8 – Getijparameters voor het getij van 22/03/2015 in verschillende modelconfiguraties.

Scenario	Afwaartse rand	Opgelegd getij	HWL [m]	Maxvv [m]	dhdt ⁻¹ [m/s]
Simona	WKAP-CADZ	obs	4,90	1,12	6,4·10 ⁻⁴
Delft3D <i>ruwheid operationeel model</i>	WKAP-CADZ	obs	4,94	1,17	6,2·10 ⁻⁴
Delft3D <i>ruwheid AvdT-studie</i>	WKAP-CADZ	obs	4,99	1,02	6,3·10 ⁻⁴
Simona	WKAP-CADZ	astro	5,21	1,06	6,1·10 ⁻⁴
Delft3D <i>ruwheid operationeel model</i>	WKAP-CADZ	astro	5.23	1,12	5,8·10 ⁻⁴
Observaties:			5,12	1,08	8,3·10 ⁻⁴

Tabel 9 – Getijparameters voor het getij van 28/11/2015 in verschillende modelconfiguraties.

Scenario	Afwaartse rand	Opgelegd getij	HWL [m]	Maxvv [m]	dhdt ⁻¹ [m/s]
Simona	WKAP-CADZ	obs	5,91	0,99	5,6·10 ⁻⁴
Delft3D <i>ruwheid operationeel model</i>	WKAP-CADZ	obs	5,91	1,07	5,6·10 ⁻⁴
Delft3D <i>ruwheid AvdT-studie</i>	WKAP-CADZ	obs	5,97	0,93	5,9·10 ⁻⁴
Simona	WKAP-CADZ	astro	5,15	0,82	5,0·10 ⁻⁴
Delft3D <i>ruwheid operationeel model</i>	WKAP-CADZ	astro	5,18	0,87	4,9·10 ⁻⁴
Observaties:			6,10	0,85	7,0·10 ⁻⁴

Tabel 10 – Getijparameters voor het getij van 30/11/2015 in verschillende modelconfiguraties.

Scenario	Afwaartse rand	Opgelegd getij	HWL [m]	Maxvv [m]	dhdt ⁻¹ [m/s]
Simona	WKAP-CADZ	obs	5,86	0,47	3,5·10 ⁻⁴
Delft3D <i>ruwheid operationeel model</i>	WKAP-CADZ	obs	5,87	0,49	3,5·10 ⁻⁴
Delft3D <i>ruwheid AvdT-studie</i>	WKAP-CADZ	obs	5,89	0,42	3,6·10 ⁻⁴
Simona	WKAP-CADZ	astro	4,95	0,67	4,4·10 ⁻⁴
Delft3D <i>ruwheid operationeel model</i>	WKAP-CADZ	astro	4.98	0,72	4,2·10 ⁻⁴
Observaties:			5,96	0,38	3,8·10 ⁻⁴

Tabel 11 – Getijparameters voor het getij van 11/03/2016 in verschillende modelconfiguraties.

Scenario	Afwaartse rand	Opgelegd getij	HWL [m]	Maxvv [m]	dhdt ⁻¹ [m/s]
Simona	WKAP-CADZ	obs	4,96	1,12	6,4·10 ⁻⁴
Delft3D <i>ruwheid operationeel model</i>	WKAP-CADZ	obs	4,99	1,18	6,2·10 ⁻⁴
Delft3D <i>ruwheid AvdT-studie</i>	WKAP-CADZ	obs	5,03	1,04	6,4·10 ⁻⁴
Simona	WKAP-CADZ	astro	5,22	1,04	5,9·10 ⁻⁴
Delft3D <i>ruwheid operationeel model</i>	WKAP-CADZ	astro	5.24	1,09	5,7·10 ⁻⁴
Observaties:			5,19	1,01	8,3·10 ⁻⁴

Tabel 12 – Getijparameters voor het getij van 02/03/2017 in verschillende modelconfiguraties.

Scenario	Afwaartse rand	Opgelegd getij	HWL [m]	Maxvv [m]	dhdt ⁻¹ [m/s]
Simona	WKAP-CADZ	obs	5,58	1,12	5,9·10 ⁻⁴
Delft3D <i>ruwheid operationeel model</i>	WKAP-CADZ	obs	5,58	1,23	5,6·10 ⁻⁴
Delft3D <i>ruwheid AvdT-studie</i>	WKAP-CADZ	obs	5,69	1,10	5,9·10 ⁻⁴
Simona	WKAP-CADZ	astro	4,92	0,89	5,1·10 ⁻⁴
Delft3D <i>ruwheid operationeel model</i>	WKAP-CADZ	astro	4.93	0,96	4,8·10 ⁻⁴
Observaties:			5,95	0,63	7,0·10 ⁻⁴

Tabel 13 – Getijparameters voor het getij van 05/10/2017 in verschillende modelconfiguraties.

Scenario	Afwaartse rand	Opgelegd getij	HWL [m]	Maxvv [m]	dhdt ⁻¹ [m/s]
Simona	WKAP-CADZ	obs	5,51	0,79	4,7·10 ⁻⁴
Delft3D <i>ruwheid operationeel model</i>	WKAP-CADZ	obs	5,52	0,88	4,5·10 ⁻⁴
Delft3D <i>ruwheid AvdT-studie</i>	WKAP-CADZ	obs	5,57	0,79	4,7·10 ⁻⁴
Simona	WKAP-CADZ	astro	4,97	0,77	4,6·10 ⁻⁴
Delft3D <i>ruwheid operationeel model</i>	WKAP-CADZ	astro	4.98	0,88	4,3·10 ⁻⁴
Observaties:			5,66	0,63	5,2·10 ⁻⁴

Tabel 14 – Getijparameters voor het getij van 03/03/2018 in verschillende modelconfiguraties.

Scenario	Afwaartse rand	Opgelegd getij	HWL [m]	Maxvv [m]	dhdt ⁻¹ [m/s]
Simona	WKAP-CADZ	obs	5,15	1,03	6,0·10 ⁻⁴
Delft3D <i>ruwheid operationeel model</i>	WKAP-CADZ	obs	5,17	1,13	5,7·10 ⁻⁴
Delft3D <i>ruwheid AvdT-studie</i>	WKAP-CADZ	obs	5,21	0,99	6,0·10 ⁻⁴
Simona	WKAP-CADZ	astro	5,21	1,00	5,9·10 ⁻⁴
Delft3D <i>ruwheid operationeel model</i>	WKAP-CADZ	astro	5.22	1,08	5,4·10 ⁻⁴
Observaties:			5,27	0,98	7,7·10 ⁻⁴

Tabel 15 – Getijparameters voor het getij van 21/02/2019 in verschillende modelconfiguraties.

Scenario	Afwaartse rand	Opgelegd getij	HWL [m]	Maxvv [m]	dhdt ⁻¹ [m/s]
Simona	WKAP-CADZ	obs	5,44	1,04	6,1·10 ⁻⁴
Delft3D <i>ruwheid operationeel model</i>	WKAP-CADZ	obs	5,47	1,08	5,9·10 ⁻⁴
Delft3D <i>ruwheid AvdT-studie</i>	WKAP-CADZ	obs	5,52	0,97	6,1·10 ⁻⁴
Simona	WKAP-CADZ	astro	5,24	1,08	6,1·10 ⁻⁴
Delft3D <i>ruwheid operationeel model</i>	WKAP-CADZ	astro	5.26	1,11	5,8·10 ⁻⁴
Observaties:			5,58	0,80	7,3·10 ⁻⁴

Tabel 16 – Getijparameters voor het getij van 23/02/2019 in verschillende modelconfiguraties.

Scenario	Afwaartse rand	Opgelegd getij	HWL [m]	Maxvv [m]	dhdt ⁻¹ [m/s]
Simona	WKAP-CADZ	obs	5,94	1,08	6,2·10 ⁻⁴
Delft3D <i>ruwheid operationeel model</i>	WKAP-CADZ	obs	4,97	1,11	5,8·10 ⁻⁴
Delft3D <i>ruwheid AvdT-studie</i>	WKAP-CADZ	obs	5,02	1,00	6,1·10 ⁻⁴
Simona	WKAP-CADZ	astro	5,14	1,04	5,7·10 ⁻⁴
Delft3D <i>ruwheid operationeel model</i>	WKAP-CADZ	astro	5.14	1,07	5,6·10 ⁻⁴
Observaties:			5,06	0,84	7,3·10 ⁻⁴

Tabel 17 – Getijparameters voor het getij van 21/05/2021 in verschillende modelconfiguraties.

Scenario	Afwaartse rand	Opgelegd getij	HWL [m]	Maxvv [m]	dhd ^{t-1} [m/s]
Simona	WKAP-CADZ	obs	4,29	0,45	3,1·10 ⁻⁴
Delft3D <i>ruwheid operationeel model</i>	WKAP-CADZ	obs	4,32	0,46	3,0·10 ⁻⁴
Delft3D <i>ruwheid AvdT-studie</i>	WKAP-CADZ	obs	4,33	0,41	3,1·10 ⁻⁴
Observaties:			4,40	0,33	3,0·10 ⁻⁴

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