



Vlaanderen
is wetenschap

20_036_1
WL rapporten

Dwarsstroming Platen van Ossenisse

Validatie Delft3D-NeVla model voor
meetcampagne 12/03/2020

DEPARTEMENT
MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

Dwarsstroming Platen van Ossenisse

Validatie Delft3D-NeVla model voor meetcampagne 12/03/2020

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

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 2020
D/2020/3241/181

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Stark, J.; Vanlede, J.; Plancke, Y.; Mostaert, F. (2020). Dwaarsstroming Platen van Ossensisse: Validatie Delft3D-NeVla model voor meetcampagne 12/03/2020. Versie 4.0. WL Rapporten, 20_036_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

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

Documentidentificatie

| | | | |
|--------------------|---|--|-----------------|
| Opdrachtgever: | RWS Zee & Delta | Ref.: | WL2020R20_036_1 |
| Trefwoorden (3-5): | Neervorming; Dwaarsstroming; Schelde-estuarium; Platen van Ossensisse; Delft3D | | |
| Kennisdomeinen | Hydraulica en Sediment > Hydrodynamica > Stroomsnelheden -en patronen > Numerieke modelleringen Hydraulica en Sediment > Hydrodynamica > Stroomsnelheden -en patronen > In situ metingen | | |
| Tekst (p.): | 28 | Bijlagen (p.): | 12 |
| 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: 2020-07-08 10:38:13 +01:00 Reden: Ik keur dit document goed  |
| Projectleider: | Plancke, Y. | Getekend door: Yves Plancke (Signature) Getekend op: 2020-07-27 07:58:16 +01:00 Reden: Ik keur dit document goed  |

Goedkeuring

| | | |
|-----------------|--------------|---|
| Afdelingshoofd: | Mostaert, F. | Getekend door: Frank Mostaert (Signature) Getekend op: 2020-07-07 15:31:40 +01:00 Reden: Ik keur dit document goed  |
|-----------------|--------------|---|



Abstract

Voorliggend rapport bevat een modelvalidatie voor dwarsstromingen ten gevolge van neervorming die tijdens gevaren ADCP-metingen langs de oostrand van de Platen van Ossensisse op 12 maart 2020 werden geobserveerd. Tijdens de meetcampagne werden tussen Boei 53 en Boei 55 sterke dwarsstromingen (i.e., loodrecht op de vaarrichting) tot maximaal 1,5 m/s richting de vaargeul en maximaal 1,0 m/s richting de plaat geobserveerd. De modelvalidatie wordt uitgevoerd voor het Delft3D-NeVla model met verschillende eerder gekalibreerde ruwheidsvelden uit de kalibratie van het 2D NeVla randvoorwaardenmodel en uit eerder AvdT-onderzoek naar sedimenttransport nabij de Drempel van Hansweert. Uit eerder modelonderzoek is al gebleken dat deze gekalibreerde Delft3D modellen in staat zijn de neervorming in dit gebied te reproduceren.

Uit de validatieoefening volgt dat de geobserveerde dwarsstromingen onderschat worden in modelsimulaties, ongeacht welk van de eerder gekalibreerde ruwheidsvelden wordt gebruikt. Als het ruwheidsveld uit eerder AvdT-onderzoek naar sedimenttransport rondom de Drempel van Hansweert wordt gebruikt, is de onderschatting het sterkst en wordt de neer bovendien te noordelijk weergegeven in vergelijking met de locatie van de geobserveerde dwarsstromingen. Als het bodemruwheidsveld uit de kalibratie van het 2D NeVla randvoorwaardenmodel wordt gebruikt, is de locatie van de neer en de dwarsstromingen wel meer zuidelijk langs de groene boeienlijn en daarmee meer in overeenstemming met realiteit. Het circulair stromingspatroon heeft tijdens de eerste fase van de neervorming dan een meer langgerekt patroon. Ook wordt de maximale dwarsstroming ten gevolge van de neer dan ten zuiden van Boei 53A en naar de plaat toe gericht gemodelleerd, terwijl deze in werkelijkheid nabij Boei 53 en naar de vaargeul toe gericht werd geobserveerd. Tot slot is ook een nieuw samengesteld ruwheidsveld uitgetoet, wat leidt tot een lichte verhoging van de gesimuleerde dwarsstroming richting de vaargeul nabij Boei 53. Een mogelijke verklaring van het minder reproduceren van neer, is de afwijking in de gemodelleerde waterstanden ten opzichte van de metingen. Het betreffende getij kende een eerder uitzonderlijk verloop.

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 | 1 |
| 2 Studiegebied..... | 2 |
| 3 Bestaand onderzoek..... | 3 |
| 3.1 Ontstaan van de neer | 3 |
| 3.2 Criterium door Decrop <i>et al.</i> (2009, 2010) | 3 |
| 3.3 Bepaling spervensters door RWS | 3 |
| 3.4 Onderzoek in het kader van LTV – Veiligheid en toegankelijkheid | 4 |
| 3.5 Onderzoek in het kader van Agenda voor de Toekomst | 4 |
| 3.6 Scenario-onderzoek door Stark <i>et al.</i> (2020b)..... | 5 |
| 4 Meetcampagne 12 maart 2020 | 7 |
| 4.1 Gevaren ADCP-transecten | 7 |
| 4.2 Geobserveerd waterstandsverloop..... | 7 |
| 4.3 Geobserveerde stroomsnelheden..... | 8 |
| 5 Modelopzet | 10 |
| 5.1 Modelrooster..... | 10 |
| 5.2 Topo-bathymetrische gegevens | 11 |
| 5.3 Randvoorwaarden | 11 |
| 5.3.1 Afwaartse randvoorwaarden..... | 11 |
| 5.3.2 Opwaartse randvoorwaarden | 11 |
| 5.3.3 Randvoorwaarden saliniteit | 11 |
| 5.4 Wind | 12 |
| 5.5 Bodemruwheid | 13 |
| 5.5.1 Kalibratie in het kader van verbetering randvoorwaardenmodel NeVla | 13 |
| 5.5.2 Kalibratie in het kader van AvdT-studie naar sedimenttransport rondom de Drempel van Hansweert | 13 |

| | | |
|---|--|----|
| 5.5.3 | Gecombineerd ruwheidsveld | 14 |
| 5.6 | Initieel zoutveld | 15 |
| 5.7 | Overige modelinstellingen..... | 16 |
| 6 | Modelresultaten | 17 |
| 6.1 | Gemodelleerd waterstandsverloop..... | 17 |
| 6.2 | Gemodelleerd stroomsnelheidsverloop..... | 20 |
| 7 | Conclusies | 26 |
| 8 | Referenties | 28 |
| Bijlage A | | B1 |
| Simulatie met ruwheidsveld uit AvdT-studie door Stark <i>et al.</i> (2019) | | B1 |
| Simulatie met ruwheidsveld uit verbetering NeVla randvoorwaardenmodel door Vanlede <i>et al.</i> (2009) . | | B5 |
| Simulatie met samengesteld ruwheidsveld | | B9 |

Lijst van de tabellen

| | |
|---|----|
| Tabel 1 – Opwaartse randvoorwaarden..... | 12 |
| Tabel 2 – Basisinstellingen Delft3D-NeVla model | 16 |

Lijst van de figuren

| | |
|---|----|
| Figuur 1 – Overzichtskaart van geulen en platen in het studiegebied..... | 2 |
| Figuur 2 – 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 | 5 |
| Figuur 3 – 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 | 5 |
| Figuur 4 – Gevaren transecten (blauw) langs de groene boeienlijn (groen) tijdens de meetcampagne in de vaargeul langs de oostrand van de Platen van Ossensisse op 12-03-2020. | 7 |
| Figuur 5 – Geobserveerd waterstandsverloop te Hansweert en Terneuzen, alsmede het verhang tussen beide stations en de stijgsnelheid te Hansweert, voor het geanalyseerde getij van 12 maart 2020. | 8 |
| Figuur 6 – Gemeten stroomsnelheidsverloop (boven), gemeten verloop van de dwarscomponent (midden) en de maximale dwarsstroming (onder) langs de groene boeienlijn rond hoogwater tijdens de meetcampagne op 12-03-2020. | 9 |
| Figuur 7 – Illustratie van het Delft3D-NeVla rooster met locatie van de afgeknipte rand bij Westkapelle-Cadzand | 10 |
| Figuur 8 – Opgelegde waterstandreeksen aan afwaartse rand. | 11 |
| Figuur 9 – Opgelegde windsnelheden en windrichtingen..... | 12 |
| Figuur 10 – Manning’s ruwheidsveld Delft3D-NeVla model zoals gekalibreerd bij afregeling van het 2D NeVla model..... | 14 |
| Figuur 11 – Manning’s ruwheidsveld Delft3D-NeVla model zoals gekalibreerd in AvdT-studie..... | 14 |
| Figuur 12 – Gecombineerd Manning’s ruwheidsveld Delft3D-NeVla model voor huidige modelvalidatie. | 14 |
| Figuur 13 – Initieel saliniteitsveld in Delft3D-NeVla..... | 15 |
| Figuur 14 – Geobserveerd en gemodelleerd waterstandsverloop te Hansweert en Terneuzen op 12-03-2020. | 17 |
| Figuur 15 – Geobserveerd en gemodelleerd verhang tussen Terneuzen en Hansweert op 12-03-2020. | 18 |
| Figuur 16 – Geobserveerde en gemodelleerde stijgsnelheid te Hansweert op 12-03-2020. | 19 |
| Figuur 17 – Uitvoerpunten modelsimulaties..... | 20 |
| Figuur 18 – Gemodelleerd stroomsnelheidsverloop (boven), de dwarscomponent (midden) en de maximale dwarsstroming (onder) langs de groene boeienlijn rond hoogwater voor het onderzochte getij op 12-03-2020 met ruwheidsveld uit AvdT-studies naar sedimenttransport rondom de drempel van Hansweert..... | 22 |
| Figuur 19 – Gemodelleerd stroomsnelheidsverloop (boven), de dwarscomponent (midden) en de maximale dwarsstroming (onder) langs de groene boeienlijn rond hoogwater voor het onderzochte getij op 12-03-2020 met ruwheidsveld uit de verbetering van het NeVla randvoorwaardenmodel. | 23 |
| Figuur 20 – Gemodelleerd stroomsnelheidsverloop (boven), de dwarscomponent (midden) en de maximale dwarsstroming (onder) langs de groene boeienlijn rond hoogwater voor het onderzochte getij op 12-03-2020 met gecombineerd ruwheidsveld..... | 24 |
| Figuur 21 – Geobserveerde en gemodelleerde maximale dwarsstromingen langs de groene boeienlijn. | 25 |

Figuur 22 – Gesimuleerd stromingsveld met bodemruweidsveld uit AvdT-studies Stark *et al.* (2019) om 16:20 B1

Figuur 23 – Gesimuleerd stromingsveld met bodemruweidsveld uit AvdT-studies Stark *et al.* (2019) om 16:40 B1

Figuur 24 – Gesimuleerd stromingsveld met bodemruweidsveld uit AvdT-studies Stark *et al.* (2019) om 17:00 B2

Figuur 25 – Gesimuleerd stromingsveld met bodemruweidsveld uit AvdT-studies Stark *et al.* (2019) om 17:20 B2

Figuur 26 – Gesimuleerd stromingsveld met bodemruweidsveld uit AvdT-studies Stark *et al.* (2019) om 17:40 B3

Figuur 27 – Gesimuleerd stromingsveld met bodemruweidsveld uit AvdT-studies Stark *et al.* (2019) om 18:00 B3

Figuur 28 – Gesimuleerd stromingsveld met bodemruweidsveld uit AvdT-studies Stark *et al.* (2019) om 18:20 B4

Figuur 29 – Gesimuleerd stromingsveld met ruweidsveld uit verbetering NeVla randvoorwaardenmodel door Vanlede *et al.* (2009) om 16:20..... B5

Figuur 30 – Gesimuleerd stromingsveld met ruweidsveld uit verbetering NeVla randvoorwaardenmodel door Vanlede *et al.* (2009) om 16:40..... B5

Figuur 31 – Gesimuleerd stromingsveld met ruweidsveld uit verbetering NeVla randvoorwaardenmodel door Vanlede *et al.* (2009) om 17:00..... B6

Figuur 32 – Gesimuleerd stromingsveld met ruweidsveld uit verbetering NeVla randvoorwaardenmodel door Vanlede *et al.* (2009) om 17:20..... B6

Figuur 33 – Gesimuleerd stromingsveld met ruweidsveld uit verbetering NeVla randvoorwaardenmodel door Vanlede *et al.* (2009) om 17:40..... B7

Figuur 34 – Gesimuleerd stromingsveld met ruweidsveld uit verbetering NeVla randvoorwaardenmodel door Vanlede *et al.* (2009) om 18:00..... B7

Figuur 35 – Gesimuleerd stromingsveld met ruweidsveld uit verbetering NeVla randvoorwaardenmodel door Vanlede *et al.* (2009) om 18:20..... B8

Figuur 36 – Gesimuleerd stromingsveld met samengesteld bodemruweidsveld om 16:20..... B9

Figuur 37 – Gesimuleerd stromingsveld met samengesteld bodemruweidsveld om 16:40..... B9

Figuur 38 – Gesimuleerd stromingsveld met samengesteld bodemruweidsveld om 17:00..... B10

Figuur 39 – Gesimuleerd stromingsveld met samengesteld bodemruweidsveld om 17:20..... B10

Figuur 40 – Gesimuleerd stromingsveld met samengesteld bodemruweidsveld om 17:40..... B11

Figuur 41 – Gesimuleerd stromingsveld met samengesteld bodemruweidsveld om 18:00..... B11

Figuur 42 – Gesimuleerd stromingsveld met samengesteld bodemruweidsveld om 18:20..... B12

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 als numerieke modellen opgezet (e.g. Decrop *et al.*, 2009, 2010) om de lokale stroompatronen nabij de oostrand van de Platen van Ossensisse in beeld te brengen. Deze metingen toonden aan dat bij sterke springtijden (ook “giertij” genoemd) 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. Door IMDC *et al.* (2013) is later onderzoek gedaan naar mogelijke morfologische ingrepen om het ontstaan van de neer te voorkomen of de intensiteit van de neer en bijbehorende dwarsstromingen te verminderen. Tevens werd binnen AvdT (Agenda voor de Toekomst) onderzoek naar sedimenttransport en morfologische ontwikkelingen in de vaargeul nabij de Drempel van Hansweert en Diepe put van Hansweert (Stark *et al.*, 2019, 2020a) ook aandacht besteed aan deze neervorming en bijbehorende stromingspatronen. Recentelijk werd door Stark *et al.* (2020b) nog een nieuw scenario-onderzoek uitgevoerd naar de potentiële invloed van morfologische ingrepen op de neervorming en dwarsstroming in dit gebied.

Het is van belang de kwaliteit van de numerieke modellen waarmee dergelijk onderzoek wordt uitgevoerd, herhaaldelijk te valideren op basis van recente snelheidsmetingen van de neervorming en dwarsstroming langs de oostrand van de Platen van Ossensisse. In voorliggend rapport wordt de performantie van het Delft3D-NeVla model gevalideerd op basis van stroomsnelheidsmetingen, in de vorm van gevaren ADCP-transecten, die in samenwerking door het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) en Rijkswaterstaat (RWS) werden uitgevoerd in maart 2020.

1.2 Doelstelling

Dit rapport heeft als doel om de modelprestatie van het Delft3D-NeVla model te valideren voor de representatie van gemeten dwarsstromingen als gevolg van neervorming aan de oostzijde van de Platen van Ossensisse tijdens een meetcampagne op 12 maart 2020.

De modelvalidatie wordt uitgevoerd voor simulaties met verschillende in eerdere studies gekalibreerde ruwheidsvelden om de prestatie van het Delft3D-NeVla model in verschillende configuraties te onderzoeken.

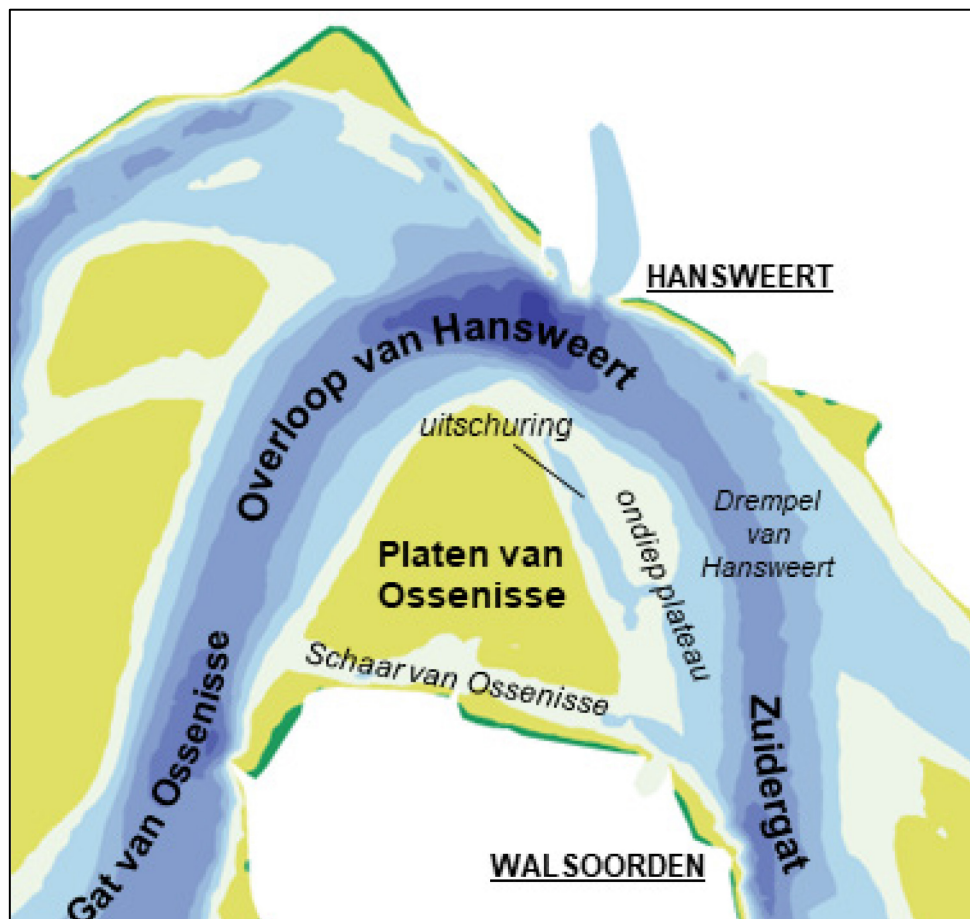
1.3 Leeswijzer

In dit rapport wordt in Hoofdstuk 2 eerst het studiegebied besproken, waarna in Hoofdstuk 3 een kort overzicht wordt gegeven van eerder (model)onderzoek naar de neervorming en dwarsstroming langs de oostrand van de Platen van Ossensisse. Hoofdstuk 4 geeft een beschrijving van de geobserveerde stroomsnelheden tijdens de meetcampagne op 12 maart 2020. De modelinstellingen van het Delft3D NeVla model worden gegeven in Hoofdstuk 5. Vervolgens worden de modelresultaten van de validatie runs getoond in Hoofdstuk 6 en Bijlage A. Tot slot worden enkele conclusies naar aanleiding van deze additionele validatie opgesomd in Hoofdstuk 7.

2 Studiegebied

De focus van dit onderzoek ligt op de omgeving van de oostrand van de Platen van Ossenissee. Deze plaat wordt omringd door de Overloop van Hansweert, de Drempel van Hansweert, het Zuidergat en de Schaar van Ossenissee (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 Ossenissee bevindt zich een ondiep plateau dat zich de laatste decennia heeft ontwikkeld (Decrop *et al.*, 2009). Dit plateau heeft op basis van recente bathymetrische gegevens uit 2020 een hoogteligging die varieert van -7 m NAP in het zuidoostelijk deel tot -2 m NAP op het noordelijk deel. Op dit ondiepe plateau vindt de initiële neervorming plaats die dwarsstromingen in de vaargeul kan veroorzaken. Tussen het ondiepe plateau en de Platen van Ossenissee heeft zich een diepe geul of uitschuring ontwikkeld met een diepteligging tot ongeveer -9 m NAP in 2020. Ook ten zuiden van de plaat bevindt zich een ondiepe geul: de Schaar van Ossenissee.

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



3 Bestaand onderzoek

3.1 Ontstaan van de neer

In eerdere studies werd de vorming van de neer bij de Platen van Ossensisse al uitvoerig beschreven (e.g. Decrop *et al.*, 2009; 2010; Stark *et al.*, 2020b; Plancke *et al.*, 2020). De grote neer op de Platen van Ossensisse ontstaat in de late vloedfase van hogere (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 aan de oostzijde van de plaat. 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 en door de uitschuring. 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 opwaarts 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 Criterium door Decrop *et al.* (2009, 2010)

Via numerieke modellering model kon deze neer gereproduceerd worden (Decrop *et al.*, 2009, 2010). Hiervoor werd een lokaal Delft3D model genest in het grotere NeVla model. Ook moest het ruwheidsveld van het Delft3D model aangepast worden ten opzichte van het originele NeVla ruwheidsveld (i.e., verlaagd op het ondiepe plateau ten oosten van de Platen van Ossensisse) om de neervorming en bijbehorende dwarsstroming te reproduceren. Uiteindelijk werd een criterium cr opgesteld waarmee de intensiteit van de dwarsstroming kon worden voorspeld:

$$cr = (1 + k_a(HWL - k_b)) \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right) \geq 4 \text{ cm/min}$$

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). Als dit criterium overschreden wordt is de kans dat er ter hoogte van de vaargeul ten oosten van de Platen van Ossensisse dwarsstromingen optreden die groter zijn dan 0,8 m/s volgens Decrop *et al.* (2010) zeer aannemelijk. Het onderzoek door Decrop *et al.* (2009, 2010) suggereert tevens een belangrijke rol voor het ondiepe plateau tussen de Platen van Ossensisse en de Drempeel van Hansweert met betrekking tot het ontstaan van de neren bij hoogwater springtij.

3.3 Bepaling spervensters door RWS

Naast bovenstaand criterium van Decrop *et al.* (2010) hanteert Rijkswaterstaat (RWS) een eigen criterium waarmee sinds enkele jaren spervensters (reductie van het vaarvenster) gedefinieerd worden. Tijdens deze spervensters is scheepvaart voor grote zeeschepen niet toegestaan ter hoogte van deze locatie. Het criterium

dat RWS hanteert is gebaseerd op het voorspelde maximale verhang tussen Terneuzen en Hansweert tijdens de vloedfase voorafgaand aan het hoogwater te Hansweert¹. 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.

Daarnaast worden tijdens een voorspelde “sterke dwarsstroming” door Rijkswaterstaat ook regelmatig ADCP-metingen uitgevoerd (i.e., raaien gevaren) langs de groene boeienlijn aan de oostzijde van de Platen van Ossenissee.

3.4 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 ruweheidsveld 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.

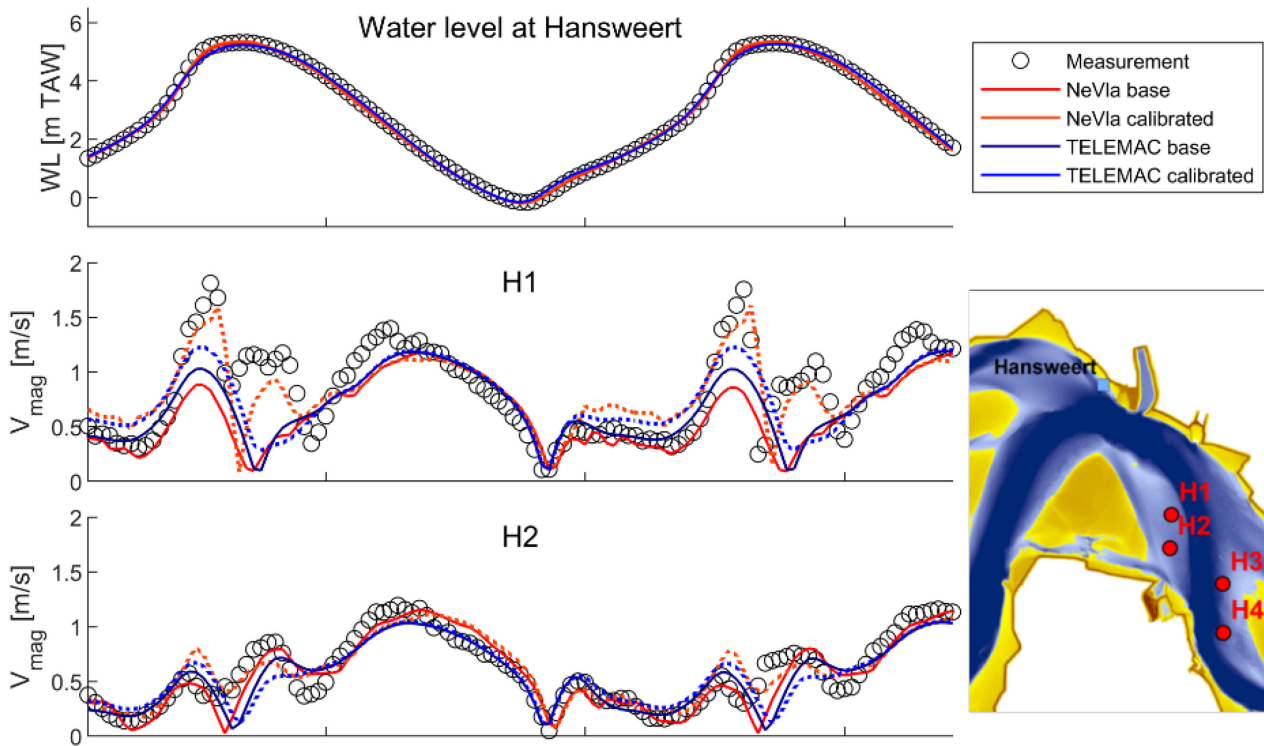
3.5 Onderzoek in het kader van Agenda voor de Toekomst

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 Ossenissee waardoor de neervorming en bijbehorende stromingspatronen eveneens relevant zijn. Binnen dit onderzoek werd dan ook veel aandacht geschonken aan het representeren van de neer. Meer specifiek werd het Delft3D-NeVla model geoptimaliseerd voor de representatie van stroomsnelheden en sedimenttransport op de ondiepte tussen de Platen van Ossenissee en de Drempel van Hansweert door middel van een herkalibratie van de (lokale) bodemruwheid. Na deze kalibratie bleek het Delft3D-NeVla model in staat om de hoge snelheidspieken op dit plateau goed te representeren (Figuur 2). 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).

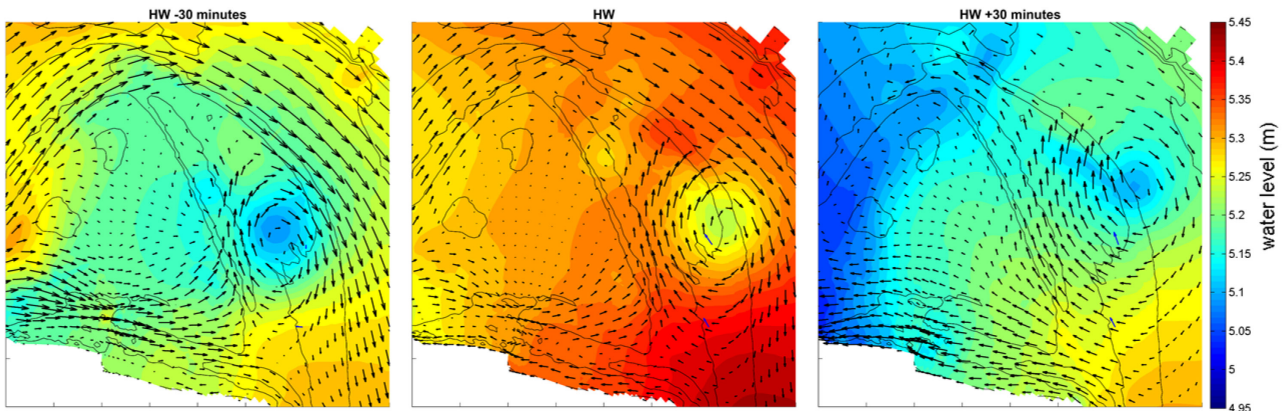
In het kader van een volgende AvdT-studie werd naast het reeds bestaande Delft3D-NeVla model ook een driedimensionaal TELEMAC-3D model van de Westerschelde gevalideerd voor snelheidsmetingen in dit studiegebied (Stark *et al.*, 2020a). De neervorming en bijbehorende dwarsstroming worden door beide modellen gereproduceerd (Figuur 3). Uit een vergelijking tussen beide modellen bleek echter dat het Delft3D model momenteel beter in staat is om de hoge snelheidspieken tijdens springtij op het ondiepe plateau te reproduceren (Figuur 2). De resultaten van het AvdT-onderzoek met betrekking tot de neervorming bij de Platen van Ossenissee en de vergelijking tussen de twee modellen zijn samengevat in Plancke *et al.* (2020).

¹ Criteria voor matige en sterke dwarsstroming zijn afkomstig uit de “*Voormelding dwarsstroomwaarschuwing januari t/m december 2020 omgeving boei 51/53 op basis van vervalcriterium astronomisch getij*” op www.vts-scheldt.net.

Figuur 2 – 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 3 – 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).



3.6 Scenario-onderzoek door Stark *et al.* (2020b)

Recentelijk werd de dwarsstroming in het gebied nog modelmatig onderzocht door Stark *et al.* (2020b). 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.

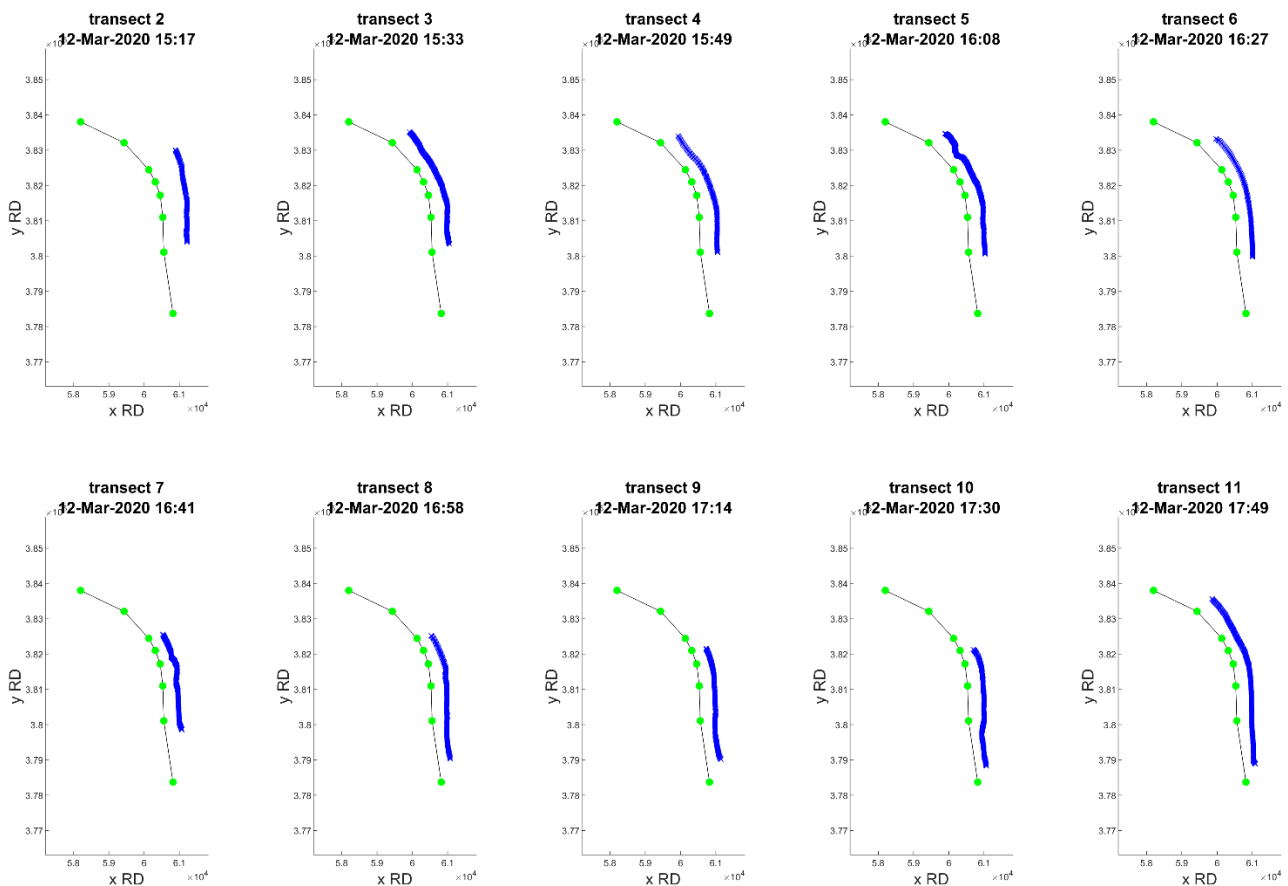
In het algemeen volgt uit deze modelstudie dat morfologische ingrepen (e.g. verdiepen/verondiepen van delen van de plaat, baggeren van kortsluitgeulen) op de Platen van Ossenissee enkel leiden tot kleine veranderingen in de sterkte van de waterstandsdepressie die ten grondslag ligt aan het ontstaan van de neer alsmede kleine spatiale 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.* (2020b) enigszins verminderen zijn een plaatrandstorting aan de noordwest- en noordoostkant van de Platen van Ossenissee, een ophoging van de zuidoostkant van de Platen van Ossenissee, een kortsluitgeul door de Platen van Ossenissee of een algehele bodemverlaging van de intertidale plaat. Voor deze ingrepen geldt volgens Stark *et al.* (2020b) 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 Ossenissee en het ondiep plateau ten oosten van deze plaat), op basis van de simulaties met een meer recente bathymetrie geen positief effect op het stromingspatroon bewerkstelligen.

4 Meetcampagne 12 maart 2020

4.1 Gevaren ADCP-transecten

Op 12 maart 2020 werden varende ADCP-metingen uitgevoerd in de vaargeul langs de oostrand van de Platen van Ossensisse. Hierbij werden gedurende een periode van ongeveer 3 uur raaien evenwijdig aan de groene boeienlijn gevaren. Figuur 4 toont de gevaren transecten die grofweg lopen tussen Boei 49 aan het noordelijke uiteinde tot Boei 57 aan het zuidelijke uiteinde. De meeste transecten lopen echter van Boei 49 tot Boei 55. De afstand tussen de gevaren transecten en de groene boeienlijn varieert tussen 300-800 m.

Figuur 4 – Gevaren transecten (blauw) langs de groene boeienlijn (groen) tijdens de meetcampagne in de vaargeul langs de oostrand van de Platen van Ossensisse op 12-03-2020.



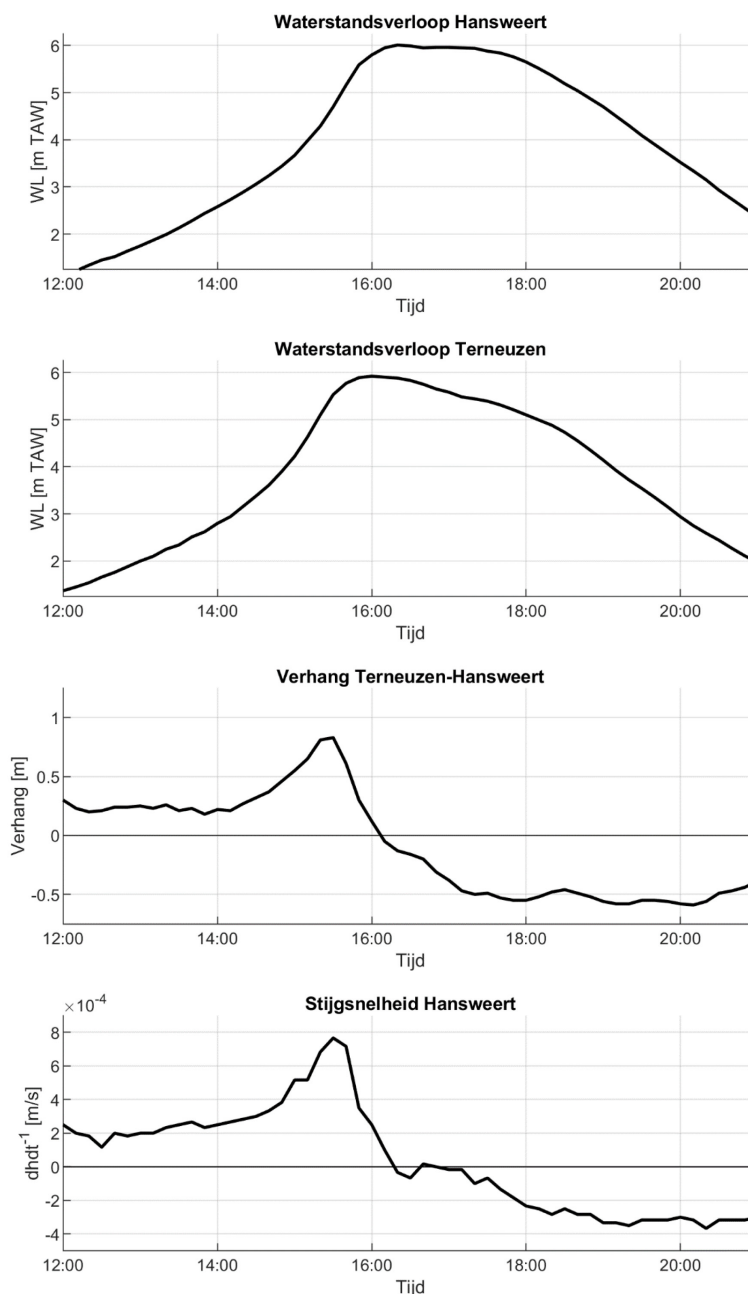
4.2 Geobserveerd waterstandsverloop

Het geanalyseerde getij in Hansweert bereikte op 12 maart 2020 om 16:20 een hoogwaterniveau van 6,01 m TAW (Figuur 5). Op dat moment was het hoogwater in Terneuzen al 20 minuten gepasseerd. Het valt op dat in Hansweert het waterpeil niet onmiddellijk daalt en gedurende meer dan 60' eerder stabiel blijft rond 6,00 m TAW, wat een uitzonderlijk verloop is.

Het verval tussen Terneuzen en Hansweert kende 50 minuten voor het hoogwater te Hansweert een piek met een waterstandsverschil van 83 cm. Volgens het door RWS gehanteerde criterium (zie: §3.3) kon

vanwege dit maximale verhang een sterke dwarsstroming verwacht worden. De stijgsnelheid in Hansweert (i.e., $dh.dt^{-1}$) kent eenzelfde verloop als het verhang tussen Terneuzen en Hansweert met een piek van $0,8 \cdot 10^{-3}$ m/s of 4,6 cm/min, eveneens 50 minuten voor het hoogwater te Hansweert (Figuur 5). Met bovenstaande gegevens kan ook de parameter cr uit het criterium van Decrop *et al.* (2009, 2010) berekend worden (zie: §3.2). Deze waarde is met 15,4 cm/min beduidend groter dan de grenswaarde van 4 cm/min waarvoor dwarsstromingen groter dan 0,8 m/s verwacht mogen worden.

Figuur 5 – Geobserveerd waterstandsverloop te Hansweert en Terneuzen, alsmede het verhang tussen beide stations en de stijgsnelheid te Hansweert, voor het geanalyseerde getij van 12 maart 2020.



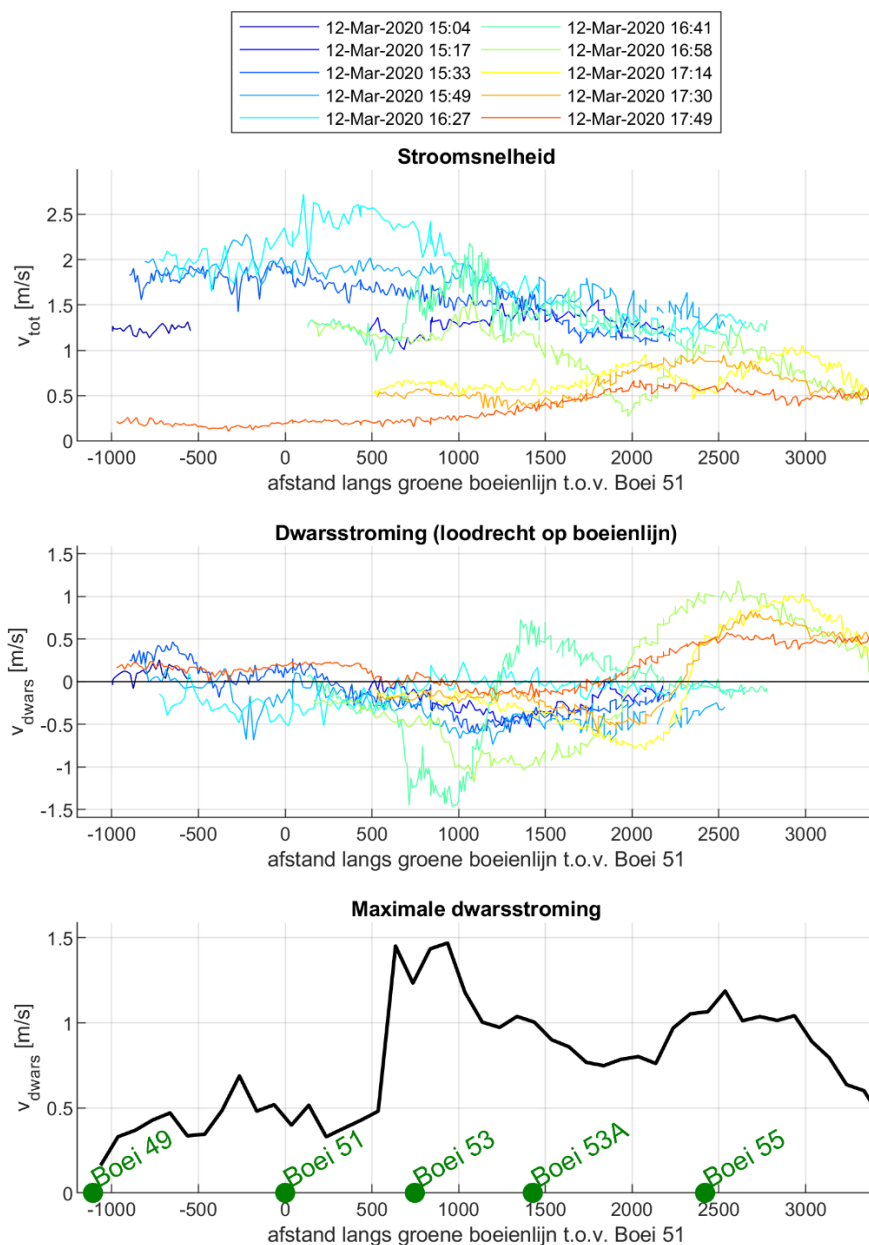
4.3 Geobserveerde stroomsnelheden

Figuur 6 toont per gevaren transect de geobserveerde dieptegemiddelde stroomsnelheden en de dwarscomponent (i.e., loodrecht op de groene boeienlijn) van deze stroomsnelheden, alsmede de maximale

geobserveerde dwarscomponent voor alle transecten. De posities van de gevaren snelheidsmetingen zijn hierbij geprojecteerd op de groene boeienlijn.

Uit het middenpaneel van deze figuur valt op te maken dat tussen 16:40 en 17:30 sprake is van een bi-directioneel stromingspatroon loodrecht op de groene boeienlijn. Omstreeks 16:40 is ter hoogte van Boei 53 een sterke dwarsstroming van bijna 1,5 m/s aanwezig die gericht is van het plateau richting de vaargeul. Tegelijkertijd is rondom Boei 53A een tegengestelde dwarsstroom van 0,7 m/s aanwezig die juist van de vaargeul richting de plaat gericht is. De simultane dwarsstromingen in tegengestelde richting duiden op de aanwezigheid van een neer. Het centrum van de neer bevindt zich dan tussen Boei 53 en Boei 53A bij $x = 1200$ m in Figuur 6. In de periode die daarop volgt beweegt de neer zich in zuidelijke richting. Om 17:14 is het centrum van de neer verschoven naar Boei 55. De maximale stroming richting de vaargeul is dan ongeveer 0,7 m/s op $x = 2000$ m en de maximale dwarsstroming richting het plateau is 1,0 m/s op $x = 3000$ m. Vanaf 17:49 is er geen sprake meer van een bi-directionele stroming over het gevaren transect.

Figuur 6 – Gemeten stroomsnelheidsverloop (boven), gemeten verloop van de dwarscomponent (midden) en de maximale dwarsstroming (onder) langs de groene boeienlijn rond hoogwater tijdens de meetcampagne op 12-03-2020.



5 Modelopzet

De huidige validatie wordt uitgevoerd voor het tweedimensionale Delft3D-NeVla model van het Schelde estuarium. Een uitvoerige kalibratie van de waterbeweging in NeVla is beschikbaar in Maximova *et al.* (2009). Gedetailleerde informatie over de Delft3D software is beschikbaar in de Delft3D-FLOW user manual (Deltares, 2011).

Er worden in het kader van de validatie simulaties uitgevoerd in verschillende configuraties (i.e., met verschillende ruwheidsvelden) van het model (zie §5.5).

5.1 Modelrooster

Het originele NeVla-rooster omvat het volledige Schelde estuarium van de Noordzee, de Vlakte van de Raan, de Westerschelde, de Zeeschelde, en de getijgebonden zijrivieren (Figuur 7). De afwaartse rand van het originele NeVla-model is gelegen in de Noordzee, de opwaartse randen zijn gelegen aan de grenzen van het tijgebied. Voor de validatieruns is de afwaartse rand van het model afgesneden ter hoogte van de lijn Westkapelle – Cadzand (witte lijn op Figuur 7) om de rekentijd te reduceren en de modelkwaliteit te verhogen door het model afwaarts aan te drijven met gemeten waterstanden. 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 hoogte van het studiegebied rondom de Platen van Ossenisse bedraagt de roosterresolutie ongeveer 100 m.

Figuur 7 – Illustratie van het Delft3D-NeVla rooster met locatie van de afgeknipte rand bij Westkapelle-Cadzand (witte lijn).



5.2 Topo-bathymetrische gegevens

Voor de Westerschelde worden bathymetrische gegevens uit het jaar 2019 met een resolutie van 20 x 20 m gebruikt. Voor de hoogteligging van de Platen van Ossensisse zelf is gebruik gemaakt van LIDAR-data uit 2019 met een resolutie van 10 x 10 m. Voor de Diepe put van Hansweert is lokaal een meer recente bathymetrie van maart 2020 toegepast. In de Zeeschelde is de bathymetrische data identiek aan de data die werd gebruikt in eerder modelonderzoek naar dwarsstromingen bij de Platen van Ossensisse door Stark *et al.* (2019, 2020b). Dit houdt in dat bathymetrische data uit de periode 2011-2014 is geïmplementeerd voor de overige delen van het estuarium.

5.3 Randvoorwaarden

5.3.1 Afwaartse randvoorwaarden

De afwaartse rand van het model wordt geforceerd met gemeten waterstanden in Cadzand en Westkapelle en zijn opgelegd voor de periode van 5-3-2020 tot 13-3-2020 (Figuur 8). In dit rapport zal enkel aandacht worden besteed aan het gemeten tij op 12-3-2020. Dit is het laatste getij in Figuur 8.

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.

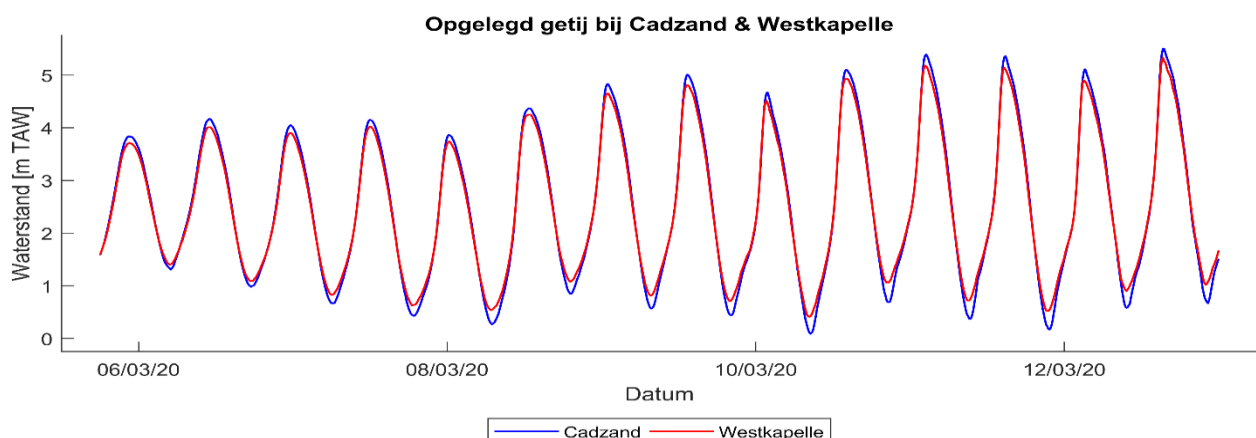
5.3.2 Opwaartse randvoorwaarden

Aan de opwaartse randen (i.e., Boven-Zeeschelde en getijgebonden zijrivieren) worden de jaargemiddelde debieten van het jaar 2009 opgelegd (Cornet, 2010) zoals opgesomd in Tabel 1. Aangezien het interessegebied hier voornamelijk de Westerschelde is, beïnvloeden de opwaartse randvoorwaarden de resultaten nauwelijks. In het studiegebied bedraagt het aandeel van de bovenafvoer minder dan 1% van de totale getijstroming (e.g. Stark *et al.* 2017).

5.3.3 Randvoorwaarden saliniteit

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

Figuur 8 – Opgelegde waterstandreeksen aan afwaartse rand.



Tabel 1 – 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 |

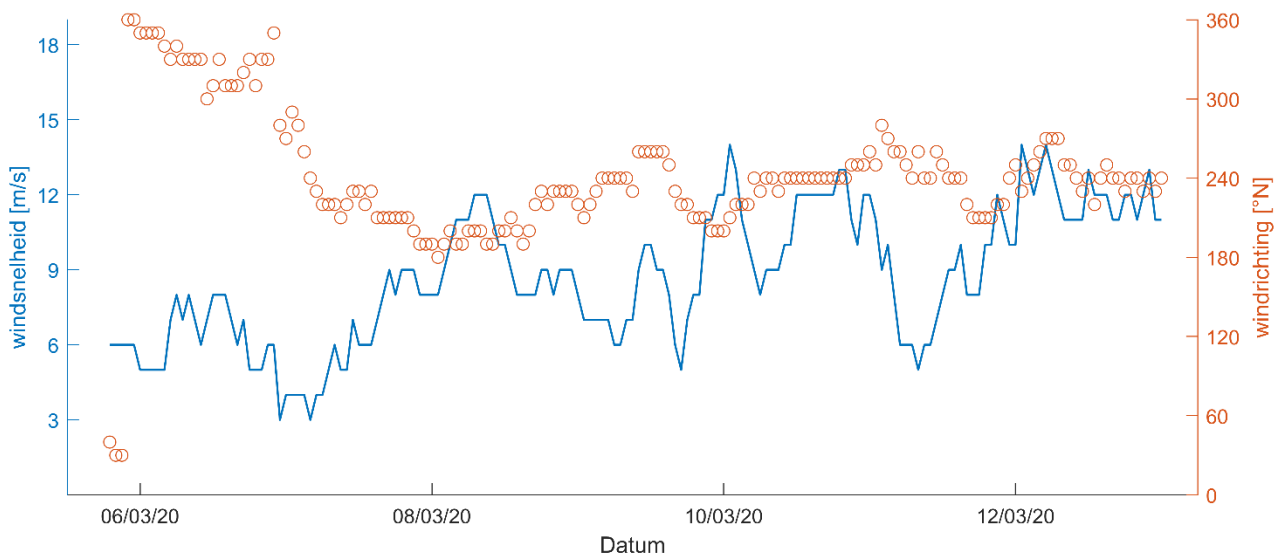
5.4 Wind

Het effect van wind is geïmplementeerd in de validatieruns. Er worden ruimtelijk constante maar temporeel variërende windkrachten- en windrichtingen geforceerd op basis van door het KNMI (i.e., Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut) gemeten uurgemiddelde winddata op 10 m hoogte voor het meetstation Hansweert. Dit betekent dat de geobserveerde winddata van Hansweert wordt toegepast op het gehele modeldomein. De opgelegde winddata wordt in Figuur 9 weergegeven voor de simulatieperiode tussen 5 en 12 maart 2020. Gedurende bijna de gehele simulatieperiode is sprake van wind uit westelijke tot zuidwestelijke richting. Het onderzochte getij ging gepaard met uurgemiddelde windsnelheden van 10-14 m/s. In het Delft3D-model werd een *wind drag coefficient* van $C_d = 0,00063$ toegepast. De schuifspanning van de wind op het wateroppervlak wordt dan berekend volgens:

$$\tau_s = \rho_a C_d (U_{10})^2$$

Hierin is τ_s de schuifspanning door wind, ρ_a de luchtdichtheid en U_{10} de windsnelheid op 10 meter hoogte.

Figuur 9 – Opgelegde windsnelheden en windrichtingen.



5.5 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; 2020b). 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. Ook wordt een combinatie van beide ruwheidsvelden getest.

5.5.1 Kalibratie in het kader van verbetering randvoorwaardenmodel NeVla

Figuur 10 toont het ruwheidsveld zoals dat werd gekalibreerd door Vanlede *et al.* (2009). 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. Uit de modelvalidatie bleek dat het NeVla model zonder verdere aanpassingen en zonder extra modules als HLES in staat is om de neervorming aan de Platen van Ossensisse te simuleren.

5.5.2 Kalibratie in het kader van 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 opnieuw gekalibreerd om gemeten stroomsnelheden en sedimenttransporten op de ondiepte tussen de Platen van Ossensisse en de Drempel van Hansweert te simuleren (Stark *et al.*, 2019). Bij deze modelkalibratie werd ook aandacht besteed aan de representatie van de neervorming op het ondiep plateau ten oosten van de Platen van Ossensisse. Na kalibratie bleek het model goed in staat het geobserveerd stroomsnelheidsverloop en het stromingsveld ten gevolge van de neervorming op het ondiep plateau te reproduceren. Op en rondom de Platen van Ossensisse was een diepte-afhankelijke verlaging van de bodemruwheid noodzakelijk om tot een betere representatie van de vloedpiek en neervorming en bijbehorende circulaire stroming te komen (zie Figuur 2). 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 $-7,5 \text{ m TAW} < z_b < -2,5 \text{ m TAW}^2$
- $n = 0,015$ voor $-2,5 \text{ m TAW} < z_b < 2,5 \text{ m TAW}$
- $n = 0,015 + 0,002 \cdot (z_b - 2,5)$ voor $z_b > 2,5 \text{ m TAW}$

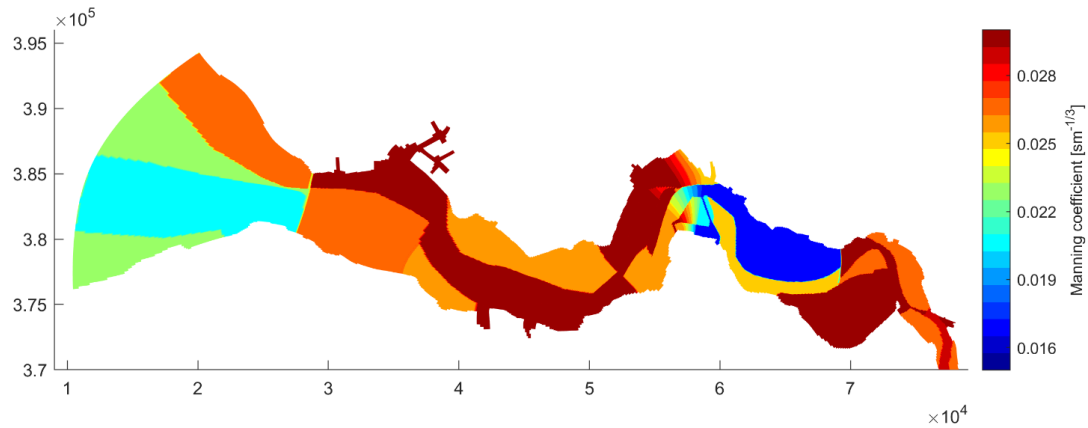
Bovenstaande schematisering van het ruwheidsveld wordt alleen toegepast op de Platen van Ossensisse en omringende ondiepe delen en plateaus omdat het ruwheidsveld enkel voor deze locatie werd gevalideerd door Stark *et al.* (2019). Voor de overige delen van het estuarium werd door Stark *et al.* (2019) 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 11.

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

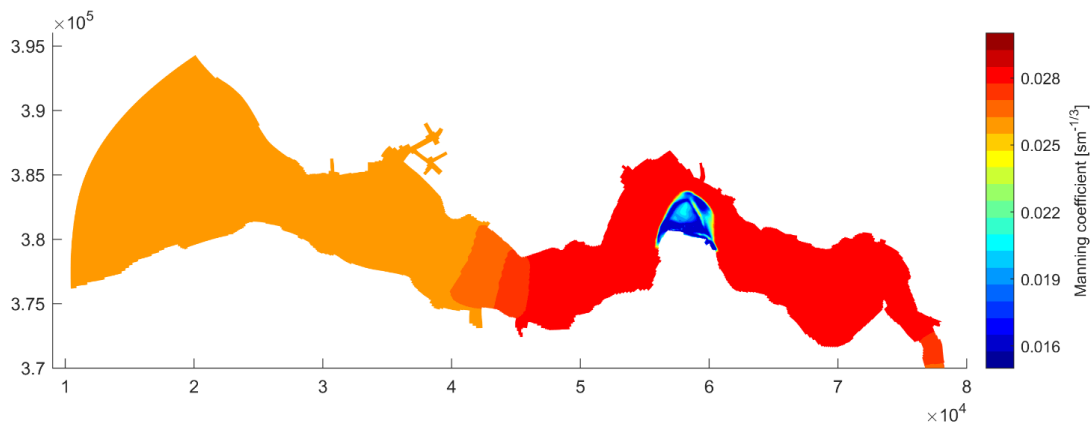
5.5.3 Gecombineerd ruwheidsveld

In het kader van deze modelvalidatie is een extra simulatie uitgevoerd waarin het door Stark *et al.* (2019) gekalibreerde ruwheidsveld werd toegepast op de Platen van Ossensisse, terwijl het door Vanlede *et al.* (2009) gekalibreerde ruwheidsveld werd toegepast op het overige deel van het estuarium, inclusief de geulen rondom de Platen van Ossensisse (Figuur 12).

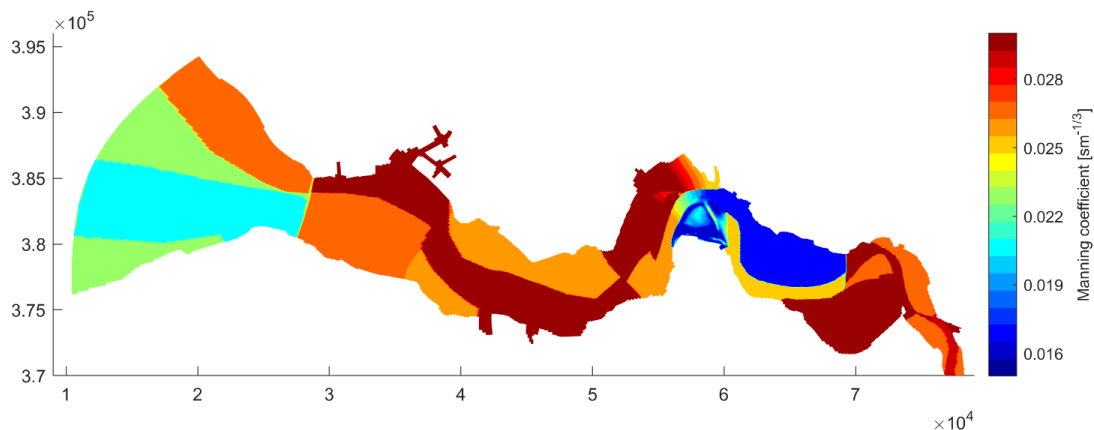
Figuur 10 – Manning’s ruwheidsveld Delft3D-NeVla model zoals gekalibreerd bij afregeling van het 2D NeVla model door Vanlede *et al.* (2009).



Figuur 11 – Manning’s ruwheidsveld Delft3D-NeVla model zoals gekalibreerd in AvdT-studie Stark *et al.* (2019).



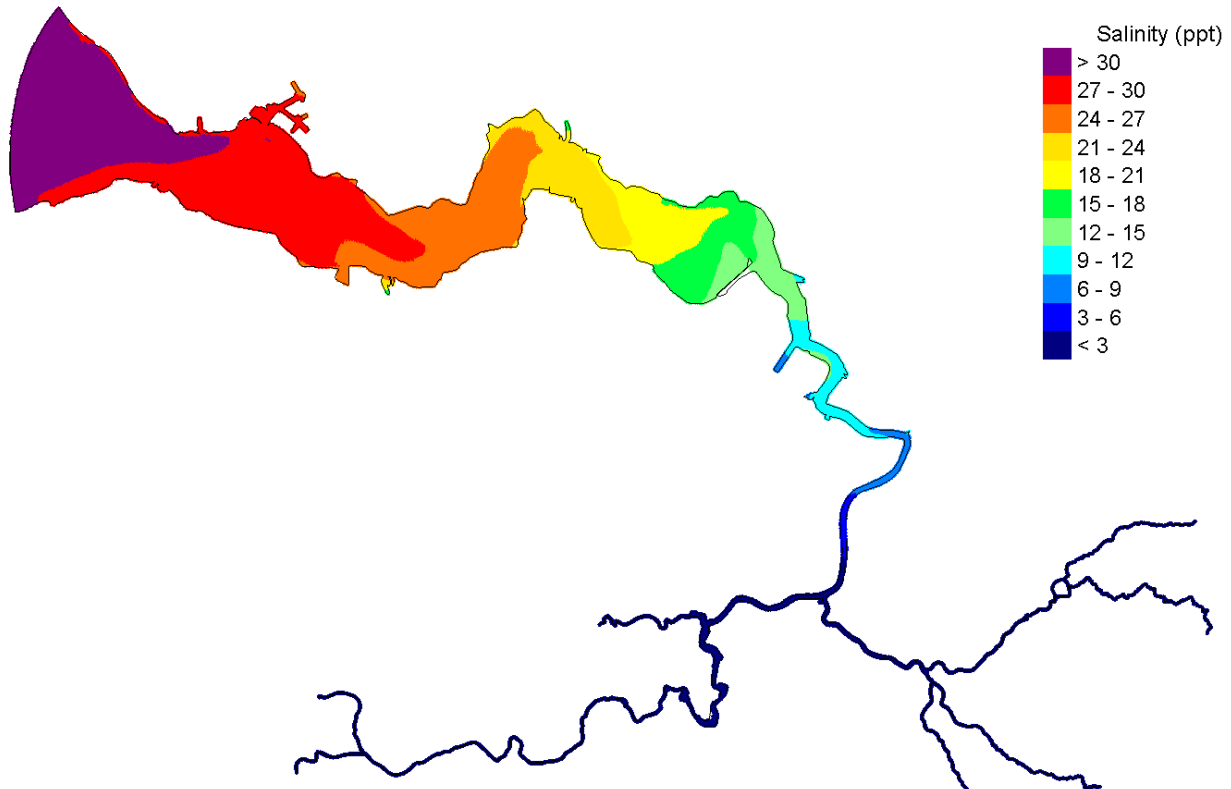
Figuur 12 – Gecombineerd Manning’s ruwheidsveld Delft3D-NeVla model voor huidige modelvalidatie.



5.6 Initieel zoutveld

In de Delft3D-NeVla simulaties wordt het initiële zoutveld geadopteerd uit de eerdere AvdT-modelstudie door Stark *et al.* (2019). Dit zoutveld wordt weergegeven in Figuur 13. De zoutmodellering zelf wordt binnen deze validatieoefening buiten scope gelaten. Er zal dus geen vergelijking plaatsvinden tussen geobserveerde en gemodelleerde saliniteitswaarden langs het estuarium. De saliniteitsgradiënt in het estuarium heeft vanwege densiteitseffecten wel een beperkte invloed op de gemodelleerde waterstanden.

Figuur 13 – Initieel saliniteitsveld in Delft3D-NeVla.



5.7 Overige modelinstellingen

De overige modelinstellingen voor het tweedimensionale Delft3D-NeVla model zijn opgesomd in Tabel 2.

Tabel 2 – Basisinstellingen Delft3D-NeVla model

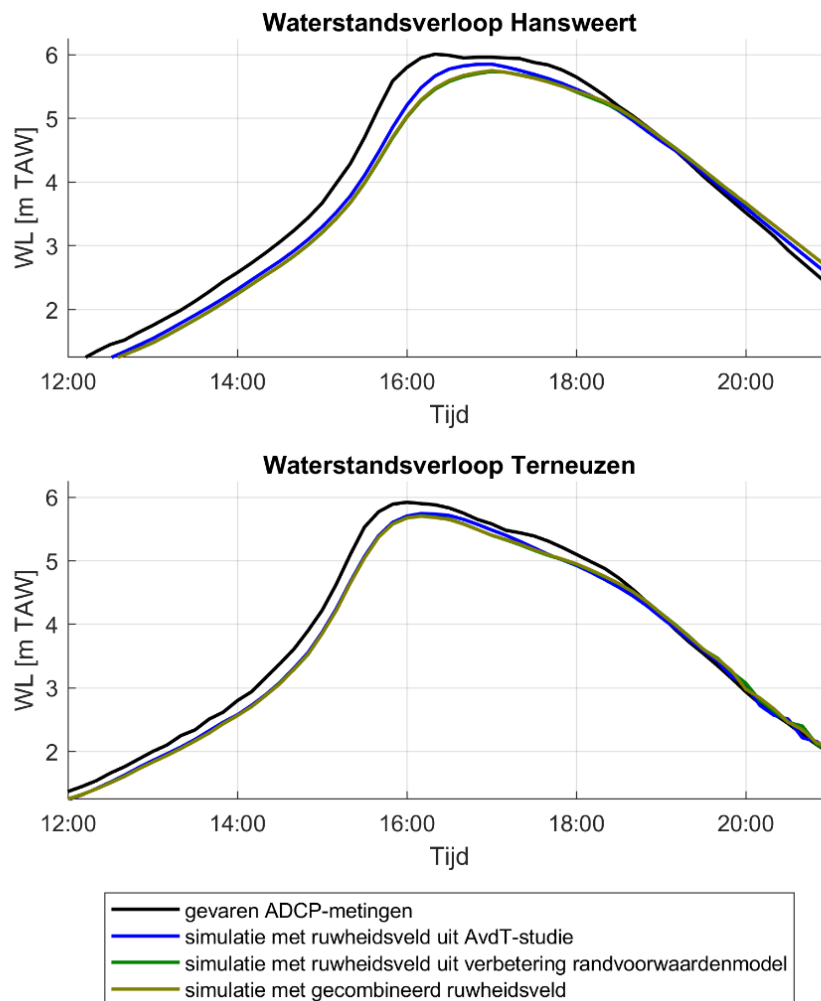
| Parameter | Waarde |
|--|------------------------|
| Time step | 0,05 min |
| Salinity | True |
| Sediment | False |
| Secondary Flow | True |
| Feedback of secondary flow onto main flow | False |
| Reflection parameter | 100 s ² |
| Gravity | 9,81 m/s ² |
| Water density | 1023 kg/m ³ |
| Air density | 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

6.1 Gemodelleerd waterstandsverloop

Figuur 14 toont het geobserveerde en gesimuleerde waterstandsverloop te Hansweert en Terneuzen voor het geanalyseerde getij op 12 maart 2020. Deze visuele vergelijking tussen model en observatie toont aan dat de hoogwaterstand voor dit specifieke getij in het studiegebied wordt onderschat in beide modelsimulaties. De onderschatting van de hoogwaterstand in Hansweert bedraagt respectievelijk -0,16 m en -0,27 m voor de simulaties met het ruwheidsveld uit eerder AvdT-onderzoek door Stark *et al.* (2019) en het ruwheidsveld zoals gekalibreerd tijdens de verbetering van het NeVla randvoorwaardenmodel door Vanlede *et al.* (2009). Ook wordt het hoogwater voor dit getij ongeveer 40 minuten later voorspeld door beide modellen. Een dergelijke faseverschuiving van de getijgolf is ook visueel waarneembaar in Figuur 14, waarbij de gemodelleerde vertraging iets groter is in de simulatie waarin het NeVla ruwheidsveld uit Vanlede *et al.* (2009) werd toegepast dan in de simulatie met het tijdens de AvdT-studies gekalibreerde ruwheidsveld.

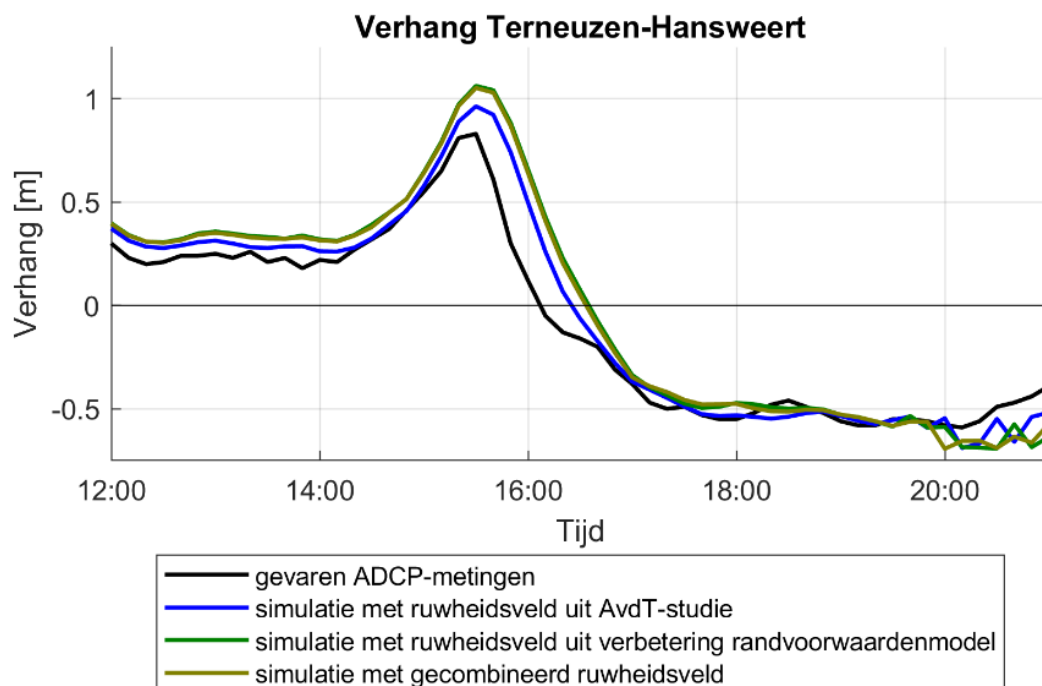
Figuur 14 – Geobserveerd en gemodelleerd waterstandsverloop te Hansweert en Terneuzen op 12-03-2020.



Verhang tussen Terneuzen en Hansweert

Figuur 15 toont het geobserveerde en gemodelleerde verhang tussen Terneuzen en Hansweert voor het geanalyseerde getij van 12 maart 2020. Het verloop van dit verhang over het getij is gelijkaardig tussen de simulaties en de gemeten waterstandsverschillen. De piek in het verhang die ongeveer één uur voor hoogwater plaatsvindt, wordt in de simulaties echter overschat. Waar een maximaal verhang van 0,83 m werd geobserveerd, is het maximale verhang in de simulaties 0,96 m als het ruwheidsveld uit de eerdere AvdT-studie wordt gebruikt en 1,05 m als het ruwheidsveld uit de modelverbetering door Vanlede *et al.* (2009) wordt toegepast. Uit Figuur 14 blijkt dat de overschatting van het verhang vooral te wijten is aan een onderschatting van de snelheid van de getijvoortplanting tussen Terneuzen en Hansweert (i.e., het faseverschil tussen gemodelleerde en gemeten waterstanden is groter in Hansweert dan in Terneuzen).

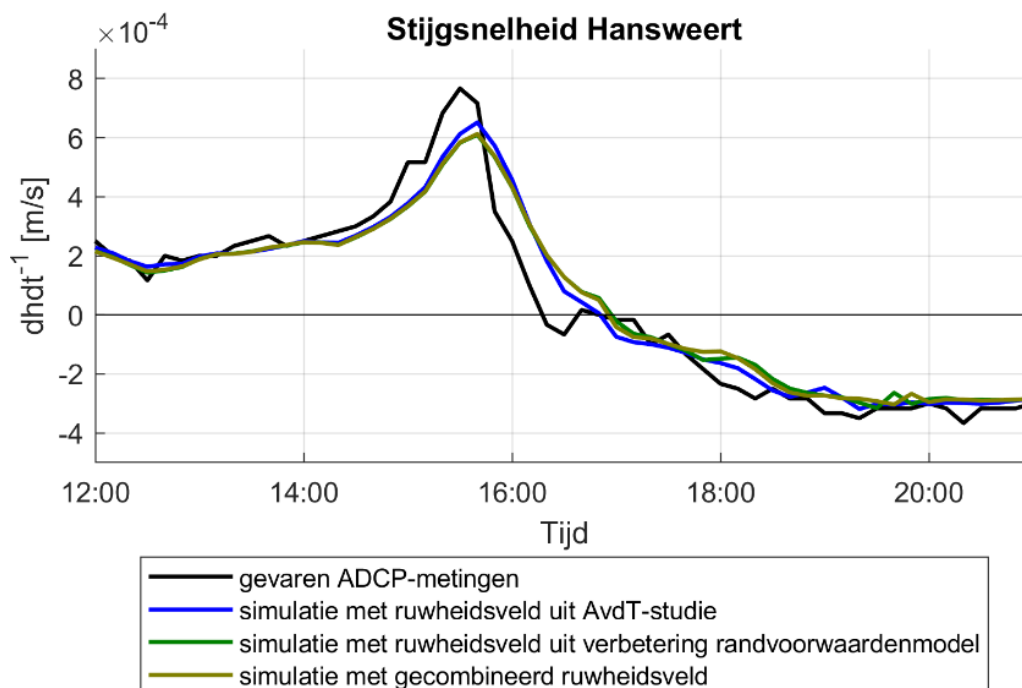
Figuur 15 – Geobserveerd en gemodelleerd verhang tussen Terneuzen en Hansweert op 12-03-2020.



Stijgsnelheid te Hansweert

Figuur 16 toont de geobserveerde en gemodelleerde stijgsnelheid te Hansweert. Het verloop van deze stijgsnelheid is gelijkaardig tussen de waterstandsmetingen en de modelresultaten. In tegenstelling tot het verhang tussen Terneuzen en Hansweert, wordt de piek in het verloop ongeveer één uur voor het hoogwater in Hansweert echter onderschat door de modellen. Dit is wederom het gevolg van een onderschatting van de voortplantingssnelheid van het onderzochte getij afwaarts van Hansweert. De geobserveerde maximale stijgsnelheid te Hansweert bedroeg $7,6 \cdot 10^{-4}$ m/s, terwijl de gemodelleerde maximale stijgsnelheden $6,1 \cdot 10^{-4}$ m/s en $6,5 \cdot 10^{-4}$ m/s bedragen voor respectievelijk de simulaties met het ruwheidsveld uit de verbetering van het randvoorwaardenmodel door Vanlede *et al.* (2009) en de simulatie met het ruwheidsveld dat in het kader van de AvdT-studie door Stark *et al.* (2019) werd gekalibreerd.

Figuur 16 – Geobserveerde en gemodelleerde stijgsnelheid te Hansweert op 12-03-2020.



Criterium Decrop *et al.* (2009, 2010)

Op basis van bovenstaande analyse van het gesimuleerd waterstandsverloop kan op basis van de hoogwaterstand en de maximale stijgsnelheid in Hansweert ook de parameter cr uit het criterium van Decrop *et al.* (2009, 2010) berekend worden (zie §3.2). Uit de waterstandsmetingen werd in Hoofdstuk 4 al een waarde van $cr = 15,4$ cm/min berekend voor dit getij. Als het ruwheidsveld uit de AvdT-studie door Stark *et al.* (2019) wordt gebruikt volgt uit de berekening dat $cr = 12,6$ cm/min. Als het ruwheidsveld uit de verbetering van het NeVla randvoorwaardenmodel door Vanlede *et al.* (2009) wordt gebruikt volgt uit de berekening dat $cr = 11,5$ cm/min. In alle modelsimulaties wordt cr dus onderschat. Er is wel steeds sprake van een overschrijding van de grenswaarde van 4 cm/min, op basis waarvan een sterke dwarsstroming mag worden verwacht.

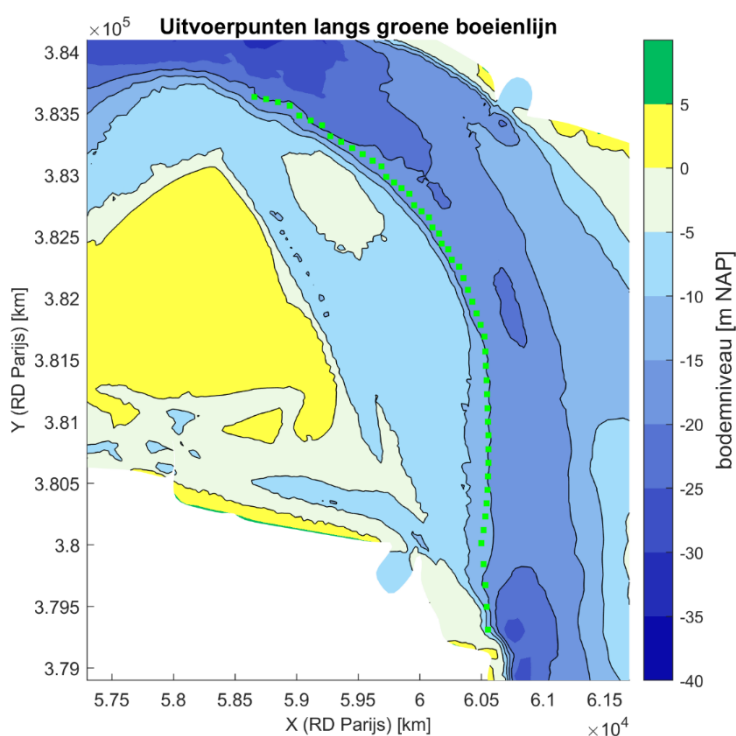
6.2 Gemodelleerd stroomsnelheidsverloop

De gesimuleerde stroomsnelheden en dwarscomponenten (i.e., loodrecht op de groene boeienlijn) ter hoogte van de groene boeienlijn (zie Figuur 17) worden in Figuur 18, Figuur 19 en Figuur 20 weergegeven voor de drie uitgevoerde modelsimulaties. Deze uitvoerpunten liggen zo dicht mogelijk bij de daadwerkelijke positie van de groene boeienlijn, terwijl de gevaren transecten tijdens de meetcampagne in de vaargeul op een afstand variërend van 300-800 m van de boeienlijn werden opgemeten (zie: Figuur 4). Figuur 21 toont de maximale geobserveerde en gesimuleerde dwarsstromingen langs de groene boeienlijn tezamen in één figuur.

Vanwege het grote faseverschil (i.e., ongeveer 40 minuten) tussen het gemeten en gesimuleerde waterstandsverloop en stroomsnelheidsverloop zijn individuele vergelijkingen tussen meting en model per gevaren transect (i.e., per tijdstap) niet zinvol. Er worden derhalve geen figuren getoond waarin voor ieder transect de gesimuleerde snelheidscomponenten worden vergeleken met de metingen.

Aanvullend worden in Bijlage A (Figuur 22 - Figuur 42) wel de gesimuleerde stroomvelden rondom hoogwater tussen 16:20 en 18:20 weergegeven voor de drie modelsimulaties.

Figuur 17 – Uitvoerpunten modelsimulaties.



Simulatie met ruwheidsveld uit AvdT-studie door Stark *et al.* (2019)

In de modelsimulatie waarin de bodemruwheid uit de AvdT-studie door Stark *et al.* (2019) werd geïmplementeerd is de bi-directionele dwarsstroming zwakker en meer noordelijk gesitueerd ten opzichte van de meetcampagne (Figuur 18). Er wordt een bi-directionele stroming van meer dan 0,40 m/s langs de groene boeienlijn gesimuleerd tussen 17:10 en 17:50. De maximale dwarsstroming wordt dan om 17:40 gemodelleerd met dwarssnelheden van ongeveer 0,90 m/s richting de vaargeul bij Boei 51 en 0,70 m/s richting de plaat bij Boei 53. De relatief sterke dwarscomponent van de stroomsnelheid ten zuiden van Boei 55 is in deze simulatie niet gerelateerd aan neervorming aangezien er geen sprake is van bi-directionele stroming.

Uit de gesimuleerde stroomvelden in Bijlage A volgt dat de bi-directionele dwarsstroming inderdaad het gevolg is van een neer die rond hoogwater ontstaat in dit gebied. Deze neer ontstaat boven het ondiepe plateau rond 16:20 (Figuur 22). Vervolgens beweegt de neer onder invloed van de vloedstroom in de vaargeul eerst in zuidelijke richting (Figuur 23) en daarna oostwaarts richting de vaargeul (Figuur 24, Figuur 25 en Figuur 26). Omstreeks 17:00 bereikt de neer dan de vaargeul aan de oostkant van het ondiepe plateau. Na omkering van de stroomrichting in de vaargeul verliest de neer aan kracht en houdt de circulaire stroming snel op te bestaan (Figuur 28).

Simulatie met ruwheidsveld uit verbetering NeVla randvoorwaardenmodel door Vanlede *et al.* (2009)

Figuur 19 toont de gemodelleerde stroomsnelheden en dwarsstromingen voor de modelsimulatie waarin de bodemruwheid uit de modelstudie voor verbetering van het NeVla model door Vanlede *et al.* (2009) werd gebruikt. Tussen 17:20 en 18:20 is in deze simulatie sprake van een bi-directionele stroming. De maximale bi-directionele dwarsstroming ten gevolge van neervorming vindt eveneens plaats om 17:40. De dwarscomponent is dan 0,90 m/s richting de vaargeul bij Boei 53 en bijna 1,20 m/s richting de plaat tussen Boei 53A en Boei 55. Daarmee is de gesimuleerde dwarsstroming sterker en zuidelijker gesitueerd dan in de simulatie met het bodemruwheidsveld uit de AvdT-studie door Stark *et al.* (2019). In vergelijking met de geobserveerde maximale dwarsstroming van bijna 1,50 m/s is de dwarscomponent die richting de vaargeul is gericht bij Boei 53/53A echter te zwak. Bovendien was in de gevaren transecten de dwarsstroming naar de vaargeul toe bij Boei 53 sterker dan de dwarscomponent naar de plaat toe bij Boei 55.

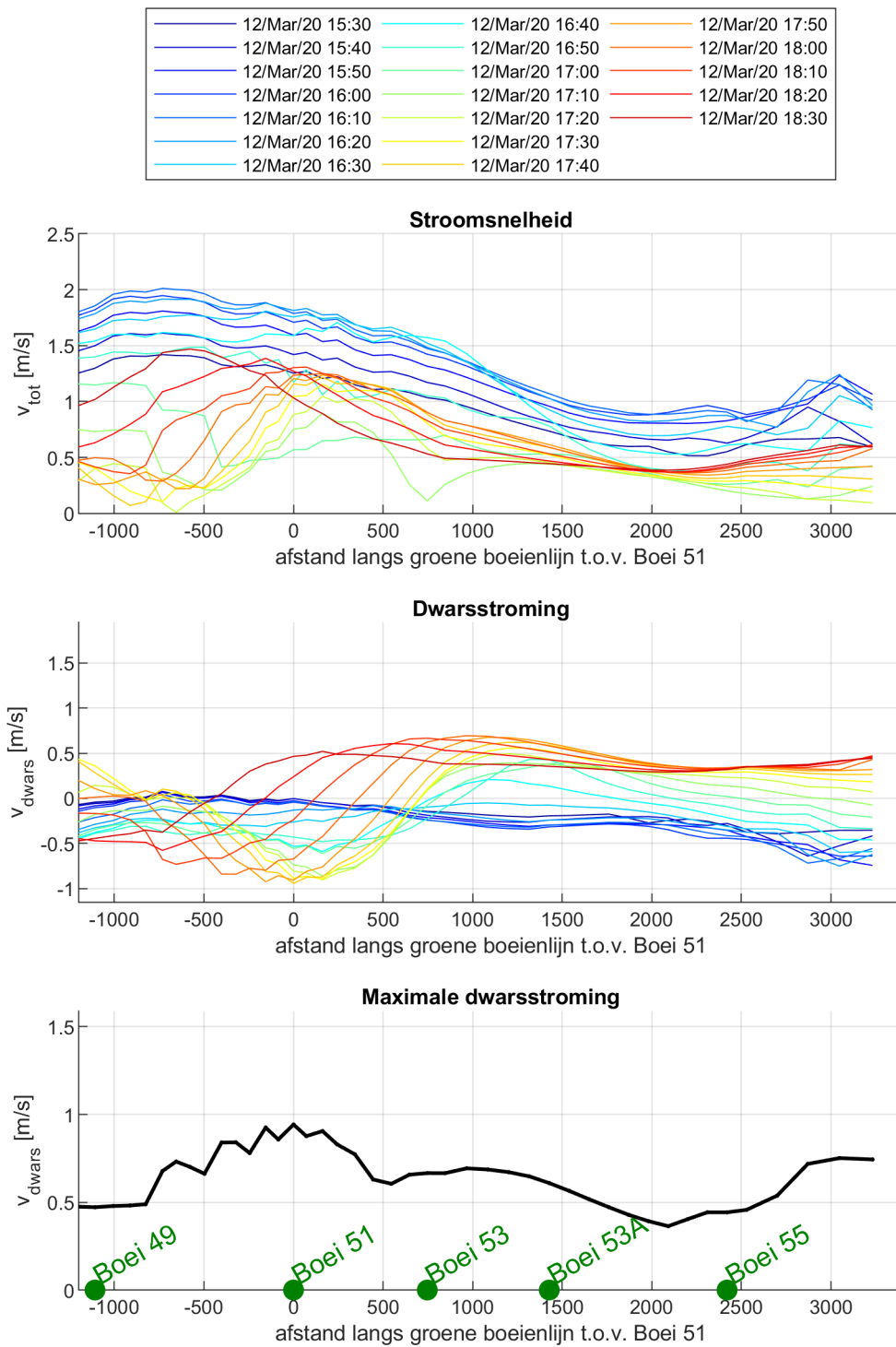
Uit de gesimuleerde stroomvelden in Bijlage A volgt dat de neer in dit gebied rond 16:20 ontstaat boven het ondiepe plateau (Figuur 29). Het circulair stromingspatroon beweegt vervolgens richting het zuidoosten, maar is in deze simulatie meer langgerekt (Figuur 30 en Figuur 31). Rond 17:40 bevindt de neer zich aan de zuidoostkant van de Platen van Ossenissee (Figuur 33). Op dat moment is de bi-directionele dwarsstroming bij de groene boeienlijn maximaal en bevindt de neer zich meer zuidelijk ten opzichte van de simulatie met het ruwheidsveld uit de AvdT-studie door Stark *et al.* (2019). Daarmee komt de locatie van de neer en de maximale dwarsstroming beter overeen met de observaties. Net als in de vorige simulatie verdwijnt de neer na omkering van de stroomrichting in de vaargeul (Figuur 35).

Simulatie met samengesteld ruwheidsveld

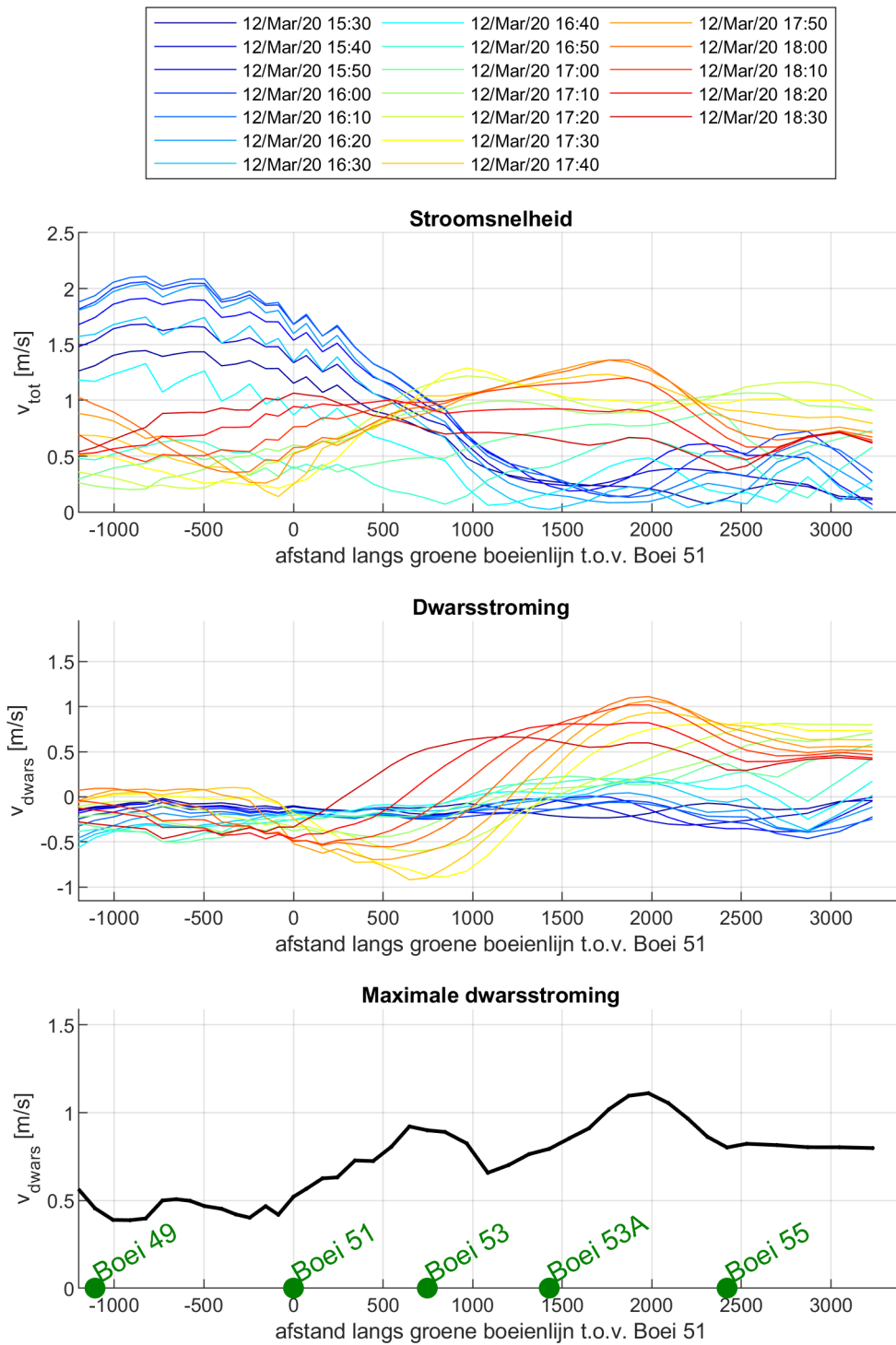
Figuur 20 toont de gemodelleerde stroomsnelheden en dwarsstromingen voor de modelsimulatie waarin een samengesteld bodemruwheidsveld (zie §5.5.3) is gebruikt. Tussen 16:30 en 18:30 is sprake van een bi-directionele stroming. In deze simulatie is de maximale dwarsstroming bij Boei 51/53 die naar de vaargeul is gericht om 17:30 al iets eerder aanwezig. Deze dwarscomponent is met 1,00 m/s wel iets sterker dan in de eerder genoemde simulaties. De maximale dwarsstroming tussen Boei 53A en Boei 55 is om 17:40 aanwezig en heeft een sterkte van ongeveer 1,10 m/s. In deze simulatie zijn de dwarscomponenten die van en naar de vaargeul zijn gericht dus meer gelijkaardig aan elkaar. De geobserveerde maximale dwarsstroming wordt echter ook in deze simulatie onderschat.

De gesimuleerde stroomvelden in Bijlage A laten zien dat ook in deze simulatie de waterstandsdepressie en de neer rond 16:20 ontstaan boven het ondiepe plateau tussen de Platen van Ossenissee en de Drempeel van Hansweert (Figuur 36). De neer beweegt wederom in zuidoostelijke richting en bereikt rond 16:40 de vaargeul (Figuur 37), waar de vloedstroom de neer nog enkele honderden meters in zuidelijke richting duwt (Figuur 39 en Figuur 40). Na omkering van de stroomrichting verliest de neer aan kracht om uiteindelijk te verdwijnen (Figuur 41 en Figuur 42).

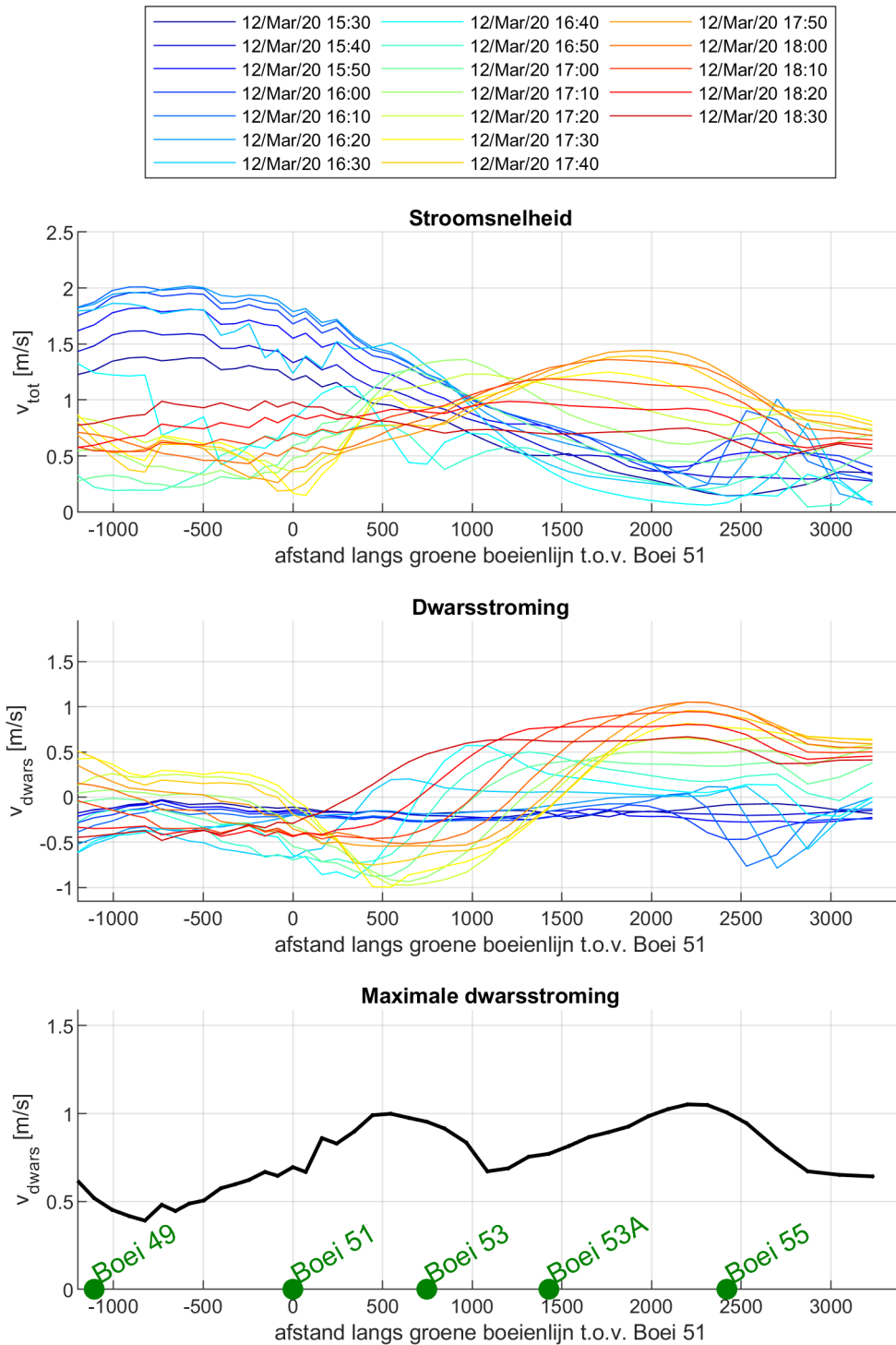
Figuur 18 – Gemodelleerd stroomsnelheidsverloop (boven), de dwarscomponent (midden) en de maximale dwarsstroming (onder) langs de groene boeienlijn rond hoogwater voor het onderzochte getij op 12-03-2020 met ruwheidsveld uit AvdT-studies naar sedimenttransport rondom de drempel van Hansweert.



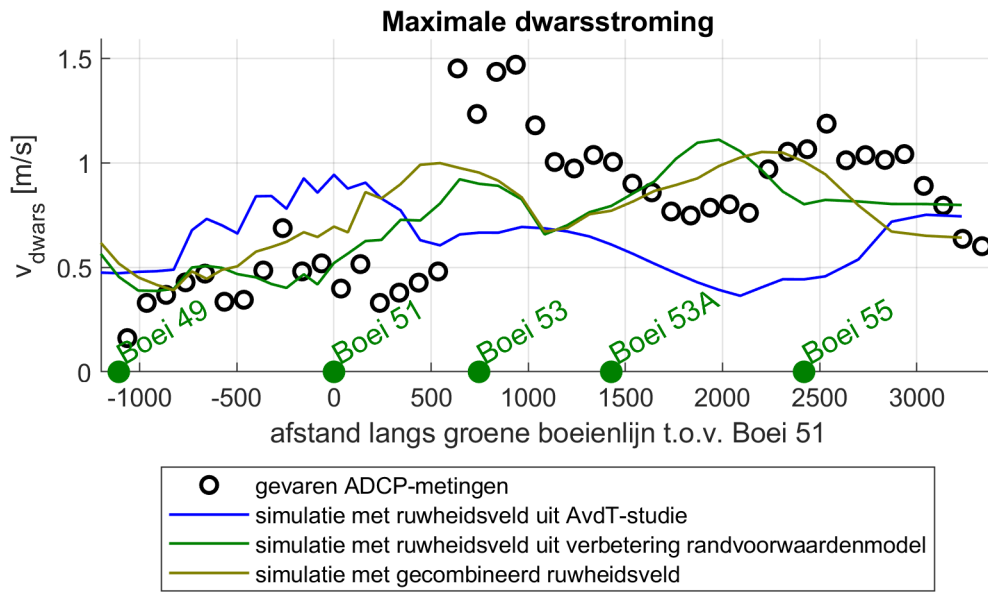
Figuur 19 – Gemodelleerd stroomsnelheidsverloop (boven), de dwarscomponent (midden) en de maximale dwarsstroming (onder) langs de groene boeienlijn rond hoogwater voor het onderzochte getij op 12-03-2020 met ruwheidsveld uit de verbetering van het NeVla randvoorwaardenmodel.



Figuur 20 – Gemodelleerd stroomsnelheidsverloop (boven), de dwarscomponent (midden) en de maximale dwarsstroming (onder) langs de groene boeienlijn rond hoogwater voor het onderzochte getij op 12-03-2020 met gecombineerd ruwheidsveld.



Figuur 21 – Geobserveerde en gemodelleerde maximale dwarsstromingen langs de groene boeienlijn.



7 Conclusies

In deze studie is de modelprestatie van het Delft3D-NeVla model onderzocht voor de representatie van de (hinderlijke) dwarsstromingen als gevolg van neervorming aan de oostzijde van de Platen van Ossenissee. Hiervoor is het numeriek model met verschillende gekalibreerde ruwheidsvelden getest. Deze ruwheidsvelden werden in het kader van de verbetering van het randvoorwaardenmodel (Vanlede *et al.*, 2009; 2015) en in het kader van modelonderzoek binnen de Agenda voor de Toekomst (Stark *et al.*, 2019; 2020a) geoptimaliseerd. In beide configuraties is het model in staat de belangrijke fysische processen, waaronder de neervorming en bijbehorende stromingspatronen rond de Platen van Ossenissee, te reproduceren. Het model werd gevalideerd voor geobserveerde dwarsstromingen tijdens een meetcampagne bestaande uit gevaren ADCP-transecten die plaatsvond op 12 maart 2020. Tijdens de meetcampagne werden in een gebied aan de zuidoostzijde van de Platen van Ossenissee, tussen Boei 53 en Boei 55, sterke bi-directionele dwarsstromingen (i.e., loodrecht op de vaarrichting) tot maximaal 1,5 m/s geobserveerd.

De locatie van de neer en de maximale geobserveerde dwarsstroming tijdens de meetcampagne op 12 maart 2020 is meer zuidelijk gelegen dan voor het door Stark *et al.* (2020b) geanalyseerde springtij van 4 maart 2018 toen de maximale dwarsstroming optrad tussen Boei 51 en Boei 53A. Het is niet duidelijk of deze verschuiving in ligging van de neer een algemene ontwikkeling is als gevolg van morfologische veranderingen of dat het verklaard kan worden door variatie in het getij. Uit scenario-onderzoek door Stark *et al.* (2020b) bleek wel dat morfologische veranderingen op de Platen van Ossenissee invloed hebben op de exacte ligging van de neer en daarmee op de intensiteit van de dwarsstroming in de vaargeul. Echter, het verloop van het getij op de meetdag wijkt af van het klassieke verloop, waarbij vooral het stabiel blijven van de waterstand rond hoogwater opvalt. Dit is eveneens een mogelijke verklaring van het minder reproduceren van neer.

Uit de huidige validatieoefening volgt dat het hoogwaterniveau in Hansweert voor het geanalyseerde getij op 12 maart 2020 in de modelsimulaties met -0,16 tot -0,27 m wordt onderschat afhankelijk van het toegepaste ruwheidsveld. Ook de maximale stijgsnelheid in Hansweert kort voor hoogwater wordt met 15-20% onderschat. Hetzelfde geldt voor de voorspeellende parameter cr die door Decrop *et al.* (2009, 2010) werd geïntroduceerd. Het maximale verhang tussen Terneuzen en Hansweert wordt in de simulaties juist overschat door een tragere voorplantingssnelheid van het getij tussen deze stations.

De geobserveerde maximale dwarsstromingen worden met 25-40% onderschat door het Delft3D NeVla model, ongeacht welk van de eerder gekalibreerde ruwheidsvelden wordt gebruikt. Deze onderschatting zou deels verklaard kunnen worden door de afwijkingen in de representatie van het geanalyseerde getij die hierboven zijn aangekaart. Als het ruwheidsveld uit het eerdere AvdT-onderzoek door Stark *et al.* (2019) wordt gebruikt dan wordt de neer bovendien te noordelijk weergegeven in vergelijking met de geobserveerde locatie van de dwarsstromingen. Hierbij wordt wel opgemerkt dat het model in deze configuratie eerder in staat is gebleken geobserveerde hoge vloedpieken op het ondiepe plateau als gevolg van neervorming en reguliere vloedstroming goed te reproduceren. Als het ruwheidsveld uit de kalibratie van het 2D NeVla randvoorwaardenmodel door Vanlede *et al.* (2009) wordt gebruikt is de locatie van de neer en de dwarsstromingen wel meer zuidelijk langs de groene boeienlijn en daarmee beter in overeenstemming met de realiteit. Het circulair stromingspatroon heeft tijdens de neervorming dan een langgerechter patroon. Wel wordt de maximale dwarsstroming dan ten zuiden van Boei 53A en naar de plaat toe gericht gemodelleerd, terwijl deze in werkelijkheid nabij Boei 53 en naar de vaargeul toe gericht werd geobserveerd. Tot slot is ook een samengesteld ruwheidsveld uitgetoet, met de bodemruwheid uit Stark *et al.* (2019) op de Platen van Ossenissee en die uit Vanlede *et al.* (2009) in de rest van het modeldomein. In deze simulatie wordt een lichte verhoging van de gesimuleerde dwarsstroming richting de vaargeul nabij Boei 53 gemodelleerd, wat neerkomt op een kleine verbetering ten opzichte van de andere validatieruns. In alle uitgevoerde modelsimulaties geldt dat er voor het onderzochte getij sprake is van een vertraging van bijna

40 minuten ten opzichte van het geobserveerde waterstandsverloop en stroomsnelheidsverloop (inclusief de dwarsstroming).

Er kan geconcludeerd worden dat het tweedimensionale Delft3D NeVla model met het bodemruweheidsveld uit de afregeling van het randvoorwaardenmodel of met het nieuwe samengestelde ruweheidsveld het best in staat is de neer en bijbehorende dwarsstromingen te reproduceren. Kwantitatief is echter sprake van aanzienlijke verschillen tussen de gesimuleerde en gemeten dwarsstroming, die het gevolg zouden kunnen zijn van het onderschatten van het hoogwaterniveau bij Hansweert, van het onderschatten van de intensiteit van de neer of van een verschuiving van de positie van de neer. Eerder modelonderzoek door Stark *et al.* (2020) toonde bijvoorbeeld aan dat een relatief kleine verschuiving in de positie van de neer tot grote kwantitatieve verschillen in dwarsstroming op bepaalde locaties in het studiegebied kan leiden. Daarom wordt aanbevolen om modelresultaten omtrent de dwarsstroming bij de Platen van Ossensisse in kwantitatief opzicht nog met voorzichtigheid te interpreteren.

8 Referenties

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.

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

Maximova, T.; Ides, S.; De Mulder, T.; Mostaert, F. (2009). 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.

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

Stark, J.; Meire, P.; Temmerman, S. (2017). Changing tidal hydrodynamics during different stages of eco-geomorphological development of a tidal marsh: A numerical modeling study. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 188, 56–68. doi:10.1016/j.ecss.2017.02.014

Stark, J.; Vandenbruwaene, W.; De Maerschalck, 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.; De Maerschalck, B.; Plancke, Y.; Mostaert, F. (2020a). Sedimenttransport op verschillende tijdschalen: Deelrapport 3 – Modelleren van hydro- en morfodynamische processen in de Westerschelde met Telemac: Scenario's in het kader van gevoeligheidsanalyse numeriek model. Versie 1.0. WL Rapporten, 17_088_3. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

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

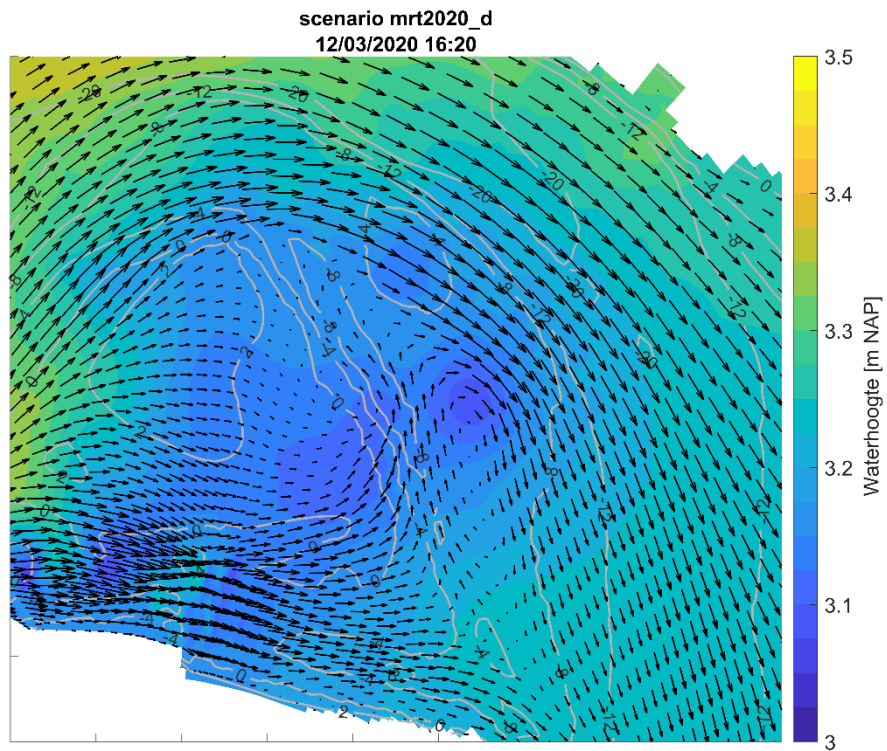
Vanlede, J.; Delecluyse, K.; Primo, B.; Verheyen, B.; Leyssen, G.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2015). Verbetering randvoorwaardenmodel: Subreport 7 - Calibration of NEVLA 3D. Version 4.0. WL Rapporten, 00_018. Flanders Hydraulics Research & IMDC: Antwerp, Belgium.

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.

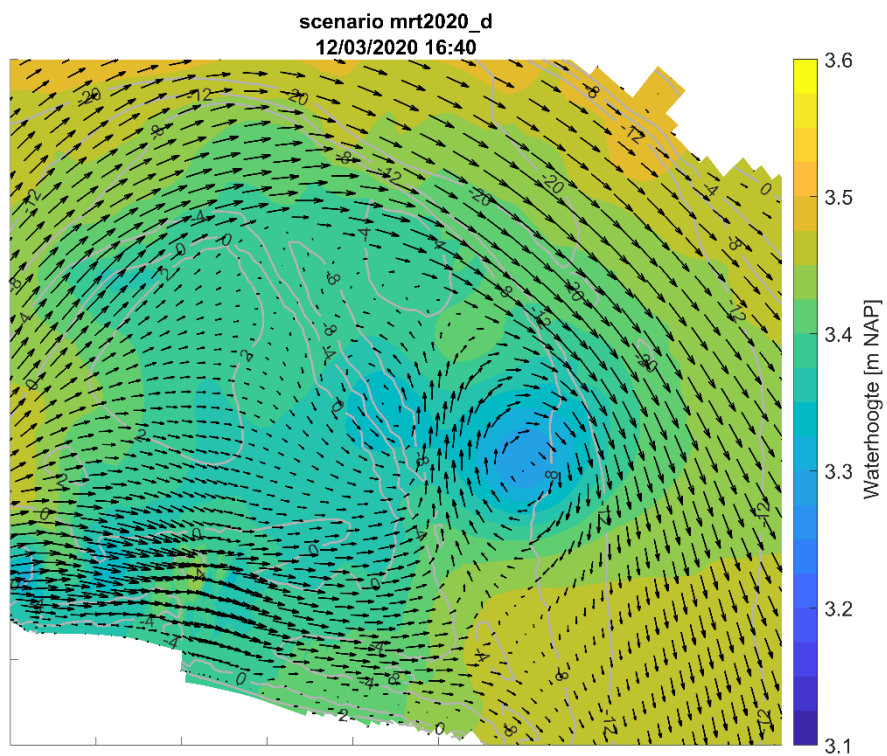
Bijlage A

Simulatie met ruwheidsveld uit AvdT-studie door Stark *et al.* (2019)

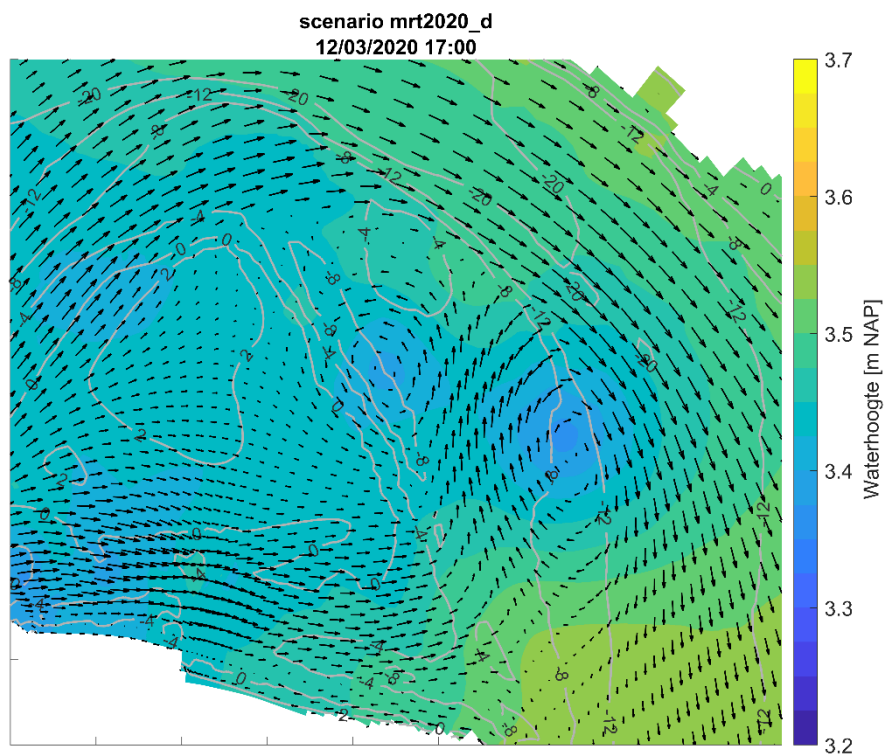
Figuur 22 – Gesimuleerd stromingsveld met bodemruwheidsveld uit AvdT-studies Stark *et al.* (2019) om 16:20



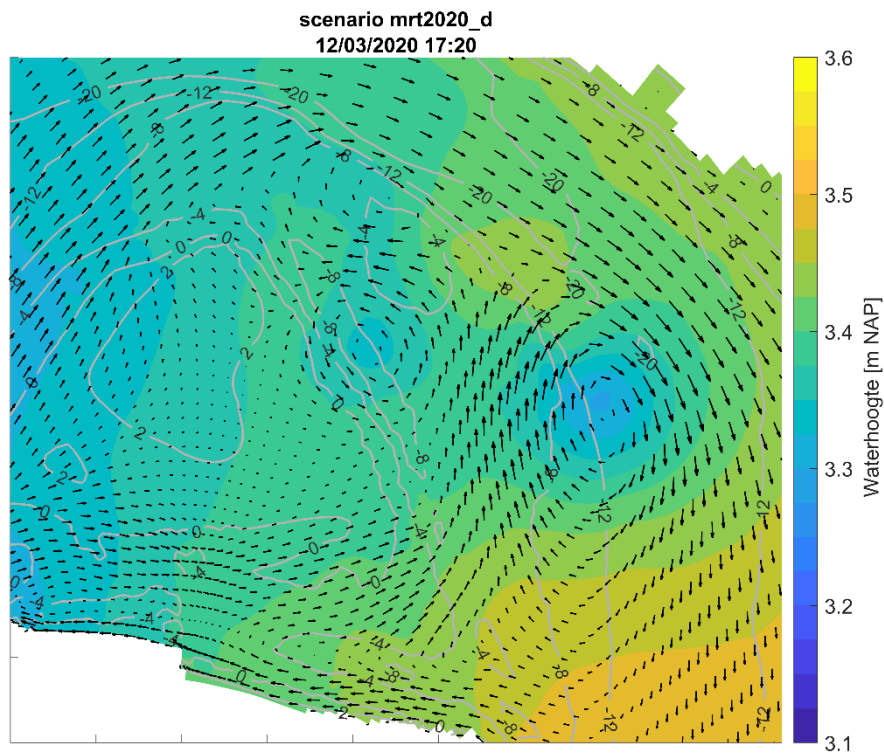
Figuur 23 – Gesimuleerd stromingsveld met bodemruwheidsveld uit AvdT-studies Stark *et al.* (2019) om 16:40



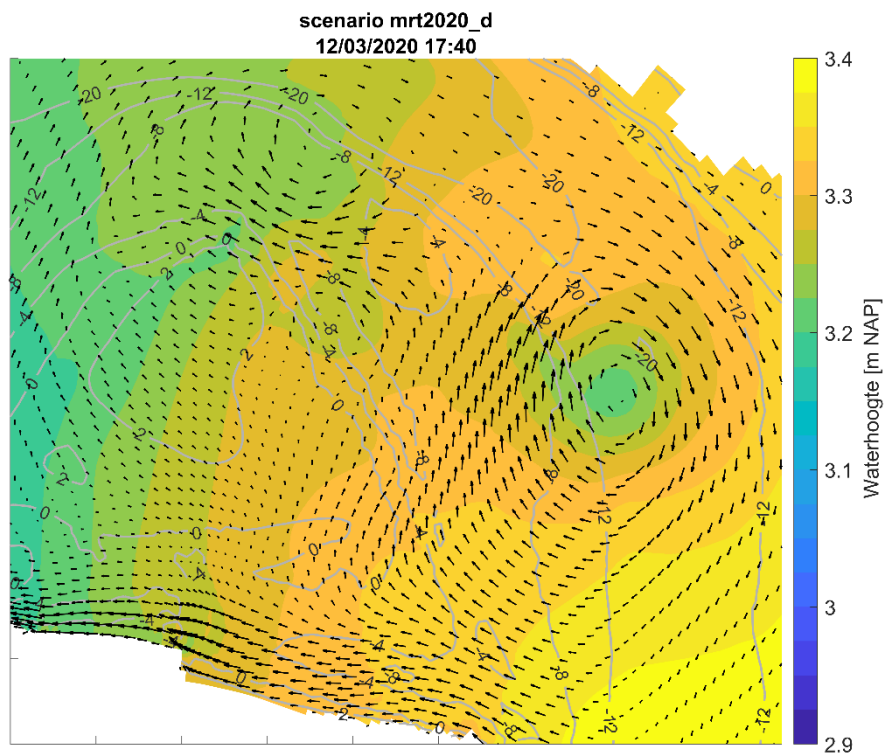
Figuur 24 – Gesimuleerd stromingsveld met bodemruweheidsveld uit AvdT-studies Stark et al. (2019) om 17:00



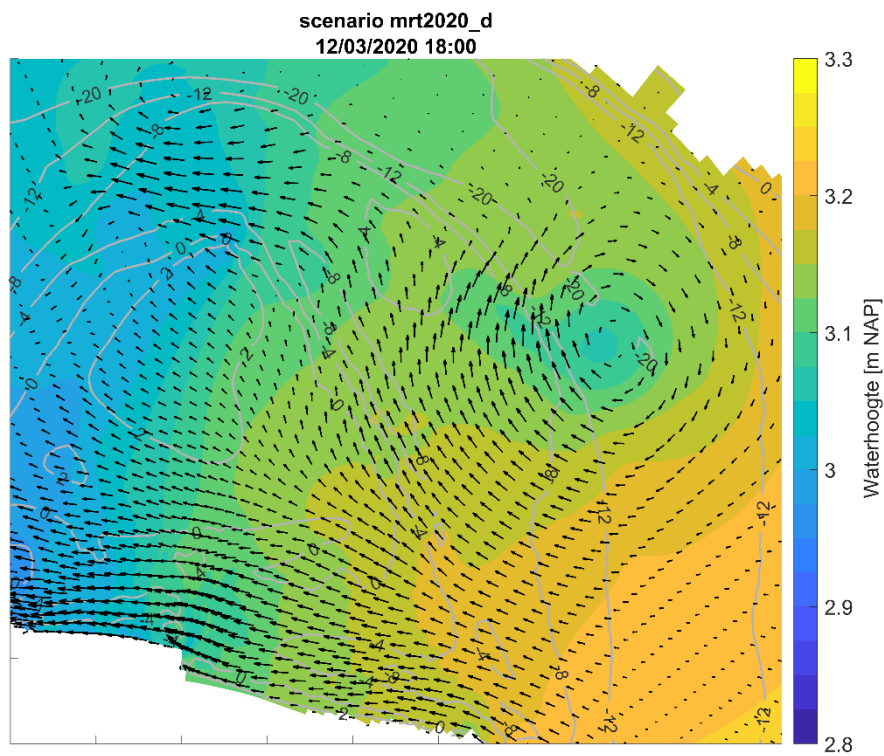
Figuur 25 – Gesimuleerd stromingsveld met bodemruweheidsveld uit AvdT-studies Stark et al. (2019) om 17:20



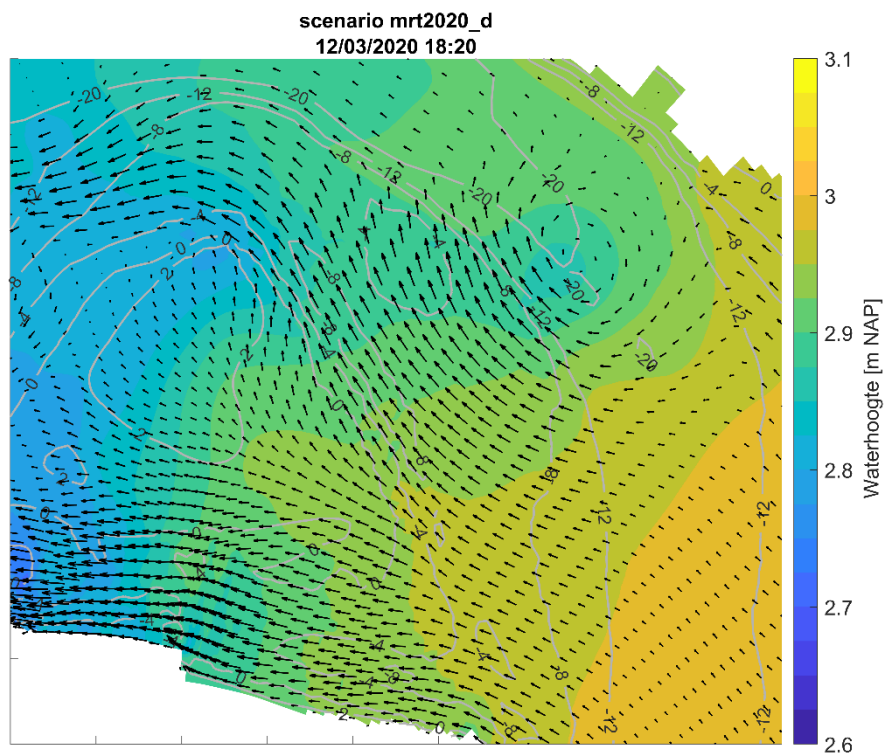
Figuur 26 – Gesimuleerd stromingsveld met bodemruweheidsveld uit AvdT-studies Stark et al. (2019) om 17:40



Figuur 27 – Gesimuleerd stromingsveld met bodemruweheidsveld uit AvdT-studies Stark et al. (2019) om 18:00

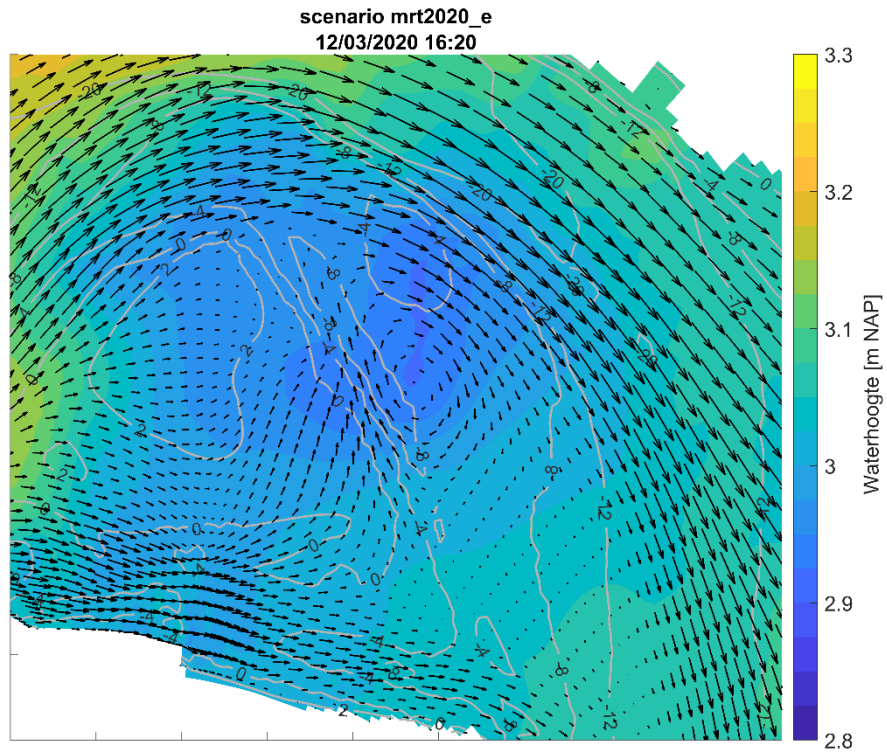


Figuur 28 – Gesimuleerd stromingsveld met bodemruweheidsveld uit AvdT-studies Stark et al. (2019) om 18:20

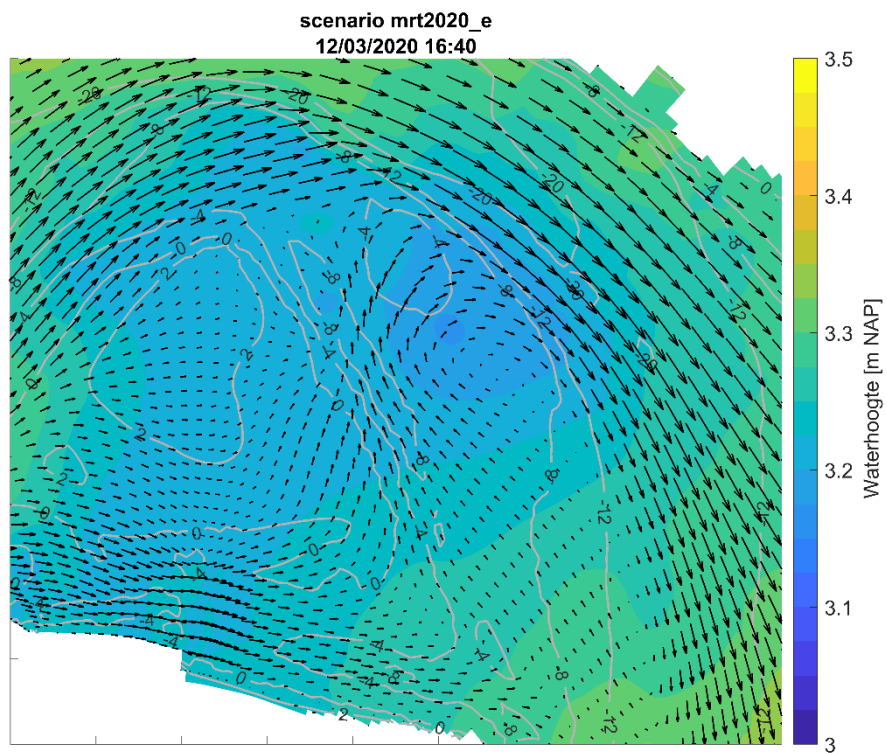


Simulatie met ruwheidsveld uit verbetering NeVla randvoorwaardenmodel door Vanlede *et al.* (2009)

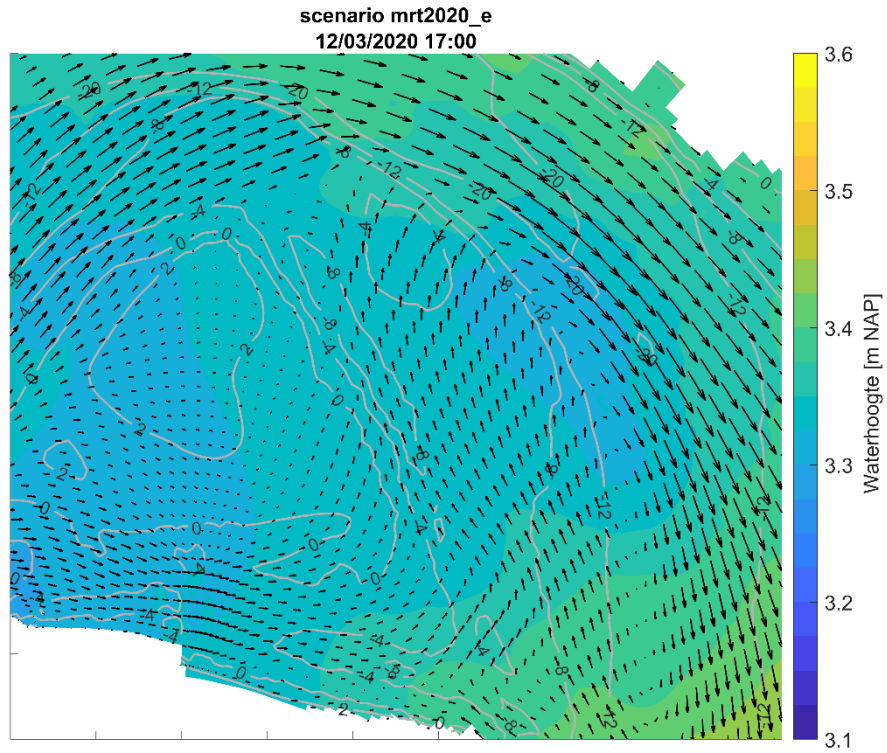
Figuur 29 – Gesimuleerd stromingsveld met ruwheidsveld uit verbetering NeVla randvoorwaardenmodel door Vanlede *et al.* (2009) om 16:20



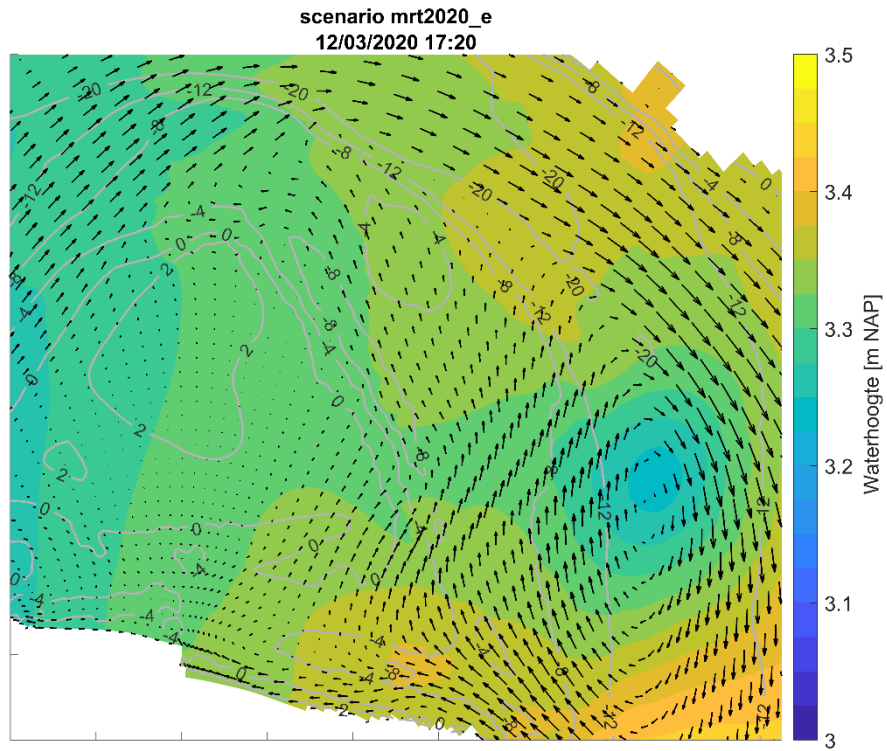
Figuur 30 – Gesimuleerd stromingsveld met ruwheidsveld uit verbetering NeVla randvoorwaardenmodel door Vanlede *et al.* (2009) om 16:40



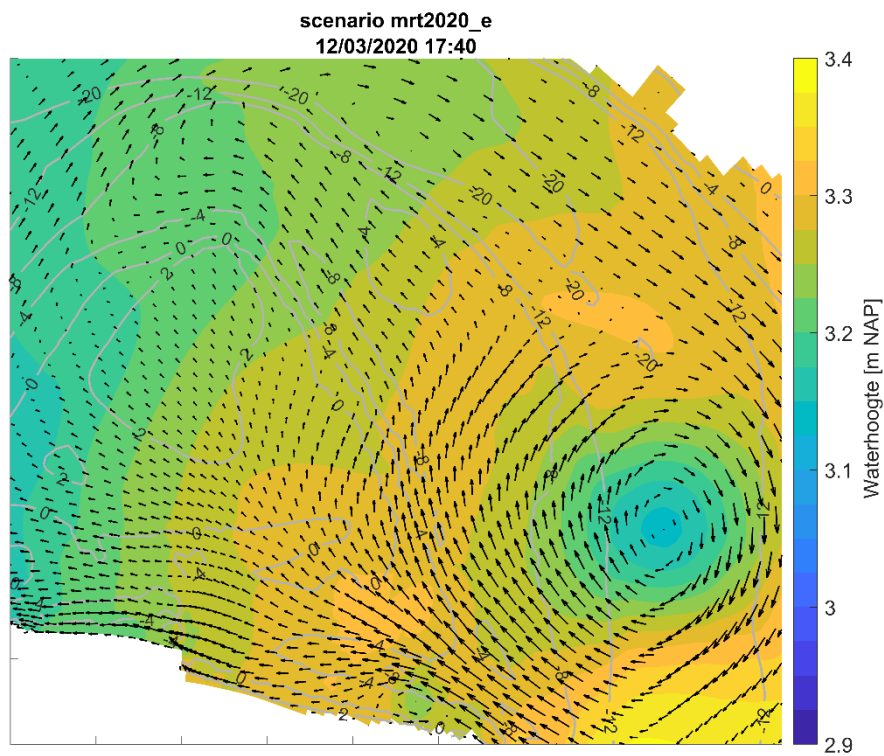
Figuur 31 – Gesimuleerd stromingsveld met ruwheidsveld uit verbetering NeVla randvoorwaardenmodel door Vanlede et al. (2009) om 17:00



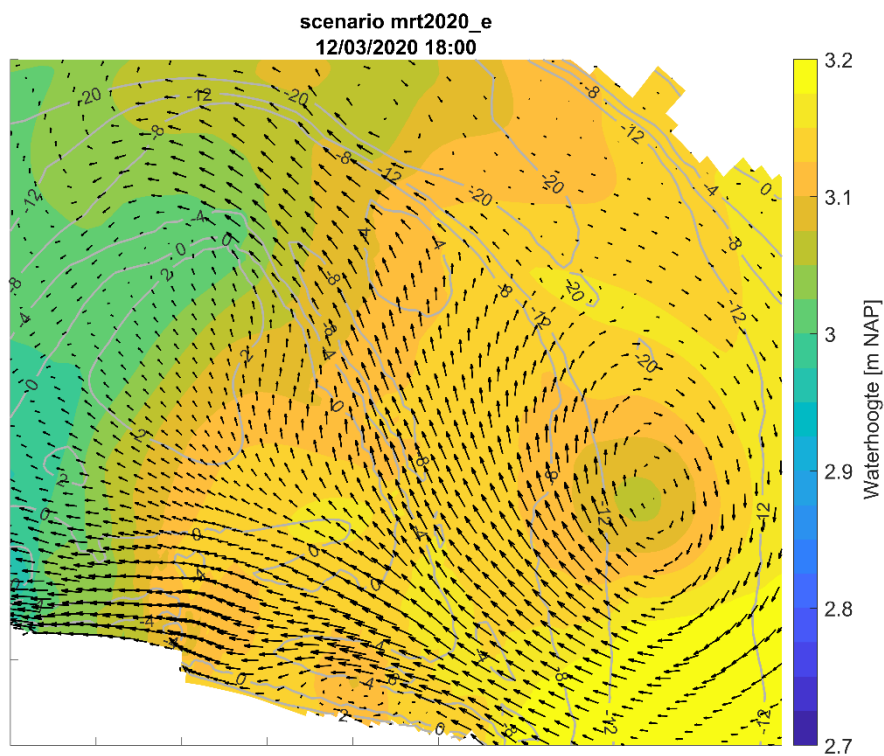
Figuur 32 – Gesimuleerd stromingsveld met ruwheidsveld uit verbetering NeVla randvoorwaardenmodel door Vanlede et al. (2009) om 17:20



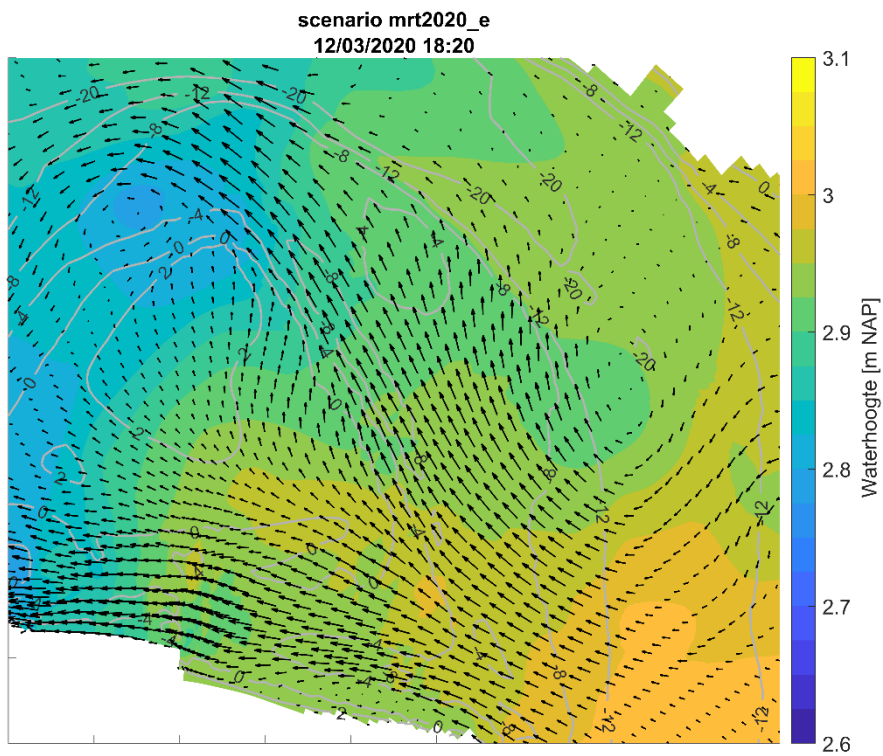
Figuur 33 – Gesimuleerd stromingsveld met ruweheidsveld uit verbetering NeVla randvoorwaardenmodel door Vanlede et al. (2009) om 17:40



Figuur 34 – Gesimuleerd stromingsveld met ruweheidsveld uit verbetering NeVla randvoorwaardenmodel door Vanlede et al. (2009) om 18:00

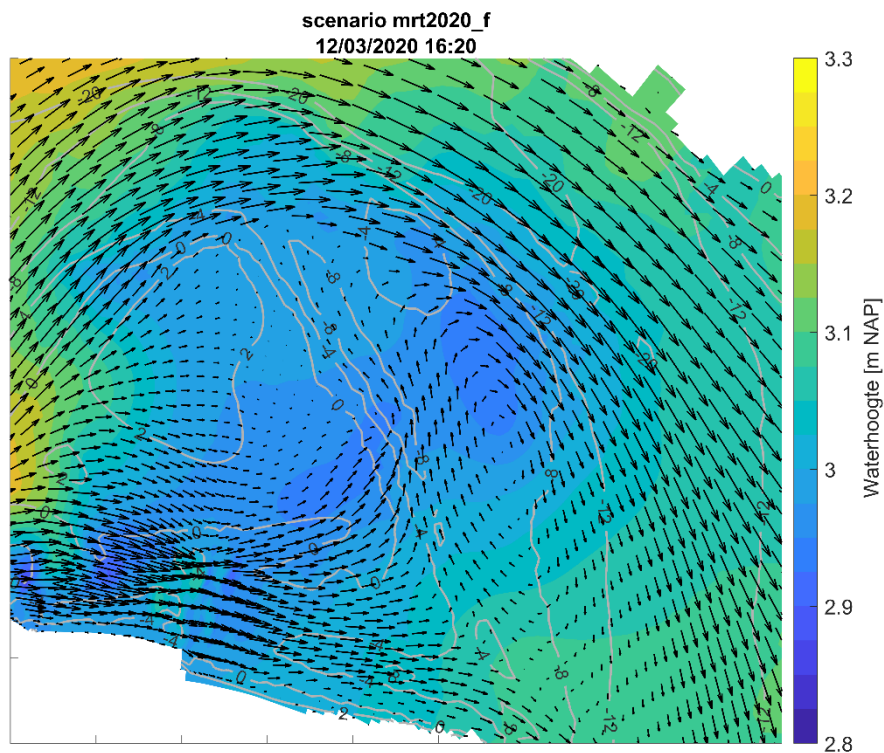


Figuur 35 – Gesimuleerd stromingsveld met ruwheidsveld uit verbetering NeVla randvoorwaardenmodel door Vanlede et al. (2009) om 18:20

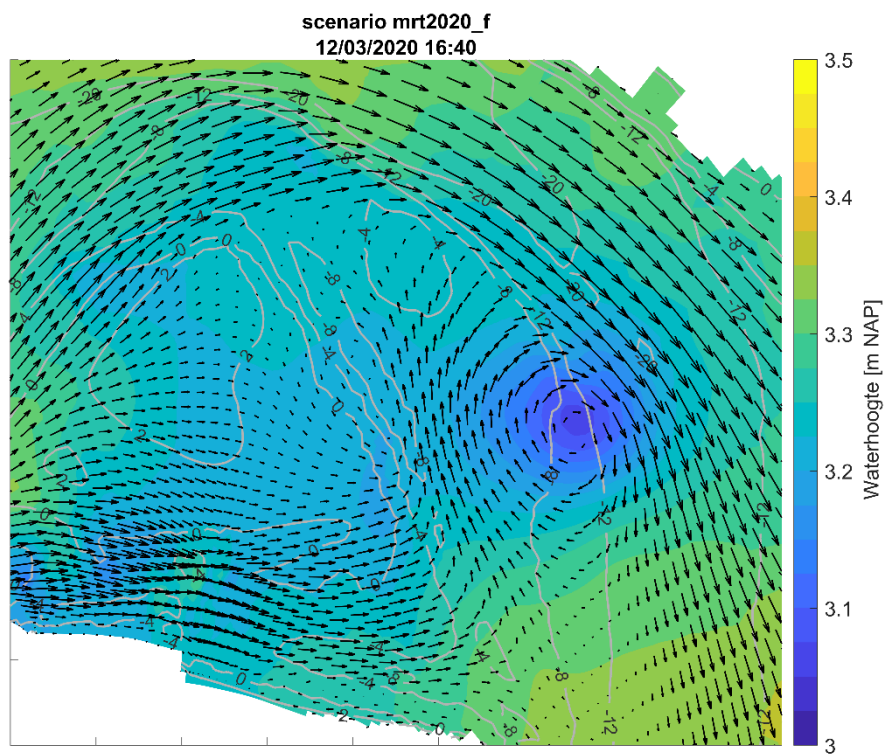


Simulatie met samengesteld ruwheidsveld

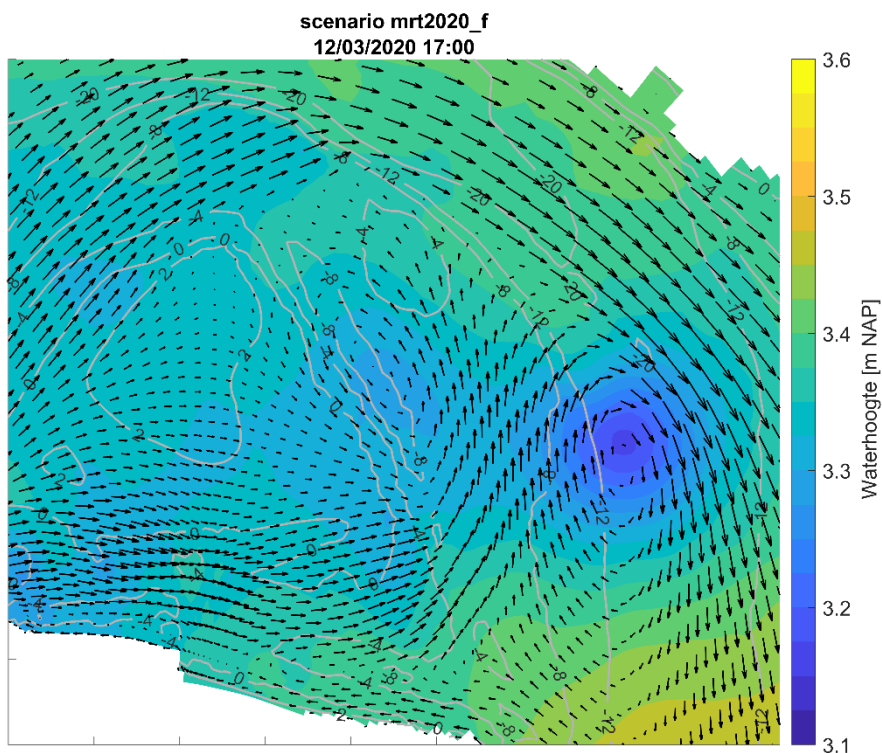
Figuur 36 – Gesimuleerd stromingsveld met samengesteld bodemruwheidsveld om 16:20



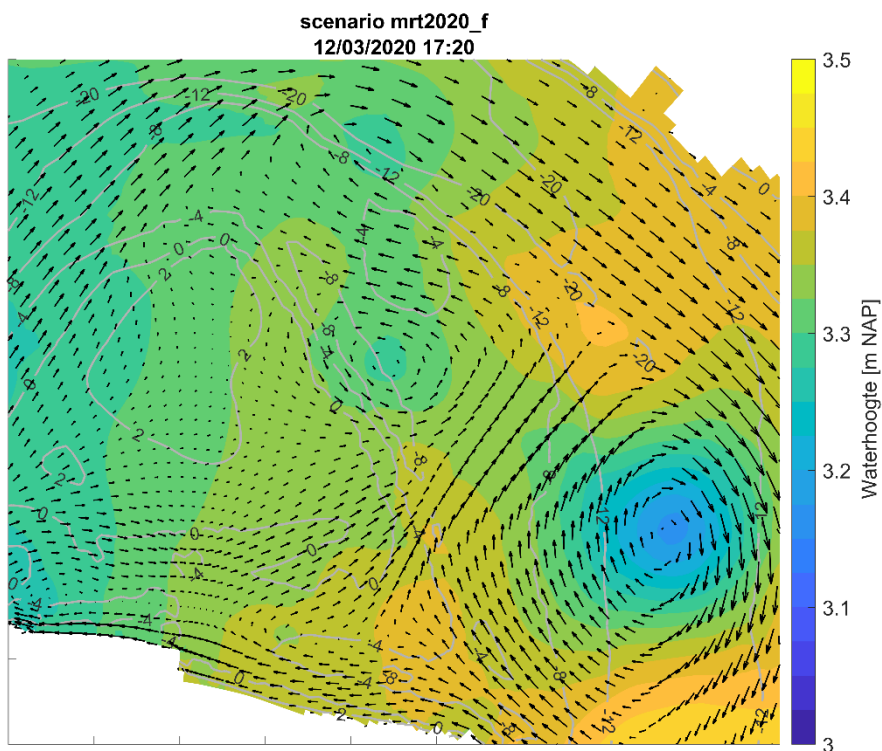
Figuur 37 – Gesimuleerd stromingsveld met samengesteld bodemruwheidsveld om 16:40



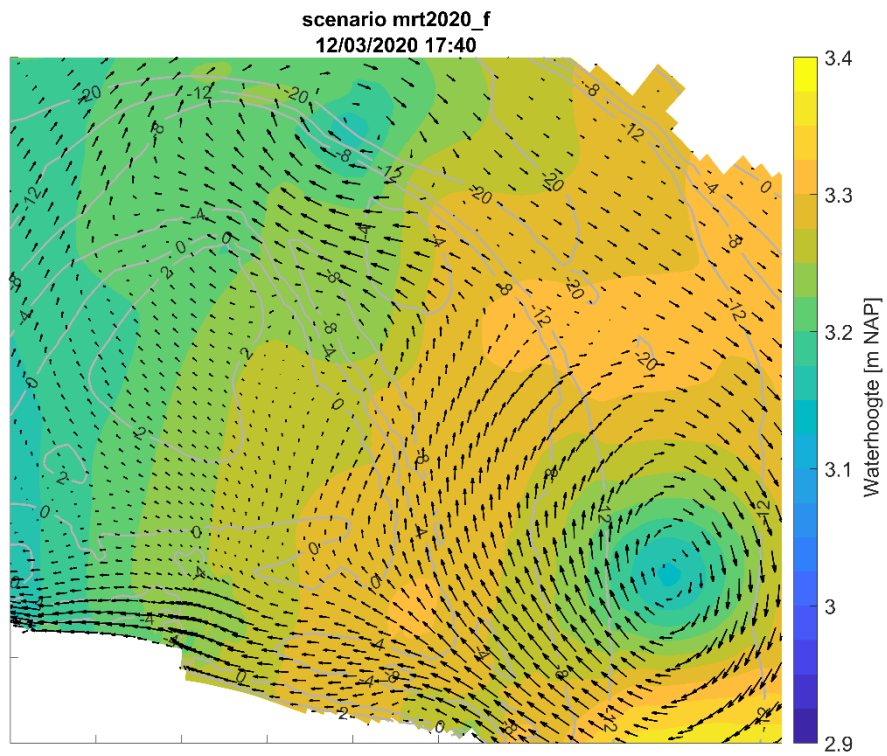
Figuur 38 – Gesimuleerd stromingsveld met samengesteld bodemruweheidsveld om 17:00



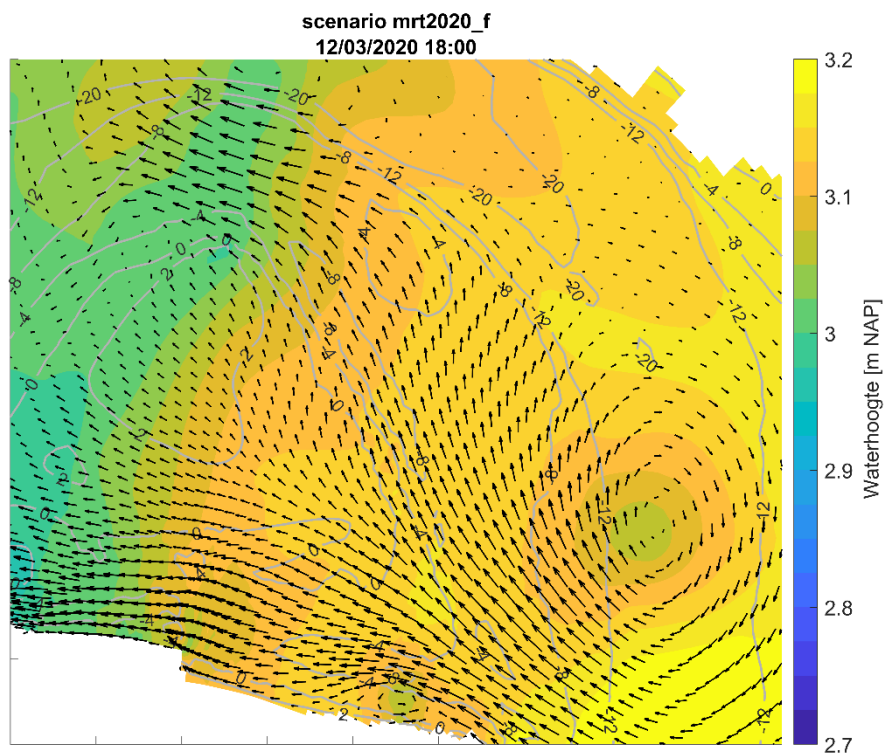
Figuur 39 – Gesimuleerd stromingsveld met samengesteld bodemruweheidsveld om 17:20



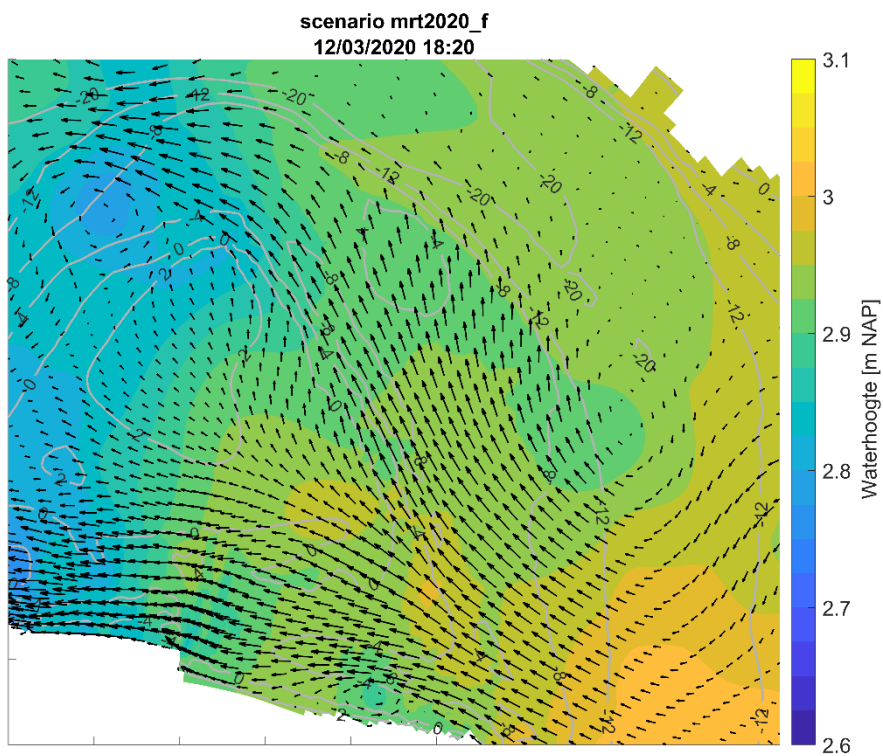
Figuur 40 – Gesimuleerd stromingsveld met samengesteld bodemruweheidsveld om 17:40



Figuur 41 – Gesimuleerd stromingsveld met samengesteld bodemruweheidsveld om 18:00



Figuur 42 – Gesimuleerd stromingsveld met samengesteld bodemruwheidsveld om 18:20



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