

## Memo

**Aan**

Marco Schrijver (RWS ZD) / Jan de Klerk (RWS ZD) / Peter Bijkerk (RWS VWM) /  
Yves Plancke (WL Borgerhout)

**Datum**

11 juni 2020

**Ons kenmerk**

11203725-001-ZKS-0011

**Aantal pagina's**

1 van 16

**Contactpersoon**

Roy van Weerdenburg  
Jebbe van der Werf

**Doorkiesnummer**

+31(0)88 335 7527

**E-mail**

Roy.vanWeerdenburg@deltares.nl

**Review**

Meinard Tiessen

**Onderwerp**

Dwarsstroming Zuidergat - Voorspelinstrumentarium

## 1 Inleiding

In 2019 heeft Deltares een evaluatie uitgevoerd van het voorspelcriterium voor het optreden van een dwarsstroming in het Zuidergat. Hiervoor werden stromingsmetingen geanalyseerd die werden uitgevoerd tussen 2005 en 2019. Een belangrijke conclusie uit het werk uit 2019 is dat de maximale stijgsnelheid van de waterstand bij Hansweert een betere indicator is voor de dwarsstroming dan het maximale waterstandsverschil tussen Hansweert en Terneuzen, mits die stijgsnelheid nauwkeurig voorspeld wordt door het modelinstrumentarium (Van Weerdenburg & van der Werf, 2019).

Op dit moment worden voorspellingen op basis van het IMPLIC model gebruikt om te beoordelen of een waarschuwing uitgegeven moet worden richting de scheepvaart voor het optreden van een matige of sterke dwarsstroming. De waarschuwing voor een matige dwarsstroming wordt afgegeven vanaf een maximaal waterstandsverschil tussen Terneuzen en Hansweert van 91 cm. De waarschuwing voor een sterke dwarsstroming wordt afgegeven vanaf een maximaal waterstandsverschil van 95 cm. Hiernaast geldt het criterium dat een waarschuwing voor een sterke dwarsstroming wordt afgegeven wanneer de voorspelde maximale waterstand bij Hansweert hoger is dan 3.35 m NAP en het maximale waterstandsverschil tussen Terneuzen en Hansweert hoger is dan 70 cm.

Als andere operationele modellen de maximale stijgsnelheid en/of het maximale waterstandsverhang nauwkeuriger voorspellen dan het IMPLIC model, dan kan het voorspelinstrumentarium verbeterd worden zonder aanpassingen aan de operationele modellen te doen. De eerste stap in het verbeteren van het voorspelinstrumentarium voor de dwarsstroming in het Zuidergat is daarom om de verschillende operationele modellen te beschrijven en de kwaliteit van de voorspellingen voor de maximale stijgsnelheid en/of het maximale waterstandsverhang te analyseren. Dit is uitgewerkt in het vervolg van dit memo. De voorspellingen worden beoordeeld op basis van een vergelijking met de gemeten stijgsnelheid en het gemeten waterstandsverhang. De voorspellingen worden in dit memo niet vergeleken met de gemeten dwarsstroming. Die vergelijking zou nog gemaakt moeten worden voordat een ander operationeel model ingezet gaat worden.

## 2 Operationele modellen

In dit hoofdstuk worden de modellen beschreven die door het Hydro Meteo Centrum (HMC) worden ingezet voor waterstandsvoorspellingen in de Westerschelde.

### 2.1 IMPLIC

IMPLIC is een systeem voor het berekenen van waterstanden, stroomsnelheden en debieten in een gebied dat geschematiseerd wordt als een eendimensionaal netwerk van open kanalen. De schematisatie van het meergeulenstelsel in de Westerschelde en van de Zeeschelde is weergegeven in Figuur 2.1. De vergelijkingen voor eendimensionale stationaire stroming in open kanalen worden opgelost met een eindige differentiemethode. Elk van de geulen in het eendimensionale netwerk wordt daarvoor gekarakteriseerd door 6 hydraulische parameters:

- Lengte: L
- Doorstromend oppervlak: AA
- Bergende breedte: BB
- Hydraulische straal: R
- Bodemruwheid: C (d.w.z. Chézy waarde)
- Windschuifspanningscoëfficiënt: W

Als benedenstroomse randvoorwaarde wordt een waterstand opgelegd. Daarvoor wordt de eindverwachting voor de waterstand bij Vlissingen (Vlis) gebruikt. Vervolgens worden de waterstanden op de andere twee knooppunten op de benedenstroomse rand (d.w.z. Breskens (Bres) en Wielingen (Wiel)) als volgt bepaald:

$$\text{Bres} = 0.99 * \text{VLIS} + 4 \text{ cm}$$

$$\text{Wiel} = (\text{Vlis} + \text{Bres}) / 2$$

Deze vergelijkingen zijn bepaald op basis van de lineaire regressie tussen gemeten waterstanden bij Breskens en Vlissingen. Een recente herberekening heeft laten zien dat deze regressielijn nog steeds geldig is.

Bovenstrooms wordt een constant debiet van 160 m<sup>3</sup>/s als randvoorwaarde opgelegd. Dit debiet wordt verdeeld over de diverse bovenstroomse zijrivieren zoals aangegeven in Tabel 2.1.

Het IMPLIC model is afgeregeld op basis van een vergelijking met gemeten waterstanden, debieten en stroomsnelheden (Rijkswaterstaat, 1989). De reproductie van de waterstand gedurende de gehele getijperiode (d.w.z. de gehele waterstandskromme) is daarbij beoordeeld.

Tabel 2.1: Verdeling van het totale debiet op de bovenstroomse rand van het IMPLIC model over de verschillende riviertakken.

Riviertak	Randpunt	Aandeel
Schelde	Melle	35%
Zenne	Zemst	11%
Dijle	Mechelen	25%
Nete	Lier	17%
Durme	Lokeren	12%

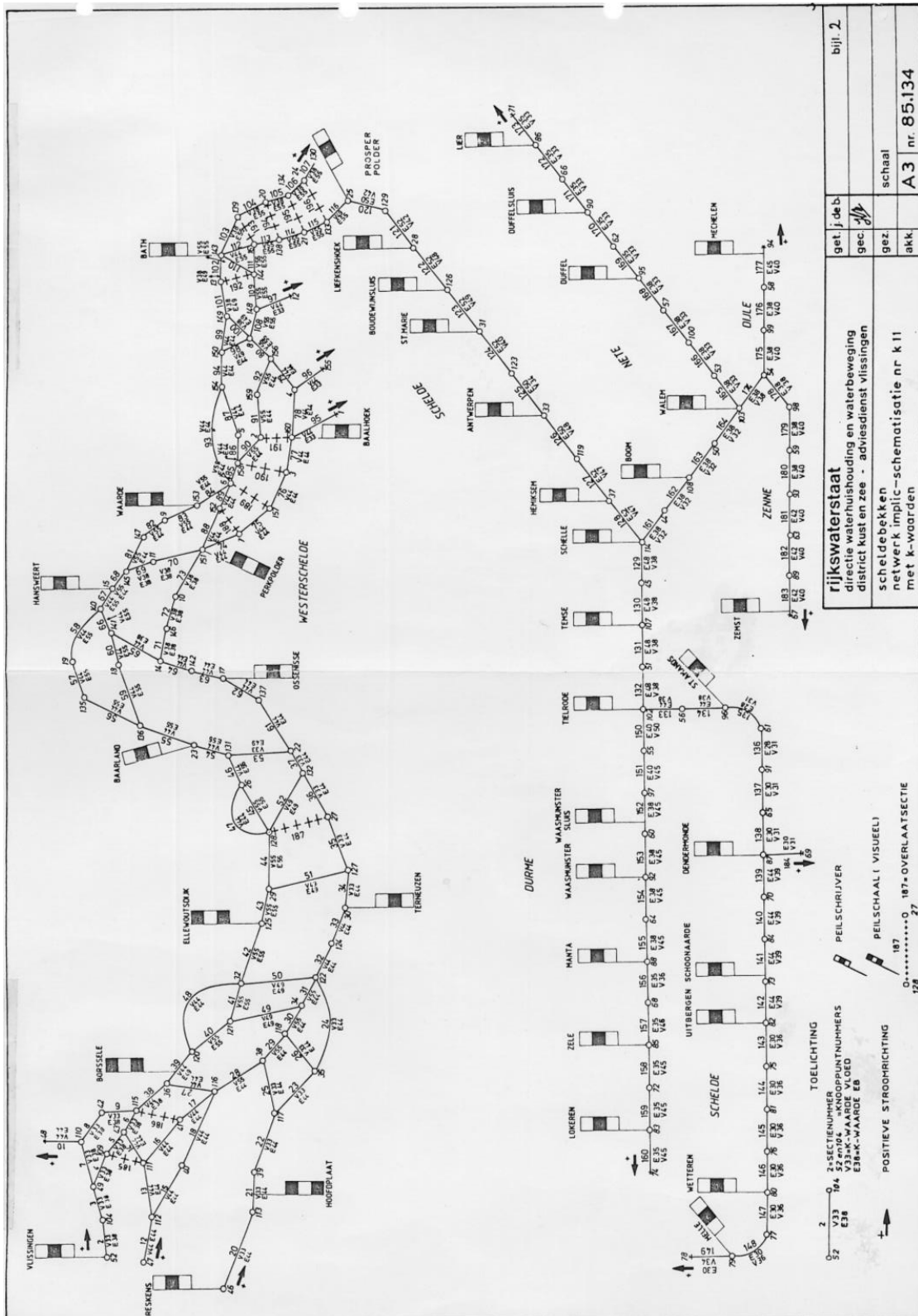
### 2.2 IMPLIC met Prosymfo3 correctie

Op basis van een vergelijking tussen modelresultaten en meetwaarden is door het Hydro Meteo Centrum gezocht naar systematische modelfouten in het operationele proces. Wanneer de systematische modelfouten bekend zijn, kunnen de modelresultaten daar in de toekomst voor gecorrigeerd worden. De methode die daarvoor gebruikt wordt is Prosymfo (PROgnose SYstematische Model Fouten). De Prosymfo correctie wordt door het HMC toegepast op resultaten van het IMPLIC model.

In Prosymfo worden de volgende correcties uitgevoerd

- Correctie op basis van een lineaire regressieanalyse tussen modelresultaten en meetwaarden per windrichtingsector van 30 graden;
- Een correctie voor lange harmonische componenten op basis van een Fouriertransformatie;
- Een correctie voor kortere, niet stationaire harmonische componenten binnen het frequentiedomein;
- Een correctie van de restfout door middel van een verzameling van Auto Regressieve (AR) - modellen.

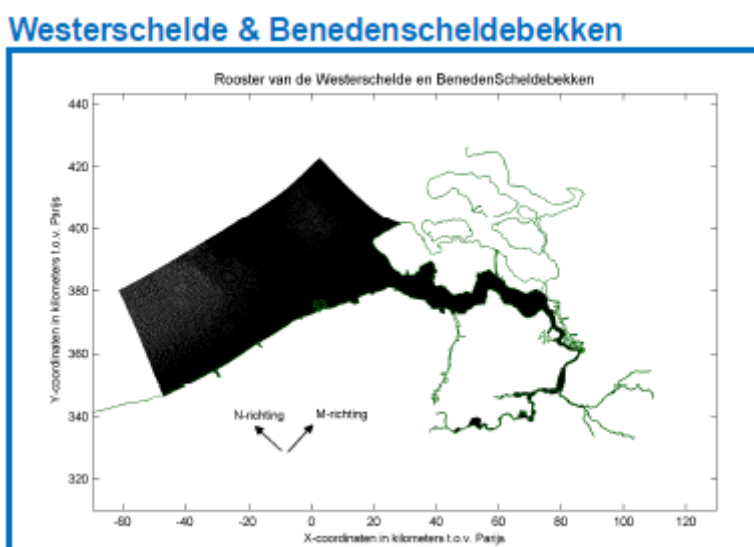
In een eerdere versie van Prosymfo (Prosymfo2, Saman & Schrijver (2008)) werden de waterstandsextremen gecorrigeerd. In de huidige versie (Prosymfo3) wordt de correctie bepaald en toegepast op de gehele waterstandskromme, bestaande uit één waarde per 10 minuten.



Figuur 2.1 Schematisatie van het Scheldebekken in een netwerk van knooppunten en open kanalen in het IMPLIC model.

## 2.3 ScalWest Fijn

Het ScalWest Fijn model is een 2D WAQUA-schematisatie van de Westerschelde en de Benedenscheldebekken (zie Figuur 2.2). Het rekenrooster is kromlijinig en gebaseerd op het NEVLA model, ten opzichte waarvan een aantal gebieden (waaronder Perkpolder, Hedwigepolder en Prosperpolder) aan het rooster zijn toegevoegd. De resolutie van het rekenrooster in de Westerschelde varieert van 25 m tot 150 m. De ruimtelijke schematisatie van het modeldomein volgt uit Baseline (versie Baseline-zwd-j12\_5-v3).



Figuur 2.2 Rekendomein van het ScalWest Fijn model in WAQUA. Figuur afkomstig uit Modelbeschrijving Zuid Westelijke Delta, versie 5<sup>e</sup> generatie schematisaties (factsheet-zwd-generatie\_5-v2016\_1).

Het ScalWest Fijn model is afgeregeld voor het jaar 2007 door kalibratie van de bodemruwheid in de Manning ruwheidsformulering. De negen ruwheidsvakken van het zomerbed zijn afgeregeld door middel van OpenDA-optimalisatie, waarbij de ruwheidswaarde van de afzonderlijke vakken wordt geoptimaliseerd zodat een optimale reproductie van gemeten waterstanden ontstaat. De randvoorwaarden van het model zijn:

- Wind: Ruimtelijk variërende HIRLAM windvelden
- Waterstanden: Afkomstig uit DCSMv6-ZUNOV4
- Rivierafvoeren: De afvoeren behorende bij de Vlaamse rivieren op de Bovenschelde worden aangeleverd door het Waterbouwkundig Laboratorium Antwerpen. Tijdreeksen van de gespuide afvoeren uit de Bathse spuisluis en de verbinding tussen de Westerschelde en het Volkerak-Zoommeer is afkomstig uit Waterbase.

Het model is gevalideerd voor de periode van 1 december 2013 tot 1 januari 2014. De gemiddelde nauwkeurigheid van het reproduceren van waterstanden heeft een gemiddelde fout (*bias*) van 1.41 cm en een kwadratische fout (*RMSE*) van 6.92 cm.

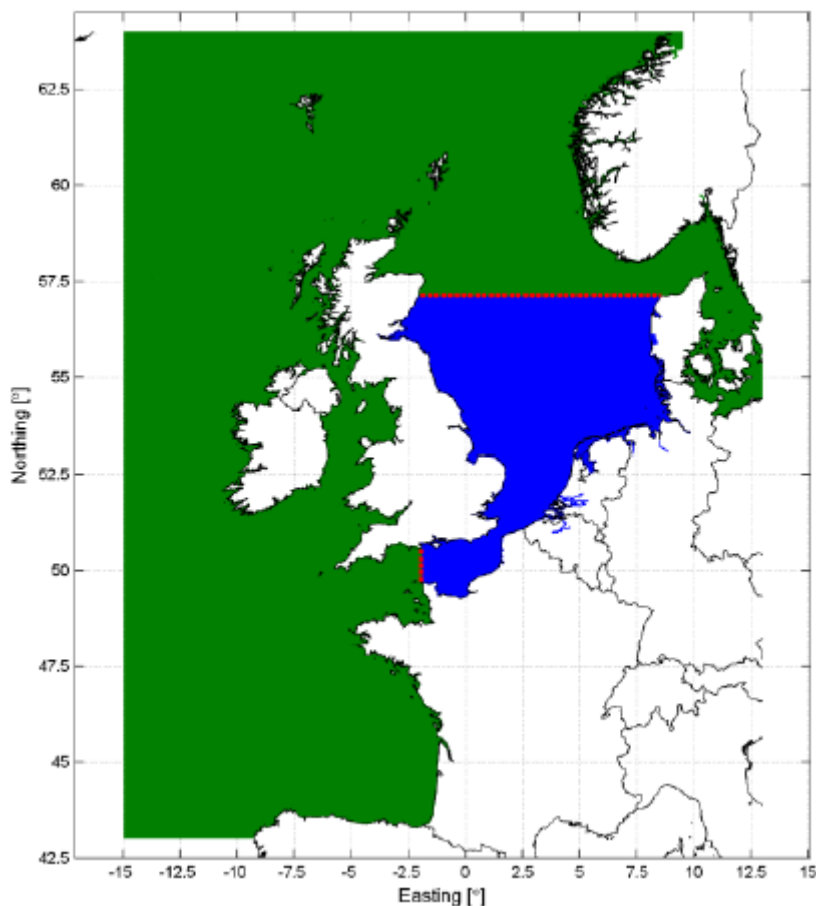
## 2.4 NZV6v4-H11 (ZUNO) en DCSMv6-H11

Voor het noordwestelijke deel van het Europese continentale plat zijn twee operationele modellen ontwikkeld, namelijk het Dutch Continental Shelf Model (DCSM) en het Zuidelijk Noordzee Model (ZUNO). Het rekendomein van beide modellen is gelijk, alleen is het rekenrooster van ZUNO verfijnd in de Zuidelijke Noordzee, in de Nederlandse estuaria en in de Waddenzee (zie Figuur 2.3). Voor operationele toepassingen worden beide modellen alleen in 2D (WAQUA) gedraaid.

Beide modellen worden identiek geforceerd: Op de modelranden wordt de waterstand opgelegd, welke 28 harmonische componenten en een opzet bevatten. De opzet is door middel van een Inverse Barometer Correctie (IBC) bepaald op basis van de lokale luchtdruk. Als meteorologische forcering worden ruimtelijk en in de tijd variërende waarden voor de luchtdruk en de windsnelheid opgelegd, welke zijn afgeleid uit hetHIRLAM meteorologisch model van het KNMI. Daarnaast zijn rivierafvoeren, spuidebieten en keringen in het model opgenomen.

De operationele versie van beide modellen is gekalibreerd en gevalideerd met behulp van waterstandmetingen op meer dan 100 locaties. De kalibratie op basis van waterstanden is uitgevoerd voor 2007 en de validatie is uitgevoerd voor 2008. De kalibratie is uitgevoerd met behulp van het OpenDA-DUD algoritme, waarbij de bodemhoogte en de bodemruwheid worden aangepast voor een optimale reproductie van de gemeten waterstanden. Voor het validatiejaar was de kwadratische fout (*RMSE*) van waterstandsvoorspellingen 8.0 cm voor DCSM en 7.8 voor DCSM-ZUNO.

Sinds juni 2020 is Hansweert een observatiepunt in alle RWsOS Noordzee modellen, wat relevant is voor het voorspelinstrumentarium voor de dwarsstroming in het Zuidergat.



*Figuur 2.3 Rekendomeinen van het DCSMv6-H11 model (in groen) en (overlappend) van het NZV6v4-H11 (ZUNO) model (in blauw). De rode lijn is een interne DD-koppelrand. Figuur afkomstig uit Modelbeschrijving Dutch Continental Shelf Model (DCSMv6) & Dutch Continental Shelf – Zuidelijke Noordzee Model (DCSMv6-ZUNOv5), versie 5<sup>e</sup> generatie modelschematisaties (factsheet-dcsm\_zuno-generatie\_5\_v2017\_01).*

### 3 Modelresultaten indicatoren dwarsstroming

De huidige versie van het operationele modelinstrumentarium (versie 6; de modellen zoals beschreven in Hoofdstuk 2) is gefaseerd in gebruik genomen. De uitvoer van de verschillende modellen is daarom voor een beperkte periode beschikbaar. Dit is weergegeven in Tabel 3.1. Voor een eerlijke vergelijking van de verschillende modellen wordt de reproductie van de waterstanden in de jaren 2017, 2018 en 2019 beoordeeld.

Observatiepunt Hansweert was tot 13 juni 2020 geen uitvoerpunt in de operationele modellen NZV6v4-H11 en DCSTMV6-H11. Deze twee modellen kunnen op dit moment alleen beoordeeld worden op basis van het reproduceren van waterstanden bij Terneuzen. In een later stadium (d.w.z. wanneer er voldoende uitvoer beschikbaar is) kunnen ook de reproductie van de waterstanden bij Hansweert en het waterstandsverhang tussen Terneuzen en Hansweert beoordeeld worden.

In het vervolg van dit hoofdstuk worden de reproductie van het maximale waterstandsverhang tussen Terneuzen en Hansweert (voor drie modellen: IMPLIC, IMPLIC met Prosymfo 3 en ScalWest Fijn), de reproductie van de maximale stijgsnelheid bij Hansweert (voor drie modellen: IMPLIC, IMPLIC met Prosymfo 3 en ScalWest Fijn) en de reproductie van de maximale stijgsnelheid bij Terneuzen (voor vijf operationele modellen) beoordeeld.

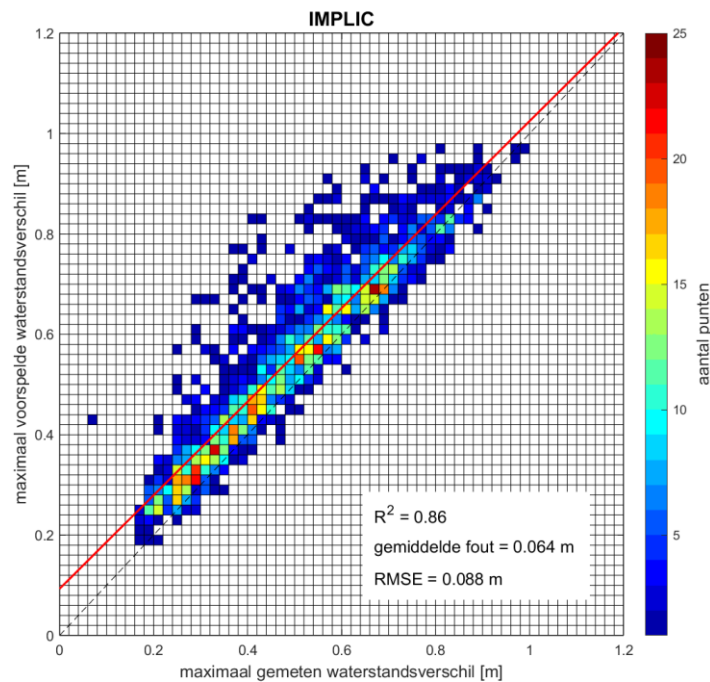
Tabel 3.1 Moment waarop de huidige operationele modellen (geldig medio 2020) in gebruik zijn genomen. Vanaf dit moment is uitvoer van het model beschikbaar.

Model	Operationeel sinds (d.w.z. uitvoer beschikbaar vanaf)
IMPLIC	01 januari 2013
IMPLIC met Prosymfo 3	31 december 2016
ScalWest Fijn	03 juli 2014
NZV6v4-H11 (ZUNO)	12 december 2014
DCSTMV6-H11	12 december 2014

#### 3.1 Maximale waterstandsverhang Terneuzen – Hansweert

Een maat voor het maximale waterstandsverhang tussen Terneuzen en Hansweert wordt bepaald als het maximale waterstandsverschil tussen Terneuzen en Hansweert tijdens de vloedstroming (d.w.z. in de uren voor hoogwater). De gemeten en de voorspelde waterstand is beschikbaar met een tijdstap van 10 minuten. Voor het beoordelen van de reproductie van waterstandskarakteristieken per getijperiode in de periode 2017-2019 is data van ongeveer 2000 getijperiodes beschikbaar.

Figuur 3.1 toont het gemeten maximale waterstandsverschil tussen Terneuzen en Hansweert per getijperiode in metingen in vergelijking met het maximale waterstandsverschil zoals die voorspeld is met het IMPLIC model. De kwaliteit van voorspellingen wordt beoordeeld op basis van het kwadraat van de correlatiecoëfficiënt ( $R^2$ ) en de wortel van de gemiddelde kwadratische fout ( $RMSE$ ). Voor de periode 2017-2019 geldt voor het IMPLIC model dat het maximale waterstandsverschil wordt voorspeld met  $R^2 = 0.86$  en  $RMSE = 0.088 m$ . Over het algemeen wordt het maximale waterstandsverschil overschat door het IMPLIC model, de gemiddelde fout is  $6.4 cm$ . Dit is vooral het geval wanneer het maximale waterstandsverschil relatief laag is.

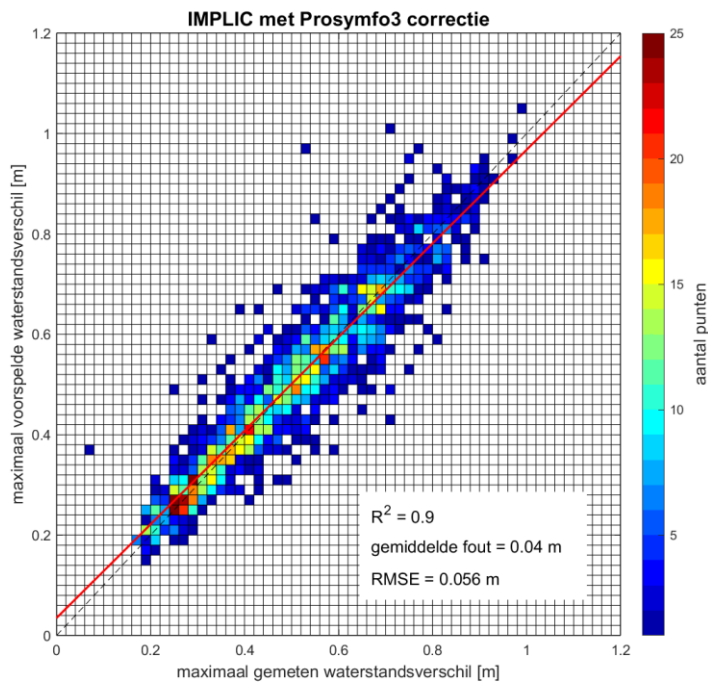


Figuur 3.1 Vergelijking van het maximale waterstandsverschil tussen Terneuzen en Hansweert per getijperiode in metingen (horizontale as) en zoals berekend met het IMPLIC model (verticale as). De rode lijn toont de lineaire regressielijn door de punten. Punten op de gestippelde lijn zijn correct voorspeld.

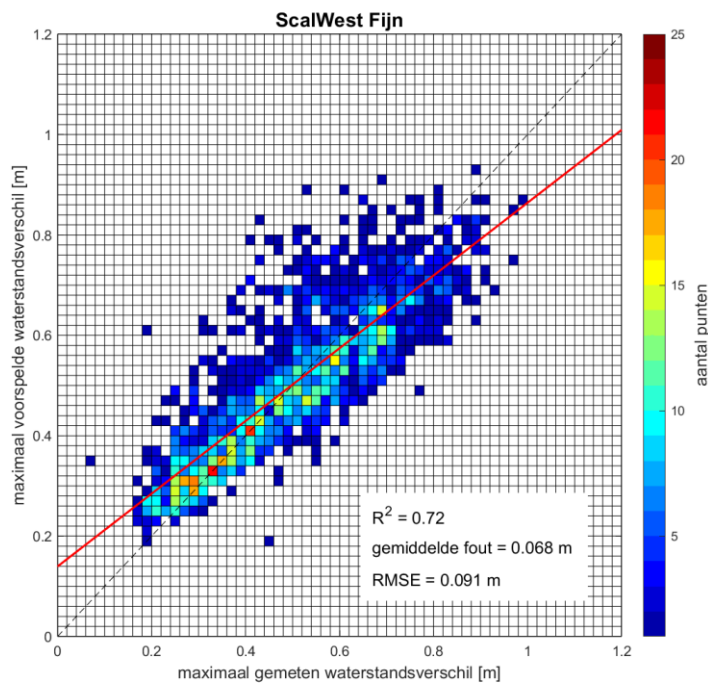
Door de Prosymfo3 correctie verbetert de voorspelling van het maximale waterstandsverschil tussen Terneuzen en Hansweert. Dit is terug te zien in Figuur 3.2.  $R^2$  neemt ten opzichte van de voorspellingen op basis van het IMPLIC model toe van 0.86 naar 0.90 en de  $RMSE$  neemt af van 0.088 m naar 0.056 m. De lineaire regressielijn in Figuur 3.2 laat zien dat relatief lage maximale waterstandsverschillen licht worden overschat door het IMPLIC model met Prosymfo3 correctie, terwijl relatief hoge maximale waterstandsverschillen licht worden onderschat door het model.

De voorspellingen van het maximale waterstandsverschil op basis van het ScalWest Fijn model zijn minder goed. In Figuur 3.3 is terug te zien dat de puntenwolk rondom de lijn 1:1 als het ware *dikker* is dan in de eerder besproken figuren:  $R^2$  is 0.72. De  $RMSE$  is 0.091 m. De lineaire regressielijn laat zien dat relatief lage maximale waterstandsverschillen worden onderschat, terwijl relatief hoge maximale waterstandsverschillen worden onderschat.





Figuur 3.2 Vergelijking van het maximale waterstandsverschil tussen Terneuzen en Hansweert per getijperiode in metingen (horizontale as) en zoals berekend met het IMPLIC model met Prosymfo3 correctie (verticale as). De rode lijn toont de lineaire regressielijn door de punten. Punten op de gestippelde lijn zijn correct voorspeld



Figuur 3.3 Vergelijking van het maximale waterstandsverschil tussen Terneuzen en Hansweert per getijperiode in metingen (horizontale as) en zoals berekend met het ScaWest Fijn model (verticale as). De rode lijn toont de lineaire regressielijn door de punten. Punten op de gestippelde lijn zijn correct voorspeld.

De kwaliteit van voorspellingen van het maximale waterstandsverschil is samengevat in Tabel 3.2. Zowel op basis van  $R^2$  als op basis van de  $RMSE$  zijn de voorspellingen met het IMPLIC model met Prosymfo3 correctie het meest nauwkeurig. Tabel 3.3 toont de kwaliteit van de voorspellingen voor de 10% getijperiodes waarbij het gemeten waterstandsverschil het hoogste is (d.w.z. de rechterkant van Figuren 3.2 tot 3.3). Het IMPLIC model blijkt voor dat toepassingsgebied nauwkeuriger dan het IMPLIC model met Prosymfo3 correctie.

Tabel 3.2 Kwaliteit van voorspellingen van het maximale waterstandsverschil tussen Hansweert en Terneuzen per getijperiode in vergelijking met metingen in verschillende operationele modellen op basis van het kwadraat van de correlatiecoëfficiënt ( $R^2$ ) en de wortel van de gemiddelde kwadratische fout ( $RMSE$ ).

	$R^2$	Gemiddelde fout	$RMSE$
<b>IMPLIC</b>	0.86	0.064 m	0.088 m
<b>IMPLIC met Prosymfo3 correctie</b>	0.90	0.040 m	0.056 m
<b>ScalWest Fijn</b>	0.72	0.068 m	0.091 m

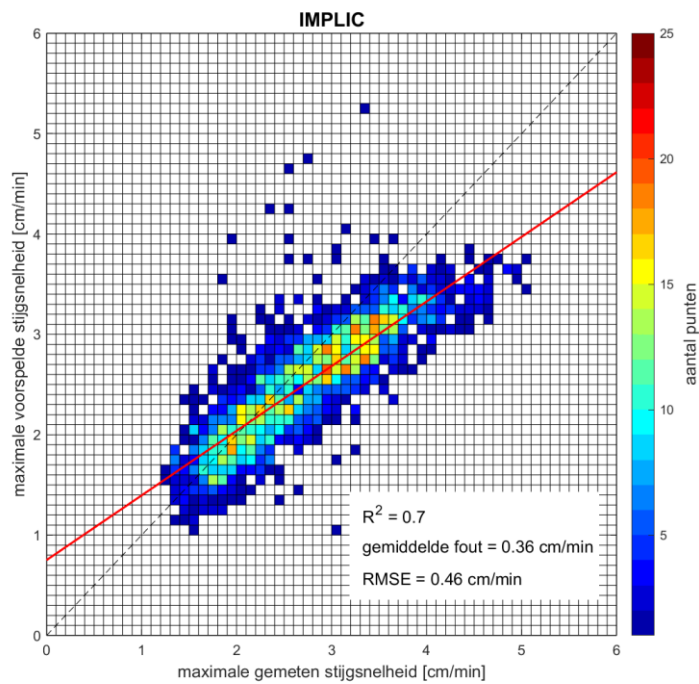
Tabel 3.3 Kwaliteit van voorspellingen van het maximale waterstandsverschil tussen Hansweert en Terneuzen in vergelijking met metingen in verschillende operationele modellen voor de 10% getijperiodes met de hoogste gemeten waarden voor het waterstandsverschil.

Top 10%	$R^2$	Gemiddelde fout	$RMSE$
<b>IMPLIC</b>	0.42	0.036 m	0.051 m
<b>IMPLIC met Prosymfo3 correctie</b>	0.37	0.049 m	0.065 m
<b>ScalWest Fijn</b>	0.14	0.093 m	0.110 m

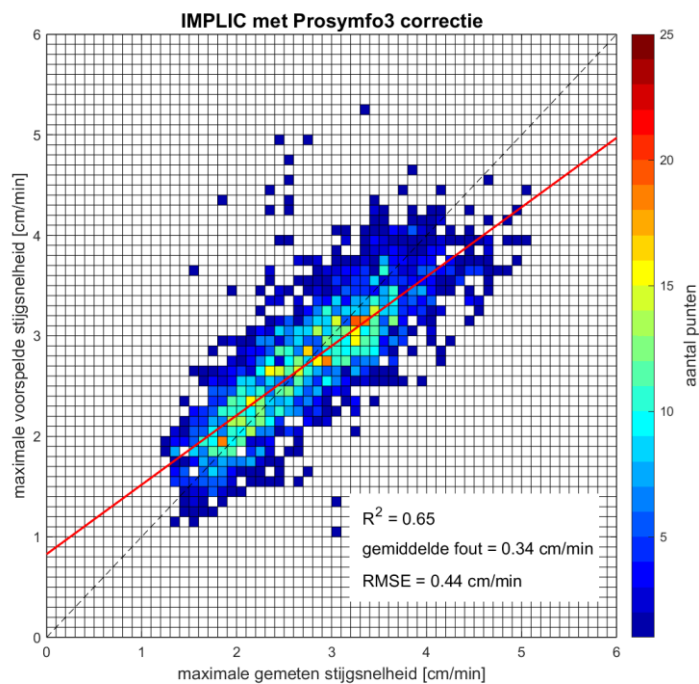
## 3.2 Maximale stijgsnelheid bij Hansweert

De maximale stijgsnelheid wordt bepaald op basis van de maximale stijging van de waterstand in een tijdstap van 10 minuten. Gewoonlijk is de stijgsnelheid enkele uren voor hoogwater maximaal. Figuur 3.4 toont de maximale gemeten stijgsnelheid per getijperiode in vergelijking met de voorspelde maximale stijgsnelheid op basis van het IMPLIC model.  $R^2$  is 0.70 en de  $RMSE$  is 0.46 cm/min. De gemiddelde fout is 0.36 cm/min. De correlatiecoëfficiënt is relatief hoog, maar uit de lineaire regressielijn in Figuur 3.4 wordt duidelijk dat de maximale stijgsnelheid structureel onderschat wordt door het IMPLIC model voor relatief hoge waarden van de maximale stijgsnelheid. Voor de 10% getijperiodes met de hoogste gemeten maximale stijgsnelheid bij Hansweert is de gemiddelde fout zelfs 0.78 cm/min (zie Tabel 3.5).

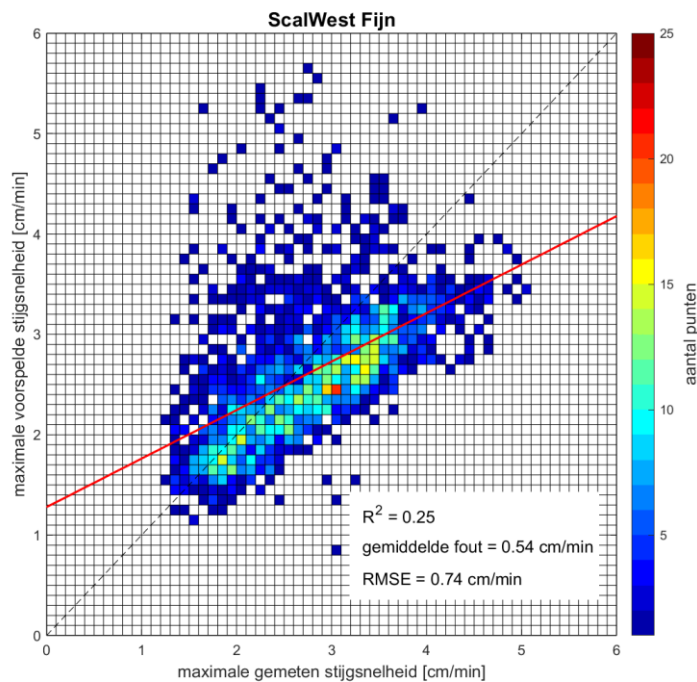
Figuur 3.5 toont het effect van de Prosymfo3 correctie op het reproduceren van de maximale stijgsnelheid bij Hansweert:  $R^2$  neemt af van 0.70 naar 0.65 en de  $RMSE$  neemt af van 0.46 cm/min naar 0.44 cm/min. De structurele onderschatting van de maximale stijgsnelheid wanneer de stijgsnelheid relatief hoog is, is minder erg ten gevolge van de Prosymfo3 correctie. De helling van de lineaire regressielijn in Figuur 3.5 is daardoor groter dan in Figuur 3.4.



Figuur 3.4 Vergelijking van de maximale stijgsnelheid bij Hansweert per getijperiode in metingen (horizontale as) en zoals berekend met het IMPLIC model (verticale as). De rode lijn toont de lineaire regressielijn door de punten.



Figuur 3.5 Vergelijking van de maximale stijgsnelheid bij Hansweert per getijperiode in metingen (horizontale as) en zoals berekend met het IMPLIC model met Prosymfo 3 correctie (verticale as). De rode lijn toont de lineaire regressielijn door de punten.



Figuur 3.6 Vergelijking van de maximale stijgsnelheid bij Hansweert per getijperiode in metingen (horizontale as) en zoals berekend met het ScalWest Fijn (verticale as). De rode lijn toont de lineaire regressielijn door de punten.

Het ScalWest Fijn model voorspelt de maximale stijgsnelheid een stuk minder nauwkeurig dan het IMPLIC model en het IMPLIC model met Prosymfo3 correctie (zie Figuur 3.6):  $R^2$  is 0.25 en de  $RMSE$  is 0.74 cm/min. Ook in het ScalWest Fijn model wordt de maximale stijgsnelheid gewoonlijk onderschat voor relatief hoge waarden voor de maximale stijgsnelheid. Daarnaast wordt er relatief vaak een hoge stijgsnelheid berekend met het ScalWest Fijn model, terwijl die niet is gemeten.

De kwaliteit van voorspellingen van de maximale stijgsnelheid bij Hansweert is samengevat in Tabel 3.4. Zowel op basis van  $R^2$  als op basis van de  $RMSE$  zijn de voorspellingen met het ScalWest Fijn model het minst nauwkeurig. De verschillen in nauwkeurigheid tussen het IMPLIC model en het IMPLIC model met Prosymfo3 correctie zijn relatief klein. Tabel 3.5 toont dat de kwaliteit van de voorspellingen voor de 10% getijperiodes waarbij de gemeten stijgsnelheid bij Hansweert het hoogste is hoger is als de Prosymfo3 correctie gebruikt wordt.

Tabel 3.4 Kwaliteit van voorspellingen van de maximale stijgsnelheid bij Hansweert per getijperiode in vergelijking met metingen in verschillende operationele modellen op basis van het kwadraat van de correlatiecoëfficiënt ( $R^2$ ) en de wortel van de gemiddelde kwadratische fout ( $RMSE$ ).

	$R^2$	Gemiddelde fout	$RMSE$
<b>IMPLIC</b>	0.70	0.36 cm/min	0.46 cm/min
<b>IMPLIC met Prosymfo3 correctie</b>	0.65	0.34 cm/min	0.44 cm/min
<b>ScalWest Fijn</b>	0.25	0.54 cm/min	0.74 cm/min

Tabel 3.5 Kwaliteit van voorspellingen van de maximale stijgsnelheid bij Hansweert in vergelijking met metingen in verschillende operationele modellen voor de 10% getijperiodes met de hoogste gemeten waarden voor de stijgsnelheid bij Hansweert.

Top 10%	R <sup>2</sup>	Gemiddelde fout	RMSE
<b>IMPLIC</b>	0.16	0.78 cm/min	0.83 cm/min
<b>IMPLIC met Prosymfo3 correctie</b>	0.086	0.54 cm/min	0.63 cm/min
<b>ScalWest Fijn</b>	0.063	0.87 cm/min	0.94 cm/min

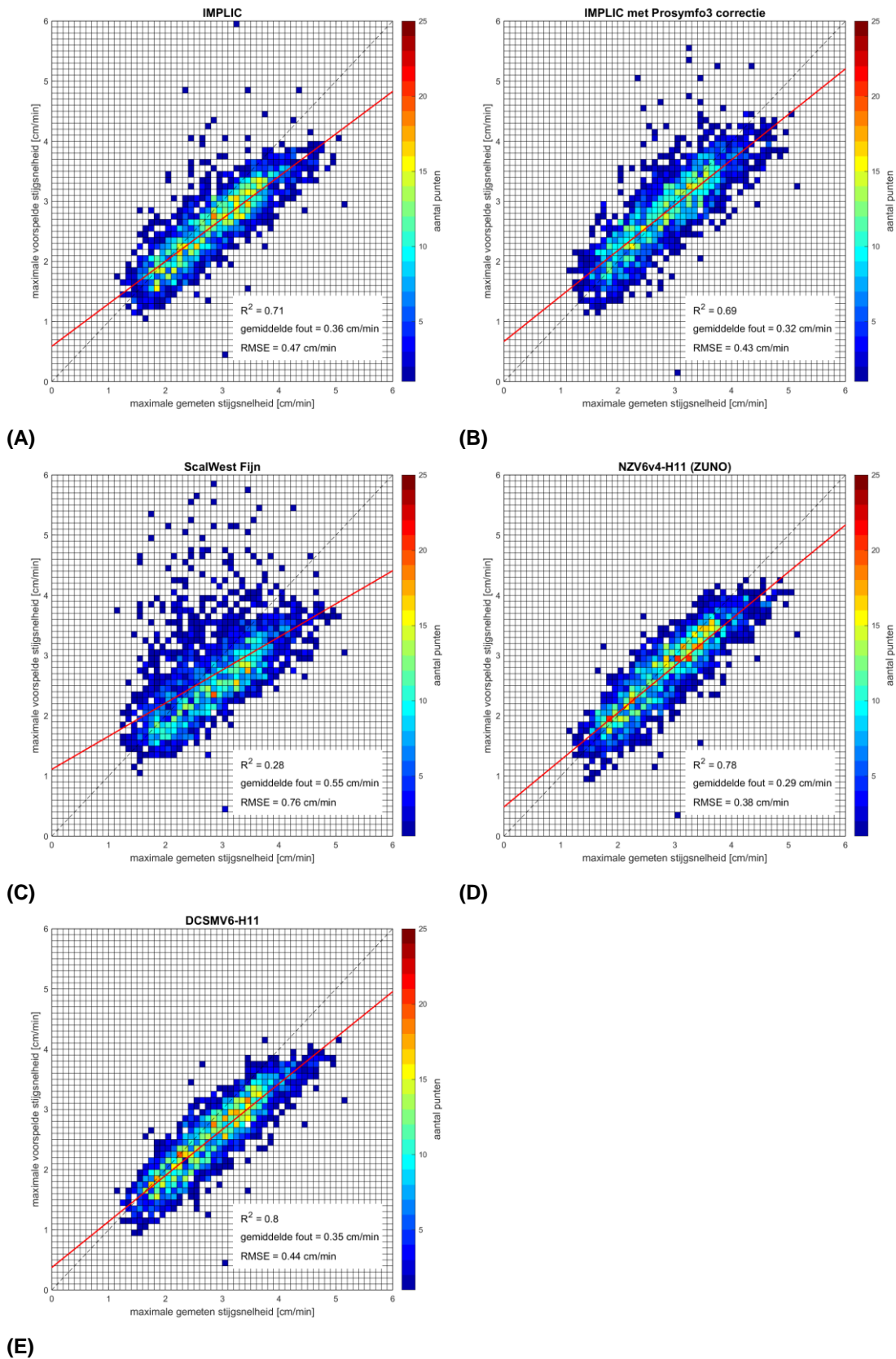
### 3.3 Stijgsnelheid bij Terneuzen

Zoals eerder werd genoemd is het observatiepunt bij Hansweert pas sinds 13 juni 2020 als uitvoerpunt opgenomen in de operationele modellen NZV6v4-H11 en DCSMV6-H11. Deze twee modellen kunnen daarom (nog) niet beoordeeld worden op basis van het waterstandsverhang tussen Terneuzen en Hansweert en op basis van de stijgsnelheid van de waterstand bij Hansweert. Voor alle vijf de operationele modellen die op dit moment worden ingezet voor waterstandsvoorspellingen in de Westerschelde wordt daarom ook de maximale stijgsnelheid van de waterstand bij Terneuzen vergeleken met gemeten waarden. De kwaliteit van voorspellingen van de stijgsnelheid bij Terneuzen is namelijk indicatief voor de kwaliteit van voorspellingen van de stijgsnelheid bij Hansweert.

De vergelijking tussen de gemeten maximale stijgsnelheid bij Terneuzen en de berekende waarden met het IMPLIC model en het IMPLIC model met Prosymfo3 correctie is opgenomen in respectievelijk Figuur 3.7A en Figuur 3.7B. De nauwkeurigheid waarmee de maximale stijgsnelheid bij Terneuzen wordt berekend is vergelijkbaar met de nauwkeurigheid waarmee de maximale stijgsnelheid bij Hansweert wordt berekend (zoals besproken in Paragraaf 3.1). Datzelfde geldt voor het ScalWest Fijn model (zie Figuur 3.7C), waarbij  $R^2 = 0.28$  en de  $RMSE = 0.76$  cm/min voor het reproduceren van de maximale stijgsnelheid bij Terneuzen. Ter vergelijking,  $R^2 = 0.25$  en de  $RMSE = 0.74$  cm/min voor het reproduceren van de maximale stijgsnelheid bij Hansweert.

De nauwkeurigheid van het reproduceren van de maximale stijgsnelheid bij Terneuzen door het NZV6v4-H11 (ZUNO) model wordt kenmerkt door  $R^2 = 0.78$  en de  $RMSE = 0.38$  cm/min (zie Figuur 3.7D). Voor het DCSMV6-H11 model geldt dat  $R^2 = 0.80$  en de  $RMSE = 0.44$  cm/min (zie Figuur 3.7E). Beide modellen berekenen de maximale stijgsnelheid bij Terneuzen dus nauwkeuriger dan de eerder besproken modellen (d.w.z. IMPLIC, IMPLIC met Prosymfo3 correctie, en ScalWest Fijn). Voor elk van de operationele modellen geldt dat de maximale stijgsnelheid wordt onderschat wanneer de maximale stijgsnelheid relatief hoog is. Dit is terug te zien in Figuur 3.7 doordat de lineaire regressielijn voor hoge waarden van de maximale stijgsnelheid onder de 1:1 lijn ligt.

De kwaliteit van voorspellingen van de maximale stijgsnelheid bij Terneuzen is voor vijf operationele modellen samengevat in Tabel 3.6. Tabel 3.7 toont de kwaliteit van de voorspellingen voor de 10% getijperiodes waarbij de gemeten stijgsnelheid bij Terneuzen het hoogste is. De nauwkeurigheid van voorspellingen voor die 10% getijperiodes is op basis van de gemiddelde fout en de RSME het hoogst voor de modellen IMPLIC met Prosymfo3 correctie en NZV6v4-H11 (ZUNO).



(E) *Figuur 3.7 Vergelijking van de maximale stijgsnelheid bij Terneuzen per getijperiode in metingen (horizontale as) en zoals berekend met het (A) IMPLIC model, (B) het IMPLIC model met Prosymfo3 correctie, (C) het ScalWest Fijn model, (D) het NZV6v4-H11 (ZUNO) model, en (E) het DCSMV6-H11 model (verticale as). De rode lijn toont de lineaire regressielijn door de punten.*

Tabel 3.6 Kwaliteit van voorspellingen van de maximale stijgsnelheid bij Terneuzen per getijperiode in vergelijking met metingen in verschillende operationele modellen op basis van het kwadraat van de correlatiecoëfficiënt ( $R^2$ ) en de wortel van de gemiddelde kwadratische fout (RMSE).

	$R^2$	Gemiddelde fout	RMSE
<b>IMPLIC</b>	0.71	0.36 cm/min	0.47 cm/min
<b>IMPLIC met Prosymfo3 correctie</b>	0.69	0.32 cm/min	0.43 cm/min
<b>ScalWest Fijn</b>	0.28	0.55 cm/min	0.76 cm/min
<b>NZV6v4-H11 (ZUNO)</b>	0.78	0.29 cm/min	0.38 cm/min
<b>DCSMV6-H11</b>	0.80	0.35 cm/min	0.44 cm/min

Tabel 3.7 Kwaliteit van voorspellingen van de maximale stijgsnelheid bij Terneuzen in vergelijking met metingen in verschillende operationele modellen voor de 10% getijperiodes met de hoogste gemeten waarden voor de stijgsnelheid bij Terneuzen.

Top 10%	$R^2$	Gemiddelde fout	RMSE
<b>IMPLIC</b>	0.13	0.68 cm/min	0.75 cm/min
<b>IMPLIC met Prosymfo3 correctie</b>	0.099	0.45 cm/min	0.55 cm/min
<b>ScalWest Fijn</b>	0.038	0.82 cm/min	0.91 cm/min
<b>NZV6v4-H11 (ZUNO)</b>	0.15	0.50 cm/min	0.57 cm/min
<b>DCSMV6-H11</b>	0.22	0.66 cm/min	0.71 cm/min

## 4 Discussie en conclusies

### Wat zijn de belangrijkste resultaten?

Op dit moment wordt het maximale waterstandsverhang tussen Terneuzen en Hansweert gebruikt als belangrijkste indicator voor het optreden van een hinderlijke dwarsstroming. Voor een voorspelling van het maximale waterstandsverhang worden resultaten van het IMPLIC model gebruikt. Het maximale waterstandsverhang wordt over het algemeen beter voorspeld door het toevoegen van de Prosymfo3 correctie op waterstandsvoorspellingen met het IMPLIC model. Echter, de hinderlijke dwarsstroming treedt gewoonlijk op bij hoge waarden voor het maximale waterstandsverhang, waardoor de nauwkeurigheid van voorspellingen voor die hoge waarden erg relevant is. Voor de 10% getijperiodes met het hoogste maximale waterstandsverhang leidt de Prosymfo3 correctie niet tot nauwkeurigere voorspellingen. De meerwaarde van de Prosymfo3 correctie voor het voorspelinstrumentarium voor de dwarsstroming is daardoor klein.

Hansweert is pas sinds kort een uitvoerlocatie in de operationele modellen NZV6v4-H11 (ZUNO) en DCSMV6-H11. Het is daarom nog te vroeg om de kwaliteit van voorspellingen van het maximale waterstandsverhang tussen Hansweert en Terneuzen in deze modellen statistisch te beoordelen.

Uit de analyse door Van Weerdenburg & Van der Werf (2019) blijkt dat de maximale stijgsnelheid van de waterstand bij Hansweert een betere indicator is voor het optreden van de dwarsstroming, maar dat de maximale stijgsnelheid op dit moment (d.w.z. met het IMPLIC model) niet nauwkeurig voorspeld wordt. De Prosymfo3 correctie heeft wel meerwaarde voor de voorspelling van de maximale stijgsnelheid van de waterstand bij Hansweert en bij Terneuzen; de voorspelling van de maximale stijgsnelheid wordt nauwkeuriger, vooral voor hoge stijgsnelheden.

Als de kwaliteit van voorspellingen bij Hansweert vergelijkbaar is met de kwaliteit van voorspellingen bij Terneuzen, dan is het model NZV6v4-H11 samen met IMPLIC met Prosymfo3 correctie het meest geschikt om de maximale stijgsnelheden te voorspellen. De operationele modellen NZV6v4-H11 (ZUNO) en DCSMV6-H11 konden nu nog niet beoordeeld worden op basis

van het voorspellen van de maximale stijgsnelheid bij Hansweert. De kwaliteit van voorspellingen van de maximale stijgsnelheid bij Terneuzen met NZV6v4-H11 (ZUNO) is vergelijkbaar met IMPLIC met Prosymfo3 correctie.

### Hoe nu verder?

In het huidige voorspelcriterium voor de dwarsstroming wordt vooral gebruikt gemaakt van het maximale waterstandsverschil tussen Terneuzen en Hansweert als indicator. Van de drie modellen die bekeken zijn wordt het maximale waterstandsverschil het beste voorspeld door het model dat nu al wordt gebruikt voor de voorspellingen (IMPLIC).

Al een nieuw criterium opgezet zal worden waarbij de maximale stijgsnelheid van de waterstand de belangrijkste indicator wordt, zijn de modellen IMPLIC met Prosymfo3 en NZV6v4-H11 (ZUNO) het beste geschikt om de maximale stijgsnelheid te voorspellen. Echter, door elk van de operationele modellen worden hoge waarden voor de maximale stijgsnelheid van de waterstand onderschat. Het is op dit moment nog niet duidelijk wat de reden is voor de onderschatting.

Een criterium op basis van de maximale stijgsnelheid is pas beter dan een criterium op basis van het maximale waterstandsverhang als de voorspelde stijgsnelheid een betere indicator blijkt voor de gemeten dwarsstroming dan het voorspelde waterstandsverhang. Om daar een uitspraak over te kunnen doen moet nog een vergelijking opgezet worden tussen de voorspelde maximale stijgsnelheid en de gemeten dwarsstroming. Pas als de correlatie daartussen beter is dan de correlatie tussen het maximale waterstandsverhang en de gemeten dwarsstroming krijgt een criterium op basis van de maximale stijgsnelheid meerwaarde.

Op dit moment is een nieuwe (6<sup>e</sup>) generatie operationele modellen in ontwikkeling. Deze modellen worden opgezet in de D-Flow Flexible Mesh software. Een modelschematisatie voor de Noordzee is al beschikbaar; een schematisatie voor de Westerschelde zal in de komende jaren volgen. Het is nog niet duidelijk wanneer deze generatie modellen ingezet kan worden voor het voorspelinstrumentarium voor de dwarsstroming in het Zuidergat.

Als een operationeel model de gemeten dwarsstroming kan reproduceren, dan kan de voorspelling direct uit de modelresultaten bepaald worden. Stark et al. (2020) laten zien hoe ze de gemeten dwarsstroming in het tweedimensionale Delft3D-NeVla model kunnen reproduceren. Het reproduceren van de dwarsstroming zou onderdeel gemaakt kunnen worden van de ontwikkeling van het D-FLOW FM model van de Westerschelde.

## 5 Referenties

- Rijkswaterstaat. (1989). *Gevoeligheidsonderzoek en afregelen eendimensionaal getijmodel Westerschelde*. Notitie: AX 89.071. Ministerie van Verkeer en Waterstaat.
- Saman, K., & Schrijver, M. (2008). *Prosymfo2 - PROgnose SYstematISChe Model FOuten - 2*. Ministerie van Verkeer en Waterstaat.
- 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.