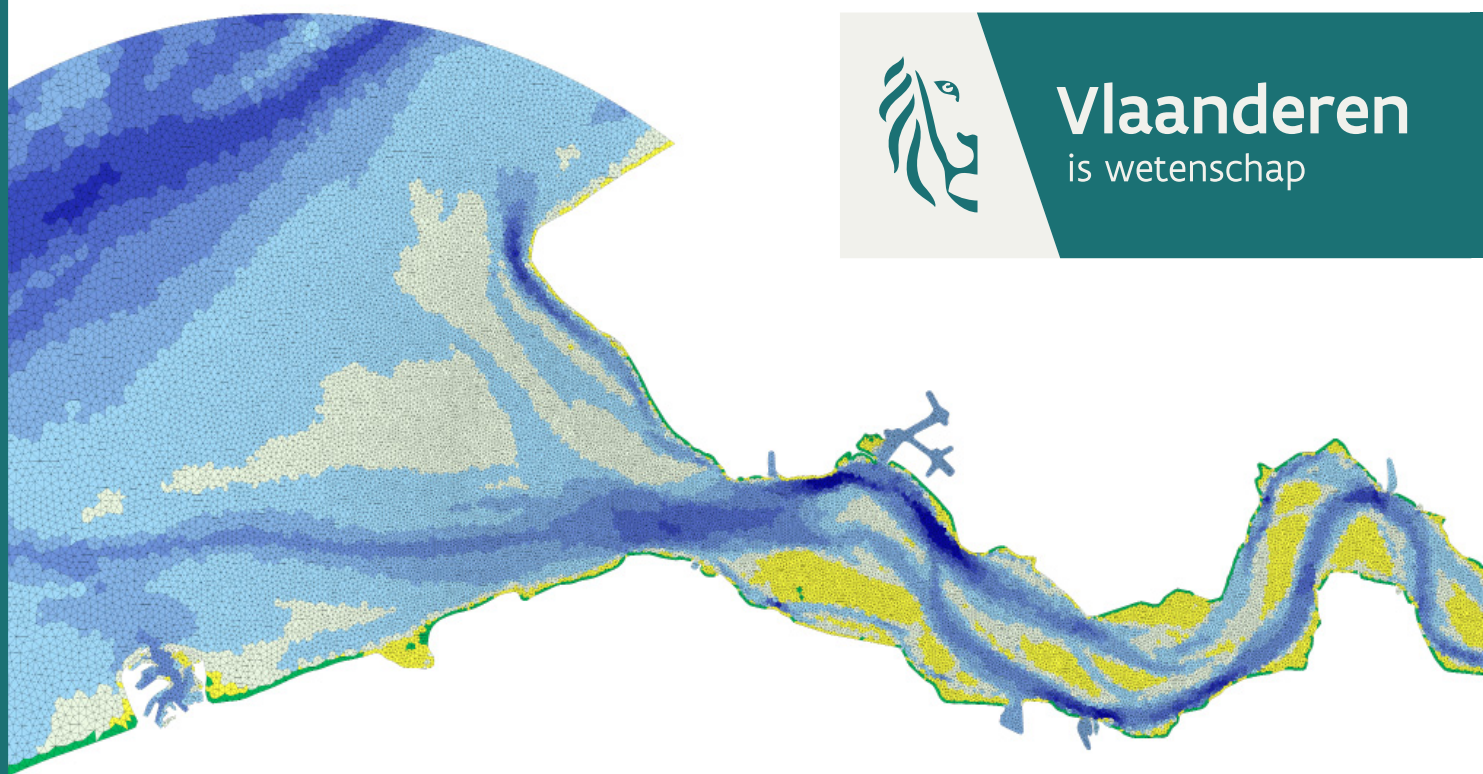




Vlaanderen
is wetenschap



17_088_3
WL rapporten

Agenda v/d Toekomst **Sedimenttransport op verschillende tijdschalen**

Deelrapport 3
Modellering van hydro- en morfodynamische processen
in de Westerschelde met Telemac:
Scenario's in het kader van gevoeligheidsanalyse numeriek model

DEPARTEMENT
**MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN**

waterbouwkundiglaboratorium.be

Agenda v/d Toekomst – Sedimenttransport op verschillende tijdschalen

Deelrapport 3 – Modellering van hydro- en morfodynamische processen in de Westerschelde met Telemac: Scenario's in het kader van gevoeligheidsanalyse numeriek model

Stark, J.; De Maerschalck, B. Plancke, Y.; Mostaert, F.

Cover figuur © Klik hier als u tekst wilt invoeren.

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/2020/3241/108

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Stark, J.; De Maerschalck, B. Plancke, Y.; Mostaert, F. (2020). Agenda v/d Toekomst – 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 3.0. WL Rapporten, 17_088_3.
Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

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

Documentidentificatie

Opdrachtgever:	VNSC	Ref.:	WL2020R17_088_3
Keywords (3-5):	Numerieke modellering, waterbeweging, morfologie, Schelde-estuarium		
Tekst (p.):	74	Bijlagen (p.):	/
Vertrouwelijk:	☒ Nee	☒ Online beschikbaar	

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

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	De Maerschalck, B.	Getekend door: Bart De Maerschalck (Signature) Getekend op: 2020-07-02 13:45:50 +01:00 Reden: Ik keur dit document goed <i>Bart De Maerschalck</i>
Projectleider:	Plancke, Y.	Getekend door: Yves Plancke (Signature) Getekend op: 2020-07-03 12:38:26 +01:00 Reden: Ik keur dit document goed <i>Yves Plancke</i>

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Mostaert, F.	Getekend door: Frank Mostaert (Signature) Getekend op: 2020-07-02 09:51:32 +01:00 Reden: Ik keur dit document goed <i>Frank Mostaert</i>
-----------------	--------------	---



Abstract

Het onderzoeksproject 'Sedimenttransport op verschillende tijdschalen' tracht de inzichten in de hydro- en sedimentdynamische en morfologische processen op verschillende ruimtelijke- en tijdschalen te verbeteren. Het onderzoek kadert ondermeer binnen thema 7 uit de Agenda van de Toekomst (AvdT): "Morfologische en ecologische effecten sedimentstrategie". In dit rapport worden de modelscenario's voor het jaar 2018 gepresenteerd. Deze scenario's staan in het teken van de validatie en gevoeligheidsanalyse van het voor deze studie nieuw opgezette complexe numerieke model in Telemac-3D en Sisyphe. De gevoeligheidsanalyse voor het hydrodynamisch model omvat een onderzoek naar de effecten van de roosterresolutie, bodemruwheid en parametrisatie van de viscositeit voor de resulterende getijvoortplanting en stromingspatronen. De gevoeligheid van de morfologische modelresultaten wordt aanvullend onderzocht voor variaties in sedimenttransportformule, sedimentdiameter, de parametrisatie van hellingseffecten en de parametrisatie van bochtstromingseffecten. Tevens wordt een vergelijking gemaakt met hydrodynamische en morfologische modelresultaten van Delft3D-NeVla simulaties die eerder werden uitgevoerd in het kader van de eerdere AvdT-studie 'Hydro- en sedimentdynamische en morfologische processen op mesoschaal'. De analyse van de resultaten concentreert zich op een studiegebied rondom de drempel van Hansweert, de Platen van Ossensisse en de diepe put van Hansweert.

De getijvoortplanting in het estuarium is gevoelig voor de gebruikte roosterresolutie in het Telemac model, wat impliceert dat een herkalibratie van de bodemruwheid noodzakelijk is als de roosterresolutie (lokaal) wordt aangepast. De representatie van het verticaal getij in het studiegebied is nauwkeuriger in de Delft3D-NeVla run dan in de verschillende Telemac runs. Dit is waarschijnlijk een gevolg van afwijkingen tussen de afwaartse randvoorwaarden van beide modellen (i.e., geobserveerde waterstanden in Delft3D t.o.v. nesting in een harmonisch model in Telemac). De complexe stromingspatronen bij de Platen van Ossensisse (i.e., circulaire stroming door neervorming) worden beter gereproduceerd door het specifiek hiervoor gekalibreerde Delft3D-NeVla model.

Doordat belangrijke processen met het oog op de morfologische ontwikkeling, zoals bagger- en stortactiviteiten, niet zijn meegenomen in de simulaties kunnen de morfologische modelresultaten niet adequaat worden vergeleken met de geobserveerde morfologische trends. In het algemeen wordt met Sisyphe een sterkere morfologische ontwikkeling gesimuleerd dan met Delft3D, ook als de instellingen grotendeels in overeenstemming zijn gebracht. De resultaten van de gevoeligheidsanalyse laten zien dat de sedimentdiameter (d_{50}) en de lokale bodemruwheid het meeste invloed hebben op de intensiteit van de gemodelleerde morfologische ontwikkeling in het Sisyphe model. In de tweedimensionale Delft3D simulatie hebben bochtstromingseffecten (i.e. *secondary flow*) eveneens een significante invloed op de gemodelleerde morfologische ontwikkeling. Tot slot zijn enkele modelscenario's uitgevoerd waarin de invloed van een storting in de diepe put van Hansweert op de morfologische ontwikkeling wordt onderzocht. In Telemac en Sisyphe leidt een storting tot een lichte toename van de sedimentatie op de Drempel van Hansweert, terwijl het effect in Delft3D vooral lokaal is vanwege een hogere stabiliteit van de gestorte specie.

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 Bestaand modelinstrumentarium	2
1.4 Leeswijzer	3
2 Modelopzet	4
2.1 Modelrooster.....	4
2.2 Bathymetrische gegevens.....	7
2.3 Afwaartse randvoorwaarden.....	7
2.4 Opwaartse randvoorwaarden	11
2.5 Saliniteit.....	11
2.6 Bodemruwheid	13
2.7 Turbulentiemodellering.....	14
2.8 Overige modelinstellingen.....	16
2.9 Instellingen morfologisch model	17
3 Hydrodynamische modelresultaten	19
3.1 Analyse	19
3.2 Vergelijking modellen en roosterresolutie	20
3.3 Gevoeligheid afwaartse randvoorwaarden.....	26
3.4 Vergelijking invloed ruwheidsveld in studiegebied	30
3.5 Gevoeligheid viscositeit.....	36
3.6 Verticaal snelheidsprofiel	40
3.7 Discussie gevoeligheidsanalyse hydrodynamisch model	41
4 Morfologische modelresultaten	43
4.1 Analyse	43
4.2 Geobserveerde morfologische veranderingen.....	43
4.3 Basissimulatie	44

4.4	Morfologische resultaten met instellingen uit AvdT-studie: <i>“Hydro- en sedimentdynamische en morfologische processen op mesoschaal”</i>	45
4.5	Invloed transportformule	48
4.6	Invloed parametrisatie bochtstroming.....	50
4.7	Invloed parametrisatie hellingeffecten	51
4.7.1	Longitudinaal hellingeffect	51
4.7.2	Transversale hellingeffecten	53
4.8	Invloed ‘skin friction correction’	55
4.9	Invloed sedimentdiameter (d_{50})	55
4.10	Invloed roosterresolutie	59
4.11	Invloed aangepast ruwheidsveld Telemac-3D.....	59
4.12	Testsimulaties met storting in diepe put van Hansweert	62
4.13	Discussie morfologische modelresultaten.....	68
5	Conclusies en aanbevelingen	70
5.1	Hydrodynamisch model.....	70
5.2	Morfologisch model	71
6	Referenties	73

Lijst van de tabellen

Tabel 1 - Amplitude- en fasecorrecties aan afwaartse rand op basis van ZUNO modelresultaten.	9
Tabel 2 – Opwaartse randvoorwaarden (debiet).	11
Tabel 3 – Basisinstellingen Telemac-3D model	16
Tabel 4 – Basisinstellingen morfologisch model	17
Tabel 5 – Modelsimulaties met aangepast ruwheidsveld.	31
Tabel 6 – Modelsimulaties met constante viscositeit.	36

Lijst van de figuren

Figuur 1 – Overzichtskaart van geulen en platen in het studiegebied.....	2
Figuur 2 – Modelrooster van het nieuw opgezette Telemac model bij het studiegebied voor verschillende resoluties (20 m, 50 m en 150 m).....	5
Figuur 3 – Nieuw opgezet modelrooster (rood) en rooster van het reeds bestaande Scaldis model (blauw). ..	6
Figuur 4 – Illustratie van het Delft3D-NeVla rooster.....	7
Figuur 5 – Overzicht van de ZUNO-gridcellen (rood) en Telemac-nodes (blauw) die zijn gebruikt in de nesting-procedure.	8
Figuur 6 - Verschilsignaal tussen een initiële simulatie en gemeten waterstandsverloop te Vlissingen voor (boven) en na (onder) de door middel van het lopend gemiddelde (blauw) toegepaste correctie van de afwaartse randvoorwaarden.....	9
Figuur 7 – Opgelegde harmonische waterstandsreeks aan de afwaartse rand voor morfologische simulaties met Telemac.	10
Figuur 8 – Opgelegd morfologisch getij aan de afwaartse rand voor morfologische simulaties met Delft3D-NeVla.	11
Figuur 9 – Initieel saliniteitsveld in Telemac.	12
Figuur 10 – Initieel saliniteitsveld in Delft3D-NeVla.....	12
Figuur 11 – Manning's ruwheidsveld.	13
Figuur 12 – Manning's ruwheidsveld Westerschelde in het door Stark et al. (2019) gebruikte DELFT-3D model.	14
Figuur 13 – Meetlocaties stroomsnelheden rondom de Drempel van Hansweert.....	19
Figuur 14 – Gemiddelde afwijking van de gemodelleerde waterstanden voor Telemac simulaties met verschillende modelroosters en het eerder gekalibreerde Delft-3D model.	21
Figuur 15 – Gemiddelde afwijking van de gemodelleerde hoogwaters ten opzichte van gemeten waarden voor Telemac simulaties met verschillende modelroosters en het eerder gekalibreerde Delft-3D model....	21
Figuur 16 – Gemiddelde afwijking van de gemodelleerde laagwaters ten opzichte van gemeten waarden voor Telemac simulaties met verschillende modelroosters en het eerder gekalibreerde Delft-3D model.....	22
Figuur 17 – RMSE van de gemodelleerde waterstanden ten opzichte van gemeten waarden voor Telemac simulaties met verschillende modelroosters en het eerder gekalibreerde Delft-3D model.	22
Figuur 18 – Gemodelleerd en gemeten stroomsnelheidsverloop bij locatie H1 tijdens springtij voor Telemac simulaties met verschillende modelroosters en het eerder gekalibreerde Delft-3D model.	24
Figuur 19 – Gemodelleerd en gemeten stroomsnelheidsverloop bij locatie H2 tijdens springtij voor Telemac simulaties met verschillende modelroosters en het eerder gekalibreerde Delft-3D model.	24
Figuur 20 – Gemodelleerd en gemeten stroomsnelheidsverloop bij locatie H4 tijdens springtij voor Telemac simulaties met verschillende modelroosters en het eerder gekalibreerde Delft-3D model.	24
Figuur 21 – Gemodelleerd en gemeten dieptegemiddeld stroomsnelheidsverloop in de diepe put van Hansweert tijdens springtij voor Telemac simulaties met verschillende modelroosters.	24

Figuur 22 – Gemodelleerd stromingsveld 30 minuten voor (links), tijdens (midden) en 30 minuten na (rechts) springtij-HW ter hoogte van de Platen van Ossensisse voor het gekalibreerd Delft3D model.	25
Figuur 23 – Gemodelleerd stromingsveld 30 minuten voor (links), tijdens (midden) en 30 minuten na (rechts) springtij-HW ter hoogte van de Platen van Ossensisse voor het Telemac model (mesh_hw150).....	25
Figuur 24 – Gemodelleerd stromingsveld 30 minuten voor (links), tijdens (midden) en 30 minuten na (rechts) springtij-HW ter hoogte van de Platen van Ossensisse voor het Telemac Scaldis model.	25
Figuur 25 - Gemodelleerd stromingsveld 30 minuten voor (links), tijdens (midden) en 30 minuten na (rechts) springtij-HW ter hoogte van de Platen van Ossensisse voor het Telemac model (mesh_hw50).....	26
Figuur 26 – Ligging van de afwaartse rand in het nieuw opgezette Telemac model (blauw) en in het ter hoogte van de lijn Westkapelle-Cadzand afgeknipte model (rood).	26
Figuur 27 – RMSE van de gemodelleerde waterstanden ten opzichte van gemeten waarden voor het in ZUNO geneste Telemac model en voor Telemac- en Delft3D modellen met een bij Westkapelle-Cadzand afgeknipte rand.	28
Figuur 28 – Gemiddelde afwijking van de gemodelleerde waterstanden ten opzichte van het gemeten waterstandsverloop voor het in ZUNO geneste Telemac model en voor Telemac- en Delft3D modellen met een bij Westkapelle-Cadzand afgeknipte rand.....	28
Figuur 29 – Gemiddelde afwijking van de gemodelleerde hoogwaters ten opzichte van gemeten waarden voor het in ZUNO geneste Telemac model en voor Telemac- en Delft3D modellen met een bij Westkapelle-Cadzand afgeknipte rand.....	29
Figuur 30 – Gemiddelde afwijking van de gemodelleerde laagwaters ten opzichte van gemeten waarden voor het in ZUNO geneste Telemac model en voor Telemac- en Delft3D modellen met een bij Westkapelle-Cadzand afgeknipte rand.	29
Figuur 31 – Gemodelleerd en gemeten stroomsnelheidsverloop bij locatie H1 tijdens springtij voor het in ZUNO geneste Telemac model en voor Telemac- en Delft3D modellen met een bij Westkapelle-Cadzand afgeknipte rand.	30
Figuur 32 – Gemodelleerd en gemeten stroomsnelheidsverloop bij locatie H2 tijdens springtij voor het in ZUNO geneste Telemac model en voor Telemac- en Delft3D modellen met een bij Westkapelle-Cadzand afgeknipte rand.	30
Figuur 33 – Aangepast ruwheidsveld ter hoogte van de Platen van Ossensisse in Delft3D studie door Stark et al. (2019).....	31
Figuur 34 – Gemiddelde afwijking van de gemodelleerde waterstanden ten opzichte van het gemeten waterstandsverloop voor Telemac simulaties met verschillende ruwheidsvelden in het studiegebied en het eerder gekalibreerde Delft-3D model.	32
Figuur 35 – Gemiddelde afwijking van de gemodelleerde hoogwaters ten opzichte van gemeten waarden voor Telemac simulaties met verschillende ruwheidsvelden in het studiegebied en het eerder gekalibreerde Delft-3D model.	32
Figuur 36 – Gemiddelde afwijking van de gemodelleerde laagwaters ten opzichte van gemeten waarden voor Telemac simulaties met verschillende ruwheidsvelden in het studiegebied en het eerder gekalibreerde Delft-3D model.	33
Figuur 37 – RMSE van de gemodelleerde waterstanden ten opzichte van gemeten waarden voor Telemac simulaties met verschillende ruwheidsvelden in het studiegebied en het eerder gekalibreerde Delft-3D model.....	33

Figuur 38 – Gemodelleerd en gemeten stroomsnelheidsverloop bij locatie H1 tijdens springtij voor Telemac simulaties met verschillende ruwheidsvelden in het studiegebied en het eerder gekalibreerde Delft-3D model.....	35
Figuur 39 – Gemodelleerd en gemeten stroomsnelheidsverloop bij locatie H2 tijdens springtij voor Telemac simulaties met verschillende ruwheidsvelden in het studiegebied en het eerder gekalibreerde Delft-3D model.....	35
Figuur 40 – Gemodelleerd en gemeten stroomsnelheidsverloop bij locatie H4 tijdens springtij voor Telemac simulaties met verschillende ruwheidsvelden in het studiegebied en het eerder gekalibreerde Delft-3D model.....	35
Figuur 41 – Gemodelleerd dieptegemiddeld stroomsnelheidsverloop in de diepe put van Hansweert tijdens springtij voor Telemac simulaties met verschillende ruwheidsvelden in het studiegebied en het eerder gekalibreerde Delft-3D model.	35
Figuur 42 – Gemodelleerd stromingsveld 30 minuten voor (links), tijdens (midden) en 30 minuten na (rechts) springtij-HW ter hoogte van de Platen van Ossensisse voor simulatie hw50_rgh=0,010@PvO_0,025@geul.	36
Figuur 43 – Gemiddelde afwijking van de gemodelleerde waterstanden ten opzichte van het gemeten waterstandsverloop voor Telemac simulaties met verschillende 'Velocity Diffusivity' coëfficiënten en met het Smagorinsky model.	37
Figuur 44 – Gemiddelde afwijking van de gemodelleerde hoogwaters ten opzichte van gemeten waarden voor Telemac simulaties met verschillende 'Velocity Diffusivity' coëfficiënten en met het Smagorinsky model.	38
Figuur 45 – Gemiddelde afwijking van de gemodelleerde laagwaters ten opzichte van gemeten waarden voor Telemac simulaties met verschillende 'Velocity Diffusivity' coëfficiënten en met het Smagorinsky model. .	38
Figuur 46 – Gemodelleerd en gemeten stroomsnelheidsverloop bij locatie H1 tijdens springtij voor Telemac simulaties met verschillende 'Velocity Diffusivity' coëfficiënten en met het Smagorinsky model.....	39
Figuur 47 – Gemodelleerd en gemeten stroomsnelheidsverloop bij locatie H2 tijdens springtij voor Telemac simulaties met verschillende 'Velocity Diffusivity' coëfficiënten en met het Smagorinsky model.....	39
Figuur 48 – Gemodelleerd en gemeten stroomsnelheidsverloop bij locatie H4 tijdens springtij voor Telemac simulaties met verschillende VELOCITY DIFFUSIVITY coëfficiënten en met het Smagorinsky model.....	39
Figuur 49 – Gemodelleerd en gemeten dieptegemiddeld stroomsnelheidsverloop in de diepe put van Hansweert tijdens springtij voor Telemac simulaties met verschillende 'Velocity Diffusivity' coëfficiënten en met het Smagorinsky model.....	39
Figuur 50 – Gemodelleerde verticale snelheidsprofielen in W-O-richting tijdens springtij in de diepe put van Hansweert.	40
Figuur 51 – Gemodelleerde verticale snelheidsprofielen in N-Z-richting tijdens springtij bij meetpunt H1. .	41
Figuur 52 – Geobserveerde morfologische ontwikkeling tussen 2013 en 2015.	44
Figuur 53 – Gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met basissimulatie RUN05.....	45
Figuur 54 – Gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met het eerder gekalibreerde Delft3D model (Stark et al., 2019) zijn gebruikt ($d_{50} = 170 \mu\text{m}$).....	47
Figuur 55 – Gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulatie RUN08 waarin de sedimenttransport instellingen van het eerder gekalibreerde Delft3D model (Stark et al., 2019) zijn gebruikt (i.e., ruwheidshoogte $k_s = 0.01 \text{ m}$ en $d_{50} = 170 \mu\text{m}$).....	47
Figuur 56 – Verschil tussen gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulatie RUN08 waarin de instellingen van het eerder gekalibreerde Delft3D model (Stark et al., 2019) zijn gebruikt en met het Delft3D model zelf.....	48

Figuur 57 – Gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulatie RUN01 (i.e., sedimenttransport berekend met Engelund-Hansen in plaats van met Van Rijn, 1984).....	49
Figuur 58 – Verschil tussen gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulatie RUN01 (Engelund-Hansen) en RUN05 (basissimulatie met Van Rijn, 1984).	49
Figuur 59 – Verschil tussen gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulatie RUN06 (secondary currents = YES) en RUN05 (basissimulatie).....	50
Figuur 60 – Verschil tussen gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met Delft3D-NeVla simulatie RUN21 (met secundaire stromingseffecten) en NEVLA_RUN20 (zonder secundaire stromingseffecten).	51
Figuur 61 – Verschil tussen gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulatie RUN12 (i.e., $\beta=1.0$ voor longitudinaal hellingeffect) en RUN05 (basissimulatie met $\beta=1.3$).	52
Figuur 62 – Verschil tussen gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulatie RUN13 (i.e., $\beta=1.6$ voor longitudinaal hellingeffect) en RUN05 (basissimulatie met $\beta=1.3$).	52
Figuur 63 – Verschil tussen gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulatie RUN09 (i.e., transversaal hellings-effect berekend met formulering Talmon et al. (1995) en $\beta_2=1.0$) en RUN05 (basissimulatie met Koch & Flokstra (1981) formule voor transversaal hellingeffect).....	53
Figuur 64 – Verschil tussen gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulatie RUN10 (i.e., transversaal hellings-effect berekend met formulering Talmon et al. (1995) en $\beta_2=10$) en RUN05 (basissimulatie met Koch & Flokstra (1981) formule voor transversaal hellingeffect).....	54
Figuur 65 – Verschil tussen gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulatie RUN11 (i.e., transversaal hellings-effect berekend met formulering Talmon et al. (1995) en $\beta_2=0.1$) en RUN05 (basissimulatie met Koch & Flokstra (1981) formule voor transversaal hellingeffect).....	54
Figuur 66 – Gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulatie RUN14 zonder 'skin friction correction'.	56
Figuur 67 – Verschil tussen gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulatie RUN14 (zonder 'skin friction correction') en RUN05 (basissimulatie met 'skin friction correction').....	56
Figuur 68 – Gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulatie RUN15 ($d_{50} = 150 \mu\text{m}$). 57	
Figuur 69 – Gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulatie RUN16 ($d_{50} = 180 \mu\text{m}$). 57	
Figuur 70 – Gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulatie RUN17 ($d_{50} = 220 \mu\text{m}$). 58	
Figuur 71 – Gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulatie RUN18 ($d_{50} = 250 \mu\text{m}$). 58	
Figuur 72 – Gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulatie RUN19 (roosterresolutie van 50 m in het studiegebied).	60
Figuur 73 – Verschil tussen gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulatie RUN19 (50 m resolutie) en RUN05 (basissimulatie met 150 m resolutie).	60
Figuur 74 – Gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulatie RUN20 (ruwheidsveld met $n=0.010 \text{ s m}^{-1/3}$ op de Platen van Ossensisse en $n=0.025 \text{ s m}^{-1/3}$ in de geulen rond de Platen van Ossensisse). 61	
Figuur 75 – Verschil tussen gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulatie RUN20 (ruwheidsveld met $n=0.010 \text{ s m}^{-1/3}$ op de Platen van Ossensisse en $n=0.025 \text{ s m}^{-1/3}$ in de geulen rond de Platen van Ossensisse) en RUN19 (constant ruwheidsveld met $n=0.022 \text{ s m}^{-1/3}$ in het studiegebied).....	61
Figuur 76 – Gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulatie RUN31 (storting van 1.0 Mm^3 in diepe put van Hansweert).	63

Figuur 77 – Verschil in gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulatie RUN31 (storting van 1.0 Mm ³ in diepe put van Hansweert) en RUN20 (referentiesimulatie) ten opzichte van verschil bij start simulatie (inzet).	63
Figuur 78 – Gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulatie RUN33 (storting van 3.0 Mm ³ in diepe put van Hansweert).	64
Figuur 79 – Verschil in gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulatie RUN33 (storting van 3.0 Mm ³ in diepe put van Hansweert) en RUN20 (referentiesimulatie) ten opzichte van verschil bij start simulatie (inzet).	64
Figuur 80 – Gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met Delft3D simulatie NEVLA_RUN20.	65
Figuur 81 – Gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met Delft3D simulatie NEVLA_RUN31 (storting van 1.0 Mm ³ in diepe put van Hansweert).	66
Figuur 82 – Verschil in gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met Delft3D simulaties NEVLA_RUN31 (storting van 1.0 Mm ³ in diepe put van Hansweert) en NEVLA_RUN20 (referentiesimulatie) ten opzichte van verschil bij start simulatie (inzet).	66
Figuur 83 – Gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met Delft3D simulatie NEVLA_RUN33 (storting van 3.0 Mm ³ in diepe put van Hansweert).	67
Figuur 84 – Verschil in gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met Delft3D simulaties NEVLA_RUN33 (storting van 3.0 Mm ³ in diepe put van Hansweert) en NEVLA_RUN20 (referentiesimulatie) ten opzichte van verschil bij start simulatie (inzet).	67

1 Introductie

1.1 Situering

In het kader van het onderzoeksprogramma “Agenda voor de Toekomst” (AvdT) voert het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) onderzoek uit naar het sedimenttransport in het Schelde-estuarium op verschillende tijdschalen, dit binnen thema 6 “Slib in het estuarium: wat zijn de condities voor een systeemomslag?” en thema 7 “*Morfologische en ecologische effecten sedimentstrategie*” uit het AvdT programma. Dit rapport is onderdeel van Deeltaak 9 - “*Sedimenttransport op verschillende tijdschalen*” van het globale AvdT onderzoeksprogramma. Binnen dit onderzoek wordt gebruik gemaakt van data-analyse, *expert judgement*, geïdealiseerde en complexe modellen.

Binnen één van de onderdelen van deze studie worden de variaties op korte (i.e., getijcycli of springtij-doodtij-cycli) en middellange (i.e. maanden tot jaren) termijn in sedimenttransportprocessen bestudeerd met behulp van een complex numeriek model. Dit model kan, na validatie, ingezet worden om de invloed van stortstrategieën op de morfologische processen in het estuarium te onderzoeken.

In voorliggende rapport wordt de performantie van een 3D-numeriek model in de TELEMAC software onderzocht. Het model werd afgeleid van het bestaande SCALDIS-model (Smolders *et al.*, 2016). In een voorgaande studie werd reeds de performantie van een gelijkaardig model in Delft3D onderzocht, waaruit bleek dat de waterbeweging in het studiegebied goed werd gereproduceerd door het model, maar dat op vlak van sedimenttransport en morfologie nog een aantal discrepanties met de metingen bestonden (Stark *et al.*, 2019).

1.2 Doelstelling

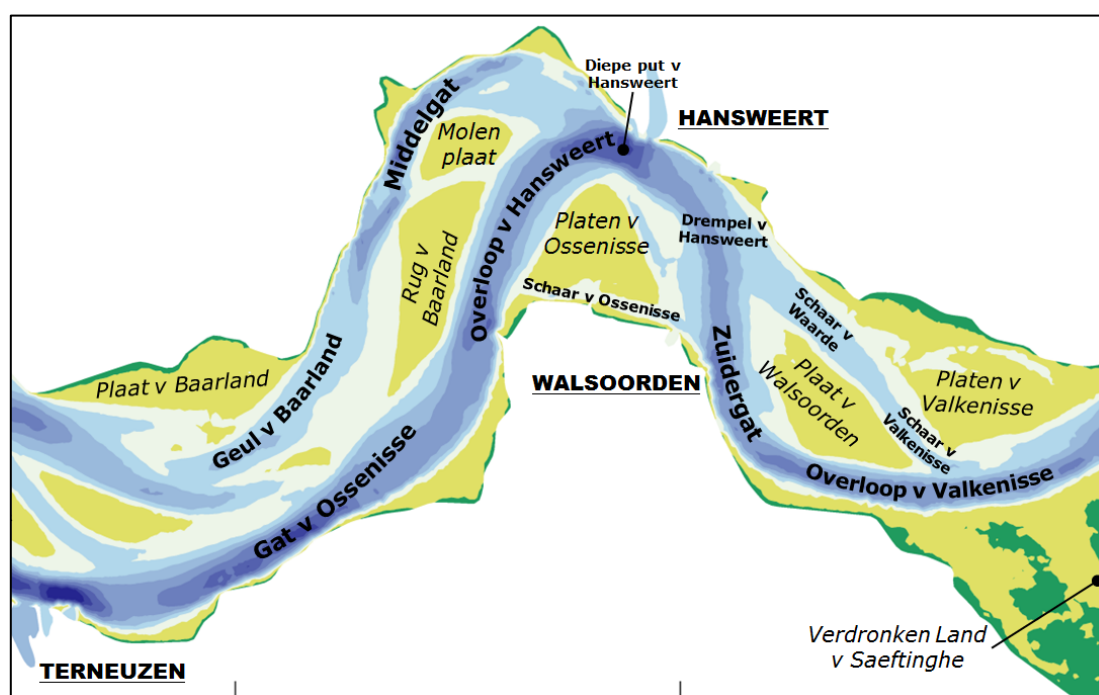
Voordat dit numerieke model ingezet kan worden om reële cases te bestuderen zal eerst de modelprestatie worden getest door middel van een gevoeligheidsanalyse en een vergelijking met bestaande complexe numerieke modellen (e.g. Delft3D-NeVla model van het Schelde-estuarium). In deze gevoeligheidsanalyse wordt het belang van diverse invoerparameters onderzocht. De focus ligt hierbij in eerste instantie op de modelprestatie in de Westerschelde tussen Terneuzen en Walsoorden. Dit deel van de Westerschelde omvat verschillende momenteel vergunde en potentiële toekomstige stortlocaties. Aangezien de huidige vergunning voor het terugstorten van onderhoudsspecie begin 2022 afloopt, dienen deze verbeterde inzichten (o.a. verspreiding van gestorte specie) om de toekomstige stortstrategie optimaal in te kunnen vullen. Dit beperkte studiegebied omvat het Gat van Ossensisse, de Overloop van Hansweert, de Platen van Ossensisse, de diepe put van Hansweert en de Drempel van Hansweert (Figuur 1).

Het toespitsen op dit deel van de Westerschelde laat onverlet dat het model in de toekomst ook ingezet kan worden om hydro- en morfodynamische vraagstukken in andere delen van de Westerschelde en Beneden-Zeeschelde te onderzoeken. Hiervoor dient dan eerst een meer uitgebreide modelvalidatie op basis van bijvoorbeeld lokale stroomsnelheidsmetingen te gebeuren.

De doelstelling van voorliggende studie is concreet om de modelprestatie van Telemac-3D (en Sisyphe voor sedimenttransportmodellerings) te onderzoeken met betrekking tot het reproduceren van waterstanden, stroomsnelheden en de morfologische ontwikkeling in het studiegebied in de Westerschelde. De hydrodynamische modelresultaten worden vergeleken met geobserveerde waarden, terwijl de morfologische modelresultaten worden geanalyseerd aan de hand van sedimentatie- en erosietrends.

Dit rapport omvat derhalve de beschrijving, validatie en gevoeligheidsanalyse van dit nieuw opgezette Telemac-3D (i.e. hydrodynamica) en Sisyphe (i.e., sedimenttransport en morfologie) model. Ter aanvulling en ter vergelijking worden ook modelresultaten met Delft3D-NeVla gepresenteerd. De modeloefeningen die in dit rapport worden gepresenteerd vallen binnen Deeltaak 4 - “Scenario’s” van de huidige studie. Deze deeltaak voorziet in de mogelijkheid om (ad hoc) modelscenario’s door te rekenen ten behoeve van het optimaliseren van de stortstrategie in de Westerschelde. De eerste reeks modelscenario’s (i.e., scenario’s uitgevoerd in 2018) is echter ingezet om meer inzicht te verkrijgen in de modelprestaties van Telemac-3D en Delft3D-NeVla met betrekking tot het reproduceren van waterstanden en stromingspatronen in de omgeving van de Drempel van Hansweert, alsmede in de gevoeligheid van morfologische modelresultaten voor de gekozen modelinstellingen in Sisyphe (Telemac-3D model).

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



1.3 Bestaand modelinstrumentarium

Telemac - Scaldis

Binnen het project “*Integraal plan Boven-Zeeschelde*” werd door het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) een ongestructureerd Telemac-3D model van het volledige Schelde-estuarium (Scaldis genaamd) ontwikkeld (Smolders *et al.*, 2016). Dit model onderscheidt zich van andere modellen van het Schelde-estuarium door de hoge ruimtelijke resolutie in vooral het opwaartse deel van het estuarium. Ook zijn overstromingsgebieden die in kader van het SIGMA-plan werden gecreëerd geïmplementeerd in dit model. Naast de waterbeweging is dit model in staat het cohesief (Smolders *et al.*, in voorbereiding) en niet-cohesief sediment transport (Smolders *et al.*, 2019) in delen van het estuarium te modelleren. In het kader van project “Historische evolutie getij en morfologie” (deeltaak 4 binnen AvdT) werd het Scaldis model hydrodynamisch voor meerdere historische situaties (i.e., 1930, 1960, 1980, 2001, 2013) gevalideerd (Stark *et al.*, 2020).

Delft3D - NeVla

Een ander model van het Schelde-estuarium dat voor dit onderzoek beschikbaar is het twee- en driedimensionale Delft3D NeVla model (zie Maximova *et al.*, 2009 voor een uitvoerige kalibratie van de waterbeweging in NeVla). Dit model kan ingezet worden om de waterbeweging in het estuarium te modelleren, evenals om het sedimenttransport te modelleren. In het kader van een voorgaande AvdT-studie (i.e., “Hydro- en sedimentdynamische en morfologische processen op mesoschaal”; Stark *et al.*, 2019) werd het tweedimensionale NeVla model gekalibreerd om gemeten stroomsnelheden en sedimenttransporten rond de Drempel van Hansweert te simuleren.

1.4 Leeswijzer

Dit rapport behandelt de resultaten van modelsimulaties waarin de modelprestatie voor verschillende roosterresoluties wordt vergeleken met de modelprestatie van het Scaldis model (Smolders *et al.*, 2016) en met de modelprestatie van een in een eerdere studie op dezelfde metingen gekalibreerd Delft3D model (Stark *et al.*, 2019).

Hoofdstuk 2 bespreekt de configuratie van het voor dit onderzoek nieuw opgezette Telemac-3D model. Dit omvat onder meer de constructie van het mesh en het creëren van de (afwaartse) randvoorwaarden.

In Hoofdstuk 3 wordt de modelprestatie van het nieuw opgezette Telemac-3D model onderzocht en vergeleken met de prestatie van al bestaande Telemac-3D (i.e., Scaldis) en Delft3D (i.e. NeVla 2D) modellen van het Schelde-estuarium. Daarnaast wordt gekeken naar de invloed van variaties in het bodemruwheidsveld in het studiegebied, evenals naar het effect van de (horizontale) viscositeit in het model. De focus ligt hierbij op de representatie van waterstanden in de Westerschelde, evenals de representatie van gemeten stroomsnelheden en het stroomsnelheidsveld rondom de Drempel van Hansweert (i.e., deze metingen werden gerapporteerd door Vandebroek *et al.*, 2017). Ook worden de stroomsnelheden vergeleken in de diepe put van Hansweert, dit met oog op mogelijke modeltoepassingen waarbij stortscenario's in de diepe delen worden gemodelleerd.

Het uiteindelijke doel van de modelstudie is om de morfologische ontwikkeling van het studiegebied te kunnen simuleren en de sedimenttransportprocessen aan de hand van modeloefeningen te kunnen verklaren. Het model zou dan ingezet kunnen worden om het morfologisch gedrag voor verschillende stortstrategieën te voorspellen. Daarom zijn tevens enkele morfologische modelsimulaties gedaan met Sisyphé (gekoppeld met Telemac-3D) om de kwaliteit en gevoeligheid van de morfologische modelresultaten in het studiegebied te analyseren. Hoofdstuk 4 omvat de resultaten van morfologische simulaties met het gekoppelde Telemac-3D/Sisyphé model. Dit hoofdstuk omvat tevens een vergelijking van deze modelresultaten met de uitkomsten van morfologische simulaties die in een eerder AvdT-onderzoek (i.e., Stark *et al.*, 2019) met Delft3D werden uitgevoerd, alsmede modelresultaten van testsimulaties met een geschematiseerde storting in het studiegebied.

Tot slot worden in Hoofdstuk 5 enkele conclusies en aanbevelingen gegeven met betrekking tot de modelprestatie en toepasbaarheid van de geteste modellen.

2 Modelopzet

Het hydrodynamisch model dat in deze gevoeligheids- en scenario-analyse wordt gebruikt is Telemac-3D (V7P2), dat onderdeel is van de Telemac modelsoftware. Telemac-3D is een model dat gebruik maakt van de eindige-elementen-methode in een ongestructureerd modelrooster van driehoekige elementen. Die laatste eigenschap laat toe om het rooster op eenvoudige wijze lokaal te verfijnen, zodat de bathymetrie in het studiegebied meer gedetailleerd kan worden weergegeven. In de beschrijving van de modelopzet wordt meermaals verwezen naar het in het kader van het project “*Integraal Plan Boven-Zeeschelde*” ontwikkelde Telemac-3D model Scaldis, wat omschreven wordt in Smolders *et al.* (2016). Gedetailleerde informatie over de Telemac modelsoftware is beschikbaar in de Telemac gebruikershandleiding (zie: <http://wiki.opentelemac.org>) of in Hervouet (2007). Een uitvoerige beschrijving van de sediment transport module Sisyphé is te vinden in Villaret *et al.* (2013) of in de Sisyphé gebruikershandleiding (Tassi, 2017).

In dit hoofdstuk wordt ook enkele malen gerefereerd naar de modelopzet van het Delft3D-NeVla model, dat eerder werd gebruikt om stroming, sedimenttransport en de morfologische ontwikkeling in het studiegebied te modelleren. Meer informatie over deze voorgaande modelstudies kan gevonden worden in Meire *et al.* (2017) en Stark *et al.* (2019). Gedetailleerde informatie over de Delft3D software is beschikbaar in de Delft3D-FLOW user manual (Deltares, 2011).

2.1 Modelrooster

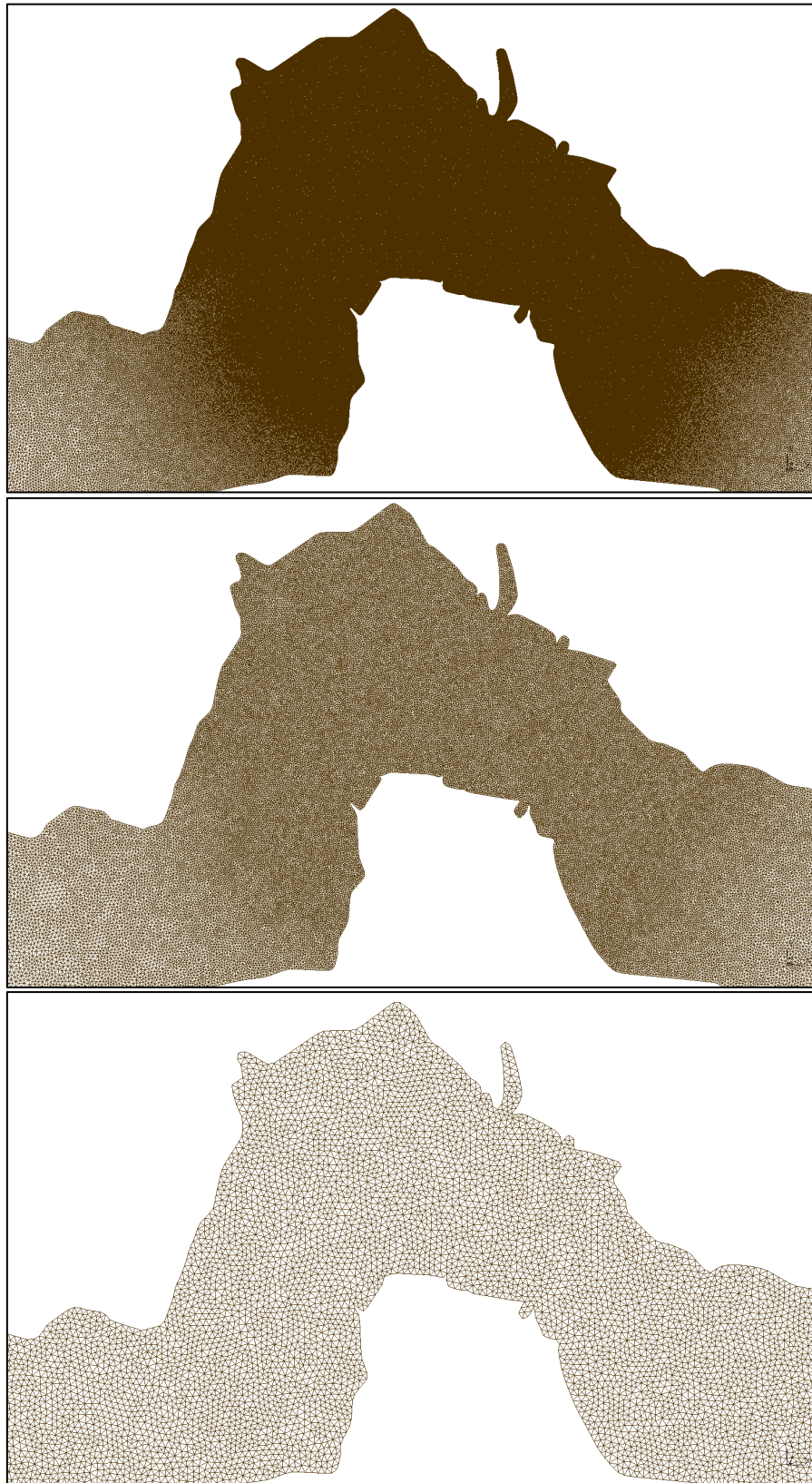
Telemac-3D

Voor deze studie is een nieuw Telemac modelrooster geconstrueerd met behulp van de GMSH meshing-tool (Geuzaine & Remacle, 2009). De GMSH software genereert automatisch een mesh dat geoptimaliseerd is voor numerieke solvers zoals deze gebruikt binnen de Telemac software (i.e., *skewness* en *aspect ratio*). Deze meshing-tool laat toe de roosterresolutie ruimtelijk te variëren op basis van locatie, afstand tot de modelrand, afstand tot een bepaald punt of op basis van dieptegradiënten in de bathymetrie. Ook kan op eenvoudige wijze de roosterresolutie in een specifiek deel van het estuarium aangepast worden (e.g. Figuur 2), zonder dat andere delen van het modelrooster hierdoor beïnvloed worden.

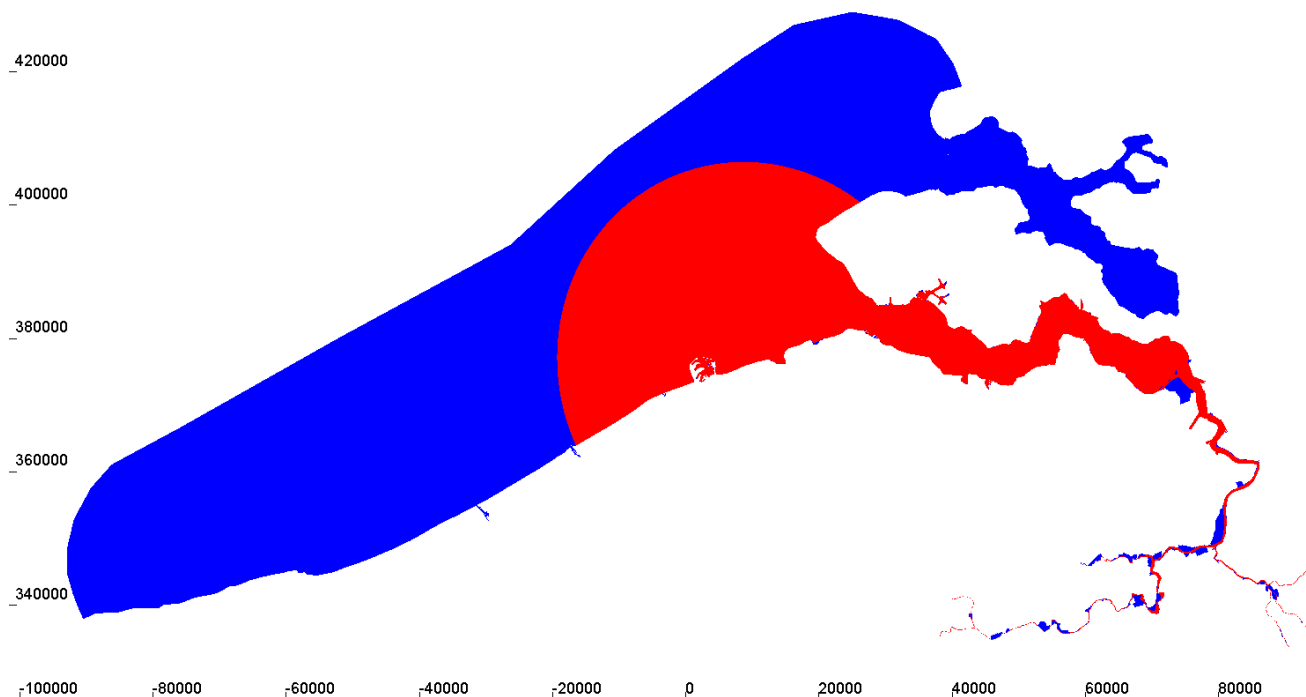
Het voor dit project opgezette model is minder uitgebreid dan het binnen het project “*Integraal plan Boven-Zeeschelde*” ontwikkelde Scaldis Telemac-3D model (Smolders *et al.*, 2016). Meer specifiek is de modelresolutie van dit model in de Boven-Zeeschelde gereduceerd en is het deel Noordzee en kust kleiner dan in Scaldis. Ook zijn de overstromingsgebieden langs de Zeeschelde niet geïncludeerd. Het volledige modelrooster is weergegeven in Figuur 3 samen met het modelrooster van het Scaldis model.

In het studiegebied tussen Terneuzen en Bath is de roosterresolutie in testsimulaties gevarieerd tussen 150 m (i.e., identiek aan de roosterresolutie in het Scaldis model), 50 m en 20 m. Figuur 2 geeft het modelrooster weer voor de verschillende modelresoluties. De modelresolutie in het overige deel van de Westerschelde is 150 m. In het mondingsgebied neemt de resolutie geleidelijk af naar ongeveer 500 m aan de afwaartse rand van het model. In de Beneden-Zeeschelde neemt de resolutie juist geleidelijk toe naar 25 m. In de Boven-Zeeschelde en getij gebonden zijrivieren is de resolutie constant op 25 m gezet. Het aantal nodes in het nieuw opgezette mesh bedraagt 101494 in 2D voor het standaardmodel en neemt toe naar 149020 en 363235 voor de modellen die tot 50 m en 20 m resolutie zijn verfijnd in het studiegebied tussen Terneuzen en Walsoorden. Het aantal elementen in 2D bedraagt 184136, 278405 of 705422 voor de modellen met 150 m, 50 m en 20 m resolutie in het studiegebied.

Figuur 2 – Modelrooster van het nieuw opgezette Telemac model bij het studiegebied voor verschillende resoluties (20 m, 50 m en 150 m).



Figuur 3 – Nieuw opgezet modelrooster (rood) en rooster van het reeds bestaande Scaldis model (blauw).



3D rooster

Het 3D model telt vijf signallagen, waarvan de hoogteligging een functie is van de genormaliseerde diepte. De verdeling over de diepte is manueel ingevoerd in de *condim.f* subroutine en is evenals in het Scaldis model (Smolders *et al.*, 2016) ingedeeld met lagen op:

- $z^*(1)=0.00 \cdot h$ (i.e., bodem)
- $z^*(2)=0.12 \cdot h$
- $z^*(3)=0.30 \cdot h$
- $z^*(4)=0.60 \cdot h$
- $z^*(5)=1.00 \cdot h$ (i.e., wateroppervlak)

Delft3D-NeVla

Het NeVla-rooster omvat het volledige Schelde estuarium van de Noordzee, de Vlakte van de Raan, de Westerschelde, de Zeeschelde, en de getijgebonden zijrivieren (Figuur 4). De afwaartse rand van het NeVla-model is gelegen in de Noordzee, de opwaartse randen zijn gelegen aan de grenzen van het tijgebied. De resolutie van het rekenrooster varieert van ongeveer 400 m op de Noordzee en neemt geleidelijk af tot ongeveer 30 meter in de buurt van Schelle. Ter hoogte van het studiegebied nabij Hansweert bedraagt de roosterresolutie ongeveer 100 m.

Voor de hydrodynamische simulaties is de afwaartse rand van het model afgesneden ter hoogte van de lijn Westkapelle – Cadzand (witte lijn op Figuur 4) om de rekentijd te reduceren. Voor het doorrekenen van morfologische simulaties is het gehele NeVla-modelrooster (i.e., inclusief de kustzone) gebruikt omdat het afsnijden ter hoogte van Westkapelle - Cadzand in eerdere studies tot instabiliteiten in morfologische simulaties heeft geleid (zie: Meire *et al.*, 2017).

Figuur 4 – Illustratie van het Delft3D-NeVla rooster



2.2 Bathymetrische gegevens

De bathymetrische data in het studiegebied is identiek aan de bathymetrische data die is gebruikt voor het eerder gekalibreerde Delft3D-NeVla model binnen het AvdT-project “*Hydro- en sedimentdynamische en morfologische processen op mesoschaal*” (Stark *et al.*, 2019). Dit houdt meer specifiek in dat voor de Westerschelde bathymetrische gegevens uit het jaar 2015 met een resolutie van 20 x 20 m zijn gebruikt. Voor het studiegebied rond de Platen van Ossensisse werd gebruik gemaakt van multibeam echo-sounding peilingen, opgemeten in het kader van de opvolging binnen Flexibel Storten, die in dezelfde periode werden uitgevoerd als wanneer de stroommetingen plaatsvonden (april-mei 2016). In het kustgebied en in de Zeeschelde is de bathymetrische data identiek aan de data van het Scaldis-2013 model (Smolders *et al.*, 2016).

Het gebruikte coördinatenstelsel is RD Parijs, het verticaal referentiepeil is uitgedrukt in m TAW.

De bathymetrische gegevens werden geïnterpoleerd op het modelrooster met behulp van de ‘2D-interpolator’ tool in het door National Research Council Canada (NRC) ontwikkelde pre- en post-processing softwarepakket BlueKenue.

2.3 Afwaartse randvoorwaarden

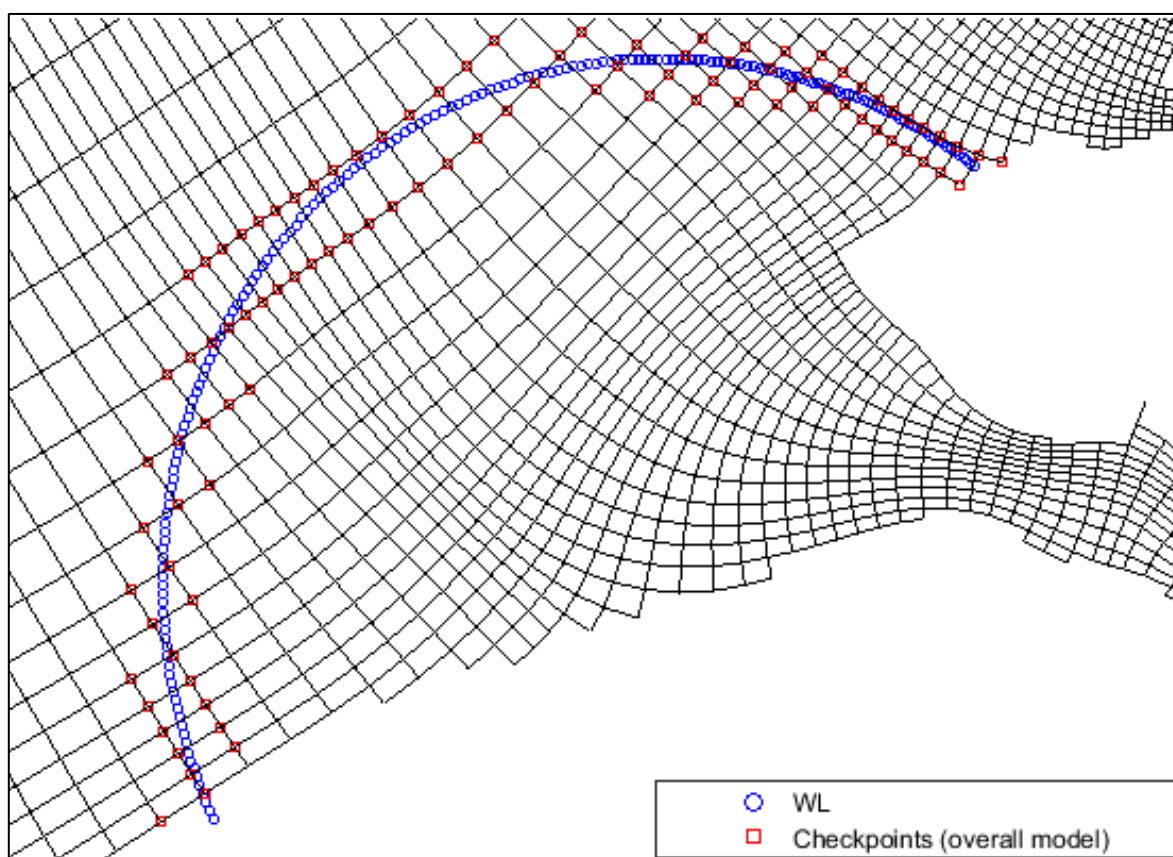
De afwaartse randvoorwaarden voor de hydrodynamische modelsimulaties zijn opgelegd voor de volgende periode:

- 26-4-2016 tot en met 11-5-2016

Randvoorwaarden Telemac

Voor het nieuw opgezette Telemac-3D model bestaan de afwaartse randvoorwaarden, evenals voor het bestaande Scaldis 3D model, uit modelresultaten van een harmonisch '*continental shelf model*'. Er is voor een harmonische run gekozen omdat er geen meteorologische run beschikbaar was om het Telemac model in te nesten. Deze harmonische run is uitgevoerd met de CSM en ZUNO modellen in SIMONA (zie voor meer informatie: Leyssen *et al.*, 2012 en Maximova *et al.*, 2016). Figuur 5 toont de uitvoerpunten van het ZUNO model (in rood) die zijn gebruikt om de afwaartse rand van het nieuwe Telemac modelrooster (in blauw) in te nesten.

Figuur 5 – Overzicht van de ZUNO-gridcellen (rood) en Telemac-nodes (blauw) die zijn gebruikt in de nesting-procedure.



De harmonische componenten uit deze modeltrein zijn vervolgens gecorrigeerd op basis van een vergelijking van de ZUNO modelresultaten met waterstandsmetingen in het mondingsgebied tijdens de studieperiode. Op zowel modelresultaten als metingen is een harmonische analyse toegepast met de T-TIDE Matlab toolbox (Pawlowicz *et al.*, 2002), waarna de gevonden amplitude- en faseverschillen tussen het ZUNO-model en de gemeten getijcomponenten worden gebruikt voor een harmonische correctie aan de afwaartse rand van de Telemac-modellen. Er zijn twee testsimulaties uitgevoerd in TELEMAC waarin de harmonische correctie van de eerst werd uitgevoerd op basis van waterstandsmetingen in Oostende, Wandelaar, Vlake van de Raan en Westkapelle (i.e., stations gesitueerd langs de modelrand) en vervolgens enkel op basis van metingen in Cadzand en Westkapelle (i.e., stations gesitueerd in de monding). Uit deze testsimulaties (i.e., waarvan de resultaten niet in dit rapport zijn opgenomen) volgt dat de amplitude- en fasecorrectie op basis van de stations in Cadzand en Westkapelle tot een betere representatie van de hoog- en laagwaters in het estuarium leidt. De correcties die zijn toegepast op basis van de vergelijking tussen de harmonische

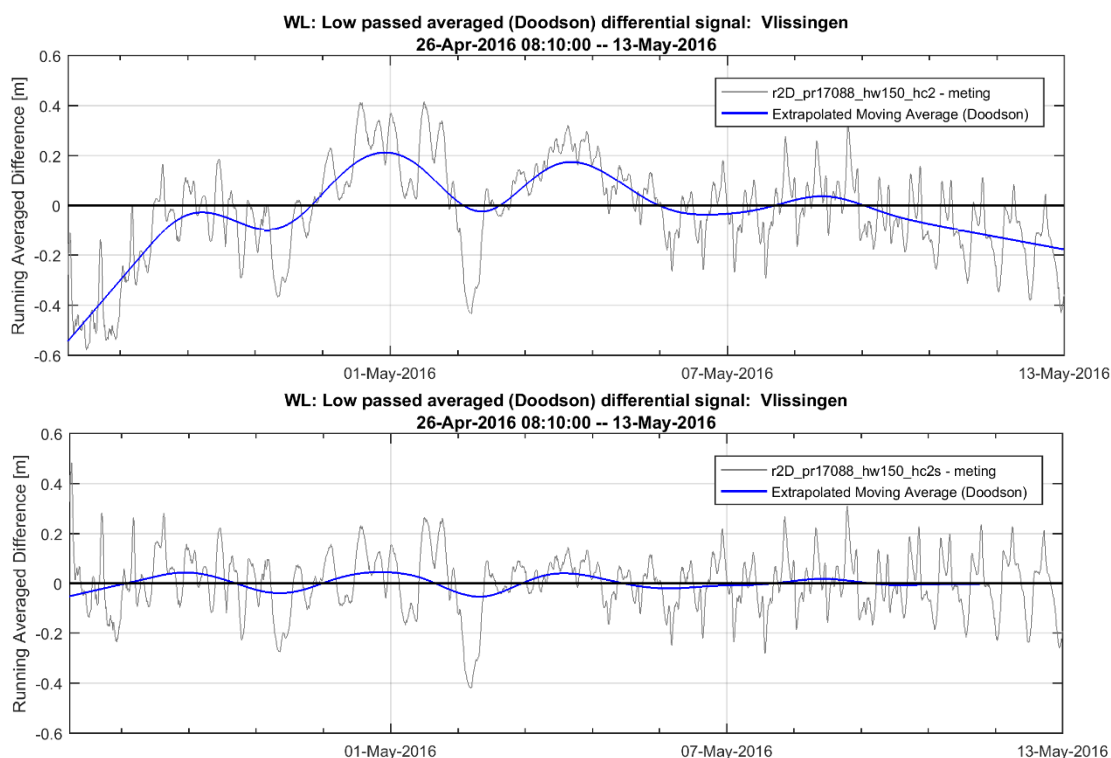
componentenanalyse van de ZUNO modelresultaten en de gemeten waterstanden in Cadzand en Westkapelle zijn opgesomd in Tabel 1.

Tot slot is op basis van een eerste simulatie met het Telemac-model een tweede correctie uitgevoerd op de afwaartse randvoorwaarden. Deze correctie gebeurt op basis van een 'proxy' opzetsignaal te Vlissingen dat is bepaald door het lopend gemiddelde van het verschil tussen de gemodelleerde waterstand en de gemeten waterstand in Vlissingen te bepalen (i.e., bepaald met een Doodson-filter; e.g. Godin, 1972). De correctie compenseert voor het ontbreken van de meteorologische forcering in de CSM-ZUNO model run voor de geselecteerde periode. Figuur 6 toont dit lopend gemiddelde van het verschilsignaal in Vlissingen voor en na toepassing van deze tweede correctie. Er wordt opgemerkt dat ook na de correcties sprake is van waterstandsverschillen die afhankelijk van de getijfase oplopen tot 0.4 m. Deze verschillen tussen gemodelleerde en gemeten waterstanden worden grotendeels veroorzaakt door een (klein) faseverschil tussen model en meting en representeren geen afwijkingen van deze grootte op de hoog- en laagwaters.

Tabel 1 - Amplitude- en fasecorrecties aan afwaartse rand op basis van ZUNO modelresultaten.

getij-component	fasecorrectie	amplitudecorrectie
M2	+3°	+4.4%
M4	-2°	+17.6%
S2	+11°	+2.5%
Z0	n.v.t.	-0.04 m

Figuur 6 - Verschilsignaal tussen een initiële simulatie en gemeten waterstandsverloop te Vlissingen voor (boven) en na (onder) de door middel van het lopend gemiddelde (blauw) toegepaste correctie van de afwaartse randvoorwaarden.



Randvoorwaarden Delft3D-NeVla

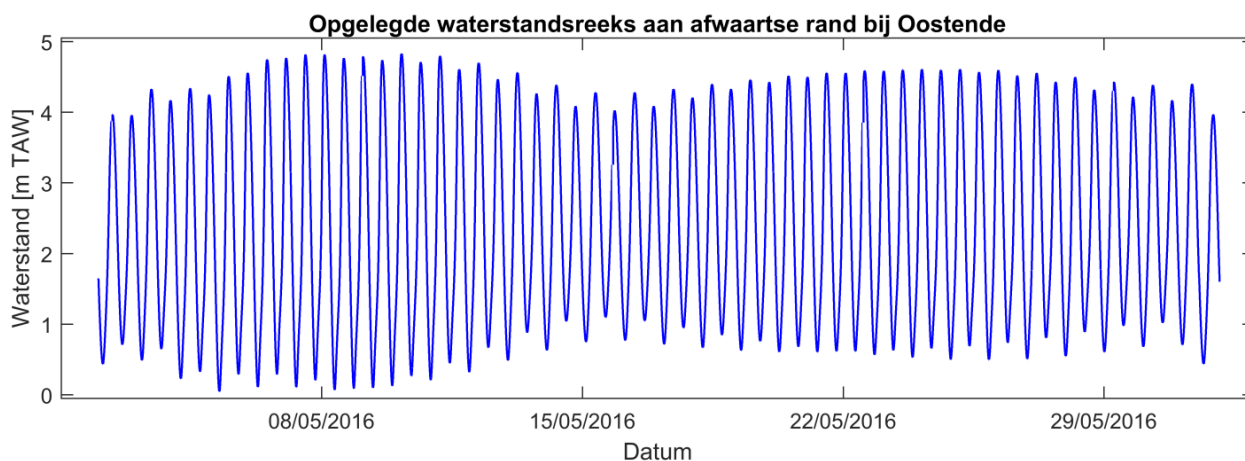
In het Delft-3D model is de afwaartse rand van het model geforceerd met waterstanden in Cadzand en Westkapelle die zijn gemeten tijdens de simulatieperiode (zie Stark *et al.*, 2019). In overeenstemming met bevindingen van Vanlede *et al.* (2009) en Maximova *et al.* (2008) werd een faseverschuiving 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 het model waar de in Cadzand gemeten waterstanden worden opgelegd.

Er wordt hier opgemerkt dat de afwaartse randvoorwaarden dus verschillend zijn tussen de Telemac en Delft3D modellen. Waar de Telemac modellen zijn genest in een harmonisch '*continental shelf model*', worden de Delft3D modellen geforceerd met gemeten waterstanden.

Afwaartse randvoorwaarden voor morfologische simulaties in Telemac

De morfologische simulaties met Telemac-3D en Sisyphe in Sectie 4 zijn uitgevoerd met gelijkaardige randvoorwaarden als de hydrodynamische simulaties in Sectie 3. De afwaartse rand is genest in de CSM-ZUNO modellen om een waterstands-tijdserie te verkrijgen. De door het harmonische model geproduceerde waterstanden van twee springtij-doodtij-cycli (i.e., 2 mei 2016 tot en met 31 mei 2016) zijn gebruikt als afwaartse randvoorwaarde (Figuur 7). Voor de morfologische simulaties is de correctie voor windopzet op basis van verschillen tussen gemeten en gemodelleerde waterstanden in Vlissingen (§2.3) niet meegenomen. Dit omdat op de tijdschaal van de morfologische runs (i.e., één jaar) de effecten van windopzet tijdens de specifieke studieperiode niet van belang zijn. Wel is een morfologische versnellingsfactor (*MorFac*) gebruikt waardoor de morfologische simulatieduur groter is dan de hydrodynamische simulatieduur. Alle Telemac-3D/Sisyphe simulaties hebben een hydrodynamische tijdsduur van 29.5 dagen, een *MorFac* van 12.25 en representeren dus een morfologische tijdsduur van ongeveer één jaar.

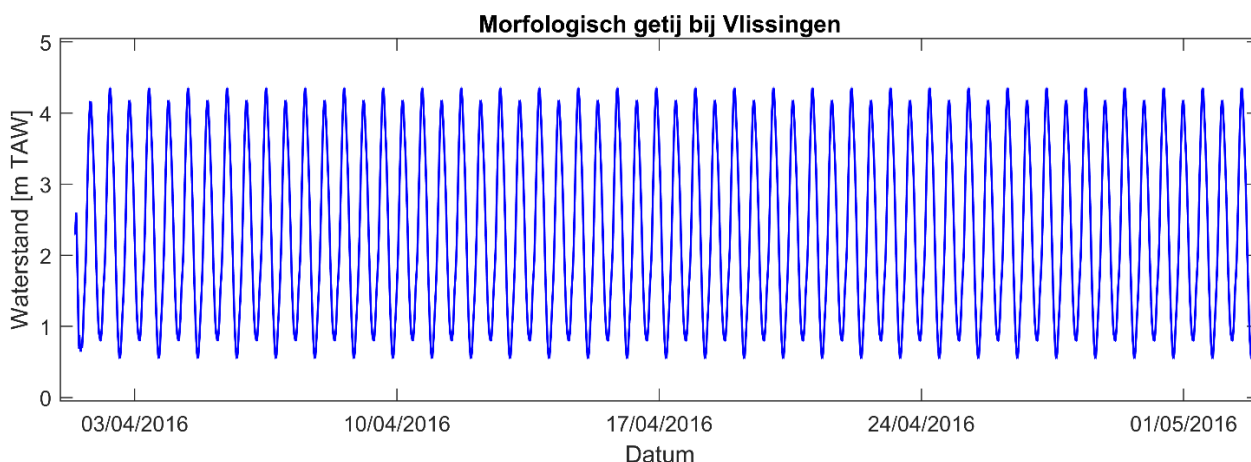
Figuur 7 – Opgelegde harmonische waterstandsreeks aan de afwaartse rand voor morfologische simulaties met Telemac.



Afwaartse randvoorwaarden voor morfologische simulaties in Delft3D

In de morfologische simulaties met Delft3D door Stark *et al.* (2019), die ook in Sectie 4 worden gepresenteerd, is gerekend met een hogere *MorFac* van 24.5. Daarnaast wordt evenals in de eerdere Delft3D modelstudies door Meire *et al.* (2017) en Stark *et al.* (2019) in de morfologische simulaties met Delft3D-NeVla gerekend met een zogenaamd morfologisch getij aan de afwaartse rand (Figuur 8). Hiermee kan het residueel sedimenttransport in een volledige springtij-doodtij cyclus gerepresenteerd worden door slechts één of twee getijcomponenten met een *MorFac* (e.g. Lesser, 2009).

Figuur 8 – Opgelegd morfologisch getij aan de afwaartse rand voor morfologische simulaties met Delft3D-NeVla.



2.4 Opwaartse randvoorwaarden

Aan de opwaartse randen (i.e., Boven-Zeeschelde en getij-gebonden zijrivieren) worden de jaargemiddelde debieten van het jaar 2009 opgelegd (Cornet, 2010) zoals opgesomd in Tabel 2. Deze randvoorwaarde is in overeenkomst met de opwaartse randvoorwaarden die werden opgelegd in de voorgaande AvdT-studie *“Hydro- en sedimentdynamische en morfologische processen op mesoschaal”* (Stark *et al.*, 2019).

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 getijstrooming (e.g. Stark *et al.* 2017).

Tabel 2 – Opwaartse randvoorwaarden (debiet).

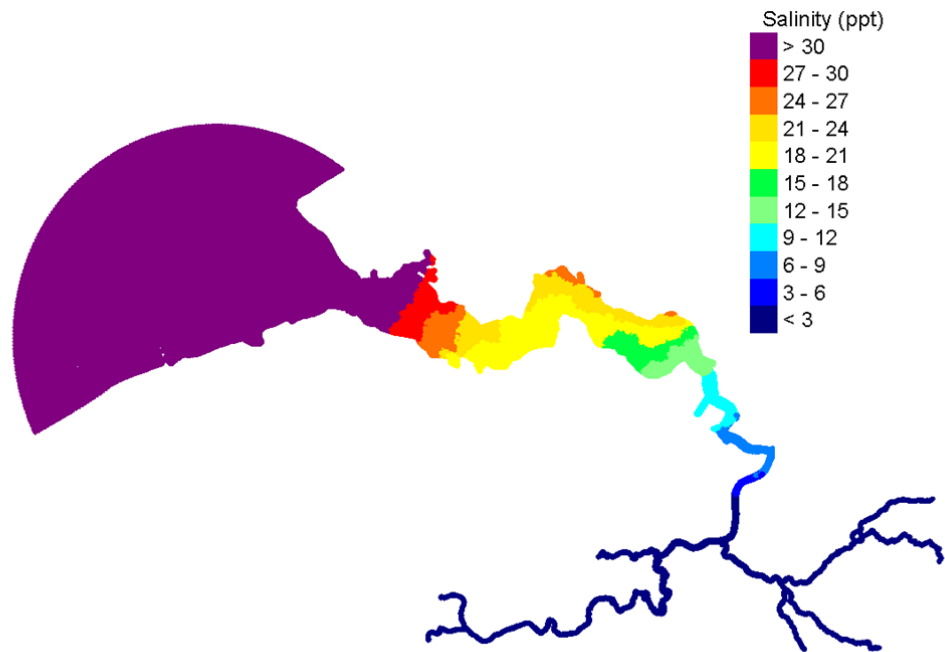
Locatie	Debiet [m ³ /s]
Boven-Zeeschelde	30.9
Dender	9.8
Zenne	10.0
Dijle	19.8
Grote Nete	4.0
Kleine Nete	5.3

2.5 Saliniteit

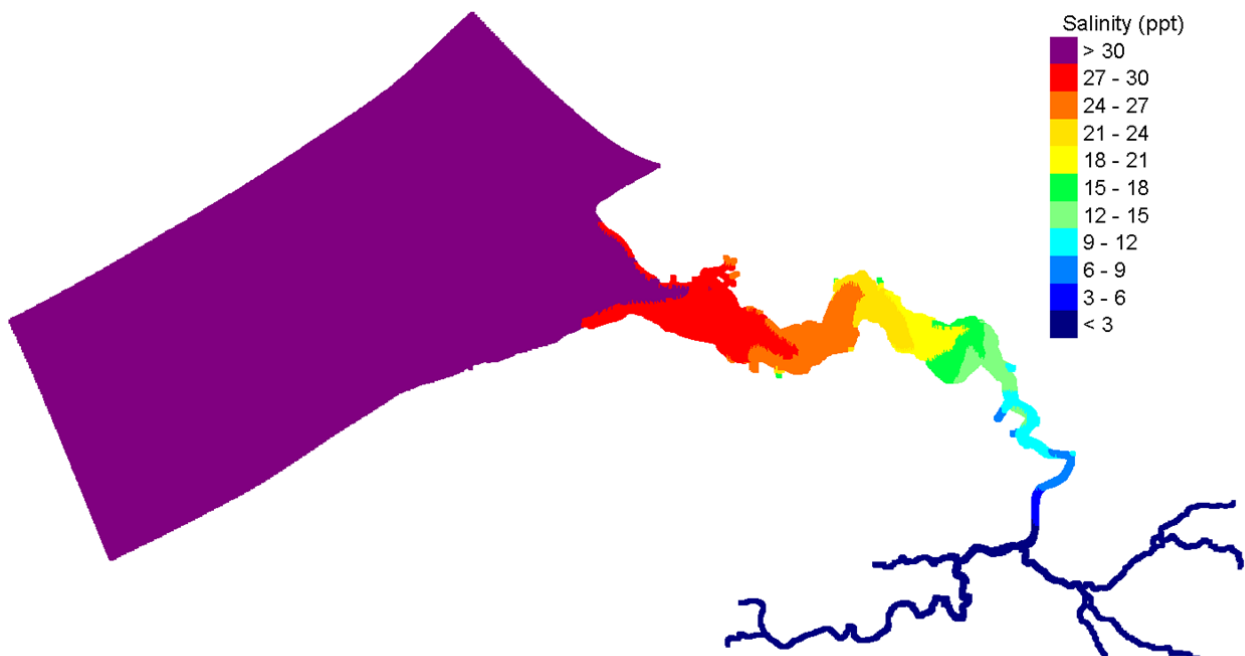
In alle modelsimulaties wordt rekening gehouden met de invloed van saliniteit.

Aan de afwaartse randen wordt een tijdsafhankelijke saliniteit opgelegd. In het geval van de Telemac simulaties zijn deze saliniteitswaarden afkomstig uit het harmonische ZUNO model waarmee ook de opgelegde waterstanden werden bepaald. In de Delft3D-NeVla simulaties is aan de afwaartse rand een constante saliniteitswaarde van 31.0 PSU opgelegd. Om saliniteit sneller door te rekenen wordt in Telemac een initieel zoutveld opgelegd in overeenstemming met het initiële zoutveld in het Scaldis 3D model (Figuur 9). 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 10.

Figuur 9 – Initieel saliniteitsveld in Telemac.



Figuur 10 – Initieel saliniteitsveld in Delft3D-NeVla.



2.6 Bodemruwheid

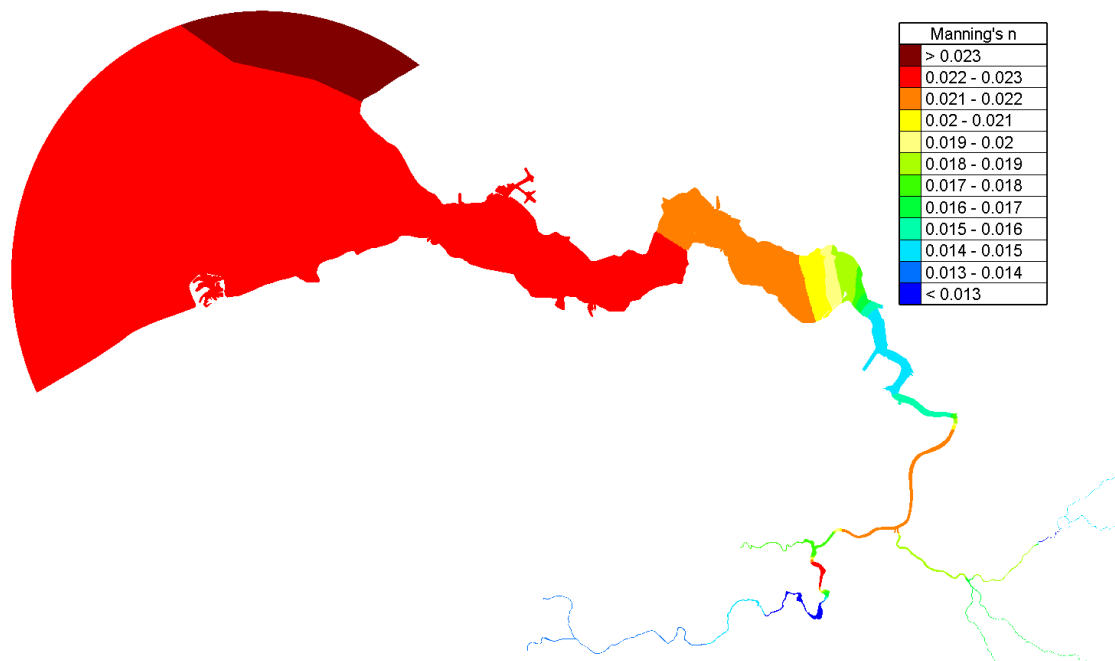
Telemac

In eerste instantie wordt het ruwheidsveld gebruikt zoals door Smolders *et al.* (2016) is gekalibreerd voor het Scaldis model (Figuur 11). In dit ruwheidsveld is de Manning's ruwheidcoëfficiënt n in het studiegebied ongeveer $n = 0.022 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$. Er zijn tevens enkele simulaties uitgevoerd waarin het ruwheidsveld in het studiegebied is aangepast naar aanleiding van bevindingen van Stark *et al.* (2019), die een uitgebreide modelkalibratie voor het Delft3D-NeVla model hebben uitgevoerd. Uit deze kalibratie volgt dat een lagere bodemruwheid op de Platen van Ossensisse en ondiepe delen tussen het intertidaal en de vaargeul leidt tot een verbeterde weergave van het stroombeeld ter plaatse van de Platen van Ossensisse en de Drempel van Hansweert (i.e., hogere pieksnelheden tijdens vloed en ontstaan van neervorming in overeenstemming met de stroomsnelheidsmetingen).

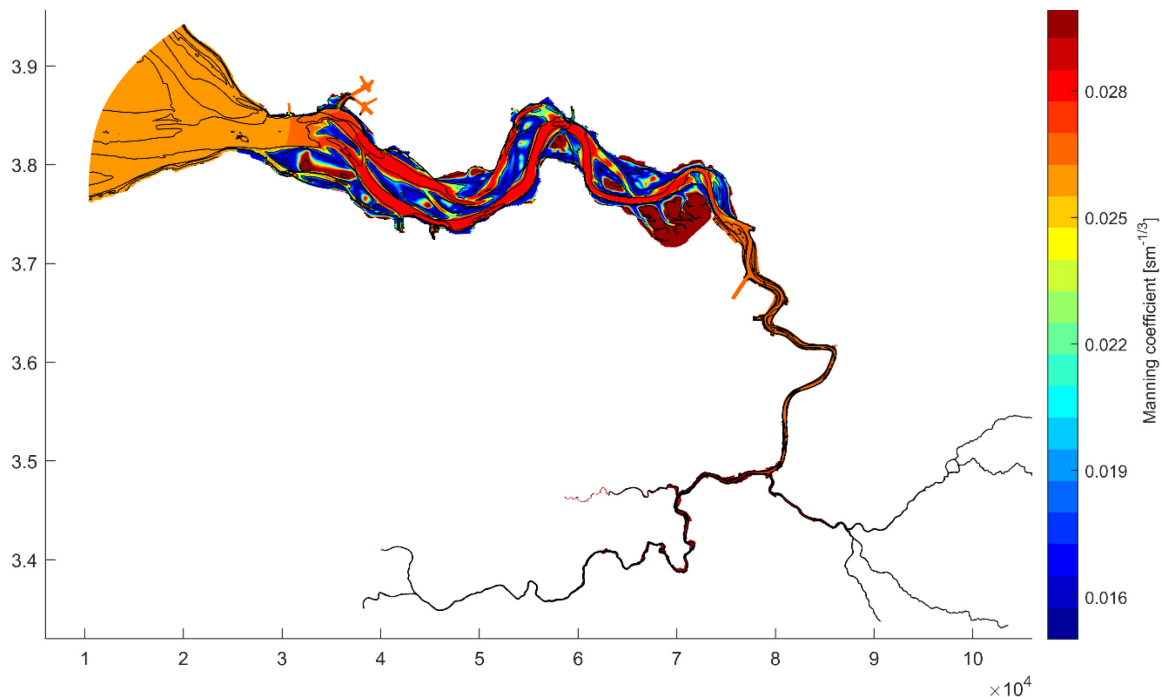
Delft3D-NeVla

Voor de Delft-3D simulatie waarmee de modelresultaten worden vergeleken is het ruwheidsveld gebruikt zoals door Stark *et al.* (2019) gekalibreerd voor het tweedimensionale Delft3D-NeVla model (zie Figuur 12).

Figuur 11 – Manning's ruwheidsveld.



Figuur 12 – Manning's ruwheidsveld Westerschelde in het door Stark et al. (2019) gebruikte DELFT-3D model.



2.7 Turbulentiemodellering

De verticale en horizontale turbulentie worden apart geparametriseerd in Telemac-3D. Er kunnen dus verschillende turbulentie-modellen en viscositeiten worden gebruikt voor de horizontale en verticale turbulentie (EDF-R&D, 2013). De instellingen voor turbulente stroming voor het in dit rapport gepresenteerde Telemac-3D model zijn overgenomen uit het Scaldis model in Smolders *et al.* (2016).

Verticaal turbulentiemodel

Het verticaal turbulentiemodel dat in deze studie wordt gebruikt is het '*mixing length model*' van Nezu en Nakagawa. Dit model drukt de turbulente viscositeit uit als een functie van de snelheidsgradiënt en de mixlengte. Hervouet (2007) laat zien dat dit model zeer geschikt is om diffusiviteit over de verticaal te representeren. Als het '*mixing length model*' wordt gebruikt om de turbulente viscositeit (v_{tur}) te bepalen, wordt deze wederom opgeteld bij de laminaire viscositeit (v_{lam}), welke gedefinieerd wordt door de "*COEFFICIENT FOR VERTICAL DIFFUSION OF VELOCITIES*" in de Telemac-3D invoer:

$$v = v_{tur} + v_{lam}$$

De verticale turbulente viscositeit wordt dan als volgt berekend:

$$v_{tur} = \kappa u^* z \left(1 - \frac{z}{h}\right)$$

- v_{tur} turbulente viscositeit;
- κ von Karman parameter (i.e., $\kappa=0.41$);
- u^* schuifsnellheid;
- z afstand van de bodem;
- h waterdiepte.

Horizontaal turbulentiemodel

Het Smagorinsky model wordt gebruikt voor de horizontale turbulente stroming. Dit is een sub-grid turbulentie model en wordt vooral gebruikt in het geval van sterk non-lineaire stroming (*EDF-R&D*, 2013). Als het Smagorinsky model wordt gebruikt om de horizontale turbulente viscositeit (ν_{tur}) te bepalen, wordt deze wederom opgeteld bij de horizontale laminaire viscositeit (ν_{lam}), welke gedefinieerd wordt door de "COEFFICIENT FOR HORIZONTAL DIFFUSION OF VELOCITIES" in de Telemac-3D invoer:

$$\nu = \nu_{tur} + \nu_{lam}$$

De horizontale turbulente viscositeit wordt in het Smagorinsky model als volgt bepaald (*Hervouet*, 2007):

$$\nu_{tur} = C_s^2 \Delta^2 \sqrt{2D_{ij}D_{ij}}$$

$$\text{waarin: } D_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$$

- ν_{tur} turbulente viscositeit;
- C_s non-dimensionale kalibratie parameter (i.e., $C_s = 0.1$);
- Δ element-grootte afgeleid van de oppervlakte (2D) of volume (3D) van de elementen;
- D_{ij} trektensor op basis van snelheidsgradiënten.

Delft3D-NeVla

In het tweedimensionale (i.e., 2D-h) Delft3D-NeVla model zijn de volgende parameter-instellingen met betrekking tot diffusiviteit en viscositeit overgenomen uit de eerdere modelstudies door Meire et al. (2017) en Stark et al. (2019):

Background Horizontal eddy viscosity = $0.1 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$

Background Horizontal eddy diffusivity = $1.0 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$

2.8 Overige modelinstellingen

De overige generieke modelinstellingen voor het hydrodynamisch model in Telemac-3D zijn overgenomen van het gevalideerde Scaldis 3D model (Tabel 3).

Tabel 3 – Basisinstellingen Telemac-3D model

Parameter	Waarde
Time step	4 s
Initial condition	constant elevation and start with smoothing time
Number of layers in the vertical	5 (3D model)
Salt transport	On
Wind	Off
Bottom friction formula	Manning
Bed roughness value	Ruimtelijk variërend
Friction formula for lateral boundaries	Nikuradse Law
Friction coefficient for lateral boundaries	0.054848
Option for the treatment of tidal flats	1: equations solved everywhere with correction on tidal flats
Treatment of negative depths	2: flux control
Free surface gradient compatibility	0.9
Vertical turbulence model	2: mixing length
Mixing length model	3: Nezu and Nakagawa
Horizontal turbulence model	4: Smagorinsky
Coefficient for vertical diffusion of velocities	0.01
Coefficient for horizontal diffusion of velocities	0.01
Scheme for advection of velocities	1: characteristics
Scheme for advection of depth	5: conservative scheme
Scheme for advection of tracers	13: Leo Postma for tidal flats
Scheme for diffusion of velocities	1: implicit (1 is default; 0 cancels the diffusion)
Scheme for diffusion of tracers	1: implicit
Solver	7: GMRES

2.9 Instellingen morfologisch model

De morfologische simulaties in Sectie 4 zijn uitgevoerd met het voor dit project opgezette modelrooster (zie Figuur 3), waarbij de resolutie in het studiegebied rond Hansweert niet is verfijnd (i.e., 150 m resolutie in de Westerschelde). Voor de morfologische simulaties is het hydrodynamisch Telemac-3D model met het Scaldis-ruwheidsveld (i.e., $n = 0.022 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$ in het studiegebied; zie Figuur 11) gekoppeld aan de sedimenttransportmodule Sisyphé. Alle instellingen van het hydrodynamisch model zijn zoals eerder in dit hoofdstuk opgesomd. De instellingen voor sedimenttransport en morfologie variëren tussen de simulaties. Er wordt eerst een basissimulatie uitgevoerd met de instellingen zoals in Tabel 4 opgesomd.

Tabel 4 – Basisinstellingen morfologisch model

Parameter	Waarde
Sediment diameter	200 μm
Morphological Factor	12.25
Option for the treatment of tidal flats	1: equations solved everywhere with correction on tidal flats
Option for the treatment of non-erodible beds	3: minimization of the solid discharge
Bed roughness value	$n = 0.02 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$ (i.e., ruimtelijk constant door aanpassing in Sisyphé subroutine <i>coefro_sisyphé.f</i>)
Bed load	Yes
Bed load transport formula	7: (Van Rijn, 1984)
Minimum value for bed load	0.01 m
Bed roughness prediction	No
Bed roughness predictor option	n/a
Slope effect	Yes
Skin friction correction	1: (yes)
Ratio between skin friction and mean diameter	$\alpha_{ks} = 3$ (i.e., $k_s' = \alpha_{ks} \cdot d_{50}$)
Formula for slope effect	1: (Koch & Flokstra, 1981)
Beta	1.3: (i.e., $Q_{B*} = Q_B \cdot [1 + \beta \cdot \partial z_s / \partial x]$)
Friction angle of the sediment	n/a (i.e., only for Soulsby, 1997)
Formula for deviation	1: (Koch & Flokstra, 1981)
Parameter for deviation	n/a (only for Talmon <i>et al.</i> , 1995)
Secondary currents	No
Secondary currents alpha coefficient	n/a
Suspension	Yes
Reference concentration formula	3: (Van Rijn, 1984)
Type of Advection	1: (method of characteristics)

Randvoorwaarden sedimenttransport

Het sedimenttransportmodel is aan de afwaartse rand en aan de opwaartse randen gesloten voor sediment. Die eerste ingreep blijkt noodzakelijk om zones van sterke sedimentatie nabij de modelrand en daarmee instabiele modeluns te voorkomen. Daarnaast wordt aangenomen dat de sedimenttoevoer aan de opwaartse randen geen effect heeft op de morfologische ontwikkeling in de Westerschelde over de periode van slechts één jaar.

Beschikbaarheid sediment op de bodem

Enkel de sedimentbodem in de Westerschelde is beschikbaar voor erosie in de morfologische simulaties (i.e., door manuele aanpassingen in de Sisyphé subroutine *noerod.f*). De hoofdreden voor deze aanname is wederom om grote morfologische veranderingen nabij de randen te voorkomen. Een bijkomend voordeel hiervan is dat de invloed van veranderende morfologie in het mondingsgebied en in de Zeeschelde op de getijvoortplanting door het estuarium minimaal blijft.

Instellingen sedimenttransportmodel in Delft3D-NeVla

De instellingen voor de morfologische Delft3D-NeVla simulatie waarmee het Telemac3D en Sisyphé model wordt vergeleken zijn te vinden in Sectie 4.4, waarin deze modelsimulatie meer uitvoerig wordt besproken.

Gevoeligheidsanalyse

In de Sisyphé modelsimulaties zijn vervolgens aanpassingen doorgevoerd in de instellingen met betrekking tot hellings-effecten transversaal en loodrecht op de stroomrichting (i.e., *slope effects*), het toepassen van de module voor bochtstroming (i.e., *secondary currents*), het toepassen van een andere sedimenttransportformule (i.e., Engelund-Hansen in plaats van de Van Rijn (1984) formulering) en de sedimentdiameter (i.e., d_{50}). Er zijn tevens morfologische simulaties uitgevoerd met een verfijnd modelrooster en er is een morfologische simulatie uitgevoerd waarin de instellingen voor Telemac-3D op basis van de uitkomsten van de gevoeligheidsanalyse van het hydrodynamisch model (zie Hoofdstuk 3) zijn aangepast. Ook is een simulatie uitgevoerd waarin de instellingen zoals gebruikt in de Delft3D modellering van de morfologische ontwikkeling in dit gebied (zie Stark *et al.*, 2019) zijn toegepast, voor zover dit binnen Sisyphé mogelijk is. Tot slot zijn er enkele testruns uitgevoerd waarin de bathymetrie in de diepe put van Hansweert is verondiept om een storting in de diepe put van Hansweert te simuleren.

3 Hydrodynamische modelresultaten

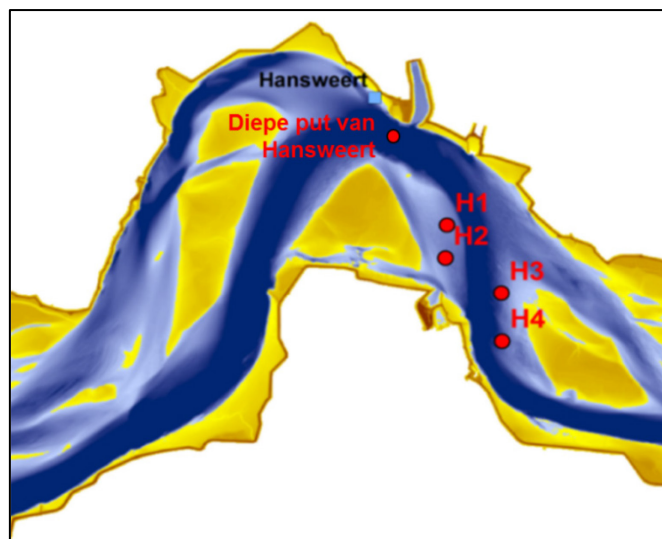
3.1 Analyse

In het kader van de huidige gevoeligheidsanalyse zijn de modelresultaten vergeleken met geobserveerde waterstanden en stroomsnelheden met behulp van de op het Waterbouwkundig Laboratorium ontwikkelde VIMM Matlab toolbox.

De gesimuleerde en geobserveerde waterstanden worden vergeleken op meerdere meetstations in het mondingsgebied, langs de Westerschelde en langs de Zeeschelde: Zeebrugge, Vlakte van de Raan, Westkapelle, Cadzand, Vlissingen, Terneuzen, Overloop van Hansweert, Hansweert, Walsoorden, Baalhoek, Bath, Prosperpolder, Liefkenshoek, Antwerpen, Temse, St. Amands en Dendermonde. Van de gesimuleerde waterstanden worden de RMSE en BIAS (i.e., gemiddelde afwijking) voor de complete tijdreeksen gepresenteerd, evenals de BIAS van de hoog- en laagwaters.

De gesimuleerde stroomsnelheden worden vergeleken met stroomsnelheidsmetingen rond de Drempel van Hansweert op de locaties zoals aangegeven in Figuur 13 (i.e., locaties H1, H2, H3 en H4). Het data-rapport van deze stroomsnelheidsmetingen is beschikbaar in Vandebroek *et al.* (2016). Ter aanvulling worden ook de gemodelleerde stroomsnelheden in de diepe put van Hansweert (zie Figuur 13 voor de locatie) vergeleken tussen de Telemac simulaties. Dit in verband met een mogelijke toepassing van de modellen voor het simuleren van stortingen in de diepe putten in dit deel van het estuarium. De modeluitvoer voor de diepe put van Hansweert is momenteel alleen beschikbaar in de Telemac modellen. Voor de stroomsnelheden wordt het gesimuleerde en het gemeten stroomsnelheidsverloop weergegeven, evenals het gesimuleerde stroomsnelheidsveld rondom hoogwater springtij. Dit laatste is gedaan omdat tijdens springtij de sterkste neervorming boven de Platen van Ossenis en de Drempel van Hansweert optreedt volgens eerdere studies door o.a. Decrop *et al.* (2009) en Stark *et al.* (2019). Het correct reproduceren van dit mechanisme kan van belang zijn voor de resultaten van morfologische simulaties. Initiële resultaten van Stark *et al.* (2019) laten bijvoorbeeld zien dat het gemodelleerde sedimentatie- en erosiepatroon op het ondiepe plateau tussen de Platen van Ossenis en de Drempel van Hansweert afhankelijk is van het al dan niet reproduceren van de neer en bijbehorend stromingspatroon.

Figuur 13 – Meetlocaties stroomsnelheden rondom de Drempel van Hansweert



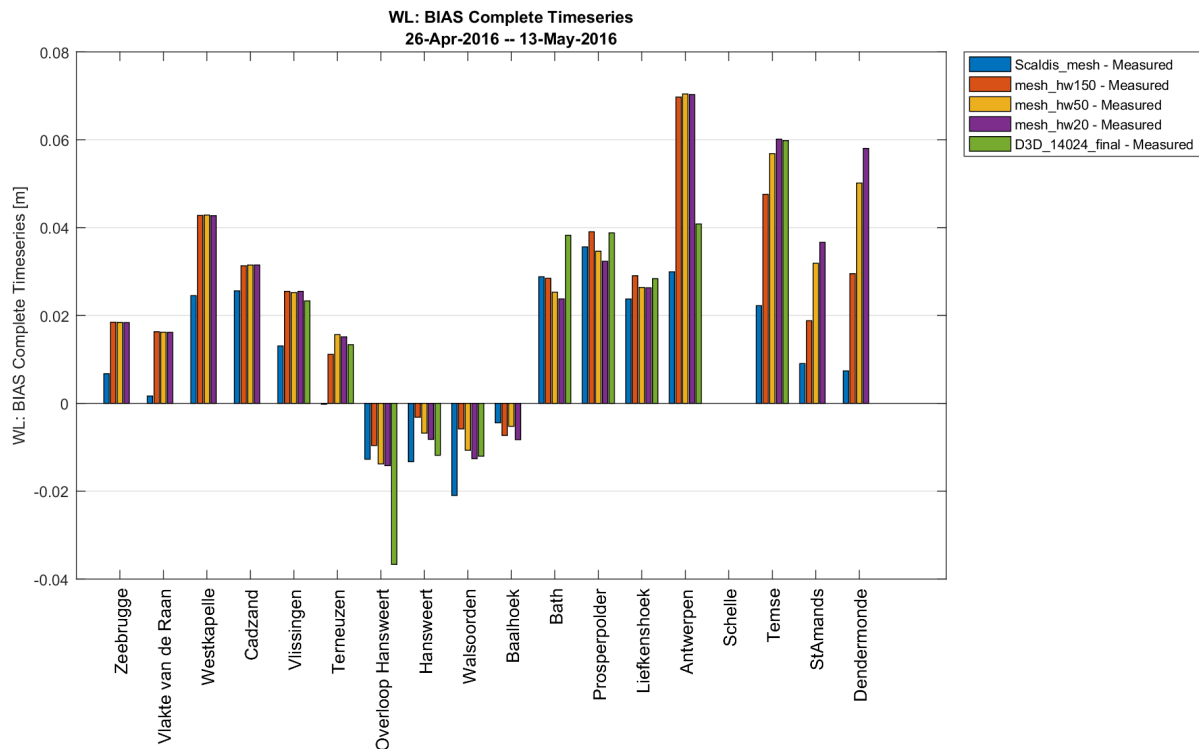
3.2 Vergelijking modellen en roosterresolutie

Waterstanden

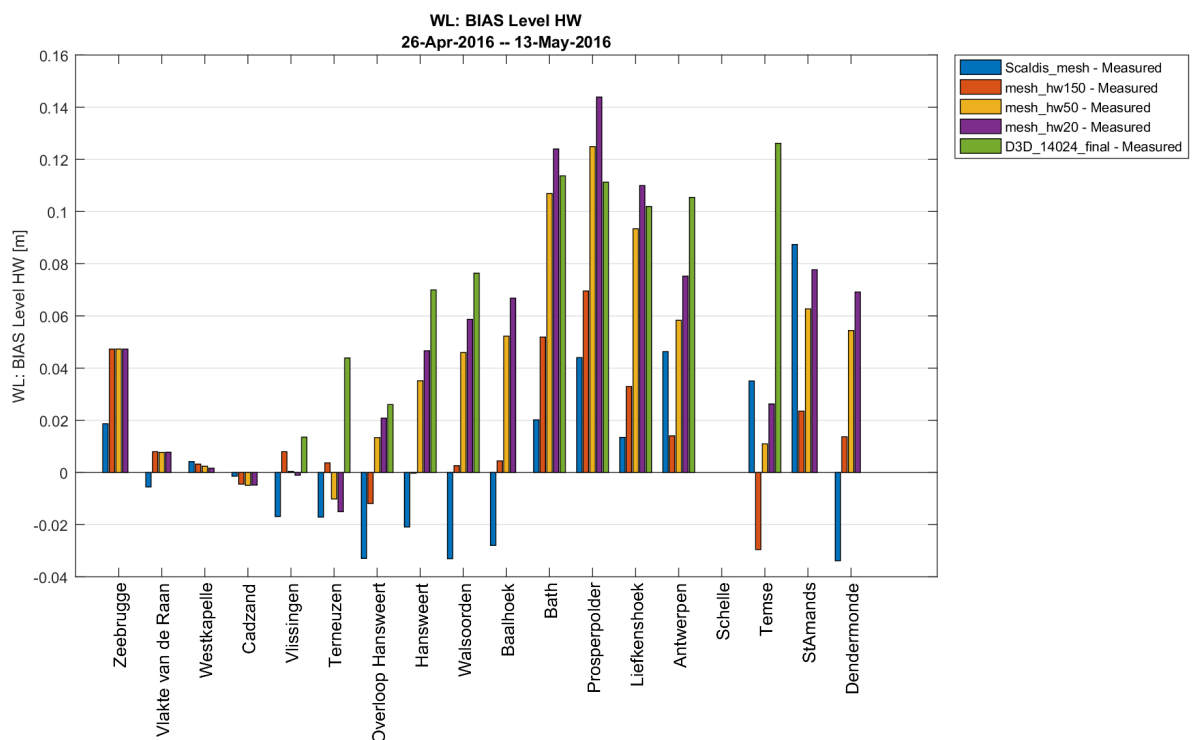
Op basis van een vergelijking tussen de modelresultaten van het Delft3D-NeVla model en de Telemac-modellen met verschillende roosterresoluties blijkt dat het Delft3D model in het algemeen beter presteert dan de verschillende Telemac modellen (Figuur 14 en Figuur 17). Hoewel de BIAS gelijkaardig is voor beide modellen, zijn de RMSE-waarden in de Delft3D simulatie kleiner dan in de Telemac simulatie. De hoge RMSE-waarden (tot 0.4 m) in combinatie met de relatief lagere BIAS (tot 0.15 m) in het Telemac model wijzen er op dat de mindere representatie van de waterstanden in dit model vooral een gevolg zijn van een faseverschil. Dit faseverschil neemt geleidelijk toe in opwaartse richting. Dit is waarschijnlijk het gevolg van de schematisering van de afwaartse randvoorwaarden. In het Delft3D model is de afwaartse randvoorwaarde opgebouwd uit tijdreeksen van gemeten waterstanden in Cadzand en Westkapelle, terwijl de randvoorwaarden van de Telemac modellen bestaan uit de resultaten van een harmonische ZUNO simulatie (zie §2.3). De RMSE-waarden van de complete waterstand-tijdseries van de verschillende modellen op meetstations in het mondingsgebied tonen aan dat de eerste methode (gemeten randvoorwaarden in het Delft3D model) een meer betrouwbare weergave geeft (Figuur 17).

De representatie van de hoogwaters en laagwaters is meer afhankelijk van het gekozen modelrooster en de roosterresolutie. In het studiegebied rond Hansweert worden de hoogwaters in de huidige modelconfiguratie het best gerepresenteerd door het meest grove Telemac model (i.e., mesh_hw150) en het Scaldis model. Het Delft3D model overschat de hoogwaters in het studiegebied het sterkst. De laagwaters worden echter het best weergegeven door het Delft3D model, evenals door simulaties met de grovere Telemac roosters (i.e., Scaldis en mesh_hw150). Een herkalibratie van de bodemruwheid is noodzakelijk om de modelprestatie ook voor aangepaste (i.e., fijnere) resoluties te verbeteren. Een verfijning van de roosterresolutie in het studiegebied zonder herkalibratie van het ruwheidsveld leidt tot een overschatting van de hoogwaters en een onderschatting van de laagwaters. Het verfijnen van de resolutie in de Telemac modellen (i.e., mesh_hw50 en mesh_hw20) leidt dus tot een hogere gemodelleerde getijamplitude in het estuarium. Ook opwaarts van het studiegebied worden de hoogwaters en laagwaters minder goed weergegeven in simulaties met de verfijnde roosterresoluties.

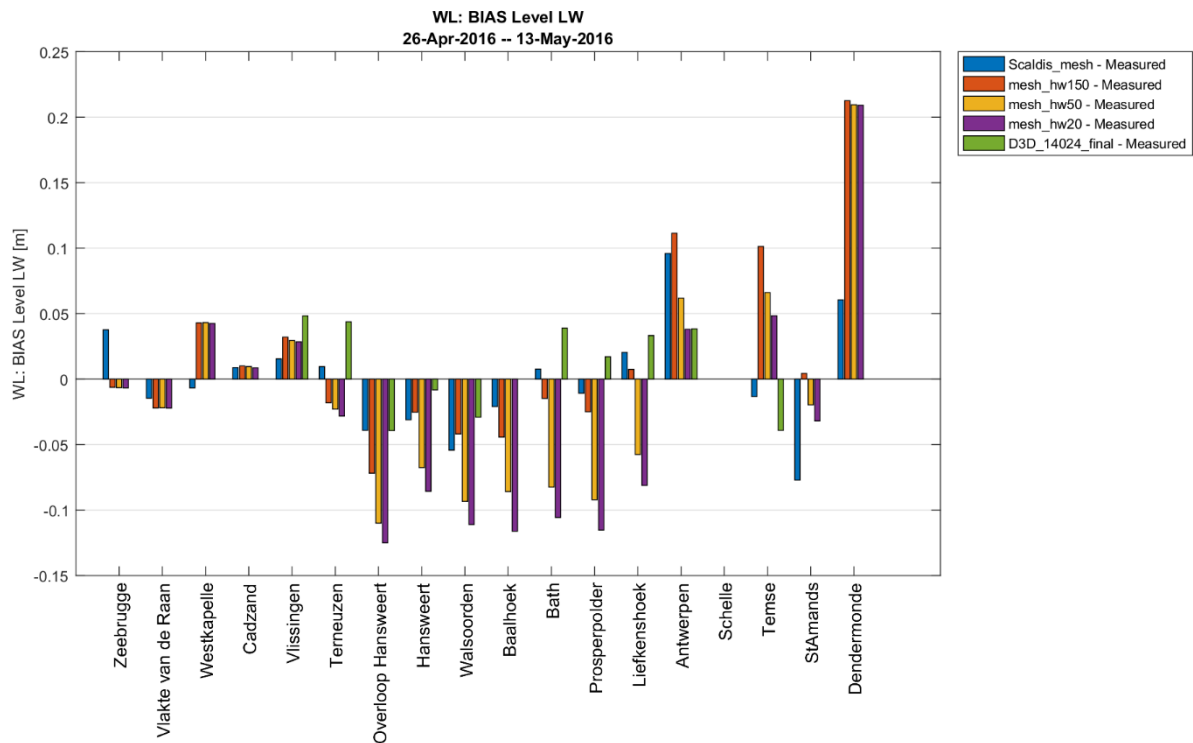
Figuur 14 – Gemiddelde afwijking van de gemodelleerde waterstanden voor Telemac simulaties met verschillende modelroosters en het eerder gekalibreerde Delft-3D model.



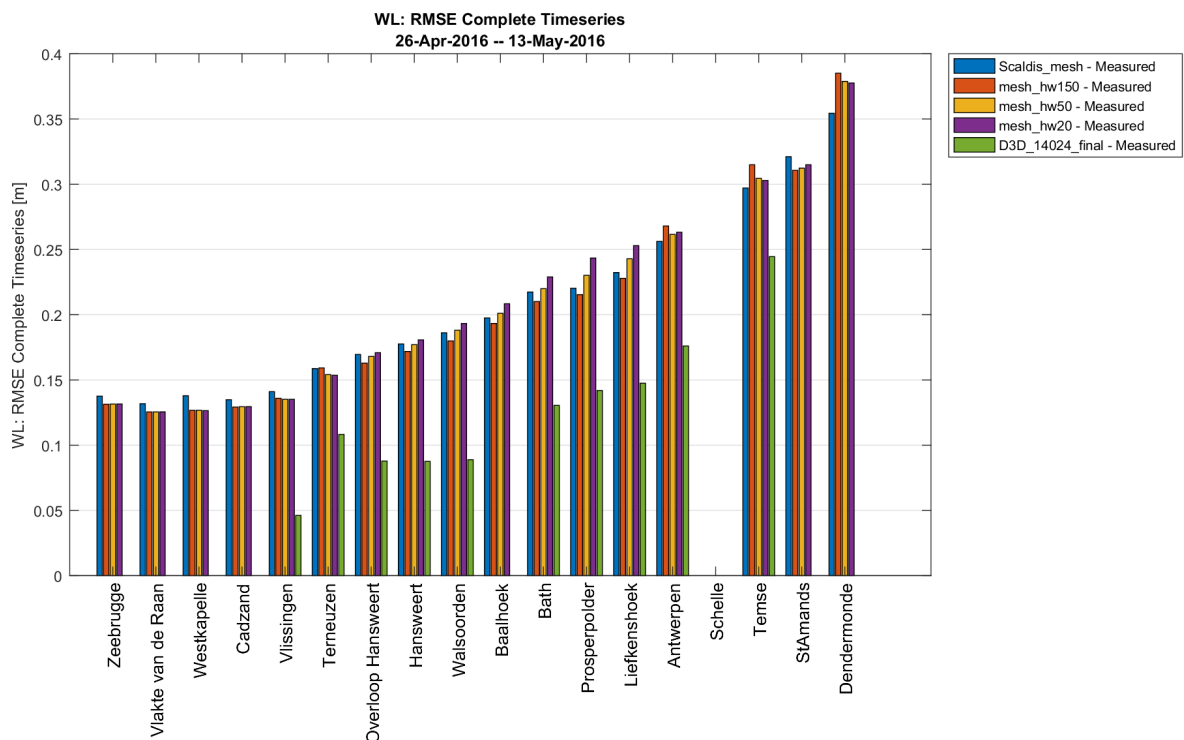
Figuur 15 – Gemiddelde afwijking van de gemodelleerde hoogwaters ten opzichte van gemeten waarden voor Telemac simulaties met verschillende modelroosters en het eerder gekalibreerde Delft-3D model.



Figuur 16 – Gemiddelde afwijking van de gemodelleerde laagwaters ten opzichte van gemeten waarden voor Telemac simulaties met verschillende modelroosters en het eerder gekalibreerde Delft-3D model.



Figuur 17 – RMSE van de gemodelleerde waterstanden ten opzichte van gemeten waarden voor Telemac simulaties met verschillende modelroosters en het eerder gekalibreerde Delft-3D model.



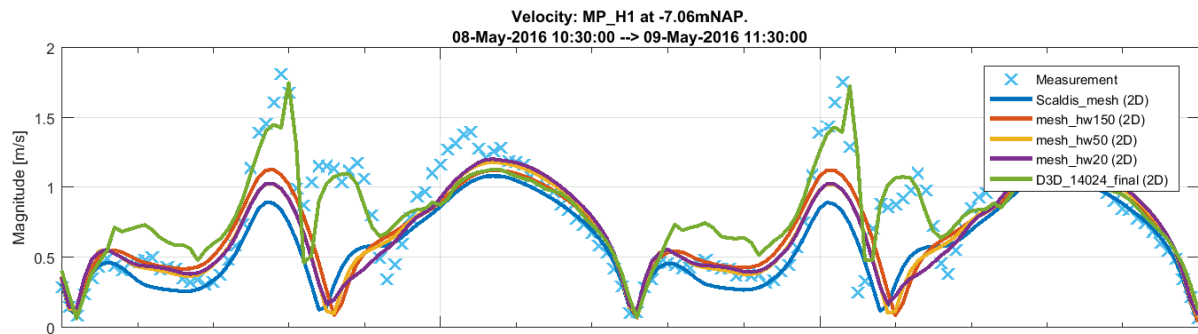
Stroomsnelheidsverloop

Het snelheidsverloop bij meetpunt H1 bestaat achtereenvolgens uit een sterke vloedpiek in zuidoostelijke richting, een tweede snelheidspiek tijdens hoogwater (gerelateerd aan een dwarsstroomcomponent door de vorming van een neer tussen de Platen van Ossensisse en de Drempel van Hansweert), gevolgd door de zwakkere eb-stroming in noordwestelijke richting (Figuur 18). Bij meetpunt H2 is het geobserveerde stroomsnelheidsverloop gelijkaardig, maar is de eb-stroming sterker dan de vloedstroming en de tweede snelheidspiek tijdens hoogwater (Figuur 19). Bij meetpunt H4 aan de zijde van de Plaat van Walsoorden is er geen sprake van een dwarsstroming door neervorming (Figuur 20) en is de maximum vloodsnelheid hoger dan de maximum ebsnelheid.

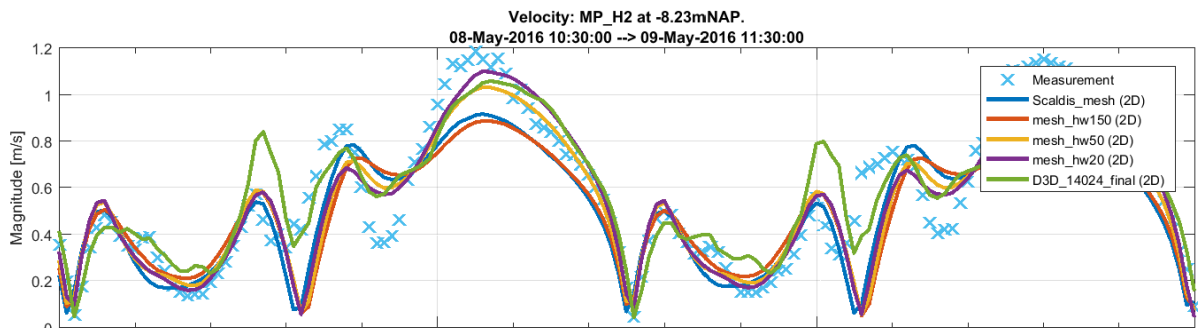
Het stroomsnelheidsverloop bij meetlocatie H1 wordt het best gerepresenteerd door het specifiek voor deze metingen gekalibreerde Delft3D model (Stark *et al.*, 2019). Dit model is als enige in staat de hoge vloedpiek en de snelheidspiek gerelateerd aan de sterke neervorming boven de Platen van Ossensisse te reproduceren. Hierbij moet de kanttekening geplaatst worden dat het ruwheidsveld van de verschillende Telemac-modellen niet opnieuw is gekalibreerd voor de weergave van deze neer en bijbehorende dwarsstromingen. Dit heeft tot gevolg dat deze neer in het Delft3D model wel gereproduceerd wordt (Figuur 22) en in de verschillende Telemac modellen niet voorkomt (Figuur 23 voor mesh_hw150, Figuur 24 voor het Scaldis model en Figuur 25 voor mesh_hw50). Deze figuren tonen ook de gemeten snelheidsvectoren (in blauw) waaruit blijkt dat er rond hoogwater inderdaad sprake is van een omkering van de stroomrichting op de ondiepte langs de Platen van Ossensisse. Aan de kant van de Plaat van Walsoorden bij meetlocatie H4 leidt een grovere roosterresolutie tot een iets sterkere eb-stroming en zwakkere vloedstroming.

Tot slot zijn de stroomsnelheden van de Telemac modelresultaten vergeleken voor de diepe put van Hansweert (Figuur 21). Hier worden de grootste verschillen gevonden tussen het Scaldis model en de nieuw opgezette Telemac modellen, wat suggereert dat de stroomsnelheid in de diepe put van Hansweert wordt beïnvloed door de lokale roosterresolutie en verschillen in getijvoortplanting door het estuarium.

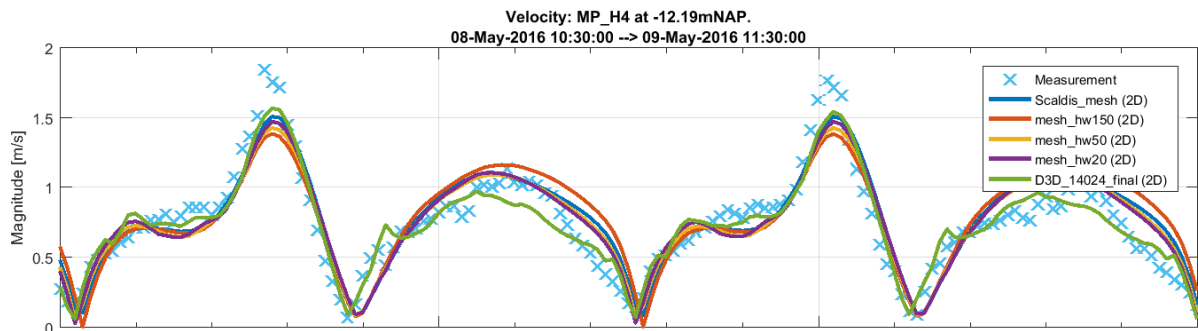
Figuur 18 – Gemodelleerd en gemeten stroomsnelheidsverloop bij locatie H1 tijdens springtij voor Telemac simulaties met verschillende modelroosters en het eerder gekalibreerde Delft-3D model.



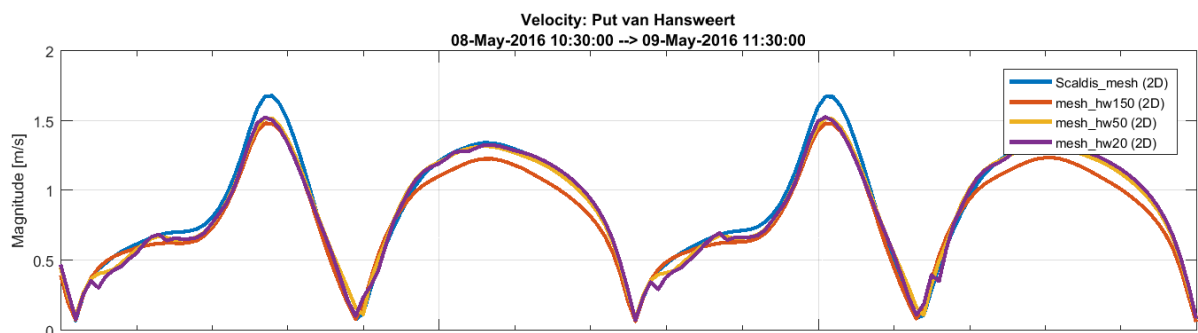
Figuur 19 – Gemodelleerd en gemeten stroomsnelheidsverloop bij locatie H2 tijdens springtij voor Telemac simulaties met verschillende modelroosters en het eerder gekalibreerde Delft-3D model.



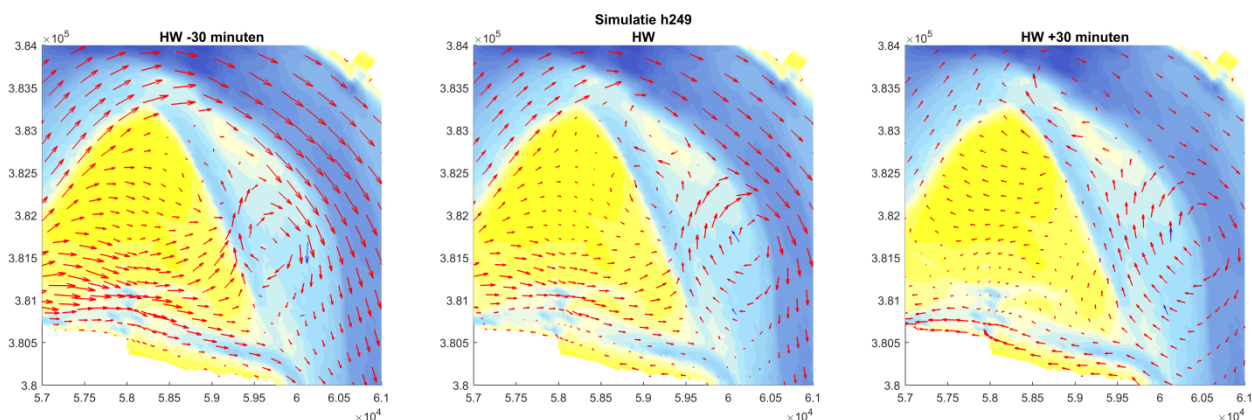
Figuur 20 – Gemodelleerd en gemeten stroomsnelheidsverloop bij locatie H4 tijdens springtij voor Telemac simulaties met verschillende modelroosters en het eerder gekalibreerde Delft-3D model.



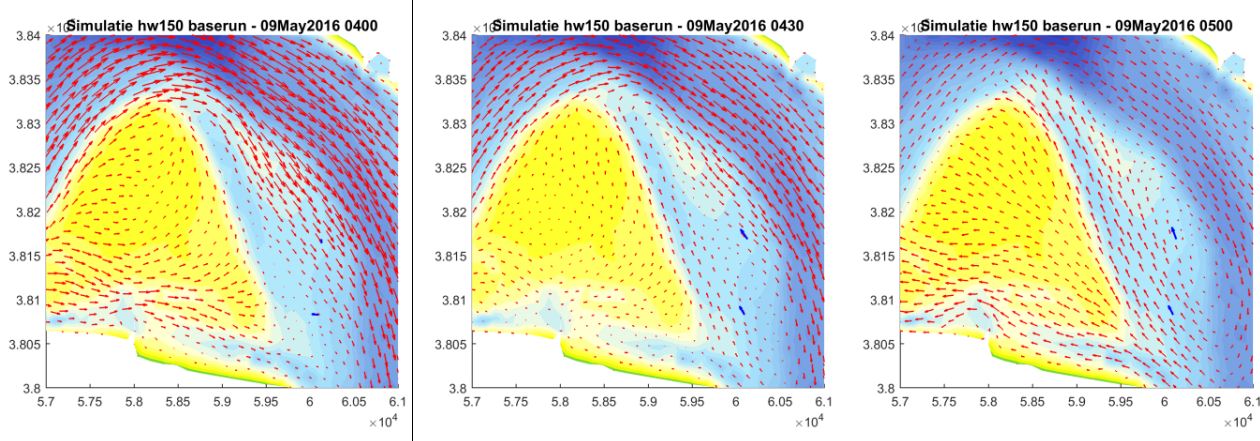
Figuur 21 – Gemodelleerd en gemeten dieptegemiddeld stroomsnelheidsverloop in de diepe put van Hansweert tijdens springtij voor Telemac simulaties met verschillende modelroosters.



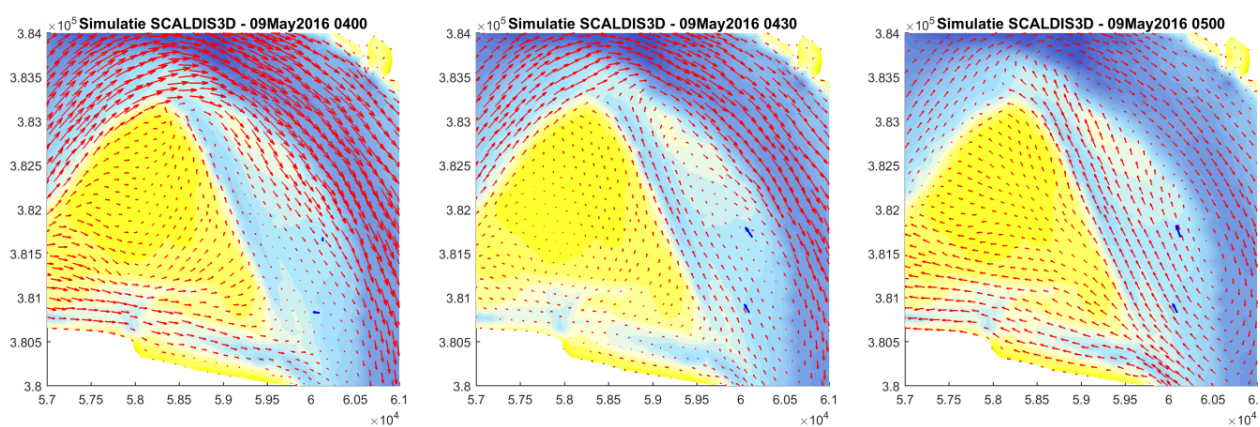
Figuur 22 – Gemodelleerd stromingsveld 30 minuten voor (links), tijdens (midden) en 30 minuten na (rechts) springtij-HW ter hoogte van de Platen van Ossensisse voor het gekalibreerd Delft3D model.



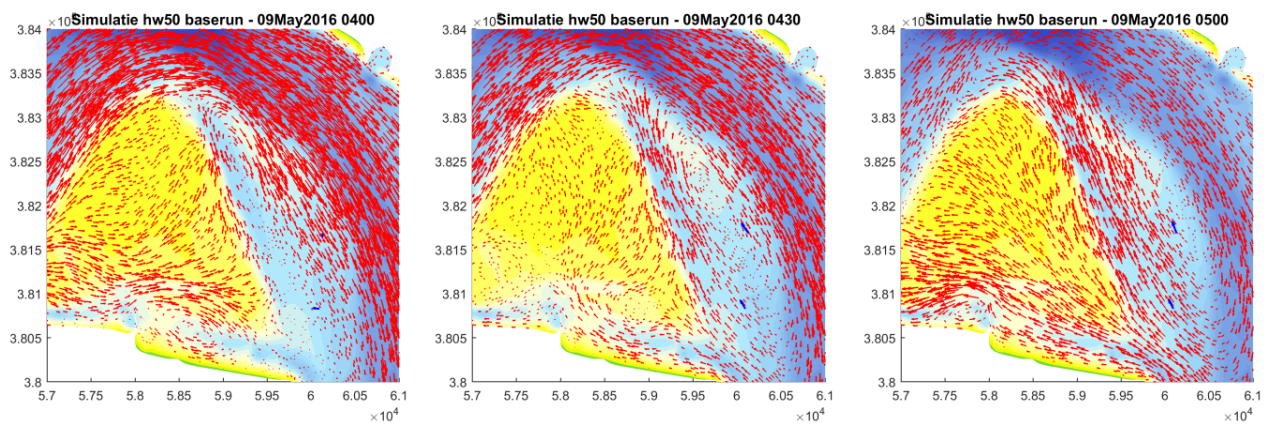
Figuur 23 – Gemodelleerd stromingsveld 30 minuten voor (links), tijdens (midden) en 30 minuten na (rechts) springtij-HW ter hoogte van de Platen van Ossensisse voor het Telemac model (mesh_hw150).



Figuur 24 – Gemodelleerd stromingsveld 30 minuten voor (links), tijdens (midden) en 30 minuten na (rechts) springtij-HW ter hoogte van de Platen van Ossensisse voor het Telemac Scaldis model.



Figuur 25 - Gemodelleerd stromingsveld 30 minuten voor (links), tijdens (midden) en 30 minuten na (rechts) springtij-HW ter hoogte van de Platen van Ossensisse voor het Telemac model (mesh_hw50).

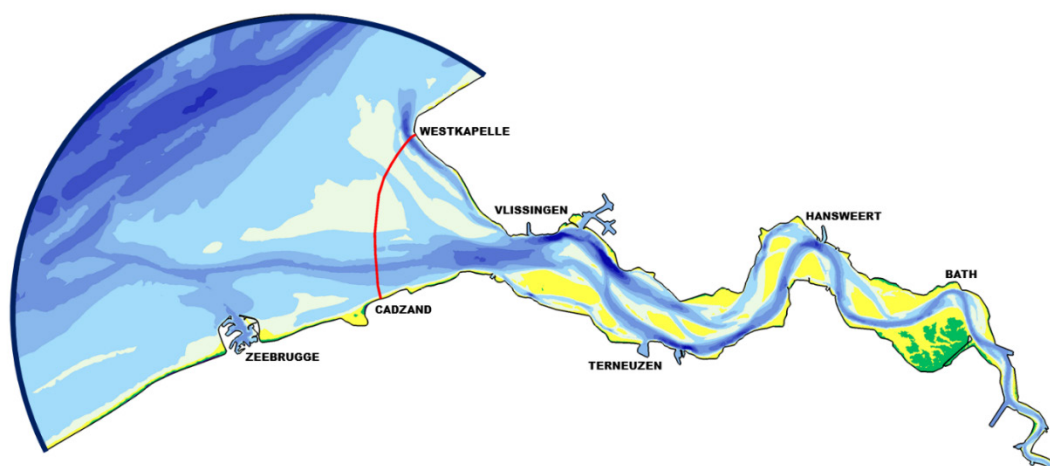


3.3 Gevoeligheid afwaartse randvoorwaarden

De ligging van de afwaartse rand is verschillend tussen het nieuw opgezette Telemac model en het eerder door Stark *et al.* (2019) gekalibreerde Delft3D-NeVla model. Bovendien zijn ook de opgelegde randvoorwaarden van verschillende bronnen afkomstig. In Telemac model is de rand gelegen in de Noordzee en zijn de randvoorwaarden afkomstig van het ZUNO model waarin het Telemac model is genest. In Delft3D-NeVla is de afwaartse rand gelegen ter hoogte van de lijn Westkapelle-Cadzand en bestaan de randvoorwaarden uit (geïnterpoleerde waarden van) waterstandsmetingen afkomstig van deze twee getijstations.

Om te onderzoeken wat het effect is van deze verschillen in opgelegde afwaartse randvoorwaarden op de modelresultaten is ook het Telemac model (i.e., het nieuw opgezette mesh met roosterresolutie van 150 m in het studiegebied) ter hoogte van de lijn Westkapelle-Cadzand afgeknipt (zie Figuur 26) en geforceerd met geïnterpoleerde waarden van geobserveerde waterstanden in deze twee getijstations. Deze Telemac simulatie heeft dus dezelfde afwaartse randvoorwaarden als het Delft3D-NeVla model, maar alle andere instellingen zijn gelijk aan de overige Telemac-simulaties.

Figuur 26 – Ligging van de afwaartse rand in het nieuw opgezette Telemac model (blauw) en in het ter hoogte van de lijn Westkapelle-Cadzand afgeknipte model (rood).



Invloed randvoorwaarden op reproductie waterstandsverloop

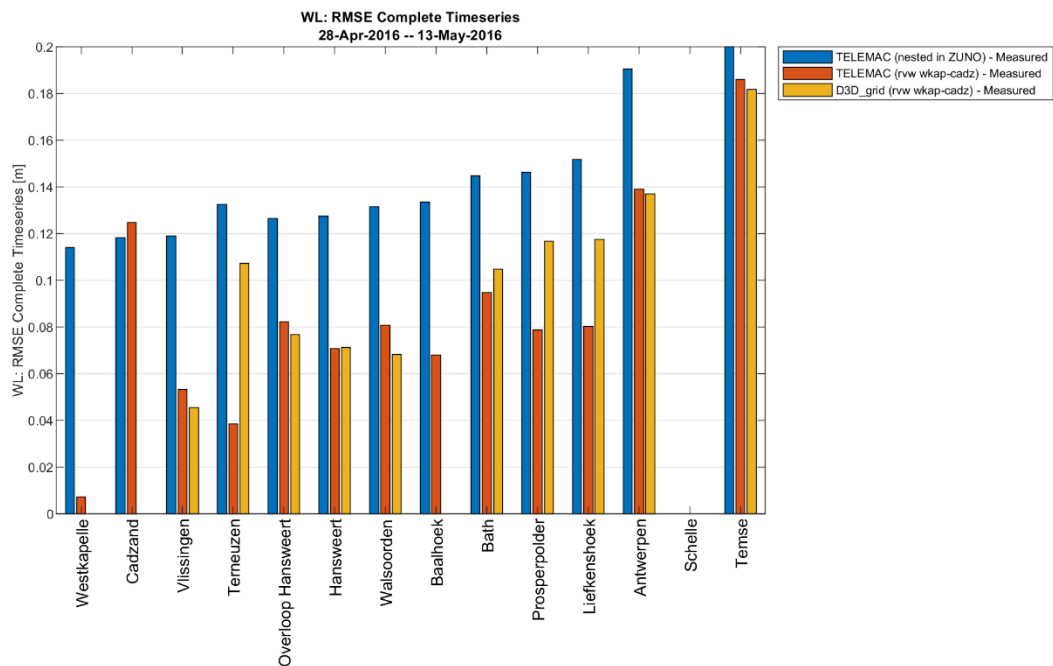
Figuur 27 – Figuur 30 tonen de BIAS en RMSE-waarden voor de gemodelleerde waterstanden met het volledige Telemac-model (genest in ZUNO), het ter hoogte van Westkapelle-Cadzand afgeknipte Delft3D model (geforceerd met gemeten waterstanden) en het afgeknipte Telemac model (eveneens geforceerd met gemeten waterstanden). In beide modellen (i.e., Delft3D en Telemac) waarin gemeten waterstanden zijn opgelegd aan de afwaartse rand zijn de RMSE-waarden langs het estuarium gelijkend en tevens lager dan in het Telemac model dat in het ZUNO model werd genest. Uit de resultaten volgt dus dat de RMSE-waarden van de simulaties in de Westerschelde sterk gerelateerd zijn aan de opgelegde randvoorwaarden. De BIAS voor de complete tijdreeks en voor de hoog- of laagwaters specifiek verschilt ook tussen de simulaties met verschillende randvoorwaarden. Met betrekking tot de BIAS zijn echter ook grote verschillen zichtbaar tussen de twee simulaties met gelijkende randvoorwaarden (i.e., beide afgeknipte modellen). Dit betekent dat de BIAS naast de invloed van de afwaartse randvoorwaarden ook sterk wordt beïnvloed door de configuratie van het model zelf.

Invloed randvoorwaarden op reproductie stroomsnelheidsverloop

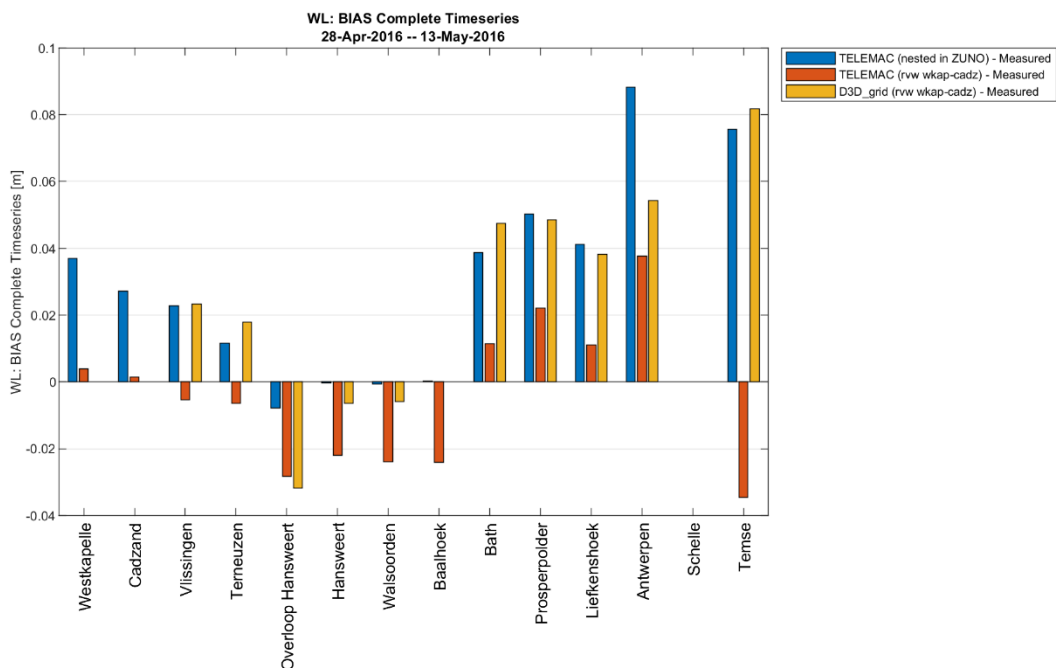
Figuur 31 en Figuur 32 tonen de gemodelleerde stroomsnelheden bij locatie H1 en H2 voor simulaties met het volledige Telemac-model (genest in ZUNO), het ter hoogte van Westkapelle-Cadzand afgeknipte Delft3D model (geforceerd met gemeten waterstanden) en het afgeknipte Telemac model (eveneens geforceerd met gemeten waterstanden). Op deze locaties wordt tijdens hoogwater springtij een snelheidspiek geobserveerd (en door het gekalibreerde Delft3D model gesimuleerd) die gerelateerd is aan circulaire stromingen ten gevolge van neervorming ten oosten van de Platen van Ossensisse. Het stroomsnelheidsverloop van beide Telemac modellen is gelijkaardig en toont deze snelheidspiek tijdens hoogwater springtij niet, ongeacht de opgelegde randvoorwaarden. Het ontbreken van deze dwarsstromingen bij locatie H1 in de Telemac simulaties kan dus niet worden verklaard door verschillen in forcering aan de afwaartse rand (i.e., gemeten waarden vs. Nesting in een harmonisch model).

De gemodelleerde stroomsnelheden op locaties H3, H4 en in de diepe put van Hansweert zijn overigens niet getoond omdat daar geen sprake is van snelheidspieken gerelateerd aan de neervorming.

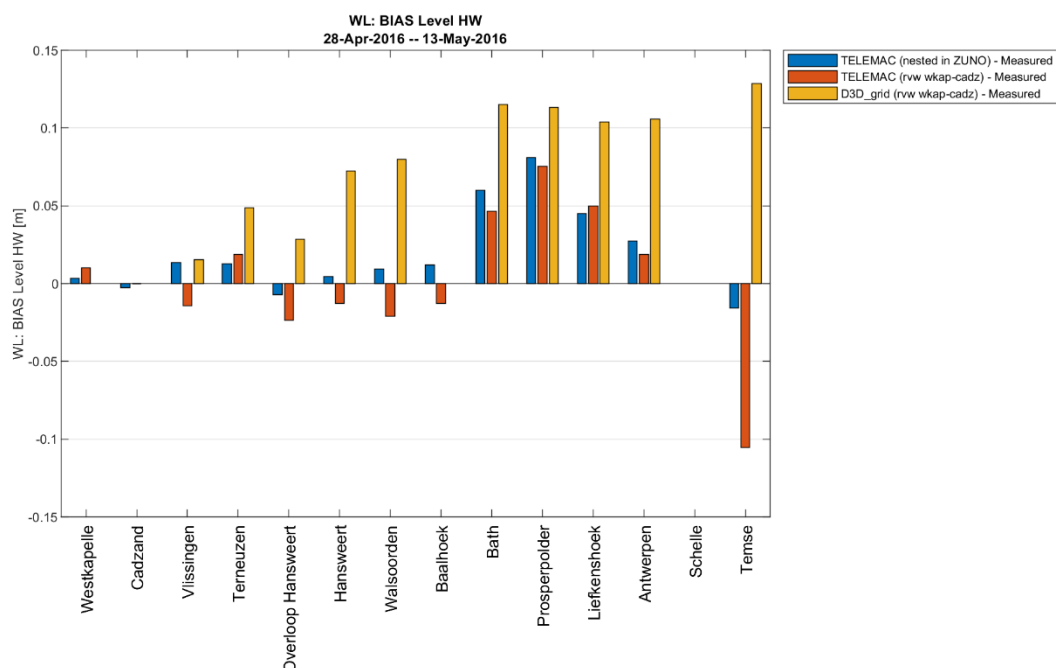
Figuur 27 – RMSE van de gemodelleerde waterstanden ten opzichte van gemeten waarden voor het in ZUNO geneste Telemac model en voor Telemac- en Delft3D modellen met een bij Westkapelle-Cadzand afgeknipte rand.



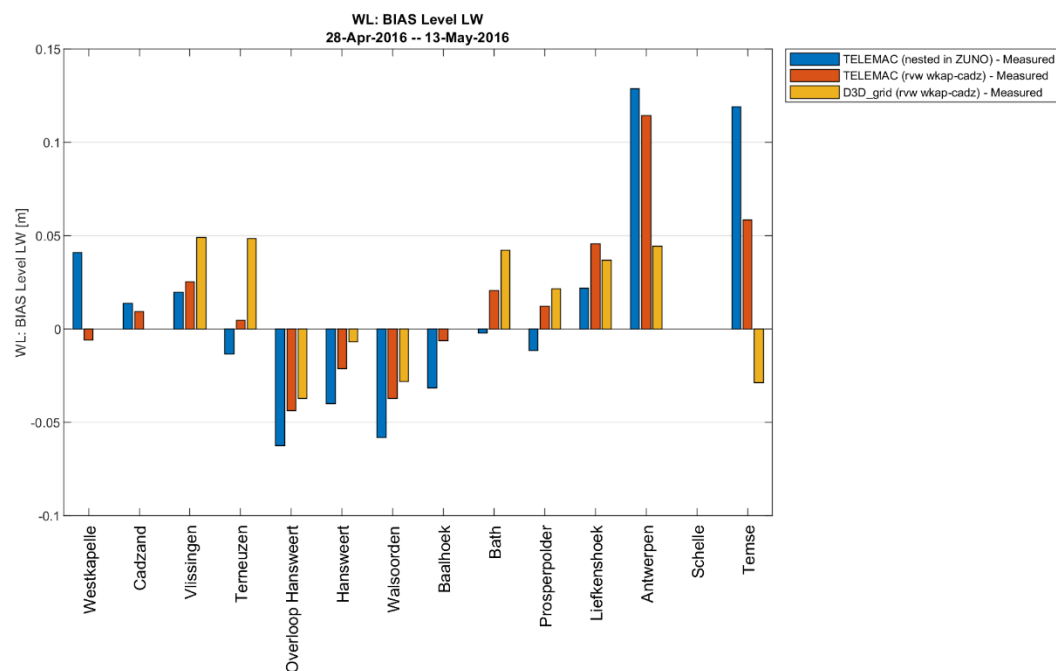
Figuur 28 – Gemiddelde afwijking van de gemodelleerde waterstanden ten opzichte van het gemeten waterstandsverloop voor het in ZUNO geneste Telemac model en voor Telemac- en Delft3D modellen met een bij Westkapelle-Cadzand afgeknipte rand.



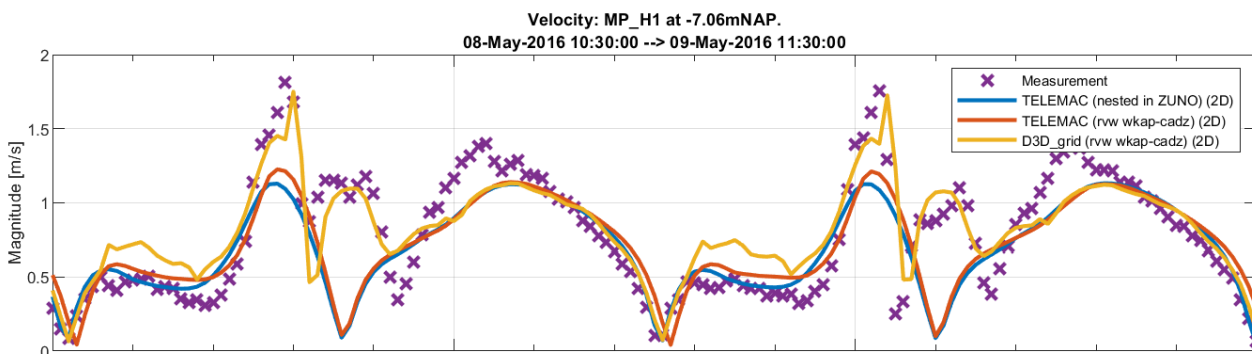
Figuur 29 – Gemiddelde afwijking van de gemodelleerde hoogwaters ten opzichte van gemeten waarden voor het in ZUNO geneste Telemac model en voor Telemac- en Delft3D modellen met een bij Westkapelle-Cadzand afgeknipte rand.



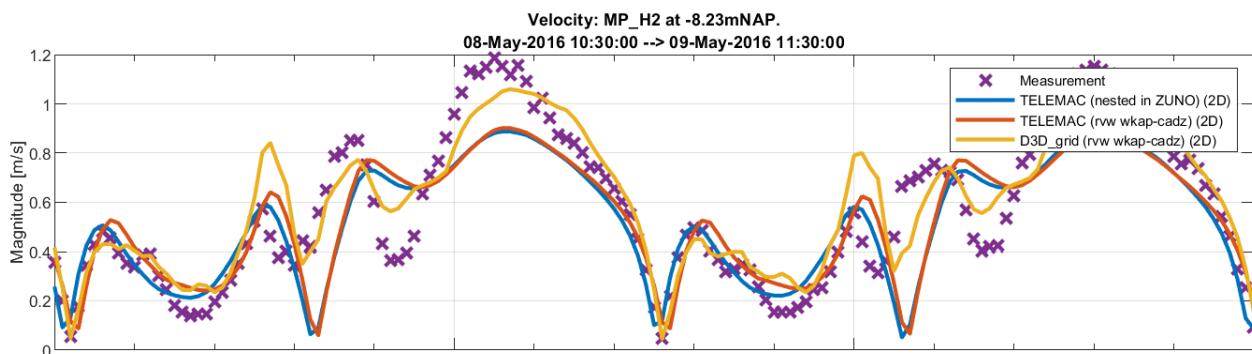
Figuur 30 – Gemiddelde afwijking van de gemodelleerde laagwaters ten opzichte van gemeten waarden voor het in ZUNO geneste Telemac model en voor Telemac- en Delft3D modellen met een bij Westkapelle-Cadzand afgeknipte rand.



Figuur 31 – Gemodelleerd en gemeten stroomsnelheidsverloop bij locatie H1 tijdens springtij voor het in ZUNO geneste Telemac model en voor Telemac- en Delft3D modellen met een bij Westkapelle-Cadzand afgeknipte rand.



Figuur 32 – Gemodelleerd en gemeten stroomsnelheidsverloop bij locatie H2 tijdens springtij voor het in ZUNO geneste Telemac model en voor Telemac- en Delft3D modellen met een bij Westkapelle-Cadzand afgeknipte rand.



3.4 Vergelijking invloed ruwheidsveld in studiegebied

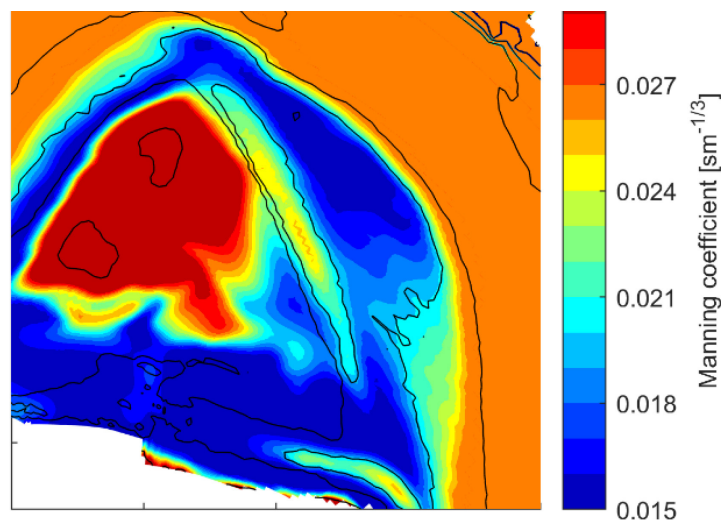
Er zijn een aantal modelsimulaties uitgevoerd waarin de bodemruwheid in het studiegebied is aangepast op basis van bevindingen van Stark *et al.* (2019) in hun Delft3D modelstudie in het kader van AvdT-project “Hydro- en sedimentdynamische en morfologische processen op mesoschaal”. Resultaten van deze modelstudie in Delft3D suggereren dat het substantieel verlagen van de bodemruwheid op de ondiepte tussen de Platen van Ossensisse en de Drempel van Hansweert bijdraagt aan een optimale representatie van de neer en bijbehorende snelheidspieken in dit gebied tijdens hoogwater springtij. Meer specifiek is de bodemruwheid in het studiegebied significant verlaagd (i.e., afhankelijk van de diepte) op de Platen van Ossensisse, inclusief een aangrenzende ondiepte aan de kant van de Drempel van Hansweert (Figuur 33). Ter plaatse van de vaargeul bij de Overloop van Hansweert, de diepe put van Hansweert en de Drempel van Hansweert zijn geen grote aanpassingen aan het ruwheidsveld gedaan.

De ruwheidsvelden die in het kader van de huidige gevoeligheidsanalyse worden vergeleken staan opgesomd in Tabel 5. De desbetreffende ruwheden zijn enkel toegepast binnen het studiegebied rondom de Platen van Ossensisse (i.e., ongeveer overeenkomstig het gebied weergegeven in Figuur 33). Er wordt opgemerkt dat het Delft3D model ook buiten het studiegebied een ander ruwheidsveld heeft dan de Telemac modellen (zie Figuur 11 en Figuur 12 in §2.6). Alle Telemac simulaties met variabele bodemruwheid zijn vergeleken op basis van het modelrooster waarin de resolutie in het studiegebied is verfijnd naar ongeveer 50m (mesh_hw50). In het overige deel van het estuarium is de ruwheid identiek aan de in het Scaldis model gebruikte waarden. De modelresultaten van het voor Hansweert gekalibreerde Delft-3D model zijn ook getoond.

Tabel 5 – Modelsimulaties met aangepast ruwheidsveld.

Simulatie	n op Platen van Ossensisse	n op Overloop van Hansweert & Drempel van Hansweert
<i>D3D_14024_final</i>	$n = 0.015 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$	$n = 0.025 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$
<i>hw50_rgh=0,021_from_Scaldis</i>	$n = 0.022 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$	$n = 0.022 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$
<i>hw50_rgh=0,015@PvO</i>	$n = 0.015 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$	$n = 0.022 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$
<i>hw50_rgh=0,015@PvO_0,025@geul</i>	$n = 0.015 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$	$n = 0.025 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$
<i>hw50_rgh=0,010@PvO_0,025@geul</i>	$n = 0.010 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$	$n = 0.025 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$
<i>hw50_rgh=0,010@PvO_0,030@geul</i>	$n = 0.010 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$	$n = 0.030 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$
<i>hw50_rgh=0,015@PvO_0,030@geul</i>	$n = 0.015 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$	$n = 0.030 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$

Figuur 33 – Aangepast ruwheidsveld ter hoogte van de Platen van Ossensisse in Delft3D studie door Stark et al. (2019).



Waterstanden

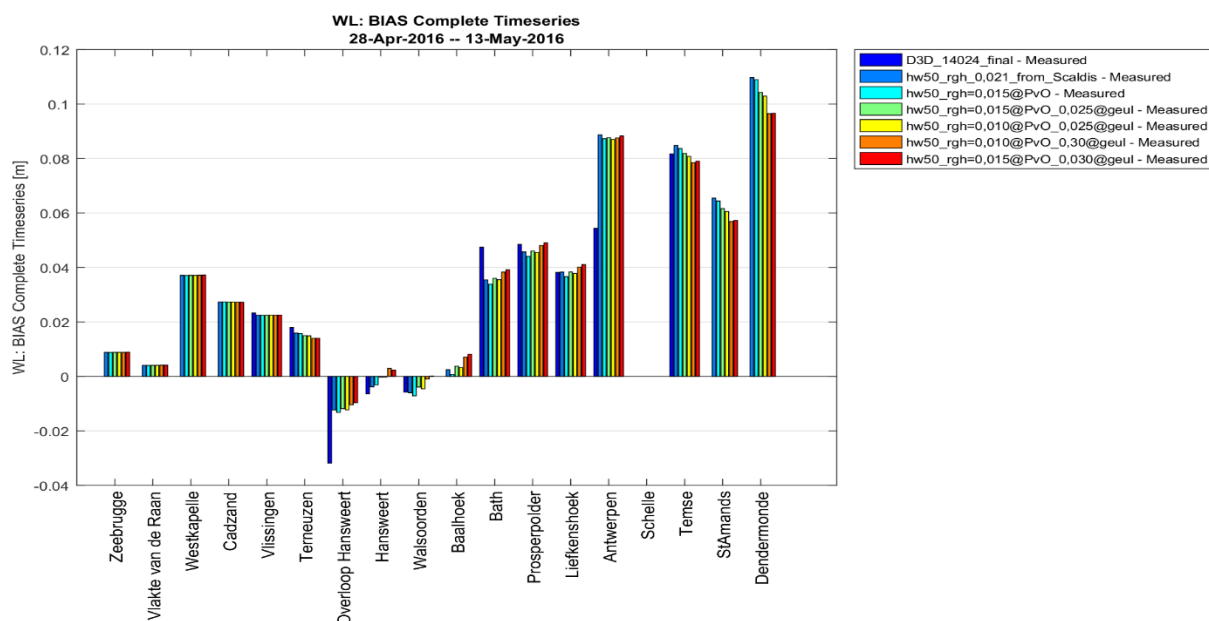
De invloed van lokale variaties in het ruwheidsveld op de gemodelleerde gemiddelde waterstanden is beperkt tot ongeveer 0.03 m in het meest opwaartse deel (Figuur 34). Echter, de grootste afwijking is die tussen de Telemac modellen en het door Stark *et al.* (2019) gekalibreerde Delft3D-NeVla model. In het algemeen kan gesteld worden dat het gekalibreerde Delft3D model de beste representatie van de waterstandsvariaties geeft (i.e., laagste RMSE voor de gehele tijdreeks in Figuur 37). Dit laatste model heeft wel een andere afwaartse randvoorwaarde (i.e., gemeten tijdserie in plaats van genest in een harmonisch model), wat dit verschil kan verklaren. Op basis van de verschillende Telemac-modelresultaten blijkt verder dat het verhogen van de ruwheid in de geulen in het studiegebied resulteert in iets betere modelprestatie (i.e., kleinere RMSE-waarden) opwaarts van Hansweert.

Als de hoogwaters en laagwaters afzonderlijk beschouwd worden blijkt echter dat de verschillende Telemac modellen de hoogwaters beter representeren voor waterstandsstations in het studiegebied tussen Terneuzen en Walsoorden. Ook is het effect van variaties in het (lokale) ruwheidsveld op hoog- en laagwaters iets groter. Het toepassen van de voor het Delft3D gekalibreerde ruwheidsveld in het studiegebied tussen Terneuzen en Walsoorden (i.e., Telemac model met $n = 0.015 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$ op de Platen van Ossensisse en $n = 0.025 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$ in de geulen rond de Platen van Ossensisse) leidt tot een lagere overschatting van de getij-amplitude (i.e., Figuur 35 voor hoogwaters en Figuur 36 voor laagwaters) en verkleint ook de RMSE op de waterstandseries (Figuur 37).

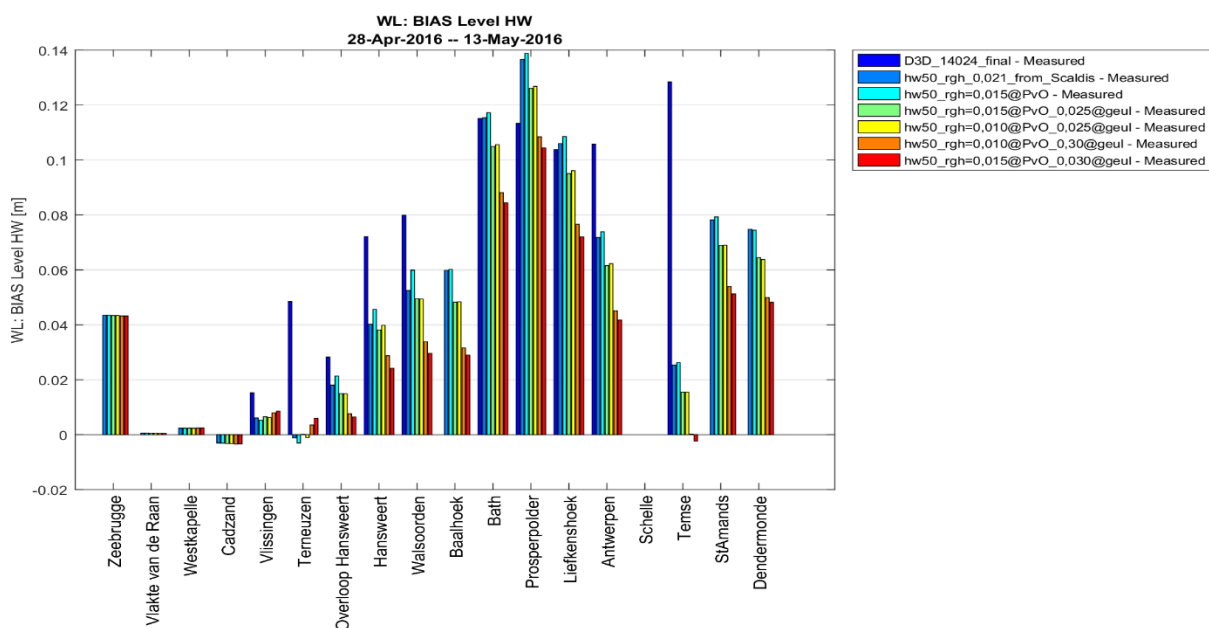
De simulaties waarin de bodemruwheid van de geulen in het studiegebied lokaal is aangepast naar $n = 0.030 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$ geven een betere representatie van de hoog- en laagwaters.

In deze context wordt opnieuw opgemerkt dat de representatie van de hoog- en laagwaters en de getij-amplitude door middel van een her-kalibratie van de bodemruwheid (eenvoudig) verbeterd kan worden. De focus ligt in deze fase van de studie echter voornamelijk op het onderzoeken van de gevoeligheid van het model met betrekking tot het simuleren van getijvoortplanting en stroomsnelheden in het studiegebied, dan op het verkrijgen van de meest optimale modelinstellingen voor getijvoortplanting door het gehele estuarium.

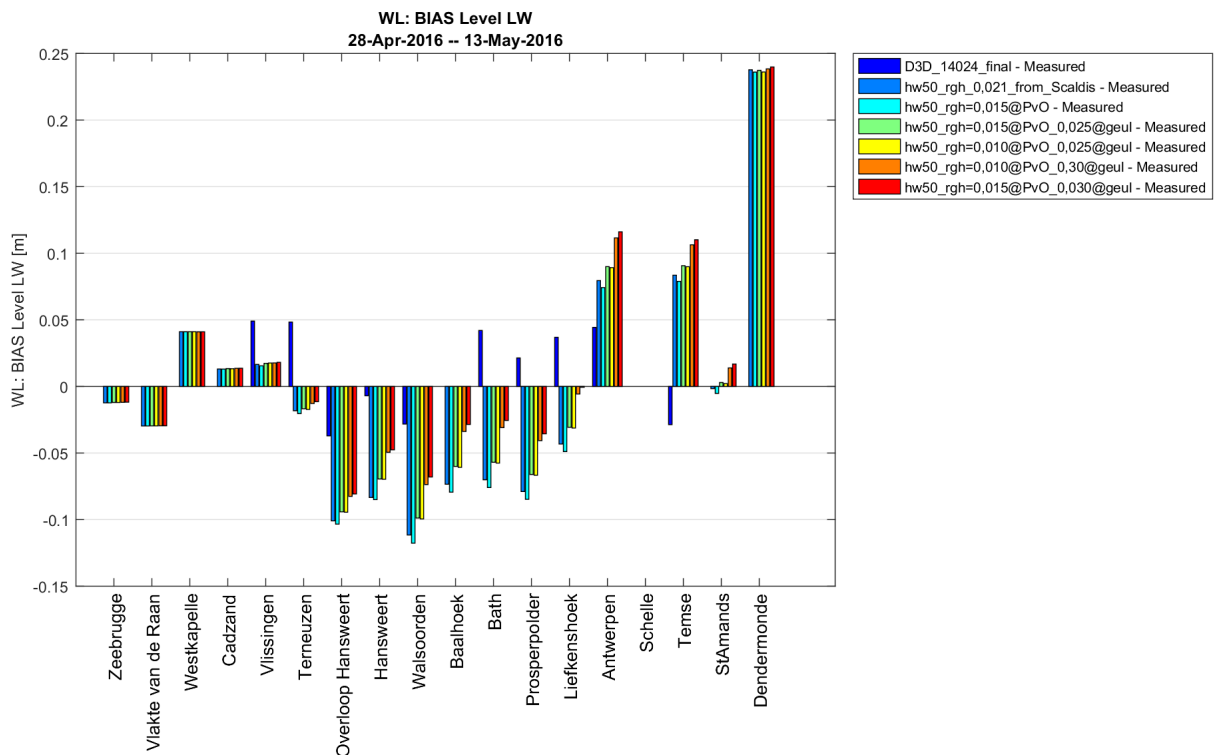
Figuur 34 – Gemiddelde afwijking van de gemodelleerde waterstanden ten opzichte van het gemeten waterstandsverloop voor Telemac simulaties met verschillende ruwheidsvelden in het studiegebied en het eerder gekalibreerde Delft-3D model.



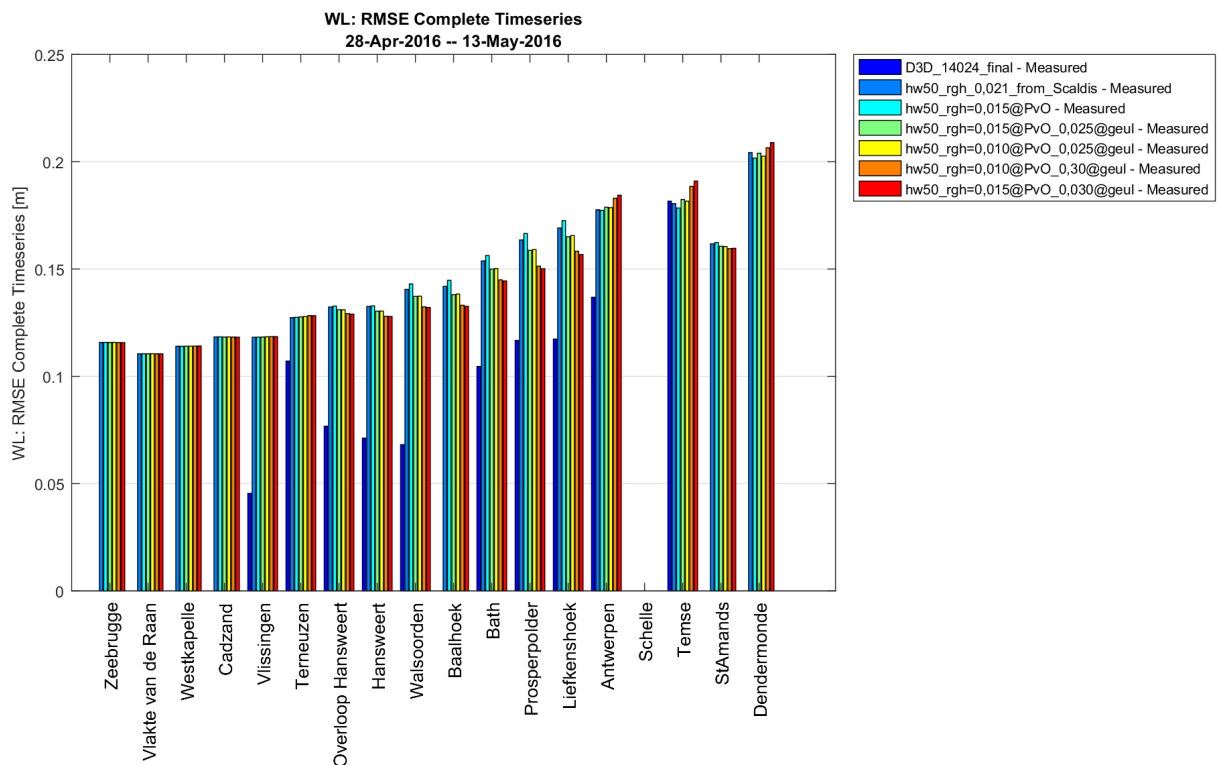
Figuur 35 – Gemiddelde afwijking van de gemodelleerde hoogwaters ten opzichte van gemeten waarden voor Telemac simulaties met verschillende ruwheidsvelden in het studiegebied en het eerder gekalibreerde Delft-3D model.



Figuur 36 – Gemiddelde afwijking van de gemodelleerde laagwaters ten opzichte van gemeten waarden voor Telemac simulaties met verschillende ruwheidsvelden in het studiegebied en het eerder gekalibreerde Delft-3D model.



Figuur 37 – RMSE van de gemodelleerde waterstanden ten opzichte van gemeten waarden voor Telemac simulaties met verschillende ruwheidsvelden in het studiegebied en het eerder gekalibreerde Delft-3D model.



Stroomsnelheidsverloop

Het snelheidsverloop bij meetpunt H1 bestaat achtereenvolgens uit een sterke vloedpiek in zuidoostelijke richting, een tweede snelheidspiek tijdens hoogwater (gerelateerd aan dwarsstroming door de vorming van een neer tussen de Platen van Ossensisse en de Drempel van Hansweert), gevolgd door de eb-stroming in noordwestelijke richting (Figuur 38). Bij meetpunt H2 is het geobserveerde stroomsnelheidsverloop gelijkaardig, maar is de eb-stroming sterker dan de vloedstroming en de dwarsstroming (Figuur 39). Bij meetpunt H4 is er geen sprake van een dwarsstroming door neervorming (Figuur 40). Tot slot zijn de stroomsnelheden van de Telemac modelresultaten vergeleken ter hoogte van de diepe put van Hansweert (Figuur 41).

Lokale variaties in het ruwheidsveld leiden tot kleine veranderingen in het stroomsnelheidsverloop op de ondiepte ten oosten van de Platen van Ossensisse (i.e., meetpunt H1 en H2). In tegenstelling tot het gekalibreerde Delft3D model is geen van de Telemac-modellen echter in staat om de hoge vloedpiek en snelheidspiek geassocieerd met dwarsstroming bij meetpunt H1 goed te reproduceren. De vloedpiek neemt wel in sterkte toe als de ruwheid op de ondiepte tussen de Platen van Ossensisse en de Drempel van Hansweert wordt verlaagd (Figuur 38).

Bij meetpunt H2 wordt de vloedpiek het best gesimuleerd als het Scaldis ruwheidsveld wordt gebruikt ($n = 0.022 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$). Deze vloedpiek werd overschat in het gekalibreerde Delft3D model evenals in de Telemac modellen waarin de ruwheid op de Platen van Ossensisse is verlaagd en/of de ruwheid in de geul rondom de Platen van Ossensisse is verhoogd. Het toepassen van verlaagde ruwheid op de Platen van Ossensisse of verhoogde ruwheid in de geul leidt overigens niet tot een verbeterde weergave van de tweede snelheidspiek bij meetpunt H2 tijdens hoogwater.

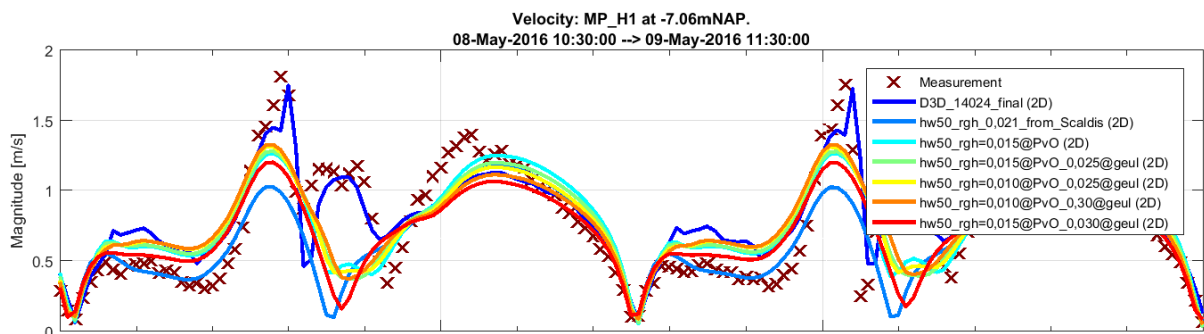
De representatie van de eb-snelheden bij meetpunten H1 en H2 verschilt weinig tussen alle modelsimulaties. Ook hier geldt dat een lagere ruwheid op de Platen van Ossensisse leidt tot iets hogere pieksnelheden.

Bij meetpunt H4 en ter hoogte van de diepe put van Hansweert zijn de verschillen in gemodelleerde dieptegemiddelde stroomsnelheid tussen de simulaties eerder klein. Wel wordt de sterke vloedpiek het best weergegeven in de Delft-3D simulatie, terwijl de onderschatting van de vloedpiek groter wordt als de ruwheid in de geul wordt verhoogd.

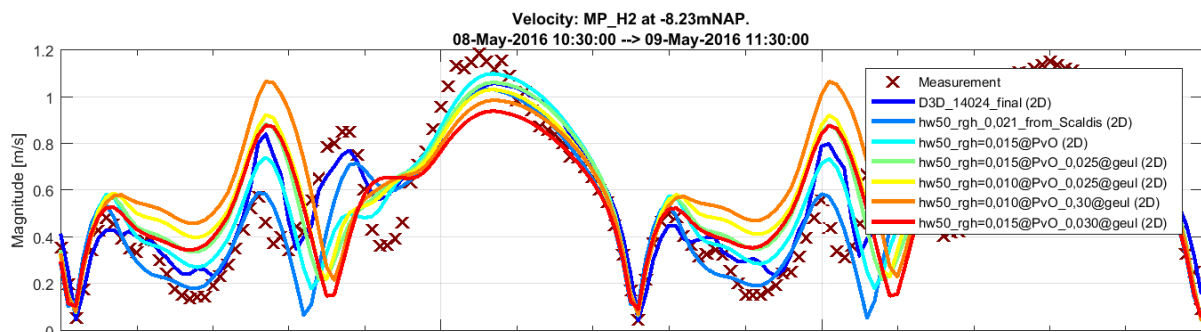
Uit visuele inspectie van de gemodelleerde stromingsvelden blijkt dat geen van de Telemac-modellen (met verschillende configuraties van de bodemruwheid in het studiegebied) in staat is de sterke dwarsstroming gerelateerd aan neervorming bij meetpunt H1 even goed te simuleren als het gekalibreerde Delft3D model (Figuur 42 voor de simulatie met $n = 0.010 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$ op de Platen van Ossensisse en $n = 0.025 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$ in de geulen rond de Platen van Ossensisse, welke de sterkste neervorming geeft; Figuur 22 voor het gekalibreerd Delft3D model).

Concluderend heeft de lokale bodemruwheid in de geul en op de ondiepe delen zoals de Platen van Ossensisse een waarneembare invloed op de gemodelleerde stroomsnelheden en het ruimtelijk stromingspatroon. Het is echter niet gelukt om de sterke snelheidspieken tijdens vloed en ten gevolge van neervorming tijdens hoogwater goed te simuleren met het Telemac model. Meer specifieke kalibratie van het ruwheidsveld in het studiegebied zou hier eventueel verbetering in kunnen brengen. Toch lijkt de representatie van het ruimtelijke stromingspatroon (i.e., inclusief de neervorming boven de Platen van Ossensisse) door het gekalibreerde Delft3D model van een betere kwaliteit.

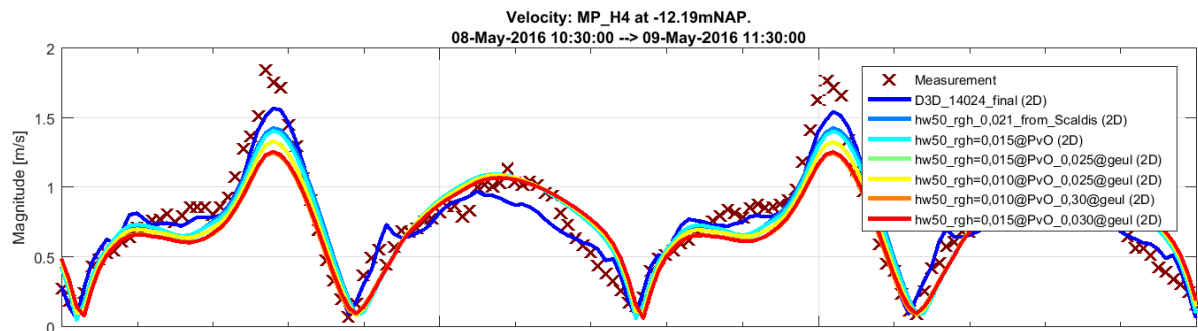
Figuur 38 – Gemodelleerd en gemeten stroomsnelheidsverloop bij locatie H1 tijdens springtij voor Telemac simulaties met verschillende ruwheidsvelden in het studiegebied en het eerder gekalibreerde Delft-3D model.



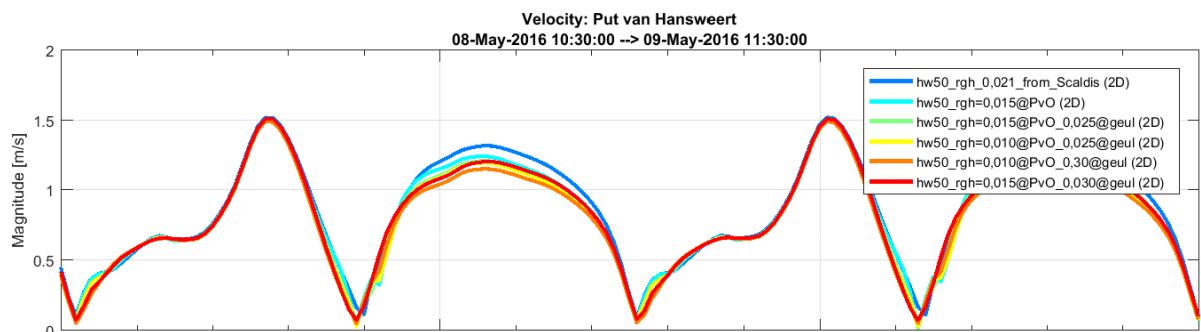
Figuur 39 – Gemodelleerd en gemeten stroomsnelheidsverloop bij locatie H2 tijdens springtij voor Telemac simulaties met verschillende ruwheidsvelden in het studiegebied en het eerder gekalibreerde Delft-3D model.



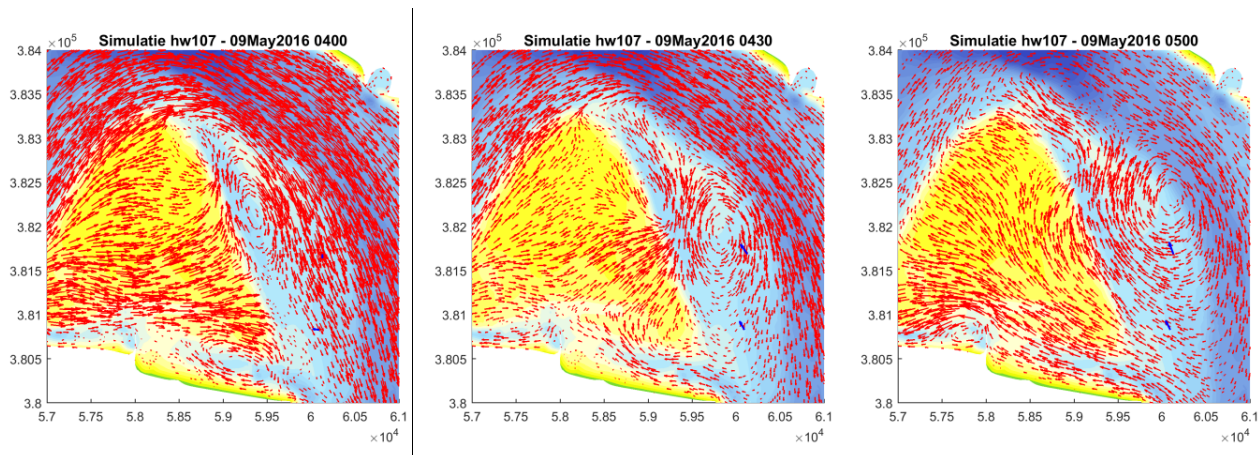
Figuur 40 – Gemodelleerd en gemeten stroomsnelheidsverloop bij locatie H4 tijdens springtij voor Telemac simulaties met verschillende ruwheidsvelden in het studiegebied en het eerder gekalibreerde Delft-3D model.



Figuur 41 – Gemodelleerd dieptegemiddeld stroomsnelheidsverloop in de diepe put van Hansweert tijdens springtij voor Telemac simulaties met verschillende ruwheidsvelden in het studiegebied en het eerder gekalibreerde Delft-3D model.



Figuur 42 – Gemodelleerd stromingsveld 30 minuten voor (links), tijdens (midden) en 30 minuten na (rechts) springtij-HW ter hoogte van de Platen van Ossensisse voor simulatie hw50_rgh=0,010@PvO_0,025@geul.



3.5 Gevoeligheid viscositeit

Om de gevoeligheid voor de door de turbulentiemodellen bepaalde diffusiecoëfficiënten na te gaan zijn vier Telemac simulaties uitgevoerd met een constante horizontale en verticale diffusiviteit coëfficiënt, terwijl de turbulente viscositeit anders door een turbulentiemodel (e.g. Smagorinsky model of '*mixing length model*') wordt bepaald (zie: §2.7). In het geval van een constante viscositeit wordt de horizontale en verticale viscositeit in het hele model bepaald door de "*COEFFICIENT FOR VERTICAL DIFFUSION OF VELOCITIES*" en de "*COEFFICIENT FOR HORIZONTAL DIFFUSION OF VELOCITIES*" (Tabel 6). Dit houdt in dat deze coëfficiënten zowel de turbulente als de laminaire viscositeit representeren. De resultaten van deze simulaties geven een indicatie voor de gevoeligheid van de modelresultaten voor de diffusiviteit. De constante diffusiecoëfficiënten die zijn getest staan opgesomd in Tabel 6.

Tabel 6 – Modelsimulaties met constante viscositeit.

Simulatie	COEFFICIENT FOR HORIZONTAL DIFFUSION OF VELOCITIES	COEFFICIENT FOR VERTICAL DIFFUSION OF VELOCITIES
VELOCITY DIFFUSIVITY = 0,01	$v_{tot} = 0,01$	$v_{tot} = 0,01$
VELOCITY DIFFUSIVITY = 0,1	$v_{tot} = 0,1$	$v_{tot} = 0,1$
VELOCITY DIFFUSIVITY = 1,0	$v_{tot} = 1,0$	$v_{tot} = 1,0$
VELOCITY DIFFUSIVITY = 10	$v_{tot} = 10$	$v_{tot} = 10$
SMAGORISKY MODEL	$v_{lam} = 0.01$ en v_{tur} uit Smagorinsky model	$v_{lam} = 0.01$ en v_{tur} uit ' <i>mixing length model</i> '

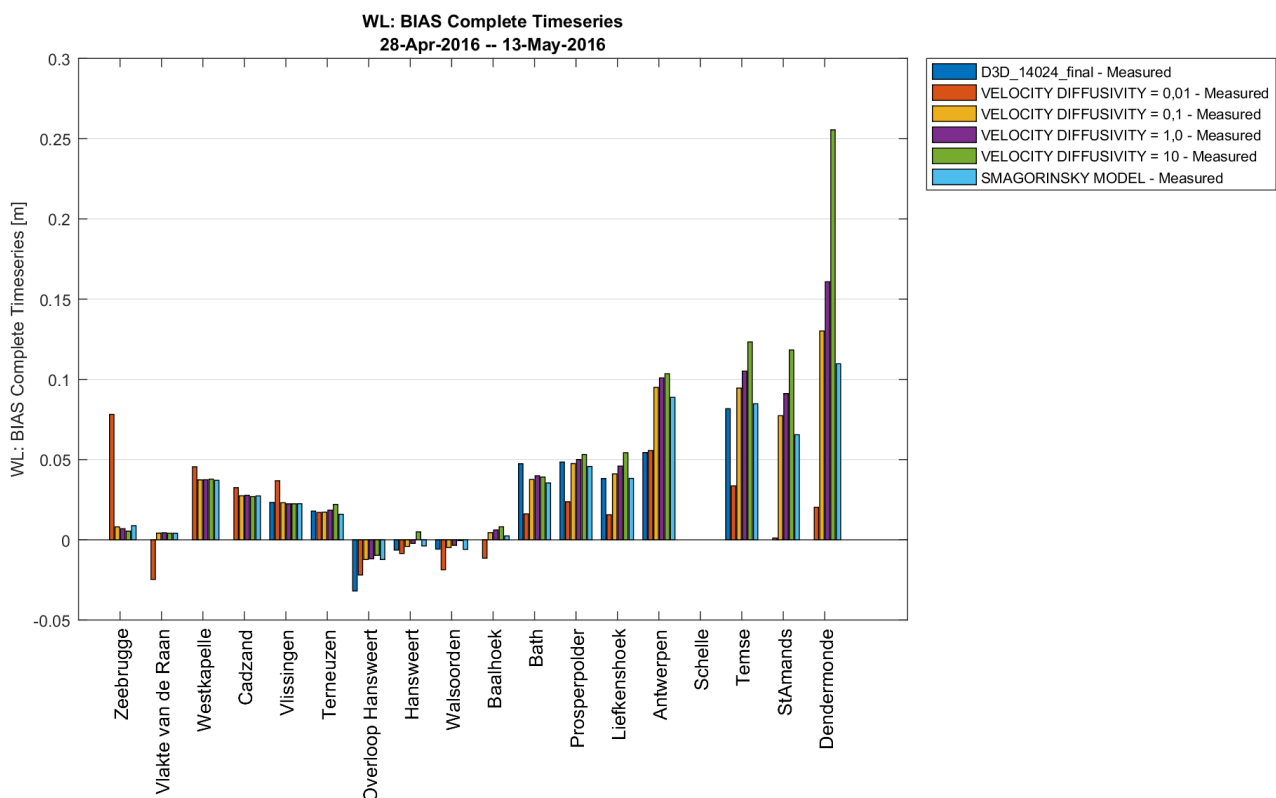
Invloed viscositeit op modelresultaten

Op basis van de modelresultaten kan geconcludeerd worden dat variaties in viscositeit een grote invloed hebben op de gemodelleerde waterstanden (Figuur 43, Figuur 44 en Figuur 45) en stroomsnelheden (Figuur 46, Figuur 47, Figuur 48 en Figuur 49). De simulatie met een relatief lage constante viscositeit (i.e.,

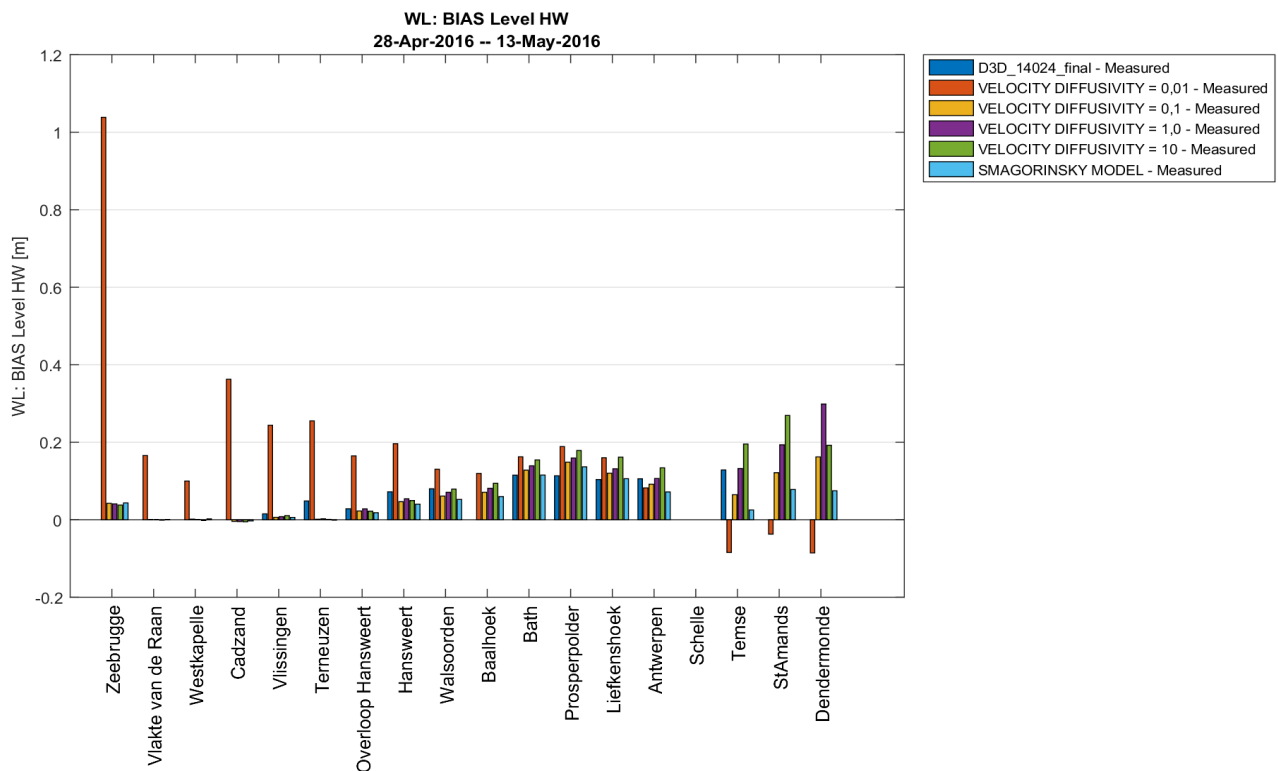
“COEFFICIENT FOR HORIZONTAL / VERTICAL DIFFUSION OF VELOCITIES” = 0,01) geeft de meest afwijkende resultaten in het hele estuarium, voornamelijk op de hoogwaters. Dit wordt veroorzaakt door instabiliteiten die met deze modelinstellingen ontstaan langs de afwaartse rand. Bij een hogere diffusiviteit worden dergelijke instabiliteiten gedempt. Ook geeft deze simulatie andere resultaten voor het stroomsnelheidsverloop bij locatie H1 (Figuur 46), waar een vertraging van de vloedpiek op lijkt te treden, de eb-piek zwakker is en er een kleine verhoging van de stroomsnelheid optreedt voor het begin van de eb. Uit visuele inspectie van de stromingsvelden blijkt echter dat deze niet is gerelateerd aan de neervorming welke in de Delft3D simulatie (Stark *et al.*, 2019) en in eerdere snelheidsmetingen en modelonderzoeken (e.g. Decrop *et al.*, 2009; Vanlede *et al.*, 2015) werd vastgesteld.

In het opwaartse deel van het estuarium in de Boven-Zeeschelde (i.e., opwaarts van Schelle) hebben ook variaties tussen hogere viscositeits-coëfficiënten een grote invloed. Dit leidt o.a. tot een grotere fout op de gemodelleerde waterstanden met een viscositeits-coëfficiënt van 10 ten opzichte van de resultaten met het Smagorinsky model. Overigens liggen de modelresultaten met het Smagorinsky model voor horizontale turbulentiemodellering, zoals gebruikt in Scaldis (Smolders *et al.*, 2016), het meest in de buurt van de modelresultaten met een constante viscositeit van 0.1.

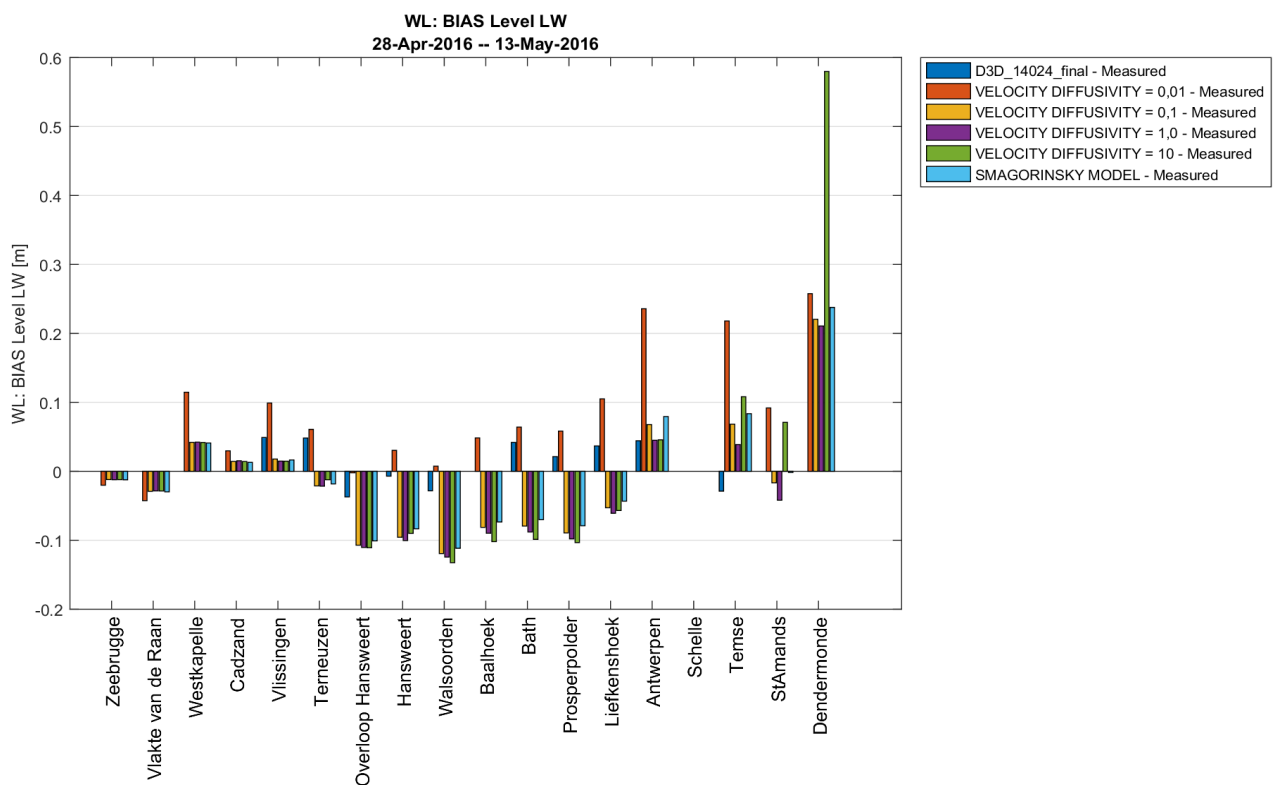
Figuur 43 – Gemiddelde afwijking van de gemodelleerde waterstanden ten opzichte van het gemeten waterstandsverloop voor Telemac simulaties met verschillende ‘Velocity Diffusivity’ coëfficiënten en met het Smagorinsky model.



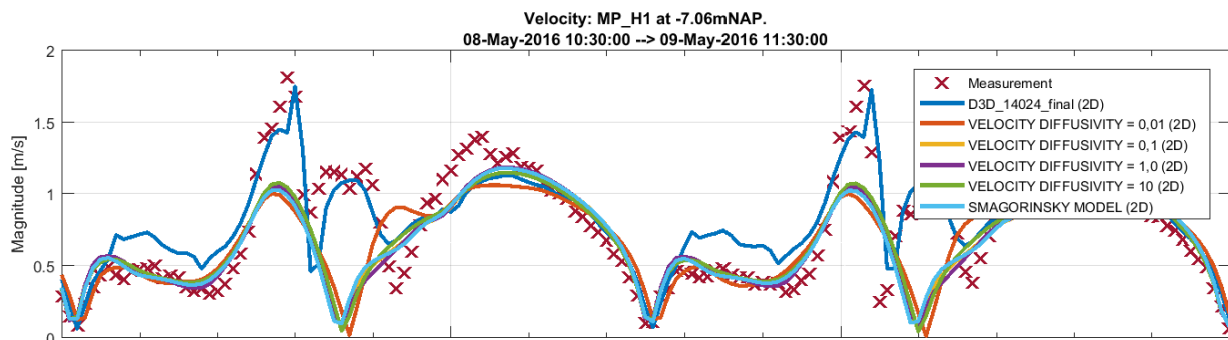
Figuur 44 – Gemiddelde afwijking van de gemodelleerde hoogwaters ten opzichte van gemeten waarden voor Telemac simulaties met verschillende 'Velocity Diffusivity' coëfficiënten en met het Smagorinsky model.



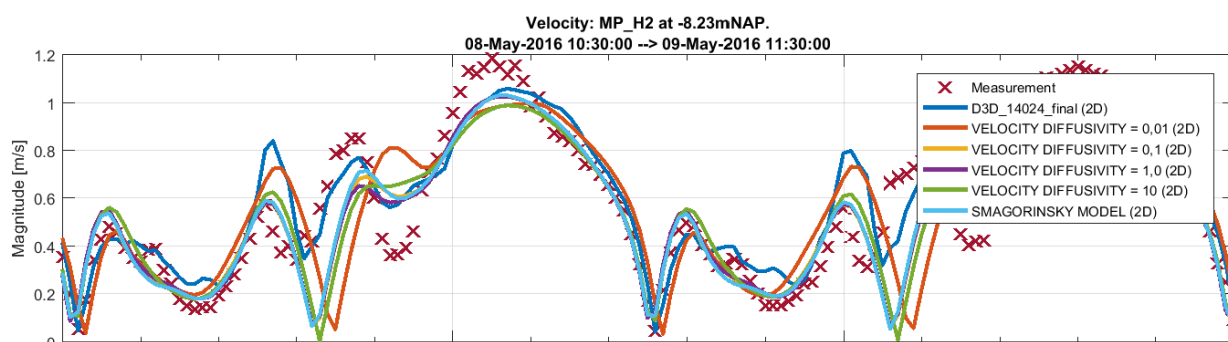
Figuur 45 – Gemiddelde afwijking van de gemodelleerde laagwaters ten opzichte van gemeten waarden voor Telemac simulaties met verschillende 'Velocity Diffusivity' coëfficiënten en met het Smagorinsky model.



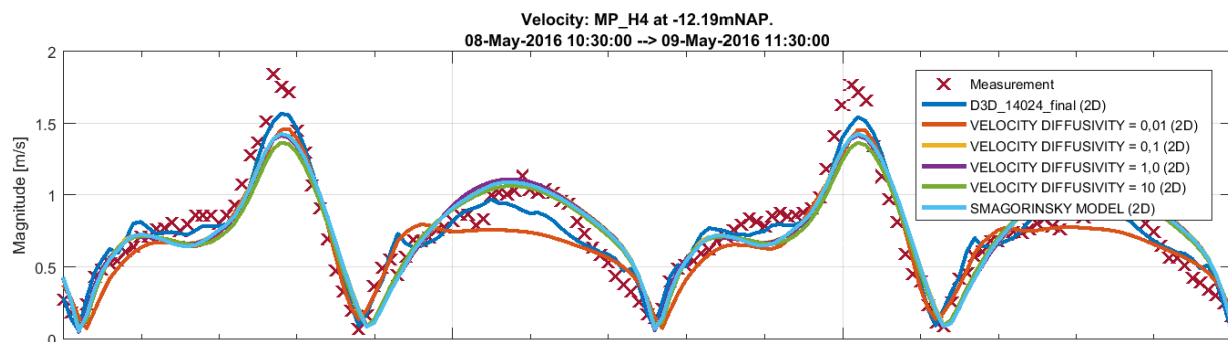
Figuur 46 – Gemodelleerd en gemeten stroomsnelheidsverloop bij locatie H1 tijdens springtij voor Telemac simulaties met verschillende 'Velocity Diffusivity' coëfficiënten en met het Smagorinsky model.



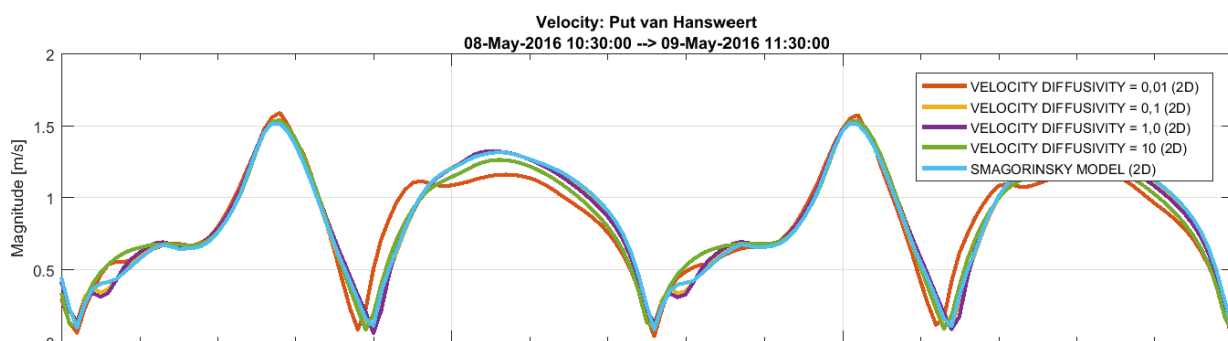
Figuur 47 – Gemodelleerd en gemeten stroomsnelheidsverloop bij locatie H2 tijdens springtij voor Telemac simulaties met verschillende 'Velocity Diffusivity' coëfficiënten en met het Smagorinsky model.



Figuur 48 – Gemodelleerd en gemeten stroomsnelheidsverloop bij locatie H4 tijdens springtij voor Telemac simulaties met verschillende VELOCITY DIFFUSIVITY coëfficiënten en met het Smagorinsky model.



Figuur 49 – Gemodelleerd en gemeten dieptegemiddeld stroomsnelheidsverloop in de diepe put van Hansweert tijdens springtij voor Telemac simulaties met verschillende 'Velocity Diffusivity' coëfficiënten en met het Smagorinsky model.



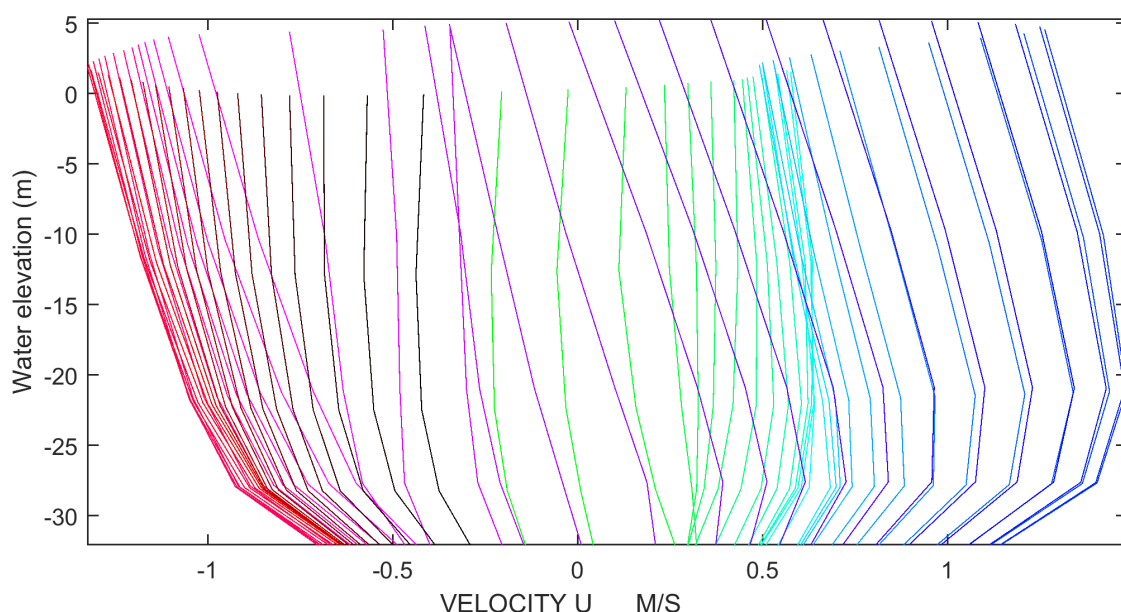
3.6 Verticaal snelheidsprofiel

Om te onderzoeken of het gebruik van een driedimensionaal model (e.g. Telemac-3D of Delft3D) preferentieel is boven een tweedimensionale modellering (e.g. Telemac-2D of Delft3D in 2Dh) zijn de verticale snelheidsprofielen op twee locaties in het studiegebied geplot. Aan de hand hiervan kan worden nagegaan of er op deze locaties sprake is van een (bij benadering) logaritmisch profiel, wat ook door een tweedimensionaal model impliciet wordt aangenomen, of dat er sprake is van een snelheidsprofiel met een andere variatie over de diepte, waarvoor een driedimensionaal model de voorkeur geniet. Het correct representeren van het verticaal snelheidsprofiel is van belang voor de morfologische modellering omdat het berekende sedimenttransport afhankelijk is van de verticale gradiënt van de snelheid nabij de bodem.

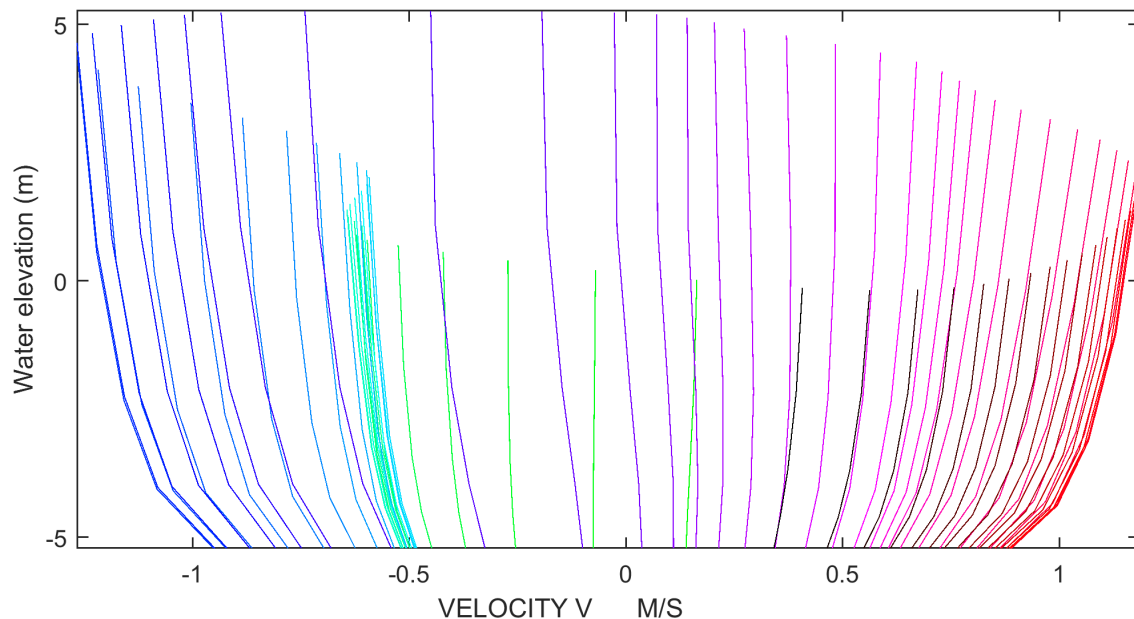
In Figuur 50 zijn de verticale snelheidsprofielen met een interval van 10 minuten in de diepe put van Hansweert voor een volledig springtijcyclus geplot. Dit is gedaan voor de Telemac simulatie met een horizontale roosterresolutie van 50 m in het studiegebied. Uit de weergegeven verticale snelheidsprofielen blijkt dat vooral tijdens de vloedfase (i.e., blauwe snelheidsprofielen) sprake is van een niet-logaritmisch snelheidsprofiel. De maximale snelheden tijdens vloed worden gemodelleerd op dieptes van -25 m TAW. Tijdens de eb fase (i.e., rode snelheidsprofielen) is het snelheidsprofiel wel bij benadering logaritmisch verdeeld over de diepte met de hoogste stroomsnelheden nabij de oppervlakte en lagere snelheden nabij de bodem. Concluderend kan gesteld worden dat een driedimensionale modellering aangewezen lijkt om het stroombeeld in de diepe put van Hansweert correct te modelleren.

Op de ondiepte tussen de Platen van Ossensisse en de Drempel van Hansweert (i.e., meetpunt H1) is het snelheidsprofiel tijdens zowel eb- als vloed bij benadering logaritmisch verdeeld over de diepte (Figuur 51). Voor het correct representeren van het stromingspatroon op deze ondiepte lijkt een driedimensionale modellering dus niet noodzakelijk. Hierbij dient wel aangetekend te worden dat de neervorming en bijbehorend stromingspatroon op deze locatie niet adequaat wordt gerepresenteerd in de desbetreffende simulatie.

Figuur 50 – Gemodelleerde verticale snelheidsprofielen in W-O-richting tijdens springtij in de diepe put van Hansweert.



Figuur 51 – Gemodelleerde verticale snelheidsprofielen in N-Z-richting tijdens springtij bij meetpunt H1.



3.7 Discussie gevoeligheidsanalyse hydrodynamisch model

Waterstandsverloop

Een potentiële verklaring voor de verschillen in representatie van het verticaal getij tussen beide modellen is de afwijking van de afwaartse randvoorwaarden. Meer specifiek bestaat de afwaartse randvoorwaarde in het door Stark *et al.* (2019) gebruikte Delft3D-NeVla uit geobserveerde waterstand-tijdreeksen, terwijl de Telemac-modellen zijn genest in het harmonische ZUNO model van de zuidelijke Noordzee. Het gevolg hiervan is dat het gemodelleerde waterstandsverloop in de meetperiode met het Delft3D model significant beter is. Hierdoor wordt een goed vergelijk van de representatie van de waterstanden in het estuarium voor de verschillende modellen bemoeilijkt. Een gevoeligheidstest waarin ook het Telemac model ter hoogte van de afwaartse rand van het Delft3D-NeVla model werd afgeknipt en werd geforceerd met gemeten waterstandsreeksen laat zien dat verschillen in nauwkeurigheid van het gemodelleerde verticaal getij inderdaad grotendeels toegeschreven kunnen worden aan de afwaartse randvoorwaarden. Dit geldt echter niet in dezelfde mate voor verschillen in representatie van hoog- en laag waterniveaus. Uit de eerdere modelvalidatie van het Scaldis Telemac-3D model (Smolders *et al.*, 2016) en van het Delft3D-NeVla model (Maximova *et al.*, 2009; Vanlede *et al.*, 2009) kan echter worden opgemaakt dat de gemodelleerde waterstanden en hoog- en laagwaters in de Westerschelde in beide modellen van een gelijkaardige kwaliteit zijn. Uit de huidige gevoeligheidsanalyse volgt tevens dat het voor deze studie ontwikkelde Telemac-3D model met een roosterresolutie van 150 m een gelijkaardige accuraatheid heeft als het eerder ontwikkelde Scaldis model. Er mag dus aangenomen worden dat de verschillende modellen voor wat betreft het reproduceren van het verticaal getij in de Westerschelde van gelijkaardige kwaliteit zijn.

Tevens blijkt uit de modelresultaten dat het verfijnen van het modelrooster tussen Terneuzen en Walsoorden een significante invloed heeft op de representatie van het waterstandsverloop. Hetzelfde geldt voor lokale aanpassingen in het ruwheidsveld ten behoeve van de representatie van het stroomsnelheidspatroon. Deze hebben een significante invloed op de representatie van waterstanden, voornamelijk opwaarts van het studiegebied. In dit opzicht wordt opgemerkt dat een (lokale) verandering of verslechtering van de representatie van het verticaal getij door een aanpassing van de roosterresolutie teniet gedaan kan worden

door een herkalibratie van het bodemruwheidsveld in het desbetreffende gebied. Dergelijke veranderingen in modelkwaliteit worden dus niet direct als onoverkomelijk gezien. Wel is een herkalibratie van het ruwheidsveld dus vereist als er met een aangepaste roosterresolutie wordt gerekend in een substantieel deel van het numerieke model.

Tot slot blijkt uit de gevoeligheidsanalyse dat het aanpassen van de turbulente viscositeit door middel van de diffusiviteit-coëfficiënt ook een grote invloed kan hebben op het waterstandsverloop. Dit geldt in het bijzonder bij een verlaging van de diffusiviteit-coëfficiënt. In de huidige schematisering van de diffusiviteit in de gebruikte Telemac-3D modellen (i.e., Scaldis en het in dit rapport gepresenteerde model) wordt echter gebruik gemaakt van het door het Smagorinsky model (horizontale viscositeit) en '*mixing length model*' (verticale viscositeit) berekende turbulente viscositeit. Met betrekking tot de parametrisatie van de viscositeit wordt nog opgemerkt dat verkennende simulaties waarin het k-ε model werd gebruikt om de horizontale en verticale turbulente viscositeit te bepalen niet tot stabiele modelresultaten hebben geleid. Deze simulaties worden niet in dit rapport opgenomen.

Stroomsnelheidsverloop

De representatie van lokale stroomsnelheden werd geanalyseerd door middel van een vergelijking met gemeten stroomsnelheden op de ondiepte tussen de Platen van Ossensisse en de Drempel van Hansweert. Hierbij springt met name de aanwezigheid van een hoge vloedspieksnelheid en een snelheidspiek tijdens hoogwater als gevolg van neervorming met bijbehorende circulaire stromingen op deze ondiepte (e.g. Decrop *et al.*, 2009). Deze vloedspiek en circulaire stroming worden het best gerepresenteerd in het door Stark *et al.* (2019) gekalibreerde Delft3D model. In dit Delft3D model is de ruwheid op de desbetreffende ondiepte ten oosten van de Platen van Ossensisse sterk verlaagd. In de verschillende Telemac-3D modellen worden deze snelheidspieken minder goed weergegeven dan in dit Delft3D model. Het aanpassen van de bodemruwheid in het studiegebied (i.e., verlagen van de ruwheid op de ondiepte en verhogen van de ruwheid in de vaargeul) leidt slechts tot een beperkte verbetering van de representatie van deze snelheidspieken. Bij een dergelijke aanpassing van de bodemruwheid leidt wel tot de simulatie van neervorming in dit gebied. Deze lijkt echter niet op exact de juiste locatie en met de juiste intensiteit gereproduceerd te worden, wat ertoe leidt dat de stroomsnelheden- en richtingen op de meetpunten afwijken van de geobserveerde waarden. Een meer uitvoerige kalibratie van het ruwheidsveld zou hier voor een verdere verbetering kunnen zorgen. Op basis van de huidige gevoeligheidsanalyse, waarin een breed spectrum aan ruwheidcoëfficiënten op deze ondiepte werd getest, wordt echter niet verwacht dat met enkel aanpassingen in het ruwheidsveld eenzelfde nauwkeurigheid als het Delft3D model verkregen kan worden met betrekking tot de representatie van de neervorming en bijbehorende stromingspatronen. In dit opzicht wordt opgemerkt dat de grote afwijking van de vloedspiek en de stroomsnelheden door neervorming in de Telemac-3D modellen slechts op één meetpunt van toepassing zijn.

4 Morfologische modelresultaten

4.1 Analyse

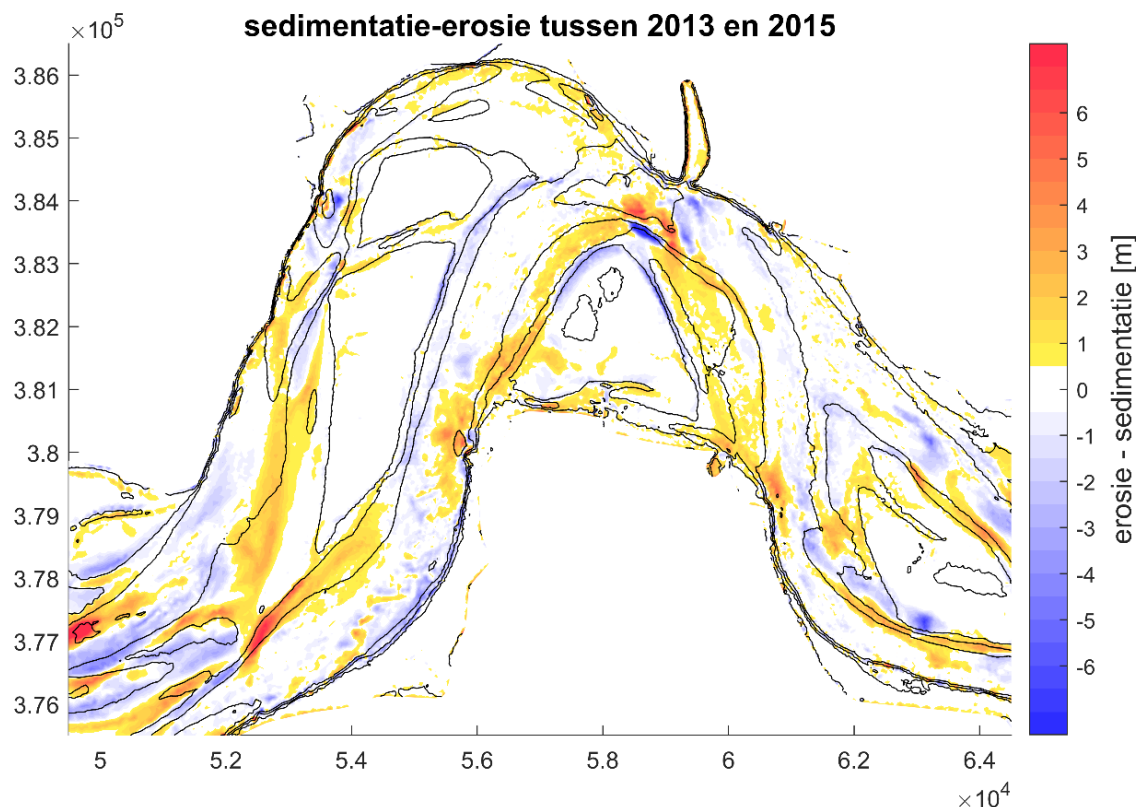
In het kader van de gevoeligheidsanalyse zijn er enkele morfologische simulaties met Sisyphe (online gekoppeld met Telemac-3D) uitgevoerd waarvan de resultaten in deze sectie worden bediscussieerd. De modelresultaten van de verschillende simulaties worden vergeleken door verschillen in de gemodelleerde morfologische ontwikkeling van het studiegebied rondom Hansweert en de Platen van Ossenis te visualiseren en te analyseren. Er wordt in het kader van de gevoeligheidsanalyse slechts een beknopte vergelijking gemaakt met geobserveerde morfologische veranderingen omdat belangrijke processen zoals de bagger- en stortactiviteiten niet worden meegenomen in de morfologische simulaties. Derhalve mag niet verwacht worden dat de geobserveerde morfologische ontwikkeling goed wordt weergegeven.

In dit hoofdstuk worden eerste geobserveerde sedimentatie- en erosiepatronen in het studiegebied toegelicht aan de hand van een verschilkaart tussen 2013 en 2015 (§4.2). Dan worden de morfologische modelresultaten van een referentiesimulatie met de generieke instellingen volgens Tabel 4 gepresenteerd (§4.3). Deze resultaten worden vergeleken met morfologische resultaten uit de Delft3D studie door Stark *et al.* (2019) en met een Telemac-3D/Sisyphe simulatie waarin de modelinstellingen uit die studie zijn overgenomen (§4.4). Vervolgens zijn er meerdere simulaties uitgevoerd in het kader van een gevoeligheidsanalyse van het morfologisch model. Hierin is het effect van de gebruikte sedimenttransportformule (i.e., Van Rijn vs. Engelund-Hansen) (§4.5), de parametrisatie van bochtstroming (§4.6), de parametrisatie van longitudinale en transversale hellingeffecten (§4.7), het corrigeren van de bodemschuifspanning voor de aanwezigheid van bodemvormen (§4.8), de korrelgrootte of sedimentdiameter (§4.9) en de roosterresolutie (§4.10) onderzocht. Ook is een simulatie uitgevoerd met een aangepast ruwheidsveld in Telemac-3D om na te gaan wat het effect is van een ander stromingspatroon in het studiegebied (i.e., met het aangepast ruwheidsveld wordt de neervorming boven de Platen van Ossenis beter weergegeven) (§4.11). Tot slot worden testsimulaties uitgevoerd waarin een storting in de diepe put van Hansweert wordt geschematiseerd (§4.12).

4.2 Geobserveerde morfologische veranderingen

Figuur 52 geeft de tussen 2013 en 2015 geobserveerde sedimentatie- en erosiegebieden in het studiegebied weer. De morfologische verandering in de geulen (i.e., Gat van Ossenis, Overloop van Hansweert en Zuidergat) is vrij beperkt, wat uiteraard verklaard kan worden door het reguliere vaargeulonderhoud waarbij de vaargeul onderhouden wordt op een vaste diepte. In de diepe put van Hansweert wordt wel een kleine sterke sedimentatiezone geobserveerd, die het gevolg lijkt te zijn van een plaatval die in 2015 is opgetreden op deze locatie (Van Dijk *et al.*, 2018). Direct opwaarts van deze diepe put is juist een erosiezone waarneembaar. Ter hoogte van de Nol van Ossenis (i.e., gebied ten zuidwesten van de Schaar van Ossenis) was ook een sterke sedimentatiezone aanwezig tussen 2013 en 2015. Langs de randen van de Platen van Ossenis is in het algemeen sprake van sedimentatie, met name aan de westrand en op de ondiepte langs de oostkant van deze plaat. De sedimentatie aan de westkant van de Platen van Ossenis kan deels toegeschreven worden aan de grote storthoeveelheden in stortvak SH41 in deze omgeving (i.e., IMDC, 2015). Tot slot lijkt de ondiepe kortsluitgeul tussen de Platen van Ossenis en de ondiepte zich verder uit te diepen.

Figuur 52 – Geobserveerde morfologische ontwikkeling tussen 2013 en 2015.



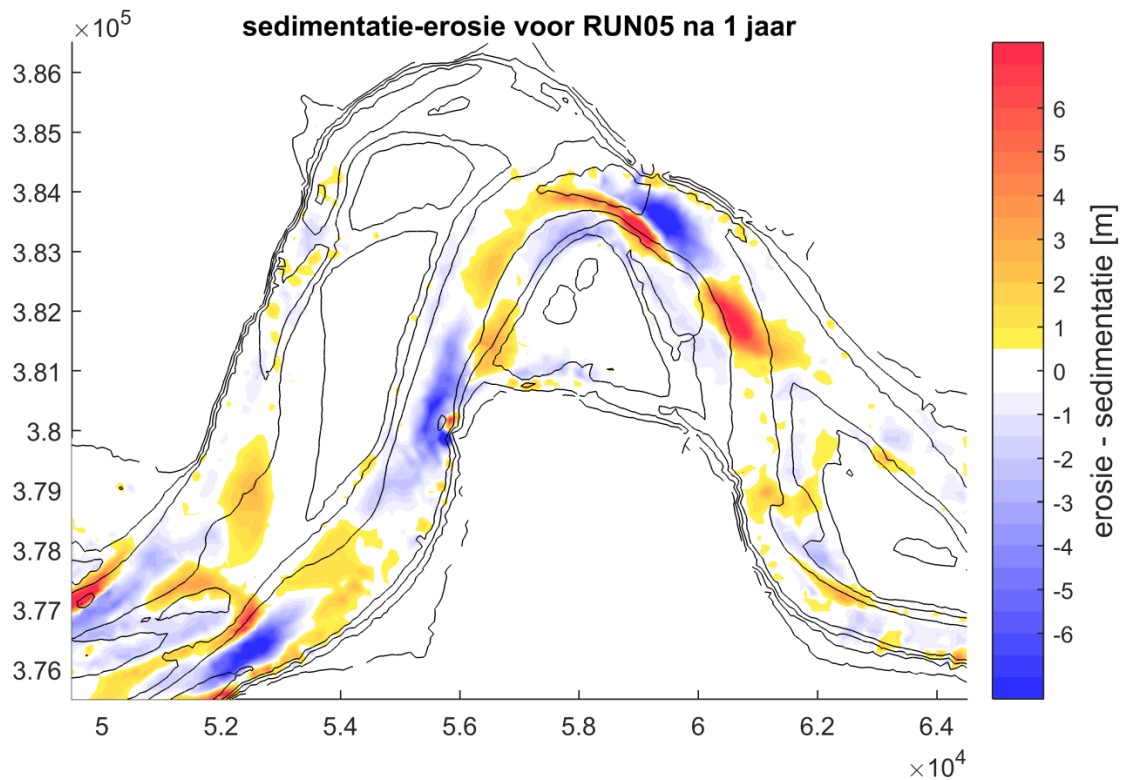
4.3 Basissimulatie

De resultaten van een éénjarige morfologische simulatie in de basisconfiguratie (i.e., RUN05 met sediment transport instellingen volgens Tabel 4) zijn weergegeven in Figuur 53. De gemodelleerde morfologische ontwikkeling in het interessegebied rondom de Platen van Ossensisse wordt gekenmerkt door enkele duidelijke erosie- of sedimentatiegebieden. Zo is er sprake van een sterke erosiepiek van meer dan 7.5 m aan de opwaartse rand van de diepe put van Hansweert en een duidelijk sedimentatiegebied met sedimentatiehoogtes van meer dan 7.5 m verder opwaarts op de Drempel van Hansweert. Op de ondiepte tussen de Platen van Ossensisse en de Drempel van Hansweert wordt een lichte erosie van maximaal 2 m gesimuleerd. Er wordt ook een sedimentatieband gemodelleerd aan de noordrand van de ondiepte langs de Platen van Ossensisse (i.e., ten zuiden van de diepe put van Hansweert), mogelijk duidend op een noordwaartse migratie van deze ondiepte en plaat tussen de Platen van Ossensisse en de vaargeul. Aan de westkant van de Platen van Ossensisse is er in de Overloop van Hansweert sprake van een sedimentatiezone die gelinkt lijkt een erosiezone op de rand van de Platen van Ossensisse zelf. Daarnaast wordt een duidelijke erosiekuil gemodelleerd ter plaatse van de Nol van Ossensisse (i.e., ten westen van de Schaar van Ossensisse). Hierbij wordt opgemerkt dat de kribben ter hoogte van Ossensisse niet als harde constructie in het Telemac model zijn opgenomen en dus kunnen eroderen. In het Gat van Ossensisse is er afwisselend sprake van sedimentatie- en erosiezones, waarbij de erosiezone in de Put van Terneuzen het sterkst is.

In vergelijking met de geobserveerde veranderingen (Figuur 52) valt vooral op dat de gemodelleerde sedimentatie- en erosiepatronen sterker zijn. De sedimentatieband aan de west- en noordzijde van de Platen van Ossensisse wordt in de juiste zones gerepresenteerd door het model. De gemodelleerde uitdieping van de diepe put van Hansweert en de aanzanding op de Drempel van Hansweert worden daarentegen niet waargenomen in de verschilplot van de observaties, al kan dit deels liggen aan het vaargeulonderhoud dat

niet door het model wordt gesimuleerd. Hetzelfde geldt voor de gemodelleerde erosie bij de Put van Ossenis, waar lichte sedimentatie werd geobserveerd (mogelijks door stortingen in dit gebied). Ook de gemodelleerde erosie op de ondiepe aan de oostzijde van de Platen van Ossenis komt niet overeen met de geobserveerde sedimentatie in dit gebied. Wellicht kan dit verklaard worden door de matige representatie van de neervorming in dit gebied in Telemac-3D.

Figuur 53 – Gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met basissimulatie RUN05.



4.4 Morfologische resultaten met instellingen uit AvdT-studie: “Hydro- en sedimentdynamische en morfologische processen op mesoschaal”

Morfologische modelinstellingen uit eerdere Delft3D-NeVla studie

In RUN08 zijn de modelinstellingen in Sisyphé aangepast naar de optimale instellingen die volgden uit de sedimenttransportmodellering door Stark *et al.* (2019) in het AvdT-project “Hydro- en sedimentdynamische en morfologische processen op mesoschaal”. Concreet houdt dit in dat de ruwheidshoogte k_s in de Van Rijn (1984) formule constant is gesteld op 0.01 m (i.e., door manuele aanpassing van de Sisyphé subroutine *tob_sisyphé.f*). Ook is de sedimentdiameter aangepast naar $d_{50} = 170 \mu\text{m}$, conform de bevindingen in de voorgaande Delft3D studie.

Toch zijn er enkele verschillen tussen de instellingen in Telemac/Sisyphé en Delft3D (i.e., 2D-h model). Een eerste verschil is de aanwezigheid van een niet-erodeerbare laag of harde laag in het Delft3D model, terwijl de beschikbare laag van sediment in het Telemac model voor de Westerschelde uniform op 100 m is gesteld. Daarnaast is er in vergelijking met het originele Delft3D model ook sprake van een ander stromingspatroon in het studiegebied als het Telemac model gebruikt wordt (zie Sectie 3). De weergave van de neervorming en

dwarsstroming ter hoogte van de Platen van Ossensisse is bijvoorbeeld minder goed in Telemac dan in Delft3D. Tot slot is het transversale hellingeffect voor sedimenttransport in Telemac (i.e., formulering van Koch & Flokstra, 1981) anders geparametriseerd dan in Delft3D (formulering van Ikeda, 1984).

Vergelijking morfologische runs in Telemac/Sisyphé en Delft3D

Figuur 54 geeft de modelresultaten met van één jaar morfologische verandering weer gesimuleerd met Delft3D. Figuur 55 geeft de morfologische verandering weer zoals gesimuleerd met het Telemac/Sisyphé model waarin de instellingen voor zover mogelijk zijn overgenomen uit de voorgaande Delft3D studie (i.e., RUN08). Figuur 56 toont de verschillen tussen de morfologische resultaten na één jaar met Telemac-3D/Sisyphé en met het Delft3D model zelf.

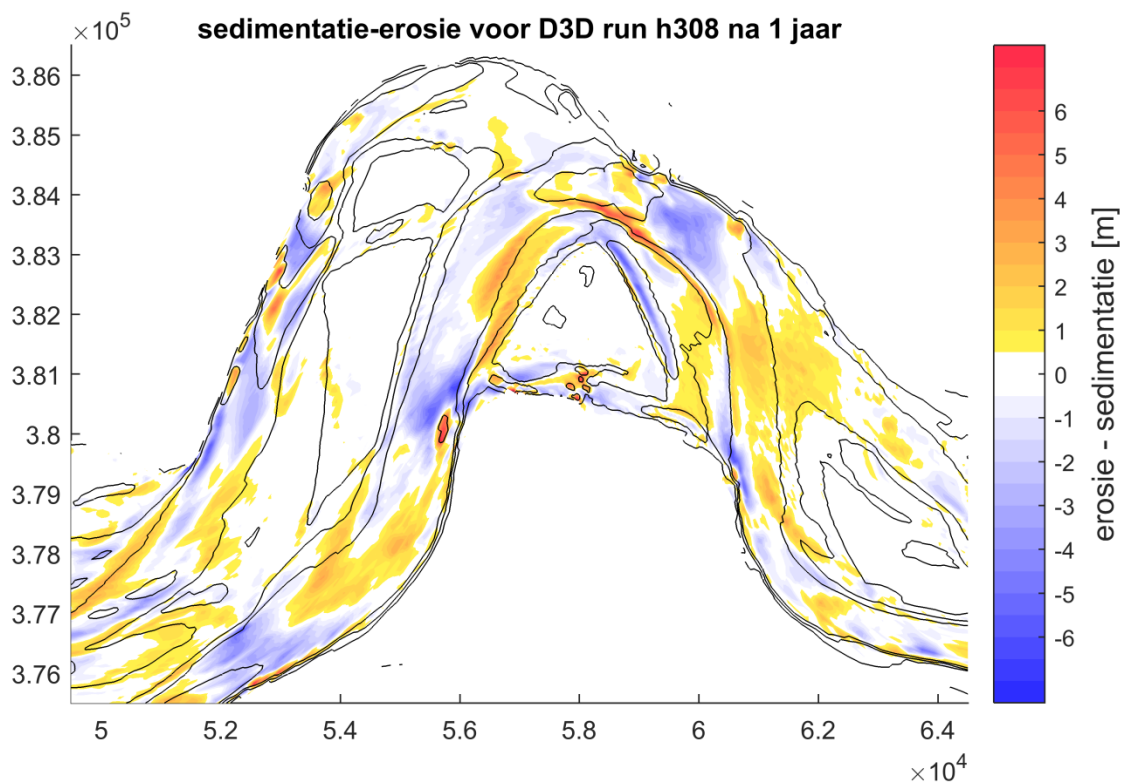
Er zijn enkele duidelijke overeenkomsten in het sedimentatie-erosie patroon van beide simulaties. Zo is er in beide simulaties sprake van een erosiezone aan de opwaartse rand van de Put van Hansweert en een sedimentatiezone op de Drempel van Hansweert. Ook is in beide simulaties een sedimentatieband aanwezig langs de noordrand van de Platen van Ossensisse en een duidelijke erosiezone in de diepe put ten zuidwesten van de Platen van Ossensisse.

Er zijn ook duidelijke verschillen tussen beide simulaties. Op de ondiepte ten oosten van de Platen van Ossensisse wordt door het Delft3D model lichte sedimentatie voorspeld, terwijl in het Telemac-3D/Sisyphé model sprake is van erosie. Dit kan mogelijk verklaard worden door het ontbreken van neervorming boven deze zone in het Telemac-3D model. Hetzelfde geldt voor de westkant van de Platen van Ossensisse, waar in Delft3D een duidelijke sedimentatiezone wordt gemodelleerd, geflankeerd door een erosiezone in het noordelijk deel van de Overloop van Hansweert. Voor de morfologische ontwikkeling zoals gemodelleerd in Sisyphé is er juist sprake van sedimentatie in de vaargeul (opwaarts deel Overloop van Hansweert). In en direct opwaarts van de diepe put van Hansweert wordt in het Telemac model sterke erosie gesimuleerd (i.e., ~1-5 m), terwijl de erosie op deze locatie in Delft3D tot ~1-2 m beperkt blijft. Dit laatste kan het gevolg zijn van de implementatie van de niet-erodeerbare laag in het delft3D-NeVla model. Nabij de Nol van Ossensisse (stortzone SH41) geeft het TELEMAC-model erosie aan, terwijl het Delft3D model hier sedimentatie aangeeft. Voor beide modellen geldt echter dat de kribben ter hoogte van de Nol van Ossensisse niet als harde constructies in het model zijn geïmplementeerd. Tot slot kan in het algemeen gesteld worden dat de Telemac-3D/Sisyphé simulatie na één jaar in een sterkere morfologische verandering resulteert dan de Delft3D-simulatie. Tevens lijken de sedimentatiezones en erosiezones in de Telemac-Sisyphé simulatie meer geconcentreerd te zijn ten opzichte van de Delft3D simulatie, waarin de sedimentatie- en erosiezones ruimtelijk meer uitgesmeerd zijn.

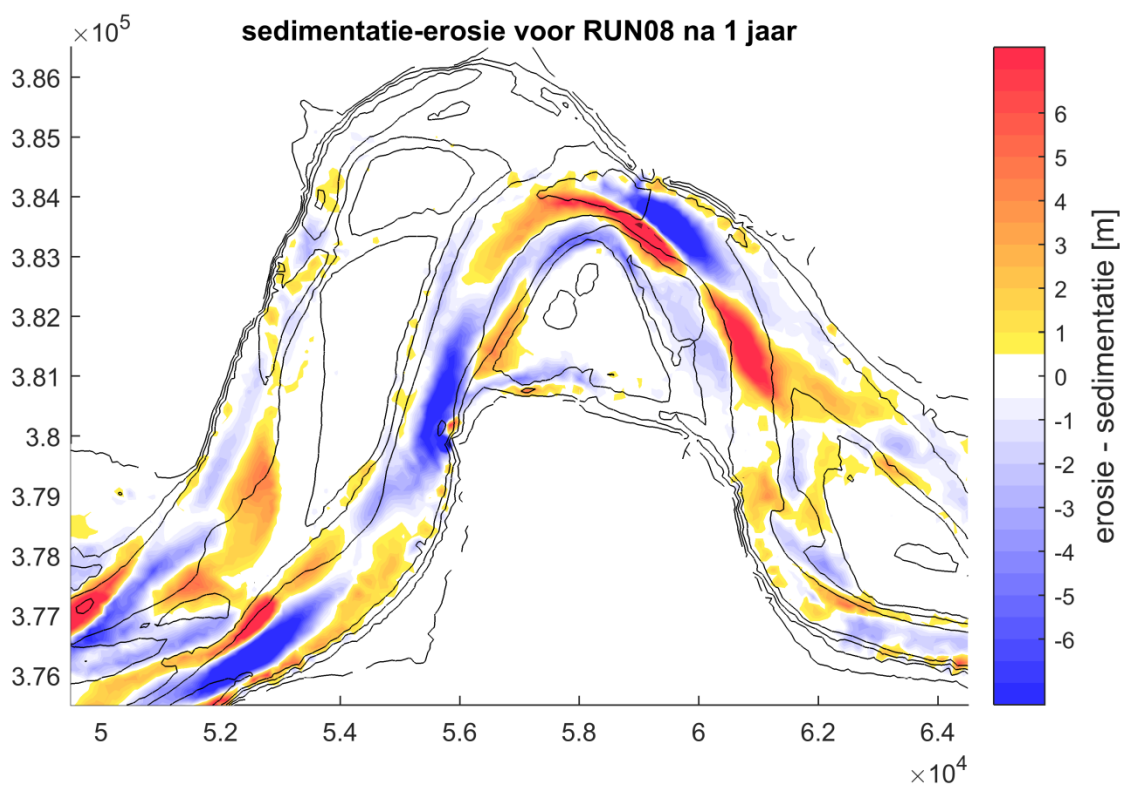
Vergelijking met geobserveerde morfologische veranderingen

In vergelijking met de geobserveerde morfologische veranderingen in het studiegebied (Figuur 52) tussen 2013 en 2015 lijkt het sedimentatie-erosiepatroon dat met Delft3D-NeVla werd gemodelleerd (Figuur 54) beter overeen te komen dan het patroon dat met Sisyphé wordt gemodelleerd (Figuur 55). Zo wordt de sedimentatiezone op de ondiepte ten oosten van de Platen van Ossensisse door het Delft3D model beter gerepresenteerd, waarschijnlijk als gevolg van een betere representatie van de neervorming in dit gebied. Daarnaast worden de geobserveerde lokale sedimentatiezone in de diepe put van Hansweert en de lokale erosiezone direct opwaarts van deze diepe put ook beter weergegeven in het Delft3D model. Hierbij wordt wel opgemerkt dat de modelinstellingen van deze Delft3D-simulatie een resultaat zijn van uitgebreide modelkalibratie op hydrodynamica en sedimenttransport, terwijl dergelijke inspanningen nog niet specifiek voor de modelinstellingen van de morfologische Telemac-3D/Sisyphé simulatie zijn verricht. Tot slot worden de sedimentatiezones langs de randen van de Platen van Ossensisse en de sedimentatie op de Drempel van Hansweert (i.e., niet goed waarneembaar in de geobserveerde verschilkaart omdat de vaargeuldiepte hier onderhouden wordt) door beide modellen gereproduceerd.

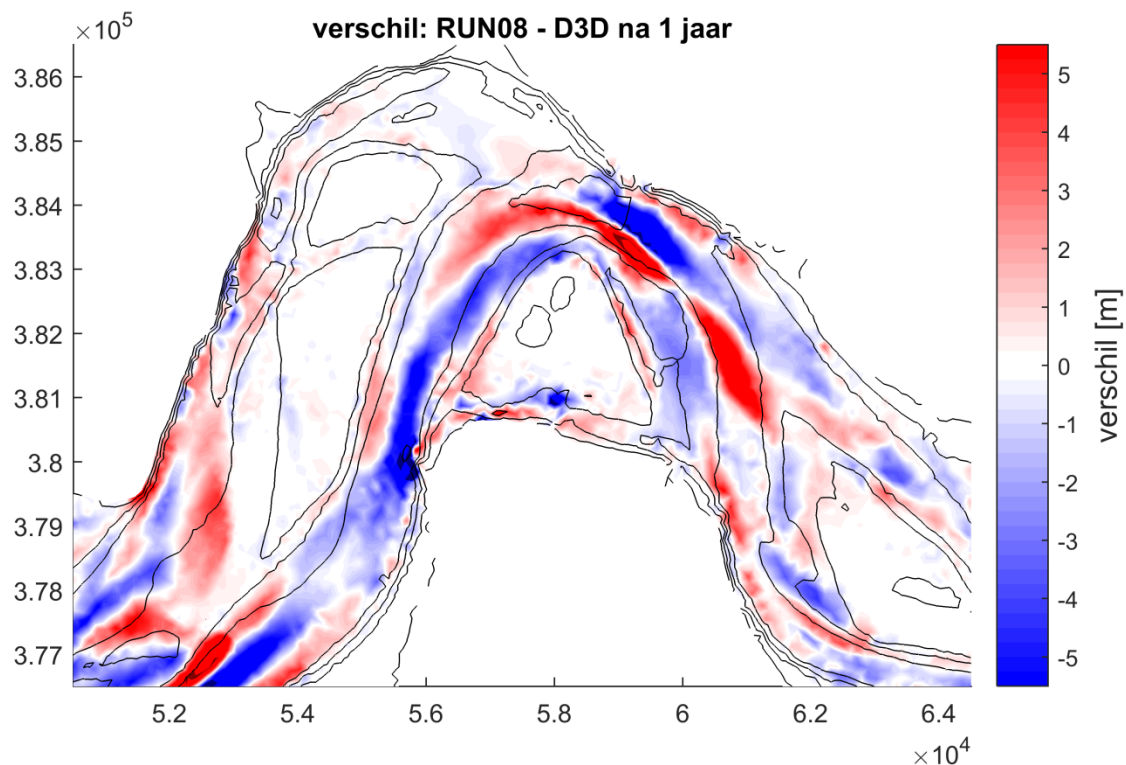
Figuur 54 – Gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met het eerder gekalibreerde Delft3D model (Stark et al., 2019) zijn gebruikt ($d_{50} = 170 \mu\text{m}$).



Figuur 55 – Gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulatie RUN08 waarin de sedimenttransport instellingen van het eerder gekalibreerde Delft3D model (Stark et al., 2019) zijn gebruikt (i.e., ruwheidshoogte $k_s = 0.01 \text{ m}$ en $d_{50} = 170 \mu\text{m}$).



Figuur 56 – Verschil tussen gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulatie RUN08 waarin de instellingen van het eerder gekalibreerde Delft3D model (Stark et al., 2019) zijn gebruikt en met het Delft3D model zelf.



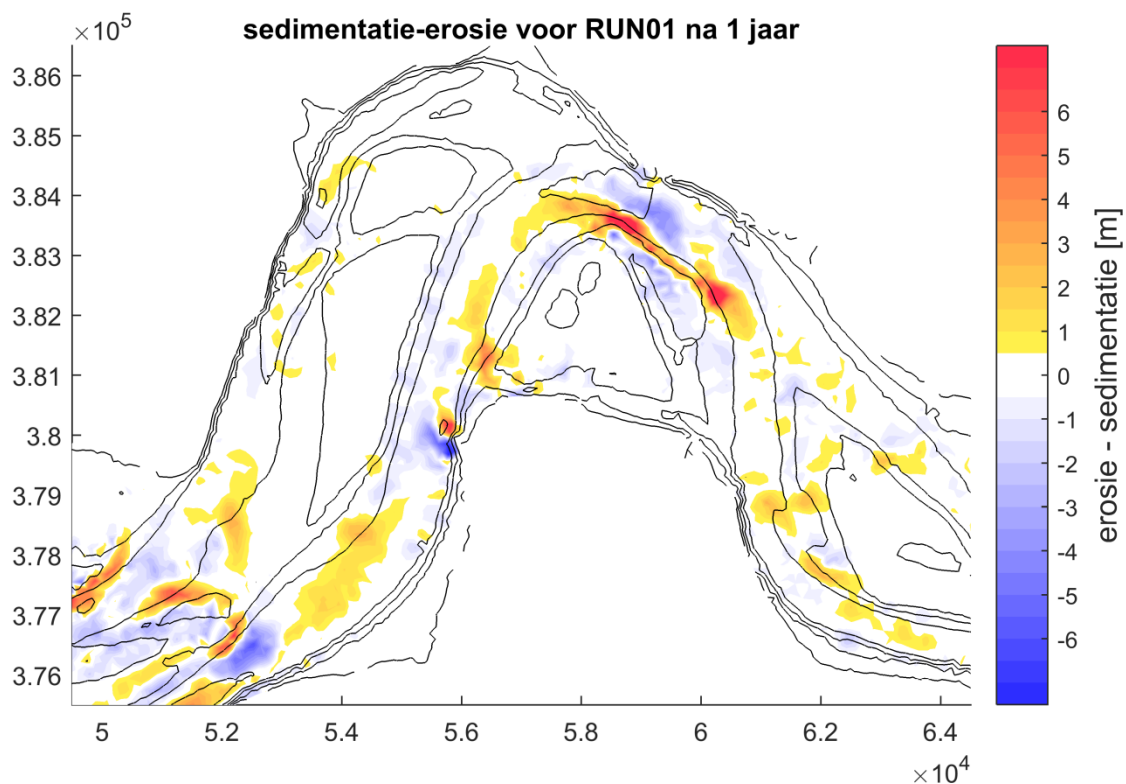
4.5 Invloed transportformule

Figuur 57 toont het resulterende sedimentatie-erosiepatroon na één jaar voor een Telemac-3D-Sisyphé simulatie waarin de Engelund-Hansen formule voor sedimenttransport werd gebruikt (RUN01) in plaats van de formuleringen van Van Rijn (1984) die in de basisconfiguratie is gebruikt (RUN05). Hiervoor werden de volgende instellingen aangepast:

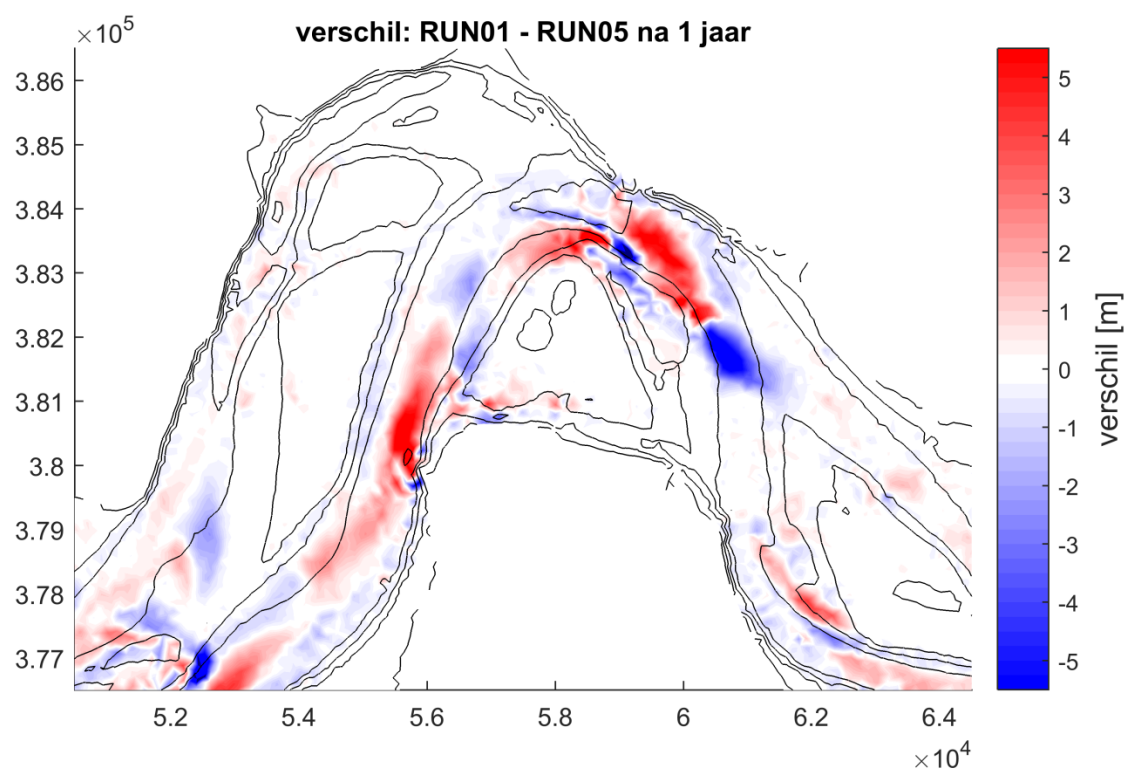
- BED-LOAD TRANSPORT FORMULA = 30
- SUSPENSION = NO

De laatste wijziging is van toepassing omdat de Engelund-Hansen formule een 'total-load' formule is. Ter aanvulling geeft Figuur 58 het verschil tussen de sedimentatie-erosie patronen zoals gemodelleerd met Engelund-Hansen of Van Rijn (1984). Uit deze vergelijking volgt duidelijk dat de resultaten van het morfologisch model met Engelund-Hansen leiden tot een minder sterke verandering dan de resultaten met Van Rijn (1984). De verschillen in sedimentatiehoogte en erosiediepte lopen op tot meer dan 5 m ter hoogte van de diepe put van Hansweert en de Drempeel van Hansweert. Vooral in de diepe delen van vaargeul nabij de Nol van Ossenis is lokaal een groot verschil in het sedimentatie- en erosiesterkte zichtbaar. Het ruimtelijk patroon van sedimentatiezones en erosiezones is wel gelijkaardig tussen beide simulaties.

Figuur 57 – Gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulatie RUN01 (i.e., sedimenttransport berekend met Engelund-Hansen in plaats van met Van Rijn, 1984).



Figuur 58 – Verschil tussen gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulatie RUN01 (Engelund-Hansen) en RUN05 (basissimulatie met Van Rijn, 1984).



4.6 Invloed parametrisatie bochtstroming

Invloed bochtstroming in Sisyphe

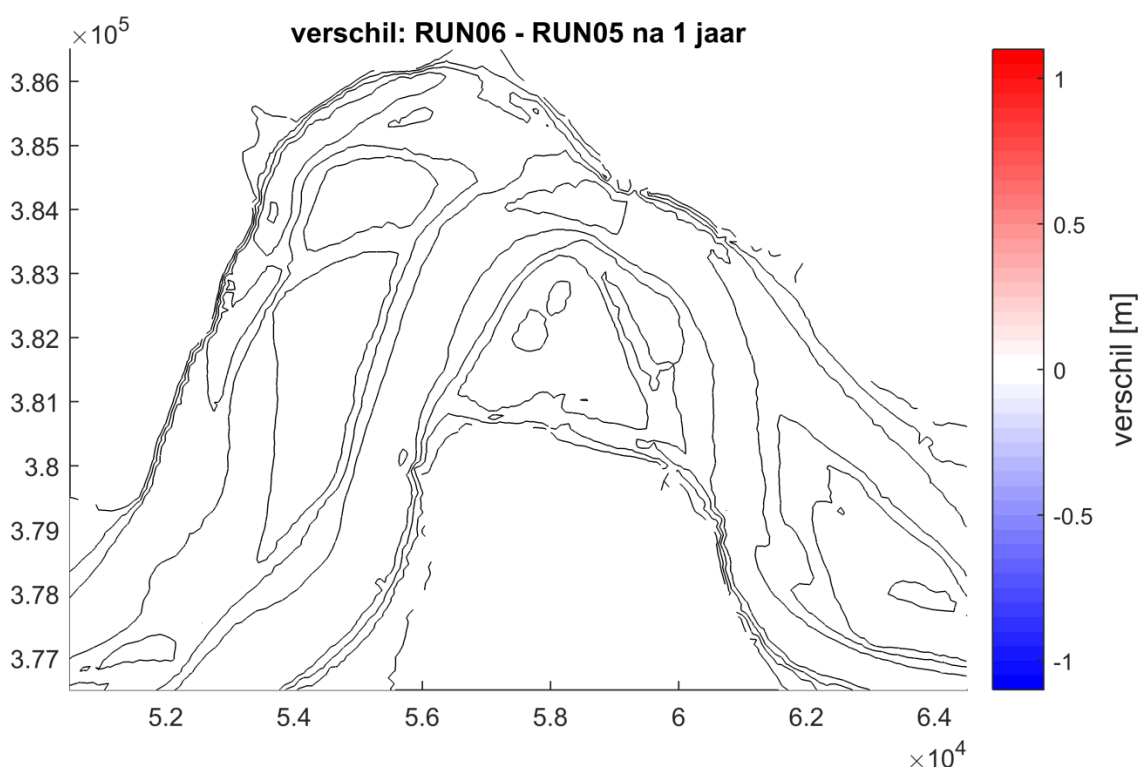
Het toevoegen van de module voor bochtstroming (i.e., *secondary flow*) in Sisyphe gekoppeld aan Telemac-3D heeft geen invloed aangezien bochtstromingseffecten in een driedimensionaal model al expliciet worden berekend. De resultaten van RUN06 waarin de invloed van bochtstroming op sedimenttransport werd meegenomen (Figuur 59) en basissimulatie RUN05 zonder de module voor bochtstroming (Figuur 53) zijn daarom nagenoeg identiek. De volgende parameters werden aangepast in RUN06:

- SECONDARY CURRENTS = YES
- SECONDARY CURRENTS ALPHA COEFFICIENT = 1.0

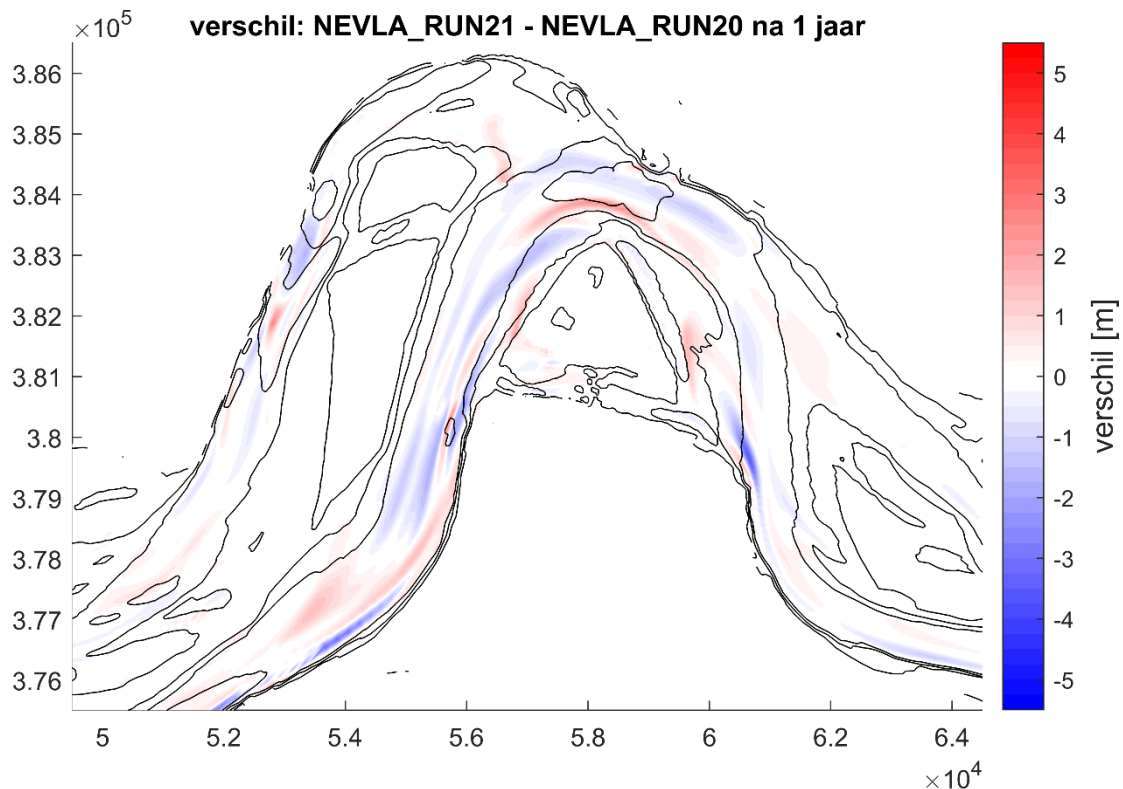
Invloed bochtstroming in Delft3D-NeVla

Ook in Delft3D is gekeken naar de invloed van de bochtstroming of '*secondary flow*'. Hierbij dient opgemerkt te worden dat het hier om een 2Dh-model gaat, in tegenstelling tot het TELEMAC-model dat 3D is. De resultaten van een Delft3D-NeVla run waarin deze effecten zijn meegenomen wordt vergeleken met een verder identieke simulatie waarin bochtstromingseffecten niet zijn meegerekend (Figuur 60). Hieruit blijkt dat het meerekenen van secundaire stromingseffecten in een tweedimensionale Delft3D run wel een grote invloed heeft op het gesimuleerde sedimentatie- en erosiepatroon. Rondom de Platen van Ossenis is er door de bochtstromingseffecten sprake van meer aanzanding in de binnenbochten en uitdieping in de buitenbochten. Het effect varieert hier van ongeveer -1 m in de buitenbocht in de diepe put van Hansweert tot +2 m aan de noordelijke punt van de plaat. Ook elders in het geulensysteem zijn dergelijke hoogteverschillen waarneembaar (e.g. Gat van Ossenis, Overloop van Hansweert en Zuidergat).

Figuur 59 – Verschil tussen gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulatie RUN06 (secondary currents = YES) en RUN05 (basissimulatie).



Figuur 60 – Verschil tussen gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met Delft3D-NeVla simulatie RUN21 (met secundaire stromingseffecten) en NEVLA_RUN20 (zonder secundaire stromingseffecten).



4.7 Invloed parametrisatie hellingeffecten

De parametrisatie van bodemhellingeffecten voor sedimenttransport bestaat uit twee componenten: (1) het effect van bodemhelling in de stroomrichting en (2) het effect van de bodemhelling loodrecht op de stroomrichting.

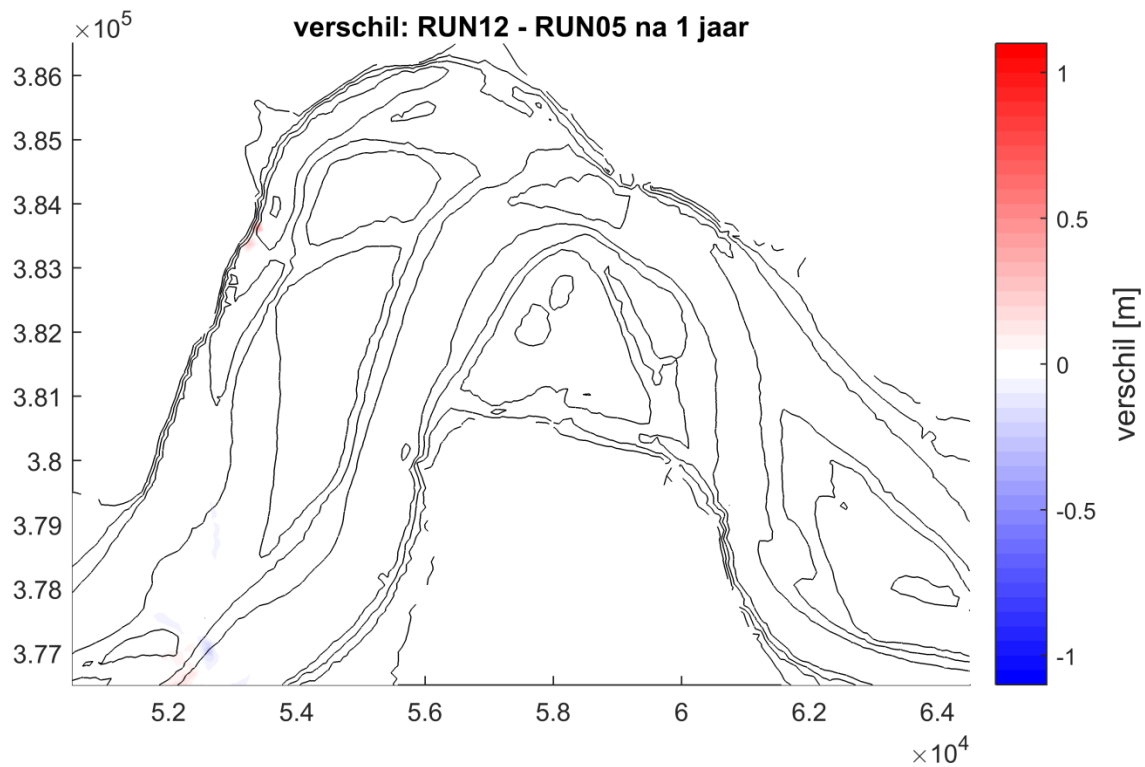
4.7.1 Longitudinaal hellingeffect

Het effect van de longitudinale (i.e., in de stroomrichting) helling op het sedimenttransport bestaat uit een correctiefactor van het transport parallel met de stroomrichting en wordt in Sisyphe standaard berekend met de formulering van Koch & Flokstra, 1981:

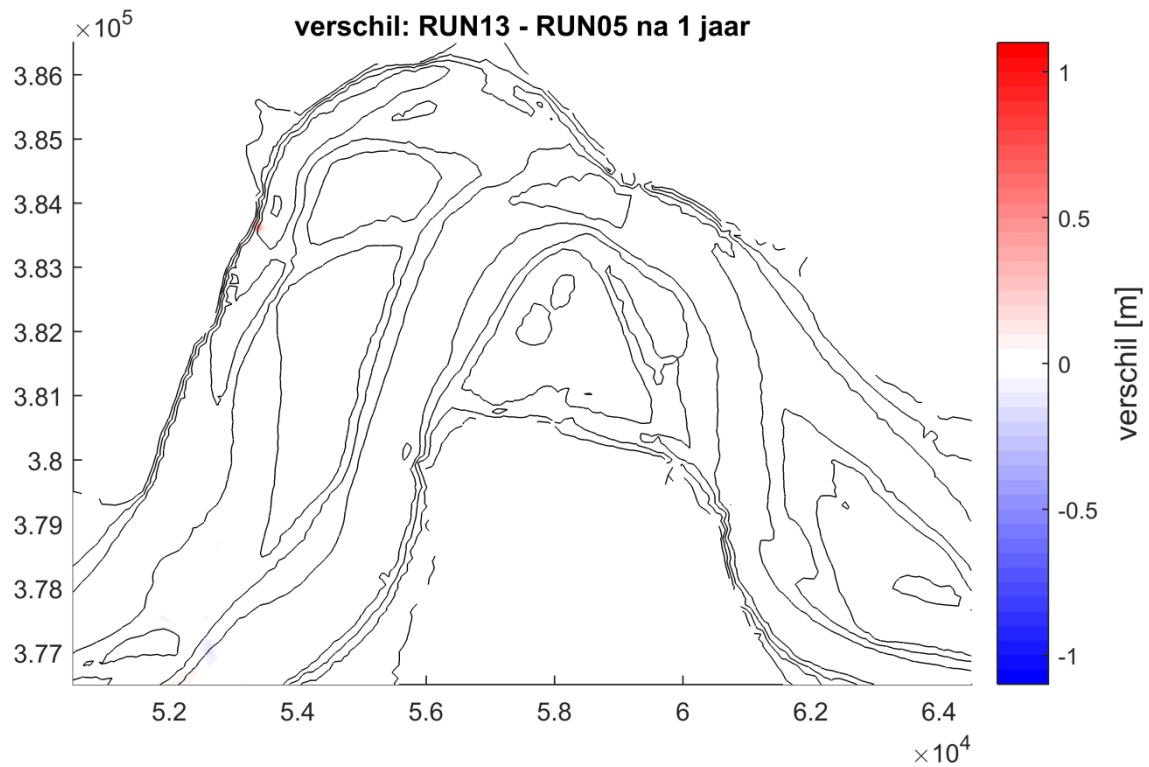
$$Q_{B^*} = Q_B \cdot \left(1 - \beta \cdot \frac{\partial z_s}{\partial x} \right)$$

Waarin Q_{B^*} het totale sediment transport in de stroomrichting inclusief longitudinaal hellingeffect voorstelt, Q_B het sediment transport zonder hellingeffecten, β is een empirische kalibratiefactor $1.0 < \beta < 1.6$ en $\partial z_s / \partial x$ is de helling in de stroomrichting. Uit simulaties waarin β werd gevarieerd tussen $\beta = 1.0$ en $\beta = 1.6$ blijkt dat deze variaties geen waarneembare invloed hebben (i.e., verschil van minder dan 0.05 m in het hele studiegebied) op het berekende morfologische ontwikkeling in Sisyphe (Figuur 61 en Figuur 62).

Figuur 61 – Verschil tussen gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulatie RUN12 (i.e., $\beta=1.0$ voor longitudinaal hellingeffect) en RUN05 (basissimulatie met $\beta=1.3$).



Figuur 62 – Verschil tussen gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulatie RUN13 (i.e., $\beta=1.6$ voor longitudinaal hellingeffect) en RUN05 (basissimulatie met $\beta=1.3$).



4.7.2 Transversale hellingeffecten

Het effect van de transversale (i.e., loodrecht op de stroomrichting) helling op het sedimenttransport bestaat uit een component loodrecht op de stroomrichting en wordt in Sisyphe standaard berekend met de formulering van Koch & Flokstra, 1981. Hierin wordt de richting van het sedimenttransport ten opzichte van de stroomrichting aangepast volgens (Van Bendegom, 1947):

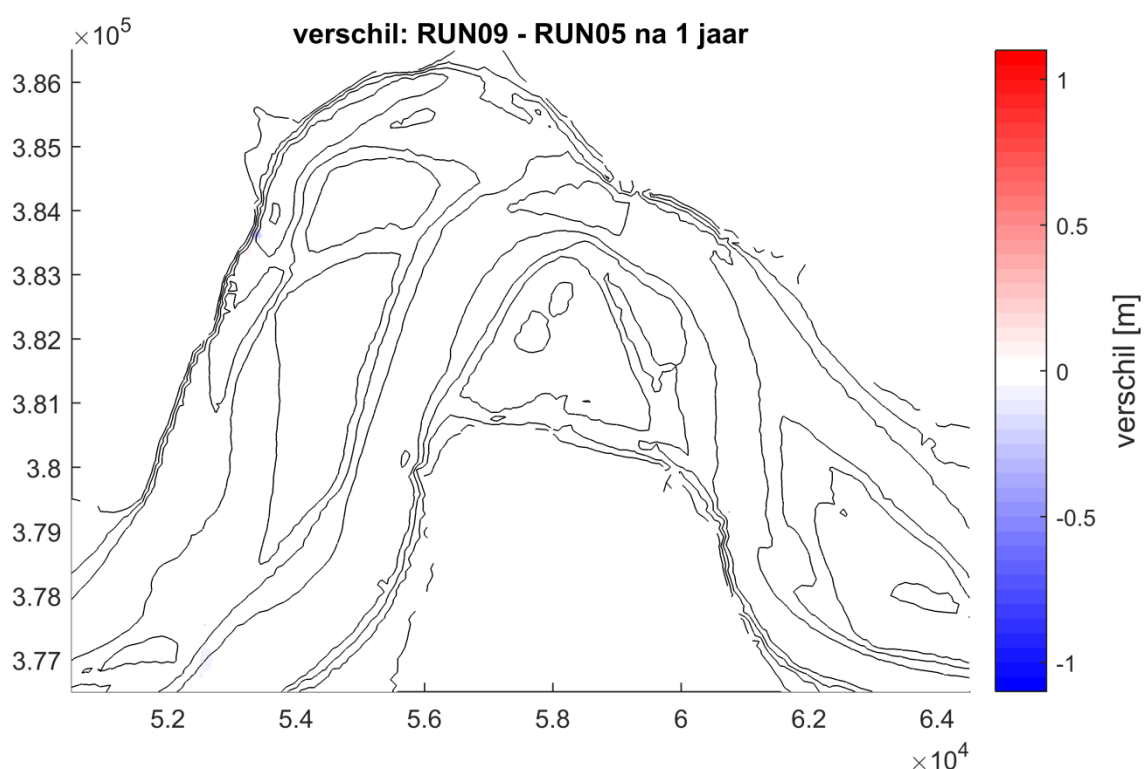
$$\tan(\Psi) = \tan(\delta) \cdot B^{-1} \cdot \left(\frac{\partial z_s}{\partial y} \right)$$

Hierin is ψ de richting van het sedimenttransport, δ de stroomrichting, B de hellingfactor (i.e., *slope factor* in Baar *et al.*, 2018) en $\partial z_s / \partial y$ de transversale helling. Volgens de formulering van Koch & Flokstra (1981) geldt dat $B = 1.5\theta$ en θ is de mobiliteitsparameter (i.e., Shields parameter). Het transversale sedimenttransport wordt in Sisyphe toegevoegd door het aanpassen van de hoek tussen de stroomrichting en de richting van het sedimenttransport. Hierdoor neemt het totale sedimenttransport niet toe als hellingeffecten worden meegenomen.

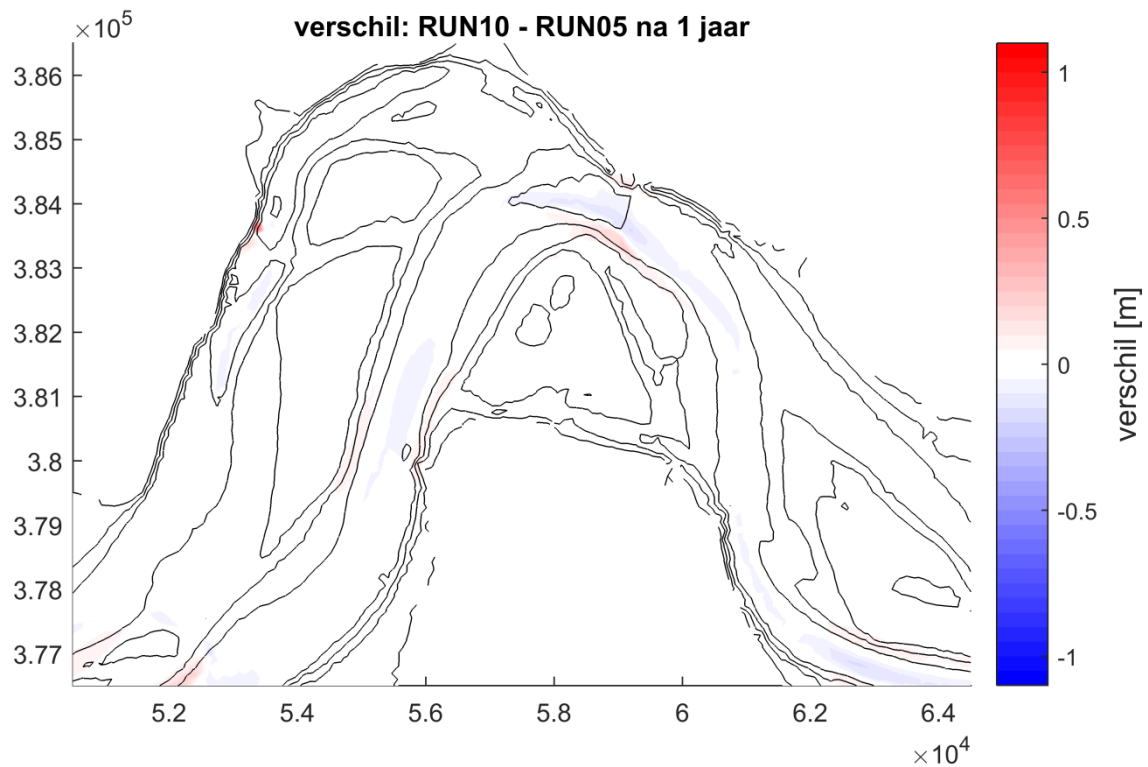
Om het effect van transversale helling op sedimenttransport aan te passen kan in Sisyphe de formulering van Talmon *et al.* (1995) worden gebruikt waarin $B = \beta_2 \cdot \theta^{0.5}$. Hierin kan de parameter β_2 gevarieerd worden. Er zijn simulaties uitgevoerd met $\beta_2 = 0.1$, $\beta_2 = 1.0$ en $\beta_2 = 10$. De modelresultaten zijn vervolgens vergeleken met de referentiesimulatie waarin de formulering van Koch & Flokstra (1981) is gebruikt (Figuur 63, Figuur 64 en Figuur 65).

Uit de modelresultaten blijkt dat het gebruiken van een relatief hoge β_2 niet leidt tot substantiële veranderingen in de morfologische ontwikkeling ten opzichte van de standaardsimulatie met Koch & Flokstra (1981). Andersom zorgt een lage β_2 voor een toename van de transversale sedimenttransportcomponent en voor een verandering van de gemodelleerde bodemligging. De geulen verondiepen dan en de hellingen tussen geulen en ondieptes verflauwen.

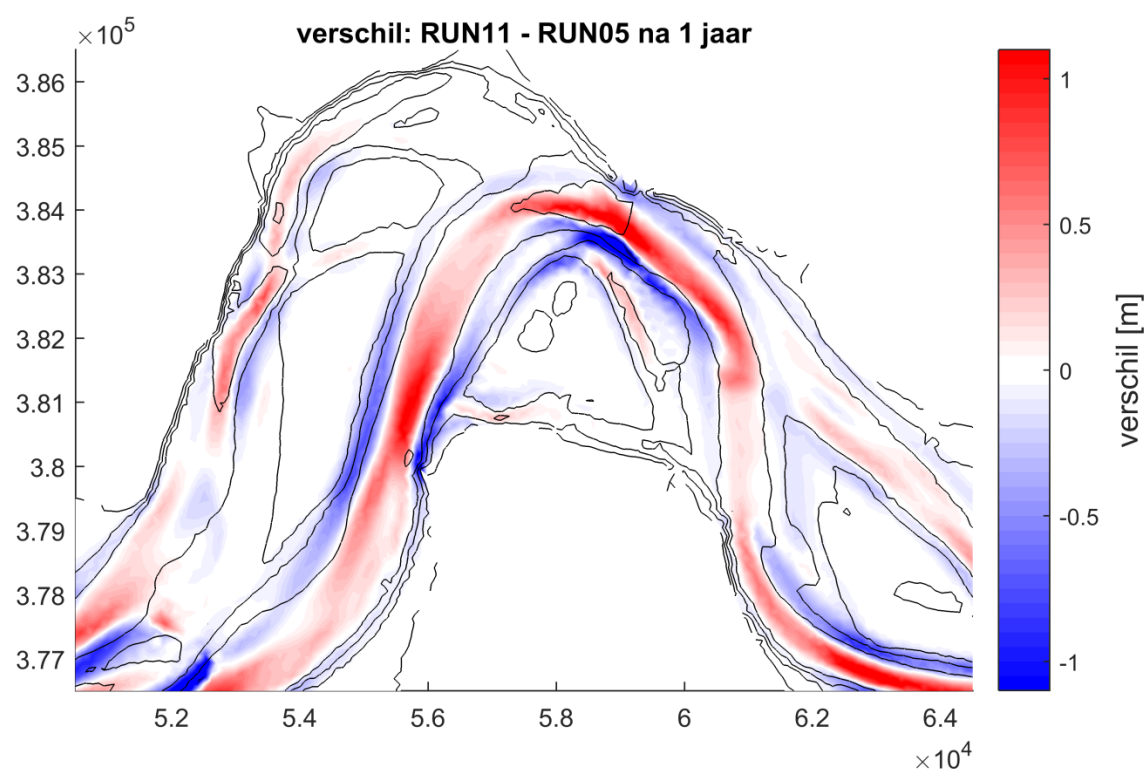
Figuur 63 – Verschil tussen gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulatie RUN09 (i.e., transversaal hellings-effect berekend met formulering Talmon et al. (1995) en $\beta_2=1.0$) en RUN05 (basissimulatie met Koch & Flokstra (1981) formule voor transversaal hellingeffect).



Figuur 64 – Verschil tussen gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulatie RUN10 (i.e., transversaal hellings-effect berekend met formulering Talmon et al. (1995) en $\beta_2=10$) en RUN05 (basissimulatie met Koch & Flokstra (1981) formule voor transversaal hellingeffect).



Figuur 65 – Verschil tussen gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulatie RUN11 (i.e., transversaal hellings-effect berekend met formulering Talmon et al. (1995) en $\beta_2=0.1$) en RUN05 (basissimulatie met Koch & Flokstra (1981) formule voor transversaal hellingeffect).



4.8 Invloed 'skin friction correction'

In Sisyphe worden sedimenttransporten berekend als functie van de lokale bodemwrijving die wordt berekend aan de hand van de hydrodynamische wrijving waarop een correctie wordt uitgevoerd middels de 'skin friction correction' ($\mu < 1$). Deze correctiefactor is de ratio van de lokale bodemwrijving (C_f') en de totale hydrodynamische bodemwrijving (C_f) waarin ook de effecten van bodemvormen zijn meegenomen:

$$\mu = \frac{C_f'}{C_f}$$

waarin:

$$C_f = 2 \cdot g \cdot n^2 \cdot h^{-1/3}$$
$$C_f' = 2 \cdot \left(\frac{\kappa}{\log(12 \cdot h/k_s)} \right)^2$$

met:

$$k_s = \alpha_{k_s} \cdot d_{50} = 3 \cdot d_{50}$$

Hierin is h de waterdiepte, κ de von Karman constante, g de gravitatie versnelling, n de hydrodynamische bodemwrijvingscoëfficiënt (i.e., Manning's coëfficiënt), k_s de lokale ruwheidshoogte, α_{k_s} de verhouding tussen de korrelgrootte en de ruwheidshoogte. Deze parameter is in deze modeloefening zo ingesteld dat $k_s \approx 3 \cdot d_{50}$ (i.e., default instelling). Standaard wordt er in Sisyphe altijd gerekend met 'skin friction correction'. In Figuur 66 is echter het morfologische resultaat na één jaar weergegeven voor RUN14 waarin deze correctie wordt uitgezet (i.e., $\mu=1$). Figuur 67 toont het verschil met de referentiesimulatie RUN05.

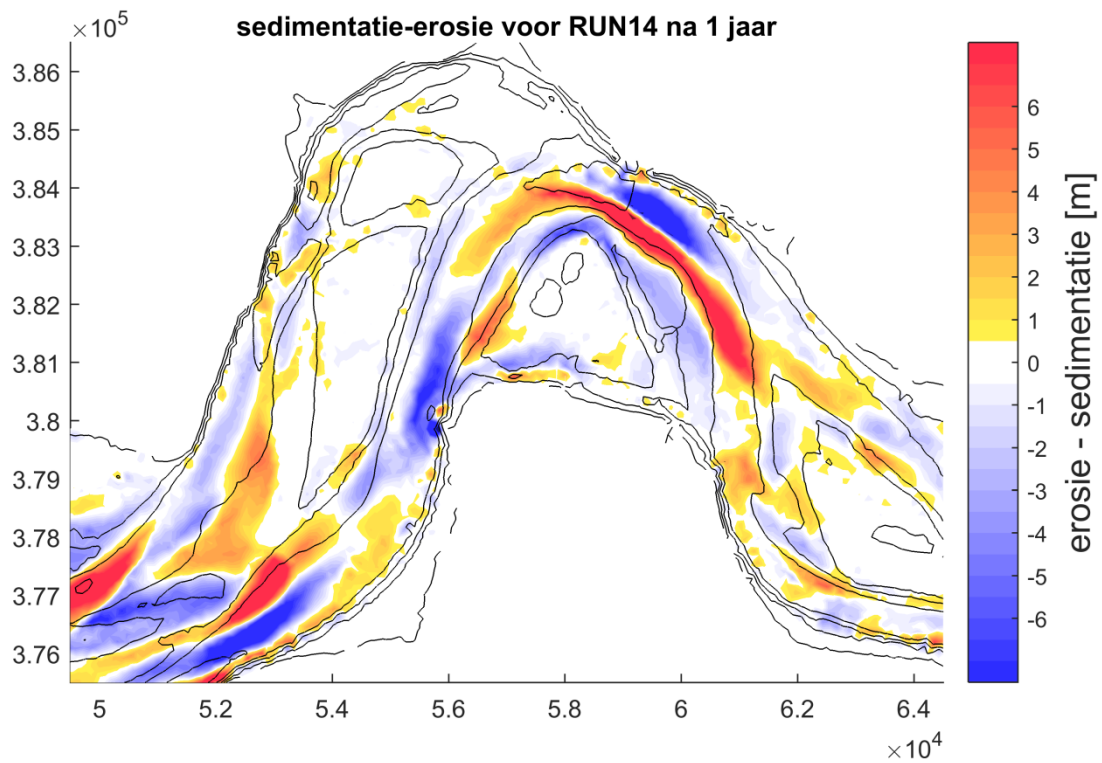
Het uitschakelen van de 'skin friction correction' leidt logischerwijs tot een veel grotere morfologische verandering in het modelresultaat. In het studiegebied komt dit enerzijds neer op een sterkere sedimentatieband tussen de Drempel van Hansweert en de Platen van Ossensisse en anderzijds een hogere erosiesnelheid aan de opwaartse rand van de diepe put van Hansweert. Ook aan de afwaartse kant van het studiegebied, nabij het gat van Ossensisse is de morfologische ontwikkeling meer uitgesproken. In beide gevallen zijn de verschillen in morfologische verandering lokaal groter dan 5 m. Concluderend kan gesteld worden dat de bodemwrijvingscorrectie een grote invloed heeft op de modelresultaten en met name op de intensiteit en snelheid van de morfologische ontwikkelingen.

4.9 Invloed sedimentdiameter (d_{50})

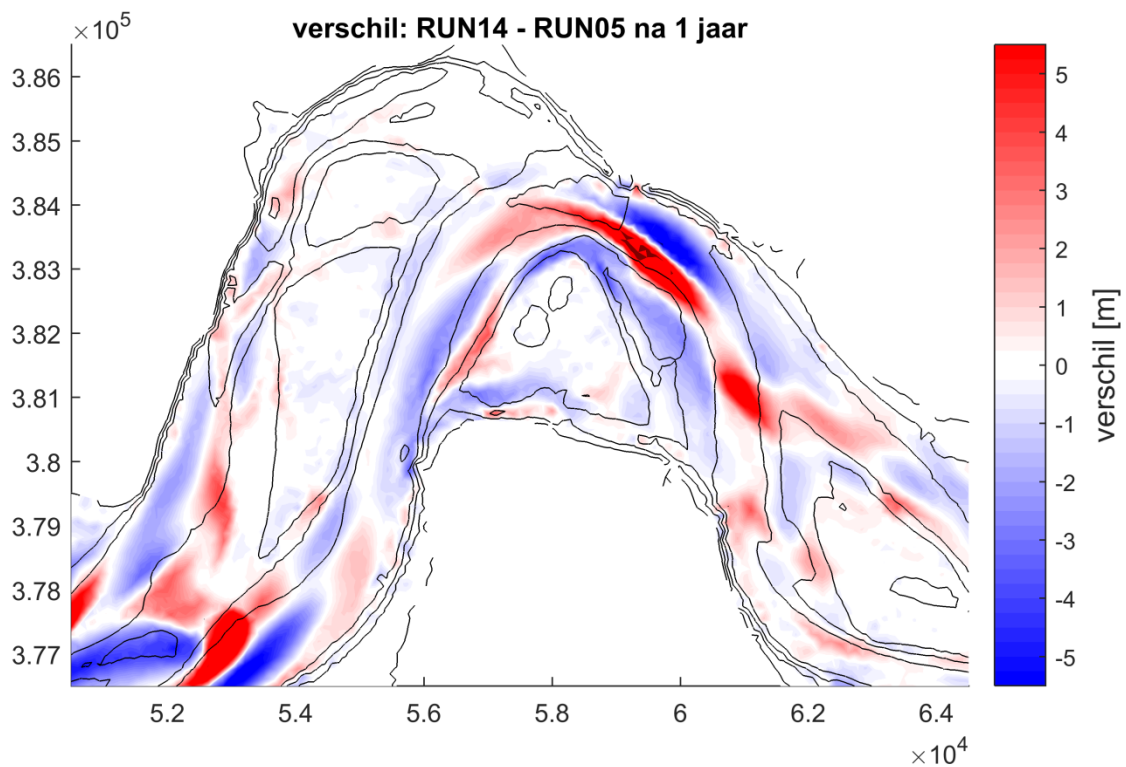
Er zijn vier simulaties uitgevoerd waarin de sedimentdiameter is gevarieerd tussen $d_{50} = 150 \mu\text{m}$ (RUN15), $d_{50} = 180 \mu\text{m}$ (RUN16), $d_{50} = 220 \mu\text{m}$ (RUN17) en $d_{50} = 250 \mu\text{m}$ (RUN18). In de basissimulatie is gerekend met een sedimentdiameter van $d_{50} = 200 \mu\text{m}$ (RUN05).

De morfologische modelresultaten (Figuur 68, Figuur 69, Figuur 70 en Figuur 71) laten zien dat de sedimentdiameter vooral veel invloed heeft op de intensiteit van de morfologische ontwikkeling, maar niet van invloed is op het specifieke patroon van sedimentatie- en erosiezones. Het effect van sedimentdiameter op de morfologische ontwikkeling is dus voorspelbaar. Grovere sedimentfracties leiden tot een kleinere morfologische verandering en fijnere sedimentfracties leiden tot een meer uitgesproken morfologische verandering.

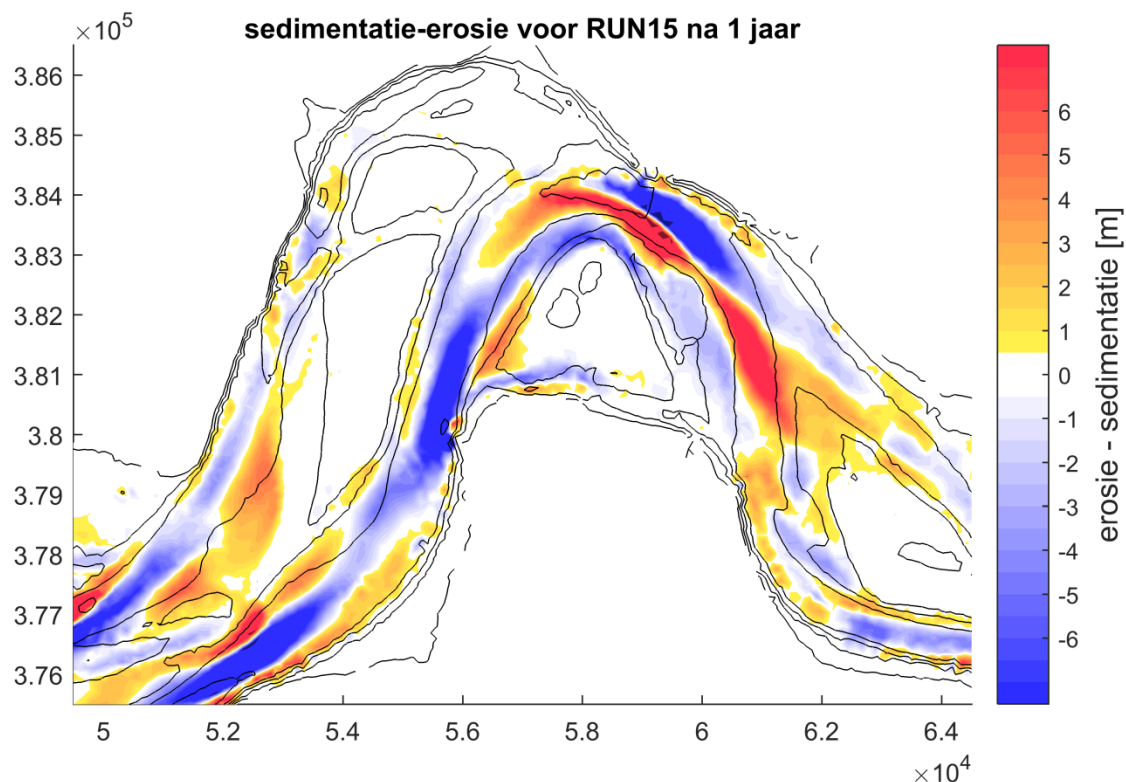
Figuur 66 – Gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulatie RUN14 zonder 'skin friction correction'.



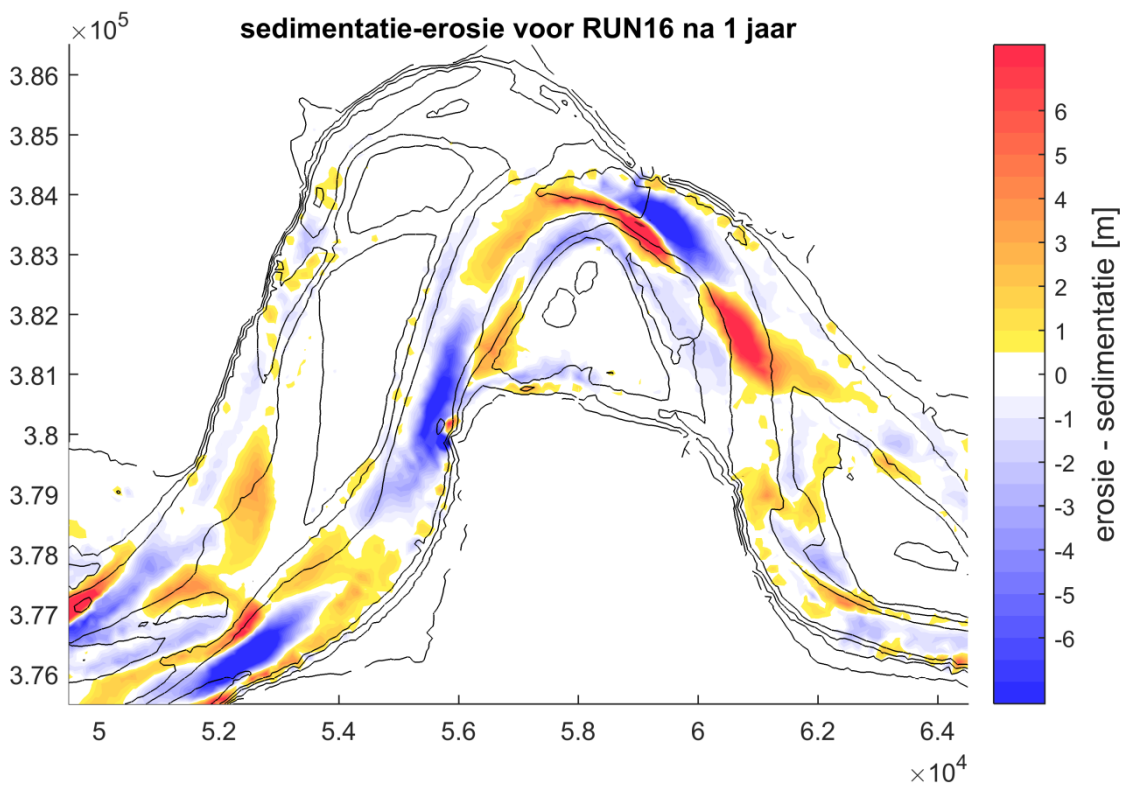
Figuur 67 – Verschil tussen gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulatie RUN14 (zonder 'skin friction correction') en RUN05 (basissimulatie met 'skin friction correction').



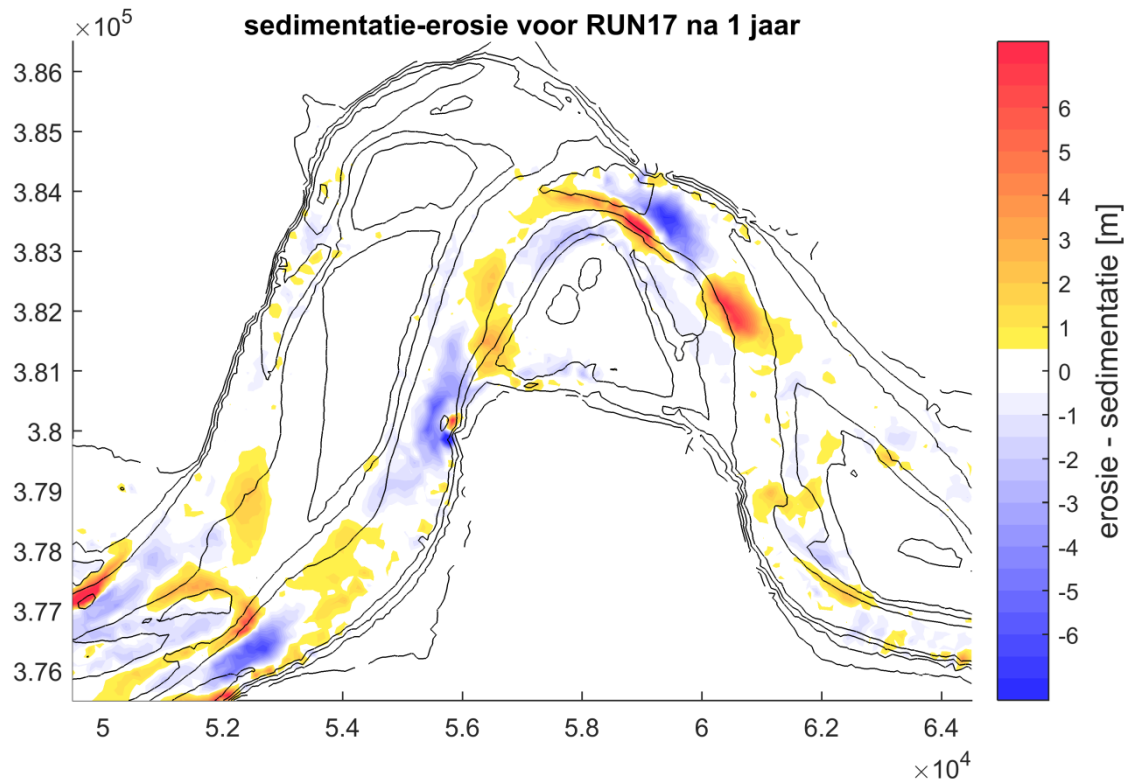
Figuur 68 – Gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulatie RUN15 ($d_{50} = 150 \mu\text{m}$).



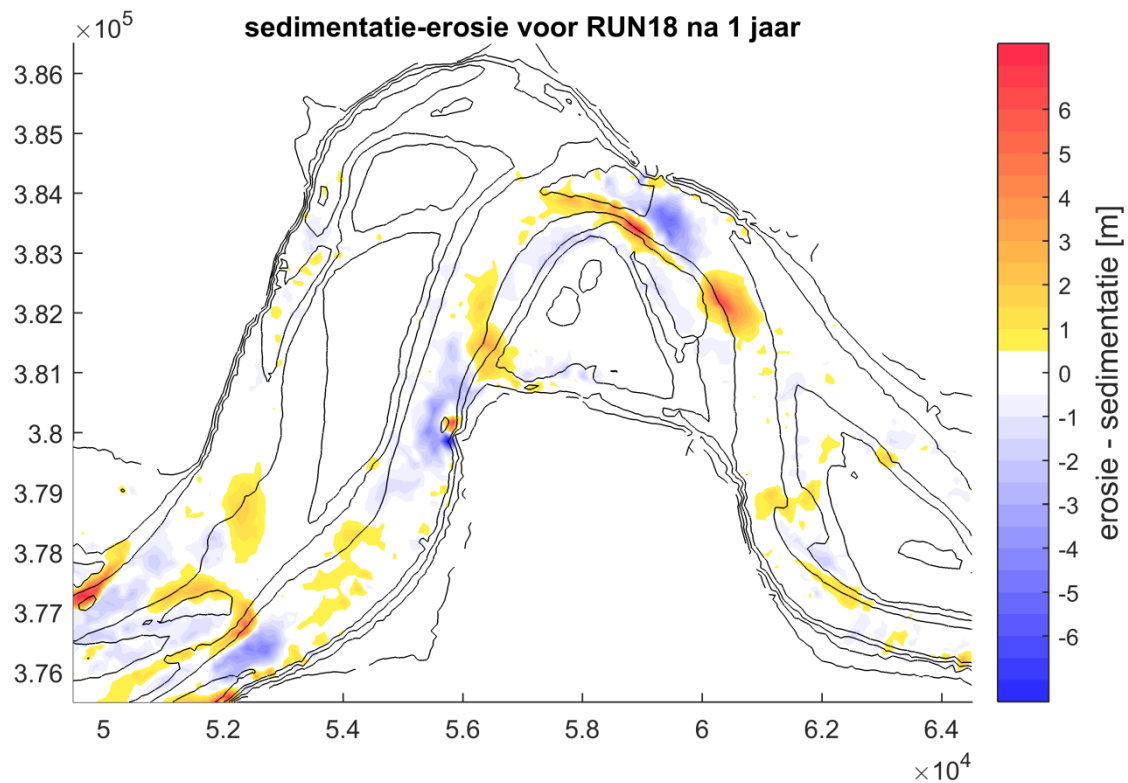
Figuur 69 – Gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulatie RUN16 ($d_{50} = 180 \mu\text{m}$).



Figuur 70 – Gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulatie RUN17 ($d_{50} = 220 \mu\text{m}$).



Figuur 71 – Gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulatie RUN18 ($d_{50} = 250 \mu\text{m}$).



4.10 Invloed roosterresolutie

Figuur 72 toont de gemodelleerde morfologische verandering na één jaar van een simulatie met een tot ongeveer 50 m verfijnde roosterresolutie (Figuur 2) in het studiegebied tussen Terneuzen en Walsoorden (RUN19). Het verschil met de basissimulatie (RUN05) waarin een resolutie van 150 m is gebruikt is weergegeven in Figuur 73.

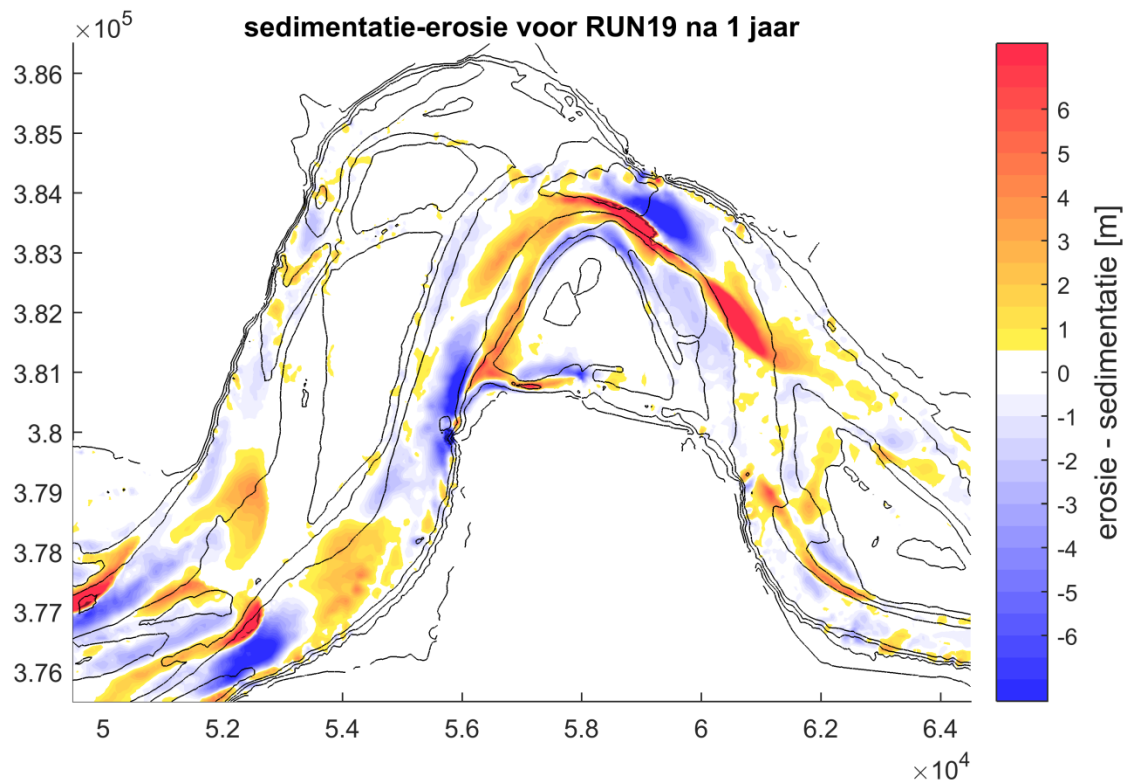
Het gebruik van een verfijnd mesh leidt tot een intensere morfologische verandering in het studiegebied, voornamelijk in gebieden met steile gradiënten. Een duidelijk voorbeeld hiervan is de rand tussen de Platen van Ossenis en de diepe put van Hansweert, waar de sedimentatieband sterker is als het fijnere mesh wordt gebruikt. In de verschilplot tussen beide simulaties (Figuur 73) is verder sprake van een ribbelig patroon wat verklaard kan worden door het verschil in mesh-resolutie.

4.11 Invloed aangepast ruwheidsveld Telemac-3D

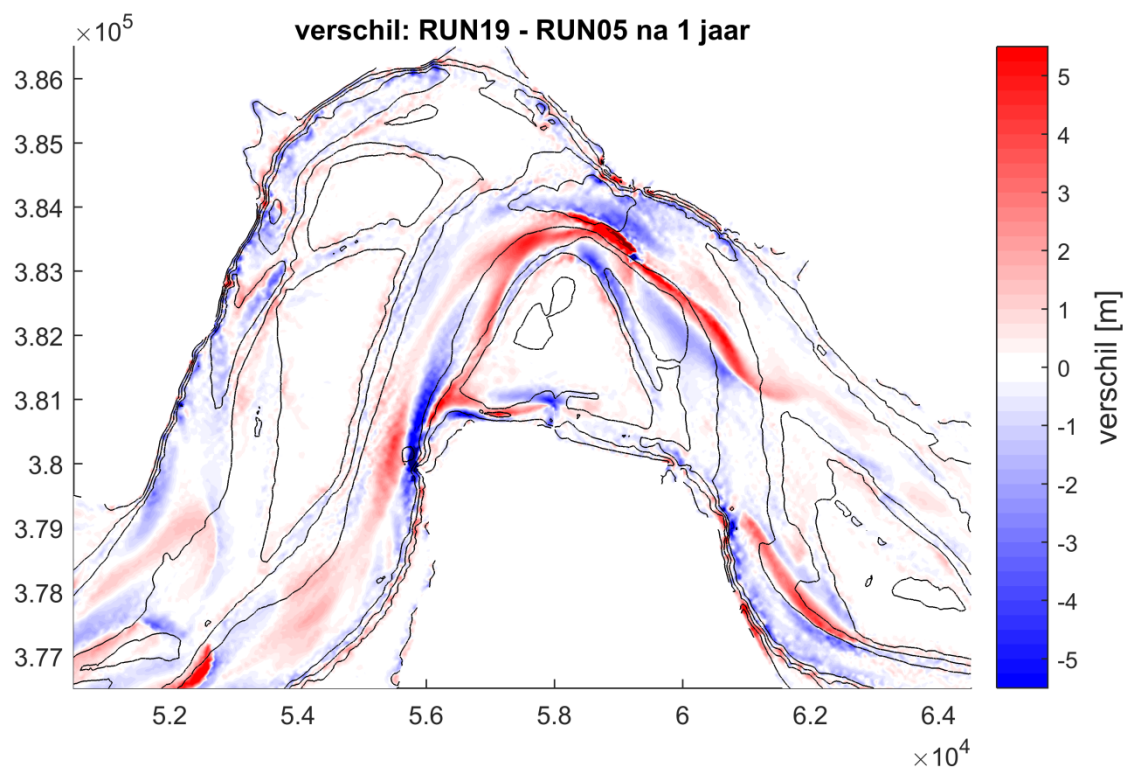
Er is een simulatie uitgevoerd waarin het ruwheidsveld voor het hydrodynamisch model is aangepast om de weergave van het stroomveld op de Platen van Ossenis te verbeteren. Hiervoor is het ruwheidsveld in Telemac-3D aangepast naar $n = 0.010 \text{ s m}^{-1/3}$ op de Platen van Ossenis en $n = 0.025 \text{ s m}^{-1/3}$ in de geulen rond de Platen van Ossenis. In Sisyphe wordt het sedimenttransport echter steeds berekend met een constante bodemruwheid van $n = 0.02 \text{ s m}^{-1/3}$ (i.e., door aanpassingen in de Sisyphe subroutine *coefro_sisyphe.f*). Voor deze simulatie met aangepast ruwheidsveld is net als in de hydrodynamische simulaties het modelrooster gebruikt waarin de resolutie tot 50 m is verfijnd in het studiegebied. Figuur 74 toont de morfologische verandering na één jaar zoals gesimuleerd met deze simulatie (RUN20) en Figuur 75 toont het verschil met de simulatie waarin er een constante bodemruwheid in het studiegebied is toegepast (RUN19).

De simulatie met het aangepaste ruwheidsveld geeft een grotendeels gelijkaardig sedimentatie- en erosiepatroon als in de basissimulatie. Toch zijn er ook enkele verschillen als gevolg van de veranderde representatie van het stroomveld. De erosieband tussen de Platen van Ossenis en de vaargeul bij de diepe put van Hansweert is minder sterk. Er is ook een afname van de erosie op de ondiepte tussen de Platen van Ossenis en de Drempel van Hansweert, welke verklaard kan worden door de neervorming boven deze ondiepte die in deze simulatie wel in zekere mate gerepresenteerd wordt. De erosiezone aan de opwaartse rand van de diepe put van Hansweert is ook iets minder sterk in de simulatie met aangepast ruwheidsveld. Ter hoogte van het Gat van Ossenis is er juist sprake van een toename in de morfologische veranderingen. De sedimentatiezone aan de westrand van de Platen van Ossenis neemt hier toe, evenals de erosiezone bij de splitsing met de Schaar van Ossenis.

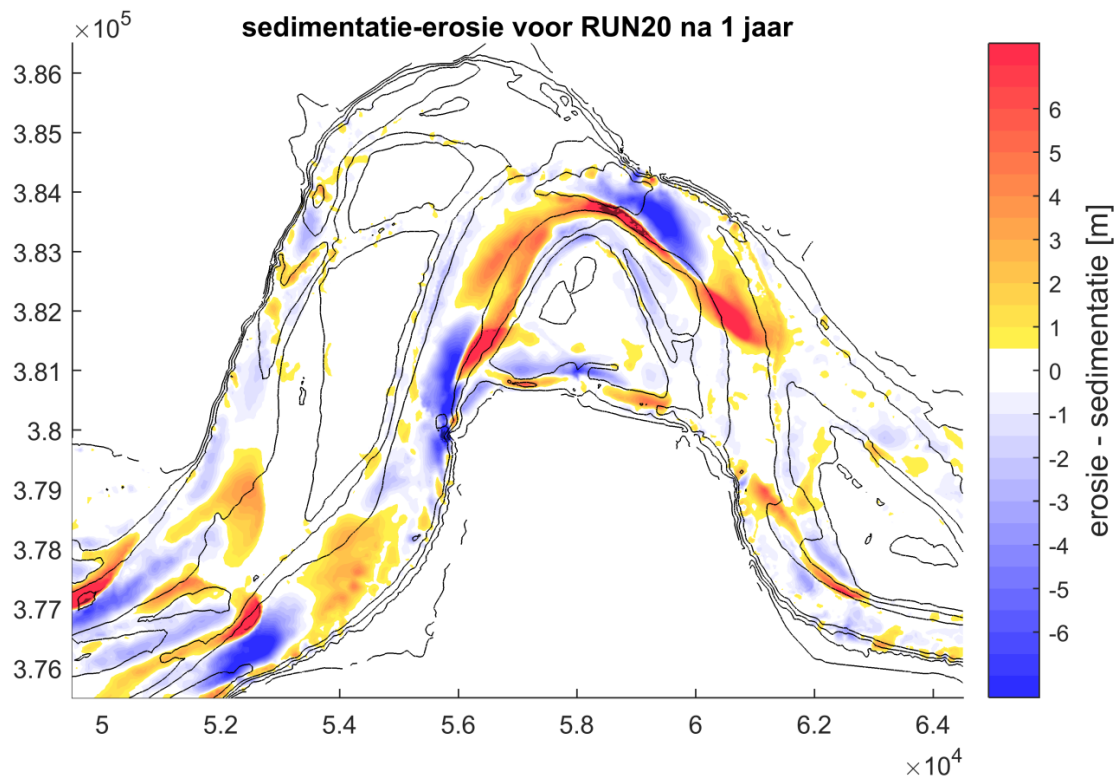
Figuur 72 – Gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulatie RUN19 (roosterresolutie van 50 m in het studiegebied).



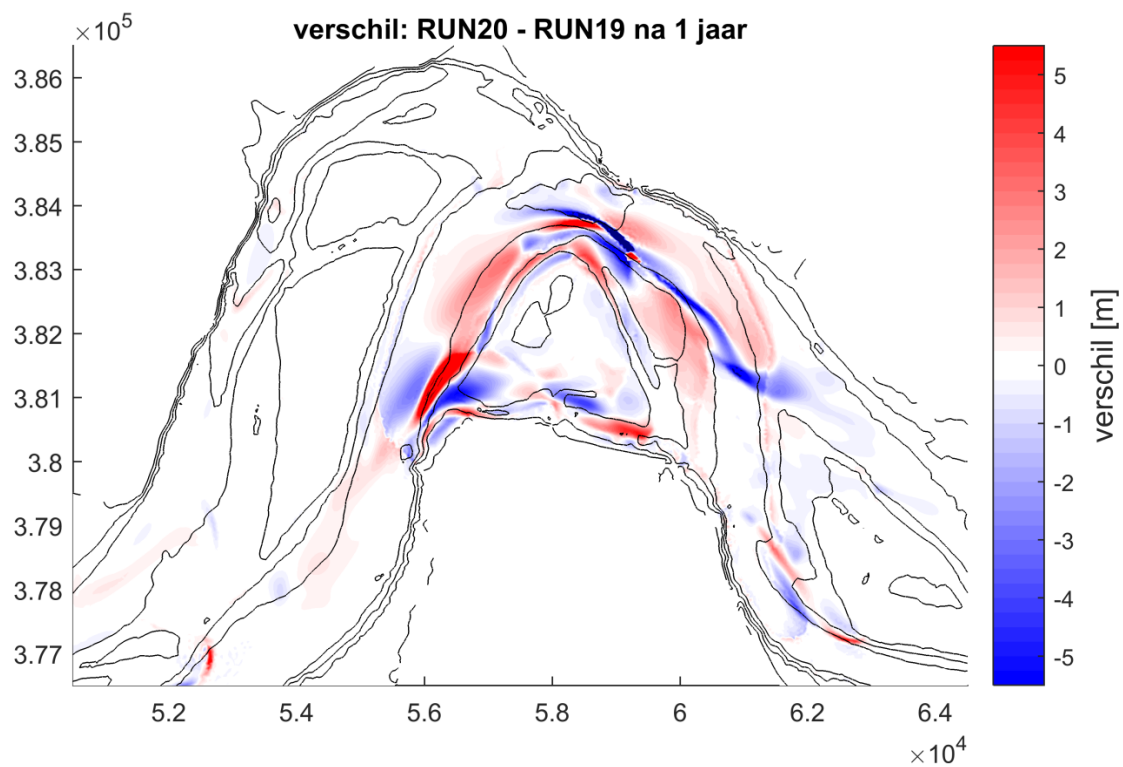
Figuur 73 – Verschil tussen gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulatie RUN19 (50 m resolutie) en RUN05 (basissimulatie met 150 m resolutie).



Figuur 74 – Gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulatie RUN20 (ruwheidsveld met $n=0.010 \text{ s m}^{-1/3}$ op de Platen van Ossensisse en $n=0.025 \text{ s m}^{-1/3}$ in de geulen rond de Platen van Ossensisse).



Figuur 75 – Verschil tussen gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulatie RUN20 (ruwheidsveld met $n=0.010 \text{ s m}^{-1/3}$ op de Platen van Ossensisse en $n=0.025 \text{ s m}^{-1/3}$ in de geulen rond de Platen van Ossensisse) en RUN19 (constant ruwheidsveld met $n=0.022 \text{ s m}^{-1/3}$ in het studiegebied).



4.12 Testsimulaties met storting in diepe put van Hansweert

Schematisering

Er zijn enkele testsimulaties uitgevoerd waarin de bodem in de diepe put van Hansweert (zie Figuur 1) is opgevuld met respectievelijk 1.0 Mm³ of 3.0 Mm³, waarmee een storting in de diepe put wordt geschematiseerd. De testsimulaties zijn met zowel het in dit rapport gepresenteerde Telemac/Sisyphe model als met het eerder ontwikkelde morfologisch model in Delft3D gesimuleerd, zodat een vergelijking gemaakt kan worden tussen beide modellen.

De modelinstellingen in de testsimulaties met Telemac/Sisyphe zijn identiek aan de instellingen van RUN20 in §4.11. Dit betekent concreet dat er wordt gerekend met het lokaal verfijnde model en met het aangepaste ruwheidsveld (gelijkaardig aan het gekalibreerd ruwheidsveld uit de Delft3D modelstudie door Stark *et al.*, 2019). De aanpassing aan de initiële bodemligging in het model is dusdanig dat de diepste delen eerst worden opgevuld (i.e., de storting is geconcentreerd in de diepste delen van de stortzone).

In het Delft3D NeVla model is gerekend met de instellingen zoals aanbevolen in Stark *et al.* (2019) en gepresenteerd in §4.4. Echter is de sedimentdiameter gelijk gesteld aan de Telemac/Sisyphe simulaties (i.e., $d_{50} = 200 \mu\text{m}$). Ook hier is de storting geschematiseerd door een aanpassing van de initiële bodemligging. De in Delft3D ingebouwde bagger- en stortmodule wordt dus niet gebruikt.

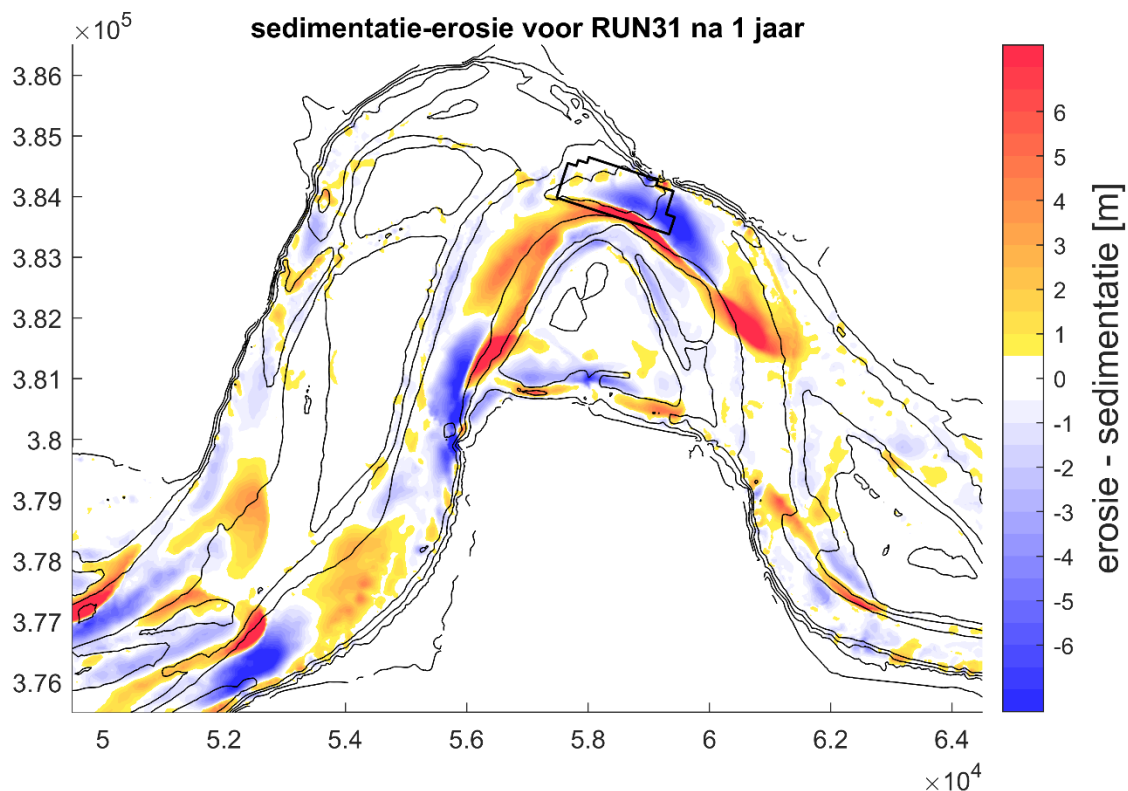
Telemac/Sisyphe

De met Telemac/Sisyphe gesimuleerde morfologische ontwikkeling van het studiegebied in de simulaties waarin er een storting in de diepe put van Hansweert is uitgevoerd verschilt weinig van de ontwikkeling zonder storting (Figuur 76 en Figuur 78 met stortingen van respectievelijk 1.0 Mm³ en 3.0 Mm³ en Figuur 74 zonder storting). In de simulaties met stortingen in de diepe put van Hansweert is enkel sprake van een kleine toename in sedimentatie op de Drempel van Hansweert (Figuur 77 en Figuur 79). Ook lijkt er een met name bij de storting van 3.0 Mm³ lichte erosie plaats te vinden aan de noordrand van de Platen van Ossensisse ten opzichte van de referentierun. Deze relatieve verbreding kan een direct gevolg zijn van de lokale verondieping en leidt op zijn beurt weer tot een lichte toename in sedimentatie aan de noordostrand van de Platen van Ossensisse.

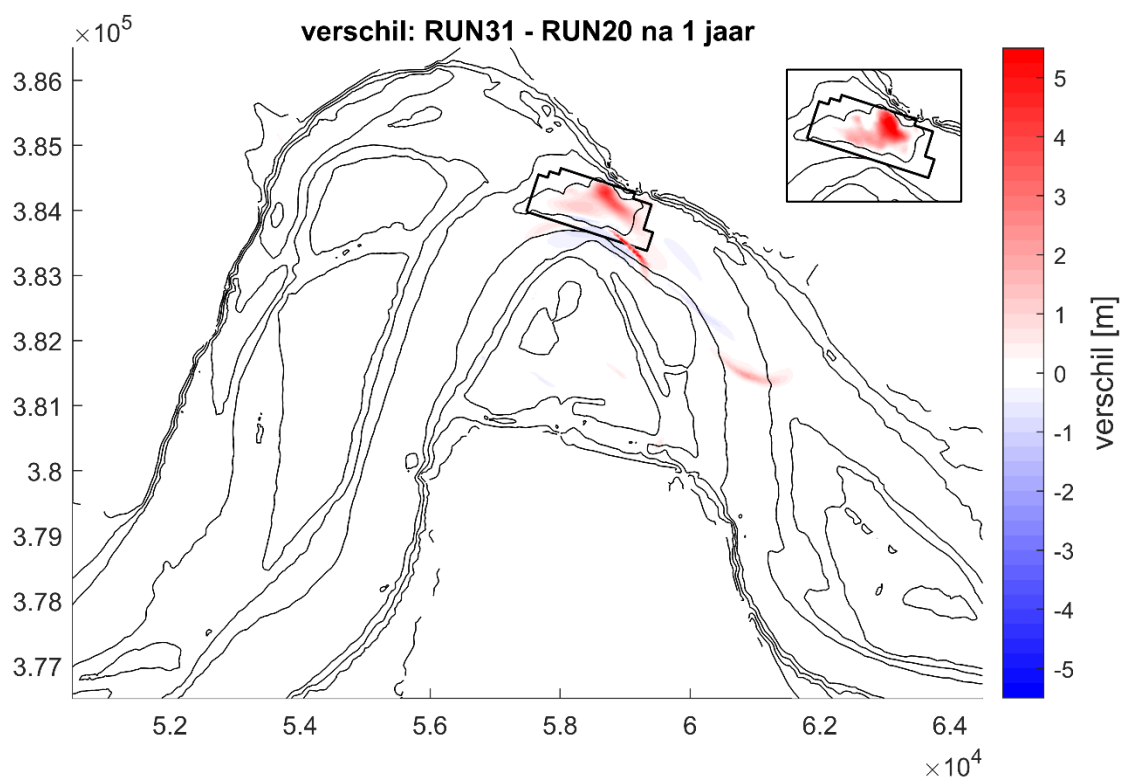
Hoewel op basis van de verschilplot tussen simulaties RUN31 of RUN33 enerzijds en RUN20 anderzijds de indruk wordt gewekt dat de stortingen stabiel zijn (i.e., er blijft sprake van een hogere bodemligging in de stortzone), blijkt uit de sedimentatie-erosie plot van RUN31 zelf dat er wel degelijk sprake is van een sterke erosieve trend in de stortzone bij de diepe put van Hansweert. Meer specifiek is de stabiliteit van de storting na één jaar 0% (i.e., de erosie in de stortzone overschrijdt de gestorte hoeveelheid). Door de autonome morfologische ontwikkeling niet mee te beschouwen kan de invloed van enkel de storting op het sedimentvolume in de stortzone geanalyseerd worden. Vergeleken met de referentiesimulatie zonder storting is de stabiliteit na een jaar echter 83%. Dit houdt in dat het verschil in sedimentvolume in de stortzone tussen beide simulaties na één jaar 83% van het initiële verschil in sedimentvolume van 1.0 Mm³ bedraagt. Bij de gesimuleerde storting van 3.0 Mm³ is de stabiliteit ten opzichte van het begin van de simulatie na één jaar 46%. Dit betekent dat 46% van de 3.0 Mm³ na één jaar nog aanwezig is in de stortzone, inclusief de natuurlijke erosie die in de referentiesimulatie optreedt. In vergelijking met de referentiesimulatie is de stabiliteit van de storting van 3.0 Mm³ 78% (i.e., het verschil in sedimentvolume tussen RUN33 en referentiesimulatie RUN20 is na één jaar nog 78% van het initiële verschil).

Als de stabiliteit van de storting berekend wordt aan de hand van een referentierun waarin de autonome morfologische ontwikkeling wordt bepaald, is de stabiliteit van de storting na één jaar dus gelijkaardig voor stortvolumes van 1.0 Mm³ of 3.0 Mm³. Echter, in absolute waarden is een stortvolume van 1.0 Mm³ na één jaar volledig geërodeerd, terwijl bijna de helft van de gestorte 3.0 Mm³ nog aanwezig is in de stortzone.

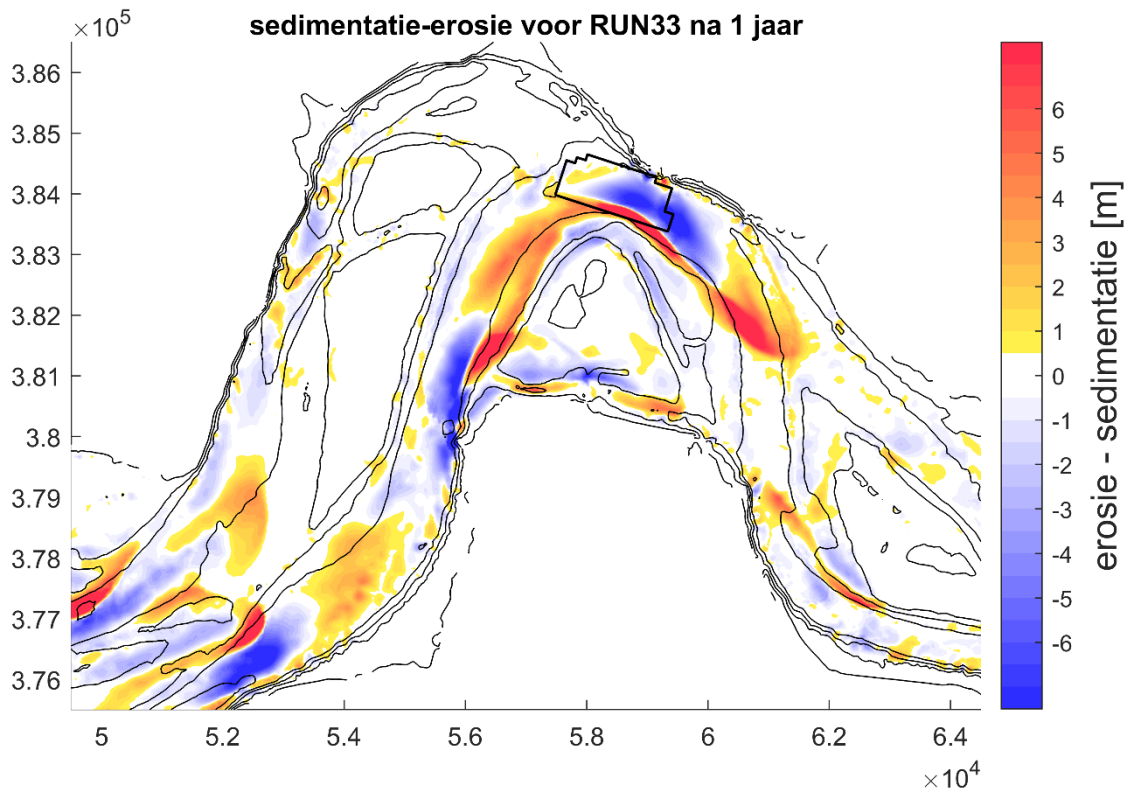
Figuur 76 – Gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulatie RUN31 (storting van 1.0 Mm³ in diepe put van Hansweert).



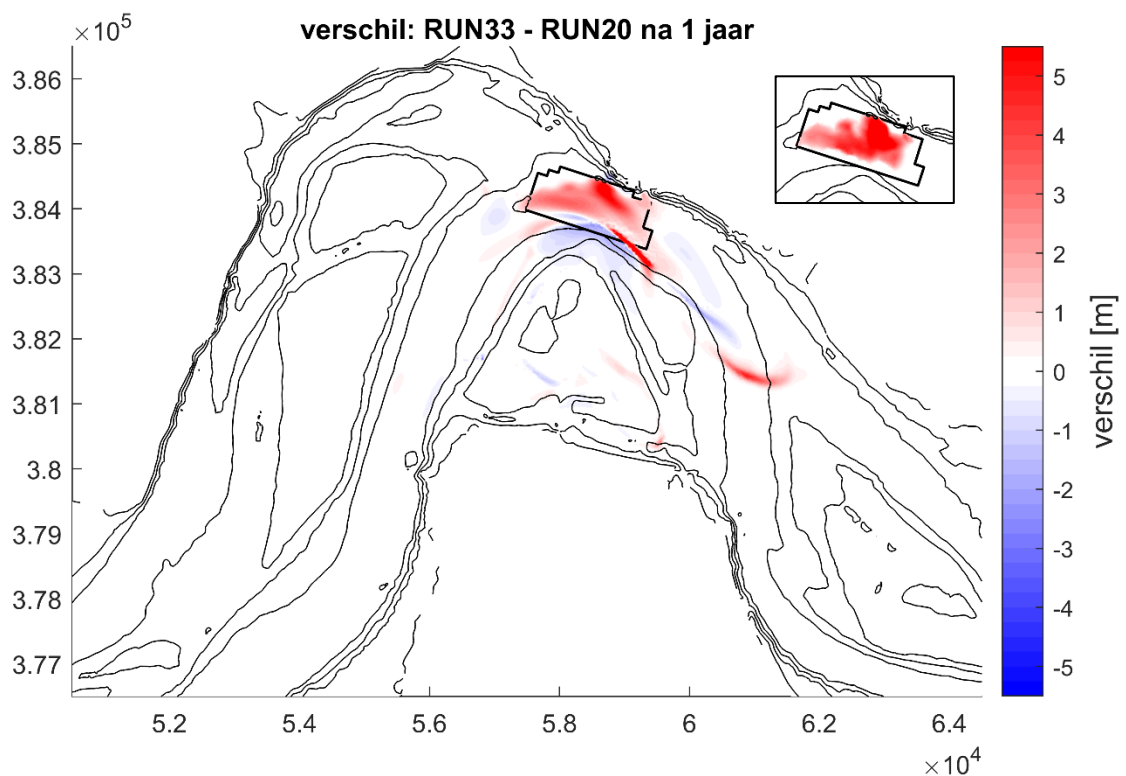
Figuur 77 – Verschil in gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulatie RUN31 (storting van 1.0 Mm³ in diepe put van Hansweert) en RUN20 (referentiesimulatie) ten opzichte van verschil bij start simulatie (inzet).



Figuur 78 – Gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulatie RUN33 (storting van 3.0 Mm³ in diepe put van Hansweert).



Figuur 79 – Verskil in gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met simulatie RUN33 (storting van 3.0 Mm³ in diepe put van Hansweert) en RUN20 (referentiesimulatie) ten opzichte van verschil bij start simulatie (inzet).



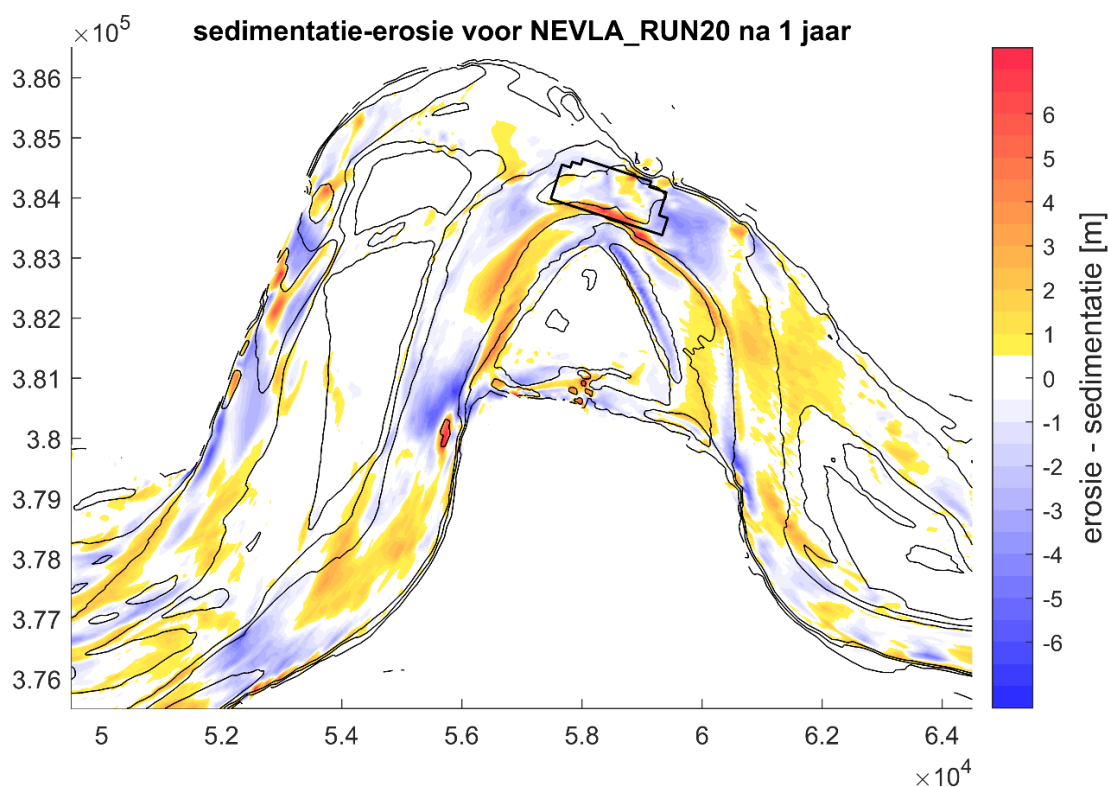
Delft3D – NeVla

Ook in Delft3D is de gesimuleerde morfologische ontwikkeling met stortingen in de diepe put van Hansweert gelijkaardig aan de morfologische ontwikkeling zonder storting (Figuur 81 en Figuur 83 met stortingen van respectievelijk 1.0 Mm^3 en 3.0 Mm^3 en Figuur 80 zonder storting). In tegenstelling tot de Telemac/Sisyphé simulaties is in de Delft3D scenario's met stortingen in de diepe put van Hansweert geen sprake van toename van de sedimentatie op de Drempel van Hansweert. Afwaarts van de stortzone is in de Overloop van Hansweert wel sprake van een lichte toename in sedimentatie in de simulaties met stortingen. Hetzelfde geldt voor een kleine zone direct opwaarts van het stortgebied (Figuur 82 en Figuur 84). De relatieve erosie aan de noordrand van de Platen van Ossenissee (i.e., ten opzichte van de referentierun zonder storting) komt ook voor in de Delft3D simulaties met stortingen. Dit is een gelijkaardig effect als in de Telemac/Sisyphé simulaties.

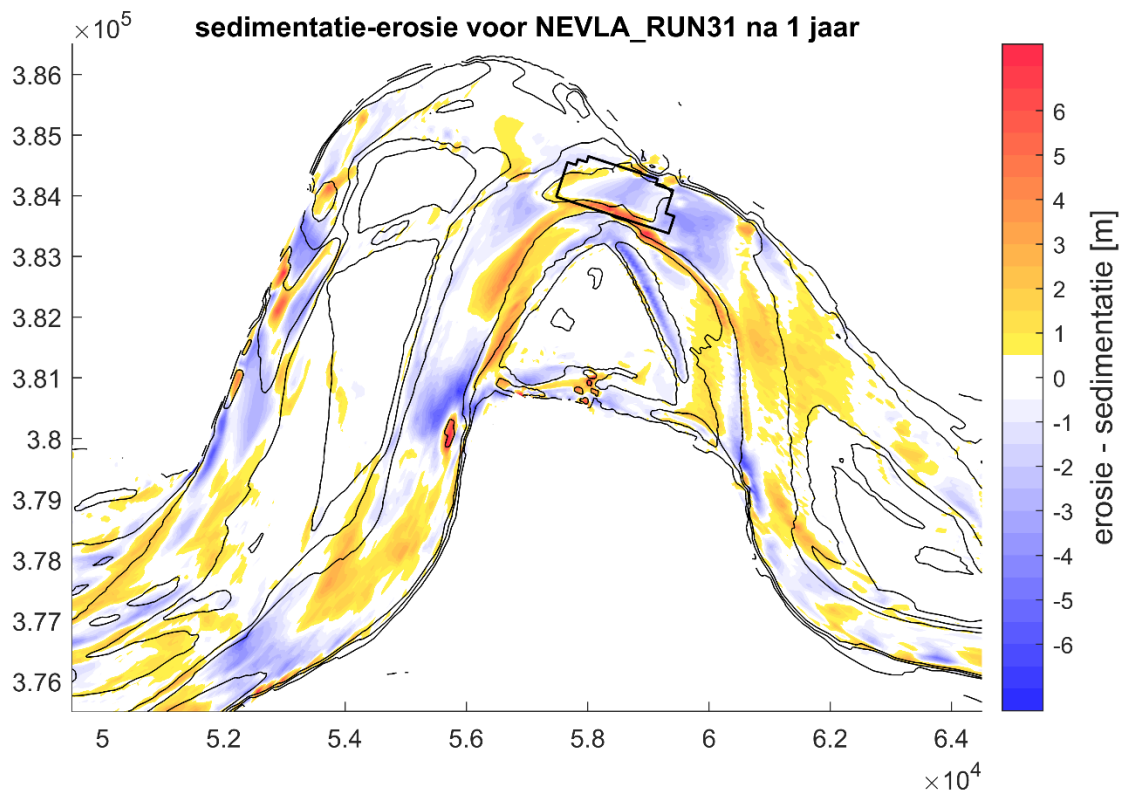
Verder is de stortstabiliteit in de Delft3D simulaties hoger dan in de Telemac/Sisyphé simulaties. Meer specifiek is de stabiliteit na één jaar 77% voor de storting van 1.0 Mm^3 en 69% voor de storting van 3.0 Mm^3 . Deze hogere stabiliteit kan grotendeels verklaard worden door het verschil in autonome morfologische ontwikkeling in het stortgebied tussen de Telemac/Sisyphé simulaties en de Delft3D simulaties. De erosie en verdieping van de bodemligging in de stortzone is namelijk minder sterk in de Delft3D simulaties (i.e., de netto volumeverandering binnen de stortzone is nihil in de referentiesimulatie NEVLA_RUN20) dan in de Telemac/Sisyphé simulaties (i.e., netto volumeverandering van -0.96 Mm^3 binnen de stortzone in de referentierun RUN20).

Ten opzichte van de referentierun is de stabiliteit van de Delft3D NeVla simulaties met stortingen haast identiek aan de nominale stabiliteit vanwege de geringe volumeverandering in de referentiesimulatie zelf. Bij een storting van 1.0 Mm^3 is het verschil in sedimentvolume ten opzichte van de simulatie zonder storting na één jaar 74% van het initiële verschil. Bij een storting van 3.0 Mm^3 is dit na één jaar 68% van het initiële verschil.

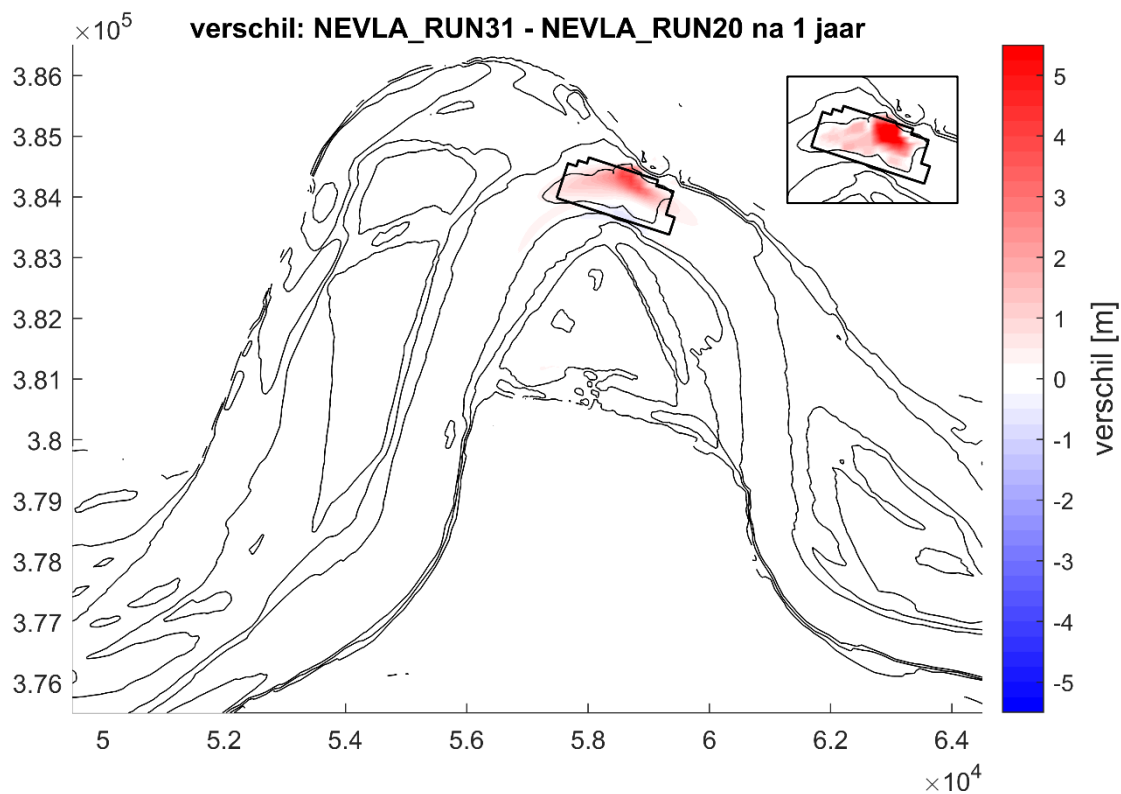
Figuur 80 – Gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met Delft3D simulatie NEVLA_RUN20.



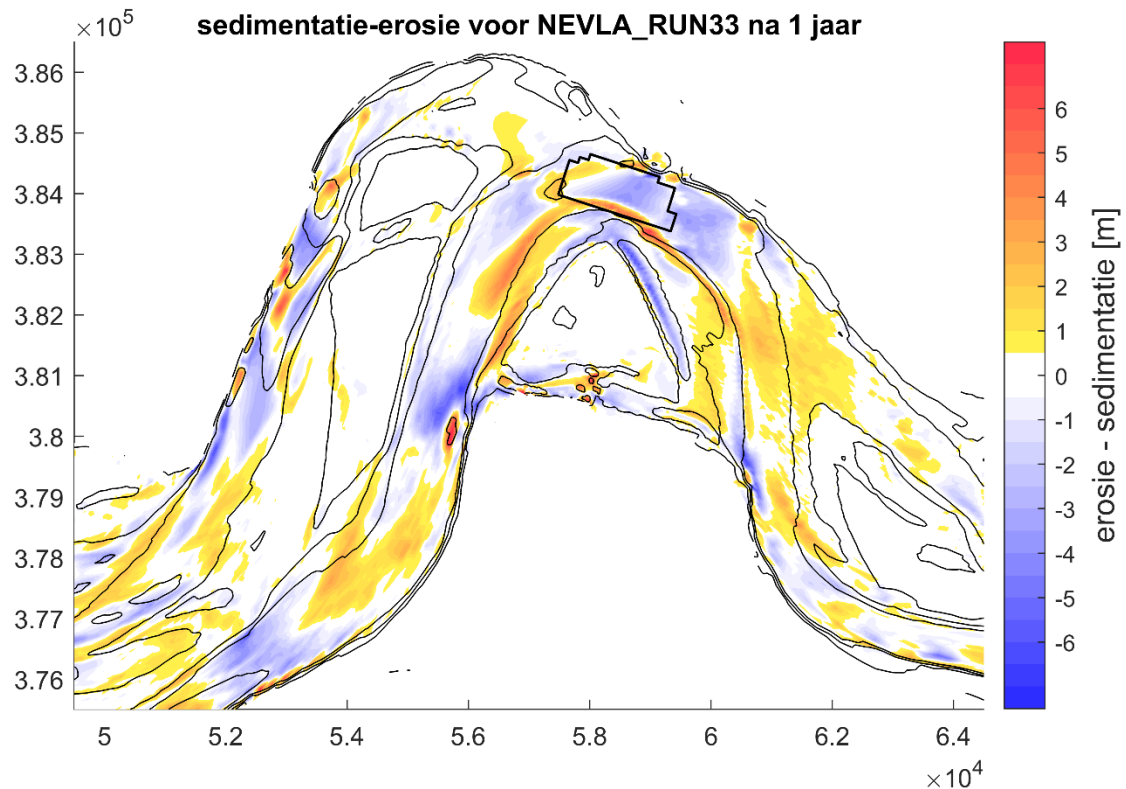
Figuur 81 – Gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met Delft3D simulatie NEVLA_RUN31 (storting van 1.0 Mm^3 in diepe put van Hansweert).



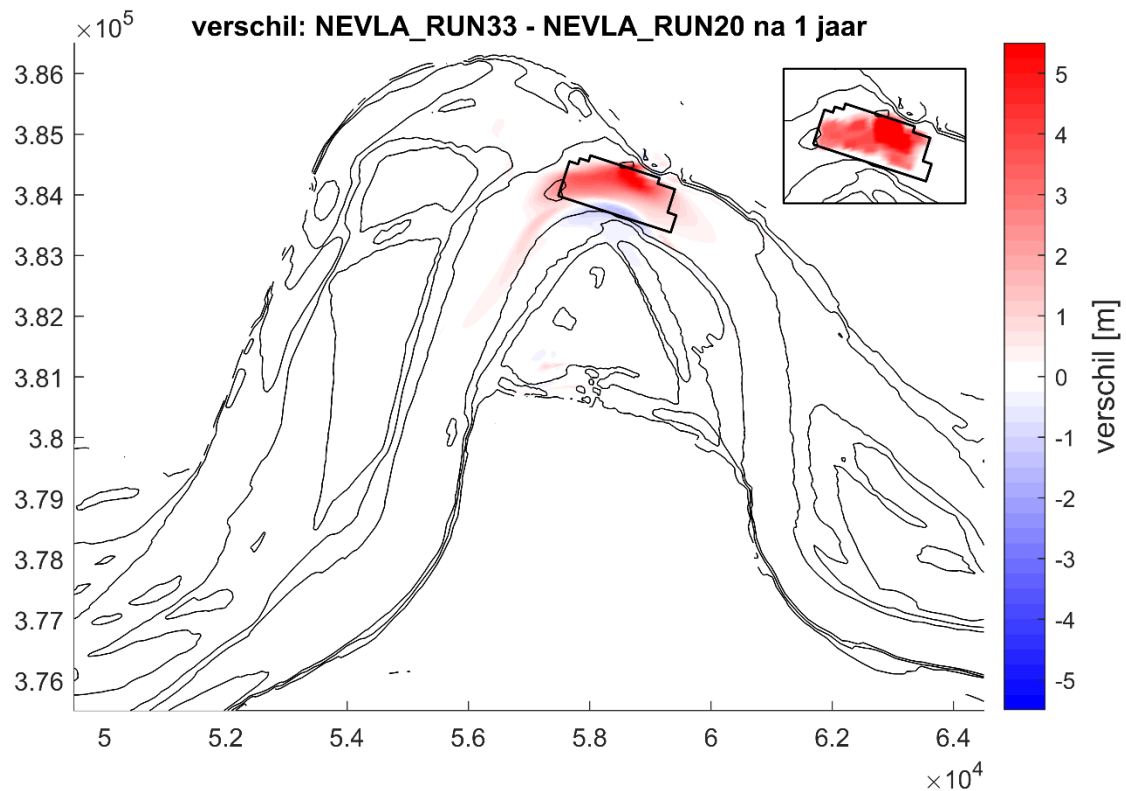
Figuur 82 – Verschil in gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met Delft3D simulaties NEVLA_RUN31 (storting van 1.0 Mm^3 in diepe put van Hansweert) en NEVLA_RUN20 (referentiesimulatie) ten opzichte van verschil bij start simulatie (inzet).



Figuur 83 – Gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met Delft3D simulatie NEVLA_RUN33 (storting van 3.0 Mm³ in diepe put van Hansweert).



Figuur 84 – Verschil in gemodelleerde morfologische ontwikkeling na één jaar met Delft3D simulaties NEVLA_RUN33 (storting van 3.0 Mm³ in diepe put van Hansweert) en NEVLA_RUN20 (referentiesimulatie) ten opzichte van verschil bij start simulatie (inzet).



4.13 Discussie morfologische modelresultaten

Telemac/Sisyphe vs. Delft3D

De morfologische modelresultaten die worden verkregen met Telemac-3D/Sisyphe vertonen een aantal sterke overeenkomsten met de al bestaande Delft3D modellering door Stark *et al.* (2019) in het kader van de AvdT-studie “*Hydro- en sedimentdynamische en morfologische processen op mesoschaal*”. Zo is er in beide morfologische modellen sprake van een duidelijke (weliswaar ruimtelijk beperkt) erosiezone aan de opwaartse rand van de Schaar van Ossensisse en een sedimentatiezone op de Drempel van Hansweert. Ook is in beide simulaties een sedimentatieband aanwezig langs de noordrand van de Platen van Ossensisse en een duidelijke erosiezone in de diepe put nabij de Nol van Ossensisse. Toch zijn er ook duidelijke verschillen tussen beide modellen. In het algemeen resulteert Telemac-3D/Sisyphe na één morfologisch jaar in een sterkere verandering dan Delft3D. Bovendien lijken de sedimentatiezones en erosiezones in de Telemac-3D/Sisyphe simulatie meer geconcentreerd te zijn ten opzichte van de Delft3D simulatie. Er zijn ook kwantitatieve verschillen. Op de ondiepte tussen de Platen van Ossensisse en de Drempel van Hansweert wordt in het Delft3D model bijvoorbeeld sedimentatie gesimuleerd, terwijl in het Telemac-3D/Sisyphe model sprake is van erosie. Dit kan mogelijk verklaard worden door het ontbreken van neervorming boven deze zone in het Telemac-3D model.

Vergelijking met geobserveerde morfologische ontwikkeling

Uit een vergelijking tussen de Telemac/Sisyphe modelresultaten, de Delft3D modelresultaten en geobserveerde morfologische veranderingen volgt dat het Delft3D model de waargenomen sedimentatie- en erosiepatronen in het studiegebied tussen Terneuzen, Hansweert en Walsoorden beter weergeeft. Met name de aanzanding op de ondiepte ten oosten van de Platen van Ossensisse en het sedimentatie- en erosiepatroon rondom de diepe put van Hansweert worden beter gerepresenteerd door het Delft3D-NeVla model. Bovendien geeft de sterke sedimentatie- en erosietrend in Telemac/Sisyphe een overschatting van de werkelijke morfologische verandering, terwijl de erosie- en sedimentatiehoeveelheden in het Delft3D-NeVla model beter overeenkomen met de waargenomen hoogteverschillen. De sedimentatiezones langs de randen van de Platen van Ossensisse en de sedimentatie op de Drempel van Hansweert worden door beide modellen gereproduceerd.

Een gedetailleerde kwantitatieve vergelijking tussen de morfologische modelresultaten en geobserveerde morfologische veranderingen is in het kader van deze gevoeligheidsanalyse niet gemaakt. De hoofdredenen hiervoor zijn dat er in werkelijkheid sprake is van een grote invloed van bagger- en stortactiviteiten op de morfologische ontwikkeling op middellange termijn; de initiële morfologische respons van het model (e.g. Roelvink, 2011) interfereert met meetperiodes waarover natuurlijke morfologische veranderingen zijn waargenomen (i.e., baggervrije periodes); de simulatieduur verschilt van mogelijke meetperiodes; en de verschillen die nog aanwezig blijken te zijn tussen de gemeten stroomsnelheden- en richtingen en de stroomvelden die door het model worden gesimuleerd (zie: Sectie 3).

Gevoeligheidsanalyse modelinstellingen

Uit de gevoeligheidsanalyse volgt verder dat de morfologische modelresultaten in kwalitatief opzicht robuust zijn. Sommige instellingen hebben echter een duidelijk effect op de intensiteit van de morfologische veranderingen. De sedimentdiameter (i.e., d_{50}) en de lokale bodemruwheid hebben de sterkste invloed op de intensiteit van de gemodelleerde morfologische ontwikkeling. De invloed van de bodemwrijving is echter tweeledig. Enerzijds is de lokale bodemruwheid van belang voor de relatie tussen de bodemschuifspanning en het sedimenttransport (i.e., na toepassing van de ‘*skin friction correction*’). Anderzijds is de wrijvingscoëfficiënt in een bredere omgeving van belang voor de hydrodynamica en dus het

stroomsnelheidspatroon in het studiegebied. Naast de sedimentdiameter en de bodemruwheid hebben de transportformule en de roosterresolutie in iets mindere mate invloed op de intensiteit van de morfologische veranderingen. Enkel de parametrisatie van transversale hellingeffecten heeft een duidelijke kwalitatieve invloed op de morfologische ontwikkeling. Als de kalibratieparameter voor dit hellingeffect (i.e., β_2 in Sisyphé) wordt verlaagd, leidt dit tot een versterking van het transversale hellingeffect en dus tot flauwere hellingen en een verondieping van de geulen. De parametrisatie van de longitudinale hellingeffecten heeft op basis van de huidige gevoeligheidsanalyse een zeer beperkte invloed op de morfologische modelresultaten. Tot slot wordt opgemerkt dat bochtstromingseffecten in het driedimensionale Telemac3D-Sisyphé model sowieso al worden meegenomen.

Concluderend kan de kwantitatieve invloed van de geteste modelinstellingen in Telemac-3D en Sisyphé als volgt worden gerangschikt:

- | | |
|---|--|
| 1. Sedimentdiameter | $d_{50} = 150\text{-}250 \mu\text{m}$ |
| 2. Bodemruwheid (' <i>skin friction correction</i> ') | $l/0$ |
| 3. Bodemruwheid in Telemac-3D | $n_{\text{plaat}} = 0.010\text{-}0.020 \text{ sm}^{-1/3} / n_{\text{geul}} = 0.025\text{-}0.020 \text{ sm}^{-1/3}$ |
| 4. Transportformule | Van Rijn (1984) vs. Engelund-Hansen |
| 5. Roosterresolutie | 50-150 m |
| 6. Parametrisatie transversale hellingeffecten | $l/0 / \beta_2$ |
| 7. Longitudinale hellingeffecten | $l/0 / \beta$ |

Bochtstromingseffecten (i.e., *secondary flow*) hebben in de tweedimensionale Delft3D-NeVla simulatie wel een invloed op de morfologische resultaten en leiden tot een verandering van het sedimentatie- en erosiepatroon (i.e., met name ter hoogte van de diepe put van Hansweert). Het wordt derhalve aangeraden om deze effecten mee te nemen als er met het Delft3D-NeVla model gerekend wordt.

Gevoeligheidsanalyse stortingen in diepe put van Hansweert

Testsimulaties met geschematiseerde stortingen in de diepe put van Hansweert leiden niet tot significant andere morfologische ontwikkelingen op grote ruimtelijke schaal. Wel is er in alle runs sprake van een relatieve verbreding van de geul ter plaatse van de stortzone (i.e., relatieve erosie aan de noordrand van de Plaat van Ossensisse). In de Telemac/Sisyphé runs leiden de stortingen tevens tot een kleine toename van sedimentatie op de Drempel van Hansweert, terwijl de toegenomen sedimentatie in de Delft3D runs direct opwaarts en afwaarts van de stortzone is geconcentreerd. De stabiliteit van de gestorte specie (inclusief natuurlijke ontwikkelingen) is lager in Telemac/Sisyphé dan in Delft3D. Dit kan verklaard worden door een sterke erosieve trend die in Telemac/Sisyphé aanwezig is in de autonome morfologische ontwikkeling van de diepe put van Hansweert, terwijl de autonome netto volumeverandering in de stortzone in Delft3D gering is.

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Hydrodynamisch model

Voor deze studie werd een nieuw Telemac-3D modelrooster opgezet voor het Schelde estuarium. Dit rooster is met name in het bovenstroomse deel van het estuarium minder gedetailleerd dan het reeds bestaande Scaldis modelrooster dat werd ontwikkeld door Smolders *et al.* (2016).

Het nieuw opgezette model heeft een vergelijkbare nauwkeurigheid als het Scaldis model voor wat betreft het representeren van het waterstandsverloop in de Westerschelde. Een vergelijking met het reeds bestaande 2D-h Delft3D-NeVla model (Stark *et al.*, 2019) laat zien dat de geneste Telemac modellen minder accuraat zijn dan het bestaande Delft3D model. De afwaartse rand van het Delft3D-NeVla model werd echter geforceerd met in Westkapelle en Cadzand geobserveerde waterstanden, terwijl het nieuwe Telemac modelrooster evenals het Scaldis model is genest in de CSM-ZUNO modeltrein (e.g. Maximova *et al.*, 2009; Leijssen *et al.*, 2012). Een gevoeligheidstest waarin ook het nieuw opgezette Telemac model werd afgeknipt ter hoogte van Cadzand-Westkapelle en met gemeten waterstanden werd geforceerd toont aan dat afwijkingen in nauwkeurigheid van de reproductie van het verticaal getij grotendeels toegeschreven kunnen worden aan verschillen in schematisering van de afwaartse randvoorwaarden.

Uit de gevoeligheidsanalyse in deze studie volgt verder dat het veranderen van de roosterresolutie een significante invloed heeft op het gemodelleerd waterstandsverloop in het estuarium (i.e., met name opwaarts van het gebied waarin het modelrooster wordt aangepast). De gemodelleerde stroomsnelheden en het stroombeeld op de Platen van Ossensisse en het aangrenzende ondiepe plateau zijn beiden gevoelig voor het lokale ruwheidsveld. Niet alle aspecten van het stroomsnelheidsverloop worden goed gerepresenteerd door de Telemac-3D modellen. Met name de reproductie van de circulaire stromingen gerelateerd aan neervorming boven het ondiepe plateau ten oosten van de Platen van Ossensisse (e.g. Decrop *et al.*, 2009; Stark *et al.*, 2019) ontbreekt in de Telemac-3D simulaties. Deze aspecten worden door het in de AvdT-studie “Hydro- en sedimentdynamische en morfologische processen op mesoschaal” ontwikkelde Delft3D-NeVla model (Stark *et al.*, 2019) beter gereproduceerd. In dit Delft3D model is de ruwheid op de desbetreffende ondiepte bij de Platen van Ossensisse sterk verlaagd. Eenzelfde verlaging van de bodemruwheid in het Telemac-3D model leidt inderdaad tot het ontstaan van een grote neer en circulaire stromingspatronen in de Telemac simulaties, maar de bijbehorende stroomsnelheden en stroomrichtingen komen nog steeds niet goed overeen met gemeten waarden. Tot slot wordt opgemerkt dat afwijkingen in de reproductie van de neervorming en bijbehorende circulaire stromingen niet veroorzaakt worden door verschillen in opgelegde afwaartse randvoorwaarden (i.e., in ZUNO genest model vs. gemeten waterstandsreeksen).

Aanbevelingen

Een verdere kalibratie, eventueel op basis van additionele stroomsnelheidsmetingen, wordt aanbevolen om de modelprestatie van het Telemac-3D model te verbeteren. Op basis van de gevoeligheidsanalyse waarin meerdere roosterresoluties en een breed bereik aan ruwheidscoëfficiënten werd getest wordt echter niet verwacht dat het Telemac-3D model de neervorming en hoge stroomsnelheden tijdens vloed op het ondiepe plateau tussen de Platen van Ossensisse en de Drempel van Hansweert na een uitgebreidere kalibratie even goed zal kunnen representeren als het Delft3D-NeVla model dat eerder werd gekalibreerd door Stark *et al.* (2019). In dit kader moet opgemerkt worden dat de Telemac-3D modellen wel een iets betere representatie van de eb-snelheden geven ten opzichte van het eerder gekalibreerde Delft3D model. Verder geldt dat bij het toepassen van een (lokaal) verfijnd modelrooster een herkalibratie zal moeten plaatsvinden om de

algehele modelprestatie op het gewenste niveau te houden. Daarnaast wordt een driedimensionale modellering aangeraden om niet-logaritmische snelheidsprofielen en helicoïdale stroming bij de diepe putten in het studiegebied correct te modelleren. Dit laatste is van belang voor morfologische modellering omdat sedimenttransport gerelateerd is aan de verticale gradiënt van de stroomsnelheid nabij de bodem.

5.2 Morfologisch model

In deze studie is een morfologisch- en sedimenttransport model voor niet-cohesief sediment opgezet in Sisyphe (online gekoppeld met Telemac-3D). Met dit model zijn meerdere morfologische simulaties uitgevoerd in het kader van een gevoeligheidsanalyse.

De resultaten van de gevoeligheidsanalyse laten zien welke instellingen of parameters de grootste invloed hebben op het resultaat. De sedimentdiameter (d_{50}) en de lokale bodemruwheid hebben het meeste invloed op de intensiteit van de morfologische ontwikkeling in het Sisyphe model. De gebruikte transportformule (i.e., Van Rijn of Engelund-Hansen) en de roosterresolutie hebben minder invloed op de intensiteit van de gemodelleerde morfologische ontwikkeling. Enkel de schematisering van transversale hellingeffecten heeft een duidelijke kwalitatieve invloed op de gesimuleerde morfologische ontwikkeling. Deze parameter heeft vooral invloed op de diepteligging van de geulen en de steilheid van de hellingen. Tenslotte is de impact van de parametrisatie van bochtstroming en van longitudinale hellingeffecten zeer beperkt. Hierbij wordt opgemerkt dat het meenemen van bochtstromingseffecten (i.e. *secondary flow*) in de tweedimensionale Delft3D simulatie wel een significante invloed heeft op de gemodelleerde morfologische ontwikkeling.

De morfologische trends zoals gemodelleerd met Sisyphe/Telemac-3D wijken af van de morfologische resultaten met het Delft3D model in de AvdT-studie "*Hydro- en sedimentdynamische en morfologische processen op mesoschaal*" door Stark *et al.* (2019). In het algemeen wordt met Sisyphe een sterkere morfologische ontwikkeling gesimuleerd dan met Delft3D, ook als de modelinstellingen grotendeels (i.e., voor zover mogelijk binnen de modelopties) in overeenstemming zijn gebracht. In en direct opwaarts van de diepe put van Hansweert wordt in het Telemac model sterke erosie gesimuleerd, terwijl de erosie op deze locatie in Delft3D beperkt blijft. Dit laatste zou kunnen komen door de implementatie van een harde niet-erodeerbare laag in Delft3D. Daarnaast wordt op het ondiepe plateau ten oosten van de Platen van Ossenissee door beide modellen een tegengestelde morfologische trend gesimuleerd, mogelijk ten gevolg van het ontbreken van neervorming boven deze ondiepte in het Telemac-3D model. Er zijn echter ook overeenkomstige morfologische trends tussen beide modellen. Zo is er in beide modellen sprake van een verdieping van de Overloop van Hansweert, een opwaartse migratie van de diepe put van Hansweert, aanzanding op de Drempel van Hansweert en een noordoostelijke migratie van het ondiepe plateau langs de Platen van Ossenissee.

Op basis van enkele testsimulaties met stortingen (i.e., geschematiseerd als verondiepingen) in de diepe put van Hansweert kan gesteld worden dat het Delft3D model op deze locatie een hogere stortstabiliteit geeft dan het Sisyphe/Telemac-3D model.

Doordat belangrijke processen met het oog op de morfologische ontwikkeling, zoals bagger- en stortactiviteiten, niet zijn meegenomen in de simulaties kunnen de morfologische modelresultaten niet adequaat worden vergeleken met de geobserveerde morfologische trends. Wel kan gesteld worden dat het door Stark *et al.* (2019) op stroming en sedimenttransport gekalibreerde Delft3D-NeVla model het waargenomen sedimentatie- en erosiepatroon kwalitatief en kwantitatief beter weergeeft dan het nieuw ontwikkelde Telemac-3D/Sisyphe model. Hierbij dient aangetekend te worden dat de modelinstellingen in Sisyphe nog niet specifiek werden gekalibreerd voor de representatie van de geobserveerde morfologische veranderingen.

Aanbevelingen

Op basis van de huidige morfologische modelresultaten en bij gebrek aan een adequate vergelijking met geobserveerde morfologische trends op dezelfde tijdschaal als de simulaties kan nog geen eenduidige keuze gemaakt worden voor één van beide morfologische modellen. Uit een kwalitatieve vergelijking tussen geobserveerde en gemodelleerde sedimentatie- en erosiepatronen komt het Delft3D-NeVla als beste optie naar voren, al moet hierbij worden bedacht dat het Telemac-3D/Sisyphe model op dit moment nog niet specifiek werd gekalibreerd voor de representatie van sedimenttransport in het studiegebied. Het Delft3D model is echter een 2D-h model, waar Telemac-3D driedimensionaal is. Dit kan van belang zijn met betrekking tot het reproduceren van stroming en sedimenttransport in de diepe delen. Ook is het Delft3D model beduidend trager in rekentijd. Aangezien beide modellen een aantal mogelijkheden blijken te hebben, maar ook hun beperkingen, wordt aangeraden om beide modellen naast elkaar te blijven inzetten. Daarnaast is het cruciaal dat de modelresultaten, zowel waterbeweging, sedimenttransport als morfologie, kritisch geïnterpreteerd worden en getoetst worden aan verwachte ontwikkeling op basis van *expert judgement*, onderbouwd door waarnemingen.

Het selecteren van de juiste modelinstellingen voor het morfologisch- of sedimenttransportmodel is niet eenvoudig vanwege gebrek aan geobserveerde natuurlijke morfologische veranderingen op lange tijdschaal (i.e., de geobserveerde morfologische veranderingen zijn mede het gevolg van bagger- en stortwerkzaamheden). In dat opzicht wordt tevens aanbevolen om deze bagger- en stortactiviteiten in de modelschematisering te implementeren, zodat gemodelleerde en geobserveerde morfologische veranderingen over tijdschalen van één of meerdere jaren beter vergeleken kunnen worden. Wel kunnen op basis van een vergelijking tussen het gemeten sedimenttransporten (Vandebroek *et al.*, 2016) en door Stark *et al.* (2019) met het Delft3D-NeVla model gesimuleerde transporten enkele aanbevelingen voor de modelinstellingen worden gedaan. Op basis van voornoemde studie lijkt het aangewezen te rekenen met de Van Rijn formule voor sedimenttransport, een constante ruwheidshoogte van $k_s \approx 0.01\text{--}0.02$ m te gebruiken en een (realistische) korrelgrootte van $d_{50} \approx 170$ μm te gebruiken. Ook kwam uit deze studie naar voren dat het toevoegen van een tweede zeer fijne (zand)fractie nodig lijkt om de geobserveerde vloedtransporten over het ondiepe plateau ten oosten van de Platen van Ossensisse goed te reproduceren. Overigens is een dergelijke vergelijking tussen model en meting met het Sisyphe/Telemac-3D model niet gemaakt omdat het gemodelleerde stroomsnelheidsverloop op een aantal meetlocaties nog een belangrijke afwijking kent ten opzichte van de snelheidsmetingen. Hierdoor mag een goede overeenstemming tussen gemeten en met Sisyphe gesimuleerde transporten nog niet worden verwacht.

6 Referenties

- Baar, A. W.; de Smit, J., Uijtewaald, W. S. J.; Kleinhans, M. G.** (2018). Sediment Transport of Fine Sand to Fine Gravel on Transverse Bed Slopes in Rotating Annular Flume Experiments. *Water Resources Research*, 54(1), 19-45. doi: 10.1002/2017WR020604
- Cornet, E.; Mostaert, F.** (2010). Hydrologisch jaarboek 2009: HIC meetstations. Versie 1.0. *WL Rapporten*, 709_01. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. 244 pp.
- Decrop, B.; De Clercq, B.; Vanlede, J.; Van Holland, G.; Ides, S.; Plancke, Y.; De Mulder, T.; Mostaert, F.** (2009). Dwaarsstromingen Ossenisse-Zuidergat –Rapport numeriek modelonderzoek. *WL Rapporten*, 753_07. Waterbouwkundig Laboratorium & IMDC: Antwerpen, België.
- Deltares** (2011). Delft3D-FLOW. Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. User Manual. Version 3.15.
- EDF-R&D** (2013). 3D hydrodynamics Telemac-3D software. Release 6.2. Operating Manual. EDF-R&D, Chatou, Frankrijk.
- Geuzaine, C.; Remacle, J-F.** (2009). Gmsh: a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 79(11), pp. 1309-133.
- Godin, G.** (1972). The Analysis of Tides, University of Toronto Press
- Hervouet, J.-M.** (2007). Hydrodynamics of Free Surface Flows: Modelling with the finite element method. doi:10.1002/9780470319628
- Ikeda, S.** (1984). Lateral bed-load transport on side slopes - closure. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(2), 200–203.
- IMDC** (2015). Monitoringprogramma Flexibel Storten. Deelopdracht 5: Analyse van de stortingen in de diepe delen van de hoofdgeul - jaarrapport 2014. I/RA/11353/15.031/THL/.
- Koch F.G.; Flokstra C.** (1981). Bed level computations for curved alluvial channels. In *Proceedings of the XIXth Congress of the Int. Ass. for Hydr. Res.*, New Delhi, India, 1980.
- Lesser, G. R.** (2009). An approach to medium-term coastal morphological modelling. UNESCO-IHE, Institute for Water Education. Doctoral thesis.
- Leyssen, G.; Vanlede, J.; Decrop, B.; Van Holland, G.; Mostaert, F.** (2012). Modellentrein CSM-ZUNO. Deelrapport 2: Validatie. *WL Rapporten*, 753_12. Waterbouwkundig Laboratorium & IMDC: Antwerpen, België.
- 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.
- Maximova, T.; Vanlede, J.; Verwaest, T.; Mostaert, F.** (2016). Vervolgonderzoek bevaarbaarheid Bovenzeeschelde: Subreport 4 – Modelling Train CSM – ZUNO: validation 2013. Version 3.0. *WL Rapporten*, 13_131. Flanders Hydraulics Research: Antwerp, Belgium.
- Meire, D.; Plancke, Y.; De Maerschalck, B.; Verwaest, T.; Mostaert, F.** (2017). Agenda voor de Toekomst: Morfologie Mesoschaal: Deelrapport 2 – Gevoeligheidsanalyse voor morfologische simulaties in de Westerschelde. Versie 4.0. *WL Rapporten*, 14_024_3. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

Pawlowicz, R.; Beardsley, B.; Lentz, S. (2002). Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE, *Computers and Geosciences* 28, 929-937.

Roelvink, J. A.; Reniers, A. J. H. M. Eds. (2011). A guide to modeling coastal morphology. *Advances in Coastal and Ocean Engineering* - Vol. 12, World Scientific.

Smolders, S.; Maximova, T.; Vanlede, J.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2016). Integraal Plan Bovenzeeschede: Subreport 1 – Scaldis: a 3D Hydrodynamic Model for the Scheldt Estuary. Version 5.0. *WL Rapporten*, 13_131. Flanders Hydraulics Research: Antwerp, Belgium.

Smolders, S.; De Maerschalck, B.; Plancke, Y.; Vanlede, J.; Mostaert, F. (2019). Integraal Plan Bovenzeeschede: Subreport 10 – Scaldis Sand: a sand transport model for the Scheldt estuary. Version 2.0. *FHR Reports*, 13_131_10. Flanders Hydraulics Research: Antwerp.

Smolders, S.; Bi, Q.; Vanlede, J.; Mostaert, F. (in voorbereiding). Integraal plan Bovenzeeschede: Sub report 6 – Scaldis Mud: a Mud Transport model for the Scheldt Estuary. Version 4.0. *FHR Reports*, 13_131_6. Flanders Hydraulics Research: Antwerp.

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.; 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.; Maximova, T.; Dujardin, A.; Smolders, S.; Vandenbruwaene, W.; Mostaert, F. (2020). Agenda for the Future – Historical evolution of tides and morphology in the Scheldt Estuary: Subreport 3 – Calibration and validation of historical hydrodynamic models. Version 3.0. *FHR Reports*, 14_147_3. Flanders Hydraulics Research: Antwerp.

Talmon A.M.; Struiksma N.; Van Mierlo M.C.L.M. (1995). Laboratory measurements of the direction of sediment transport on transverse alluvial-bed slopes. *J. of Hydr. Res.*, 33(4): 495–517.

Tassi, P. (2017). Sisyphé User manual. Version 7.2. EDF-R&D, Chatou, Frankrijk.

Van Bendegom, L. (1947). Enige beschouwingen over riviermorfologie en rivierverbetering. *De Ingenieur*, 59(4), 1–11.

Van Dijk, W. M.; Mastbergen, D. R.; van den Ham, G. A.; Leuven, J. R. F. W.; Kleinhans, M. G. (2018). Location and probability of shoal margin collapses in a sandy estuary. *Earth Surf. Process. Landforms*, 43: 2342–2357. doi:10.1002/esp.4395.

Vandebroek, E.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2017). Hydrodynamics and Sediment Dynamics at the mouth of the Schelde Estuary: Factual data report for frame- measurements at Drempel van Hansweert in May/June 2016. Version 1.0. *WL Rapporten*, 00_128. Flanders Hydraulics Research, Antea Group & VUB: Antwerp, Belgium.

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.

Villaret, C.; Hervouet, J.-M.; Kopmann, R.; Merkel, U.; Davies, A.G. (2013). Morphodynamic modeling using the Telemac finite-element system. *Comput. and Geosci.* 53, 105-113. doi:10.1016/j.cageo.2011.10.004

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