

17\_088\_7 WL rapporten

# Agenda v/d Toekomst Sedimenttransport op verschillende tijdschalen

Deelrapport 7 Resultaten lange termijn morfologische simulaties

DEPARTEMENT MOBILITEIT & OPENBARE WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

# Agenda v/d Toekomst – Sedimenttransport op verschillende tijdschalen

Deelrapport 7 – Resultaten lange termijn morfologische simulaties

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



Cover figuur © Vlaamse overheid, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Waterbouwkundig Laboratorium

#### 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/2020/3241/112

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Stark, J.

**Stark, J.; De Maerschalck, B.; Plancke, Y.; Mostaert, F.** (2020). Agenda v/d Toekomst – Sedimenttransport op verschillende tijdschalen: Deelrapport 7 – Resultaten lange termijn morfologische simulaties. Versie 5.0. WL Rapporten, 17\_088\_7. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

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

#### Documentidentificatie

Opdrachtgever:	VNSC	Ref.:	WL2020F	817_088_7
Keywords (3-5):	Schelde-estuarium; morfologie; Delft3D; TELEMAC			
Kennisdomeinen	Hydraulica en Sediment > Morfologie > Erosie/sedimentatie > Numerieke modelleringen			
Tekst (p.):	37	Bijlager	n (p.):	-
Vertrouwelijk:	🖾 Nee	🛛 Online beschikbaa	r	

Auteur(s)

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	De Maerschalck, B.	Getekend door. Bart De Maerschaldk (Signa Getekend op: 2020-00:07 13:54:34:401:00 Reden: Ik keur dit document goed Baar De Haerschalck
Projectleider:	Plancke, Y.	Getekend door: Yves Plancke (Signature) Getekend op: 2020-05-18 i 6.06.08 + 01.00 Reden: Ik keur di document goed Yves Plancke

#### Goedkeuring

		Getekend door: Frank Mostaert (Signature) Getekend op: 2020-05-07 16:48:31 +01:00 Reden: Ik keur did cournert goed
Afdelingshoofd:	Mostaert, F.	Frank Hostaert



# Abstract

Het onderzoeksproject 'Sedimenttransport op verschillende tijdschalen' tracht de inzichten in de hydro- en sedimentdynamische en morfologische processen op verschillende ruimtelijke- en tijdsschalen 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 resultaten van enkele lange termijn morfologische simulaties gepresenteerd. Deze scenario's staan in het teken van de validatie van het voor deze studie nieuw opgezette complexe numerieke model in Telemac-3D en Sisyphe. 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'. Kennis van de lange termijn trends die deze morfologische modellen produceren is van belang bij de interpretatie en duiding van morfologische simulaties op korte termijn, bijvoorbeeld voor simulaties die het effect van stortingen nabootsen. De analyse van de resultaten concentreert zich op een studiegebied in het oostelijk deel van de Westerschelde. De resultaten van de morfologische modellen worden vergeleken met geobserveerde bathymetrische veranderingen tussen 1980-2001 en tussen 2001-2016. Tot slot is ook een Delft3D simulatie uitgevoerd waarin de effecten van vaargeulonderhoud en het terugstorten van gebaggerd materiaal zijn meegenomen.

Doordat belangrijke processen met het oog op de morfologische ontwikkeling, zoals bagger- en stortactiviteiten, in de meeste morfologische lange-termijn simulaties niet zijn meegenomen is de overeenkomst tussen de modelresultaten en geobserveerde morfologische trends matig. Enkele bathymetrische veranderingen die wel door de morfologische modellen wel goed worden gereproduceerd zijn de algehele verdieping van de hoofdgeulen tussen Terneuzen en Bath en de aangroei van de Plaat van Walsoorden in afwaartse richting. Opvallende afwijkingen tussen de morfologische simulaties en de geobserveerde veranderingen zijn het ontbreken van de verondieping van het Middelgat, migratie van de Schaar van Valkenisse in noordelijke in plaats van zuidelijke richting en de sedimentatieband aan de westrand van de Platen van Ossenisse waar in werkelijkheid sprake was van erosie tussen 2001 en 2016.

Een vergelijking tussen de Telemac-3D/Sisyphe en Delft3D simulaties laat zien dat de met het Delft3D model gesimuleerde morfologische ontwikkeling na tien jaar sterker is. Ook worden enkele morfologische ontwikkelingen verschillend weergegeven in beide modellen. Op basis van de huidige modelresultaten kan geconcludeerd worden dat het implementeren van baggeren en storten essentieel is om meerjarige morfologische ontwikkelingen te kunnen simuleren. Daarnaast wordt het verbeteren van de representatie van de stromingspatronen rondom de Platen van Ossenisse gezien als belangrijke voorwaarde om de betrouwbaarheid van lange termijn morfologische modellering (i.e., met name voor de Telemac-3D/Sisyphe simulaties) aldaar te verbeteren.

# Inhoudstafel

Ab	stract	I	11
Inl	noudsta	afel	V
Lij	st van d	de tabellenV	11
Lij	st van d	de figuren VI	11
1	Intro	oductie	1
	1.1	Situering	1
	1.2	Doelstelling	1
	1.3	Studiegebied	2
	1.4	Bestaand modelinstrumentarium	3
	1.5	Leeswijzer	3
2	Mod	lelopzet	4
	2.1	Modelrooster	4
	2.2	Bathymetrische gegevens	6
	2.3	Afwaartse randvoorwaarden	7
	2.4	Opwaartse randvoorwaarden	9
	2.5	Randvoorwaarden sedimenttransport	9
	2.6	Beschikbaarheid sediment op de bodem 1	0
	2.7	Saliniteit1	1
	2.8	Turbulentiemodellering1	2
	2.9	Bodemruwheid	2
	2.10	Overige modelinstellingen	4
	2.11	Overige instellingen morfologisch model1	5
3	Geo	bserveerde morfologische verandering op de lange termijn1	8
	3.1 Terneu	De geobserveerde morfologische verandering wordt besproken voor het studiegebied tusse Izen en Bath.	n 8
	3.1.1	l 1980-2001	8
	3.1.2	2 2001-2016	8
4	Resu	ıltaten lange-termijn simulaties 2	1
	4.1	Telemac-3D/Sisyphe simulaties 2	1
	4.1.1	1980-simulatie	1
	4.1.2	2 2001-simulatie	2

	4.1.3	3 2016-simulatie	24
	4.2	Delft3D simulaties	26
	4.2.2	1 2016 simulatie	26
	4.2.2	2 2016 simulatie met baggeren en storten	27
5	Disc	ussie en conclusies	33
	5.1	Modelprestatie Telemac-3D/Sisyphe	33
	5.2	Modelprestatie Delft3D	33
	5.3	Vergelijking Telemac-3D/Sisyphe vs. Delft3D	34
	5.4	Verbeterpunten morfologische modellen	34
	5.5	Conclusies	34
6	Refe	erenties	36

# Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Amplitude- en fasecorrecties aan afwaartse rand op basis van ZUNO modelresultaten	8
Tabel 2 – Opwaartse randvoorwaarden (debiet).	. 9
Tabel 3 – Basisinstellingen Telemac-3D model	14
Tabel 4 – Basisinstellingen Delft3D-NeVla model	15
Tabel 5 – Basisinstellingen morfologisch model Telemac / Sisyphe	16
Tabel 6 – Basisinstellingen morfologisch model Delft3D-NeVla	17
Tabel 7 – Basisinstellingen sediment in Delft3D-NeVIa simulatie	17
Tabel 8 – Verdeling van gebaggerd sediment over stortzones	28

# Lijst van de figuren

Figuur 1 – Overzichtskaart van geulen en platen in het studiegebied 2
Figuur 2 – Nieuw opgezet modelrooster (rood) en rooster van het reeds bestaande Scaldis model (blauw). 5
Figuur 3 – Illustratie van het Delft3D-NeVla rooster
Figuur 4 – Overzicht van de ZUNO-gridcellen (rood) en Telemac-nodes (blauw) die zijn gebruikt in de nesting- procedure
Figuur 5 – Opgelegde harmonische waterstandsreeks aan de afwaartse rand voor morfologische simulaties
Figuur 6 – Opgelegd morfologisch getij aan de afwaartse rand voor morfologische simulaties met Delft3D- NeVla
Figuur 7 – Dikte sedimentlaag in Westerschelde in het door Stark et al. (2019) gebruikte DELFT-3D model.10
Figuur 8 – Initieel saliniteitsveld in Telemac 11
Figuur 9 – Initieel saliniteitsveld in Delft3D-NeVIa11
Figuur 10 – Manning's ruwheidsveld in het Telemac-3D model13
Figuur 11 – Manning's ruwheidsveld Westerschelde in het door Stark <i>et al.</i> (2019) gebruikte Delft3D model
Figuur 12 – Geobserveerde morfologische verandering in de oostelijke helft van de Westerschelde tussen 1980 en 2001
Figuur 13 – Geobserveerde morfologische verandering in de oostelijke helft van de Westerschelde tussen 2001 en 2016
Figuur 14 –Bathymetrie in de oostelijke helft van de Westerschelde in 1980 (boven), 2001 (midden) en 2016 (onder) 20
Figuur 15 – Gemodelleerde bathymetrie in de oostelijke helft van de Westerschelde na een tienjarige Telemac-3D/Sisyphe simulatie met 1980 als startjaar
Figuur 16 – Gemodelleerde morfologische verandering in de oostelijke helft van de Westerschelde in een tienjarige Telemac-3D/Sisyphe simulatie met 1980 als startjaar
Figuur 17 – Gemodelleerde bathymetrie in de oostelijke helft van de Westerschelde na een tienjarige Telemac-3D/Sisyphe simulatie met 2001 als startjaar
Figuur 18 – Gemodelleerde morfologische verandering in de oostelijke helft van de Westerschelde in een tienjarige Telemac-3D/Sisyphe simulatie met 2001 als startjaar
Figuur 19 – Gemodelleerde bathymetrie in de oostelijke helft van de Westerschelde na een tienjarige Telemac-3D/Sisyphe simulatie met 2016 als startjaar
Figuur 20 – Gemodelleerde morfologische verandering in de oostelijke helft van de Westerschelde in een tienjarige Telemac-3D/Sisyphe simulatie met 2016 als startjaar
Figuur 21 – Gemodelleerde bathymetrie in de oostelijke helft van de Westerschelde na een tienjarige Delft3D simulatie met 2016 als startjaar
Figuur 22 – Gemodelleerde morfologische verandering in de oostelijke helft van de Westerschelde in een tienjarige Delft3D simulatie met 2016 als startjaar

Figuur 23 – Vaargeulpolygoon onderverdeeld in secties (donkerblauw) met bijbehorende stortzones (rood) in het oostelijke deel van de Westerschelde voor de Delft3D simulatie met vaargeulonderhoud en startjaar 2016
Figuur 24 – Overzicht van geschematiseerde vaargeul en stortzones in de oostelijke helft van de Westerschelde
Figuur 25 – Gemodelleerde morfologische verandering in de oostelijke helft van de Westerschelde in een tienjarige Delft3D simulatie met de module voor baggeren en storten geactiveerd en 2016 als startjaar 30
Figuur 26 – Verschil in gemodelleerde morfologische verandering in de oostelijke helft van de Westerschelde tussen tienjarige Delft3D simulaties met en zonder de module voor baggeren en storten
Figuur 27 – Jaarlijkse baggerhoeveelheden in verschillende geulsegmenten van de Westerschelde in een tienjarige Delft3D simulatie met 2016 als startjaar
Figuur 28 – Jaarlijkse storthoeveelheden in verschillende geulsegmenten van de Westerschelde in een tienjarige Delft3D simulatie met 2016 als startjaar

# 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 lange termijn (i.e., jaren tot decennia) in sedimenttransportprocessen bestudeerd. Hiervoor wordt onder meer gebruik gemaakt van sedimenttransportmodellering en morfologische modellering.

Voor de complexe morfologische modellering wordt een numeriek model opgezet in Telemac-3D en Sisyphe. Het model werd afgeleid van het bestaande Scaldis-model. In voorliggend rapport wordt de modelprestatie van het zandtransportmodel met betrekking tot de reproductie van morfologische veranderingen op de lange termijn onderzocht. Dit model kan uiteindelijk ingezet worden om de invloed van stortstrategieën op de lange termijn morfologische processen in het estuarium te onderzoeken. Ook wordt de prestatie van een gelijkaardig morfologisch model in Delft3D onderzocht, waarop de verschillen en overeenkomsten tussen beide modellen bediscussieerd worden.

### 1.2 Doelstelling

Voordat een morfologisch model van het Schelde-estuarium ingezet kan worden om reële cases, zoals het effect van stortingen in diepe delen, te bestuderen dient eerst de algemene modelprestatie onderzocht te worden. Dit rapport behandelt derhalve de modelprestatie van het aan Telemac-3D gekoppelde zandtransportmodel "Sisyphe" en van het al bestaande Delft3D-NeVla model met betrekking tot de representatie van morfologische veranderingen op een tijdschaal van ordegrootte één tot twee decennia. Dit betreft een kwalitatieve analyse van de gemodelleerde trends, alsmede een kwalitatieve vergelijking tussen de gemodelleerde en geobserveerde trends. Een kwantitatieve vergelijking wordt op voorhand weinig zinvol geacht vanwege de doorgaans matige prestatie van lange termijn morfologische modellen in dat opzicht.

Daarnaast geven de resultaten van lange termijn morfologische simulaties de intrinsieke morfologische trends van morfologische modelsimulaties weer. Deze trends moeten gekend zijn om (korte termijn) morfologische modelresultaten voor specifieke onderzoeksvragen of case studies (e.g. stortingen in diepe delen of aanzanding op drempels) te kunnen duiden.

Vanwege verschillen in schematisering van onder meer de afwaartse rand, de dikte van de sedimentlaag en hellingeffecten tussen beide modellen wordt een één-op-één vergelijking van de modelresultaten met deze modellen bemoeilijkt. Morfologische veranderingen gerelateerd aan slibdynamiek vallen overigens buiten de scope van dit rapport.

## 1.3 Studiegebied

De focus van het onderzoek ligt in eerste instantie op de oostelijke helft van de Westerschelde en met name het gebied 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 verbeterede inzichten (o.a. verspreiding van gestorte specie) om de toekomstige stortstrategie optimaal in te kunnen vullen. Dit beperkte studiegebied omvat het Gat van Ossenisse, de Overloop van Hansweert, de Platen van Ossenisse, 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.



## 1.4 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. In het kader van AvdT-project "Historische evolutie getij en morfologie" (thema 4 binnen AvdT) werd het Scaldis model hydrodynamisch voor meerdere historische situaties (i.e., voor 1930, 1960, 1980, 2001 en 2013) gevalideerd (Stark *et al.*, 2020a).

Naast de waterbeweging is dit model in staat het cohesief en niet-cohesief sediment transport (online) in delen van het estuarium te modelleren. Het sediment in dit studiegebied bestaat overwegend uit zandig materiaal, waarvoor de Sisyphe module binnen Telemac gebruikt kan worden voor de berekening van het sedimenttransport.

#### Delft3D - NeVla

Een ander model van het Schelde-estuarium dat voor dit onderzoek beschikbaar is het tweedimensionale (2D-h) Delft3D-NeVla model (zie Maximova *et al.*, 2009 voor een uitvoerige kalibratie van de waterbeweging). 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 Delft3D-NeVla model specifiek gekalibreerd om gemeten stroomsnelheden en sedimenttransporten rond de Drempel van Hansweert te simuleren.

Er werden door Stark *et al.* (2019) reeds langdurige morfologische simulaties uitgevoerd met de voor dit gebied gekalibreerde versie van het Delft3D-NeVla model. Met dit laatste model zal aanvullend een langdurige morfologische simulatie uitgevoerd worden waarin de effecten van onderhoudsbaggerwerken geïmplementeerd worden. De resultaten met beide morfologische kunnen dus onderling vergeleken worden.

### 1.5 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 omvat een omschrijving van de modelopzet, gebruikte modelinstellingen en randvoorwaarden in Telemac-3D/Sisyphe en Delft3D-NeVla.

In Hoofdstuk 3 worden vervolgens eerst de geobserveerde morfologische veranderingen in het studiegebied tussen Terneuzen en Walsoorden getoond voor de periode 1980-2016.

Vervolgens worden in Hoofdstuk 4 de modelresultaten van zowel Telemac-3D/Sisyphe als Delft3D getoond en vergeleken met de geobserveerde veranderingen. Er zijn simulaties uitgevoerd met 1980, 2001 en 2016 als startpunt voor de bathymetrische veranderingen. Met het Delft3D-NeVla is tevens een simulatie uitgevoerd waarin bagger- en stortactiviteiten in de Westerschelde geïmplementeerd werden.

Hoofdstuk 5 geeft een overzicht van de belangrijkste bevindingen omtrent de modelprestatie en een vergelijking tussen beide 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 algemene beschrijving van de sediment transport module Sisyphe is te vinden in Villaret et al. (2013) of in de Sisyphe 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). 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, zonder dat andere delen van het modelrooster hierdoor beïnvloed worden. Deze software is specifiek ontwikkeld om modelroosters te optimaliseren met betrekking tot eindige elementen gebaseerde software.

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 het voor dit project opgezette model in de Boven-Zeeschelde grover gemaakt en is de geïncludeerde kustzone kleiner dan in Scaldis. Ook zijn de overstromingsgebieden langs de Zeeschelde niet geïncludeerd. Het volledige modelrooster dat hier is gebruikt is weergegeven in Figuur 2 samen met het modelrooster van het Scaldis model.

De modelresolutie in 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 knooppunten (nodes) in het nieuw opgezette mesh bedraagt 149020 in 2D. Het aantal elementen in 2D bedraagt 278405.



#### Figuur 2 – Nieuw opgezet modelrooster (rood) en rooster van het reeds bestaande Scaldis model (blauw).

#### **3D rooster**

Het 3D model telt vijf sigmalagen, 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·*h* (i.e., bodem)
- z\*(2)=0.12·h
- z\*(3)=0.30·h
- z\*(4)=0.60·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 3). 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 in Deelrapport 3 (Stark *et al.*, 2020b) werd de afwaartse rand van het model afgesneden ter hoogte van de lijn Westkapelle – Cadzand (witte lijn op Figuur 3) om de rekentijd te reduceren. Voor het doorrekenen van morfologische simulaties in dit rapport 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 3 – Illustratie van het Delft3D-NeVla rooster



### 2.2 Bathymetrische gegevens

Er zijn morfologische modellen opgezet met de bathymetrie van 2016, 2001 en 1980 als startpunt.

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 Ossenisse 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).

Voor de bathymetrische gegevens van 1980 en 2001 is gebruik gemaakt van dezelfde data als in Stark *et al.* (2020a), waar historische Scaldis modellen zijn opgezet voor onder meer deze tijdsperiodes.

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

#### **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' zonder windinvloed. Deze resultaten zijn afkomstig uit de CSM en ZUNO modellen in SIMONA (zie voor meer informatie: Leyssen et al., 2012 en Maximova et al., 2016). Figuur 4 toont de nodes en gridcellen die zijn gebruikt om het voor deze studie nieuw opgezette Telemac modelrooster in het ZUNO-model te nesten.

De harmonische componenten uit deze modeltrein zijn vervolgens gecorrigeerd op basis van een vergelijking van de ZUNO modelresultaten met waterstandsmetingen in het mondingsgebied. 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. 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.

De afwaartse randvoorwaarden voor de lange-termijn morfologische modelsimulaties zijn opgelegd voor één springtij-doodtij-cyclus (i.e., 2 mei 2016 tot en met 31 mei 2016; Figuur 5), die vijf keer wordt herhaald. Alle Telemac-3D/Sisyphe simulaties hebben dus een hydrodynamische tijdsduur van 150 dagen, een *MorFac* van 12.25 en representeren daarmee een morfologische tijdsduur van ongeveer tien jaar. Deze simulatieduur van tien jaar verschilt van de periodes waarover de geobserveerde morfologische veranderingen worden beschouwd in Hoofdstuk 3 (i.e., 1980-2001 en 2001-2016), maar laat wel een kwalitatieve analyse toe. In dit opzicht wordt benadrukt dat de lange termijn simulaties vooral dienen om de autonome morfologische trends in de morfologische modellen te identificeren ten behoeve van een betere interpretatie van morfologische modelresultaten op kortere termijn (i.e., ~1 jaar).



Figuur 4 – Overzicht van de ZUNO-gridcellen (rood) en Telemac-nodes (blauw) die zijn gebruikt in de nesting-procedure.

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 5 – Opgelegde harmonische waterstandsreeks aan de afwaartse rand voor morfologische simulaties.



#### Randvoorwaarden Delft3D-NeVla model

In het Delft3D-NeVla model wordt, evenals in de eerdere Delft3D modelstudies door Meire *et al.* (2017) en Stark *et al.* (2019), aan de afwaartse rand een zogenaamd morfologisch getij opgelegd (Figuur 6) in plaats van de springtij-doodtij-cyclus die in de Telemac-3D/Sisyphe simulaties wordt gebruikt. Dit gegeven vermoeilijkt de vergelijking tussen beide modellen.

Een morfologisch getij is een enkel of dubbel getij dat in een morfologische simulatie, na vermenigvuldiging van de modelresultaten met een morfologische versnellingsfactor, representatief is voor de morfologische uitkomst van een springtij-doodtij-cyclus (e.g. Latteux, 1995; Roelvink *et al.*, 2011) De morfologische tijdsduur van de Delft3D simulatie startend met de bathymetrie van 2016 bedraagt eveneens 10 jaar. Er werd in de Delft3D-NeVla simulaties echter gerekend met een *MorFac* van 24.5 in plaats van 12.25.



### 2.4 Opwaartse randvoorwaarden

In beide modellen worden aan de opwaartse randen (i.e., Boven-Zeeschelde en getij-gebonden zijrivieren) 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 getijstroming (e.g. Stark *et al.*, 2017).

Tabel 2 – Opwaartse randvoorwaarden (debiet).			
	Locatie	Debiet [m <sup>3</sup> /s]	
	Boven-Zeeschelde	30.9	
	Dender	9.8	
	Zenne	10.0	
	Dijle	19.8	
	Grote Nete	4.0	
	Kleine Nete	5.3	

### 2.5 Randvoorwaarden sedimenttransport

#### Telemac/Sisyphe

Het sedimenttransportmodel is aan de afwaartse rand gesloten voor sediment, terwijl de sedimenttoevoer aan de opwaartse debietranden op 0.0 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> is gesteld. Die eerste ingreep is nodig om zones van hoge sedimentatiesnelheden nabij de modelrand te voorkomen en daaruit voortvloeiende instabiele modelresultaten te vermijden. Daarnaast mag verondersteld worden dat de sedimentinflux aan de opwaartse rand voornamelijk uit cohesief sediment bestaat, terwijl de morfologische modellen enkel zandfracties bevatten.

#### Delft3D-NeVla

In het Delft3D-NeVla model is het sedimenttransportmodel aan de afwaartse rand open voor sediment. Er is aan de afwaartse rand een referentieconcentratie van 0.05 kg/m<sup>3</sup> opgelegd. De opwaartse debietranden zijn wel gesloten voor sediment. Verwacht wordt dat er binnen de simulatie periode geen of weinig zand geïmporteerd wordt via de Westerschelde tot het interessegebied waardoor de verschillen in afwaartse randvoorwaarde tussen de twee modellen weinig effect zullen hebben op de resultaten.

## 2.6 Beschikbaarheid sediment op de bodem

#### Telemac/Sisyphe

In de lange termijn morfologische simulaties met Sisyphe is enkel de sedimentbodem in de Westerschelde beschikbaar voor erosie (i.e., door aanpassingen in de Sisyphe subroutine *noerod.f*). De hoofdreden voor deze aanpassing in de modelschematisering is om grote morfologische veranderingen nabij de afwaartse randen te voorkomen. Enkele testsimulaties laten namelijk zien dat sterke morfologische ontwikkelingen nabij de afwaartse rand kunnen leiden tot instabiliteit van het model. Een bijkomend voordeel is dat de invloed van veranderende morfologie in het mondingsgebied en in de Beneden- en Boven-Zeeschelde op de getijvoortplanting door het estuarium hiermee geminimaliseerd wordt. De dikte van de sedimentlaag is in de Westerschelde gesteld op 100 m (i.e., quasi-onbeperkte sediment beschikbaarheid).

#### Delft3D-NeVla

In de instellingen van de Delft3D simulaties door Stark *et al.* (2019) wordt gebruik gemaakt van een harde laag (i.e., variabele initiële dikte van de sedimentlaag). Dit gebeurt op basis van lithologische kaarten (zie Vos *et al.*, 2016a). De initiële dikte van de sedimentlaag in de Boven-Zeeschelde en tijgebonden zijrivieren is op 0 m gesteld. Figuur 7 weergeeft de initiële dikte van de sedimentlaag in de Westerschelde. Ook het verschil in initiële dikte van sedimentlagen maakt een vergelijking tussen beide modellen lastiger.

Het beschikbare sediment is in de morfologische simulaties met Delft3D-NeVla dus verschillend van het beschikbare sediment in de simulaties met Telemac-3D / Sisyphe.



## 2.7 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 zijn 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 8). 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 9.



## 2.8 Turbulentiemodellering

#### Telemac

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). Het verticaal turbulentiemodel dat wordt gebruikt is het *'mixing length model'* van Nezu en Nakagawa. Het Smagorinsky model wordt gebruikt voor de horizontale turbulente stroming.

#### 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 m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>

Background Horizontal eddy diffusivity = 1.0 m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>

### 2.9 Bodemruwheid

In de gebruikte modellen is de bodemruwheid ruimtelijk variërend. Dit kan een effect hebben op de gemodelleerde morfologische resultaten omdat de ruwheidscoëfficiënt wordt gebruikt bij de berekening van het sedimenttransport (e.g. Meire et al., 2017). Met name scherpe overgangen in bodemruwheid dienen vermeden te worden. Daarom verdient een ruimtelijk constante bodemruwheid in eerste instantie de voorkeur bij morfologisch modelonderzoek. Een ruimtelijk constante ruwheidscoëfficiënt gaat hier echter ten koste van de representatie van de hydrodynamica. Zo is een correcte weergave van de complexe stromingspatronen rondom de Platen van Ossenisse, een belangrijk studiegebied binnen dit project, afhankelijk van een ruimtelijk variabel ruwheidsveld (Stark et al., 2019). Beide opties hebben dus hun nadelen. Voor de lange termijn simulaties in dit rapport is ervoor gekozen om de ruimtelijk variërende ruwheidsvelden van de hydrodynamische modellen te behouden. Dit omdat deze lange termijn simulaties vooral ondersteunend zijn en dienen om het begrip van morfologische modelresultaten op korte termijn beter te kunnen interpreteren en te duiden. Voor die éénjarige morfologische simulaties wordt de invloed van ruimtelijke variërende ruwheidsvelden kleiner geacht, omdat op die kortere termijn nog geen substantiële veranderingen in het geulen- en platenstelsel worden gemodelleerd. Een meer correcte representatie van de hydrodynamica wordt voor zulke simulaties verkozen boven een ruimtelijk constant ruwheidsveld. In de huidige studie moeten de resultaten op lange termijn derhalve wel met voorzichtigheid worden geïnterpreteerd omdat de ligging van geulen en platen na een morfologische lange termijnsimulatie beïnvloedt kan zijn door het opgelegde ruwheidsveld.

#### Telemac

In eerste instantie wordt het ruwheidsveld gebruikt zoals door Smolders *et al.* (2016) is gekalibreerd voor het Scaldis model (Figuur 10). In dit ruwheidsveld is de Manning's ruwheidcoëfficiënt *n* in het studiegebied ongeveer  $n = 0.022 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$ .

#### 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 11).

Figuur 10 – Manning's ruwheidsveld in het Telemac-3D model.



Figuur 11 – Manning's ruwheidsveld Westerschelde in het door Stark et al. (2019) gebruikte Delft3D model.



## 2.10 Overige modelinstellingen

#### Telemac-3D

De overige generieke modelinstellingen voor het hydrodynamisch model in Telemac-3D zijn overgenomen van het gevalideerde Scaldis 3D model (Smolders *et al.*, 2016).

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	

#### Delft3D-NeVla

De algemene modelinstellingen van het Delft3D-NeVla model zijn opgesomd in Tabel 4.

Parameter	Waarde	
Time step	0.05 min	
Salinity	True	
Sediment	True	
Secondary Flow	True	
Reflection parameter	100 s <sup>2</sup>	
Gravity	9.81 m/s <sup>2</sup>	
Water density	1023 kg/m <sup>3</sup> (depends on salinity)	
Air density	1 kg/m <sup>3</sup>	
Temperature	15 °C	
Wall roughness	Free	
Horizontal eddy viscosity	0.1 m²/s	
Horizontal eddy diffusivity	1.0 m²/s	
Drying and flooding	Centres and faces	
Depth specified at	Grid cell corners	
Depth at centre	Max	
Depth at faces	Mor	
Threshold depth	0.05 m	
Marginal depth	0.05 m	
Smoothing time	120 min	
Advection scheme for momentum	cyclic	
Advection scheme for Transport	cyclic	
Horizontal Forester filter	True	
Map results Interval	745 min	
History output interval	10 min	

### 2.11 Overige instellingen morfologisch model

De modelinstellingen voor sedimenttransport zijn niet identiek tussen beide modellen. Dit vanwege verschillen in formuleringen die standaard in de software-modules zijn geïmplementeerd. Zo zijn er bijvoorbeeld verschillen in de implementatie van de Van Rijn sedimenttransportformule en in de formuleringen die zijn gebruikt voor hellingeffecten: i.e., Koch & Flokstra (1981) voor Sisyphe en Ikeda (1984) en Van Rijn (1993) in Delft3D. Ook zijn de ruwheidscoëfficiënten die in de transportformules worden gebruikt verschillend tussen beide modellen.

#### Telemac/Sisyphe

De morfologische simulaties in Sectie 4 zijn uitgevoerd met het voor dit project opgezette modelrooster (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 10) gekoppeld aan de sedimenttransportmodule Sisyphe. Alle instellingen van het hydrodynamisch model zijn zoals eerder in dit hoofdstuk opgesomd. In geen van de Telemac modellen wordt de bagger- en stortmodule toegepast.

Tabel 5 – Basisinstellingen morfologisch model Telemac / Sisyphe			
Paramotor	Waarda		
Sediment diameter	200 um		
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 s·m <sup>-1/3</sup> (i.e., ruimtelijk constant door aanpassing in Sisyphe subroutine coefro_sisyphe.f)		
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 et al., 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)		

#### Delft3D-NeVla

De invoerwaarden en modelconfiguratie voor het door Stark *et al.* (2019) gekalibreerd sedimenttransportmodel voor de Drempel van Hansweert worden in onderstaande tabellen opgesomd. In het NeVla-model wordt zowel een run uitgevoerd zonder de implementatie van bagger- en stortactiviteiten als een run waarin de bagger- en stortactiviteiten met behulp van de *'dredging and dumping'*-module in geschematiseerde vorm zijn geïmplementeerd.

Tabel 6 – Basisinstellingen morfologisch model Delft3D-NeVla		
Parameter	Waarde	
Morphological scale factor	24.5	
time interval after which morphological changes will be	1440 min	
threshold sediment thickness for reducing sediment	0.05 m	
Morphological update	true	
Neumann boundary condition for non-cohesive suspended	true	
Include effect of sediment on density gradient	false	
Van Rijn's reference height	$\alpha_{ks} = 1 * \alpha_{ks'} [-]$	
Longitudinal bed gradient factor for bedload transport	α <sub>Bs</sub> = 1.0 [-] (Van Rijn, 1993)	
Transverse bed gradient factor for bedload transport	α <sub>Bn</sub> = 1.5 [-] (Ikeda, 1984)	
Current-related suspended sediment transport factor	1.0	
Current-related bedload transport factor	1.0	
Minimum depth for sediment calculations	0.1 m	
Global / maximum dry cell erosion factor	0 [-]	
Maximum depth for variable THETSD	1.5 m	
Option for $k_{s}$ and $k_{w}$	lopKCW = 1 (i.e., )	
Current related roughness k <sub>s</sub>	RDC = 0.01 m	

Tabel 7 – Basisinstellingen sediment in Delft3D-NeVla simulatie

Parameter	Waarde
Transport formula	Van Rijn (1993)
Reference density for hindered settling calculations	c <sub>ref</sub> = 1600 kg/m <sup>3</sup>
Option for determining suspended sediment diameter	lopSus = 0 (i.e., Van Rijn, 1993 method)
Sediment Type	Sand
Specific density of sediment fraction	$P_{sol} = 2650 \text{ kg/m}^3$
Sediment diameter	d <sub>50</sub> = 200 μm
Dry bed density	CDryB = $1600 \text{ kg/m}^3$
Factor for determining suspended sediment diameter	FacDSS = 1 (i.e., $D_{sus}$ = FACDSS · $d_{50}$ )

# 3 Geobserveerde morfologische verandering op de lange termijn

# 3.1 De geobserveerde morfologische verandering wordt besproken voor het studiegebied tussen Terneuzen en Bath.

Figuur 12 en Figuur 13 geven verschilplots voor de periodes 1980-2001 en 2001-2016. Figuur 14 toont de geobserveerde bathymetrie van dit gebied voor 1980, 2001 en 2016.

#### 3.1.1 1980-2001

De morfologische veranderingen tussen 1980 en 2001 worden gekenmerkt door een aantal ontwikkelingen (Figuur 12). De sterkste ontwikkelingen zijn de uitsnijding en verdieping in de buitenbocht van de Overloop van Valkenisse en het Zuidergat (i.e., A in Figuur 12), uitsnijding in de vorm van een sterke erosiezone in de buitenbocht van de Overloop van Hansweert ter hoogte van de Molenplaat (i.e., B in Figuur 12) en de sterke sedimentatie in het Middelgat en aansluitend de Geul van Baarland (i.e., C in Figuur 12). Deze ontwikkeling is gerelateerd aan de grootschalige veranderingen in deze macrocel, waar het Middelgat (ebgeul) in de loop van de 20<sup>e</sup> eeuw geleidelijk verondiepte, terwijl de vloedgeul (Gat van Ossenisse en Overloop van Hansweert) geleidelijk verdiepte. De geobserveerde morfologische ontwikkeling in het Gat van Ossenisse is beperkt en bestaat uit verschillende zones van lichte sedimentatie of erosie (i.e., D in Figuur 12). Het westelijke uiteinde van de Everingen verondiept tijdens de periode tussen 1980 en 2001 (i.e., E in Figuur 12), evenals de zuidelijke inloop van het Middelgat. De ontwikkeling van de overige geulen bestaat uit een lichte sedimentatie ter hoogte van de Drempel van Hansweert (i.e., F in Figuur 12). In deze periode breekt de Schaar van Valkenisse juist door de Platen van Valkenisse in de richting van de Overloop van Valkenisse (i.e., G in Figuur 12). Op de Platen van Valkenisse is overwegend sprake van lichte sedimentatie (i.e., H in Figuur 12). Ook op de Platen van Ossenisse is sprake van sedimentatie, met name aan de zuid- en westkant (i.e., I in Figuur 12), wat resulteert in een vernauwing van de Schaar van Ossenisse. De ondiepte aan de noordoostkant van de plaat ondergaat lichte erosie tussen 1980 en 2001. De morfologische ontwikkeling van de Plaat van Walsoorden gedurende deze periode wordt gekenmerkt door sterke erosie of afkalving aan de afwaartse kant en sedimentatie aan de zuidkant (i.e., J in Figuur 12). Geobserveerde verdiepingen in vaargeulen kunnen deels het gevolg zijn geweest van vaargeulverruiming die omstreeks 1997 plaatsvond.

#### 3.1.2 2001-2016

De morfologische ontwikkelingen tussen 2001 en 2016 (Figuur 13) zijn in een aantal opzichten verschillend van de veranderingen tussen 1980 en 2001. In deze latere periode is de meest kenmerkende morfologische verandering de algehele verdieping van de hoofdgeul lopende van het Gat van Ossenisse (i.e., A in Figuur 13), naar de Overloop van Hansweert (i.e., B in Figuur 13), de Diepe put van Hansweert, Drempel van Hansweert (i.e., C in Figuur 13), het Zuidergat (i.e., D in Figuur 13) en de Overloop van Valkenisse (i.e., E in Figuur 13). Deze ontwikkeling kan deels gerelateerd worden aan de verruiming van de vaargeul die in 2010 plaats heeft gevonden. De verdieping van de Overloop van Hansweert (inclusief de Diepe put van Hansweert en de Drempel van Hansweert) en Overloop van Valkenisse tussen 2001 en 2016 is wel minder sterk dan in de voorgaande periode tussen 1980 en 2001. Een andere kenmerkende ontwikkeling van het geulensysteem is net als in de voorgaande periode de sterke sedimentatie van het Middelgat en met name de zuidelijke inloop van het Middelgat (i.e., F en G in Figuur 13). De vloedschaar aan het opwaartse uiteinde van de Everingen migreert tussen 2001 en 2016 in zuidelijke richting (i.e., H in Figuur 13). In het gebied tussen

Walsoorden en Bath is er sprake van lichte aanzanding en verondieping in de Schaar van Waarde (i.e., I in Figuur 13), terwijl de Schaar van Valkenisse juist verder uitdiept en in zuidwestelijke richting migreert (i.e., J in Figuur 13). Dat laatste betekent tevens dat de opwaartse kant van de Plaat van Walsoorden erodeert. Aan de afwaartse (i.e., noordwestelijke) zijde groeit de Plaat van Walsoorden juist aan tussen 2001 en 2016 (i.e., K in Figuur 13), dit in tegenstelling tot de ontwikkeling in de periode 1980-2001. Op de Platen van Ossenisse is er sprake van een erosieve trend aan de westrand, terwijl het ondiepe plateau tussen de plaat en de Drempel van Hansweert juist verondiept (i.e., L in Figuur 13). Deze ontwikkelingen zijn omgekeerd aan de trends die tussen 1980 en 2001 werden geobserveerd. Tevens ontstaat er een klein kortsluitgeultje tussen dit ondiepe plateau en de Platen van Ossenisse zelf.



Figuur 13 – Geobserveerde morfologische verandering in de oostelijke helft van de Westerschelde tussen 2001 en 2016.







# 4 Resultaten lange-termijn simulaties

De gemodelleerde morfologische ontwikkeling wordt hieronder besproken voor Telemac-3D/Sisyphe simulaties die gestart zijn met de 1980 (i.e., RUN1980), 2001 (i.e., RUN2001) of 2016 (i.e., RUN100) bathymetrie als uitgangspunt. Voor de simulaties met de 2016 bathymetrie als uitgangspunt worden zowel de Telemac-3D/Sisyphe resultaten als de resultaten van het morfologisch model opgezet in de AvdT-studie *"Hydro- en sedimentdynamische en morfologische processen op mesoschaal"* besproken. Voor de simulaties met 1980 of 2001 als uitgangspunt zijn alleen Telemac-3D/Sisyphe simulatie uitgevoerd en kunnen de resultaten vergeleken worden met de geobserveerde morfologische veranderingen in de periodes 1980-2001 en 2001-2016 (zie Hoofdstuk 3). Bij deze vergelijkingen dient in overweging te worden genomen dat bagger- en stortactiviteiten niet worden gesimuleerd in de morfologische modellen.

### 4.1 Telemac-3D/Sisyphe simulaties

#### 4.1.1 1980-simulatie

De met Telemac-3D/Sisyphe gesimuleerde morfologische verandering in een tienjarige 1980-simulatie is weergegeven in Figuur 15 (bathymetrie na tien jaar) en Figuur 16 (sedimentatie-erosie plot). De gemodelleerde ontwikkeling wordt gekenmerkt door een verdieping van de meeste hoofdgeulen in het studiegebied. Het Gat van Ossenisse, de Overloop van Hansweert en de Overloop van Valkenisse zijn aan erosie onderhevig. Ook de opwaartse kant van de Everingen en de Geul van Baarland verdiepen in deze simulatie. Tot slot is er ook een erosiezone zichtbaar in de buitenbocht bij Hansweert, die doorloopt in de Schaar van Waarde. Opvallend is de sterke sedimentatiezone bij de Drempel van Hansweert, welke gelinkt kan worden aan de noordoostelijke migratie van het ondiepe plateau tussen de Platen van Ossenisse en de vaargeul. In de 1980-simulatie komt dit plateau los van de Platen van Ossenisse om een nieuwe plaat te vormen die zich op zijn beurt hecht aan de Plaat van Walsoorden. Tussen Hansweert en Terneuzen is ook een grote sedimentatiezone zichtbaar ter hoogte van de zuidelijke inloop van het Middelgat. Deze inloop verondiept in de simulatie, terwijl de platen en ondieptes tussen het Gat van Ossenisse en de Geul van Baarland in hoogte en omvang toenemen.

De gemodelleerde morfologische veranderingen in de tienjarige 1980-simulatie zijn erg verschillend, zowel kwantitatief als kwalitatief (i.e., let op verschil in kleurschaal bij sedimentatie-erosieplots), van de veranderingen die werden geobserveerd tussen 1980 en 2001. Hierbij dient wel in aanmerking te worden genomen dat de geobserveerde morfologische veranderingen tussen 1980 en 2001 ook sterk zijn beïnvloed door antropogene ingrepen zoals de verruiming van de vaargeulen en vaargeulonderhoud.

De grootste tekortkomingen van de morfologische 1980-simulatie met Telemac-3D/Sisyphe zijn het ontbreken van de verondieping van het Middelgat en de Geul van Baarland, die juist verdiept in de simulatie, het foutief simuleren van de sterke verondieping van het Zuidergat en het foutief simuleren van de loslating van het ondiepe plateau ten oosten van de Platen van Ossenisse welke in werkelijkheid niet zijn voorgekomen. Ook de geobserveerde verandering in ligging en oriëntatie van de geulen aan de opwaartse kant van de Everingen (i.e., Zuid-Everingen en Straatje van Willem), de aanzanding in de Schaar van Ossenisse en het doorbreken van de Schaar van Valkenisse worden niet of verkeerd gesimuleerd in de 1980-simulatie.

Toch zijn er ook trends die wel overeenkomen met de observaties. In zowel model als observatie is er sprake van een algemene verdieping van de geulen in het Gat van Ossenisse, de Overloop van Hansweert en de Overloop van Valkenisse. Ook wordt de plaatranderosie aan de noordkant van de Platen van Ossenisse goed weergegeven. Hetzelfde geldt voor het verondiepen van de zuidelijke inloop van het Middelgat (i.e., tussen de Rug van Baarland en Middelplaat).



Figuur 15 – Gemodelleerde bathymetrie in de oostelijke helft van de Westerschelde na een tienjarige Telemac-3D/Sisyphe simulatie met 1980 als startjaar.

Figuur 16 – Gemodelleerde morfologische verandering in de oostelijke helft van de Westerschelde in een tienjarige Telemac-3D/Sisyphe simulatie met 1980 als startjaar.



#### 4.1.2 2001-simulatie

Figuur 17 en Figuur 18 tonen respectievelijk de gesimuleerde bathymetrie en morfologische verandering na een tienjarige simulatie met Telemac-3D/Sisyphe met als beginjaar 2001. De morfologische ontwikkeling die wordt gemodelleerd met de 2001-simulatie is in veel opzichten gelijkaardig aan die van de 1980-simulatie. Er zijn duidelijke erosiezones in het Gat van Ossenisse, de Everingen, Geul van Baarland, de buitenbocht bij Hansweert en de randen van de Platen van Ossenisse. Ook is er sprake van het loslaten van

het ondiepe plateau ter hoogte van de Drempel van Hansweert, de sedimentatie van het Zuidergat ter hoogte van de Drempel van Hansweert en het ontstaan van een nieuwe kortsluitgeul tussen de Overloop van Hansweert en de Overloop van Valkenisse vlak langs de Platen van Ossenisse. Tevens worden er in deze simulatie ook nieuwe platen gevormd tussen de Middelplaat en de Rug van Baarland. Een klein verschil met de 1980-simulatie is de ontwikkeling van de Schaar van Valkenisse, die in de 2001-simulatie uitdiept en een diepe verbinding vormt met het opwaartse deel van de Overloop van Valkenisse.

Ook de morfologische trends die worden gemodelleerd met de tienjarige 2001-simulatie zijn verschillend ten opzichte van de geobserveerde morfologische veranderingen tussen 2001 en 2016. Er wordt ook met betrekking tot deze vergelijking opgemerkt dat de geobserveerde morfologische veranderingen zijn beïnvloed door bagger- en stortwerkzaamheden in het kader van vaargeulonderhoud, die in de morfologische simulatie niet zijn meegenomen.

De geobserveerde verdieping van de hoofdgeul in het Gat van Ossenisse, de Overloop van Hansweert en de Overloop van Valkenisse wordt redelijk tot goed gesimuleerd in de 2001-simulatie. Hierbij dient vermeld te worden dat deze verdieping in werkelijkheid ook deels een gevolg was van vaargeulverruiming. De afwaartse aangroei op de Plaat van Walsoorden wordt eveneens goed door het model gerepresenteerd. De meest opvallende afwijking in de gemodelleerde morfologische ontwikkeling is het ontbreken van de verondieping van het Middelgat. Hetzelfde geldt voor de het ontbreken van de zuidelijke migratie van de Everingen, welke in het model verdiept. Ook de sedimentatie in het Zuidergat wordt verkeerd gemodelleerd, al kan daarvan gesteld worden dat de geobserveerde erosieve trend sterk is beïnvloed door de baggerwerkzaamheden op de Drempel van Hansweert. Op de Platen van Ossenisse en het ondiepe plateau komen de geobserveerde en gesimuleerde trends beter overeen. Hier is in beide gevallen sprake van afkalving aan de westzijde van de plaat, aanzanding op het ondiepe plateau en erosie of geulvorming tussen dit plateau en de plaat zelf. Het doorbreken van de Schaar van Valkenisse richting de Overloop van Valkenisse wordt door het model redelijk weergegeven, al is deze doorbraak in werkelijkheid in zuidelijke richting gebeurd, terwijl het model dit in oostelijke richting weergeeft. Een laatste afwijking van de gemodelleerde morfologische trends is de sedimentatie opwaarts van de Overloop van Valkenisse bij de Schaar van de Noord. In werkelijkheid is hier tussen 2001 en 2016 sprake geweest van erosie.







#### 4.1.3 2016-simulatie

Figuur 19 en Figuur 20 tonen respectievelijk de gesimuleerde bathymetrie en morfologische verandering na een tienjarige simulatie met Telemac-3D/Sisyphe met als beginjaar 2016. De morfologische trends in de 2016-simulatie zijn eveneens gelijkaardig aan die van de 1980-simulatie en 2001-simulatie. Er is wederom sprake van een uitdieping van de geulen in de Everingen en aansluitend de Geul van Baarland, de vernauwing en verdieping van het Gat van Ossenisse, de lichte erosie in het grootste deel van de Overloop van Hansweert en de uitdieping van de Schaar van Waarde richting de Diepe put van Hansweert. De verdieping van de Overloop van Valkenisse is echter minder sterk in de 2016-simulatie. Andere overeenkomsten zijn de sedimentatie op het ondiepe plateau ten noordoosten van de Platen van Ossenisse, op de Drempel van Hansweert en dientengevolge het aanzanden van het Zuidergat. Net als in voorgaande simulaties is tussen Middelplaat en de Rug van Baarland sprake van een sterke sedimentatiezone die voor nieuwe plaatvorming zorgt. Ook is er een sterke sedimentatiezone zichtbaar in het opwaartse deel van de Overloop van Valkenisse richting de Schaar van de Noord. De ontwikkeling van de Schaar van Valkenisse is wel verschillend in de 2016simultie ten opzichte van de eerdere simulaties. Deze breekt ter hoogte van Baalhoek in zuidelijke richting door naar de Overloop van Valkenisse, terwijl dit in de 2001-simulatie in oostelijke richting gebeurde (i.e., in de 1980-simulatie breekt de Schaar van Valkenisse niet volledig door richting de Overloop van Valkenisse).

Omdat er geen analyse van de morfologische ontwikkeling is gemaakt voor de periode na 2016 kunnen de huidige resultaten van de 2016-simulatie enkel vergeleken worden met de geobserveerde morfologische ontwikkeling tussen 2001 en 2016. Aangezien de meeste gemodelleerde morfologische trends gelijkaardig zijn tussen de 2001-simulatie en de 2016-simulatie levert deze vergelijking nauwelijks nieuwe inzichten op. De erosieve trends in de geulen Gat van Ossenisse, Overloop van Hansweert en Overloop van Valkenisse worden goed weergegeven, terwijl de gesimuleerde aanzanding in het Zuidergat in werkelijkheid niet is opgetreden. Dit laatste kan mogelijk verklaard worden door de intensieve baggeractiviteiten op de Drempel van Hansweert. De tussen 2001 en 2016 geobserveerde verandering in oriëntatie van het opwaartse uiteinde van de Everingen en de verondieping van het Middelgat en de Geul van Baarland worden niet door de 2016-simulatie gereproduceerd. De zuidelijke migratie van de Schaar van Valkenisse wordt ook niet door het model weergegeven. Op de Plaat van Walsoorden en de Platen van Ossenisse is de gemodelleerde morfologische trend wel gelijkaardig aan de geobserveerde trends. In zowel model als observatie is sprake van aanzanding aan de afwaartse rand van de Plaat van Walsoorden, afkalving aan de westrand van de Platen van Ossenisse

en een noordwestelijke migratie van het ondiepe plateau tussen de Platen van Ossenisse en de Drempel van Hansweert waardoor een nieuwe kortsluitgeul ontstaat tussen het Zuidergat en de Overloop van Hansweert. Die laatste geul is echter veel meer uitgesproken in het model, mogelijk doordat de migratie van het plateau in de simulatie niet wordt gelimiteerd door baggerwerkzaamheden op de Drempel van Hansweert.

Figuur 19 - Gemodelleerde bathymetrie in de oostelijke helft van de Westerschelde



Figuur 20 – Gemodelleerde morfologische verandering in de oostelijke helft van de Westerschelde in een tienjarige Telemac-3D/Sisyphe simulatie met 2016 als startjaar.



## 4.2 Delft3D simulaties

#### 4.2.1 2016 simulatie

Figuur 21 en Figuur 22 tonen respectievelijk de gesimuleerde bathymetrie en morfologische verandering na een tienjarige simulatie met Delft3D met als beginjaar 2016 (i.e., NEVLA\_RUN41). De met het Delft3D model gesimuleerde morfologische ontwikkeling in de oostelijke helft van de Westerschelde wordt globaal gekenmerkt door een verdieping van de hoofdgeulen. De Pas van Terneuzen, de Overloop van Hansweert, het Zuidergat, de Overloop van Valkenisse en het Nauw van Bath verdiepen met enkele meters in de tienjarige morfologische simulatie. Hetzelfde geldt voor de opwaartse kant van de Everingen, de Geul van Baarland en het Middelgat, evenals de Schaar van Ossenisse. De diepte-ontwikkeling van het Gat van Ossenisse is in deze simulatie sterk ruimtelijk variërend. Tegenover de uitdieping van de meeste geulen staan enkele gebieden waar sprake is van grootschalige sedimentatie in de tienjarige morfologische simulatie. De grootste sedimentatiegebieden bevinden zich ten zuiden van de Geul van Baarland (i.e., tussen de Middelplaat en de Rug van Baarland) en aan de westkant van de Plaat van Walsoorden. Met betrekking tot de geulontwikkeling valt op dat in de Delft3D simulatie sommige geulen sterk versmallen of ontwikkelen tot een stelsel van smalle diepe geulen (e.g. Everingen, Middelgat, Schaar van Waarde). Opvallend is ook het ontstaan van enkele nieuwe platen tijdens de morfologische simulatie. Aan de afwaartse kant van de Plaat van Walsoorden, in het Gat van Ossenisse en in de Overloop van Hansweert vormen zich smalle platen. Tevens verplaatst het ondiepe plateau tussen de Platen van Ossenisse en de Drempel van Hansweert zich in noordwestelijke richting en ontstaat er net als in de Telemac-3D/Sisyphe simulaties een nieuwe geul tussen deze ondiepte en de Platen van Ossenisse. Het ondiepe plateau sluit in de tienjarige Delft3D simulatie echter niet aan bij de Plaat van Walsoorden, wat inhoudt dat het Zuidergat in de Delft3D simulatie wel open blijft (Figuur 21).

Omdat er geen analyse van de morfologische ontwikkeling is gemaakt voor de periode na 2016 kunnen de huidige resultaten niet vergeleken worden met geobserveerde morfologische ontwikkeling.







4.2.2 2016 simulatie met baggeren en storten

#### Schematisering baggeren en storten

Het effect van baggeren en storten op de lange termijn morfologische ontwikkeling is in een extra Delft3D-simulatie (NEVLA\_RUN43) geschematiseerd met behulp van de 'dredging and dumping'-module in Delft3D. Deze module laat toe binnen bepaalde polygonen de bodemligging te verdiepen als een minimale diepte wordt onderschreden (i.e., onderhoud van vaargeuldiepte) en het op die manier verwijderde sedimentvolume elders binnen andere polygonen te storten (i.e., storten van gebaggerd materiaal).

Het vaargeulonderhoud wordt als volgt geschematiseerd in NEVLA\_RUN43: de onderhoudsdiepte van de vaargeul is gesteld op -14.7 m TAW, waarbij steeds een overdiepte van 0.7 m aangehouden wordt. Al het gebaggerde materiaal wordt in de morfologische simulatie teruggestort in stortzones volgens de fictieve en sterk geschematiseerde verdeling in Tabel 8. Hierbij wordt het materiaal in principe gestort in de eerste stortzone, tenzij hier geen ruimte beschikbaar is. Deze instellingen vormen daarmee een sterke vereenvoudiging ten opzichte van de stortverdeling die werd toegepast in een eerdere morfologische hindcast door Van der Wegen *et al.* (2017).

De polygoon waarbinnen de bodemligging wordt onderhouden en de stortpolygonen van de hoofdstortzones zijn weergegeven in Figuur 23 voor de oostelijke helft van de Westerschelde. Tot slot dient nog opgemerkt te worden dat de geïmplementeerde bagger- en stortstrategie niet exact overeen komt met de strategie die tussen 2001 en 2016 werd toegepast.

Figuur 23 – Vaargeulpolygoon onderverdeeld in secties (donkerblauw) met bijbehorende stortzones (rood) in het oostelijke deel van de Westerschelde voor de Delft3D simulatie met vaargeulonderhoud en startjaar 2016 (i.e., NEVLA\_RUN43).



Tabel 8 – Verdeling van gebaggerd sediment over stortzones

Secties vaargeul	Stortzone	Alternatieve stortzone
Drempel van Vlissingen	SN11	SN31
Drempel van Borssele Pas van Terneuzen Put van Terneuzen	SN31	SN11
Gat van Ossenisse Overloop Hansweert Drempel van Hansweert	SH41	SN41 Plaat van Walsoorden
Drempel van Walsoorden Overloop van Valkenisse	SH51	SN51 Plaat van Walsoorden
Drempel van Valkenisse Bocht van Bath	SH61	SN61

#### Morfologische resultaten simulatie met baggeren en storten

Figuur 24 en Figuur 25 tonen de gesimuleerde bathymetrie en morfologische verandering na een tienjarige Delft3D-simulatie met als beginjaar 2016 waarin de invloed van vaargeulonderhoud werd gesimuleerd. Figuur 26 geeft het verschil in morfologische ontwikkeling na tien jaar tussen de simulatie met vaargeulonderhoud en de simulatie zonder vaargeulonderhoud.

De gemodelleerde bathymetrie na de tienjarige simulatie komt beter overeen met de geobserveerde bathymetrie (i.e., initiële situatie) dan wanneer er geen bagger- en stortmodule wordt gebruikt. De onveranderde ligging van de hoofdgeulen, de noordwaartse migratie van de Platen van Ossenisse en de aanzanding op de ondiepte ten noordoosten van deze plaat komen in deze simulatie bijvoorbeeld overeen met geobserveerde trends.

De invloed van baggeren- en storten op de gemodelleerde lange termijn morfologische ontwikkeling is het grootst binnen en nabij de bagger- en stortpolygonen. Het gesimuleerde vaargeulonderhoud voorkomt de ontwikkeling van nieuwe kleine platen in de geul ter hoogte van het Gat van Ossenisse, de Overloop van Hansweert en de Overloop van Valkenisse. De huidige ligging van de hoofdgeul blijft daar behouden. Uiteraard is een ander gevolg dat er sedimentatie plaatsvindt in en nabij de belangrijkste stortzones. Vooral bij stortzones SH41 aan de oostrand van het gat van Ossenisse, stortzones SH61 en SN61 in de Bocht van Bath neemt de bodemhoogte met enkele meters toe als de invloed van bagger- en stortactiviteiten mee wordt genomen in de tienjarige morfologische simulatie. Het effect van storten is kleiner in stortzone SH51 omdat de stortcapaciteit hier beperkt is door de minimale diepte die vereist is (i.e., deze stortzone ligt bijna volledig in de vaargeulpolygoon).

Een ander opvallend effect van het implementeren van bagger- en stortactiviteiten in de morfologische simulatie is de morfologische ontwikkeling van de Platen van Ossenisse, Overloop van Hansweert, Drempel van Hansweert en het ondiepe plateau wat aldaar tussen plaat en hoofgeul gelegen is. In de simulatie met vaargeulonderhoud blijft de ligging van het platen- en geulensysteem in dit gebied relatief ongewijzigd, terwijl in de gemodelleerde ontwikkeling zonder vaargeulonderhoud sprake was van een noordoostelijke migratie van het ondiepe plateau in combinatie met het ontstaan van een nieuwe ebgeul tussen het plateau en de Platen van Ossenisse. In de simulatie met vaargeulonderhoud is na tien jaar morfologische ontwikkeling juist sprake van sedimentatie op de huidige ondiepte, in plaats van een doorbraak van de zich ontwikkelende ebgeul. Wel wordt ook in de simulatie met vaargeulonderhoud een, weliswaar minder sterke, noordelijke migratie van de Overloop van Hansweert gesimuleerd.

#### Baggerhoeveelheden

Figuur 27 en Figuur 28 geven de bagger- en stortvolumes per gesimuleerd jaar weer voor de polygonen zoals gedefinieerd in Figuur 23. Het gebaggerd volume voor de Bocht van Bath is niet weergegeven omdat de resultaten niet voor de hele simulatieduur bruikbaar bleken. Door een inconsistentie in de schematisering worden in dit segment onrealistisch hoge baggervolumes verkregen vanaf het moment dat het stortvak SH61 ondieper wordt dan de minimale geuldiepte (i.e., er is namelijk sprake van een kleine overlap tussen baggeren stortpolygoon). Om dezelfde reden is ook de stortintensiteit van stortvak SH61 niet getoond.

Voor alle geulsegmenten geldt dat de baggerhoeveelheden in de eerste jaren van de simulatie geleidelijk toenemen. Mogelijk duurt het een tijd voor de grootschalige morfologische ontwikkelingen die hierboven staan beschreven van invloed zijn op de bodemligging binnen het vaargeulpolygoon. De initiële morfologische respons van het model leidt dus niet tot een hogere baggerhoeveelheid in het eerste jaar. De hoogste baggerintensiteit wordt vanaf jaar 4 gemodelleerd op de drempels van Vlissingen, Hansweert en Valkenisse (i.e., tot ong. 2.7 Mm<sup>3</sup>/jaar). Na jaar 7 nemen de baggerhoeveelheden op de drempels van Hansweert en Vlissingen iets af tot ongeveer 2.0 Mm<sup>3</sup>/jaar, terwijl de hoeveelheden op de drempel van Valkenisse juist pieken in jaar 9 en jaar 10. De baggerhoeveelheden op de Drempel van Hansweert komen in het tweede deel van de simulatie daarmee goed overeen met de werkelijk gebaggerde hoeveelheden die na de laatste verruiming sinds 2010 plaats hebben gevonden in dit segment (Vos et al., 2017). De baggerhoeveelheden op de Drempel van Vlissingen worden wel ruimschoots overschat in de simulatie. De baggerintensiteit in de andere geulsegmenten ligt een stuk lager. In de Put van Terneuzen wordt zelfs helemaal geen baggeractiviteit gesimuleerd. Hierbij wordt aangetekend dat niet alle geulsegmenten een gelijkaardig oppervlakte hebben en de baggervolumes dus niet direct gelinkt kunnen worden aan sedimentatiehoogtes. Tot slot valt op dat de baggerintensiteit in de Drempel van Valkenisse en Overloop van Hansweert blijft toenemen naar het einde van de simulatie, terwijl de baggerhoeveelheden in de andere segmenten stagneren of zelfs dalen in de laatste fase van de morfologische simulatie.

Het gebaggerde volume wordt gestort in stortpolygonen SH41, SN11, SN31, SH51, SH61 (niet getoond) en SN61. Vanaf jaar 9 wordt ook materiaal gestort in polygoon SN41. De overige stortpolygonen worden binnen de huidige simulatie niet gebruikt. De hoogste stortintensiteit wordt gesimuleerd voor SH41, waar het materiaal vanuit het Gat van Ossenisse, de Overloop van Hansweert en de Drempel van Hansweert wordt teruggestort, en SN11, waar het materiaal van de Drempel van Vlissingen en Drempel van Borssele wordt

gestort. Hierbij wordt wederom opgemerkt dat de schematisering van de stortstrategie niet overeenkomt met de in werkelijkheid gebruikte strategie. De intentie van deze simulatie is in eerste instantie dan ook het globale effect van vaargeulonderhoud op de lange termijn morfologische ontwikkeling te analyseren.



Figuur 25 – Gemodelleerde morfologische verandering in de oostelijke helft van de Westerschelde in een tienjarige Delft3D simulatie met de module voor baggeren en storten geactiveerd en 2016 als startjaar.





Figuur 26 – Verschil in gemodelleerde morfologische verandering in de oostelijke helft van de Westerschelde tussen tienjarige Delft3D simulaties met en zonder de module voor baggeren en storten.

Figuur 27 – Jaarlijkse baggerhoeveelheden in verschillende geulsegmenten van de Westerschelde in een tienjarige Delft3D simulatie met 2016 als startjaar.





Figuur 28 – Jaarlijkse storthoeveelheden in verschillende geulsegmenten van de Westerschelde in een tienjarige Delft3D simulatie met 2016 als startjaar.

# 5 Discussie en conclusies

Er zijn verschillende lange termijn morfologische simulaties uitgevoerd om de intrinsieke trends van de beschikbare morfologische modellen te onderzoeken. Drie simulaties (i.e., startend in 1980, 2001 of 2016) zijn uitgevoerd met het in Deelrapport 3 van deze studie gepresenteerde Telemac-3D model in combinatie met de bijbehorende Sisyphe module voor de online berekening van niet-cohesief sedimenttransport. De gesimuleerde morfologische veranderingen zijn vergeleken met de geobserveerde morfologische ontwikkeling tussen 1980 en 2001 en tussen 2001 en 2016. Daarnaast wordt een tienjarige Delft3D simulatie die werd uitgevoerd in het kader van een eerdere AvdT-studie (i.e., Meire *et al.*, 2017; Stark *et al.*, 2019) geanalyseerd. Tot slot is ook een nieuwe Delft3D simulatie uitgevoerd waarin de invloed van vaargeulonderhoud (i.e., baggeren en storten) op de gemodelleerde lange termijn morfologische ontwikkeling werd onderzocht.

### 5.1 Modelprestatie Telemac-3D/Sisyphe

De gemodelleerde morfologische veranderingen met Telemac-3D/Sisyphe komen matig overeen met de geobserveerde morfologische ontwikkeling in de oostelijke helft van de Westerschelde. Enkele morfologische ontwikkelingen die wel door de Telemac-3D/Sisyphe simulaties worden gereproduceerd zijn de algehele verdieping van de hoofdgeulen tussen Terneuzen en Bath, hoewel dat in werkelijkheid ook deels het gevolg was van de verdieping van de vaargeul, de aangroei van de Plaat van Walsoorden in afwaartse richting en de plaatranderosie aan de noordwestrand van de Platen van Ossenisse.

De meest opvallende tekortkoming van de Telemac modellen is dat de historische morfologische simulaties niet in staat zijn de geobserveerde verondieping van het Middelgat te reproduceren, al is deze verondieping in werkelijkheid gedeeltelijk gerelateerd aan de gebruikte stortstrategie naast de natuurlijke functiewisseling tussen hoofd- en nevengeul die in de 20<sup>e</sup> eeuw optrad. Ook de zuidelijke migratie van de Schaar van Valkenisse en de hiermee gepaard gaande afkalving van de opwaartse rand van de Plaat van Walsoorden worden niet geheel correct gesimuleerd. De migratie van de Schaar van Valkenisse wordt bijvoorbeeld te oostelijk gereproduceerd door het Telemac model. Verder valt in alle morfologische simulaties op dat het ondiepe plateau tussen de Platen van Ossenisse en de Drempel van Hansweert in noordoostelijke richting migreert en dat de kortsluitgeul die zo ontstaat in diepte toeneemt. In werkelijkheid wordt deze ontwikkeling echter beperkt door het vaargeulonderhoud op de Drempel van Hansweert.

### 5.2 Modelprestatie Delft3D

Ook de tienjarige morfologische simulatie met Delft3D (startjaar 2016) geeft afwijkende morfologische ontwikkelingen in vergelijking met de geobserveerde trends tussen 2001 en 2016. De algehele verdieping van de hoofdgeulen en de sedimentatie aan de afwaartse rand van de Plaat van Walsoorden worden ook met het Delft3D model goed gereproduceerd. Als bagger- en stortactiviteiten worden geïmplementeerd in de Delft3D simulatie lijkt de gemodelleerde morfologische ontwikkeling van de hoofdgeul beter op de geobserveerde trend tussen 2001 en 2016. Zo zorgt het gesimuleerde vaargeulonderhoud ervoor dat er geen nieuwe platen ontstaan binnen de huidige vaargeul. De ligging van de platen en geulen blijft dan ongeveer hetzelfde. Er is dan bijvoorbeeld geen sprake van de noordwaartse migratie van het ondiepe plateau langs de noordoostkant van de Platen van Ossenisse. Het Delft3D model met vaargeulonderhoud is daarnaast in staat de tussen 2001 en 2016 geobserveerde sedimentatiezone op het ondiepe plateau langs de Platen van Ossenisse te simuleren. Als bagger- en stortactiviteiten worden meegenomen kan het Delft3D model dus de morfologische ontwikkeling van deze plaat en aangrenzende geulen kwalitatief redelijk reproduceren. Er

bestaan echter nog grote verschillen in sedimentatiehoogtes en erosiedieptes, alsmede in de exacte locaties van erosie- en sedimentatiezones. Deze kwantitatieve afwijkingen zouden door middel van modelkalibratie en een meer gedetailleerde implementatie van het vaargeulonderhoud en de stortstrategieën verkleind kunnen worden.

## 5.3 Vergelijking Telemac-3D/Sisyphe vs. Delft3D

Uit een vergelijking tussen de Delft3D en Telemac-3D/Sisyphe simulaties kan opgemaakt worden dat de gesimuleerde morfologische ontwikkeling na tien jaar sterker is in het Delft3D model. Dit geldt zowel voor de erosiedieptes als de sedimentatiehoogtes. Sommige morfologische trends worden verschillend weergegeven tussen beide modellen. Hierbij wordt opgemerkt dat de modelinstellingen in Delft3D-NeVla en Telemac-3D/Sisyphe niet hetzelfde zijn. Verschillen in het sedimentatie- en erosiepatroon kunnen bijvoorbeeld een gevolg zijn van de harde laag die in het Delft3D model aanwezig is. Zo is ter hoogte van de Diepe put van Hansweert de initiële dikte van de sedimentlaag beperkt tot enkele meters, wat verdere uitdieping van deze put kan voorkomen. In de schematisering van de sedimentlaag in het Telemac/Sisyphe model is de potentiele uitdieping van deze put daarentegen quasi-onbegrensd. Andere belangrijke verschillen tussen beide modellen zijn het opgelegde bodemruwheidsveld, de parametrisatie van 3D- en bochtstromingseffecten (i.e., 3D modellering in Telemac-3D en 2D-h met 'secondary flow' in Delft3D-NeVla) en de parametrisatie van hellingeffecten op sedimenttransport (i.e., Koch & Flokstra (1981) formulering in Sisyphe vs. Ikeda (1984) formulering in Delft3D). Ter plaatse van de Platen van Ossenisse is tevens sprake van een verschil in het snelheidsveld ter hoogte van de ondiepte tussen de Platen van Ossenisse en de Drempel van Hansweert. In het Delft3D-NeVla model worden hier circulaire stromingspatronen als gevolg van neervorming gesimuleerd, terwijl deze in Telemac-3D minder goed worden gerepresenteerd.

## 5.4 Verbeterpunten morfologische modellen

Met betrekking tot de matige prestaties van de morfologische simulaties wordt opgemerkt dat de kwaliteit van de hydrodynamische representatie in het Telemac-3D model nog tekortkomingen kent. Zo wordt de neervorming rondom de Platen van Ossenisse nog niet correct weergegeven in het gebruikte Telemac-3D model. Ook zijn enkele belangrijke processen niet meegenomen in het morfologisch model. Dit gaat bijvoorbeeld om implementatie van de bagger- en stortactiviteiten in Sisyphe, het implementeren van de vaargeulverruimingen die hebben plaatsgevonden tussen 1980 en 2016 en het implementeren van een harde laag (i.e., slecht erodeerbare kleilagen) in Sisyphe welke de erosiediepte kan beperken. Daarnaast zijn de huidige tienjarige morfologische simulaties met Telemac-3D/Sisyphe aan de afwaartse rand, van Oostende tot nabij de Veerse Gatdam, geforceerd met opeenvolgende springtij-doodtij-cycli. In het vervolg zou gebruik gemaakt kunnen worden van een morfologisch getij (i.e., een constant getij welke de gemiddelde morfologische verandering kan representeren; e.g. Latteux, 1995; Lesser, 2009). Hiermee zou tevens de rekentijd verkort kunnen worden. In de Delft3D simulatie is aan de afwaartse rand, in de Noordzee, wel gebruik gemaakt van een morfologisch getij.

Tot slot wordt opgemerkt dat het Delft3D-model al enkele kalibratieslagen heeft ondergaan voor de representatie van het stromingspatroon en het sedimenttransport (Stark *et al.*, 2019), terwijl het Telemac model nog minder ver in ontwikkeling is. Daarom is de ruimte voor verbetering waarschijnlijk groter voor het Telemac-3D/Sisyphe model.

### 5.5 Conclusies

De resultaten van de lange termijn morfologische simulaties geven de intrinsieke morfologische trends voor de verschillende modellen weer. Deze trends zijn bruikbaar om resultaten van korte termijn simulaties of

case studies (e.g. morfologische simulaties met stortingen in diepe delen of voor het bepalen van aanzanding op drempels) beter te kunnen interpreteren. De gemodelleerde veranderingen in dergelijke scenario analyses kunnen dan worden afgezet tegen de intrinsieke trends van de morfologische modellen.

Met betrekking tot de kwaliteit van de onderzochte modellen kan geconcludeerd worden dat de morfologische modelresultaten op lange termijn (i.e. ordegrootte tien jaar) nog tekortkomingen kennen. Het verbeteren van de hydrodynamische modelprestatie wordt gezien als belangrijkste voorwaarde om vooruitgang te boeken. Dit geldt met name voor de Telemac-3D/Sisyphe simulaties. Op basis van de huidige modelresultaten kan al wel geconcludeerd worden dat het implementeren van baggeren en storten noodzakelijk is om meerjarige morfologische ontwikkelingen goed te kunnen simuleren. In een vervolgonderzoek kan de gevoeligheidsanalyse van het sedimenttransport- en morfologisch model (zie Deelrapport 3; Stark *et al.,* 2020b) worden gebruikt om de optimale modelinstellingen voor Telemac-3D/Sisyphe of Delft3D te bekomen.

# 6 Referenties

**Baar, A. W.; de Smit, J., Uijttewaal; 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). Dwarsstromingen 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.

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.

Latteux, B. (1995). Techniques for long-term morphological simulation under tidal action. *Marine Geology*, 126(1–4), 129-141. doi:10.1016/0025-3227(95)00069-B.

**Lesser, G. R.** (2009). An approach to medium-term coastal morphological modelling. IHE Delft Institute for Water Education.

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 Bovenzeeschelde: Subreport 1 – Scaldis: a 3D Hydrodynamic Model for the Scheldt Estuary. Version 5.0. *WL Rapporten*, 13\_131. Flanders Hydraulics Research: Antwerp, Belgium.

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 3.0. *WL Rapporten*, 14\_024\_7. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

**Stark, J.; Maximova, T.; Dujardin, A.; Smolders, S.; Vandenbruwaene, W.; Mostaert, F.** (2020a). 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.

**Stark, J.; De Maerschalck, B.; Plancke, Y.; Mostaert, F.** (2020b). AvdT – Sedimenttransport op verschillende tijdschalen - Gevoeligheidsanalyse numeriek model: Deelrapport 3 – Modellering van hydro- en morfodynamische processen in de Westerschelde met Telemac – Gevoeligheidsanalyse numeriek model. Versie 3.0. *WL Rapporten*, 17\_088\_3. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

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). Sisyphe User manual. Version 7.2. EDF-R&D, Chatou, Frankrijk.

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

Van der Wegen, M.; van der Werf, J.J.; De Vet, P.L.M.; Röbke, B.R. (2017). Hindcasting Westerschelde mouth morphodynamics (1963-2011). Deltares: Delft. ii, 32 + appendices pp.

**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

**Vos, G.; De Maerschalck, B.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F.** (2016a). Sedimentstrategie Beneden Zeeschelde: Deelrapport 2 – Opzet en validatie van het numerieke model voor het modelleren van zand. Versie 4.0. *WL Rapporten*, 14\_025. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België.

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

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