

Vlaanderen
is wetenschap

23_024_1
WL rapporten

Lange termijn morfologische modellering stortstrategie Westerschelde

Modelopzet en scenario-berekeningen

DEPARTEMENT
**MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN**

waterbouwkundiglaboratorium.be

Lange termijn morfologische modellering stortstrategie Westerschelde

Modelopzet en scenario-berekeningen

Stark, J.; Schramkowski, G.

Waterbouwkundig Laboratorium
Vlaanderen is wetenschap

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 2025
D/2025/3241/150

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Stark, J.; Schramkowski, G. (2025). Lange termijn morfologische modellering stortstrategie Westerschelde: Modelopzet en scenario-berekeningen. Versie 4.0. WL Rapporten, 23_024_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

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

Documentidentificatie

Opdrachtgever:	DMOW-aMT	Ref.:	WL2025R23_024_1
Trefwoorden (3-5):	Morfologie; Westerschelde; Stortstrategie; Delft3D		
Kennisdomeinen:	Hydraulica en Sediment > Sediment > Baggeren en storten > Numerieke modellering Hydraulica en Sediment > Morfologie > Erosie/sedimentatie > Numerieke modellering		
Tekst (p.):	71	Bijlagen (p.):	/
Vertrouwelijk:	☒ Nee	☒ Online beschikbaar	

Auteur(s):	Stark, J.

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Schramkowski, G.	Dr. George P. Schramkowski Digitaal ondertekend door Dr. George P. Schramkowski Datum: 2025.07.16 09:24:15 +02'00'
Projectleider:	Stark, J.	Getekend door:Stark Jeroen Getekend op:2025-07-22 11:17:51 +02:0 Reden:Ik keur dit document goed Stark Jeroen Vlaamse overheid

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Bellafkih, K.	Signed by:Bellafkih Abdelkarim Signed at:2025-07-16 10:55:53 +02:00 Reason:Ik keur dit document goed Bellafkih Abdelkarim Vlaamse overheid

Abstract

Dit rapport bevat een modelstudie naar de lange termijn morfologische effecten van het storten in diepe delen van de Westerschelde. De studie is uitgevoerd met een bestaand sterk geschematiseerd Delft3D model van het estuarium. Er is een methodiek toegepast waarbij het morfologisch model in een berekening van 500 jaar zelf een bodemligging vormt op basis van de meest relevante fysische processen, de geometrie van het estuarium, vereenvoudigde hydrodynamische randvoorwaarden en parametrisatie voor sedimenttransport. Buiten een lokale roosterverfijning in de oostelijke helft van de Westerschelde en de implementatie van een vaste bodemligging ter hoogte van Saeftinghe is de modelschematisering quasi-hetzelfde als in eerdere studies. Het toegepaste model is in staat om een herkenbaar patroon van geulen en platen in de Westerschelde te produceren. In het gesimuleerde geulensysteem zijn zowel drempels als diepe putten aanwezig, waardoor het mogelijk is om de morfologische effecten van storten in diepe putten te onderzoeken.

Er is een scenario-analyse uitgevoerd om de morfologische impact van vaargeulonderhoud en van verschillende stortstrategieën op lange termijn te onderzoeken. In deze scenarioberekeningen zijn vervolgruns opgestart waarin een bepaalde stortstrategie continu wordt toegepast, startend vanaf de door het model zelf geproduceerde bodemligging na 500 jaar, en met een aanvullende simulatieduur van 100 jaar. De modelresultaten tonen aan dat het vastleggen van de vaargeul een verstarring van de morfologie veroorzaakt, waarbij de natuurlijke dynamiek van geulen en platen beperkt wordt. De gemodelleerde stortscenario's laten zien dat het langdurig storten in diepe delen van de vaargeul uiteindelijk kan leiden tot een verondieping van de hoofdgeul en een uitdieping van de nevengeulen. De morfologische veranderingen die door de stortstrategieën worden geïnduceerd hebben ook een impact op de getijvoortplanting en het residueel transport. Tenslotte is de impact van de stortstrategie op het baggerbezwaar in de modelsimulaties geanalyseerd. Deze is afhankelijk van de exacte stortlocatie, de richting van het residueel sedimenttransport en de beschikbare stortruimte.

Inhoudstafel

Abstract III
Inhoudstafel IV
Lijst van de tabellen VI
Lijst van de figuren VII
1 Introductie 1
1.1 Achtergrond 1
1.2 Geïdealiseerd morfologisch modelleren 1
1.3 Doelstelling en scope 2
1.4 Leeswijzer 2
2 Literatuurstudie 3
2.1 Eerder geïdealiseerd morfologisch onderzoek met het vereenvoudigd Delft3D-NeVla model 3
2.2 Onderzoek naar morfologische effecten stortstrategie 4
2.2.1 Morfologische modellering effecten vaargeulonderhoud 4
2.2.2 Gecombineerde numerieke- en fysische schaalmodellering door Universiteit Utrecht 7
2.2.3 Synthese van proefstortingen en modelanalyses 8
2.3 Kennisleemtes state-of-the-art 9
3 Methodiek 10
3.1 Modelaanpak 10
3.2 Modelinstellingen 10
3.2.1 Modeldomein en grid 10
3.2.2 Bathymetrie 12
3.2.3 Randvoorwaarden 13
3.2.4 Simulatieduur 14
3.2.5 Sedimenttransportformulering 14
3.2.6 Golven 17
3.2.7 Overige modelinstellingen 17
3.3 Stortscenario’s 18
3.4 Verwerking en analyse van modelresultaten 20
3.4.1 Beoordeling grootschalige morfologische kenmerken 20
3.4.2 Getijvoortplanting 21
3.4.3 Gemodelleerd sedimenttransport 21

4 Modelresultaten 23
4.1 Resultaten referentierun 23
4.1.1 Globale morfologie 23
4.1.2 Geuldiepte 24
4.1.3 Hypsometrie 28
4.1.4 Getij 29
4.1.5 Sedimenttransport 30
4.2 Gevoeligheidsanalyse 34
4.2.1 Overzicht modelsimulaties gevoeligheidsanalyse 34
4.2.2 Invloed modelresolutie 34
4.2.3 Bodemligging Verdronken Land van Saeftinghe 35
4.2.4 Initiële bodemdiepte 36
4.2.5 Invloed bovenafvoer 38
4.2.6 Invloed transportformulering 39
4.2.7 Zijbekkens 44
4.2.8 Invloed windgolven 45
4.2.9 Invloed morfologische versnellingsfactor 46
4.2.10 Conclusies gevoeligheidsanalyse 47
4.3 Bagger- en stortscenario's 47
4.3.1 Effect vaargeulonderhoud 47
4.3.2 Morfologische ontwikkeling in stortscenario's 50
4.3.3 Bagger- en storthoeveelheden 57
4.3.4 Invloed op hydrodynamica en getijvoortplanting 60
4.3.5 Invloed op sedimenttransport 62
5 Discussie en conclusies 65
5.1 Toepasbaarheid model 65
5.2 Effect vaargeulonderhoud en stortstrategie 66
5.3 Aanbevelingen 67
6 Referenties 69

Lijst van de tabellen

Tabel 1 - Afwaartse randvoorwaarden langs westrand. 13

Tabel 2 - Overzicht modelinstellingen. 18

Tabel 3 - Overzicht modelscenario's stortstrategie. 20

Tabel 4 - Overzicht bagger- en stortvolumes in Westerschelde voor modelscenario's met verschillende stortstrategie. 57

Lijst van de figuren

Figuur 1 - Gemodelleerde morfologische ontwikkeling met geïdealiseerd model (Nnafie *et al.*, 2017b). 3

Figuur 2 - Gemodelleerde bodemligging na morfologische hindcast (1965-2002) met FINEL-2D model door Dam *et al.* (2015). 5

Figuur 3 - Voorbeeld van morfologische modelresultaten uit Röbke *et al.* (2022) met gesimuleerde volumeveranderingen in de macrocellen en residuele transporten tussen de macrocellen voor simulaties met 0.96 m zeespiegelstijging tot 2100 en met de huidige (boven) of toekomstige (onder) stortstrategie. 6

Figuur 4 - Voorbeeld van modelresultaten uit Stark *et al.* (2020b) met gesimuleerde verspreiding van sedimentstorting in stortvak SH51 (links) en relatieve invloed op morfologische ontwikkeling na één jaar (rechts). 7

Figuur 5 - Morfologische ontwikkeling in schaalmodelproeven door Van Dijk *et al.* (2021), met en zonder vaargeulonderhoud. 8

Figuur 6 - Modeldomein. 11

Figuur 7 - Verfijnd grid in oostelijke helft Westerschelde (bathymetrie ter illustratie). 12

Figuur 8 - Initiële bodemligging. 13

Figuur 9 - Vaargeulpolygoon (geel) en contouren stortpolygonen in hoofdgeul (blauw) en nevengeul (rood). 19

Figuur 10 - De verdeling van de Westerschelde in macrocellen, bestaande uit hoofd- en nevengeul en tussen- en naastliggende intergetijdengebieden. Uit: (Schrijver, 2020) 21

Figuur 11 - Uitvoerpunten langs vaargeul. 22

Figuur 12 - Transecten langs vaargeul. 22

Figuur 13 - Gemodelleerde morfologische ontwikkeling na 100, 300 en 500 jaar in de referentierun (Run711C). 25

Figuur 14 - Geobserveerde morfologie Westerschelde in jaren ’50 (boven), in 2009 (midden) en gemodelleerde morfologie in de referentierun (Run 711C). 26

Figuur 15 - Geulcontouren na 100, 300 en 500 jaar in referentierun (Run711C). 26

Figuur 16 - Herkenbare macrocellen na 500 jaar in referentierun (Run711C). 27

Figuur 17 - Ligging en langsprofiel van de hoofdgeul (thalweg) na 500 jaar in referentierun (Run711C). 27

Figuur 18 - Hypsometrie van de Westerschelde op basis van historische bathymetrische data (links) en op basis van de morfologie geproduceerd in de referentierun (rechts). 28

Figuur 19 - Subtidaal en intertidaal volume op basis van historische bathymetrische data (1800-2019). 28

Figuur 20 - Getijkarakteristieken op basis van morfologie na 500 jaar in referentierun (Run711C). 29

Figuur 21 - Historische getijslag Schelde-estuarium. Uit: Wang *et al.* (2019) 30

Figuur 22 - Getijasymmetrie ($T_{stijging}/T_{daling}$) op basis van morfologie na 500 jaar in referentierun (Run711C). 30

Figuur 23 - Residueel sedimenttransport op basis van morfologie na 500 jaar in referentierun (Run806 = vervolgrun op Run711C). 31

Figuur 24 - Ontwikkeling van het (10-jaarlijks gemiddelde) residueel transport over simulatieduur van 500 jaar in Run711C). 31

Figuur 25 - Schets van residueel transport op basis van morfologie na 500 jaar in referentierun (boven) en berekend netto sedimenttransport in Mm^3/jaar op basis van sedimentbalans Westerschelde 1955-2020 uit Elias *et al.* (2023) (onder). 32

Figuur 26 - Bruto en netto sedimenttransport per macrocel op basis van morfologie na 500 jaar in referentierun (Run806 = vervolgrun op Run711C). 33

Figuur 27 - Gemodelleerde morfologie na 500 jaar in simulatie met origineel grid uit Nnafie *et al.*, (2017c) (Run703B2; boven) en met verfijnd grid tussen Gat van Ossenisse en Bocht van Bath (Run707; onder). 35

Figuur 28 - Gemodelleerde morfologie in simulatie met vlakke initiële bodemligging (Run555; boven) en met vaste bodemligging voor Saeftinghe (Run703B2; onder). 36

Figuur 29 - Hypsometrie van de Westerschelde na 500 jaar in simulatie initiële bodemdiepte uit Nnafie *et al.*, (2017c) (Run710E; links) en met een initiële bodemdiepte die 2 m is verondiept (Run711C; rechts). 37

Figuur 30 - Gemodelleerde morfologie na 500 jaar in simulatie initiële bodemdiepte uit Nnafie *et al.*, (2017c) (Run710E; boven) en met een initiële bodemdiepte die 2 m is verondiept (Run711C; onder). 37

Figuur 31 - Gemodelleerde morfologie in simulatie zonder bovenafvoer (Run 706; boven) en met een bovenafvoer van 100 m^3s^{-1} (Run706B; onder). 38

Figuur 32 - Gemodelleerde morfologie in simulatie met sedimenttransportformule van Engelund-Hansen (Run710E; boven) en Van Rijn sedimenttransportformule (Run709C; onder). 39

Figuur 33 - Hypsometrie van de Westerschelde in simulatie met sedimenttransportformule van Engelund-Hansen (Run710E; links) en Van Rijn sedimenttransportformule (Run709C; rechts). 40

Figuur 34 - Gemodelleerde morfologie in simulaties met Engelund-Hansen transportformule en verschillende α_{BN}. 41

Figuur 35 - Gemodelleerde morfologie in simulaties met VR04 transportformule en verschillende α_{BN}. 42

Figuur 36 - Gemodelleerde morfologie in simulaties met verschillende α_{BS}. 43

Figuur 37 - Langsprofiel van de hoofdgeul (thalweg) na 500 jaar in simulaties met verschillende α_{BN}. 44

Figuur 38 - Langsprofiel van de hoofdgeul (thalweg) na 500 jaar in simulaties met verschillende α_{BS}. 44

Figuur 39 - Gemodelleerde morfologie na 500 jaar in simulatie met zijbekkens (Run721D; boven) en zonder zijbekkens in de referentierun (Run711C; onder). 45

Figuur 40 - Gemodelleerde morfologie na 400 jaar in simulatie zonder windgolven (links) en met windgolven (rechts). Uit: Nnafie *et al.* (2017b). 45

Figuur 41 - Gemodelleerde morfologie in simulaties met MorFac = 50 (Run712C; boven), MorFac = 100 (referentierun Run711C; midden) en MorFac = 200 (Run712D; onder). 46

Figuur 42 - Gemodelleerde morfologie in simulatie 806 zonder vaargeulonderhoud (boven), sedimentatie-erosie-plot (onder). 49

Figuur 43 - Verschilplots voor simulatie 810A met vaargeulonderhoud en simulatie 810B met vaargeulonderhoud én uniform terugstorten (onder) t.o.v. simulatie 806 zonder vaargeulonderhoud. 49

Figuur 44 - Baggerintensiteit in simulaties met (810A) en zonder (810B) terugstorten van sediment. 50

Figuur 45 - Gemodelleerde morfologie in Run810C (storten diepe delen; dichtbij) en verschil met Run806 (zonder onderhoud). 51

Figuur 46 - Gemodelleerde morfologie in Run810E (storten nevengeulen; dichtbij) en verschil met Run806 (zonder onderhoud). 52

Figuur 47 - Gemodelleerde morfologie in Run810F (storten hoofdgeul; uniform) en verschil met Run806 (zonder onderhoud). 52

Figuur 48 - Gemodelleerde morfologie in Run810G (storten diepe delen; opwaarts) en verschil met Run806 (zonder onderhoud). 53

Figuur 49 - Gemodelleerde morfologie in Run810H (storten diepe delen; afwaarts) en verschil met Run806 (zonder onderhoud). 53

Figuur 50 - Geulcontouren na 100 jaar morfologische ontwikkeling in simulaties met verschillende bagger- en stortstrategieën. 54

Figuur 51 - Langsprofiel van de hoofdgeul (thalweg) na 100 jaar morfologische ontwikkeling in modelsimulaties met verschillende bagger- en stortstrategieën. 55

Figuur 52 - Verschil in langsprofiel van de hoofdgeul (thalweg) t.o.v. Run808B (uniform storten). 55

Figuur 53 - Verandering volume hoofdgeulen(links) en nevengeulen (rechts) in simulaties met verschillende stortstrategieën, t.o.v. Run808B als referentie. 56

Figuur 54 - Verandering volume westelijke helft (links) en oostelijke helft (rechts) van de Westerschelde, in simulaties met verschillende stortstrategieën, t.o.v. Run808B als referentie. 57

Figuur 55 - Jaarlijkse baggervolumes in simulaties met verschillende bagger- en stortstrategieën..... 58

Figuur 56 - Jaarlijkse baggervolumes in westelijke helft (boven) en oostelijke helft (onder) van de Westerschelde. 59

Figuur 57 - Verschil in getijslag na 100 jaar morfologische ontwikkeling in simulaties met verschillende bagger- en stortstrategieën, met Run808B als referentie..... 61

Figuur 58 - Verschil in getijasymmetrie na 100 jaar morfologische ontwikkeling in simulaties met verschillende bagger- en stortstrategieën, met Run808B als referentie. 61

Figuur 59 - Bruto en netto sedimenttransport op 4 locaties na 100 jaar morfologische ontwikkeling in modelsimulaties met verschillende bagger- en stortstrategieën. 63

Figuur 60 - Gemiddeld bruto en netto sedimenttransport per macrocel na 100 jaar morfologische ontwikkeling in modelsimulaties met verschillende bagger- en stortstrategieën. 64

1 Introductie

1.1 Achtergrond

In het kader van de Agenda voor de Toekomst van de VNSC werd recent een plan van aanpak met betrekking tot Integraal Sedimentbeheer opgesteld. In dit document staan de belangrijkste onderzoeksnoden voor de komende jaren beschreven, waarvan enkele betrekking hebben op de lange termijn morfologische ontwikkeling van de Westerschelde. Een van de onderzoeksnoden is het bestuderen van de lange termijn effecten van een stortstrategie met sedimentstortingen in de diepe delen van de hoofdgeul in de Westerschelde op de ontwikkeling van de omliggende geulen, platen of oevers in het estuarium, in relatie tot een veranderend estuarium onder invloed van klimaat en zeespiegelstijging.

Voorliggend rapport beschrijft een studie die door het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) is uitgevoerd om de lange termijn effecten van het storten in diepe delen te analyseren met behulp van een bestaand geïdealiseerd morfologisch model.

1.2 Geïdealiseerd morfologisch modelleren

Ondanks de moderne ontwikkelingen in de wereld van de numerieke modellen en computerinfrastructuur van de laatste decennia blijft de modellering van de morfologische evolutie van estuaria een hele uitdaging. De morfologische ontwikkeling van het estuarium wordt gedreven door de ruimtelijke en temporele variaties in het transport van zand en slib, die op hun beurt gedreven worden door getij en golfwerking. Kleine of lokale fouten in de berekende stroming kunnen leiden tot grotere fouten in de berekende (netto) transporten en bodemveranderingen. Voor het modelleren van lange termijn morfologische ontwikkelingen wordt bovendien gebruik gemaakt van een morfologische versnellingsfactor (Lesser, 2009), waarbij de fouten in de bodemverandering nog eens geëxtrapoleerd of uitvergroot worden. Hierbij speelt ook een rol dat gedurende de morfologische inspeeltijd de bodemveranderingen een gevolg zijn van een onevenwicht tussen de vereenvoudigde randvoorwaarden en de geïmplementeerde bodemligging (Roelvink, 2006). De totale afwijking van een morfologisch model is de accumulatie van al deze fouten doorheen de gemodelleerde tijd. Over langere tijdschalen van enkele decaden leert de ervaring dat de afwijkingen in de bodemligging of de morfologie te groot worden voor een directe kwantitatieve analyse van de modelresultaten.

Dit vergt een andere aanpak. In een geïdealiseerd model wordt het estuarium meer kwalitatief benaderd. Het is niet zozeer de bedoeling om de evolutie van elke bocht, geul of plaat in detail te reproduceren, maar wel om de belangrijkste drijvende mechanismen, zowel natuurlijke als menselijke, die geleid hebben tot de typische karakteristieken van de Schelde zoals we ze nu kennen te leren kennen en begrijpen. Doordat de initiële bodemligging in een geïdealiseerd morfologisch model door het model zelf wordt berekend (i.e., het model bepaalt zelf een dynamisch evenwicht van de morfologie op basis van de randvoorwaarden) is het onevenwicht tussen de morfologie en de hydrodynamische randvoorwaarden veel kleiner dan wanneer een geobserveerde bodemligging wordt geïmplementeerd.

Binnen het Agenda voor de Toekomst project *"Verbetering morfologisch instrumentarium"* werd door het WL reeds een geïdealiseerd morfologisch modelinstrumentarium ontwikkeld (Nnafie *et al.*, 2016, 2017b; a) wat binnen de huidige studie kan worden toegepast om het effect van storten in diepe delen op de lange termijn morfologische ontwikkeling van de Westerschelde te onderzoeken.

1.3 Doelstelling en scope

De algemene doelstelling van dit onderzoek is om de lange termijn effecten van een gekozen stortstrategie, zoals “storten in diepe delen”, op de morfologische kenmerken van de Westerschelde te onderzoeken.

Hiervoor dienen eerst geschikte instellingen voor het modelinstrumentarium te worden geselecteerd, waarmee relevante morfologische kenmerken van de Westerschelde gerepresenteerd worden. Tevens zal een gevoeligheidsanalyse voor deze modelinstellingen worden uitgevoerd. Uiteindelijk wordt een scenario-analyse uitgevoerd waarmee de lange termijn invloed van een gekozen stortstrategie op de morfologische kenmerken wordt onderzocht.

Een modelkalibratie voor de reproductie van een specifieke historische bodemligging valt buiten de scope van dit project. Interacties met andere processen die de lange termijn morfologische ontwikkeling sturen, zoals zeespiegelstijging of veranderingen in de geometrie van het estuarium (e.g. ontpolderingen en inpolderingen), worden in dit rapport niet beschouwd. Ook zal de studie zich enkel richten op de morfologische ontwikkeling in de Westerschelde. De morfologie of de stortstrategie in het mondingsgebied en in de Zeeschelde vormen geen onderdeel van deze studie.

1.4 Leeswijzer

Dit rapport is als volgt ingedeeld:

Hoofdstuk 2 bevat een samenvatting van eerder onderzoek naar (lange termijn) morfologische effecten van de stortstrategie en van eerder onderzoek met het modelinstrumentarium dat binnen deze studie is toegepast.

In Hoofdstuk 3 wordt een beschrijving gegeven van de modelschematisering en van de geïmplementeerde modelscenario’s, alsmede van de methodiek voor verwerking en analyse van de modelresultaten.

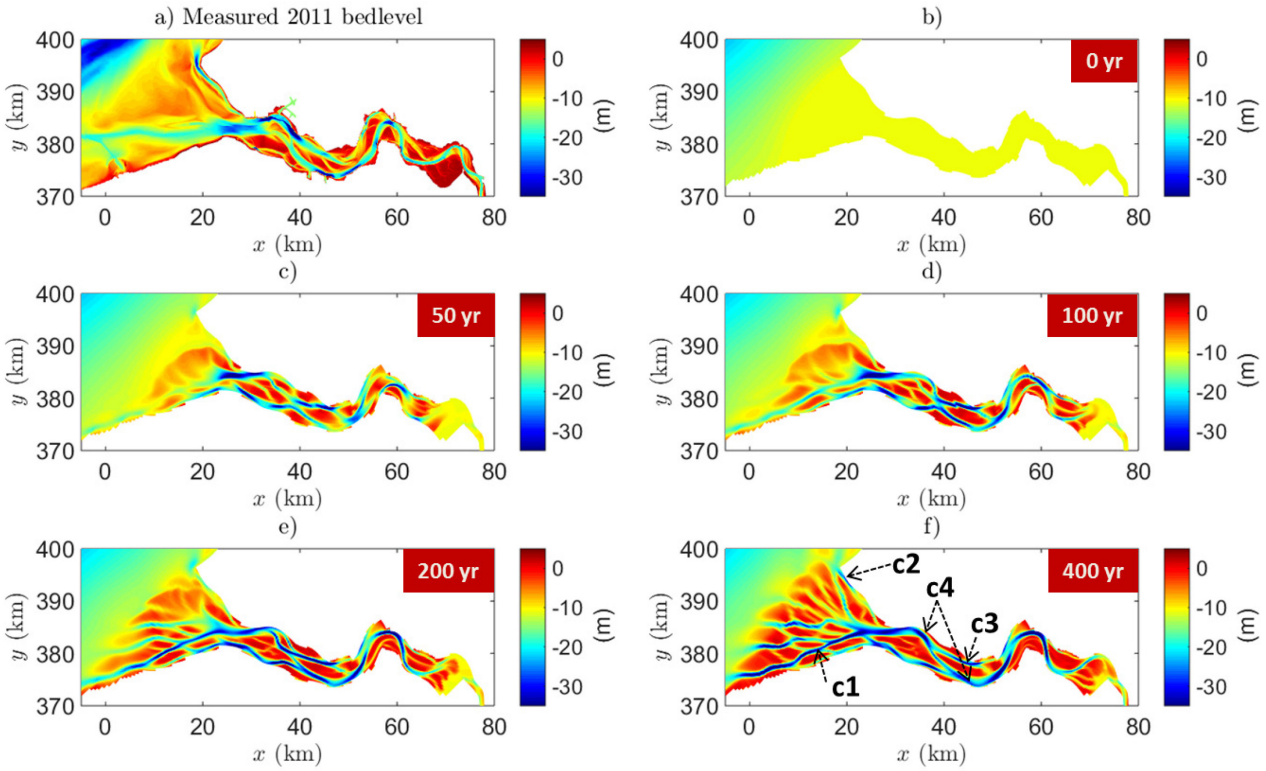
In Hoofdstuk 4 worden de modelresultaten weergegeven aan de hand van een referentiesimulatie en scenarioberekeningen waarmee het effect van een aantal stortstrategieën wordt geanalyseerd. De gevoeligheid voor enkele modelinstellingen en parameters wordt eveneens besproken.

Tot slot worden in Hoofdstuk 5 de belangrijkste bevindingen van deze modelstudie samengevat.

2 Literatuurstudie

2.1 Eerder geïdealiseerd morfologisch onderzoek met het vereenvoudigd Delft3D-NeVla model

Eerder werd door het WL als onderdeel van de Agenda voor de Toekomst studie *"Verbetering morfologisch instrumentarium"* een geïdealiseerd 2Dh model voor de voordelta van het Schelde-estuarium ontwikkeld (Nnafie *et al.*, 2016, 2017b; a). Dit Delft3D model is gebaseerd op het NeVla model, maar met een grovere roosteresolutie en een sterk vereenvoudigde schematisering van de Zeeschelde en getijgebonden zijrivieren. Het geïdealiseerd morfologisch model wordt niet gestart met de complexe bathymetrie zoals die gekend is, maar met een geschematiseerde lineair hellende bodem met een breedtegemiddelde diepte. Als hydrodynamische forcering wordt een vereenvoudigd *morfologisch getij* en een *gereduceerd golfklimaat* gebruikt (cfr. Lesser, 2009). Onder invloed van deze forcering produceert het morfologisch model zelf een patroon van geulen en platen, dat gelijkaardige grootschalige kenmerken vertoont als het echte Schelde estuarium (Figuur 1).



Figuur 1 - Gemodelleerde morfologische ontwikkeling met geïdealiseerd model[1] (Nnafie *et al.*, 2017b).

[1] Deze versie van het model focust op de ontwikkelingen van geulen en platen in de Westerschelde. Om efficiënt te rekenen worden golven hier niet meegenomen, dit verklaart het afwijkende geulenpatroon in de voordelta. Door toevoeging van een golf forcering evolueert de voordelta naar het gekende systeem van twee hoofdgeulen en een tussenliggende Vlakte van de Raan (Nnafie *et al.*, 2017b).

Het model wordt ingezet om lange termijn effecten, i.e. decennia tot eeuwen, van grootschalige ingrepen op deze morfologische kenmerken te onderzoeken. De morfologische simulaties worden vanuit een vlakke bodem gestart, waarbij het geïdealiseerd model zelf een dynamisch evenwicht van de morfologie (plaat-geulsysteem) bepaalt op basis van de randvoorwaarden. Deze gesimuleerde bodemligging wordt vervolgens als initiële conditie gebruikt voor verschillende scenarioberekeningen. Doordat de initiële bodemligging van het geïdealiseerd morfologisch model is gevormd door het model zelf is het onevenwicht tussen de morfologie en de hydrodynamische randvoorwaarden veel kleiner dan wanneer een geobserveerde bodemligging wordt geïmplementeerd.

Het geïdealiseerd morfologisch model van de Westerschelde en haar monding werd door het WL reeds succesvol ingezet om de autonome ontwikkeling, stabiliteit en het toekomstige baggerbeslag van een nieuwe toegangsgeul in het mondingsgebied (i.e., Geul van de Walvischstaart) op lange termijn (decennia) te onderzoeken (De Maerschalck *et al.*, 2017). Ook de effecten van historische inpolderingen op de morfologische ontwikkeling van het estuarium en de huidige ligging van de platen en geulen werden aan de hand van het modelinstrumentarium bestudeerd (Nnafie *et al.*, 2018b, 2019). Verder werd het modelinstrumentarium reeds ingezet voor onderzoek naar de lange termijn effecten van (versnelde) zeespiegelstijging (Nnafie *et al.*, 2018a).

In sectie 3.2 wordt een gedetailleerde modelbeschrijving gegeven, alsmede een overzicht van de gebruikte modelinstellingen en aanpassingen ten opzichte van de eerdere modelstudies.

2.2 Onderzoek naar morfologische effecten stortstrategie

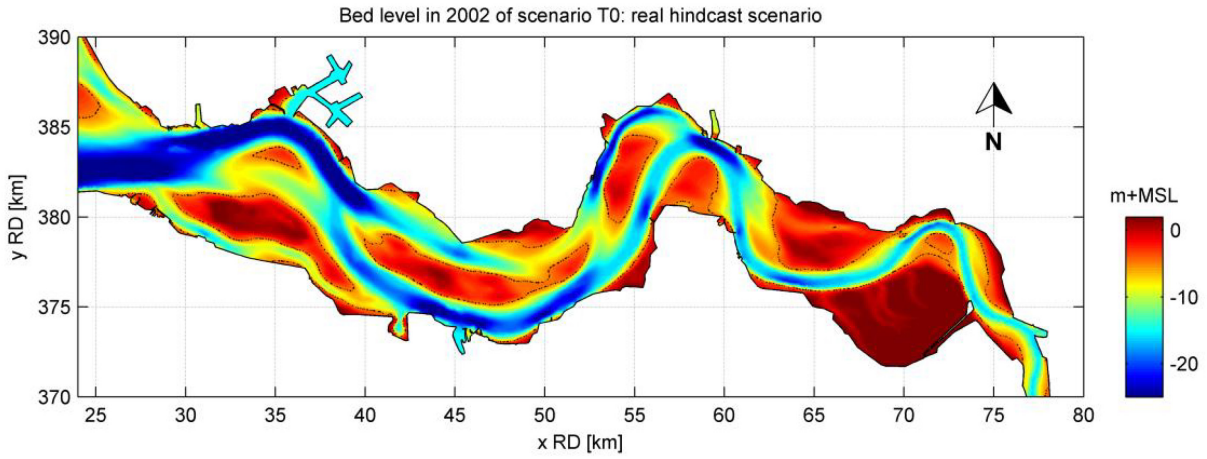
2.2.1 Morfologische modellering effecten vaargeulonderhoud

LT Morfologische modellering door Svasek

De natuurlijke morfologische ontwikkeling in de Westerschelde en de impact van menselijke activiteiten op deze ontwikkelingen zijn door (Dam *et al.*, 2013, 2015) onderzocht met behulp van morfologische berekeningen met een proces-gebaseerd FINEL-2D model. In een referentiescenario werd de historische periode 1965-2002 gesimuleerd, inclusief alle menselijke activiteiten die in die periode hebben plaatsgevonden. Naast dit T0-scenario zijn voor dezelfde periode twee extreme scenario's gemodelleerd: (1) een scenario vanaf 1965 zonder menselijke activiteiten en (2) een scenario waarin vaargeulonderhoud plaatsvindt, maar het sediment niet wordt teruggestort. Figuur 2 toont de door Dam *et al.* (2015) gemodelleerde morfologie in de Westerschelde na een periode van 40 jaar voor het referentiescenario. Doordat vaargeulonderhoud is meegenomen in de schematisering wordt de ligging van de hoofdgeul steeds goed gereproduceerd. Voor de nevengeulen in de westelijke helft van de Westerschelde is dat ook het geval. In de oostelijke helft is de representatie van het geulpatroon minder accuraat.

Door verschillende sedimentstrategieën te modelleren werd geconcludeerd dat de toegepaste strategie een grote impact heeft gehad op de morfologie van het estuarium en het getij gedurende de gesimuleerde periode. Zo zijn in de periode 1965-2002 de geulen verdiept en is de hoogte van de platen toegenomen, waardoor de bodemligging van de Westerschelde de afgelopen decennia steiler is geworden. De resultaten laten ook significante effecten zien op de voortplanting van het getij in het estuarium. Als gevolg van de menselijke activiteiten van de afgelopen decennia is het getijverschil tussen de monding en Antwerpen met ongeveer 0,4 meter toegenomen en is de voortplanting van het getij met ongeveer 15 minuten versneld.

Een andere belangrijke conclusie van de studie door Dam *et al.* (2015) is dat de uitkomst van een lange termijn morfologische berekening voornamelijk wordt bepaald door: (1) zelforganisatie van de morfologie; (2) de opgelegde geometrie (i.e., vastgelegde oevers en niet-erodeerbare lagen) en (3) het goed voorspelbare getij, dat zeker in de Westerschelde bepalender is dan meer stochastische forcering van stormen of periodes met een hoge bovenafvoer.



Figuur 2 - Gemodelleerde bodemligging na morfologische hindcast (1965-2002) met FINEL-2D model door Dam *et al.* (2015).

LT Morfologische modellering door Deltares

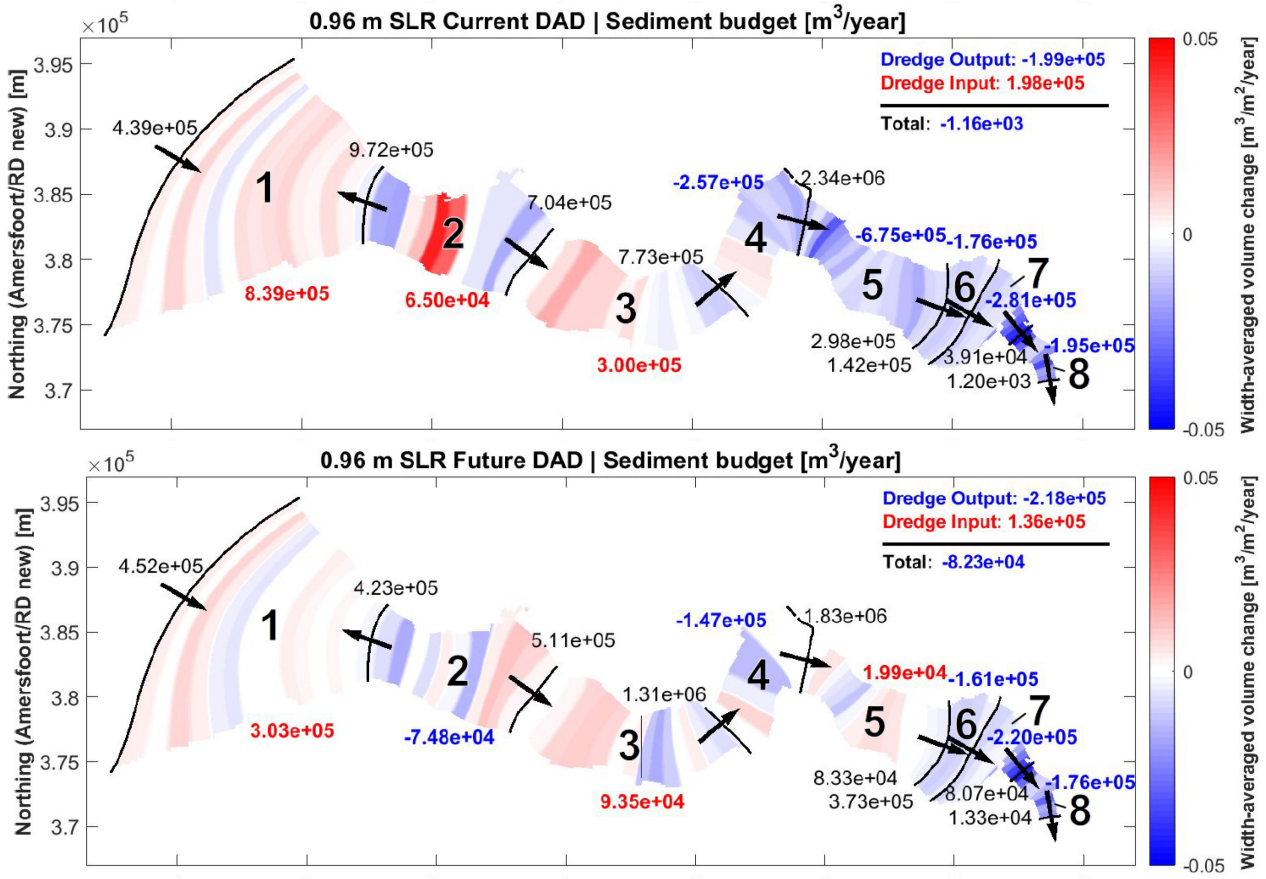
Door Röbke *et al.* (2022) werd een quick-scan uitgevoerd naar de effecten van extreme zeespiegelstijging in het Schelde-estuarium tot 2100. Hierbij is ook gekeken naar het effect van verschillende vormen van morfologisch beheer (baggeren, storten, kustsuppleties). Er is gebruik gemaakt van een vergroofde versie van het Delft3D-NeVla model (in 2D), dat eerder door Van der Wegen & Roelvink, (2012) werd ontwikkeld om hindcasts te doen van de morfologische ontwikkeling in de Westerschelde tussen 1963 en 2011. Een gelijkaardige versie van het NeVla model wordt overigens ook binnen de huidige studie toegepast.

In de studie door Röbke *et al.* (2022) zijn verschillende zeespiegelstijgingsscenario's (met 2100 als richtjaar) in morfologische modelberekeningen onderzocht. Om de invloed van het sedimentbeheer te onderzoeken zijn simulaties uitgevoerd waarin het kustbeheer (suppleties) of de stortstrategie in de Westerschelde werd gevarieerd. Hierbij werd een onderscheid gemaakt tussen de 'huidige stortstrategie' en een 'toekomstige stortstrategie' waarbij enkel nog in de diepe delen van de hoofdgeul wordt gestort. Onderhoudsstrategieën voor de Zeeschelde zijn niet onderzocht.

Met betrekking tot de waterbeweging wordt geconcludeerd dat een andere verdeling van baggerspecie of meer kustsuppleties nauwelijks invloed heeft op de waterstanden in het estuarium in een situatie met sterke zeespiegelstijging. De hoogwaterstanden in de Westerschelde stijgen mee met de zeespiegelstijging. Belangrijke wijzigingen in de verdeling van sediment in de Westerschelde hebben dan ook geen significant effect op de getijslag. De toename in waterdiepte is, zeker bij de extremere zeespiegelstijging, zo groot dat een andere herverdeling van sediment binnen het estuarium nauwelijks significant meer is. De modelscenario's laten zien dat bij zeespiegelstijging het estuarium meer sediment exporteert langs de lijn Vlissingen-Breskens. De horizontale getijasymmetrie wordt onder zeespiegelstijging, door een verdieping van de geulen, geleidelijk meer eb-gedomineerd (of minder vloed-gedomineerd).

Er is een analyse gemaakt van de invloed van sedimentbeheer op de morfologie aan de hand van de hypsometrische curve en gemodelleerde volumeveranderingen in de verschillende macrocellen (Figuur 3). De toegenomen waterdiepte en het sedimentverlies lijken, zeker bij snellere zeespiegelstijging, de kans te verminderen dat geulen die nu stelselmatig verondiepen, zoals het Middelgat, gaan verdwijnen omdat hiervoor onvoldoende sediment beschikbaar is. De studie laat verder zien dat intergetijdengebieden groeien onder invloed van zeespiegelstijging, maar kunnen de stijging in geval van grote zeespiegelstijging niet bijhouden met op lange termijn een afname van het areaal tot gevolg. Omdat een strategie waarbij meer gestort wordt in het oosten van de Westerschelde de verdieping in dat deel van het estuarium vermindert, is de verwachting dat deze stortstrategie op lange termijn een positief effect heeft op de omvang van de intergetijdengebieden. De onzekerheden in de morfologische modellering door Röbke *et al.* (2022) zijn echter te groot om dergelijke hypotheses te bevestigen.

De kwantitatieve modelresultaten van de morfologische runs bleken zeer gevoelig voor modelinstellingen gerelateerd aan sedimenttransport en het al dan niet meenemen van processen zoals windgolven of slibtransport. Er werd specifiek onderzocht wat het belang is van het meenemen van slibtransport (als aanvulling op het zandtransport) voor verschillende type onderzoeksvragen. Uit de studie volgt dat het meenemen van slibtransport met name belangrijk is voor de morfologische modellering van de evolutie van intergetijdengebieden en minder van belang is voor de grootschalige waterbeweging. De groei van intergetijdengebieden onder zeespiegelstijging wordt namelijk vooral door slibdepositie veroorzaakt.



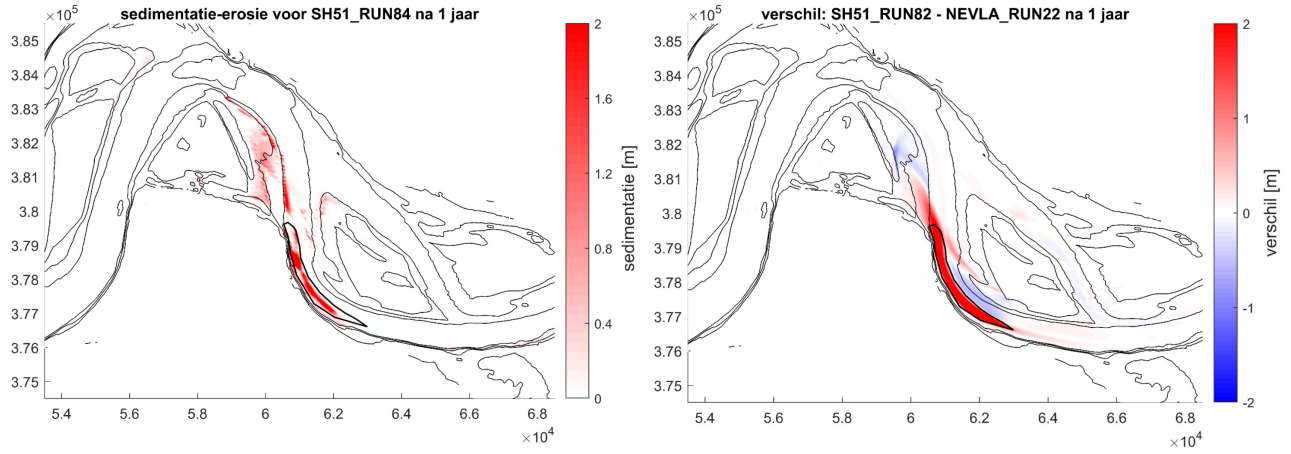
Figuur 3 - Voorbeeld van morfologische modelresultaten uit Röbke *et al.* (2022) met gesimuleerde volumeveranderingen in de macrocellen en residuele transporten tussen de macrocellen voor simulaties met 0.96 m zeespiegelstijging tot 2100 en met de huidige (boven) of toekomstige (onder) stortstrategie.

Modelonderzoek naar morfologische effecten stortstrategie door het Waterbouwkundig Laboratorium

Binnen het Agenda voor de Toekomst project "*Sedimenttransport op verschillende tijdschalen*" werden door Stark *et al.* (2020a; b) modelberekeningen uitgevoerd waarmee de morfologische invloed en de verspreiding van sedimentstortingen in de Westerschelde op middellange termijn (i.e., 1 tot 10 jaar) werd bestudeerd. Voor dit onderzoek werd zowel gebruik gemaakt van het NeVla-model in Delft3D als het Scaldis model in Telemac.

Uit Stark *et al.* (2020a), waarin de focus lag op het sedimenttransport en de morfologische ontwikkeling in een zone rondom de Platen van Ossenisse en de Drempel van Hansweert, volgt dat het meenemen van vaargeulonderhoud (i.e., baggeren én storten) essentieel is voor het reproduceren van de morfologische ontwikkeling op middellange termijn. In modelberekeningen zonder vaargeulonderhoud blijkt de ligging van geulen en platen zeer dynamisch. Er wordt gesteld dat deze intrinsieke morfologische trends die in de modelsimulaties aanwezig zijn de interpretatie van modelresultaten kunnen bemoeilijken en dat in scenario-analyses gekeken dient te worden naar relatieve veranderingen in morfologische ontwikkeling.

In Stark *et al.* (2020b) is specifiek gekeken naar de stortstabiliteit en sedimentverspreiding aan de hand van modelberekeningen (Figuur 4). Berekeningen met een vaste bodem werden gebruikt om sedimentatiezones te identificeren. Berekeningen met een morfologisch actieve bodem werden gebruikt om de (relatieve) invloed van de stortingen op de morfologische ontwikkeling en de stortstabiliteit te bestuderen. De modelstudie laat zien dat individuele stortingen van 1-3 Mm^3 in de diepe putten slechts een beperkt effect hebben op de morfologische ontwikkeling na 1 of 2 jaar. Direct opwaarts en afwaarts van de diepe stortvakken, evenals binnen de stortpolygonen zelf, wordt wel steeds een relatieve bodemverhoging gesimuleerd. Ook is er ten gevolge van de abrupte verondieping die de storting zelf veroorzaakt veelal sprake van een relatieve verbreding of verdieping van de geulsectie evenwijdig aan de stortzone. Het dwarsprofiel van de vaargeul verandert in de omgeving van de stortvakken dus naar een minder diep en iets bredere sectie. Tot slot werd op basis van de modeloefening door Stark *et al.* (2020b) aangeraden om de invloed van sedimentstortingen te onderzoeken met morfologisch actieve modellen en om gebruik te maken van een inspeeltijd om de initiële morfologische respons van het model te reduceren. Het verminderen van de initiële respons in een modelsimulatie vergemakkelijkt de interpretatie van de modelresultaten (Roelvink, 2006).



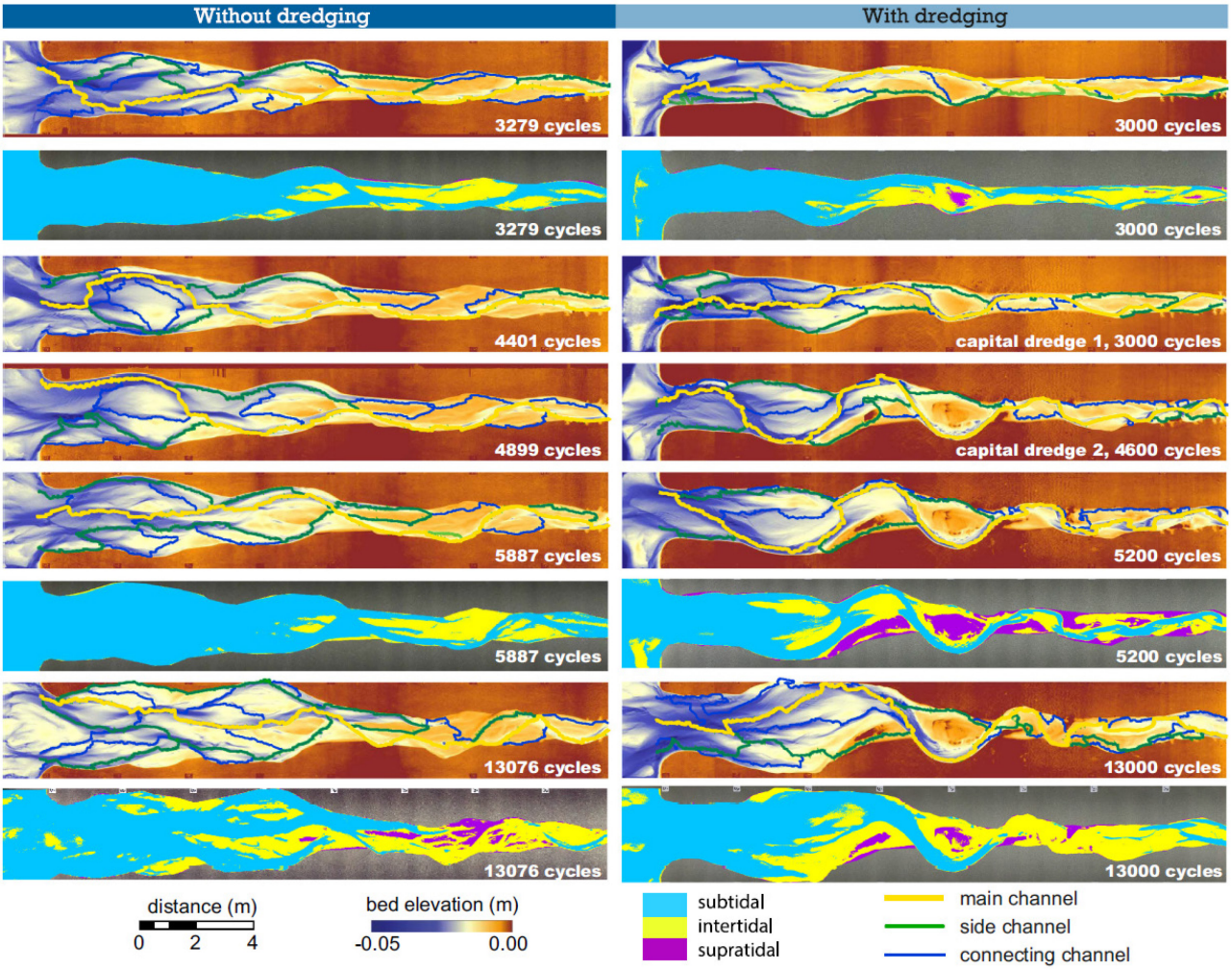
Figuur 4 - Voorbeeld van modelresultaten uit Stark *et al.* (2020b) met gesimuleerde verspreiding van sedimentstorting in stortvak SH51 (links) en relatieve invloed op morfologische ontwikkeling na één jaar (rechts).

2.2.2 Gecombineerde numerieke- en fysische schaalmodellering door Universiteit Utrecht

Van Dijk *et al.* (2021) gebruikten fysische schaalproeven, bathymetrische data en morfodynamische modellen (i.e., met het Delft3D-NeVla model) om de effecten van baggeren en storten op de morfologie, en met name het voortbestaan van het meergeulensysteem en de intertidale platen, in de Westerschelde te analyseren. De fysische schaalmodellering is uitgevoerd in de *"metronoom"*, waarin getijstroming wordt nagebootst door het periodiek kantelen van het gehele model (Kleinhans *et al.*, 2017). Waar de data-analyse en de numerieke modellering in dit onderzoek gebaseerd zijn op de daadwerkelijke morfologie van de Westerschelde is de fysische schaalmodellering gebaseerd op een sterk geschematiseerde weergave. In het fysisch schaalmodel wordt namelijk gestart met een vlakke bodem en wordt de morfologische ontwikkeling dus niet bepaald door een reeds opgelegde beginconditie op basis van een geobserveerde bodemligging. Figuur 5 toont de ontwikkeling van de estuariene morfologie in de fysische schaalmodellering door Van Dijk *et al.* (2021) met en zonder baggeren en storten (i.e., baggeren en storten is in het schaalmodel geïmplementeerd door periodiek de drempels te verdiepen en sediment elders terug te deponeren).

Uit de studie door Van Dijk *et al.* (2021) wordt geconcludeerd dat alle methoden aangeven dat bagger- en stortstrategieën op de lange termijn in algemene zin ongunstig zijn voor de morfologie van het meergeulensysteem omdat het een onbalans creëert tussen ondiepe en diepere delen van het estuarium.

Hierdoor wordt de positie van de hoofd- en nevengeul gefixeerd en kunnen de morfologisch waardevolle kortsluitgeulen verloren gaan (Swinkels *et al.*, 2009). Verdere verdieping of uitbreiding van de hoofdgeul verergerd deze ongunstige ontwikkelingen, maar zeespiegelstijging zou juist als gunstig bijeffect kunnen hebben dat het meergeulensysteem nieuw leven wordt ingeblazen. Maatregelen die door middel van een stortstrategie worden genomen om deze morfologische trends tegen te gaan hebben volgens Van Dijk *et al.* (2021) een beperkt effect. Maar er wordt wel geconcludeerd dat een strategie waarbij sediment in de hoofdgeul wordt teruggestort zowel uit ecologisch als uit economisch oogpunt het meest gunstig lijkt.



Figuur 5 - Morfologische ontwikkeling in schaalmodelproeven door Van Dijk *et al.* (2021), met en zonder vaargeulonderhoud.

2.2.3 Synthese van proefstortingen en modelanalyses

Door Huisman *et al.* (2020) werd een syntheserapport opgemaakt met een nadere uitwerking van een aantal eerdere studies met betrekking tot lokale processen tijdens het storten, de levensduur van stortingen en de regionale verspreiding van het sediment (Huisman *et al.*, 2018; Huismans *et al.*, 2021; Van der Wegen *et al.*, 2021). In dit rapport zijn de mechanismen voor verspreiding van gestort sediment in een conceptueel model uitgewerkt op basis van de proefstortingen die in de Put van Hansweert zijn uitgevoerd. Voor andere diepe putten die als stortlocatie zullen worden gebruikt is vervolgens een doorvertaling gemaakt van de verwachte effecten. Zo wordt een overzicht gegeven van de te verwachten effecten van storten van baggerspecie in diepe putten op de hydrodynamica, morfologie en het baggerbezwaar in de Westerschelde.

Enkele bevindingen uit dit syntheserapport met betrekking tot het effect van storten in diepe delen van het estuarium staan hieronder opgesomd. Hierbij wordt opgemerkt dat veel bevindingen louter zijn gebaseerd op expert-judgement en doorvertaling van het conceptueel model naar lange termijn morfologische ontwikkelingen.

Zo wordt op basis van expert-judgement verwacht dat de diepte van de vaargeul op de lange termijn gelijkmatiger wordt als gevolg van het deels opvullen van de diepe putten zelf. Dit is in overeenstemming met de hierboven besproken modelstudie door Röbke *et al.* (2022). Op een termijn van enkele decennia kan dit een lichte reductie van de getijslag tot gevolg hebben en kan ook de vloeddominantie licht toenemen. Het effect op de getijslag zal de eerste jaren echter beperkt blijven tot maximaal 1 cm volgens de analyses in Huisman *et al.* (2020). Het effect op getij-asymmetrie kan zich doorzetten naar een reductie in sedimentexport in de sedimentbalans.

Ook wordt door Huisman *et al.* (2020) aandacht besteed aan de ruimtelijke herverdeling van sediment in het meergeulensysteem als gevolg van de gekozen stortstrategie. Zij verwachten dat een stortstrategie waarbij er in de diepe putten wordt gestort logischerwijs zorgt voor een groter sedimentvolume in de hoofdgeul en minder opvulling van nevengeulen, dan een strategie waarbij er ook in nevengeulen wordt gestort. Dit wordt als een gunstig effect beschouwd omdat het opvullen van de nevengeulen onwenselijk wordt geacht.

Een ander effect van storten in de diepe putten dat in dit syntheserapport wordt besproken is een toename van het sedimenttransport richting de geulwanden en dientengevolge de mogelijke toename van het aantal zettingsvloeiingen. Dit effect zou op lange termijn kunnen leiden tot een hogere dynamica van de geulwanden en daarmee een snellere morfologische ontwikkeling. Ook kan de geobserveerde aanzandende trend in de binnenbochten van diepe putten waarin wordt gestort op termijn leiden tot een subtiele verandering in verdeling van de getijstroming over de breedte. Als de vloedstroming meer naar de buitenbocht wordt geduwd kan daar erosie ontstaan met een verwijding van de bocht tot gevolg. Dit wordt ook waargenomen in de Put van Hansweert. Op basis van de analyses door (Huismans *et al.*, 2021) kan echter niet worden vastgesteld of deze ontwikkeling het gevolg is van het storten in de diepe put, maar er wordt wel gesteld dat storten in de put deze ontwikkeling kan versterken.

Tot slot wordt in het syntheserapport door Huisman *et al.* (2020) gesteld dat het baggerbezwaar op lange termijn waarschijnlijk zal toenemen naarmate de diepe putten in de hoofdgeul geleidelijk opvullen door het langdurig storten in diepe putten. Morfologische modelberekeningen door (Huisman *et al.*, 2018) lieten over een simulatieperiode van 10 jaar al een kleine toename van 10-20% in het baggerbezwaar zien ten opzichte van een strategie waarbij ook in de nevengeulen en op de plaatranden wordt gestort.

2.3 Kennisleemtes state-of-the-art

Bovengenoemde studies hebben de natuurlijke morfologische ontwikkeling van de Westerschelde en de impact van menselijke activiteiten onderzocht, waarbij verschillende numerieke modellen werden gebruikt. Deze onderzoeken hebben aangetoond dat stortstrategieën en zeespiegelstijging significante effecten hebben op de morfologie, sedimenttransport, en getijslag in het estuarium. Er is echter nog onzekerheid over de langetermijneffecten van deze stortstrategieën en de invloed van zeespiegelstijging op de morfologische kenmerken van het plaat-geulsysteem en de duurzaamheid van het storten in diepe delen in relatie tot het baggerbezwaar.

Dit rapport onderzoekt daarom de lange termijn effecten van een gekozen stortstrategie, i.e., "storten in diepe delen", op de morfologische kenmerken van de Westerschelde en helpt om onzekerheden in bestaande scenario-analyses door Röbke *et al.* (2022) en Van Dijk *et al.* (2021) te verkleinen. Hoewel interacties met zeespiegelstijging buiten de scope van dit rapport vallen, biedt de geïmplementeerde modelaanpak een basis voor toekomstige studies die deze interacties kunnen onderzoeken.

3 Methodiek

3.1 Modelaanpak

Het Delft3D modelinstrumentarium dat werd ontwikkeld binnen het AvdT-onderzoek *"Verbetering morfologisch instrumentarium"* (Nnafie *et al.*, 2016, 2017b; a) wordt in deze studie toegepast voor het onderzoek naar de effecten van vaargeulonderhoud en verschillende stortstrategieën op de lange termijn morfologische ontwikkeling van de Westerschelde.

Op basis van een gevoeligheidsanalyse en verkennende simulaties kunnen eerst de effecten van verschillende modelinstellingen en schematiseringen op de gemodelleerde morfologische kenmerken worden verkend. Het is hierbij niet de bedoeling om het model te kalibreren of te valideren ten opzichte van een specifieke bestaande bathymetrie, temeer omdat de bathymetrie in de Westerschelde over de laatste decennia tot eeuwen zeer veranderlijk was en daarnaast ook is beïnvloed door allerlei menselijke ingrepen zoals baggerwerkzaamheden en in- of ontpolderingen. De modelinstellingen kunnen wel worden gekozen aan de hand van meer algemene morfologische kenmerken die representatief zijn voor het systeem van de Westerschelde, zoals de aanwezigheid van een meergeulensysteem bestaande uit verschillende macrocellen, de aanwezigheid van drempels en diepe putten (relevant voor de stortstrategie) en de globale diepteligging of geulvolumes (hypsometrie).

Na het selecteren van de modelinstellingen kunnen onderhoudsbaggerwerken worden geïmplementeerd in een of meerdere vervolgrun(s). Dit wil zeggen dat de verkregen morfologie uit de initiële run als startpunt wordt gebruikt voor de scenario-analyse waarin de effecten van een stortstrategie worden onderzocht. In het geïdealiseerd model kan de ligging van de vaargeul, de platen en de drempels en daardoor ook de stortvakken daardoor afwijken van de realiteit. Er dient dus een methodiek of algoritme te worden toegepast om een stortstrategie (e.g. storten in diepe delen, plaatrandstortingen, etc.) toe te passen op de morfologie van het geïdealiseerd model. De geïmplementeerde stortstrategie zal daarom een conceptuele schematisering zijn van de werkelijkheid.

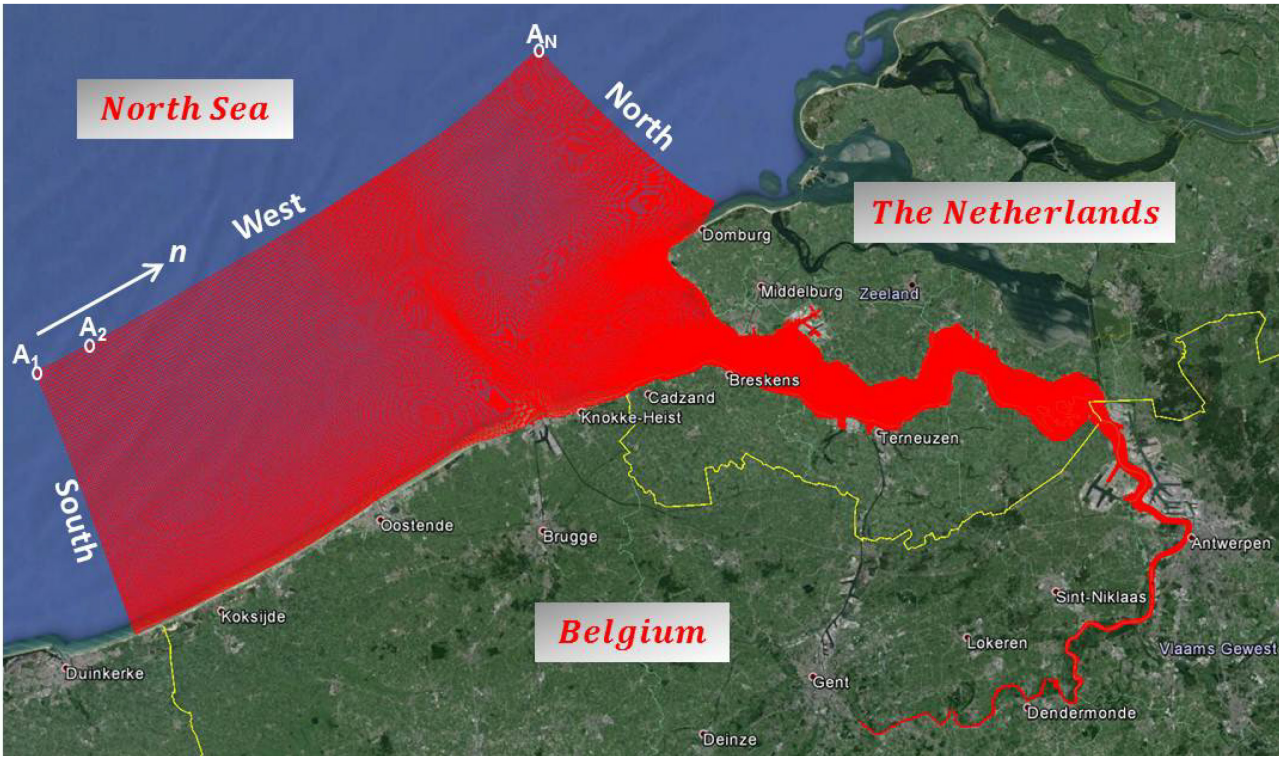
3.2 Modelinstellingen

In deze sectie worden de modelinstellingen uiteengezet die op basis van de verkennende simulaties zijn geselecteerd. In sectie 4.1 wordt een overzicht gegeven van de verkregen modelresultaten en morfologische kenmerken met de geselecteerde modelinstellingen.

In sectie 4.2 wordt in een gevoeligheidsanalyse de invloed van enkele van de gekozen instellingen en schematiseringen toegelicht.

3.2.1 Modeldomein en grid

Figuur 6 laat het modeldomein en modelgrid zien van het Delft3D model dat in deze studie wordt toegepast. Het modelrooster is afgeleid van het originele Delft3D-NeVla model (Hartsuiker & van Banning, 2004), maar de getijgebonden zijrivieren zijn afgeknipt. Bovendien is het model vergroofd ten opzichte van het originele NeVla model, evenals in de studie door (Van der Wegen & Roelvink, 2012). De (Beneden-)Zeeschelde maakt ook onderdeel uit van het modeldomein, maar dient hierin vooral als 'randgebied' om de weergave van de getijvoortplanting en de morfologie in de Westerschelde representatief te maken. De resolutie van het model in de Zeeschelde is te grof om een adequate analyse van de morfologische kenmerken of van de morfologische ontwikkeling uit te voeren. Vraagstukken rondom *grensoverschrijdend storten* vormen daarom geen onderdeel van deze studie.

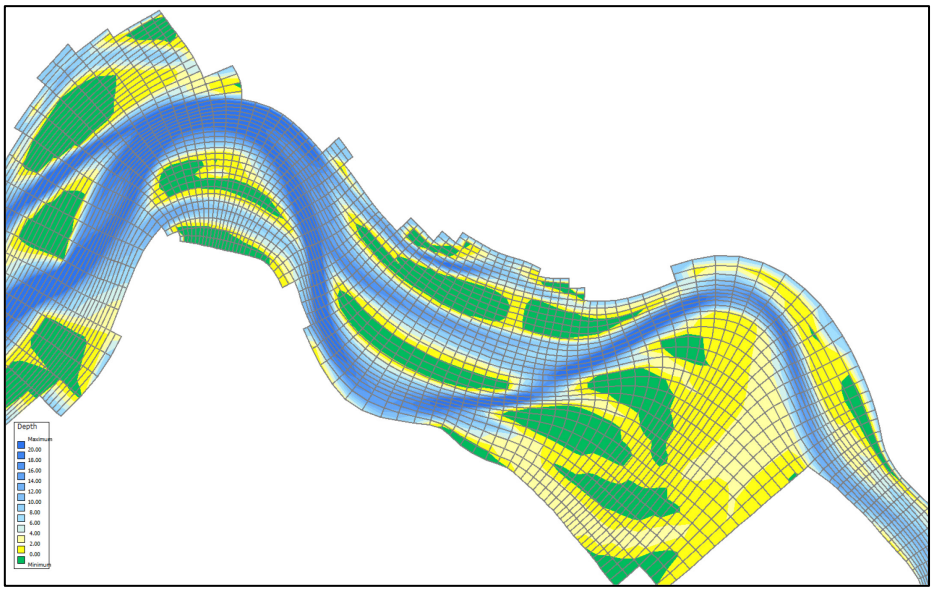


Figuur 6 - Modeldomein.

Verfijning grid

In (Nnafie *et al.*, 2017c, b; a, 2018a) werd het model toegepast voor morfologische vraagstukken in het mondingsgebied. In de huidige studie betreft het interessegebied de volledige Westerschelde. Uit verkennende simulaties en resultaten uit de eerdere projecten waarin dit model werd toegepast is gebleken dat de resolutie van het model in het oostelijke deel van de Westerschelde onvoldoende was om een representatief meergeulenstelsel te reproduceren. Daarom is het model in de zone Terneuzen-Bath voor de huidige studie verder verfijnd (i.e., met een factor 2 in de lengterichting; zie Figuur 7). Bovendien zorgt deze verfijning voor minder langgerekte gridcellen, waardoor de geulvorming in het model minder wordt beïnvloed door het modelgrid zelf. Het effect van de roosterverfijning op de verkregen morfologische resultaten maakt onderdeel uit van de gevoeligheidsanalyse in sectie 4.2.

Uiteindelijk varieert de resolutie van het model van maximaal 2x3 km nabij de zuidrand in de Noordzee, 400x700 m in het mondingsgebied, naar ongeveer 300x800 m in de westelijke helft van de Westerschelde, 150x400 m in het oostelijk deel van de Westerschelde en uiteindelijk ongeveer 30x100 m in de Boven-Zeeschelde.



Figuur 7 - Verfijnd grid in oostelijke helft Westerschelde (bathymetrie ter illustratie).

3.2.2 Bathymetrie

Initiële bodemligging

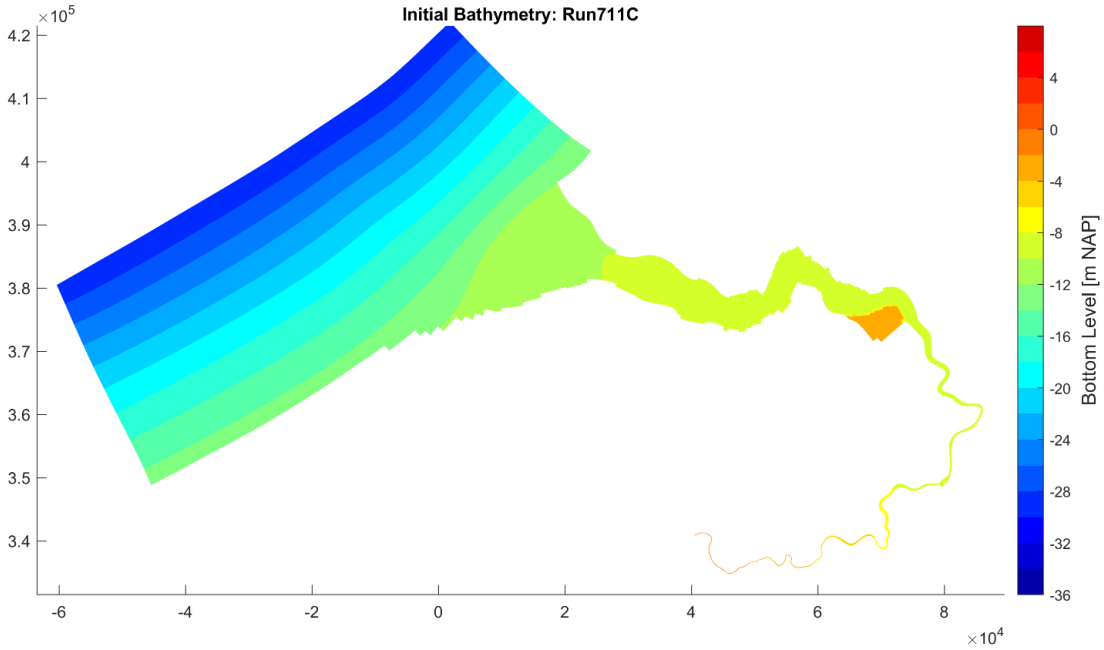
Alle morfodynamische experimenten starten vanuit een vlakke hellende bodem (Figuur 8). De diepteligging in de Westerschelde is -8,6 m NAP. In de Zeeschelde varieert de initiële diepteligging tussen 0,0 m NAP aan de opwaartse rand en -8,6 m NAP ter hoogte van de Belgisch-Nederlandse grens. Op de Noordzee neemt de initiële bodemdiepte vanaf Vlissingen geleidelijk toe in zeewaartse richting tot -30 m NAP aan de zeerand.

Dikte sedimentlaag

Er wordt in het model een uniforme sedimentlaag van 50 m dik opgelegd. De harde niet-erodeerbare bodem bevindt zich daardoor 50 m onder de initiële bodemligging. Er zijn dus geen harde lagen geïmplementeerd op basis van gekende lithologie. De reden hiervoor is dat binnen de geïdealiseerde modelopzet de morfologie door het model zelf gevormd wordt. Morfologische processen gerelateerd aan het (langzaam) doorbreken van hardere kleilagen als onderdeel van de vorming van de uiteindelijke morfologie na enkele honderden jaren kunnen niet goed in het model worden geïmplementeerd en vallen daarom buiten scope van deze studie.

Bodemligging Verdronken Land van Saeftinghe

De initiële bodemligging en de dikte van de initiële sedimentlaag ter hoogte van het Verdronken Land van Saeftinghe vormen een uitzondering op bovenstaande beschrijving. Uit verkennende simulaties is gebleken dat de morfologische kenmerken van het meergeulensysteem in de oostelijke helft van de Westerschelde beter gereproduceerd worden als de hoogteligging van het verdronken Land van Saeftinghe in zekere mate wordt vastgelegd in de modelgeometrie. Daarom is ervoor gekozen om de initiële bodemligging van Saeftinghe op 0 m NAP in te stellen (zie Figuur 8) en tevens een niet-erodeerbare bodem toe te passen voor dit gebied. Dit wil zeggen dat er wel sedimentatie in het gebied kan plaatsvinden, maar geen ontgronding dieper dan deze ingestelde harde laag.



Figuur 8 - Initiële bodemligging.

3.2.3 Randvoorwaarden

Afwaartse randvoorwaarden

Conform eerdere studies met het geïdealiseerd Delft3D-model wordt aan de afwaartse rand een combinatie van waterstanden ζ aan de westelijke zeerand en Neumann-randvoorwaarden aan de zuidelijke en noordelijke randen toegepast (Figuur 6). Het model wordt op de westelijke rand geforceerd door drie harmonische getijcomponenten ($M2$, $M4$ en $M6$) met amplitudes ζ_2, ζ_4 en ζ_6; frequenties ω, $2{\cdot}\omega$ en $3{\cdot}\omega$; en fases ϕ_2, ϕ_4 en ϕ_6 volgens:

$$\zeta(x,y,t) = z_s + \hat{\zeta}_2 \cos(\omega t - \phi_2) + \hat{\zeta}_4 \cos(2\omega t - \phi_4) + \hat{\zeta}_6 \cos(3\omega t - \phi_6)$$

Hierin is z_s de gemiddelde waterstand. In Nnafie *et al.* (2016b) wordt de afleiding van de harmonische componenten langs de modelrand uiteengezet. De getijgolf loopt van de zuidrand naar de noordrand van het model. In Tabel 1 worden de opgelegde amplitudes en fases opgesomd. De opgelegde waterstanden langs de westelijke zeerand worden lineair geïnterpoleerd tussen de zuidrand en de noordrand. De hoekfrequentie van het M2-getij is ω = 1,405·10^{-4} s^{-1}. De Neumann randvoorwaarden aan de zuidrand en noordrand bestaan uit een opgelegde waterstandsgradiënt waarvan de amplitude en fase volgen uit het waterstandsverloop aan de westelijke zeerand.

Tabel 1 - Afwaartse randvoorwaarden langs westrand.

	Zuid		Noord	
Getijcomponent	**Amplitude**	**Fase**	**Amplitude**	**Fase**
M2	ζ_2 = 1,6 m	ϕ_2 = 23°	ζ_2 = 1,2 m	ϕ_2 = 55°
M4	ζ_4 = 0,1 m	ϕ_4 = -11°	ζ_4 = 0,1 m	ϕ_4 = 113°
M6	ζ_6 = 0,05 m	ϕ_6 = -24°	ζ_6 = 0,05 m	ϕ_6 = 77°

Opwaartse randvoorwaarden

Aan de opwaartse rand wordt een constant debiet opgelegd van 100 m^3/s.

In de gevoeligheidsanalyse zijn enkele berekeningen uitgevoerd waarin de invloed van het bovendebiet op de morfologische modelresultaten beknopt is onderzocht.

Randvoorwaarden sedimenttransport

De randvoorwaarden voor sedimenttransport worden bepaald door een evenwichtssedimentflux (Deltares, 2018). Dit betekent dat de sedimentflux aan de randen is aangepast aan de lokale stromingsomstandigheden en er daardoor weinig sedimentatie of erosie wordt verwacht nabij de rand.

3.2.4 Simulatieduur

Uit eerder modelonderzoek door Nnafie *et al.*, (2017c) blijkt dat een simulatieduur van minimaal 300 jaar vereist is om stabiele morfologische patronen te verkrijgen en ervoor te zorgen dat de verkregen resultaten niet afhankelijk zijn van de tijd. De standaard simulatieduur is daarom 500 jaar voor de berekeningen die vanaf een vlakke bodem starten.

In de scenario-analyse voor de stortstrategie worden vervolgruns opgestart (startend vanaf de ingespeelde bodem na 500 jaar) met een simulatieduur van 100 jaar.

Morfologische versnellingsfactor

Er wordt gerekend met een morfologische versnellingsfactor of *MORFAC* van 100. Door de toepassing van een *MORFAC* worden alle bodemveranderingen (i.e., erosie en sedimentatiehoeveelheden) met een factor vermenigvuldigd. Het sedimenttransport zelf wordt niet vermenigvuldigd. Dit houdt in dat er een factor 100 verschil is tussen de hydrodynamische simulatieduur en de morfologische simulatieduur. In de gevoeligheidsanalyse is ook nagegaan wat de impact is van de toegepaste *MORFAC* op de morfologische ontwikkeling.

3.2.5 Sedimenttransportformulering

In de modelberekeningen wordt gerekend met de sedimenttransportformule van Engelund & Hansen, (1967), waarmee het totale sedimenttransport wordt berekend (i.e., geen onderscheid tussen bodemtransport en zwevend transport). In de gevoeligheidsanalyse zijn ook berekeningen uitgevoerd met de Van Rijn transportformuleringen, waarin dit onderscheid wel wordt gemaakt.

Engelund Hansen

Het sedimenttransport wordt berekend op basis van de transportformule van Engelund & Hansen, (1967). Deze is gebaseerd op het energiebalans concept en berekent direct het totale sedimenttransport. Er wordt dus geen onderscheid gemaakt tussen bodemtransport en suspensietransport.

De formule wordt uitgedrukt in volgende vergelijking:

$$\overrightarrow{q_s} = \frac{0{,}05\,|u^4|.\vec{u}}{\sqrt{g}\,.C^3\,.\Delta^2\,.D_{50}} \qquad (2.1)$$

De grootte van het sediment transport q_s [$m^3/m/s$] wordt gerelateerd aan:

▪ U	[m/s]	Diepte-gemiddelde snelheid
▪ $\Delta = (\rho_s - \rho_w)/\rho_w$	[-]	Relatieve dichtheid sedimentdeeltjes
▪ g	[m/s^2]	Valversnelling

▪ D_{50}	[m]	Mediane korrelgrootte
▪ C	[$m^{1/2}/s$]	Chézy coëfficiënt (i.e., met $C = 1/n \cdot R^{1/6}$)
○ n	[$s/m^{1/3}$]	Manning coëfficiënt
○ R	[m]	Hydraulische radius (~waterdiepte)

Van Rijn

In de gevoeligheidsanalyse worden ook simulaties uitgevoerd waarin het sedimenttransport wordt berekend met de Van Rijn transportformule. Het bodemtransport volgens Van Rijn (1993, 2007) wordt als volgt berekend:

$$|Q_b| = \alpha_b \cdot \sqrt{\Delta g D_{50}^3} \cdot {D_*}^{-0,3} \cdot max\left(0\ ;\ \left(\frac{\theta-\theta_{crit}}{\theta_{crit}}\right)\right)^{\eta} \tag{2.2}$$

met:

- α_b en η, constanten [-]
- D_* de non-dimensionale sedimentdiameter [-]

$$D_* = D_{50}\left[\Delta\frac{g}{\nu^2}\right]^{\frac{1}{3}} \tag{2.3}$$

- θ de non-dimensionale bodemschuifspanning [-]

$$\theta = \frac{\mu\tau_b}{(\rho_s-\rho_w)gD_{50}} \tag{2.4}$$

- θ_{crit} de kritische Shields parameter [-] die in Sisyphe afhankelijk is van D_* volgens:

$$\begin{aligned}
\theta_{crit} &= 0{,}24D_*^{-1} && voor: D_* \leq 4\\
\theta_{crit} &= 0{,}14D_*^{-1} && voor: 4 < D_* \leq 10\\
\theta_{crit} &= 0{,}04D_*^{-1} && voor: 10 < D_* \leq 20\\
\theta_{crit} &= 0{,}013D_*^{-1} && voor: 20 < D_* \leq 150\\
\theta_{crit} &= 0{,}045 && voor: 150 \leq D_*
\end{aligned} \tag{2.5}$$

- ν de kinematische viscositeit van water [Pa·s]
- μ een correctiefactor voor bodemwrijving of *'skin friction'* in Sisyphe [-]
- τ_b de berekende bodemschuifspanning [Pa] volgens:

$$\tau_b = \frac{1}{2}\rho_w C_d \vec{U} \tag{2.6}$$

- U de dieptegemiddelde stroomsnelheid [$m \cdot s^{-1}$]
- C_d de non-dimensionale wrijvingscoëfficiënt [-] volgens de Manning formulering:

$$C_d = 2gn^2h^{-1/3} \tag{2.7}$$

- n Manning's wrijvingscoëfficiënt [$s \cdot m^{-1/3}$]
- h waterdiepte [m]

De waarden voor α_b en η verschillen tussen verschillende versies van de formuleringen in Van Rijn (1993) en Van Rijn (2007).

Voor het suspensietransport wordt gebruik gemaakt van de volgende uitdrukking:

$$Q_s = \vec{U}C_{ref} \tag{2.8}$$

met:

- U de dieptegemiddelde stroomsnelheid [m·s^{-1}]
- C_{ref} de referentieconcentratie [kg·m^{-3}] op hoogte Z_{ref} volgens:

$$C_{ref} = 0{,}015\, D_{50} \frac{\max\left(0\,;\left({}^{\theta}/_{\theta_{crit}} - 1\right)\right)^{1{,}5}}{Z_{ref}\,.D_{*}^{0{,}3}} \tag{2.9}$$

$$Z_{ref} = max\left({}^{k_s}/_{2}\;;\; 0{,}01\; m\right) \tag{2.10}$$

Hierin is θ wederom de non-dimensionale bodemschuifspanning, θ_{crit} de kritische bodemschuifspanning en is C_{ref} de referentieconcentratie. Deze wordt bepaald op de referentiehoogte Z_{ref}, die een functie is van de stroming-gerelateerde ruwheidshoogte k_s [m]. Transport boven deze referentiehoogte wordt beschouwd als suspensietransport en onder de referentiehoogte als bodemtransport. De stroming-gerelateerde ruwheidshoogte is gelijk aan $k_s = 3{\cdot}d_{50}$. Een andere optie is om de bodemruwheid door de bodemruwheidsvoorspeller uit Van Rijn (2007) te laten berekenen.

Coëfficiënten voor transversaal en lateraal hellingtransport

In zowel de Engelund-Hansen als de Van Rijn transportformulering kan een correctie voor (aanvullend) hellingtransport worden doorgevoerd. Het bodemtransport wordt namelijk beïnvloed door de lokale bodemhelling. Er worden twee hellingen onderscheiden: de helling in de richting van het transport (ook wel de longitudinale bodemhelling genoemd) en de helling in de richting loodrecht daarop (ook wel de transversale bodemhelling genoemd).

De longitudinale bodemhelling leidt tot een verandering van de sedimenttransportsnelheid (Bagnold, 1966):

$$\vec{S}_b = \alpha_s \vec{S} \tag{2.11}$$

Met:

$$\alpha_s = 1 + \alpha_{bs}\left(\frac{\tan(\emptyset)}{\cos\left(\tan^{-1}\left(\frac{\partial z}{\partial s}\right)\right)\left(\tan(\emptyset) + \frac{\partial z}{\partial s}\right)} - 1\right) \tag{2.12}$$

waarin:

▪ $\vec{S}$	De transportvector zonder hellingeffecten
▪ α_{bs}	Een door de gebruiker te kiezen kalibratieparameter (default: α_{bs} = 1,0)
▪ $\emptyset$	De transportrichting
▪ $\frac{\partial z}{\partial s}$	De lokale bodemhelling in de stroomrichting

Het additionele bodemtransport loodrecht op de lokale stroomrichting als gevolg van het transversale hellingeffect wordt berekend met onderstaande formulering (Ikeda, 1984):

$$\vec{S}_{bn} = f_{norm}\overrightarrow{S_b} \tag{2.13}$$

met:

$$f_{norm} = \alpha_{bn}\sqrt{\left(\frac{\tau_{b,cr}}{|\vec{\tau_b}|}\right)}\frac{\partial z_b}{\partial n} \tag{2.14}$$

waarin:

▪ $\overrightarrow{S_b}$	De transportvector zonder hellingeffecten
▪ $\vec{S}_{bn}$	De additionele transportvector als gevolg van transversale hellingeffecten
▪ α_{bn}	Een door de gebruiker te kiezen kalibratieparameter (default: α_{bn} = 1,5)
▪ $\frac{\partial z_b}{\partial n}$	De lokale bodemhelling loodrecht op de stroomrichting
▪ $\tau_{b,cr}$	De kritische bodemschuifspanning
▪ $\lvert\overrightarrow{\tau_b}\rvert$	De bodemschuifspanning als gevolg van de lokale stroming

In deze studie wordt gerekend met α_{BS} = 1,0 en α_{BN} = 1,5. In de gevoeligheidsanalyse zijn ook berekeningen met andere waarden uitgevoerd.

Er wordt opgemerkt dat de keuze voor kalibratieparameters α_{BN} en α_{BS} afhankelijk is van de gekozen transportformulering. In de formule van Engelund Hansen, die het totale transport berekent, wordt het volledige transport aangepast op basis van de hierboven gegeven formuleringen. In de Van Rijn formulering wordt een onderscheid gemaakt tussen bodemtransport en zwevend transport en is enkel het bodemtransport onderhevig aan hellingeffecten. Bij gebruik van de Engelund-Hansen transportformule dienen in het algemeen lagere waarden voor α_{BN} en α_{BS} te worden gekozen dan bij de sedimenttransportformule van Van Rijn. Daarom kunnen gekalibreerde waarden voor α_{BN} en α_{BS} uit andere morfologische modelstudies waarin andere transportformuleringen zijn gebruikt, zoals in het modelonderzoek naar de hellingeffecten door (Baar *et al.*, 2018) en door Van Dijk *et al.* (2019), niet één-op-één worden overgenomen.

3.2.6 Golven

Er zijn geen windgolven geïmplementeerd in de modelschematisering. De implementatie van windgolven in het Delft3D model leidt namelijk tot een sterke toename in rekentijd, waardoor ook aanpassingen aan de tijdstap (i.e., *DT=0,50 min* i.p.v. *DT=0,25 min*), morfologische versnellingsfactor (i.e., *MORFAC=200* i.p.v. *MORFAC=100*) of simulatieduur (i.e., maximaal 400 jaar) noodzakelijk bleken om tot een werkbare rekentijd te komen. Een reguliere modelberekening van 500 jaar waarin de golfmodule wordt geactiveerd en waarin dergelijke aanpassingen aan de tijdstap of morfologische versnellingsfactor niet worden gedaan duurt bijvoorbeeld meer dan twee weken op het HPC-rekencluster. In de gevoeligheidsanalyse is wel een beknopte vergelijking opgenomen tussen modelberekeningen met en zonder golven.

Uit eerder modelonderzoek door Nnafie *et al.* (2017b) blijkt bovendien dat het effect van golven op de morfologische ontwikkeling van de Westerschelde enkel essentieel is in het mondingsgebied. Hier zorgt de golfwerking voor verspreiding van sediment, wat de vorming van een netwerk aan onwerkelijke kleinschalige geulen tegenwerkt. Echter, het feit dat de twee grote geulen in het mondingsgebied (i.e., “Oostgat” en “Wielingen”) gereproduceerd worden ongeacht de implementatie van golven of het golfklimaat, betekent dat de getijstroming de drijvende kracht is achter de ontwikkeling van de hoofdgeulen in het mondingsgebied. In het overige deel van de Westerschelde bleek de implementatie van golven vooral een kwalitatieve invloed te hebben op de morfologische ontwikkeling. Er was wel sprake van verschillen in de exacte ligging van geulen en platen, maar de grootschalige karakteristieken bleven gelijkaardig.

3.2.7 Overige modelinstellingen

Enkele algemene modelinstellingen, waaronder de invoerwaarden en modelconfiguratie voor morfologie en sediment, worden in Tabel 2 opgesomd. Er wordt opgemerkt dat een aantal parameters in deze tabel onderdeel zijn van de gevoeligheidsanalyse in sectie 4.2.

Tabel 2 - Overzicht modelinstellingen.

Beschrijving	Parameter	Waarde
Tijdstap	Δt	15 s
Bodemruwheidscoëfficiënt (Chézy)	C	65 $m^{1/2}s^{-1}$
Eddy viscositeit	ν	1,0 m^2s^{-1}
Eddy diffusiviteit	ϵ	0,1 m^2s^{-1}
Coriolis parameter	f	$1{,}43 \cdot 10^{-4}$ s^{-1}
Soortelijke massa water	ρ_w	1024 kgm^{-3}
Watertemperatuur	T_w	15° C
Transportformule		Engelund-Hansen
Longitudinaal hellingtransport		Bagnold, 1966
Transversaal hellingtransport		Ikeda, 1984
Coëfficiënt longitudinaal hellingtransport	α_{BS}	1,0
Coëfficiënt transversaal hellingtransport	α_{BN}	1,5
Sediment Type	*SedTyp*	Zand
Soortelijke massa sediment	ρ_{sol}	2650 kg/m^3
Sediment diameter	d_{50}	200 µm
Relatieve dichtheid sediment	δ	1,65
Morfologische versnellingsfactor	*MorFac*	100
Inspeeltijd voor begin morfologische berekening	*MorStt*	10080 min
Minimale dikte sedimentlaag voor reductie erosie	*Thresh*	0,05 m
Minimum diepte voor berekening sedimenttransport	*SedThr*	0,10 m
Porositeit	p	0,40

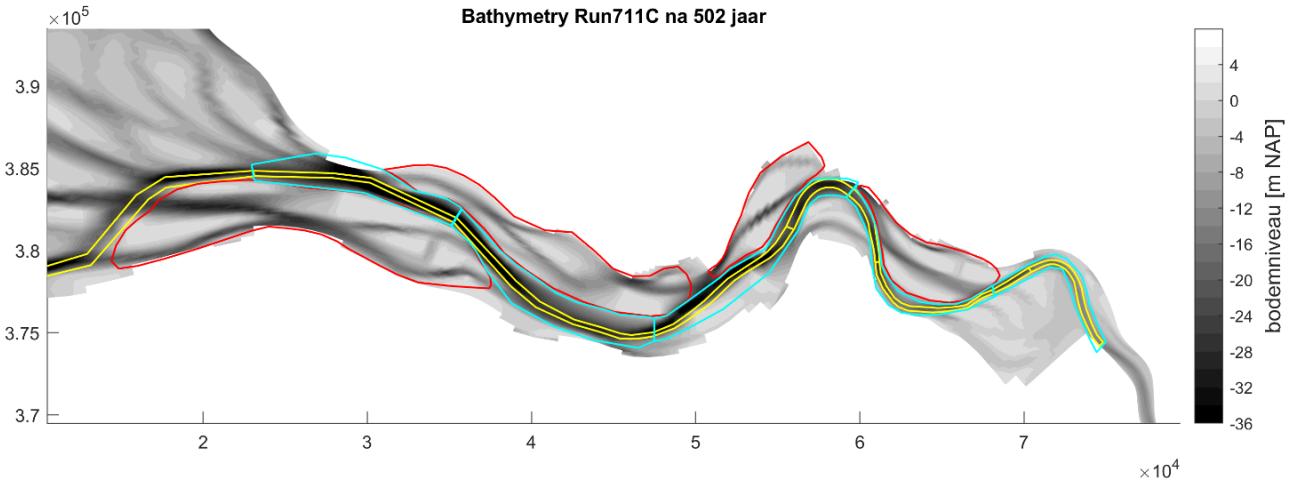
3.3 Stortscenario's

Voor de modelscenario's met vaargeulonderhoud wordt de bagger- en stortmodule in Delft3D toegepast. Deze module biedt de mogelijkheid om binnen vooraf vastgestelde vaargeulpolygonen vaargeulonderhoud voor een bepaalde onderhoudsdiepte uit te voeren en het sediment binnen vooraf ingestelde stortpolygonen weer terug te storten. Hierbij kan ervoor gekozen worden om het sediment volgens een vaste procentuele verdeling over verschillende stortvakken te verdelen, of om per baggerlocatie een bijbehorende stortlocatie te selecteren. Ook is er de mogelijkheid om de verdeling van het sediment binnen een stortpolygoon te wijzigen van een gelijkmatige verdeling naar een verdeling waarbij de diepste delen eerst worden opgevuld.

Vaargeulonderhoud

De vaargeulpolygoon is voor dit modelonderzoek opgesteld aan de hand van de gesimuleerde morfologie in de referentierun. De ligging van de vaargeul is daardoor afwijkend ten opzichte van de huidige vaargeulligging of de vaargeulligging voor een historische bathymetrie. Figuur 9 toont de gedefinieerde vaargeul in de Westerschelde. De vaargeulpolygoon is in verschillende delen opgeknipt op basis van de onderscheidbare macrocellen die in de gesimuleerde morfologie kunnen worden herkend. De onderhoudsdiepte is in alle scenario's ingesteld op -18.85 m NAP (of -16.5 m TAW). Deze afwijking ten opzichte van de daadwerkelijke onderhoudsdiepte in de Westerschelde is gedaan omwille van de diepteligging van de geul en de drempels in de door het model gesimuleerde morfologie na 500 jaar in de referentierun (zie sectie 4.1).

In de Zeeschelde is overigens geen vaargeul gedefinieerd en daar wordt in de stortscenario's ook geen vaargeulonderhoud toegepast. De bodemligging in de sterk geschematiseerde Zeeschelde blijft zich in de stortscenario's dus ontwikkelen zonder menselijke ingrepen.



Figuur 9 - Vaargeulpolygoon (geel) en contouren stortpolygonen in hoofdgeul (blauw) en nevengeul (rood).

Stortstrategie

Er worden een aantal morfologische simulaties uitgevoerd waarin verschillende stortstrategieën zijn geïmplementeerd. Binnen deze stortscenario's worden de stortlocaties gevarieerd tussen (1) hoofdgeul en nevengeul; (2) tussen een gelijkmatige verdeling en het opvullen van de diepste delen; en (3) tussen verschillende macrocellen of geulsecties, waarbij onderscheid wordt gemaakt tussen stortlocaties dichtbij, verder opwaarts of verder afwaarts van de baggerlocatie. Meer specifiek gaat het om scenario's 810G en 810H, waarbij er in de diepe delen van de macrocel opwaarts of afwaarts van de baggerlocatie wordt teruggestort.

Hiervoor zijn verschillende stortzones gedefinieerd die in Figuur 9 worden weergegeven. Elk van de stortzones bestrijkt de hoofdgeul of nevengeul van een onderscheidbare geulsectie in de gesimuleerde morfologie. De stortpolygonen omvatten ook ondiepe of intertidale delen, maar in de modelinstellingen kan een minimale diepte worden ingesteld vanaf waar sediment gestort kan worden. Zodoende wordt in de stortscenario's enkel in de geulen gestort.

Tabel 3 geeft een beschrijving van de stortstrategie die in elk scenario werd geïmplementeerd.

De stortscenario's hebben elk een simulatieduur van 100 jaar, waarbij de gesimuleerde morfologie na 500 jaar in de referentierun (sectie 4.1) als initiële conditie wordt gebruikt.

Stortingen worden in het Delft3D model geïmplementeerd door lokale bodemverhogingen. Het sediment wordt dus niet in de waterkolom losgelaten. Er wordt aangenomen dat deze schematisering op lange termijn geen effect heet op de morfologie.

Tabel 3 - Overzicht modelscenario's stortstrategie.

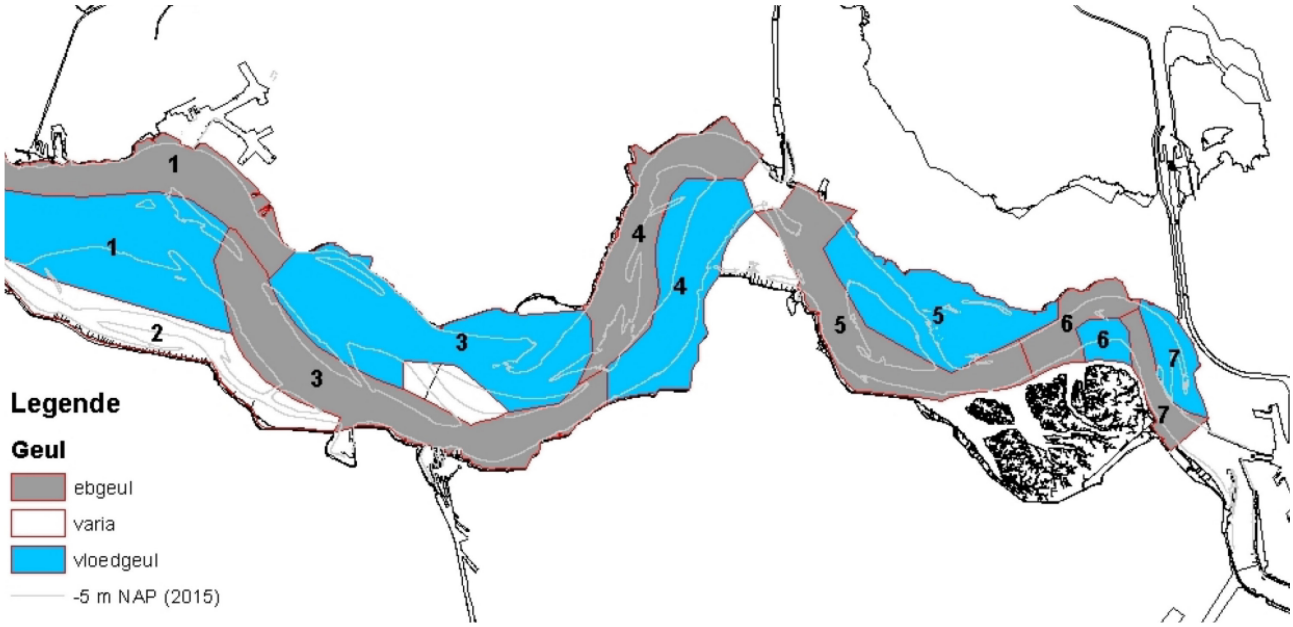
ID	Omschrijving
RUN806	*vervolgrun zonder vaargeulonderhoud*
RUN810A	*alleen baggeren*
RUN810B	*Uniform storten (gelijkmatige verdeling over Westerschelde in alle zones < 0,0 m NAP; cfr. geen stortstrategie; wel sedimentbehoud)*
RUN810C	*Stortstrategie: diepe delen (in meest nabij gelegen sectie/macrocel van de hoofdgeul)*
RUN810E	*Stortstrategie: nevengeulen (in meest nabij gelegen sectie/macrocel van de nevengeul)*
RUN810F	*Stortstrategie: uniform storten in diepe delen (gelijkmatige verdeling over alle geulsecties < -22 m NAP)*
RUN810G	*Stortstrategie: diepe delen (in aangrenzende opwaartse sectie/macrocel van de hoofdgeul)*
RUN810H	*Stortstrategie: diepe delen (in aangrenzende afwaartse sectie/macrocel van de hoofdgeul)*

3.4 Verwerking en analyse van modelresultaten

3.4.1 Beoordeling grootschalige morfologische kenmerken

De gesimuleerde morfologie na 500 jaar in de Westerschelde wordt visueel geanalyseerd en beoordeeld op basis van morfologische kenmerken, zoals de aanwezigheid van een meergeulensysteem, de ligging en geometrie van platen en geulen en de aanwezigheid van drempels en diepe putten. Deze morfologische kenmerken worden van belang geacht voor het kunnen analyseren van de effecten van verschillende stortstrategieën in de daarop volgende scenario-analyse. Bovendien kan aan de hand van deze visuele inspectie worden beoordeeld in hoeverre de gemodelleerde morfologie representatief is voor de geobserveerde morfologie in de Westerschelde. Echter, de geobserveerde grootschalige morfologische kenmerken in de Westerschelde zijn niet constant. Over een periode van decennia tot eeuwen is sprake van grote variatie in de ligging van geulen en platen. Daarbij zijn zowel de geometrie van het estuarium als de diepteligging van geulen en drempels beïnvloed door menselijke ingrepen zoals inpolderingen, zandwinning en vaargeulonderhoud. Daarom wordt in de visuele inspectie van de gemodelleerde morfologie vooral beschouwd of er (1) sprake is van een meergeulensysteem, (2) er macrocellen geïdentificeerd kunnen worden (Figuur 10); en (3) de geometrie van geulen en platen (e.g. breedteverhouding tussen geulen en platen of tussen hoofd- en nevengeulen) gelijkaardig is aan geobserveerde morfologische data.

Naast een visuele inspectie wordt getracht enkele morfologische kenmerken te kwantificeren aan de hand van (1) de hypsometrie van de gemodelleerde morfologie in de Westerschelde in combinatie met het geulvolume en intertidaal volume; en (2) de variatie in geuldiepte langs de thalweg, waarmee diepe putten en/of drempels geïdentificeerd kunnen worden. De berekening van de geulvolumes en intertidale volumes uit de bathymetrie is gebaseerd op de gemiddelde hoogwaters en gemiddelde laagwaters te Hansweert (i.e., centraal in de Westerschelde gelegen). Dit betreft dus een globale inschatting die is bedoeld om de verschillen in morfologie tussen de modelberekeningen te kunnen duiden.



Figuur 10 - De verdeling van de Westerschelde in macrocellen, bestaande uit hoofd- en nevengeul en tussen- en naastliggende intergetijdengebieden. Uit: (Schrijver, 2020)

3.4.2 Getijvoortplanting

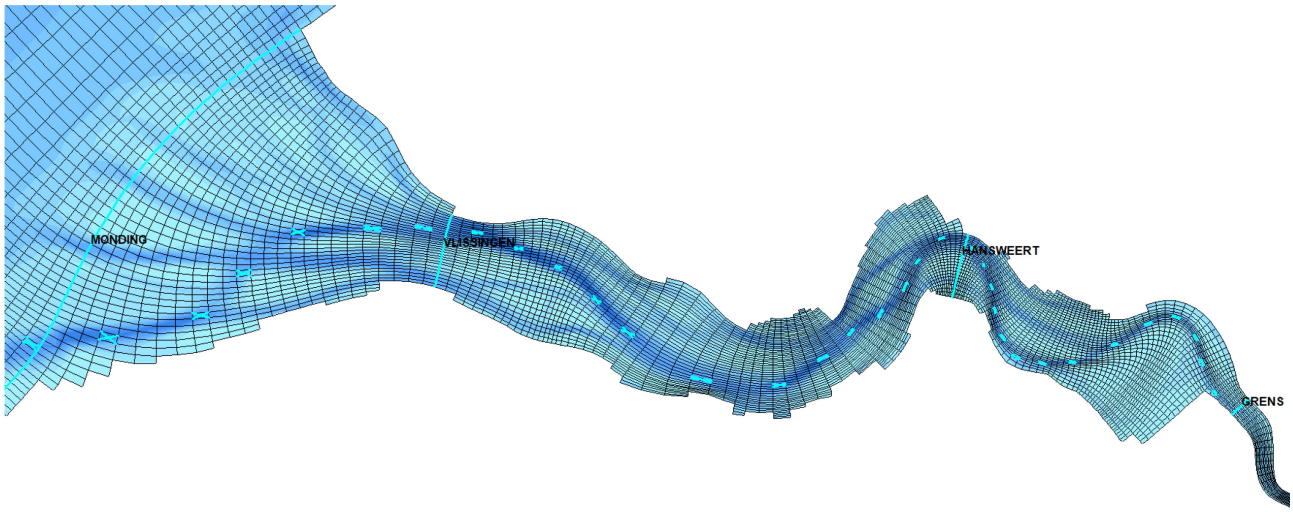
De getijvoortplanting wordt ook beschouwd in de scenario-analyse. Zo kan worden nagegaan of er in de verschillende (stort)scenario's sprake is van een invloed op de getijvoortplanting. Het verticaal getij wordt geanalyseerd door op een aantal uitvoerpunten langs de thalweg (Figuur 11) de getijkarakteristieken (i.e., getijslag, hoog- en laagwaterniveau) te bepalen. Naast de getijslag wordt ook de verticale getij-asymmetrie beschouwd op basis van het verschil tussen de stijgingsduur en dalingsduur ($T_{stijging}/T_{daling}$). Dit gebeurt op basis van de laatste 14,5 dagen (hydrodynamische tijdschaal) of laatste 4 jaar (morfologische tijdschaal) van de simulatie zodat de getijkarakteristieken als representatief kunnen worden beschouwd voor de morfologie aan het einde van de modelsimulatie.

3.4.3 Gemodelleerd sedimenttransport

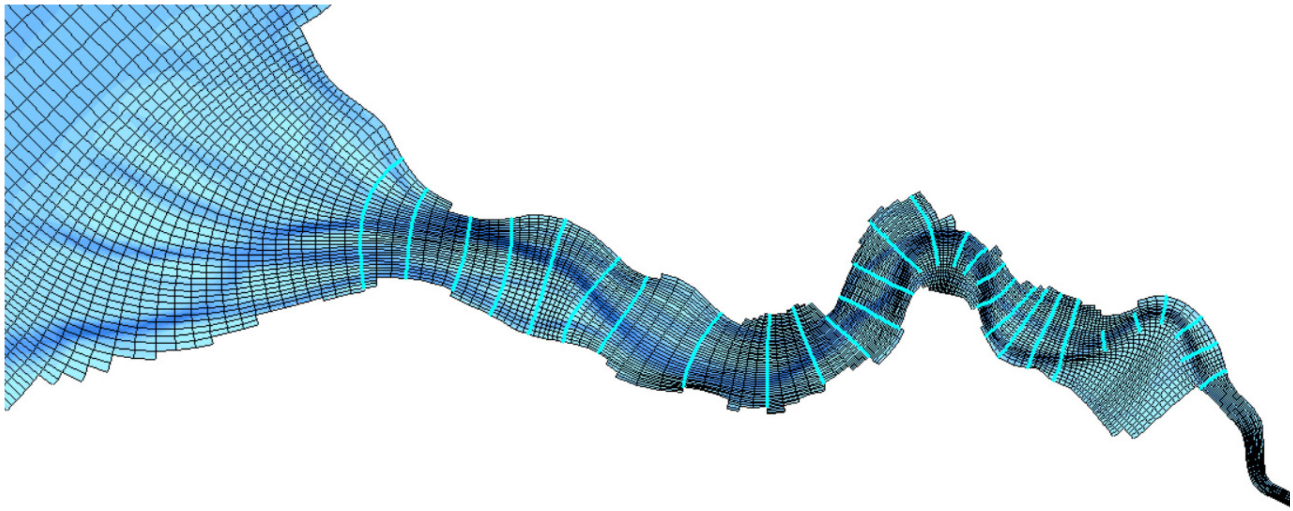
Naast de morfologische kenmerken wordt ook het gemodelleerd sedimenttransport in de verschillende (stort)scenario's vergeleken. Het sedimenttransport wordt geanalyseerd langs een aantal raaien op kenmerkende locaties langs het estuarium (Figuur 11): in het mondingsgebied (i.e., lijn Westkapelle-Cadzand) transect Vlissingen-Breskens (i.e., nabij de monding), ter hoogte van Hansweert (i.e., overgang van westelijke naar oostelijke helft Westerschelde) en bij de Belgisch-Nederlandse grens (i.e., overgang tussen Westerschelde en Zeeschelde).

Voor een gedetailleerde analyse van de sedimenttransportcapaciteit in de Westerschelde is daarnaast per individuele geul een veelvoud aan raaien geanalyseerd om een meer genuanceerd beeld van de transportcapaciteit per geulsectie of per macrocel te krijgen. Deze raaien hebben eenzelfde ruimtelijke spreiding als de uitvoerpunten langs de thalweg in Figuur 12.

De sedimenttransporten over de laatste 4 jaar (morfologische tijdschaal) worden beschouwd. Ze zijn daarmee representatief voor de gesimuleerde morfologie aan het einde van de verschillende modelsimulaties.



Figuur 11 - Uitvoerpunten langs vaargeul.



Figuur 12 - Transecten langs vaargeul.

4 Modelresultaten

In sectie 4.1 worden de resultaten van de referentieberekening, waarvan de modelinstellingen in sectie 3.2 zijn besproken, getoond en worden overeenkomsten en verschillen tussen de door het model geproduceerde morfologie na 500 jaar en geobserveerde historische bodemliggingen bediscussieerd.

Sectie 4.2 bevat de resultaten van een gevoeligheidsanalyse voor variaties in de modelschematisering en parametrisatie.

De door het model geproduceerde morfologie uit de referentiesimulatie dient als initiële conditie voor de scenarioberekeningen in sectie 4.3. Deze scenario-analyse is gebaseerd op morfologische simulaties van 100 jaar en focust op de invloed van variaties in stortstrategie op de morfologische kenmerken van het estuarium.

4.1 Resultaten referentierun

4.1.1 Globale morfologie

In Figuur 13 wordt de morfologische ontwikkeling in de referentierun weergegeven, startend vanaf een vlakke hellende bodem aan het begin van de morfologische simulatie, en vervolgens voor de berekende bodemligging na 100, 300 en 500 jaar. Aanvullend wordt in Figuur 14 de gemodelleerde bodemligging na 500 jaar vergeleken met de geobserveerde bodemligging in de jaren ’50 en in 2009.

Na 100 jaar heeft zich al een duidelijk patroon van geulen en platen gevormd, waarbij de ligging van de hoofdgeul en de grootste platen redelijk gelijk blijft tot het einde van de simulatie na 500 jaar. Dit volgt ook uit de ontwikkeling van de geulcontour (i.e., gebaseerd op de -10 m NAP contourlijnen), die in Figuur 15 zijn weergegeven. Het lijkt er zodoende op dat de harde laterale begrenzing de grootschalige dynamiek van het geul-plaatsysteem op lange termijn beperkt. Enkele belangrijke morfologische kenmerken die in de historische bodemliggingen worden geobserveerd komen terug in de gemodelleerde bodemligging. In Figuur 16 is een schets toegevoegd van herkenbare macrocellen zoals omschreven in (Winterwerp *et al.*, 2000) die in de gesimuleerde morfologie na 500 jaar herkenbaar zijn. De cellen bestaan uit een netwerk van hoofd- en nevengeul(en) en tussen- en naastliggende intergetijdengebieden.

In het oostelijk deel van de Westerschelde vormt zich een hoofdgeul langs de buitenbochten van het estuarium, conform de ligging van de hoofdgeul in geobserveerde bodemliggingen (Figuur 14). In de “Bocht van Bath” migreert deze hoofdgeul geleidelijk in westelijke richting en ontstaan langs de oostzijde ondieptes. Opwaarts van de “Bocht van Bath” wordt na 500 jaar morfologische ontwikkeling geen meergeulensysteem meer gemodelleerd. De gekende macrocellen 6 en 7 (Figuur 10) ontbreken derhalve in het model. Na 100 en 300 jaar morfologische ontwikkeling was ter hoogte van de Belgisch-Nederlandse grens (cfr. macrocel 7) nog wel een meergeulensysteem aanwezig. Tussen Hansweert en Bath ontstaan naast de hoofdgeul ook twee nevengeulen op locaties waar in werkelijkheid de “Schaar van Waarde” en “Zimmermangeul” aanwezig zijn: één direct langs de noordrand van het model en één in zuidoostelijke richting. Het patroon van het meergeulensysteem in macrocel 5 (Figuur 10) wordt dus door het morfologisch model gereproduceerd (Figuur 16). De breedte van beide nevengeulen neemt in de modelsimulatie toe over tijd, terwijl de tussengelegen platen versmallen en afkalven.

Verder valt in dit deel van het estuarium op dat in het “Verdronken Land van Saeftinghe” drie ondiepe geulen ontstaan, overeenkomstig de werkelijke ligging van de intertidale geulen. De hoogteligging van het “Verdronken Land van Saeftinghe”, en de andere platen in het estuarium, wordt onderschat in de morfologische simulatie. Een mogelijke verklaring hiervoor is het ontbreken van processen die verticale ophoging van intergetijdengebieden bevorderen, zoals de aanwezigheid van fijn cohesief sediment, de aanwezigheid van vegetatie en andere bio-geomorfologische processen.

Centraal in de Westerschelde kan de kenmerkende scherpe bocht in de hoofdgeul rondom de “Platen van Ossenisse”, i.e., ter hoogte van Hansweert, worden onderscheiden. De kromming van deze bocht varieert gedurende de morfologische simulatie. Bovendien is er vroeg in de morfologische run nog een kleine nevengeul aanwezig die de “Platen van Ossenisse” doorkruist. De “Schaar van Ossenisse” is ook aanwezig in de gemodelleerde morfologie en lijkt zich, evenals de nevengeulen in het oostelijk deel van het estuarium, gestaag te verbeden.

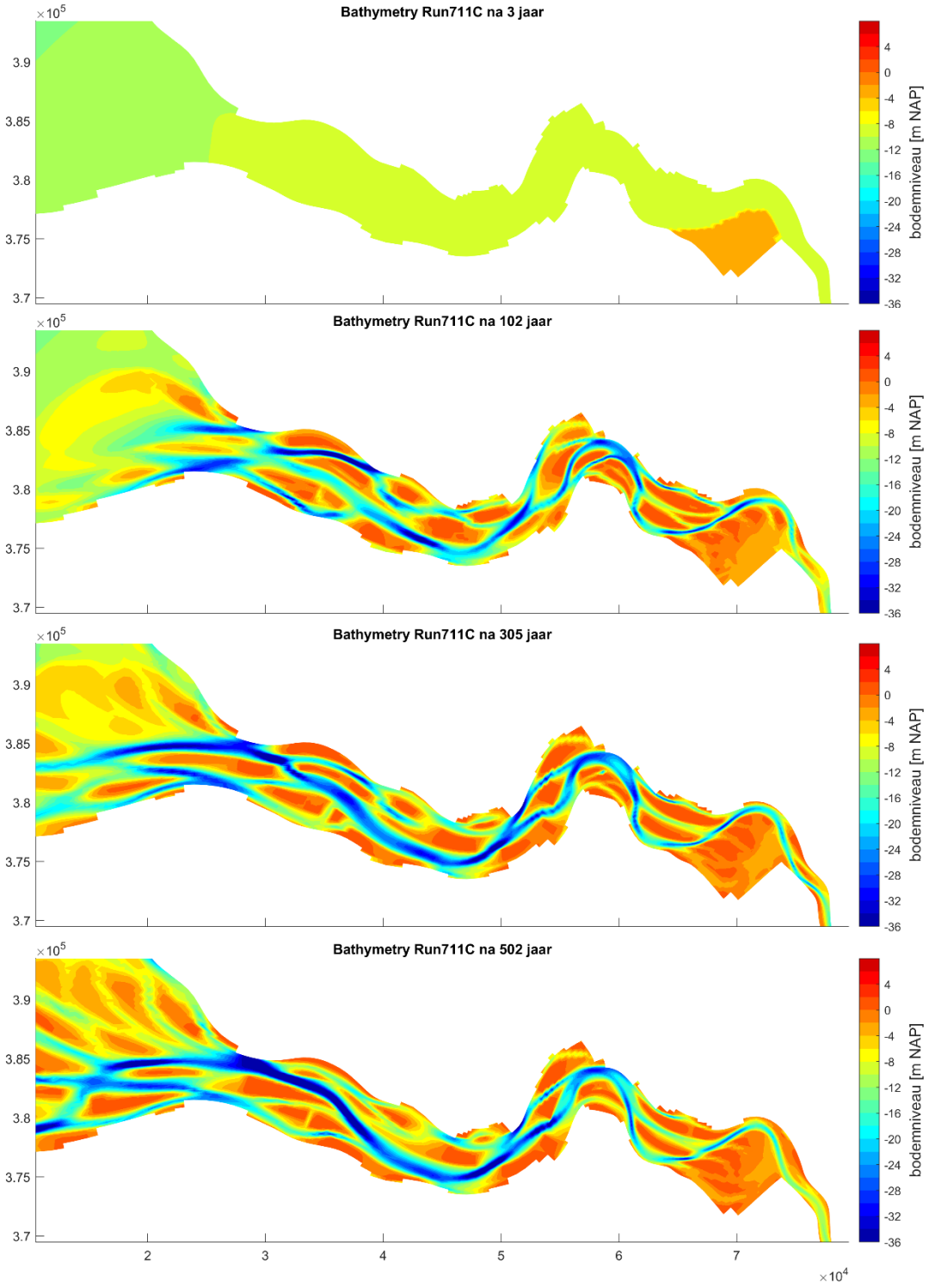
Ook in de westelijke helft van de Westerschelde is sprake van een meergeulensysteem. De ligging van de diepe hoofdgeul stabiliseert na ongeveer 200 jaar (Figuur 13) en komt in grote lijnen overeen met de geobserveerde bodemligging in 2009. Er is evenwel geen sprake van een tussen van hoofd- en nevengeul, zoals ook na de jaren ’50 voor het “Middelgat” en het “Gat van Ossenisse” werd geobserveerd. In de morfologische run volgt de hoofdgeul een traject van Vlissingen (noordrand geometrie) naar Terneuzen (zuidrand geometrie) en loopt verder centraal tussen beide randen richting Hansweert (noordrand geometrie). In vergelijking met de geobserveerde bodemliggingen (Figuur 14) is de geometrie van de hoofdgeul in dit deel van het estuarium minder gekromd. Ook zijn de nevengeulen in de morfologische run minder prominent ten opzichte van de geobserveerde bathymetrische data. Zo kan de “Everingen” na 500 jaar moeilijk onderscheiden worden. De ligging van de platen en nevengeulen komt wel redelijk overeen met de werkelijkheid, wat inhoudt dat gekende macrocellen 1, 3 en 4 in de westelijke helft van de Westerschelde (Figuur 10) ook voor de door het model geproduceerde morfologie gedefinieerd kunnen worden.

De morfologische ontwikkeling in het mondingsgebied is meer dynamisch dan de ontwikkeling in de Westerschelde zelf. Na 500 jaar zijn de twee belangrijke toegangsgeulen naar het estuarium, i.e., “Wielingen” richting het zuidwesten en “Oostgat” richting het noordwesten weliswaar aanwezig, de tussenliggende ondiepte “Vlakte van de Raan” wordt niet gereproduceerd. Gedurende de modelsimulatie vormt zich in de voordelta een uitgebreid netwerk van geulen en platen, waar in werkelijkheid geen sprake van is. De ligging en configuratie van dit geulennetwerk in de voordelta is na 500 jaar overigens nog steeds dynamisch. Eerdere modelstudies door Nnafie *et al.* (2017b) toonden al aan dat de implementatie van (wind)golven essentieel is voor het accuraat reproduceren van de morfologie in de voordelta en de “Vlakte van de Raan”. Golven zorgen voor een grotere ruimtelijke verspreiding van sediment over de voordelta wat de vorming van kleine geulen tegenwerkt. De implementatie van windgolven in het model is echter niet noodzakelijk voor het reproduceren van de grootschalige morfologische kenmerken in de Westerschelde die hierboven zijn toegelicht en leidt bovendien tot onwenselijk lange rekentijden.

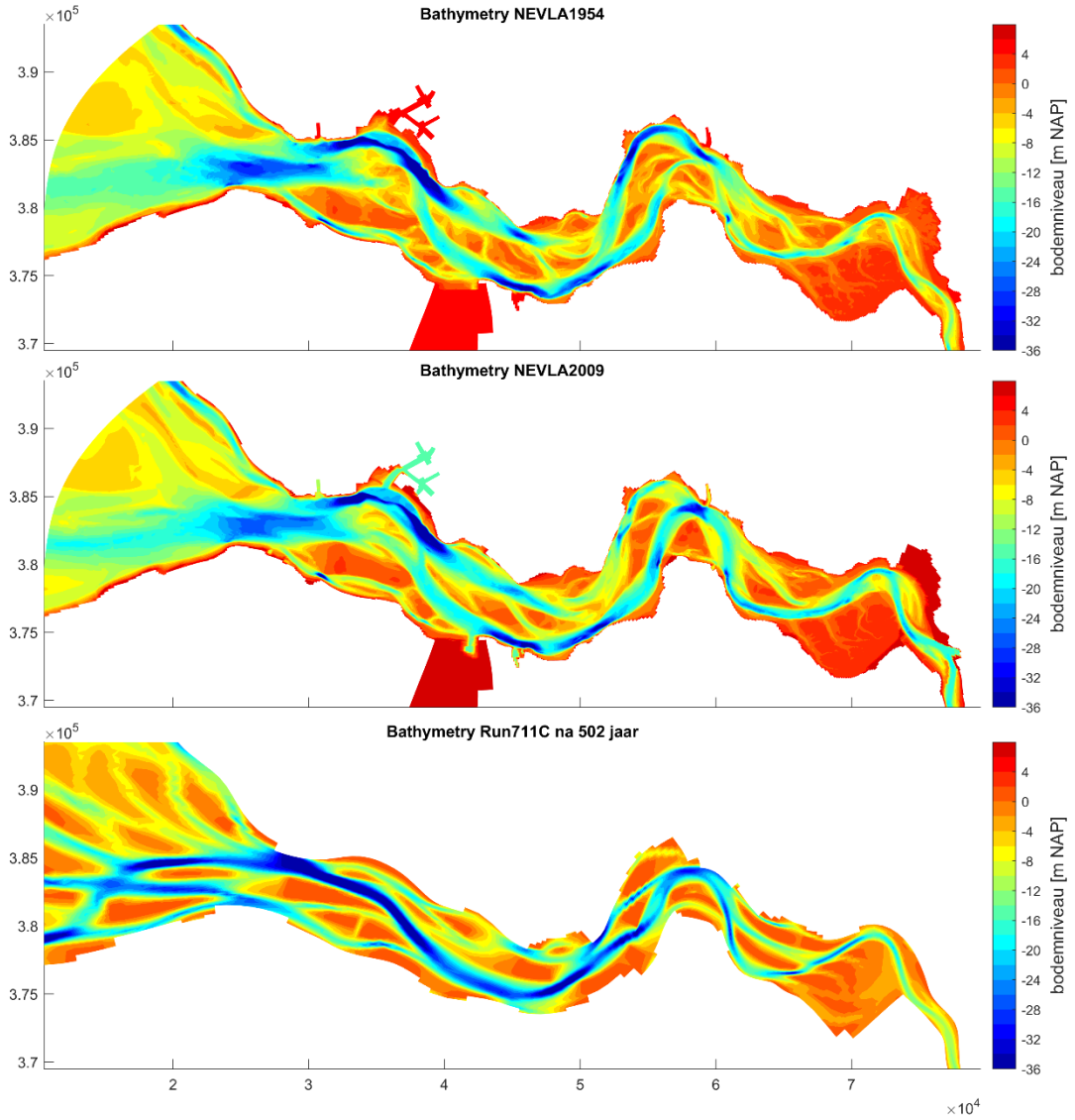
4.1.2 Geuldiepte

De aanwezigheid van diepe putten en drempels in de hoofdgeul is in Figuur 17 geïllustreerd door de thalweg te bepalen en de diepteligging hierlangs te plotten. Uit deze figuur volgt een opeenvolgend patroon van (diepe) putten en (ondiepe) drempels in de hoofdgeul. Ook blijkt dat er een geleidelijke afname is in geuldiepte vanaf de monding landinwaarts richting de Zeeschelde. De diepste put (< -50 m NAP) bevindt zich nabij de monding, ter hoogte van de vernauwing bij Vlissingen. Verder zijn er diepe putten aanwezig in alle macrocellen, waarbij de diepteligging afneemt tot ongeveer -25 m NAP in de oostelijke helft van de Westerschelde. Hetzelfde geldt voor de diepteligging van de drempels. Tussen Terneuzen en Vlissingen hebben de ondiepe zones of drempels in de hoofdgeul nog steeds een diepte van lager dan -25 m NAP (i.e., vergelijkbaar met de diepteligging van de putten in het meest oostelijk deel), terwijl de drempels in de oostelijke helft van de Westerschelde met een diepteligging van ongeveer -15 m NAP een stuk ondieper zijn.

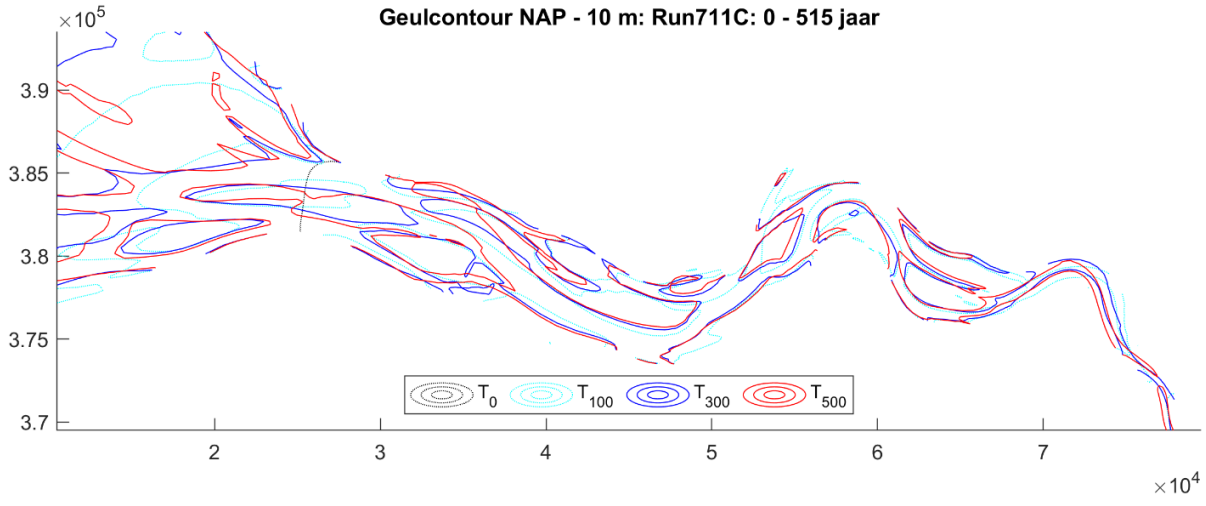
In vergelijking met geobserveerde bathymetrische data is de hoofdgeul in de door het model geproduceerde morfologie dus dieper gelegen. Dit betekent dat voor de schematisering van het vaargeulonderhoud in de scenario-analyse (sectie 4.3) er een aangepaste onderhoudsdiepte van -18.85 m NAP (of -16.5 m TAW) geïmplementeerd wordt, zodat er representatieve baggerhoeveelheden in de uit te voeren scenario-analyse worden gemodelleerd.



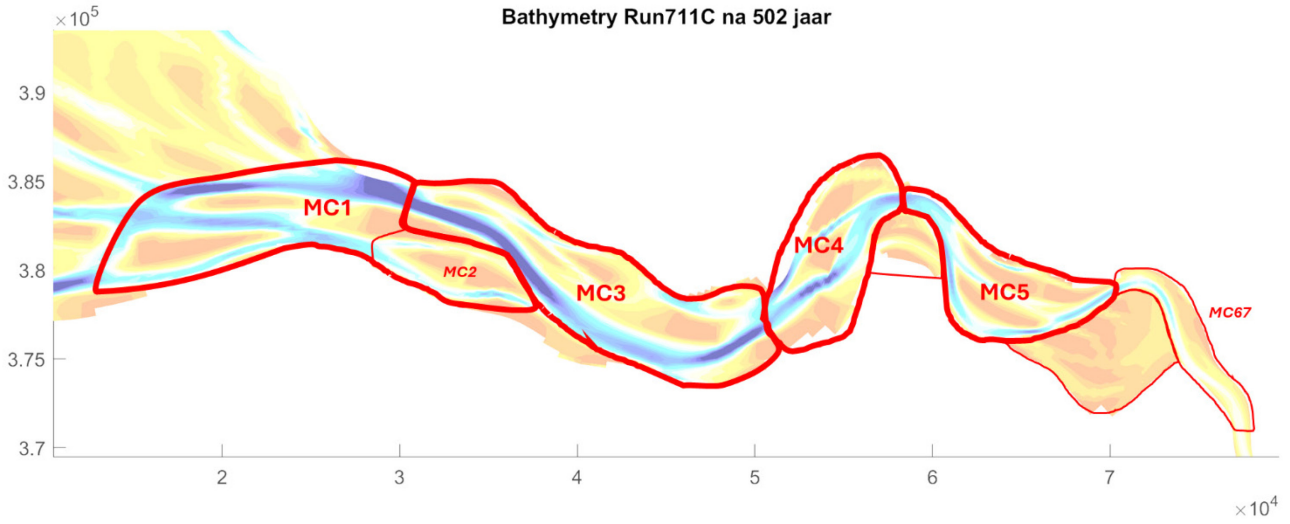
Figuur 13 - Gemodelleerde morfologische ontwikkeling na 100, 300 en 500 jaar in de referentierun (Run711C).



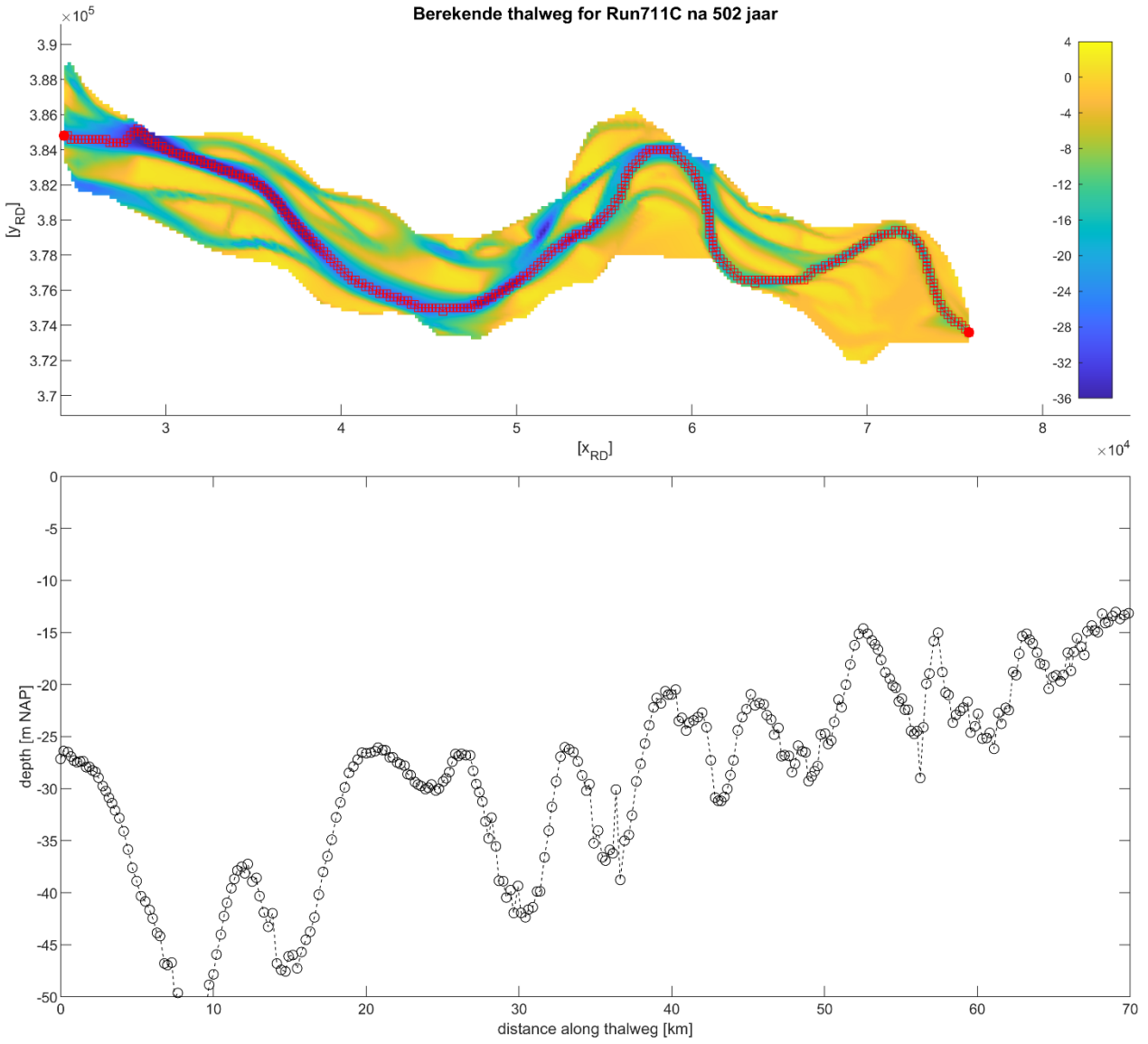
Figuur 14 - Geobserveerde morfologie Westerschelde in jaren ’50 (boven), in 2009 (midden) en gemodelleerde morfologie in de referentierun (Run 711C).



Figuur 15 - Geulcontouren na 100, 300 en 500 jaar in referentierun (Run711C).



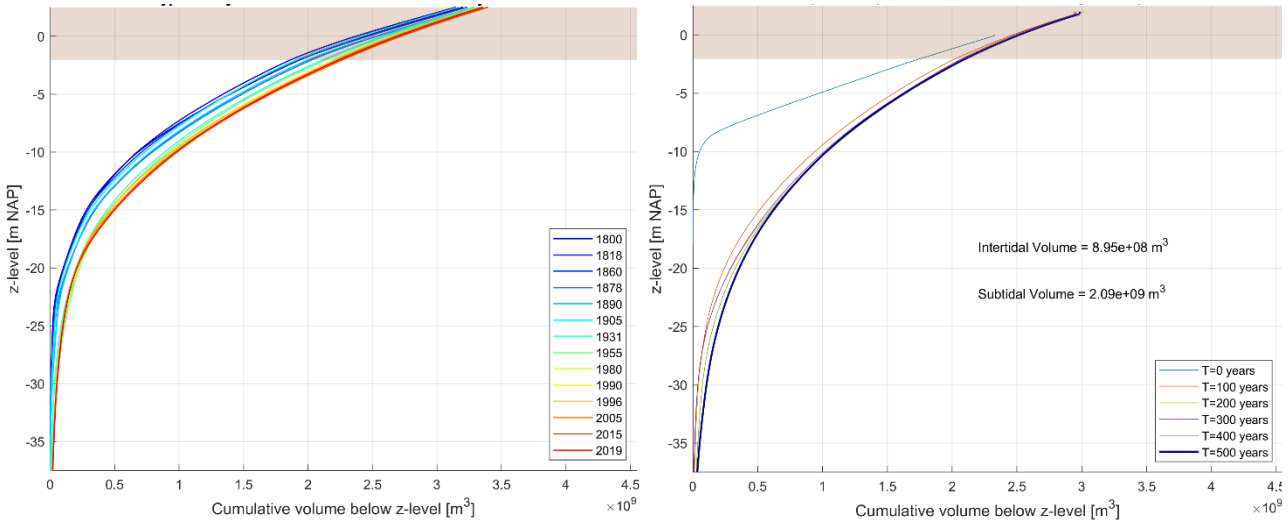
Figuur 16 - Herkenbare macrocellen na 500 jaar in referentierun (Run711C).



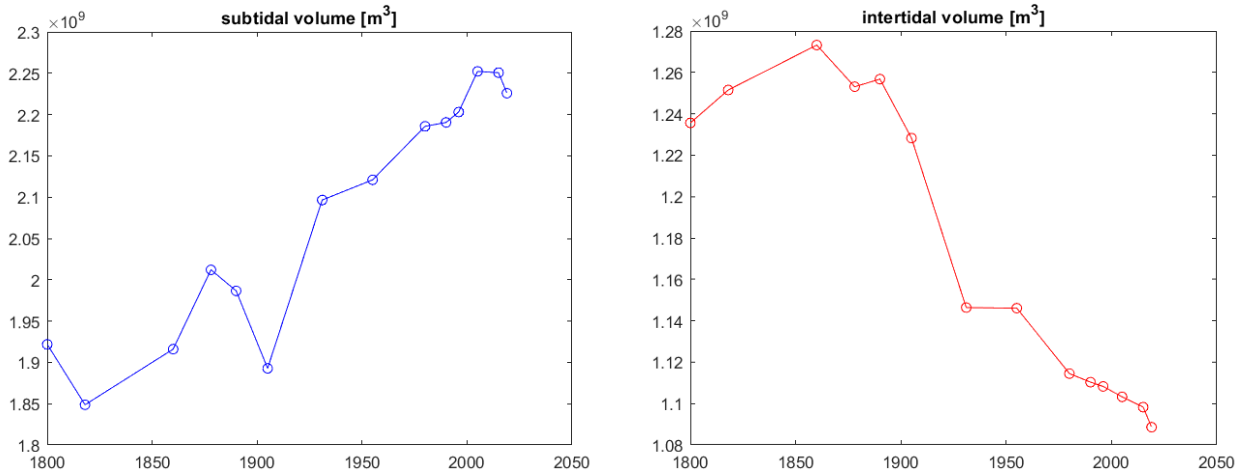
Figuur 17 - Ligging en langsprofiel van de hoofdgeul (thalweg) na 500 jaar in referentierun (Run711C).

4.1.3 Hypsometrie

In Figuur 18 wordt de hypsometrie van de Westerschelde weergegeven op basis van de morfologische simulatie (Run711C) en op basis van verschillende historische bodemliggingen. In Figuur 19 worden voor deze historische bodemliggingen ook de subtidale geulvolumes en intertidale volumes berekend (i.e., watervolumes). Hierbij wordt opgemerkt dat deze volumes zijn bepaald op basis van het recente gemiddeld laagwaterniveau te Hansweert (zie sectie 3.4) en dus een zeer grove inschatting vormen. Uit de historische bodemliggingen volgt een geleidelijke verdieping van het systeem over tijd. Het subtidaal geulvolume is met ongeveer 10% toegenomen van ±2,0·10^9 m^3 in de 19^e eeuw tot meer dan 2,2·10^9 m^3 recentelijk. Het intertidaal volume, wat uiteraard ook onderhevig is aan inpolderingen, is in dezelfde periode juist afgenomen van 1,2-1,3·10^9 m^3 in de 19^e eeuw naar ±1,1·10^9 m^3 recentelijk. In de morfologische simulatie is eveneens sprake van een geleidelijke verdieping van het systeem. De initiële bodemligging is relatief ondiep en wordt in het begin van de simulatie al snel uitgeruimd. Na deze sterke initiële respons blijft de gemodelleerde bodemligging gestaag uitdiepen, zij het in een veel lager tempo. Na 500 jaar heeft de door het model geproduceerde morfologie in de Westerschelde een totaal geulvolume van 2,1·10^9 m^3 en een intertidaal volume van 0,9·10^9 m^3. Het geulvolume komt dus goed overeen met geobserveerde bodemliggingen, terwijl het intertidaal volume wordt onderschat. Een verklaring voor de onderschatting kan zijn dat de resolutie van het geïdealiseerd morfologisch model veel grover is dan de resolutie van de bathymetrische opmetingen, waardoor bepaalde morfologische entiteiten, zoals kleinere intertidale geulen niet worden gereproduceerd.



Figuur 18 - Hypsometrie van de Westerschelde op basis van historische bathymetrische data (links) en op basis van de morfologie geproduceerd in de referentierun (rechts).



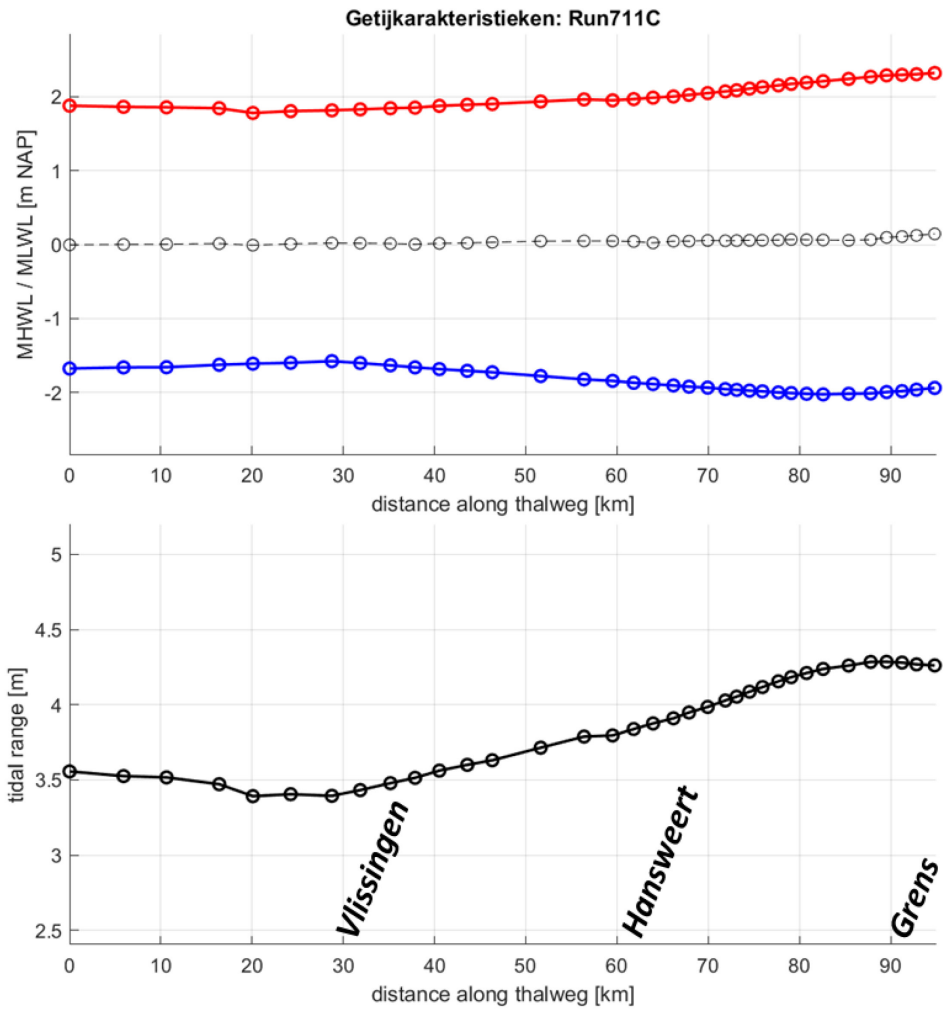
Figuur 19 - Subtidaal en intertidaal volume op basis van historische bathymetrische data (1800-2019).

4.1.4 Getij

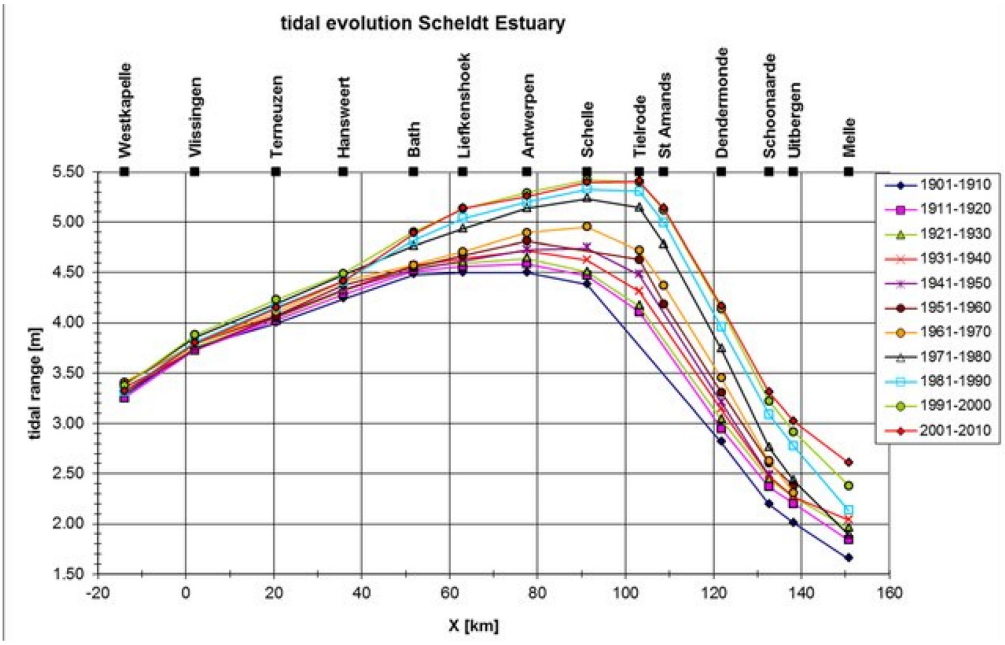
Figuur 20 geeft het gemodelleerd verticaal getij weer in referentierun 711C. In het mondingsgebied is de gemodelleerde getijslag ongeveer 3,5 m. Vanaf Vlissingen neemt de getijslag toe in opwaartse richting tot een maximum van bijna 4,5 m bij de Belgisch-Nederlandse grens. Verder opwaarts lijkt de getijslag weer af te nemen. De figuur is echter afgeknipt voor de Zeeschelde omdat dit buiten de scope van deze studie valt en de bodemligging in dit gebied zeer sterk afwijkt van de werkelijkheid. In vergelijking met waargenomen (historische) verlopen van de getijslag (Figuur 21) geeft het morfologisch model een situatie weer die meer overeenkomt met het verticaal getij rond 1900 dan in een recente situatie. Ook toen nam de getijslag toe in de Westerschelde en bevond de maximale getijslag zich in het meest afwaartse deel van de Zeeschelde.

Getijasymmetrie

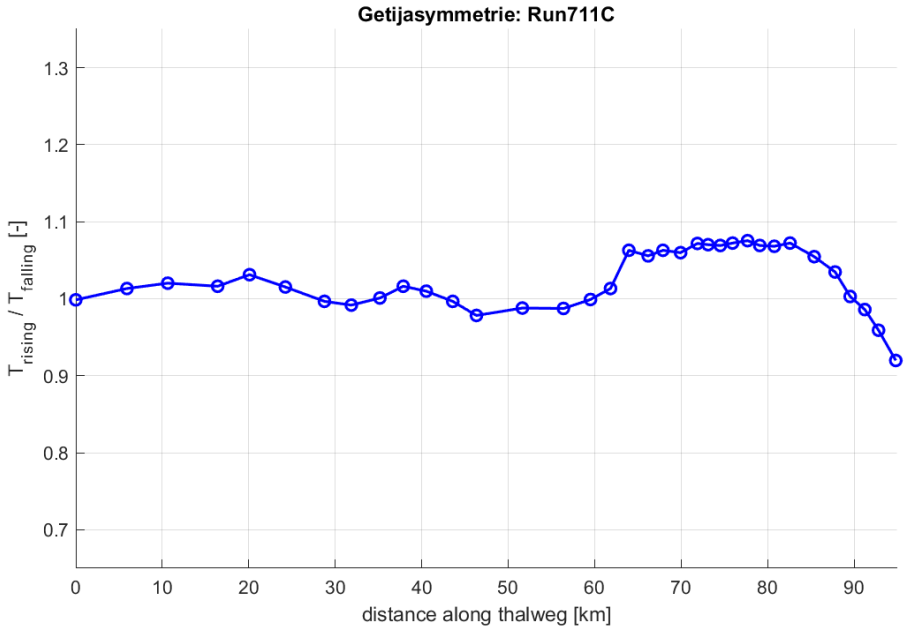
Figuur 22 toont de verticale getij-asymmetrie in de Westerschelde na 500 jaar morfologische ontwikkeling in de referentierun. In het westelijk deel van de Westerschelde, i.e. tot KM-60, is geen sprake van een duidelijke asymmetrie tussen stijgingsduur en dalingsduur. In de oostelijke helft van de Westerschelde is de stijgingsduur langer dan de dalingsduur, duidend op ebdominantie. In de Beneden-Zeeschelde, i.e., vanaf KM-90 opwaarts, is een omgekeerde trend zichtbaar met een kortere stijgingsduur, duidend op vloeddominantie. Dit gebied valt echter buiten de scope van het huidige project, mede door de gebrekkige morfologische representatie.



Figuur 20 - Getijkarakteristieken op basis van morfologie na 500 jaar in referentierun (Run711C).



Figuur 21 - Historische getijslag Schelde-estuarium. Uit: Wang *et al.* (2019)

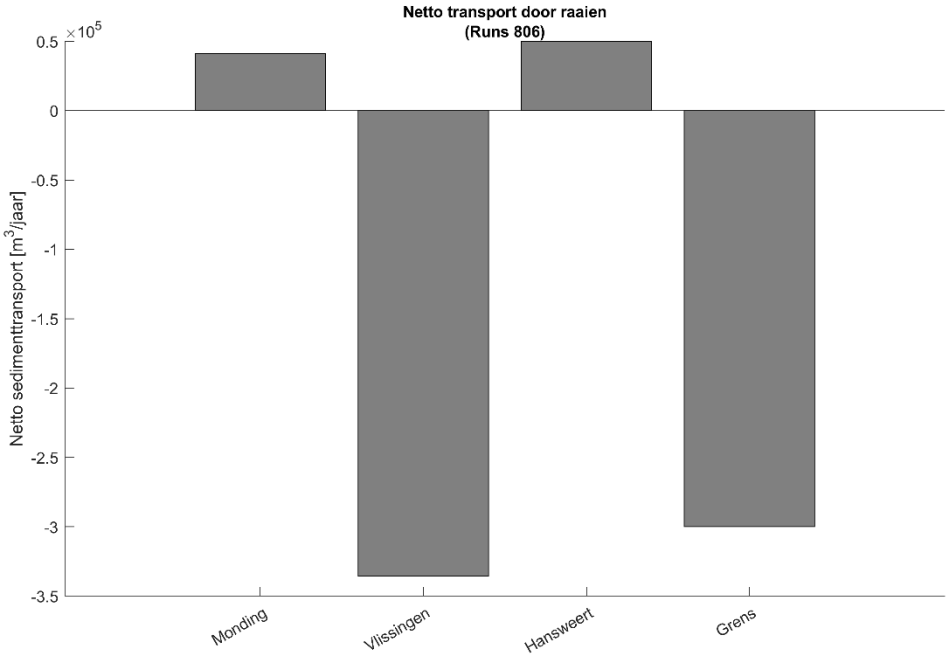


Figuur 22 - Getijasymmetrie ($T_{stijging}/T_{daling}$) op basis van morfologie na 500 jaar in referentierun (Run711C).

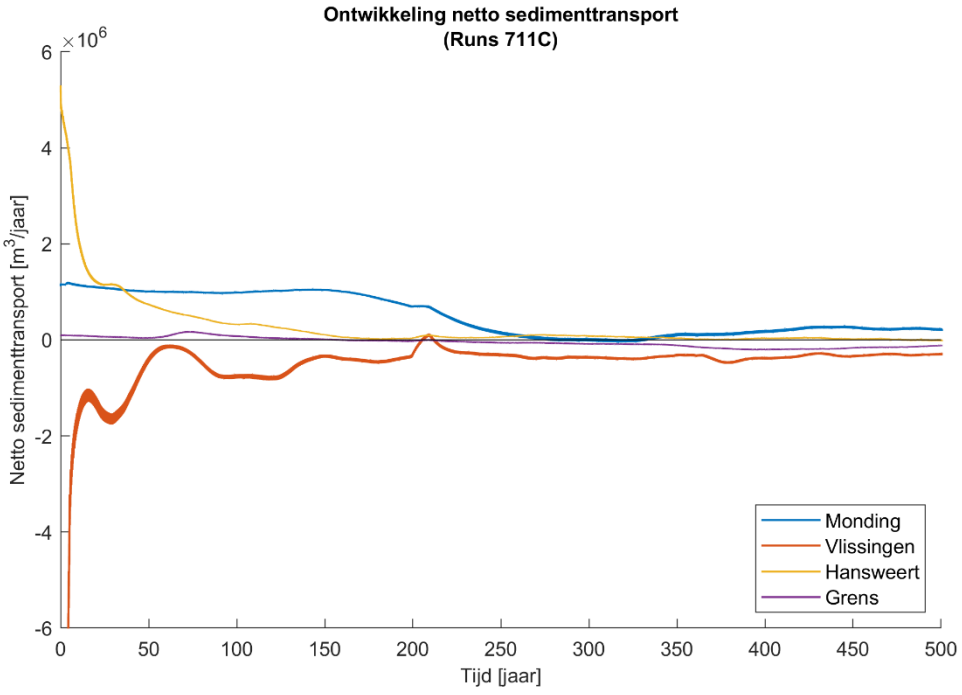
4.1.5 Sedimenttransport

Het gemodelleerd residueel transport door 4 transecten (monding, Vlissingen-Breskens, Hansweert, grens) is weergegeven in Figuur 23. Het netto sedimenttransport is gebaseerd op de morfologische situatie aan het einde van referentierun en berekend uit vervolgsimulatie Run806 die de bodemligging van Run711C als initiële conditie gebruikt. De ontwikkeling over de simulatieduur van 500 jaar wordt getoond in Figuur 24. Het netto sedimenttransport varieert sterk over de transecten met netto import voor het transect in het mondingsgebied en juist netto export voor het transect Vlissingen-Breskens. Het residueel transport tussen de westelijke en oostelijke helft van de Westerschelde (transect Hansweert) is licht importerend.

Aan de grens is er juist een sterk exporterend afwaarts gericht residueel transport van de Zeeschelde naar de Westerschelde. Dit kan waarschijnlijk worden gerelateerd aan het ontbreken van vaargeulonderhoud in de Zeeschelde in de scenarioberekeningen. Op basis van de ontwikkeling van het residueel transport over de tijd kan worden geconcludeerd dat de grootste morfologische veranderingen plaatsvinden in de eerste ±250 jaar. Daarna nemen de residuele transporten sterk af naar de waardes gepresenteerd in Figuur 23. De residuele transporten blijven over de laatste honderden jaren relatief constant.

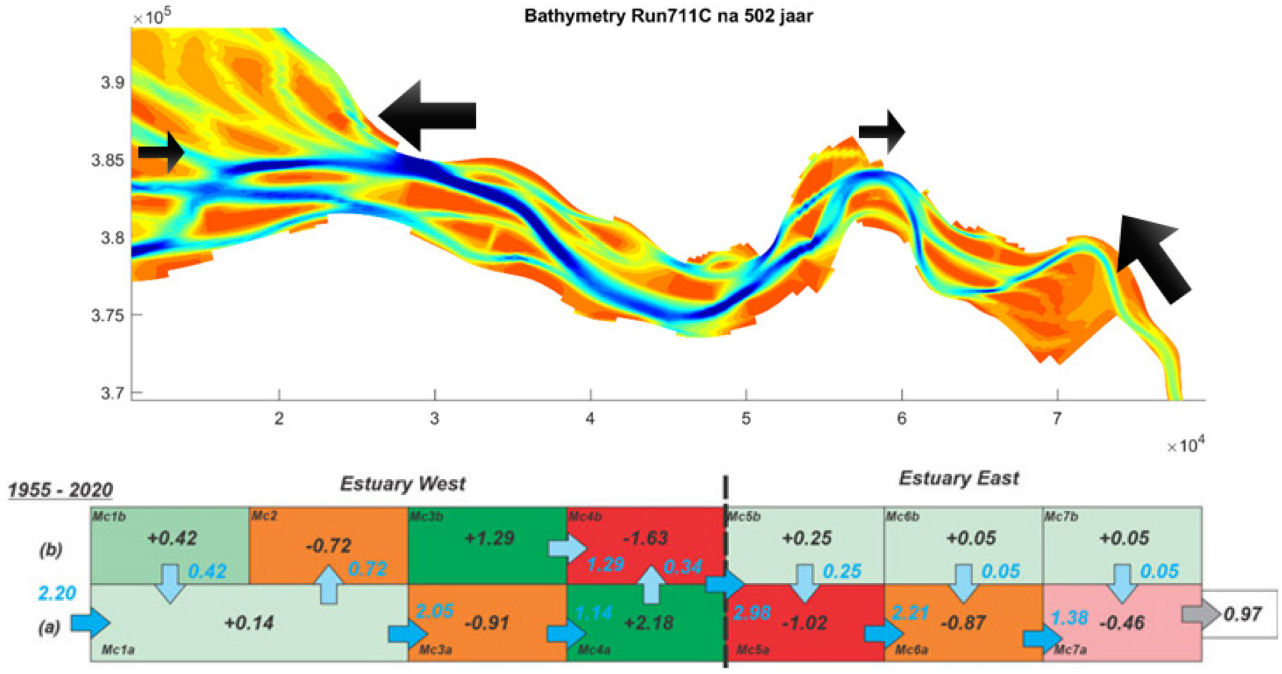


Figuur 23 - Residueel sedimenttransport op basis van morfologie na 500 jaar in referentierun (Run806 = vervolgrun op Run711C).



Figuur 24 - Ontwikkeling van het (10-jaarlijks gemiddelde) residueel transport over simulatieduur van 500 jaar in Run711C).

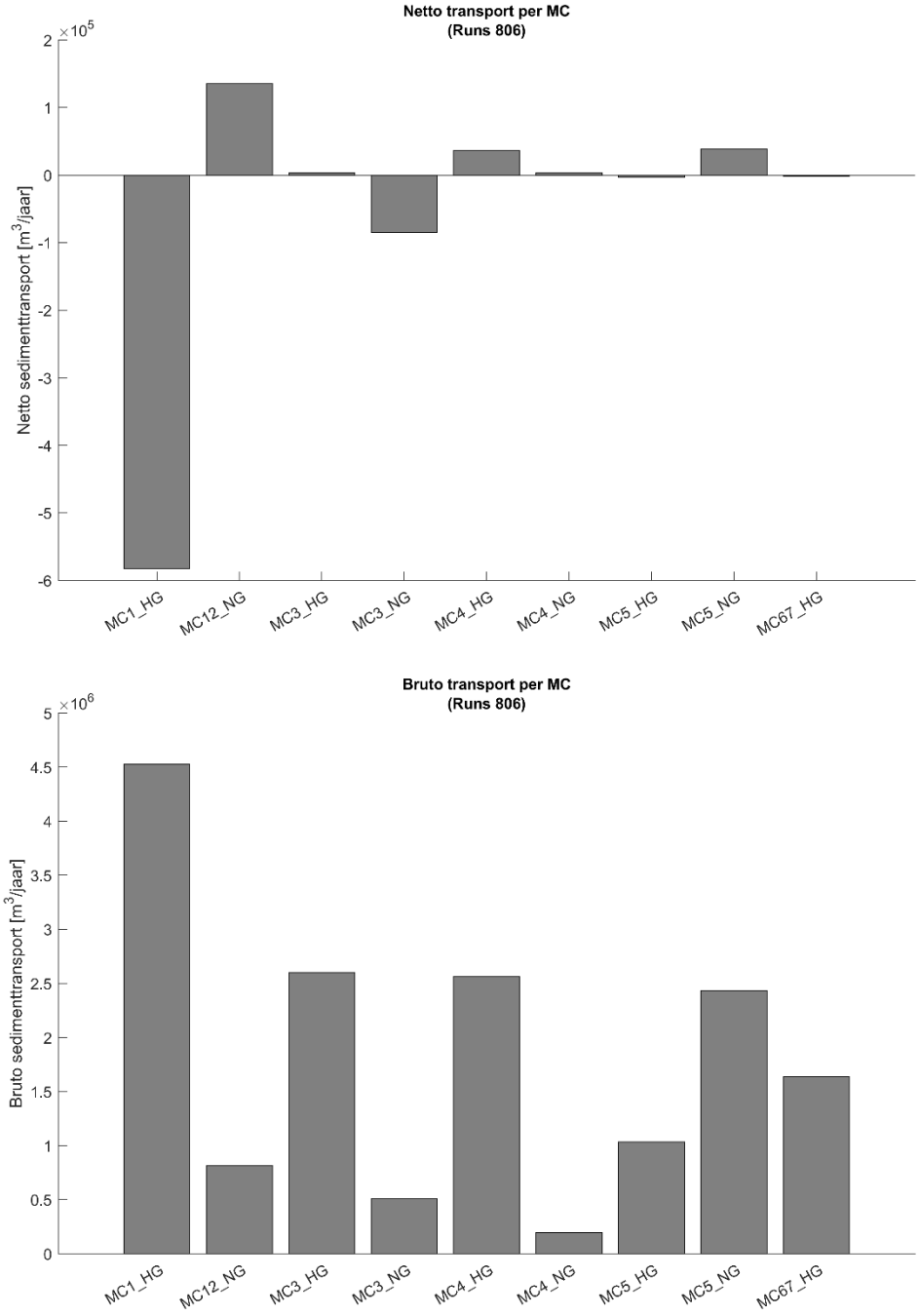
Figuur 25 geeft een schematisch overzicht van de gemodelleerde transporten (pijlen en daarnaast een overzicht van de sedimenttransporten die in de sedimentbalans van werden bepaald over de periode 1955-2020 (Elias *et al.*, 2023). De gemodelleerde transporten en transportrichtingen in het geïdealiseerd morfologisch model wijken af van de sedimentbalans, waarbij wordt opgemerkt dat in de sedimentbalans over de afgelopen decennia geen sprake was van een morfologisch evenwicht. Enkel het kleine opwaarts transport ter hoogte van Hansweert is goed in overeenstemming. Er wordt hierbij wel opgemerkt dat er sprake is van grote ruimtelijke variabiliteit in residueel sedimenttransport tussen en binnen de macrocellen. Dit werd ook al opgemerkt in eerder modelonderzoek door Röbke *et al.* (2022) (zie ook: Figuur 3). In de interpretatie van de stortscenario's zal rekening worden gehouden met de afwijkingen in transportpatronen die in het geïdealiseerd morfologisch model aanwezig zijn.



Figuur 25 - Schets van residueel transport op basis van morfologie na 500 jaar in referentierun (boven) en berekend netto sedimenttransport in Mm^3/jaar op basis van sedimentbalans Westerschelde 1955-2020 uit Elias *et al.* (2023) (onder).

Transport per macrocel

In Figuur 26 worden de gemiddelde bruto en netto sedimenttransporten per macrocel weergegeven (i.e., op basis van de geïdentificeerde cellen in Figuur 16). Uitgezonderd het sterke afwaartse transport in de hoofdgeul van macrocel 1 zijn de residuele (netto) transporten in de verschillende geulsecties minimaal. De bruto transporten, die bijvoorbeeld van belang zijn voor de stabiliteit van gestort sediment, zijn steeds het grootst in de hoofdgeul, uitgezonderd macrocel 5, waar het transport door de nevengeul groter is.



Figuur 26 - Bruto en netto sedimenttransport per macrocel op basis van morfologie na 500 jaar in referentierun (Run806 = vervolgrun op Run711C).

4.2 Gevoeligheidsanalyse

4.2.1 Overzicht modelsimulaties gevoeligheidsanalyse

Als onderdeel van de modelaanpak is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd waarbij verschillende parameters en modelinstellingen zijn gevarieerd en de impact hiervan op de door het model gesimuleerde morfologische ontwikkeling is beschouwd.

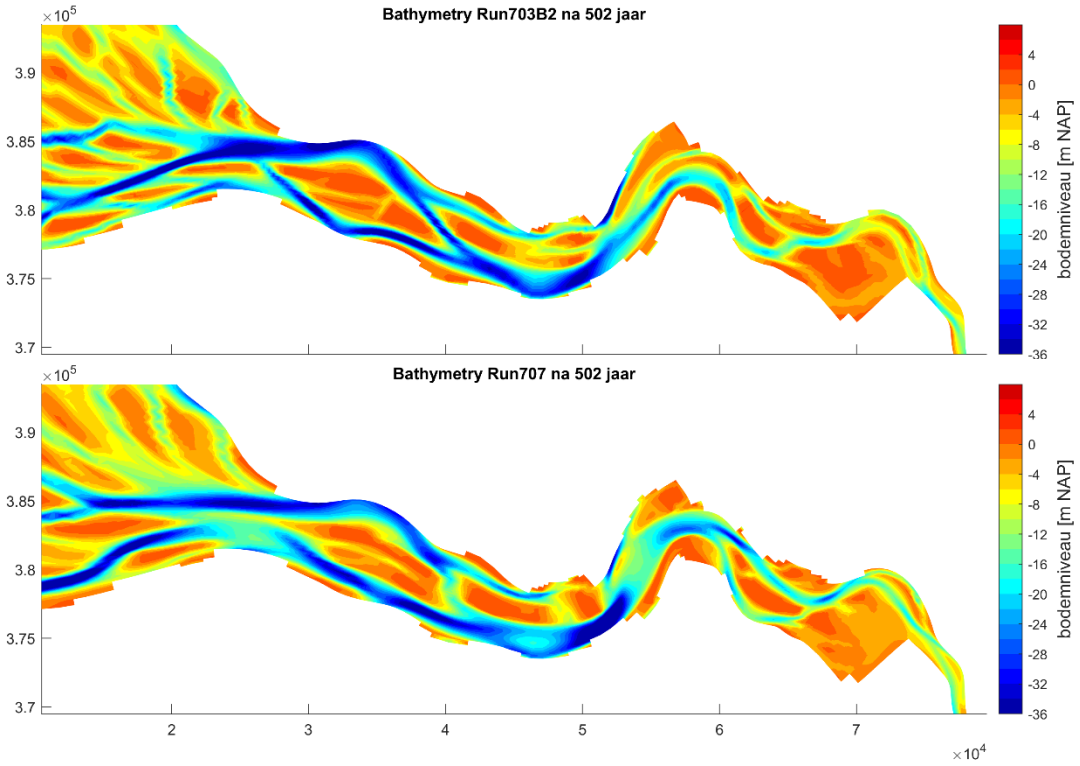
In onderstaande secties wordt de invloed besproken van:

- Modelresolutie
- Initiële bodemligging
- Geometrie van het estuarium (i.e., zijbekkens)
- Bovenafvoer
- Implementatie windgolven
- Sedimenttransportformule
- Coëfficiënten voor transversaal en longitudinaal hellingtransport
- Morfologische versnellingsfactor

Overigens is niet elke combinatie van modelparameters getest. Om de invloed van verschillende modelinstellingen te illustreren wordt daarom niet altijd dezelfde referentierun gebruikt. Sommige parameters zijn bijvoorbeeld enkel toegepast op het originele rekenrooster, terwijl andere parameters enkel op het verfijnde rooster zijn geïmplementeerd. Dit is het resultaat van voortschrijdend inzicht tijdens het testen van verschillende modelinstellingen. Daarnaast zijn de effecten van veel parameters en processen, waaronder ook windgolven of bochtstroming al onderzocht in het AvdT-onderzoek *"Verbetering morfologisch instrumentarium"* (Nnafie *et al.*, 2017c, b; a, 2018a). Hoewel de focus van dat onderzoek vooral op het mondingsgebied en het westelijk deel van de Westerschelde lag is de invloed van de meeste modelinstellingen op de gemodelleerde morfologische ontwikkeling zeer gelijkaardig in het overige deel van de Westerschelde.

4.2.2 Invloed modelresolutie

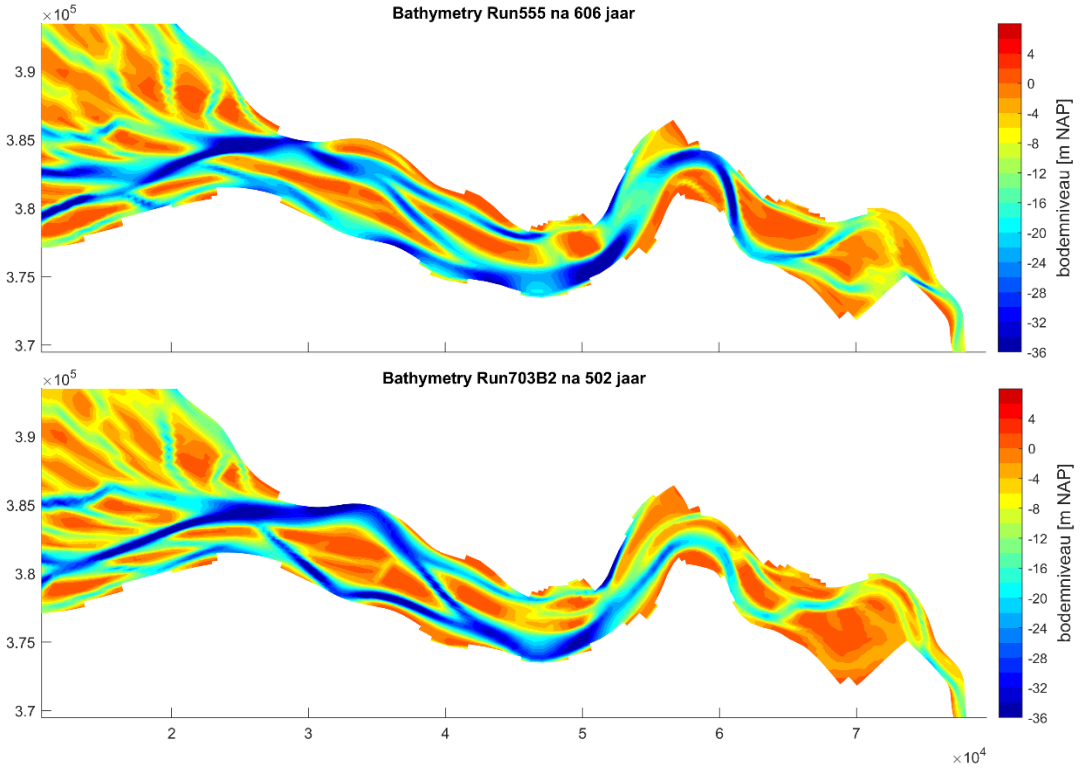
In sectie 3.2.1 werd al toegelicht dat uit verkennende modelsimulaties is gebleken dat een gridverfijning in de Westerschelde nodig is ten opzichte van de originele resolutie in het eerder AvdT-onderzoek (Nnafie *et al.*, 2017c, b; a, 2018a) toegepaste model. In Figuur 27 wordt de door het model geproduceerde morfologie getoond voor simulaties met het originele modelgrid en met een verfijnd modelgrid. Hierin is zichtbaar hoe de geuldiepte in de "Bocht van Bath" beperkt blijft door de te grove roosterresolutie en de slechte allignatie van het rooster met de kromming die de geul hier moet maken. Door de gridverfijning is het model in staat om de kromming van de geul in de "Bocht van Bath" te volgen en ontstaat er in de door het model gesimuleerde morfologie wel een diepe geul richting de Zeeschelde. Uit andere modelsimulaties blijkt dat de gridverfijning tussen Terneuzen en de Belgisch-Nederlandse grens het model ook in staat stelt om meerdere nevengeulen te reproduceren, bijvoorbeeld de configuratie van de "Schaar van Valkenisse" en de "Zimmermanngeul". Uiteindelijk is er in de referentierun Run711C voor gekozen om met het fijnere modelgrid te rekenen.



Figuur 27 - Gemodelleerde morfologie na 500 jaar in simulatie met origineel grid uit Nnafie *et al.*, (2017c) (Run703B2; boven) en met verfijnd grid tussen Gat van Ossenisse en Bocht van Bath (Run707; onder).

4.2.3 Bodemligging Verdronken Land van Saeftinghe

Uit de verkennende modelsimulaties blijkt eveneens dat de initiële bodemligging van het Verdronken Land van Saeftinghe en de maximale erosiediepte (i.e., diepteligging van harde niet erodeerbare laag) een grote invloed kunnen hebben op de door het model gereproduceerde morfologische ontwikkeling. Figuur 28 geeft de gemodelleerde morfologie weer voor een simulatie waarin de initiële bodemligging en dikte van de sedimentlaag in het Verdronken Land van Saeftinghe is aangepast om diepe uitsnijding door geulvorming in deze zone te verhinderen. Er is een vergelijking gemaakt met de gemodelleerde morfologie in een simulatie waarin de initiële bodemligging en sedimentlaagdikte in Saeftinghe niet werden aangepast. Uit deze vergelijking blijkt dat, naast de in sectie 3.2.1 besproken gridverfijning, ook de (initiële) bodemligging van Saeftinghe van belang is om de ligging van de geulen in de oostelijke helft van de Westerschelde enigszins representatief te kunnen simuleren. Als de bodemligging van Saeftinghe daarentegen niet als harde randvoorwaarde wordt geïmplementeerd ontwikkelt er een netwerk van relatief diepe vloedscharen die doorlopen tot in de Beneden-Zeeschelde. Dit heeft uiteraard ook invloed op de getijvoortplanting richting de Zeeschelde en daarmee de getijhydrodynamica- en asymmetrie in de Westerschelde.

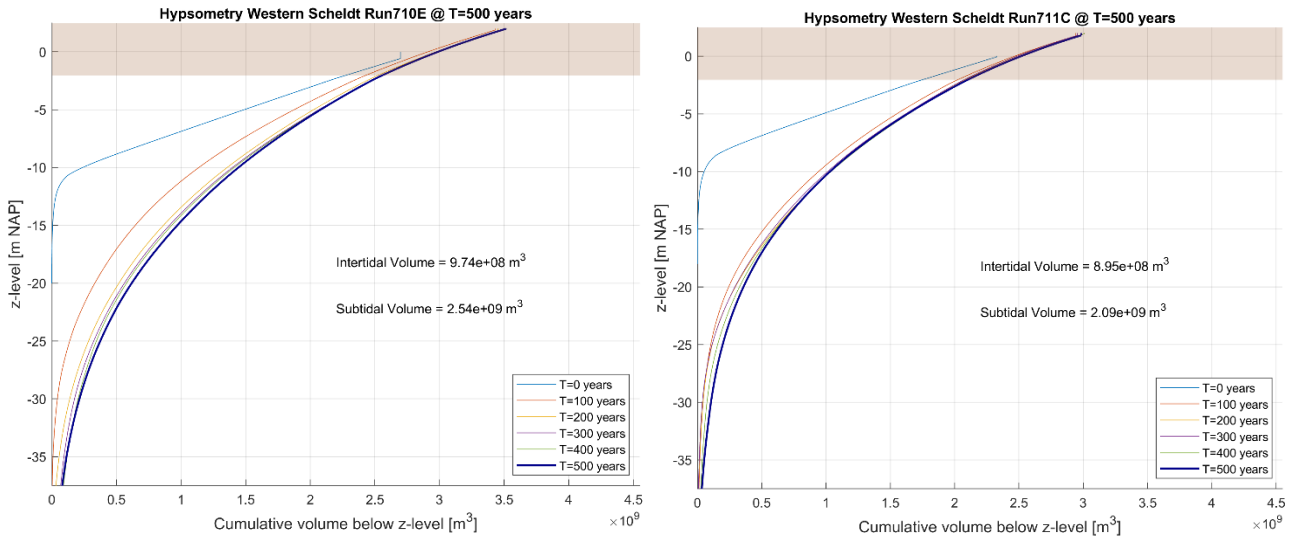


Figuur 28 - Gemodelleerde morfologie in simulatie met vlakke initiële bodemligging (Run555; boven) en met vaste bodemligging voor Saeftinghe (Run703B2; onder).

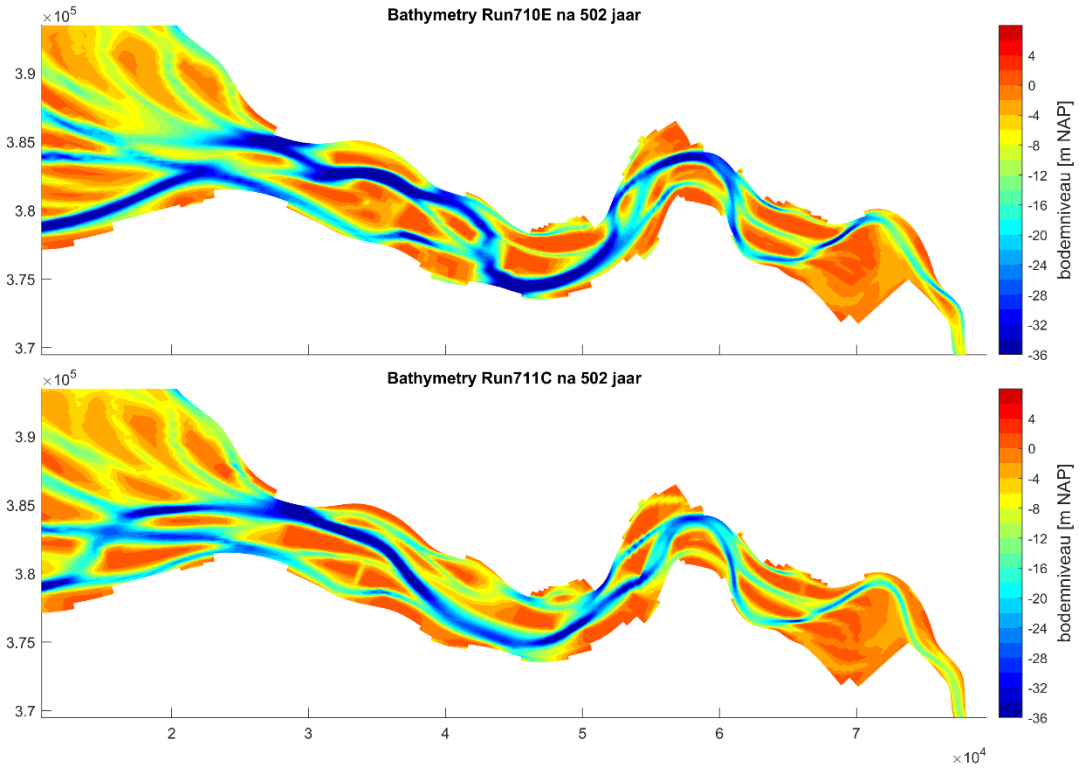
4.2.4 Initiële bodemdiepte

De gevoeligheid voor de initiële diepteligging is eveneens onderzocht door simulaties uit te voeren waarin de initiële bodemdiepte wordt gevarieerd. Dit betreft simulaties Run710E met de initiële bodemligging zoals gebruikt door Nnafie *et al.*, (2017c) en Run711C (i.e., referentierun in de huidige studie) waarin de initiële bodemligging 2 m werd verondiept.

Figuur 29 toont voor deze simulatie de hypsometrie, inclusief de subtidale en intertidale volumes na 500 jaar morfologische ontwikkeling. In Figuur 30 wordt de uiteindelijke morfologie weergegeven. Door verondieping in de initiële situatie is de bodemligging na 500 jaar morfologische ontwikkeling significant anders. Zowel het subtidaal en intertidaal volume is na afloop van de simulatie lager als de initiële bodemdiepte lager is. Het subtidale volume blijft na 500 jaar 18% lager en het intertidale volume blijft ongeveer 8% lager dan in Run710E met de initiële bodemdiepte uit Nnafie *et al.*, (2017c). Het globale patroon van het meergeulensysteem is zeer gelijkaardig in Run710E en de referentierun uit deze studie (Run711C) waarin de initiële bodemligging werd verondiept, maar de exacte ligging van de platen en de vorm van de platen is wel verschillend (Figuur 30). Het is dus van belang om een initiële bodemligging te kiezen die uiteindelijk tot representatieve morfologische kenmerken leidt. In dit geval zijn dat representatieve geulvolumes en intertidale volumes.



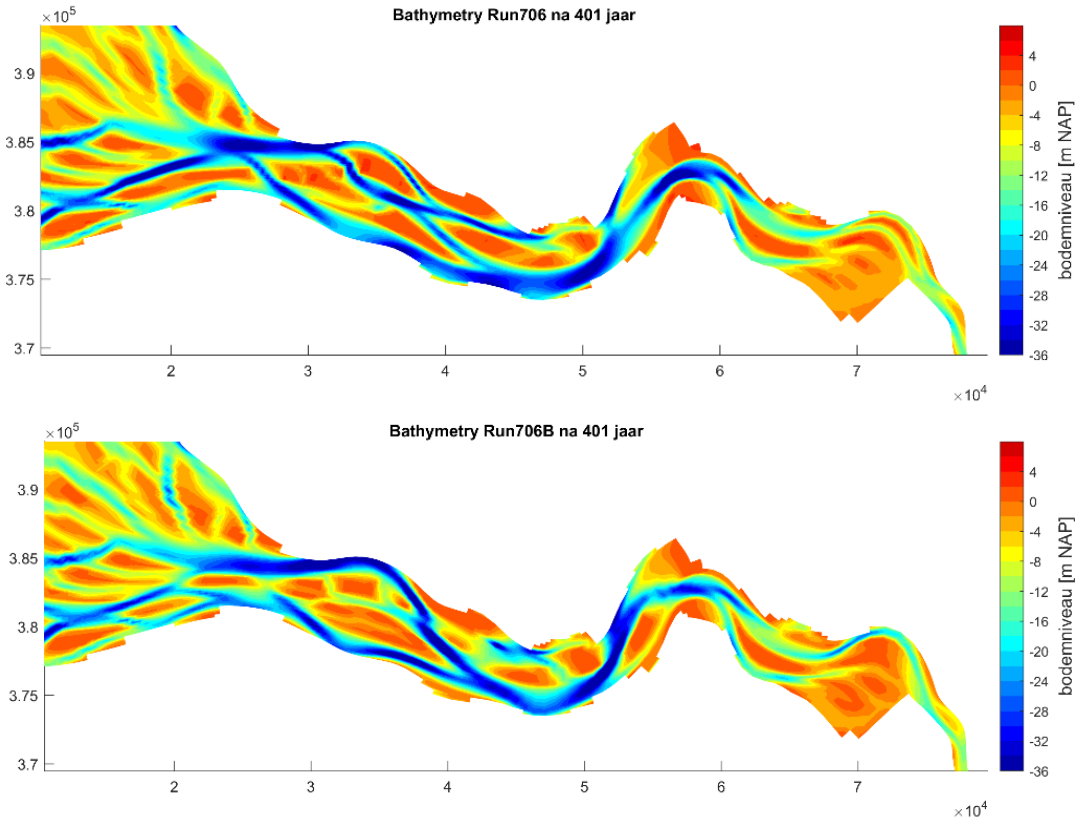
Figuur 29 - Hypsometrie van de Westerschelde na 500 jaar in simulatie initiële bodemdiepte uit Nnafie *et al.*, (2017c) (Run710E; links) en met een initiële bodemdiepte die 2 m is verondiept (Run711C; rechts).



Figuur 30 - Gemodelleerde morfologie na 500 jaar in simulatie initiële bodemdiepte uit Nnafie *et al.*, (2017c) (Run710E; boven) en met een initiële bodemdiepte die 2 m is verondiept (Run711C; onder).

4.2.5 Invloed bovenafvoer

De invloed van de bovenafvoer of rivierafvoer in het Scheldebekken op de gemodelleerde morfologische ontwikkeling in de Westerschelde wordt geanalyseerd door twee simulaties te vergelijken waarin de bovenafvoer al dan niet is geïmplementeerd (Figuur 31). In Run706 is géén bovenafvoer geïmplementeerd. In Run706B is wél een bovenafvoer van 100 m^3/s geïmplementeerd ter hoogte van de bovenstroomse rand van de Zeeschelde. In beide simulaties werd de initiële bodemligging in de Westerschelde nog niet aangepast en werd de maximale bodemdiepte in Saeftinghe niet beperkt. Ook is in deze simulaties het rooster nog niet verfijnd. Hoewel de door het model gesimuleerde morfologie in de oostelijke helft van de Westerschelde voor beide simulaties grote discrepanties kent met de referentierun (Run711C) die in dit rapport wordt gebruikt, is een opvallend verschil de diepteligging van de geul in de Zeeschelde (i.e., meest opwaartse deel in de figuren). In de simulatie zonder bovenafvoer is de geuldiepte meer beperkt dan wanneer er wel een bovenafvoer wordt geïmplementeerd. Bovendien leidt de implementatie van de bovenafvoer tot een meer open verbinding tussen de Westerschelde en Zeeschelde met één diepe getijgeul, in plaats van een netwerk van vloedscharen. Er wordt daarom geopteerd voor het implementeren van een bovenafvoer in de referentierun voor de huidige modelstudie (Run711C).

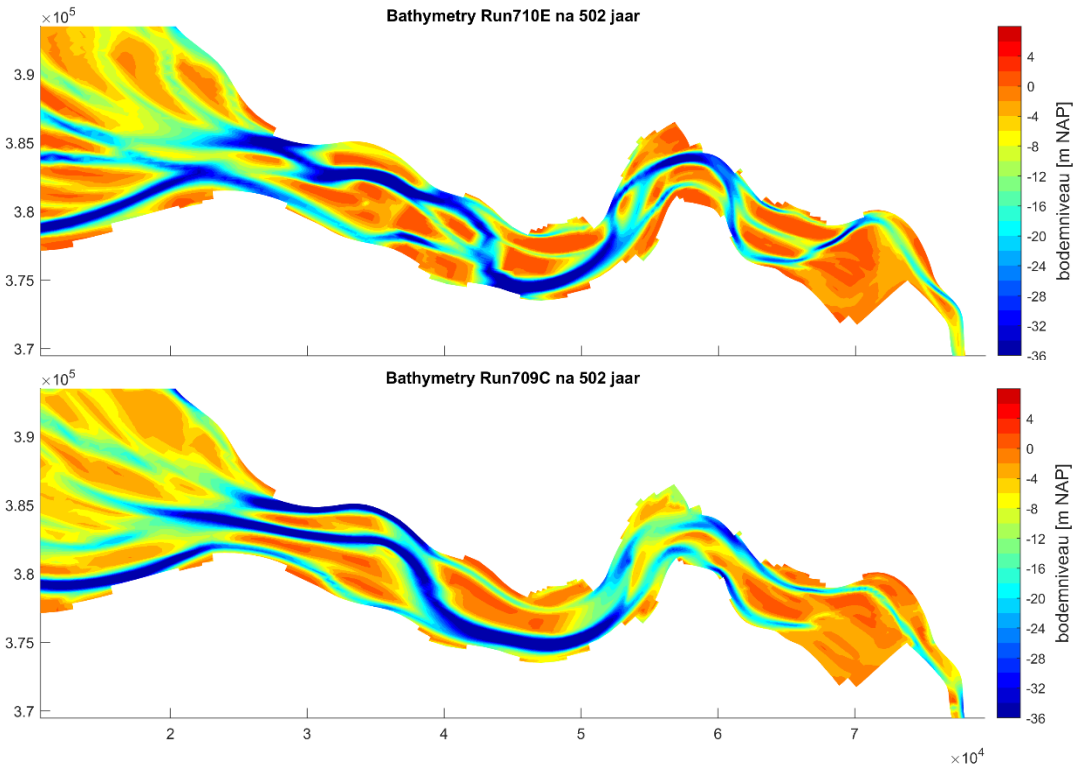


Figuur 31 - Gemodelleerde morfologie in simulatie zonder bovenafvoer (Run 706; boven) en met een bovenafvoer van 100 m^3s^{-1} (Run706B; onder).

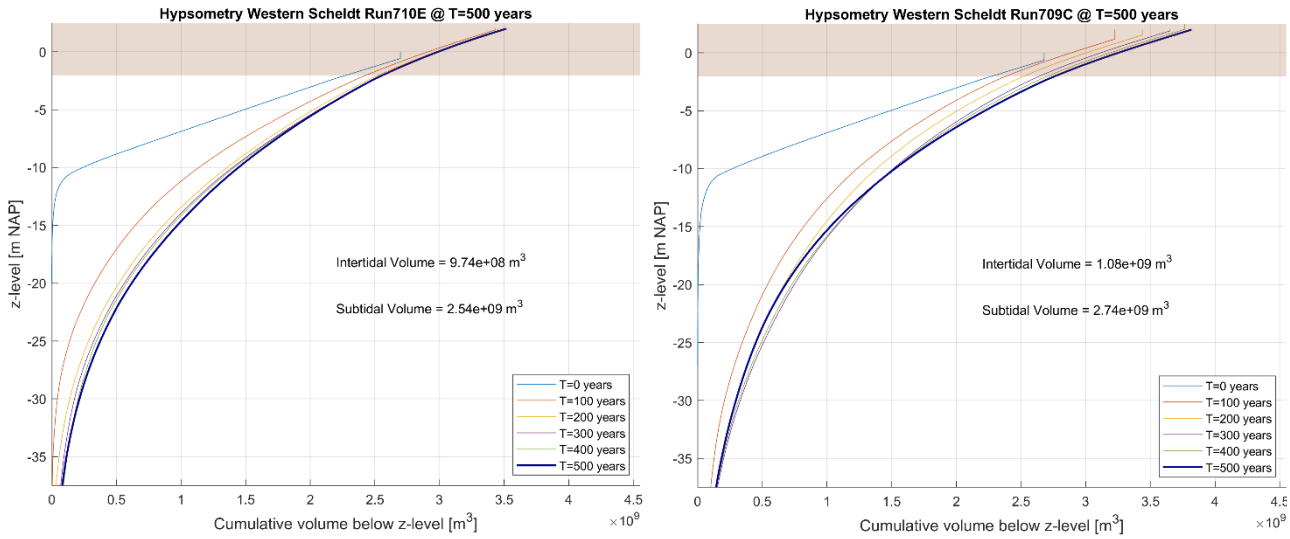
4.2.6 Invloed transportformulering

De invloed van de sedimenttransportformulering op de door het model geproduceerde morfologie is onderzocht voor twee transportformules: Engelund-Hansen (Run710E) en Van Rijn (Run709C). In Figuur 32 wordt voor beide runs de gesimuleerde bodemligging na 500 jaar morfologische ontwikkeling getoond en in Figuur 33 de uiteindelijke hypsometrie met een indicatie voor het totale subtidale en intertidale volume in de Westerschelde. Er wordt opgemerkt dat bij aanpassing van de transportformule van Engelund-Hansen naar Van Rijn automatisch ook de formulering voor hellingtransport verandert aangezien het additioneel hellingtransport bij Van Rijn enkel op het bodemtransport wordt toegepast en in het geval van Engelund-Hansen op het totaal transport (i.e., Engelund-Hansen is een totaaltransport formule). Om enigszins vergelijkbare waarden voor het hellingtransport te bekomen dienen de kalibratiefactoren α_{BN} dus ook te worden aangepast. Een exacte overeenstemming in aanvullend hellingtransport tussen beide transportformuleringen kan hierbij onmogelijk worden gevonden. In Run710E met de Engelund Hansen formulering is α_{BN} = 1,5 toegepast en in Run709C met de Van Rijn formulering is α_{BN} = 20 toegepast. In de volgende sectie wordt nog specifiek ingegaan op de invloed van de kalibratiefactoren α_{BN} en α_{BS}, gebaseerd op simulaties met de Engelund-Hansen transportformulering (i.e., conform de referentierun).

Een eerste blik op de gesimuleerde bodemligging in beide runs leert dat de morfologische ontwikkeling sterk verschilt afhankelijk van de gekozen transportformulering. Zowel de ligging van geulen en platen als de vorm ervan wijkt sterk af. Bij toepassing van de Van Rijn formulering zijn de geulen dieper en is de kromming van de bochten minder sterk dan wanneer de Engelund-Hansen formulering wordt toegepast. Dit laatste kan ook te maken hebben met de gekozen coëfficiënt voor hellingtransport. Uit de hypsometrie volgt ook dat het subtidaal volume en intertidaal volume groter zijn bij toepassing van de Van Rijn formulering. Omdat in referentierun 711C de geulvolumes al worden overschat lijkt het toepassen van de Van Rijn formulering in plaats van de Engelund-Hansen formule dus niet aangewezen. Wel wordt opgemerkt dat een verdere kalibratie op basis van coëfficiënten voor hellingtransport tot een ander resultaat zou kunnen leiden.



Figuur 32 - Gemodelleerde morfologie in simulatie met sedimenttransportformule van Engelund-Hansen (Run710E; boven) en Van Rijn sedimenttransportformule (Run709C; onder).

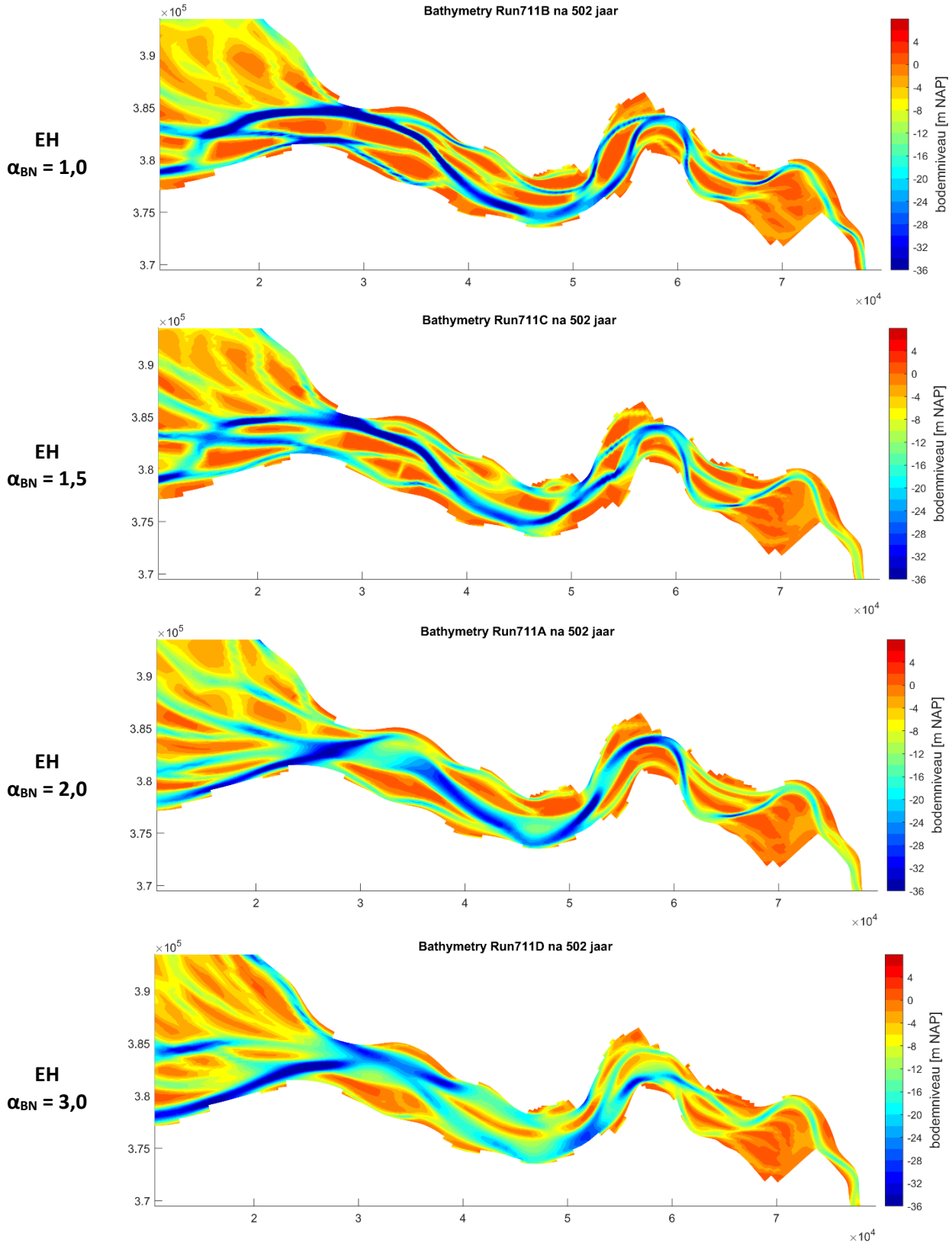


Figuur 33 - Hypsometrie van de Westerschelde in simulatie met sedimenttransportformule van Engelund-Hansen (Run710E; links) en Van Rijn sedimenttransportformule (Run709C; rechts).

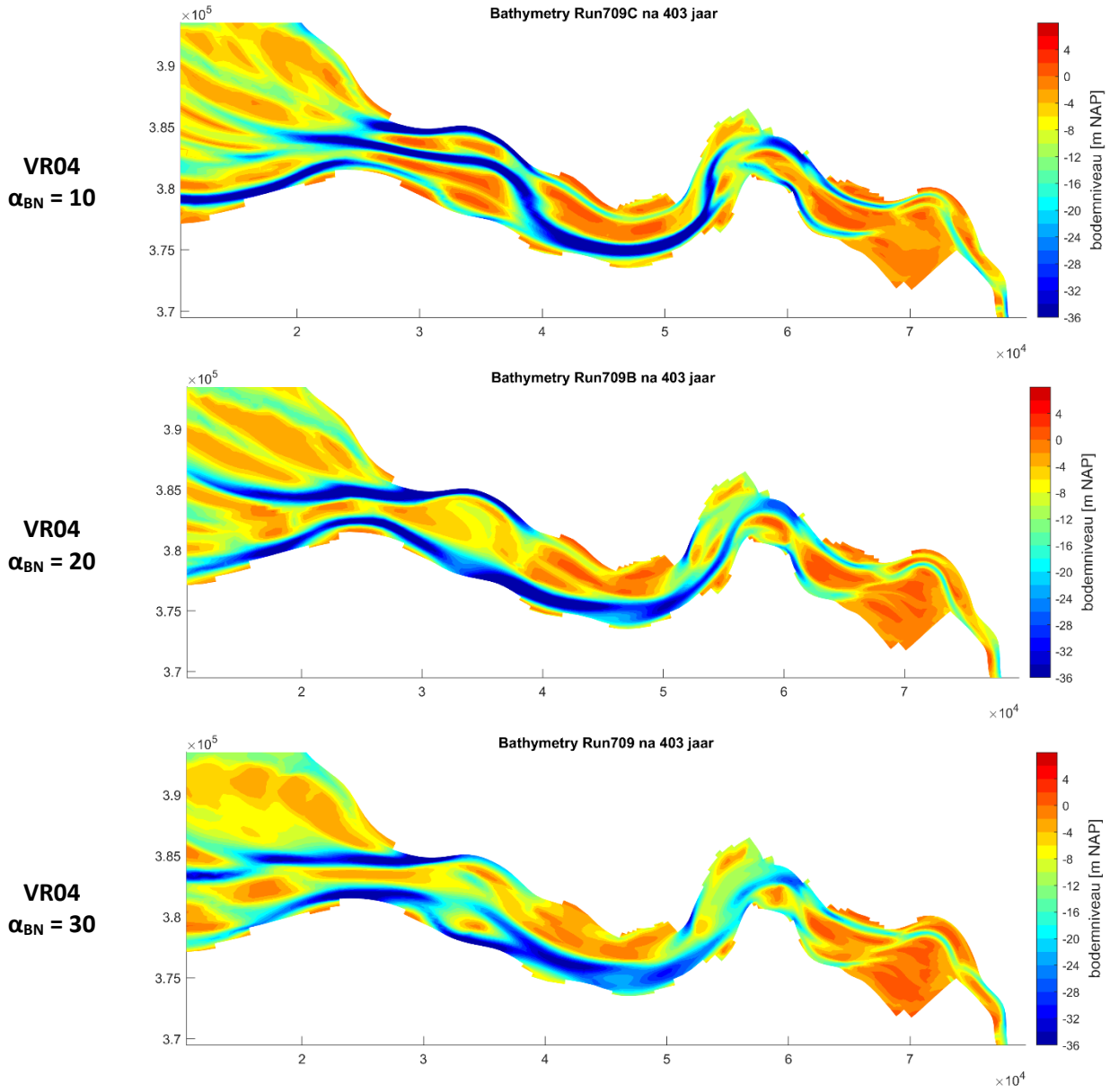
Transversaal hellingtransport

Figuur 34 laat de door het model geproduceerde morfologie na 500 jaar zien voor simulaties met verschillende waarden voor de coëfficiënt voor transversaal hellingtransport (i.e., α_{BN} = 1,0; α_{BN} = 1,5; α_{BN} = 2,0 en α_{BN} = 3,0) in combinatie met de Engelund-Hansen transportformulering. De keuze voor α_{BN} heeft een grote impact op de uiteindelijke morfologie. Hogere waarden geven flauwere gradiënten, flauwe geulwanden en relatief ondiepe geulen in de morfologie. Bij een te hoge waarde gaat dit ten koste van het plaatoppervlakte dat afneemt door de te flauwe geulhellingen. Lagere waarden voor α_{BN} laten juist steilere gradiënten en steile geulwanden toe waardoor diepe geulen kunnen ontwikkelen (zie ook: Figuur 37 met thalwegdiepte in de Westerschelde). Voor een coëfficiënt groter dan 2,0 leidt dit tot zeer grote afwijkingen in de gesimuleerde morfologie. Het totale subtidale volume neemt bij deze hoge waarden opvallend genoeg juist toe, doordat de platen mee eroderen als gevolg van het hoge transversale hellingtransport. In Run711D met α_{BN} = 3,0 is het subtidale volume bijvoorbeeld 7% hoger dan in Run711B en Run711C met α_{BN} = 1,0 en α_{BN} = 1,5. Ook het intertidale volume is met 25-30% significant hoger door de lagere ligging van de platen. Uiteindelijk is in de referentierun van deze studie een relatief lage waarde van α_{BN} = 1,5 toegepast.

In Figuur 35 wordt de gevoeligheid voor α_{BN} eveneens geïllustreerd, maar nu aan de hand van drie morfologische simulaties met de Van Rijn transportformulering. In deze runs zijn, zoals eerder uitgelegd, hogere waarden voor α_{BN} toegepast: α_{BN} = 10; α_{BN} = 20 en α_{BN} = 30. het additioneel hellingtransport bij Van Rijn enkel op het bodemtransport wordt toegepast en in het geval van Engelund-Hansen op het totaal transport (i.e., Engelund-Hansen is een totaaltransport formule). Dit komt doordat het additioneel hellingtransport bij Van Rijn enkel op het bodemtransport wordt toegepast en in het geval van Engelund-Hansen op het totaal transport (i.e., Engelund-Hansen is een totaaltransport formule). De geselecteerde waarden zijn gebaseerd op instellingen die door Van Dijk *et al.* (2019) werden gevonden in een eerdere gevoeligheidsanalyse voor de effecten van hellingtransport op de morfologie van de Westerschelde. De impact van deze coëfficiënt in het geval van de Van Rijn transportformulering is verder gelijkaardig aan de impact bij de Engelund-Hansen formulering: Hogere waarden leiden tot flauwe gradiënten en relatief brede ondiepe geulen, terwijl lage waarden leiden tot steile gradiënten en relatief diepe en smalle geulen.



Figuur 34 - Gemodelleerde morfologie in simulaties met Engelund-Hansen transportformule en verschillende α_{BN}.

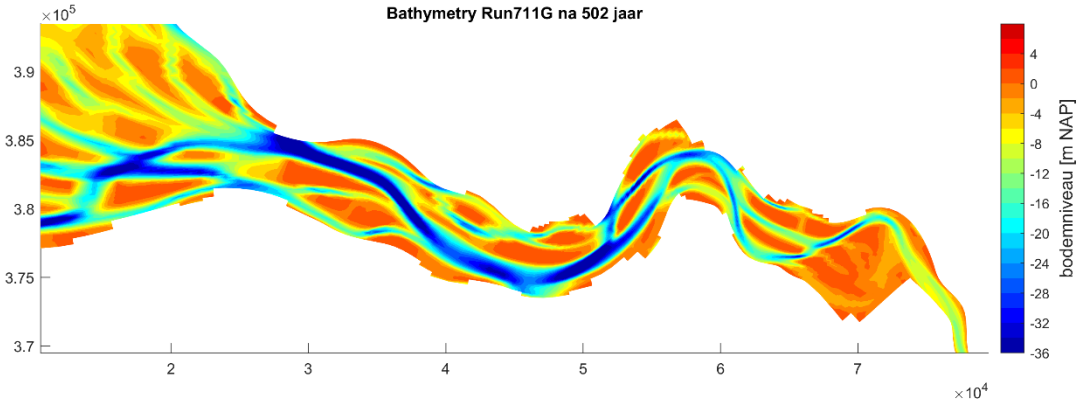


Figuur 35 - Gemodelleerde morfologie in simulaties met VR04 transportformule en verschillende α_{BN}.

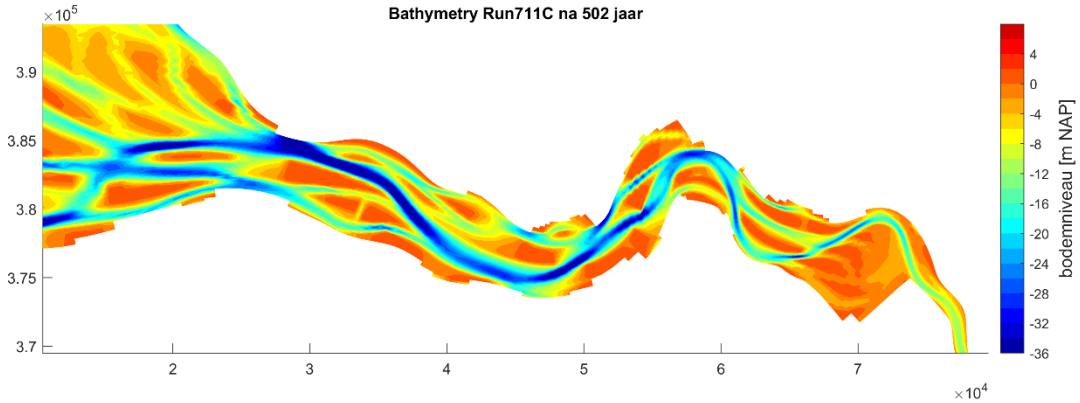
Longitudinaal hellingtransport

Het effect van de coëfficiënt voor longitudinaal helling transport α_{BS} wordt in Figuur 36 geïllustreerd aan de hand van drie simulaties met α_{BS} = 0,5; α_{BS} = 1,0 en α_{BS} = 2,0. Het effect van α_{BS} is kleiner dan het effect van α_{BN}. Lagere waarden voor α_{BS} geven aanleiding tot meer longitudinale variatie, terwijl een hogere waarde tot flauwere gradiënten in de geulen leidt. Dit volgt ook uit de diepteligging van de hoofdgeul of thalweg die in Figuur 38 wordt geïllustreerd voor de drie simulaties met verschillende α_{BS}. De geulvolumes zijn hierdoor iets kleiner als hogere waarden voor α_{BS} worden toegepast (i.e., 10% verschil in geulvolume na 500 jaar morfologische ontwikkeling tussen simulatie met α_{BS} = 0,5 en α_{BS} = 2,0). Bovenstaande is op zowel de hoofdgeulen als de nevengeulen van toepassing.

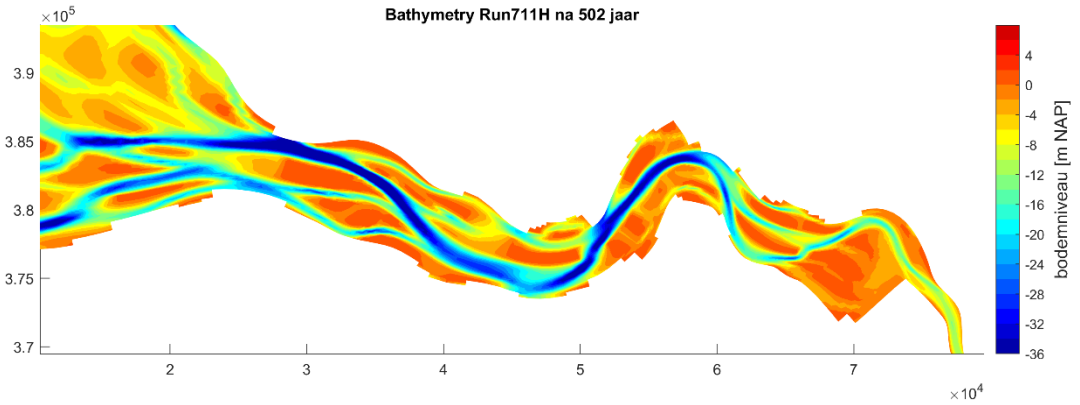
EH
α_{BS} = 0,5



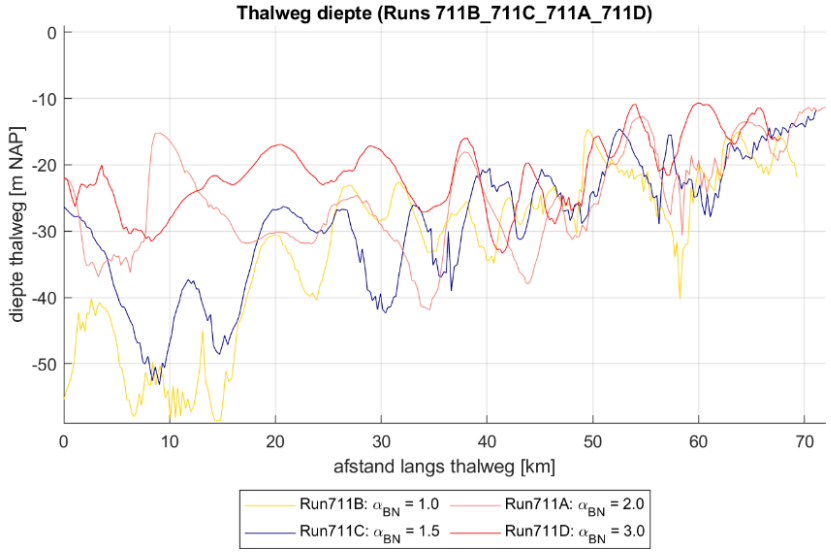
EH
α_{BS} = 1,0



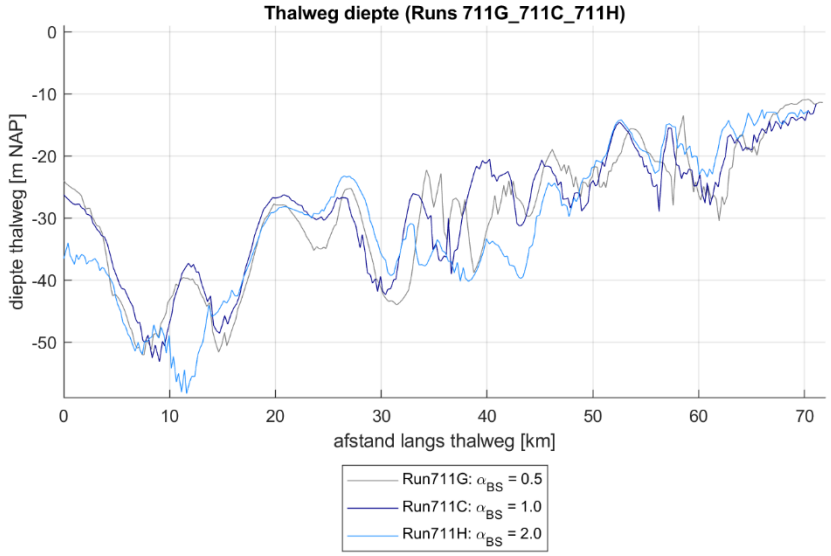
EH
α_{BS} = 2,0



Figuur 36 - Gemodelleerde morfologie in simulaties met verschillende α_{BS}.



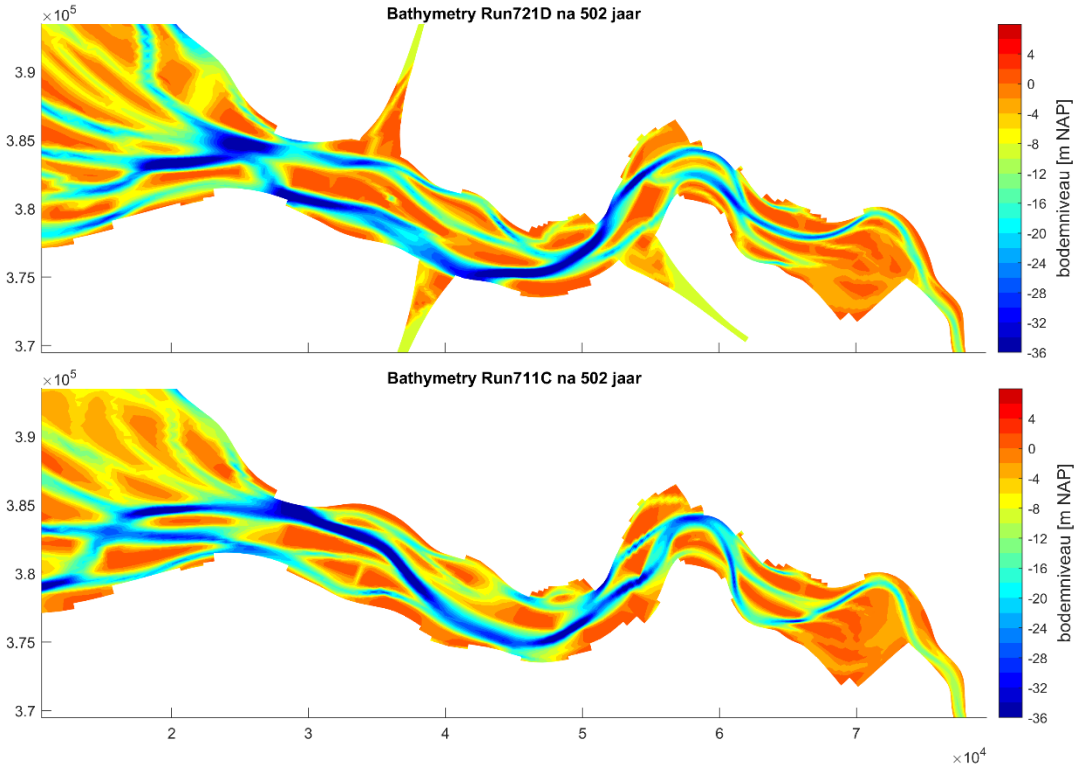
Figuur 37 - Langsprofiel van de hoofdgeul (thalweg) na 500 jaar in simulaties met verschillende α_{BN}.



Figuur 38 - Langsprofiel van de hoofdgeul (thalweg) na 500 jaar in simulaties met verschillende α_{BS}.

4.2.7 Zijbekkens

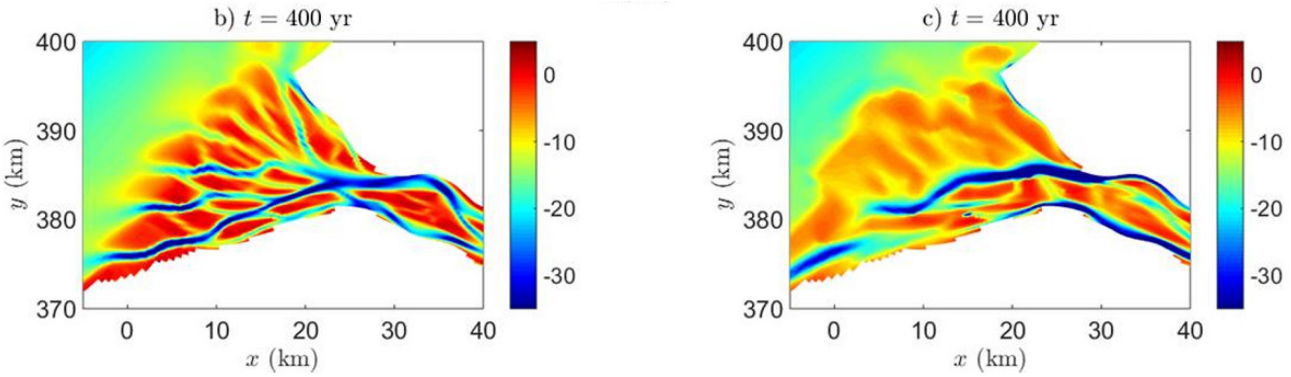
Het effect van zijbekkens op de morfologische ontwikkeling werd uitvoerig onderzocht door (Nnafie *et al.*, 2017c). De belangrijkste conclusie uit deze studie was dat zijbekkens, zoals het voormalige Sloebekken of de Braakman, ertoe leiden dat de geulen in het hoofdbekken van het estuarium van de oevers worden weggedrukt. In Figuur 39 wordt de morfologische ontwikkeling getoond na een simulatieduur van 500 jaar voor een modelrun mét en zonder zijbekkens. Het is duidelijk dat de morfologie en de ligging van geulen en platen significant anders is als er zijbekkens worden meegenomen in de modeloefening. Het specifieke effect van de zijbekkens op de morfologische kenmerken vormt echter geen onderwerp van de huidige studie, waarin de focus ligt op het effect van stortingen en vaargeulonderhoud. Daarom is ervoor geopteerd om in de referentierun de zijbekkens achterwege te laten.



Figuur 39 - Gemodelleerde morfologie na 500 jaar in simulatie met zijbekkens (Run721D; boven) en zonder zijbekkens in de referentierun (Run711C; onder).

4.2.8 Invloed windgolven

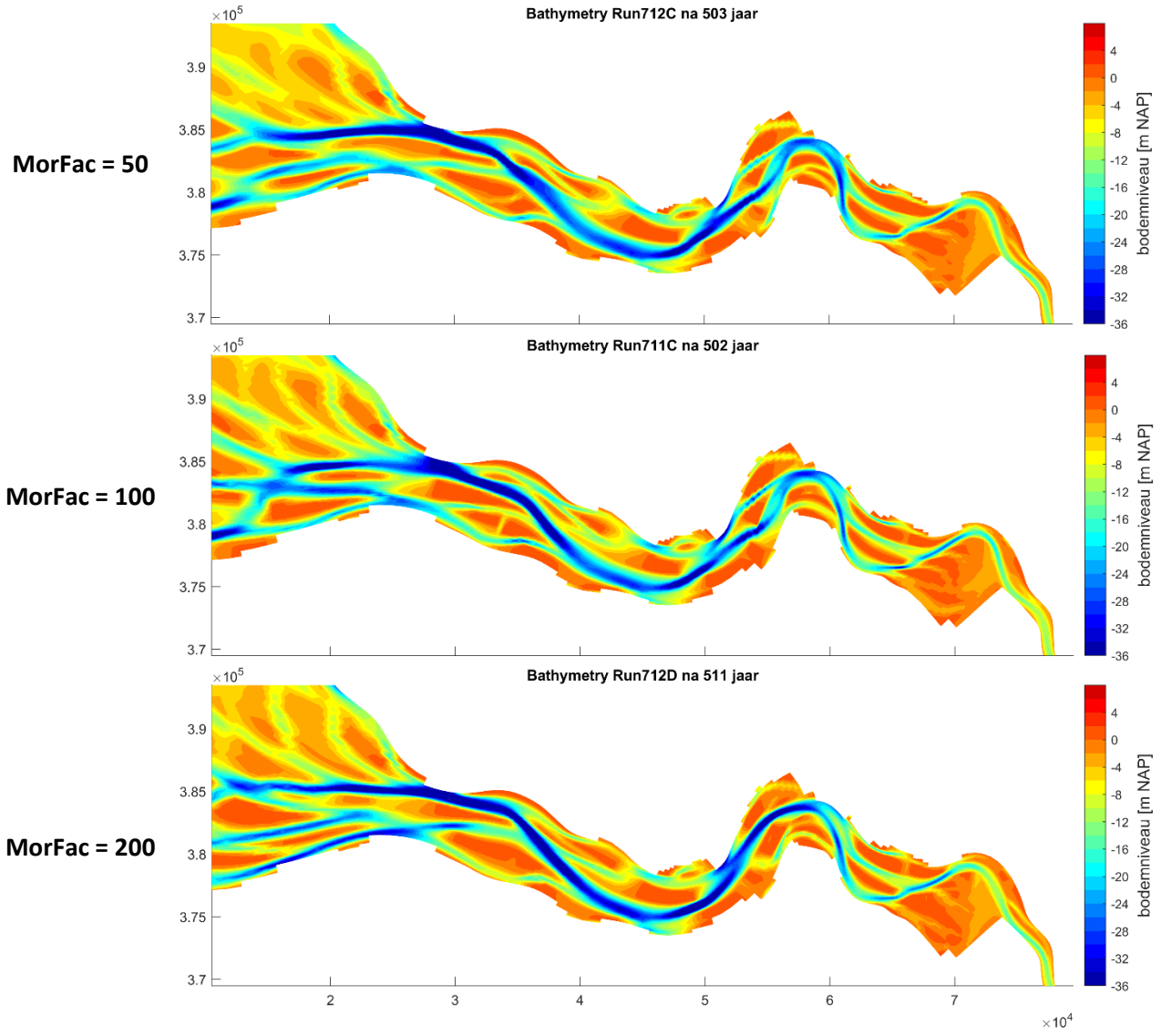
De invloed van de implementatie van windgolven werd reeds onderzocht door Nnafie *et al.* (2017b). Hoewel er voor de huidige studie ook enkele verkennende berekeningen zijn uitgevoerd mét golfmodule is ervoor geopteerd dit niet te passen voor de scenario-analyse. Er werd in deze runs geen betere representatie van de morfologie bekomen en de rekentijd neemt significant toe als de golfmodule wordt geïmplementeerd. Uit het vorig modelonderzoek bleek bovendien al dat het effect van golven op de morfologische ontwikkeling van de Westerschelde enkel essentieel is in het mondingsgebied (Figuur 40).



Figuur 40 - Gemodelleerde morfologie na 400 jaar in simulatie zonder windgolven (links) en met windgolven (rechts). Uit: Nnafie *et al.* (2017b).

4.2.9 Invloed morfologische versnellingsfactor

Het effect van de morfologische versnellingsfactor of *MorFac* op de modelresultaten wordt geïllustreerd in Figuur 41, waarin de door het model gesimuleerde bodemligging na 500 jaar morfologische ontwikkeling wordt getoond voor simulaties met een *MorFac* van respectievelijk 50, 100 en 200. De simulatie met een *MorFac* van 100 betreft in dit geval referentierun 711C. Simulaties met een *MorFac* van 50 of 100 geven zeer gelijkaardige resultaten, al is de exacte diepteligging van de geulen iets anders. Bij een hogere *MorFac* van 200 ontstaan wel significante verschillen in de gesimuleerde morfologische ontwikkeling. Zo is in macrocel 3 (zone Terneuzen-Hansweert) de nevengeul niet meer aanwezig. Ook zijn sommige kortsluitgeulen (i.e., ondiepe geulen die de platen dwars doorkruisen) niet meer aanwezig bij een hogere *MorFac*. Er kan geconcludeerd worden dat een *MorFac* van 100 tot gelijkaardige modelresultaten leidt ten opzichte van simulaties met lagere *MorFac* waardes, maar dat bij een verdere verhoging van de *MorFac* grotere afwijkingen beginnen te ontstaan.



Figuur 41 - Gemodelleerde morfologie in simulaties met MorFac = 50 (Run712C; boven), MorFac = 100 (referentierun Run711C; midden) en MorFac = 200 (Run712D; onder).

4.2.10 Conclusies gevoeligheidsanalyse

Uit de gevoeligheidsanalyse blijkt verder dat de door het model geproduceerde morfologie zeer gevoelig is voor de modelschematisering. Met name de roosterresolutie, sedimenttransportformulering en de coëfficiënten voor hellingtransport hebben een grote invloed. Op basis van de gevoeligheidsanalyse zijn enkele aanpassingen gedaan aan de modelschematisering, zoals ook in sectie 3.2 al werd vermeld. In het kort betreft dit een roosterverfijning in de oostelijke helft van de Westerschelde, de implementatie van een niet-erodeerbare laag in de bodem van het *Verdronken Land van Saeftinghe*, de implementatie van een constant bovenstrooms debiet en het aanpassen van de coëfficiënten voor longitudinaal en lateraal hellingtransport.

4.3 Bagger- en stortscenario's

Deze sectie bevat de resultaten van de modelberekeningen met vaargeulonderhoud en met een aantal geïmplementeerde stortstrategieën (Tabel 3). In alle scenario's wordt gestart met de bodemligging die na 500 jaar morfologische ontwikkeling door het model zelf werd geproduceerd (sectie 4.1). Er wordt steeds een onderhoudsdiepte van -18.85 m NAP (of -16.5 m TAW) toegepast. De vervolgsimulaties hebben een duur van 100 jaar, waardoor de totale duur van de morfologische ontwikkeling 500 + 100 = 600 jaar is. In sectie 4.3.1 wordt het effect van vaargeulonderhoud eerst besproken. Vervolgens volgen in secties 4.3.2 - 4.3.6 de resultaten van modelberekeningen met verschillende stortstrategieën.

Tabel 3 – Overzicht modelscenario's stortstrategie (herhaling).

ID	Omschrijving
RUN806	*vervolgrun zonder vaargeulonderhoud*
RUN810A	*alleen baggeren*
RUN810B	*Uniform storten (gelijkmatige verdeling over Westerschelde in alle zones < 0,0 m NAP; cfr. geen stortstrategie; wel sedimentbehoud)*
RUN810C	*Stortstrategie: diepe delen (in meest nabij gelegen sectie/macrocel van de hoofdgeul)*
RUN810E	*Stortstrategie: nevengeulen (in meest nabij gelegen sectie/macrocel van de nevengeul)*
RUN810F	*Stortstrategie: uniform storten in diepe delen (gelijkmatige verdeling over alle geulsecties < -22 m NAP)*
RUN810G	*Stortstrategie: diepe delen (in aangrenzende opwaartse sectie/macrocel van de hoofdgeul)*
RUN810H	*Stortstrategie: diepe delen (in aangrenzende afwaartse sectie/macrocel van de hoofdgeul)*

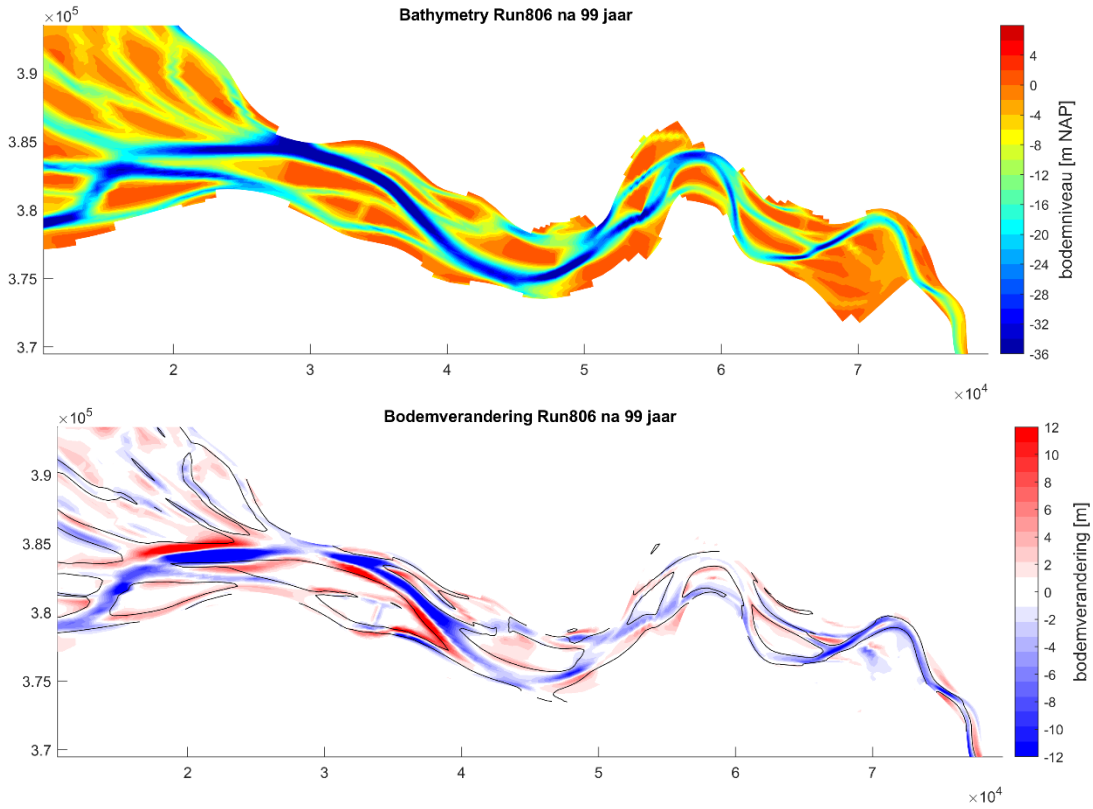
4.3.1 Effect vaargeulonderhoud

Het effect van vaargeulonderhoud op de morfologische ontwikkeling van de Westerschelde wordt geanalyseerd door een scenarioberekeningen zonder baggeractiviteiten (Run806) en met baggeractiviteiten in de vaargeulpolygoon (Run810A) te vergelijken. In Run810A wordt het sediment uit het model verwijderd en is dus geen sprake van massabehoud. Daarom wordt ook een berekening aan de vergelijking toegevoegd waarin het sediment dat uit de vaargeul verwijderd wordt behouden blijft en gelijkmatig wordt verdeeld over het oppervlakte van de Westerschelde (i.e., enkel gebieden lager dan 0 m NAP; Run810B). In dit laatste scenario blijft het sediment weliswaar behouden, er is echter geen sprake van een specifieke stortstrategie met aangewezen stortlocaties.

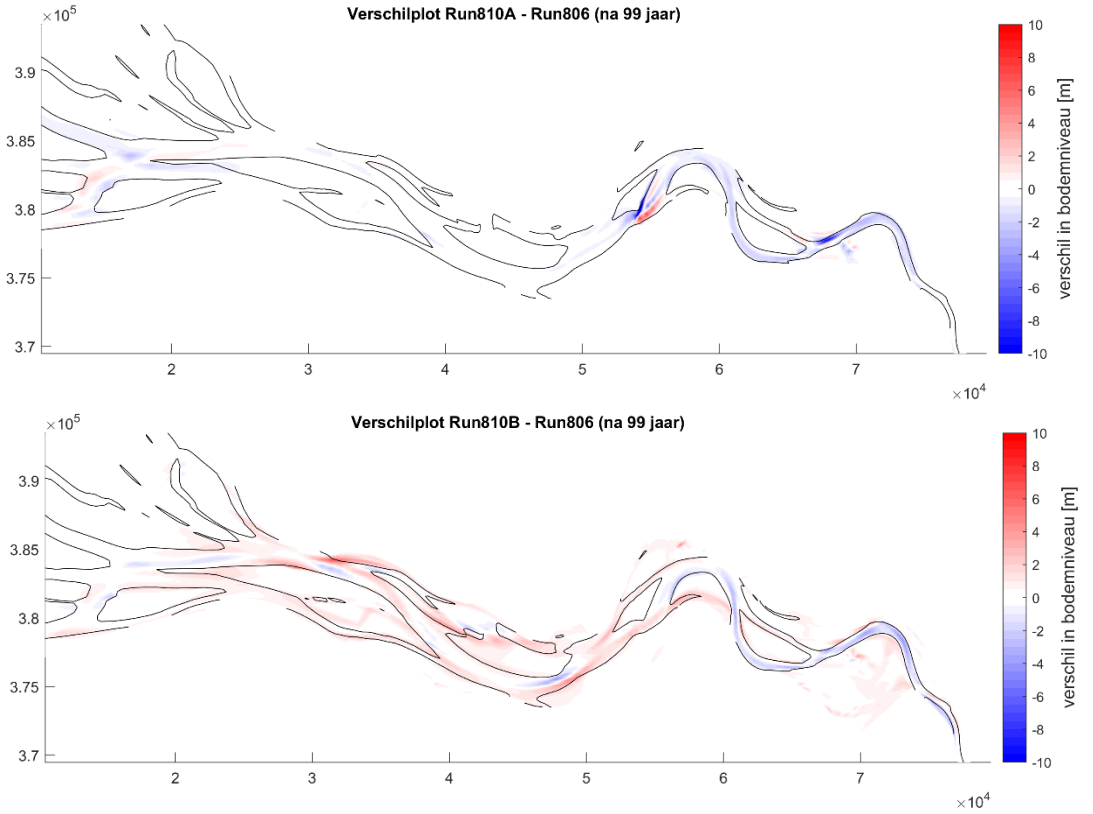
Figuur 42 toont de gesimuleerde bodemligging na 100 jaar in de modelberekening zonder vaargeulonderhoud en een sedimentatie-erosie-plot voor bodemverandering over de simulatieduur. De bodemligging en configuratie van geulen en platen is in de simulatie zonder baggeren na 100 jaar nog zeer gelijkaardig aan de beginconditie. Er zit dus weinig verschil in grootschalige morfologie na 500 jaar ontwikkeling en na 600 jaar ontwikkeling vanaf een vlakke bodem. Wel is er sprake van een geleidelijke verschuiving van enkele platen in het mondingsgebied en de westelijke helft van de Westerschelde (ie., te herkennen aan smalle banden van sterke erosie en sedimentatie naast elkaar zichtbaar zijn). In de oostelijke helft van de Westerschelde diept de hoofdgeul nog iets uit in de simulatie zonder vaargeulonderhoud. De plaatranden groeien daarentegen iets aan. Figuur 43 toont verschilplots voor de bodemligging na 100 jaar in de twee berekeningen met vaargeulonderhoud (Run810A en Run810B) ten opzichte van de berekening zonder vaargeulonderhoud. Het effect van vaargeulonderhoud in Figuur 43 is veel kleiner dan de autonome morfologische ontwikkeling in Figuur 42. In de oostelijke helft van de Westerschelde leidt het vaargeulonderhoud wel tot een verdere verdieping van de hoofdgeul in macrocel 5. In de nevengeulen van macrocel 5 is een heel beperkte sedimentatiezone te zien. In de westelijke helft van de Westerschelde is het effect van het vaargeulonderhoud echter zeer beperkt. Als het gebaggerde sediment in Run 810B gelijkmatig over het estuarium wordt verdeeld is zelfs sprake van sedimentatie in sommige geulsecties in de westelijke helft van de Westerschelde. Uiteraard is door het gelijkmatig terugstorten van het sediment ook in de nevengeulen en op de platen sprake van lichte aanzanding.

Baggervolumes

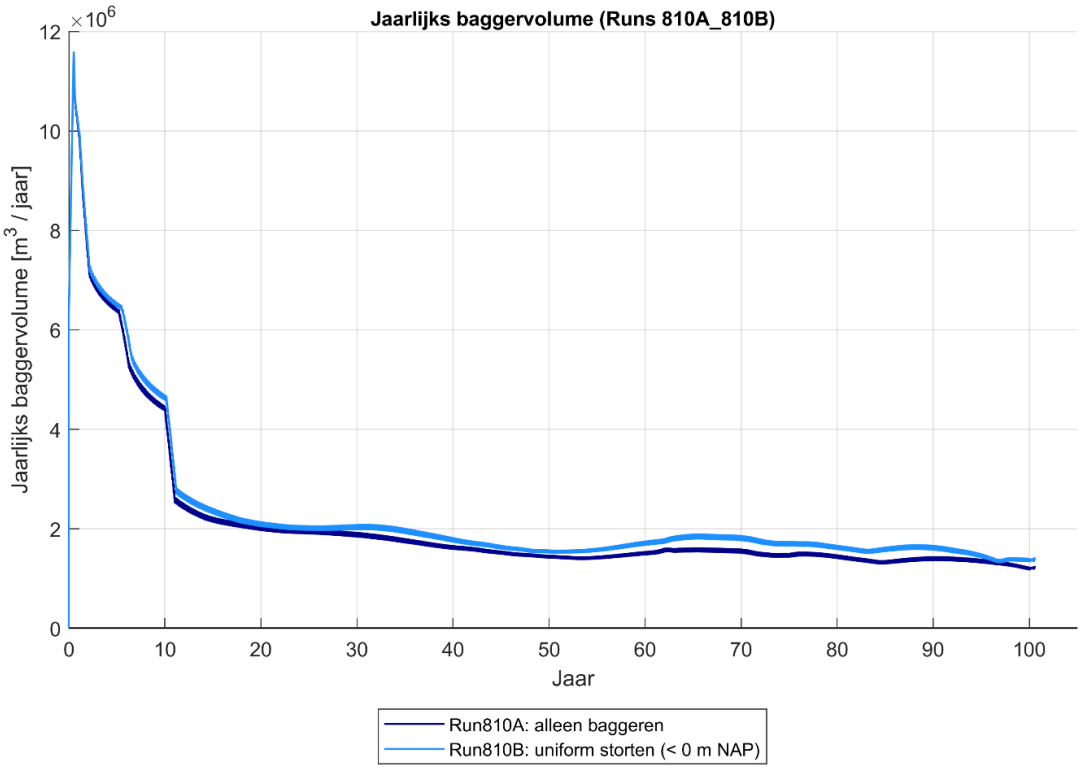
Na 100 jaar zijn de totale baggervolumes voor Run810A en Run810B resp. 208 Mm^3 en 225 Mm^3, of 2,1-2,2 Mm^3 per jaar. Het effect van het gelijkmatig terugstorten van het sediment over het volledige estuarium op het totale baggervolume is met +8% dus zeer beperkt. Hierbij wordt opgemerkt dat in Run810B een groot gedeelte van het sediment op laag dynamische zones en buiten de vaargeulpolygoon wordt teruggeplaatst. Dit is geen realistische stortstrategie. Voor het effect van terugstorten wordt verwezen naar de resultaten van simulaties waarin effectief een stortstrategie werd geïmplementeerd (secties 4.3.2 - 4.3.6). Verder blijkt uit Figuur 44 dat de baggerintensiteit in de beginperiode van de simulatie hoog is, tot 12 Mm^3 per jaar, maar later afneemt en stabiliseert. In de beginfase van de modelrun wordt de vaargeul op diepte gebracht en heeft zich nog geen nieuw evenwicht tussen de geuldiepte en naastgelegen geulwanden en platen gevormd. Dit leidt tijdelijk tot hogere baggervolumes. Na 10 á 20 jaar in de morfologische berekening stabiliseren de baggervolumes tot ongeveer 1,5-2,0 Mm^3 per jaar in beide simulaties.



Figuur 42 - Gemodelleerde morfologie in simulatie 806 zonder vaargeulonderhoud (boven), sedimentatie-erosie-plot (onder).



Figuur 43 - Verschilplots voor simulatie 810A met vaargeulonderhoud en simulatie 810B met vaargeulonderhoud én uniform terugstorten (onder) t.o.v. simulatie 806 zonder vaargeulonderhoud.



Figuur 44 - Baggerintensiteit in simulaties met (810A) en zonder (810B) terugstorten van sediment.

4.3.2 Morfologische ontwikkeling in stortscenario's

De resultaten van de modelberekeningen met verschillende stortstrategieën (Tabel 3) worden in deze paragraaf voorgesteld aan de hand van: bathymetrische verschilplots, veranderingen in diepteligging en volumes van hoofd- en nevengeulen, getijkarakteristieken, sedimenttransporten en uiteraard de baggerhoeveelheden zelf. De stortscenario's worden ten opzichte van elkaar geanalyseerd. Om de autonome morfologische ontwikkeling en de invloed van het vaargeulonderhoud te verdisconteren worden Run810A (enkel vaargeulonderhoud) en Run810B (met massabehoud, maar zonder stortstrategie) als referentieruns gebruikt.

Ontwikkeling grootschalige morfologie

In Figuur 45 – Figuur 49 wordt voor de verschillende stortscenario's (Runs 810C, 810E, 810F, 810G en 810H) de bodemligging na 100 jaar morfologische ontwikkeling weergegeven, alsmede het verschil in bodemligging ten opzichte van Run806 (zonder vaargeulonderhoud). Aanvullend worden in Figuur 50 de geulcontouren na 100 jaar morfologische ontwikkeling geplot voor alle stortscenario's.

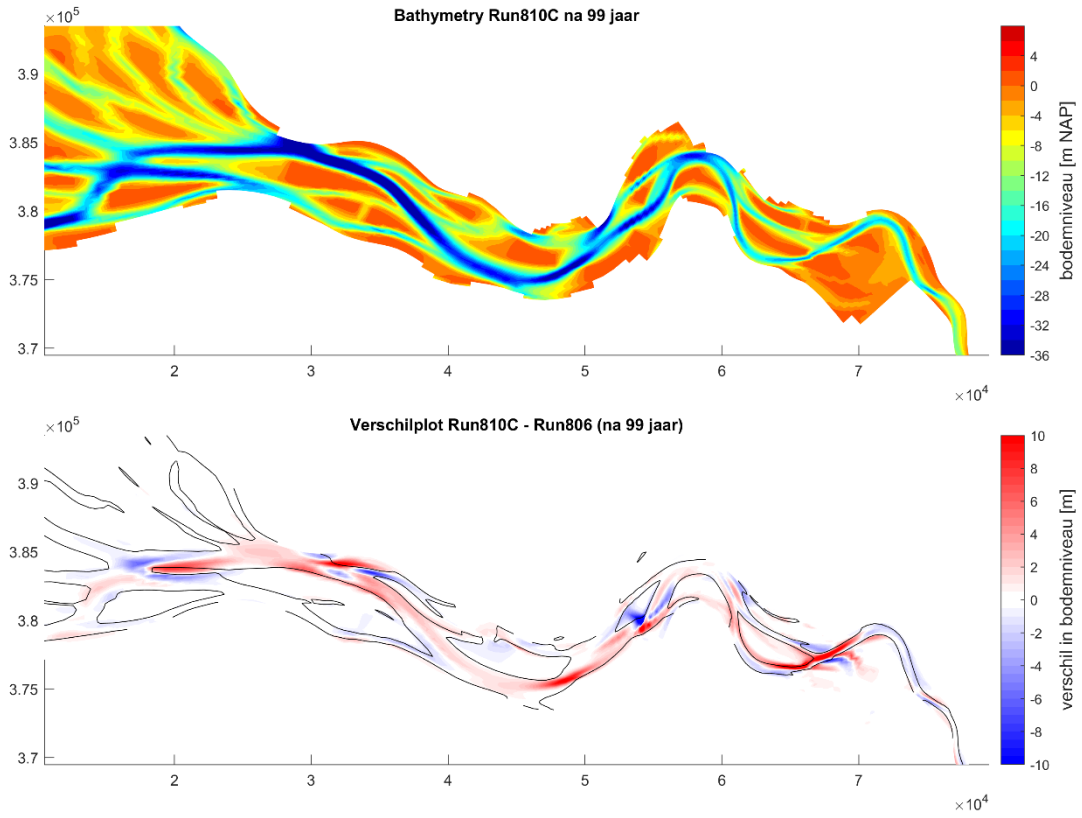
De gemodelleerde bodemligging na 100 jaar morfologische ontwikkeling met onderhoudsbaggerwerken (baggeren en terugstorten) is voor scenario's met een verschillende stortstrategie nog zeer gelijkend. De ligging van geulen en platen verschilt nauwelijks tussen de verschillende scenario's (Figuur 50). Enkel scenario 810E waarbij er in de nevengeulen wordt teruggestort laat een ander patroon zien in sommige macrocellen.

In alle stortscenario's waar er in de diepe delen wordt gestort (Run 810C, 810F, 810G en 810H) is een duidelijke verondieping zichtbaar in de hoofdgeul ten opzichte van de referentieberekening. Dit patroon is kwalitatief gelijkend tussen de stortscenario's, maar afhankelijk van de exacte strategie is de relatieve verondieping het grootst in diepe putten of meer gelijkmatig verdeeld over het westelijk of oostelijk deel van de hoofdgeul. Zo is in Run 810F de verondieping in de hoofdgeul zeer gelijkmatig verdeeld als gevolg van het ruimtelijk verspreid terugstorten, terwijl in Runs 810C, 810G en 810H de verondieping het grootst is op een aantal specifieke locaties in de diepe putten.

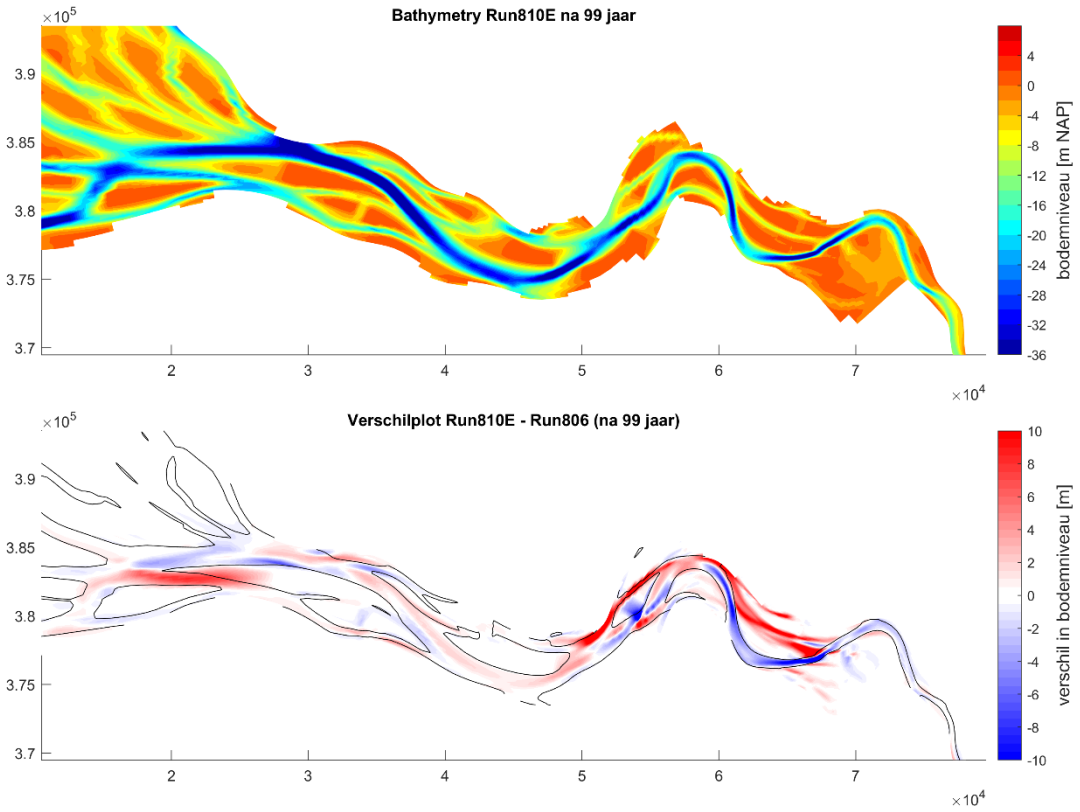
Scenario 810E waarin er in de nevengeulen wordt teruggestort laat een ander patroon zien. De nevengeul in de oostelijke helft van de Westerschelde, op de locatie van de Schaar van Waarde en Schaar van Valkenisse, verondiept in deze simulatie zeer sterk tot geuldieptes kleiner dan 10 m onder NAP.

In alle simulaties zijn naast grote zones van relatieve verondieping lokaal ook relatieve verdiepingen zichtbaar ten opzichte van de referentierun, voornamelijk ten gevolge van het vaargeulonderhoud zelf. Als in de nevengeulen wordt gestort en de nevengeulen verondiepen sterk, leidt dit in scenario 810E tot een bijkomende uitdieping van de hoofdgeul in dezelfde macrocel. Andersom leidt het storten in de hoofdgeul en een relatieve verondieping aldaar in simulaties 810C, 810F, 810G en 810H lokaal ook tot een relatieve uitdieping van de nevengeul. Dit speelt met name in de oostelijke helft van de Westerschelde, waar de verschillen in de morfologische ontwikkeling van de bodemligging het grootst zijn.

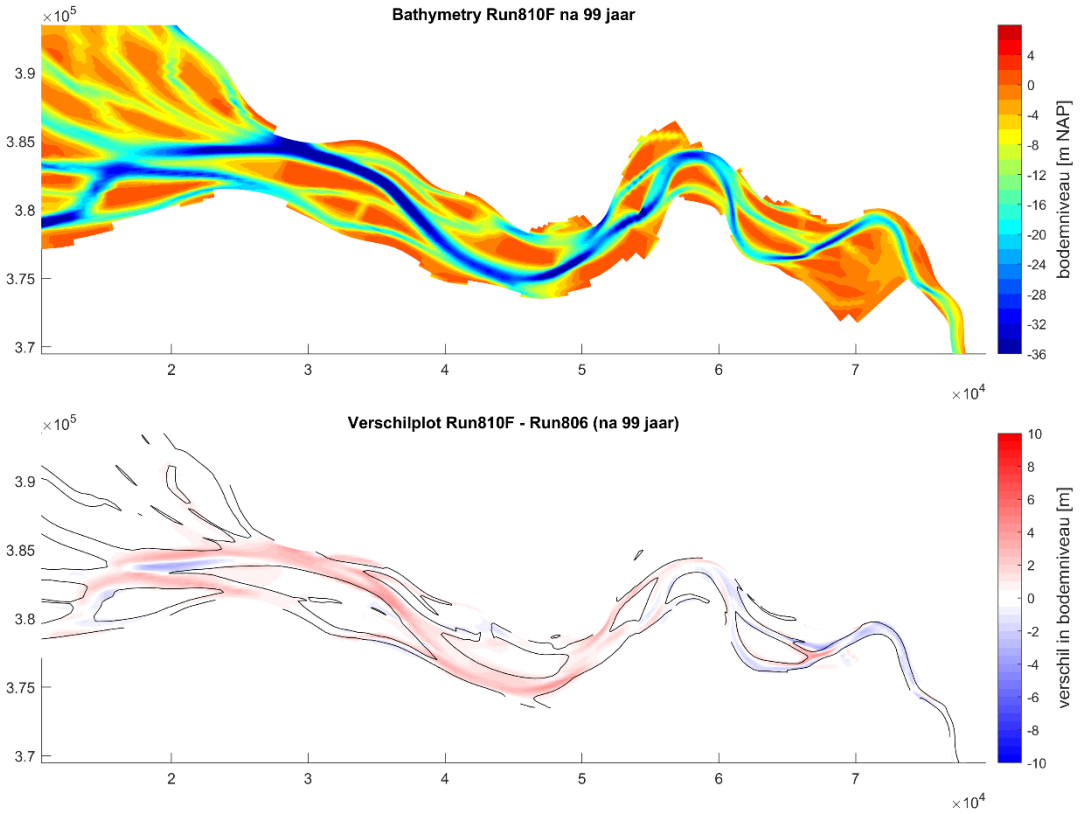
De ontwikkeling van de geuldieptes en geulvolumes wordt in de volgende secties in meer detail besproken.



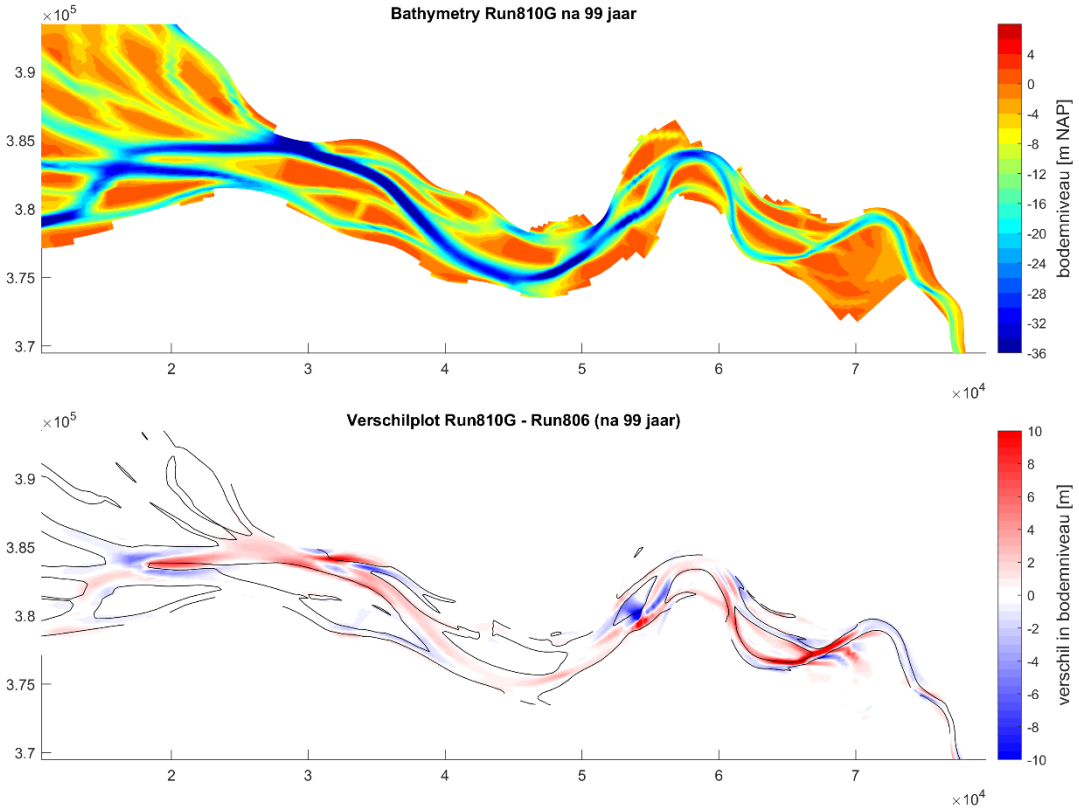
Figuur 45 - Gemodelleerde morfologie in Run810C (storten diepe delen; dichtbij) en verschil met Run806 (zonder onderhoud).



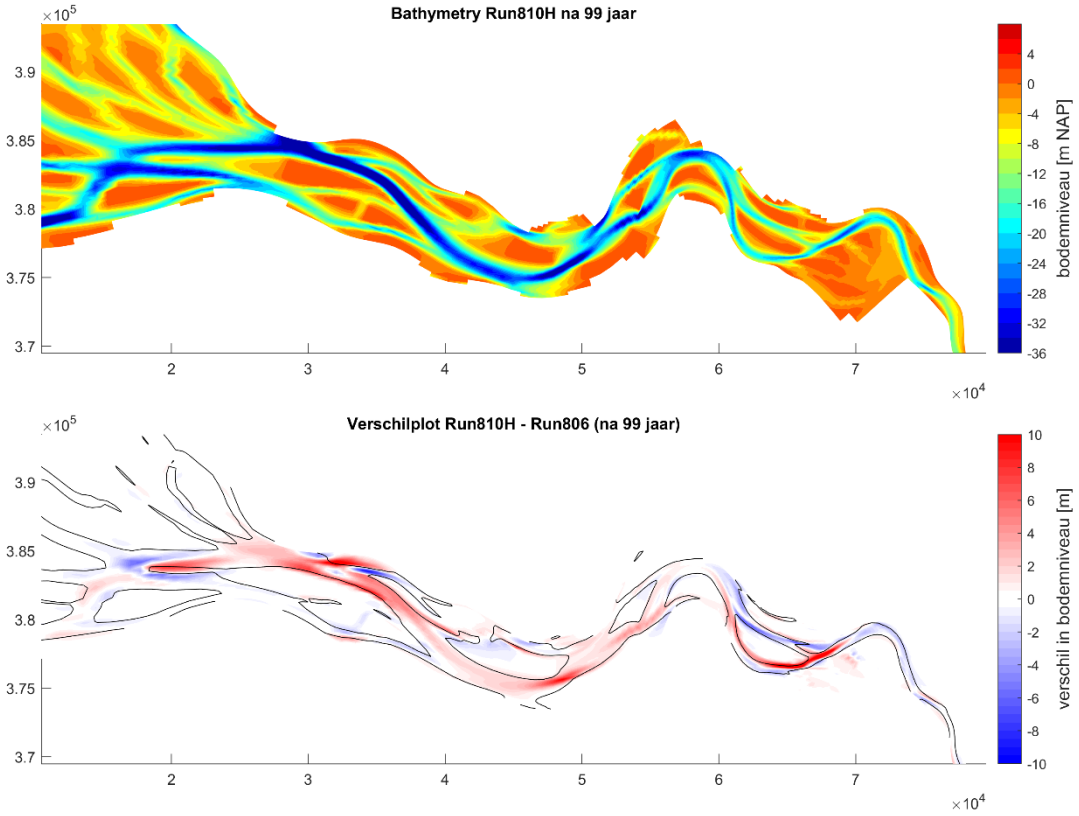
Figuur 46 - Gemodelleerde morfologie in Run810E (storten nevengeulen; dichtbij) en verschil met Run806 (zonder onderhoud).



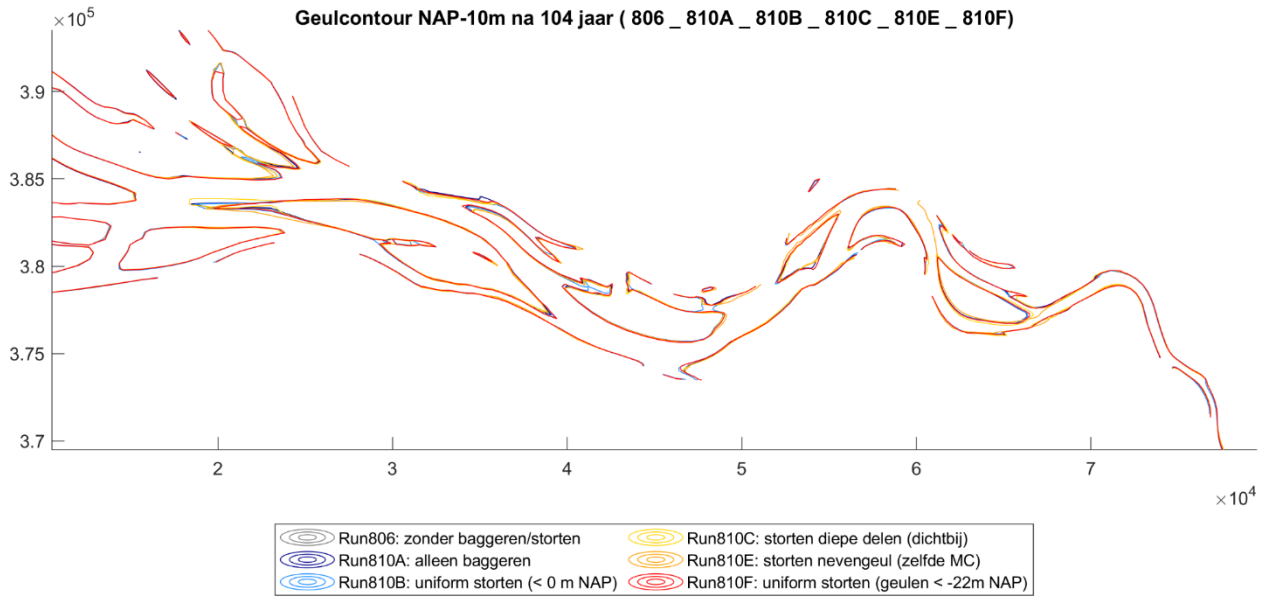
Figuur 47 - Gemodelleerde morfologie in Run810F (storten hoofdgeul; uniform) en verschil met Run806 (zonder onderhoud).



Figuur 48 - Gemodelleerde morfologie in Run810G (storten diepe delen; opwaarts) en verschil met Run806 (zonder onderhoud).



Figuur 49 - Gemodelleerde morfologie in Run810H (storten diepe delen; afwaarts) en verschil met Run806 (zonder onderhoud).



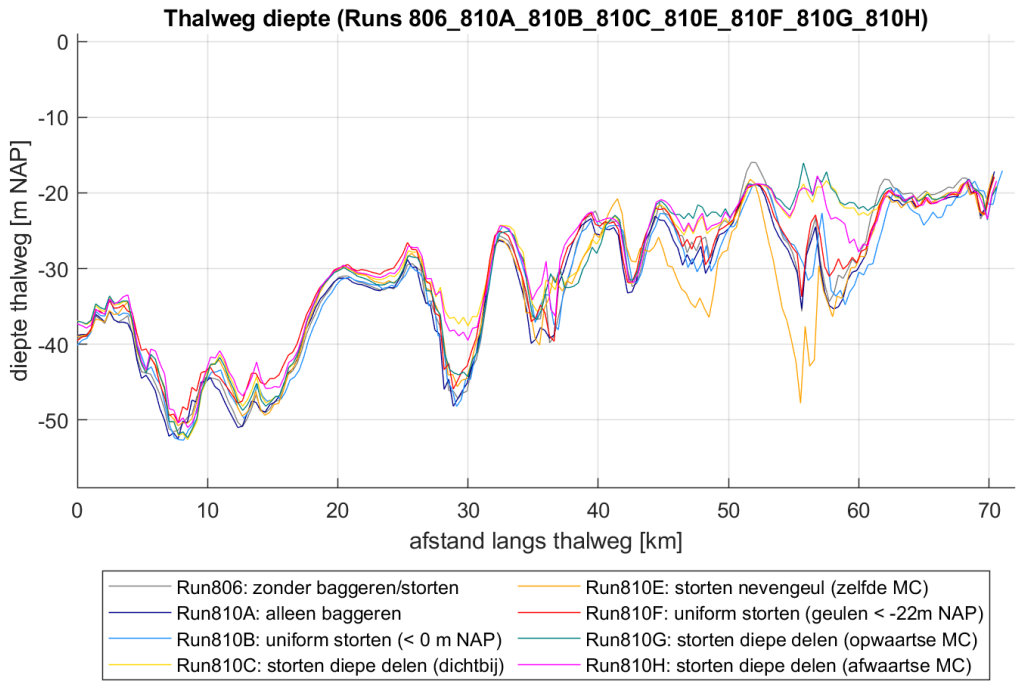
Figuur 50 - Geulcontouren na 100 jaar morfologische ontwikkeling in simulaties met verschillende bagger- en stortstrategieën.

Geuldiepte

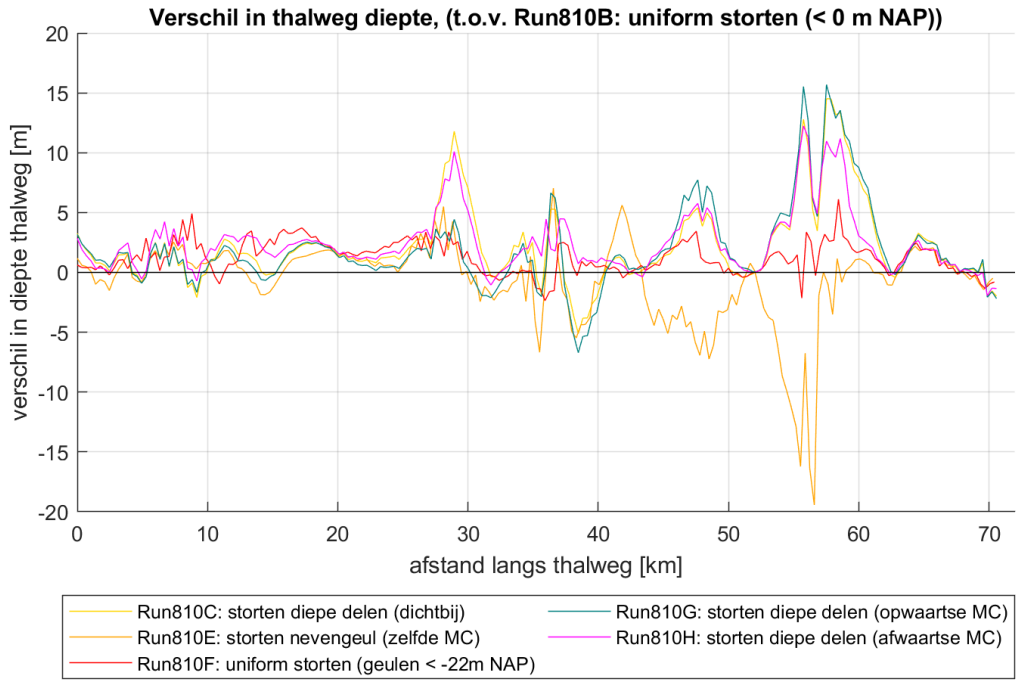
Figuur 51 geeft het langsprofiel van de vaargeul vanaf Vlissingen tot de Belgisch-Nederlandse grens na 100 jaar morfologische ontwikkeling voor de uitgevoerde stortscenario's. In Figuur 52 wordt het verschil in geuldiepte ten opzichte van scenario 810B (uniform terugstorten) getoond. Uit deze figuren volgt dat de effecten van de stortstrategie op de geuldiepte het grootst zijn in de oostelijke helft van de Westerschelde. Met name in macrocel 5 (zone rond *Overloop van Valkenisse;* KM-50 tot KM-60 in figuren) worden grote verschillen in geuldiepte gemodelleerd. In de oostelijke helft van het estuarium is de geuldiepte in de door het model geproduceerde morfologie sowieso kleiner. Het is dus logisch dat de relatieve impact van sedimentstortingen hier groter is. Daarbij zijn de baggervolumes door vaargeulonderhoud in deze zone het grootst (zie sectie 4.3.3).

Meer specifiek leidt het langdurig storten in diepe delen in de desbetreffende stortscenario`s in macrocellen 1-5 (KM-25 tot KM-60 in figuren) tot het opvullen van de putten, waarbij het effect in de afwaartse macrocellen uiteraard veel sterker is in scenario's 810C en 810H. In macrocel 5 (cfr. *Overloop van Valkenisse*) wordt in de hoofdgeul een verondieping tot +15 m gesimuleerd en in macrocellen 3 en 4 (cfr. *Gat van Ossenisse*) een verondieping tot +10 m. verder blijft het langsprofiel van de geuldiepte na 100 jaar morfologische ontwikkeling gelijkaardig tussen de verschillende modelsimulaties. Ook de locaties van de drempels en diepe putten veranderen niet.

Tot slot geven de modelresultaten aan dat het storten in de nevengeulen in Run 810E ook een effect heeft op de diepteligging van de hoofdgeul. In de oostelijke helft van het estuarium is in deze simulatie sprake van een sterke uitdieping die lokaal zelfs leidt tot geuldieptes die meer dan 20 m dieper zijn dan in de scenario's waarbij er in de hoofdgeul wordt gestort.



Figuur 51 - Langsprofiel van de hoofdgeul (thalweg) na 100 jaar morfologische ontwikkeling in modelsimulaties met verschillende bagger- en stortstrategieën.



Figuur 52 - Verschil in langsprofiel van de hoofdgeul (thalweg) t.o.v. Run808B (uniform storten).

Geulvolumes

Figuur 53 toont de relatieve ontwikkeling van de geulvolumes over de volledige simulatieperiode van 100 jaar voor elk van de stortscenario's ten opzichte van Run 810B (i.e., gelijkmatige verdeling van sediment / geen strategie). Er wordt hierbij een onderscheid gemaakt tussen de hoofd- en nevengeulen op basis van de polygonen in Figuur 16. Geulvolumes worden berekend als het volume onder -5 m NAP.

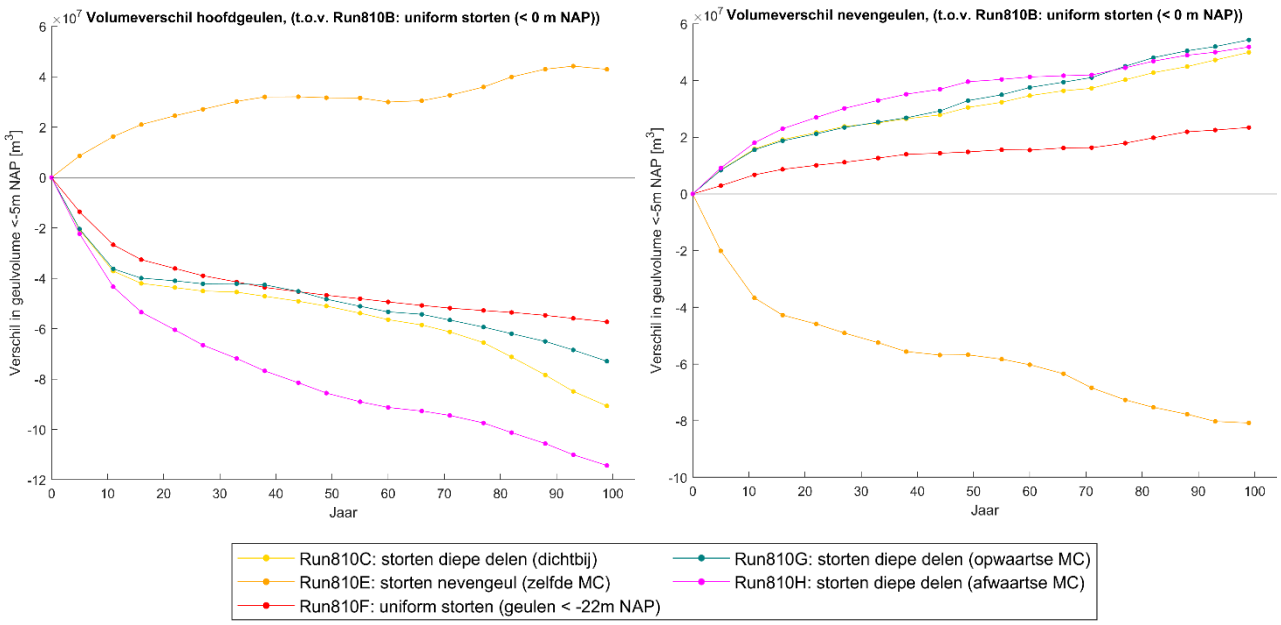
In Figuur 54 wordt de ontwikkeling van de geulvolumes getoond, maar in deze figuur wordt er een onderscheid gemaakt tussen de westelijke (MC1-4) en oostelijke helft (MC5-6) van het estuarium. Door de morfologische ontwikkeling van het geulvolume relatief ten opzichte van een referentiesimulatie te beschouwen kan de autonome morfologische ontwikkeling die in het model plaatsvindt worden verdisconteerd. Er is voor Run 810B gekozen omdat hierin sprake is van vaargeulonderhoud en massabehoud. Zo ligt de focus op het effect van de stortstrategie.

Deze figuren laten zien dat het geulvolume in de hoofdgeul geleidelijk afneemt als er langdurig in wordt gestort. Deze relatieve afname in geulvolume is het grootst in scenario 810H, waarbij er afwaarts van de baggerlocaties wordt gestort, tot ongeveer -110 Mm^3 na 100 jaar. De afname in geulvolume van de hoofdgeul is met 50-60 Mm^3 ongeveer de helft kleiner als er opwaarts van de baggerlocaties wordt gestort (Run 810G) of als er uniform over alle geulen dieper dan -22 m wordt gestort (Run 810F). In dit laatste scenario wordt overigens ook deels in de nevengeulen gestort (zie: sectie 4.3.6).

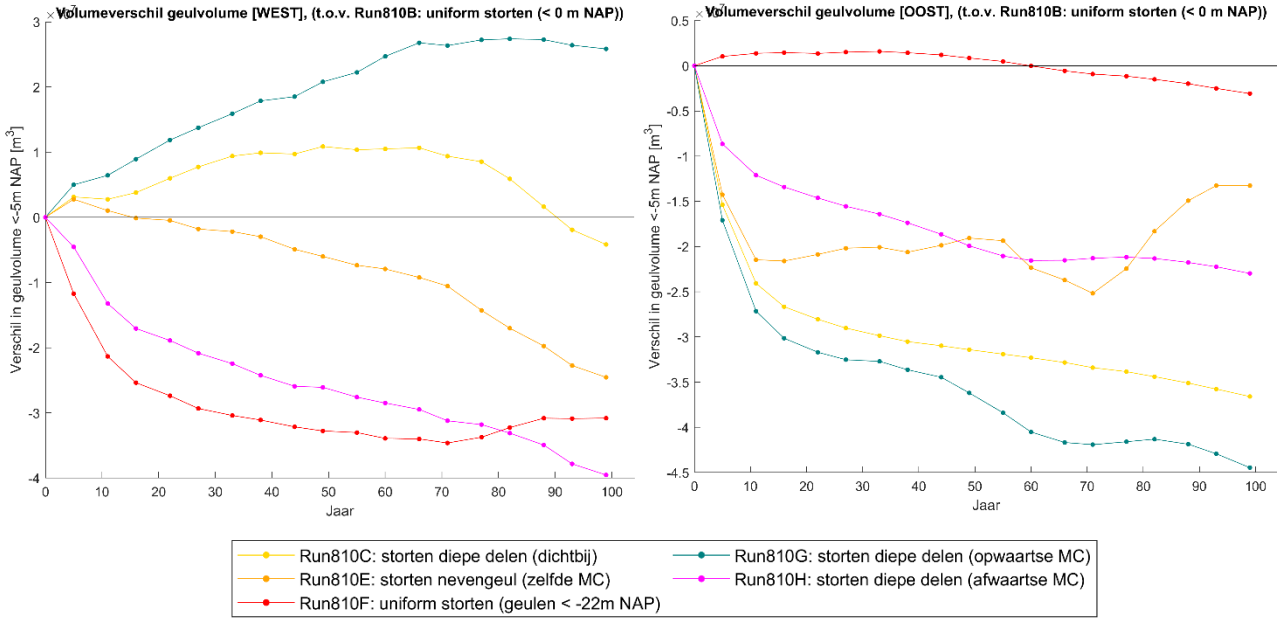
In de scenario's waarin er in de hoofdgeul wordt gestort is steeds sprake van een toename van het geulvolume in de nevengeul. De verschillen tussen de scenario's zijn echter kleiner dan voor de afname van het geulvolume in de hoofdgeul. De relatieve toename in geulvolume van de nevengeul bedraagt steeds ongeveer 60 Mm^3 na 100 jaar morfologische ontwikkeling. Simulatie 810F vormt hierop een uitzondering, waarschijnlijk omdat er in dit stortscenario ook deels in de nevengeul zelf wordt gestort.

Het modelscenario waarbij er in de nevengeulen wordt gestort (Run 810E) heeft uiteraard een omgekeerd effect. In deze simulatie is na 100 jaar morfologische ontwikkeling sprake van een relatieve afname van het totale volume van de nevengeulen van -80 Mm^3 en een relatieve toename van volume van de hoofgeulen van +40 Mm^3. De relatieve afname van het geulvolume in de nevengeul is dus groter dan de toename in de hoofdgeul.

Uit Figuur 54 blijkt verder nog dat er afhankelijk van de gekozen stortstrategie (opwaartse macrocel, afwaartse macrocel of dichtstbijzijnde macrocel) er verschillen kunnen ontstaan in de volumeontwikkeling van de geulen in de westelijke en oostelijke helft van de Westerschelde. De grootste effecten van de stortstrategie op de oost-west verdeling van de morfologische ontwikkeling worden gemodelleerd voor het scenario met opwaarts storten (Run 810G). Deze strategie leidt tot de grootste relatieve afname van het geulvolume in de oostelijke helft en de grootste relatieve toename van het geulvolume in de westelijke helft.



Figuur 53 - Verandering volume hoofdgeulen(links) en nevengeulen (rechts) in simulaties met verschillende stortstrategieën, t.o.v. Run808B als referentie.



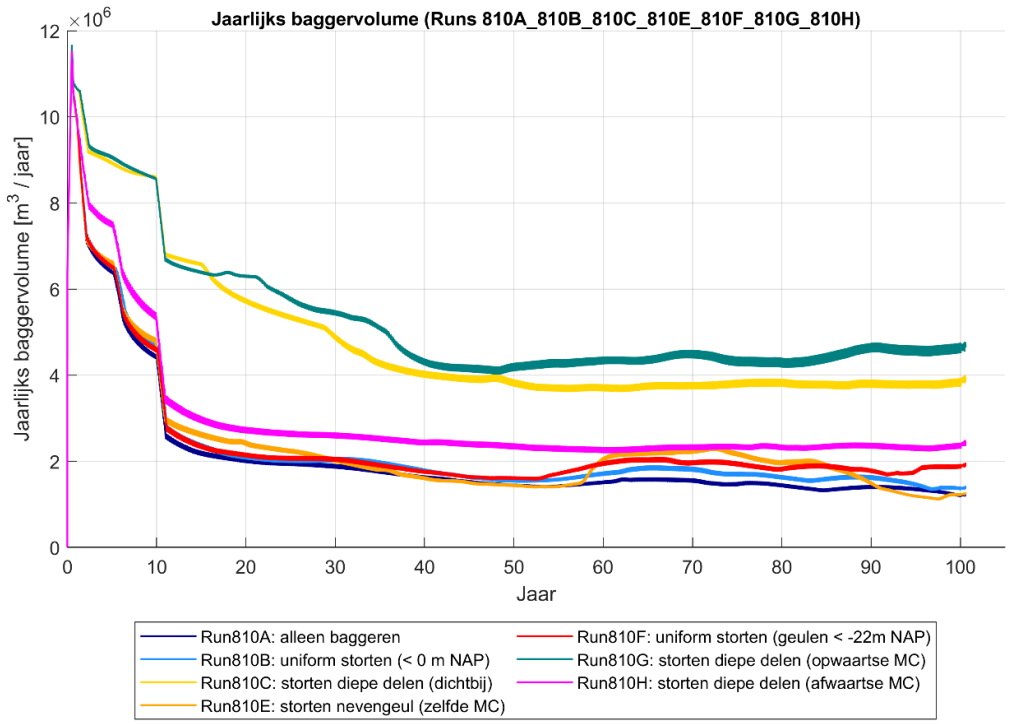
Figuur 54 - Verandering volume westelijke helft (links) en oostelijke helft (rechts) van de Westerschelde, in simulaties met verschillende stortstrategieën, t.o.v. Run808B als referentie.

4.3.3 Bagger- en storthoeveelheden

Het effect van de stortstrategie op de totale baggervolumes in de verschillende modelberekeningen is samengevat in Tabel 4 (baggervolumes uitgedrukt in Mm^3 per jaar). Hierin wordt een onderscheid gemaakt tussen de baggervolumes in de oostelijke en westelijke helft van de Westerschelde. De verdeling van de stortvolumes wordt eveneens weergegeven, waarbij een onderscheid tussen hoofd- en nevengeul wordt gemaakt en voor stortingen in de hoofdgeul ook een onderscheid tussen stortingen in de oostelijke en westelijke helft. Daarnaast toont Figuur 55 de ontwikkeling van het totale baggervolume over de tijd. In Figuur 56 wordt wederom een onderscheid gemaakt tussen de gebaggerde volumes in de westelijke en oostelijke helft van de Westerschelde.

Tabel 4 - Overzicht bagger- en stortvolumes in Westerschelde voor modelscenario's met verschillende stortstrategie.

ID	Gemiddeld baggervolume [Mm^3/jaar]			Verdeling stortvolumes [Mm^3/jaar]		
	Totaal	West	Oost	HG (west)	HG (oost)	NG
RUN810A	**2.1**	0.1	1.3	-	-	-
RUN810B	**2.3**	0.2	1.4	0.7	0.2	1.3
RUN810C	**4.7**	0.2	3.9	1.0	3.7	-
RUN810E	**2.3**	0.2	1.6	-	-	2.3
RUN810F	**2.4**	0.3	1.4	1.7	0.2	0.4
RUN810G	**5.2**	0.1	4.4	0.7	4.6	-
RUN810H	**2.9**	0.4	1.9	1.8	1.1	-



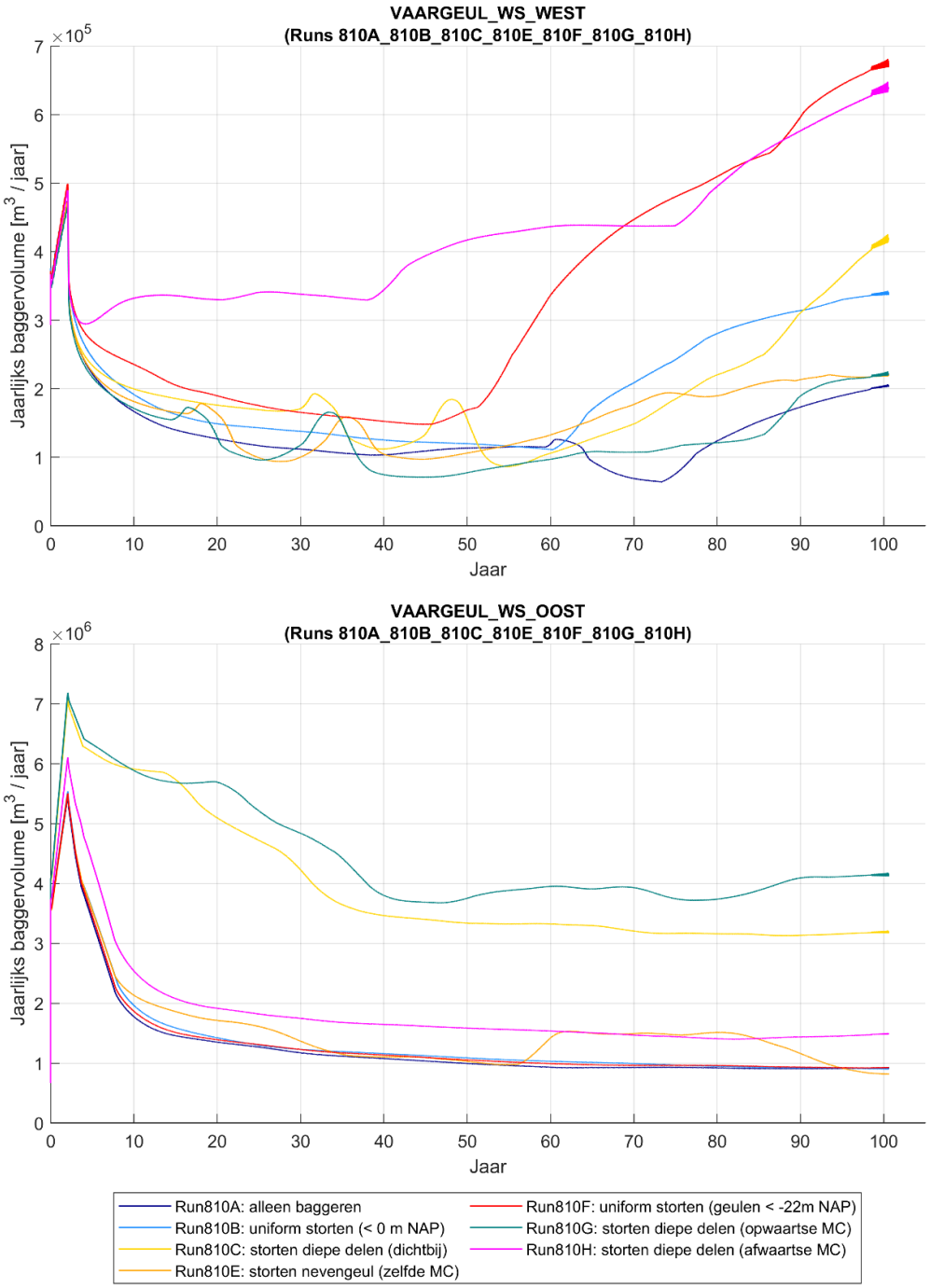
Figuur 55 - Jaarlijkse baggervolumes in simulaties met verschillende bagger- en stortstrategieën.

Afhankelijk van het geïmplementeerde stortscenario variëren de baggervolumes in de modelberekeningen ruwweg tussen de 2 - 5 Mm^3 per jaar. De jaarlijkse baggervolumes zijn verreweg het grootst in scenario's 810C en 810G. In deze stortscenario's worden grote hoeveelheden sediment in de oostelijke helft van de Westerschelde teruggestort. In de overige stortscenario's, waarbij er meer in de westelijke helft (Run 810F) of in de nevengeulen (Run 810E) wordt teruggestort, zijn de jaarlijkse baggervolumes significant kleiner. De baggervolumes zijn het kleinst bij het ruimtelijk uniform terugstorten van sediment, zowel als dit verspreid is over de geulen (Run 810F) als wanneer dit verspreid over het gehele estuarium is (Run 810B). In beide gevallen is de toename van de totale baggervolumes ten opzichte van het scenario zonder terugstorten (Run 810A met enkel vaargeulonderhoud) overigens miniem.

De vergelijking tussen de scenario's toont aan dat storten in de hoofdgeul in het oostelijke deel van het estuarium de grootste impact heeft op het baggerbezwaar. Hiervoor kunnen twee oorzaken worden gegeven. Ten eerste ligt de stortzone hier dichtbij een belangrijke baggerlocatie (i.e., in het morfologisch model wordt het meest gebaggerd in MC5 ter hoogte van de Overloop van Hansweert). Ten tweede is het netto sedimenttransport aan de opwaartse rand van de Westerschelde afwaarts gericht en is er sprake van een lager afwaarts (of zelfs licht opwaarts) transport ter hoogte van Hansweert (zie sectie 4.3.5) waardoor het sediment zich sneller ophoopt in het oostelijk deel van de hoofdgeul.

Als de ontwikkeling van de baggervolumes over de tijd wordt beschouwd valt op dat er vooral in de beginfase van de simulaties grote hoeveelheden gebaggerd worden. In deze periode wordt de vaargeulpolygoon nog op diepte gebaggerd. Na deze initiële piek blijven de totale baggerhoeveelheden in alle simulaties redelijk stabiel over de tijd. In het westelijk deel van de Westerschelde is de baggerintensiteit meer variabel over de tijd. Hier is sprake van een gestage toename van de baggervolumes in scenario's waarin (gedeeltelijk) afwaarts wordt gestort (Run 810F en Run 810H). De impact hiervan op het totale baggerbezwaar blijft echter gering. Deze impact zou groter kunnen zijn als de hoofdgeul in de westelijke helft van het estuarium verondiept als gevolg van ophoping van sediment. Ook bij een ondiepere initiële bodemligging (die dan ook dichter bij de realiteit zou liggen) zou de impact van afwaarts storten groter zijn. In de huidige simulaties zijn de absolute volumes echter nog steeds klein vanwege de grotere initiële diepteligging in dit deel van het estuarium.

Tot slot wordt opgemerkt dat de totale baggervolumes in de stortscenario's kleiner zijn dan in de realiteit. Er is afhankelijk van het stortscenario sprake van een factor 2 tot factor 4 verschil met de daadwerkelijke baggervolumes in de Westerschelde. Mogelijke oorzaken voor dit verschil zijn (1) de dieper gelegen hoofdgeul in het westelijk deel van het estuarium, waardoor de noodzaak om te baggeren hier beperkt is in de modelsimulaties en (2) het gegeven dat het model een eigen evenwicht heeft gevormd waardoor het morfologisch systeem minder dynamisch is dan in werkelijkheid.



Figuur 56 - Jaarlijkse baggervolumes in westelijke helft (boven) en oostelijke helft (onder) van de Westerschelde.

4.3.4 Invloed op hydrodynamica en getijvoortplanting

Getijslag

Het effect van de gemodelleerde morfologische veranderingen in de stortscenario's op de getijvoortplanting is ook geanalyseerd. In Figuur 57 wordt het effect van de stortstrategie op de getijslag langs de Westerschelde weergegeven, wederom ten opzichte van scenario 810B (vaargeulonderhoud en ruimtelijk uniform terugstorten). De getijslag is hier gebaseerd op de ±4 jaar in de morfologische simulaties.

In het mondingsgebied, tot KM-30 is het effect op de getijslag logischerwijs nihil. Vanaf de lijn Vlissingen-Breskens (KM-30) beginnen verschillen te ontstaan. Uiteindelijk zijn de verschillen in getijslag tussen de simulaties opwaarts aan de Belgisch-Nederlandse grens (KM-90) het grootst. In het scenario met enkel vaargeulonderhoud (zonder terugstorten) is als gevolg van de zandonttrekking sprake van een toename in getijslag oplopend tot +0,12 m. In de verschillende stortscenario's is aan de opwaartse rand van de Westerschelde steeds sprake van een reductie in getijslag. De invloed van de stortstrategie op de getijslag is het sterkst in de scenario's waarbij er in de diepe delen van de hoofdgeul wordt gestort, tot -0,15 m als er in de afwaartse macrocel wordt teruggestort. Als er in de opwaartse macrocel of in de meest dichtstbijzijnde macrocel wordt teruggestort is de reductie in getijslag met -0,13 m iets kleiner. Bovendien is het effect op de getijslag pas zichtbaar opwaarts van de intensief gebruikte stortlocaties. Zo is er in scenario 810G pas sprake van een reductie van de getijslag vanaf KM-80 (macrocel 5).

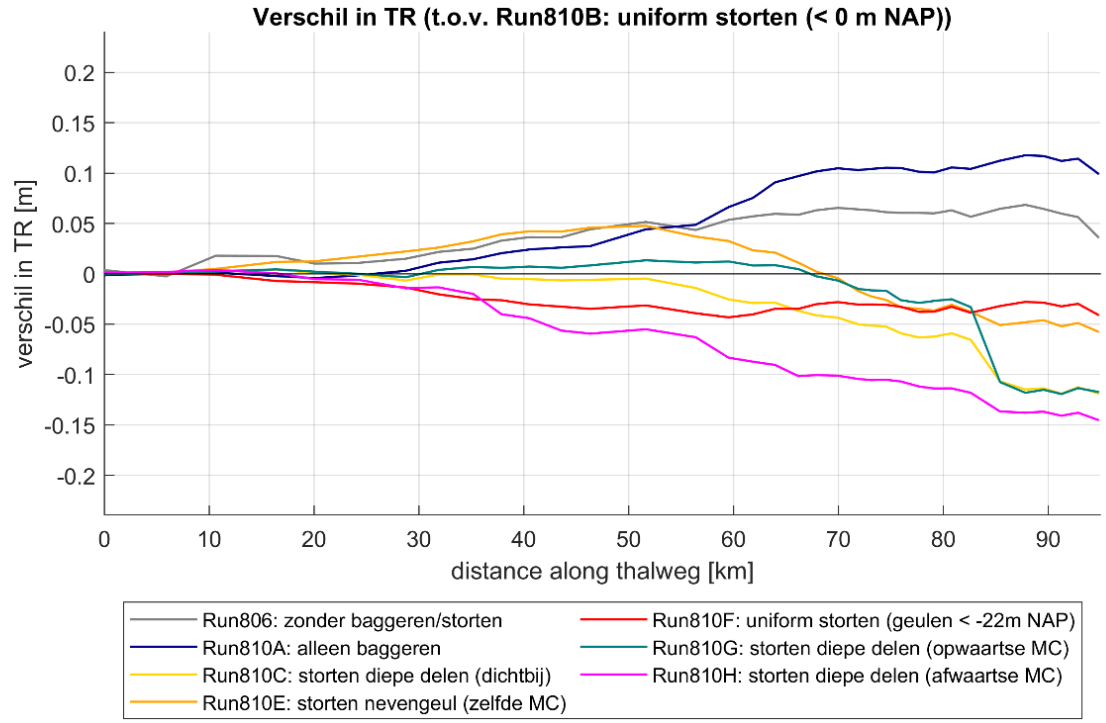
Een opvallend resultaat is dat het dempend effect op getijslag door het storten in de hoofdgeul groter is bij het storten in de afwaartse delen van de hoofdgeul, terwijl de totale baggervolumes (en stortvolumes) in deze stortscenario's het kleinst zijn (zie sectie 0).

Het stortscenario waarbij er in de nevengeul wordt teruggestort (Run 810E) geeft een opvallende ruimtelijke variatie in het effect op de getijslag. In de westelijke helft van de Westerschelde leidt het storten in de nevengeulen tot een lichte toename van de getijslag, terwijl in de oostelijke helft juist sprake is van een lichte reductie in getijslag. Dit suggereert dat in dit scenario de relatieve verdieping van de hoofdgeul in de westelijke helft dominant is over de relatieve verondieping van de nevengeul met een toename van de getij-indringing als gevolg. In de oostelijke helft is de relatieve verondieping van de nevengeul juist dominant over de relatieve verdieping van de hoofdgeul, leidend tot een reductie van de getijslag. De totale impact blijft overigens beperkt tot ±0,05 m.

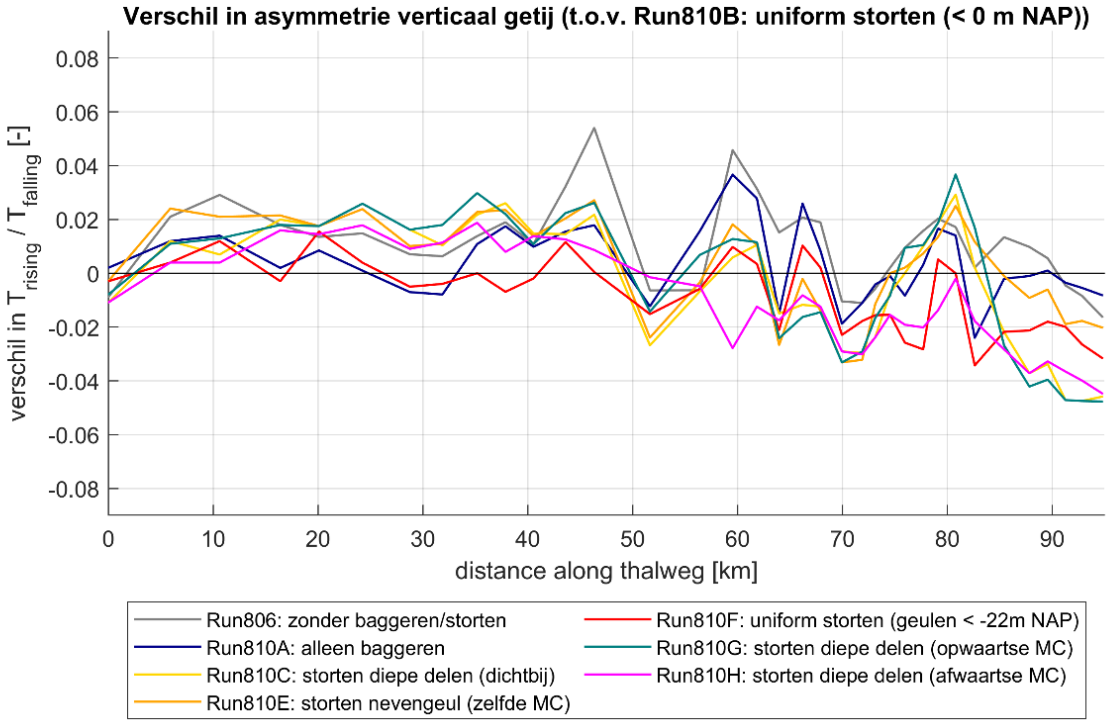
Getijasymmetrie

Naast de impact op getijslag is ook gekeken naar de impact van de morfologische veranderingen in de stortscenario's op de getij-asymmetrie. In Figuur 58 wordt het verschil in getij-asymmetrie t.o.v. scenario 810B (vaargeulonderhoud en ruimtelijk uniform terugstorten) langs de Westerschelde getoond op basis van de ratio tussen de stijgingsduur en de dalingsduur. De effecten van de stortstrategie op de verticale asymmetrie van het getij zijn ruimtelijk zeer variabel en er is geen duidelijk of ruimtelijk consistent patroon zichtbaar. De ruimtelijke variatie in getij-asymmetrie is ook groter dan de verschillen tussen de bagger- en stortscenario's. Dit geldt zowel voor de stortscenario`s als voor de scenario's met enkel vaargeulonderhoud of zonder baggeren en storten.

In de scenario's waarin er in de diepe delen van de hoofdgeul wordt gestort is richting opwaarts wel sprake van een kleine afname in de ratio $T_{stijging}/T_{daling}$, duidend op een meer vloed-dominante asymmetrie als gevolg van de verondieping van de hoofdgeul. Dit is een gekend resultaat op basis van eerdere fundamentele studies die getij-asymmetrie linken aan geuldiepte (Friedrichs & Aubrey, 1988; Speer & Aubrey, 1985) en dat ook op basis van eerdere (model)studies naar getijvoortplanting in het Schelde-estuarium werd gevonden (Stark *et al.*, 2017, 2020d; Vandenbruwaene *et al.*, 2020).



Figuur 57 - Verschil in getijslag na 100 jaar morfologische ontwikkeling in simulaties met verschillende bagger- en stortstrategieën, met Run808B als referentie.



Figuur 58 - Verschil in getijasymmetrie na 100 jaar morfologische ontwikkeling in simulaties met verschillende bagger- en stortstrategieën, met Run808B als referentie.

4.3.5 Invloed op sedimenttransport

De gemodelleerde bruto en netto sedimenttransport(capaciteit) op 4 kenmerkende locaties staat voor de stortscenario's weergegeven in Figuur 59. In Figuur 60 wordt het sedimenttransport per macrocel weergegeven, waarbij een onderscheid wordt gemaakt tussen de hoofd- en nevengeul.

De methodiek voor het bepalen van de getoonde transporten is uiteengezet in sectie 3.4.3 en is conform de *Evaluatiemethodiek Schelde-estuarium* (Stark *et al.*, 2022).

Bruto transport

De bruto sedimenttransporten blijven in alle scenario's van eenzelfde ordegrootte als in een scenario zonder baggeren en storten. Er zijn uiteraard wel verschillen tussen de scenario's, die met name in de oostelijke helft van de Westerschelde significant zijn. De verdubbeling van het sedimenttransport in de hoofdgeul van MC5 in Run 810E (storten in nevengeulen) in combinatie met de afname van het transport door de nevengeul is het meest opvallend effect. Dit stortscenario induceert in deze zone ook de grootste veranderingen in morfologie en geulvolumes. Ook leidt het terugstorten van sediment in de opwaartse macrocellen (scenario 810C en 810G) tot een toename van het sedimenttransprot aldaar. Dit duidt op een situatie waarbij (een deel van) het gestorte materiaal weer wordt uitgeruimd. Tot slot valt op dat het storten in de hoofdgeulen leidt tot een toename van het bruto transport door de nevengeul in MC5. Dit kan worden gerelateerd aan de veranderingen in morfologie, waarbij de geulvolumes van de nevengeul op lange termijn toenemen. Aan de opwaartse rand van de Westerschelde (raai grens) leiden alle simulaties met het terugstorten van sediment overigens tot een afname van het bruto sedimenttransport, wellicht gerelateerd aan een afname van de getijvoortplanting (sectie 0).

Netto of residueel transport

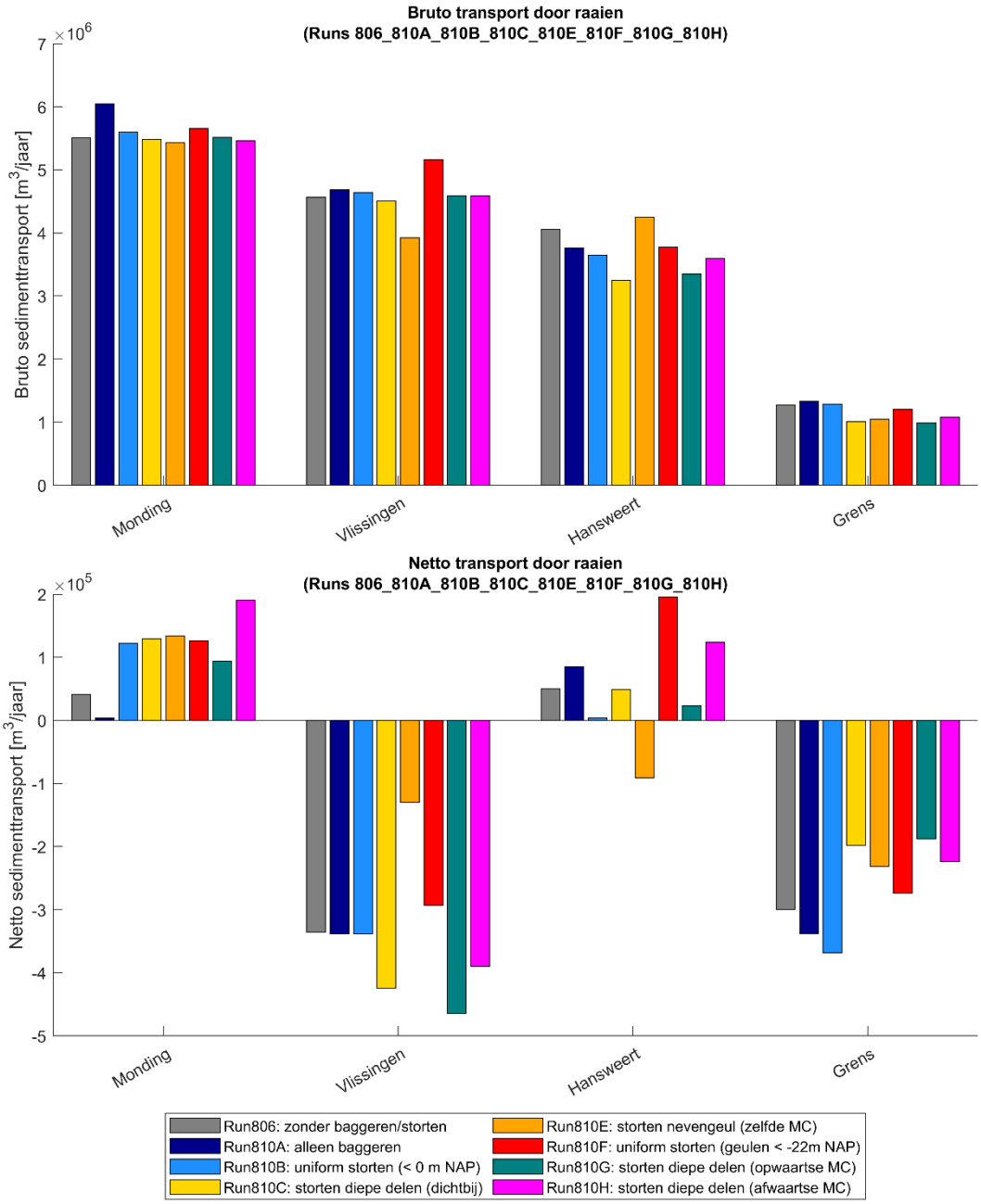
Het effect van vaargeulonderhoud en de stortstrategie op het netto of residueel sedimenttransport is beduidend groter. Op sommige locaties is zelfs sprake van een omkering van de netto transportrichting.

Aan de opwaartse en afwaartse rand van de Westerschelde blijven de residuele transportrichtingen wel hetzelfde. Er is sprake van export aan de grens en import aan de monding, hoewel het residueel transport langs de lijn Vlissingen-Breskens in alle gevallen afwaarts is gericht. Het storten in diepe delen van de hoofdgeul (Runs 810C, 810G en 810H) leidt tot een beperkte toename van deze export bij Vlissingen. Storten in de nevengeulen (Run 810E) leidt bij Vlissingen juist tot een sterke afname van de netto export door de hoofdgeul, wellicht vanwege het lokaal uitdiepen van deze hoofdgeul.

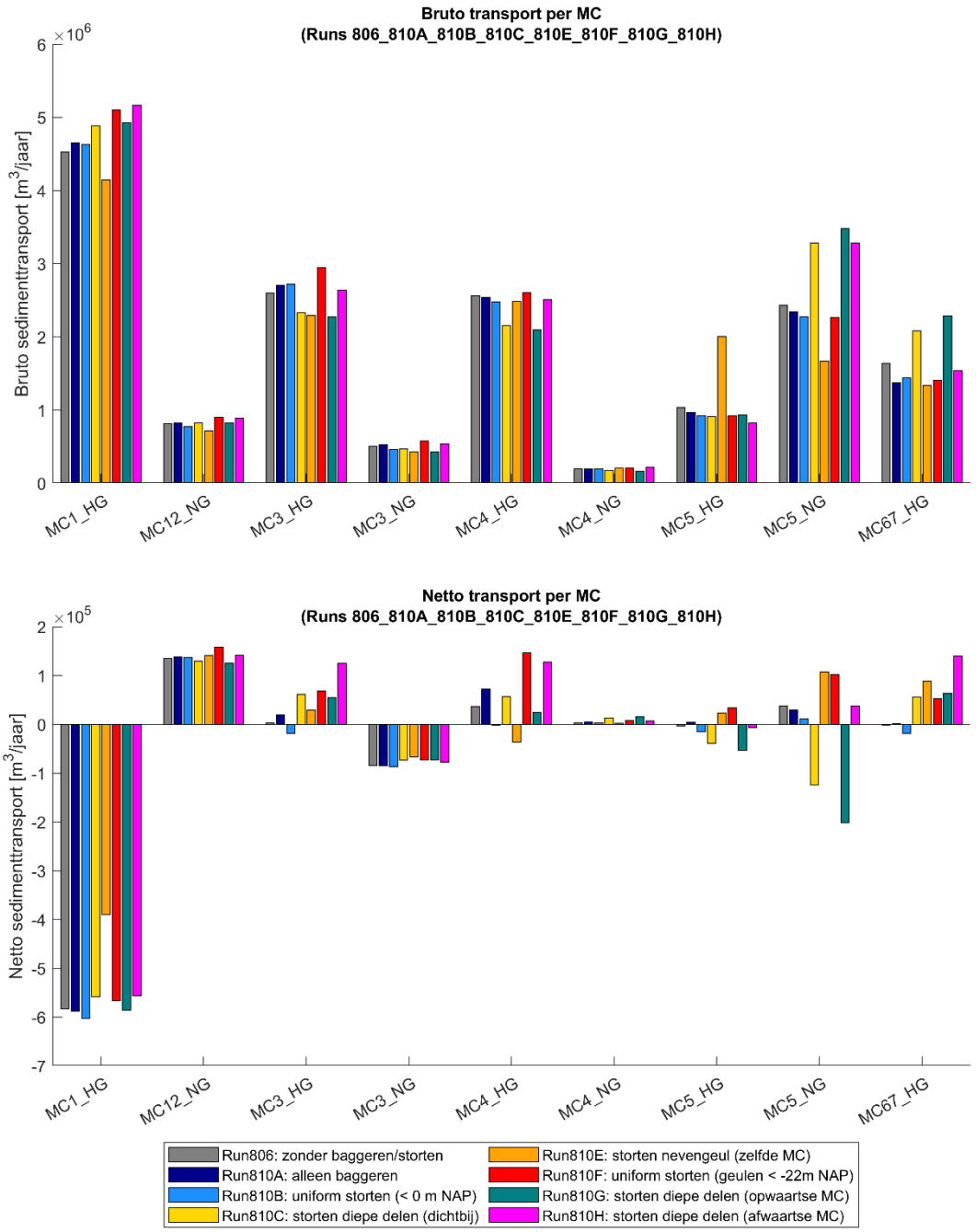
Alle stortstrategieën leiden tot een afname van het afwaarts gerichte residueel transport aan de Belgisch-Nederlandse grens. De afname in sedimentexport bij de grens (i.e., transport van Zeeschelde naar Westerschelde) kan worden gerelateerd aan een afname van ebdominantie of toename van de vloeddominantie (zie ook sectie 0) als gevolg van een verondieping van de geulen (Friedrichs & Aubrey, 1988). Opvallend is dat het ruimtelijk uniform terugstorten van sediment in Run 810B juist leidt tot een gering toename van de sedimentexport aan de grens. Een subtiele verandering van de intertidale oppervlaktes en hoogteligging vormen hierbij een mogelijke verklaring (Stark *et al.*, 2017).

In het estuarium zijn de effecten van de stortscenario's op het residueel transport meer gevarieerd. Ter hoogte van Hansweert is het residueel transport in de referentierun gering. Het storten in de nevengeulen (Run 810E) induceert bij Hansweert een duidelijk afwaarts netto transport en storten in de hoofdgeulen leidt tot een opwaarts transport, waarbij het opwaarts gerichte transport het grootst is als er voornamelijk in de macrocellen afwaarts van Hansweert wordt gestort (Run 810H).

Op macrocelniveau zijn de effecten van de stortstrategie op het residueel transport doorgaans het grootst in de hoofdgeul, met uitzondering van MC5 waar ook het storten in diepe delen van de hoofdgeul een grote impact heeft op het residueel transport in de nevengeul. Alle stortscenario's waarbij in de diepe delen van de hoofdgeul wordt gestort leiden in een zekere mate tot een toename van de netto import (of afname van de netto export) door diezelfde hoofdgeulen. Dit is een verwacht resultaat op basis van bekende relaties tussen geuldiepte en getij-asymmetrie (e.g. Friedrichs & Aubrey, 1988). MC5 vormt wederom de uitzondering, waarbij in Run 810G en 810C (storten in opwaartse macrocel of meest dichtbijgelegen macrocel) juist sprake is van een toename van de sedimentexport door de hoofdgeul.



Figuur 59 - Bruto en netto sedimenttransport op 4 locaties na 100 jaar morfologische ontwikkeling in modelsimulaties met verschillende bagger- en stortstrategieën.



Figuur 60 - Gemiddeld bruto en netto sedimenttransport per macrocel na 100 jaar morfologische ontwikkeling in modelsimulaties met verschillende bagger- en stortstrategieën.

5 Discussie en conclusies

5.1 Toepasbaarheid model

Representatie morfologie

Voor dit modelonderzoek werd een sterk geschematiseerd of geïdealiseerd morfologisch model van het Schelde-estuarium gebruikt. Dit Delft3D model werd eerder gebruikt voor onderzoek naar lange termijn morfologische processen in het mondingsgebied van het Schelde estuarium (e.g. Nnafie *et al.*, 2017b, 2018b). Er is een methodiek toegepast waarbij het model zelf een bodemligging vormt op basis van de vastgestelde geometrie, vereenvoudigde hydrodynamische randvoorwaarden (harmonisch getij en constante rivierafvoer) en de parametrisatie voor sedimenttransport. Processen zoals golfwerking, zeespiegelstijging, saliniteit of slibtransport zijn niet geïmplementeerd. Uiteindelijk is het geïdealiseerd model in staat gebleken om een herkenbaar patroon van geulen en platen in de Westerschelde, bestaande uit meerdere macrocellen, te reproduceren. In de door het morfologisch model gesimuleerde geulbodem is ook een opeenvolging van drempels en diepe putten aanwezig. Om ook in de oostelijke helft van de Westerschelde een herkenbare morfologie en een voldoende diepe overgang tussen Westerschelde en Zeeschelde te produceren zijn een aantal aanpassingen gedaan in de modelopzet ten opzichte van eerder onderzoek. Zo is het modelrooster hier nog verfijnd en is ter hoogte van het *Verdronken Land van Saeftinghe* een vaste niet-erodeerbare bodem geïmplementeerd. In tegenstelling tot eerdere studies (Dam *et al.*, 2015), bleek op andere locaties een niet-erodeerbare bodem niet noodzakelijk om een herkenbaar patroon van geulen en platen te produceren. Overigens maakt deze modelverbetering in de oostelijke helft van de Westerschelde het mogelijk om, in navolging van de eerdere modelstudie door Nnafie *et al.* (2017c), de lange termijn morfologische impact van de ontpolderingen in Perkpolder en wellicht ook van Hedwige-Prosperpolder te onderzoeken.

Bij de representatie van de morfologie kunnen wel enkele kanttekeningen worden geplaatst. Zo is de diepte van de geulen, met name in de westelijke helft van de Westerschelde, groter dan in werkelijkheid. Het ontbreken van harde (klei)lagen in de modelschematisering kan hiervoor een mogelijke verklaring zijn (Van der Vegt *et al.*, 2020). Harde lagen verhinderen immers de uitdieping van geulen. De getijvoortplanting door het estuarium is minder sterk dan in werkelijkheid. De getijslag is lager en daarmee meer conform historische (pre-1900) situaties, waarschijnlijk vanwege de ondiepe bodemligging in de sterk geschematiseerde Zeeschelde. Ook de residuele transportrichtingen zijn in het geïdealiseerd model op een aantal locaties verschillend ten opzichte van de sedimentbalans over de laatste decennia (Elias *et al.*, 2023). Hierbij wordt opgemerkt dat de sedimentbalans is opgemaakt op basis van bodemliggingen die niet zijn gebaseerd op een situatie van een quasi-evenwichtssituatie van de morfologie. Desalniettemin moeten de gevonden trends in de huidige modelstudie zorgvuldig worden geïnterpreteerd.

Representatie vaargeulonderhoud en stortstrategie

Het vaargeulonderhoud is in het morfologisch model geïmplementeerd door binnen een vaste polygoon (o.b.v. de door het model geproduceerde morfologie) een constante onderhoudsdiepte aan te geven. In de scenarioberekeningen wordt het gebaggerde sediment volgens een aantal verschillende stortstrategieën teruggeplaatst. Afhankelijk van het stortscenario bedraagt het gemiddelde baggerbezwaar in de morfologische berekeningen ongeveer 25% á 50% van het daadwerkelijke baggerbezwaar in de laatste jaren. Deze onderschatting heeft weinig invloed op de bevindingen die op basis van de scenario-analyse worden gedaan, omdat die vooral kwalitatief van aard zijn en omdat de scenarioberekeningen ten opzichte van elkaar en in een geïdealiseerde context worden beschouwd. De oorzaak voor de lagere baggervolumes wordt gezocht in de toegepaste methodiek waarbij het model zelf een morfologisch evenwicht vormt en deze door het model gevormde bodemligging als initiële conditie voor de scenarioberekeningen wordt gebruikt.

Hierdoor zijn de morfologische veranderingen in de scenarioberekeningen beperkt. Bovendien is in de referentieberekening zonder vaargeulonderhoud zelfs sprake van een geleidelijke verdieping van sommige geulsecties, met name in de westelijke helft van de Westerschelde. De diepere bodemligging van de geulen in de westelijke helft van het estuarium heeft sowieso een beperkende invloed op de absolute baggerhoeveelheden. Met betrekking tot de implementatie van de stortstrategie kan een alternatieve aanpak worden verkozen, waarbij de baggerhoeveelheden worden opgelegd. Hierdoor is de grootte van de ingreep weliswaar meer in overeenstemming met de realiteit, de verwachting is echter dat de gevonden trends in de resultaten gelijkaardig blijven.

Over de toepasbaarheid van de gebruikte modelschematisering voor de analyse van de morfologische impact van een stortstrategie wordt verder opgemerkt dat het model te grofmazig is om subtiele morfologische trends, zoals de neiging tot bochtmigratie die in de expertbeoordeling door Huisman *et al.* (2020) als potentieel effect van storten in diepe delen werd genoemd, te onderscheiden. Aan de andere kant liggen de grootschalige morfologische kenmerken in de stortscenario's juist redelijk vast door het vaargeulonderhoud. De bevindingen in deze studie moeten dus worden gebaseerd op globale verschillen in gemodelleerde volumeveranderingen in het geulsysteem (zoals de verdieping of verondieping van hoofd en nevengeulen).

Ook wordt de lange termijn ontwikkeling van de hoogteligging van intertidale platen niet in detail beschouwd omdat relevante fysische processen voor de verticale aangroei van platen in met name de oostelijke helft van het estuarium, zoals slibtransport (Dam *et al.*, 2022; Elmilady *et al.*, 2022) en vegetatie-ontwikkeling (Wang & Temmerman, 2013), niet zijn geïmplementeerd in het morfologisch model.

5.2 Effect vaargeulonderhoud en stortstrategie

Op basis van de modelberekeningen met verschillende stortscenario's kunnen enkele conclusies worden getrokken over de lange termijn effecten van de stortstrategie op de morfologie van de Westerschelde.

Impact vaargeulonderhoud

De belangrijkste conclusie met betrekking tot vaargeulonderhoud is dat een vaste ligging van de vaargeul leidt tot een verstarring van de morfologie, waarbij wordt opgemerkt dat ook in de berekeningen zonder vaargeulonderhoud al sprake is van een vrij stabiele ligging van het geul-plaatsysteem als gevolg van de laterelae begrenzing. De natuurlijke dynamiek van geulen en platen en tussen hoofd- en nevengeulen wordt nog verder beperkt door de vaargeul op een vaste positie te onderhouden. De huidige studie bevestigt daarmee de bevindingen door Röbke *et al.* (2022) op basis van morfologische berekeningen startend vanuit een geobserveerde bodemligging.

Een alternatieve strategie zou kunnen zijn om een adaptief vaargeulonderhoud toe te passen waarbij de vaargeulpolygoon mee beweegt met de morfologische ontwikkeling van de geulen. Dergelijke scenarioberekeningen zijn echter niet uitgevoerd in deze studie. Overigens is de morfologie in de uitgevoerde scenarioberekeningen sowieso al minder dynamisch vanwege de initiële bodemligging die door het model zelf is gevormd en de planimetrie (i.e., ligging vaste randen) die gedurende de gehele simulatieperiode hetzelfde blijft. In werkelijkheid is de morfologie meer dynamisch omdat er geen sprake is van een evenwichtssituatie. De morfologische respons op historische veranderingen zoals in- en ontpolderingen, verdiepingen, zeespiegelstijging, getijslag, enz. is continu gaande. Ook spelen processen zoals slibdynamiek of schorvorming een rol in de morfodynamica. Deze processen zijn nu niet beschouwd.

Impact stortstrategie

Op basis van de lange termijn berekeningen in deze studie leidt het storten in (diepe delen van) de vaargeul uiteindelijk tot een verondieping van de hoofdgeul. Hiermee bevestigt de huidige studie de verwachting die op basis van eerder modelonderzoek en een expertenbeoordeling werd uitgesproken in aanloop naar de vorige vergunningsaanvraag (Huisman *et al.*, 2020), alsmede eerdere modelresultaten die met korte termijn morfologische berekeningen werden gevonden (Stark *et al.*, 2020b; a). De verondieping van de hoofdgeul gaat in de modelsimulaties gepaard met een relatieve uitdieping van de nevengeulen. Het geulvolume van de nevengeul neemt dus toe bij systematisch storten in de hoofdgeul. De verondieping van de hoofdgeul heeft overigens ook een klein reducerend effect op de getijslag en beïnvloed ook de getij-asymmetrie, die meer vloed-dominant wordt door de relatieve verondieping. Dit laatste aspect is ook van toepassing op het residueel sedimenttransport.

Afhankelijk van de locatie van de stortingen in de hoofdgeul kan de impact van deze strategie op het baggerbezwaar groot of klein zijn. Een toename van het baggerbezwaar als gevolg van storten in diepe delen werd ook verwacht op basis van eerdere studies door Huisman *et al.* (2018, 2020). In de uitgevoerde scenario-analyse is het effect op de baggervolumes het grootst bij stortingen in de opwaartse macrocellen, waar de initiële bodemligging in het model al minder diep gelegen was. Het baggerbezwaar in de oostelijke helft van het estuarium neemt in de huidige scenario-analyse met meer dan een factor 2 toe als er opwaarts wordt gestort. Het effect van de stortlocatie op het baggerbezwaar is ook gerelateerd aan de richting van het residuele transport, welke in het model afwijkt van gevonden transportrichtingen in de sedimentbalans. Het algemene principe is dat stortingen in een opwaarts deel van de hoofdgeul leiden tot hogere baggervolumes als het residueel transport afwaarts is gericht, en vice versa. Ook is in de huidige modeloefening het afwaartse deel van de hoofdgeul dieper gelegen, waardoor er meer stortruimte is in vergelijking met de opwaartse macrocellen. Binnen een algemene strategie zoals het storten in diepe delen van de hoofdgeul dient dus rekening te worden gehouden met locatie-specifieke elementen zoals de residuele transportrichting ten opzichte van de baggerlocatie en de totale stortruimte.

Het lange termijn effect van storten in de nevengeulen is eveneens onderzocht in de scenario-analyse. Het effect van een dergelijke strategie op de geulvolumes is omgekeerd ten opzichte van storten in de hoofdgeul: namelijk een verondieping van de nevengeulen en een relatieve uitdieping van de hoofdgeulen. Afhankelijk van de zone waar deze verdere uitdieping van de hoofdgeul zich situeert leidt dit ook tot een kleine toename in getijslag. Opvallend is dat het effect van de ver(on)dieping van de hoofd- en nevengeul op de getijslag verschillend is in de oostelijke en westelijke helft van de Westerschelde. In het meergeulensysteem is de verhouding van geulvolumes tussen hoofd- en nevengeul dus van belang voor de demping of amplificatie van het getij, zoals ook in eerder onderzoek door Coen *et al.* (2019) al werd aangetoond, maar er is op basis van de huidige modelberekeningen geen generiek antwoord te geven op de vraag welke ratio in geulvolumes een dempend of amplificerend effect op getijslag heeft.

Tot slot wordt opgemerkt dat bovenstaande conclusies gebaseerd zijn op modelberekeningen waarbij 100 jaar onafgebroken dezelfde stortstrategie wordt toegepast, ongeacht de effecten van deze strategie op getijslag, sedimenttransport en morfologie. In werkelijkheid wordt een stortstrategie bijgestuurd of aangepast als er ongewenste effecten worden opgemerkt.

5.3 Aanbevelingen

Stortstrategie

Met oog op de lange termijn effecten van de stortstrategie worden op basis van de morfologische modellering in dit rapport een aantal aanbevelingen gedaan:

Om de retourstroming tussen stortlocatie en baggerlocatie te beperken wordt geadviseerd om rekening te houden met de residuele of netto transportrichting en -capaciteit bij het kiezen van geschikte stortlocaties.

Deze netto transportrichting varieert zowel longitudinaal als lateraal over de geulen en diepe putten (Huisman *et al.*, 2020; Van der Wegen *et al.*, 2021). Aanvullend onderzoek naar de ruimtelijke variatie in (netto) transportrichtingen in de geulen of binnen stortzones wordt daarom aanbevolen.

Vanwege de geleidelijke verondieping van de hoofdgeulen die in deze studie, maar ook in eerdere studies, wordt gevonden als gevolg van het storten in diepe putten, wordt aanbevolen om de morfologische effecten van deze strategie goed op te volgen. Door naast de uitruiming van de stortlocaties ook de diepteligging van omliggende geulsecties te monitoren kan tijdig worden bijgestuurd als daar aanleiding toe is. Hierbij dient wel te worden meegenomen dat de verondieping van hele geulsecties een relatief traag proces is ten opzichte van de uitruiming van individuele stortingen.

Aangezien het aanhouden van een vaste ligging van de vaargeul op basis van de morfologische modellering leidt tot verminderde morfodynamica en een verstarring van het systeem van geulen en platen wordt aanbevolen om nader onderzoek te doen naar de impact van een adaptieve ligging van de vaargeul, waarbij de vaargeul meer mee beweegt met natuurlijke morfologische ontwikkelingen. Modelmatig zou hierbij ook kunnen worden onderzocht wat de impact is van het vastleggen van een vaargeul op basis van een morfologische evenwichtssituatie ten opzichte van het vastleggen van de vaargeul in een systeem dat uit evenwicht is.

Modelverbetering

In de huidige studie is het morfologisch model toegepast dat eerder door Nnafie *et al.* (2016, 2017b; a) werd ontwikkeld. Buiten enkele aanpassingen aan de roosterresolutie en de parametrisatie van sedimenttransport is de modelschematisering gelijk gehouden aan die vorige studies. Er zijn desalniettemin modelverbeteringen denkbaar die de kwaliteit en het toepassingsgebied van het model zouden kunnen uitbreiden:

In algemene zin zou een roosterverfijning aanleiding kunnen geven tot een meer gedetailleerde representatie van morfologische kenmerken, waardoor ook kleinschalige effecten, zoals bijvoorbeeld de herverdeling van sediment tussen binnen- en buitenbochten (Huisman *et al.*, 2020), kunnen worden onderzocht. In dit kader wordt opgemerkt dat de roosterresolutie en oriëntatie van het modelrooster deels bepalend kunnen zijn voor de geulontwikkeling in morfologische modelstudies.

Een andere mogelijkheid voor modelverbetering is het verfijnen van de schematisering van de Zeeschelde. Het implementeren van een diepere vaargeul aldaar (bijvoorbeeld door het implementeren van vaargeulonderhoud of een vaste bodemligging) kan de representatie van de geobserveerde getijvoortplanting en getijasymmetrie in de oostelijke helft van de Westerschelde verbeteren.

Met oog op de representatie van de geobserveerde getijvoortplanting en residuele transportpatronen kan uiteraard geprobeerd worden om het model hierop af te regelen, bijvoorbeeld door subtiele aanpassingen aan de randvoorwaarden of andere modelinstellingen. Als de juiste verhoudingen gevonden worden voor de netto import of export van sediment kan dit helpen om geobserveerde morfologische ontwikkelingen beter te reproduceren. Dit zou echter voorbij gaan aan de gehanteerde methodiek waarbij het model zelf een evenwicht vormt.

In de huidige studie is getracht om enkel de meest dominante processen voor de globale morfologische ontwikkeling in de modelschematisering op te nemen. Deze geïdealiseerde aanpak heeft als voordeel dat de modelkalibratie beperkt is en het modelresultaat niet afhankelijk is van een veelvoud aan geïmplementeerde processen. Echter, de invloed van sommige processen, zoals de invloed van cohesief sediment, de invloed van saliniteit, de invloed van zeespiegelstijging, de invloed van vegetatieontwikkeling of de invloed van harde niet-erodeerbare lagen op de morfologische ontwikkeling zijn in de huidige modelstudie niet onderzocht. Ook de interacties van deze processen met het vaargeulonderhoud en de stortstrategie zijn dus niet gesimuleerd. Afhankelijk van de specifieke onderzoeksvraag kan het noodzakelijk zijn om één of meerdere van deze processen wel te implementeren. Hiervoor zijn in sommige gevallen wel complexere of meer gedetailleerde modellen nodig.

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 Resour. Res. 54*(*1*): 19–45. doi:10.1002/2017WR020604

Bagnold, R.A. (1966). An Approach to the Sediment Transport Problem from General Physics. *USGS Prof. Pap.* ISBN 0872626652. 37 pp.

Coen, L.; Plancke, Y.; De Maerschalck, B.; Mostaert, F. (2019). Morfologie Mesoschaal - FSK: deelrapport 2. Fysieke systeemkenmerken Schelde-estuarium. Versie 5.0. *WL Rapporten*, 14_024_2. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

Dam, G.; Poortman, S.E.; Bliek, A.J.; Plancke, Y. (2013). Long-term modeling of the impact of dredging strategies on morpho- and hydrodynamic developments in the Western Scheldt, ***in***: (2013). *20th World Dredging Congress and Exhibition 2013 (WODCON XX). The Art of Dredging. Brussels, Belgium, 3-7 June 2013*. [S.n.]. ISBN 978-1-63266-266-8. pp.739

Dam, G.; Van der Wegen, M.; Roelvink, D.; Labeur, R.; Bliek, B. (2015). Simulation of long-term morphodynamics of the Western Scheldt, ***in***: (2015). *E-proceedings of the 36th IAHR World Congress*: The Hague. pp.9

Dam, G.; van der Wegen, M.; Taal, M.; van der Spek, A. (2022). Contrasting behaviour of sand and mud in a long-term sediment budget of the Western Scheldt estuary. *Sedimentology 69*(*5*): 2267–2283. doi:10.1111/sed.12992

De Maerschalck, B.; Dijkstra, J.; Nnafie, A.; Vroom, J.; van Oyen, T.; Röbke, B.R.; van der Werf, J.; Van der Wegen, M.; van Maren, B.; Taal, M.; Vanlede, J.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2017). Modellering Belgische kustzone en Scheldemonding: deelrapport 3. Modellering van de morfologische effecten na aanleg nieuwe Geul van de Walvischstaart. Versie 3.0. *WL Rapporten*, 15_068_3. Deltares: Antwerpen

Deltares. (2018). Delft3D-FLOW, User Manual. pp.672

Elias, E.P.L.; Van Der Spek, A.J.F.; Wang, Z.B.; Cleveringa, J.; Jeuken, C.J.L.; Taal, M.; Van Der Werf, J.J. (2023). Large-scale morphological changes and sediment budget of the Western Scheldt estuary 1955-2020: the impact of large-scale sediment management. *Geol. en Mijnbouw/Netherlands J. Geosci. 102*(*1–3*). doi:10.1017/njg.2023.11

Elmilady, H.; van der Wegen, M.; Roelvink, D.; van der Spek, A. (2022). Modeling the Morphodynamic Response of Estuarine Intertidal Shoals to Sea-Level Rise. *J. Geophys. Res. Earth Surf. 127*(*1*): 1–26. doi:10.1029/2021JF006152

Engelund, F.; Hansen, E. (1967). A monograph on sediment transport in alluvial streams: Copenhagen. ISBN 9788578110796. doi:10.1017/CBO9781107415324.004

Friedrichs, C.T.; Aubrey, D.G. (1988). Non-linear Tidal Distortion in Shallow Well-Mixed Estuaries: a Synthesis. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* ISBN 0272-7714 *27*(*6784*): 521–545. doi:10.1016/0272-7714(90)90054-U

Hartsuiker, G.; van Banning, G.K.F.M. (2004). 2Dh Nevla-Scheldemodel (SCALWEST 2000 met verbeterde Belgische roosterschematisatie): bouw en afregeling stromingsmodel. Waterbouwkundig Laboratorium/Alkyon: Borgerhout

Huisman, B.; Huismans, Y.; Vroom, J. (2020). Effecten van storten in diepe putten van de Westerschelde. 43 pp.

Huisman, B.; Schrijvershof, R.A.; Lanckriet, T.; Van der Werf, J. (2018). Baggerdepositie in diepe geulen: 97

Huismans, Y.; Van der Vegt, H.; Huisman, B.; Colina Alonso, A. (2021). Westerschelde : storten in diepe putten. 99 pp.

Ikeda, S. (1984). Lateral bed-load transport on side slopes - closure. *J. Hydraul. Eng. 110*(*2*): 200–203

Kleinhans, M.G.; Van Der Vegt, M.; Leuven, J.; Braat, L.; Markies, H.; Simmelink, A.; Roosendaal, C.; Van Eijk, A.; Vrijbergen, P.; Van Maarseveen, M. (2017). Turning the tide: Comparison of tidal flow by periodic sea level fluctuation and by periodic bed tilting in scaled landscape experiments of estuaries. *Earth Surf. Dyn. 5*(*4*): 731–756. doi:10.5194/esurf-5-731-2017

Lesser, G.R. (2009). An Approach to Medium-term Coastal Morphological Modelling. Delft University of Technology. ISBN 9780415556682. 255 pp.

Nnafie, A.; De Maerschalck, B.; Vanlede, J.; Schramkowski, G.; Mostaert, F. (2018a). Morphodynamic modeling of the Scheldt estuary and its mouth: Effects of sea level rise. Version 2.. *FHR reports*, 14_094_8. Flanders Hydraulics Research: Antwerp

Nnafie, A.; De Maerschalck, B.; Vanlede, J.; Schramkowski, G.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2017a). Morphodynamic modelling of the Scheldt mouth: effects of extreme wave and wind events. Version 2.. *FHR reports*, 14_094_7. Flanders Hydraulics Research: Antwerp

Nnafie, A.; de Swart, H.; De Maerschalck, B.; Van Oyen, T.; van der Vegt, M.; van der Wegen, M. (2019). Closure of secondary basins causes channel deepening in estuaries with moderate to high friction. *Geophys. Res. Lett. 46*. Available at: https://hdl.handle.net/10.1029/2019gl084444

Nnafie, A.; van Oyen, T.; De Maerschalck, B.; Plancke, Y.; Mostaert, F. (2017b). Morphodynamic modelling of the Scheldt mouth: effects of waves. Version 3.. *FHR reports*, 14_094_6. Flanders Hydraulics Research: Antwerp

Nnafie, A.; van Oyen, T.; De Maerschalck, B.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2016). Modeling effects of geometry, initial bathymetry and sediment availability on the morphodynamic evolution of the Scheldt mouth area. version 4. *FHR reports*, 14_094_4. Flanders Hydraulics Research: Antwerp. IV, 37 pp.

Nnafie, A.; van Oyen, T.; De Maerschalck, B.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2017c). Modeling long-term morphodynamic evolution of the Scheldt estuary and its mouth area: Effects of secondary tidal basins. Version 2.. *FHR reports*, 14_094_5. Flanders Hydraulics Research: Antwerp

Nnafie, A.; Van Oyen, T.; De Maerschalck, B.; van der Vegt, M.; Van der Wegen, M. (2018b). Estuarine channel evolution in response to closure of secondary basins: An observational and morphodynamic modeling study of the Western Scheldt Estuary. *J. Geophys. Res. Surf. 123*. Available at: https://hdl.handle.net/10.1002/2017jf004364

Röbke, B.R.; Elmilady, H.; Van Der Wegen, M.; Taal, M. (2022). The long-term morphological response to sea level rise and different sediment strategies in the Western Scheldt estuary (The Netherlands)

Roelvink, J.A. (2006). Coastal morphodynamic evolution techniques. *Coast. Eng. 53*(*2–3*): 277–287. doi:10.1016/j.coastaleng.2005.10.015

Schrijver, M. (2020). Monitoring meergeulensysteem Westerschelde Monitoring meergeulensysteem Westerschelde. 1–94 pp.

Speer, P.E.; Aubrey, D.G. (1985). A study of non-linear tidal propagation in shallow inlet/estuarine systems Part II: Theory. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* ISBN 0272-7714 *21*(*2*): 207–224. doi:10.1016/0272-7714(85)90097-6

Stark, J.; De Maerschalck, B.; Plancke, Y.; Meire, D. (2022). Evaluatiemethodiek Sedimenttransportcapaciteit: deelrapport 1. Methodiek. Versie 3.0. *WL Rapporten*, 21_106_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

Stark, J.; De Maerschalck, B.; Plancke, Y.; Mostaert, F. (2020a). 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. Versie 3.0.

WL Rapporten, 17_088_3. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

Stark, J.; De Maerschalck, B.; Plancke, Y.; Mostaert, F. (2020b). 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.

Stark, J.; De Maerschalck, B.; Plancke, Y.; Mostaert, F. (2020c). Agenda v/d Toekomst – Sedimenttransport op verschillende tijdschalen: scenario's stortingen diepe delen. Versie 2.2. *WL Rapporten*, 17_088_12. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

Stark, J.; Smolders, S.; Meire, P.; Temmerman, S. (2017). Impact of intertidal area characteristics on estuarine tidal hydrodynamics: A modelling study for the Scheldt Estuary. *Estuar. Coast. Shelf Sci. 198*: 138–155. Available at: https://hdl.handle.net/10.1016/j.ecss.2017.09.004

Stark, J.; Smolders, S.; Vandenbruwaene, W.; Mostaert, F. (2020d). Agenda for the Future – Historical evolution of tides and morphology in the Scheldt Estuary: Sub report 4. Hydrodynamic modelling of morphological scenarios. Version 3.. *FHR reports*, 14_147_4. Flanders Hydraulics Research: Antwerp.

Swinkels, C.M.; Jeuken, C.M.C.J.L.; Wang, Z.B.; Nicholls, R.J. (2009). Presence of connecting channels in the western scheldt estuary. *J. Coast. Res. 25*(*3*): 627–640. doi:10.2112/06-0719.1

Van der Vegt, H.; Mastbergen, D.; Van der Werf, J. (2020). Moeilijk-erodeerbare lagen in de Westerschelde. 57 pp.

Van der Wegen, M.; Roelvink, J.A. (2012). Reproduction of estuarine bathymetry by means of a process-based model: Western Scheldt case study, the Netherlands. *Geomorphology*. ISBN 0169-555X *179*: 152–167. doi:10.1016/j.geomorph.2012.08.007

Van der Wegen, M.; Schrijvershof, R.; Colina Alonso, A.; Broekema, Y.; Kranenburg, W.; Huisman, B. (2021). Hydrodynamics in the pits of Borssele and Hansweert. 37 pp.

Van Dijk, W.M.; Cox, J.R.; Leuven, J.R.F.W.; Cleveringa, J.; Taal, M.; Hiatt, M.R.; Sonke, W.; Verbeek, K.; Speckmann, B.; Kleinhans, M.G. (2021). The vulnerability of tidal flats and multi-channel estuaries to dredging and disposal. *Anthr. Coasts 4*(*1*): 36–60. doi:10.1139/anc-2020-0006

Van Dijk, W.M.; Hiatt, M.R.; Van der Werf, J.J.; Kleinhans, M.G. (2019). Effects of shoal margin collapses on the morphodynamics of a sandy estuary. *J. Geophys. Res. - Earth Surf. 124*. doi:10.1029/2018jf004763

Van Rijn, L.C. (1993). Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas. Aqua Publications: Amsterdam. ISBN 9080035629

Van Rijn, L.C. (2007). Unified View of Sediment Transport by Currents and Waves. I: Initiation of Motion, Bed Roughness, and Bed-Load. *J. Hydraul. Eng. 133*(*6*): 649–667

Vandenbruwaene, W.; Stark, J.; Plancke, Y.; Mostaert, F. (2020). Agenda voor de Toekomst – Historische evolutie getij en morfologie Schelde estuarium: deelrapport 5. Synthese. Versie 4.0. *WL Rapporten*, 14_147_5. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

Wang, C.; Temmerman, S. (2013). Does biogeomorphic feedback lead to abrupt shifts between alternative landscape states?: An empirical study on intertidal fl ats and marshes. *J. Geophys. Res. 118*: 229–240. doi:10.1029/2012JF002474

Wang, Z.B.; Vandenbruwaene, W.; Taal, M.; Winterwerp, H. (2019). Amplification and deformation of tidal wave in the Upper Scheldt Estuary. *Ocean Dyn. 69*(*7*): 829–839. doi:10.1007/s10236-019-01281-3

Winterwerp, J.C.; Jeuken, M.C.J.L.; Van Helvert, M.; Kuijper, C.; Van der Spek, A.J.F.; Stive, M.; Thoolen, P.M.C.; Wang, Z.B. (2000). Lange Termijnvisie Schelde-estuarium cluster morfologie. Uitvoeringsfase. Deel 1: hoofdrapport: Delft

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