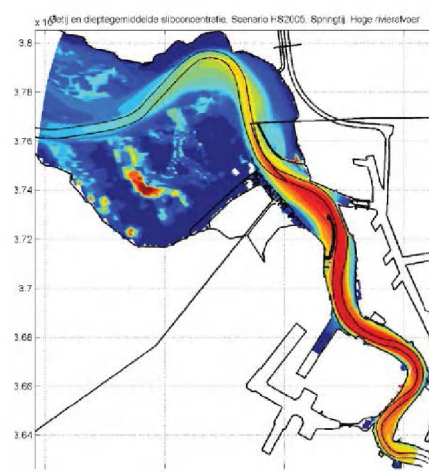


Instandhouding vaarpassen Schelde Milieuvergunningen terugstorten baggerspecie



LTV – Veiligheid en Toegankelijkheid

Simulatie met effectanalyse op mesoschaal

Basisrapport kleinschalige ontwikkeling K-20

01 oktober 2013

Colofon

International Marine & Dredging Consultants

Adres: Coveliersstraat 15, 2600 Antwerpen, België

Telefoon: + 32 3 270 92 95

Fax: + 32 3 235 67 11

Email: info@imdc.be

Website: www.imdc.be

Deltares

Adres: Rotterdamseweg 185, 2600 MH Delft, Nederland

Telefoon: + 31 (0)88 335 8273

Fax: +31 (0)88 335 8582

Email: info@deltares.nl

Website: www.deltares.nl

Svašek Hydraulics BV

Adres: Schiehaven 13G, 3024 EC Rotterdam, Nederland

Telefoon: +31 10 467 13 61

Fax: +31 10 467 45 59

Email: info@svasek.com

Website: www.svasek.com

ARCADIS Nederland BV

Adres: Nieuwe Stationsstraat 10, 6811 KS Amhem, Nederland

Telefoon: +31 (0)26 377 89 11

Fax: +31 (0)26 377 85 60

Email: info@arcadis.nl

Website: www.arcadis.nl

Document Identificatie

Titel	Simulatie met effectanalyse op mesoschaal
Project	Instandhouding vaarpassen Schelde Milieuvergunningen terugstorten baggerspecie
Opdrachtgever	Afdeling Maritieme Toegang - Tavernierkaai 3 - 2000 Antwerpen
Bestek nummer	16EF/2010/14
Documentref	I/RA/11387/13.095/GVH,
Documentnaam	K:\PROJECTS\11\11387 - Instandhouding Vaarpassen Schelde\10-Rap\Op te leveren rapporten\Oplevering 2013.10.01\werkdocumenten\K-20 - Simulaties met effectenanalyse op mesoschaal_v2.0.docx

Revisies / Goedkeuring

Versie	Datum	Omschrijving	Auteur	Nazicht	Goedgekeurd
1.0	31/3/2013	Klaar voor revisie	P.J. Menninga MSc G. Dam	B. Grasmeijer M Taal	B. Grasmeijer
2.0	01/10/2013	Finaal	P.J. Menninga MSc G. Dam	B. Grasmeijer M Taal	B. Grasmeijer

Verdeellijst

1	Analoog	Youri Meersschaut
1	Digitaal	Youri Meersschaut

SIMULATIES V&T MET EFFECTANALYSE OP MESOSCHAAL

PROJECT LTV VEILIGHEID EN TOEGANKELIJKHEID; LTV
V&T-RAPPORT K-20

11 september 2013
077010281:0.1 - Definitief
C04021.002666.0100

Inhoud

1	Inleiding	3
2	Model beschrijving	5
2.1	Inleiding	5
2.2	Delft3D	5
2.2.1	Rekenroosters	5
2.2.2	Bodem en bodemsamenstelling	6
2.2.3	Stromingsrandvoorwaarden	6
2.3	Finel2d	8
2.3.1	Roosterinstellingen	8
2.3.2	Modelbodem	8
2.3.3	Waterbeweging	9
2.3.4	Overige modelinstellingen	9
3	Onderzoek kortsluitgeulen	10
3.1	Inleiding	10
3.2	Methode	11
3.3	Resultaten	13
3.3.1	Scenario 1: Referentie	13
3.3.2	Scenario 2: Gedempte kortsluitgeul	14
3.3.3	Scenario 3: Gedempte kortsluitgeul, uitgediept Middelgat	18
3.3.4	Scenario 4: Extra kortsluitgeul Rug van baarland	21
3.3.5	Scenario 5: Verlaagde Molenplaat en Rug van Baarland	23
3.3.6	Scenario 6: Kortsluitgeul door de Plaat van Walsoorden	26
3.4	Conclusies	28
4	Onderzoek nevengeulen	30
5	Onderzoek putten	31
5.1	Inleiding	31
5.2	Methode	31
5.3	Inspelen	32
5.3.1	Bodemligging	32
5.3.2	Resultaten: Waterstanden	33
5.3.3	Resultaten: Stromingen	33
5.3.4	Resultaten: verticaal snelheidsprofiel	34
5.3.5	Resultaten: 3d effecten	35
5.3.6	Resultaten: Verschil bodemligging	36
5.3.7	Bodemschuifspanning	37
5.4	Opvullen diepe put	38
5.4.1	Bodemligging	38
5.4.2	Resultaten: Waterstanden	39
5.4.3	Resultaten: Stromingen	40
5.4.4	Sedimentatie/ erosie	42

5.5	Conclusies	47
6	Simulaties opvullen diepe delen Westerschelde	48
6.1	Inleiding	48
6.2	Methode	48
6.3	Bodemcriteria	48
6.4	Scenario's	51
6.5	Resultaten	54
6.5.1	getijslag	54
6.5.2	getijcomponenten.....	57
6.5.3	fase	60
6.6	Discussie/ conclusie	62
7	Historische ingrepen, systematisch effectonderzoek	63
7.1	Inleiding	63
7.2	Resultaten	63
7.2.1	Scenario t0 (referentie)	63
7.2.2	Scenario T1 (zandwinning bij Plaat van Ossensisse)	64
7.2.3	Scenario T2 (zandwinning bij Plaat van Valkenisse)	71
7.3	Scenario T3 (Onderhoud Drempel van Bath).....	73
7.4	Scenario T4 (Leidammen)	75
7.5	Scenario T5 (Onderhoud Drempel van Hansweert)	77
7.6	Conclusies	80
8	Referenties	81
Bijlage 1	Morfologisch effect leidammen Antwerpen	82
Colofon		102

1

Inleiding

Binnen het onderzoek van LTV O&M, in het programma gericht op Veiligheid & Toegankelijkheid (lopend van maart 2011 tot maart 2013) zijn modelsimulaties uitgevoerd waarbij gekeken is naar de effecten op de kleinere ruimteschalen (meso- en macroschaal) van historische en toekomstige ingrepen in het Schelde-estuarium. Dit rapport geeft hiervan verslag. Er is gekeken naar de effecten op de hydro,- en morfodynamica. Het doel van de simulaties is tweeledig. De resultaten worden ten eerste gebruikt om een beter begrip te krijgen van de systeemwerking van het estuarium. Daarnaast wordt verkend in welke mate het mogelijk is om het functioneren van het estuarium op macro- en mesoschaal te verbeteren met specifiek daarop gerichte ingrepen.

Er is gewerkt met schematisaties die zijn gebaseerd op software van Delft3D en Finel2D. Beide daarmee verkregen modellen zijn in staat om de hydro, - en morfodynamica van het Schelde-estuarium natuurgetrouw te simuleren. De opzet, achtergrond, kalibratie en presetaties van het gebruikte model zijn al beschreven in LTV V&T-rapport A-26 en LTV V&T-rapport A-27 (Consortium Deltares-IMDC- Svašek-Arcadis, 2013). Met het Delft3D model zijn de effecten van aanpassingen in de configuratie van drie morfologische systemen onderzocht, namelijk kortsluitgeulen (verslaglegging in hoofdstuk 3), nevengeulen (hoofdstuk 4), diepe 'putten' (hoofdstuk 5). In het verlengde van hoofdstuk 5 is in hoofdstuk 6 het opvullen van diepe delen onderzocht. Hier is niet alleen gekeken naar de diepe putten, maar ook naar diepere delen in de hoofd,- en nevengeulen. Met het Finel2D model is bestudeerd wat de eigenstandige effecten zijn geweest van meerdere historische ingrepen op de morfologie, debieten en getijslag (hoofdstuk 7).

- Kortsluitgeulen vormen een verbinding tussen hoofdgeul en nevengeul. Er wordt, zowel vanuit morfologisch als ecologisch oogpunt, belang gehecht aan de aanwezigheid van kortsluitgeulen in het meergeulenstelsel. De aanwezigheid en de verplaatsing van kortsluitgeulen is een kenmerkend element van de morfodynamiek van de Westerschelde. Het ondiepe water van de kortsluitgeulen is een belangrijk habitat. Ook betekent de aanwezigheid van kortsluitgeulen platen dat de waterlijn langs de platen langer wordt. Langs de waterlijn foerageren vogels (steltlopers) en een langere waterlijn betekent dat de foerageermogelijkheden toenemen. De laatste decennia zijn echter kortsluitgeulen verdwenen, terwijl er vrijwel geen nieuwe ontstonden LTV V&T-rapport K-16 (Consortium Deltares-IMDC- Svašek-Arcadis, 2013). Met een Delft3D-model is onderzoek gedaan naar de dynamica van de kortsluitgeulen en de voorwaarden voor het ontstaan van nieuwe kortsluitgeulen.
- Nevengeulen kunnen wellicht beter gebruikt worden voor het scheiden van verkeersstromen van de scheepvaart. Hiervoor moeten dan wel een aantal drempels op diepte worden gebracht en onderhouden. De modelonderzoeken hiervoor zijn al in een ander rapport van het programma Veiligheid & Toegankelijkheid beschreven, namelijk in LTV V&T-rapport B-24 (Consortium Deltares-IMDC- Svašek-Arcadis, 2013). Hier worden de conclusies herhaald.

- Putten zijn locaties in het estuarium waar de diepte lokaal sterk toeneemt, om vervolgens weer sterk af te nemen. Er kunnen dieptes optreden van -30 m tot zelfs -50 m t.o.v. NAP. De hoofdgeul heeft over het algemeen een diepte van ongeveer -20 m NAP. Door de relatief grote diepte, bieden deze putten een potentieel groot reservoir voor het storten van baggerspecie. Echter, door de betrekkelijk grote bodemgradiënten kunnen er turbulente stromingen ontstaan. Hierdoor wordt de verspreide baggerspecie betrekkelijk snel weer opgewoeld en uit de put getransporteerd. Dit proces is met een numeriek model gebaseerd op Delft3D onderzocht. Er is één geschikte put gekozen, die vervolgens in de schematisatie is opgevuld met sediment, om daarna de morfologische ontwikkeling te bestuderen.
- De studie naar het opvullen van de diepe delen in de Westerschelde is verricht in het kader van het reduceren van de getijslag. Hoewel er verscheidene theoretische mogelijkheden zijn om de getijslag te reduceren, geeft dit rapport een beeld van de mogelijkheden waarbij enkel een morfologische oplossing is beschouwd.
- De effecten van al bestaande ingrepen zijn systematisch onderzocht met een model gebaseerd op Finel2D. Het gaat om zandwinning, op twee locaties (Plaat van Ossenis, Plaat van Valkenisse) individuele verdiepingen (Drempel bij Bath en Drempel van Hansweert) en om de aanleg van de Leidammen nabij de Vlaams-Nederlandse grens. Het effect van de Leidammen is ook nog uitgebreider bestudeerd, met een simulatie over nog langere tijdsperiode. Deze staat beschreven in de bijlage.

Dit rapport vervolgt eerst met een korte beschrijving van de gebruikte modellen in hoofdstuk 2. Dit hoofdstuk is in feite een samenvatting van LTV V&T-rapporten A-26 en A-27.

2

Model beschrijving

2.1 INLEIDING

Dit hoofdstuk beschrijft de basis opzet en instellingen van het gebruikte Deflt3D en Finel2D model. Dit hoofdstuk is gebaseerd op de LTV V&T-rapporten A-26 en A-27.

Voor het vervolg van het rapport zal steeds vanuit deze basis instellingen worden gewerkt. Eventuele aanpassingen specifiek voor een bepaalde situatie zullen worden beschreven in het betreffende hoofdstuk.

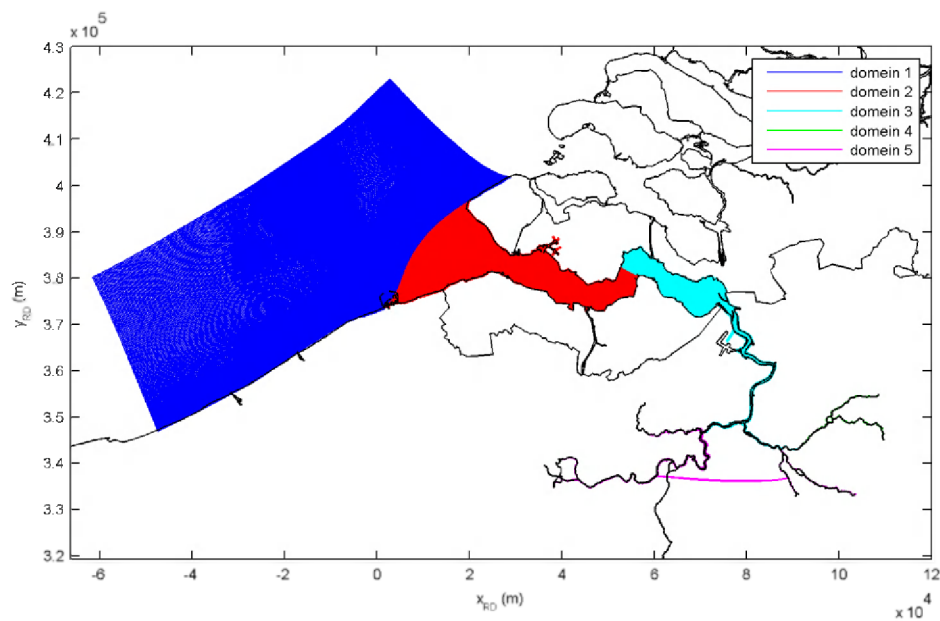
2.2 DELFT3D

2.2.1 REKENROOSTERS

Door de combinatie van de grootte van het gebied en de gewenste resolutie, vergt het model relatief veel rekenkracht. De rekensnelheid is daarom geoptimaliseerd door middel van domeindecompositie. Hierbij is het totale rekenrooster opgedeeld in domeinen, waarbij er naar is gestreefd om het aantal rekencellen per domein zo gelijk mogelijk te houden. Uiteindelijk is er voor gekozen om te rekenen met vijf domeinen:

- Domein 1: het zeegebied
- Domein 2: de Westerschelde van de lijn Zeebrugge-Westkapelle tot Hoedekenskerke
- Domein 3: de rest van de Westerschelde, de Zeeschelde tot Tielrode, de Rupel en de Nete tot Ter Elst
- Domein 4: de Nete bovenstrooms van Ter Elst, de Kleine Nete en de Grote Nete
- Domein 5: de Durme, de Zeeschelde stroomopwaarts van Tielrode, de Zenne en de Dijle

Figuur 2.1 toont verdeling van de domeinen. De ‘verbinding’ tussen de Zeeschelde en de Zenne is aangebracht om de twee deelroosters van domein 5 als één domein te kunnen laten werken. In de berekeningen is deze middels droge punten dichtgezet, zodat er geen wateruitwisseling is via deze verbinding.



Figuur 2.1: Rekenroosters van het Delft3D model

2.2.2 BODEM EN BODEMSAMENSTELLING

Het model gaat uit van de bodemligging van 2011. Dit is de meest recent ingemeten bodem die bekend was bij de start van het onderzoek. Als sediment gebruikt het model enkel zand. Dit is een reële aanname, aangezien het sediment in de Westerschelde en de Zeeschelde in de geulen en op de platen voor minder dan 10% uit slib bestaat. Daarnaast wordt voor het hele gebied uitgegaan van een uniforme korrelgrootte van $D_{50} = 200 \mu\text{m}$, met een specifieke dichtheid van 2650 kg/m^3 en een droge dichtheid van 1600 kg/m^3 . Verder bestaat de bodem van het model uit erodeerbare en niet-erodeerbare lagen. Deze zijn beschreven in LTV V&T-rapport A-28. De dikte van de sedimentlaag die beschikbaar is voor erosie, wordt bepaald door het hoogteverschil tussen de ligging van de niet-erodeerbare laag en het bodemniveau. Met andere woorden, wanneer de niet-erodeerbare laag en het bodemniveau dezelfde ligging hebben, is er geen sediment beschikbaar voor erosie. Voor het model dat is gebruikt in dit rapport is de werkelijke dikte van de sedimentlaag uit 2011 geschematiseerd.

Aangezien in werkelijkheid het estuarium bevaarbaar wordt gehouden door middel van baggeringrepen, is een schematisatie van het baggeren ook vereist in het model. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de *dredge & dumping* (dad) module in Delft3D. Binnen deze module kunnen polygonen opgegeven worden waarbinnen een vereiste diepte wordt opgegeven. Wordt het ondieper dan deze diepte, dan wordt het overtollige sediment weggebaggerd en herverdeeld over door de gebruiker aangegeven locaties binnen het model domein. In de berekeningen wordt uitgegaan van de ligging van de bagger- en stortpolygonen uit 2011. Ook voor de baggerdieptes en de herverdelingssleutels wordt uitgegaan van de informatie uit 2011.

2.2.3 STROMINGSRANDVOORWAARDEN

De randvoorwaarden aan de open zee rand zijn bepaald door het uitvoeren van de volgende modellentrein:

- Continental Shelf Model (CSM)
- Zuidelijke Noordzeemodel (Zuno)
- Nederlands Vlaams model van de Schelde (NEVLA)

Het Continental Shelf Model (of CSM) omvat het continentaal plat van 48 graden noord tot 62.25 graden noord en van 12 graden west tot 13 graden oost. In het zuiden ligt de begrenzing ter hoogte van Brest in Frankrijk en in het noorden ter hoogte van Ålesund in Noorwegen. De oostelijke grens ligt ter hoogte van Kopenhagen (in Denemarken) en Malmö in Zweden.

Het Zuidelijke Noordzee (of Zuno) model omvat de zuidelijke Noordzee en Het Kanaal, begrensd door de lijnen Aberdeen (Groot-Brittannië) - Hanstholm (Denemarken) in het noorden en Bournemouth (Groot-Brittannië) - Cherbourg (Frankrijk) in het zuid-westen.

Vanuit deze stromingsmodellen wordt één springtij-doodtij cyclus afgeleid, die vervolgens wordt opgelegd op de zeeranden van het model. Met een morfologische acceleratiefactor van 24.75 is dit representatief voor de morfologische ontwikkeling na één jaar. Door vervolgens het model telkens opnieuw op te starten vanuit de hydrodynamische en morfologische condities aan het einde van de voorgaande simulatie, kan de morfologische ontwikkeling over meerdere jaren worden berekend. Zowel de bodem als de waterbeweging is voldoende ingespeeld na één springtij-doodtij cyclus. Het model wordt bovenstrooms op de rivieren aangedreven met gemiddelde debieten van de rivieren (op basis van meetgegevens).

De overige model instellingen worden gegeven in Tabel 2.1.

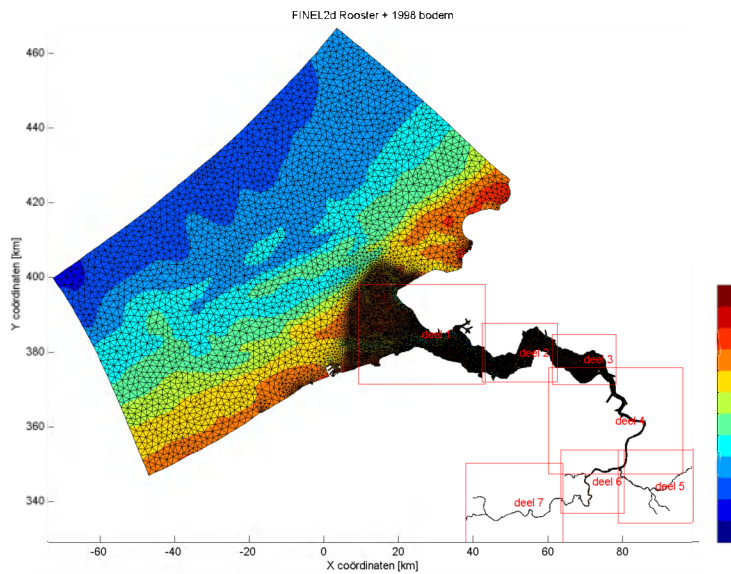
Parameter	Instelling
Roughness	
Roughness formula	Manning
Roughness value	Ruimtelijk variërend van 0.025 m tot 0.017
Wall roughness slip condition	Free
Viscosity	
Horizontal eddy viscosity	1 m ² /s
Horizontal eddy diffusivity	1 m ² /s
Sediment	
Sediment transport model	Van Rijn (2007)
Morphology	
Update bathymetry during flow simulation	True
Include effect of sediment on fluid density	False
Equilibrium sand conc. profile at inflow boundaries	True
Morphological scale factor	24.75
Van Rijn's reference height factor	1
Threshold sediment thickness	0,05 m
Factor for erosion of adjacent cells	0
Current-related reference concentration factor	0,5
Current-related transport vector magnitude factor	0,5
Transverse bed gradient factor α_{bn}	100
Streamwise bed gradient factor α_{bs}	1

Tabel 2.1: Modelinstellingen Delft3D model

2.3 FINEL2D

2.3.1 ROOSTERINSTELLINGEN

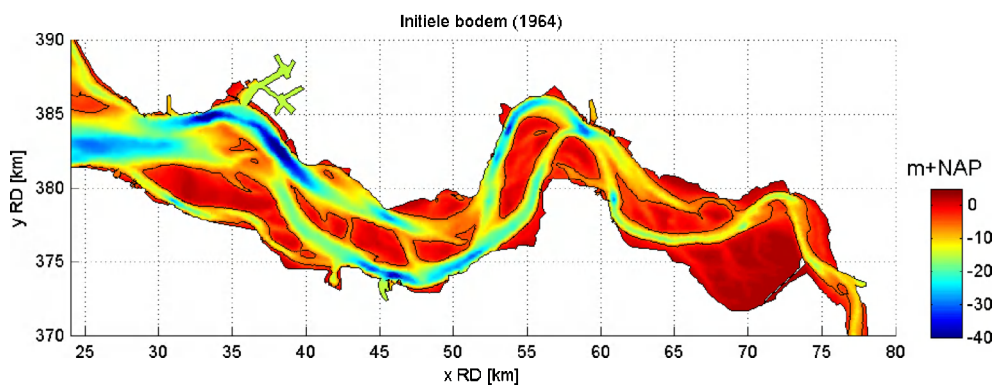
Het rooster van het Finel2D model is gepresenteerd in Figuur 2.2. Dit rooster heeft 52840 roostercellen, met een typische roosterafstand van 120x130m in de Westerschelde. De rekentijd is gereduceerd door het model te paralleliseren.



Figuur 2.2: Finel2D rekenrooster en 1998 bodem. (uit Svašek Hydraulics, 2012)

2.3.2 MODELBODEM

De initiële modelbodem die in deze studie is toegepast bestaat voor het grootste deel uit een 20x20 m² GIS bodem van de Westerschelde uit 1964 (Rijkswaterstaat Zeeland), aangevuld met een 20x20 m² GIS bodem van de Westerschelde uit 1963 en een bathymetrie van de Zeeschelde uit 1960. De initiële modelbodem is weergegeven in Figuur 2.3. In de figuur is de NAP -5 m contourlijn opgenomen.



Figuur 2.3: Initiële modelbodem van de Westerschelde in 1964. In de figuur is de NAP -5 m contourlijn opgenomen.

2.3.3 WATERBEWEGING

Op de zeerland van het model worden astronomische getijde componenten opgelegd. Op de rivierranden worden gemiddelde afvoeren opgelegd. Nadat de waterbeweging is ingespeeld, zijn 38 complete springtij-doodtij cycli morfologisch doorerekend. Met een versnellingsfactor van 24.75, is dit representatief voor de morfologische ontwikkelingen in 38 jaar tijd.

2.3.4 OVERIGE MODELINSTELLINGEN

De overige modelinstellingen zijn weergegeven in Tabel 2.2 en zijn gelijk aan de instellingen zoals gevonden in de actualisatie van het FINEL model (LTV V&T-rapport A-26).

Parameter	Instelling
Sediment transport formule	Engelund Hansen
d_{50}	300 μm in de monding, geleidelijk afnemend tot 150 μm in het oosten.
Valsnelheid zand	Afhankelijk van d_{50}
Morfologische versnellingsfactor	24.75
Parametrisatie spiraalstroming	Aan
Hydraulische ruwheid	1 cm
Morfologische ruwheid	1 cm

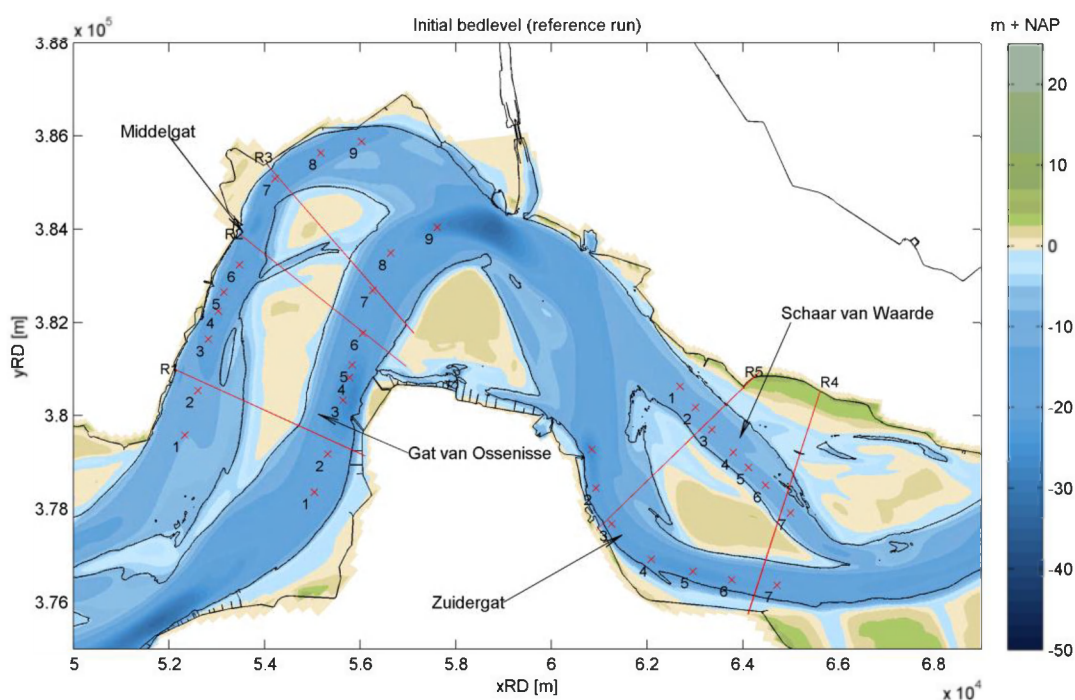
Tabel 2.2: Instellingen FINEL2D modelberekening

3

Onderzoek kortsluitgeulen

3.1 INLEIDING

In dit hoofdstuk wordt aan de hand van modelsimulaties getracht om meer systeembegrip te verkrijgen van de kortsluitgeulen in de Westerschelde. Hiervoor worden in het bijzonder de gebieden bij de Molenplaat, de Rug van Baarland en de Plaat van Walsoorden beschouwd (Figuur 3.1). De eerste twee zandplaten worden aan weerszijden omsloten door het Middelgat, het Gat van Ossensisse en in het Noorden door de Overloop van Hansweert. Tussen de Molenplaat en de Rug van Baarland loopt een zogenaamde kortsluitgeul, de Geul van de Molenplaat. De Plaat van Walsoorden wordt aan weerszijden omsloten door de Schaar van Waarde en het Zuidergat. In de uitgevoerde simulaties, die dienen ter ondersteuning van het systeembegrip op mesoschaal, wordt telkens de huidige morfologie van de zandplaten veranderd.



Figuur 3.1 Initiele bodemligging na inspeelperiode, zonder aanpassingen. Roden lijnen: dwarsdoorsneden waardoor debieten kunnen worden bepaald. Kruisjes: observatiepunten.

3.2 METHODE

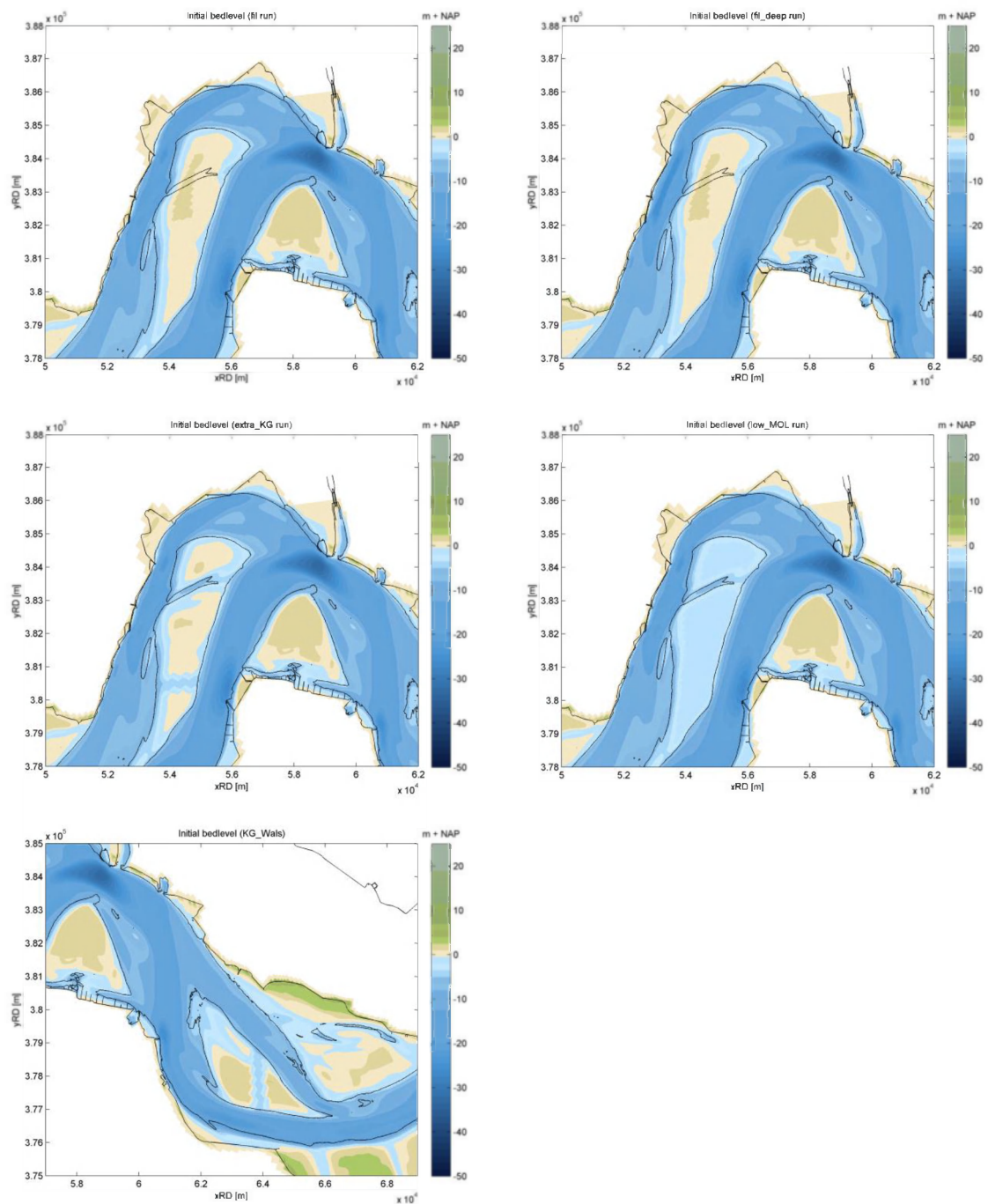
Figuur 3.1 toont de ingespeelde initiële bodem. Deze configuratie is gebruikt ter referentie. Ook aangegeven zijn de dwarsdoorsnedes (R1 tot R5) en observatiepunten (rode kruisjes). Er worden drie verschillende debieten beschouwd:

- Het totale debiet door de dwarsdoorsnede
- Het debiet door de nevengeul
- Het debiet door de hoofdgeul.

In de tekst zal worden gerefereerd naar bijvoorbeeld dwarsdoorsnede R1 Middelgat. Dan wordt alleen de stroming bedoeld door het gedeelte van R1 dat zich in het Middelgat bevindt. Merk op dat het debiet door de totale dwarsdoorsnede niet gelijk is aan de som van de debieten door de hoofdgeul en door de nevengeul. Dit komt doordat voor het totale debiet ook het debiet over de plaat wordt meegenomen.

Om een beter systeembegrip op mesoschaal te verkrijgen, is de initiële bodem op vijf verschillende manieren veranderd. We hebben de volgende zes scenario's gedefinieerd:

1. Het referentie scenario, de bodem is na de inspeelsimulatie niet aangepast (Figuur 3.1).
2. De geul van de Molenplaat is volledig gedempt (Figuur 3.2, linksboven)
3. De geul van de Molenplaat is gedempt en het Middelgat, nabij de kortsluitgeul, is uitgediept tot een diepte van 25 meter (Figuur 3.2, rechtsboven).
4. In de Rug van Baarland is een extra kortsluitgeul gemaakt met een diepte van -5 m NAP (Figuur 3.2, links midden).
5. De gehele Molenplaat en de Rug van Baarland is verlaagd tot -2 m NAP (Figuur 3.2, rechts midden).
6. In de Plaat van Walsoorden is een extra kortsluitgeul gegraven met een diepte van -5 m NAP (Figuur 3.2, linksonder).



Figuur 3.2: Initiële bodemliggingen voor de verschillende scenario's: gedempte geul van de Molenplaat (linksboven); uitgediept Middelgat en gedempte geul van de Molenplaat (rechtsboven); extra kortsluitgeul door de Rug van Baarland (links midden); verlaagde Molenplaat en de Rug van Baarland (rechts midden); extra kortsluitgeul door de Plaat van Walsoorden (linksonder).

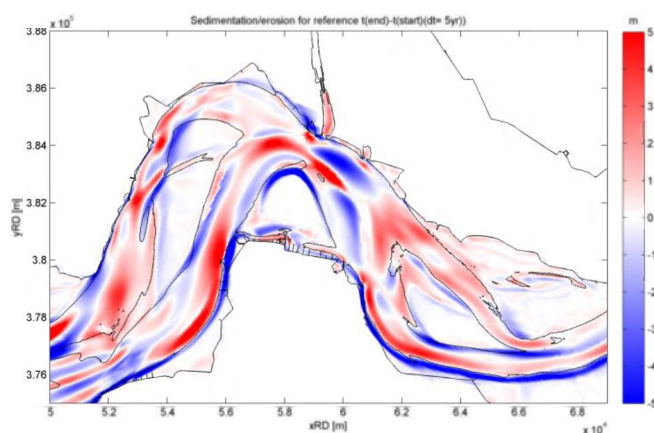
3.3 RESULTATEN

We zullen de resultaten per scenario behandelen, waarbij we telkens eerst ingaan op de berekende erosie en sedimentatie in het interesse gebied. Vervolgens kijken we naar het verschil in maximale stroomsnelheid tijdens hoog- en laagwater van het behandelde scenario met het referentiescenario. Daarna onderzoeken we het debietverschil door de dwarsdoorsneden en het verschil in de maximale hoog- en laagwaterstand met het referentiescenario. Tot slot onderzoeken we het verschil in waterstandsniveau voor maximaal hoog en laagwater tussen de observatiepunten aan weerszijden van de platen.

3.3.1 SCENARIO 1: REFERENTIE

Dit scenario vormt het uitgangspunt. De waterstandsniveaus en de debieten in de volgende scenario's zullen steeds worden vergeleken met de referentiesituatie.

Figuur 3.3 toont de berekende sedimentatie en erosie in het gebied na 5 jaar. Er is een duidelijke sedimentatie te zien in zowel het Gat van Ossensisse als het Middelgat. De sedimentatie in het Gat van Ossensisse wordt vermoedelijk mede veroorzaakt door verspreiding van baggerspecie op SH41. Ook is er een matige sedimentatie te zien in de geul van de Molenplaat. Nabij de Plaat van Walsoorden vindt sedimentatie plaats in de Schaar van Waarde en in het midden van het Zuidergat. De sedimentatie in het Zuidergat wordt zeer waarschijnlijk veroorzaakt door de aanwezigheid van verspreidingslocatie SH51 op deze positie. Daarnaast valt op dat in het Zuidergat aan de randen erosie optreedt. Tot slot treedt er in de diepste gedeeltes van de Bocht van Walsoorden sedimentatie op, terwijl aan de randen erosie optreedt.

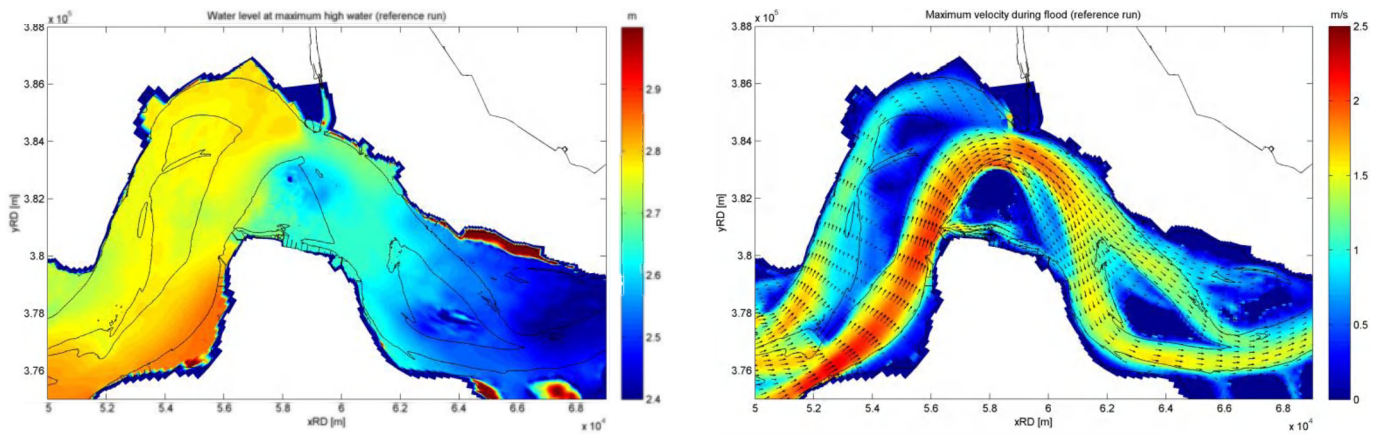


Figuur 3.3. Sedimentatie en erosie voor het referentiescenario. Rode kleuren sedimentatie, blauwe kleuren erosie.

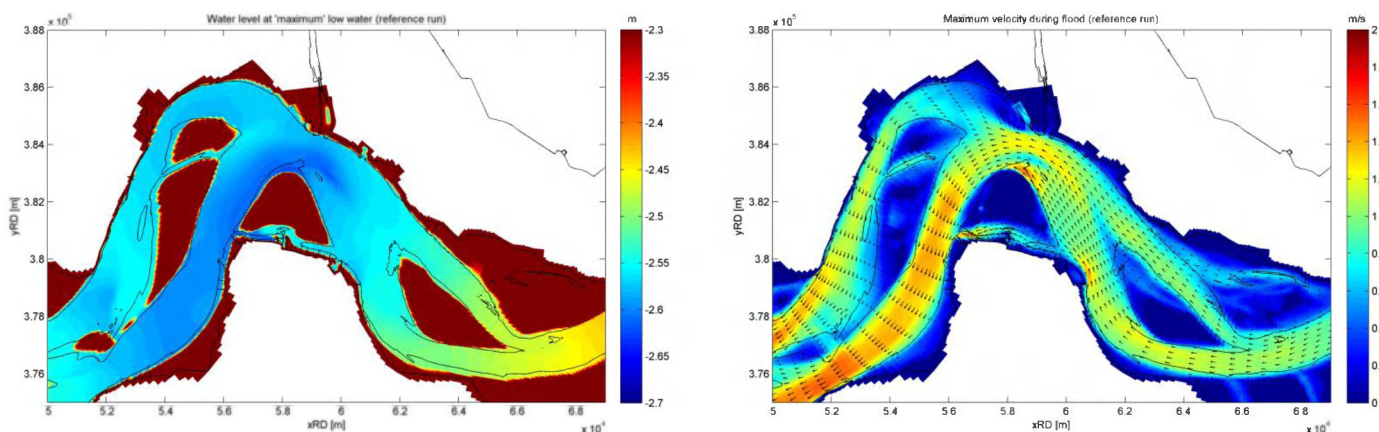
De waterstand tijdens hoogwater op locatie Middelgat 1 wordt weergegeven in figuur 3.4. Er is een duidelijk verschil in waterstandsniveau te zien tussen het Middelgat en het Gat van Ossensisse. Dit komt doordat de stroomsnelheid van de vloedstroom door het Gat van Ossensisse krachtiger is dan de vloedstroom door het Middelgat (figuur 3.4, rechter paneel). Het water dat vanuit het Gat van Ossensisse uitmondt in de overloop van Hansweert, vormt zo een natuurlijke barrière voor het water dat vanuit het Middelgat hierin uitmondt. Dit is in tegenstelling tot de waterstanden door de geulen langs de Plaat van Walsoorden, waar nauwelijks verschillen optreden. Ook treedt er hier nauwelijks verschil op in maximale vloedstroomsnelheden tussen die geulen.

Tijdens de laagste waterstand op locatie Middelgat 1, is het waterstandsniveau in het Gat van Ossensisse duidelijk lager dan in het Middelgat (figuur 3.5). Het water 'kiest' er duidelijk voor om via het Gat van

Ossensisse zeewaarts te stromen. Dit is ook te zien in het rechterpaneel in Figuur 3.5, die de maximale stroomsnelheid gedurende laagwater weergeeft. In deze figuur is ook te zien hoe er water door de geul van de Molenplaat richting het Middelgat stroomt, wat er voor zorgt dat de stroomsnelheid daar toeneemt. Wederom treden er tijdens laagwater weinig verschillen op rondom de Plaat van Walsoorden.



Figuur 3.4: Maximale waterstand t.o.v. NAP gedurende hoogwater op locatie Middelgat 1 (linker figuur) en de resulterende maximale vloedstroomsnelheid (rechter figuur) voor het referentiescenario



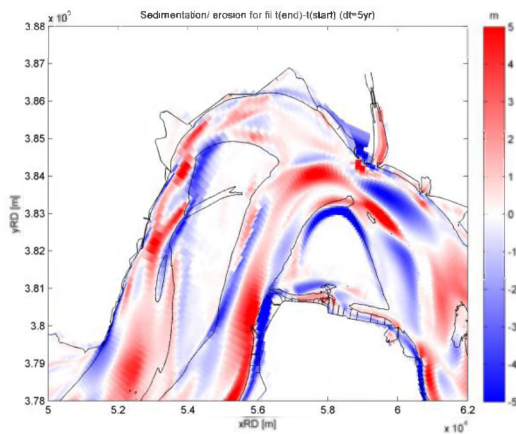
Figuur 3.5: Minimale waterstand t.o.v. NAP gedurende laagwater (linker figuur) en maximale ebstroomsnelheid (rechter figuur) voor het referentiescenario

3.3.2 SCENARIO 2: GEDEMPTE KORTSLUITGEUL

In dit scenario is de kortsluitgeul gedempt. In de figuren is deze situatie weergegeven als 'fil'.

Sedimentatie/ erosie

Uit figuur 3.6 valt op te maken dat er betrekkelijk weinig verschil zit in het sedimentatie en erosie patroon in het interessegebied. Het valt op dat de kortsluitgeul zich na de simulatie van 5 jaar nog niet heeft hersteld.



Figuur 3.6. Sedimentatie/ Erosie voor scenario 2. Kleurenschaal is hetzelfde als in figuur 3.3

Maximale vloedstroom

Figuur 3.7 geeft de relatieve stroomsnelheidsverandering weer tussen scenario 1 en scenario 2 gedurende de maximale vloedstroom. De rode kleuren geven een toename in stroomsnelheid weer, terwijl de blauwe kleuren een afname in stroomsnelheid weergeven.

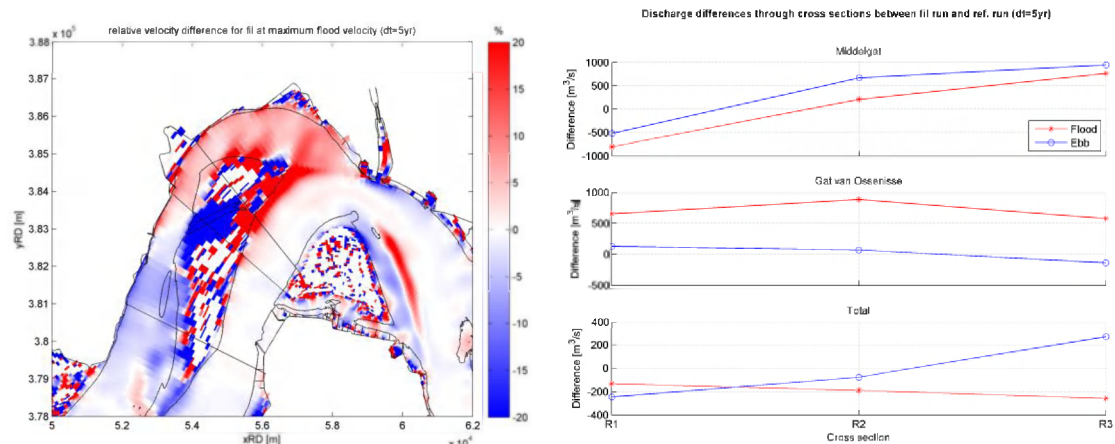
Het effect van het dempen van de kortsluitgeul is duidelijk te zien door de lokale afname van de stroomsnelheid. De toename van de stroomsnelheid over de plaat ten zuiden en oosten van de gedempte geul is opvallend. Dit duidt erop dat in scenario 1 de kortsluitgeul niet alleen vanuit de geulen wordt gevoed, maar ook over de plaat. Nu de kortsluitgeul is gedempt, zoekt het water een andere weg, hetgeen een toename in stroomsnelheid op die plaatsen tot gevolg heeft. De stroming die nu is ontstaan, volgt een route ten oosten van de gedempte kortsluitgeul en stroomt uit op de grens van het Middelgat en de overloop van Hansweert. Merk op dat tijdens scenario 1 de stroomsnelheden over de plaat al betrekkelijk laag waren, waardoor de verandering van de stroomsnelheid in absolute zin minder groot zijn dan de figuur wellicht suggereert.

Ook ten noorden van de Molenplaat is de stroomsnelheid toegenomen. Dit is een logisch gevolg van het dempen van de geul. Hierdoor stroomt het water nu volledig door het Middelgat en kan het niet halverwege het Middelgat via de kortsluitgeul naar het Gat van Ossensisse stromen.

De genoemde verschillen zijn ook duidelijk te zien in het verschil in debiet dat door de aangegeven dwarsdoorsneden stroomt (figuur 3.7, rechter paneel). Dit figuur toont het debietverschil tussen scenario 1 en scenario 2 voor het maximale instantane debiet tijdens eb en vloed. Een positieve waarde betekent een groter debiet voor scenario 2, een negatieve waarde een kleiner debiet. De orde van grootte van het maximale instantane debiet door het Middelgat is ongeveer 15.000 m³, door het Gat van Ossensisse ongeveer 45.000 m³ en totaal ongeveer 60.000 m³. Over het algemeen is er sprake van een groter debiet tijdens vloed dan tijdens eb.

Duidelijk is te zien dat, als gevolg van het dempen van de kortsluitgeul, het debiet tijdens vloed door sectie R1 in het Middelgat afneemt (zie ook figuur 3.1), terwijl het debiet in dezelfde sectie door het Gat van Ossensisse toeneemt. Het sluiten van de kortsluitgeul is dus ook van invloed op de vloedbeweging zeewaarts van de kortsluitgeul. Ondanks dat er een kleiner volume per tijdseenheid het Middelgat instroomt, is er een toename van het debiet te zien in de secties ter hoogte en ten noorden van de kortsluitgeul.

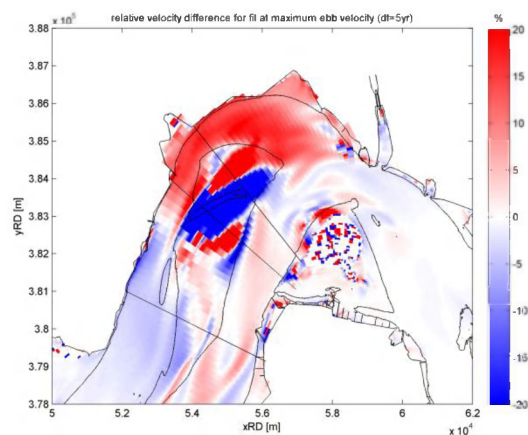
In het Gat van Ossenisse nemen de debieten voor alle secties toe. Dit past bij de waarneming dat er een kleiner volume door het Middelgat stroomt. De toename van de debieten is het grootst in sectie R2. Hier stroomt water in, van over de plaat. Ten slotte nemen de totale volumes die het gebied instromen iets af.



Figuur 3.7: Linker figuur: Relatieve verschillen in vloedstroomsnelheid t.o.v. het referentiescenario voor scenario 2. Rechter figuur: Debiet verschillen door de dwarsdoorsneden, uitgesplitst voor Middelgat, Gat van Ossenisse en voor de totale dwarsdoorsnede.

Maximale ebstroom

Ook tijdens de maximale ebstroom neemt de stroomsnelheid ten noorden van de plaat sterk toe (figuur 3.8). Het water dat in scenario 1 door de kortsluitgeul stroomde, gaat nu door het Middelgat richting zee. Daarnaast valt op dat de stroomsnelheid bij de 'monding' van de oorspronkelijke kortsluitgeul naar het Middelgat licht afneemt. Dit duidt erop dat niet het volledige volume dat oorspronkelijk door de geul stroomde nu door het Middelgat stroomt. Dit is ook te zien in de zwakke toename van de stroomsnelheid in het Gat van Ossenisse. Deze observaties worden ondersteund door de debietsverschillen door de dwarsdoorsneden (figuur 3.7). Er is een sterke toename te zien van de debieten door Middelgat sectie R3 en R2, terwijl het debiet door Middelgat R1 juist is afgenomen. De veranderingen van het ebdebiet door het Gat van Ossenisse als gevolg van het dempen van de kortsluitgeul zijn veel kleiner.



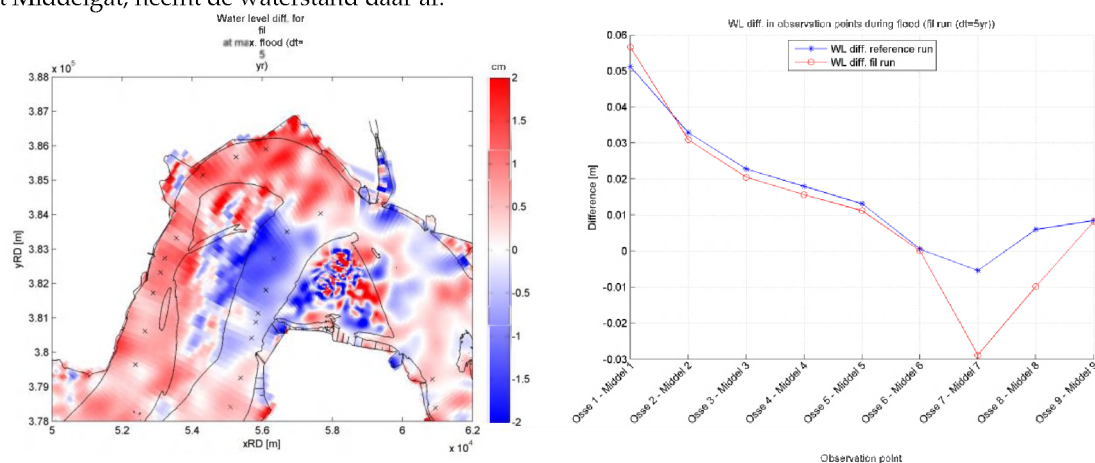
Figuur 3.8: Relatieve ebstroomsnelheidsverschillen t.o.v. het referentie scenario voor scenario 2

Waterstand maximaal hoogwater

Figuur 3.9 toont de het effect van het dempen van de kortsluitgeul op de waterstanden tijdens hoogwater (op locatie Middelgat 1). Getoond wordt het verschil tussen scenario 1 en scenario 2. De blauwe kleuren geven een daling van de waterstanden weer, de rode kleuren een stijging. Hierbij is rekening gehouden met een eventuele faseverschuiving zodat het resultaat hier niet door verstoord wordt.

Het valt op dat door het dempen van de kortsluitgeul de maximale hoogwaterstand afneemt in het Gat van Ossensisse, terwijl de waterstand toeneemt in het Middelgat. Dit duidt dus op een verandering van het verhang tussen de geulen. Daarnaast is het opmerkelijk dat er een uitstralend effect op de waterstanden lijkt te zijn in oostelijke en westelijke richting.

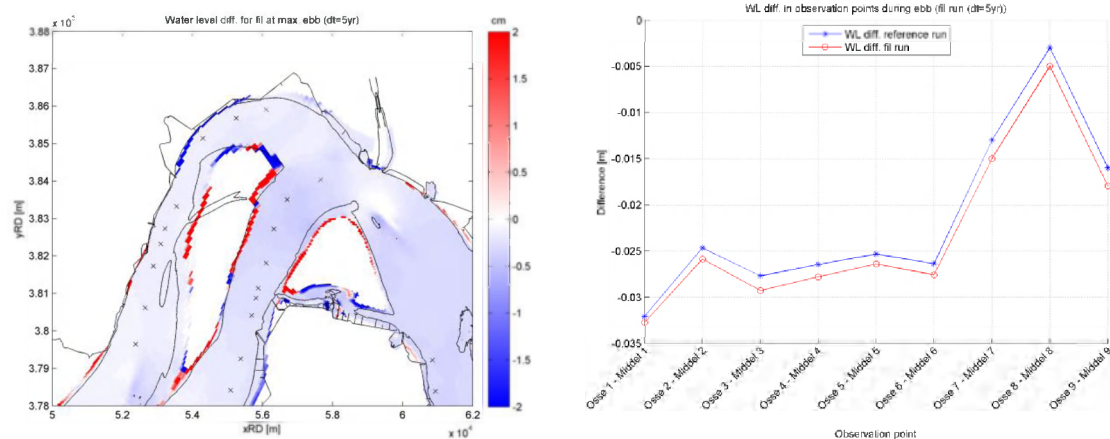
Deze verandering in verhang is ook duidelijk terug te zien in het rechterpaneel in figuur 3.9. Hier zijn de waterstanden in de negen observatiepunten in het Gat van Ossensisse vergeleken met de negen observatiepunten in het Middelgat. Een positieve waarde betekent een hogere waterstand in het Gat van Ossensisse, een negatieve waarde betekent een hogere waterstand in het Middelgat. In de figuur is te zien dat voor punten 2 tot en met 6 er sprake is van een afname van het verhang door het sluiten van de kortsluitgeul. Dit betekent dat de waterstanden in de hoofd- en nevengeul dichter bij elkaar zijn komen te liggen. Vanaf punt zes echter neemt het verhang sterk toe. De waterstand in het Middelgat is hoger dan in het Gat van Ossensisse vanaf dit punt. Door het dempen van de kortsluitgeul stroomt er minder water vanuit het Middelgat naar het Gat van Ossensisse. Hierdoor stroomt er meer water door het Middelgat, waardoor de waterstand in het Middelgat ter hoogte van deze observatiepunten toeneemt. Ook zal de stroomsnelheid hier wat toenemen. Doordat het Gat van Ossensisse tegelijkertijd minder wordt 'gevoed' door water vanuit het Middelgat, neemt de waterstand daar af.



Figuur 3.9: Linker figuur: Hoogwaterstandsverschil t.o.v. het referentie scenario. Rood: toename; blauw: afname. Rechter figuur: Waterstandsverschillen voor maximale hoogwaterstand tussen het gat van Ossensisse en het Middelgat voor het referentie scenario en voor scenario 2. Positieve waarden: waterstand in het gat van Ossensisse hoger; negatieve waarden: waterstand in Middelgat hoger.

Waterstand maximaal laagwater

Ook voor de maximale laagwaterstanden is een verschilfiguur gemaakt (figuur 3.10). De verschillen zijn verwaarloosbaar klein. Wanneer de waterstanden per observatiepunt met elkaar worden vergeleken, valt op dat het waterstandsverschil in het geheel als gevolg van het dempen van de kortsluitgeul tussen het Gat van Ossensisse en het Middelgat licht is toegenomen. Over het algemeen is de invloed van het dempen van de kortsluitgeul op de ruimtelijke waterstandsvariatie tijdens laagwater beperkt.



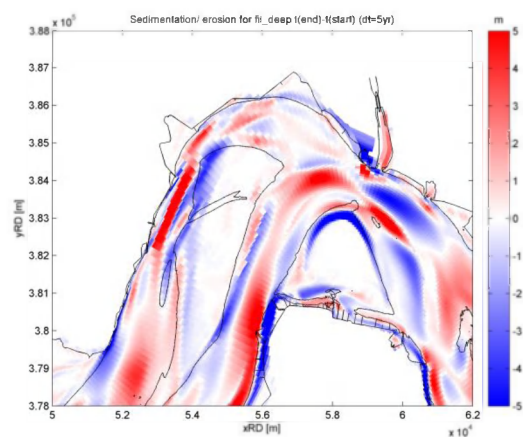
Figuur 3.10: Linker figuur: Relatieve maximum laagwaterstandsverschil t.o.v. het referentie scenario. Rood: uitwijking wordt groter, blauw: uitwijking wordt kleiner. Rechter figuur: Waterstandsverschillen voor maximale laagwaterstand tussen het gat van Ossenisse en het Middelgat voor het referentie scenario en voor scenario 2. Positieve waarden: waterstand in het gat van Ossenisse hoger; negatieve waarden: waterstand in Middelgat hoger.

3.3.3 SCENARIO 3: GEDEMPTE KORTSLUITGEUL, UITGEDIPT MIDDELGAT

In dit scenario is de kortsluitgeul gedempt en het Middelgat uitgediept tot 25 m. In de figuren is deze situatie weergegeven als 'fil_deep'.

Sedimentatie/ erosie

Figuur 3.11 laat een duidelijke sedimentatie zien in de extra verdieping die is aangebracht. Ook voor deze situatie vindt er nog geen erosie plaats in de kortsluitgeul.

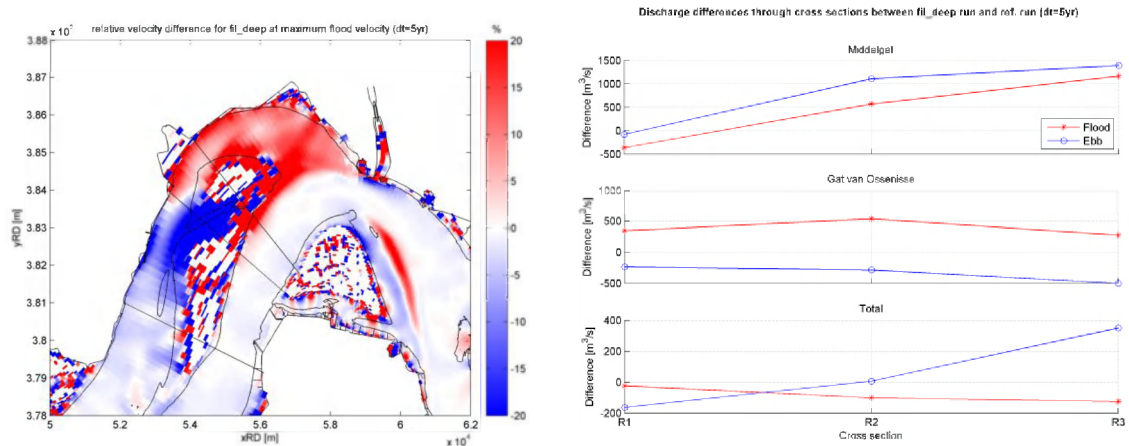


Figuur 3.11. Sedimentatie en erosie voor scenario 3

Maximale vloedstroom

In figuur 3.12 is ten noorden van de plaat een duidelijke toename van de vloedstroomstroomsnelheid te zien, ten opzichte van scenario 1. Wanneer we figuur 3.12 met figuur 3.7 vergelijken, dan valt op dat de toename van de stroomsnelheid ten noorden van de plaat voor scenario 3 sterker is dan voor scenario 2. Door de uitdieping van het Middelgat neemt de bodemruwheid af en stroomt er een groter volume water doorheen. Waar in scenario 2 het water door de afsluiting van de kortsluitgeul zich nog voornamelijk een weg zocht door het Gat van Ossenisse, stroomt er nu dus een groter volume door het Middelgat. Dit is ook te zien in de debietverandering (figuur 3.12, rechter paneel). De afname van het volume door het

Middelgat door sectie R1 is minder sterk voor scenario 3 dan voor scenario 2. Tegelijkertijd is ook de toename van het volume door sectie R1 in het Gat van Ossenisse minder sterk voor scenario 3 dan voor scenario 2. Aan de noordkant van de uitgediepte geul neemt de bodemdiepte relatief snel af van ongeveer 25 m tot ongeveer 20 m. Het water heeft minder ruimte waardoor de stroomsnelheid toeneemt.

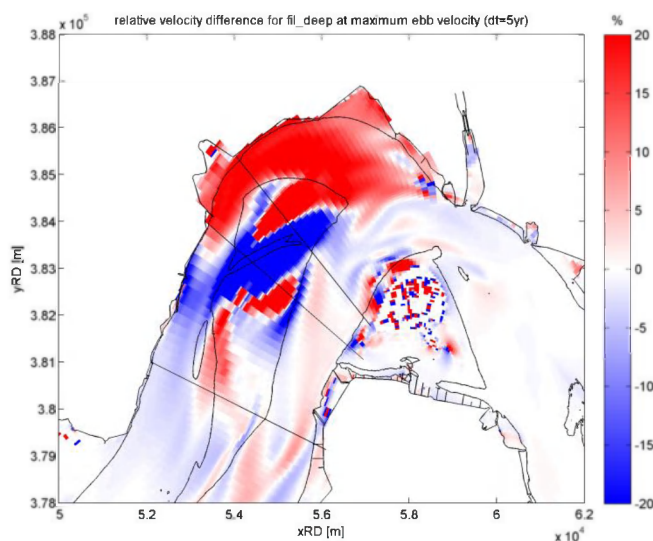


Figuur 3.12: Linker figuur: Relatieve verschillen in vloedstroomsnelheid t.o.v. het referentiescenario, voor scenario 3. Rechter figuur: Debietverschillen door de dwarsdoorsnedes, uitgesplitst voor Middelgat, Gat van Ossenisse en voor de totale dwarsdoorsnede.

Maximale ebstroom

Tijdens de maximale ebstroom zijn dezelfde veranderingen voor de stroomsnelheid waarneembaar (figuur 3.13). Door de diepere geul wordt er als het ware een groter volume water het Middelgat 'ingezogen', waardoor de snelheid ten noorden van de Molenplaat toeneemt. Wanneer dit volume de geul bereikt, krijgt het door de verdieping meer ruimte en neemt de stroomsnelheid af.

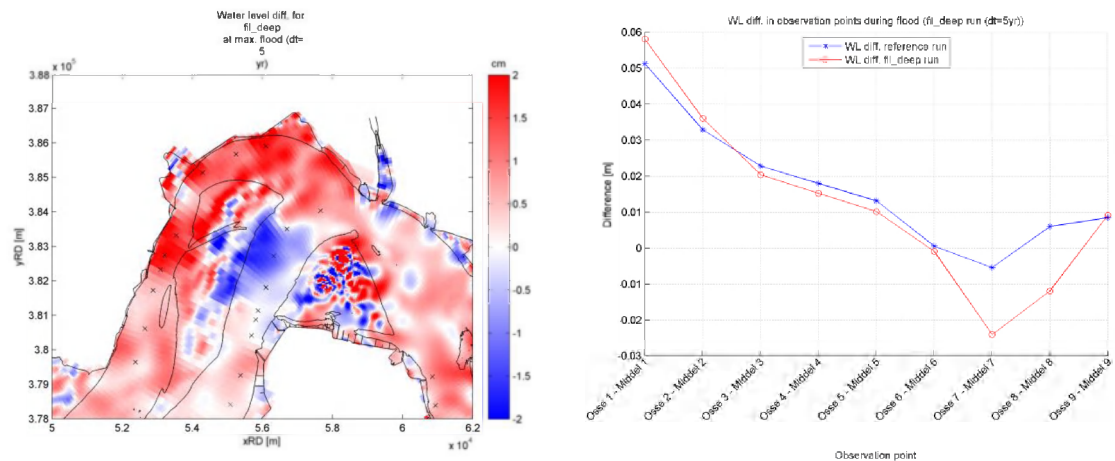
Een vergelijking van de debietveranderingen voor scenario 3 (figuur 3.12) met de debietveranderingen voor scenario 2 (figuur 3.7), levert eenzelfde beeld op als voor de situatie met maximale vloedstroom. Nu stroomt het water bij sectie R3 de geulen binnen. Zichtbaar is dat bij het Middelgat relatief meer water binnen stroomt voor scenario 3 dan het geval was voor scenario 2. Tegelijkertijd stroomt er een relatief kleiner volume het Gat van Ossenisse in.



Figuur 3.13. Relatieve ebstroomsnelheidsverschillen t.o.v. het referentie scenario voor scenario 3.

Waterstand maximaal hoogwater

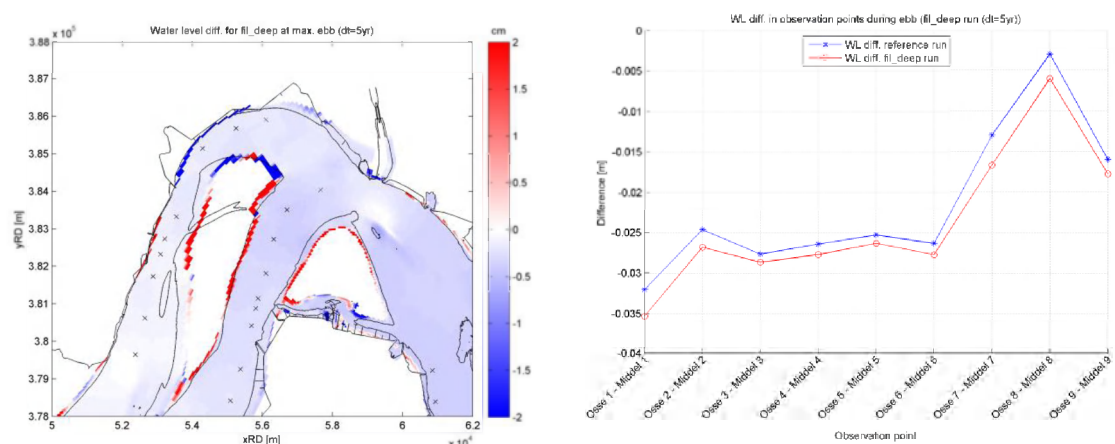
Op de overgang van de gebaggerde geul naar de niet-gebaggerde geul is een lichte verhoging van het maximale waterpeil te zien (figuur 3.14). Het water wordt hier dus opgestuwd. Dit komt overeen met de eerder genoemde lokale toename van de vloedstroomsnelheid. In vergelijking met de maximale hoogwaterstand voor scenario 2 is het waterpeil in het Gat van Ossensisse nog steeds licht gedaald. Deze twee ontwikkelingen hebben tot gevolg dat door de verdieping het waterstandsverschil tussen het Gat van Ossensisse en het Middelgat in absolute zin licht is toegenomen, vooral voor observatiepunten 7 en 8 (vergelijk figuur 3.14 en figuur 3.9).



Figuur 3.14: Linker figuur: Relatieve maximum hoogwaterstandsverschil t.o.v. het referentie scenario, voor scenario 3. Rechter figuur: Waterstandsverschillen voor maximale hoogwaterstand tussen het gat van Ossensisse en het Middelgat voor het referentiescenario en scenario 3.

Waterstand maximaal laagwater

Het beeld voor de maximale laagwaterstand voor scenario 3 is vergelijkbaar met scenario 2. In het algemeen is het verschil in waterstand ten opzichte van scenario 1 licht toegenomen. Dit was ook het geval voor scenario 2 (figuur 3.15). Daarnaast is ook het verhang tussen het Middelgat en het Gat van Ossensisse licht toegenomen en ook dit was het geval voor scenario 2.



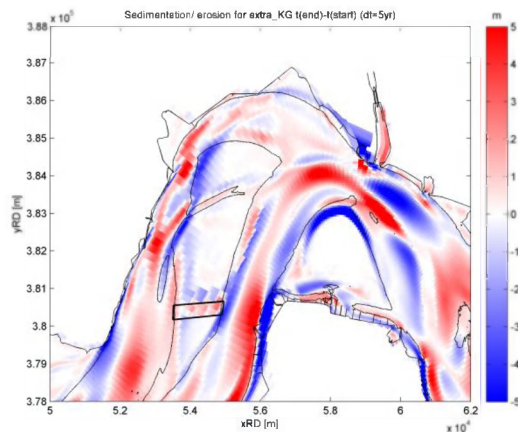
Figuur 3.15: Linker figuur: Relatieve maximum laagwaterstandsverschil t.o.v. het referentie scenario, voor scenario 3. Rechter figuur: Waterstandsverschillen voor maximale laagwaterstand tussen het gat van Ossensisse en het Middelgat voor het referentie scenario en scenario 3.

3.3.4 SCENARIO 4: EXTRA KORTSLUITGEUL RUG VAN BAARLAND

In dit scenario is in de Rug van Baarland een extra kortsluitgeul gegraven, met een diepte van 5 m. In de figuren is dit scenario aangegeven met 'extra_KG'.

Sedimentatie/ erosie

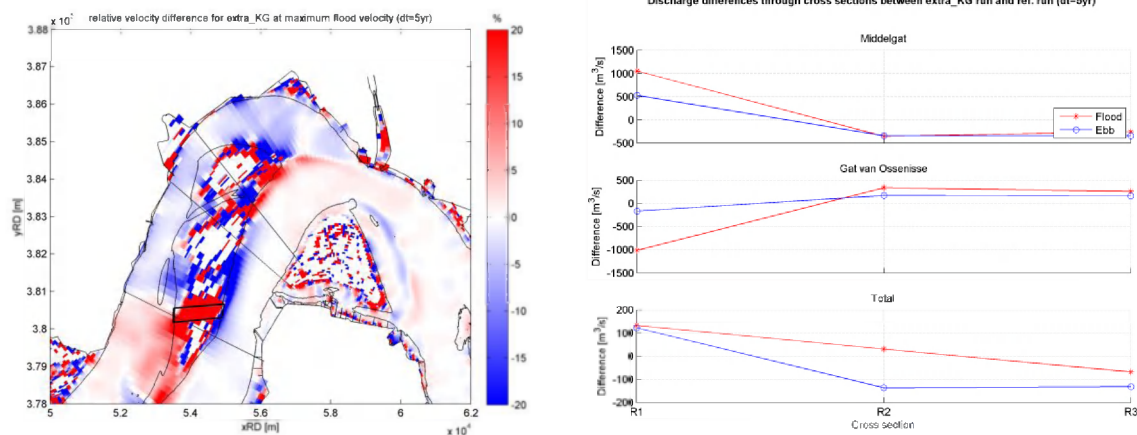
Het patroon van sedimentatie en erosie geeft voor scenario 4 een vergelijkbaar beeld als voor de andere scenario's (figuur 3.16). Er treedt echter een duidelijke sedimentatie op in de extra kortsluitgeul. Aan de randen van deze geul treedt echter ook een lichte erosie op. Dit heeft tot gevolg dat de initieel 'hoekige' randen weg eroderen en de geul een natuurlijker vorm krijgt.



Figuur 3.16. Sedimentatie en erosie scenario 4.

Maximale vloedstroom

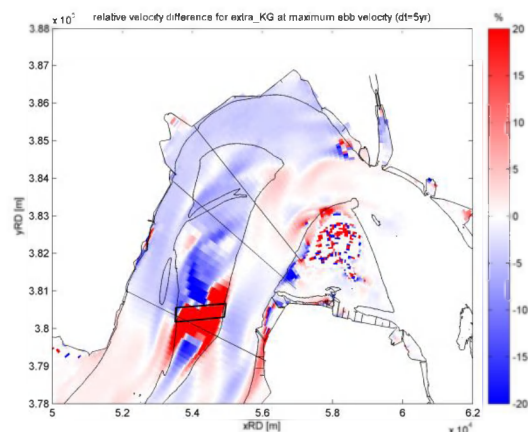
Figuur 3.17 presenteert de relatieve verandering van de maximale vloedstroom. De aanwezigheid van de extra kortsluitgeul leidt duidelijk tot sterke lokale toename van de stroomsnelheid. Daarnaast valt op dat de stroomsnelheid ten zuiden van de extra kortsluitgeul sterk afneemt. Kennelijk voorkomt de aanwezigheid van de extra kortsluitgeul stroming over de plaat. Daarnaast is er aan de zuidkant van het Middelgat een duidelijke toename van de stroomsnelheid te zien, terwijl aan de noordkant de stroomsnelheid is afgenomen. In het Gat van Ossensisse is deze situatie andersom (hoewel minder sterk). Er is dus afname van de stroomsnelheid in het zuiden en toename van de stroomsnelheid in het noorden. Hieruit valt op te maken dat de extra kortsluitgeul water onttrekt aan het Middelgat. Hierdoor neemt de snelheid ter hoogte van de extra kortsluitgeul toe en stroomt er een kleiner volume door het noordelijke gedeelte van het Middelgat. In de figuren voor de debieten is ook te zien dat er een groter volume water door Middelgat sectie R1 stroomt, terwijl door dezelfde sectie in het Gat van Ossensisse een kleiner volume stroomt (figuur 3.17). Op het punt waar de natuurlijke kortsluitgeul uitstroomt in het Gat van Ossensisse (sectie R2), wordt het verschil in debiet tussen scenario 1 en scenario 4 weer zeer klein. Dit betekent dat tijdens de vloed de extra kortsluitgeul vooral van invloed is op de hydrodynamica aan de zuidkant van het interessegebied.



Figuur 3.17: Linker figuur: Relatieve vloedstroomsnelheid verschillen t.o.v. het referentiescenario voor scenario 4. De ligging van de nieuwe kortsluitgeul is aangegeven doormiddel van de zwarte contour. Rechter figuur: Debiet verschillen door de dwarsdoorsneden, uitgesplitst voor Middelgat, Gat van Ossensisse en voor de totale dwarsdoorsnede, voor scenario 4.

Maximale ebstroom

Voor de maximale ebstroom is er een toename te zien van de stroomsnelheid aan de noordkant van het Gat van Ossensisse, terwijl de stroomsnelheid afneemt aan de noordkant van het Middelgat (figuur 3.18). In de figuur is goed te zien hoe de extra kortsluitgeul vervolgens water onttrekt aan het Gat van Ossensisse, omdat de ebstroomsnelheid in het Gat van Ossensisse ter hoogte van de extra geul weer afneemt, terwijl de snelheid in het Middelgat daar juist toeneemt. Ook dit proces is goed te zien in figuren voor de debietverschillen (figuur 3.17). Bij secties R3 en R2 zijn de debieten in het Gat van Ossensisse licht toegenomen, terwijl de debieten in het Middelgat licht zijn afgenomen. Bij sectie R1 echter, neemt het debiet in het Gat van Ossensisse af, terwijl het debiet in het Middelgat juist toeneemt.

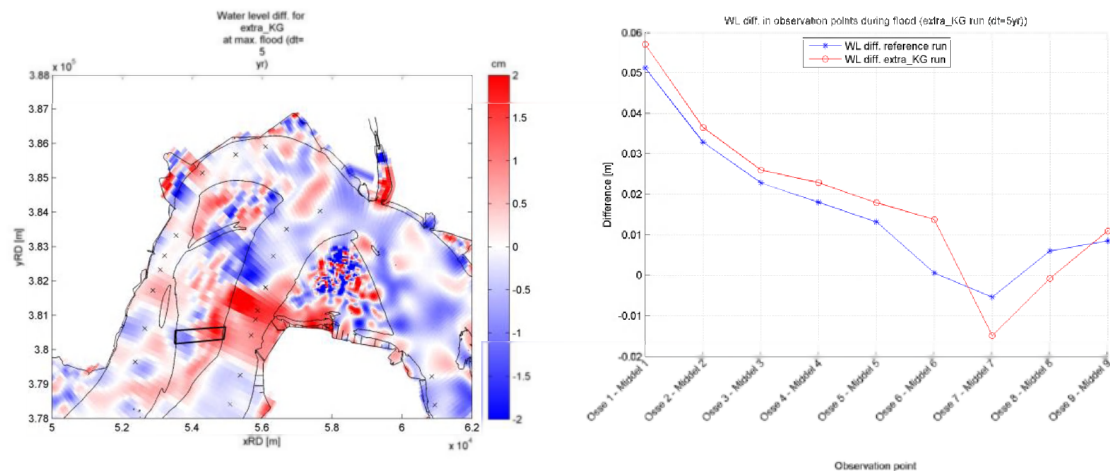


Figuur 3.18. Relatieve ebstroomsnelheidsverschillen t.o.v. het referentie scenario voor scenario 4. De ligging van de nieuwe kortsluitgeul is aangegeven doormiddel van de zwarte contour.

Waterstand maximaal hoogwater

Voor de maximale waterstand tijdens hoogwater is de extra kortsluitgeul vooral van invloed bij de monding van de geul in het Gat van Ossensisse (observatiepunten 3 tot 5 in figuur 3.19). Op die punten neemt de maximale waterstand lokaal sterk toe. Dit is goed te begrijpen omdat hier water vanuit het Middelgat naar het Gat van Ossensisse wordt getransporteerd. Figuur 3.19 laat zien dat tijdens maximaal hoogwater, het verschil in waterstand tussen het Gat van Ossensisse en het Middelgat is toegenomen,

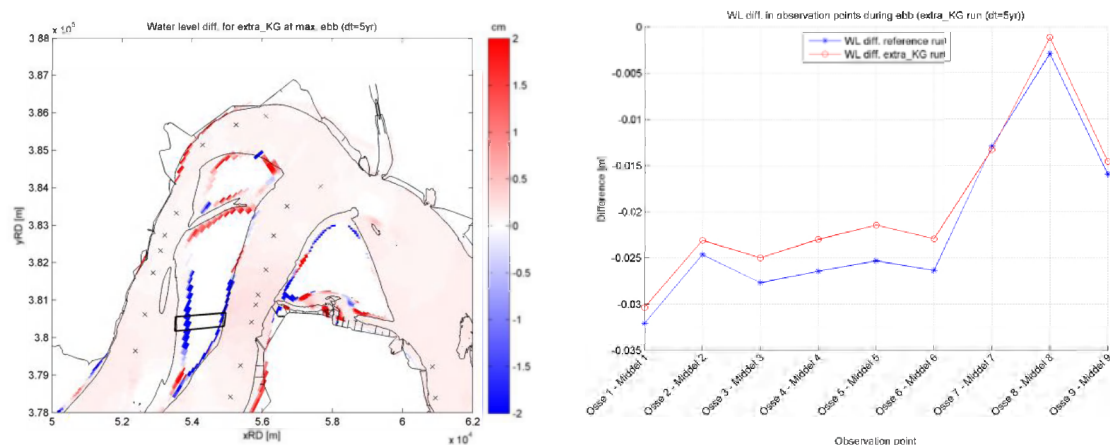
waarbij ten zuiden van de natuurlijke geul de waterstand in het Gat van Ossensisse hoger is dan in het Middelgat, terwijl noordelijk van de natuurlijke geul de waterstand in het Middelgat hoger is dan in het Gat van Ossensisse.



Figuur 3.19: Linker figuur: Relatieve maximum hoogwaterstandsverschil t.o.v. het referentie scenario, voor scenario 4. Rechter figuur: Waterstandsverschillen voor maximale hoogwaterstand tussen het Gat van Ossensisse en het Middelgat voor het referentiescenario en scenario 4.

Waterstand maximaal laagwater

Net als voor de andere scenario's is er een zeer beperkt verschil in de maximale laagwaterstanden tussen scenario 4 en het referentiescenario. Wel valt uit figuur 3.20 op te maken dat het verschil in waterstand tussen het Gat van Ossensisse en het Middelgat licht is afgenomen. Dit betekent dat door de extra geul het verhang tussen de geulen licht is afgenomen.



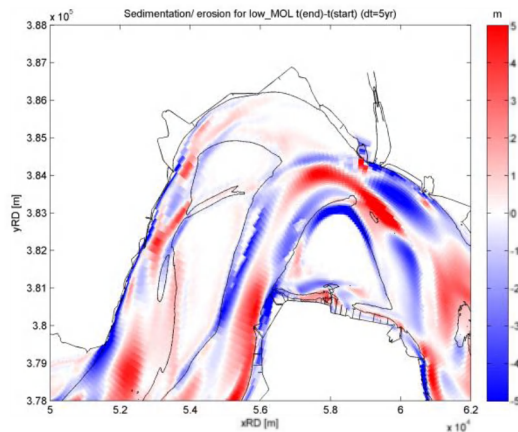
Figuur 3.20: Linker figuur: Relatieve maximum laagwaterstandsverschil t.o.v. het referentie scenario, voor scenario 4. Rechter figuur: Waterstandsverschillen voor maximale laagwaterstand tussen het gat van Ossensisse en het Middelgat voor het referentiescenario en scenario 4.

3.3.5 SCENARIO 5: VERLAAGDE MOLENPLAAT EN RUG VAN BAARLAND

In dit scenario zijn de Molenplaat en Rug van Baarland verlaagd tot een diepte van -2 m onder NAP. In de figuren is dit scenario aangegeven met 'low-MOL'.

Sedimentatie/ erosie

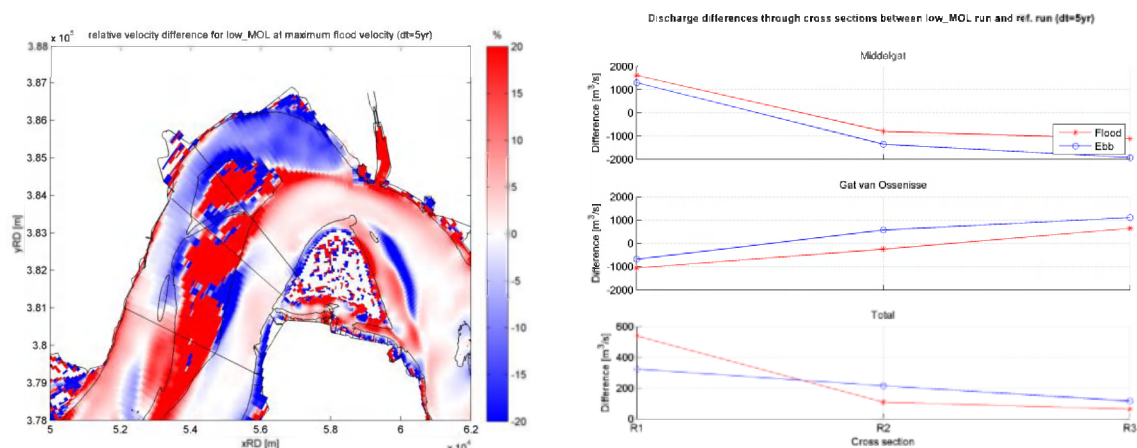
In het patroon van sedimentatie en erosie in figuur 3.21 valt op dat, ondanks de verlaging van de platen, er geen extra sedimentatie of erosie plaatsvindt, ondanks het feit dat er nu constant water over de plaat stroomt. Daarnaast levert het verlagen van de plaat ook geen positieve bijdrage aan het ontstaan van nieuwe kortsluitgeulen. Ook de sedimentatie en erosie in de geul van de Molenplaat wordt niet beïnvloed door het verlagen van de platen.



Figuur 3.21 sedimentatie en erosie voor scenario 5.

Maximale vloedstroom

Het effect op de maximale vloedstroom van het verlagen van de Molenplaat en de Rug van Baarland is duidelijk zichtbaar in figuur 3.22. Door de toegenomen waterdiepte over de rug neemt de stroomsnelheid daar sterk toe. Als een gevolg daarvan wordt er een kleiner volume water door de geul ten noorden van de Molenplaat geleid, waardoor daar de stroomsnelheid afneemt. Daarnaast neemt de stroomsnelheid in de Geul van de Molenplaat af. Deze geul dient niet langer als dominante verbinding tussen het Middelgat en het Gat van Ossensisse. Ook het debiet dat nu tijdens vloed door het gebied stroomt is sterk gestegen. Dit is een logisch gevolg van het verlagen van de platen (figuur 3.22).

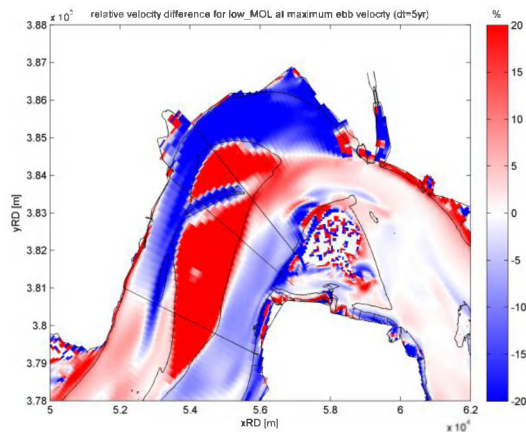


Figuur 3.22: Linker figuur: relatieve snelheidsverschillen voor de maximale vloedstroom voor scenario 5. Rechter figuur: debiet verschillen voor scenario 5.

Maximale ebstroom

De snelheidsverschillen zijn tijdens maximale ebstroom sterker dan tijdens maximale vloedstroom (figuur 3.23). Dit komt doordat in het referentiescenario de Molenplaat en de gedeeltes van de Rug van Baarland droogvallen tijdens eb, terwijl dit met verlaagde platen niet meer gebeurt. Dit heeft vooral gevolgen voor

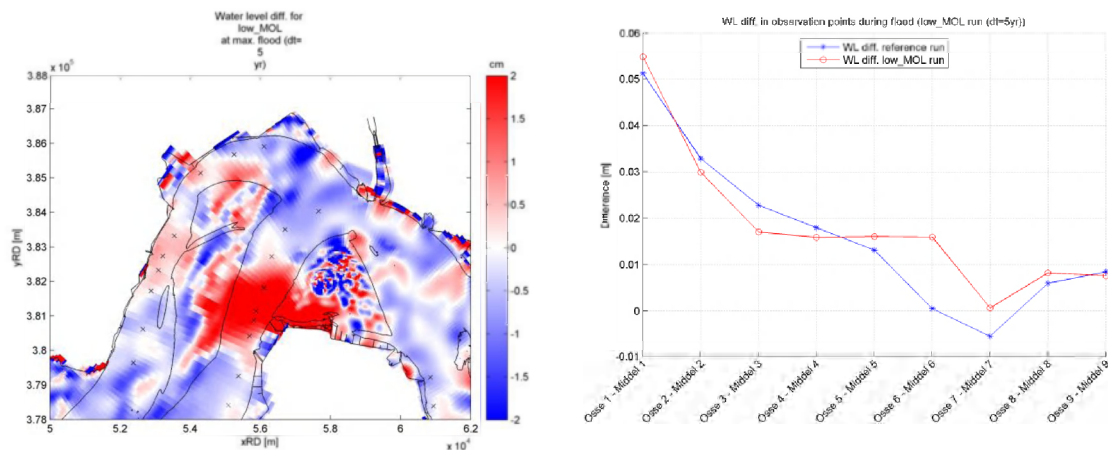
de stroomsnelheid ten noorden van de Molenplaat. Merk op dat in het referentiescenario de stroomsnelheden zeer klein zijn (vrijwel nul). Hierdoor ontstaat in figuur 3.23 een sterke relatieve toename over de plaat. Er is inderdaad een toename van de stroomsnelheid over de plaat, maar minder sterk dan de figuur wellicht suggereert. De stroomsnelheden in de geulen zijn nog steeds groter dan op de platen. Toch wordt het water minder sterk door het Gat van Ossensisse geleid. Hierdoor neemt de stroomsnelheid af in deze geul.



Figuur 3.23 relatieve verschillen voor de maximale ebstroom voor scenario 5

Waterstand maximaal hoogwater

In figuur 3.24 is te zien dat door het verlagen van de platen een stijging van het waterpeil optreedt tijdens maximaal hoogwater in het midden van het Gat van Ossensisse. Er kan een groter volume water over de plaat worden aangevoerd. Daarnaast valt op dat het verhang vanaf observatiepunt 6 groter is dan voor het referentiescenario. De vermoedelijke reden is dat vanaf dit punt de maximale stroomsnelheid in het Gat van Ossensisse toeneemt, terwijl de stroomsnelheid in het Middelgat afneemt.

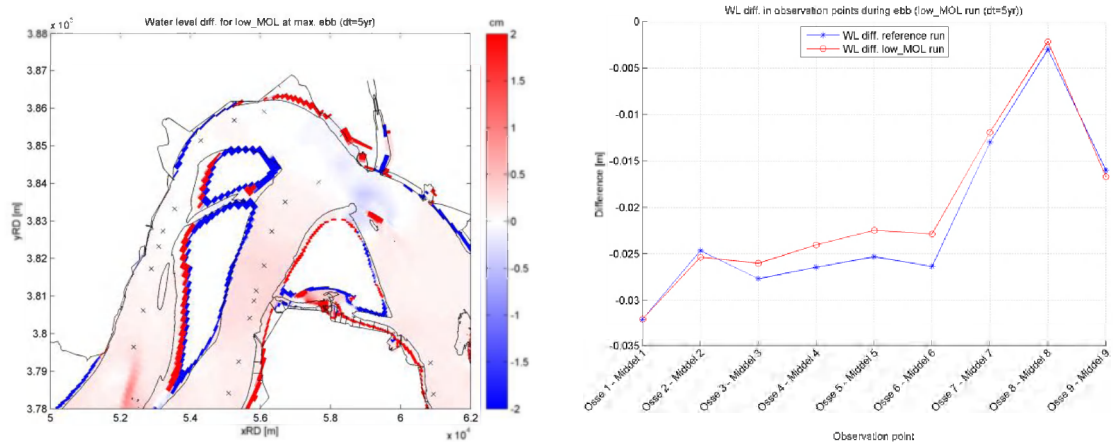


Figuur 3.24: Linker figuur: relatieve verschillen in waterstand tijdens maximaal hoogwater voor scenario 5. Rechter figuur: verhangverloop voor het referentiescenario en scenario 5 tijdens maximaal hoogwater.

Waterstand maximaal laagwater

Tijdens maximaal laagwater neemt de uitwijking van het tij licht toe in het Gat van Ossensisse. Hierdoor is de waterstand bij laagwater iets lager (figuur 3.25). De ebstroom kan nu ook over de plaat zeewaarts stromen, waardoor de volumes in het Gat van Ossensisse minder worden aangevuld en dit gebied beter

leeg kan stromen. Merk op dat op de plaat geen relatieve verschillen uitgerekend kunnen worden, doordat het waterpeil hier in de referentiesituatie te laag is.



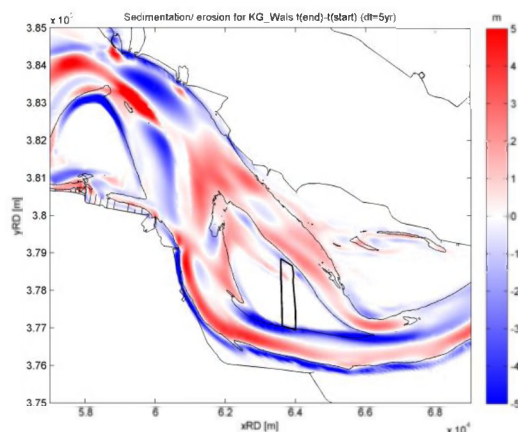
Figuur 3.25: Linker figuur: relatieve verschillen in de waterstand tijdens maximaal laagwater voor scenario 5. Rechter figuur: verhang verloop voor het referentiescenario en scenario 5 tijdens maximaal laagwater

3.3.6 SCENARIO 6: KORTSLUITGEUL DOOR DE PLAAT VAN WALSOORDEN

Voor het laatste scenario is er een kortsluitgeul met een diepte van NAP -5 m gegraven in de Plaat van Walsoorden. In de figuren is deze situatie aangeduid met 'KG_Wals'.

Sedimentatie/ erosie

Het patroon van sedimentatie en erosie in figuur 3.26 laat zien dat er weinig veranderingen optreden wanneer er een kortsluitgeul door de Plaat van Walsoorden wordt gegraven (vergelijk met figuur 3.3). Zelfs op de plaat zelf verschilt het patroon slechts in lichte mate t.o.v. het referentiescenario.

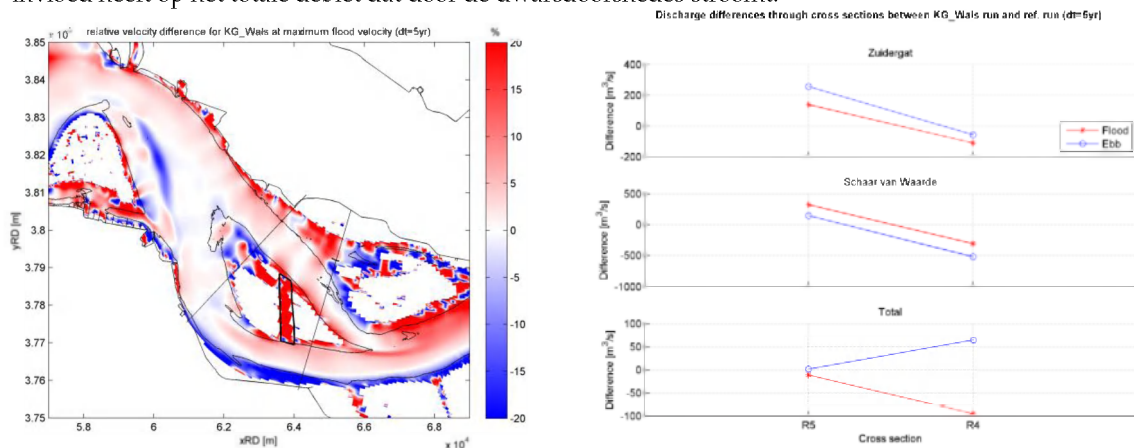


Figuur 3.26: Sedimentatie/ erosie voor scenario 6. De ligging van de extra kortsluitgeul is aangegeven doormiddel van de zwarte contour.

Maximale vloedstroom

Door het graven een kortsluitgeul door de plaat neemt de stroomsnelheid over de plaat duidelijk toe. Figuur 3.27 laat duidelijk zien dat de vloedstroomsnelheid over de noordelijke punt van de plaat toeneemt. De extra kortsluitgeul heeft kennelijk een aanzuigende werking. In het meest oostelijke gedeelte van het interessegebied neemt de stroomsnelheid ook licht toe. Dit is vermoedelijk een gevolg van de

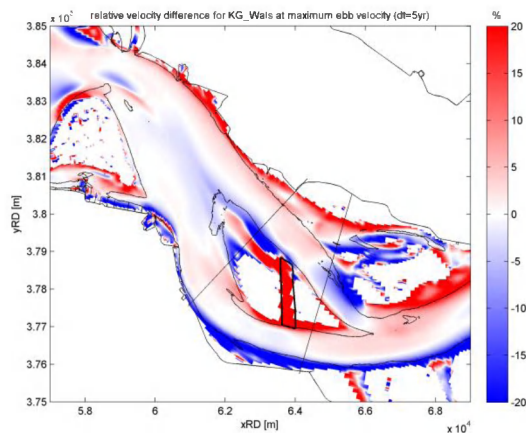
toename van de stroomsnelheid over de plaat. Figuur 3.27 laat ook zien dat de nieuwe geul geen grote invloed heeft op het totale debiet dat door de dwarsdoorsneden stroomt.



Figuur 3.27: Linker figuur: relatieve verschillen voor de maximale vloedstroom voor scenario 6. Rechter figuur: debiet verschillen voor scenario 6.

Maximale ebstroom

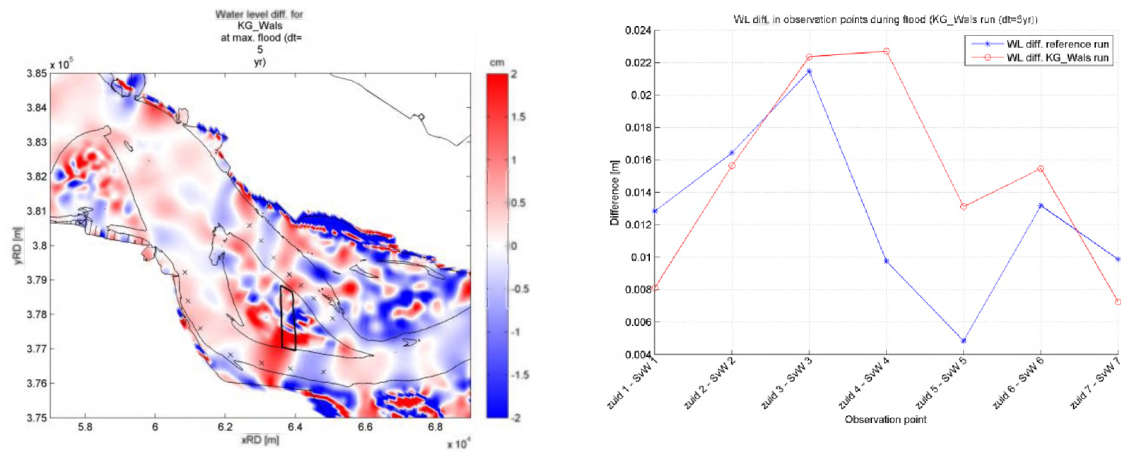
Tijdens maximale ebstroom is de situatie vergelijkbaar met de situatie voor maximale vloedstroom (figuur 3.28). Over de plaat neemt de stroomsnelheid toe. In plaats van dat de geul uitmondt in de Schaar van Waarde wordt het water vanuit de geul vooral afgevoerd over de noordelijke punt van de plaat. Ook voor de debieten treden er geen grote verschillen op.



Figuur 3.28 relatieve verschillen voor de maximale ebstroom voor scenario 6.

Waterstand maximaal hoogwater

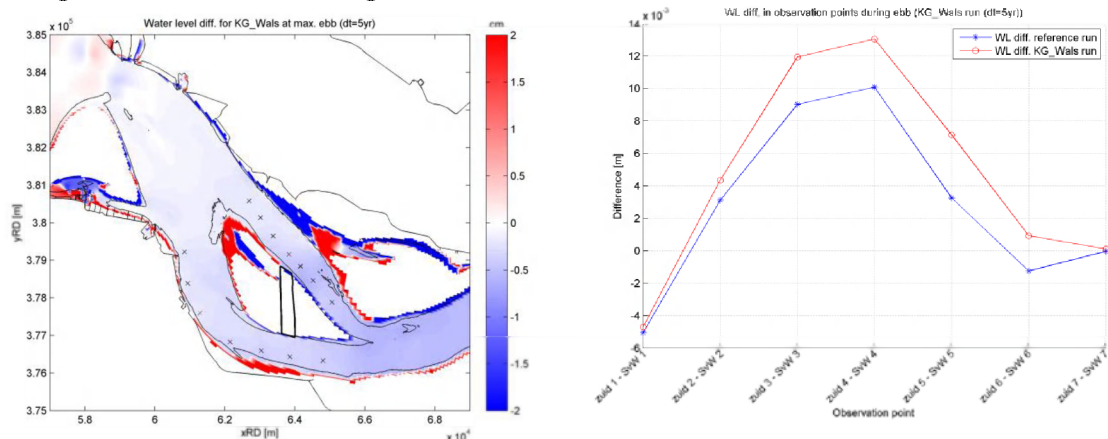
Figuur 3.29 laat zien dat er slechts geringe verschillen in waterstand optreden tijdens maximaal hoogwater. Alleen daar waar de kortsluitgeul uitmondt in het Zuidergat neemt de waterstand iets toe. Voor het verhang laat figuur 3.29 ook zien dat voor de referentiesituatie het waterpeil in het Zuidergat ongeveer 1 tot 2 cm hoger is dan het waterpeil in de Schaar van Waarde. Dit is in tegenstelling met de situatie voor scenario 2, waarbij na het sluiten van de kortsluitgeul de waterstand in de hoofdgeul kleiner was dan in de nevengeul. Met andere woorden: het lijkt erop dat het verhang rondom de plaat van Walsoorden minder geschikt is voor het ontstaan van een kortsluitgeul. Echter, het wel of niet bestaan van een verhang is niet per se een voorwaarde voor het bestaan van een kortsluitgeul. Door een kortsluitgeul te graven neemt het verhang in de observatiepunten 4, 5 en 6 namelijk toe.



Figuur 3.29: Linker figuur: relatieve verschillen in de waterstand tijdens maximaal hoogwater voor scenario 6. Rechter figuur: verhang verloop voor het referentie scenario en scenario 6 tijdens maximaal hoogwater.

Waterstand maximaal laagwater

De waterstand tijdens maximaal laagwater verandert vrijwel niet door de aanwezigheid van de korstuigeul (figuur 3.30). Er is nauwelijks sprake van een verhang en dit verandert niet door het aanbrengen van een nieuwe kortsluitgeul.



Figuur 3.30: Linker figuur: relatieve verschillen in de waterstand tijdens maximaal laagwater voor scenario 6. Rechter figuur: verhang verloop voor het referentie scenario en scenario 6 tijdens maximaal laagwater.

3.4 CONCLUSIES

De zes uitgevoerde simulaties leiden tot de volgende conclusies;

- Veranderingen in de morfologie in de gebieden rondom de onderzochte kortsluitgeulen heeft slechts zeer beperkt invloed op de morfodynamiek van de kortsluitgeul.
- Het systeem vertoont geen terugkeer naar de oude situatie wanneer, op de onderzochte plaatsen, een extra kortsluitgeul door een plaat wordt gegraven, dan wel wanneer een kortsluitgeul wordt gedempt.
- Veranderingen van de morfologie rondom kortsluitgeulen hebben wel invloed op de hydrodynamica. De toename van het verhang tussen het Gat van Ossensisse en het Middeldgat, wanneer de Geul van de Molenplaat wordt gedempt, duidt erop dat het verhang de kortsluitgeul in stand houdt. De morfologische berekeningen laten ook zien dat de kortsluitgeul zich niet opnieuw ontwikkelt. Uitsluitend het bestaan van een verhang lijkt onvoldoende om een kortsluitgeul te doen ontstaan.
- Het is mogelijk dat het ontstaansmechanisme achter de kortsluitgeulen over een grotere tijdschaal plaats vindt dan de vijf jaar waarvoor in de gepresenteerde simulaties is gerekend.

- De simulaties laten zien dat ingrepen in de kortsluitgeulen mogelijk een uitstralend effect hebben op de waterstanden elders in de Westerschelde.

Deze conclusies worden verder verwerkt in de rapporten binnen 'Veiligheid en Toegankelijkheid' die de systeemwerking beschrijven, meer in het bijzonder LTV V&T-rapport K-16, K-17 en G-13 (Consortium Deltares-IMDC- Svašek-Arcadis, 2013).

4

Onderzoek nevengeulen

Het modelonderzoek naar het bevaarbaar maken en houden van de nevengeulen in de Westerschelde wordt gepresenteerd in LTV V&T-rapport B-24: *Gebruik van nevengeulen voor binnenvaart* (Consortium Deltares-IMDC- Svašek-Arcadis, 2013). Hier worden alleen de conclusies van de Delft3D simulaties uit dat rapport gepresenteerd.

Deze conclusies zijn:

- Door het verdiepen van de nevengeulen neemt het totale baggerbezwaar over vijf jaar toe.
- Doordat het sediment dat is verwijderd uit de nevengeulen wordt gestort op locaties in de hoofdgeul, neemt het baggerbezwaar in de hoofdgeul lokaal toe.
- In de Geul van Baarland is pas een significante baggerinspanning nodig vanaf het vijfde simulatiejaar, door sedimentatie van Plaat van Baarland. Het is te verwachten dat hierdoor op de langere termijn een intensiever onderhoud van de geul nodig is.
- In de hoofdgeul nabij de Schaar van Valkenisse treedt sedimentatie op als gevolg van de verdieping van de nevengeul.
- In de hoofdgeul bij de Schaar van de Noord neemt het baggeronderhoud toe als gevolg van een toename van de storting door het verdiepen van de nevengeul.
- Het verdiepen van de geulen heeft beperkte invloed op de grootschalige hydrodynamica in de Westerschelde.
- Geadviseerd wordt te werken met flexibele stortingen, waardoor lokaal de hoofdgeul niet te veel wordt belast met de toename van het stortvolume als gevolg van het verdiepen van de nevengeulen.

5

Onderzoek putten

5.1 INLEIDING

Dit hoofdstuk presenteert de resultaten van een gedetailleerde modelstudie naar diepe putten in de Westerschelde. De centrale vraag voor dit hoofdstuk luidt:

“Wat is het effect op de hydrodynamica en sedimentatie/erosie rond een diepe put, wanneer de diepe put wordt opgevuld met sediment?”

Als eerste aanzet bestuderen we de Put van Hansweert. Gezien de relatief geringe omvang en diepte van de Put gaan we ervan uit dat het model de stromingen in de Put goed kan berekenen. Dit is in tegenstelling tot bijvoorbeeld de Put van Borssele, waar uit metingen blijkt dat complexe turbulente stromingen een rol spelen. Er zijn echter geen metingen van de stromingen rond de Put van Hansweert.

Verwacht wordt dat 3D effecten van belang zijn rondom deze put. Hierom is in 3D gesimuleerd. Hiervoor gebruiken we het bestaande Delft3D model van de Schelde, geschikt gemaakt voor een 3D simulatie

Dit hoofdstuk bespreekt eerst de gebruikte methode en hoe het oorspronkelijk model is aangepast, zodat het geschikt is voor 3D simulaties. Daarna volgen de uitgevoerde experimenten en de resultaten. Tot slot volgen conclusies en aanbevelingen.

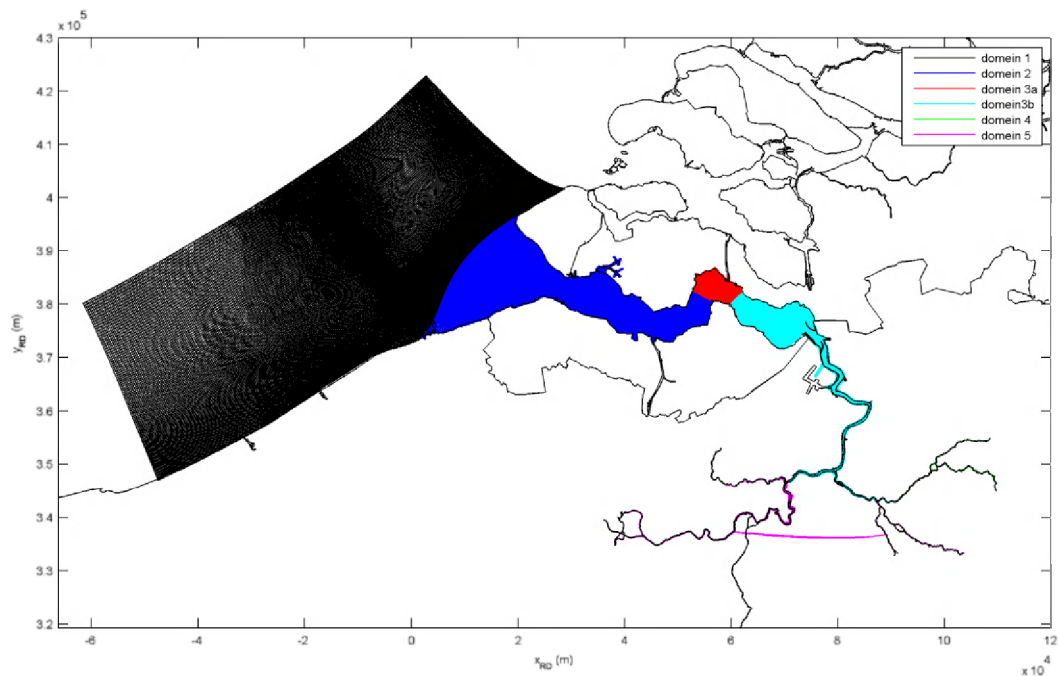
5.2 METHODE

In de voorgaande hoofdstukken is gebruik gemaakt van simulaties met een 2DH model. Dit houdt in dat de berekeningen worden uitgevoerd met 1 verticale laag. Een diepe put is een significante toename van de diepte in een relatief klein gebied en de beschouwde put ligt in één van de bochten van de Westerschelde. De verwachting is daarom dat 3D-effecten een rol spelen met mogelijk verticale stroming aan de wanden van de Put en een verschil in de richting van de horizontale stroming tussen het oppervlak en de bodem. Om deze redenen is het bestaande model aangepast en gedeeltelijk 3D gemaakt.

Schematisatie

In het originele model is het rekenrooster opgedeeld in 5 ongeveer even grote domeinen. Hierbij zijn de getijderandvoorwaarden opgelegd aan de randen van het zeedomein. Tussen de domeinen vindt directe uitwisseling van stroming en sedimentconcentraties plaats. Om de rekentijd en het door het model gebruikte geheugen binnen acceptabele grenzen te houden is alleen het gebied rond de Put van Hansweert in 3D geschematiseerd. Hiervoor is het originele derde domein opgesplitst in domein 3a en 3b, waarbij 3a het 3D domein is (figuur 5.1). Voor het 3D model is gekozen om 8 lagen toe te voegen, waarbij wordt gerekend met sigma lagen. Gezien vanaf het wateroppervlak naar de bodem hebben de lagen de volgende

diktes t.o.v. de totale waterdiepte: 33%, 25.44%, 15.185%, 10.125%, 6.75%, 4.5%, 3.0% en 2.0%. Verder zijn aan de modelinstellingen geen veranderingen aangebracht.



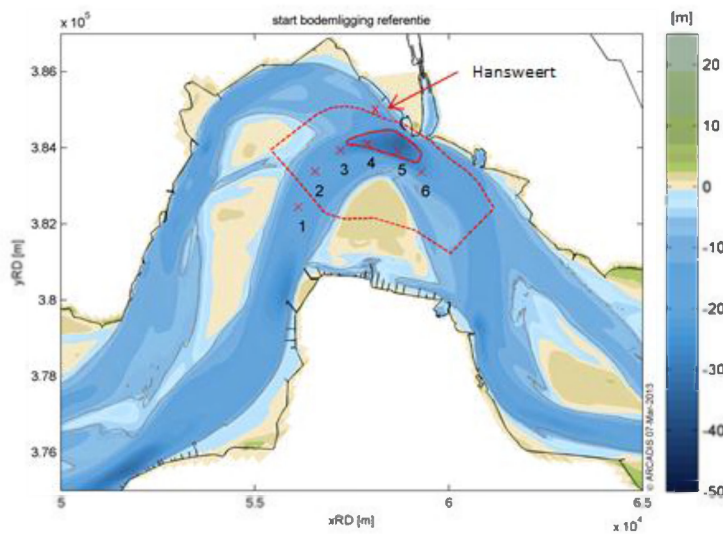
Figuur 5.1: Overzicht rekenroosters

5.3 INSPELEN

Om een gevoel te krijgen voor de verschillen tussen de 2D en 3D simulaties volgen eerst de verschillen die optreden tijdens de inspeelsimulaties. Hierdoor zijn eventuele effecten van de schematisatie te onderscheiden van fysische effecten. We beschouwen hiertoe de eerste simulatiedagen. Allereerst worden de waterstanden en stroomsnelheden met elkaar vergeleken, gevolgd door eventuele 3D stromingseffecten in de 3D simulatie. Daarna worden de verschillen in sedimentatie en erosie bekeken. Tot slot worden de verschillen in de bodemschuifspanning behandeld.

5.3.1 BODEMLIGGING

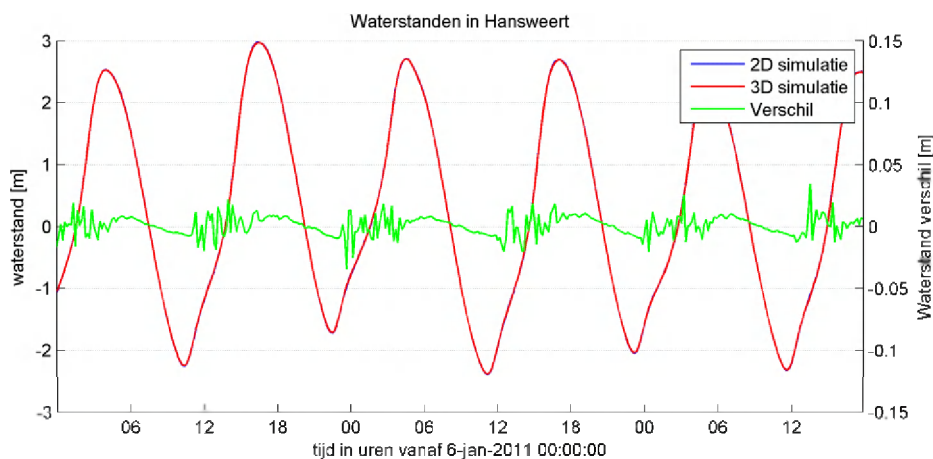
Net als in de voorgaande studies, gebruiken we de werkelijke bodemligging, welke eerst wordt ingespeeld over één morfologisch jaar. Dit wordt gedaan voor zowel de 2D- als de 3D-simulatie. De bodem die aan het eind van deze simulaties is berekend, zal vervolgens in paragraaf 5.4 worden doorgestart voor een referentiesimulatie, waarin uiteraard geen aanpassingen zijn gedaan, en voor de opgevulde-put-simulatie, waarbij de Put van Hansweert is opgevuld.



Figuur 5.2 Bodemligging aan het eind van de 2D inspeelsimulatie. Doorgetrokken rode lijn: Gedeelte van de Put van Hansweert dat wordt opgevuld. Onderbroken rode lijn: polygoon waarbinnen de hypsometrische curves worden bepaald. Ook aangegeven is de ligging van de monitoringstations (rode kruisjes), met bijbehorende nummers

5.3.2 RESULTATEN: WATERSTANDEN

Figuur 5.3 toont berekende waterstandstijdseries bij Hansweert voor zowel de 2D als de 3D simulatie. De figuur laat duidelijk zien dat voor beide simulaties vrijwel exact dezelfde waterstanden worden berekend. De groene lijn toont een klein verschil tussen beide simulaties dat binnen de fouten marge van het model valt.

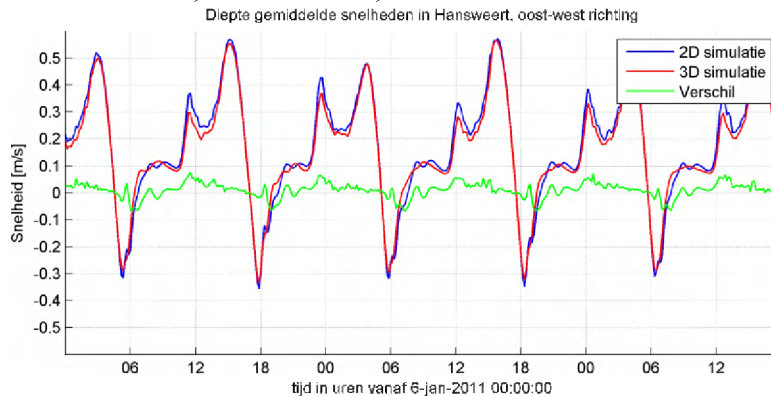


Figuur 5.3 Waterstanden als functie van de tijd in meetlocatie Hansweert. Blauw: 2D simulatie; rood: 3D simulatie; groen: verschil. Merk op dat de blauwe en rode lijnen vrijwel volledig overlappen.

5.3.3 RESULTATEN: STROMINGEN

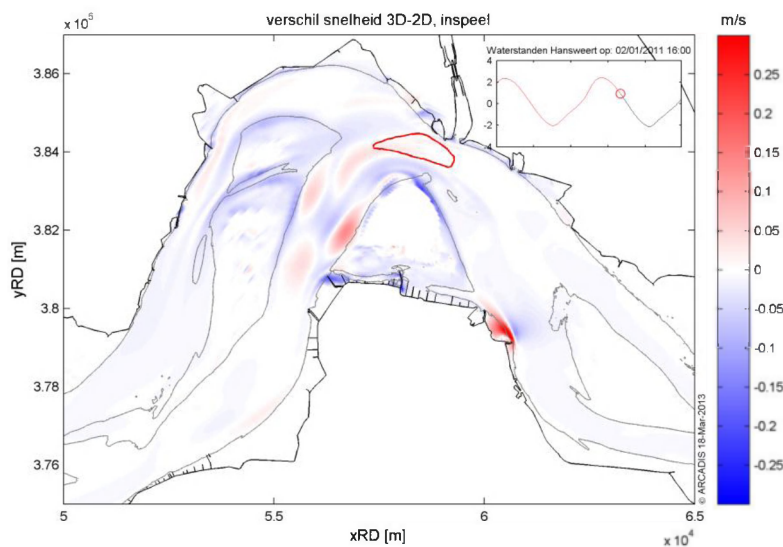
Ter illustratie van het verschil tussen de 2D en de 3D-simulatie toont figuur 5.4 berekende tijdseries van de dieptegemiddelde stroming bij Hansweert (zie figuur 5.2) voor zowel de 2D- als de 3D-simulatie. De dieptegemiddelde ebsnelheden zijn voor de 2D en 3D-simulatie vergelijkbaar op dit station. De

dieptegemiddelde vloedsnelheden zijn voor de 3D-simulatie iets kleiner dan die voor de 2D-simulatie. Op andere stations kan dit juist andersom zijn.



Figuur 5.4: Diepte gemiddelde stroomsnelheid als functie van de tijd in meetpunt Hansweert. Blauw: 2D simulatie; rood: 3D simulatie; groen: verschil. Positieve waarden representeren stroming landinwaarts; negatieve waarden representeren stroming zeewaarts.

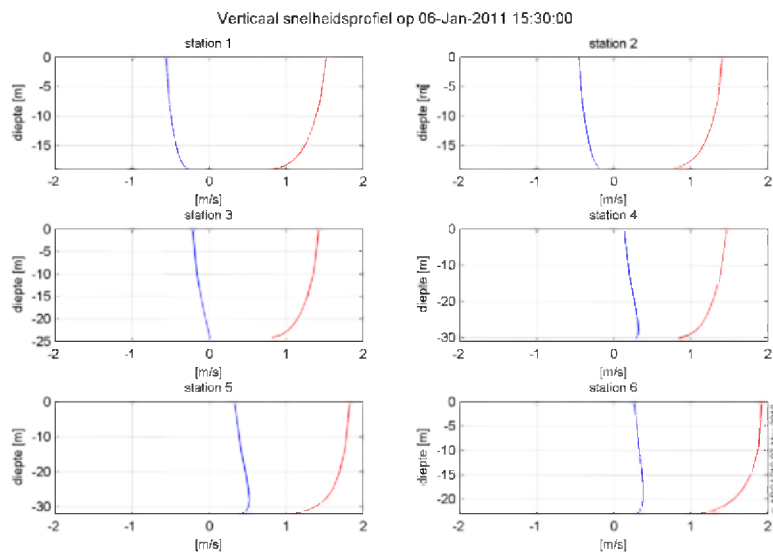
Figuur 5.5 toont een voorbeeld van het verschil in dieptegemiddelde snelheid tussen de 3D- en 2D-simulatie in een 2DH perspectief in de eb fase van het getij. De dieptegemiddelde snelheid is afwisselend groter of kleiner in de 3D- dan in de 2D-simulatie maar de 3D-snelheden lijken vooral in de buitenbocht iets hoger te zijn dan de 2D-snelheden. Dit betekent dat 3D-effecten een rol kunnen spelen in dit gebied.



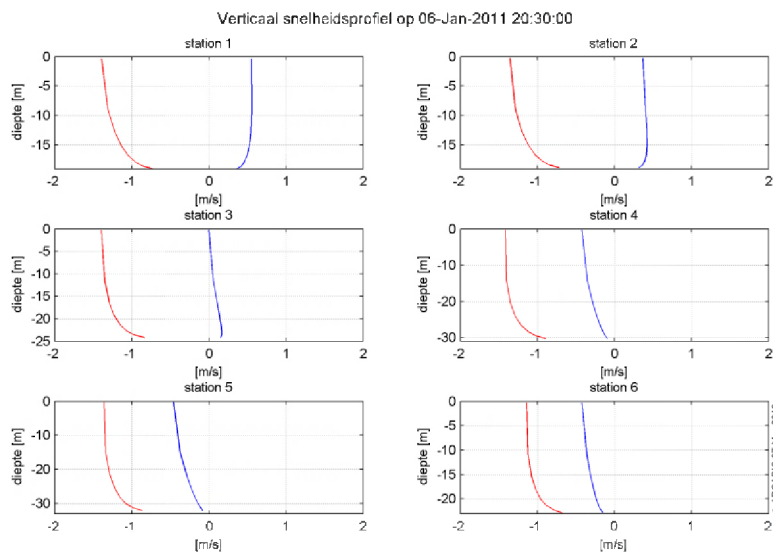
Figuur 5.5: Verschil in dieptegemiddelde snelheid tussen de 2D- en 3D-simulatie tijdens zeewaartse stroming, gedurende het begin van de inspeel simulatie. De figuur laat zien dat de snelheden in het 3D domein in de 3D simulatie over het algemeen lager liggen dan in de 2D simulatie.

5.3.4 RESULTATEN: VERTICAAL SNELHEIDSPROFIEL

Figuur 5.6 en figuur 5.7 tonen de verticale snelheidsprofielen in het 3D domein in zes observatiepunten, gelegen in de hoofdgeul, tijdens maximale vloed,- en ebstroom. De figuren laten zien dat het model in 3D niet altijd een logaritmisch toenemend snelheidsprofiel berekent. Hierdoor kan de bodemschuifspanning in het 3D model afwijken van die in het 2D model. Dit kan een ander sedimentatie en erosie patroon tot gevolg hebben.



Figuur 5.6: Verticaal snelheidsprofiel in zes observatiepunten in het 3D domein, tijdens maximale vloedstroom. Rood: snelheid in de Oost-West richting; blauw: snelheid in de Noord-Zuid richting. De nummers van de stations refereren naar de nummers in figuur 5.2.

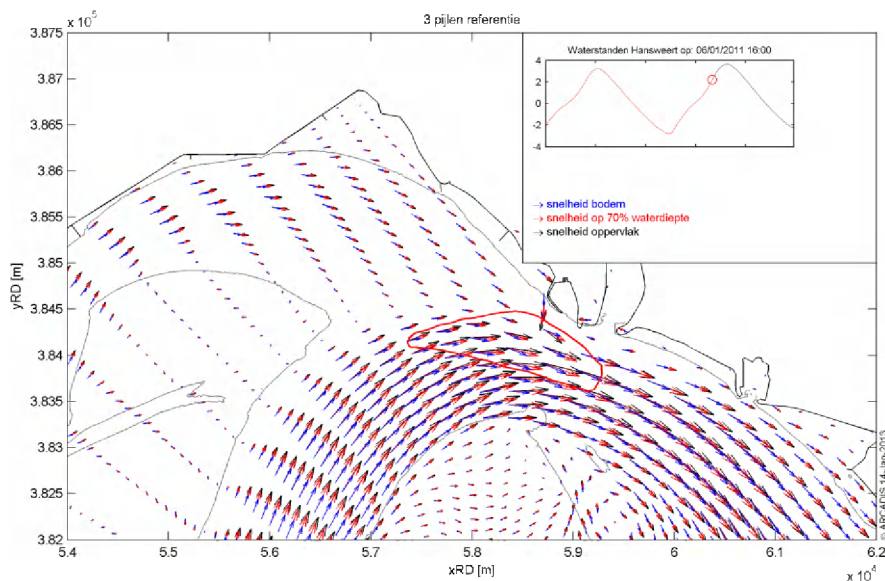


Figuur 5.7: Verticaal snelheidsprofiel in zes observatiepunt in het 3D domein. Rood: snelheid in de Oost-West richting; blauw: snelheid in de Noord-Zuid richting. De nummers van de stations refereren naar de nummers in figuur 5.2.

5.3.5 RESULTATEN: 3D EFFECTEN

Om eventuele 3D stromingseffecten goed in kaart te brengen beschouwen we het snelheidsveld rondom de put in drie lagen; de bovenste laag, de laag op 70% van de waterdiepte en de bodemlaag. Figuur 5.8 toont deze zogenaamde 3-pijlenplot tijdens maximale vloedstroom. De figuur laat nabij de put een rotatie zien van de stromingsvector over de diepte. Dit betekent dat er een verschil zit in de richting van de stroming aan de bodem en aan het oppervlak. Naast het effect van de put op de horizontale snelheid, werd ook verwacht dat de put van invloed zou zijn op het verticale snelheidspatroon. Door de grote diepteverschillen is het aannemelijk dat er een verticale circulatie stroming ontstaat in de put. Een

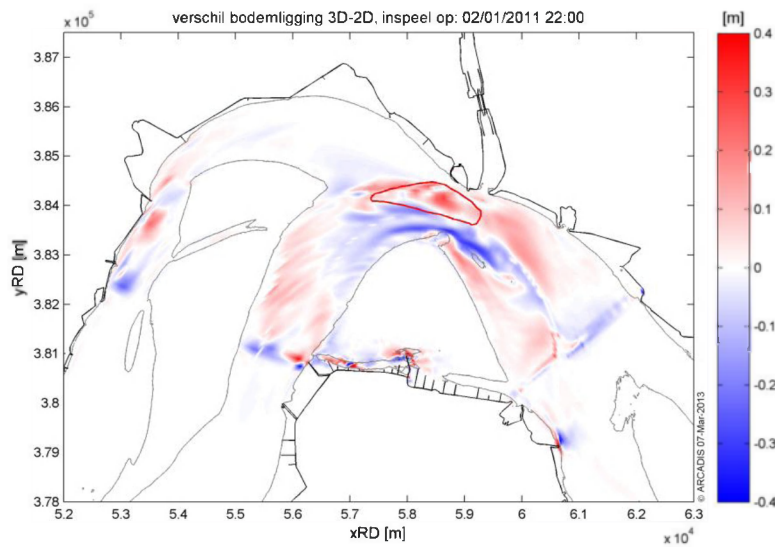
dergelijk stromingspatroon is echter nauwelijks waargenomen in de modelresultaten. Misschien is het aantal verticale lagen hiervoor nog te beperkt. Toch laat de 3-pijlenplot zien dat er 3D effecten optreden in de omgeving van de put, doordat de horizontale richting van de stroming verandert met de diepte.



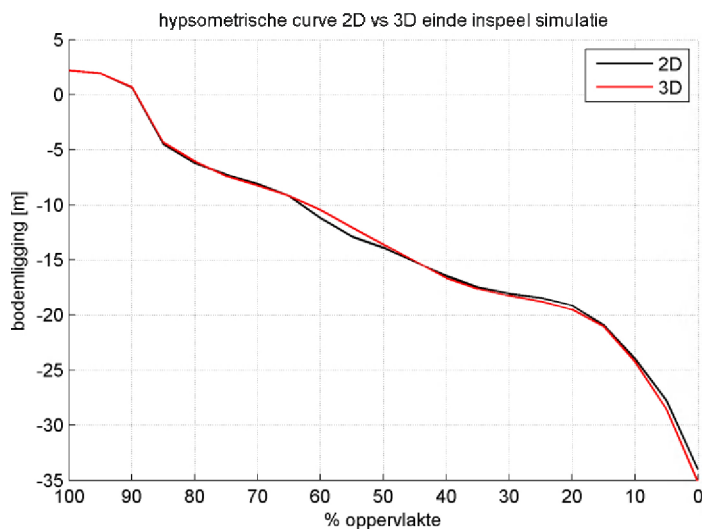
Figuur 5.8: Snelheidsvector veld op drie verschillende dieptes tijdens maximale vloedstromingen in Hansweert.

5.3.6 RESULTATEN: VERSCHIL BODEMLIGGING

Om ervoor te zorgen dat de bodemontwikkeling niet wordt beïnvloed door eventuele opstarteffecten, is de bodemontwikkeling toegestaan na één stromingsdag. Figuur 5.9 laat het verschil in bodemligging zien tussen de 3D- en 2D-simulaties na de eerste dag dat bodemontwikkeling is toegestaan (dus na 2 stromingsdagen). Doordat een morfologische acceleratiefactor is toegepast, komt dit neer op de bodemontwikkeling na ongeveer 25 dagen. Een rode kleur betekent een diepere bodemligging voor de 3D simulatie, een blauwe kleur een ondiepere bodemligging. Het valt op dat de put in de 3D-simulatie sterker wordt uitgeruimd dan in de 2D-simulatie. Daarnaast is de mate van sedimentatie ten zuiden van de put ook sterker in de 3D-simulatie. Dit is ook te zien wanneer we de hypsometrische curves van de 2D- en 3D-simulaties aan het einde van de inspeelsimulatie met elkaar vergelijken (figuur 5.10). Hieruit blijkt dat in de diepere delen meer sediment wordt geërodeerd en dat dit sediment vervolgens in de ondiepere delen van de put weer wordt afgezet. Dit wordt veroorzaakt door een groter sedimenttransport in de 3D berekeningen dan in de 2D-simulatie en is het gevolg van een grotere snelheidsgradiënt aan de bodem en daardoor grotere bodemschuifspanning dan in 2D. Door dit verschil zou de 3D-simulatie eigenlijk opnieuw moeten worden afgeregeld op sedimenttransport en morfologie. Voor het doel van deze studie is deze eerste 3D-schatting echter voldoende en laten we resultaten zien van zowel de 2D- als de 3D-simulatie.



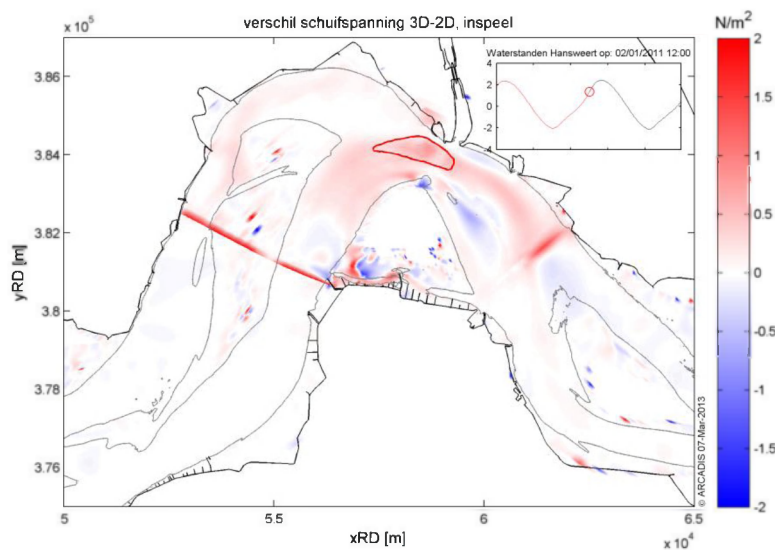
Figuur 5.9: Verschil in bodemontwikkeling tussen 3D en 2D na één stromingsdag.



Figuur 5.10: Hypsometrische curves aan het einde van de inspeelsimulatie van het gebied binnen de polygoon die is getoond in figuur 5.2.

5.3.7 BODEMSCHUIFSPANNING

Figuur 5.11 toont het verschil in bodemschuifspanning tijdens maximale vloedstroomsnelheid. In deze figuur is te zien dat de bodemschuifspanning in de 3D-simulatie inderdaad groter is dan in de 2D-simulatie. Daarnaast valt op dat er verschillen in bodemschuifspanning optreden op de randen van het 2D en 3D-domein. Dit wordt veroorzaakt door de plotselinge overgang van 2D naar 3D en andersom. Een meer geleidelijke overgang met tussendomeinen (bijvoorbeeld van 2D naar 3D met 4 lagen en daarna naar 3D met 8 lagen te gaan) zou deze randeffecten beperken. De rekentijd zou hierdoor echter onaanvaardbaar hoog worden. Voor het doel van deze studie gaan we ervan uit dat de randeffecten voldoende ver van het interessegebied liggen en om eventuele invloeden hiervan uit te sluiten interpreteren we de resultaten van zowel de 2D- als de 3D-simulaties.



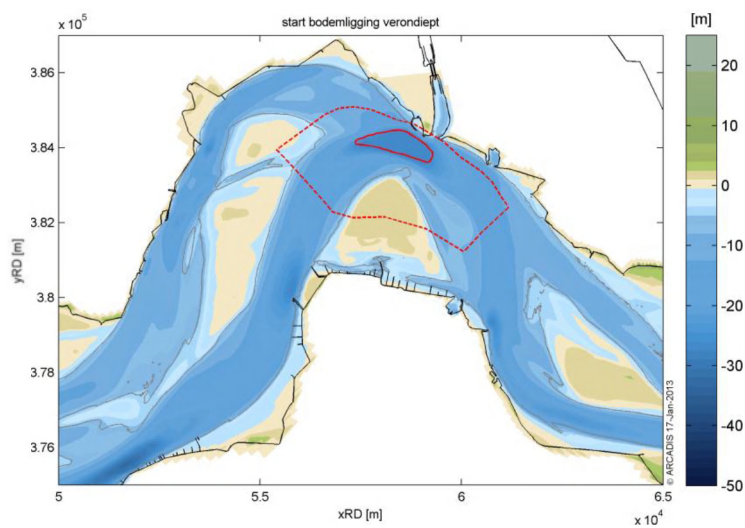
Figuur 5.11: Bodemschuifspanning verschil tussen de 2D en 3D simulatie. De grote overgang op de westrand van het 2D en 3D domein is opvallend.

5.4 OPVULLEN DIEPE PUT

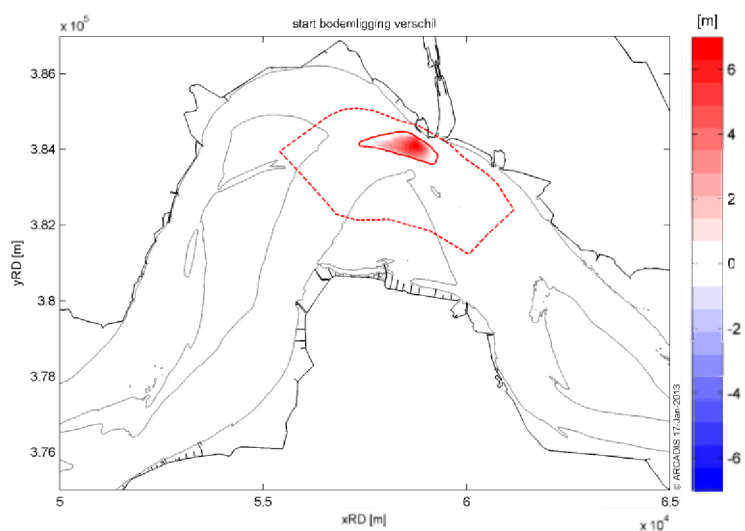
Deze sectie beschrijft het effect van het opvullen van de Put van Hansweert op de hydrodynamica en de morfodynamica in het gebied. Zowel de resultaten voor de 2D- als voor de 3D simulaties worden behandeld.

5.4.1 BODEMLIGGING

Figuur 5.12 toont de bodem rondom het 3D domein met een opgevulde put. Er is voor gekozen om de Put van Hansweert op te vullen binnen de gesloten rode contour tot een bodemhoogte van NAP-27m. Dit houdt in dat ongeveer 2.5 Mm³ sediment is toegevoegd. Figuur 5.13 toont het verschil tussen beide bodemkaartjes. Merk op dat binnen de rode gesloten contour niet alleen de waterdiepte is afgenomen, maar ook de dikte van de sedimentlaag is toegenomen. Er is in feite 2.5 Mm³ sediment aan het systeem toegevoegd, aangezien het benodigde sediment niet elders aan de Westerschelde is onttrokken.



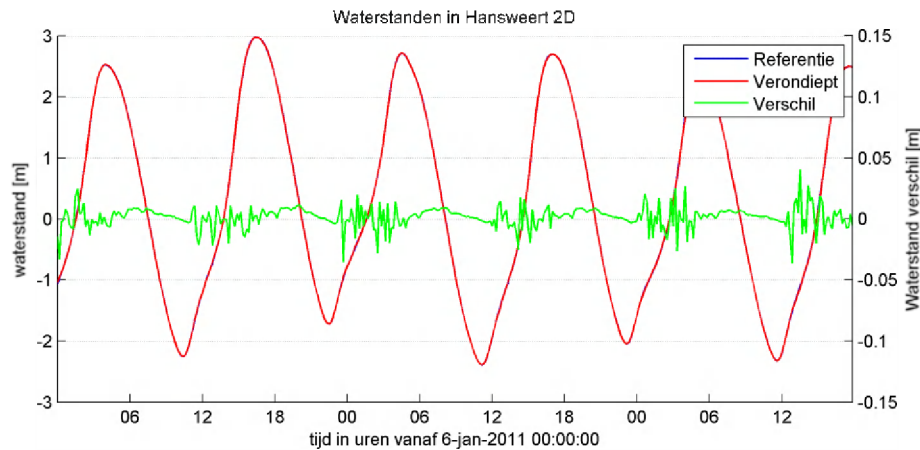
Figuur 5.12: Bodemligging aan het eind van de 2D inspeelsimulatie, waarbij het gebied binnen de doorgetrokken rode lijn is opgevuld tot 27 m. Onderbroken rode lijn: polygoon waarbinnen de hypsometrische curves worden bepaald.



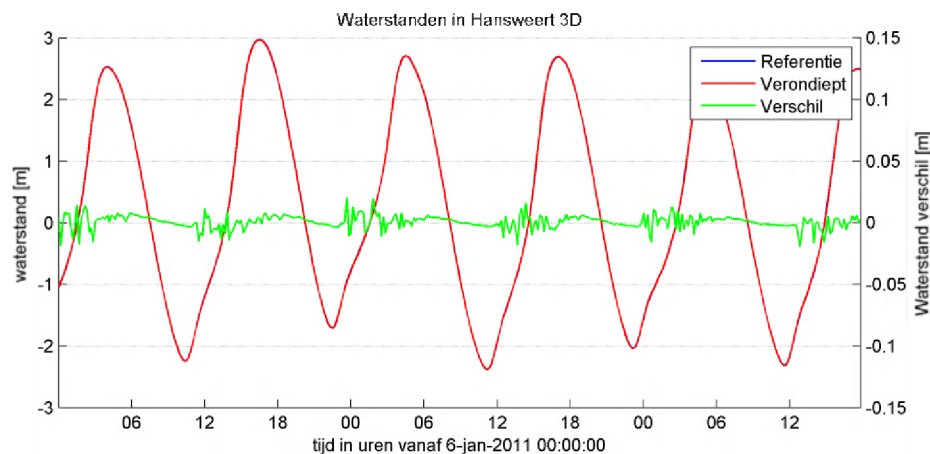
Figuur 5.13 Vershil tussen Figuur 5.2 en Figuur 5.12.

5.4.2 RESULTATEN: WATERSTANDEN

Figuur 5.14 en figuur 5.15 tonen de waterstanden in Hansweert zien voor de referentie- en opgevulde-put-situatie, voor, respectievelijk, de 2D- en 3D-simulatie. De figuren laten duidelijk zien dat het opvullen van de Put van Hansweert tot NAP-27 m een verwaarloosbaar kleine invloed heeft op de waterstanden in het gebied.



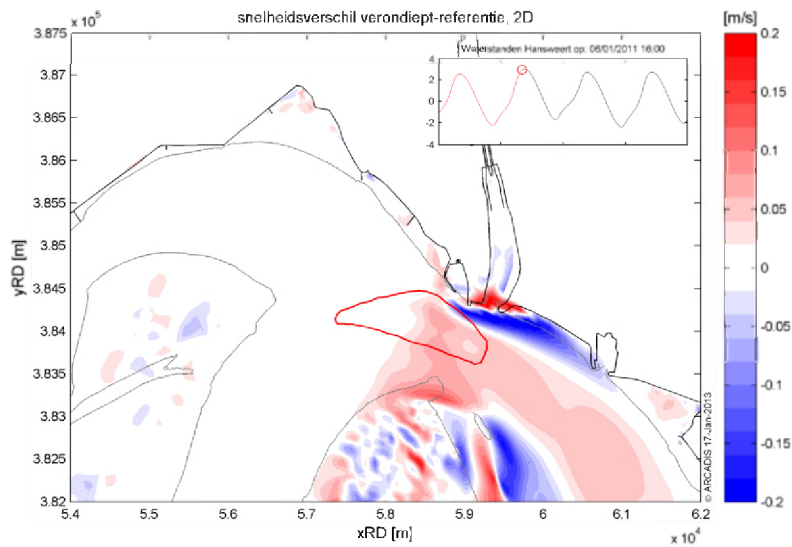
Figuur 5.14: Waterstanden in monitoringstation Hansweert voor de 2D referentie-simulatie (blauwe lijn), de 2D opgevlude-put-simulatie (rode lijn) en het verschil tussen de simulaties (groene lijn).



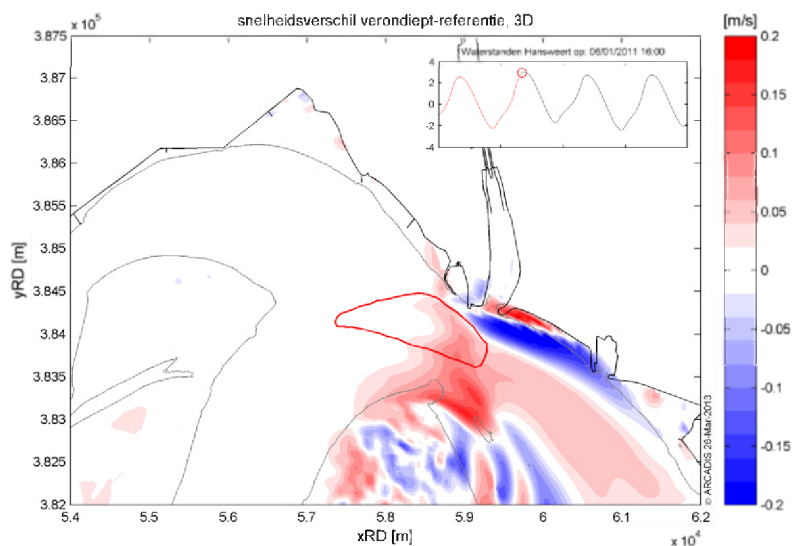
Figuur 5.15: Waterstanden in monitoringstation Hansweert voor de 3D referentie simulatie (blauwe lijn), de 3D opgevlude-put-simulatie (rode lijn) en het verschil tussen de simulaties (groene lijn).

5.4.3 RESULTATEN: STROMINGEN

Figuur 5.16 en figuur 5.17 tonen de invloed van het opvullen van de put tot NAP-27 m op de dieptegemiddelde stroomsnelheid voor respectievelijk de 2D- en 3D-simulaties tijdens maximaal hoogwater. Beide figuren laten duidelijk zien dat de stroomsnelheden ter hoogte van de put, maar ook oostelijk van de put, toenemen als gevolg van het opvullen. Het water krijgt minder ruimte en gaat daardoor sneller stromen. De verschil figuren tonen voor zowel de 2D- als de 3D-simulaties verschillen in dezelfde orde van grootte. Echter, het is te zien dat ten zuidwesten van de put de snelheid meer is toegenomen in 3D-simulatie dan in de 2D-simulatie. Dit hangt samen met een sterkere sedimentatie in dit gedeelte voor de opgevlude 3D-simulatie dan voor de opgevlude 2D-simulatie (zie paragraaf 5.4.4), waardoor het doorstroomoppervlak in 3D kleiner is dan in de 2D-simulatie. Als gevolg hiervan neemt de stroomsnelheid hier sterker toe in de 3D-simulatie, dan in de 2D-simulatie.

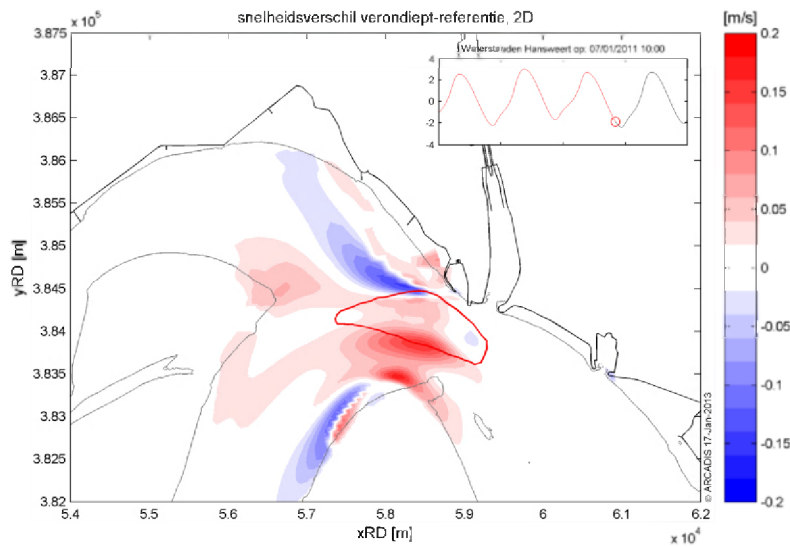


Figuur 5.16: Dieptegemiddeld snelheidsverschil tussen het verondiepte en referentie scenario, voor de 2D simulatie, tijdens maximaal hoogwater. Rood: toename snelheid, blauw: afname snelheid.

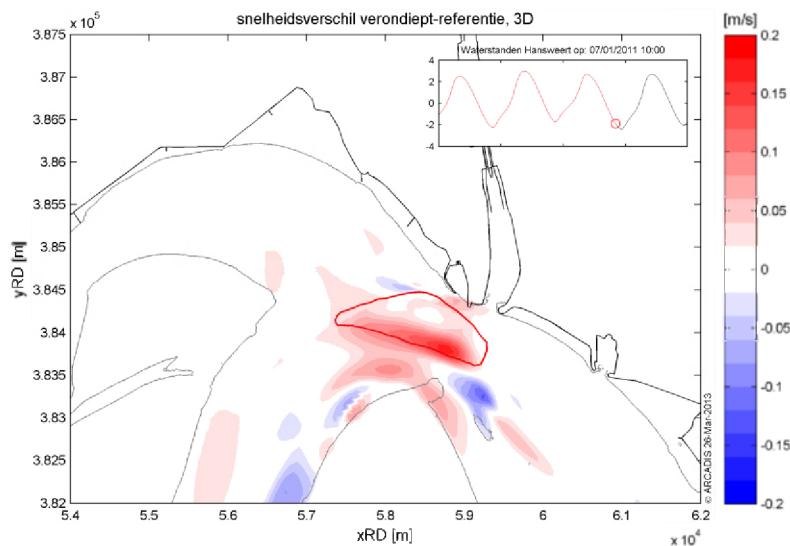


Figuur 5.17: Diepte gemiddelde snelheidsverschil tussen het verondiepte en referentie scenario, voor de 3D simulatie, tijdens maximale vloedstroming. Rood: toename snelheid, blauw: afname snelheid.

Figuur 5.18 en figuur 5.19 tonen de invloed van het opvullen van de put op de dieptegemiddelde stroomsnelheid voor respectievelijk de 2D- en 3D-simulatie tijdens maximaal laagwater. Ook nu blijkt dat het water door het opvullen minder hinder van de grote diepte verschillen in de put ondervindt waardoor de stroomsnelheden in de put toenemen. Net als tijdens hoogwater, zijn de snelheidsverschillen in put voor de 3D- en 2D-simulatie in de zelfde orde van grootte. Echter, de 2D-simulatie vertoont een afname van de stroomsnelheid in een smalle band ten noordwesten van de put, terwijl dit in 3D niet te zien is. In de sedimentatie en erosie figuren (paragraaf 5.4.4) is hier geen sterke bodemverandering te zien. Daardoor lijkt het erop dat deze stromingsverandering in 2D een gevolg is van een uitstralend effect van de bodemverandering in de put.



Figuur 5.18: Effect van verondiepen van de put op de dieptegemiddelde stroomsnelheid voor de 2D-simulatie, tijdens maximaal laagwater. Rood: toename snelheid, blauw: afname snelheid.

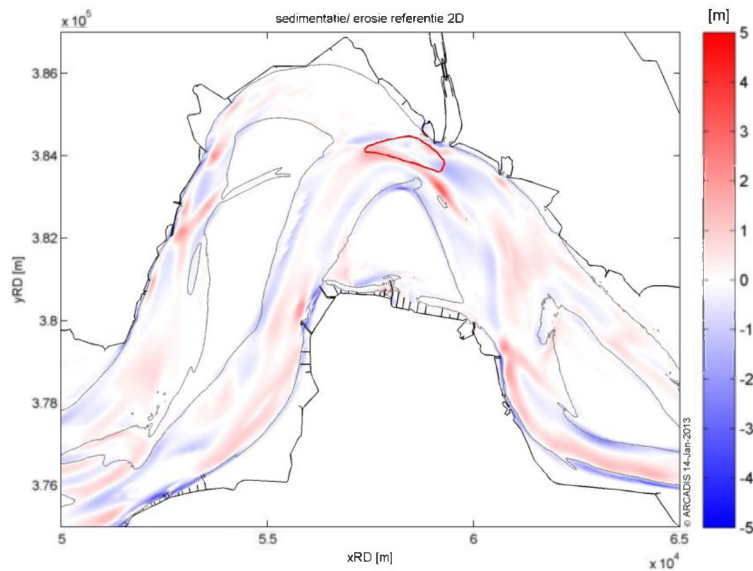


Figuur 5.19: Effect van verondiepen van de put op de dieptegemiddelde stroomsnelheid voor de 3D-simulatie, tijdens maximaal laagwater. Rood: toename snelheid, blauw: afname snelheid.

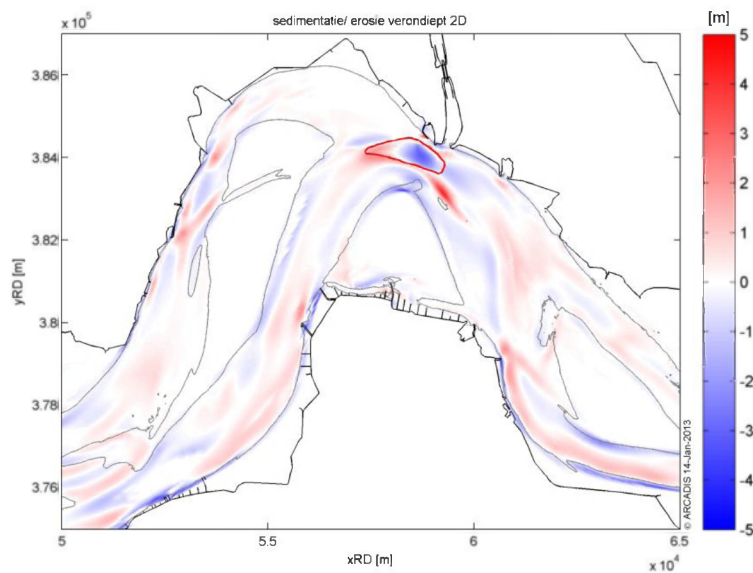
5.4.4 SEDIMENTATIE/ EROSIE

Figuur 5.20 toont het sedimentatie-erosie-patroon voor het 2D-referentiescenario en figuur 5.21, voor het opgevulde-put-scenario. In het referentiescenario treedt er in de put een beperkte erosie op door de betrekkelijke dunne erodeerbare laag in dit gebied. In het opgevulde-put-scenario is de diepte in de put gereduceerd door deze op te vullen met erodeerbaar materiaal. Hierdoor is er meer sediment beschikbaar voor transport. Figuur 5.21 laat zien dat er mede daardoor ook weer erosie optreedt en de put voor het grootste deel weer wordt uitgeruimd. Figuur 5.22 toont het verschil tussen het 2D referentiescenario en het 2D opgevulde-put-scenario. De erosie in de put is ook hierin duidelijk zichtbaar. Het geërodeerde sediment wordt in de nabije omgeving van de put weer afgezet. In het oorspronkelijke erosiegebied ten oosten van de put treedt er door het opvullen van de put minder erosie op.

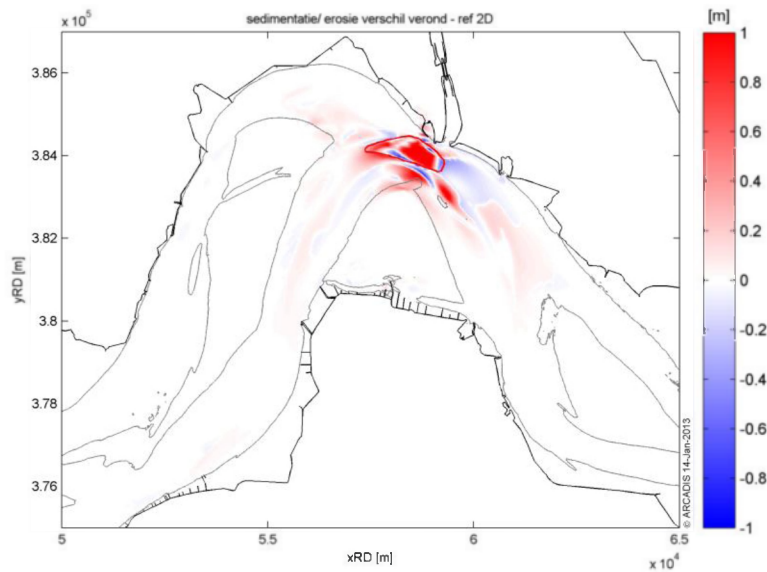
Figuur 5.23 toont de hypsometrische curve aan het einde van de 2D-simulaties voor het referentiescenario en het opgepulde-put-scenario. Duidelijk is te zien dat de ondiepe put weliswaar weer wordt uitgeruimd maar nog niet tot de oorspronkelijke diepte wordt teruggebracht.



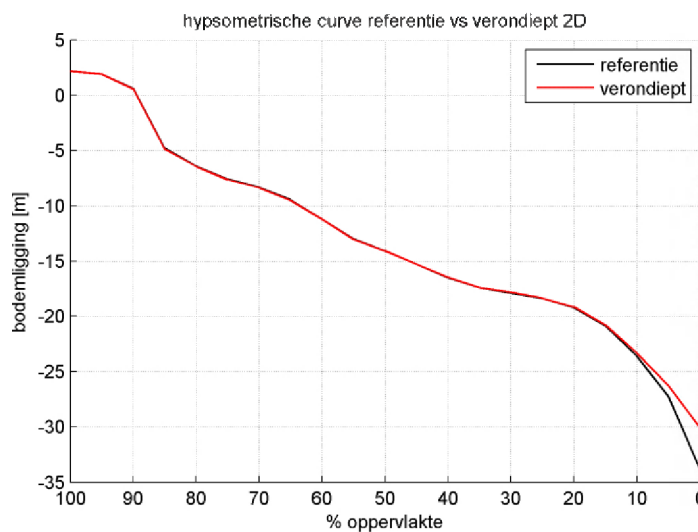
Figuur 5.20: Sedimentatie en erosie voor het 2D referentiescenario in het eerste morfologische jaar na de inspeel simulatie. Rood: sedimentatie; blauw: erosie.



Figuur 5.21: Sedimentatie en erosie voor het 2D opgepulde-put-scenario in het eerste morfologische jaar na de inspeel simulatie. Rood: sedimentatie; blauw: erosie



Figuur 5.22: Verschil sedimentatie/erosie tussen het 2D referentie- en 2D opgevulde-put-scenario, aan het einde van de simulatie. Rode gebieden: sedimentatie/ erosie effect versterkt in het opgevulde-put-scenario; blauwe gebieden: sedimentatie/ erosie effect afgezwakt in het opgevulde-put-scenario.



Figuur 5.23: Hypsometrische curve aan het einde van de 2D referentie-simulatie en aan het einde van de 2D opgevulde-put-simulatie.

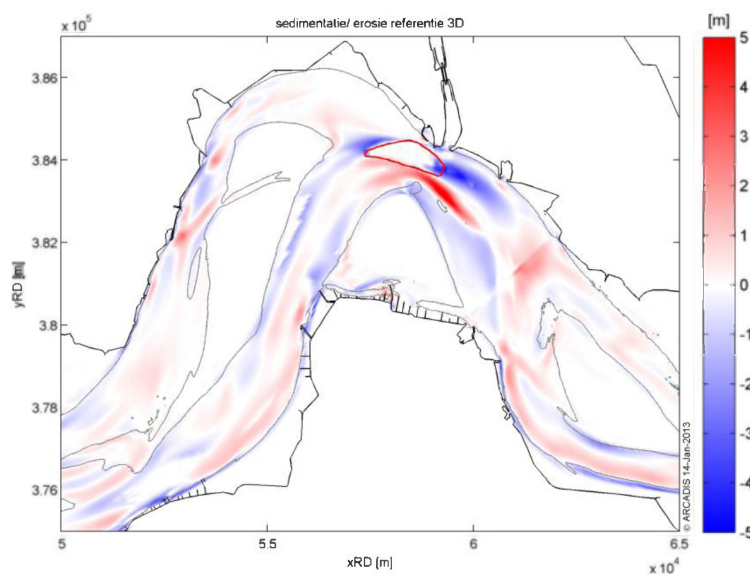
De sedimentatie en erosie patronen zijn voor de 3D-simulatie sterker dan voor de 2D-simulatie (vergelijk figuur 5.24 met figuur 5.20). Dit verschil wordt veroorzaakt door de snelheidsgradiënt bij de bodem die in de 3D-simulatie expliciet wordt uitgerekend door het k-epsilon turbulentiemodel, terwijl in de 2D-simulatie een logaritmisch snelheidsprofiel wordt aangenomen. Dit verschil veroorzaakt een verschil in bodemschuifspanning en daardoor in transport. Dit verschil wordt logischerwijs groter wanneer 3D-effecten belangrijker worden.

Mede hierdoor is in de 3D-simulatie het beschikbare sediment boven de niet-erodeerbare laag tijdens de inspeelsimulatie al uit de put geërodeerd. In de daaropvolgende simulaties kan er in de put geen verdere erosie optreden. In het scenario met opgevulde put is er wel weer sediment beschikbaar voor erosie (figuur 5.25). Figuur 5.26 laat zien dat het sediment dat uit de put erodeert met name in zuidoostelijke

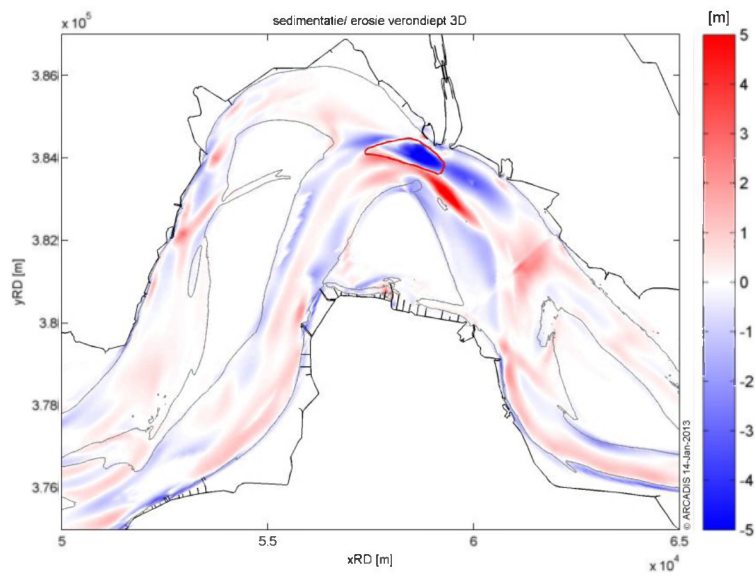
richting en in mindere mate in de hoofdgeul dichtbij de put wordt afgezet. Figuur 5.26 laat ook zien dat het erosiegebied in de oorspronkelijke situatie direct ten oosten van de put (zie figuur 5.24 en figuur 5.25) minder sterk aanwezig is in het opgevulde-put-scenario.

Figuur 5.27 toont de hypsometrische curve aan het einde van de 3D-referentiesimulatie en aan het einde van de opgevulde-put-simulatie. Deze figuur laat zien dat het meeste sediment dat in opgevulde-put-scenario werd aangebracht binnen één morfologisch jaar weer uit de put is verdwenen.

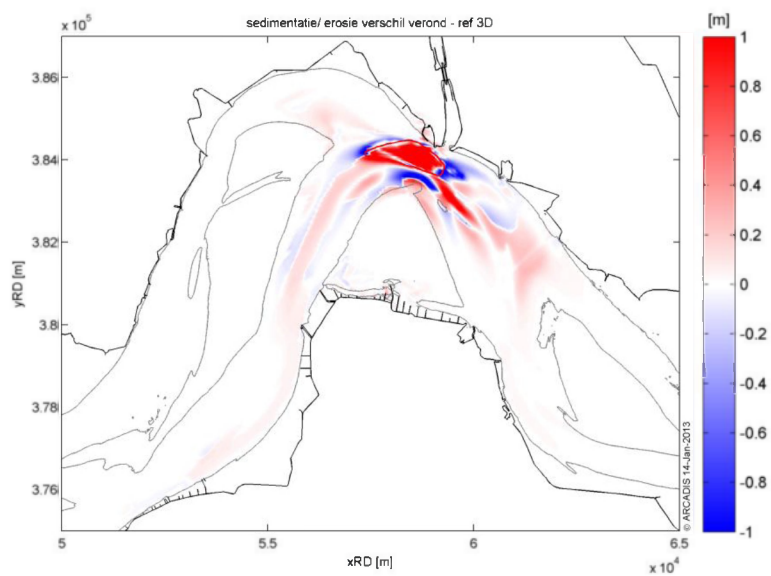
Zowel uit de 2D- als uit de 3D-simulaties leiden we af dat de ingreep in de Put van Hansweert alleen invloed heeft op de sedimentatie en erosie nabij de put. Het sediment dat uit de put wordt verwijderd wordt in de directe omgeving van de put weer afgezet en heeft dus geen invloed op de morfologie in andere gebieden van de Schelde.



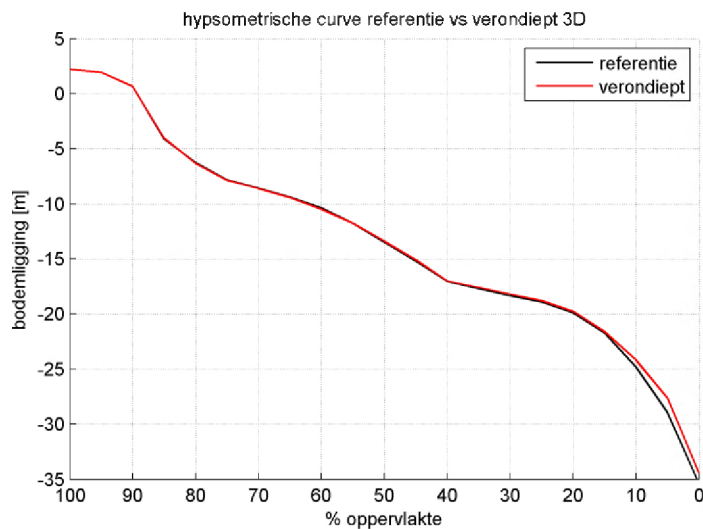
Figuur 5.24: Sedimentatie en erosie voor het 3D referentiescenario in het eerste morfologische jaar na de inspeelsimulatie. Rood: sedimentatie; blauw: erosie.



Figuur 5.25 Sedimentatie en erosie voor het 3D opgevulde-put-scenario in het eerste morfologische jaar na de inspeelsimulatie. Rood: sedimentatie; blauw: erosie.



Figuur 5.26: Verschil sedimentatie/erosie tussen het 2D referentie en 2D opgevulde-put-scenario, aan het einde van de simulatie. Rode gebieden: sedimentatie/ erosie effect versterkt in het opgevulde-put-scenario; blauwe gebieden: sedimentatie/ erosie effect afgezwakt in het opgevulde-put-scenario.



Figuur 5.27: Hypsometrische curve aan het einde van de 3D referentiesimulatie en aan het einde van de 3D opgevulde-put-simulatie

5.5 CONCLUSIES

De conclusies van dit hoofdstuk zijn als volgt samengevat:

- Opvullen van de Put van Hansweert met zand tot NAP-27 m leidt volgens de berekeningen tot een toename van de stroomsnelheid rondom de put.
- Het aangebrachte zand wordt volgens de berekeningen voor een groot deel binnen één morfologisch jaar weer uit de put geërodeerd.
- Het uit de put geërodeerde zand wordt in de nabije omgeving van de put afgezet. Lokaal leidt dit tot toename van sedimentatie of afname van erosie. Het opvullen van de put heeft een zeer beperkte invloed op de sedimentatie en erosie patronen elders in het estuarium.
- De vergelijking tussen de uitkomsten van de 2D- en 3D-simulaties laat zien dat bij de Put van Hansweert 3D-effecten een rol spelen.
- Het verdient aanbeveling resultaten van 3D-simulaties te vergelijken met snelheidsmetingen zoals die bijvoorbeeld zijn uitgevoerd in de Put bij Borssele.

6

Simulaties opvullen diepe delen Westerschelde

6.1 INLEIDING

Dit hoofdstuk behandelt de resultaten van een modelstudie naar de mogelijkheden tot het reduceren van de getijslag in de Westerschelde door het opvullen van de diepe delen. Als gevolg van menselijke ingrepen in het estuarium gedurende de tweede helft van de twintigste eeuw is de amplificatie van de getijslag toegenomen, vooral in het deel van het estuarium stroomopwaarts Hansweert (LTV V&T-rapport G-8). De mogelijkheden van het reduceren van de getijslag zijn en worden op verscheidene manieren onderzocht binnen LTV V&T. Het beter inzetten van te storten (of aan te voeren) sediment is daarin een belangrijke lijn. Op basis van de in V&T ontwikkelde kennis over de indringing van het getij (o.m. rapport G-7) wordt verwacht dat via de doorstroomoppervlakte, met name de geulen, er invloed uitgeoefend kan worden. Hierop wordt in dit hoofdstuk dieper ingegaan.

Allereerst zal worden onderzocht wat het effect is op de getijslag wanneer van de hele hoofdgeul en diepe delen van de nevengeulen de doorstroomoppervlakte wordt beperkt. Volledige toepassing hiervan is uiteraard het meest onrealistische scenario, maar geeft wel een beeld van wat er theoretisch maximaal mogelijk is. Daarna zullen effecten van het toevoegen van sediment in het oostelijk gebied, het westelijk gebied en in specifieke andere delen worden onderzocht.

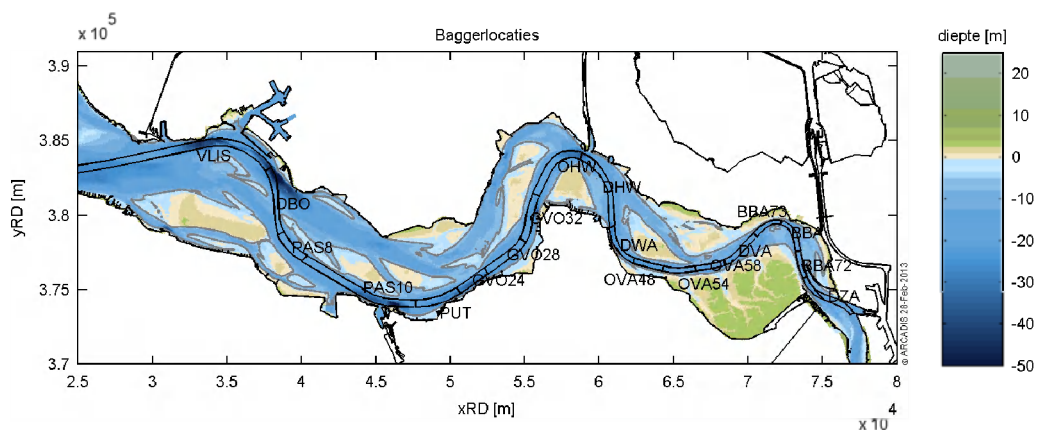
6.2 METHODE

Om tot een uitspraak te komen of het mogelijk is om de getijslag te reduceren doormiddel van het slim aanbrengen van sediment, zal de 2DH versie van het Delft3D Schelde model, zoals beschreven in hoofdstuk 2, worden gebruikt. Om er voor te zorgen dat de getijslag niet wordt beïnvloed door het herverdelen van sediment als gevolg van natuurlijke sediment transporten, zal er morfostatisch worden gerekend. Dit betekent dat de bodemligging niet verandert gedurende de simulaties.

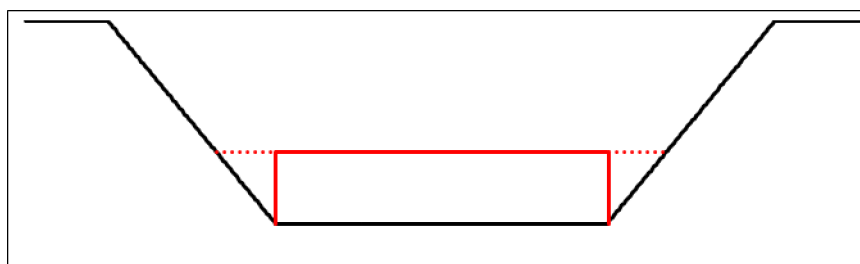
6.3 BODEMCRITERIA

Onderzocht worden de mogelijkheden om de getijslag te reduceren, door verbeterd sedimentbeheer. Randvoorwaarde hierbij is dat het huidige morfologische karakter, vastgelegd in de doelstelling 'behoud meergeulenstelsel' blijft bestaan. Als gevolg hiervan is het niet wenselijk om de meeste nevengeulen te verondiepen en moet omgegaan worden met het risico dat de platen extra zullen worden verhoogd (wordt ook als onwenselijk gezien). Hierdoor resteren de locaties in de hoofdgeul en in de diepe delen van de Everingen. Hoewel de Everingen ook een nevengeul is, is deze geul nog voldoende breed en zal een verondieping niet eenvoudig leiden tot het degenereren van die geul.

Voor het bepalen van de diepte tot waar verondiept kan worden zullen de huidige baggerdieptes inclusief 1 m overdiepte worden aangehouden. De diepte van de hoofdgeul wordt modelmatig teruggebracht tot 1 m onder de vereiste baggerdiepte. Aangezien de vereiste baggerdieptes variëren per baggerpolygoon, varieert ook de mate waarin de geulen worden aangepast. De namen van de polygonen met daarin de vereiste baggerdieptes en de dieptes tot waar zal worden verondiept zijn getoond in Tabel 6.1. De ligging van de baggerlocaties is getoond in Figuur 6.1. Deze polygonen vormen het uitgangspunt, maar het aantal van deze polygonen dat per scenario zal worden gebruikt verschilt (zie paragraaf 6.4). Voor de breedte van de verondieping zal in principe worden uitgegaan van de breedte van het baggerpolygoon. Echter, om te voorkomen dat sediment zo wordt aangebracht dat het niet aansluit met het talud, wordt ook aan weerszijden van de geul het profiel aangepast (figuur 6.2). In figuur 6.3 is de huidige bodemligging getoond, met daarin de polygonen die worden aangehouden voor het verondiepen van de geulen.



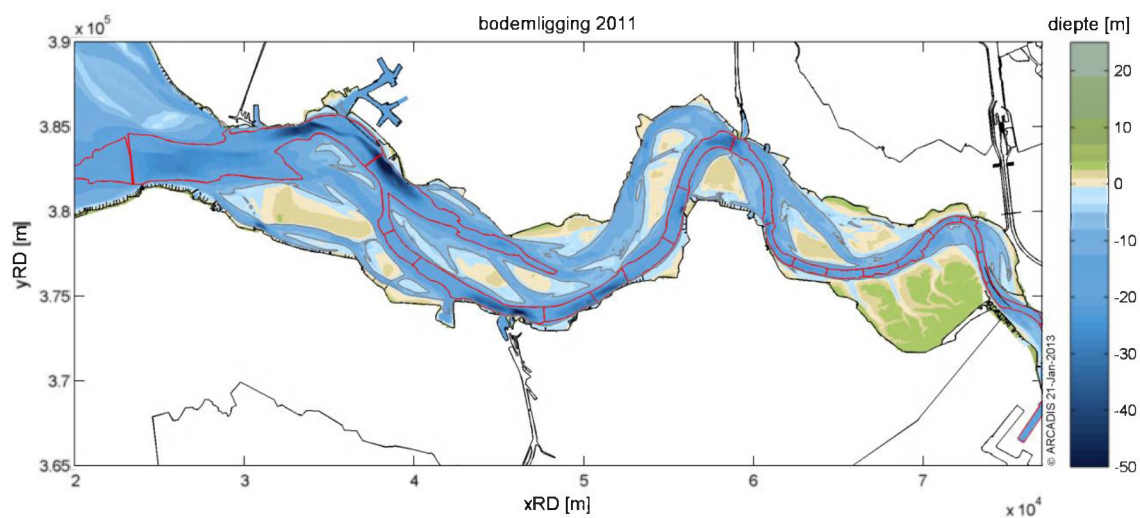
Figuur 6.1: Bodemligging 2011, met de namen en contouren van de baggerlocaties.



Figuur 6.2: Weergave van het opvullen van de geul. Zoals te zien wordt niet alleen in het diepste gedeelte van de geul sediment aangebracht, maar wordt er gezorgd voor een geleidelijke overgang naar het talud.

Naam baggerpolygonen	Vereiste diepte	'Stort'diepte
BBA	17.50	18.50
BBA72	17.50	18.50
BBA73	17.50	18.50
DBO	17.10	18.10
DHW	17.37	18.37
DVA	17.48	18.48
DWA	17.39	18.39
DZA	17.58	18.58
GVO24	17.24	18.24
GVO28	17.24	18.24
GVO32	17.24	18.24
OHW	17.30	18.30
OVA48	17.40	18.40
OVA54	17.43	18.43
OVA58	17.15	18.15
PAS10	17.15	18.15
PAS8	17.15	18.15
PUT	17.20	18.20
VLIS	17.02	18.02
VR	16.98	17.98
WIEL	16.98	17.98
ZSCH	17.60	18.60

Tabel 6.1: overzicht van de gebruikte baggerpolygonen, met de bijbehorende diepte en de aangehouden dieptes voor de verondieping.



Figuur 6.3: Bodemligging 2011 met de polygonen waarbinnen de geulen zullen worden verondiept.

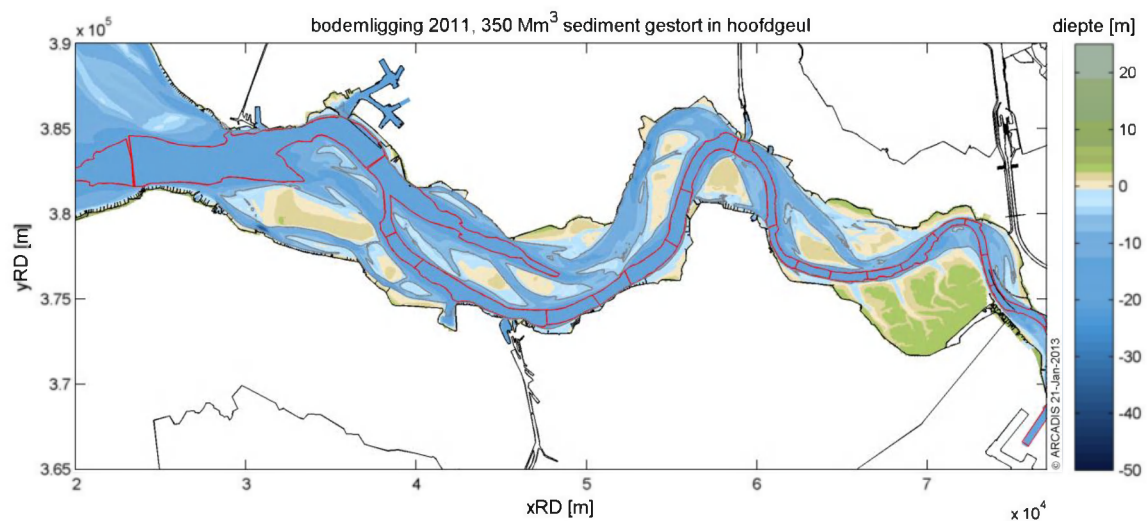
6.4 SCENARIO'S

Deze sectie presenteert de gesimuleerde scenario's met de daarbij behorende bodemligging.

In tabel 6.2 zijn de uitgevoerde scenario's weergegeven. Scenario T_0 kent geen aanpassingen en zal daarom ter referentie dienen. Voor scenario T_1 is van de hele hoofdgeul en de Everingen het doorstroomoppervlak aangepast, volgens de polygonen in figuur 6.3 en tabel 6.2. In totaal kan er in dit scenario 350 Mm^3 sediment aangebracht worden. Dit geeft een beeld van de maximaal mogelijke reductie via aanpassing van de doorstroomoppervlakte, met behoud van de vaargeul. De bodem voor dit scenario is te zien in figuur 6.4.

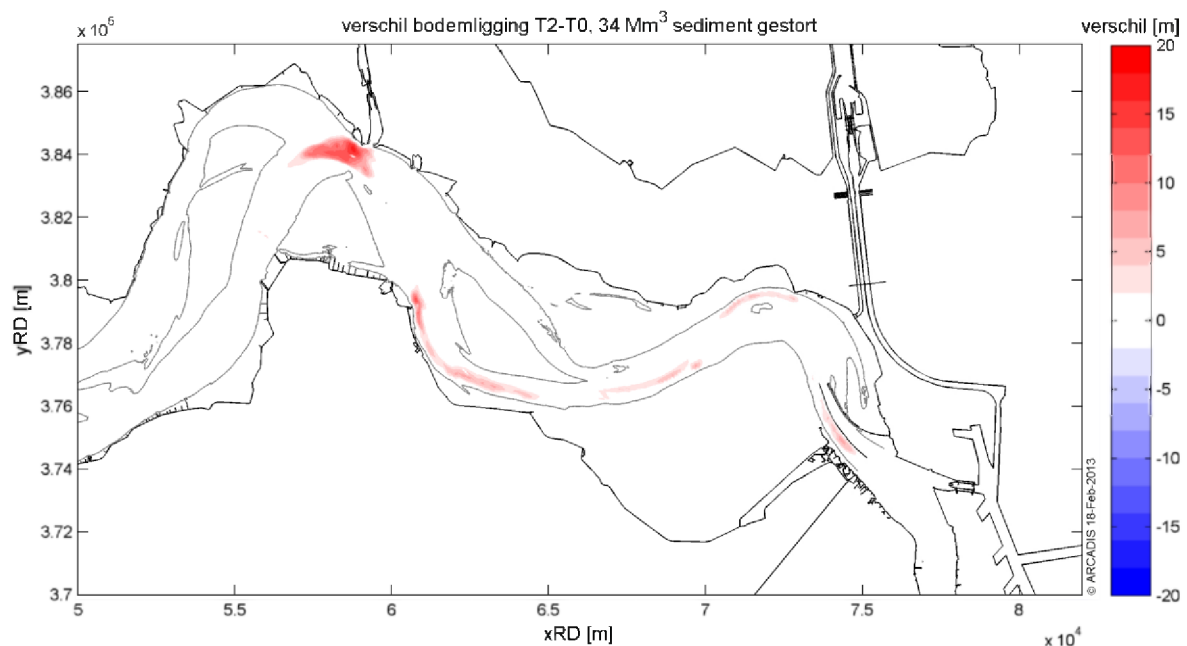
Scenario	Omschrijving	Volume aangebracht [Mm^3]
T_0	Referentie, geen aanpassingen	0
T_1	Hele hoofdgeul en Everingen verondiept	350
T_2	Alleen domein 3 verondiept (oostelijk van Ossensisse)	34
T_3	Alleen domein 3 verondiept (oostelijk van Ossensisse) en geulen versmald	77
T_4	Alleen put van Hansweert verondiept	16
T_5	Alleen domein 1 en 2 verondiept (westelijk van Ossensisse)	316

Tabel 6.2: Overzicht van de gesimuleerde scenario's.



Figuur 6.4: bodem voor scenario T_1 .

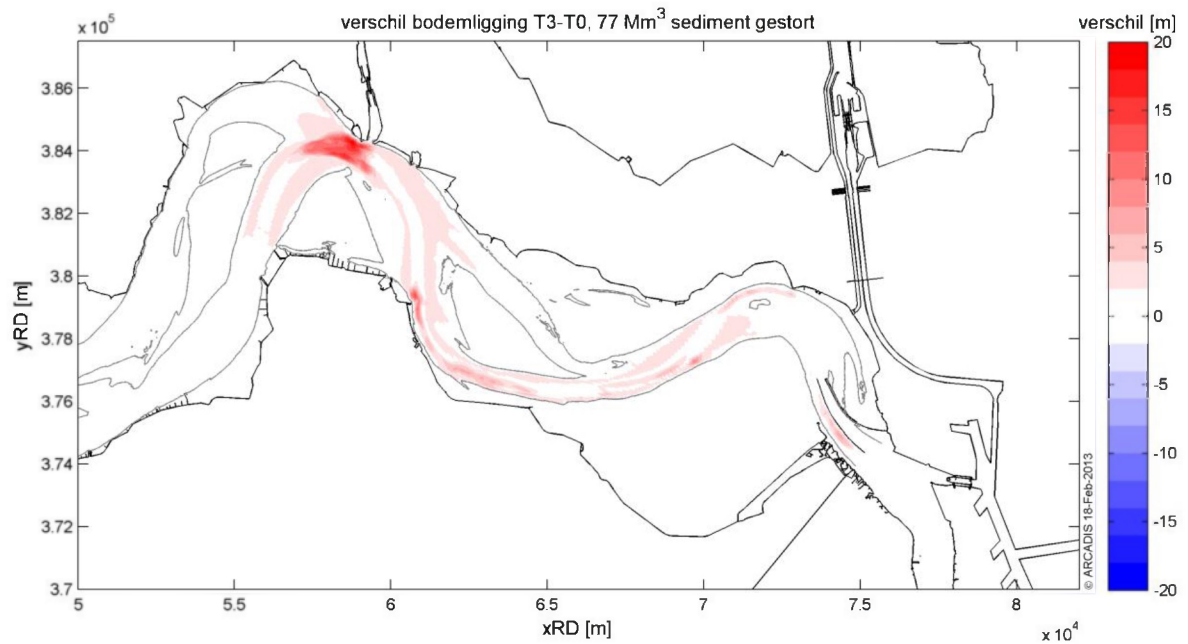
De toename van de amplificatie van het getij vindt vooral plaats in de delen stroomopwaarts Hansweert (Ossensisse). Daarom is de verwachting dat verondiepen van deze delen relatief meer invloed heeft dan verondiepen in het hele gebied. In scenario T_2 wordt dit onderzocht door alleen ten oosten van Ossensisse in de geulen te verondiepen. In figuur 6.5 is de verschilbodem te zien tussen scenario T_0 en scenario T_2 . Uit tabel 6.2 blijkt dat het totale volume ten opzichte van scenario T_1 aanzienlijk is afgenomen.



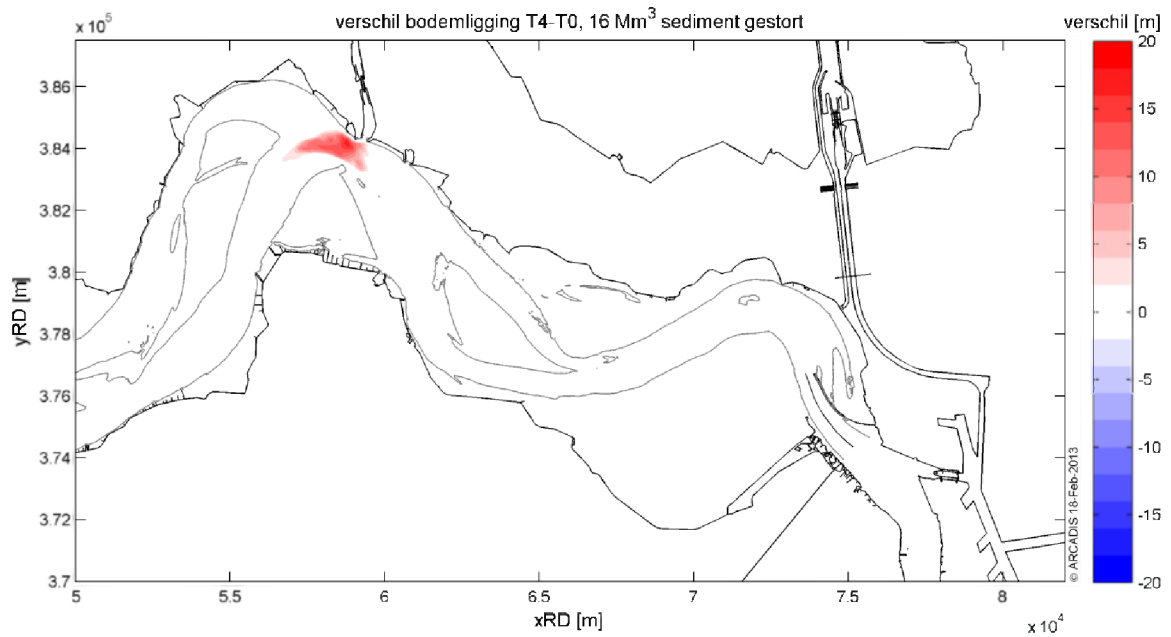
Figuur 6.5: Verschil bodemligging tussen scenario T2 en T0. In totaal is er in scenario T2 34 Mm³ aangebracht.

Er worden nog twee andere scenario's beschouwd met ingrepen in het oostelijke gedeelte. In scenario T3 (figuur 6.6) is de geul niet alleen verondiept (zoals in scenario T2), maar ook versmald. Voor de breedte van het diepste gedeelte van de hoofdgeul is westelijk van Hansweert 500 m en oostelijk 370 m aangehouden. Vervolgens is het talud met ongeveer 3 m verondiept, waarbij er weer op is gelet dat er geen 'blokken' sediment ontstaan. In totaal is voor dit scenario 77 Mm³ sediment aangebracht.

In scenario T4 wordt alleen het effect van het verondiepen van de Put van Hansweert onderzocht. Hiervoor is in totaal 16 Mm³ sediment nodig (figuur 6.7).

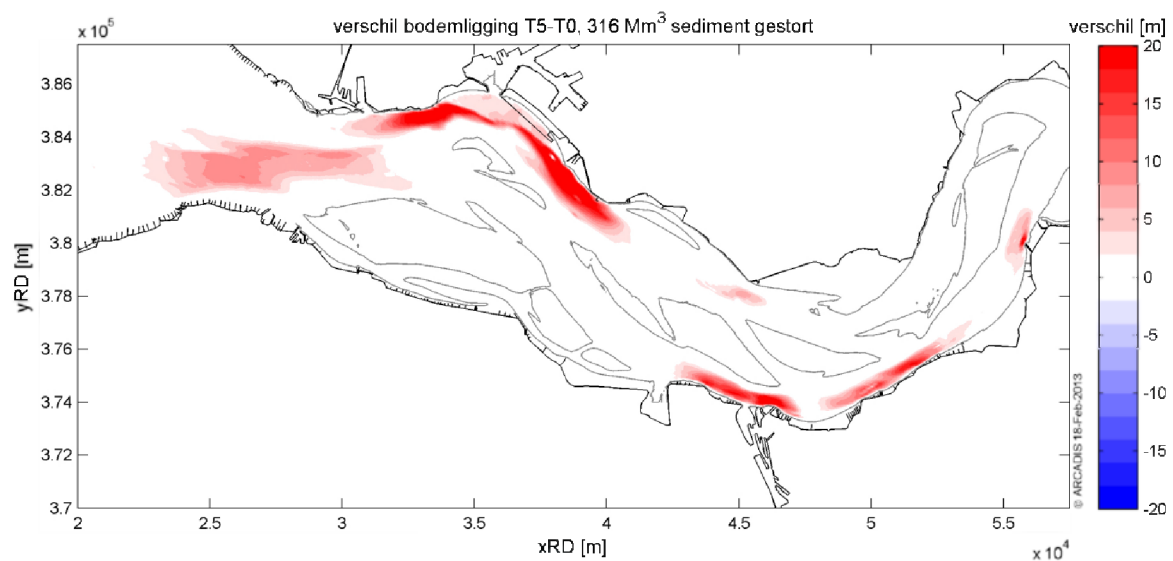


Figuur 6.6: Verschil bodemligging tussen scenario T3 en T0. In scenario T3 is er 77 Mm³ aangebracht.



Figuur 6.7: Verschil bodemligging tussen scenario T4 en T0. In scenario T4 is er 16 Mm³ aangebracht.

Tot slot wordt in scenario T3 het effect van het aanbrengen van sediment ten westen van Ossensisse onderzocht (figuur 6.8). Dit is een relevant scenario (ondanks het hoge volume van 316 Mm³), omdat er in werkelijkheid verruiming optreedt in dit gedeelte. Als gevolg van die verruiming kan de getijdegolf makkelijker naar binnen lopen, met vergrote amplificatie van het getij tot gevolg. Daarnaast, is er veel ruimte beschikbaar, waardoor het effect van de sedimenttoename op de morfologie beperkter is.



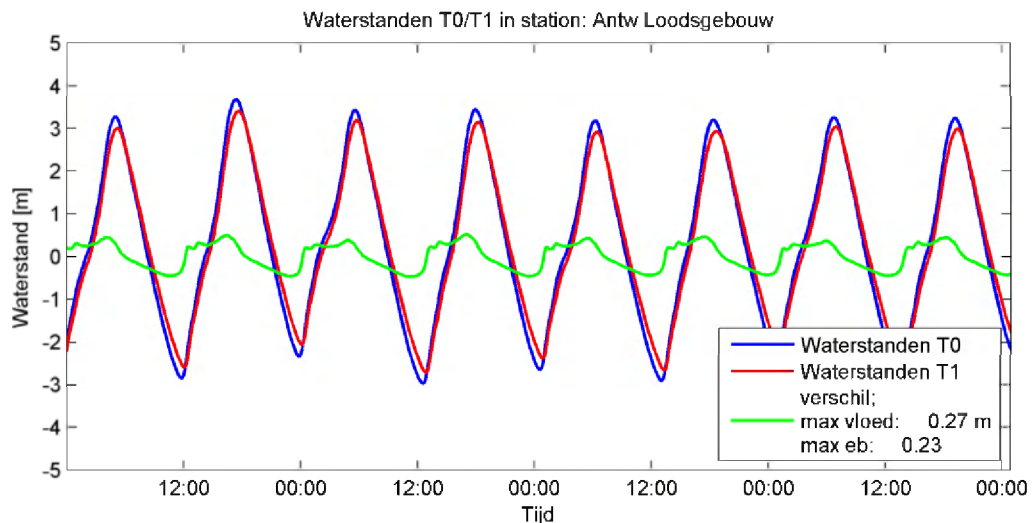
Figuur 6.8: Verschil bodemligging tussen scenario T5 en T0. In scenario T5 is er 316 Mm³ aangebracht.

6.5 RESULTATEN

6.5.1 GETIJSLAG

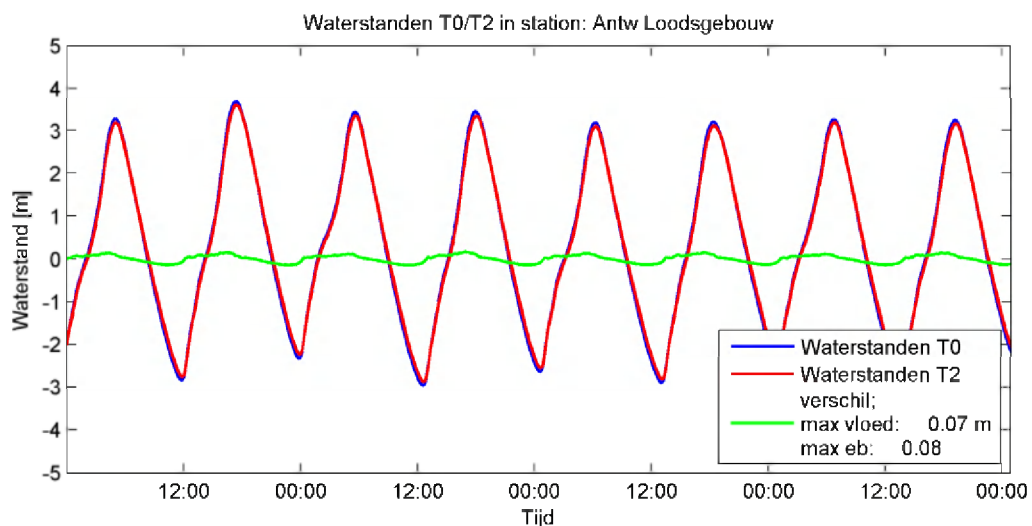
Deze sectie toont de resultaten van de berekeningen voor de verschillende simulaties met betrekking tot de getijslag bij het station Antwerpen Loodsgebouw. De figuren tonen de berekende waterstanden voor de simulaties met en zonder ingrepen, waarbij geen rekening wordt gehouden met de verschillende getijdcomponenten.

In figuur 6.9 zijn de waterstanden getoond voor scenario T0 en T1 en het verschil in waterstand. De figuur laat zien dat door het verondiepen van de hele hoofdgeul en een gedeelte van de Everingen, er een reductie in de getij amplitude ontstaat. Tijdens maximaal hoogwater is de reductie 0,27 m en tijdens maximaal laagwater 0,23 m. In totaal verkleint deze ingreep dus de getijslag bij Antwerpen met 0,50 m. Daarnaast valt uit de figuur op te maken dat er een verschuiving optreedt van de getijde golf; maximaal laag- en hoogwater worden later bereikt dan in scenario T0.



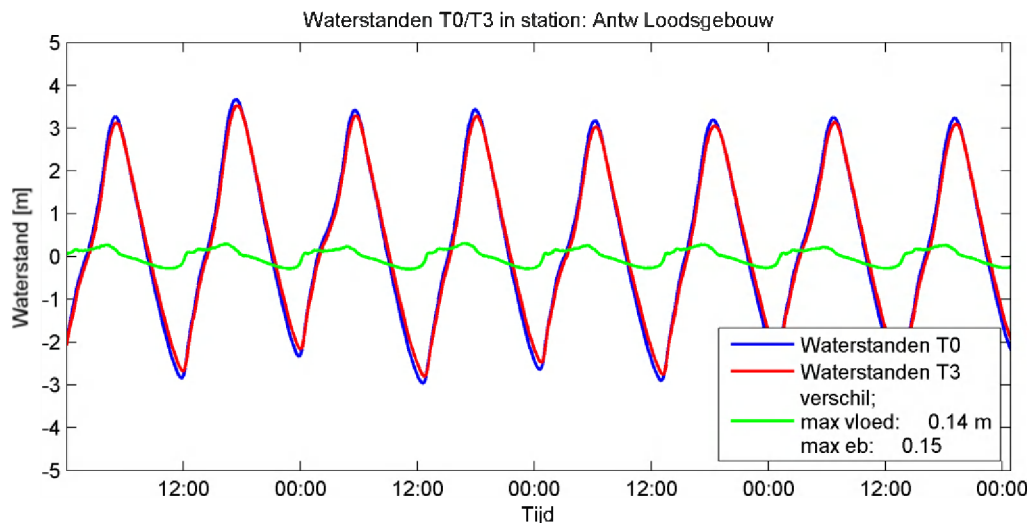
Figuur 6.9: Waterstanden in Antwerpen Loodsgebouw voor scenario T_0 en T_1 . Ook weergegeven is het verschil tussen de scenario's.

In figuur 6.10 zijn de waterstanden in Antwerpen Loodsgebouw getoond voor scenario T_2 . In dit scenario is dus alleen in het oostelijke gedeelte sediment aangebracht. De figuur laat zien dat er door deze ingreep een reductie in van 0,07 m tijdens maximaal hoogwater en 0,08 m tijdens maximaal laagwater kan worden bereikt, wat in totaal dus neerkomt op een reductie van 0,15 m. Daarnaast toont de figuur dat de aankomst van de totale getijde golf nauwelijks is veranderd door de ingreep.



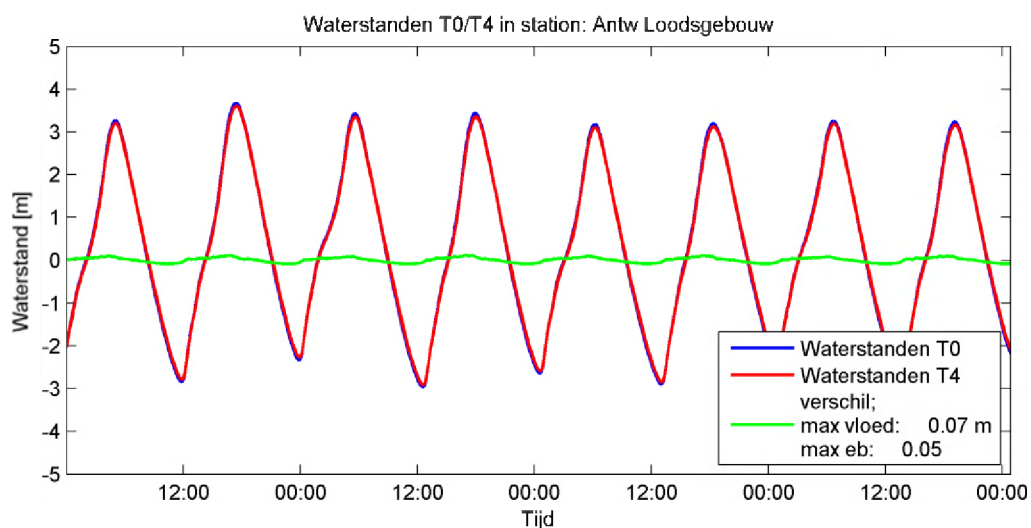
Figuur 6.10: Waterstanden in Antwerpen Loodsgebouw voor scenario T_0 en T_2 . Ook weergegeven is het verschil tussen de scenario's.

Wanneer we het aan te brengen volume in het oostelijke deel bijna verdubbelen door de geulen ook te versmallen (scenario T_3), dan verdubbelt ook de te bereiken reductie van de waterstand tijdens maximaal hoog en laagwater. Zoals in figuur 6.11 te zien is, is voor dit scenario de waterstand tijdens maximaal hoogwater met 0,14 m verlaagd en is de uitwijking tijdens maximaal laagwater met 0,15 m gereduceerd. In totaal betekent dit dus een reductie van de getijslag van 0,29 m. Daarnaast is ook de aankomst van de getijdegolf wat verlaat ten opzichte van scenario T_2 .



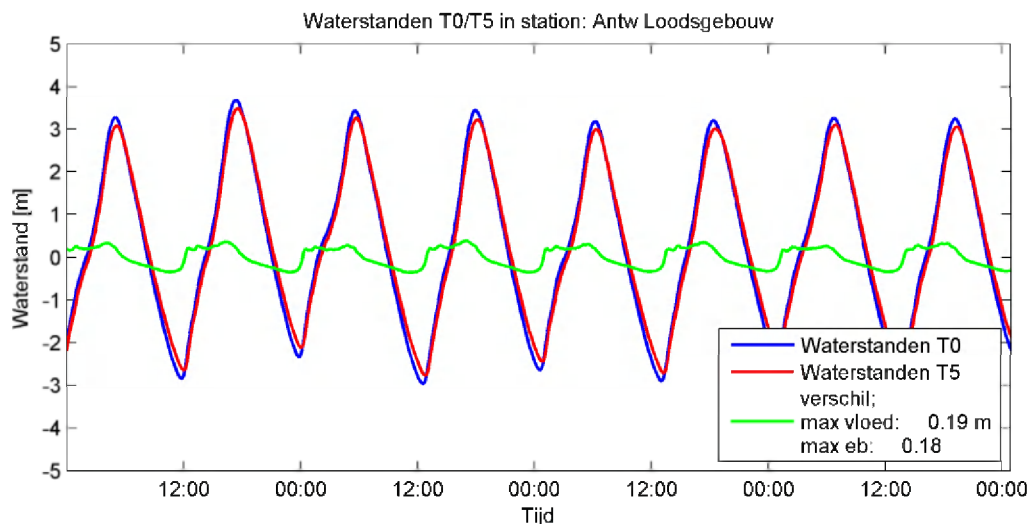
Figuur 6.11: Waterstanden in Antwerpen Loodsgebouw voor scenario T_0 en T_3 . Ook weergegeven is het verschil tussen de scenario's.

Wanneer alleen naar toegevoegd sediment ten oosten van Ossensisse wordt gekeken, kan verreweg het grootste gedeelte van het sediment worden aangebracht in de Put van Hansweert, zoals al bleek uit tabel 6.2. Aangezien aanbrengen in de Put van Hansweert geen direct negatief effectief heeft op de toegankelijkheid van het gebied met betrekking tot de scheepvaart, is het aantrekkelijk om het effect van aanbrengen in alleen de Put in kaart te brengen. In figuur 6.12 zijn de waterstanden van scenario's T_0 en T_4 getoond. Hieruit blijkt dat er door alleen in de Put van Hansweert sediment aan te brengen er een reductie van 0,07 m kan worden bereikt tijdens maximaal hoogwater en van 0,05 m tijdens maximaal laagwater. Dit komt dus neer op een totale reductie van 0,12 m. Het is opvallend dat, ondanks dat er in scenario T_4 maar 50 % van het totale volume van scenario T_2 wordt aangebracht, er toch een vergelijkbare reductie van de getijslag kan worden bereikt.



Figuur 6.12: Waterstanden in Antwerpen Loodsgebouw voor scenario T_0 en T_4 . Ook weergegeven is het verschil tussen de scenario's.

Tot slot zijn in figuur 6.13 de waterstanden voor scenario T_0 en T_5 getoond. Hieruit blijkt dat sedimenttoevoegingen alleen ten westen van Ossensisse een reductie van 0,19 m tijdens maximaal hoogwater en 0,18 m tijdens maximaal laagwater oplevert. In totaal komt dit neer op een reductie van 0,37 m. Ook komt voor scenario T_5 de getijdegolf wat later aan, dan voor scenario T_0 .



Figuur 6.13: Waterstanden in Antwerpen Loodsgebouw voor scenario T_0 en T_5 . Ook weergegeven is het verschil tussen de scenario's.

6.5.2 GETIJCOMPONENTEN

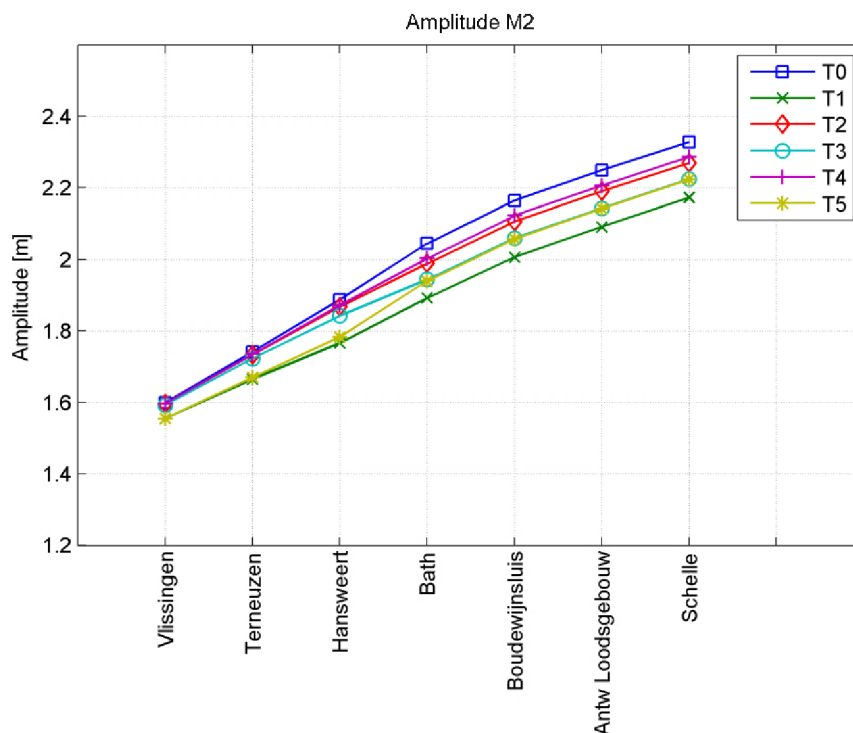
In de vorige sectie zijn alleen de resultaten behandeld van de getijslag in station Antwerpen Loodsgebouw. In deze sectie zullen we kijken naar de effecten van de ingrepen in meerdere stations langs de Westerschelde. Dit zullen we doen aan de hand van getijdecomponenten. Aangezien het dubbeldaags maangetij de aandrijvende factor is van de getijdegolf in de Westerschelde, zullen we vooral kijken naar de M_2 component, en de eerste harmonische component, M_4 . De getijdecomponenten zijn berekend aan de hand van de gemodelleerde waterstanden met het programma `t_tide.m`. Omdat met dit programma een benadering wordt gemaakt van de getijdegolf, is het van belang om bij het analyseren van de resultaten rekening te houden met de foutenmarge. De foutenmarges zijn vergelijkbaar voor alle scenario's. Voor de amplitude van het M_2 en M_4 getij is de foutenmarge ongeveer 0,02 m; voor de fase van het M_2 getij is de foutenmarge ongeveer 0,7°; voor de fase van het M_4 getij varieert de foutenmarge van ongeveer 10° bij Vlissingen tot ongeveer 30° bij Schelle. Deze hoge fouten voor het M_4 getij worden toegeschreven aan de relatief korte tijdserie waarover de componenten worden berekend. Aangezien de foutenmarges voor de M_4 fase vergelijkbaar zijn voor de scenario's, zijn ze wel geschikt voor onderlinge vergelijkingen waarbij vooral kan worden gekeken naar de patronen. Ze zijn echter minder geschikt om te vergelijken met resultaten van andere modelstudies of metingen.

In figuur 6.14 is de amplitude van het M_2 getij getoond in zeven stations langs de Westerschelde. De figuur toont een duidelijke toename van de amplitude landwaarts. In de vorige sectie is al aangegeven dat alle ingrepen een reductie op de amplitude leveren. Alleen de scenario's T_1 en T_5 hebben effect op de getijslag in het hele domein. De andere scenario's hebben alleen effect vanaf station Hansweert. Dit komt

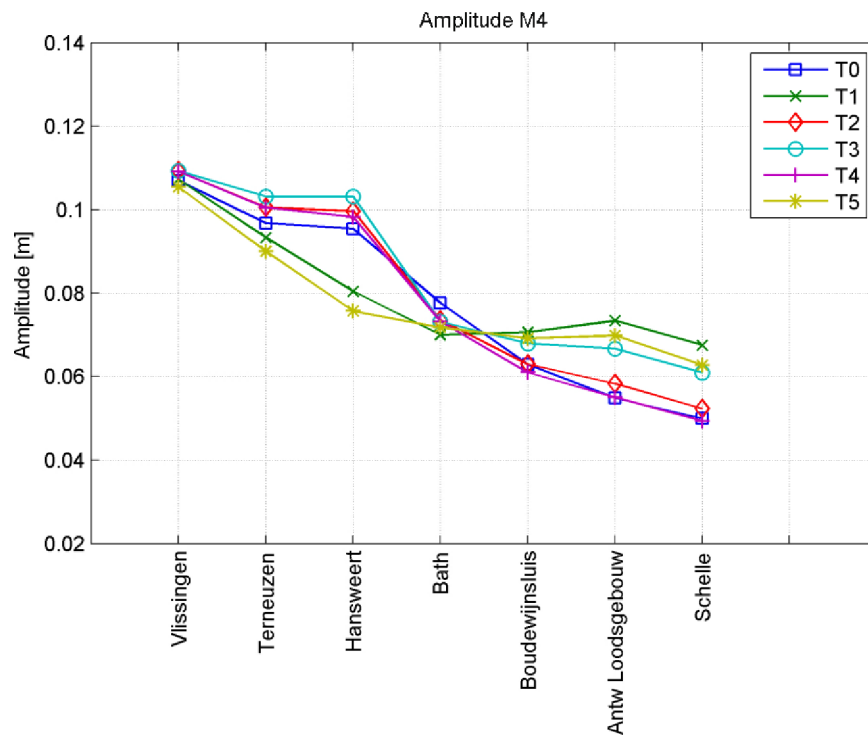
doordat voor deze scenario's de ingrepen alleen van toepassing zijn ten oosten van Ossensisse. Het is opvallend dat voor scenario's T₃ en T₅ dezelfde M2 amplitudes worden uitgerekend vanaf station Bath.

Het beeld van de amplitude van de M4 component is anders dan van de M2 component. Uit figuur 6.15 blijkt dat de amplitudes van de M4 component afnemen landinwaarts. Dit geldt in principe voor alle scenario's, echter voor scenario T₁, T₃ en T₅ geldt dat de amplitudes min of stabiliseren vanaf station Bath. Daarnaast valt op dat voor scenario T₁ en T₅ tot aan Bath lagere M4 amplitudes worden uitgerekend dan voor T₀, terwijl vanaf Bath er hogere M4 amplitudes worden uitgerekend. Het is ook te zien dat het effect van scenario's T₂ en T₄ op de M4 amplitude zeer klein is. De verschillen van de amplitudes voor deze scenario's met scenario T₀, valt binnen de foutenmarge. Daarom kan worden gesteld dat de ingrepen geen effect hebben gehad op de M4 amplitude.

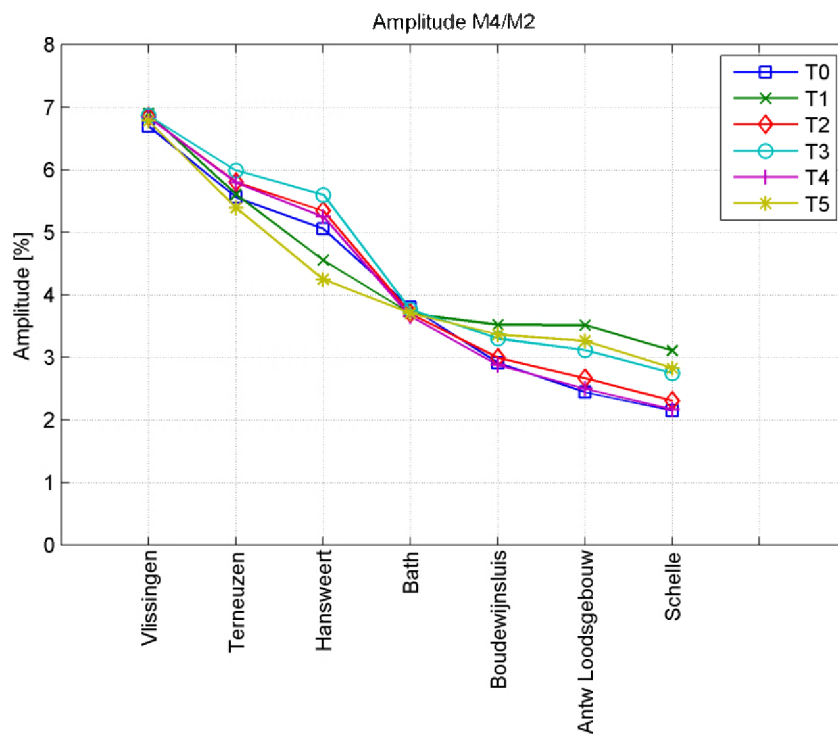
Tot slot toont figuur 6.16 de verhouding tussen de amplitudes van de M4 en M2 componenten. De figuur laat zien dat in station Bath er voor alle scenario's geen verandering optreedt in de verhouding van de M4 amplitude en de M2 amplitude. Echter, ten oosten van Bath is de amplitudeverhouding voor de scenario's T₂, T₃ en T₄ licht toegenomen. Ten westen van Bath neemt alleen de verhouding toe voor T₂ en T₃, terwijl er voor T₄ nauwelijks verandering optreedt in de verhouding ten opzicht van T₀. Voor de scenario's T₁ en T₅ is de verhouding ten westen van Bath afgenomen en is de verhouding ten oosten van Bath toegenomen.



Figuur 6.14: Amplitude M2, voor zeven stations, voor de zes scenario's.



Figuur 6.15: Amplitude M4, voor zeven stations, voor de zes scenario's.



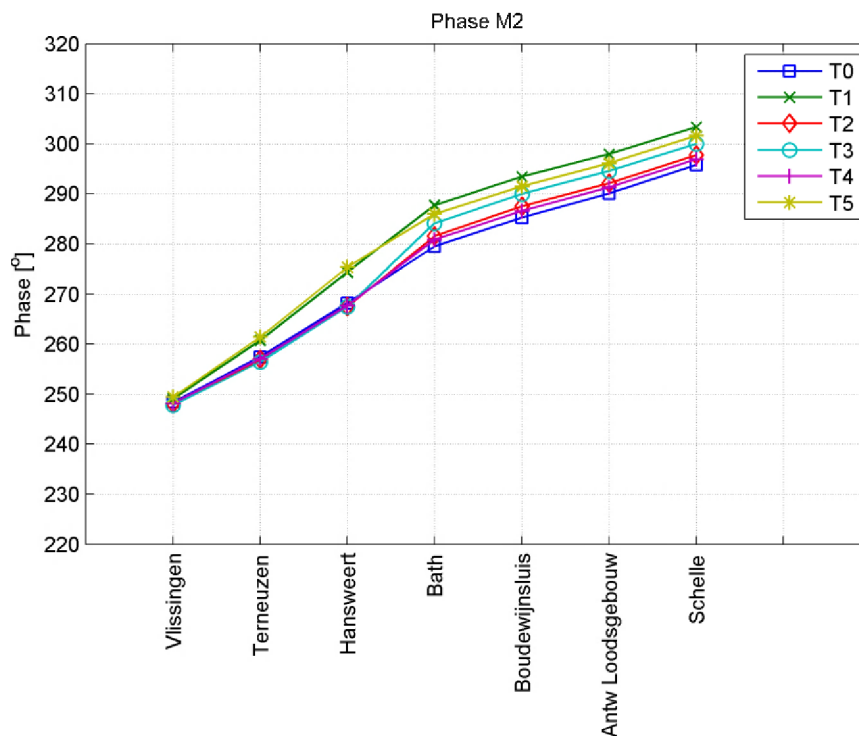
Figuur 6.16: Verhouding amplitude M4/M2 in procenten, voor zeven stations, voor de zes scenario's.

6.5.3 FASE

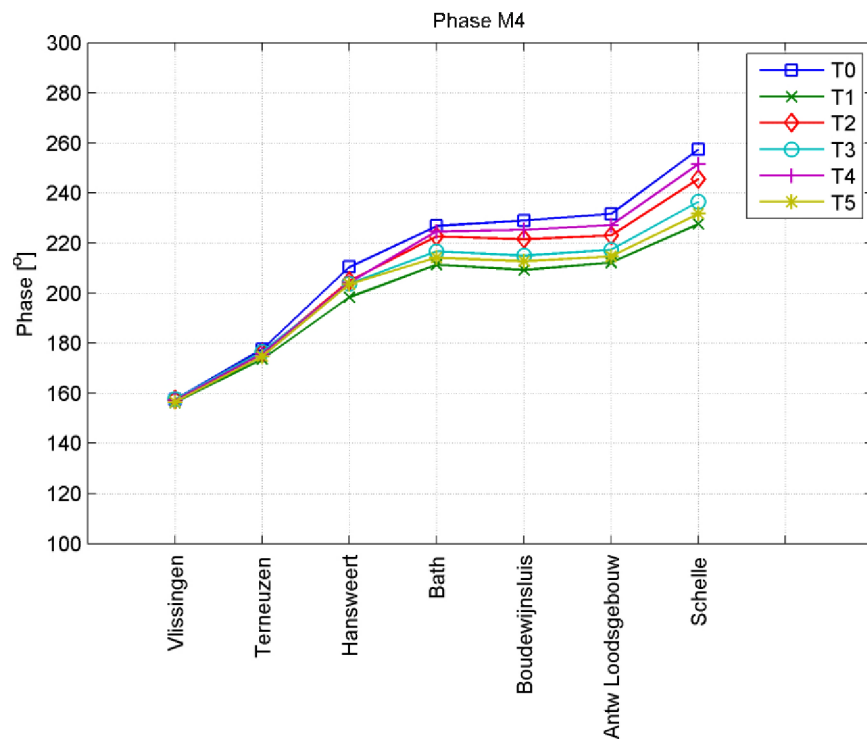
In figuur 6.17 zijn de berekende M2 fases voor alle scenario's in zeven stations weergegeven. Uit de figuur blijkt duidelijk dat als gevolg van de ingrepen de fase toeneemt. Dit houdt in dat de getijdegolf later in de stations aankomt in vergelijking met scenario T_0 . Voor de kleinere ingrepen (T_2 en T_4) is de toename van de fase klein, voor de grotere ingrepen wordt de toename van de fase groter. Het maximale verschil is er tussen scenario T_0 en T_1 , met een verschil in Schelle van ongeveer 8° , wat overeenkomt met ongeveer 15 minuten.

De fases van het M4 getij laten een ander patroon zien. Hier geldt namelijk dat het M4 getij eerder aankomt als gevolg van de ingrepen. Ook hier geldt weer dat het grootste verschil wordt bereikt voor scenario T_1 , namelijk een verschil van ongeveer 30° in Schelle, wat overeenkomt met ongeveer 30 minuten. De kleinste verschillen worden weer bereikt voor scenario T_2 en T_4 .

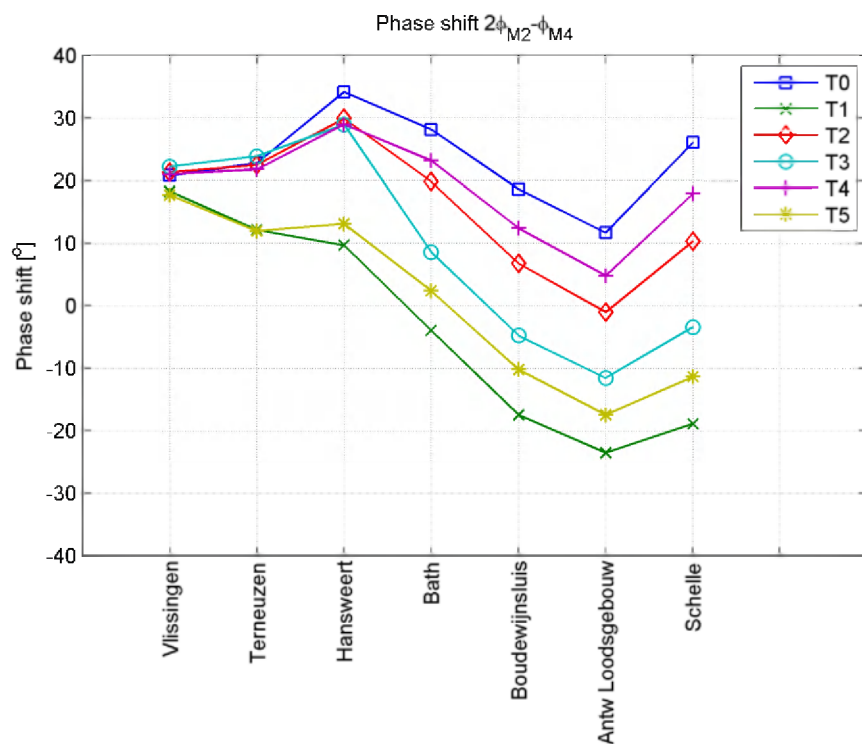
Tot slot is in figuur 6.19 het faseverschil getoond tussen de M2 en M4 getijdcomponenten. De figuur laat zien dat voor alle scenario's het faseverschil afneemt ten opzichte van het scenario T_0 .



Figuur 6.17: Fase van het M2 getij, in zeven stations, voor zes scenario's. Fases zijn weergegeven in graden ten opzichte van Greenwich.



Figuur 6.18: Fase van het M4 getij, in zeven stations, voor zes scenario's. Fases zijn weergegeven in graden ten op zicht van Greenwich.



Figuur 6.19: Faseverschil tussen het M2 en M4 getij, in zeven stations, voor zes scenario's.

6.6 DISCUSSIE/ CONCLUSIE

Voordat conclusies worden getrokken op basis van de uitgevoerde berekeningen, is het belangrijk de resultaten eerst in perspectief te plaatsen. Met betrekking tot de praktische uitvoerbaarheid van de gesimuleerde scenario's dient het volgende opgemerkt te worden:

- Er wordt vanuit gegaan dat het aangebrachte sediment niet wordt herverdeeld, wat in de praktijk niet het geval zal zijn.
- Over het algemeen zijn de benodigde hoeveelheden sediment erg hoog.
- Er wordt vanuit gegaan dat de benodigde hoeveelheid sediment in één keer beschikbaar zal zijn. Deze aanname kan alleen worden benaderd wanneer er sediment van buiten het estuarium zal worden aangevoerd.

Ondanks deze beperkingen geeft deze studie ondersteuning van het begrip van de getijslag in de Westerschelde en voor het bepalen van de kaders waarbinnen het reduceren van de getijslag mogelijk is, wanneer wordt uitgegaan van een puur morfologische oplossing.

Scenario T₁ levert de grootste reductie van de amplitude van de totale getijgolf op. Ten opzichte van T₀ neemt de amplitude van de M₂ component af langs alle stations. De amplitude van de M₄ component, echter, neemt ten opzichte van T₀ toe vanaf station Bath. Dit is een gevolg van de verminderde diepte, waardoor er een toename van de bodemwrijving optreedt, met als gevolg dat de M₄ amplitude toeneemt ten opzicht van de T₀ situatie. Scenario T₁ levert de grootste reductie in getijslag op, maar vraagt ook het meeste sediment. Veel van dit sediment zal zich herverdelen, met gevolgen voor bevaarbaarheid en volume onderhoudsbaggerwerk.

Op basis van een vergelijking met de grootte van de ingreep wordt de relatief grootste reductie in de getijslag bereikt met het verondiepen van de turbulente putten, zoals de Put van Hansweert. Het verondiepen van deze put leverde een vergelijkbare reductie met het verondiepen van de hele geul ten oosten van Ossensisse, terwijl er maar de helft van het volume sediment voor nodig was.

Naast de Put van Hansweert kan ook nog worden gedacht aan het vullen van de Putten van Terneuzen en Borssele. Deze scenario's zijn nog niet apart doorgerekend. Er dient wel bedacht te worden dat het bestaan van deze putten erop duidt dat de stroming in deze gebieden dusdanig is, dat het sediment betrekkelijk snel weer uit de put wordt verwijderd.

Het verondiepen van de diepe putten is qua hoeveelheden sediment dus een realistische mogelijkheid, maar er dient een oplossing gevonden te worden voor het snelle herverdelen van het aangebracht sediment.

Een volgende stap kan zijn om de getijslag-reducerende effecten van de diepe putten onafhankelijk voor elke put in kaart te brengen. Ook moet een oplossing worden gevonden voor het eroderende karakter van de stroming in deze gebieden

7

Historische ingrepen, systematisch effectonderzoek

7.1 INLEIDING

De effecten (op morfologie, getijslag en debieten) van al bestaande ingrepen zijn systematisch onderzocht met een model gebaseerd op Finel2D. Het gaat om zandwinning, (op twee locaties: Plaat van Ossenis, Plaat van Valkenisse), individuele verdiepingen (Drempel bij Bath en Drempel van Hansweert) en om de aanleg van de Leidammen nabij de Vlaams-Nederlandse grens.

Dit hoofdstuk bespreekt de resultaten van de berekeningen.

Er zijn zes scenario's doorgerekend. Het eerste scenario, T0 is een *hindcast* van de werkelijk opgetreden situatie. Dit wil zeggen: er is rekening gehouden met het feit dat de vaargeul op diepte gehouden wordt, het gebaggerde materiaal in stortvakken wordt gestort en dat zandwinning plaatsvindt. Vervolgens zijn enkele ingrepen 'uitgezet'. Door de referentie met de nieuwe situatie te vergelijken kan het 'eigen' effect van een enkele ingreep bekeken worden.

De scenario's zijn:

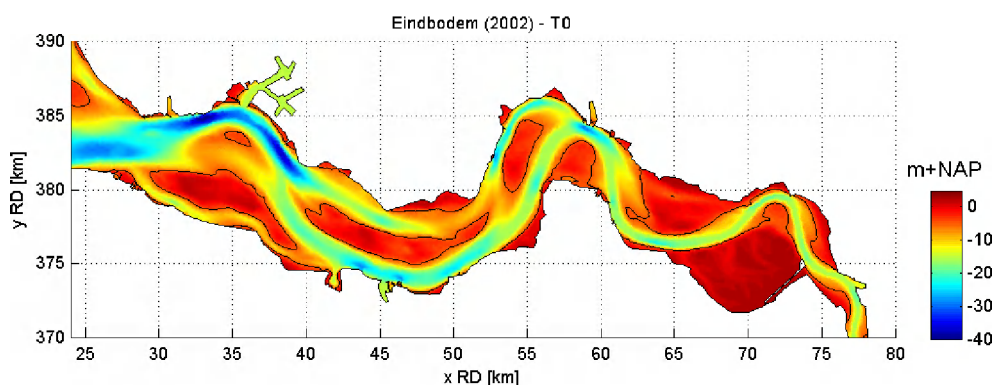
- Scenario T1: zandwinning ter plaatse van de Plaat van Ossenis wordt niet uitgevoerd;
- Scenario T2: Zandwinning bij de Plaat van Valkenisse wordt niet uitgevoerd;
- Scenario T3: De verdiepingen bij de Drempel van Bath worden achterwege gelaten;
- Scenario T4: Leidammen nabij Antwerpen worden verwijderd;
- Scenario T5: De verdiepingen van de Drempel van Hansweert worden achterwege gelaten.

In de scenario's 0, 1, 2, 3 en 5 wordt er vanuit gegaan dat de Leidammen bij Antwerpen gedurende de gehele berekening bestaan. In werkelijkheid zijn de dammen pas enkele jaren na de start van de berekening aangelegd.

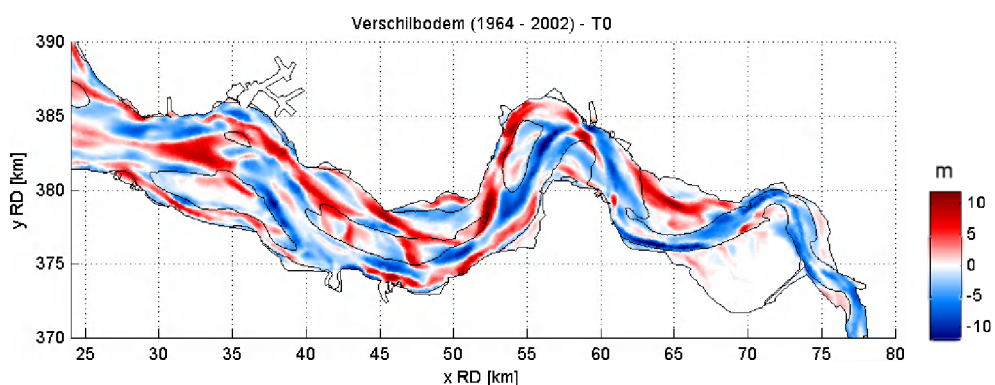
7.2 RESULTATEN

7.2.1 SCENARIO T0 (REFERENTIE)

De bodem aan het einde van de modelberekening van scenario T0 is gegeven in figuur 7.1. Het verschil tussen de beginbodem en de eindbodem is voor scenario T0 gepresenteerd in figuur 7.2. De meeste grootschalige morfologische ontwikkelingen zijn door FINEL2D goed gereproduceerd, zie ook LTV V&T-rapport A-26 (Consortium Deltares-IMDC- Svašek-Arcadis, 2013), hoewel het gedrag van een aantal nevengeulen (Schaar van de Spijkerplaat, Everingen en Schaar van Waarde) afwijkt van de werkelijkheid.



Figuur 7.1: De modelbodem aan het einde van de berekening (2002) voor scenario T0. De NAP -5 m contourlijn voor de betreffende eindsituatie is in de figuur opgenomen



Figuur 7.2: Het verschil tussen de initiële modelbodem en de uiteindelijke modelbodem voor scenario T0 (1964-2002). Rood staat voor sedimentatie; blauw voor erosie. In de figuur is de NAP -5 m contourlijn voor de betreffende eindsituatie opgenomen.

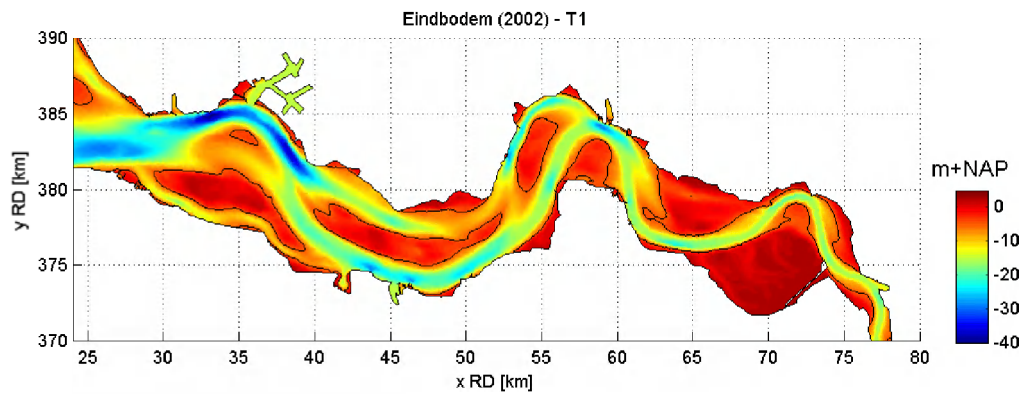
7.2.2 SCENARIO T1 (ZANDWINNING BIJ PLAAT VAN OSSENISSE)

De bodem aan het einde van de modelberekening van scenario T1, waar de zandwinning ter plaatse van de Plaat van Ossensisse niet is meegenomen, is gegeven in figuur 7.3. De morfologische ontwikkeling is gepresenteerd in figuur 7.4 en het verschil in de eindbodem tussen scenario T0 en T1 is gegeven in figuur 7.5. In figuur 7.6 is ingezoomd op het interessegebied.

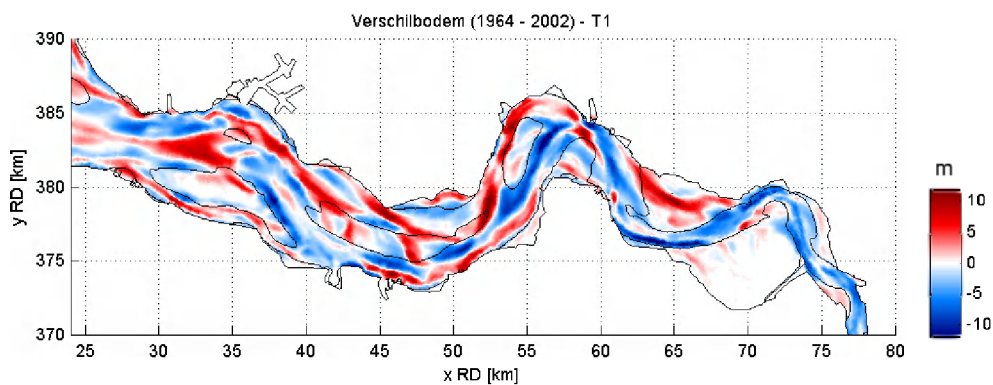
Het effect van 'geen zandwinning bij de Plaat van Ossensisse' op de morfologie van de Westerschelde is beperkt. Alleen ter plaats van de Plaat van Ossensisse zelf treedt iets minder erosie op in scenario T1 dan scenario T0. In scenario T1 is 2,4 Mm³ minder zand gewonnen dan in scenario T0, waar gedurende de 38 gesimuleerde jaren 92,1 Mm³ zand gewonnen is.

Uit figuur 7.10 en figuur 7.11, waarbij de jaarlijkse baggerhoeveelheid per baggergebied is weergegeven, volgt dat het niet winnen van zand leidt tot enigszins meer onderhoudsbaggerwerkzaamheden. Waar in scenario T0 jaarlijks ongeveer 15 Mm³ gebaggerd wordt, is in scenario T1 sprake van een toename van ongeveer 0,1 Mm³. Het effect is vooral merkbaar bij de Overloop van Hansweert, dat nabij de Plaat van Ossensisse gelegen is.

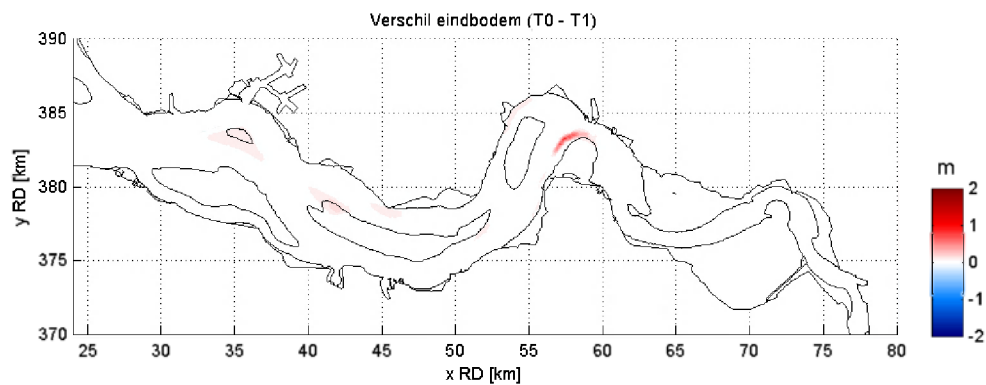
De invloed op de waterstand en de debietverdeling door de geulen in de Westerschelde is eveneens minimaal. Om het effect op de waterstand te kwantificeren is de grootte van de M2, M4 en M6 component voor de verschillende scenario's ter plaatse van Antwerpen, Valkenisse en Vlissingen bepaald. Het resultaat is gepresenteerd in figuur 7.7 tot en met figuur 7.9. Voor de drie locaties en de drie componenten zijn de waarden van scenario T0 en scenario T1 vrijwel gelijk.



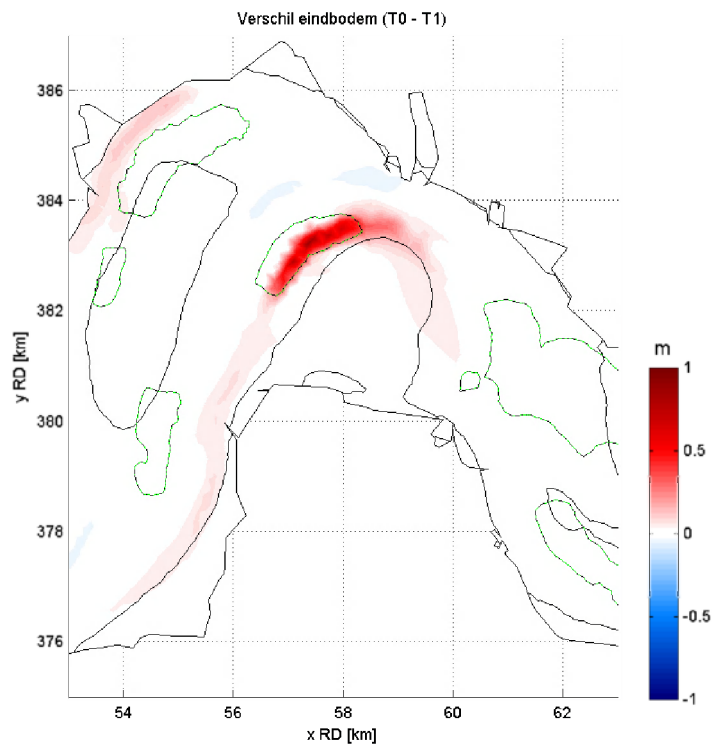
Figuur 7.3: De modelbodem aan het einde van de berekening (2002) voor scenario T1. De NAP -5 m contourlijn voor de betreffende eindsituatie is in de figuur opgenomen.



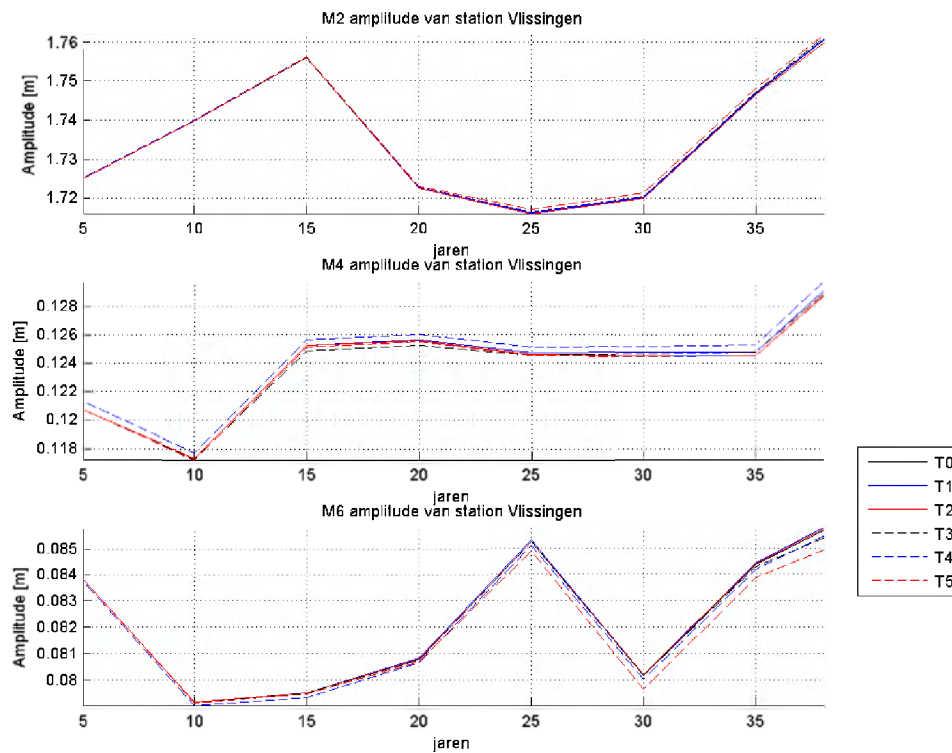
Figuur 7.4: Het verschil tussen de initiële bodem en de uiteindelijke bodem voor scenario T1 (1964-2002). Rood staat voor sedimentatie; blauw voor erosie. In de figuur is de NAP -5 m contourlijn voor de betreffende eindsituatie opgenomen.



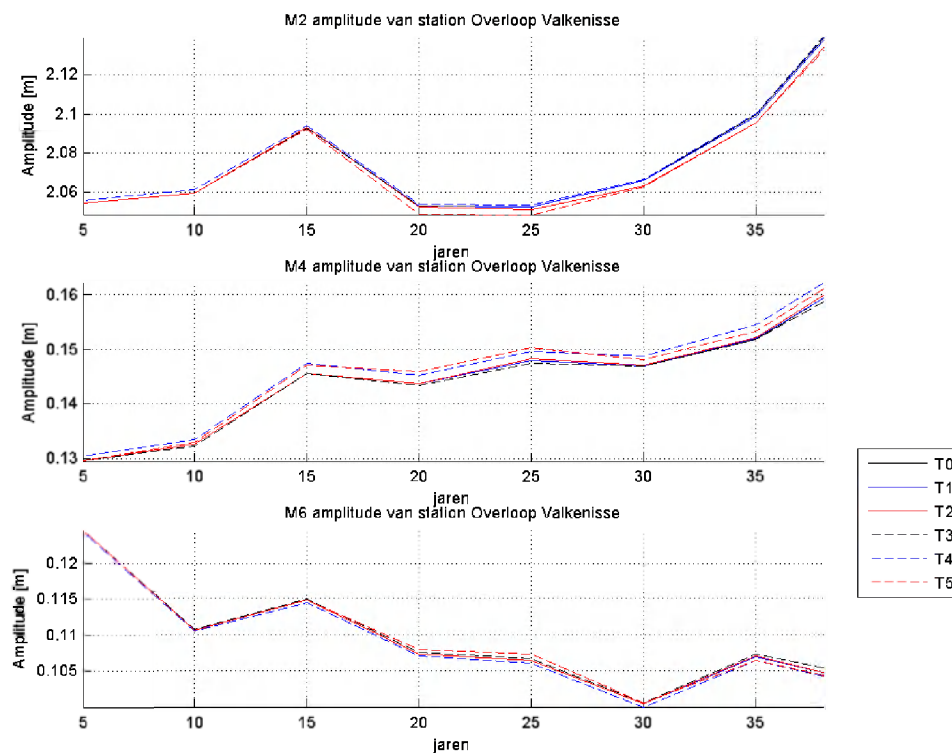
Figuur 7.5: Het verschil tussen de uiteindelijke bodem van scenario T0 en scenario T1 (1964-2002). Rood staat voor meer sedimentatie bij scenario T1 dan bij scenario T0. Blauw staat voor meer erosie. In de figuren is de NAP -5 m contourlijn voor de T0 eindsituatie opgenomen.



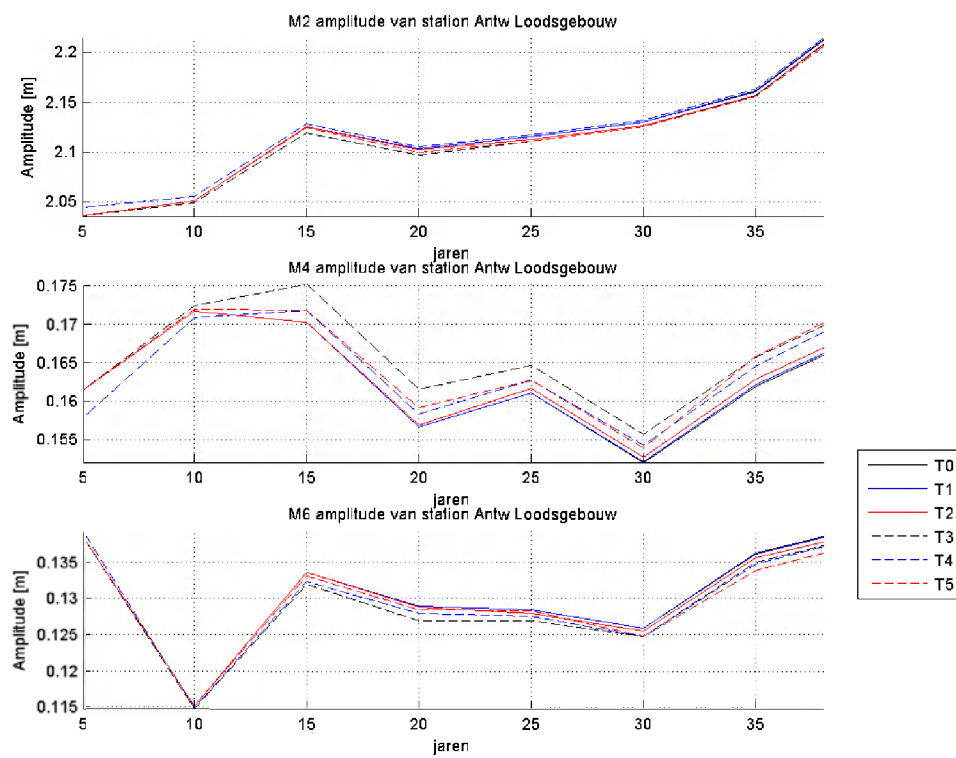
Figuur 7.6: Het verschil tussen de uiteindelijke bodem van scenario T0 en scenario T1 (1964-2002), ingezoomd op de Overloop van Hansweert. Rood staat voor meer sedimentatie bij scenario T1 dan bij scenario T0. Blauw staat voor meer erosie. In de figuren is de NAP -5 m contourlijn voor de T0 eindsituatie opgenomen. De groen/zwarte polygonen geven de zandwingsgebieden weer in de periode 1965-2002.



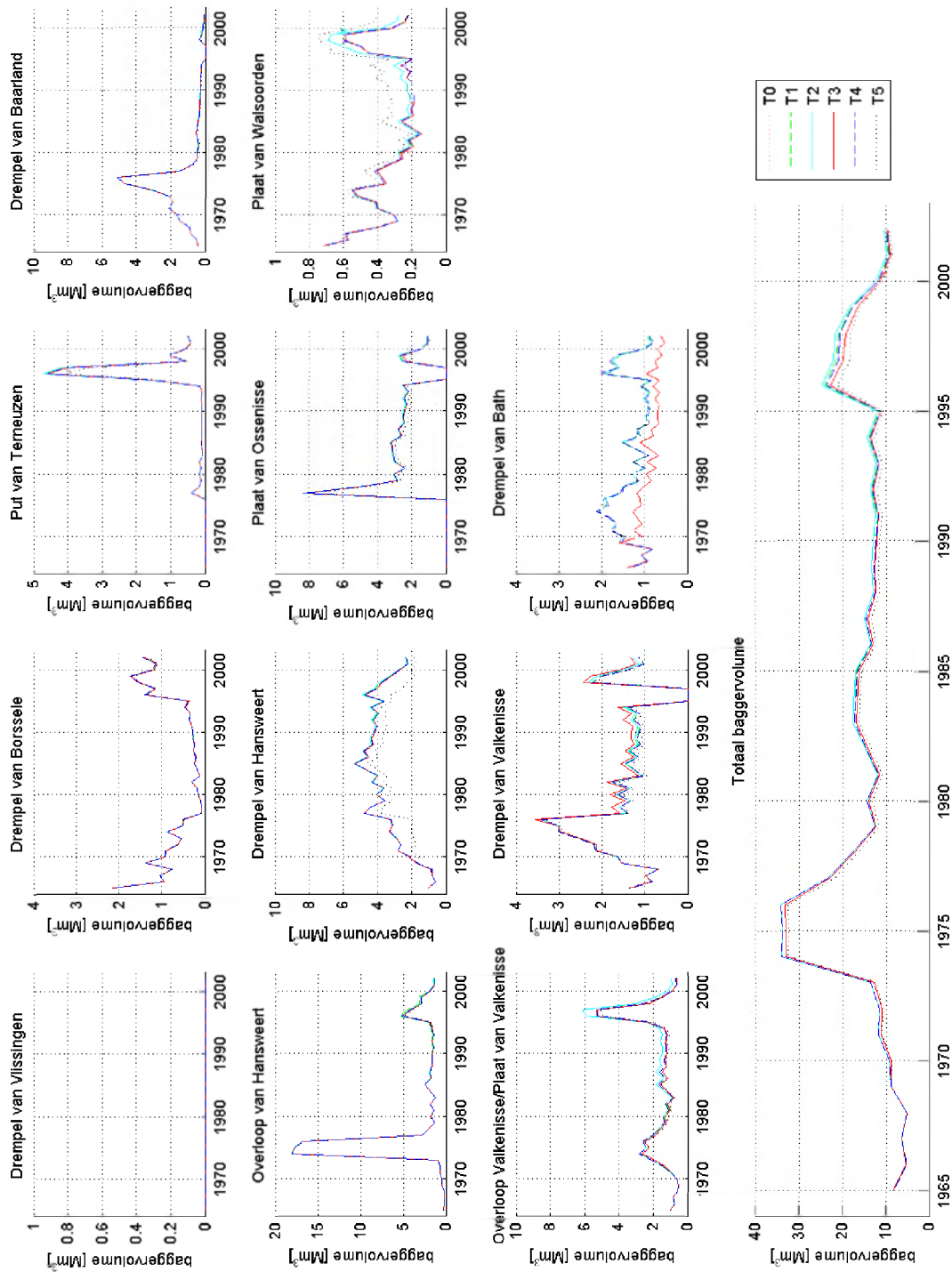
Figuur 7.7: De M2, M4 en M6 component van het getijsignaal bij Vlissingen voor de verschillende scenario's.



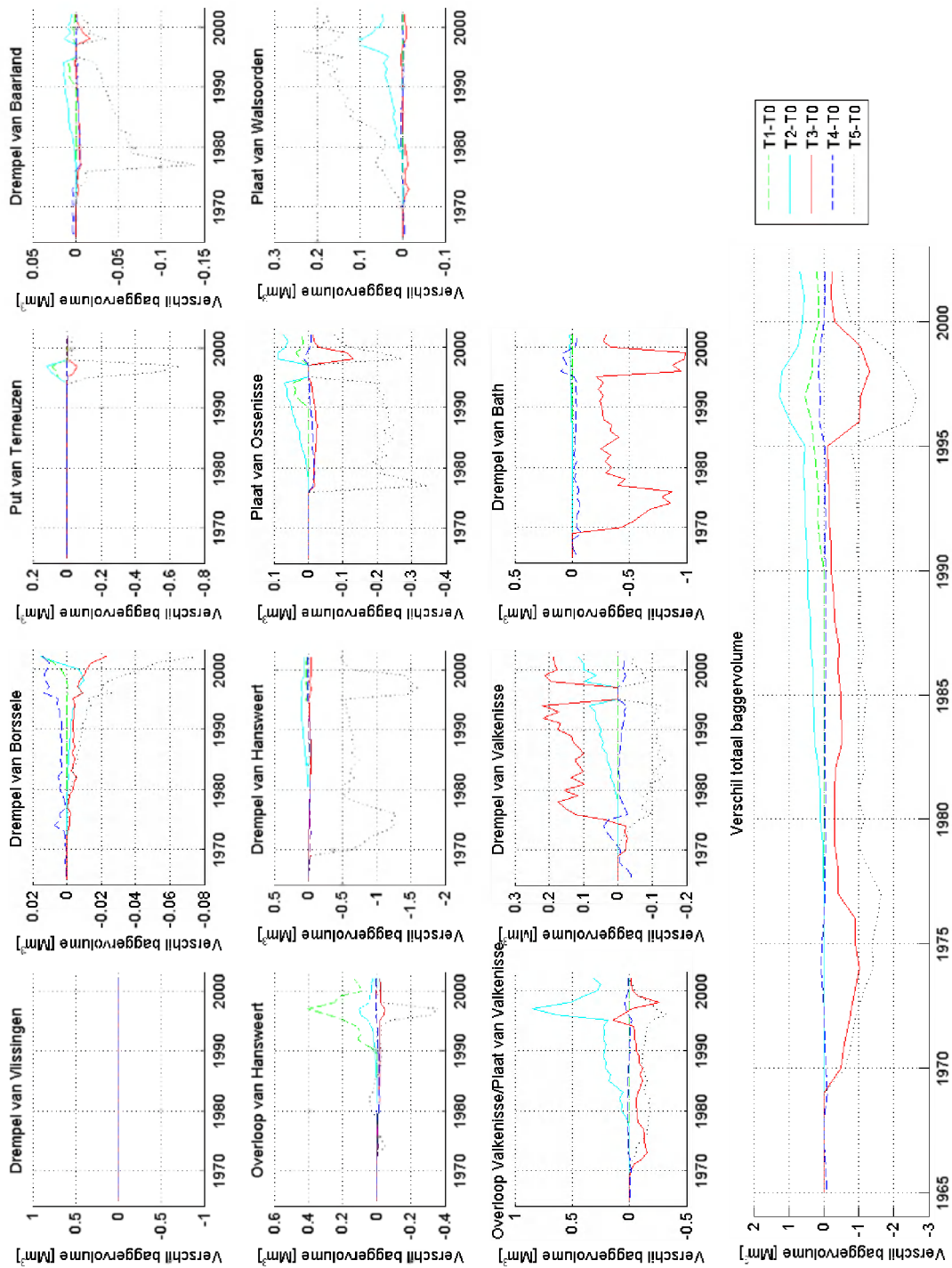
Figuur 7.8: De M2, M4 en M6 component van het getijsignaal bij Valkenisse voor de verschillende scenario's.



Figuur 7.9: De M2, M4 en M6 component van het getijsignaal bij Antwerpen voor de verschillende scenario's.



Figuur 7.10: Baggevolumes per jaar in de verschillende drempelgebieden in de Westerschelde bij de verschillende scenario's. Het totale baggevolumen ten opzichte van de tijd is eveneens weergegeven.



Figuur 7.11: Het verschil in baggervolumes per jaar in de verschillende drempelgebieden in de Westerschelde tussen de verscheidene scenario's en scenario T0. Het verschil in het totale baggervolume ten opzichte van de tijd is eveneens weergegeven. Bij een negatief verschil wordt er in het betreffende scenario minder gebaggerd dan in scenario T0. Bij een positief verschil wordt er in het betreffende scenario meer gebaggerd.

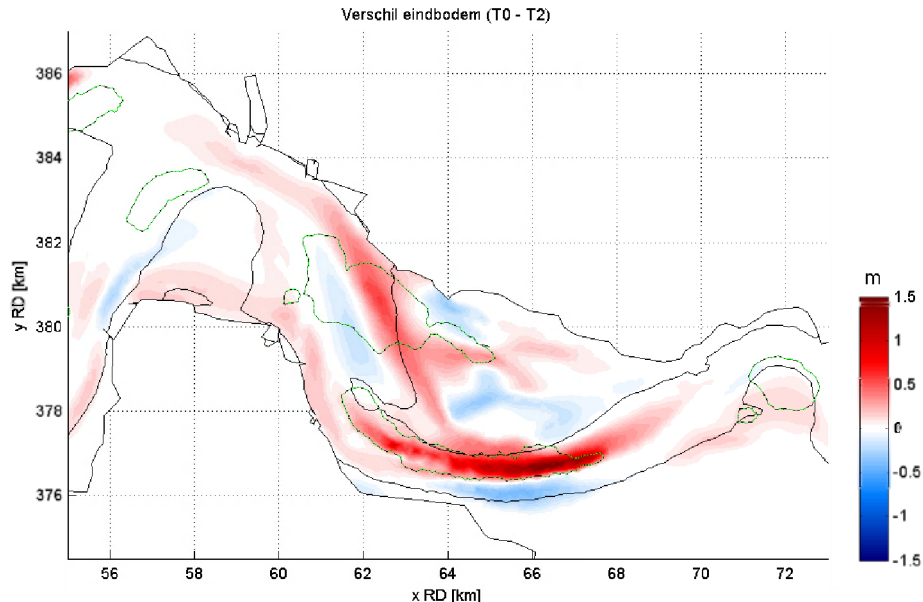
7.2.3 SCENARIO T2 (ZANDWINNING BIJ PLAAT VAN VALKENISSE)

De bodem aan het einde van de modelberekening van scenario T2, waar de zandwinning ter plaatse van de Plaat van Valkenisse niet is meegenomen, wordt getoond in figuur 7.13. De morfologische ontwikkeling is gepresenteerd in figuur 7.14. Het verschil in morfologische ontwikkeling tussen scenario T0 en T2 is gegeven in figuur 7.15. In figuur 6.12 is ingezoomd op het interessegebied.

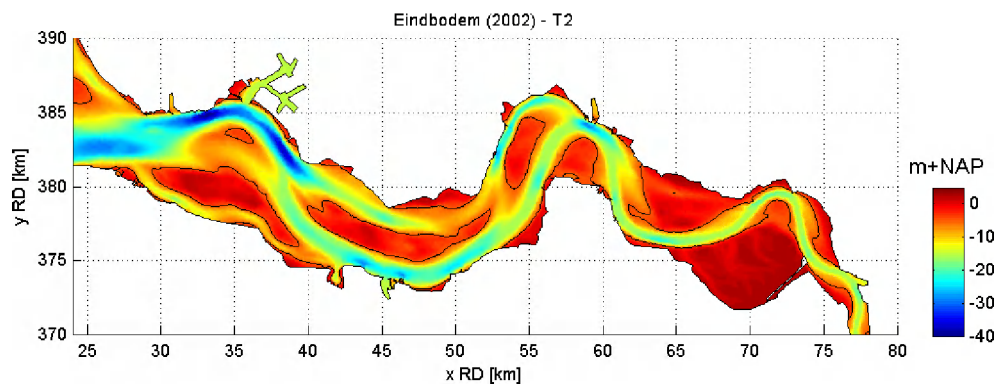
In de Overloop van Valkenisse treedt door het achterwege laten van de zandwinning minder erosie op. In scenario T2 is 9,1 Mm³ minder zand gewonnen dan in scenario T0, waar gedurende de 38 gesimuleerde jaren 92,1 Mm³ zand gewonnen is. Aan de zuidzijde van de geul neemt de erosie iets toe. Het uitbochten van de geul is dus wat sterker in scenario T2 dan in scenario T0. Daarbij is de sedimentatie in de Schaar van Waarde en het Middelgat licht toegenomen.

Door het achterwege laten van de zandwinning zijn de onderhoudsbaggerwerkzaamheden met gemiddeld ongeveer 0,3 Mm³/jaar toegenomen, zie figuur 7.10 en figuur 7.11. De toename vindt hoofdzakelijk plaats bij de Overloop van Valkenisse/Plaat van Valkenisse zelf, maar is eveneens duidelijk zichtbaar bij de Drempel van Valkenisse en de Plaat van Walsoorden.

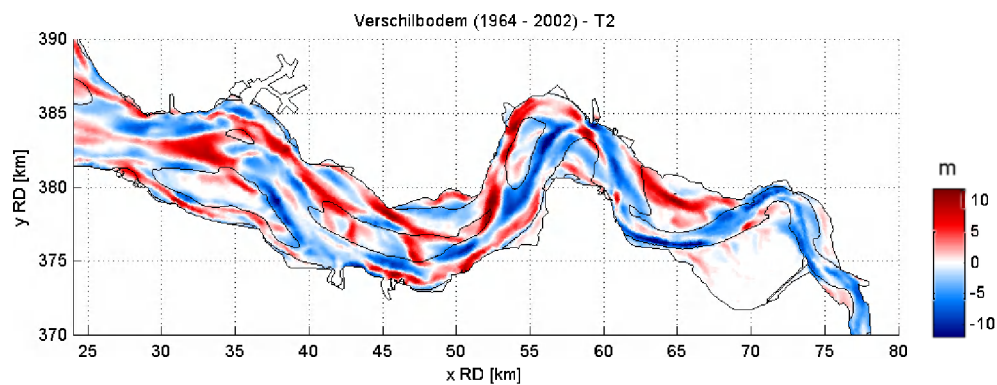
Evenals bij scenario T1 is het effect op de waterstand en de debietverdeling door de geulen zeer klein. Wanneer de grootte van enkele getijcomponenten wordt beschouwd, zie figuur 7.7 tot en met Figuur 7.9, blijkt dat ter plaatse van Valkenisse de M2 component in scenario T2 iets kleiner is dan in scenario T0. Het verschil bedraagt echter minder dan een halve centimeter.



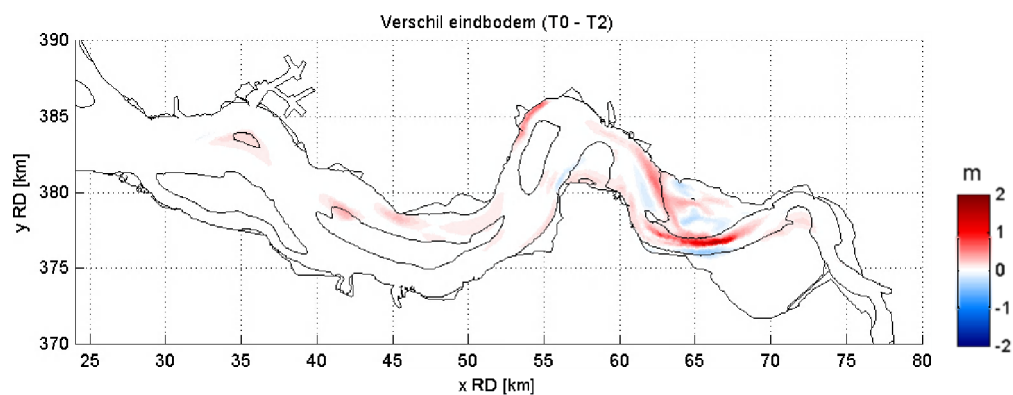
Figuur 7.12: Het verschil tussen de uiteindelijke bodem van scenario T0 en scenario T2 (1964-2002), ingezoomd op de Overloop van Valkenisse. Rood staat voor meer sedimentatie bij scenario T2 dan bij scenario T0. Blauw staat voor meer erosie. In de figuren is de NAP -5 m contourlijn voor de T0 eindsituatie opgenomen. De groen/zwarte polygonen geven de zandwingebeden weer in de periode 1965-2002.



Figuur 7.13: De modelbodem aan het einde van de berekening (2002) voor scenario T2. De NAP -5 m contourlijn voor de betreffende eindsituatie is in de figuur opgenomen.



Figuur 7.14: Het verschil tussen de initiële bodem en de uiteindelijke bodem voor scenario T2 (1964-2002). Rood staat voor sedimentatie; blauw voor erosie. In de figuur is de NAP -5 m contourlijn voor de betreffende eindsituatie opgenomen.



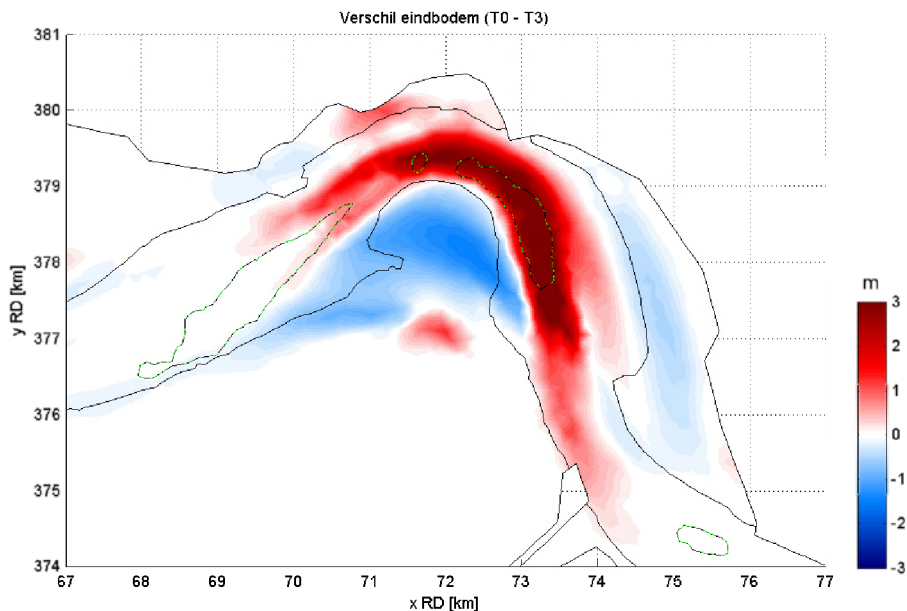
Figuur 7.15: Het verschil tussen de uiteindelijke bodem van scenario T0 en scenario T2 (1964-2002). Rood staat voor meer sedimentatie bij scenario T2 dan bij scenario T0. Blauw staat voor meer erosie. In de figuren is de NAP -5 m contourlijn voor de T0 eindsituatie opgenomen.

7.3 SCENARIO T3 (ONDERHOUD DREMPEL VAN BATH)

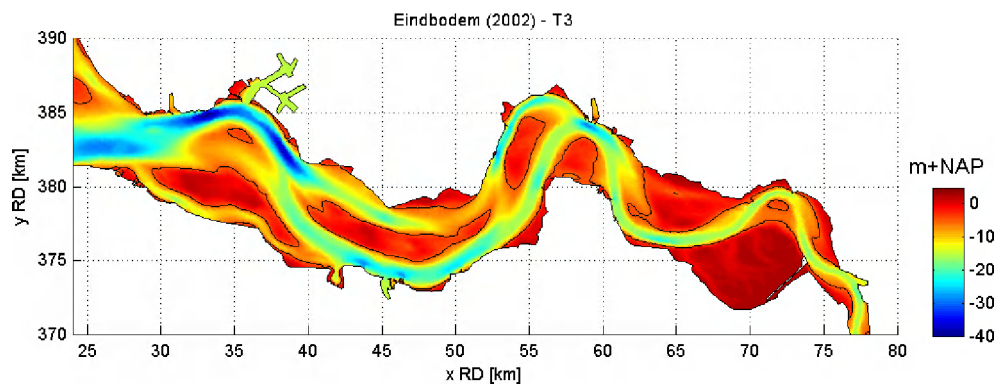
In scenario T3, wordt de Drempel van Bath vanaf het begin van de modelberekening niet verder verdiept. De verdieping in de jaren '70 en de jaren '90 worden dus niet uitgevoerd in het model. De te onderhouden diepte op de drempel blijft op de diepte van voor de jaren '70. De bodem aan het einde van de modelberekening is gegeven in figuur 7.17. De morfologische ontwikkeling is gepresenteerd in figuur 7.18, en het bodemverschil tussen scenario T0 en T3 is gegeven in figuur 7.19. In figuur 6.16 is ingezoomd op het interessegebied. Het verschil in morfologische ontwikkeling ten opzicht van scenario T0 is beduidend groter dan bij scenario T1 en T2 het geval is.

In scenario T3 eroderen het Nauw van Bath en de Pas van Rilland minder dan in scenario T0. Het gebied rond de Schaar van de Noord daarentegen en (in mindere mate) de Appelzak eroderen juist meer dan in scenario T0. De relatieve sedimentatie treedt ook buiten de baggerpolygoon op, voornamelijk aan de noordzijde van het Nauw van Bath. De geul lijkt in scenario T3 iets te vernauwen ten opzichte van scenario T0. Met andere woorden: het effect van verdiepen van de drempel is dat ook buiten de vaargeul extra erosie optreedt; de geul wordt breder ter plekke van de drempel. Verder weg van de drempel van Bath lijkt het effect verwaarloosbaar.

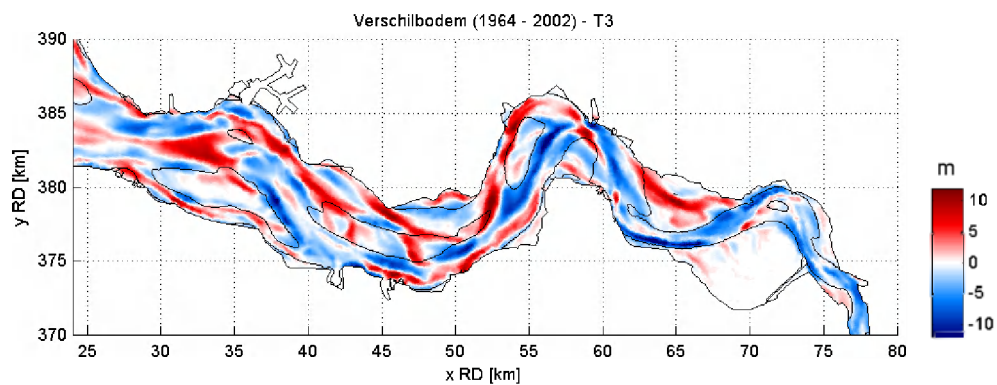
Door het niet uitvoeren van de verdieping van de drempel, worden ter plaatse van de Drempel van Bath de onderhoudsbaggerwerkzaamheden logischerwijs verminderd, zie figuur 7.10 en figuur 7.11. Ter plaatse van de Plaat van Valkenisse nemen de onderhoudsbaggerwerkzaamheden, in mindere mate, juist toe. Wanneer de gehele Westerschelde wordt beschouwd, is sprake van een duidelijke afname. Jaarlijks wordt er gemiddeld 0,45 Mm³ minder gebaggerd.



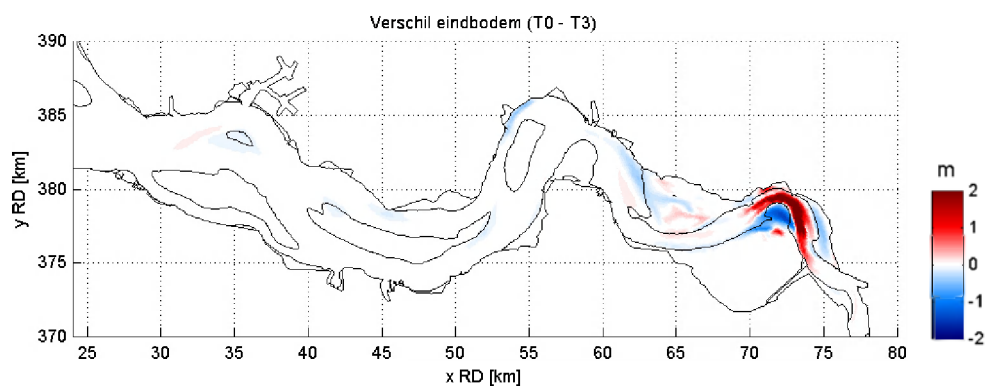
Figuur 7.16: Het verschil tussen de uiteindelijke bodem van scenario T0 en scenario T3 (1964-2002), ingezoomd op het Nauw van Bath en de Schaar van de Noord. Rood staat voor meer sedimentatie bij scenario T3 dan bij scenario T0. Blauw staat voor meer erosie. In de figuren is de NAP -5 m contourlijn voor de T0 eindsituatie opgenomen. De groen/zwarte polygoon geven de baggergebieden (vaargeulonderhoud) weer (bepaald door het model).



Figuur 7.17: De modelbodem aan het einde van de berekening (2002) voor scenario T3. De NAP -5 m contourlijn voor de betreffende eindsituatie is in de figuur opgenomen.



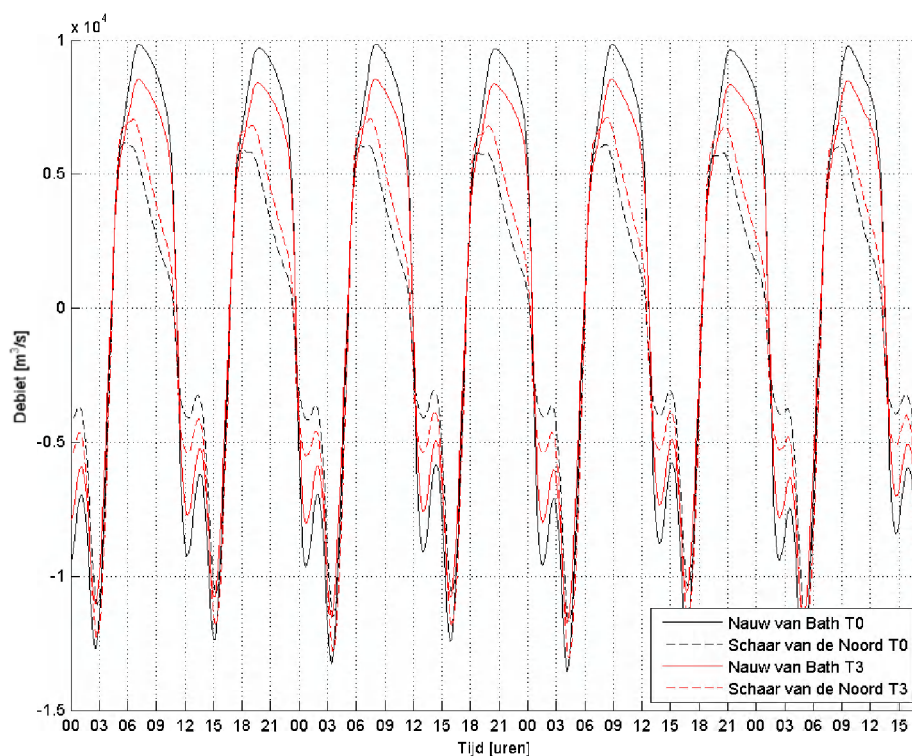
Figuur 7.18: Het verschil tussen de initiële bodem en de uiteindelijke bodem voor scenario T3 (1964-2002). Rood staat voor sedimentatie; blauw voor erosie. In de figuur is de NAP -5 m contourlijn voor de betreffende eindsituatie opgenomen.



Figuur 7.19: Het verschil tussen de uiteindelijke bodem van scenario T0 en scenario T3 (1964-2002). Rood staat voor meer sedimentatie bij scenario T3 dan bij scenario T0. Blauw staat voor meer erosie. In de figuren is de NAP -5 m contourlijn voor de T0 eindsituatie opgenomen.

Het effect van de ingreep in scenario T3 op de waterstand en de verdeling van de debieten over de geulen is wat groter dan in voorgaande scenario's het geval was. Omdat de Schaar van de Noord een belangrijke rol zal gaan spelen, en het Nauw van Bath een iets minder grote rol, trekt het Nauw van Bath iets minder debiet en de Schaar van de Noord wat meer debiet, zie figuur 7.20.

Wanneer de grootte van de getijcomponenten in Vlissingen, Valkenisse en Antwerpen beschouwd worden, zie figuur 7.7 tot en met figuur 7.9, is vooral in de M4 component ter plaatse van Antwerpen een verschil ten opzichte van scenario T0 zichtbaar. De verhoging bedraagt ongeveer een halve centimeter. De grootte van de amplitude van de M2 en de M6 component neemt iets af.



Figuur 7.20: Debiet in het Nauw van Bath en de Schaar van de Noord voor scenario T0 en scenario T3.

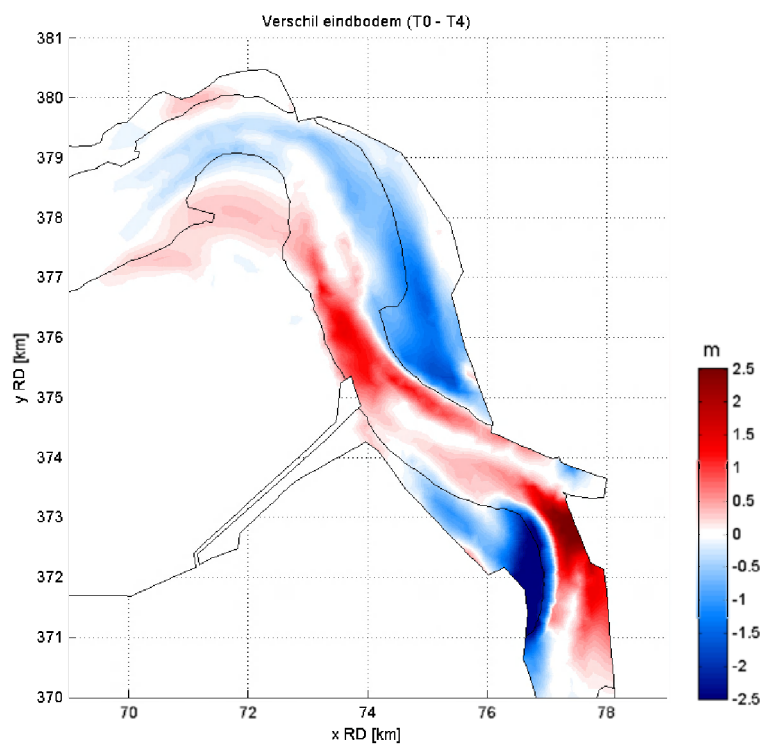
7.4 SCENARIO T4 (LEIDAMMEN)

De bodem aan het einde van de modelberekening van scenario T4, waar de Leidammen nabij Antwerpen niet zijn geïmplementeerd, wordt getoond in figuur 7.22. Het verschil tussen de beginbodem en de eindbodem, de morfologische ontwikkeling, is voor scenario T4 gepresenteerd in figuur 7.23, en het verschil in morfologische ontwikkeling tussen scenario T0 en T4 wordt getoond in figuur 7.24. In figuur 7.21 is ingezoomd op het interessegebied.

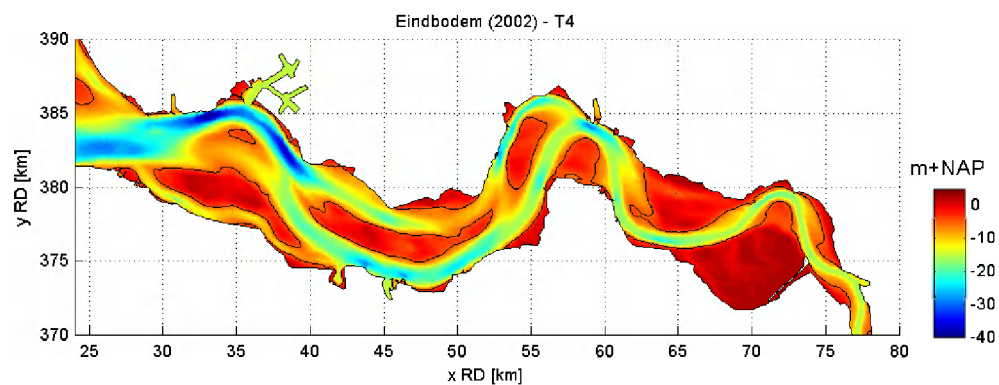
In scenario T4 treedt minder erosie op in de Pas van Rilland dan in scenario T0. De Appelzak en de Ballastplaat eroderen juist meer. Het verwijderen van de Leidammen, leidt tot een toename van de onderhoudsbaggerwerkzaamheden zie figuur 7.21 waarin duidelijk is dat de sedimentatie in de vaargeul toeneemt. Het verwijderen van de Leidammen heeft invloed op zowel de waterstand als de

debietverdeling. Het Appelzak zal een ietwat grotere rol gaan spelen en meer debiet trekken; de Pas van Rilland wat minder. De verschillen blijven echter zeer klein.

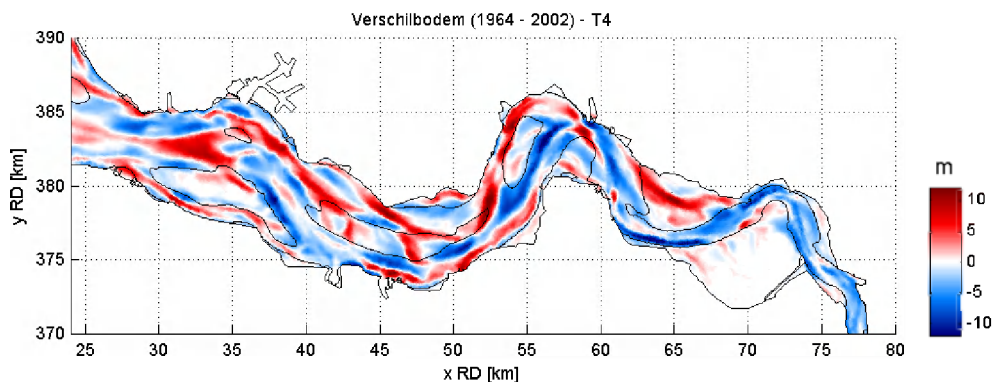
Figuur 7.7 tot en met figuur 7.9 laten zien dat het verwijderen van de Leidammen leidt tot een iets hogere amplitude van de M4 component van zowel Antwerpen als Valkenisse. De verhoging bedraagt echter niet meer dan 2 mm. De M2 en de M6 blijven ongeveer gelijk.



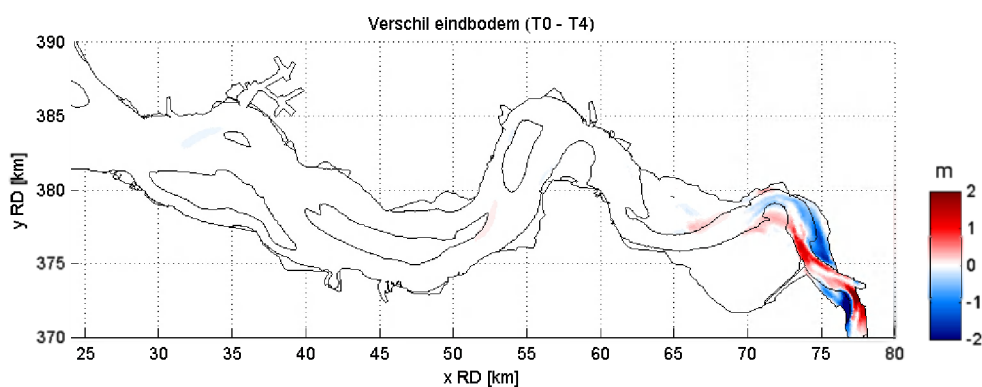
Figuur 7.21: Het verschil tussen de uiteindelijke bodem van scenario T0 en scenario T4 (1964-2002), ingezoomd op de Pas van Rilland. Rood staat voor meer sedimentatie bij scenario T4 dan bij scenario T0. Blauw staat voor meer erosie. In de figuren is de NAP -5 m contourlijn voor de T0 eindsituatie opgenomen.



Figuur 7.22: De modelbodem aan het einde van de berekening (2002) voor scenario T4. De NAP -5 m contourlijn voor de betreffende eindsituatie is in de figuur opgenomen.



Figuur 7.23: Het verschil tussen de initiële bodem en de uiteindelijke bodem voor scenario T4 (1964-2002). Rood staat voor sedimentatie; blauw voor erosie. In de figuur is de NAP -5 m contourlijn voor de betreffende eindsituatie opgenomen.



Figuur 7.24: Het verschil tussen de uiteindelijke bodem van scenario T0 en scenario T4 (1964-2002). Rood staat voor meer sedimentatie bij scenario T4 dan bij scenario T0. Blauw staat voor meer erosie. In de figuren is de NAP -5 m contourlijn voor de T0 eindsituatie opgenomen.

Het effect van de Leidammen is ook nog uitgebreider bestudeerd, met een simulatie over nog langere tijdperiode. Deze staat beschreven in de bijlage.

7.5 SCENARIO T5 (ONDERHOUD DREMPEL VAN HANSWEERT)

De bodem aan het einde van de modelberekening van scenario T5, waar de Drempel van Hansweert na het begin van de modelberekening niet verder verdiept is, is gegeven in figuur 7.26. Het verschil tussen de beginbodembodem en de eindbodembodem, de morfologische ontwikkeling, is voor scenario T3 gepresenteerd in figuur 7.27. Het verschil in morfologische ontwikkeling tussen scenario T0 en T3 is gegeven in figuur 7.28. In figuur 7.25 is ingezoomd op het interessegebied.

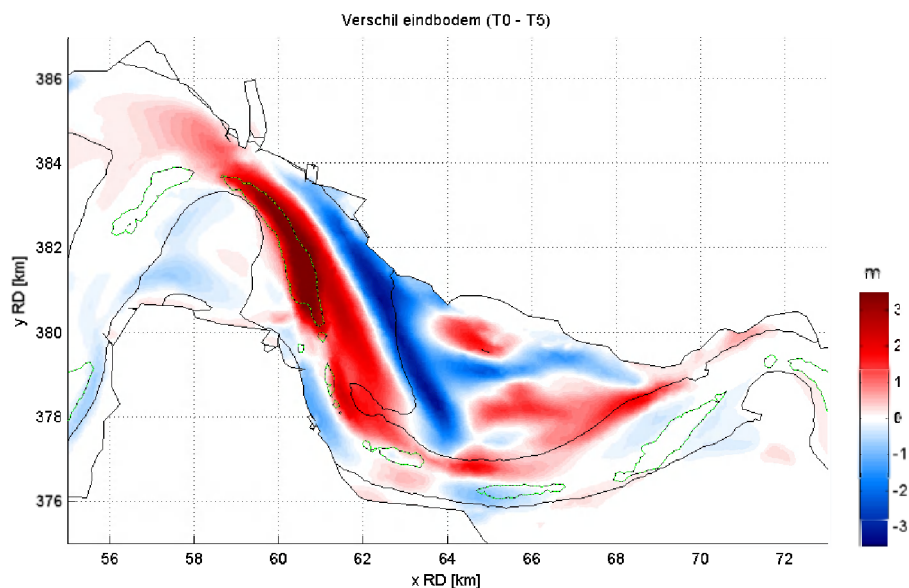
In scenario T5 eroderen de Drempel van Hansweert en het Zuidergat beduidend minder dan in scenario T0. De Schaar van Waarde en de Schaar van Valkenisse eroderen juist meer dan in scenario T0. Ook lijkt de Drempel van Hansweert/Schaar van Waarde iets uit te bochten ten opzichte van scenario T0. Ook opvallend is de relatieve sedimentatie aan de noordzijde van de Overloop van Valkenisse en de Bocht van

Walsoorden. Ten opzichte van scenario T0 wordt de vaargeul dus smaller. Met andere woorden: het verdiepen van de Drempel van Hansweert zorgt er voor dat de vaargeul verder erodeert. Er is een morfologisch effect te zien in de gehele macrocel 5. Dit morfologisch effect is veel groter dan bij Scenario T3, waar de Drempel van Bath op dezelfde manier beschouwd is. Daar was alleen een lokaal effect merkbaar.

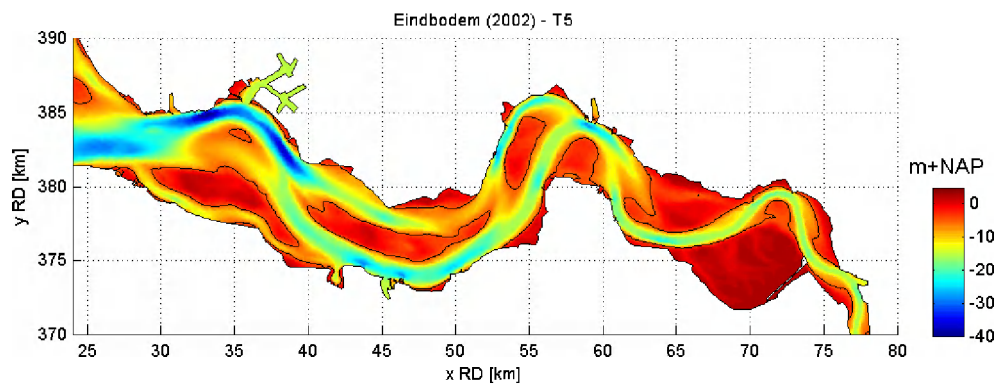
Ook het effect op de onderhoudsbaggerwerkzaamheden is veel groter bij scenario T5 dan bij scenario T3. Op de Plaat van Walsoorden na treedt in alle drempelgebieden een vermindering van de onderhoudsbaggerwerkzaamheden op, zie figuur 7.10 en figuur 7.11, waarbij de grootste vermindering logischerwijs optreedt bij de Overloop van Hansweert zelf. Totaal wordt er jaarlijks gemiddeld 1 Mm³ minder gebaggerd.

Het effect van de ingreep in scenario T5 op de waterstand en de verdeling van de debieten over de geulen is eveneens duidelijk zichtbaar. Het debiet in de Bocht van Walsoorden en de Schaar van Waarde is gegeven in figuur 7.29. De Schaar van Waarde gaat een belangrijkere rol spelen en trekt in scenario T5 meer debiet dan in scenario T0. Voor de Bocht van Walsoorden geldt het omgekeerde.

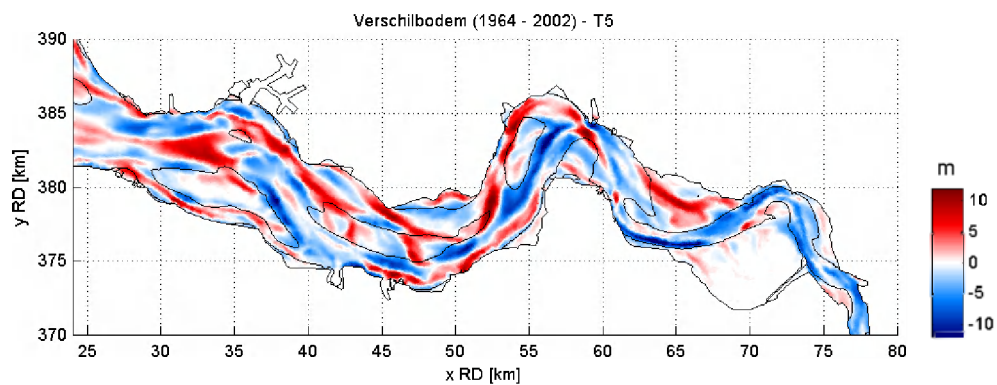
Wanneer de grootte van de getijcomponenten in Vlissingen, Valkenisse en Antwerpen beschouwd worden, zie figuur 7.7 tot en met figuur 7.9, is ter plaatse van Valkenisse een verlaging van de M2 component zichtbaar. De M4 component daarentegen is ietwat verhoogd. Ook ter plaatse van Antwerpen is de M2 component wat verlaagd en de M4 component wat verhoogd.



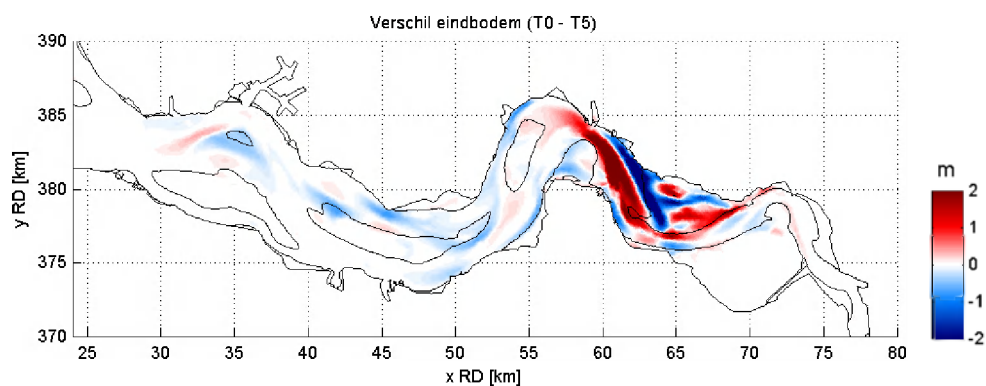
Figuur 7.25: Het verschil tussen de uiteindelijke bodem van scenario T0 en scenario T5 (1964-2002), ingezoomd op de Bocht van Walsoorden en de Overloop van Hansweert. Rood staat voor meer sedimentatie bij scenario T5 dan bij scenario T0. Blauw staat voor meer erosie. In de figuren is de NAP -5 m contourlijn voor de T0 eindsituatie opgenomen. De groen/zwarte polygonen geven de baggergebieden (vaargeulonderhoud) weer.



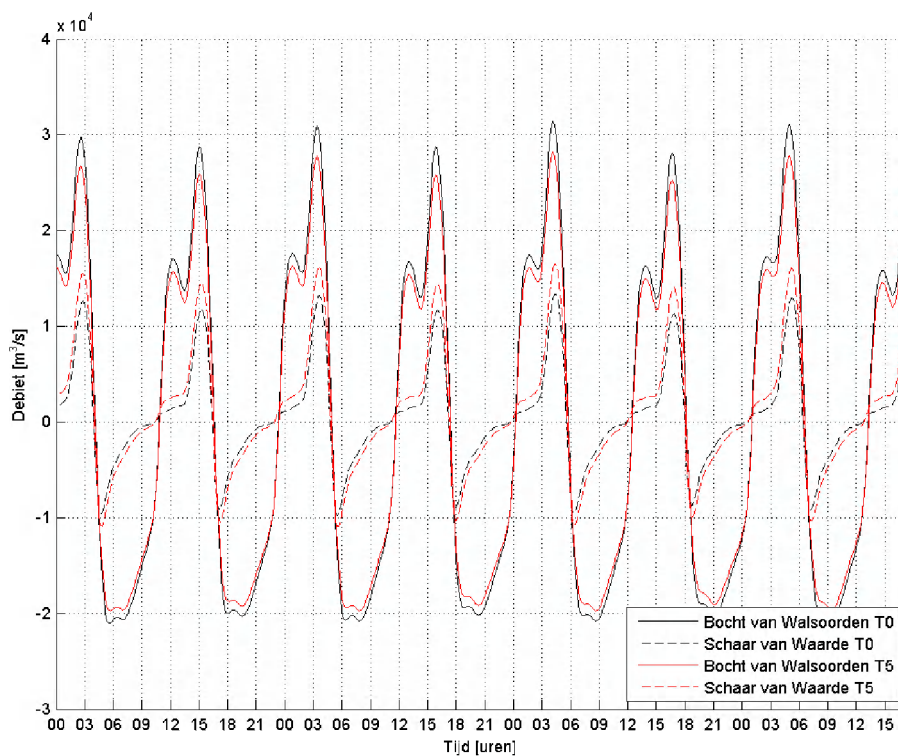
Figuur 7.26: De modelbodem aan het einde van de berekening (2002) voor scenario T5. De NAP -5 m contourlijn voor de betreffende eindsituatie is in de figuur opgenomen.



Figuur 7.27: Het verschil tussen de initiële bodem en de uiteindelijke bodem voor scenario T5 (1964-2002). Rood staat voor sedimentatie; blauw voor erosie. In de figuur is de NAP -5 m contourlijn voor de betreffende eindsituatie opgenomen.



Figuur 7.28: Het verschil tussen de uiteindelijke bodem van scenario T0 en scenario T5 (1964-2002). Rood staat voor meer sedimentatie bij scenario T5 dan bij scenario T0. Blauw staat voor meer erosie. In de figuren is de NAP -5 m contourlijn voor de T0 eindsituatie opgenomen.



Figuur 7.29: Debiet in de Bocht van Walsoorden en de Schaar van Waarde voor scenario T0 en scenario T3.

7.6 CONCLUSIES

De invloed van het niet uitvoeren van zandwinning bij Ossensisse en in de Overloop van Valkenisse op de getijslag en het debiet is beperkt. Op de morfologie is het effect alleen lokaal. De ingrepen leiden tot een toename in de onderhoudsbaggerwerkzaamheden.

Het niet verdiepen van de Drempel van Bath en de Drempel van Hansweert heeft een groter effect. De nevengeul gaat in beide gevallen een grotere rol spelen. De hoofdgeul lijkt iets te vernauwen, wat gevolgen heeft voor de debietverdeling. In beide situaties is voornamelijk lokaal een verlaging van de amplitude van de M2 component zichtbaar, naast een ietwat verhoogde M4 component. Uit beide scenario's blijkt dat bij verdieping van de drempel de rest van de vaargeul ook (verder) gaat eroderen. Bij de Drempel van Bath is dit vooral een lokaal effect, bij de Drempel van Hansweert strekt het morfologisch effect zich uit tot de gehele macrocel 5. Beide ingrepen leiden logischerwijs tot een vermindering van de onderhoudsbaggerwerkzaamheden.

Het niet aanleggen van de Leidammen bij Antwerpen heeft eveneens tot gevolg dat de nevengeul een belangrijkere rol gaat spelen, en beïnvloedt voornamelijk de grootte van de amplitude van de M4 component. De invloed op de baggerwerkzaamheden is beperkt.

8

Referenties

- Consortium Deltares-IMDC- Svašek-Arcadis, 2013. LTV V&T-rapport A-26: Actualisatierapport Finel 2D Schelde-estuarium.
- Consortium Deltares-IMDC- Svašek-Arcadis, 2013. LTV V&T-rapport A-27: Actualisatierapport Delft-3D Schelde-estuarium.
- Consortium Deltares-IMDC- Svašek-Arcadis, 2013. LTV V&T-rapport A-28: Harde lagen Westerschelde.
- Consortium Deltares-IMDC- Svašek-Arcadis, 2013. LTV V&T-rapport B-24: Gebruik van nevengeulen voor binnenvaart.
- Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis, 2013a. LTV V&T-rapport G-7: Tidal Phenomena in the Scheldt Estuary, part 2.
- Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis, 2013a. LTV V&T-rapport G-8: Aanvullend onderzoek historische ontwikkeling getij
- Consortium Deltares-IMDC- Svašek-Arcadis, 2013. LTV V&T-rapport G-13: Synthese en conceptueel model
- Consortium Deltares-IMDC- Svašek-Arcadis, 2013. LTV V&T-rapport K-16: Ontwikkeling mesoschaal Westerschelde (factsheets)
- Maximova, T.; Ides, S.; Vanlede, J.; De Mulder, T.; Mostaert, F. (2009a). Verbetering 2D randvoorwaardenmodel. Deelrapport 3: Kalibratie bovenlopen. WL Rapporten, 753_09. Flanders Hydraulics Research, Antwerp, Belgium
- Maximova, T.; Ides, S.; De Mulder, T.; Mostaert, F. (2009b). LTV O&M thema Veiligheid - Deelproject 1: Verbetering hydrodynamisch NEVLA model ten behoeve van scenario-analyse. WL Rapporten, 756_05. Flanders Hydraulics Research & Deltares: Antwerp, Belgium
- Maximova, T.; Ides, S.; De Mulder, T.; Mostaert, F. (2009c). Verbetering randvoorwaardenmodel. Deelrapport 4: Extra aanpassingen Zeeschelde. WL Rapporten, 753_09. Flanders Hydraulics Research: Antwerp, Belgium

Bijlage 1

Morfologisch effect leidammen Antwerpen

Introductie

Eind jaren 60' en begin jaren 70' zijn bij Antwerpen twee leidammen aangelegd om de stroming door de hoofdvaargeul, de Pas van Rilland, te geleiden en de vaargeul zo op diepte te houden. In deze bijlage wordt het effect van de leidammen op de morfologie onderzocht met behulp van het FINEL2d model voor een periode van 100 jaar. De resultaten worden vergeleken ten opzichte van een T0 scenario waarin de leidammen bij Antwerpen niet verwijderd zijn. In vergelijking met de simulatie die is beschreven in hoofdstuk 6 wordt nu het effect van verwijderen van de leidammen bepaald vanuit de huidige bodem (die is ontstaan door de aanleg ervan ruim 40 jaar geleden).

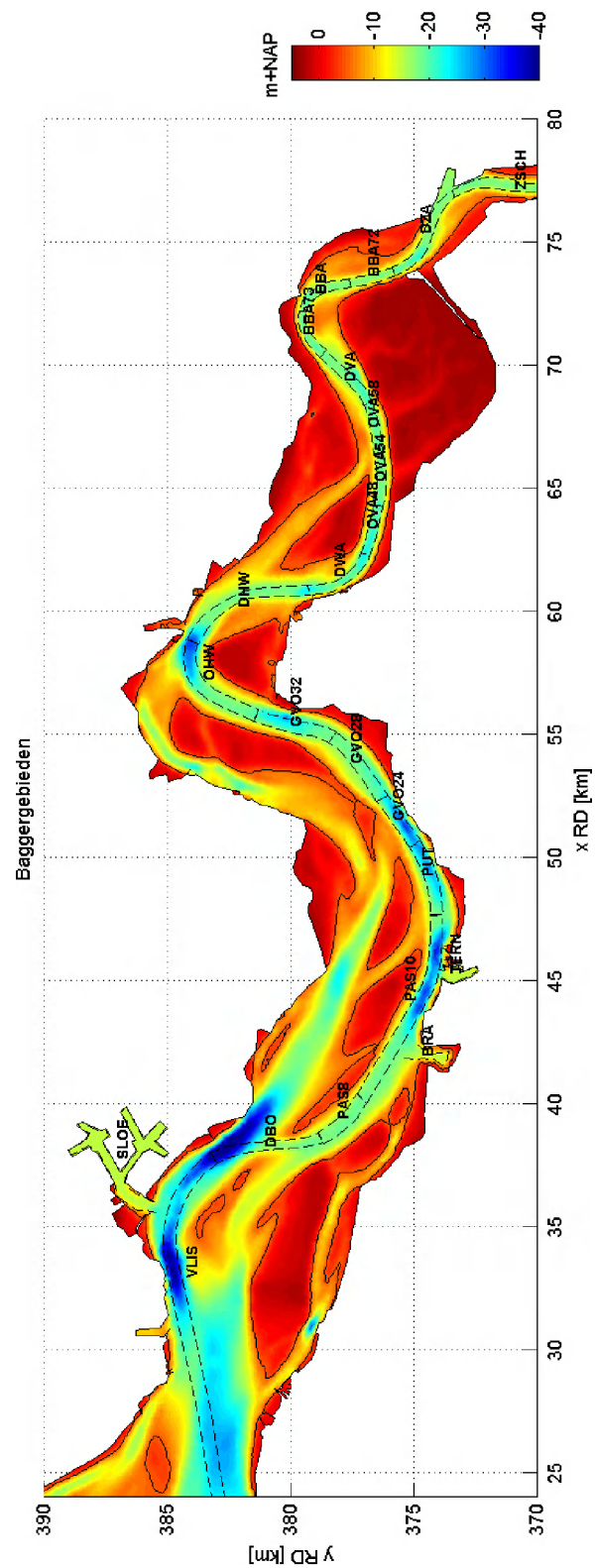
FINEL2d model

Gebruik gemaakt wordt van het FINEL2d model van de Westerschelde. Dit model is geactualiseerd voor het LTV V&T project (LTV V&T-rapport A-26). In het model worden de leidammen gesimuleerd als overlaten. Daarbij worden in het model de vaargeulen onderhouden door middel van een bagger- en stortroutine. Per baggergebied wordt gekeken of een rooster cel onder de minimaal benodigde diepte van 14.5 m LAT komt. Het baggervolume per baggergebied wordt vervolgens volgens een verdeelsleutel gestort in de stortgebieden. De verdeelsleutel is de 2011 situatie (na verdieping), zie LTV V&T-rapport G-11 voor deze verdeling. De locatie van alle baggerlocaties in het model is gegeven in Figuur B 1. De locatie van alle stortgebieden in het model is gegeven in Figuur B 2.

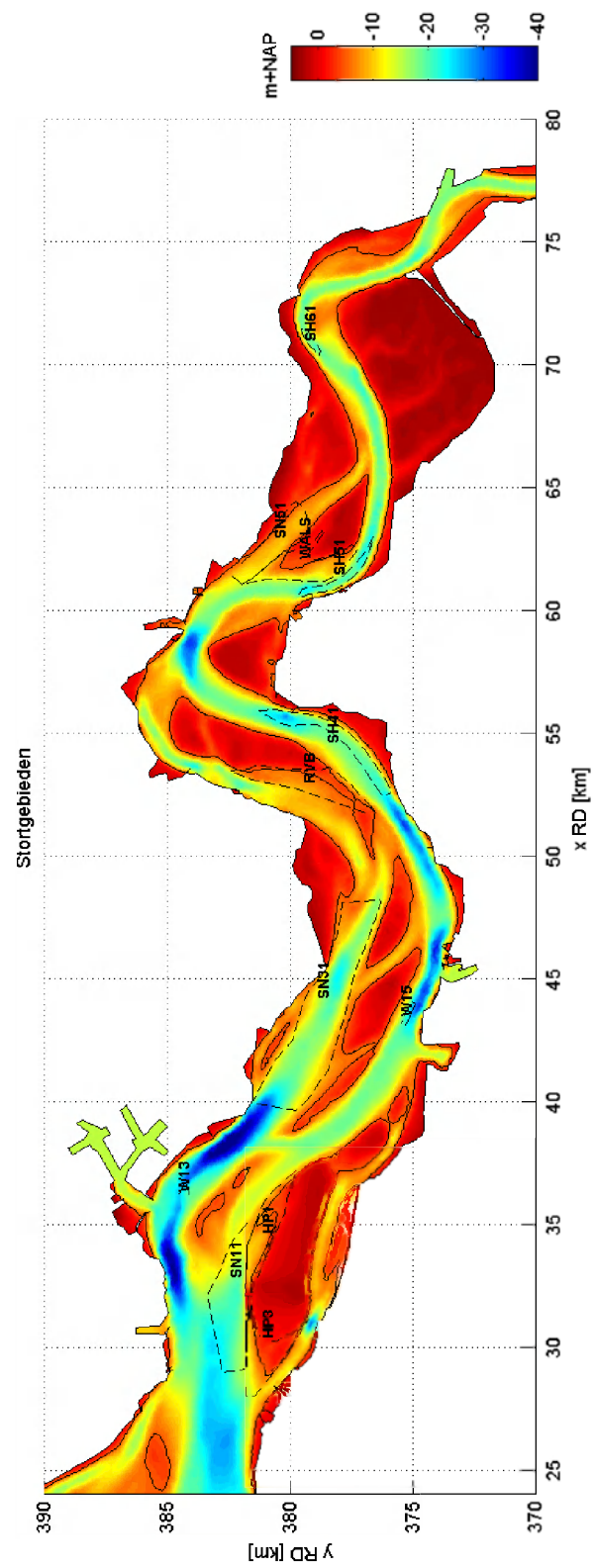
Er worden 2 scenario's uitgevoerd, dat zijn:

- T0: huidige situatie
- T1: situatie zonder leidammen

Beide scenario's worden 101 jaar doorgerekend, waarvan het eerste jaar inspelen is. De simulatie start in 2011.



Figuur B 1: Overzicht en benaming baggergebieden



Figuur B 2: Overzicht en benaming stortgebieden

Uitkomsten van de scenario's

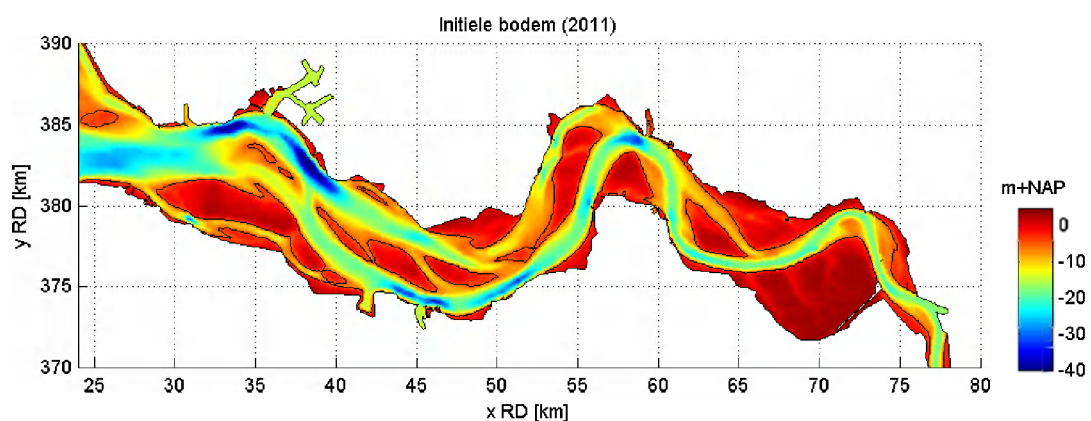
Bodemligging

De initiële bodem van zowel het T0 als T1 scenario is te zien in Figuur B 3. In Figuur B 4 is ingezoomd op de initiële bodem ter plaatse van de leidammen. De leidammen zijn met zwarte stippellijnen in de figuur weergegeven. In scenario T0 zijn de leidammen wel als overlaten opgenomen, in scenario T1 niet. De eindbodem na 100 jaar bij T0 is te zien in Figuur B 5 en Figuur B 6. De bodemontwikkeling na 100 jaar is te zien in Figuur B 7 en Figuur B 8. Voor scenario T1 is de eindbodem na 100 jaar weergegeven in Figuur B 9 en Figuur B 10, en de bodemontwikkeling in Figuur B 11 en Figuur B 12. Het verschil in bodemontwikkeling tussen scenario T0 en scenario T1 is gepresenteerd in Figuur B 13 en Figuur B 14.

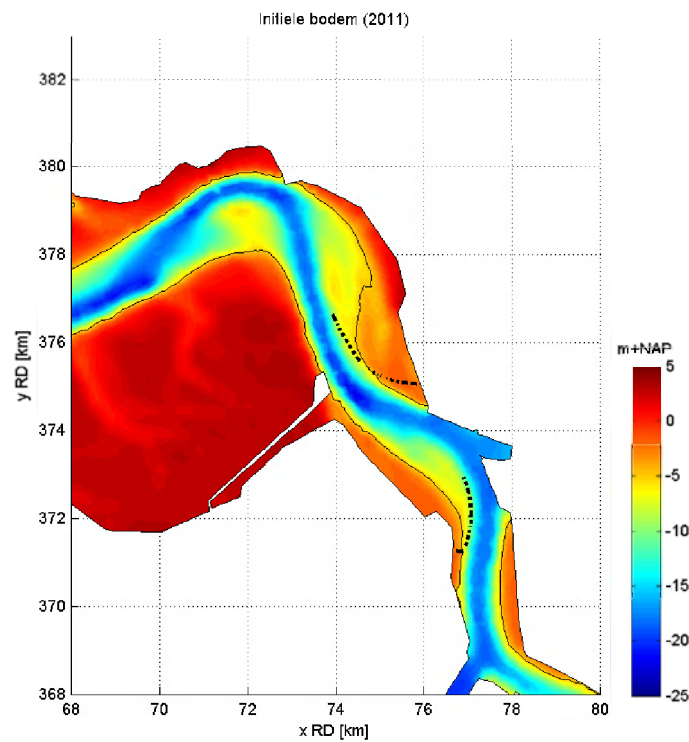
Uit Figuur B 13 en Figuur B 14 blijkt dat ter plaatse van de Appelzak en de Schaar van Ouden Doel relatieve erosie optreedt. In de Pas van Rilland treedt relatieve sedimentatie op. In scenario T0 wordt de stroming door middel van de leidammen geconcentreerd in de Pas van Rilland. In de Appelzak en de Schaar van Ouden Doel is de stroomsnelheid daardoor relatief laag en in de Pas van Rilland relatief hoog. In scenario T1 zijn de leidammen niet aanwezig, en vindt ook de concentratie van de stroming in de Pas van Rilland niet plaats. De stroomsnelheid in de Pas van Rilland is daardoor lager in scenario T1 dan in scenario T0, en leidt tot relatieve sedimentatie in scenario T1. In de Appelzak en de Schaar van Ouden Doel is de stroomsnelheid hoger in scenario T1 dan in scenario T0, wat leidt tot relatieve erosie. Dit effect is ook terug te zien in de debietverdeling.

Ook in de omgeving van de leidammen, bij Bath, is het effect van het verwijderen van de leidammen zichtbaar. Doordat de Appelzak uitschuurt, wordt het debiet door deze geul groter, en verdiept ook het Nauw van Bath enigszins.

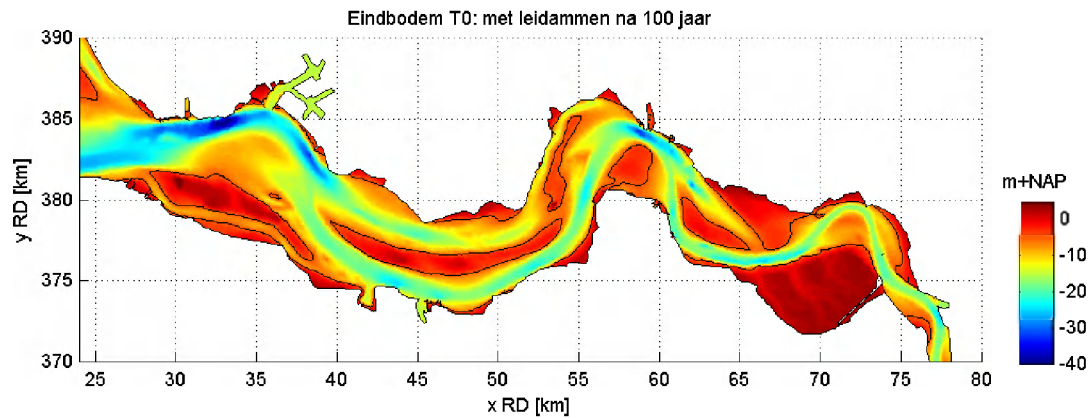
Ter plaatse van de Schaar van Waarde is relatieve erosie zichtbaar. Vermoedelijk ontstaat dit doordat de storthoeveelheid in stortvak SN51 toeneemt, doordat nabij de leidammen meer gebaggerd wordt. De relatieve erosie ter plaatse van de Schaar van Waarde is daarmee een secundair effect van de ingreep.



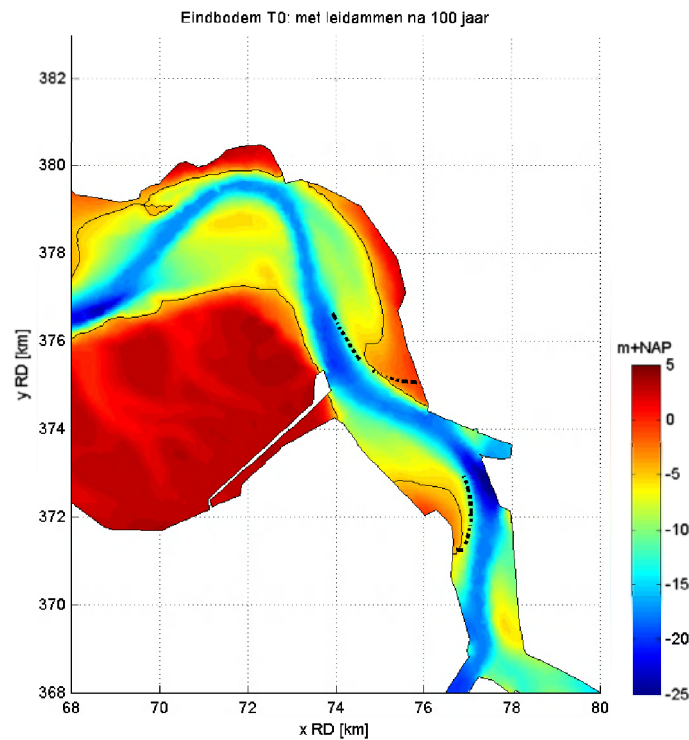
Figuur B 3: Initiële modelbodem voor scenario T0 en T1. De NAP -5 m dieptelijn is in de figuur weergegeven.



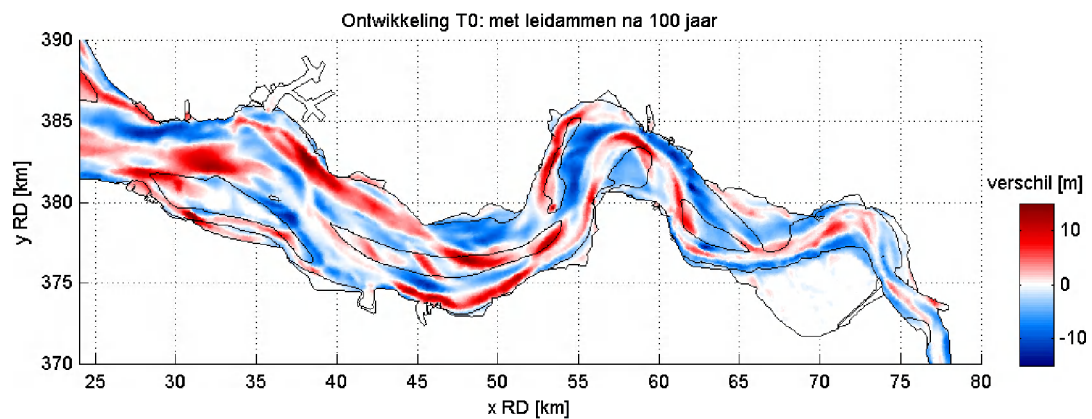
Figuur B 4: Initiële modelbodem voor scenario T0 en T1. De NAP -5 m dieptelijn is in de figuur weergegeven.



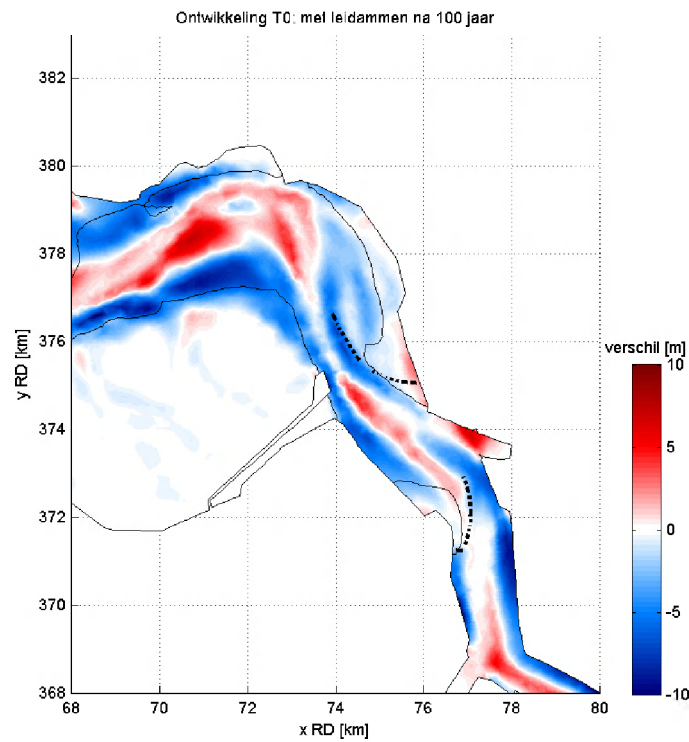
Figuur B 5: Eindbodem voor scenario T0 na 100 jaar. De NAP -5 m dieptelijn is in de figuur weergegeven.



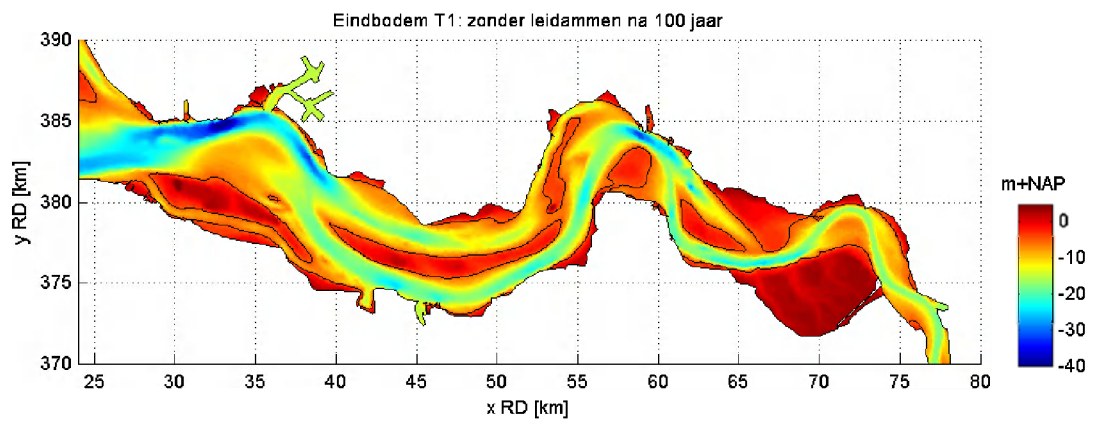
Figuur B 6: Eindbodem voor scenario T0 na 100 jaar, ingezoomd op de leidammen (zwarte stippellijn). De NAP -5 m dieptelijn is in de figuur weergegeven.



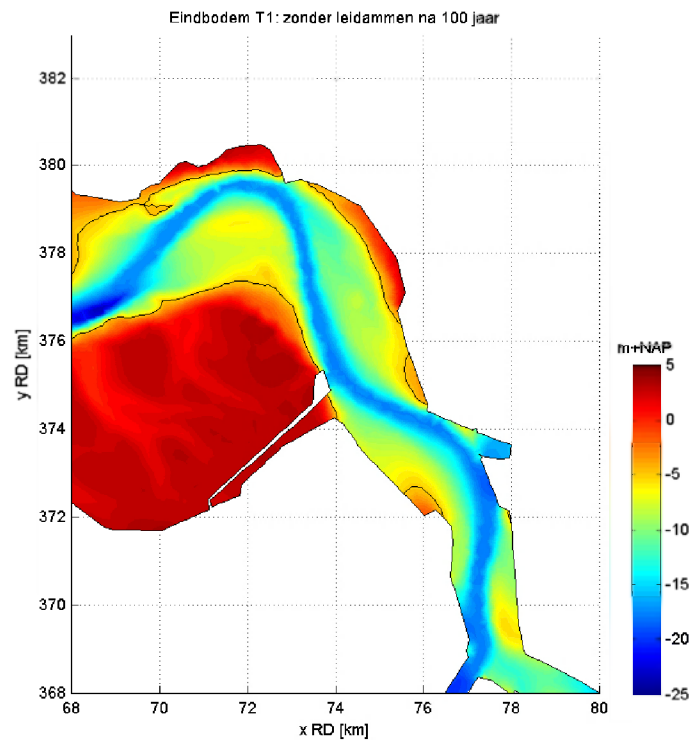
Figuur B 7: Bodemontwikkeling van scenario T0 na 100 jaar. De NAP -5 m dieptelijn is in de figuur weergegeven. Rood staat voor sedimentatie; blauw voor erosie.



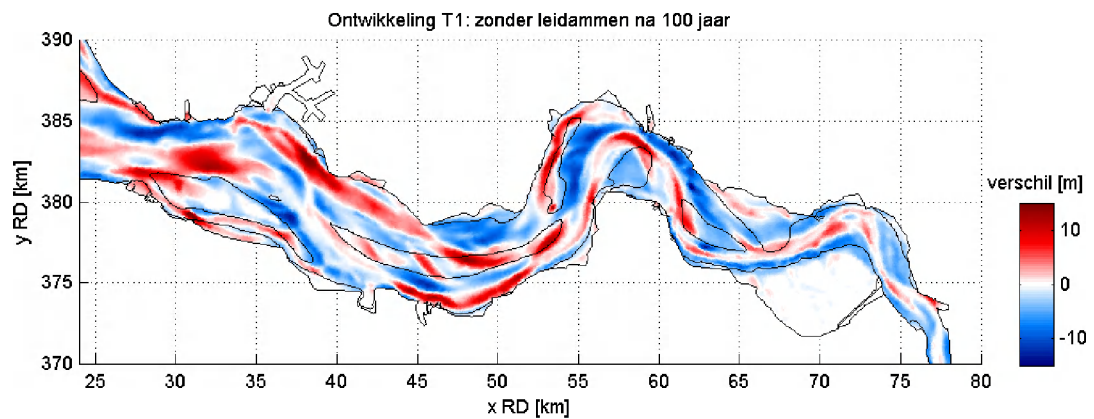
Figuur B 8: Bodemontwikkeling van scenario T0 na 100 jaar, ingezoomd op de leidammen (zwarte stippellijn). De NAP -5 m dieptelijn is in de figuur weergegeven. Rood staat voor sedimentatie; blauw voor erosie.



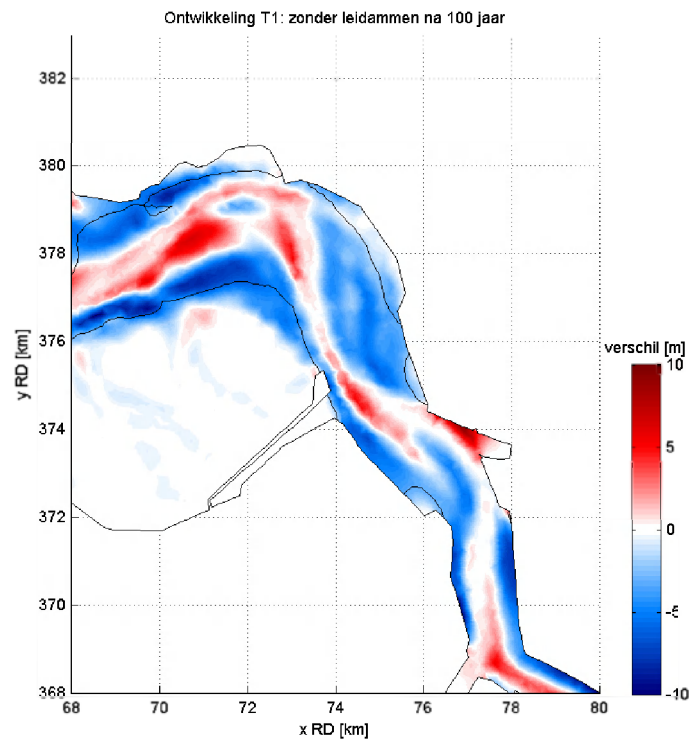
Figuur B 9: Eindbodem voor scenario T1 na 100 jaar. De NAP -5 m dieptelijn is in de figuur weergegeven.



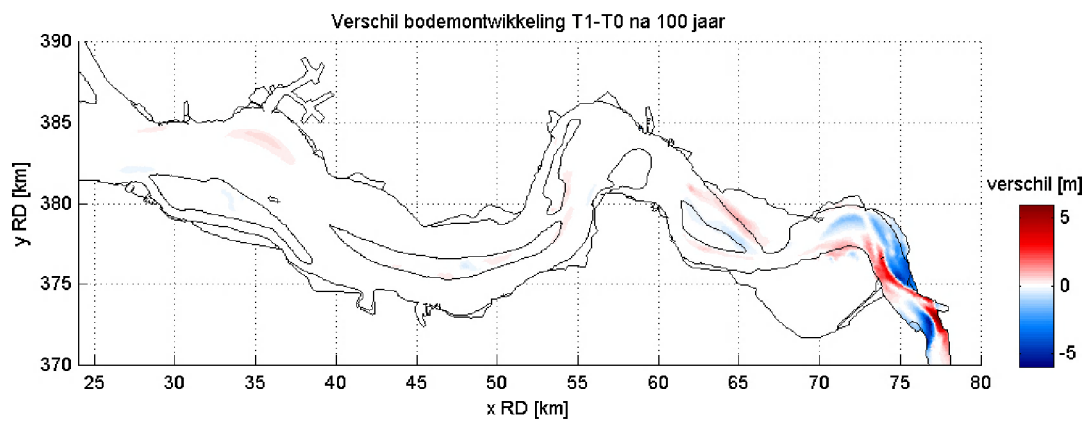
Figuur B 10: Eindbodem voor scenario T1 na 100 jaar, ingezoomd op de locatie van de leidammen. De leidammen zijn in scenario T1 niet geïmplementeerd. De NAP -5 m dieptelijn is in de figuur weergegeven.



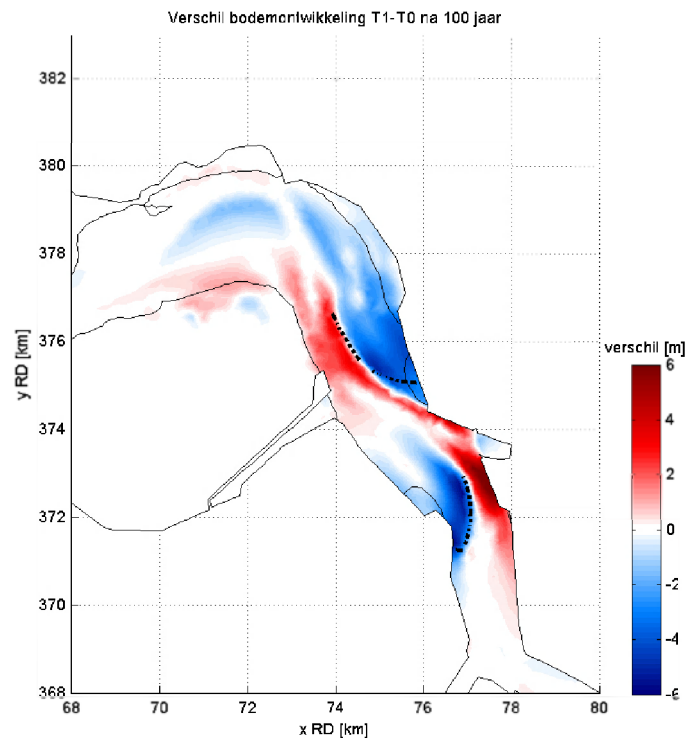
Figuur B 11: Bodemontwikkeling van scenario T1 na 100 jaar. De NAP -5 m dieptelijn is in de figuur weergegeven. Rood staat voor sedimentatie; blauw voor erosie.



Figuur B 12: Bodemontwikkeling van scenario T1 na 100 jaar, ingezoomd op de locatie van de leidammen. De leidammen zijn in scenario T1 niet geïmplementeerd. De NAP -5 m dieptelijn is in de figuur weergegeven. Rood staat voor sedimentatie; blauw voor erosie.



Figuur B 13: Verschil in bodemontwikkeling tussen scenario T0 en T1 na 100 jaar. De NAP -5 m dieptelijn (T0) is in de figuur weergegeven. Rood staat voor meer sedimentatie of minder erosie in scenario T1 dan in scenario T0; blauw voor minder sedimentatie of meer erosie in scenario T1 dan in scenario T0.

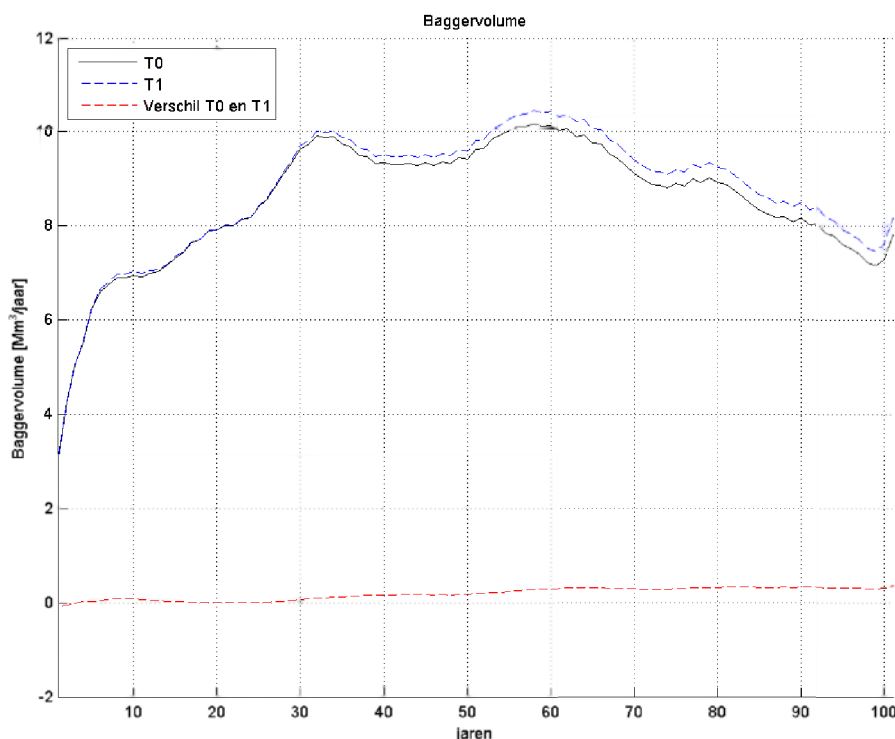


Figuur B 14: Vershil in bodemontwikkeling tussen scenario T0 en T1 na 100 jaar, ingezoomd op de leidammen (zwarte stippellijn). De leidammen zijn in scenario T1 niet geïmplementeerd. De NAP -5 m dieptelijn (T0) is in de figuur weergegeven. Rood staat voor meer sedimentatie of minder erosie in scenario T1 dan in scenario T0; blauw voor minder sedimentatie of meer erosie in scenario T1 dan in scenario T0.

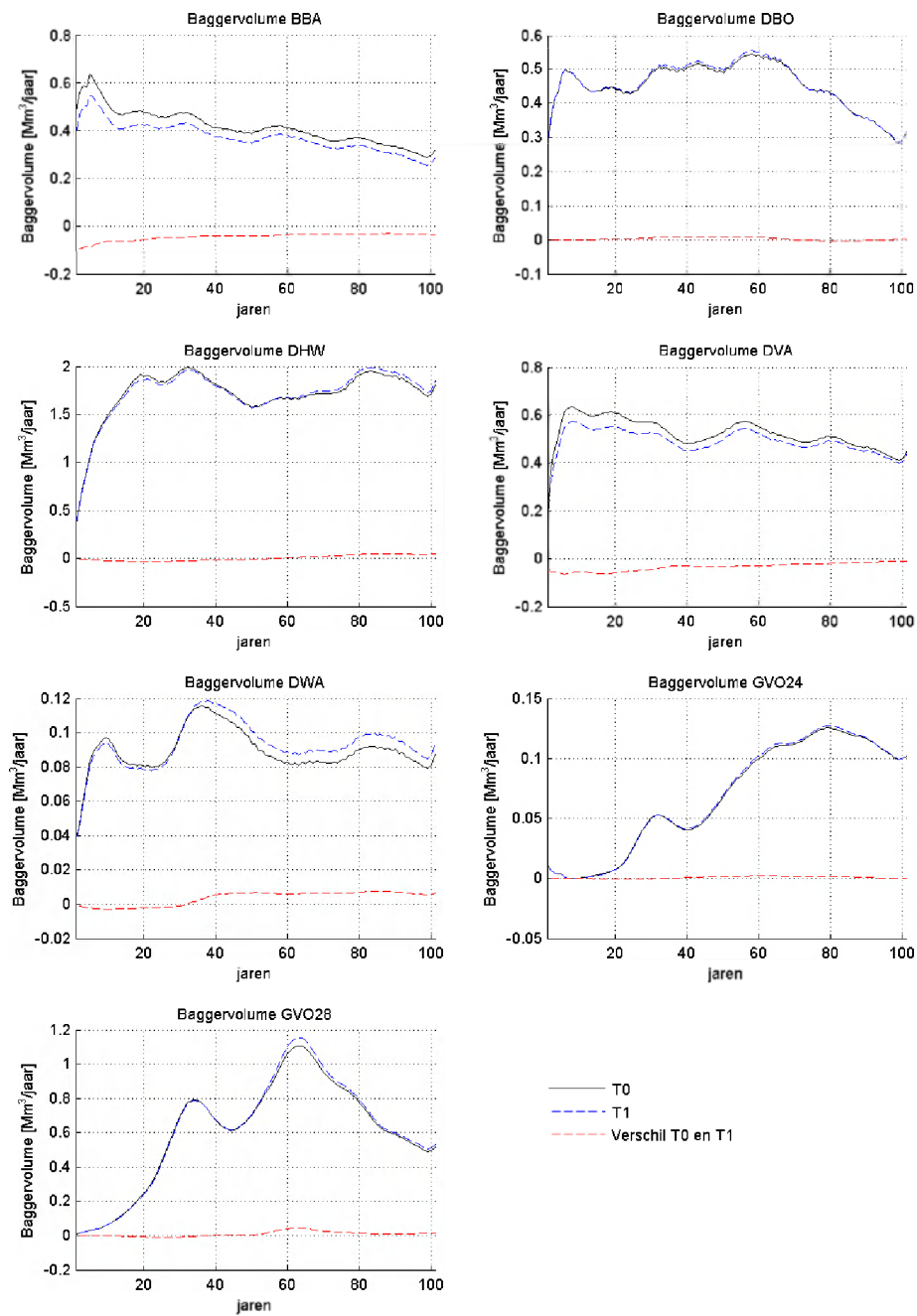
Baggerhoeveelheden

Het FINEL2d model houdt bij hoeveel volume er per jaar gebaggerd moet worden om de vaargeul op diepte te houden. De volumes van de gehele Westerschelde zijn te zien in Figuur B 15. Hierbij is het volume getoond over de jaren voor de T0 en de T1 en het verschil tussen de T1 en T0. De eerste jaren heeft het model nodig om op te starten. Na een aantal jaren ontstaat er langzaam een verschil tussen de T0- en de T1-berekening. Het verschil in totaalvolume na 101 jaar (100 jaar met aftrek van inspelen) blijft echter beperkt. Het baggervolume is over de jaren niet gelijk. Dit wordt veroorzaakt doordat de vaargeul strak op zijn plaats vastgehouden wordt in het model, terwijl de morfologische activiteit van de Westerschelde gewoon doorgaat. Het kan dus zijn dat er in bepaalde jaren bijvoorbeeld meer gebaggerd moet worden doordat er ondieptes de vaargeul in 'lopen'.

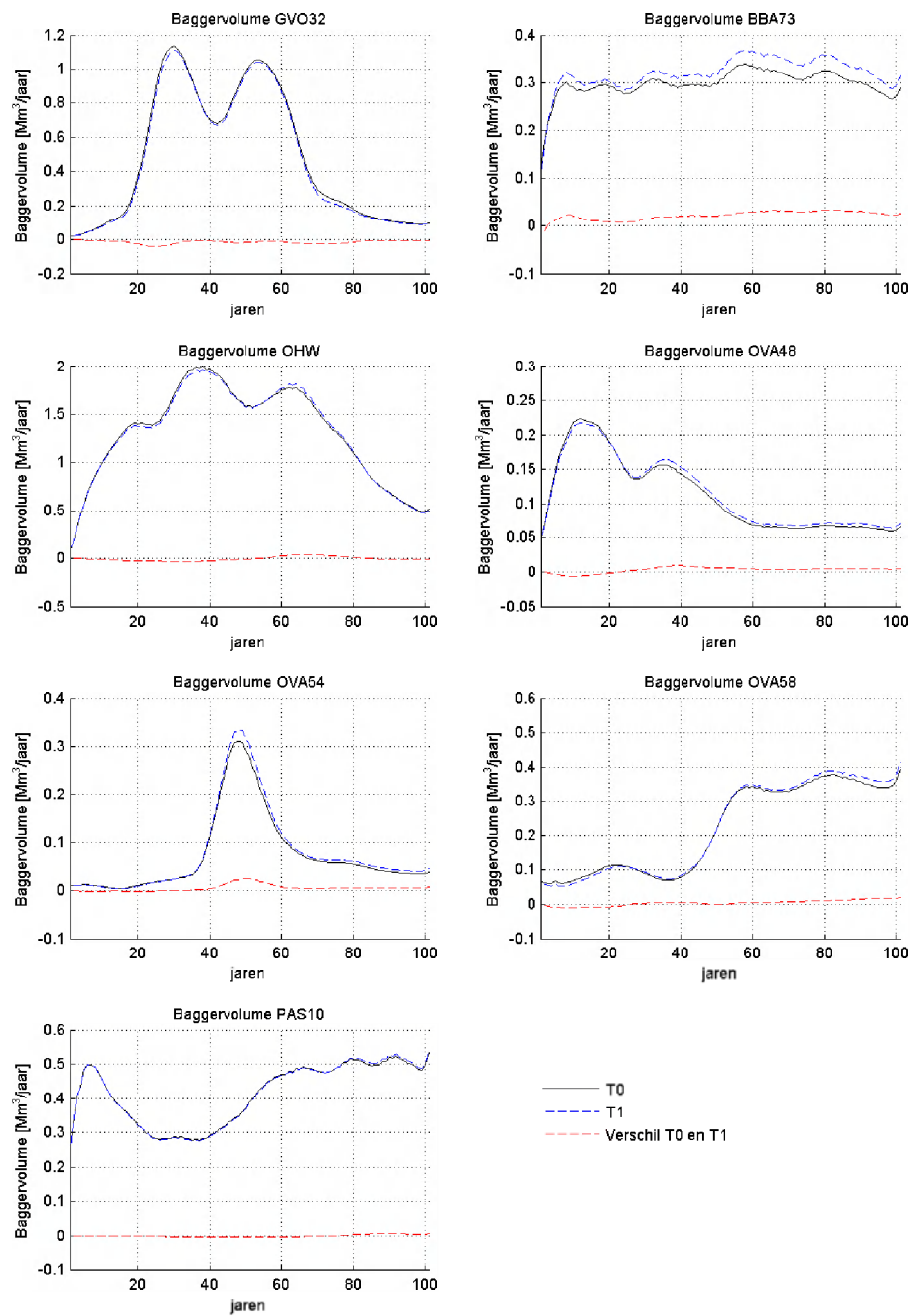
De baggerhoeveelheden zijn uitgesplitst per drempelgebied in Figuur B 16 tot en met Figuur B 19. In de figuren is zichtbaar dat in een aantal baggergebieden in het oostelijk deel van de Westerschelde (BBA72, BBA73) en in de Zeeschelde (DZA, ZSCH) het baggervolume toeneemt als gevolg van het verwijderen van de leidammen. Het toenemen van de baggerhoeveelheid in de polygonen BBA72, DZA en ZSCH is een direct gevolg van het morfologisch effect van het verwijderen van de leidammen. Als gevolg van de ingreep neemt het stortvolume in stortpolygoon SH61 toe, dat overlapt met baggerpolygoon BBA73. Vermoedelijk ontstaat hierdoor een toename in de baggerhoeveelheid van BBA73 zichtbaar



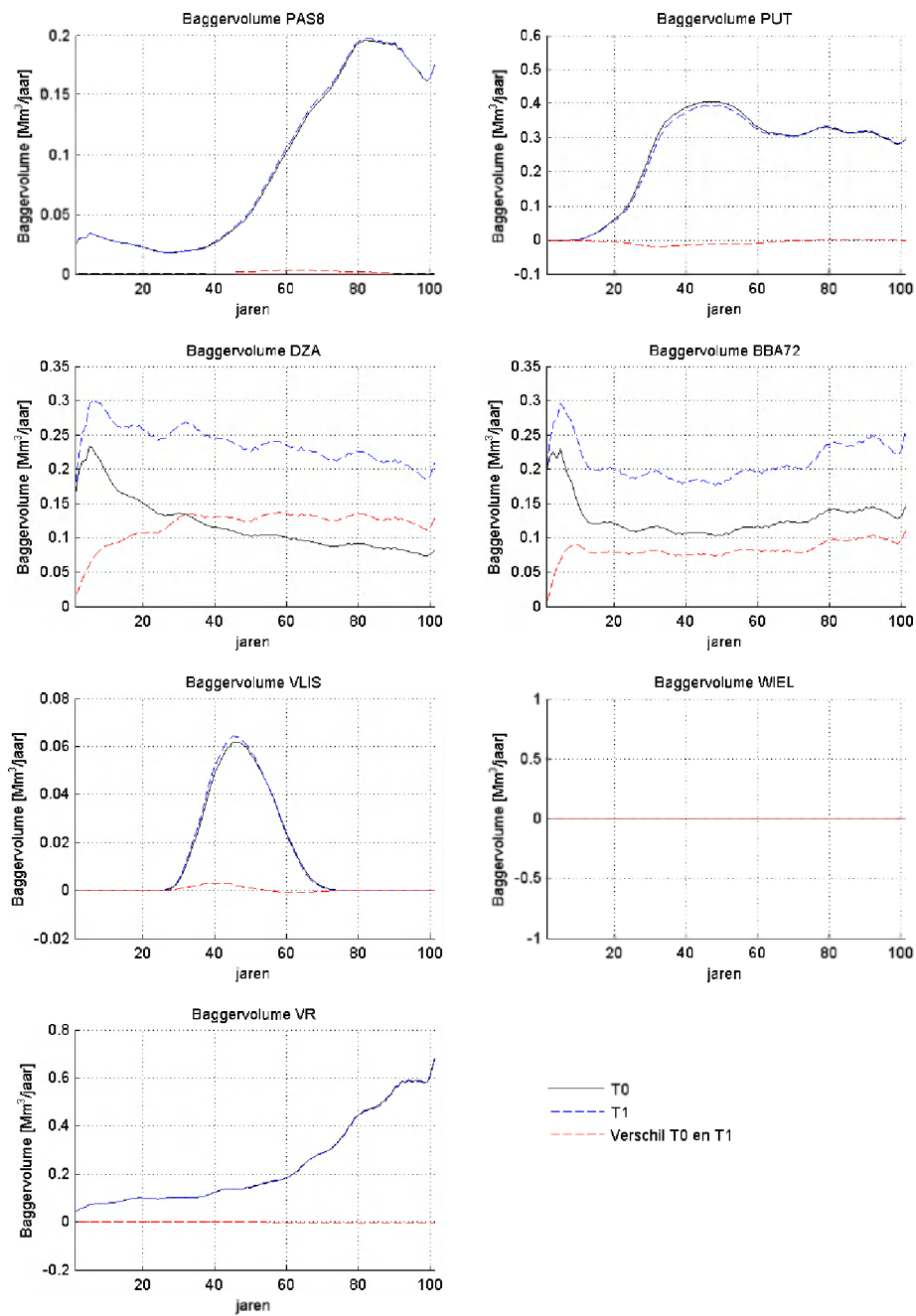
Figuur B 15: Baggervolume gehele Westerschelde



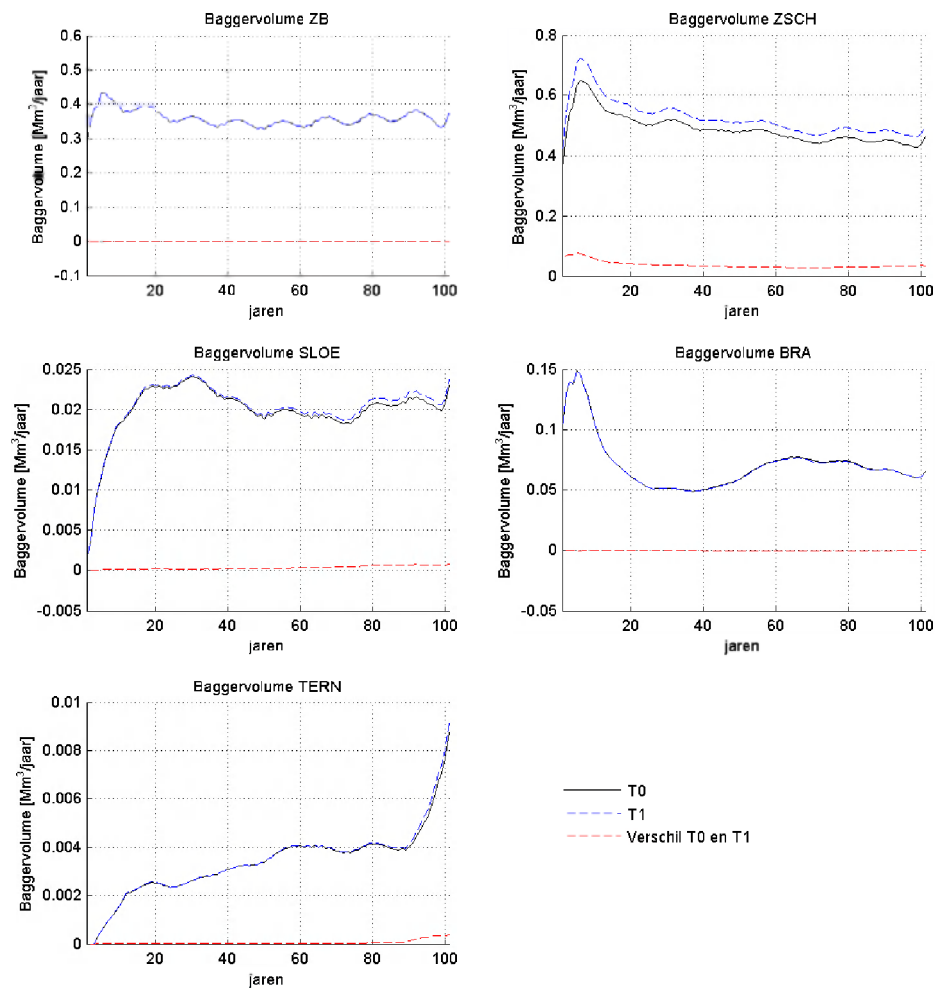
Figuur B 16: Bagervolume uitgesplitst per drempel (1/4).



Figuur B 17: Bagervolume uitgesplitst per drempel (2/4).



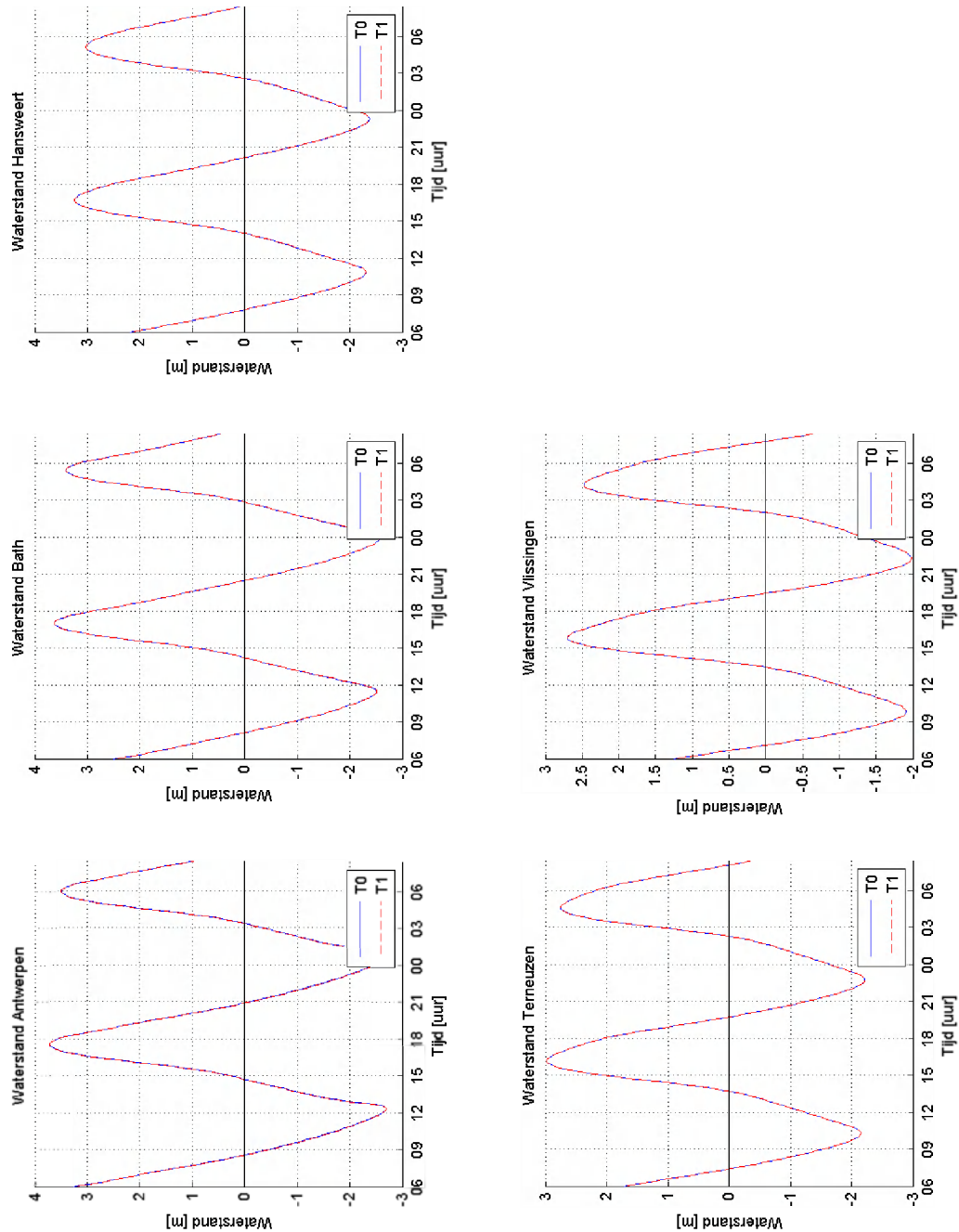
Figuur B 18: Bagervolume uitgesplitst per drempel (3/4).



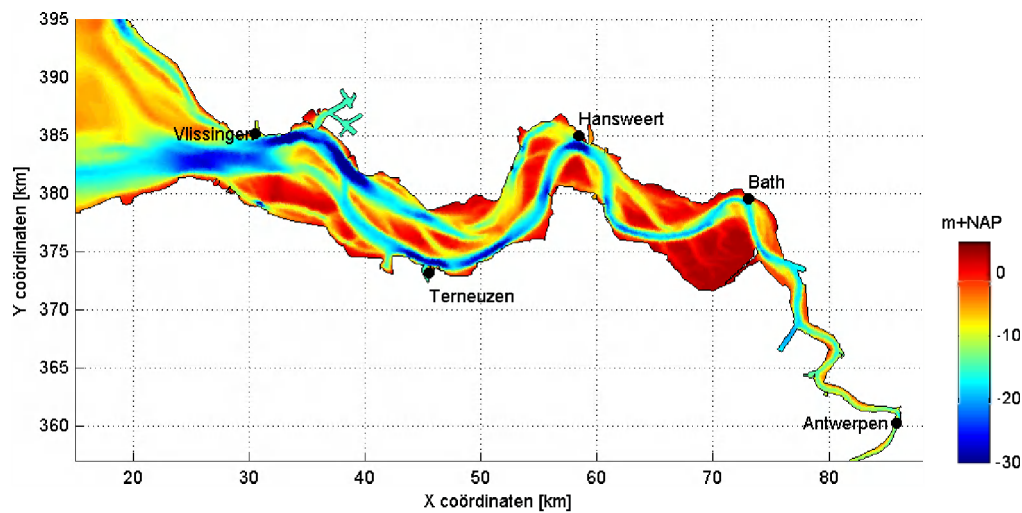
Figuur B 19: Baggervolume uitgesplitst per drempel (4/4).

Waterstanden

De waterstanden voor verschillende locaties in de Westerschelde worden in Figuur B 20 weergegeven voor een moment aan het einde van de berekeningen. In Figuur B 21 wordt de ligging van de locaties in de Westerschelde weergegeven. Te zien is dat de waterstanden vrijwel exact over elkaar heen vallen. Ter plaatste van Antwerpen zijn lokaal kleine verschillen zichtbaar.



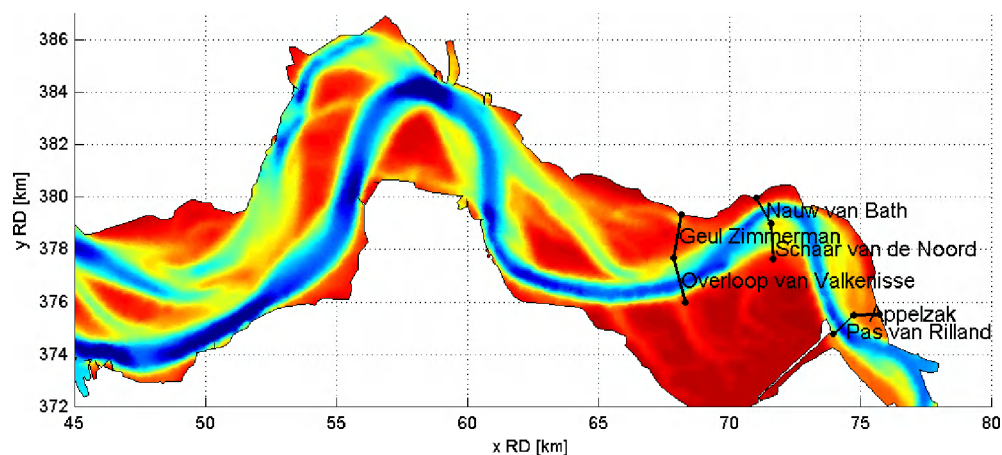
Figuur B 20: Waterstanden op verschillende locaties in de Westerschelde, aan het einde van de berekening. De locaties van de waterstanden worden in Figuur B 21 weergegeven.



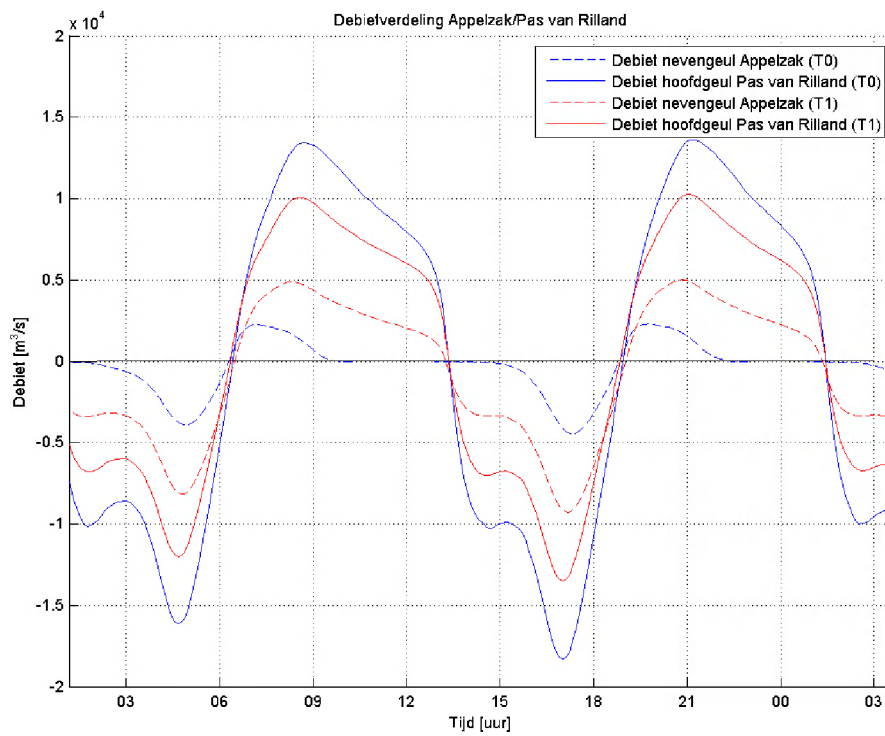
Figuur B 21: Locaties waarop in Figuur B 20 de waterstanden gegeven zijn.

Debietten

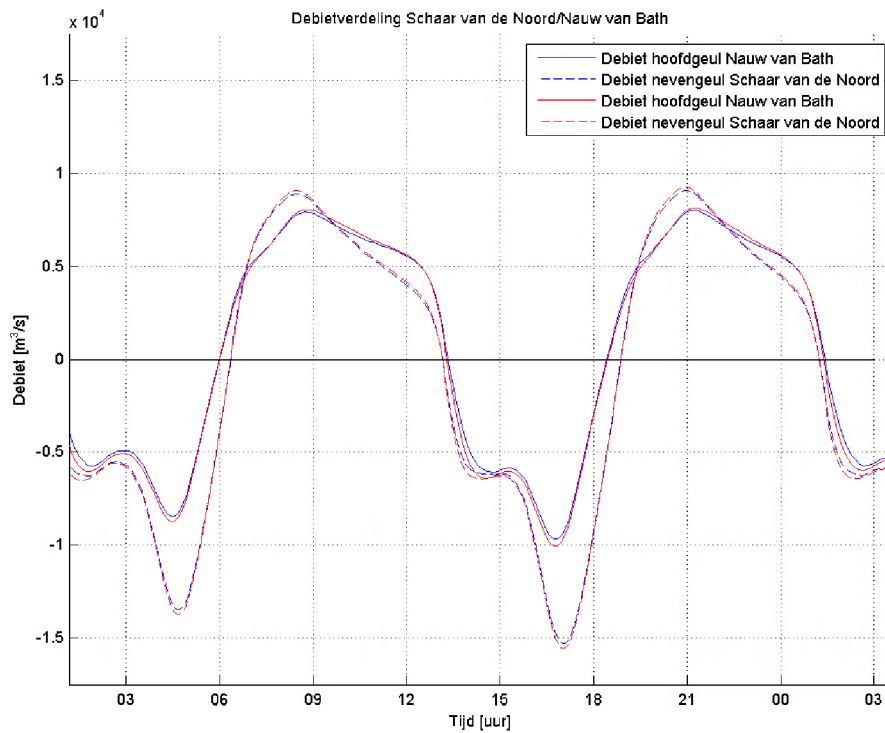
Om verder inzicht te krijgen in de effecten zijn debietverdelingen over de hoofd- en nevengeulen bepaald. Onderstaande figuren tonen van één dag de debieten aan het eind van de simulatie (na 100 jaar) tijdens een springtij situatie. De locaties van de debiettraaien zijn weergegeven in Figuur B 22. Ter plaatse van de leidammen is de debietverdeling duidelijk veranderd, zie Figuur B 23. Het debiet is in de T1 meer evenredig over de Pas van Rilland en de Appelzak verdeeld dan in scenario T0 het geval is. Ter plaatse van Bath is nauwelijks verandering in de debietverdeling zichtbaar. Ter plaatse van de Overloop van Valkenisse heeft het verwijderen van de leidammen geen enkel effect op de debietverdeling.



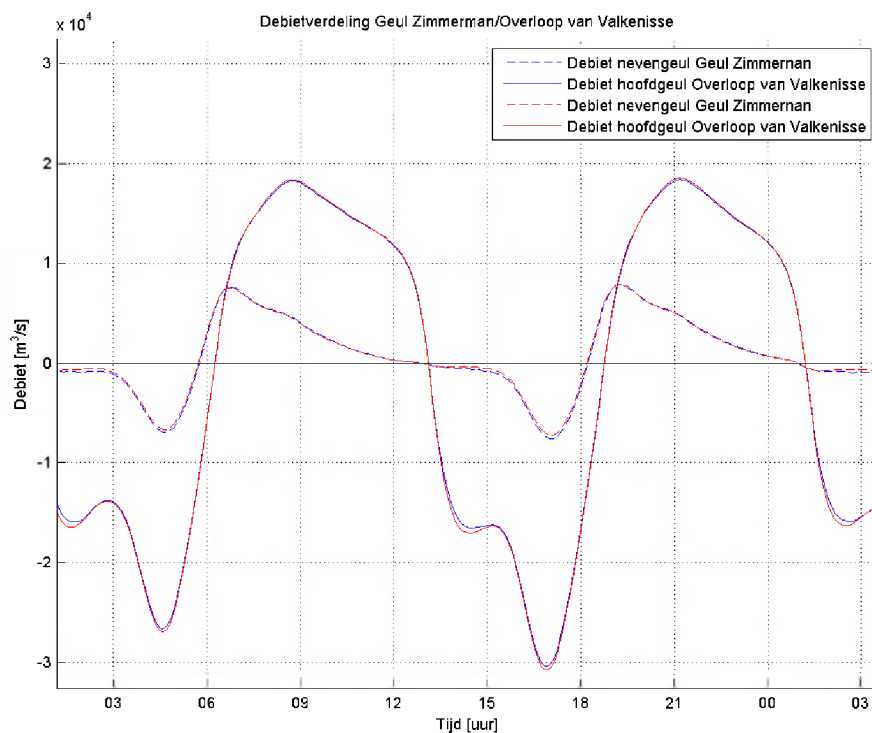
Figuur B 22: Locaties debiettraaien in de Westerschelde.



Figuur B 23: Debietverdeling Appelzak/Pas van Rilland



Figuur B 24: Debietverdeling Schaar van de Noord/Nauw van Bath



Figuur B 25: Debietverdeling Geul Zimmerman/Overloop van Valkenisse

Conclusies

De leidammen bij Antwerpen werken als weerstandselement. Door het verwijderen van de leidammen bij Antwerpen ontstaan lokaal kleine verschillen in de waterstand ten opzichte van de T0 situatie. Het debiet door de Pas van Rilland neemt af en er vindt relatieve sedimentatie plaats. Het debiet door de Appelzak neemt toe en er vindt ten opzichte van scenario T0 relatieve erosie plaats. De ingreep heeft alleen lokaal invloed op de morfologie en heeft een zeer beperkte invloed op de waterstand. Ten gevolge van het verwijderen van de leidammen neemt het baggerbezwaar toe.

Referenties

- Consortium Deltares-IMDC- Svašek-Arcadis, 2013. LTV V&T-rapport A-26: Actualisatierapport Finel 2D Schelde-estuarium.
- Consortium Deltares-IMDC- Svašek-Arcadis, 2013. LTV V&T-rapport G-11: Simulaties met effectanalyse op schaal estuarium

Colofon

SIMULATIES V&T MET EFFECTANALYSE OP MACROSCHAAL

OPDRACHTGEVER:

PROJECT LTV VEILIGHEID EN TOEGANKELIJKHEID; LTV V&T-RAPPORT K-16

STATUS:

Definitief

AUTEUR:

P.J. Menninga MSc
Gerard Dam

GECONTROLEERD DOOR:

Bart Grasmeijer
Marcel Taal

VRIJGEGEVEN DOOR:

Bart Grasmeijer

11 september 2013
077010281:0.1

ARCADIS NEDERLAND BV
Hanzelaan 286
Postbus 137
8000 AC Zwolle
Tel +31 38 7777 700
Fax +31 38 7777 710
www.arcadis.nl
Handelsregister 9036504

©ARCADIS. Alle rechten voorbehouden. Behoudens uitzonderingen door de wet gesteld, mag zonder schriftelijke toestemming van de rechthebbenden niets uit dit document worden veelelvoudigd en/of openbaar worden gemaakt door middel van druk, fotokopie, digitale reproductie of anderszins.