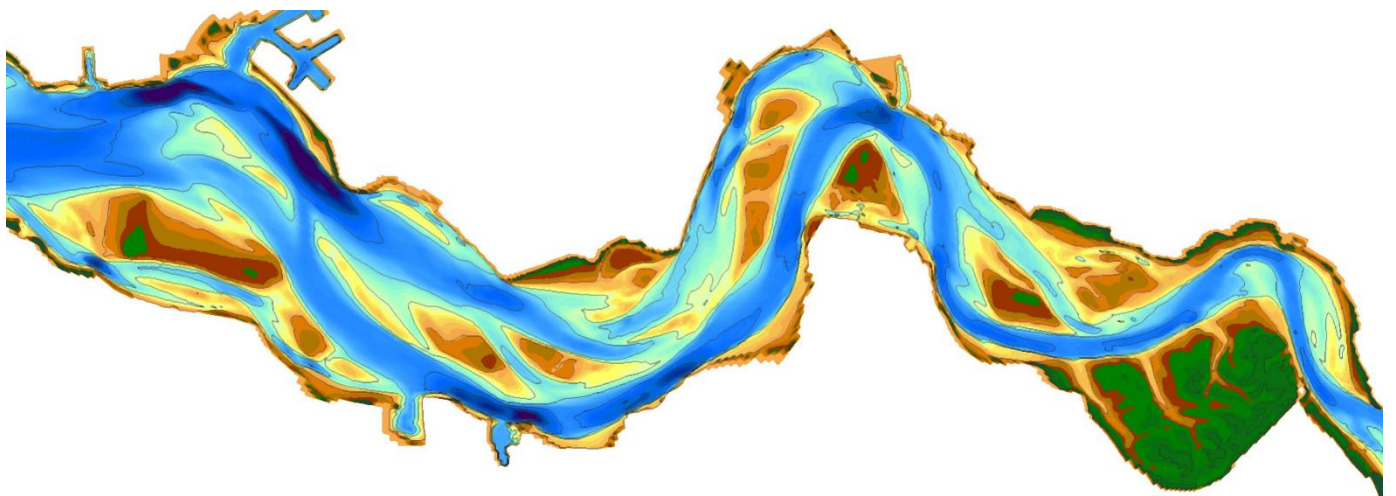


Effecten van storten in diepe putten van de Westerschelde

Synthese van proefstortingen en modelanalyses



Effecten van storten in diepe putten van de Westerschelde
Synthese van proefstortingen en modelanalyses

Auteur(s)

B.J.A. Huisman

Y. Huismans

J. Vroom

Effecten van storten in diepe putten van de Westerschelde

Synthese van proefstortingen en modelanalyses

Opdrachtgever	Vlaams-Nederlandse Scheldecommissie
Contactpersoon	Frederik Roose
Referenties	
Trefwoorden	Westerschelde, Stortstrategie, Diepe putten, Vaargeulonderhoud, Morfologie

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	21-01-2021
Projectnummer	1210301-015
Document ID	1210301-015-ZKS-0012
Pagina's	43
Status	definitief

Auteur(s)

	B.J.A. Huisman	
	Y. Huismans	
	J. Vroom	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
1.0	B.J.A. Huisman	Z.B. Wang	A.G. Segeren	
	Y. Huismans			
	J. Vroom			

Samenvatting

De toegankelijkheid van de haven van Antwerpen is afhankelijk van de diepte van de vaargeulen in de Westerschelde. Ten behoeve hiervan wordt het hele jaar door gebaggerd. Het gebaggerde materiaal wordt in de Westerschelde teruggestort. Ten behoeve van een verbeterde stortstrategie heeft de 'Vlaams Nederlandse Schelde Commissie' (VNSC) middels de projectgroep 'Storten en meergeulenstelsel' Deltares verzocht om verschillende studies uit te voeren naar de effecten van een stortstrategie met plaatsing van gebaggerd materiaal in de diepe delen van de hoofdgeul van de Westerschelde. Deze analyses zijn uitgevoerd om te toetsen of een aangepaste beheerstrategie voor het storten van gebaggerd materiaal mogelijk is. Deze beheerstrategie wordt door Rijkswaterstaat Zee & Delta en de afdeling Maritieme Toegang (aMT) van het Ministerie van Openbare Werken in Vlaanderen voorbereid en door de VNSC vastgesteld als basis voor de nieuwe vergunningen voor storten van baggerspecie in de Westerschelde.

Dit rapport bevat een synthese en nadere uitwerking van eerdere studies die zich richten op de verspreiding van zandige baggerspecie. De mechanismen voor verspreiding van het gestorte sediment zijn uitgewerkt voor de Put van Hansweert, waarvoor gegevens van proefstortingen beschikbaar zijn. Belangrijk is dat een conceptueel model wordt gegeven van de verwachte transportpatronen in de Put van Hansweert én de morfologische respons van stortingen. Hierin wordt de beschikbare informatie samengevat met betrekking tot 1) lokale processen tijdens het storten, 2) de levensduur van stortingen en 3) de regionale verspreiding van het sediment (met name in de hoofdgeul én naar de binnenbocht). Op basis hiervan kon tevens een interpretatie worden gegeven van de verspreiding van gestorte baggerspecie in andere diepe putten van de Westerschelde. Ook wordt een overzicht gegeven van de te verwachten effecten van storten van baggerspecie in diepe putten op de hydrodynamica, grootschalige / lange-termijn morfologie en het baggerbezwaar in de vaargeul van de Westerschelde.

De analyses dienen als basis voor het inschatten van mogelijke effecten die kunnen optreden tijdens het storten van sediment. Op basis van de analyses in deze studie en de onderliggende deelrapportages is het echter niet mogelijk om een gedetailleerdere (kwantitatieve) voorspelling te geven van de baggervolumes en morfologische effecten op de nevengeulen en intergetijdengebieden. Het is daarom aan te bevelen om het storten van zand in de diepe putten van de Westerschelde door de tijd heen langzaam op te bouwen, om zodoende de effecten nader te kunnen onderzoeken. Hiervoor dient ook actief gemonitord te worden na het storten, zodat de volgende stortingen qua locatie en volume geoptimaliseerd kunnen worden.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	6
1.1	Achtergrond en aanleiding voor het onderzoek	6
1.2	Doel en onderzoeksvragen	6
1.3	Methodiek	6
1.4	Leeswijzer	7
2	Systeembeschrijving Westerschelde	8
2.1	Gebiedskarakteristiek	8
2.2	Historie baggerwerkzaamheden	8
2.3	Hydrodynamica van de Westerschelde	9
2.4	Stroming in diepe putten	9
2.5	Morfologie van de Westerschelde	11
2.6	Sediment en Harde lagen	13
2.7	Historische morfologische ontwikkelingen	13
3	Effecten van storten in diepe putten	16
3.1	Introductie	16
3.2	Stortstrategieën	16
3.3	Lokaal: storten en erosie van proefstorting	17
3.4	Mesoschaal: verspreiding van sediment naar de omgeving	20
3.4.1	Morfologische invloed van Put van Hansweert	21
3.4.2	Andere diepe putten van de Westerschelde	25
3.5	Impact stortstrategie op baggervolumes en verdeling sediment	28
3.6	Effect op getijvoortplanting en lokale stroomsnelheden	30
3.7	Lange termijn morfologische effecten	31
4	Conclusies en aanbevelingen	35
4.1	Conclusies	35
4.2	Aanbevelingen	36
	Referenties	38
A	Overzicht Westerschelde	41
B	Eigenschappen van stortstrategieën	42

1 Inleiding

1.1 Achtergrond en aanleiding voor het onderzoek

De toegankelijkheid van de haven van Antwerpen is afhankelijk van de diepte van de vaargeulen in de Westerschelde. Ten behoeve hiervan wordt het hele jaar door gebaggerd. Het gebaggerde materiaal wordt in de Westerschelde teruggestort. Ten behoeve van een verbeterde stortstrategie heeft de 'Vlaams Nederlandse Schelde Commissie' (VNSC) middels de projectgroep 'Storten en meergeulenstelsel' Deltares verzocht om verschillende studies uit te voeren naar de effecten van een stortstrategie met plaatsing van gebaggerd materiaal in de diepe delen van de hoofdgeul van de Westerschelde. De resultaten van deze studies dragen bij aan het opstellen van een beheerstrategie door RWS Zee & Delta (Marco Schrijver) en aMT (Frederik Roose, Youri Meersschant), welke door de VNSC wordt vastgesteld als basis voor de nieuwe vergunningen voor storten van baggerspecie in de Westerschelde.

Deze studie betreft een synthese van de inhoudelijke rapportages die zijn geschreven welke zich richten op de hydrodynamica van de diepe putten (Van der Wegen et al., 2021), verspreiding van proefstortingen en de morfologische invloed op de omgeving (Huisman et al., 2018; Huismans et al., 2021) alsmede baggervolumes (Huisman et al., 2018). Tevens wordt in deze studie een nadere interpretatie (expert-beoordeling) gegeven van de mogelijke lange termijn effecten van het storten in de diepe putten op de Westerschelde.

1.2 Doel en onderzoeksvragen

Dit onderzoek draagt bij aan een conceptueel model van de morfologie van de diepe putten, alsmede de effecten van een stortstrategie. De volgende vragen krijgen aandacht in deze studie:

1. Wat is de hydrodynamische impact van storten in diepe putten?
2. Wat is de morfologische impact van een storten in diepe putten?
 - a. Lokaal in een diepe put?
 - b. Op mesoschaal over aanliggende deelgebieden?
 - c. Qua lange termijn morfologie?
3. Wat zijn de kenmerken van een efficiënte stortstrategie?
 - a. Wat is de invloed van een storting in diepe putten op het baggerbezwaar?
 - b. Welke aanbevelingen zijn er te geven over de praktijk van het storten in diepe putten? Hoe dient er gemonitord te worden?

1.3 Methodiek

Deze studie biedt een synthese van de kennis over diepe putten van de Westerschelde en mogelijke stortstrategieën waarvoor informatie uit proefstortingen in de diepe Put van Hansweert en numerieke modellen worden gebruikt. De volgende onderdelen zijn uitgewerkt:

1. **Systeembeschrijving van Westerschelde (Hoofdstuk 2)**

Algemene kennis over het fysische systeem van de Westerschelde wordt in dit hoofdstuk beschreven, waardoor een overzicht ontstaat van de relevante gebieden, bodemsedimentsamenstelling, harde lagen en de historische morfologische ontwikkeling. Tevens worden de relevante hydrodynamische processen in de diepe putten nader beschreven.

2. Impact van storten in diepe putten (Hoofdstuk 3)

Dit hoofdstuk beschrijft de impact van storten in diepe putten op de morfologie en hydrodynamica van de Westerschelde. De verspreiding van het zand op de stortlocatie en naar de omgeving wordt beschreven op basis van ervaringen met proefstortingen in de Put van Hansweert. Hierbij wordt het volgende beschouwd : 1) de lokale processen tijdens het storten en snelheid van de erosie in de diepe put, 2) de verspreiding van gestort sediment in de Put van Hansweert naar de omliggende morfologische elementen (met name hoofdgeul, geulwand, nevengeul) alsmede de doorvertaling voor andere diepe putten en 3) een overzicht van de verwachte lange termijn effecten van storten in diepe putten van de Westerschelde. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de eerdere rapportages over de verspreiding van zand in de putten en omgeving (Huisman et al., 2018; Huismans et al., 2021) welke aangevuld wordt met expert beoordeling. Ook het effect van stortstrategieën in diepe putten op het baggerbezwaar wordt beschouwd, waarna er aandacht is voor de invloed van het storten in diepe putten op de getijslag en lokale stroomsnelheden. De resultaten van de Delft3D berekeningen in Huisman et al. (2018) worden hiervoor als basis gebruikt.

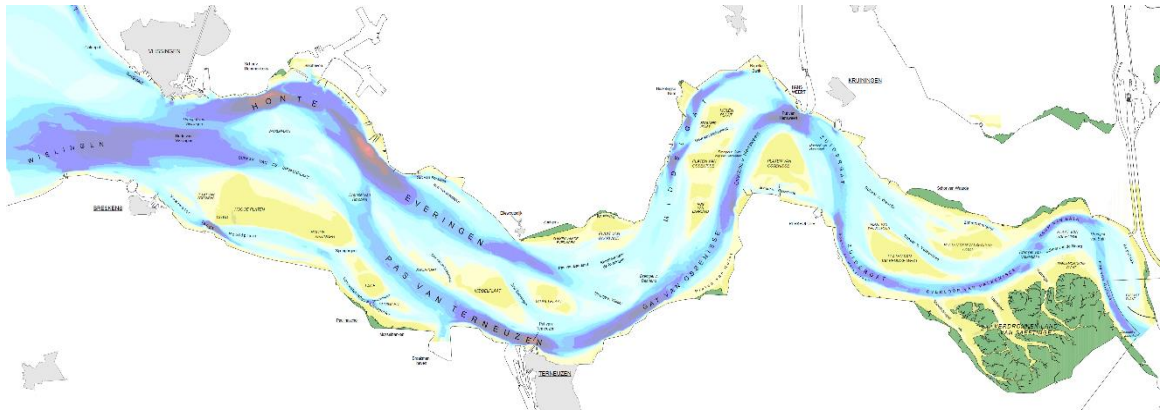
1.4 Leeswijzer

In Hoofdstuk 2 wordt een systeembeschrijving gegeven van de diepe putten van de Westerschelde en het beheer van de vaargeul. In dit hoofdstuk wordt ook de hydrodynamica van diepe putten beschreven alsmede de morfologische ontwikkeling van de Westerschelde op basis van literatuurkennis. De invloed van storten in de diepe putten wordt in Hoofdstuk 3 beschreven. Hier wordt een interpretatie gegeven van de lokale verspreiding van proefstortingen in de Put van Hansweert en impact van deze stortingen op de morfologie van de omgeving van de diepe putten. Op basis van expert-beoordeling is de lange-termijn morfologische invloed van het storten in diepe putten van de Westerschelde beschreven. Ook wordt het mogelijke baggerbezwaar geëvalueerd voor verschillende typen stortstrategieën, alsmede de verwachte invloed hiervan op het getij in de Westerschelde. Conclusies en aanbevelingen worden gegeven in Hoofdstuk 4.

2 Systeembeschrijving Westerschelde

2.1 Gebiedskarakteristiek

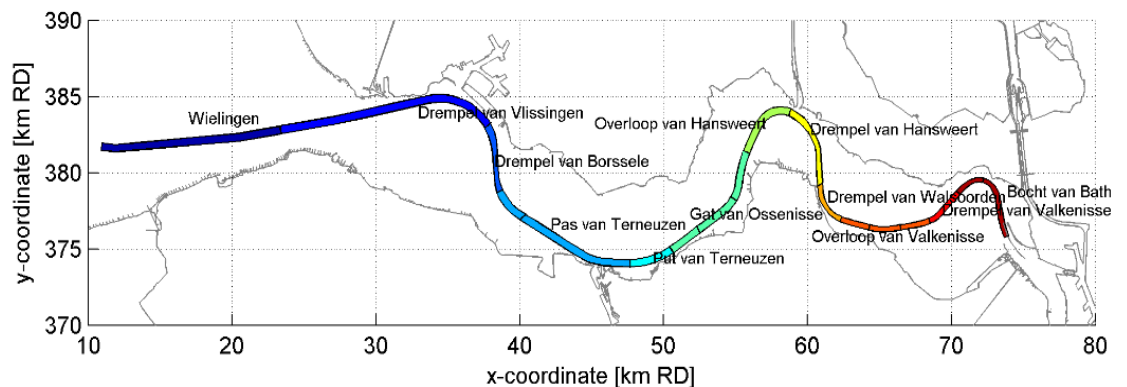
De Westerschelde is een getijde gedomineerd estuarium met sterk meanderende geulen (Figuur 2.1). De intergetijdengebieden zijn ecologisch waardevol, onder meer voor vogels. De hoofdgeul wordt gebruikt als vaarweg naar de haven van Antwerpen, en daarvoor op diepte gehouden.



Figuur 2.1 Overzicht van naamgeving platen en geulen van de Westerschelde

2.2 Historie baggerwerkzaamheden

In 1895 is gestart met de eerste baggerwerkzaamheden in het Belgische deel van de Schelde. Op Nederlandse bodem is in 1923 gestart met het verdiepen van de vaarweg ter hoogte van Bath (i.e. op de Drempel van Bath). Later worden ook de meer westelijke drempels van de Westerschelde verdiept. (i.e. Drempel van Hansweert en Drempel van Borssele). In de jaren 70 heeft een eerste verruiming van de vaargeul plaats gevonden waardoor meer breedte van de vaargeul werd gerealiseerd. Eind vorige eeuw vond de tweede verruiming van de vaargeul plaats. Gebaggerd materiaal werd op locaties in de buurt gestort (bijv. in nevengeulen).



Figuur 2.2 Overzicht van relevante locaties langs de vaargeul van de Westerschelde

Tot 2015 vond ook zandwinning plaats, waardoor het volume zand in de Westerschelde is afgenomen. Baggeronderhoud wordt ook verricht in de havens langs de Westerschelde. Dit is overwegend fijn sediment (slib).

In 2010 heeft een derde verruiming van de vaarweg plaats gevonden. Momenteel wordt de vaarweg onderhouden op een diepte van LAT -14,5 meter, met een overdiepte van maximaal 70 centimeter. De baggervolumes bedragen ongeveer 8 a 9 miljoen m³ per jaar. In de periode tijdens en na deze verruiming is gebaggerd materiaal ook geplaatst op plaatranden (Hooge Platen West en Noord, Rug van Baarland en Plaat van Walsoorden). Tevens is sediment gestort in enkele nevengeulen (o.a. Schaar van de Spijkerplaat en oostelijke put van de Everingen), in diepe delen van de hoofdgeul (o.a. Zuidergat) en op geulwanden (met name op de noordoostelijke geulwand van het Gat van Ossensisse en in de buitenbocht bij Bath).

2.3 Hydrodynamica van de Westerschelde

De getijslag in de Westerschelde varieert van ongeveer 3,80 m bij Vlissingen tot bijna 5 m ter hoogte van Bath (Kuijper & Lescinski, 2013). Tot aan Tielrode in de Zeeschelde neemt de getijslag verder toe (tot bijna 5,50 m). De verdiepingen van de Westerschelde en Zeeschelde alsmede de inpoldering van getijdegebieden zorgden voor een toename in de getijslag gedurende de laatste halve eeuw. De verruimde geulen verlaagden de weerstand voor de getijgolf, terwijl er minder bergend oppervlak was door het inpolderen van intergetijdengebieden.

De dieptegemiddelde getijstrooming tijdens vloed of eb bedraagt ongeveer 0.7 t/m 1 m/s in de geulen van het mondingsgebied van het estuarium, en is ongeveer 1 t/m 1.5 m/s in de hoofdgeulen van het estuarium. De piekstroomsnelheid tijdens eb is over het algemeen groter dan de piek-snelheid tijdens vloed (Vroom et al., 2015). Lokaal zijn de stroomsnelheden hoger als gevolg van contractie van de stroming én 3D processen (i.e. met name op de plaatranden, in nevengeulen en op de geulwand van diepe putten). Tevens kunnen scheepsgolven (i.e. met name de primaire golf) invloed hebben op de stroomsnelheden op de platen (Schroevers et al., 2011). Het estuarium heeft een relatief kleine rivierafvoer (circa 100 m³/s) ten opzichte van de debieten door het getij.

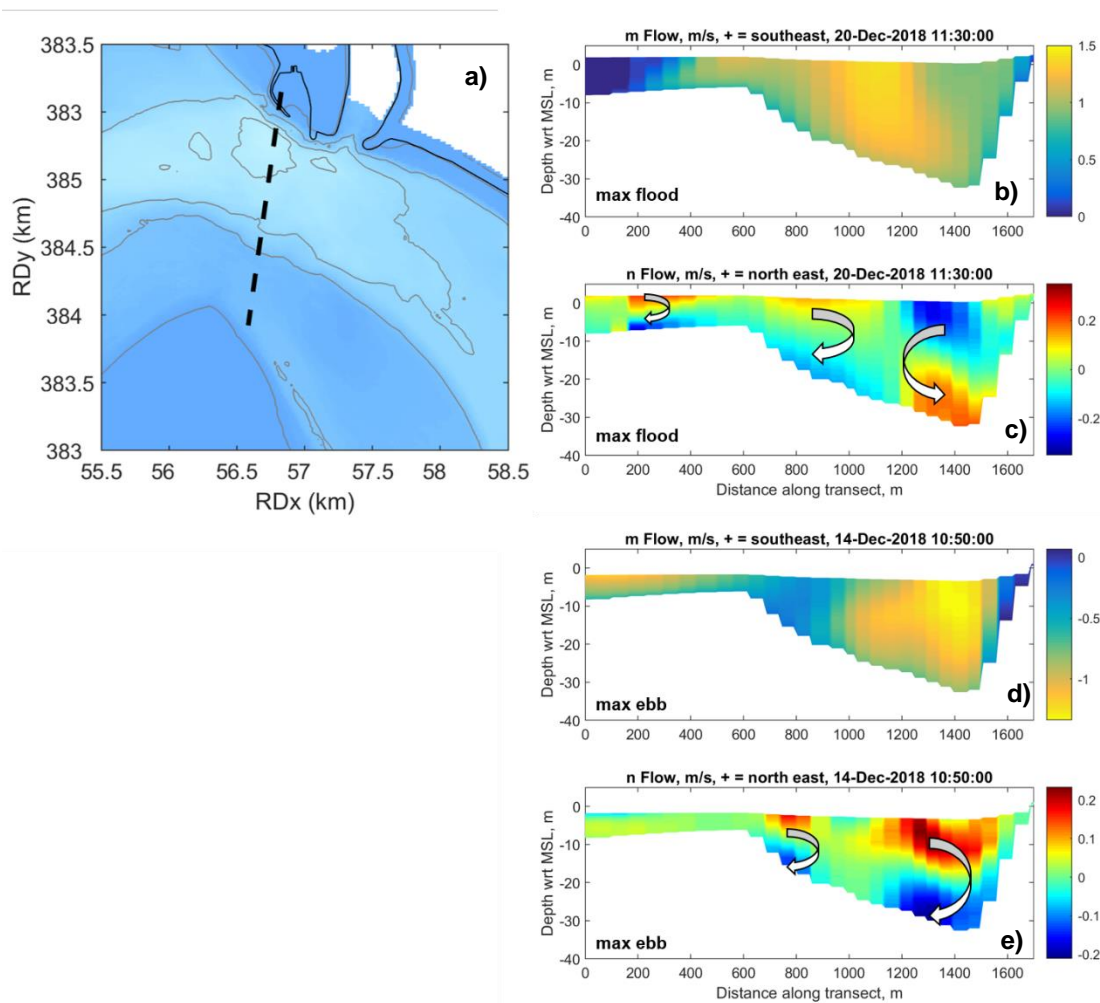
De golfhoogte in het Westerschelde estuarium is over het algemeen beperkt door de strijklengte van de golven en is daardoor binnen het estuarium ten hoogste enkele decimeters. In het gebied aan de zeezijde van het estuarium zijn de golven aanzienlijk hoger en bepaald door de golven die opgewekt worden op de Noordzee. De typische significante golfhoogte op de Nederlandse Noordzeekust is ongeveer 1 m (Wijnberg, 2002) met dominante golfrichting uit het noordwesten of zuidwesten. Typische winterstormen kunnen leiden tot een maximum significante golfhoogte van 4 tot 5 meter en piekperiodes van 10 tot 15 seconde.

2.4 Stroming in diepe putten

Binnen de Westerschelde zijn er verschillende plaatsen waar de vaargeul een sterke bocht maakt. De bochtstralen van de vaargeul zijn het kleinst aan de oostzijde van het estuarium en worden groter in zeewaartse richting. Ter plaatse van het Nauw van Bath is de vaargeul zeer sterk gekromd met bochtstraal van ongeveer 1200 m, terwijl de krommingen bij de Put van Hansweert en Zuidergat ook zeer groot zijn (i.e. bochtstralen van circa 2000 m). Aan de zeezijde heeft de vaargeul de grootste kromming ter plaatse van de Honte (ongeveer 3000 m bochtstraal). Putten bevinden zich op locaties in de Westerschelde met complexe 3D (bocht)stromingen.

Deze bochtstromingen in de diepe putten worden tevens sterk bepaald door saliniteit gedreven stromingen (Van der Wegen et al., 2021). De dichtheidsverschillen tussen het midden van de vaargeul en de zijanten zorgen dat er meerdere circulatiecellen ontstaan dwars op de vaargeul. Afhankelijk

van de locatie en de fase van het getij kunnen 2 tot 4 circulaties gevonden worden over de breedte van de geul ter plaatse van de Put van Borssele en Put van Hansweert (Figuur 2.3). Deze circulaties zijn belangrijk voor de morfologie van de diepe putten, omdat ze invloed hebben op de 1) dwarsstromingen dichtbij de bodem, 2) opwaartse en neerwaartse stromingen die suspensie van zand beïnvloeden en 3) het verticale profiel van de getijstrooming in de lengterichting van de geul.



Figuur 2.3 Berekende stroomsnelheden in de Put van Hansweert op 20 December 2018 tijdens de vloed (paneel b en c) en eb fase (paneel d en e) (Van der Wegen et al., 2021).

I : Dwarsstroming bij de bodem

Deze circulatiecellen zorgen voor een dwarsstroming die aanzienlijk kan zijn (zeg 10% van de snelheid van de stroming in de hoofdgeul; Van der Wegen et al., 2021). De richting van de stroming bij de bodem staat echter niet altijd naar de binnenbocht zoals verwacht mag worden voor bochtstroming in rivieren, maar kan door de laterale dichtheidsverschillen ook juist naar de buitenbochtgericht zijn, zoals bijvoorbeeld te zien is tijdens de vloed fase voor de Put van Hansweert (Figuur 2.3c). Tijdens de eb-fase van het getij staat de residuele stroming wel naar de binnenbocht toe gericht (Figuur 2.3e).

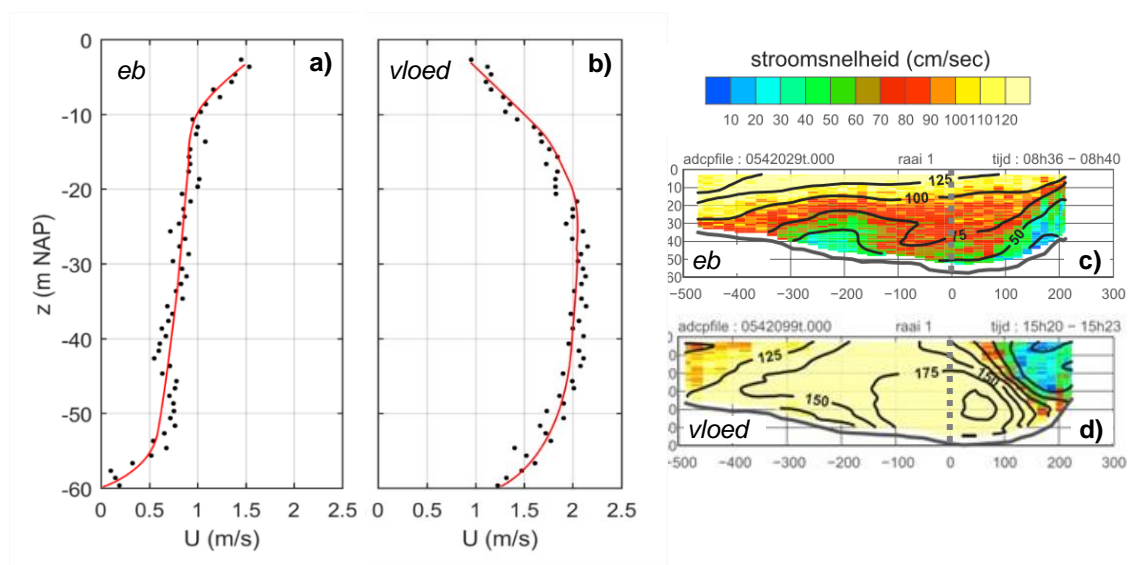
II : Opwaartse en neerwaartse stroming (suspensie)

Ook zorgen deze circulatiecellen op bepaalde plaatsen in de geul voor een opwaartse of neerwaartse stroming (i.e. op convergentie en divergentie punten van de stromingscomponent dwars op de

hoofdrichting van de geul). Verwacht wordt dat deze stromingen de suspensie van sediment in de waterkolom kunnen vergroten of sediment juist naar beneden kunnen voeren, waardoor er meer of juist minder sediment zal bezinken. Als voorbeeld kan de Put van Hansweert genomen worden waar in de beschouwde periode sprake was van een neerwaartse stroming op de binnenbocht van de Put van Hansweert tijdens de vloed-fase (Figuur 2.3c), terwijl er een opwaartse stroming was tijdens de eb-fase (Figuur 2.3e). Overigens kan dit op andere momenten of locaties weer anders zijn.

III : Verticale positie van grootste stroomsnelheden (lengterichting van de geul)

Naast de dwarsstromingen wordt ook de stroming in de lengterichting van de geul (in met name de diepe putten) aanzienlijk beïnvloed door de recirculaties als gevolg van dichtheidsverschillen. Dit effect is zichtbaar bij de Put van Hansweert tijdens zowel de eb als vloed fase (Figuur 2.3b en d). Ook bij de Put van Borssele is dit effect te zien, alhoewel het zich hier met name tijdens vloed manifesteert (Figuur 2.4). De maximum stroomsnelheid tijdens vloed bevindt zich op ongeveer 40% van de waterdiepte en niet bij het wateroppervlak (Figuur 2.4b en d). Hierdoor zullen de krachten op de bodem ook groter zijn dan verwacht mag worden voor een logaritmisch profiel met een maximum hoog in de waterkolom (i.e. zonder invloed van zout). Ook kan de vloeddinantie van het systeem verhoogd worden door dit effect.



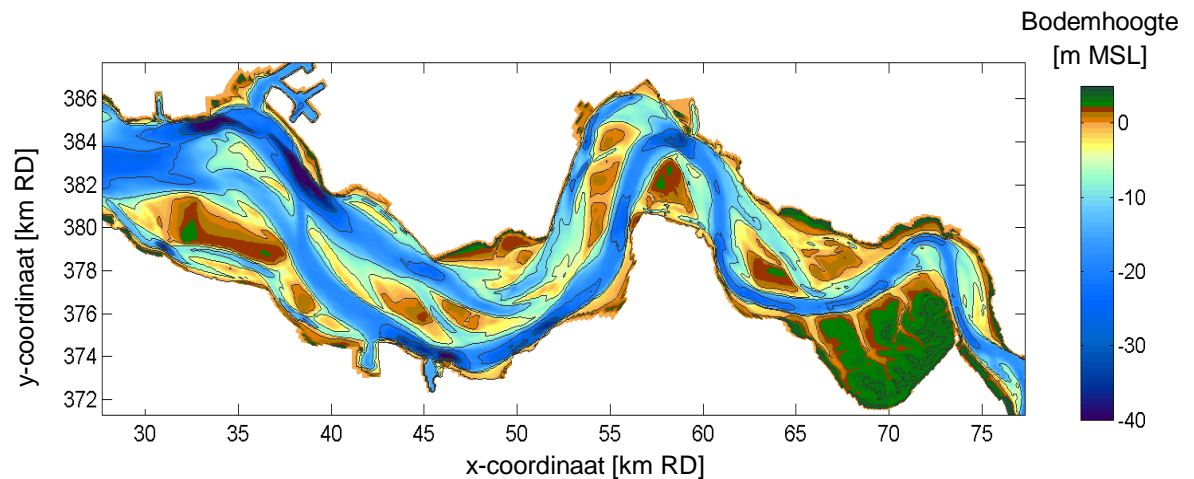
Figuur 2.4 Gemeten stroomsnelheden in de Put van Borssele voor 28 November 2011 (Van der Wegen et al., 2021)

2.5 Morfologie van de Westerschelde

Het Westerschelde estuarium wordt gekenmerkt door een hoofd- en nevengeul (Figuur 2.5). De ebstroming is op de meeste plaatsen dominant in de hoofdgeul, behalve in de hoofdgeul tussen het Gat van Ossensisse en de Put van Hansweert. De vloedstroming is belangrijker in de nevengeulen. De hoofdgeul loopt vanaf de Wielingen via de Honte en Put van Borssele naar de Pas van Terneuzen en Gat van Ossensisse, naar de Put van Hansweert, Zuidergat, Overloop van Valkenisse en Nauw van Bath. Ter plaatse van de bochten is de hoofdgeul dieper, veelal omdat er door bedijkingen of andere harde ophangpunten geen ruimte was voor de geul om in de breedte uit te breiden. De hoofdgeul wordt regelmatig gebaggerd.

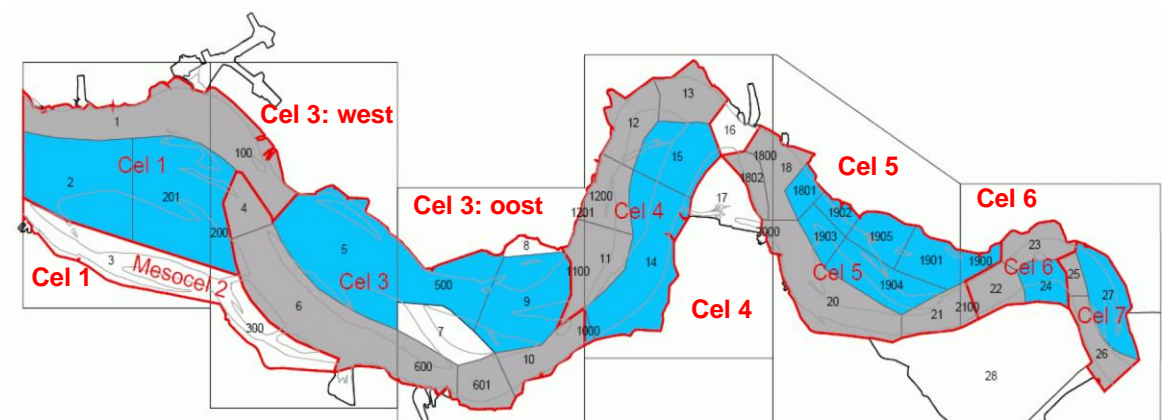
De nevengeulen hebben een minder grote doorsnede dan de hoofdgeul. Van west naar oost hebben ze de namen 'Schaar van de Spijkerplaat', Everingen, Middelgat, Schaar van Waarde, Schaar van Valkenisse, Schaar van de Noord en Appelzak. De laatste ligt achter een geleidedam en is geen echte

nevengeul meer. Tussen hoofd- en nevengeulen kunnen kortsluitgeulen liggen, die plaatgebieden doorsnijden.



Figuur 2.5 Initiële historische bathymetrie van het Westerschelde model

De Westerschelde wordt veelal beschreven via de zes aanwezige macrocellen, een samenhangend deel van hoofd- en nevengeul en tussen- en naastliggende intergetijdengebieden. De overgang tussen twee macrocellen wordt meestal gelegd waar hoofd- en nevengeulen elkaar 'kruisen' (Figuur 2.6). Die plaatsen worden als drempelgebieden aangeduid en ze zijn altijd de morfologisch meest actieve gebieden. Net bovenstrooms daarvan bevinden zich meestal de locaties die het meest gebaggerd dienen te worden om de diepte van de vaargeul te handhaven.



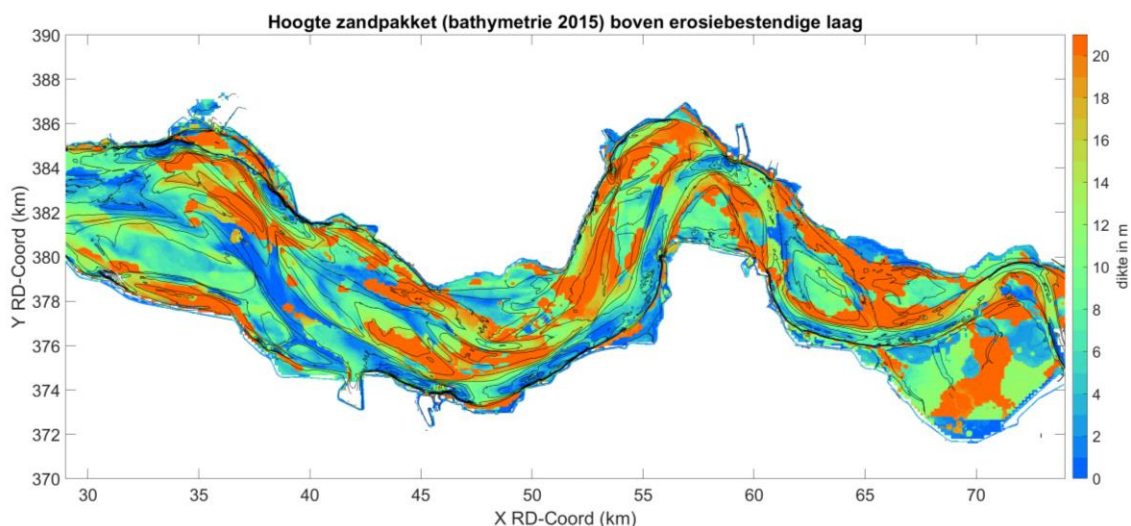
Figuur 2.6 Overzichtskaart van macro- en mesocellen (bron : Cleveringa, 2013)

De intergetijdengebieden tussen de geulen van de Westerschelde (i.e. hoger dan LAT) welke niet verbonden zijn met het vaste land worden aangeduid als platen. Ze kennen zowel hoog- als laagdynamische delen (Cleveringa, 2013). De laagdynamische delen hebben lagere stroomsnelheden en daardoor meer slib en meer bodemleven. De grote stroomsnelheden op hoogdynamische platen zorgen voor een grote opwoeling van de bodem met ribbels als gevolg van de stroming. Hier is weinig bodemleven mogelijk. Hoogdynamische delen van de platen bevinden zich dicht bij de geulen. De hogere onbegroeide intergetijdengebieden aan de randen van de Westerschelde worden Slikken genoemd en de begroeide delen Schorren.

2.6 Sediment en Harde lagen

Het sediment in de Westerschelde bestaat uit zand, slib en veen. Over het algemeen bestaat het sediment in de geulen uit zand, terwijl meer slibrijk sediment op de intergetijdengebieden van de Westerschelde ligt (McLaren, 1993). Gebieden met een lagere dynamiek van de bodem en hydrodynamica worden gekenmerkt door slibrijk sediment met (indien het sediment geconsolideerd is) een verhoogde weerstand tegen erosie ten opzichte van zandige bodems. Tevens zijn er gebieden met een bodem bestaande uit relatief erosiebestendig veen of klei. Oudere klei- en veenlagen zijn op sommige plaatsen in de geulen aanwezig. Door de aanwezigheid van deze meer cohesieve lagen wordt erosie in een bepaalde richting vertraagd, waardoor bijvoorbeeld de diepte van een put niet toeneemt, maar een horizontale vergroting van de put plaats vindt.

In sommige deelgebieden van de Westerschelde bevinden zich harde lagen welke lokale erosie verhinderen. De dikte van de zandige lagen in de Westerschelde is afhankelijk van het bodemniveau waarop erosieresistente lagen voorkomen (bijv. klei, keileem of potklei). Deze zandige sedimentlaagdikte is gekarteerd door TNO (TNO, 2003) en vervolgens aangepast aan de hand van het historische bodemniveau voor alle beschikbare data tot 2011 (Dam, 2013). Recent is een update gemaakt van de harde lagen kaart van de Westerschelde (Van der Vegt et al., 2019) waaruit een vergelijkbare harde lagen kaart naar voren is gekomen. De schematisatie van de dikte van het erodeerbare zandpakket is weergegeven in Figuur 2.7. Opgemerkt wordt dat er volgens het betreffende model geen sediment beschikbaar is op de bodem van verschillende diepe putten in de Westerschelde. De putten kunnen op deze locaties dus niet verdiepen. Verder zijn er bestortingen aanwezig in verschillende buitenbochten van de Westerschelde die niet kunnen eroderen.



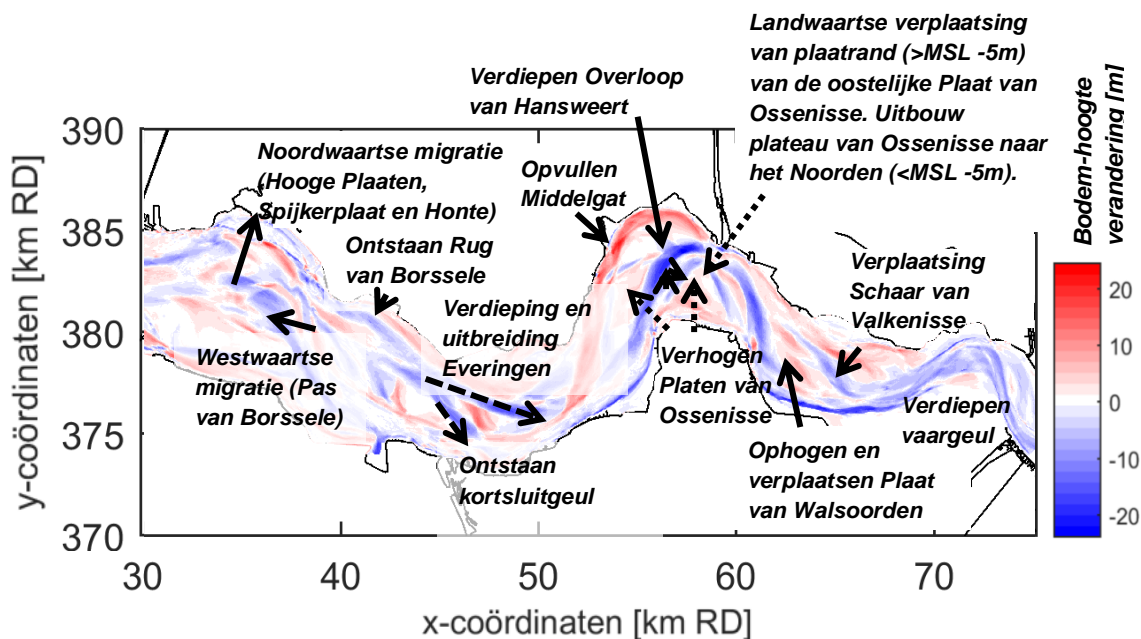
Figuur 2.7 Dikte van de zandlaag op de bovenste moeilijk-erodeerbare laag ten opzichte van de 2015 vakloding. Contourlijnen elke 5m vanaf 0m to -50m t.o.v.NAP. (Van der Vegt et al., 2019)

Een belangrijke bevinding in Van der Vegt et al. (2019) is dat er ook plaatsen zijn met deels cohesieve bodemlagen, die wel eroderen maar dan met een lagere snelheid. Harde lagen lijken dus vooral invloed te hebben op de snelheid waarmee erosie plaats vindt.

2.7 Historische morfologische ontwikkelingen

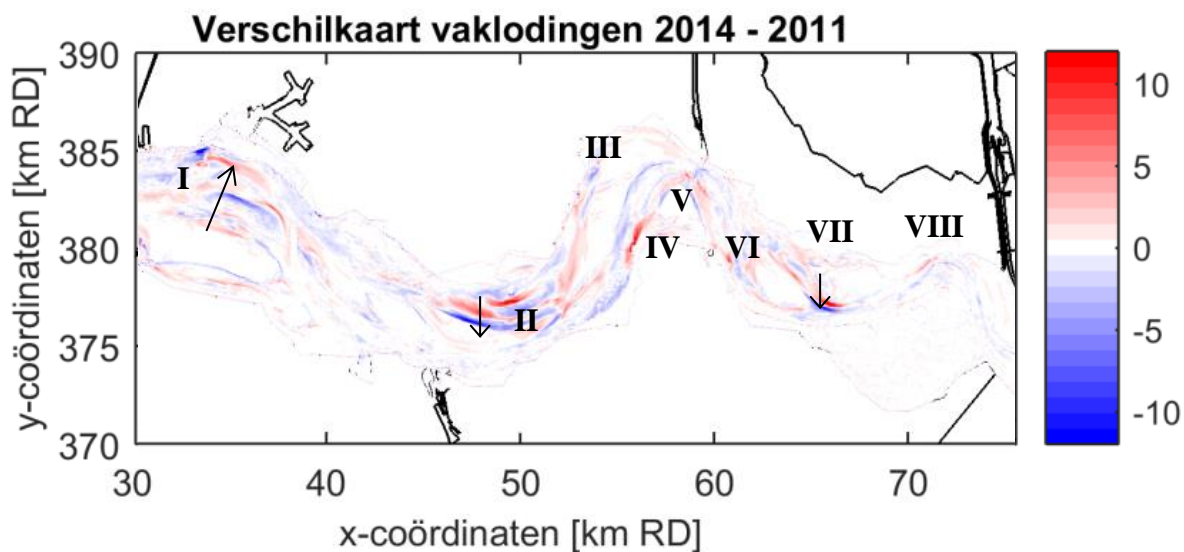
De Westerschelde is morfologisch zeer dynamisch, wat zich uit in de verschuivingen in de ligging van de (hoofd)geul en het ophogen van sommige platen in de Westerschelde (o.a. De Vet et al., 2017).

Een overzicht van de lange termijn morfologische ontwikkeling wordt gegeven door Cleveringa (2013). Op basis van een verschilplot van de bodems voor de jaren 2010 en 1955 wordt dit voor het Nederlandse deel van de Westerschelde weergegeven in Figuur 2.8. Dit deel van de Westerschelde wordt getoond omdat hier veel grote veranderingen plaats gevonden hebben.



Figuur 2.8 Verskilplot bodemhoogte in de periode 1964 tot 2011 met karakteristieke ontwikkelingen (figuur uit Huisman et al., 2018 op basis analyse van Cleveringa, 2013).

De recente morfologische ontwikkelingen over de periode 2011 t/m 2014 laten een grote natuurlijke dynamiek zien rond de Spijkerplaat in Macrocel 1 (zie I in Figuur 2.9). Binnen Macrocel 3 is met name een verplaatsing van de oostelijke geul van de Everingen naar het Zuiden waarneembaar (II).



Figuur 2.9 Veranderingen in recente morfologie van de Westerschelde voor de periode 2011 tot en met 2014.

De opvulling van het Middeldgat en verdieping van de Overloop van Hansweert zijn ook in de recente data van Macrocel 4 te zien (III). In het Gat van Ossenisse is een grote accumulatie te zien als gevolg van de stortstrategie (IV). Dit is deels gerelateerd aan stortingen in SH41 sinds 2011 (circa 20 miljoen m³) en deels aan geulwandstortingen sinds 2014 (circa 7 miljoen m³). Op de geulwand van de Platen van Ossenisse (V) vond accumulatie plaats van zand, wat in feite een uitbouw is van het plateau dat op circa 5 meter waterdiepte ligt. Hoger in het profiel (op de plaatranden) was echter juist sprake van erosie in deze periode. Binnen Macrocel 5 is sprake van aanzanding ter plaatse van de Plaat van Walsoorden (VI) alsmede een verlegging van de bovenstroomse zijde van de Schaar van Valkenisse en Schaar van Waarde, welke deels gerelateerd zouden kunnen zijn aan de stortstrategie (op de plaatranden) in deze periode. De Schaar van Valkenisse migreert aan de oostzijde naar het zuiden (VII). Binnen macrocel 6 zijn de veranderingen relatief beperkt (VIII). Wat opvalt is met name de aanzanding op de geulwand aan de noordwest zijde van het Nauw van Bath, welke deels veroorzaakt wordt door het storten van sediment. Tevens is lichte erosie aanwezig in de binnenbocht.

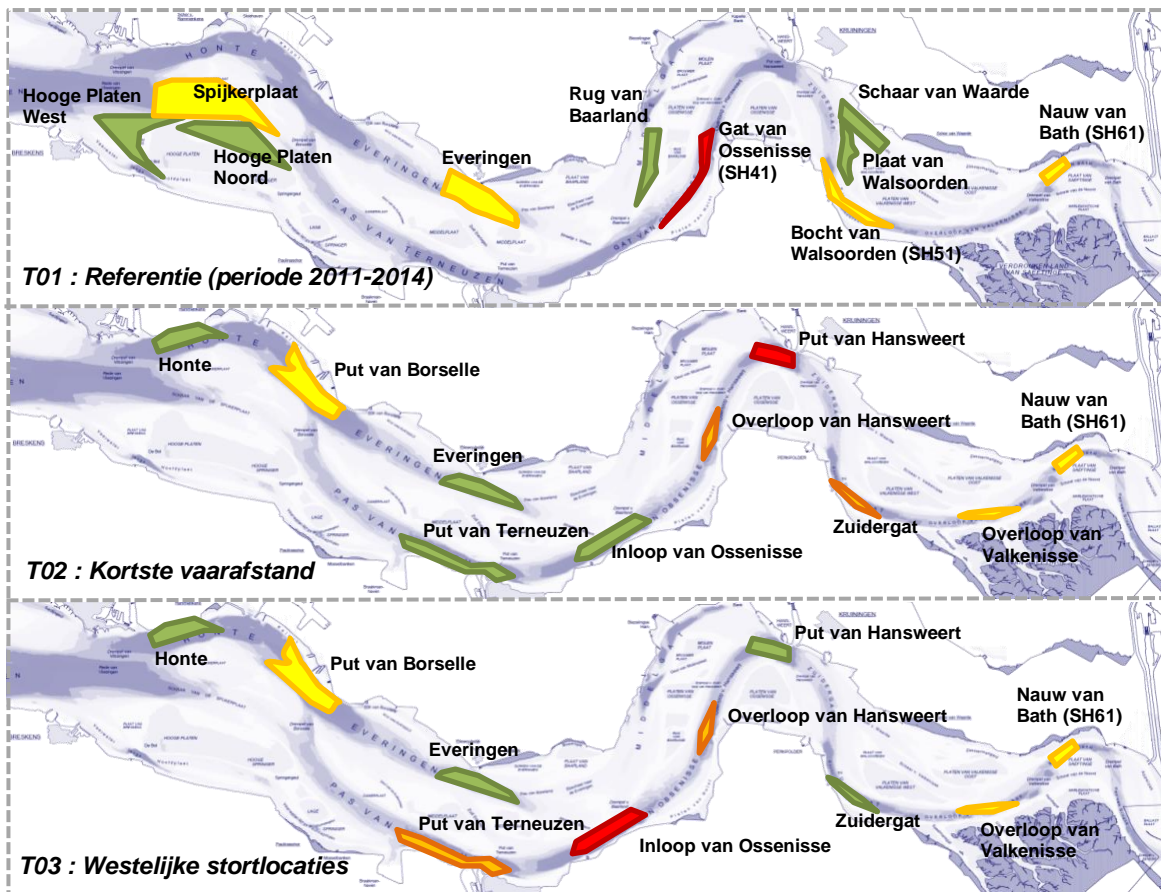
3 Effecten van storten in diepe putten

3.1 Introductie

Dit hoofdstuk geeft een beschrijving van de effecten van het storten van sediment in diepe putten op de hydrodynamica en morfologie van de Westerschelde. Ten behoeve hiervan wordt extra aandacht besteed aan de Put van Hansweert, aangezien hier gegevens beschikbaar zijn van proefstortingen. Op basis van deze kennis wordt een doorvertaling gegeven voor de verwachte verspreiding van gestort zand in andere diepe putten.

3.2 Stortstrategieën

Voor het vaargeulonderhoud van de Westerschelde dienen meerdere stortingen per jaar uitgevoerd te worden die gezamenlijk een effect hebben op de hydrodynamica en morfologie van de diepe putten. Volgens de stortstrategie voor het onderhoud van de vaargeul vond het storten in de periode 2011 tot 2014 plaats op plaatranden, in nevengeulen en op de geulwand van het Gat van Ossenissee (T01 in Figuur 3.1). Deze strategie wordt gezien als referentiestrategie in de analyses van Huisman et al. (2018).



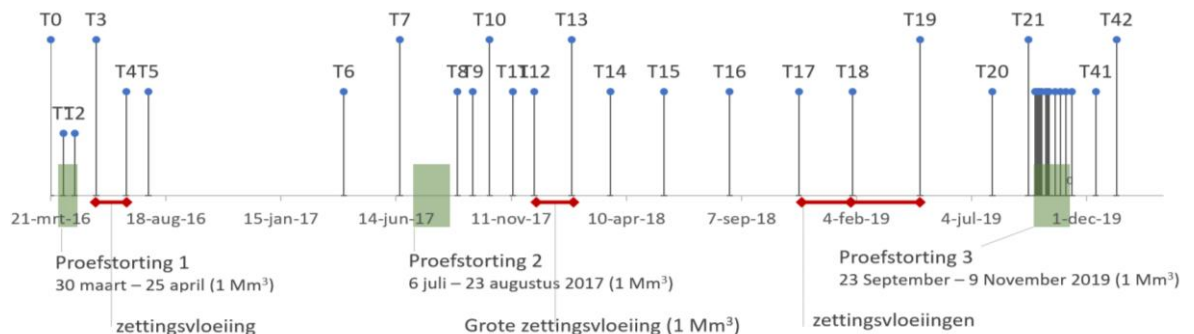
Figuur 3.1 Stortstrategieën voor de Westerschelde (boven : historische strategie over de periode 2011-2014; midden : stortstrategie met storten in dichtsbijzijnde diepe putten; onder : storten in westelijke putten; de kleuren geven de intensiteit van de stortingen aan; groen naar rood = van lage naar hoge intensiteit)

Om de mogelijke effecten van een stortscenario in de diepe putten te illustreren beschrijft Huisman et al. (2018) naast de historische stortstrategie een aantal mogelijke toekomstige stortstrategieën waarin er in diepe putten wordt gestort (zie Appendix B voor de verdeling van zand). Deze verschillen onderling qua ruimtelijke plaatsing van het gestorte sediment (T02 en T03 in Figuur 3.1).

Hierbij wordt onderscheid gemaakt in een strategie die stort in de dichtstbijzijnde locatie ten opzichte van de baggerlocatie (T02) en een strategie waarbij een deel van het zand van de drempels in Macrocel 5 in de ruimere westelijke putten wordt gestort (T03). Er wordt dan dus minder gestort in de Put van Hansweert en het Zuidergat en juist meer gestort in de Inloop van Ossensisse en Put van Terneuzen.

3.3 Lokaal: storten en erosie van proefstorting

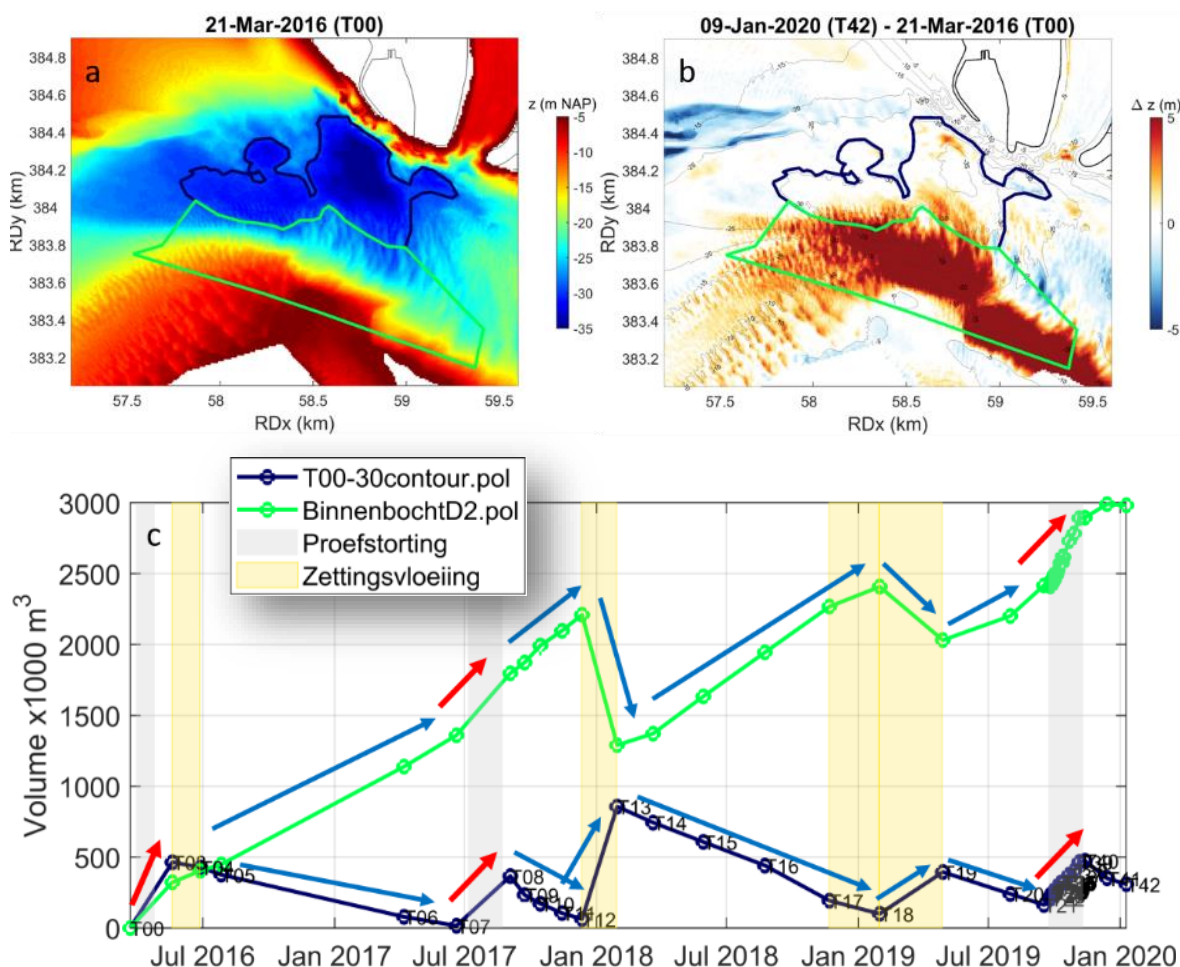
De eerste vraag die met betrekking tot de stortstrategieën gesteld kan worden is “In welke mate het sediment dat gestort wordt blijft liggen in de diepe putten”. De lokale effecten van het storten van sediment in diepe putten zijn onderzocht door IMDC en Deltares (Huisman et al., 2018; Huismans et al., 2021). In deze rapportages wordt een beschrijving en analyse gedaan van proefstortingen in de diepe Put van Hansweert. Stortingen aan de zuidzijde van de diepe put van Hansweert zijn uitgevoerd in April 2016, juli-augustus 2017 en oktober-november 2019 en hadden een volume per proefstorting van 0.7 tot 1 miljoen m³ (Figuur 3.2). In september 2019 is er een proefstorting uitgevoerd aan de noordzijde van de Put van Hansweert met een volume van ~300,000 m³. De stortingen werden quasi-doorlopend uitgevoerd (gemiddeld ca. 10 stortingen per dag), ongeacht de fase van het getij. Voor, tijdens en na de stortcampagnes is de bodem frequent ingemeten met een multibeam echolood. De grootte van het ingemeten gebied verschilt per peiling, wat wordt weergegeven met de hoogte van de lijn. Ook zettingsvloeiingen hebben invloed op de ingemeten morfologie en worden weergegeven in Figuur 3.2 met een rode lijn. De zettingsvloeiing tussen meting T12 en T13 heeft een vergelijkbaar volume als de proefstortingen van ~1 miljoen m³.



Figuur 3.2 Tijdbalk met stortingen (in groen) en monitoringsmomenten (T0 – T42) van de proefstortcampagne in de Put van Hansweert. De lengte van de staven geeft de grootte van het monitoringsgebied weer. (Huismans et al., 2021)

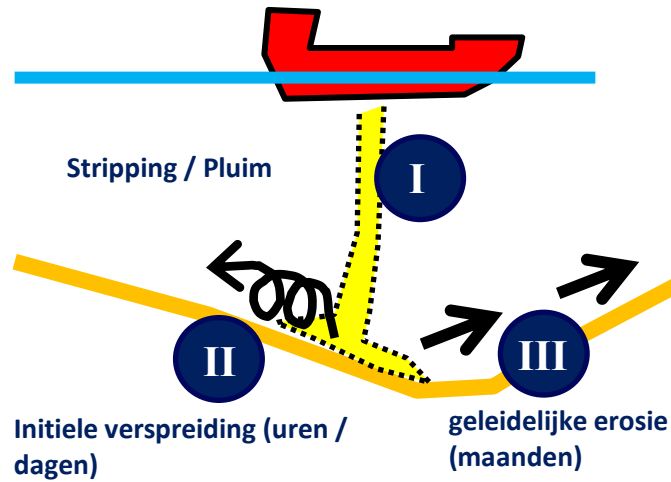
De ervaringen met het storten zijn dat de proefstortingen volledig eroderen in ongeveer een jaar (Figuur 3.3). Bij de proefstortingen in 2016 en 2017 (Figuur 3.2) kon een aanzienlijk deel (~50%) van het gestorte sediment niet terug gevonden worden in het lokale stortvak, maar bij de stortingen in 2019 werd een groter deel (circa 80%) teruggevonden in een straal van circa 300 meter rond het stortvak. Bij de stortingen in 2019 werd echter ook tijdens de stortingen gemeten waardoor meer sediment teruggevonden kon worden (Huismans et al., 2021). Verwacht wordt dat een groot deel van het gestorte sediment via suspensietransport op de binnenbocht van de Put van Hansweert terecht

gekomen is, aangezien hier een sterke sedimentatie te zien is na de proefstortingen. Het gecombineerde volume in het stortvak en de aanzanding in de binnenbocht bedragen samen 80% tot 95% van het stortvolume. Opgemerkt wordt dat er in de bathymetrische metingen ook veel natuurlijke veranderingen in de morfologie te zien zijn (o.a. door migrerende bodemvormen).



Figuur 3.3 Ontwikkeling van het volume in de Put van Hansweert en op de binnenbocht. Links-boven: Bodemhoogte in de diepe put van Hansweert; Rechts-boven: Bathymetrische verandering over de periode tussen 21 maart 2016 (T0) en 9 januari 2020 (T42); Onder: volumeverandering in de diepe put (zwarte lijn) en op de binnenbocht (groene lijn). Merk op dat er tijdens het storten een toename kan zijn in zowel de put als op de binnenbocht (rode pijlen) en dat er in de rest van de periode sprake is van een tegengestelde volumeontwikkeling van de put en de binnenbocht (blauwe pijlen). (bron: Huismans et al, 2021)

De initiële verspreiding van zand vindt plaats tijdens het storten door het lateraal verspreiden van de fijne zandfractie van de stortpluim (zie I in Figuur 3.4) en daarna als gevolg van de verspreiding van de pluim over de bodem (zie II in Figuur 3.4). De geleidelijke volumeverandering na de eerste meting vindt plaats over een periode van maanden als gevolg van erosie door de getijstrooming (zie III in Figuur 3.4).



Figuur 3.4 Verschillende fases waarbij erosie kan optreden na het storten in een diepe put (Huisman et al., 2018)

I : sediment pluim

Na de storting verlaat het zand het ruim in een paar minuten. De grote dichtheid van het gestorte materiaal zorgt er dan voor dat een dichtheidspluim ontstaat die zich met grote snelheid naar beneden beweegt. Door het verschil in dichtheid wordt turbulentie op de grens van de stortpluim en het omliggende water onderdrukt waardoor de menging met het omliggende langzaam stromende water heel beperkt is. De verwachting is dat vrijwel alle gestorte zand daadwerkelijk naar de bodem zal vallen én dat de verliezen van zand tijdens het storten dus klein zijn. Een klein deel van de dichtheidsstroom zal zich losmaken via zogenaamde stripping (Figuur 3.5). Dit gedeelte van het sediment heeft niet voldoende dichtheid meer om zich in bulk verticaal te bewegen met een snelheid groter dan de valsnelheid van individuele deeltjes. Initieel bevindt het gestripte sediment zich in de staart van de wolk. Bij grote waterdiepte heeft de wolk tijd nodig om naar de bodem te zakken en vormt zich een paar van wervels, die door de bijkomende rotatie aanleiding kunnen geven tot meer stripping. De fractie aan sediment die via stripping aan de hoofdwolk wordt onttrokken wordt geschat op 10% tot 20% (Huisman et al., 2018; Huismans et al, 2021), maar is afhankelijk van o.a. de valsnelheid, de afmetingen van het gestorte sedimentvolume, de stroming, en het turbulentieniveau. En daarmee dus ook afhankelijk van de timing van het storten, de locatie en het type sediment.



Figuur 3.5 Valgedrag van een sedimentpluim, met de moederwolk en de staart (Gensheimer et al., 2013)

II : turbulente verspreiding van sediment over de bodem

De stortpluim bereikt de bodem met hoge snelheid en zal zich daarna over de bodem verspreiden. Ter plaatse van het contactpunt met de bodem kan (in het geval van een zachte bodem) een kleine erosiekuil ontstaan met een diameter van circa 80 meter, en in de omgeving een ring met gestort sediment. De omvang van deze ring is vastgesteld in de recente proefstortingen in oktober 2019, waarin een diameter van circa 250 meter werd gevonden. Dit wordt bevestigd door CFD modellering (IMDC, 2020) waarin de verspreiding van het zand ook over een diameter van circa 200 tot 300 meter plaatsvindt. De hoeveelheid sediment die zich over grotere afstand (tot buiten het modeldomein) verplaatst lijkt in deze simulaties echter beperkt te zijn in de initiële fase na het storten. De vaarsnelheid is van belang voor de verspreiding van de stortpluim. Bij een grotere vaarsnelheid is er een veel grotere verspreiding in de vaarrichting, en ook een groter verlies van sediment. Verondersteld wordt dat naast de vaarsnelheid ook de opwoeling van de sedimentpluim door de schroef van het schip van belang is. Als snel gevaren wordt (of bij hoge getijsnelheden) zal een deel van het sediment verder van de bedoelde stortlocatie geraken. Dit is in de metingen bij de eerste twee proefstortingen echter niet vastgesteld. Aannemelijk is dat tijdens het storten een deel van de fijne fracties met de getijstroom wordt meegevoerd en zich over een groter gebied verspreidt (o.a. Huisman et al., 2018; Huismans et al., 2021). Als gevolg hiervan is het sediment dat direct na storten op de bodem terug te vinden is ($D_{50} \approx 290 \mu\text{m}$) aanzienlijk grover dan de korrelgrootte in de beun ($D_{50} \approx 170 \mu\text{m}$) (Plancke et al., 2019).

Kort na het storten wordt verondersteld dat het materiaal nog enigszins mobiel is (en los gepakt) waardoor het eenvoudiger meegenomen kan worden door de getijstrooming. Ook zorgt de turbulentie na de inslag van het materiaal op de bodem voor een aanzienlijk grotere opwoeling van het sediment. Verder moet meegenomen worden dat een groot aantal stortingen (van enkele duizenden kubieke meters zand per scheepslading) nodig zijn om een volledige storting van circa 1 miljoen m^3 te realiseren, waardoor het mogelijk is dat de turbulentie (of direct impact) van een nieuwe storting zorgt voor het mobiliseren van al eerder op de bodem gestort materiaal. Dit effect kon niet direct worden waargenomen in de metingen van de eerste twee proefstortingen, omdat de turbulente verspreiding over de bodem bijna instantaan na de storting plaatsvindt. De turbulentie en laterale verspreiding na het bereiken van de bodem wordt echter wel belangrijk geacht voor de verspreiding van het gestorte materiaal over de put.

III : geleidelijke erosie

Na de initiële snelle erosie zal het nog aanwezige sediment geleidelijk eroderen uit de diepe put (circa een jaar). Initieel is sprake van een snelle erosie die exponentieel afneemt in de tijd. Bij de proefstortingen (en zettingsvloeiing) werd een gemiddelde erosiesnelheid van 1,000 tot 3,000 m^3/dag geobserveerd voor een individuele storting (Huismans et al., 2021). De hoogste erosiesnelheid gemeten tussen twee peilingen door is 6,600 m^3/dag , deze is bepaald op basis van twee peilingen net na een volledige proefstorting van 1 miljoen m^3 zand, wanneer de erosiecapaciteit het hoogst is. Wanneer de put verder uitruimt, komt de bodemligging weer dichterbij de oorspronkelijke ligging en nemen de schuifspanningen weer af en daarmee ook de erosiesnelheid, net zo lang tot de bodem weer haar evenwichtsdiepte heeft bereikt. Wanneer de omliggende bodem uit moeilijk erodeerbaar materiaal bestaat (klei of veen) zal dit sneller gaan, omdat geen nieuw sediment wordt aangevoerd. Wanneer de omliggende bodem uit zand bestaat zal dit langzamer gaan, omdat er – naast dat er sediment wordt afgevoerd – ook sediment wordt aangevoerd. In en rond de Put van Hansweert bestaat de toplaag van de bodem voor een deel uit moeilijk erodeerbare klei en veenlagen. Opgemerkt wordt dat de respons na een storting in een diepe put is vergelijkbaar met die na een zettingsvloeiing, waarbij ook een geleidelijke erosie optreedt over een vergelijkbare periode (Huismans et al., 2021).

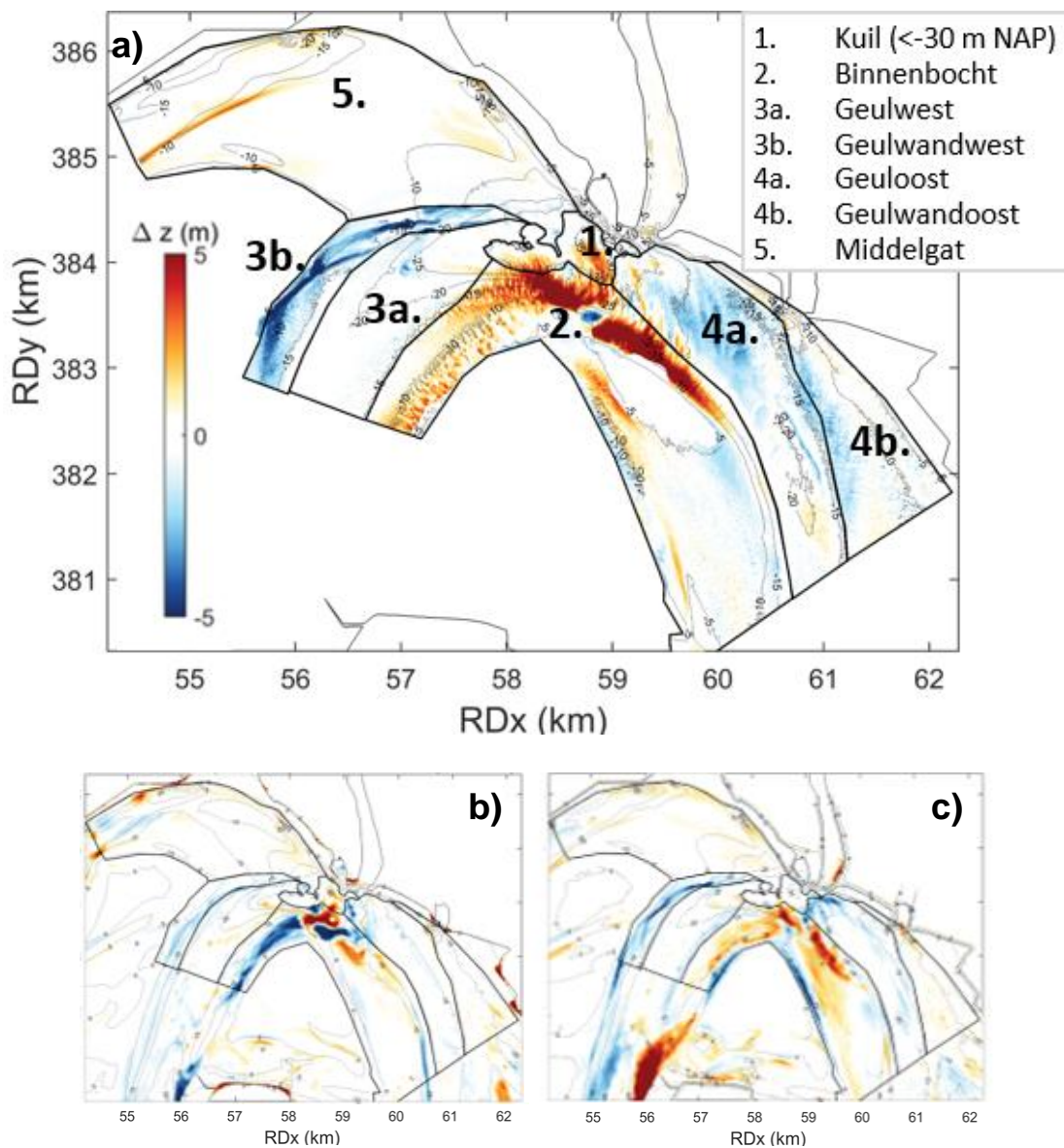
3.4 Mesoschaal: verspreiding van sediment naar de omgeving

Het storten in diepe putten van de Westerschelde zal leiden tot een herverdeling van het gestorte zand naar de omliggende gebieden. De invloed betreft met name verspreiding in de hoofdgeul richting de

drempels, aanzanding op geulwanden (o.a. van de binnenbocht) en in nevengeulen. Als illustratie voor de effecten op mesoschaal wordt een toelichting gegeven voor de Put van Hansweert, aangezien hier proefstortingen hebben plaats gevonden, metingen van de bodemligging zijn geanalyseerd en modellen zijn gebruikt voor het doorrekenen van de hydrodynamica en het sedimenttransport. Daarna zal op basis van een expert-beoordeling teruggekoppeld worden op de verwachte effecten voor de andere putten.

3.4.1 Morfologische invloed van Put van Hansweert

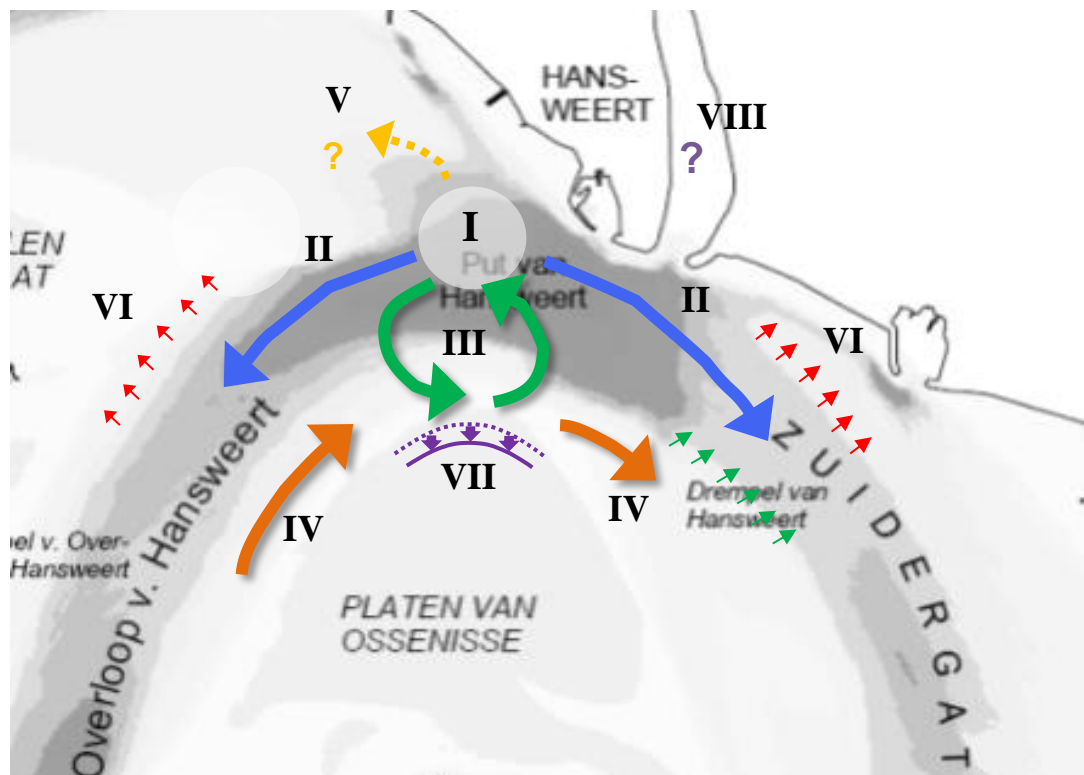
De invloed van het storten in de Put van Hansweert komt naar voren in de bodemhoogte metingen na plaatsing van twee proefstortingen (Figuur 3.6; zie Huismans et al., 2021).



Figuur 3.6 Bathymetrische ontwikkeling van de Put van Hansweert na het plaatsen van de proefstortingen voor de periode van Maart 2016 tot April 2019 (paneel a) en voor de referentieperiodes voor en na stortingen bij het Gat van Ossenisse van 2002 tot 2005 (paneel b) en van 2011 tot 2014 (paneel c). (Huismans et al, 2021)

Sterke sedimentatie werd waargenomen in de Put van Hansweert (1) én op de binnenbocht van de Put van Hansweert (2). Dit patroon was in de referentieperiode 2002 tot 2005 niet aanwezig. De sedimentatie in de Put van Hansweert was in deze periode tijdelijk, omdat de Put na storten telkens leegt. In de Overloop van Hansweert (3a) is vrijwel geen invloed te zien op de bodemhoogte, wat mogelijk samenhangt met baggerwerk. Er is sprake van erosie op de geulwand oostelijk van de Molenplaat (3b) en in mindere mate is dit ook geval in de hoofdgeul van het Zuidergat (4a) en op de daaraan grenzende oostelijke geulwand (4b). De erosie op deze geulwand (4b) was niet, of in mindere mate aanwezig in de referentieperiode. In het Middलगat lijkt sprake van beperkte aanzanding (5), deze aanzanding is echter minder sterk dan de aanzanding die is opgetreden vóór de proefstortingen.

Op basis van de waargenomen veranderingen in de bathymetrie (Huismans et al., 2021) én informatie uit modelstudies over hydrodynamica van de diepe putten (Van der Wegen et al., 2021) en stortstrategieën (Huisman et al., 2018) kan een overzicht gegeven worden van de processen waarvan verwacht wordt dat ze de verspreiding van zand vanuit de stortlocaties in de diepe putten naar de omgeving bepalen. Dit betreft in de eerste plaats een tijdelijke aanzanding in de diepe put (I). In de hoofdgeul nemen de eb- en vloedstroming zand mee naar de drempels (II), maar opgemerkt moet worden dat dit niet de dominante wijze van transport was tijdens de proefstortcampagnes. Het grootste deel van het gestorte zand wordt namelijk vanuit de put naar de geulwand en ondiep water oever van de binnenbocht getransporteerd (III) en daarvandaan of weer terug de put in via een zettingsvloeiing of middels vloedstroom gedreven transport naar het oosten richten de Drempel van Hansweert (IV). Verwacht wordt dat aangroei van de binnenbocht op termijn voor verruiming van de bocht zal zorgen. De erosie vindt hoofdzakelijk plaats op de noordelijke geulwand (i.e. buitenbocht van de geul) op een diepte van 10 tot 15 meter (VI). Via de ebstroom is er interactie met de toegang van het Middलगat (V), maar het effect hiervan kon in de bodemmetingen na de proefstortingen nog niet worden gevonden. Indirect zou er een invloed aanwezig kunnen zijn op andere gebieden, zoals de Platen van Ossenis (VII) en de voorhavens van Hansweert (VIII).



Figuur 3.7 Overzicht van verwachte relevante morfologische ontwikkelingen bij de Put van Hansweert. De normale pijlen geven transportpatronen aan die zijn waargenomen, terwijl de gestippelde pijlen (met vraagtekens) een mogelijke (kleine) ontwikkeling aangeven die nog niet kon worden geverifieerd met metingen.

I : Aanzanding in de Put

De Put van Hansweert heeft een aanzienlijke capaciteit tot het uitruimen van baggerspecie stortingen, maar zal naar verwachting toch gedeeltelijk opvullen met zand als gevolg van de stortingen. De stortvolumes kunnen op dagen met stortingen namelijk de uitruimcapaciteit van circa 10,000 m³/dag van de Put van Hansweert overschrijden. Alhoewel de verwachting is dat het jaarlijks gemiddelde stortvolume wel lager zal liggen dan deze uitruimcapaciteit. De mate waarin het opvullen gebeurt hangt af van de volumes die gestort worden én de snelheid waarmee het sediment uitgeruimd wordt. Indien deze volumes kleiner zijn dan de beschikbare transportcapaciteit uit de put naar de omgeving zal er slechts zeer beperkte aanzanding zijn, terwijl er bij een overschrijding van de transportcapaciteit minder zand afgevoerd kan worden dan beschikbaar komt door storten in desbetreffende diepe put. Ondanks dat dit leidt tot enige opvulling van de diepe put, wordt verwacht dat de diepte nog steeds groot zal blijven (i.e. veel meer dan de benodigde vaardiepte van de schepen). Naarmate de put verder opvult zal de transportcapaciteit mogelijk toe gaan nemen. Lokaal zal daarnaast ook een deel van het gestorte zand achterblijven in de put op plaatsen waar de bodemschuifspanningen iets lager zijn.

II : Verspreiding in de lengterichting van de geul

Een deel van het gestorte zand zal in de lengterichting van de geul worden verplaatst door de eb- en vloedstromingen. Overigens kon in de bathymetrische analyses na de proefstortingen (Huismans et al., 2021) slechts een beperkt deel van het sediment (orde 10%) gevonden worden in de hoofdgeul. De effecten van de verspreiding van zand in de lengterichting van de geul (i.e. aanzanding) zijn echter moeilijk te zien in de bodemhoogte metingen omdat er in de hoofdgeul wordt gebaggerd én het sediment waarschijnlijk over een groot gebied verspreid raakt. De analyse van de hydrodynamica van de Put van Hansweert en hierop gebaseerde schattingen van het bodemtransport laten daarentegen juist een duidelijke verspreiding in de lengterichting van de geul zien (Van der Wegen et al., 2021; Huismans et al., 2021). Ook is er met numerieke modellen een voorspelling gemaakt van de morfologische invloed van een programma van stortingen in de diepe putten, waarin vooral een morfologische invloed wordt gevonden in de lengterichting van de geul (Huisman et al., 2018). De baggervolumes nemen toe omdat er meer zand vanaf de putten naar de drempels toe getransporteerd wordt (Huisman et al., 2018). Met name voor stortingen in het oostelijke deel van de Put van Hansweert wordt een direct transport via de hoofdgeul naar de Drempel van Hansweert verwacht (Elias et al., 2021). Numerieke modelsimulaties geven aan dat het invloedgebied van de stortlocaties in diepe putten na vijf jaar ongeveer 1 tot 5 km zal uitbreiden in beide richtingen vanaf de put (Huisman et al., 2018). De absolute impact van het storten en baggeren op de bodemhoogteverandering in de hoofdgeul bedraagt lokaal enkele meters, wat vergelijkbaar is met de autonome ontwikkeling op veel plaatsen, maar neemt snel af naarmate de afstand tot de bagger- of stortlocatie groter wordt.

III : Aanzanding op de geulwand (binnenbocht) & toename zettingsvloeiingen

Het storten van sediment aan de binnenzijde van de Put van Hansweert gaat samen met een sterke aanzanding op de binnenbocht. Een groot deel van het zand komt mogelijk al tijdens de proefstorting op de binnenbocht terecht (zie Figuur 3.3), vermoedelijk via suspensietransport. Numerieke modellen geven aan dat dit transport naar de binnenbocht met name van belang is voor stortingen in het zuiden en westen van de Put van Hansweert, aangezien dit sediment via de Overloop van Hansweert en de westzijde van de Platen van Ossensisse richting de binnenbocht kan worden getransporteerd (Elias et al., 2021), echter een opvallende observatie was dat ook na de stortingen aan de noordzijde van de put aanzanding werd waargenomen op de binnenbocht (Huismans et al., 2021). Binnen een aantal maanden tot een jaar verlaat het zand de put. De waargenomen toename van sediment op de binnenbocht is niet enkel en alleen afkomstig van de proefstortingen. Uit een beschouwing van de langjarige trend, blijkt dat sediment dat ten zuidwesten van de put gestort wordt (vak SH 41) gedeeltelijk ook op de binnenbocht belandt. Vanaf de binnenbocht gaat het sediment óf terug de put in via een zettingsvloeiing óf wordt het langs de binnenbocht oostwaarts getransporteerd. Als gevolg van de doorgaande aanzanding aan de binnenbocht van de Put van Hansweert wordt verwacht dat het aantal zettingsvloeiingen in de toekomst zal toenemen. De autonome trend van terugtrekking van de plaatrand van de Platen van Ossensisse wordt mogelijk versterkt (Huismans et al., 2021).

IV : Vloedstroming gedreven oostwaarts transport over de ondiepe oever

Op de vloed-gedomineerde ondiepe rand (circa 5m diep) van de Platen van Ossenis Oost vindt transport naar het oosten plaats. Hierdoor wordt zand dat eerder naar de binnenbocht is vervoerd, vervolgens naar de oostelijke geulrand van de Platen van Ossenis getransporteerd, waarna het zand uiteindelijk ook op de drempel van Hansweert terecht zal komen (Plancke et al., 2019b; Elias et al., 2021). De beddingvormen migreren met een snelheid van 1 à 2 m/dag (~300 à 700 m jaar). Analyses van bodemveranderingen tussen 2009 en 2019 laten zien dat ook het zand van de stortingen aan de oostzijde van het Gat van Ossenis (SH41), op enkele kilometers ten zuidwesten van de put, zich in eerste instantie noordoostwaarts en daarna oostwaarts beweegt over de ondiepe oever van de Platen van Ossenis Oost.

V : Mogelijke invloed op nevengeul (Middelgat)

Op basis van aanwijzingen uit numerieke simulaties van de proefstortingen, wordt verwacht dat een klein deel van het gestorte sediment uit de putten naar het Middelgat toe wordt getransporteerd. In de recente proefstorting aan de noordzijde van de Put van Hansweert (oktober 2019, december 2019 en januari 2020) werd een aanzanding van ~150,000 m³ (circa 20%) gevonden in de toeloop naar het Middelgat, maar nog vrijwel geen zand in het Middelgat zelf (Huismans et al., 2021). De bodemhoogte metingen na de proefstortingen laten opvallend genoeg een vermindering zien van de aanzanding in het Middelgat. De metingen geven dus geen aanwijzing voor aanzanding van het Middelgat door de proefstortingen. Het zou hier echter kunnen gaan om een al bestaande afname van de aanzanding die in de loop van de tijd versnelt. Kleine hoeveelheden extra sedimentatie ten gevolge van storten in de put zijn dan kleiner dan waargenomen kan worden bovenop de versnelling in afname van sedimentatie. Op basis van numerieke modellering van transportpatronen in de Put van Hansweert (Elias et al., 2021) en systeemkennis wordt verwacht dat sediment van stortingen aan de Noordwest zijde van de Put van Hansweert deels in de luwe gebieden van het Middelgat terecht kan komen. De snelheid van verspreiding van sediment in de hoofdgeul is overigens wel aanzienlijk groter dan richting het Middelgat.

VI : Erosie op de buitenbocht (oostzijde van het Zuidergat)

De geulwand noordoostelijk van het Zuidergat erodeerde tijdens de proefstortingen met 0.7 tot 1 miljoen m³, terwijl dit voorafgaand aan de stortingen in mindere mate het geval was. De erosie aan de geulwand van het Zuidergat bevindt zich met name tussen MSL -15m en MSL-10m (Huismans et al., 2021). Dit duidt op een verruiming van de bocht van de Put van Hansweert. Dit is waarschijnlijk een gevolg van de sterke aanzanding van de binnenbocht van de Put van Hansweert én die hieruit volgende sterke tendens tot aanzanding van de geulwand oostelijk van de Platen van Ossenis. De vernauwing aan de binnenzijde van de bocht zorgt er daarna voor dat de bocht naar buiten toe wil uitbreiden. Opgemerkt wordt dat er ten westen van de Put van Hansweert (aan de oostzijde van de Molenplaat) ook erosie werd waargenomen na de proefstortingen (zie Figuur 2.8), maar dat deze erosie niet sterker is dan in de autonome ontwikkeling voorafgaand aan de stortingen (Huismans et al., 2021) en dus niet noodzakelijkerwijs het gevolg is van de stortingen in de Put van Hansweert. Deze erosie is waarschijnlijk een reactie op de aanzanding van de westelijke geulwand van de Platen van Ossenis, ten gevolge van stortingen in SH41.

VII : Ontwikkeling van de platen van Ossenis

De plaatranden van de Platen van Ossenis zijn de afgelopen jaren rond de waterlijn geërodeerd (Huismans et al., 2021). Monitoring van de plaatrand met satellietbeelden geeft aan dat deze trend is versneld in de periode van de proefstortingen. Dit is mogelijk het gevolg van een verkleining van het doorstroomoppervlak door aanzanding op de binnenbocht waardoor er een versterking optreedt van de stroming in ondiep water langs de plaatrand van de Platen van Ossenis (Huismans et al., 2021).

VIII : Voorhaven van Hansweert

De voorhaven van Hansweert is niet meegenomen in de bathymetrische metingen, aangezien het niet verwacht wordt dat er zand naar dit gebied toegaat. Wel is het mogelijk dat een klein deel van het

fijnere sediment (slib) deze kant opgaat. In de praktijk wordt verwacht dat dit een klein effect zal zijn omdat slechts een klein deel van de baggerspecie slib is én het slib zich over een groot gebied verspreidt.

3.4.2 Andere diepe putten van de Westerschelde

Naast de Put van Hansweert kan ook gebaggerd zand gestort worden in andere diepe putten van de Westerschelde. Dit betreft de Honte, Put van Borssele, Put van Terneuzen, Gat van Ossenisse, Overloop van Hansweert, Bocht van Walsoorden, Inloop van Valkenisse en het Nauw van Bath. Voor deze putten zijn geen proefstortingen uitgevoerd en ook geen berekeningen gedaan van het lokale effect op de morfologie van het storten, maar kan op basis van de kennis die ingewonnen is bij de Put van Hansweert wel een kwalitatieve beoordeling gegeven worden (zie Tabel 3.1). Deze expert-beoordeling wordt hier beschreven. Hierbij wordt een beoordeling gegeven van het belang (i.e. de verwachting van voorkomen en de mate van invloed op de lokale morfologie) van de bij de Put van Hansweert waargenomen mesoschaal morfologische veranderingen. De kwalitatieve beoordeling van de mesoschaal morfologische effecten van storten in de diepe putten wordt in Figuur 3.8 visueel gerepresenteerd.

Tabel 3.1 Expert-beoordeling van het belang van transport mechanismes en morfologische verandering voor het storten in diepe putten van de Westerschelde. Het 'belang' representeert kwalitatief de kans en het effect van een mechanisme (x= enig belang; XXX= zeer belangrijk).

	I: Aanzanding put (afname van bergingscapaciteit)	II: Verspreiding door hoofdgeul (o.a. naar drempel)	III: Transport naar geulwand (binnenbocht) en platen	IV: Herverdeling op geulwand of plaat door getijstroming	V: Transport naar nevengeul	VI: Erosie op de tegenoverliggende buitenbocht *1
diepe put \ symbool in fig 3.8	★	➔	➔	➔	➔	--
Honte		XXX	x	x	x	
Put van Borssele		xx	x	xx	xx	
Put van Terneuzen	x	XXX	x		x	
Gat van Ossenisse	xx	xx	x	x	xx	
Overloop van Hansweert	xx	xx	x	xx	x	
Put van Hansweert	x	xx	XXX	xx	xx	xx
Bocht van Walsoorden	XXX	xx	XXX	xx		x
Overloop van Valkenisse	XXX	XXX	x	x	xx	
Nauw van Bath	xx	xx	XXX	xx	x	x

*1 erosie van de buitenbocht is sterk afhankelijk van de precieze locatie van bestortingen en harde lagen.

Het beschikbare bergend volume (i.e. bergcapaciteit voor baggerspecie) is groter in de diepe putten in het westelijk deel van de Westerschelde dan in het oosten. Opgemerkt wordt dat een hogere snelheid waarmee zand wordt getransporteerd uit de diepe put zorgt voor een grotere morfologische invloed op de omgeving, maar tegelijkertijd gunstig is voor de bergingscapaciteit van de put. In algemene zin wordt verwacht dat de verspreiding van gestort sediment in de andere diepe putten met

name via de hoofdgeul zal plaatsvinden in de richting van nabije drempels (Huisman et al., 2018; Elias et al., 2021). Dit geldt met name voor de putten die niet in een bocht liggen, en waarbij geen grote aftakking naar een nevengeul aanwezig is. Bij de Inloop van Ossenis (zuidwestelijke deel van het Gat van Ossenis) wordt bijvoorbeeld verwacht dat er veel transport is door de hoofdgeul, met name in de vloed-richting (Antolinez et al., 2020). Tevens werd gevonden dat het sediment van de proefstortingen in de Inloop van Ossenis (dat direct na storten nog op de bodem aanwezig was) langer in de nabijheid van de stortlocatie verbleef dan in de Put van Hansweert.

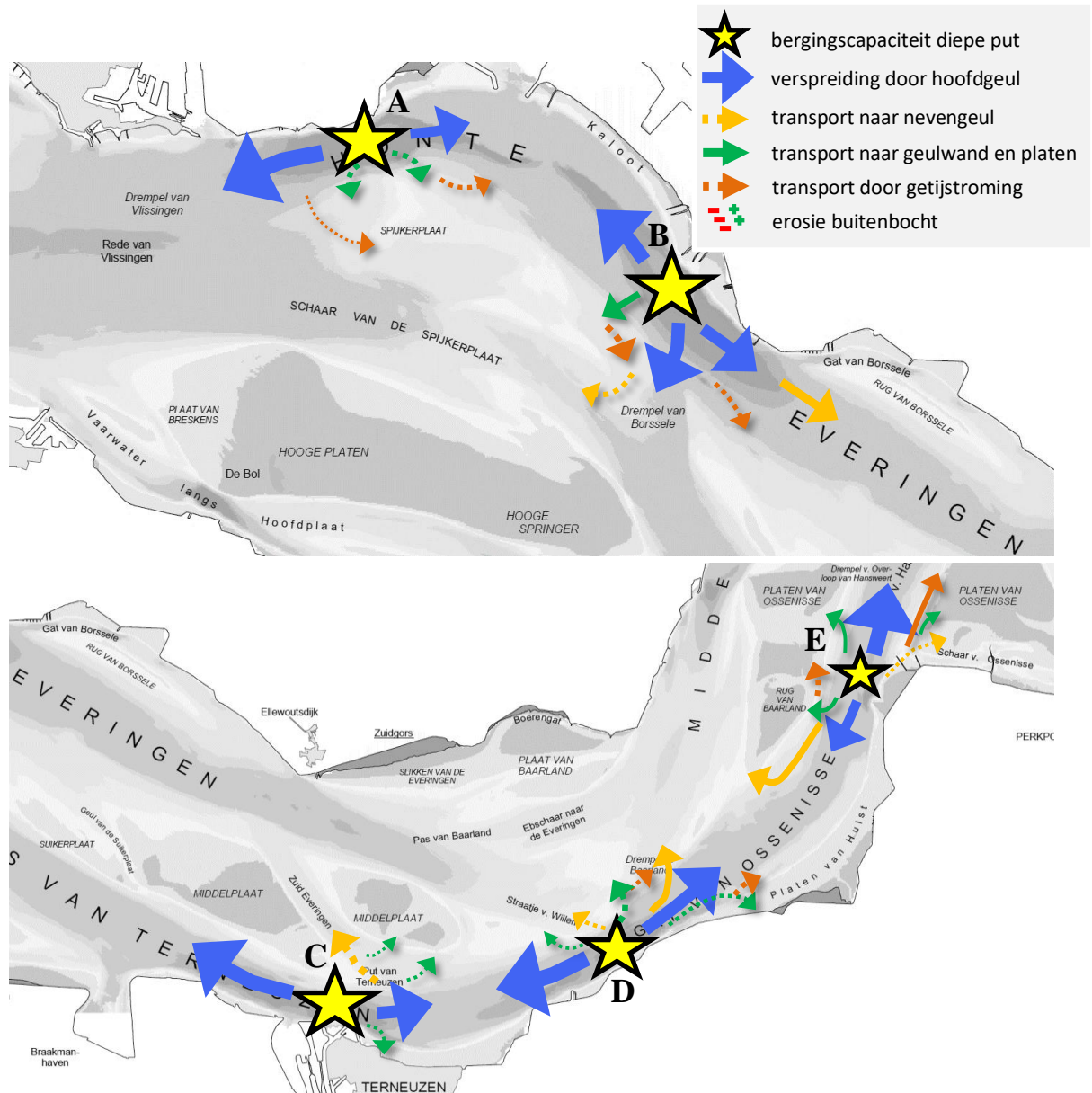
De naar de binnenbocht gerichte residuele stromingen zullen voor de meeste putten kleiner zijn dan voor de Put van Hansweert (Van der Wegen et al., 2021), aangezien de kromtestraal van de meeste bochten aanzienlijk groter is (i.e. een ruimere bocht). Uitzonderingen hierop zijn het Nauw van Bath en de Bocht van Walsoorden (F en H in Figuur 3.8) waar een grote component van transport richting de geulwand van de binnenbocht wordt verwacht, omdat de kromming van de geul voor deze putten vergelijkbaar is met de Put van Hansweert (i.e. ook een vrij nauwe bocht). Voor alle putten zal sprake zijn van transport van de geulen naar de geulwanden, maar dit zal meer ingrijpend zijn voor de putten die zich in een bocht bevinden zoals de Put van Hansweert, Bocht van Walsoorden en het Nauw van Bath. Op termijn wordt een bijdrage aan de groei van de platen verwacht voor de in de omgeving aanwezige platen die kunnen aangroeien als er zand beschikbaar komt in nabijgelegen geulen (De Vet et al., 2020), ook al werd hiervan nog niets waargenomen in de metingen van de proefstortingen. Enige invloed wordt op langere termijn verwacht voor de Spijkerplaat, Middelplaat, Rug van Baarland, Platen van Ossenis, Plaat van Walsoorden, Platen van Valkenisse West en Plaat van Saeftinghe. Echter hierbij dient aangemerkt te worden dat deze platen ook nu al continu veranderen.

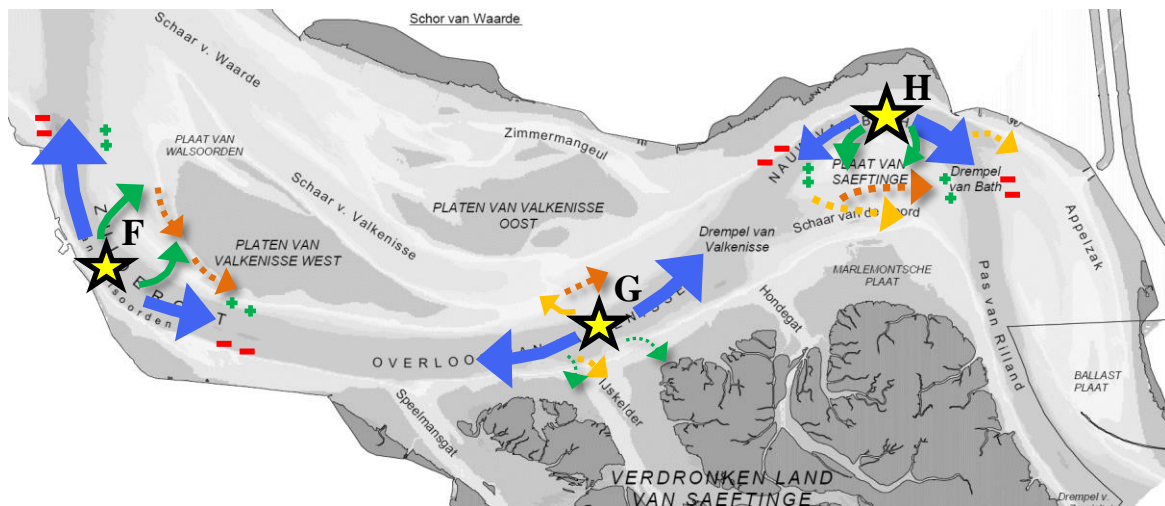
Als er sedimentatie plaats vindt op de geulwanden (in ondiep water aan de randen van de geulen) zal het in veel gevallen meegenomen worden door lokale stromingen die hier sterk asymmetrisch zijn over het getij (i.e. een sterkere invloed van ofwel vloed- of ebstroming). Bijvoorbeeld met een sterke vloedfase voor de ondiepe zones in de binnenbochten van de Westerschelde, zoals het geval is bij de Put van Hansweert. Een vergelijkbaar mechanisme wordt verwacht bij de Bocht van Walsoorden en het Nauw van Bath (F en H in Figuur 3.8). Ook elders wordt verwacht dat sediment in vloed- of eb-richting mee wordt genomen over de geulwanden en ondiepe oevers, maar dan in iets minder sterke mate. Dit geldt bijvoorbeeld voor het transport op de oostelijke oever van de Overloop van Hansweert (E in Figuur 3.8), waar een noordwaarts transport waargenomen is voor de stortingen bij SH41.

Naast een toename van de transporten naar de nabije drempels in de hoofdgeul (o.a. de drempels van Vlissingen en Borssele, Terneuzen, Hansweert, Valkenisse en Bath) wordt ook verwacht dat een deel van het sediment zal sedimenteren in nabije nevengeulen. Dit geldt met name voor de Put van Borssele (B in Figuur 3.8) die grenst aan de Everingen, en in mindere mate ook voor het Gat van Ossenis (D in Figuur 3.8) waar een transport naar het Middelgat wordt verwacht (via het Straatje van Willem en de Drempel van Baarland) én voor de Overloop van Valkenisse (G in Figuur 3.8) waar een deel van het sediment de Schaar van Valkenisse ingevoerd kan worden. Op termijn wordt op basis van de verwachte verspreiding van het sediment over de ondiepe geulwanden en intergetijdengebieden ook een effect verwacht voor kleine nevengeulen (of kortsluitgeulen) zoals de Schaar van de Spijkerplaat, Zuid-Everingen, Schaar van Ossenis en Schaar van de Noord.

Verwacht wordt dat de precieze locatie van de stortingen in een specifieke put een invloed heeft op de verspreiding naar de omliggende gebieden (Elias et al., 2021). Een storting in de Put van Borssele (B in Figuur 3.8) dichterbij de Everingen zal bijvoorbeeld de toevoer van sediment naar deze nevengeul versterken, terwijl een stortlocatie dicht bij een drempel de recirculatie van gebaggerd stortmateriaal zal beïnvloeden. Aanbevolen wordt om in de strategie rekening te houden met de verwachte verspreidingsrichtingen van het sediment. Afhankelijk van de voorkeur qua effecten kan er mogelijk voor worden gekozen om de ruimtelijke verdeling van het storten in de diepe put zo te doen dat de ruimtelijke verspreiding uit de put wordt beïnvloed. De hoeveelheden die gestort worden in een diepe put zullen ook van belang zijn voor de effecten maar kunnen niet eenvoudig meegewogen worden in deze analyse. Om te verifiëren of de verwachte effecten op de andere stortlocaties dan de Put van

Hansweert ook daadwerkelijk optreden, verdient het aanbeveling om 1) de situatie op stortlocaties goed te monitoren op basis waarvan regelmatige evaluaties kunnen worden uitgevoerd en 2) om een flexibiliteit te hebben ingebouwd in de stortstrategie ten behoeve van eventuele benodigde bijstellingen van de stortvolumes per locatie.





Figuur 3.8 Kwalitatieve beoordeling van mogelijke mesoschaal morfologische ontwikkelingen als gevolg van stortingen in de diepe putten van de Westerschelde. De hier weergegeven transportrichtingen zijn interpretaties door experts op basis van metingen bij, en systeemkennis over, de Put van Hansweert.

3.5 Impact stortstrategie op baggervolumes en verdeling sediment

Door het storten op locaties met grote stroomsnelheden, zoals in de diepe putten, zal de recirculatie van gebaggerd sediment naar de drempels toenemen (Huisman et al., 2018). Op basis van numerieke berekeningen is een schatting gemaakt van de jaargemiddelde baggervolumes (Tabel 3.2) voor elk van de stortstrategieën (Paragraaf 3.2). Opgemerkt wordt dat bij de berekeningen is aangenomen dat het sediment dat bij het storten ook daadwerkelijk op de bodem van de stortlocatie terecht komt, en dus nog geen rekening houdt met andere processen die het tijdens het storten of op korte tijdschaal na het storten kunnen mobiliseren welke in Paragraaf 3.3 zijn beschreven.

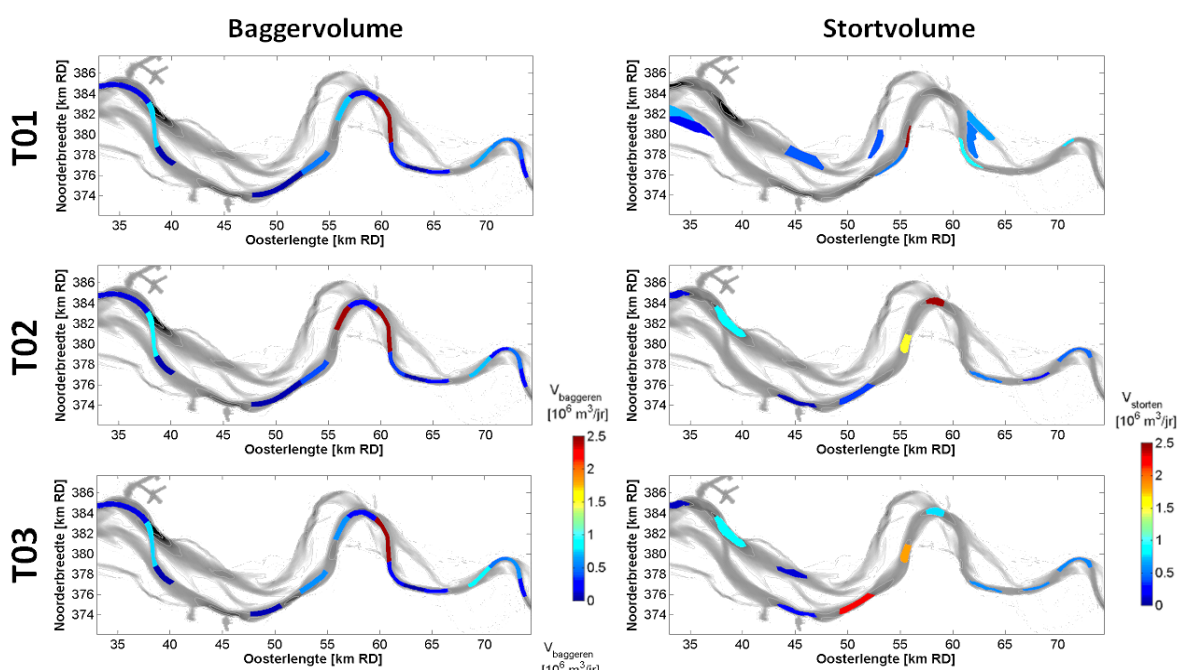
Tabel 3.2 Overzicht baggervolumes voor de beschouwde stortstrategieën (Huisman et al., 2018)

	Vaargeulonderhoud [$10^6 \text{ m}^3/\text{jr}$] (beste schatting)
T01 : Referentie 2011-2014	10.2
T02 : Dichtstbijzijnde putten	12.1
T03 : Westelijke putten	10.3

Het gemodelleerde volume van het vaargeulonderhoud bedraagt ongeveer 10 miljoen m^3/jr voor de huidige stortstrategie (T01 : historisch over de periode 2011-2014). Het kiezen voor een strategie waarbij de dichtstbijzijnde diepe putten worden gebruikt als stortlocatie (T02; o.a. Put van Hansweert) resulteert in een 10% tot 20% groter baggerbezwaar (~ 12 miljoen m^3/jr) in de eerste 5 jaar. Het volume van het baggerwerk zal voor T02 in het eerste jaar echter vergelijkbaar zijn met het huidige baggerbezwaar, aangezien er eerst een zekere opvulling van de putten plaats zal vinden alvorens het transport naar de drempel hoger wordt. Op lange termijn (meer dan 10 jaar) zal de toename van de recirculatie van gebaggerd sediment mogelijk groter zijn dan de berekende 10% tot 20%, aangezien de putten verder opgevuld zullen zijn waardoor de transportcapaciteit toeneemt. Het storten in de meer westelijke putten (T03; o.a. Put van Terneuzen en Inloop van Ossensisse) resulteert in een lager baggerbezwaar dan voor de dichtstbijzijnde putten, omdat er in het Westen meer bergcapaciteit aanwezig is in de putten.

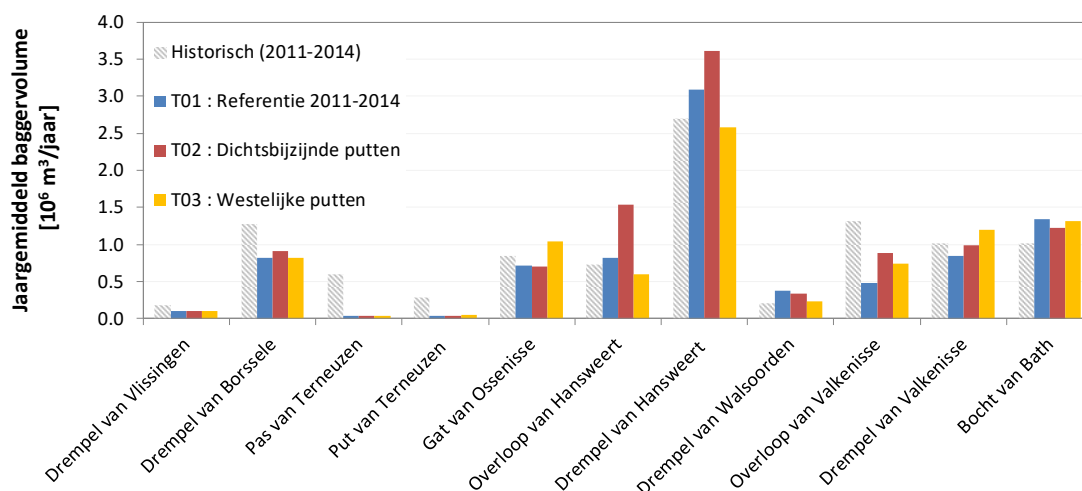
Opgemerkt moet worden dat het baggerbezwaar bij de Drempel van Hansweert gedurende de periode van de proefstortingen vergelijkbaar was met de voorgaande periode. Echter hierbij moet worden meegewogen dat het volume gestorte baggerspecie tijdens de periode van de proefstortingen aanzienlijk lager was dan het toegepaste volume in strategie T01. En tevens dat de werkelijke baggervolumes per jaar aanzienlijk kunnen verschillen. Waardoor het effect van de proefstortingen niet terug te zien is in de historische baggervolumes.

De belangrijkste locaties voor het vaargeulonderhoud zijn de Drempel van Hansweert en Drempel van Borssele. Daarnaast is er enig baggerwerk in de Overloop van Ossensisse voor de strategie met storting in de dichtstbijzijnde putten. Het storten op de geulwand van het Gat van Ossensisse voor strategie T01 erg belangrijk, terwijl de Put van Hansweert voor T02 de belangrijkste stortlocatie is. Strategie T03 spreidt het gestorte materiaal tevens over de meer westelijke putten (i.e. Put van Terneuzen en Inloop van Ossensisse).



Figuur 3.9 Overzicht van bagger- en stortlocaties met bijbehorende stortvolumes voor strategie T01 t/m T03 op basis van modelresultaten voor het ‘opgevulde putten’ model (voor jaar 2). Deze figuren zijn bedoeld om een indicatief overzicht te geven van de locaties waar gestort en gebaggerd wordt (Huisman et al., 2018).

Een overzicht van de baggervolumes per locatie laat zien dat deze volumes voor de referentiestrategie (T01) redelijk goed aansluiten bij de historische baggervolumes over de periode 2011 t/m 2014 (Figuur 3.10). Op de belangrijkste locatie (Drempel van Hansweert) voorspelt het model een realistisch onderhoudsvolume. Echter op enkele locaties is een onderschatting aanwezig. Dit geldt in het bijzonder voor de westelijke onderhoudslocaties (met name Pas van Terneuzen en Put van Terneuzen), alhoewel deze zeer beperkt bijdragen aan het totale vaargeulonderhoudsbaggerwerk. Op deze locaties wordt een aanzienlijk deel aan fijn zand en slib gebaggerd wat niet mee wordt genomen in de numerieke modellen.



Figuur 3.10 Beste schatting van baggervolumes per locatie voor strategie T01 t/m T04 voor het model met opgevulde putten (Huisman et al., 2018).

De verschillen in bagger- en stortvolumes voor de verschillende strategieën hebben effect op de verdeling van zand naar de hoofdgeul, nevengeulen en intergetijdengebieden, aangezien er voor de referentiestrategie T01 door het storten meer zand naar de intergetijdengebieden en nevengeulen zal worden geplaatst dan voor de strategieën waarbij in de diepe putten wordt gestort (T02 en T03). Verwacht wordt ook dat het proces van het storten in diepe putten (T02 en T03) minder effect heeft op de ecologie dan het storten in een nevengeul of op een intergetijdengebied (T01), aangezien de ecologie zich in een diepe put makkelijker aanpast vanwege de al van nature aanwezige hoge morfologische dynamiek is. Verwacht wordt dat er op de lange-termijn een invloed zal zijn van de stortstrategie op de zandvolumes van de macrocellen, wat met name het geval is voor de westelijke stortstrategie (T03) waarbij meer zand naar Macrocel 3 wordt vervoerd. Een flexibele en gerichte manier van storten kan echter ook zorgen dat deze effecten worden gecompenseerd.

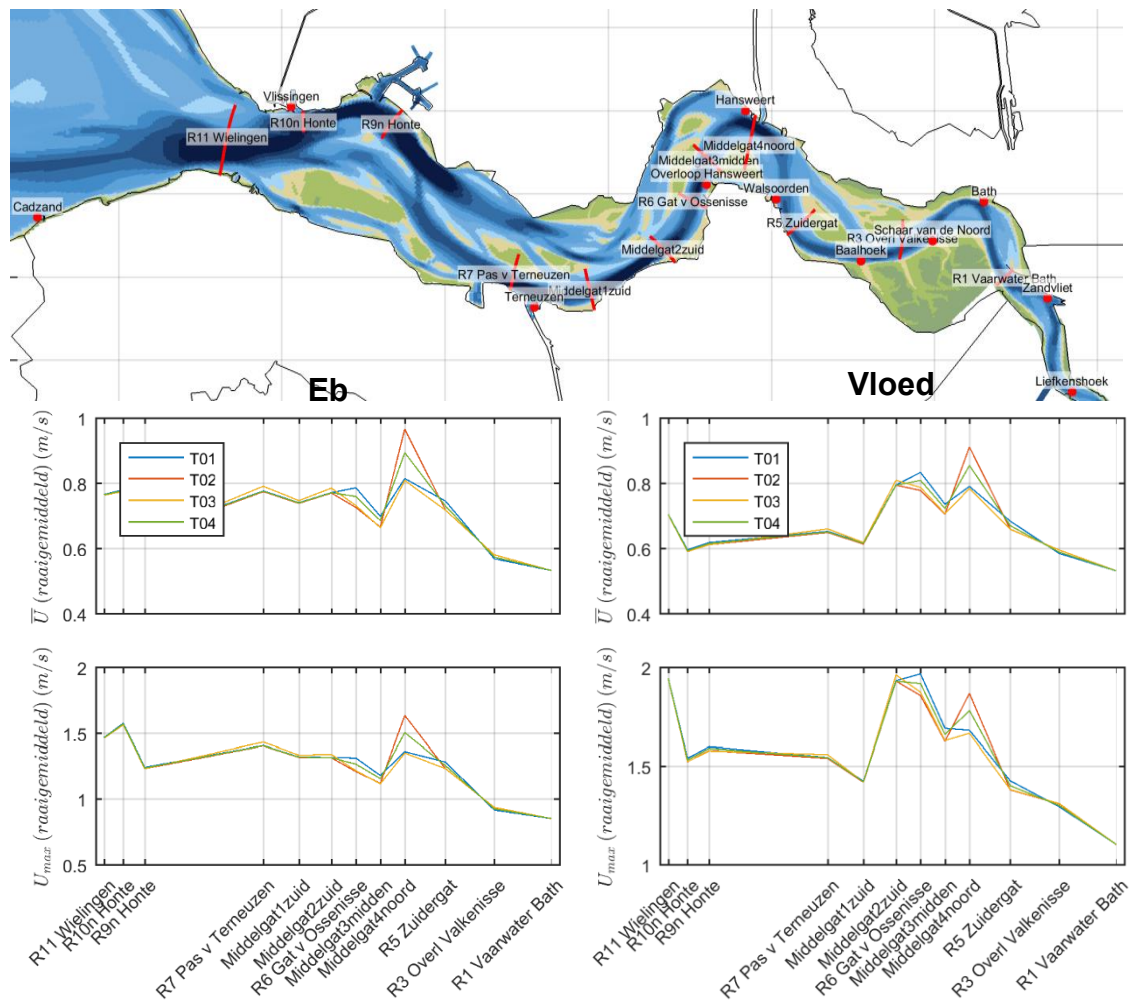
3.6 Effect op getijvoortplanting en lokale stroomsnelheden

De invloed van stortstrategieën op de hydrodynamica in het estuarium is geëvalueerd met numerieke simulaties (Huisman et al., 2018). De resultaten van deze analyse laten zien dat de gekozen stortstrategieën in de eerste jaren een beperkt effect hebben op het verticale getij (waterstanden) in het estuarium. Het effect van de stortstrategieën op de getijslag is minder dan één centimeter. In het westelijke deel van de Westerschelde is er een toename van hoogwater van 0 tot 0.3 cm, terwijl er sprake is van verkleining van de getijslag in het oostelijke deel vanaf de Overloop van Hansweert als gevolg van een hoger gemiddeld laag water (GLW) van +0.3 tot +0.7 cm. Het storten in de diepe putten van de vaargeul zorgt voor een grotere weerstand tegen de getijstrooming, waardoor de getijslag en het debiet in het bovenstroomse deel van de Westerschelde zeer licht afnemen.

De verandering voor strategie T02, waarbij in de dichtsbijzijnde diepe put wordt gestort, is iets groter dan voor de andere strategieën (verandering in ξ_{M4}/ξ_{M2} van circa 0.2% en van minder dan 0.1° in $2\phi_{M2}-\phi_{M4}$), maar ook dit betreft een kleine verandering. Op korte termijn zijn de effecten waarschijnlijk niet waarneembaar, maar op lange termijn (decades) kan er een vermindering zijn van het verticale getij in het bovenstroomse deel van de Westerschelde ten opzichte van de referentiestrategie wat gunstig is voor dit gebied.

Ter plaatse van de diepe putten (waarin gestort wordt) kan op termijn een vergroting van de stroomsnelheden optreden doordat het doorstroomoppervlak kleiner wordt gemaakt door het storten

in de diepe putten. Aan de hand van de debieten en het doorstroomoppervlakte van enkele raaien is de raaigemiddelde stroomsnelheid berekend (Figuur 3.11). Bij de Put van Hansweert bedraagt de toename van de piekstroomsnelheid met storten in de Put van Hansweert lokaal maximaal +0.25 m/s wanneer de put volledig zou zijn opgevuld. In de praktijk zal de invloed op de stroming veel kleiner zijn, omdat een dergelijke opvulling zal zorgen voor een sterkere uitruiming van de diepe Put van Hansweert waardoor de put niet zo veel zal verondiepen.



Figuur 3.11 Maximale en raaigemiddelde ebb- en vloedssnelheid (per stortstrategie) in de Westerschelde voor de dwarsraaien R1 t/m R11 (zie bovenste plot). Linker plot : ebbsnelheid; Rechter plot : vloedssnelheid.

3.7 Lange termijn morfologische effecten

Naast de uitwisseling van zand van het ene morfologische onderdeel van de Westerschelde naar andere deelgebieden (bijv. vanuit een diepe put naar een sectie van een binnenbocht), zullen de gebieden zelf ook veranderen als gevolg van het storten in de diepe putten. Dit zorgt voor een terugkoppeling op de stroming, waarna als gevolg weer een verdere aanpassing van de morfologische ontwikkeling van de Westerschelde kan plaats vinden. Er wordt hier onderscheid gemaakt tussen de effecten die op lange termijn in secties van de Westerschelde (i.e. hoofdgeul, nevengeul en

intergetijdengebieden) rond de putten verwacht worden én de macroschaal effecten die het grotere gedrag van het estuarium beïnvloeden.

De lange-termijn ontwikkelingen die rond de putten (i.e. in de hoofdgeul, nevengeul en op de intergetijdengebieden) verwacht worden zijn:

Dynamischer geulwanden en morfologische trends dichtbij de stortingen

Door de vergroting van het zandtransport vanuit de put naar de geulwanden zullen deze sneller aangroeien en zal als gevolg daarvan ook het aantal zettingsvloeiingen toenemen. De verhoging van de dynamiek van de geulwanden ter plaatse van de diepe putten zorgt er waarschijnlijk voor dat de lange termijn morfologische aanpassingen van de Westerschelde in deze gebieden sneller kunnen verlopen. De verplaatsing van de hoofdgeul gaat plaatselijk mogelijk sneller, maar ook de groei van platen kan mogelijk worden versterkt.

Gelijkmatiger diepte van de hoofdgeul

Door de tijd heen zullen de diepe putten waar actief gestort wordt enigszins verondiepen, terwijl de hoofdgeul op andere (ondiepe) plaatsen in stand gehouden wordt door onderhoudsbaggerwerk van de vaargeul. Deze opvulling gaat door totdat een nieuw evenwicht is bereikt tussen het aanbod van gestort zand en de capaciteit van de stroming in de put om dit weg te voeren. Verwacht wordt dat de interactie met de nevengeulen en platen licht toe zal nemen door de kleinere diepte. Opgemerkt moet worden dat de putten ook na een eventuele verondieping nog steeds aanzienlijk dieper zullen zijn dan de vaargeuldiepte. De effecten zullen niet overal hetzelfde zijn, omdat de capaciteit van de putten sterk verschilt én ook niet in alle diepe putten evenveel gestort zal worden. Met name in het oostelijk deel van de Nederlandse Westerschelde (Macrocel 5 en 6) kan het storten leiden tot een duidelijk verondiepte bodem. Monitoring is nodig om een eventuele opvulling van de putten tijdig te kunnen vaststellen. Dit is met name relevant voor de meer oostelijke putten die een kleinere bergende capaciteit hebben (ten opzichte van de stortvolumes) zoals de Put van Hansweert, Bocht van Walsoorden, Overloop van Valkenisse en het Nauw van Bath. Initieel zou er elke maand een meting plaats moeten vinden in het diepere deel van deze putten als er actief wordt gestort. Later kan een halfjaarlijkse meting volstaan. Op basis van de waargenomen veranderingen in de morfologie kan de verdeling van het gestorte sediment over de putten daarna worden aangepast, waarmee rekening gehouden dient te worden in de stortstrategie.

Verwijding van bochten door aanzanding in de binnenbocht

De aanzandende trend op de binnenbocht van de diepe putten (o.a. Put van Hansweert) duwt de vloed en ebstream van de hoofdgeul naar buiten, waardoor erosie kan ontstaan op de andere zijde. In feite is er sprake van een verwijding van de bocht (i.e. grotere kromtestraal), wat ook waarneembaar is voor de Put van Hansweert. Verondersteld wordt dat deze ontwikkeling ook zonder de stortingen in de Put van Hansweert zou kunnen plaatsvinden, maar dat het wordt versneld door de toevoer van extra sediment op de binnenbocht (i.e. versneld meanderen van de hoofdgeul).

Verzanding van nevengeulen en kortsluitgeulen

Verwacht wordt dat de nabij de diepe putten gelegen nevengeulen (o.a. Schaar van de Spijkerplaat, Everingen, Middelgat, Schaar van Waarde en Valkenisse) en kortsluitgeulen (o.a. Zuid Everingen, Geul van Molenplaat) op termijn aanzanding kunnen ondervinden door de beschikbaarheid van gestorte baggerspecie in de diepe putten en transport naar de omgeving. Hierdoor kunnen deze nabije nevengeulen en kortsluitgeulen enigszins versneld aanzanden. Opgemerkt dient te worden dat er bij de proefstortingen in de Put van Hansweert maar heel weinig invloed gevonden kon worden op de nevengeul (het Middelgat) wat een kleine invloed suggereert, maar de meetperiode was te kort om dit te kunnen vaststellen. De impact op de nevengeulen zal echter minder groot zijn dan de impact van een strategie waarin (deels) direct in de nevengeul zal worden gestort. Monitoring van de nevengeulen is nodig om te verifiëren of er daadwerkelijk sprake is van een beperkte aanzanding van de nevengeulen. Voor het monitoren van de nevengeulen zou er op een

aantal doorsnedes een maandelijkse tot halfjaarlijkse bathymetrische meting moeten plaatsvinden in een relevante nevengeul waar al aanzanding plaatsvindt, zoals de Everingen, het Middelgat, Schaar van Valkenisse en de Schaar van de Noord. Hierin kan mogelijk aangesloten worden bij de reguliere systeemmonitoring (Moneos) of de systeemevaluatie (EMSE).

Ophogen van zandige intergetijdenplaten

In de buurt van de putten zal meer zand beschikbaar zijn voor de zandige intergetijdengebieden (o.a. Spijkerplaat, Middelplaat, Molenplaat, Platen van Ossensisse, Platen van Walsoorden, Platen van Valkenisse West en Oost). De opbouw van de zandige platen kan een nadeel zijn als deze al te hoog liggen, maar zou ook positief kunnen uitpakken voor lage platen én voor het meegroeivermogen met zeespiegelstijging. Op langere termijn is het mogelijk dat zand van de putten naar de nevengeulen beweegt en hierna, zoals beschreven door De Vet et al. (2020), van de nevengeul naar het intergetijdengebied verplaatst. Daarbij moet echter de kanttekening worden geplaatst dat het bij De Vet et al. (2020) ging om een grote hoeveelheid zand die direct in een nevengeul werd gestort, terwijl het sediment vanuit de putten over een grotere afstand moet worden getransporteerd. Een strategie met storten in diepe putten zorgt voor minder zandbeschikbaarheid in de nevengeulen dan wanneer een deel van de baggerspecie direct in de nevengeulen wordt gestort, waardoor ook de invloed op de zandige intergetijdenplaten kleiner wordt verondersteld voor een strategie met storten in diepe putten. Opgemerkt moet worden dat erosie werd vastgesteld op de rand van de noordelijke kop van de Platen van Ossensisse in de beschouwde periode met de proefstortingen, maar verwacht wordt dat dit samenhangt met de sterke aanzanding op de binnenbocht bij de Put van Hansweert. Dit wordt dan ook gezien als een lokaal effect wat mogelijk in een bocht kan optreden, maar niet uitsluit dat er ook ophoging van platen kan zijn. In algemene zin wordt het nuttig geacht om de intergetijdengebieden te monitoren, om te zien wat de trend is in de ontwikkeling van de intergetijdengebieden in relatie tot de stortstrategie. Hiervoor volstaat waarschijnlijk een analyse van de reguliere jaarlijkse monitoring met LiDAR, omdat deze gebieden traag zullen reageren op het aanbod van sediment in de diepe putten. Indien er ten dele toch stortingen in nevengeulen opgenomen worden in de strategie dan is het aan te raden om een hogere frequentie monitoring op intergetijdenplaten in de nabije omgeving van deze stortingen uit te voeren.

Weinig effect op slikken aan de rand van de Westerschelde

Er wordt weinig effect verwacht van de stortstrategie in de diepe putten op de slikken en hogere platen die uit fijner sediment opgebouwd zijn. Het meeste zandige sediment dat beschikbaar komt bij diepe putten zal al ruim voor het bereiken van deze modderige intergetijden platen al bezinken. Alleen het 2^e orde effect van beschikbaarheid van zandig intergetijdengebied waar bovenop een modderige plaat zou kunnen ontstaan draagt mogelijk bij aan het effect op slikken en schorren.

Verondersteld wordt dat er ook door het storten lange termijn effecten kunnen optreden op de grootschalige morfologie van de Westerschelde. Deze veranderingen moeten daarbij overigens gezien worden in de context van autonome veranderingen in de Westerschelde, die op sommige plaatsen al zeer groot zijn. De stortingen kunnen zorgen voor een versnelling of vertraging van lange termijn ontwikkelingen die al gaande zijn.

Verkleining getijslag van de Westerschelde op lange termijn

De getijdeslag van Westerschelde zal op langere termijn (decades) beïnvloed worden door opvulling van de putten (Röbke et al., 2020). De meer gelijkmatige diepte over de lengte van de hoofdgeul zorgt voor een iets grotere weerstand van de stroming, waardoor de getijslag mogelijk iets kleiner wordt. Overigens is hiervan in de eerste vijf jaren nog vrijwel geen effect van gevonden in simulaties (Huisman et al., 2018).

Zandexport van de Westerschelde vermindert

De Westerschelde laat over het algemeen een netto import van sediment zien, welke zal afnemen als gevolg van zeespiegelstijging (Röbke et al., 2020). In het westelijke deel zal de sediment import mogelijk omslaan naar export van sediment. De verplaatsing van sediment van de ene naar de andere macrocel wordt echter niet alleen veroorzaakt door de autonome ontwikkeling van de Westerschelde, maar in aanzienlijke mate ook door de wijze van verdelen van het gebaggerde zand over de stortlocaties (Huisman et al., 2018). Ten opzichte van de autonome ontwikkeling (i.e. zonder vaargeulonderhoud) wordt er meer zand naar westelijke cellen verplaatst (met name van macrocel 4 naar macrocel 3). De absolute jaarlijkse volumeveranderingen in de macrocellen (orde 0 tot 1 miljoen m³/jaar per macrocel) zijn kleiner dan het jaarlijks gebaggerde volume in de Westerschelde (~10 miljoen m³ per jaar). Als gevolg kan er dus met de baggerstrategie ook gecompenseerd worden voor veranderingen van de grootschalige sedimentbalans.

Functie hoofdgeul en nevengeul

Als gevolg van de ruimtelijke herverdeling van sediment door het baggeren en storten zal er door de keuze van een stortstrategie ook een invloed zijn op de sedimentvolumes in de hoofdgeul en in de nevengeulen. Deze door de stortstrategie geïnduceerde invloed is naar verwachting groter dan de indirecte invloed van verspreiding van zand (via sedimenttransport) vanuit stortlocaties naar nevengeulen (of andersom). Het is de verwachting dat een stortstrategie waarbij er in de diepe putten wordt gestort zorgt voor een groter sedimentvolume in de hoofdgeul en minder opvulling van nevengeulen, dan een strategie waarbij er (deels) in nevengeulen wordt gestort zoals nu het geval is. Een strategie met stortingen in diepe putten van de Westerschelde is daardoor gunstig voor de lange-termijn ontwikkeling van de Westerschelde, omdat het verder opvullen van nevengeulen onwenselijk wordt geacht.

4 Conclusies en aanbevelingen

4.1 Conclusies

Dit rapport is een synthese van studies die zich richten op de verspreiding van zandige baggerspecie die is gestort in de diepe geulen van de Westerschelde. Deze analyses zijn uitgevoerd om te toetsen of een aangepaste beheerstrategie voor het storten van gebaggerd materiaal haalbaar is en wat de effecten zijn op de ontwikkeling van de Westerschelde. De beheerstrategie wordt door Maritieme toegang voorbereid in overleg met de VNSC en RWS Zee & Delta. De beheerstrategie dient als basis voor de nieuwe vergunningen voor storten van baggerspecie in de Westerschelde. De studie is een synthese van informatie over de impact van een stortstrategie in diepe putten op:

- 1 de hydrodynamica van de Westerschelde en lokale stroomsnelheden,
- 2 verspreiding van gestort sediment vanuit diepe putten naar de omgeving (op basis van metingen van de proefstortingen en modellering bij de Put van Hansweert),
- 3 lange termijn ontwikkeling van de Westerschelde (expert-beoordeling),
- 4 baggerwerk voor vaargeul onderhoud.

De invloed van storten in diepe putten op de grootschalige hydrodynamica van de Westerschelde is zeer beperkt in de eerste jaren, het effect op de getijslag is minder dan 1 cm. Lokaal kunnen de stroomsnelheden bij diepe putten echter wel enigszins toenemen als gevolg van het opvullen van een put met gestort materiaal.

Voor de verspreiding van zand rond stortingen is informatie beschikbaar van de praktijkervaring met het storten in diepe delen uit de huidige stortstrategie en van proefstortingen bij de Put van Hansweert. Deze stortlocatie is van groot belang voor een toekomstige strategie met storten in diepe putten, omdat dit de dichtstbijzijnde diepe put is vanaf de belangrijke baggerlocatie bij de Drempel van Hansweert. Voor de Put van Hansweert werd gevonden dat de verspreiding van gestort sediment in diepe putten al zeer snel na storten plaatsvindt (circa 50% binnen enkele weken). Verondersteld wordt dat het verlies tijdens het storten beperkt is (<20%) omdat een dichtheidspluim ontstaat die met grote snelheid richting de bodem valt. Mogelijk verspreidt het sediment zich daarom vooral als het zich bij het storten zijwaarts verspreidt over de bodem (over een gebied met een diameter van circa 250 meter) en via suspensietransport. Na de initiële snelle verspreiding vindt een geleidelijke erosie plaats van het gestorte sediment op de bodem van de Put van Hansweert, met een snelheid van enkele duizenden kubieke meters per dag. Het geërodeerde sediment verplaatst zich hoofdzakelijk naar de binnenbocht, vanwaar de vloedstroming het sediment met name in oostelijke richting over de ondiepe vooroever verspreidt. Verwacht wordt dat het resterende deel van het sediment met name door de hoofdgeul naar de Drempel van Hansweert zal worden getransporteerd. Op de noordelijke kop van de Platen van Ossensisse heeft een teruggang van de platen plaats gevonden op de waterlijn, welke mogelijk gerelateerd is aan de lokale aanzanding in de binnenbocht (i.e. in dieper water). Op basis van kennis van het systeem van de Westerschelde en numerieke modellering wordt ook verondersteld dat een deel van het sediment naar de nevengeulen zal gaan, maar dit kon vooralsnog niet worden vastgesteld in de metingen na de proefstortingen in de Put van Hansweert.

Naast de Put van Hansweert zullen ook andere diepe putten worden gebruikt als stortlocatie van gebaggerd zand. Voor deze locaties is een doorvertaling gemaakt van de verwachte effecten op basis van praktijkervaring met het storten in diepe delen én de waargenomen veranderingen na proefstortingen bij de Put van Hansweert.

Dit betreft een kwalitatief overzicht waarin afhankelijk van parameters, zoals geometrie, bochtstraal, nabijheid van een drempel en aanwezigheid van een nevengeul, een beoordeling is gegeven van het

relatieve belang van de bij de Put van Hansweert waargenomen morfologische veranderingen voor deze putten. Deze informatie geeft richting bij het monitoren en beoordelen van de effecten van toekomstige stortingen in deze putten.

Op basis van een expert-beoordeling wordt verwacht dat de diepte van de vaargeul op de lange termijn gelijkmatiger wordt als gevolg van het deels opvullen van de diepe putten waarin veel wordt gestort. Hierdoor zal een lichte reductie van de getijslag optreden over de komende decades in de Westerschelde, en zal ook de vloeddominantie iets toenemen waardoor er minder export van zand is. Ter plaatse van de diepe putten waar gestort wordt, zullen de geulwanden morfologisch dynamischer worden als gevolg van extra aanvoer van zand uit de put én een toename van het aantal zettingsvloeiingen. De beschikbaarheid van zand kan lokaal mogelijk zorgen voor enige aanzanding van nabije nevengeulen en kortsluitgeulen, maar deze invloed is vanzelfsprekend kleiner dan voor alternatieve strategieën waarbij (deels) direct in een nevengeul wordt gestort. Hetzelfde geldt voor zandige intergetijdengebieden dichtbij de putten die op termijn beperkt mee zouden kunnen groeien door de beschikbaarheid van zand, terwijl slibbige platen vrijwel niet worden beïnvloed. Deze lange termijn effecten op de nevengeulen en intergetijdengebieden konden echter nog niet in metingen of met numerieke modellen worden vastgesteld, maar worden desalniettemin waarschijnlijk geacht op basis van de kennis van de morfologische ontwikkeling van de Westerschelde.

Op basis van berekeningen wordt verwacht dat een stortstrategie met gebruikmaken van diepe putten van de Westerschelde zal leiden tot een beperkte toename van het baggerbezwaar bij de drempels van 10% tot 20% ten opzichte van een bestaande strategie met stortingen op platen, in nevengeulen en op de geulwand van het Gat van Ossensisse. Na verloop van tijd kan echter een opvulling van de diepe putten ontstaan als er meer zand wordt gestort dan afgevoerd kan worden door natuurlijke processen. Verwacht wordt dat het baggerbezwaar hierdoor op langere termijn (na meer dan 5 jaar intensief storten) verder gaat toenemen.

4.2 Aanbevelingen

Op basis van de analyses in deze studie en de onderliggende deelrapportages is het niet mogelijk om gedetailleerdere (meer kwantitatieve) voorspellingen te geven van de baggervolumes en morfologische impacts op nevengeulen en intergetijdengebieden. Ten behoeve van de te kiezen stortstrategie voor de komende jaren wordt daarom aanbevolen om:

- het storten van zand in de diepe putten van de Westerschelde door de tijd heen langzaam op te bouwen, om zodoende de effecten te kunnen onderzoeken. Door de tijd heen kan, afhankelijk van de eerste ervaringen, het volume zand dat wordt gestort in de diepe putten worden vergroot. Dit geldt met name voor de putten waar nog geen praktijkervaring beschikbaar is.
- monitoring uit te voeren van de bodemveranderingen rond stortlocaties in diepe putten van de Westerschelde. Om zodoende tijdig de effecten op de omgeving te kunnen inschatten. Dit is met name relevant voor de oostelijke diepe putten van de Westerschelde (o.a. Put van Hansweert, Bocht van Walsoorden, Overloop van Valkenisse en Nauw van Bath) om te zien in welke mate deze opvullen, en daarmee om de uitruimcapaciteit te kunnen inschatten, en andere neveneffecten te kunnen monitoren (Middelgat, ontwikkeling plaatrand van Ossensisse en sedimentatie drempel van Hansweert). Voor een evaluatie van de uitruimsnelheid van stortingen én de verspreiding naar de directe omgeving van een put zou een maandelijks monitoring in het eerste halfjaar kunnen worden toegepast, waarvan tenminste één meting voor het storten wordt opgenomen.
- Na verloop van tijd kan de terugkeerfrequentie worden teruggeschroefd tot een (half)jaarlijkse meting. Voor de ruimtelijk dekking is het van belang naast de put ook een deel van de hoofdgeul, nevengeulen en binnenbocht te monitoren. Het juiste gebied verschilt per locatie. Geadviseerd wordt om van tevoren een expert beoordeling te maken van het gebied dat beïnvloed zou kunnen worden door de storting. Voor de intergetijdengebieden volstaan waarschijnlijk de bestaande

jaarlijkse bathymetrische metingen, omdat deze gebieden trager reageren op stortingen in de diepe putten.

- het storten te spreiden over de stortlocaties (i.e. niet alle sediment op één locatie te storten), om zodoende een te grote verondieping op een enkele stortlocatie te voorkomen (bijv. bij de Put van Hansweert of Gat van Ossensisse).
- ten behoeve van de kennisontwikkeling zou het wenselijk zijn om op termijn ook monitoring uit te voeren (over een periode van enkele maanden) in de kleinere oostelijke stortlocaties (Bocht van Walsoorden, Overloop van Valkenisse, het Nauw van Bath en SH71) waar minder bergingscapaciteit is.
- bij de verdeling van het stortmateriaal over de stortlocaties dient rekening gehouden te worden met de grootschalige sedimentbalans van de Westerschelde, welke beïnvloed zou kunnen worden door de maatregelen, zoals ook nu al gebeurt in de huidige stortstrategie. Hierin kan gestuurd worden door een gebalanceerd stortbeleid.
- de samenstelling van het sediment mee te wegen bij de keuze van een locatie voor het terugstorten van gebaggerd zand in het estuarium. Sediment dat in grote mate uit silt en fijn zand bestaat kan bijvoorbeeld terug geplaatst worden op laag energetische locaties (o.a. op platen of plaatranden), terwijl gemiddeld en grof zand op hoog energetische locaties (o.a. diepe putten) kan worden geplaatst.

Referenties

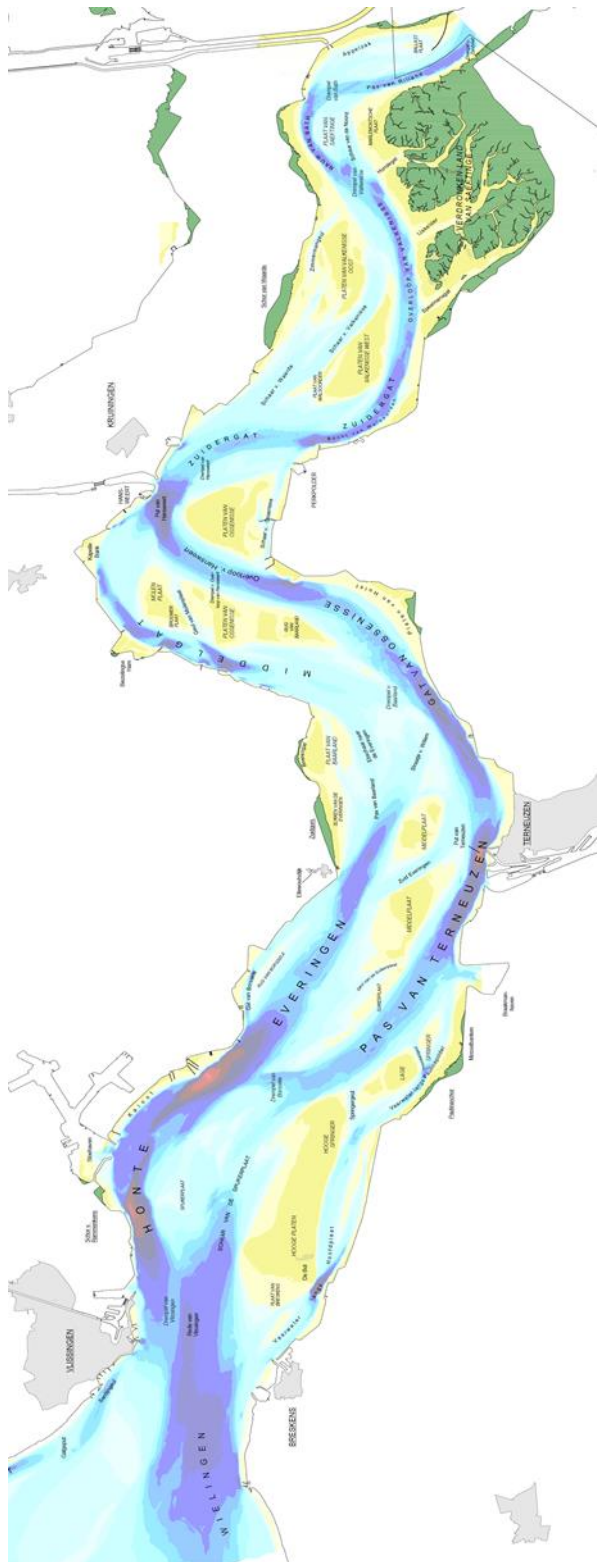
- Antolinez, J.A.A., Huisman, B.J.A., & Huismans, Y. (2021). Mesoscale morphology of the Inloop van Ossenisse. Influence of pilot disposals in relation to autonomous trends. Deltares rapport.
- Consortium Arcadis-Technum (2007). Milieueffectrapport Verruiming vaargeul Beneden-Zeeschelde en Westerschelde. Achtergronddocument Baggeren en storten. Antwerp, Belgium.
- Cleveringa, J. (2013). Ontwikkeling mesoschaal Westerschelde (factsheets). Basisrapport kleinschalige ontwikkeling K-16. Project LTV veiligheid en toegankelijkheid; LTV V&T-rapport K-16. 30 augustus 2013. *Rapport A2666*. I/RA/11387/13.083/GVH.
- Dam, G. (2013a). Actualisatie Delft3D model van de Westerschelde. Lange Termijn Visie Schelde-estuarium, Veiligheid en Toegankelijkheid. *Rapport, 077028230:0.1 – C04021.002666.0100*. 11 april 2013. Auteur G. Dam. (oplegnotitie I/RA/11387/12.103/GVH, Achtergrondrapport A-27)
- Dam, G. (2013b). Simulaties V&T met effectanalyse op mesoschaal. Lange Termijn Visie Schelde-estuarium, Veiligheid en Toegankelijkheid. *Rapport 077010281:0.1*. Auteurs P.J. Menninga en G. Dam. C04021.002666.0100. 11 september 2013. (oplegnotitie I/RA/11387/13.095/GVH, Basisrapport kleinschalige ontwikkeling K-20)
- Dam, G. (2013c). LTV A-23: validatie FINEL2D/3D model a.d.h.v. stroommetingen Put van Borssele. Auteur : G.Dam.
- Dam, G. (2013d). A-28 LTV - Veiligheid en Toegankelijkheid. Harde lagen Westerschelde.
- Dam, G. (2013e). Actualisatie van het FINEL2d model van de Westerschelde ten behoeve van Lange Termijn Visie Schelde-estuarium, Veiligheid en Toegankelijkheid. Auteur G. Dam. Achtergrondrapport A-26, 1630/U11274/GD/G, 13 augustus 2013. (oplegnotitie I/RA/11387/12.100/GVH, Achtergrondrapport A-26).
- De Vet, P.L.M., Van Prooijen, B.C., & Wang, Z.B. (2017). The differences in morphological development between the intertidal flats of the Eastern and Western Scheldt. *Geomorphology*, Vol. 281, pp. 31–42.
- De Vet, P.L.M., van Prooijen, B.C., Colosimo, I., Ysebaert, T., Herman, P.M.J., & Wang, Z.B. (2020). Sediment disposals in estuarine channels alter the ecomorphology of intertidal flats. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, Vol. 125.
- Decrop, B. (2019). CFD Modelling van de Verdeling Zand Na Het Kleppen Boven Een Diepe Put. *IMDC rapportage*. Gepresenteerd bij de VNSC bijeenkomst, Oktober 2019.
- De Vriend, H.J., Wang, Z.B., Ysebaert, T., Herman, P.M.J., & Ding, P. (2011). Ecomorphological problems in the Yangtze Estuary and the Western Scheldt. *Wetlands*, Vol. 31, pp. 1033–1042.
- Elias, E., Roelvink, F., Pearson, S., Huisman, B.J.A. (2021). Investigation of Sediment Pathways in the Put Van Hansweert. Morphological effects of dumping in a deep pit of the Western Scheldt. *Deltares Report 1210301-001-ZKS-0010*.
- Gensheimer, R.J. (2010). *Dynamics of particle clouds in ambient currents with application to open-water sediment disposal*. PhD Thesis, Cambridge Massachusetts Institute of Technology.
- Huisman, B.J.A., Schrijvershof, R., Lanckriet, T., & Van der Werf, J. (2018). Baggerdepositie in Diepe Geulen. Strategie Voor Het Plaatsen van Sediment in de Diepere Getijdegeulen van de Westerschelde. *Deltares rapport 1210301-000-ZKS-0027*. In opdracht van de Vlaams Nederlandse Schelde Commissie (VNSC).
- Huismans, Y., Van der Vegt, H., Huisman, B.J.A., & Alonso, A.C. (2021). Westerschelde: storten in diepe putten Technische rapportage: mesoschaal morfologische ontwikkelingen rond de Put

van Hansweert. *Deltares rapport 1210301-015-ZKS-0006*. In opdracht van de Vlaams Nederlandse Schelde Commissie (VNSC).

- IMDC (2018a). Factual datarapport Diepe Delen 2017. *Rapport I/RA/12161/17.204/GLE/*.
- IMDC (2018b). Vaarwegbeheer 2016-2021 Bestelopdracht 1: Flexibel Storten 2017. Maandrapport Flexibel Storten februari - maart 2018. *Rapport I/RA/11498/18.040/JMA*.
- IMDC (2020). Report on CFD calculations disposal plumes. IMDC report for VNSC I/RA/12161/20.005/BDC/FKY. Auteurs: Foteini Kyrousi & Boudewijn Decrop.
- Kuijper, K., & Lescinski, J. (2013). Data analyses water levels ebb and flood volumes and bathymetries Western Scheldt. *LTV V&T rapport G-05*, March 2013.
- Lanckriet, T., Depreiter, D., & Van Holland, G. (2017). Equilibrium-Type Response Model for the Sediment Volume of Dredging and Disposal Areas. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*.
- McLaren, P. (1993). Patterns of sediment transport in the western part of the Westerschelde. *Technical Report, GeoSea Consulting*, Cambridge, UK, 1993.
- McLaren, P. (1994). Sediment transport in the Westerschelde between Baarland and Rupelmonde, *Technical Report, GeoSea Consulting*, Cambridge, UK, 1994.
- Pandelaers, C, & Kragiopoulou, E. (2019). Vaarwegbeheer 2016-2021 Bestelopdracht 6: Flexibel Storten 2018-2019 - Maandrapport April-Mei 2019. *IMDC Rapport I/RA/11498/19.071/CPA/*.
- Plancke, Y. (2017). Analyse en D3D modellering stortingen diepe delen. *Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen*.
- Plancke, Y., Claeys, S., Verwaest, T., & Mostaert, F. (2017a). Overleg Flexibel Storten: Deelrapport 23 – Stroming- en sedimentmeting ter hoogte van de diepe put van Hansweert. Versie 3.0. *WL Rapporten, 00_031_23. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen*.
- Plancke, Y., Schrijver, M., Meire, D., Verwaest, T., & Mostaert, F. (2017b). Overleg Flexibel Storten: Deelrapport 22 – Analyse van de waterbeweging, het sedimenttransport en de morfologie nabij de Plaat van Walsoorden. *WL Rapporten, 00_031_22. Versie 1.0. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen & Rijkswaterstaat Zee & Delta: Middelburg*.
- Plancke Y. (2018). Memo 22-1-2018 Korrelanalyse en natte densiteit baggerstalen. *Waterbouwkundig Laboratorium*.
- Plancke, Y., Meire, D., & Mostaert, F. (2018). Agenda voor de toekomst - Morfologie Mesoschaal: deelrapport 14. Bodemtransport nabij de Platen van Ossenissee op basis van een analyse van bodemvormen. Versie 3.0. *WL Rapporten, 14_024_14. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen*.
- Plancke, Y., Meire, D., & Mostaert, F. (2019a). Overleg Flexibel Storten: Deelrapport 31 – Stromings- en sedimenttransport metingen ter hoogte van de diepe put van Hansweert. 47 pp.
- Plancke, Y., Meire, D., & Mostaert, F. (2019b). Agenda voor de Toekomst - Sedimentstrategie Westerschelde: Syntheserapport. Versie 0.1. *WL Rapporten, 13_122_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen*.
- Röbke, B.R., Van der Wegen, M., Elmilady, H., & Taal, M. (2020). Long-term morphological response to sea level rise and different sediment strategies in (Western) Scheldt estuary. Presentatie voor de VNSC, 22 april 2020.
- Schrijvershof, R., & Vroom, J. (2015). Overzicht van Menselijke Ingrepen in de Westerschelde En Haar Mondingsgebied in de Periode 1985-2014. *Deltares Memo 1210301-001-ZKS-0005*.
- Schrijvershof, R., & Vroom, J. (2016). Effecten van realistische (extreme) stortstrategieën in de Westerschelde. *Deltares report 1220094-000*.

- TNO (2003). Kartering moeilijk erodeerbare lagen in het Schelde estuarium, *TNO rapport 03-213-B1208*.
- Van der Vegt, H., Mastbergen, D., & Van der Werf, J. (2019). Moeilijk-Erodeerbare Lagen in de Westerschelde - Onzekerheden En Gevolgen Voor Morfodynamiek. *Deltares report 1210301-015-ZKS-0008*.
- Van Rijn, L.C. (1993). *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas*. Aqua Publications, ISBN 90-800356-2-9.
- Van Rijn, L.C. (2007a). Unified View of Sediment Transport by Currents and Waves I – Initiation of motion, bed roughness and bed load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 133 (6), pp. 649-667.
- Van Rijn, L.C. (2007b). Unified View of Sediment Transport by Currents and Waves II – Suspended transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 133 (6), pp. 668-689.
- Vroom, J., & Schrijvershof, R. (2015). Overzicht van menselijke ingrepen in de Westerschelde en haar mondingsgebied in de periode 1985-2014. *Deltares report 1210301-001-ZKS-0005*.
- Vroom, J., De Vet, P.L.M., & Van der Werf, J. (2015). Validatie Waterbeweging Delft3D-NeVla Model Westerscheldemonding. *Deltares report 1210301-001-ZKS-0001*.
- Van der Wegen, M., Schrijvershof, R., Alonso, A.C., Broekema, Y., Kranenburg, W., & Huisman, B.J.A. (2021). Hydrodynamics in the Pits of Borssele and Hansweert - Data-Analysis and Delft3D-FM Modeling. *Deltares report 1210301-015*.
- Wijnberg, K.M. (2002). Environmental controls on decadal morphologic behaviour of the Hollandcoast. *Marine Geology*, Vol. 189, pp. 227-247.

A Overzicht Westerschelde



Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl