

## Invloed baggerstrategie op slibconcentraties en baggervolumes vaarweg Holwerd-Ameland



## Invloed baggerstrategie op slibconcentraties en baggervolumes vaarweg Holwerd-Ameland

### Auteur(s)

Bart Grasmeijer

Roy van Weerdenburg

Thijs van Kessel

## Invloed baggerstrategie op slibconcentraties en baggervolumes vaarweg Holwerd-Ameland

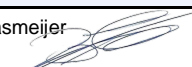
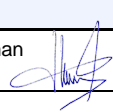

<b>Opdrachtgever</b>	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
<b>Contactpersoon</b>	de heer H. Mulder (WVL); de heer E. Lofvers (NN)
<b>Referenties</b>	
<b>Trefwoorden</b>	Waddenzee, Vaarweg Holwerd – Ameland, Vaargeulonderhoud, Baggerwerkzaamheden, Slibdynamiek, Slibmodellering, Delft3D-FM WQ

### Documentgegevens

<b>Versie</b>	0.7
<b>Datum</b>	22-04-2021
<b>Projectnummer</b>	11206799-005
<b>Document ID</b>	11206799-006-ZKS-0001
<b>Pagina's</b>	49
<b>Status</b>	definitief

### Auteur(s)

	Bart Grasmeijer	
	Roy van Weerdenburg	
	Thijs van Kessel	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
0.7	Bart Grasmeijer 	Peter Herman 	Toon Segeren	
	Roy van Weerdenburg			
	Thijs van Kessel			

# Samenvatting

Rijkswaterstaat is in 2016 gestart met een programma voor de ontwikkeling van kennis over de morfologie van de Nederlandse Waddenzee en voor het inbedden hiervan in beleid en beheer. In het kader van het programma worden ter bevordering van de onderlinge uitwisseling en borging van de morfologische kennis ook onderzoeksopdrachten uitgevoerd vanuit een specifiek project.

Het voorliggende rapport wordt uitgebracht als onderdeel van het deelproject Evaluatie bochtafsnijding en vergroten systeemkennis Vaarweg Ameland. Het rapport onderzoekt of een aanpassing van de baggerstrategie kan leiden tot vermindering van de aanzienlijke baggerinspanningen in de vaarweg Holwerd-Ameland in de Nederlandse Waddenzee.

Met behulp van recent verzamelde veldgegevens is een bestaand model aangepast en gevalideerd voor de specifieke toepassingen in deze studie. Het bestaande model is gebouwd in Delft3D-FM (Flexible Mesh). Het rekenrooster van dit model is voor deze studie lokaal verfijnd ten opzichte van het basismodel zodat het studiegebied met voldoende nauwkeurigheid is opgenomen in de modelschematisatie. De slibdynamiek is berekend voor een periode van drie maanden met realistische meteorologische forcering. Validatie van het model toont aan dat de beschikbare veldgegevens over het algemeen goed worden gereproduceerd door het model, maar dat de slibconcentratie dicht bij de pier van Holwerd significant wordt onderschat.

Er zijn modelberekeningen uitgevoerd met verschillende baggerstrategieën. Analyse van de resultaten van verschillende modelberekeningen geeft inzicht in het effect van de baggerstrategieën en op de slibconcentraties en de aanslibbing in de vaargeul bij Holwerd. Om de invloed van de huidige verspreidingsstrategie in beeld te brengen, zijn simulaties gemaakt met baggeren maar zonder verspreiden en simulaties inclusief verspreiden. Deze zijn uitgevoerd met verschillende modelinstellingen, waarbij vooral gevarieerd is in de sterkte van de uitwisseling van slib tussen waterkolom en bodem.

Op basis van de modelberekeningen wordt geconcludeerd dat het verspreiden van slib in de geul bij eb leidt tot 10-30% hogere baggervolumes, vergeleken met een strategie waarbij het slib uit het systeem wordt verwijderd, of bij Zuiderspruit, één van de beschikbare stortlocaties, wordt gestort. Op basis van de onzekerheden in de resultaten van de huidige studie worden aanbevelingen gedaan voor vervolgonderzoek in de vorm van veldwaarnemingen en modellering.

# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
	<b>Begrippenlijst</b>	<b>7</b>
<b>1</b>	<b>Introductie</b>	<b>9</b>
1.1	Inleiding	9
1.2	Achtergrond	9
1.2.1	Morfologische ontwikkeling	9
1.2.2	Onderhoudsbaggerwerk	11
1.3	Aanpak	13
1.4	Leeswijzer	13
<b>2</b>	<b>Modelopzet en validatie</b>	<b>14</b>
2.1	Basismodel Waddenzee	14
2.1.1	Modeldomein	14
2.1.2	Waterbewegingsmodel	15
2.1.3	Slibmodel	15
2.2	Aanpassingen modelschematisatie	16
2.2.1	Roosterverfijning en bodemhoogtegegevens	16
2.2.2	Validatie met nieuwe metingen	18
2.3	Simulatieperiode en initiële condities	19
2.4	Validatie instellingen slibmodel met metingen	22
2.4.1	Korrelgrootteverdeling, percentage slib en droge dichtheid	22
2.4.2	Valsnelheid bodemslib	25
2.4.3	Kritische bodemschuifspanning voor erosie	28
2.4.4	Consolidatie	29
<b>3</b>	<b>Slibdynamiek en baggeronderhoud</b>	<b>30</b>
3.1	Slibdynamiek zonder baggeren	30
3.1.1	Slib in de bodem	30
3.1.2	Slib in de waterkolom	33
3.1.2.1	Zonder baggeren en verspreiden	33
3.1.2.2	Met baggeren maar zonder verspreiden	36
3.1.2.3	Met baggeren en verspreiden	37
3.1.2.4	Met verhoogde sedimentatie naar de bufferlaag en baggeren en verspreiden	37
3.2	Berekende baggervolumes	38
3.2.1	Zonder verspreiding en volgens huidige verspreidingsstrategie	38
3.2.2	Aangepaste verspreidingsstrategie	40
<b>4</b>	<b>Discussie en aanbevelingen</b>	<b>41</b>
4.1	Discussie	41
4.1.1	Slibconcentraties	41
4.1.2	Baggeronderhoud en retourstroming	41

4.2	Aanbevelingen	42
<b>5</b>	<b>Conclusies</b>	<b>44</b>
<b>6</b>	<b>Referenties</b>	<b>45</b>
<b>A</b>	<b>Bijlagen</b>	<b>47</b>
A.1	Bijlage 1: Baggervolumes vaarweg Ameland per maand vanaf 2018	47

# Begrippenlijst

In onderstaande tabel worden de definities van een aantal begrippen die veel voorkomen bij de modellering van slib toegelicht.

Term	Parameter	Dimensies	Definitie
Depositie-efficiëntie [-]	depeff		Fractie van de bruto depositieflux van de waterkolom naar de bodem die in de bodemlagen terecht komt.
Slibfractie in de waterkolom	IM1		<i>Inorganic Matter</i> ; Eerste slibfractie in het buffermodel
Slibfractie in de waterkolom	IM2		<i>Inorganic Matter</i> ; Tweede slibfractie in het buffermodel
Intra-getijvariatie			Variatie die terug te zien is op een tijdschaal van een getijperiode
Manningscoëfficiënt		s/m <sup>1/3</sup>	Veelgebruikte kwantificering voor de ruwheid van de bodem
Flufflaag			Zie Bodemlaag S1. Kan in havens en vaargeulen zich manifesteren als 'fluffy' materiaal.
Bufferlaag			Zie Bodemlaag S2.
Bodemlaag S1	S1		Gemakkelijk erodeerbare bodemlaag van het zgn. tweelagen of buffermodel; heeft in het model alleen massa en geen dikte en ligt op de onderlaag S2.
Bodemlaag S2	S2		Bufferlaag van het buffermodel. Bestaat uit een zandige matrix waarin slib wordt gebufferd of geconsolideerd slib met hogere erosieweerstand.
SPM		g/l, mg/l of kg/m <sup>3</sup>	<i>Suspended Particulate Matter</i> ; deeltjes die in de waterkolom zitten. Ook wel aangeduid met zwevende stof in de waterkolom
SSC		g/l, mg/l of kg/m <sup>3</sup>	<i>Suspended Sediment Concentration</i> ; sediment dat in de waterkolom zit. Omdat in dit rapport alleen slib wordt gemodelleerd, is dat sediment slib. Ook wel aangeduid slib- of sedimentconcentratie in de waterkolom.
Residuele stroming		m/s	Netto stroming over een bepaalde periode
Residueel transport		m <sup>3</sup> /s	Netto transport over een bepaalde periode
Restdebiet		m <sup>3</sup> /s	Netto debiet over een bepaalde periode
Strijk lengte		m of km	De ononderbroken afstand waarover de wind over het water kan waaien tot hij een zeker punt bereikt. Deze lengte is bepalend voor de hoogte van golven.
Bodemschuifspanning door stroming [Pa]	$\tau_{flow}$	N/m <sup>2</sup>	Bodemschuifspanning ten gevolge van stroming
Bodemschuifspanning door golven [Pa]	$\tau_{wave}$	N/m <sup>2</sup>	Bodemschuifspanning ten gevolge van golven
Valsnelheid	$w_s$	mm/s	Snelheid waarmee deeltjes in stilstaand water door de waterkolom naar de bodem zakken

Term	Parameter	Dimensies	Definitie
Verblijftijd in de bodem		seconden, minuten of uren	Gemiddelde duur dat slib in de bodem verblijft
Hypsometrie			Op een hypsometrische curve wordt voor een bodemoppervlak (x coördinaat van de curve) het bodemoppervlak getoond dat onder een bepaalde hoogte (y coördinaat van de curve) ligt.



# 1 Introductie

## 1.1 Inleiding

Rijkswaterstaat is in 2016 gestart met een programma voor de ontwikkeling van kennis over de morfologie van de Nederlandse Waddenzee en voor het inbedden hiervan in beleid en beheer. In het programma wordt morfologische kennis op een structurele manier verzameld, geanalyseerd, geordend en geborgd. Daarnaast wordt de kennis toegankelijk gemaakt voor beleids- en beheervraagstukken op het gebied van veiligheid, bereikbaarheid, natuur en overige gebruiksfuncties. Hiertoe wordt afstemming gezocht met beleidsmakers, beheerders, adviseurs, wetenschappers en gebruikers van het wad. In het kader van het programma worden ter bevordering van de onderlinge uitwisseling en borging van de morfologische kennis ook onderzoeksopdrachten uitgevoerd vanuit een specifiek project. Het voorliggende rapport wordt uitgebracht als onderdeel het deelproject Evaluatie bochtafsnijding en vergroten systeemkennis Vaarweg Ameland.

Het doel van deze studie is de morfologische kennis over de vaarweg tussen Holwerd en Ameland en het omringende kombergingsgebied te actualiseren en te vergroten. Dit is nodig om actuele beheervragen te beantwoorden, zoals:

- Hoe kan het baggerbeheer in de komende jaren geoptimaliseerd worden?
- Welke morfologische ontwikkelingen kunnen op een tijdschaal van ~10 jaar verwacht worden?

Om deze vragen te beantwoorden is een recent ontwikkeld numeriek model voor dit gebied verder verbeterd met behulp van in 2019 uitgevoerde metingen.

Deze exercitie biedt de mogelijkheid om de metingen meer generiek toe te passen. In het model kunnen we namelijk de omstandigheden gelijk houden en alleen de instellingen aanpassen zodat we processen kunnen ontrafelen. Omdat we de omstandigheden gelijk houden kiezen we voor één meetperiode.

Met het model worden vervolgens modelberekeningen met verschillende baggerstrategieën gemaakt en de uitkomsten worden vergeleken.

## 1.2 Achtergrond

De veerverbinding Holwerd-Ameland kampt al lang met regelmatig optredende vertragingen en een sterke toename van het baggerbezwaar in de vaargeul (Herman et al., 2016; Villars et al., 2016). Figuur 1.1 toont de veerverbinding. In het meest oostelijke deel van de vaargeul (het deel bij Holwerd) wordt hoofdzakelijk slib gebaggerd. Verderop in de vaarroute wordt met enige regelmaat zand gebaggerd om het hele vaartraject op diepte te houden.

### 1.2.1 Morfologische ontwikkeling

Op de schaal van de gehele Waddenzee is het gebied ten zuiden van Ameland al decennia een depositiegebied (Herman, et al., 2016; Elias, 2019). De platen en kwelders zijn sneller in hoogte gestegen dan de zeespiegel. Dit heeft geleid tot een afname van het getijvolume door de geulen. Het natuurlijke proces is dan dat de geulen in dwarsoppervlak zullen afnemen, omdat de evenwichtsoppervlakte van de geuldoorsnede een functie is van het getijvolume (hoe meer water per getij door de geul stroomt, hoe groter het doorstroomoppervlak van de geul zal zijn). De reactie van geulen op een afname van het getijvolume is relatief traag, zodat kan worden verwacht dat de

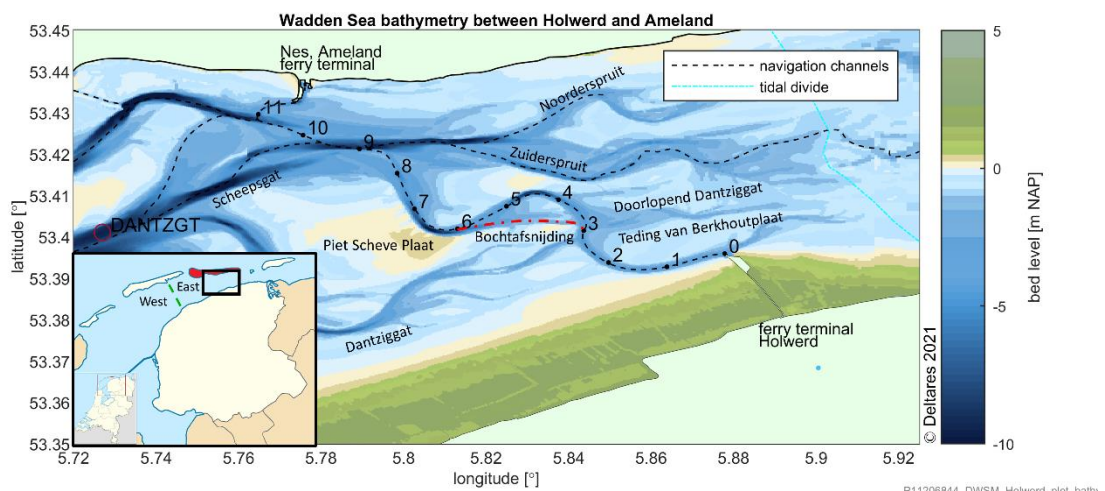
geulen in onevenwicht zijn met het huidige getijvolume en daardoor de neiging zullen hebben aan te zanden / slibben.

Rond het zuidelijke deel van de vaargeul heeft een aantal lokale morfologische processen bijgedragen aan omstandigheden die sedimentatie in de geul bevorderen:

1. Verhoging van het bodemniveau in het kombergingsgebied van de vaargeul, dus verlaging van het kombergingsvolume, is de belangrijkste reden van de afname van het getijprisma door het zuidelijke deel van de vaargeul.
2. De verhoging van de Teding van Berkhoutplaat leidt tot verzwakking van de vloed-eb circulatie door het geulenstelsel Dantziggat – Vaargeul. Dit leidt tot een toename van het getijvolume naar het Doorlopend Dantziggat en een afname in de vaargeul.
3. De hierboven genoemde blokkering van de vloed-eb circulatie en het verdwijnen van de vloed-schaar ten westen van de Teding van Berkhoutplaat hebben samen tot gevolg dat het zuidelijke deel van de vaargeul minder ebdominant (c.q. meer vloeddominant) wordt. Deze getijsymmetrie bevordert het transport van sediment naar de geul.

De vaarroute is de afgelopen tientallen jaren steeds bochtiger geworden (zie bijlage A.1). Tussen km 3 en km 6 langs het vaargeultraject bevindt zich een eb-vloedschaar (Figuur 1.1). Dit is een veel voorkomend morfologisch element, bestaande uit twee min of meer evenwijdige geulen, de ebgeul en de vloedgeul. In de ebgeul is de snelheid gemiddeld over een getijperiode in ebrichting, terwijl de gemiddelde snelheid in de vloedgeul in vloedrichting is. Over de getijperiode geïntegreerd, is in een ebgeul het watervolume in ebrichting dan dus groter dan in een vloedgeul. Een vloedgeul eindigt meestal op een drempel in de bodem (dit zijn de gebieden waar zand gebaggerd wordt als er een vaargeul is).

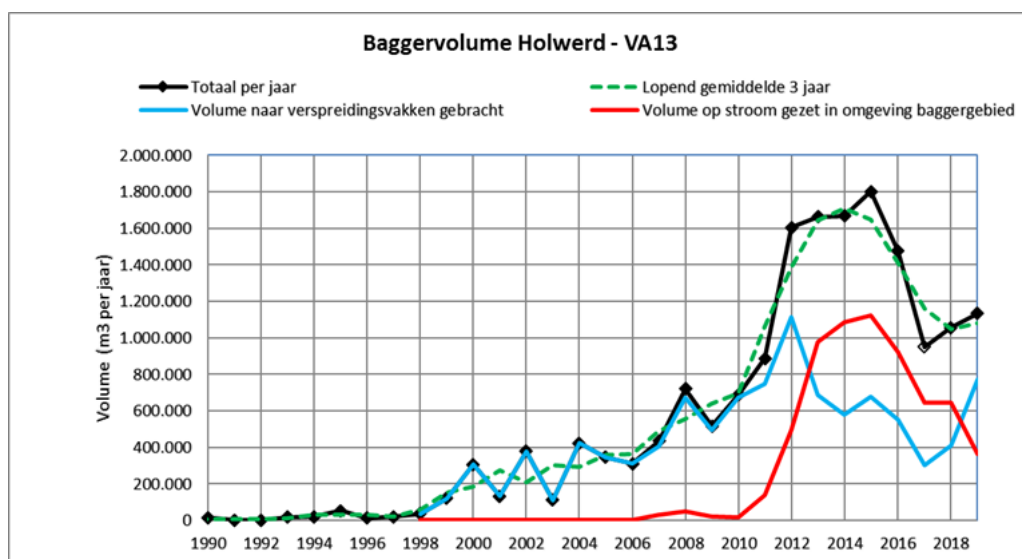
De natuurlijke evolutie van een eb-vloedschaar wordt gekenmerkt door het uitbochten van de ebgeul. Terwijl de ebgeul een steeds grotere bocht ontwikkelt, neemt haar capaciteit om water af te voeren normaliter af. Die rol wordt dan meer en meer overgenomen door de vloedgeul. Uiteindelijk verliest de ebgeul haar functie geheel, en ontstaat er een nieuwe eb-vloedschaar. De oude vloedgeul wordt de nieuwe ebgeul, en er wordt een nieuwe vloedgeul gevormd. Dit is een cyclisch proces met een periode van meerdere decennia.



Figuur 1.1 Kaart met daarop aangegeven de vaarroute tussen Holwerd (Friesland) en Nes op Ameland (Friesland) en de bochtafsnijding die in 2019 is gerealiseerd. De afstand langs de vaarweg is aangegeven in kilometers. Het wantij wordt aangegeven met de cyaankleurige stippellijn.

### 1.2.2 Onderhoudsbaggerwerk

Hoewel al geruime tijd middels ploegen de geul op diepte werd gehouden, is het echte baggerwerk tegen het eind van de vorige eeuw begonnen. Sindsdien hebben de gebaggerde volumes een zeer sterke toename gekend (Figuur 1.2). De toename is vanaf 2011 het sterkst. Het is opvallend dat de baggervolumes sinds 2016 weer zijn afgenomen. Dit heeft verschillende oorzaken. Ten eerste is tussen 2011 en 2016 een groot deel van het gebaggerde sediment dichtbij het baggergebied weer verspreid of “op stroom gezet”. Waarschijnlijk heeft dit geleid tot een retourstroom waardoor het sediment terugstroomde naar het baggergebied. In een eerdere studies wordt aangegeven dat het stopzetten van de praktijk van op stroom zetten een belangrijke factor is voor het reduceren van het baggerbezwaar (Grasmeijer & Rübke, 2018). De tweede factor die van invloed kan zijn op de toename van het baggerbezwaar is de toename van de te onderhouden breedte en diepte. Vanaf het jaar 2010 ging de breedte van 55 naar 60 m en de diepte van NAP-3.5 m naar NAP-3.8 m. In de praktijk wordt hier overigens een overdiepte gehanteerd en wordt er gebaggerd op een diepte van NAP-4.0 m. Tot slot kunnen de contractuele verplichtingen van invloed zijn op de baggerhoeveelheden. In 2010 en 2016 werden aanpassingen gedaan aan de contracten voor het onderhouden van de vaarweg. Het baggervolume gemiddeld over de jaren 2017-2019 bedraagt ongeveer  $1,1 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>/jaar.



Figuur 1.2 De ontwikkeling van het baggervolume in het baggergebied; stortvolumes zijn ook gegeven (persoonlijke communicatie Mulder, 2020).

In de Tweede Kamer werd in 2014 en 2015 gevraagd te komen tot kortetermijnoplossingen die haalbaar en realistisch zijn voor de regelmatig optredende vertraging op de veerverbinding Holwerd-Ameland (zie kamerstukken 2014–2015, 31409, nr. 84). Daarbij is de minister van Infrastructuur en Milieu verzocht om het verkorten (doorsteken) van de vaargeul Ameland te onderzoeken en de financiële gevolgen daarvan (structureel en incidenteel) in kaart te brengen.

Rijkswaterstaat zag een bochtafsnijding van de vaargeul als een mogelijke eerste stap om op redelijk korte termijn een vermindering van de vertragingen te bewerkstelligen. Met een bochtafsnijding wordt het vaartraject met 850 m verkort. Gezien de doelstellingen van de PKB-Waddenzee was het gewenst dat een bochtafsnijding niet zou leiden tot hoger baggerbezwaar maar juist tot een afname.

De effecten van een bochtafsnijding zijn in 2018 onderzocht (Grasmeijer & Rübke, 2018). Uit de berekeningen bleek dat door aanleg van de bochtafsnijding de snelheden en debieten in de ebgeul zouden afnemen en die in de bochtafsnijding toenemen. Geadviseerd werd om bij de bochtafsnijding zoveel mogelijk het natuurlijke verloop van de vloedschaar te volgen. Zonder verandering van de praktijk van op stroom zetten van slib werd het netto effect op het totale

baggerbezwaar ongeveer neutraal ingeschat. Het stopzetten van de praktijk van op stroom zetten, waarbij een retourstroom naar het baggergebied optreedt, zou wellicht een belangrijkere factor voor het reduceren van het baggerbezwaar zijn dan de bochtafsnijding. Onzeker was of slib stabiel kon worden geborgen in de oude ebgeul en daarmee effectief aan de retourstroming zou kunnen worden onttrokken.

Op 14 januari 2019 zijn de werkzaamheden voor de bochtafsnijding aangevangen. De bochtafsnijding vond plaats in de Vloedgeul, een locatie waar zich door natuurlijke processen al een geul had ontwikkeld. Medio 2011/2013 kon de veerboot er zelfs tijdelijk doorheen. Daarna bochtte de ebgeul steeds verder uit en verzandde de vloedgeul. In 2019 is besloten het eerder ingezette natuurlijke proces verder te ondersteunen door de vloedgeul te baggeren. Gebr. Van der Lee heeft de bochtafsnijding begin april 2019 opgeleverd en op 7 april 2019 is deze officieel in gebruik genomen. Om de effecten van de ingreep te kunnen bepalen zijn metingen uitgevoerd (Perk, et al., 2019a, 2019b).

De metingen laten zien dat door de bochtafsnijding een afname van de getijdenvolumes door de oorspronkelijke ebgeul heeft plaatsgevonden en een toename van de debieten in de bochtafsnijding. Na de bochtafsnijding stroomt er dus minder water door de oude ebgeul en stroomt er meer water door de bochtafsnijding (Perk, et al., 2020; Grasmeijer & Van Weerdenburg, 2020). Dit komt overeen met eerdere voorspellingen (Grasmeijer & Rübke, 2018).

De metingen laten ook zien dat de slibconcentraties vanaf km 6 richting Holwerd (km 0) sterk toenemen (zie voor locaties Figuur 1.1). Tijdens ebstroom komen de gemeten concentraties op 0,9 m boven de bodem regelmatig boven de 1000 mg/l (Perk, et al., 2020). De sterkste toename in concentratie vindt plaats rond of circa 2 uur na de maximale ebstroom. De precieze oorzaak van deze piek in concentraties is niet bekend maar het lijkt mogelijk veroorzaakt door stortingen van sediment ("op stroom zetten") uit het vaarwegonderhoud nabij Km 4-5 (Perk, et al., 2020). Onderstaande luchtfoto gemaakt op 15 april 2019 illustreert de troebelheid in dit deel van de vaarweg.



*Figuur 1.3 Luchtfoto van het meest zuidelijke deel van de vaarweg tussen Holwerd en Ameland. De foto is genomen op 15 april 2019.*

## 1.3 Aanpak

In deze studie zijn de nieuw beschikbaar gekomen veldgegevens gebruikt worden om een bestaand numeriek model voor de slibdynamiek in de Waddenzee te optimaliseren en te valideren. Er is gekozen voor een slibmodel omdat het grootste deel van het baggerwerk wordt uitgevoerd in het oostelijk deel van de vaargeul, tussen de ebgeul en de pier bij Holwerd, en dit bijna uitsluitend slibrijk materiaal betreft (Herman, et al., 2016). De veldgegevens zijn in het kader van de bochtafsnijding ingewonnen door WaterProof Marine Consultancy & Services BV (WaterProof)<sup>1</sup> en door Rijkswaterstaat-CIV:

- In twee periodes in 2019 is door WaterProof een uitgebreide meetcampagne uitgevoerd rondom de vaargeul tussen Holwerd en Ameland. Daarbij is een grote set aan hydro-morfologische parameters verzameld. De eerste meetcampagne (T0) vond plaats in de wintermaanden januari, februari en maart (Perk et al., 2019a). De tweede meetcampagne (T1) vond plaats in september en oktober 2019 (Perk et al., 2019b).
- Rijkswaterstaat-CIV heeft in september 2019 13-uurs debietmetingen uitgevoerd op vier raaien in de vaargeul.
- Voor, tijdens en na de uitvoering van de bochtafsnijding zijn in opdracht van Rijkswaterstaat-NN lodingen uitgevoerd om de bodemhoogte in en rond de geul te bepalen.
- Eerder in 2016 hebben ook metingen plaatsgevonden in de vaargeul naar stroomsnelheid en slibconcentratie door middel van een 13-uursmeting op 14 april 2016 (Van Kessel, 2016) alsmede bodemsamenstelling en slibeigenschappen (De Lucas, et al., 2016).

Met behulp van de veldgegevens is een bestaand model ingericht voor de specifieke toepassingen in deze studie. Het bestaande model is gebouwd in Delft3D-FM (Flexible Mesh) en wordt beschreven door Vroom et al. (2020). Het rekenrooster van dit model is voor deze studie lokaal verfijnd ten opzichte van het basismodel zodat het studiegebied met voldoende nauwkeurigheid is opgenomen in de modelschematisatie. De overige modelinstellingen zijn overgenomen van Vroom et al. (2020).

Vervolgens zijn er modelberekeningen uitgevoerd met verschillende baggerstrategieën. Analyse van de resultaten van verschillende modelberekeningen geeft inzicht in het effect van de baggerstrategieën en op de slibconcentraties en de aanslibbing in de vaargeul bij Holwerd.

## 1.4 Leeswijzer

In Hoofdstuk 2 wordt de opzet en de validatie van het Delft3D-FM WQ uitgebreid besproken. Daarbij is vooral aandacht besteed aan de veranderingen die zijn doorgevoerd ten opzichte van het model dat wordt beschreven door Vroom et al. (2020). De resultaten van de modelstudie zijn opgenomen in Hoofdstuk 3 en Hoofdstuk 4. In Hoofdstuk 3 worden de hydrodynamische effecten van de bochtafsnijding toegelicht. Achtereenvolgens komen de waterstanden, de stroomsnelheden en de debieten door de vaargeul aan bod. In Hoofdstuk 4 worden resultaten gepresenteerd van de slibdynamiek en de aanslibbing in de vaargeul in de situatie voor de bochtafsnijding en in de situatie na de bochtafsnijding. Ook hier wordt aandacht besteed aan het effect van de roosterresolutie op de modelresultaten.

In Hoofdstuk 5 volgt een discussie waarbij de modelresultaten worden besproken in relatie tot de aanpak in deze studie. Uit die discussie volgen ook de aanbevelingen voor vervolgonderzoek. De conclusies van deze studie zijn opgesomd in Hoofdstuk 6.

---

<sup>1</sup> WaterProof heeft de metingen uitgevoerd in opdracht van zowel Rijkswaterstaat als de provincie Friesland, omdat de metingen een dubbel doel dienden, zowel de vaarweg als Holwerd aan Zee



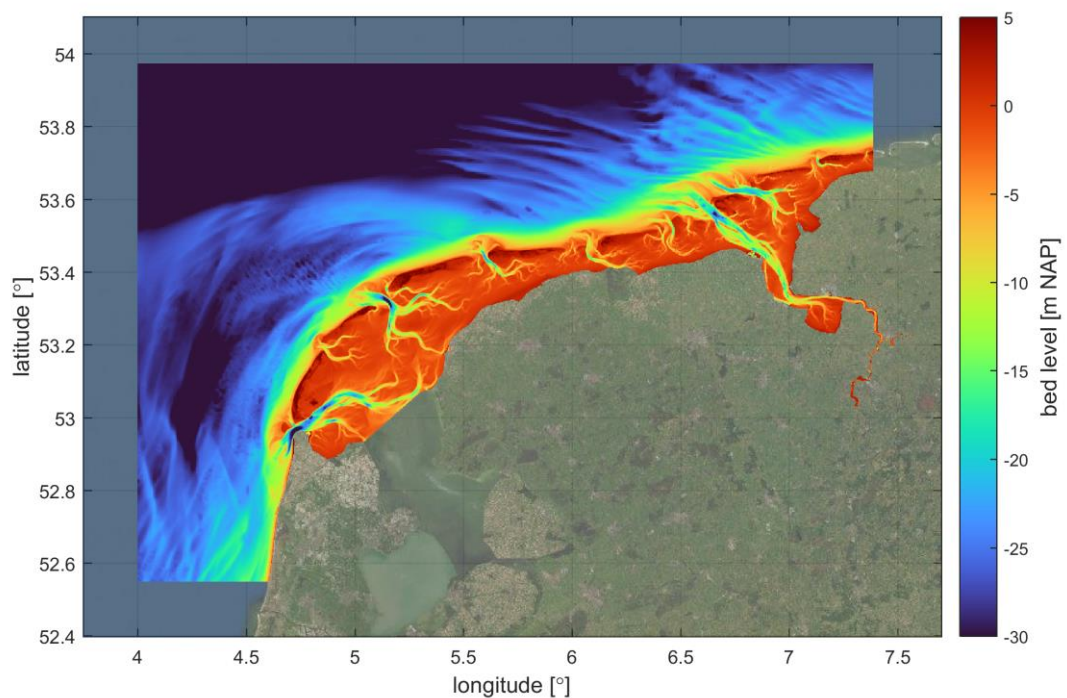
## 2 Modelopzet en validatie

### 2.1 Basismodel Waddenzee

#### 2.1.1 Modeldomein

Als uitgangspunt in de modelstudie wordt het Delft3D-FM model voor slibdynamiek in de Waddenzee gebruikt dat is opgezet door Vroom et al. (2020)<sup>2</sup>. De opzet van de waterbeweging van dit Dutch Wadden Sea Model (DWSM) wordt beschreven door Van Weerdenburg & Zijl (concept). De maximale roosterresolutie van het waterbewegingsmodel is circa 100 m x 100 m in de Waddenzee. Ten behoeve van de rekentijd is er voor het berekenen van slibdynamiek gekozen de maximale roosterresolutie te beperken tot 200 m x 200 m in de Waddenzee en het aantal verticale  $\sigma$ -lagen tot 10.

Het modeldomein van het DWSM bevat de Waddenzee, de zeegaten en buitendelta's en de Noordzeekust van de Waddeneilanden. De zuidelijke rand van het modeldomein ligt langs de Hollandse kust ter hoogte van IJmuiden en de oostelijke rand ligt ruim voorbij het Eems estuarium. Het modeldomein en de bathymetrie zijn weergegeven in Figuur 2.1. De resolutie van het rekenrooster is 0.5 nautische mijl (nm) x 0.5 nm (d.w.z. 926 m x 926 m) in de noordwestelijke hoek van het modeldomein en neemt in twee stappen toe tot ongeveer 200 m x 200 m langs de Noordzeekust, in de zeegaten, op de buitendelta's en in de Waddenzee.



Figuur 2.1 Kaart van het ruimtelijke domein van het Dutch Wadden Sea Model (DWSM) met daarop aangegeven de bodemhoogte t.o.v. NAP op basis van de vaklodingen data.

<sup>2</sup> Dit wordt ook wel het KRW-slibmodel genoemd. KRW = Kaderrichtlijn Water

### 2.1.2 Waterbewegingsmodel

De hydrodynamische randvoorwaarden op de open modelranden zijn afgeleid uit modelresultaten van het 0.5 nm Dutch Continental Shelf Model (DCSM, Zijl et al., 2018). Ook de diepte-afhankelijke randvoorwaarden voor temperatuur en saliniteit zijn uit dat model afgeleid. Afvoeren uit de Eems en bij de spuilsuizen van Den Oever, Kornwerderzand en Lauwersoog zijn in het model meegenomen op basis van meerjarige gemiddelden, omdat tijdens het opzetten van het model de gemeten tijdreeksen nog niet beschikbaar waren voor de te modelleren periode. Als meteorologische forcering (d.w.z. windcondities, atmosferische druk, temperatuur, instraling, regenval en verdamping) worden ERA5 data gebruikt. Dit is anders dan in het model dat is beschreven door Vroom et al. (2020), waarin HiRLAM data van het KNMI worden gebruikt als meteorologische forcering. Inmiddels is er een voorkeur ontstaan voor het gebruik van ERA5 data omdat de beschikbare parameters in die dataset beter aansluiten bij de manier waarop de watertemperatuur in het model wordt bepaald (d.w.z. het *Heat Flux* model).

Voor het modelleren van de slibdynamiek wordt een relatief eenvoudige methode toegepast om de bijdrage van golven aan de bodemschuifspanning te bepalen. Hierbij wordt de golfhoogte op een punt in het rekenrooster bepaald op basis van de windsnelheid, de strijklengte en de lokale waterdiepte, volgens de formuleringen van Hurdle & Stive (1989). De strijklengte is afhankelijk van de windrichting en wordt elke vier uur opnieuw berekend op basis van de actuele waterdiepte. Door de strijklengte regelmatig opnieuw te berekenen kan het zijn dat de strijklengte onderbroken wordt door drooggevallen delen. In recente versies van de Delft3D-FM modelsoftware is een koppeling met een nauwkeuriger golfmodel (d.w.z. SWAN) nog niet beschikbaar voor 3D berekeningen. Tijdens de opzet en kalibratie van DWSM-Slib is gebleken dat een strijklengteaanpak voldoende nauwkeurig is om golfgedreven resuspensie in de Waddenzee te simuleren (Vroom et al., 2020).

De totale bodemschuifspanning ( $\tau$ ) die wordt gebruikt om de resuspensie van slib te bepalen volgt uit een lineaire optelling van de bodemschuifspanning door stroming en de bodemschuifspanning door golven. Niet-lineaire interacties tussen golven en stromingen worden hierbij dus niet meegenomen. De wrijvingscoëfficiënt ter bepaling van de bodemschuifspanning door golven ( $f_w$ , zie Swart (1974)) gebruikt een Nikuradse ruwheidshoogte van  $1 \cdot 10^{-3}$  m als maat voor de bodemruwheid.

### 2.1.3 Slibmodel

Het hydrodynamische model is online gekoppeld met DELWAQ en de slibprocessen worden berekend met het zogenaamde buffermodel, waarbij onderscheid wordt gemaakt tussen een makkelijk erodeerbare sliblaag op de bodem (S1) die ook wel flufflaag wordt genoemd en een onderlaag (S2) die ook wel bufferlaag wordt genoemd en die meestal zandig is (Van Kessel, et al., 2011). De eerste laag is representatief voor de dunne laag op de bodem die ontstaat tijdens getijkentering en die gemakkelijk in suspensie wordt gebracht door getijstromingen. De totale sedimentmassa in deze laag is doorgaans klein en de verblijftijd van sediment in deze laag is kort vanwege de grote uitwisseling tussen deze laag en het water. De bufferlaag is representatief voor de zanderige zeebodem waarin slib kan worden meegevoerd en tijdelijk kan worden opgeslagen. Opwerveling uit deze bufferlaag gebeurt tijdens dynamische omstandigheden.

De instellingen van de erosie- en sedimentatieparameters in dit slibmodel zijn overgenomen uit de modelkalibratie die is uitgevoerd door Vroom et al. (2020). De instellingen zijn weergegeven in Tabel 2.1. Voor die kalibratie is gebruik gemaakt van (i) periodiek gemeten concentraties Zwevende Stof (SPM) bij observatiepunten in het MWTL meetnet in de Waddenzee en in de Noordzee, (ii) tijdseries van de gemeten concentraties SPM bij Eemshaven en tijdseries van de troebelheid bij Boontjes en (iii) ruimtelijke patronen van slib in de bodem uit de Sedimentatlas.

Op de randen van het model worden tijdseries voor de slibconcentratie opgelegd. De opgelegde slibconcentraties variëren met de diepte langs de modelrand volgens de relatie die is beschreven door Herman et al. (2018). De opgelegde slibconcentraties hebben een sinusvormig verloop in het jaar, waarbij de concentraties in de wintermaanden hoger zijn dan de jaargemiddelde concentratie en de concentraties in de zomermaanden lager zijn dan de jaargemiddelde concentratie. Ook deze relatie is overgenomen uit Herman et al. (2018).

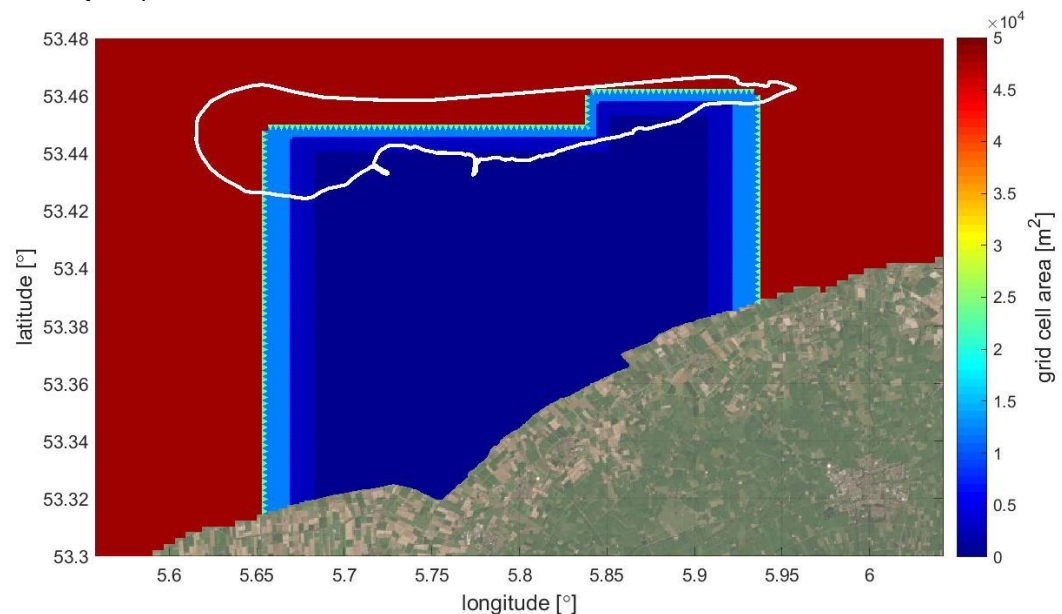
Tabel 2.1 Instellingen van de erosie- en sedimentatieparameters van het slibmodel.

Slibeigenschap	Fractie 1 (IM1)	Fractie 2 (IM2)
Valsnelheid [mm s <sup>-1</sup> ]	1,5	0,4
Depositie-efficiëntie [-]	0,25	
Percentage van sedimentatie-flux naar bodemlaag S2 [-]	0,05	
Kritische schuifspanning voor erosie uit bodemlaag S1 [Pa]	0,10	
0 <sup>e</sup> orde erosiesnelheid van bodemlaag S1 [kg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ]	6,9*10 <sup>-5</sup>	
1 <sup>e</sup> orde erosiesnelheid van bodemlaag S1 [s <sup>-1</sup> ]	5,8*10 <sup>-6</sup>	
Kritische schuifspanning voor erosie uit bodemlaag S2 [Pa]	0,80	
Erosiesnelheid van bodemlaag S2 [kg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ]	1,5 * 10 <sup>-4</sup>	
Dikte van bodemlaag S2 [m]	0,10	

## 2.2 Aanpassingen modelschematisatie

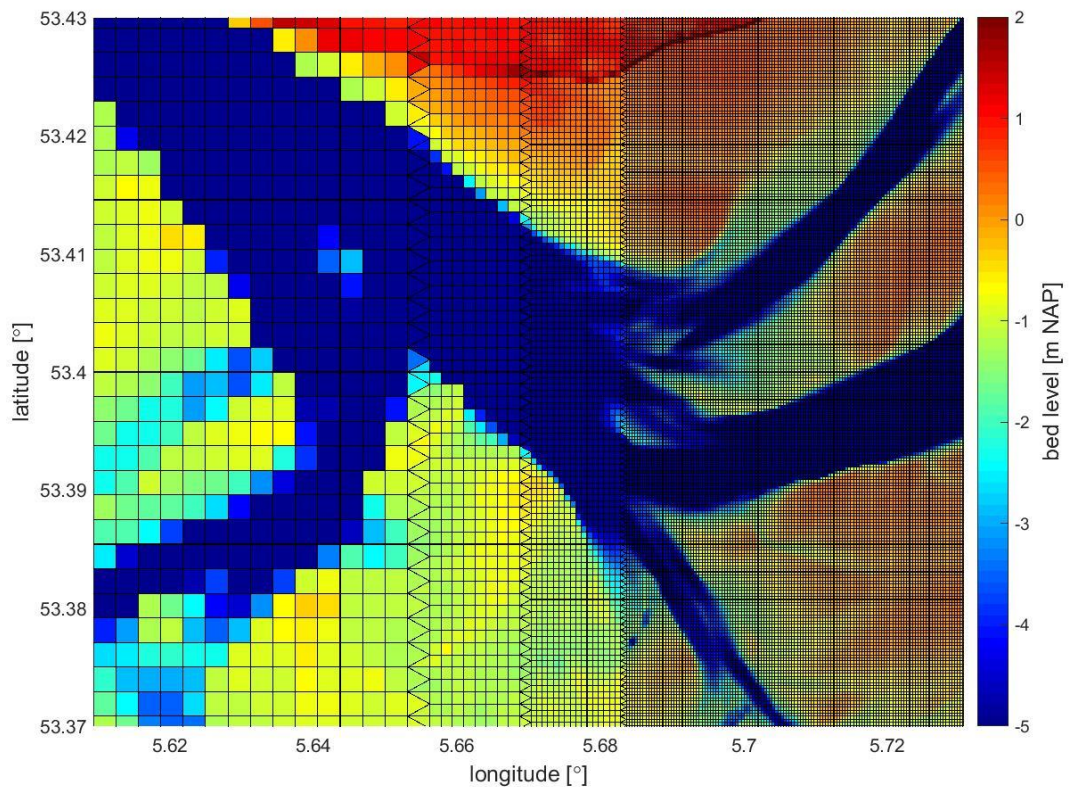
### 2.2.1 Roosterverfijning en bodemhoogtegegevens

De roosterresolutie van 200 m x 200 m van DWSM-Slib in de Waddenzee is onvoldoende om de vaargeul tussen Holwerd en Ameland nauwkeurig op te nemen in de modelbathymetrie. Het rekenrooster is daarom lokaal verfijnd tot ongeveer 25 m x 25 m in het bekken achter Ameland. Dit is weergegeven aan de hand van de roosterresolutie in Figuur 2.2. In 3 stappen wordt de roosterresolutie elke keer met een factor 2 verfijnd. Die stappen zijn ook weergegeven in Figuur 2.3. Een roosterresolutie van 25 m x 25 m was in dit project de maximaal haalbare resolutie om reketijden praktisch haalbaar te houden.



Figuur 2.2 Horizontale resolutie van het rekenrooster (weergegeven als de oppervlakte van roostercellen) nadat het rooster in het bekken achter Ameland in drie stappen verfijnd is van ~200 m x ~200 m naar ~25 m x ~25 m.





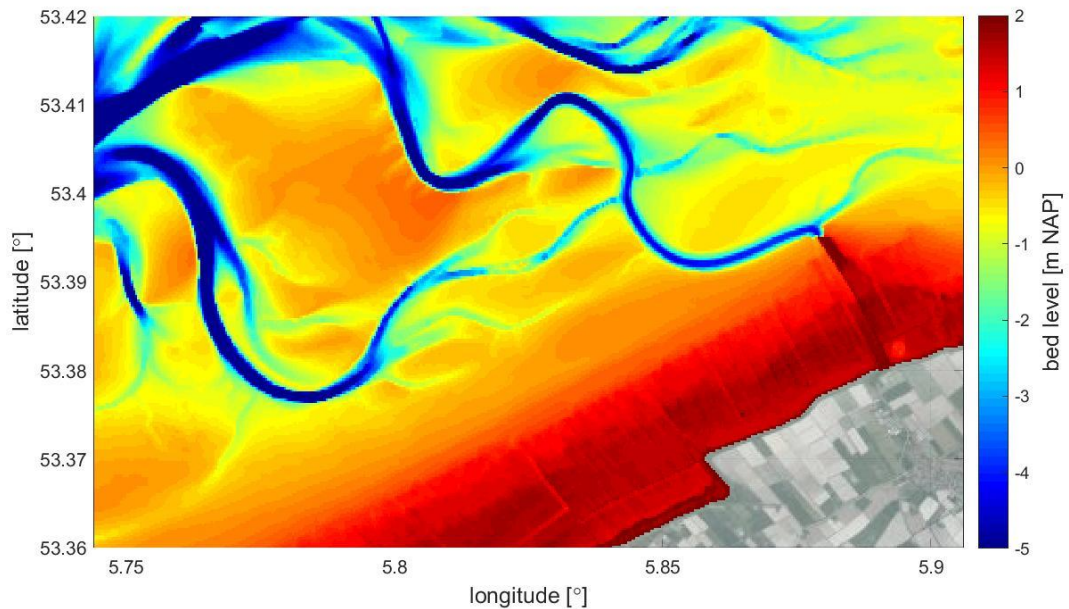
*Figuur 2.3 Weergave van de roosterverfijning in het bekken achter Ameland. Links (zeegat Borndiep) is de resolutie ~200 m x 200 m en in drie stappen neemt die resolutie toe tot ~25 m x 25 m. De kleurschaal toont de bodemhoogte.*

Voor de bodemhoogte in het interessegebied zijn verschillende data beschikbaar. De vaklodings data bevat de bodemhoogte in het hele interessegebied met een resolutie van 20 m x 20 m. Met LiDAR ingewonnen data bevat de bodemhoogte in intergetijdengebieden op een hoge resolutie (1 m x 1 m). Daarnaast zijn er in het kader van de bochtafsnijding projectmetingen uitgevoerd van de bodemhoogte in de vaargeul (beheerlodingen). De resolutie van die data is 1 m x 1 m. Die projectmetingen zijn vóór, tijdens en na de aanleg van bochtafsnijding uitgevoerd. In deze studie wordt gebruik gemaakt van projectmetingen uit september 2018 voor de situatie vóór de bochtafsnijding en van projectmetingen uit augustus 2019 voor de situatie na de bochtafsnijding. Ter illustratie toont bijlage A.2 de gemeten ontwikkeling van de bochtafsnijding en de ebgeul vanaf de aanvang van de werkzaamheden tot een jaar daarna. Hieraan is te zien dat de bochtafsnijding steeds ruimer wordt en de ebgeul steeds nauwer.

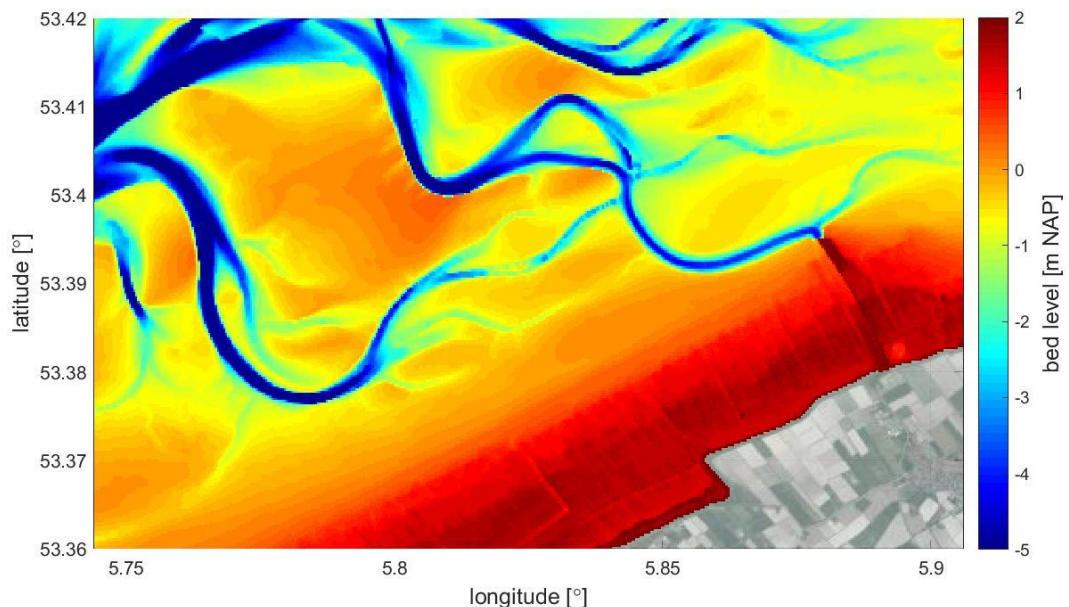
Voor de bodemhoogte in de uiteindelijke modelberekeningen worden de bodemgegevens als volgt toegepast:

1. Projectmetingen van de bochtafsnijding worden gebruikt voor het deel van het modeldomein waar die beschikbaar zijn (d.w.z. de vaargeul). Voor de situatie vóór de bochtafsnijding (T0) wordt de survey van september 2018 gebruikt. Voor de situatie na de bochtafsnijding (T1) wordt de survey van Augustus 2019 gebruikt.
2. Voor intergetijdengebieden in het modeldomein worden gegevens uit de LiDAR survey gebruikt.
3. Voor delen van het modeldomein waar geen projectmetingen en geen LiDAR gegevens beschikbaar zijn worden vaklodings gebruikt.

De uiteindelijke bodemhoogte voor de situatie zonder en met bochtafsnijding is weergegeven in respectievelijk Figuur 2.4 (onder) en Figuur 2.5.



Figuur 2.4 Modelbodem voor aanvang van de bochtafsnijding op basis van vaklodingen, LiDAR data en projectmetingen (van september 2018) in de vaargeul



Figuur 2.5 Modelbodem na de bochtafsnijding op basis van vaklodingen, LiDAR data en projectmetingen (van augustus 2019) in de vaargeul.

### 2.2.2 Validatie met nieuwe metingen

Grasmeijer en Van Weerdenburg (2020) hebben invloed van de roosterresolutie en de interpolatie van de bodemdata op de reproductie van de hypsometrie<sup>3</sup> en de hydrodynamica onderzocht. Hieruit bleek dat de hypsometrie bij gebruik van een resolutie van 25 x 25 m voldoende nauwkeurig werd weergegeven. Uit validatie van de hydrodynamica bleken de laagwaterstanden in het model met 100 m resolutie niet laag genoeg zijn. Een combinatie van betere bodemdata en een hogere modelresolutie (25 m resolutie) verbeterde de reproductie van de laagwaterstanden aanzienlijk,

<sup>3</sup> Op een hypsometrische curve wordt voor een bodemoppervlak (x coördinaat van de curve) het bodemoppervlak getoond dat onder een bepaalde hoogte (y coördinaat van de curve) ligt.

hoewel de laagwaterstanden nog iets te hoog waren ten opzichte van de metingen. Halverwege de vaarweg bedroeg de gemiddelde fout in het reproduceren van de waterstand 8 cm en dichtbij Holwerd 12 cm (Grasmeijer & Van Weerdenburg, 2020).

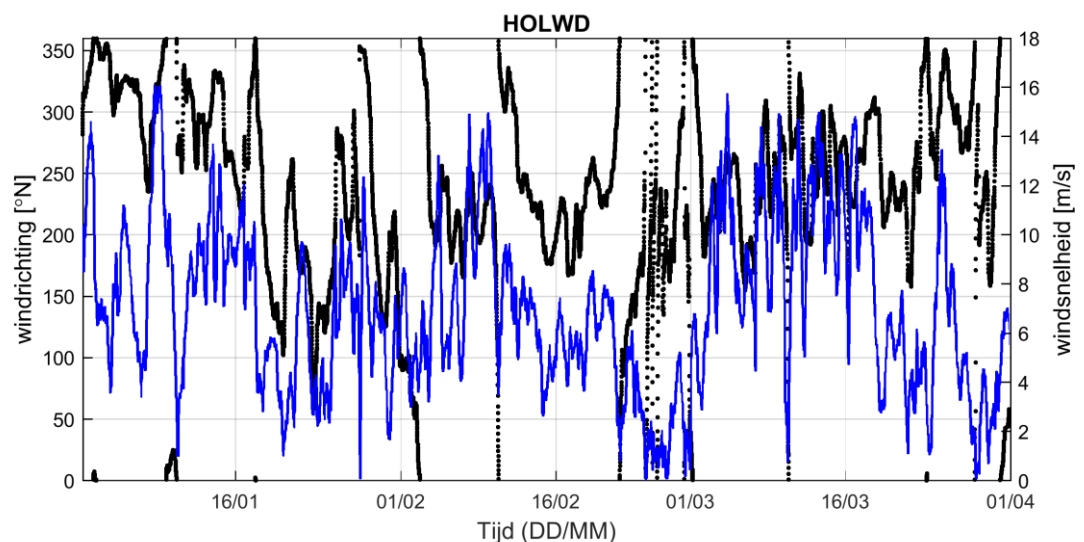
Uit een vergelijking met gemeten dieptegemiddelde stroomsnelheden bleek dat de amplitude van de ebstroming goed werd gereproduceerd tijdens doortij maar iets werd onderschat tijdens springtij. Deze onderschatting is gerelateerd aan de iets te hoge laagwaterstanden in het model. Een gelijk volume stroomt dan door een te grote waterdiepte, waardoor de stroomsnelheden kleiner zijn dan in metingen. De vloedstroming werd door het model gewoonlijk iets overschat. Het was niet precies duidelijk wat daarvan de oorzaak was. In de gemeten stroomsnelheden was een duidelijk verschil zichtbaar tussen de amplitude van de ebstroming (d.w.z. groter) en de amplitude van de vloedstroming (d.w.z. kleiner). In de modelresultaten was dat niet duidelijk het geval.

Wat betreft de laagwaterstanden bleek dat een verlaging van de bodemruwheid in het bekken gunstig was voor het reproduceren van de meetdata. Door de afname van de bodemruwheid nam de amplitude van de berekende stroomsnelheden echter toe, waardoor de gemeten stroomsnelheden minder goed gereproduceerd werden. Daarom is er voor gekozen om de bodemruwheid in het bekken op de originele waarde van  $0.0227 \text{ s/m}^{1/3}$  te houden, ondanks dat de laagwaterstanden dan minder goed gereproduceerd worden. Een nauwkeurigere reproductie van de stroomsnelheden heeft namelijk de voorkeur.

Berekende debieten kwamen goed overeen met metingen in 6 verschillende raaien. Zowel de fasering van de eb- en vloedstroming als de maximale debieten werden goed gereproduceerd.

## 2.3 Simulatieperiode en initiële condities

De simulatieperiode loopt van 1 januari 2019 tot 1 april 2019. De slibdynamiek is afhankelijk van de actuele condities (bijv. getij en meteorologische condities). Ter illustratie toont Figuur 2.6 de windcondities bij Holwerd tijdens de simulatieperiode. Hierin is een sterke variatie in windsnelheid te zien met vooral aan het einde van de simulatieperiode windsnelheden van 10-14 m/s gedurende lange tijd. Dit komt overeen met windkracht 6. Deze krachtige wind zorgt aan het eind van de simulatieperiode voor golven die meer slib opwoelen dan in de periode ervoor.



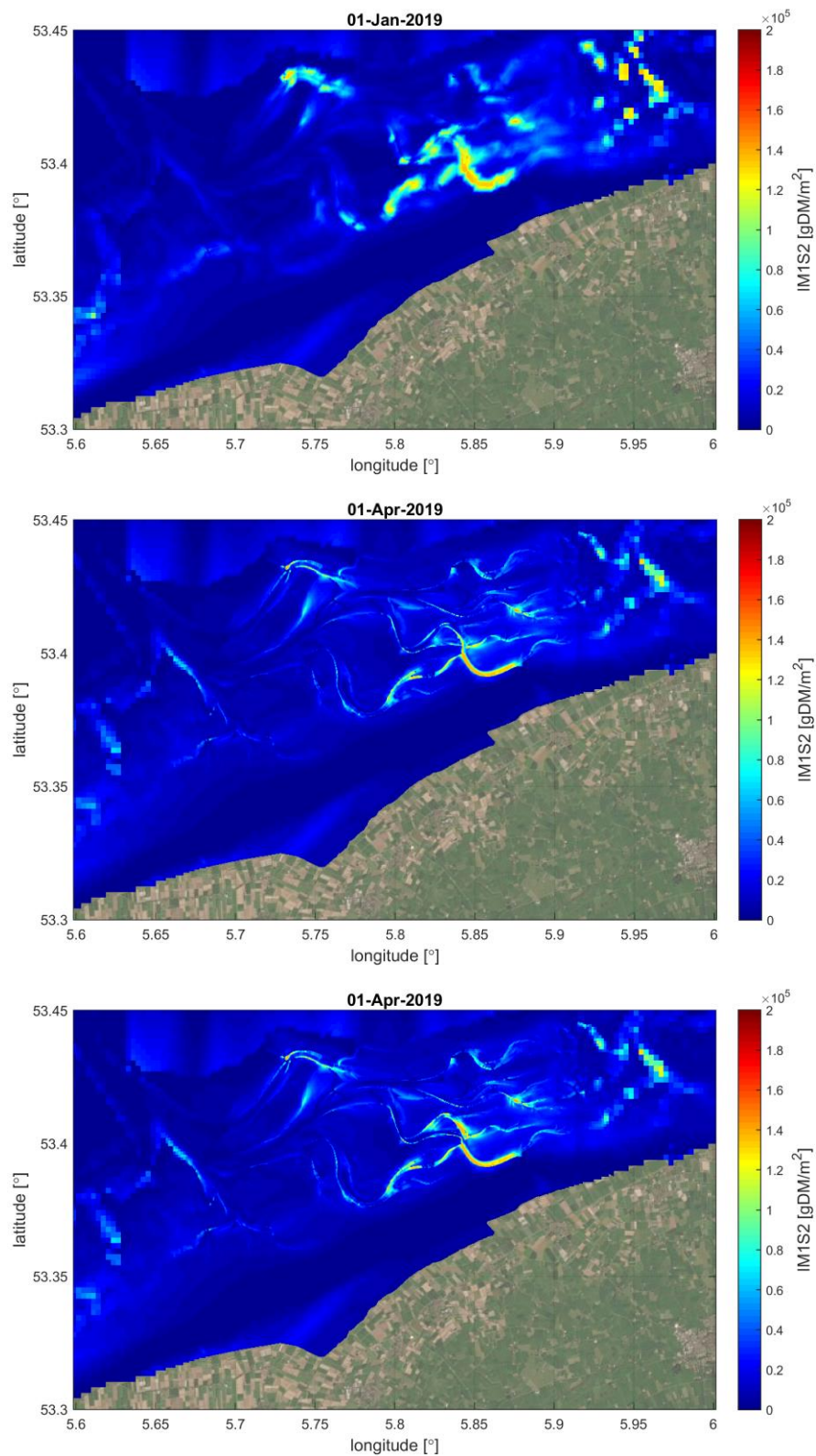
Figuur 2.6 Windcondities bij Holwerd tijdens de simulatieperiode. In zwart (linker as) is de windrichting aangegeven, in blauw (rechter as) is de windsnelheid aangegeven.



Net als bij de modelvalidatie worden de effecten van de initiële condities geëlimineerd door een inspeelperiode van 10 dagen te gebruiken voor de waterbeweging. Als initiële condities voor saliniteit (bij de bodem en bij het wateroppervlak) en temperatuur worden ruimtelijk variërende velden opgelegd die het resultaat zijn van een inspeelsom van 1 jaar. Voor de initiële conditie voor slib in de bodem wordt gebruik gemaakt van de modelresultaten die zijn verkregen in het kader van KRW Slib (Vroom et al., 2020). In dat project is de verdeling van slib in de bodem ingespeeld door middel van een modelsimulatie van 3 jaar. De resolutie van die bodemdata is lager (d.w.z. 200 m x 200 m) dan de resolutie van het rekenrooster in de huidige studie (d.w.z. 25 m x 25 m). Om de verdeling van slib aan te passen aan de hogere resolutie wordt een inspeelperiode van 3 maanden gebruikt. De slibverdeling aan het eind van die drie maanden wordt vervolgens gebruikt als initiële conditie voor de modelsimulaties die in Hoofdstuk 3 worden besproken.

De ruimtelijke verdeling die is overgenomen uit het model van Vroom et al., (2020) hoort bij een bodemligging zoals vóór de bochtafsnijding in de vaargeul, maar wordt gebruikt voor modelsimulaties met een bodemligging zoals vóór en zoals na de bochtafsnijding. De inspeelperiode van 3 maanden wordt voor beide scenario's afzonderlijk toegepast. Figuur 2.7 toont de ruimtelijke verdeling van bodemslib (fractie IM1 in laag S2) aan het begin en aan het einde van de inspeelperiode van drie maanden. De ruimtelijke verdeling van fractie IM2 in laag S2 (niet weergegeven) is vergelijkbaar, alleen is de aanwezige massa een factor 3 tot 5 lager. In deze modelsimulaties wordt geen onderhoudsbaggeren toegepast. Er ligt daardoor veel slib in de vaargeul, met name in het deel bij Holwerd.

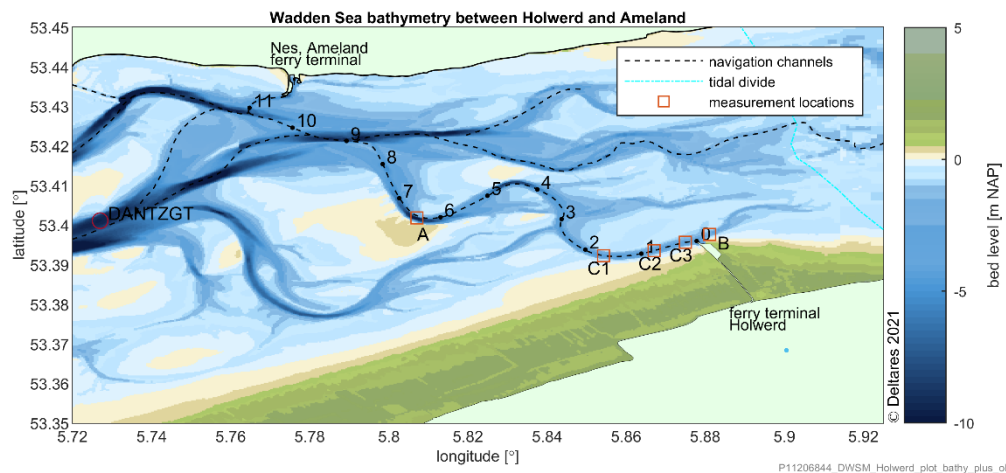
De inspeelperiode voor slib in de bodem zorgt ervoor dat de resolutie van de verdeling van slib toeneemt. Daardoor zijn sterkere gradiënten zichtbaar in de ruimtelijke verdeling. Daarnaast kan de slibverdeling zich tijdens de inspeelperiode aanpassen aan de veranderde hydrodynamische condities ten gevolge van de roosterverfijning. Een voorbeeld van de veranderde hydrodynamische condities zijn de laagwaterstanden die beter gereproduceerd worden met een hogere modelresolutie, waardoor het dynamische evenwicht van de verdeling van bodemslib zal veranderen.



Figuur 2.7 Ruimtelijke verdeling van fractie IM1 in laag S2 aan het begin van de inspeelperiode (boven) en aan het einde van de inspeelperiode op hoge resolutie voor de T0 bodem (midden) en de T1 bodem (onder).

## 2.4 Validatie instellingen slibmodel met metingen

De instellingen van de erosie- en sedimentatieparameters in het slibmodel zijn overgenomen uit de modelkalibratie die is uitgevoerd door Vroom et al. (2020). De instellingen zijn weergegeven in Tabel 2.1. In 2016 en 2019 zijn er veldmetingen uitgevoerd waarbij bodemonsters en watermonsters zijn genomen om de verschillende eigenschappen van het sediment te bepalen (Perk, et al., 2020; Van Kessel, 2016; De Lucas, et al., 2016). Dit gaat om het percentage slib, de korrelverdeling van het zand, de valsnelheid van het slib, het consolidatiegedrag en de bezinksnelheid van het slib en de kritische schuifspanning en erosiesnelheid van het sediment. Naast bodem en watermonsters zijn er in 2016 ook monsters uit het beun van het baggerschip genomen (De Lucas, et al., 2016).

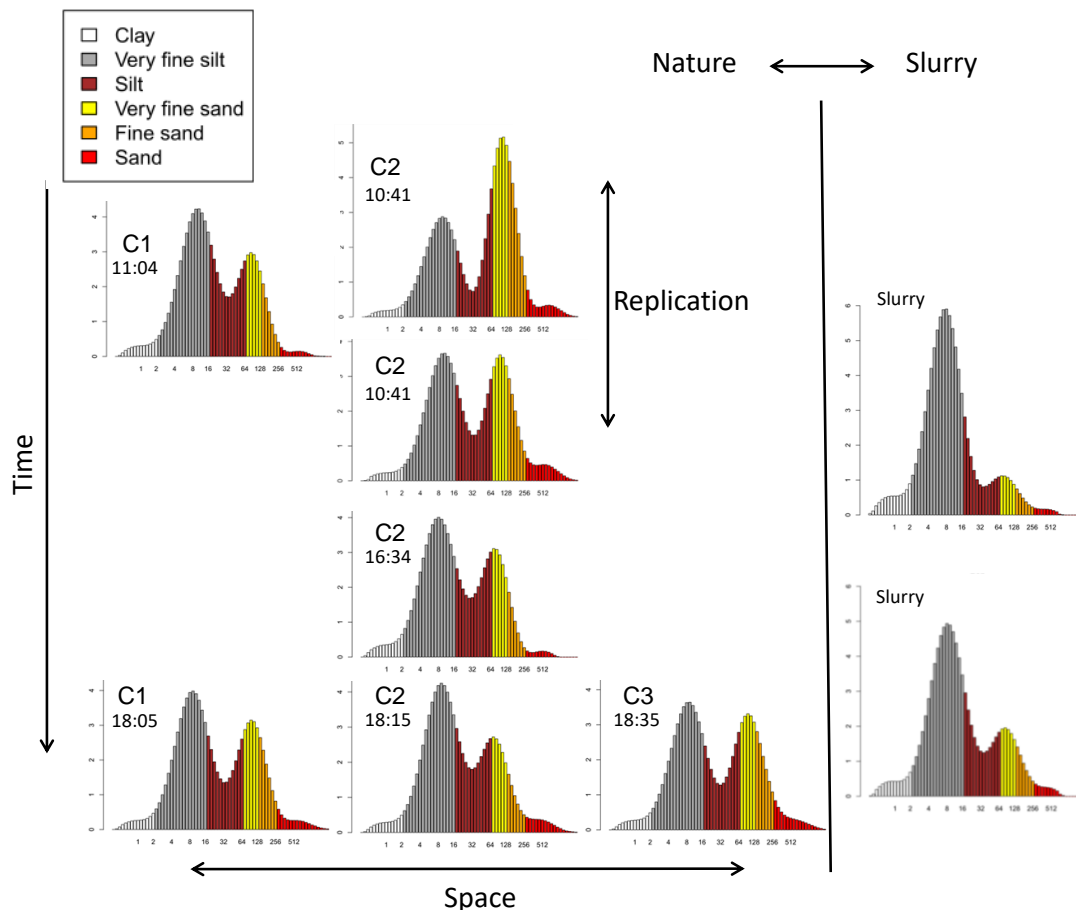


Figuur 2.8 Kaart met daarop aangegeven de vaarroute tussen Holwerd (Friesland) en Nes (Ameland) zonder de bochtafsnijding die in 2019 werd gerealiseerd. De afstand langs de vaarweg is aangegeven in kilometers. Het wantij wordt aangegeven met de cyaanleurige stippellijn. Meetlocaties in de vaargeul zijn aangegeven met vierkantjes.

### 2.4.1 Korrelgrootteverdeling, percentage slib en droge dichtheid

Figuur 2.9 toont een overzicht van korrelgrootteverdelingen bepaald uit monsters C1, C2 en C3 en bepaald uit monsters genomen uit de beun van het baggerschip (De Lucas, et al., 2016). De monsters zijn genomen in 2016. Er is geen duidelijk patroon in ruimte of tijd voor de monsters die uit de bodem van de vaargeul zijn genomen. Alle monsters worden gedomineerd door de zeer fijne slibfractie met een zandfractie variërend van 25-40%.

In vergelijking met de monsters van de bodem vertonen de monsters uit het baggerschip een grotere dominantie van de slibfractie. Er zit slechts 10-15% zand in de slurry. Dit kan een weerspiegeling zijn van de selectieve opname van sedimentfracties tijdens het baggerproces maar het kan ook zijn veroorzaakt door niet-aselecte bemonstering in het baggerschip. Hoewel het sediment tijdens het transport werd gemengd en er geen duidelijke zandlaag in de slurry kon worden onderscheiden, is enige differentiële bezinking van zand (segregatie) waarschijnlijk. De hier geanalyseerde monsters zijn per emmer uit de oppervlaktelaag van de baggerspecie genomen.



Figuur 2.9 Overzicht van de korrelgrootteverdelingen van de monsters uit de Malvern-analyses, waarbij de variabiliteit in ruimte en tijd van de genomen monsters in de natuur wordt weergegeven en deze wordt vergeleken met de monsters die binnen het baggerschip zijn genomen; deeltjesgrootte in micrometer. Voor locatie van de monsternamen zie Figuur 2.8

Tabel 2.2 toont de sedimenteigenschappen van de monsters genomen langs de vaarweg op locaties C1, C2 en C3 en in het beun van het baggerschip in 2016 (De Lucas, et al., 2016). De dichtheid met poriën van de bodemonsters ligt tussen de 1467 en 1606 kg/m<sup>3</sup>, wat suggereert dat de bodem zich in een geconsolideerde toestand bevindt. Door de bemonsteringstechniek (Van Veen grijper) kan het best zijn dat er bovenop de stevige modderige zeebodem een veel zwakkere modderlaag aanwezig is. Het gehalte aan organische stof varieert tussen 4,6 en 7,0%. De droge dichtheid van de bodemonsters varieert tussen de 733 en 958 kg/m<sup>3</sup>.

De dichtheid met poriën van de monsters genomen uit het beun van het baggerschip ligt rond de 1300 kg/m<sup>3</sup> en is daarmee veel lager dan die van de bodemonsters. Ook de droge dichtheid zonder poriën van de monsters uit het beun is met ongeveer 400 kg/m<sup>3</sup> veel lager dan die van de bodemonsters.

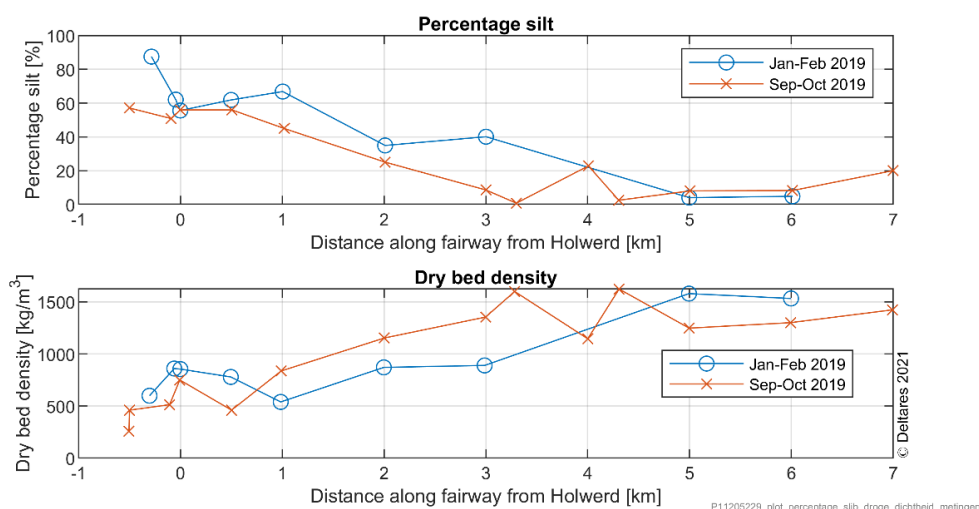
Tabel 2.2 Sedimenteigenschappen bepaald uit de monsters genomen in 2016 (De Lucas, et al., 2016)

sample	Dichtheid met poriën (kg/m <sup>3</sup> )	Percentage organisch materiaal (%)	Droge dichtheid zonder poriën(kg/m <sup>3</sup> )
C1 (KG-07)	1606	4.9	958
C1 (KG-13)	1492	6.2	773
C2 (KG-05)	1575	4.9	908
C2 (KG-06)	1552	5.4	870
C2 (KG-09)	1467	6.5	733
C2 (KG-14)	1491	7.0	771
C3 (KG-15)	1604	4.6	954
Beun1	1275	n.a.	414
Beun2	1255	n.a.	383
Beun3	1302	n.a.	458

In 2019 zijn er eveneens monsters genomen op verschillende posities langs de vaarweg (Perk, et al., 2020). Figuur 2.10 laat zien dat het percentage slib in de bodem met 60-90% betrekkelijk hoog is in de omgeving van de pier bij Holwerd. Dit neemt af tot ongeveer 30-40% op 2 km van de pier en verder af tot ongeveer 5% op 5 km afstand van de pier. Dit komt overeen met de eerdere waarnemingen in 2016 (Herman, et al., 2016; De Lucas, et al., 2016).

Uit de waarnemingen in 2019 blijkt dat de droge dichtheid van het bodemmateriaal in de omgeving van de pier ongeveer 500 kg/m<sup>3</sup> bedraagt en dat dit toeneemt tot 1300-1500 kg/m<sup>3</sup> op 5 km van de pier bij Holwerd. Dichtbij de pier is de droge dichtheid in 2019 lager dan die uit de waarnemingen in 2016. Verderop langs vaarweg komen de waarnemingen met elkaar overeen.

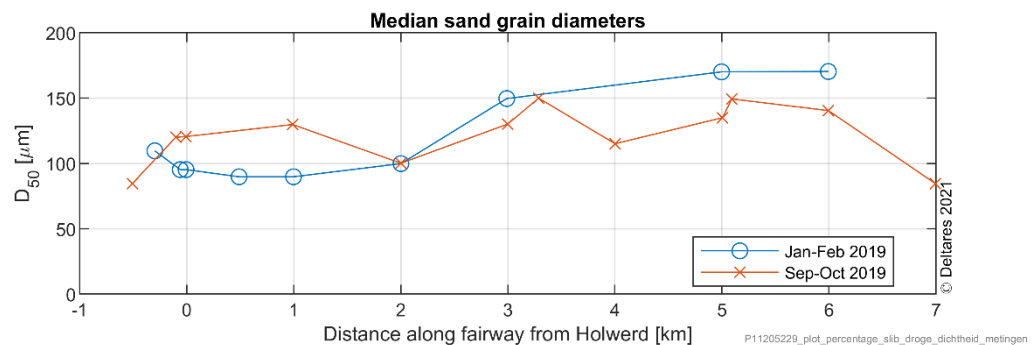
In deze studie wordt gebruik gemaakt van een slibmodel zonder zand. Voor de eerste drie kilometer vanaf Holwerd is dit een redelijk goede weergave van de werkelijkheid. Verderop in de vaarweg speelt zand ook een belangrijke rol.



Figuur 2.10 Gemeten percentage slib en droge dichtheid van het sediment op de bodem langs de vaarweg vanaf Holwerd (Perk, et al., 2020). Voor de locaties langs de vaarweg zie Figuur 2.8



Figuur 2.11 laat zien dat de zandfractie langs de vaargeul bestaat uit fijn zand met een mediane korrel diameter  $D_{50}$  van ongeveer 100  $\mu\text{m}$  rond de pier tot ongeveer 150  $\mu\text{m}$  op 5 km van de pier bij Holwerd. Dit komt overeen met eerdere waarnemingen (Herman, et al., 2016).



Figuur 2.11 Gemeten korrel diameters langs de vaarweg vanaf Holwerd (Perk, et al., 2020). Voor de locaties langs de vaarweg zie Figuur 2.8

## 2.4.2 Valsnelheid bodemslib

Voordat we iets van metingen tonen moeten we hier aangeven dat er voor cohesief sediment geen uniek gedefinieerde valsnelheid bestaat om de volgende redenen (Winterwerp & Van Kesteren, 2004):

1. In het algemeen wordt gesuspendeerd sediment gekenmerkt door een verdeling in deeltjesgrootte, dus valsnelheid. Vooral wanneer het sediment slecht gesorteerd is, is de afzettingssnelheid niet alleen het product van de mediane bezinkingsnelheid en de concentratie van gesuspendeerd sediment. In dat geval dient de suspensie in verschillende fracties te worden behandeld.
2. De deeltjesgrootteverdeling en de mediane grootte kunnen sterk variëren (soms in ordes van grootte!) in tijd en ruimte als resultaat van uitvloeking en sorteerprocessen.
3. De valsnelheid wordt bepaald onder de voorwaarde van evenwicht tussen de zwaartekracht- en sleepkrachten op het bezinkende deeltje. In het mariene milieu zijn de deeltjes echter mogelijk niet in staat om de turbulente waterbewegingen in de wervelingen te volgen, waardoor de evenwichtsannahme wordt geschonden.
4. Toch is het vaak mogelijk om een karakteristieke bezinkingsnelheid te definiëren om het transport en de bestemming van een cohesieve sedimentsuspensie bevredigend te beschrijven. Deze karakteristieke valsnelheid is echter afhankelijk van het probleem.
5. Verschillende praktische (engineering) problemen vragen om verschillende benaderingen, studies en / of modelleertechnieken, die vaak tot verschillende valsnelheden leiden. Bij waterkwaliteitsproblemen is men bijvoorbeeld vooral geïnteresseerd in de fijnere fractie van het sediment waaraan verontreinigingen hechten, terwijl bij aanslibbingsstudies de grovere bulkfractie van groter belang is.
6. De relatie tussen valsnelheid en zwevend sedimentconcentratie. De meeste datasets laten een toename van de valsnelheid zien met toenemende sedimentconcentratie. Dit wordt vaak veroorzaakt door een toename van de samenvoegingsnelheid. De concentraties echter toe bij toenemende stroomsnelheid vanwege bodemerrosie. Een dergelijke grotere stroomsnelheid kan ook grotere sedimentdeeltjes mobiliseren en suspenderen, waardoor de samenstelling van het sediment in suspensie verandert. Dit impliceert uiteraard ook een toename van de gemiddelde valsnelheid maar niet als gevolg van flocculatieprocessen.
7. De valsnelheid in dichtheidsstromen kan een orde van groter zijn dan die van de afzonderlijke deeltjes.

Er is dus geen algemeen toepasbaar recept om de valsnelheden te bepalen. De hieronder gepresenteerde resultaten van eerder uitgevoerde valsnelheidsmetingen geven daarom slechts een indicatie van de orden van grootte van te verwachten valsnelheden. We tonen hier alleen de valsnelheidsmetingen van monsters die niet werden behandeld met een anti-flocculatiemiddel. Tabel 2.1 geeft een overzicht van de range aan gemeten valsnelheden.

Tabel 2.3 Ranges van gemeten valsnelheden

Locatie	Datum	Mediane valsnelheden zonder anti-flocculatie [mm/s]	Referentie
C2 (bodem)	April 2016	1,9-8	(De Lucas, et al., 2016)
C3 (bodem)	April 2016	2,5-5	(De Lucas, et al., 2016)
B (suspensie)	Februari 2019	0,09-1,98	(Perk, et al., 2020)
B (suspensie)	September 2019	0,09-0,27	(Perk, et al., 2020)

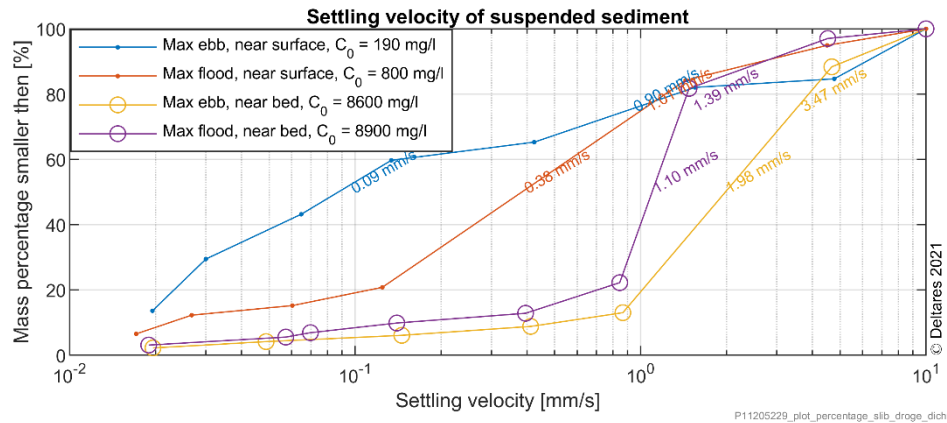
In april 2016 zijn er valsnelheidsmetingen uitgevoerd met bodemonsters genomen op locaties C2 en C3 (De Lucas, et al., 2016). Hierbij werd geen anti-flocculatiemiddel toegepast. De mediane valsnelheid van het bodemsediment van locatie C2 varieerde tussen de 1,9 en 8 mm/s, die van locatie C2 tussen de 2,5 en 5 mm/s. De grootte van deze valsnelheden resulteert in een betrekkelijk grote aanslibbingsnelheid. Bijvoorbeeld, een concentratie van 250 mg/l bij een valsnelheid van 2 mm/s resulteert in een aanslibbing van 43 kg/m<sup>2</sup>/dag ofwel 5 cm/dag (De Lucas, et al., 2016).

Figuur 2.12 toont de gemeten valsnelheden in zout water van het suspensiemateriaal op een locatie dichtbij Frame B in februari 2019. Tabel 2.4 toont de statistiek daaruit. De gebruikte vier watersedimentmonsters zijn genomen met een slangenpompje op diverse hoogten boven de bodem en tijdstippen in het getij (Perk, et al., 2020). Met deze suspensie monsters zijn bezinkproeven gedaan in het laboratorium in zout water van Holwerd zonder anti-flocculatiemiddel. De monsters zijn in een emmer gemengd met een roerstok om een uniforme slibconcentratie te maken en daarna overgegoten in een bezinkkolom en opnieuw verticaal gemengd met een roerstok waarna de bezinkproef is uitgevoerd. De getoonde valsnelheid is dus niet de in-situ valsnelheid van suspensief slib.

Figuur 2.12 laat zien dat de mediane valsnelheden van de slibmonsters genomen in februari 2019 0,09-0,38 mm/s bedragen bij concentraties van 190-800 mg/l. Dit is betrekkelijk laag. De valsnelheden bedragen 1,10-1,98 mm/s bij veel hogere concentraties van 8600-8900 mg/l. Deze betrekkelijk hoge valsnelheden zouden veroorzaakt kunnen zijn door flocculatie maar ook door de samenstelling van het sediment (zie bovenstaande punt 6).

Figuur 2.13 toont de valsnelheden in zout water van suspensie monsters genomen in september 2019 en Tabel 2.5 de bijbehorende statistieken. Ook hier zijn de mediane valsnelheden betrekkelijk laag met waarden van 0,27-0,31 mm/s bij een concentratie van 225-250 mg/l. Het is opvallend dat de valsnelheden bij hogere concentraties in dit geval juist lager zijn, namelijk 0,10-0,15 mm/s bij concentraties van 580-1110 mg/l.

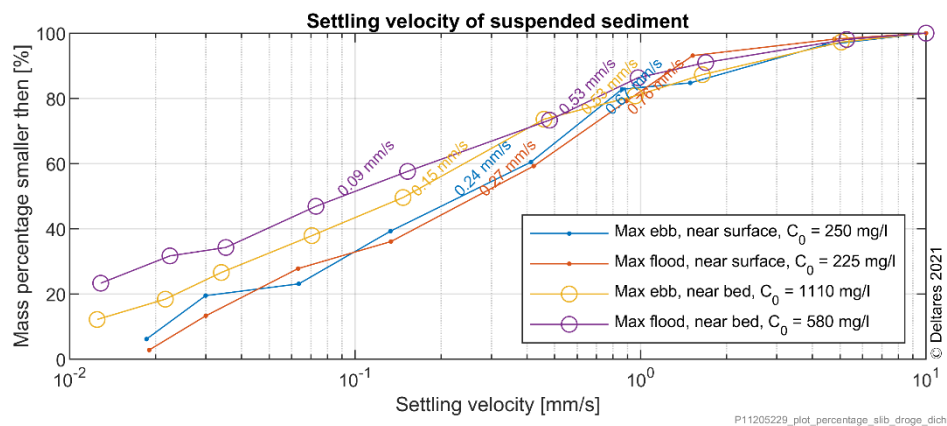
De gemeten mediane valsnelheden en de 75-percentiel valsnelheden van de suspensie monsters genomen in februari 2019 liggen in de buurt van de valsnelheden van de twee slibfracties van 0,4 en 1,5 mm/s toegepast in het slibmodel. De valsnelheden van de suspensie monsters genomen in september 2019 zitten aan de ondergrens van die toegepast in het slibmodel. De mediane waarden zijn een factor 2 lager dan de laagste valsnelheid in het slibmodel en de 75-percentiel waarden liggen in de buurt van de laagste van de twee slibfracties in het slibmodel.



Figur 2.12 Valsnelheden in zout water van het slib uit suspensiemonsters genomen in Februari 2019 zonder anti-flocculatiemiddel (Perk, et al., 2019)

Tabel 2.4 Valsnelheden in zout water van het slib uit suspensiemonsters genomen in februari 2019 zonder anti-flocculatiemiddel (Perk, et al., 2019)

Locatie	$C_0$ [mg/l]	$W_{s,50}$ [mm/s]	$W_{s,75}$ [mm/s]
Nabij wateroppervlak bij maximale ebstroom	190	0,09	0,90
Nabij wateroppervlak bij maximale vloedstroom	800	0,38	1,01
Nabij bodem bij maximale ebstroom	8600	1,10	3,47
Nabij bodem bij maximale vloedstroom	8900	1,98	1,39
Gemiddelde	4623	0,89	1,69



Figur 2.13 Valsnelheden in zout water van het slib uit suspensiemonsters genomen in September 2019 zonder anti-flocculatiemiddel (Perk, et al., 2020)

Tabel 2.5 Valsnelheden in zout water van het slib uit suspensiemonsters zonder anti-flocculatiemiddel (Perk, et al., 2020)

Locatie	$C_0$ [mg/l]	$W_{s,50}$ [mm/s]	$W_{s,75}$ [mm/s]
Nabij wateroppervlak bij maximale ebstroom	250	0,24	0,67
Nabij wateroppervlak bij maximale vloedstroom	225	0,27	0,76
Nabij bodem bij maximale ebstroom	1110	0,15	0,53
Nabij bodem bij maximale vloedstroom	580	0,09	0,53
Gemiddelde	541	0,19	0,62

### 2.4.3 Kritische bodemschuifspanning voor erosie

De kritische bodemschuifspanning voor de erosie van zand-slib-mengsels is bepaald uit gootproeven met zoet water over een compartiment met sediment uit de geul bij Holwerd ter hoogte van frame B (Perk, et al., 2020). We moeten hier bij vermelden dat de vloksterkte toeneemt en daardoor de erodeerbaarheid afneemt met een toenemend zoutgehalte (Winterwerp & Van Kesteren, 2004). In zoet water is de kritische schuifspanning voor erosie dus lager dan in zout water.

De stroomsnelheid in de goot is in kleine stapjes verhoogd totdat er oppervlakte-erosie en massa-erosie van de slibbodem in de goot visueel wordt waargenomen. Oppervlakte-erosie is het geleidelijk ontstaan van kleine groeven en putjes in het sliboppervlak. Massa-erosie is het ontstaan van grote slibwolken over grote delen van het sliboppervlak door het uitbreken van slibbrokken.

Tabel 2.6 toont de percentages zand, de droge dichtheden en de kritische bodemschuifspanningen voor erosie bepaald uit monsters genomen in februari 2019. Tabel 2.7 toont dezelfde parameters voor monsters genomen in september 2019. Deze tabellen laat zien dan de kritische bodemschuifspanning toeneemt bij toenemende droge dichtheid maar dat ook de verhouding zand-slib een grote rol speelt.

De kritische bodemschuifspanning voor erosie van de bufferlaag van  $0,80 \text{ N/m}^2$  die in het model wordt toegepast ligt dichtbij de waargenomen bodemschuifspanningen bij droge dichtheden ruwweg tussen de  $500$  en  $1000 \text{ kg/m}^3$ . Die van de makkelijk erodeerbare flufflaag van  $0,10 \text{ N/m}^2$  is logischerwijs veel lager omdat deze representatief is voor de dunne laag op de bodem die ontstaat tijdens getijkentering.

Tabel 2.6 Percentage zand, droge dichtheid en kritische bodemschuifspanningen voor erosie van zand-slib mengsels uit monsters genomen in februari 2019 in de geul bij Holwerd

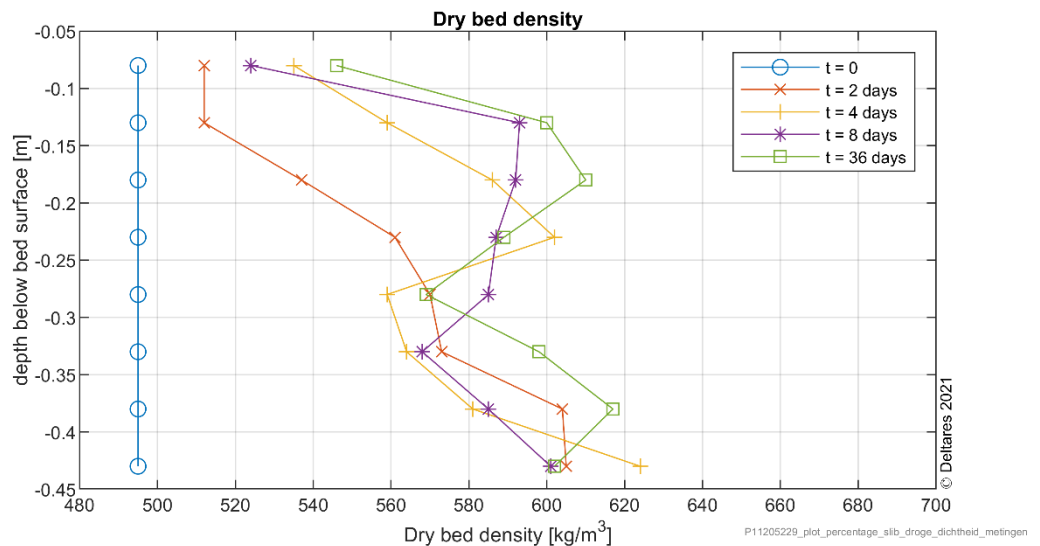
Monster	Percentage zand [%]	Droge dichtheid [ $\text{kg/m}^3$ ]	Kritische schuifspanning Oppervlakte erosie [ $\text{N/m}^2$ ]	Kritische schuifspanning Massa erosie [ $\text{N/m}^2$ ]
Dichtbij frame B (1)	15%	$300 \pm 30$	0,25	0,45
Dichtbij frame B (2)	15%	$330 \pm 30$	0,35	0,60
Dichtbij frame B (3)	15%	$500 \pm 30$	0,45	0,75
Dichtbij frame B (4)	15%	$710 \pm 50$	1,00	1,40
Vaarweg 1 km	25-40%	$700 \pm 30$	1,50	2,50
Vaarweg 2 km	35%	$1100 \pm 50$	2,50	2,90
Vaarweg 6 km	95%	$1500 \pm 50$	0,40	-

Tabel 2.7 Percentage zand, droge dichtheid en kritische bodemschuifspanningen voor erosie van zand-slib mengsels uit monsters genomen in september 2019 in de geul bij Holwerd

Monster	Percentage zand [%]	Droge dichtheid [ $\text{kg/m}^3$ ]	Kritische schuifspanning Oppervlakte erosie [ $\text{N/m}^2$ ]	Kritische schuifspanning Massa erosie [ $\text{N/m}^2$ ]
Dichtbij frame B, volledig monster	43%	$500 \pm 30$	0,85	1,3
Dichtbij frame B, toplaag (10-20 cm)	20%	$335 \pm 15$	0,50	0,6
Vaarweg 0 km	44%	$650 \pm 30$	1,50	1,8
Vaarweg 4 km	77%	$1050 \pm 50$	0,90	1,8

#### 2.4.4 Consolidatie

Uit consolidatieproeven met verschillende beginconcentraties samengesteld met sediment uit de geul ter hoogte van frame B bij Holwerd blijkt dat suspensiemateriaal met een beginconcentratie van 10 tot 30 kg/m<sup>3</sup> consolideert tot ca. 200 kg/m<sup>3</sup> in ca. 6 uur (Perk, et al., 2020). Suspensiemateriaal met een beginconcentratie van 50 tot 100 kg/m<sup>3</sup> consolideert tot ca. 200 kg/m<sup>3</sup> in ca. 3 uur. Bodemmateriaal met een droge dichtheid van 200 tot 300 kg/m<sup>3</sup> consolideert tot een droge dichtheid van ca. 450 kg/m<sup>3</sup> in ca. 9 dagen. Uit proeven van het consolidatiegedrag over de diepte startend met een beginconcentratie van 495 kg/m<sup>3</sup> blijkt dat de droge dichtheid na 8 dagen toeneemt met ongeveer 20% tot 600-620 kg/m<sup>3</sup> (Figuur 2.14). Consolidatie en de daardoor veranderende kritische schuifspanning voor erosie wordt op dit moment niet meegenomen in het slibmodel.



Figuur 2.14 Verloop van droge dichtheid in laboratoriumkolom met bodemslib ter hoogte van frame B in de geul bij Holwerd (Perk, et al., 2020)

## 3 Slibdynamiek en baggeronderhoud

### 3.1 Slibdynamiek zonder baggeren

De slibdynamiek is berekend voor de periode van 1 januari 2019 tot 1 april 2019 (zie paragraaf 2.3). Omdat er veel gegevens beschikbaar zijn over het baggeronderhoud in de jaren voor de bochtafsnijding is er voor gekozen om simulaties te doen voor de situatie zonder de bochtafsnijding (d.w.z. T0 bodem) die in 2019 werd uitgevoerd.

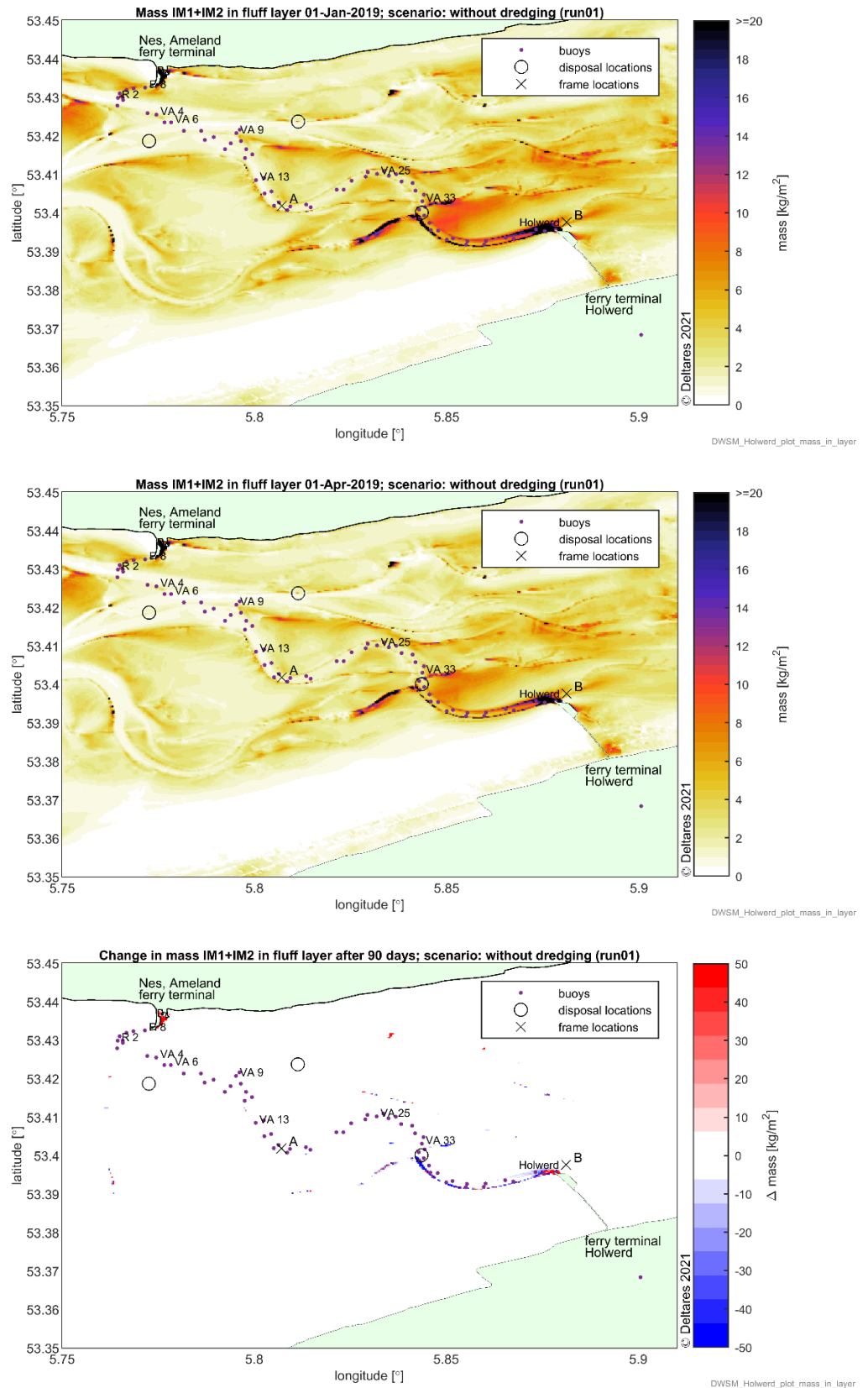
#### 3.1.1 Slib in de bodem

Figuur 3.1 toont de berekende massa in de flufflaag (S1) in een modelsimulatie zonder baggeronderhoud aan het begin (boven) en aan het einde van de modelsimulatie van drie maanden (midden), en het verschil in massa tussen het begin en het einde van de modelsimulatie (onder). De flufflaag is een gemakkelijk erodeerbare bodemlaag bovenop de bufferlaag. Door de gemakkelijke erodeerbaarheid toont Figuur 3.1 slechts twee momentopnames die gedurende de simulatie anders kunnen zijn, maar het geeft wel een indruk van het ruimtelijke patroon. De massa in de flufflaag is het grootst in de vaarweg tussen Holwerd en VA 33 (ongeveer 3 km van de pier bij Holwerd). Ook in het Dantziggat, het doorlopend Dantziggat en rond de Teding van Berkhoutplaat, net ten noorden van de vaarweg tussen Holwerd en VA 33, is de massa in de flufflaag iets groter dan in de rest van het gebied. Het onderste paneel in Figuur 3.1 laat zien dat de veranderingen in de flufflaag het grootst zijn in de vaarweg tussen Holwerd en VA 33.

Figuur 3.2 toont de berekende massa in de bufferlaag (S2) in dezelfde modelsimulatie aan het begin (boven) en aan het einde van de modelsimulatie van drie maanden (midden), en het verschil in massa tussen het begin en het einde van de modelsimulatie (onder). De bufferlaag bevat slib met een hogere erosieweerstand. Figuur 3.2 laat duidelijk zien dat de meeste aanslibbing plaatsvindt in de vaargeul vanaf de afvaart van de veerboot bij Holwerd tot VA 33. Er treedt ook aanslibbing op tussen VA 33 en VA 25. Op de intergetijdeplaten langs de vaargeul is erosie van slib te zien. Dit wordt veroorzaakt door de betrekkelijk ruwe condities in het laatste deel van de simulatieperiode (zie paragraaf 2.3). Slib erodeert dan van de ondiepe platen en zet zich af in de geulen.

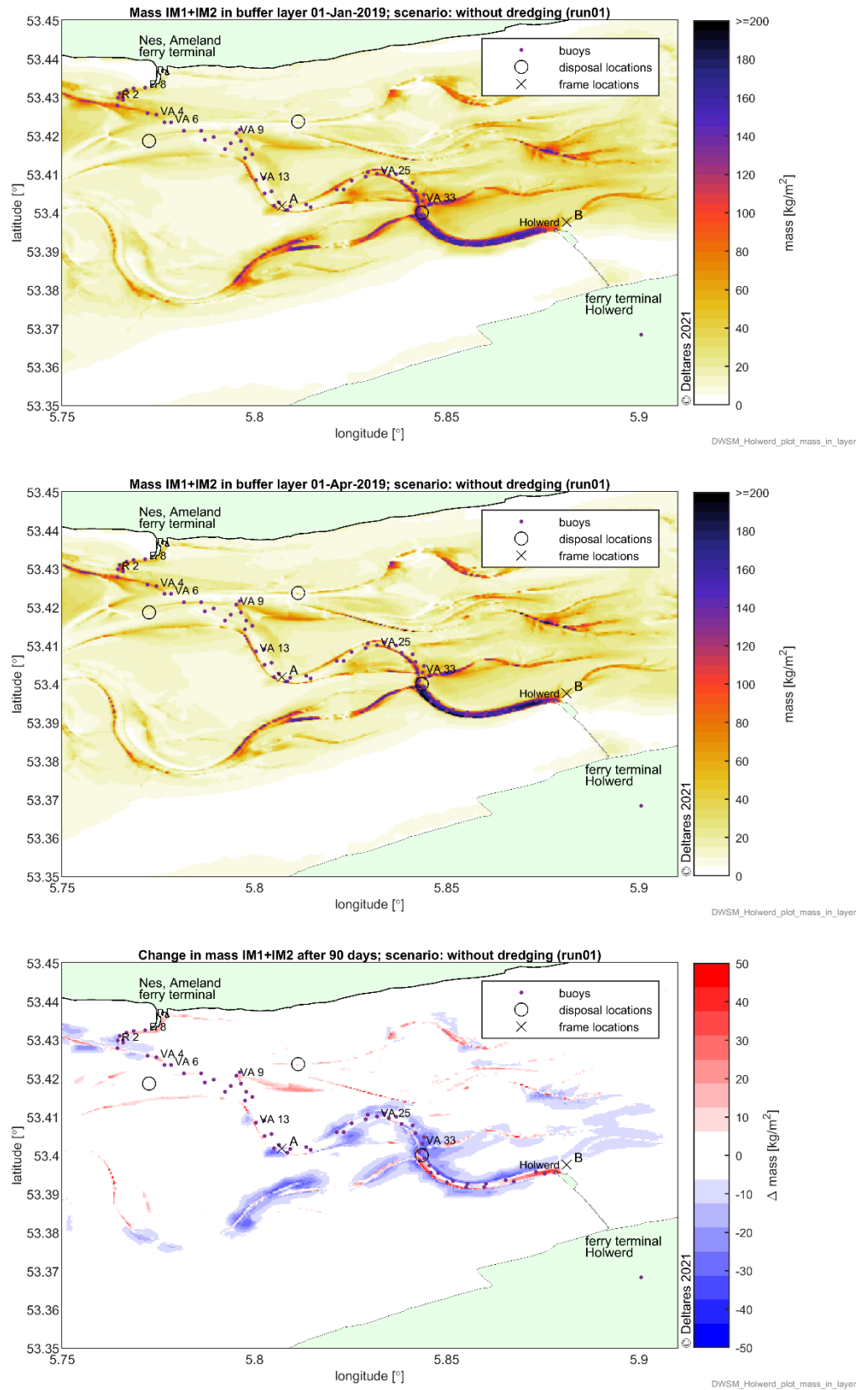
Figuur 3.3 en Figuur 3.4 tonen de berekende bodemschuifspanning en de slibmassa in de fluff- en bufferlaag op de locaties van frame A en frame B. Deze figuren laten zien dat de bodemschuifspanning  $\tau_{50}$  bij frame A ongeveer  $0,53 \text{ N/m}^2$  bedraagt en bij frame B ongeveer  $0,37 \text{ N/m}^2$ . Voor beide locaties is dit boven de kritische schuifspanning voor erosie van  $0,1 \text{ N/m}^2$  in de flufflaag en onder de kritische schuifspanning voor erosie van  $0,8 \text{ N/m}^2$  in de bufferlaag. De schuifspanning die in 90% van de tijd wordt overschreden ( $\tau_{90}$ ) is met  $1,57 \text{ N/m}^2$  bij frame A en  $1,43 \text{ N/m}^2$  bij frame B boven de kritische schuifspanning voor erosie van  $0,8 \text{ N/m}^2$  in de bufferlaag. Voor het grootste deel van de tijd zijn de schuifspanningen bij frame B lager dan bij frame A. De schuifspanningspieken zijn bij frame B echter juist hoger dan bij frame A. Dit is ook te zien aan de schuifspanning die in 99% van de tijd wordt overschreden. Deze  $\tau_{99}$  is met  $2,56 \text{ N/m}^2$  bij frame B hoger dan de  $2,07 \text{ N/m}^2$  bij frame A.

De slibmassa in de bufferlaag neemt gedurende de simulatie van drie maanden bij frame A af van ongeveer  $40 \text{ kg/m}^2$  naar ongeveer  $30 \text{ kg/m}^2$ . Bij frame B neemt dit af van ongeveer  $30 \text{ kg/m}^2$  naar ongeveer  $25 \text{ kg/m}^2$ . De slibmassa in de flufflaag is iets dynamischer dan die in de bufferlaag en varieert bij frame A ongeveer tussen 5 en  $10 \text{ kg/m}^2$ .



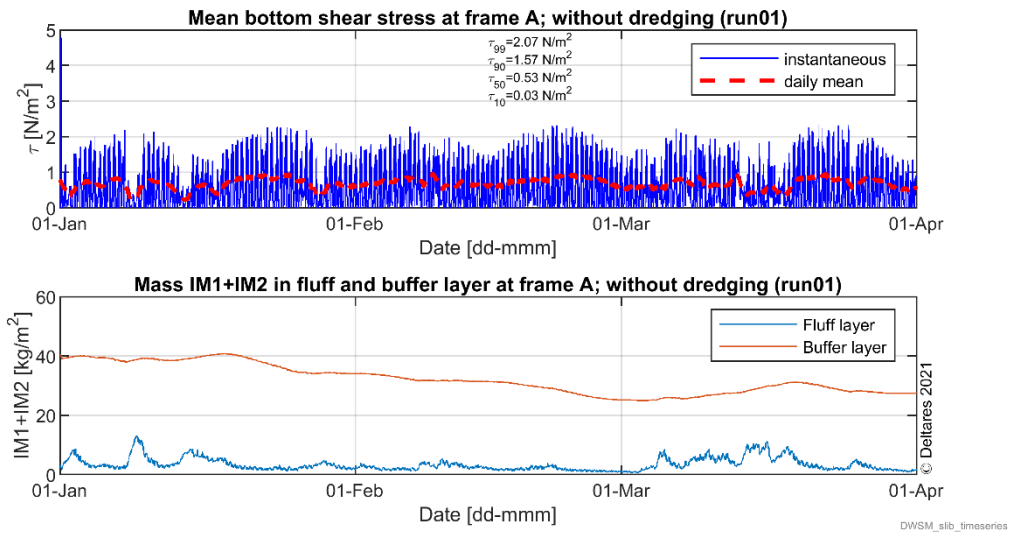
Figuur 3.1 Massa in de flufflaag (S1) aan het begin (boven) en aan het einde (midden) van een modelsimulatie van drie maanden zonder baggeren, en het verschil in massa tussen het begin en het einde van de modelsimulatie (onder). Het merendeel van het slib in de bodem zit in de bufferlaag; de massa slib in de flufflaag (S1) is ongeveer 10% van de massa in de bufferlaag.



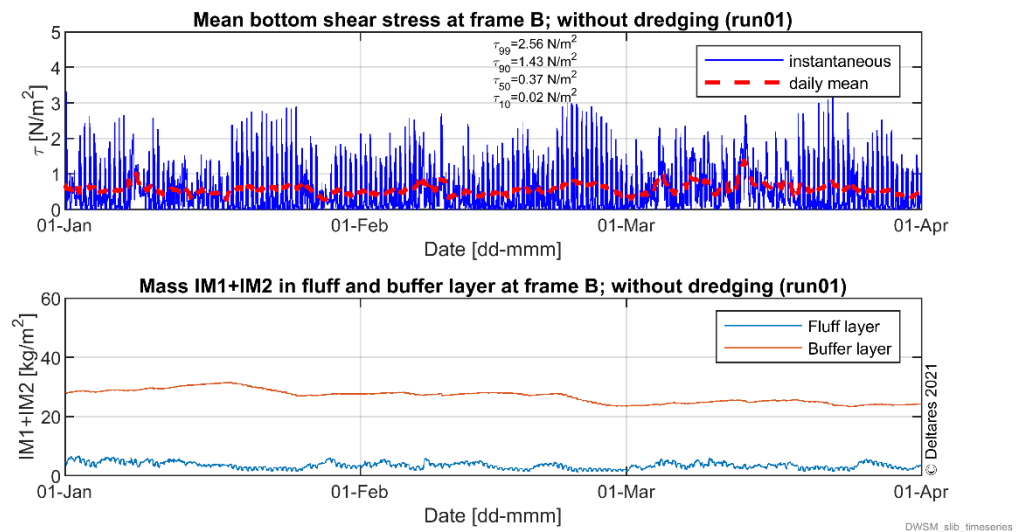


Figuur 3.2 Massa in de bufferlaag (S2) aan het begin (boven) en aan het einde (midden) van de modelsimulatie van drie maanden zonder baggeren, en het verschil in massa tussen het begin en het einde van de modelsimulatie (onder). Het merendeel van het slib in de bodem zit in de bufferlaag; de massa slib in de flufflaag (S1) is ongeveer 10% van de massa in de bufferlaag.





Figuur 3.3 Berekende bodemschuifspanning en slibmassa in de fluff- en bufferlaag op locatie frame A



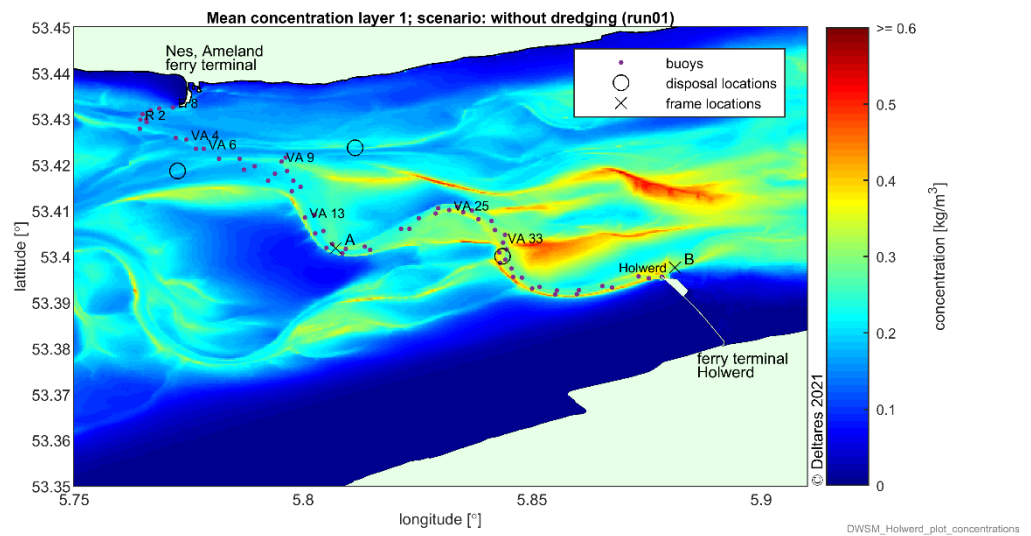
Figuur 3.4 Berekende bodemschuifspanning en slibmassa in de fluff- en bufferlaag op locatie frame B

### 3.1.2 Slib in de waterkolom

#### 3.1.2.1 Zonder baggeren en verspreiden

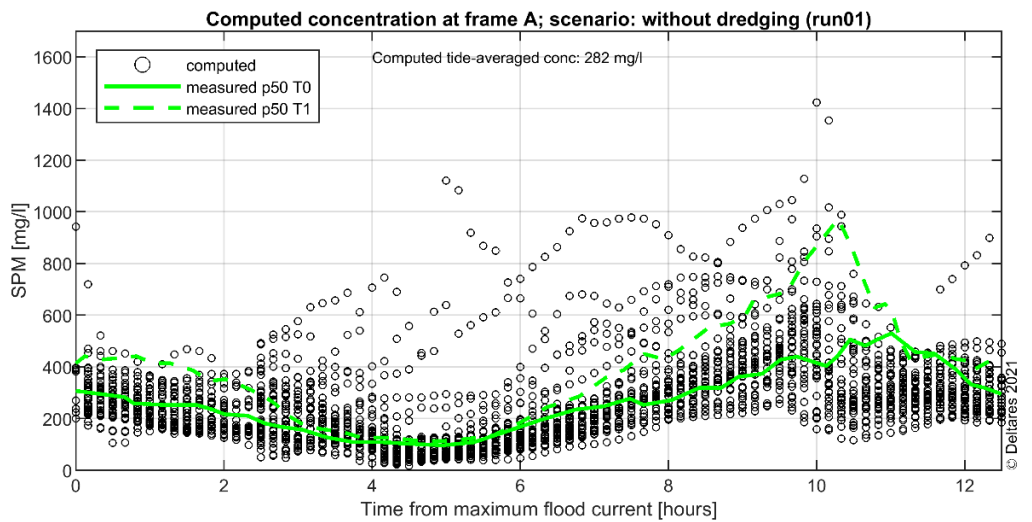
Figuur 3.5 toont de berekende tijdsgemiddelde slibconcentraties in het water dicht bij de bodem (onderste rekenlaag) voor de simulatie zonder baggeren en verspreiden. Het gaat hier om een gemiddelde over een modeluitvoer met een frequentie van één keer per dag voor een periode van 3 maanden. Dat is een gemiddelde over 91 kaarten. Hierin zijn ook momenten meegenomen waarin de platen droog zijn gevallen en de concentraties daar op dat moment nul zijn. Dit is de reden dat in Figuur 3.5 vooral de continue natte delen de hoogste concentraties laten zien en dit geeft een iets ander beeld dan een luchtfoto (bijv. Figuur 1.3) waarop de drooggevallen platen ook duidelijk bruin kleuren.

Figuur 3.5 laat zien dat de hoogste concentraties optreden aan de oostzijde van het gebied (d.w.z. richting het wantij Pinke Wad) en dan met name aan het oostelijke einde van de Zuiderspruit, het doorlopend Dantziggat met de Teding van Berkhoutplaat en het oostelijke deel van de vaarweg tussen VA33 en Holwerd (zie Figuur 1.1 voor benamingen). De gemiddelde concentraties bedragen hier enkele honderden mg/l tot lokaal meer dan 600 mg/l.



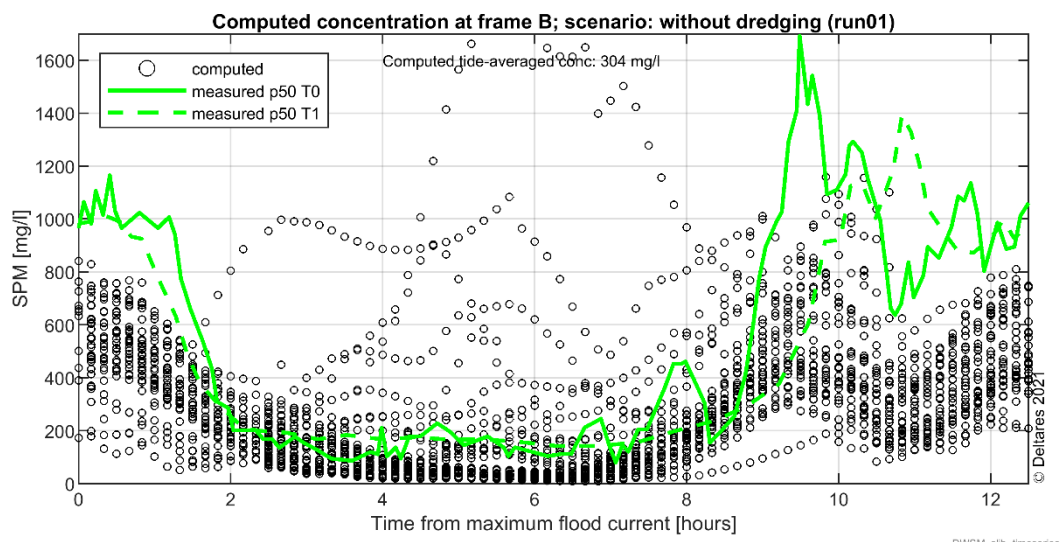
Figuur 3.5 Berekende tijdsgemiddelde concentraties bij de bodem met standaard instellingen voor de situatie zonder baggeren en storten

Figuur 3.6 toont de berekende concentraties bij de bodem bij meetframe A voor alle getijden in de simulatie, weergegeven vanaf het tijdstip van de maximale vloedstroom van elk getij. Alle getijden zijn dus in één getij samengevoegd. Deze figuur laat zien dat de berekende concentraties ongeveer 300 mg/l bedragen tijdens maximale vloed ( $t = 0$ ). Dit neemt af tot ongeveer 100 mg/l op  $t = 5.5$  uur en weer toe tot ongeveer 400 mg/l op  $t = 10$  uur. Het gemiddelde van de berekende concentraties is 282 mg/l. De groene lijnen in Figuur 3.6 tonen de mediaan van de gemeten concentraties op meetframe A. De getrokken groene lijn toont de gemeten concentraties voor de meetperiode voor de bochtafsnijding en de onderbroken groene lijn voor de meetperiode na de bochtafsnijding. De hydrodynamische condities (d.w.z. fasering in spring-dootij cyclus en meteorologische condities) waren verschillend gedurende de twee meetperiodes, waardoor de verschillen niet enkel aan de bochtafsnijding toegewezen kunnen worden. Figuur 3.6 laat zien dat de berekende concentraties bij Frame A redelijk goed overeen komen met de gemeten concentraties.



Figuur 3.6 Berekende concentraties bij de bodem bij meetframe A weergegeven in de tijd vanaf de maximale vloedstroomsnelheid. Gemeten waarden (mediaan) op 0.9 m boven de bodem zijn weergegeven met groene lijnen. Zie figuur Figuur 3.5 voor de locaties van meetframes. De berekende waarden volgen uit een modelsimulatie met standaard modelinstellingen zonder baggeren en storten.

Figuur 3.7 toont de berekende concentraties bij de bodem bij meetframe B. De berekende concentraties bedragen hier ongeveer 600 mg/l tijdens maximale vloed ( $t = 0$ ), nemen af tot ongeveer 100 mg/l op  $t = 5.5$  uur en weer toe tot ongeveer 400 mg/l op  $t = 10$  uur. Het gemiddelde van de berekende concentraties is 304 mg/l. Deze figuur laat zien dat de berekende concentraties ruim twee keer lager zijn dan de metingen. Figuur 3.5 laat zien dan de berekende concentraties iets westelijker van het meetframe hoger zijn. De gemiddelde berekende concentratie op een locatie die ongeveer 250 m westelijker ligt is 379 mg/l (d.w.z. 25% hoger dan op de locatie van meetframe B). Dit is echter nog steeds lager dan de gemeten concentraties. Tabel 3.1 toont de gemeten en berekende tijdsgemiddelde concentraties bij meetframe A en B. Ter illustratie van de ruimtelijke variatie toont Tabel 3.1 ook het berekende gemiddelde op ongeveer 250 m westelijk van meetframe B.



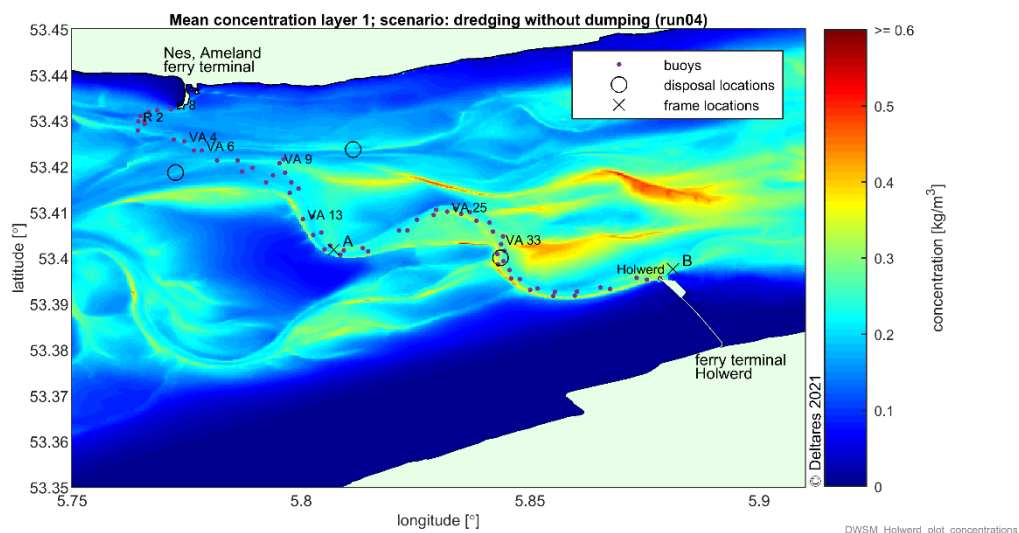
Figuur 3.7 Berekende concentraties bij de bodem bij meetframe B weergegeven in de tijd vanaf de maximale vloedstroomsnelheid. Gemeten waarden (mediaan) op 0.9 m boven de bodem zijn weergegeven met groene lijnen. Zie figuur Figuur 3.5 voor de locaties van meetframes. De berekende waarden volgen uit een modelsimulatie met standaard modelinstellingen zonder baggeren en storten.

Tabel 3.1 Gemeten tijdsgemiddelde concentraties op 0,9 m boven de bodem bij meetframe A en meetframe B en berekende waarden in de onderste rekenlaag voor de simulatie zonder baggeren.

	Tijdsgemiddelde concentratie (mg/l)	
	Gemeten	Zonder baggeren en storten Standaard instellingen (run01)
<b>Meetframe A</b>	437	282 ( $\Delta = -35\%$ )
<b>Meetframe B</b>	731	304 ( $\Delta = -58\%$ ) / 379 <sup>4</sup> ( $\Delta = -48\%$ )

### 3.1.2.2 Met baggeren maar zonder verspreiden

Figuur 3.8 toont de berekende tijdsgemiddelde slibconcentraties in het water dicht bij de bodem (onderste rekenlaag) voor de simulatie met baggeren maar zonder verspreiden. Ook in deze simulatie treden de hoogste concentraties op aan de oostzijde van het gebied. De concentraties zijn in deze simulatie iets lager dan in de simulatie zonder baggeren omdat er nu slib uit het modeldomein wordt onttrokken (vergelijk Figuur 3.8 met Figuur 3.5). Dit is ook te zien aan de berekende tijdsgemiddelde concentraties bij meetframe A en B in Tabel 3.2. Door het baggeren wordt de berekende tijdsgemiddelde concentratie bij frame A ongeveer 10 mg/l lager en bij frame B ongeveer 30 mg/l. Ter illustratie van de ruimtelijke variatie toont Tabel 3.2 ook het berekende gemiddelde op ongeveer 250 m westelijk van meetframe B.



Figuur 3.8 Berekende tijdsgemiddelde concentraties bij de bodem met standaard instellingen voor de situatie met baggeren maar zonder verspreiden.

Tabel 3.2 Gemeten tijdsgemiddelde concentraties op 0,9 m boven de bodem bij meetframe A en meetframe B en berekende waarden in de onderste rekenlaag voor de simulatie zonder baggeren en de simulatie met baggeren maar zonder verspreiden

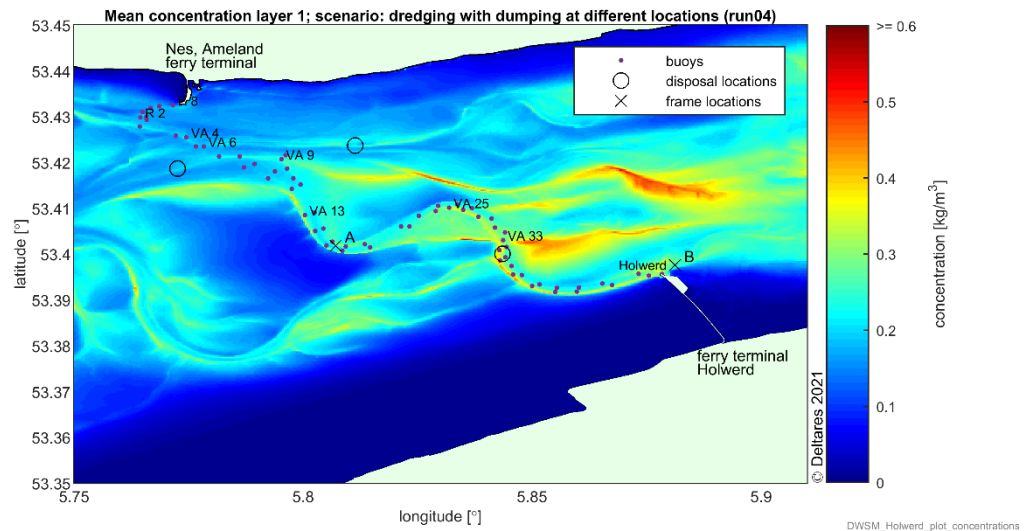
	Tijdsgemiddelde concentratie (mg/l)		
	Gemeten	Zonder baggeren Standaard instellingen (run01)	Met baggeren maar zonder verspreiden Standaard instellingen (run04)
<b>Meetframe A</b>	437	281 ( $\Delta = -36\%$ )	271 ( $\Delta = -38\%$ )
<b>Meetframe B</b>	731	304 ( $\Delta = -58\%$ ) / 379 <sup>5</sup> ( $\Delta = -48\%$ )	273 ( $\Delta = -63\%$ ) / 342 <sup>4</sup> ( $\Delta = -53\%$ )

<sup>4</sup> Dit is de berekende gemiddelde concentratie wanneer de locatie van frame B in het model ongeveer 250 m naar het westen is verplaatst

<sup>5</sup> Dit is de berekende gemiddelde concentratie wanneer de locatie van frame B in het model ongeveer 250 m naar het westen is verplaatst

### 3.1.2.3 Met baggeren en verspreiden

Er zijn modelsimulaties uitgevoerd met verschillende instellingen om de invloed van baggerspecieverspreiding op de slibconcentraties te onderzoeken. De simulaties waarin de baggerspecie verdeeld wordt over drie verschillende verspreidingslocaties worden hier toegelicht. De eerste verspreidingslocatie ligt dichtbij VA33, de tweede ligt in het Scheepsgat en de derde ligt in de Zuiderspuit. Figuur 3.9 toont de berekende tijdsgemiddelde slibconcentraties in het water dicht bij de bodem (onderste rekenlaag) voor deze simulatie met baggeren en verspreiden. De concentraties zijn in deze simulatie iets hoger dan de simulatie met baggeren zonder verspreiden omdat het slib nu wel in het model wordt teruggebracht. Dit is ook te zien aan de berekende tijdsgemiddelde concentraties bij meetframe A en B in Tabel 3.2. Door het verspreiden worden de berekende tijdsgemiddelde concentraties bij frame A en frame B ongeveer 6 mg/l hoger dan zonder verspreiden.



Figuur 3.9 Berekende tijdsgemiddelde concentraties bij de bodem met standaard instellingen voor de situatie met baggeren en verspreiden

Tabel 3.3 Gemeten tijdsgemiddelde concentraties op 0,9 m boven de bodem bij meetframe A en meetframe B en berekende waarden in de onderste rekenlaag voor verschillende simulaties.

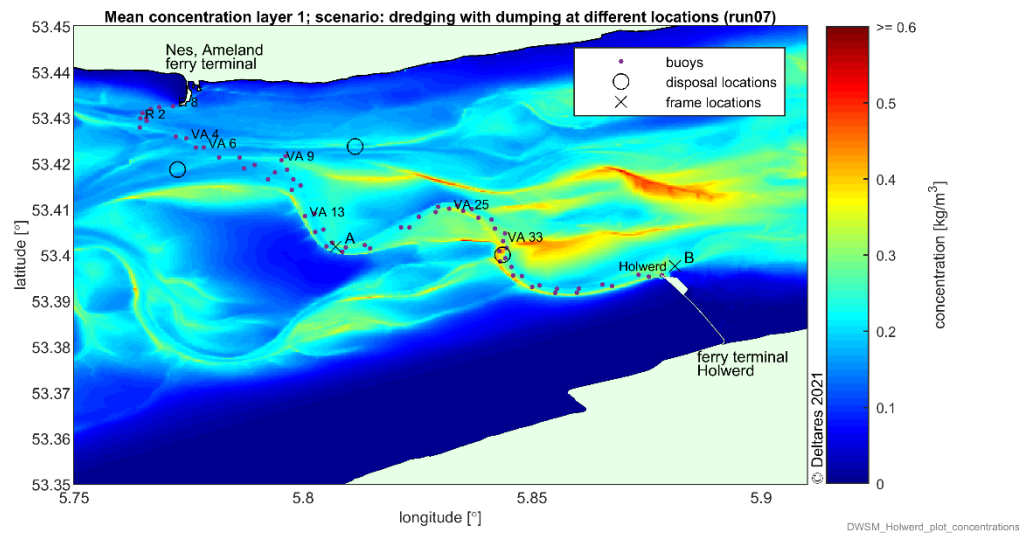
	Tijdsgemiddelde concentratie (mg/l)			
	Gemeten	Zonder baggeren Standaard instellingen (run01)	Met baggeren maar zonder verspreiden Standaard instellingen (run04)	Met baggeren en verspreiden Standaard instellingen (run04)
<b>Meetframe A</b>	437	281 ( $\Delta = -36\%$ )	271 ( $\Delta = -38\%$ )	277 ( $\Delta = -37\%$ )
<b>Meetframe B</b>	731	304 ( $\Delta = -58\%$ ) 379 <sup>6</sup> ( $\Delta = -48\%$ )	273 ( $\Delta = -63\%$ ) 342 <sup>6</sup> ( $\Delta = -53\%$ )	279 ( $\Delta = -62\%$ ) 349 <sup>6</sup> ( $\Delta = -52\%$ )

### 3.1.2.4 Met verhoogde sedimentatie naar de bufferlaag en baggeren en verspreiden

De bufferlaag is representatief voor de zanderige zeebodem waarin slib kan worden meegevoerd en tijdelijk kan worden opgeslagen. Opwerveling uit deze bufferlaag gebeurt tijdens dynamische omstandigheden. Baggeren kan een rol spelen in de dynamiek van de bufferlaag. In het model kan de sedimentatie naar de bufferlaag worden gekalibreerd. Standaard staat deze factor ingesteld op  $\alpha = 0,05$  (zie Tabel 2.1). Dit zorgt er in het model voor dat wanneer er sedimentatie plaatsvindt

<sup>6</sup> Dit is de berekende gemiddelde concentratie wanneer de locatie van frame B in het model ongeveer 250 m naar het westen is verplaatst

hiervan 5% in de bufferlaag terecht komt en 95% in de flufflaag. De invloed van de sedimentatie naar de bufferlaag is onderzocht door verschillende factoren voor de sedimentatie-flux naar de bufferlaag toe te passen in de door baggeren onderhouden vaargeul. Hier tonen we het effect door deze  $\alpha$  te verhogen naar 0,1. Figuur 3.10 toont de berekende tijdsgemiddelde slibconcentraties in het water dicht bij de bodem (onderste rekenlaag) voor de simulatie met deze aangepaste instellingen met baggeren en verspreiden. Tabel 3.4 toont weer de berekende tijdsgemiddelde concentraties en laat zien dat een verhoging van  $\alpha = 0,05$  naar  $\alpha = 0,1$  bij frame A leidt tot een 4 mg/l lagere gemiddelde concentratie en bij frame B tot een 20 mg/l lagere gemiddelde concentratie.



Figuur 3.10 Berekende tijdsgemiddelde concentraties bij de bodem met verhoogde sedimentatie naar de bufferlaag ( $\alpha = 0.1$ ) voor de situatie met baggeren en verspreiden

Tabel 3.4 Gemeten tijdsgemiddelde concentraties op 0,9 m boven de bodem bij meetframe A en meetframe B en berekende waarden in de onderste rekenlaag voor verschillende simulaties.

	Tijdsgemiddelde concentratie (mg/l)				
	Gemeten	Zonder baggeren Standaard instellingen (run01)	Met baggeren maar zonder verspreiden Standaard instellingen (run04)	Met baggeren en verspreiden Standaard instellingen (run04)	Met baggeren en verspreiden Aangepaste instellingen (run07)
<b>Meetframe A</b>	437	281 ( $\Delta = -36\%$ )	271 ( $\Delta = -38\%$ )	277 ( $\Delta = -37\%$ )	273 ( $\Delta = -38\%$ )
<b>Meetframe B</b>	731	304 ( $\Delta = -58\%$ ) 379 <sup>7</sup> ( $\Delta = -48\%$ )	273 ( $\Delta = -63\%$ ) 342 <sup>7</sup> ( $\Delta = -53\%$ )	279 ( $\Delta = -62\%$ ) 349 <sup>7</sup> ( $\Delta = -52\%$ )	259 ( $\Delta = -65\%$ ) 322 <sup>7</sup> ( $\Delta = -56\%$ )

## 3.2 Berekende baggervolumes

### 3.2.1 Zonder verspreiding en volgens huidige verspreidingsstrategie

Tabel 3.5 toont het waargenomen baggervolume zand en slib per jaar tussen Holwerd en VA13, gemiddeld over de jaren 2017-2019 (zie Figuur 1.2). Het gemiddelde bedraagt ongeveer  $1,1 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>/jaar. Het gebaggerde sediment bestaat voor ongeveer 20% uit zand (Van Rijn, et al., 2016). Het baggervolume slib komt daarmee op  $0,88 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>/jaar.

<sup>7</sup> Berekende gemiddelde concentratie wanneer locatie frame B in model ongeveer 250 m naar westen is verplaatst



Om de invloed van de huidige verspreidingsstrategie in beeld te brengen zijn twee situaties met het model doorgerekend, namelijk de situatie met baggeren maar zonder verspreiden en de situatie met baggeren en verspreiden. De simulaties zijn uitgevoerd met verschillende modelinstellingen, namelijk met de standaard instellingen en met verhoogde sedimentatie naar de bufferlaag.

De modelsimulaties zijn gemaakt voor een periode van 3 maanden (januari t/m maart). In het model wordt de gebaggerde massa elke 10 minuten bijgehouden. Om dit te vergelijken met het waargenomen volume per jaar is de gemiddelde berekende massa per dag (kg/dag) gedeeld door een droge dichtheid van  $400 \text{ kg/m}^3$  en daarna vermenigvuldigd met 365 dagen.

Voor de simulatie met baggeren zonder verspreiden en met de standaard modelinstellingen bedraagt het berekende baggervolume  $0,18 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{jaar}$  (Tabel 3.5). Dit is een factor 5 lager dan het waargenomen baggervolume. Met dezelfde standaard instellingen inclusief verspreiden wordt dit  $0,24 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{jaar}$ . Dit is bijna een factor 4 lager dan waargenomen. Het verschil in baggervolume tussen de simulatie met en zonder verspreiding is ruim 30%.

Tabel 3.5 Waargenomen baggervolume per jaar en berekende waarden met standaard instellingen.

Waargenomen		Berekend			
Waargenomen gemiddelde zand+slib ( $\text{m}^3/\text{jaar}$ )	Waargenomen gemiddelde slib <sup>8</sup> ( $\text{m}^3/\text{jaar}$ )	Met baggeren maar zonder verspreiden  Standaard instellingen ( $\alpha=0,05$ )	Met baggeren en verspreiden  Standaard instellingen ( $\alpha=0,05$ )	Met baggeren en verspreiden  Aangepaste instellingen ( $\alpha=0,1$ )	Met baggeren en verspreiden  Aangepaste instellingen ( $\alpha=0,2$ )
$1,1 \cdot 10^6$	$0,88 \cdot 10^6$	$0,18 \cdot 10^6$	$0,24 \cdot 10^6$	$0,63 \cdot 10^6$	$1,36 \cdot 10^6$

Voor de simulatie met baggeren zonder verspreiden en met een verhoogde sedimentatie naar de bufferlaag van  $\alpha = 0,1$  in plaats van 0,05 bedraagt het berekende baggervolume  $0,57 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{jaar}$  (Tabel 3.6). Dit komt in de buurt van het waargenomen jaarlijkse baggervolume maar is nog ongeveer 35% lager. Met verspreiden wordt het berekende baggervolume  $0,63 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{jaar}$ . Dit komt nog iets dichter in de buurt maar is nog bijna 30% lager dan waargenomen. Het verschil in baggervolume tussen de simulatie met en zonder verspreiding is bij deze modelinstelling ruim 10%.

Tabel 3.6 Waargenomen baggervolume per jaar en berekende waarden met verhoogde sedimentatie naar de bufferlaag ( $\alpha=0,1$ ).

Waargenomen		Berekend	
Waargenomen gemiddelde zand+slib ( $\text{m}^3/\text{jaar}$ )	Waargenomen gemiddelde slib <sup>9</sup> ( $\text{m}^3/\text{jaar}$ )	Met baggeren maar zonder verspreiden  Aangepaste instellingen ( $\alpha=0,1$ )	Met baggeren en verspreiden  Aangepaste instellingen ( $\alpha=0,1$ )
$1,1 \cdot 10^6$	$0,88 \cdot 10^6$	$0,57 \cdot 10^6$	$0,63 \cdot 10^6$

Voor de simulatie met baggeren zonder verspreiden en met een iets verder verhoogde sedimentatie naar de bufferlaag van  $\alpha = 0,2$  bedraagt het berekende baggervolume  $1,17 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{jaar}$  (Tabel 3.7). Dit ligt ruim 30% hoger dan het waargenomen jaarlijkse baggervolume. Met verspreiden wordt het berekende baggervolume  $1,36 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{jaar}$ . Dit is bijna 55% hoger dan waargenomen. Het verschil in baggervolume tussen de simulatie met en zonder verspreiding is bij deze modelinstelling ruim 15%.

<sup>8</sup> Uitgaande van 80% slib in het gebaggerde sediment (zie Van Rijn et al, 2016)

<sup>9</sup> Uitgaande van 80% slib in het gebaggerde sediment (zie Van Rijn et al, 2016)

Tabel 3.7 Waargenomen baggervolume per jaar en berekende waarden met verder verhoogde sedimentatie naar de bufferlaag ( $\alpha=0,2$ ).

Waargenomen		Berekend	
Waargenomen gemiddelde zand+slib (m <sup>3</sup> /jaar)	Waargenomen gemiddelde slib <sup>10</sup> (m <sup>3</sup> /jaar)	Met baggeren maar zonder verspreiden Aangepaste instellingen ( $\alpha=0,2$ )	Met baggeren en verspreiden Aangepaste instellingen ( $\alpha=0,2$ )
1,1*10 <sup>6</sup>	0,88*10 <sup>6</sup>	1,17*10 <sup>6</sup>	1,36*10 <sup>6</sup>

### 3.2.2 Aangepaste verspreidingsstrategie

Naast de simulaties zonder verspreiden en die volgens de huidige verspreidingsstrategie zijn er ook modelsimulaties uitgevoerd met een aangepaste verspreidingsstrategie. Deze zijn uitgevoerd met een verhoogde sedimentatie naar de bufferlaag  $\alpha = 0,2$ . Hoewel het berekende baggervolume voor deze simulatie hoger is dan waargenomen, geeft het wel een indruk van het effect van een andere verspreidingsstrategie.

Er zijn simulatie met de volgende vier verspreidingsscenario's gemaakt:

1. Baggeren zonder verspreiden
2. Baggeren met verspreiden volgens de huidige strategie
3. Baggeren met alles verspreiden in het Scheepsgat
4. Baggeren met alles verspreiden in de Zuiderspruit

In de vorige paragraaf hebben we reeds het verschil laten zien tussen de simulaties zonder verspreiding en die met de huidige verspreidingsstrategie. Tabel 3.8 toont daarbij ook de resultaten van de twee andere verspreidingsscenario's. Hieruit blijkt dat alles verspreiden in het Scheepsgat leidt tot een kleine 10% lager baggervolume en alles verspreiden in de Zuiderspruit leidt tot een kleine 15% lager baggervolume. Als al het gebaggerde materiaal verspreid wordt in de Zuiderspruit is het berekende baggervolume bijna gelijk aan het berekende baggervolume zonder verspreiden. Dit betekent dat op de tijdschaal van de modelberekening (3 maanden) de baggerspecie vanuit de Zuiderspruit niet terugkeert naar de vaargeul. Op langere tijdschaal kan een deel van de baggerspecie mogelijk alsnog terugstromen, maar dit is niet onderzocht.

Tabel 3.8 Waargenomen baggervolume per jaar en berekende waarden met verschillende verspreidingsscenario's (met verhoogde sedimentatie naar de bufferlaag ( $\alpha=0,2$ )).

Waargenomen		Berekend			
Waargenomen gemiddelde zand+slib (m <sup>3</sup> /jaar)	Waargenomen gemiddelde slib <sup>11</sup> (m <sup>3</sup> /jaar)	Zonder verspreiden Aangepaste instellingen ( $\alpha=0,2$ )	Huidig verspreidingsstrategie Aangepaste instellingen ( $\alpha=0,2$ )	Alles verspreiden in Scheepsgat Aangepaste instellingen ( $\alpha=0,2$ )	Alles verspreiden in Zuiderspruit Aangepaste instellingen ( $\alpha=0,2$ )
1,1*10 <sup>6</sup>	0,88*10 <sup>6</sup>	1,17*10 <sup>6</sup>	1,36*10 <sup>6</sup>	1,26*10 <sup>6</sup>	1,18*10 <sup>6</sup>

<sup>10</sup> Uitgaande van 80% slib in het gebaggerde sediment (zie Van Rijn et al, 2016)

<sup>11</sup> Uitgaande van 80% slib in het gebaggerde sediment (zie Van Rijn et al, 2016)



## 4 Discussie en aanbevelingen

### 4.1 Discussie

#### 4.1.1 Slibconcentraties

De metingen die juist ten oosten van de pier bij Holwerd zijn uitgevoerd laten zien dat de gemiddelde slibconcentratie hier erg hoog is, namelijk 731 mg/l. Dit is een stuk hoger dan de gemiddelde gemeten concentraties in de vaargeul, halverwege tussen Holwerd en Ameland (437 mg/l). Het verschil in gemiddelde concentraties tussen deze twee locaties is veel minder groot in modelsimulaties. Mogelijke oorzaken zijn de hydrodynamische forcering en processen die in het model ontbreken.

Het gemeten verschil in concentraties tussen de twee locaties zou veroorzaakt kunnen worden door een lokaal verschil in bodemschuifspanning, waardoor er op de ene locatie meer slib opgewoeld wordt van de bodem dan op de andere locatie. Tabel 4.1 toont de gemeten karakteristieke vloed- en ebsnelheden bij frame A (halverwege de vaargeul) en frame B (ten oosten van de pier bij Holwerd) tijdens springtij en doottij. De tabel laat zien dat de vloed- en ebsnelheid bij frame B ongeveer 30% lager is dan bij frame A en de ebsnelheid is ongeveer 10% hoger. Deze relatief kleine verschillen in stroomsnelheden verklaren niet het grote verschil in gemeten sedimentconcentraties. In de modelsimulaties is de bodemschuifspanning bij frame B iets lager dan bij frame A voor het grootste deel van de tijd (zie Figuur 3.3 en Figuur 3.4 in paragraaf 3.1.1). Dat de gemeten concentraties bij Holwerd zo hoog zijn lijkt daardoor niet te worden veroorzaakt door lokale opwoeling van slib door stroming.

Tabel 4.1 Gemeten karakteristieke stroomsnelheden bij frame A en frame B (Perk, et al., 2020)

	Doottij		Springtij	
	Vloed	Eb	Vloed	Eb
Frame A (halverwege vaargeul)	0,9	0,7	1,2	1,3
Frame B (ten oosten van pier bij Holwerd)	0,6	0,8	0,9	1,4

Waarschijnlijk worden de hoge slibconcentraties bij de veersteiger van Holwerd (deels) veroorzaakt door opwoeling van slib door scheepsbewegingen zoals de Schottel pomp-jets van de veerboten en scheepsgolven die het gevolg zijn van het varen door een smalle vaargeul. Uit metingen blijkt inderdaad een verhoging van de concentraties bij aankomst van de veerboot (Perk, et al., 2019). Dit speelt een grotere rol bij de veersteiger van Holwerd dan verderop in de vaargeul door het manoeuvreren en versnellen van (veer)boten. Hydrodynamische veldmetingen hebben laten zien dat de veerboot een grote invloed heeft op de waterbeweging. Het effect van scheepsbewegingen op de slibdynamiek ontbreekt in de modelsimulaties. Dit is een mogelijke verklaring waarom de berekende concentraties bij de veersteiger van Holwerd (frame B) lager zijn dan in veldmetingen, terwijl de concentraties halverwege de vaargeul (frame A) redelijk goed gereproduceerd worden door het model.

#### 4.1.2 Baggeronderhoud en retourstroming

Om de gemeten baggervolumes te reproduceren is de verdeling van de sedimentatieflux over de twee bodemlagen aangepast. In eerste instantie was die verdeling gekalibreerd op basis van een vergelijking met metingen in de hele Waddenzee. Met die initiële instellingen was het berekende baggeronderhoud in de vaargeul tussen Holwerd en Ameland ongeveer een factor 5 te laag. Voorbeelden van fysische redenen waarom de verdeling van de sedimentatieflux over de twee

bodemlagen lokaal anders kan zijn is het voorkomen van *fluid mud*, extra dynamiek door ploegen of de Schottel-pompjets<sup>12</sup> van de veerboot.

Met verschillende modelsimulaties is geanalyseerd hoe het verspreiden van baggerspecie het baggeronderhoud beïnvloedt. In het uiterste geval wordt de baggerspecie niet teruggestort, maar uit het gebied onttrokken. In dat geval is er dus geen retourstroming; slib dat uit de vaargeul wordt gebaggerd zal niet nog eens in de vaargeul sedimenteren. Als alle baggerspecie verspreid zou worden op de stortlocatie die op relatief grote afstand van de vaargeul ligt, namelijk in de Zuiderspruit, dan is de retourstroming erg klein (~1% tijdens de simulatieperiode van 3 maanden). Hoe dichter de baggerspecie bij de vaargeul verspreid wordt, hoe groter de retourstroming wordt.

In een modelsimulatie met de huidige bagger- en stortstrategie wordt ongeveer 50% van het slib dat uit de vaargeul wordt gehaald op stroom gezet bij VA 33. Het overige deel wordt verspreid in het Scheepsgat (bij eb) en in de Zuiderspruit (bij vloed). In een modelsimulatie van 3 maanden leidt deze stortstrategie tot 10% meer baggeronderhoud in de vaargeul ten opzichte van een modelsimulatie waarin gebaggerd slib niet wordt teruggestort. Het grootste deel van die 10% is het gevolg van het op stroom zetten bij VA 33. Dat betekent dat een groot deel van het slib dat in het model op stroom wordt gezet nog tijdens de modelsimulatie opnieuw in de vaargeul terecht komt, en dus opnieuw gebaggerd moet worden. De retourstroming is daarmee overigens minder groot dan de 23-50% die op basis van eerdere analyses van baggervolumes geschat werd (Grasmeijer & Röbbke, 2018). Daarvoor zijn de volgende redenen te bedenken:

- De locatie en het moment waarop de baggerspecie wordt verspreid is in het model zo goed mogelijk geschematiseerd. Het is echter mogelijk dat de verspreiding in de uitvoering op een iets andere wijze en locatie plaatsvindt. Dit heeft invloed op de verdere verspreiding door stroming.
- Een belangrijke beperking voor de modelresultaten is de simulatietijd van drie maanden. Hierdoor wordt slib alleen bij de retourstroming geteld als het nog binnen de simulatieperiode opnieuw gebaggerd wordt. Er mist dus een lange termijn effect van het verspreiden op de slibconcentraties en het baggeronderhoud. Verwacht wordt dat de positieve feedback tussen het verspreiden en de baggervolumes op de lange termijn leidt tot accumulatie van slib in de vaargeul, met als gevolg grotere baggerhoeveelheden en een grotere retourstroming.
- In de modelresultaten is duidelijk te zien dat veel van het verspreide slib terecht komt in de omgeving van het doorlopend Dantziggat. Ondanks dat dit slib later alsnog in de vaargeul terecht kan komen (lange termijn effect), is het niet duidelijk of dit in werkelijkheid ook optreedt. Als dat niet het geval blijkt dan zou de dispersie (d.w.z. verspreiding) van slib vanuit de relatief diepe vaargeul richting dit gebied in het model (te) hoog zijn. Dit wordt mogelijk veroorzaakt doordat er geen terugkoppeling is van sedimentconcentraties naar de dichtheid in de hydrodynamische berekening, waardoor te veel verticale menging optreedt.

## 4.2 Aanbevelingen

Onzekerheden in de resultaten van de huidige studie leiden tot de volgende aanbevelingen voor vervolgonderzoek.

### Waarnemingen

- Langdurige metingen ( $\geq 1$  jaar) van slibconcentraties, saliniteit, stroomsnelheden en golfhoogtes op tenminste twee locaties tussen Holwerd en Ameland. Eén van de meetlocaties in een geul dichtbij de pier van Holwerd en de tweede in een geul dichtbij een verspreidingslocatie. Na een jaar kan de tweede meting verplaatst worden naar een locatie die niet wordt beïnvloed door scheepsbewegingen, baggeren en

---

<sup>12</sup> Deze pompjets zuigen water op en spuiten het onder zeer hoge druk er weer uit. Deze pompjets kunnen ook 360° draaien.

baggerspecieverspreiding, bijvoorbeeld het Dantziggat. Samen met de metingen dichtbij de pier van Holwerd moet hier langdurig ( $\geq 1$  jaar) worden gemeten. Op deze wijze kan zowel het effecten van baggeren en storten als de seizoensvariatie van de slibconcentraties in beeld worden gebracht

#### Modellering

- Bepalen van de gevoeligheid van de locatie en het moment waarop de baggerspecie wordt verspreid in het model op de slibconcentraties en de baggervolumes. Dit is mogelijk door het materiaal bijvoorbeeld een uur eerder of later te verspreiden, of door het materiaal 1 km stroomopwaarts of stroomafwaarts van VA33 te verspreiden.
- Het meenemen van scheepsbewegingen (b.v. pompjet-werking en scheepsgolven) in de modelsimulaties voor slibdynamiek. Deze kunnen worden vergeleken met de hierboven aanbevolen veldwaarnemingen.
- Het meenemen van ploegen in de modelsimulaties voor slibdynamiek.
- Maken van simulaties voor een langere periode ( $\geq 1$  jaar) om de seizoensvariatie in beeld te brengen en om het relatieve belang van baggeren en baggerspecieverspreiding op de slibconcentraties van deze seizoensvariatie te kunnen onderscheiden.
- Naast slib ook zand meenemen in de analyses en de modellering, omdat het gebaggerde materiaal in werkelijkheid bestaat uit zand en slib. De onderlinge interactie tussen zand- en slibdeeltjes zal daarnaast de erosie van beiden beïnvloeden.
- Verdere analyses waar het sediment na verspreiding wordt afgezet. Dit kan bijvoorbeeld met tracers in het veld of door het volgen van deeltjes in het simulatiemodel.

## 5 Conclusies

De slibdynamiek is berekend voor een periode van drie maanden tussen 1 januari 2019 en 1 april 2019. Om de invloed van de huidige verspreidingsstrategie in beeld te brengen, zijn simulaties gemaakt met baggeren maar zonder verspreiden en simulaties inclusief verspreiden. Deze zijn uitgevoerd met verschillende modelinstellingen, namelijk met de standaard instellingen en met verhoogde sedimentatie naar de bufferlaag.

- Uit recente waarnemingen blijkt dat het percentage slib in de bodem met 60-90% betrekkelijk hoog is in de omgeving van de pier bij Holwerd. Dit neemt af tot ongeveer 30-40% op 2 km van de pier en verder af tot ongeveer 5% op 5 km afstand van de pier. Deze waarnemingen komen overeen met die in eerdere waarnemingen waar het percentage slib in de eerste 3 km van de vaargeul ongeveer 75-80% bedroeg.
- De droge dichtheid van het bodemmateriaal bedraagt ongeveer  $500 \text{ kg/m}^3$  in de omgeving van de pier. Dit neemt toe tot  $1300\text{-}1500 \text{ kg/m}^3$  op 5 km van de pier bij Holwerd.
- In deze studie wordt gebruik gemaakt van een slibmodel zonder zand. Voor de eerste drie kilometer vanaf Holwerd is dit een redelijk goede weergave van de werkelijkheid. Verderop in de vaarweg speelt zand ook een belangrijke rol.
- De gemeten mediane valsnelheden en de 75-percentiel valsnelheden van suspensie monsters zonder anti-flocculatiemiddel genomen in februari 2019 liggen in de buurt van de valsnelheden van de twee slibfracties van 0,4 en 1,5 mm/s toegepast in het slibmodel. De valsnelheden van de suspensie monsters genomen in september 2019 zitten aan de ondergrens van die toegepast in het slibmodel. Verschillen kunnen te maken hebben met het moment van monsternamen in het seizoen of het moment in het getij.
- De kritische bodemschuifspanning voor erosie van de bufferlaag van  $0,80 \text{ N/m}^2$  die in het model wordt toegepast ligt dichtbij de waargenomen bodemschuifspanningen bij droge dichtheden ruwweg tussen de 500 en  $1000 \text{ kg/m}^3$ . Die van de makkelijk erodeerbare flufflaag van  $0,10 \text{ N/m}^2$  is logischerwijs veel lager omdat deze representatief voor de dunne laag op de bodem die ontstaat tijdens getijkentering.
- De berekende slibconcentraties komen redelijk goed overeen met metingen halverwege de vaarweg op ruim 6 km van de pier bij Holwerd. Met standaard instellingen is het verschil ongeveer 35%. Met verhoogde sedimentatie naar de bufferlaag is dit verschil iets hoger namelijk 37-38%. Ook de variatie van slibconcentraties gedurende het getij komt op deze locatie redelijk goed overeen met de metingen, met de grootste slibconcentraties tijdens maximale vloedstroom.
- De berekende slibconcentraties juist ten oosten van de pier bij Holwerd worden door het model onderschat. Het verschil tussen de metingen en berekeningen is op deze locatie ongeveer 58-63%. Wanneer de locatie in het model ongeveer 250 m naar het oosten wordt verschoven dan is het verschil 48-56%.
- Het verschil in berekend baggervolume tussen de simulaties zonder verspreiding en die met verspreiding is ongeveer 10-30% (afhankelijk van modelinstelling sedimentatie naar bufferlaag). In het model wordt dus meer gebaggerd in combinatie met verspreiding dan wanneer het gebaggerde slib uit het systeem wordt gehaald.
- Alles verspreiden in het Scheepsgat leidt tot een kleine 10% lager baggervolume en alles verspreiden in de Zuiderspruit leidt tot een kleine 15% lager baggervolume.

## 6 Referenties

De Lucas, M., Ibanez, M. & Winterwerp, H., 2016. *Analyse Vaargeul Holwerd Ameland. Overview Laboratory Analyses. Rapport 1230378-002-ZKS-0002.*, Delft, The Netherlands: Deltares.

Elias, E., 2019. *Een actuele sedimentbalans van de Waddenzee. Report 11203683-001-ZKS-0002*, Delft, The Netherlands: Deltares.

Grasmeijer, B. & Röbbke, B., 2018. *Hydromorfologische vervolgstudie vaarweg Holwerd-Ameland. Rapport 11201692-000-ZKS-0001*, Delft, The Netherlands: s.n.

Grasmeijer, B. & Van Weerdenburg, R., 2020. *Evaluatie Bochtafsnijding Vaarweg Ameland. Rapport 11205229-006-ZKS-0002*, Delft, The Netherlands: Deltares.

Herman, P. et al., 2018. *Mud dynamics in the Wadden Sea. Towards a conceptual model*, s.l.: Deltares report 11202177-000-ZKS-0011.

Herman, P. et al., 2016. *Analyse Vaargeul Holwerd-Ameland. Rapport 1230378-005-ZKS-0001*, Delft, The Netherlands: s.n.

Hurdle, D. & Stive, R., 1989. Revision of SPM 1984 wave hindcast model to avoid inconsistencies in engineering applications. *Coastal Engineering*, 12(4), pp. 339-351.

Perk, L., Van Rijn, L., Brinkkemper, J. & Koudstaal, K., 2019. *Metingen Holwerd-Ameland: Meetresultaten en laboratorianalyse metingen januari-maart 2019*, Lelystad, The Netherlands: WaterProof rapport WP2018\_1155\_R3r1.

Perk, L., Wesselman, D., Koudstaal, K. & Van Rijn, L., 2020. *Metingen Holwerd-Ameland: Meetresultaten en laboratorianalyse T1 metingen sept-okt 2019*, Lelystad, The Netherlands: Waterproof rapport WP2019\_1176\_R1r1.

Rijkswaterstaat, 1998. *Sedimentatlas Waddenzee*, The Hague, The Netherlands: Rijkswaterstaat, Ministerie van Verkeer en Waterstaat.

Swart, D. H., 1974. *Offshore sediment transport and equilibrium beach profiles*, s.l.: PhD thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.

Van Kessel, T., 2016. *Analyse vaargeul Holwerd-Ameland. Veldmetingen vaargeul Holwerd. Rapport 1230378-000-ZKS-0018*, Delft, The Netherlands: Deltares.

Van Kessel, T. et al., 2011. Modelling the seasonal dynamics of SPM with a simple algorithm for the buffering of fines in a sandy seabed. *Continental Shelf Research*, Volume 31, pp. S124-S134.

Van Rijn, L., Cleveringa, J. & Van Kessel, T., 2016. *Analyse Vaargeul Holwerd-Ameland. Analyse historische baggergegevens en Iodingen. Rapport 1230378-000-ZKS-0011*, Delft, The Netherlands: Deltares.

Van Rijn, L., n.d. s.l.: s.n.

Van Weerdenburg, R. & Zijl, F., concept. *Development of a Delft3D-FM model of the Dutch Wadden Sea - Model Setup and Validation of DWSM*, s.l.: Deltares report.

Villars, N. et al., 2016. *Analyse vaargeul Holwerd - Ameland: Verkennende studie naar maatregelen om vertragingen en baggerbezwaar op te lossen*, s.l.: Deltares rapport 1230378-000-ZKS-0017.

Vroom, J., Van Weerdenburg, R., Smits, B. & Herman, P., 2020. *Modellering slibdynamiek voor de Waddenzee: Kalibratie voor KRW Slib*, s.l.: Deltares rapport 11205229-001-ZKS-0001.

Winterwerp, J. & Van Kesteren, W., 2004. *Introduction to the Physics of Cohesive Sediment in the Marine Environment*. Delft, The Netherlands: Elsevier.

Zijl, F., Veenstra, J. & Groenenboom, J., 2018. *The 3D Dutch Continental Shelf Model - Flexible Mesh (3D DCSM-FM): Setup and validation*, s.l.: Deltares rapport 1220339-000-ZKS-0042.

# A Bijlagen

## A.1 Bijlage 1: Baggervolumes vaarweg Ameland per maand vanaf 2018

TabelApX A.1 Droge dichtheid in beun (ton/m<sup>3</sup>) per baggervak: zeer grove waarden (Rijkswaterstaat)

	Veerdam Holwerd	Holwerd- VA33	VA13- VA33	VA9- VA13	VA4-VA6	VA4- Reegeul	Reegeul	Nes haven
<i>De Vries &amp; Van der Wiel</i>	0.57	0.56	0.56	0.69	0.94	nvt	0.66	0.66
<i>Van der Lee</i>	0.36	0.36	0.36	0.65	0.65	0.65	0.65	0.36
<i>Keuze droge dichtheid</i>	0.4	0.4	0.4	0.7	0.8	0.7	0.6	0.5

TabelApX A.2 Baggervolumes (Rijkswaterstaat)

Jaar-maand	Veerdam Holwerd	Holwerd- VA33	VA13- VA33	VA9- VA13	VA4-VA6	VA4- Reegeul	Reegeul	Nes haven	Aanleg bochtaf- sijding
<b>2018-jan</b>	2480	49600		30500	15550	0	1138	1910	
<b>feb</b>	3640	49900		30250	24870	0	5500	2730	
<b>mrt</b>	2220	55500		76700	25200	0	4800	540	
<b>apr</b>	4322	97300		52850	16700	7500	0	600	
<b>mei</b>	5355	117400		61750	30000	7000	600	4080	
<b>jun</b>	6280	101060		53200	25500	0	600	3790	
<b>jul</b>	4420	105850		17600	25760	24500	1800	2200	
<b>aug</b>	4400	66390		8200	18649	6000	0	3860	
<b>sep</b>	3500	103700		28785	18080	0	600	550	
<b>okt</b>	2480	118000		105000	13600	16700	1200	1380	
<b>nov</b>	4140	111800		19283	13370	17500	2400	2450	
<b>2018-dec</b>	2630	79300		7700	18600	0	0	1750	
<b>2019-jan</b>	1250	90970		7200	14000	0	1800	2670	63262
<b>feb</b>	1575	77000		32300	20500	1500	600	1860	141965
<b>mrt</b>	2280	51600		35200	6380	8500	0	1460	114496
<b>apr</b>	4610	47400	75600	24970	18380	9100	3000	1390	
<b>mei</b>	3750	54600	88630	15600	18250	13100	1200	2570	
<b>jun</b>	4340	34800	44506	9023	13474	600	0	1140	
<b>jul</b>	4020	54200	61893	24271	30123	0	1800	1150	
<b>aug</b>	2725	34940	28268	13750	7573	0	0	0	
<b>sep</b>	5180	81340	38900	19140	10700	0	1800	2590	
<b>okt</b>	4350	85010	23950	19450	8680	16000	600	1710	
<b>nov</b>	2610	72450	24300	20720	7500	7500	600	2020	
<b>2019-dec</b>	1740	33400	28600	22640	3440	10500	0	1730	
<b>2020-jan</b>	4415	39950	20330	15680	8670	2500	0	1695	
<b>feb</b>	1945	62480	12680	17800	600	3000	915	3755	
<b>mrt</b>	4875	86620	41420	51500	11140	7500	900	4105	



Jaar-maand	Veerdam Holwerd	Holwerd- VA33	VA13- VA33	VA9- VA13	VA4-VA6	VA4- Reegeul	Reegeul	Nes haven	Aanleg bochtaf- snijding
apr	8400	89900	28100	43800	9920	5600	1200	2725	
mei	7775	75150	25900	35900	13200	6000	4000	2590	
jun	7500	94040	29580	24400	11390	3500	1800	2860	
<b>Volume gemiddeld (m<sup>3</sup>)</b>	3974	74055	38177	30839	15327	5803	1295	2129	
<b>Massa gemiddeld<sup>13</sup>(ton)</b>	1589	29622	15271	21587	12261	4062	777	1064	

---

<sup>13</sup> Uitgaande van keuze droge dichtheid uit TabelApx A.1

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](http://www.deltares.nl)