

## Memo

### Aan

Jurre De Vries, Ernst Lofvers, Almer de Swaaf

### Kopie aan

Ana Colina Alonso, Roy van Weerdenburg, Thijs van Kessel, Julia Vroom

<b>Datum</b>	<b>Ons kenmerk</b>	<b>Aantal pagina's</b>
18 augustus 2022	11208040-004-ZKS-0001	1 van 21
<b>Contactpersoon</b>	<b>Doorkiesnummer</b>	<b>E-mail</b>
Bob Smits	+31(0)88 335 7513	Bob.Smits@deltares.nl

### Onderwerp

Modelberekeningen morfologische studie Vaargeul Boontjes

## Samenvatting

In het kader van de evaluatie 'Vaargeul Boontjes' is een morfologische studie uitgevoerd naar de systeemdynamiek en de verwachte baggerhoeveelheden voor vaargeulonderhoud. Dit memo beschrijft op hoofdlijnen de eerste resultaten van de modellering voor de morfologische studie, die als inbreng worden meegenomen voor de ecologische studie en de MKBA. Deze drie deelprojecten vormen gezamenlijk de basis voor de evaluatie van de vaargeul Boontjes. Voor de morfologische studie is in 2021 een data analyse uitgevoerd, waaruit bleek dat het gehele gebied een sedimenterende (verlandende) trend laat zien. In 2022 is daar een numerieke modelstudie aan toegevoegd, waarvoor beheersscenario's zijn gesimuleerd met verschillende vaargeuldimensies en verspreidingsstrategieën. Hiervoor is het bestaande 3D-slibmodel voor de Waddenzee (DWSM) lokaal verfijnd tot een resolutie van 30 m en toegepast voor de volgende scenario's: (1) terugkeer naar de 'natuurlijke situatie' vóór drempelverwijdering, (2) handhaving van de huidige streefdiepte van -3.8 m NAP, (3) een verdiept scenario met streefdiepte -4.7 m NAP (alle drie met het huidige verspreidingsbeleid) en (4) een scenario met de huidige streefdiepte, maar zonder terugstorten van gebaggerd materiaal.

Uit hydrodynamische modelresultaten blijkt dat een verdieping (c.q. verondieping) van de vaargeul leidt tot een lichte toename (c.q. afname) van getijdenbeten en eveneens tot een kleine toename (c.q. afname) van piek eb- en vloednelheden. Uit de gesimuleerde baggerhoeveelheden blijkt het verschil tussen deze modelscenario's zeer gering te zijn (gesimuleerde effecten <5%) en met name te ontstaan tijdens hoogdynamische condities, wat impliceert dat de resultaten sterk afhankelijk zijn van de gekozen forcering (bijv. het aantal stormen). Een kleine verlaging van het baggervolume (4% lager) kan worden bereikt bij een kleinere streefdiepte. Het verdiepen van de vaargeul naar een streefdiepte van -4.7 m leidt tot een kleine toename van het baggervolume (2% hoger). Het onttrekken van het gebaggerde materiaal door niet terug te storten maakt geen noemenswaardig verschil. Verder blijkt uit een extra modelscenario met een bodemligging uit 2003 dat de resultaten veel gevoeliger zijn voor de grootschalige morfologische ontwikkeling (65% lager baggervolume) dan voor de lokale vaargeuldimensies (gesimuleerde effecten <5%).

Met de huidige modelopzet en -instellingen wordt de netto aanslibbing in de vaargeul Boontjes onderschat. In combinatie met een versimpelde 1D analyse geven de modelresultaten echter goed inzicht in de relatieve effecten van de scenario's. De modelresultaten zijn doorvertaald naar een prognose voor jaarlijkse onderhoudsbaggercijfers (zie Tabel 4), waarbij rekening is gehouden met het aandeel zand en jaarlijkse fluctuaties in de forcering. Hierbij zijn voor de huidige situatie (scenario B) de ondergrens (117.000 m<sup>3</sup> per jaar) en bovengrens (307.000 m<sup>3</sup>

per jaar) bepaald aan de hand van de waargenomen gemiddelde jaarlijkse baggerhoeveelheden in de periode 2017-2021 en de bijbehorende standaarddeviatie.

Voor een scenario waarin de vaargeul niet langer onderhouden wordt, is een inschatting gemaakt van de morfologische ontwikkeling van de geul. De geul zal in dat geval opvullen totdat een evenwichtsprofiel is bereikt. Aan de hand van een empirische relatie wordt ingeschat dat de evenwichtsdiepte van de geul ongeveer -2.4 m NAP is voor het huidige kombergingsvolume. In de toekomst zal de geul met verdere afname van het kombergingsvolume nog verder kunnen verondiepen richting orde -2 m NAP, mogelijk zelfs verder.

Tot slot is ook een eerste indicatie gegeven voor de ontwikkeling van de baggervolumes richting 2050 op basis van empirische relaties en *expert judgement*. Hierbij wordt opgemerkt dat deze ontwikkeling sterk gestuurd zal worden door de morfologische ontwikkeling van het gebied, waarover nog veel onzekerheden bestaan. Op basis van de data analyse van de historische morfologische ontwikkeling wordt aangenomen dat de afname van het kombergingsvolume over de afgelopen 30 jaar zal doorzetten in de komende 30 jaar. In combinatie met een gelijkblijvende uitvoeringswijze van de baggerwerkzaamheden en gelijkblijvende sedimentaanvoer zal dat leiden tot een toename in de baggervolumes. Aangezien de geschatte afname van het kombergingsvolume voor de komende 30 jaar vrij gering is (ca. 6%), wordt in die periode geen extreme toename in baggervolumes verwacht. Afhankelijk van de invulling van de empirische relaties, wordt de toename van de jaargemiddelde baggervolumes richting 2050 geschat op maximaal 29%.

## 1 Inleiding

### 1.1 Context

In navolging van de bestuursovereenkomst 'Financiering en realisatie van de Werken aan de Vaarweg Harlingen – Kornwerderzand (Boontjes)' uit 2009 wordt dit jaar (2022) een evaluatie van het beheer van de vaargeul uitgevoerd en worden nieuwe afspraken gemaakt voor de komende jaren. In dat kader worden een morfologische studie, een ecologische studie en een MKBA (Maatschappelijke Kosten-Baten Analyse) uitgevoerd. Dit memo beschrijft op hoofdlijnen de eerste resultaten van de modellering voor de morfologische studie, die als inbreng worden meegenomen voor de ecologische studie en de MKBA.

Daarnaast zal in de tweede helft van 2022 nog verder worden gewerkt aan de volgende aspecten (niet in dit memo):

1. nadere verklaring waarom ontwikkeling van het waargenomen baggervolume anders verloopt dan tijdens de Planstudie Drempelverwijdering Boontjes was voorspeld en verbeterd inzicht in het effect van de drempelverwijdering; en
2. inzicht in de te verwachten (autonome) morfologische ontwikkeling en sturende processen op basis van historische trends op verschillende tijd-ruimteschalen en inzichten uit numerieke modelstudie.

### 1.2 Samenvatting resultaten data analyse 2021

De morfologische ontwikkeling en aandrijvende processen zijn in 2021 (op hoofdlijnen) in beeld gebracht middels een data analyse (Colina Alonso et al., 2021). Ook zijn de gegevens van de baggerwerkzaamheden tussen 2012 en 2020 bestudeerd om inzicht te vergroten in de oorzaak van de toename in het baggervolume en in de te verwachten baggervolumes in de toekomst. De belangrijkste inzichten uit deze analyses m.b.t. de systeemwerking van de vaargeul Boontjes en aandrijvende processen achter het vaargeulonderhoud waren:

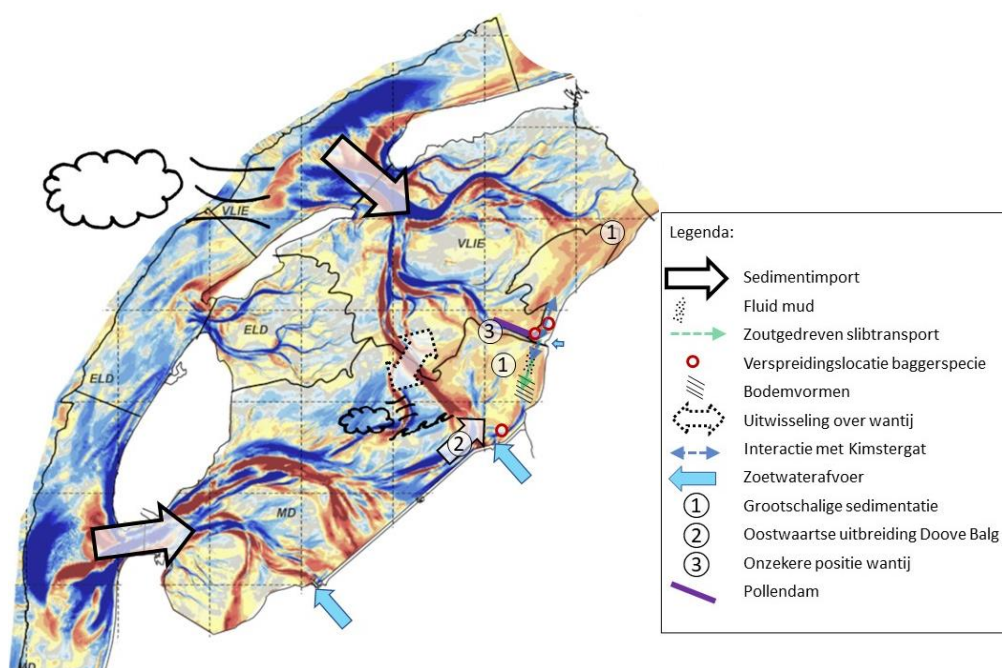
- De grootschalige en lange termijn sedimentatietrend aan de landwaartse zijde van de bekkens leidt, ook in de toekomst, tot verkleining van het kombergingsvolume van de geul Boontjes en leidt tot toenemende sedimentatie van zand en slib in de vaargeul.

- De ontwikkeling van de Boontjes wordt verder beïnvloed door de ontwikkeling van het noordwaarts gelegen Kimstergat en de uitwisseling daarmee, de aanwezigheid van de Pollendam en de zoetwaterafvoer vanaf de Afsluitdijk (en gerelateerde reststromingen).
- Er vindt mogelijk toegenomen retourstroming van slib plaats vanaf de verspreidingslocaties nabij Harlingen. Dit geldt in mindere mate voor de verspreidingslocatie ten zuiden van de Boontjes, omdat daar met name zand wordt verspreid
- Door stormen (uit het ZW-W) wordt er veel zand en slib opgewoeld en afgezet in de vaargeul. Door de drempelverwijdering en de inmiddels hoger gelegen platen speelt dit effect nu naar verwachting sterker dan in het verleden.

Verder kwamen uit de gegevens van de baggeraar de volgende zaken naar voren:

- In het noordelijk deel van de Boontjes wordt tijdens de zomerperiode fluid mud gevormd, in het zuidelijk deel is de bodem zandiger en zijn migrerende bodemvormen aanwezig.
- Van het totale gebaggerde materiaal is ongeveer 80% slib en 20% zand. 81% van het gebaggerde materiaal wordt in *Kimstergat 1* gestort en 19% in stortlocatie *Boontjes*.
- Daarnaast is er slibrijker materiaal gebaggerd dan verondersteld, waardoor de gebaggerde volumes veel sterker zijn toegenomen (factor 3.9) dan de gebaggerde massa (factor 1.7 à 2.7).

De bovenstaande bevindingen zijn samengevat in het conceptuele model gepresenteerd in Figuur 1.1 (zie p. 52-54 van Colina Alonso et al.(2021) voor de onderbouwing hiervan).



Figuur 1.1 Samenvatting van de systeemwerking.(Colina Alonso et al., 2021) Ontwikkeling van de Boontjes wordt gestuurd door grootchalige processen: sedimentimport door de zeegaten, sedimentatie langs de vastelandskust (①), de morfologische ontwikkeling van de Doove Balg (②), de initiële uitbreiding van het Marsdiep naar het oosten en de (onzekere) positie van het wantij (③) en de grote uitwisseling over het wantij. De stromingspatronen zijn complex door de aanwezigheid van de Pollendam, de zoetwaterafvoer en samenhangend zuidwaarts sedimenttransport nabij de bodem. In de noordelijke Boontjes is fluid mud aanwezig, terwijl de zuidkant juist wordt gekenmerkt door zandige bodemvormen. Door wind en golven gedreven sedimenttransport leiden tot sedimentatie in de vaargeul, waarbij onder dynamische condities sediment vanaf de omringende platen wordt opgewoeld en in de vaargeul wordt afgezet. Verspreiding van baggerspecie kan bijdragen aan lokaal grotere sedimentbeschikbaarheid nabij de Boontjes en aan verhoogd baggerbezwaaar.

## 1.3 Doelstelling

De gehele morfologische studie in het kader van de evaluatie van het beheer van de vaargeul richt zich op de doorvertaling van de inzichten die zijn opgedaan uit de data analyse en modellering naar optimalisatie van het beheer t.a.v. baggervolumes, vaargeuldimensies en verspreidingsstrategie. Het doel van dit memo en de daarvoor uitgevoerde modellering is om de bevindingen uit de morfologische studie vast te leggen en beschikbaar te maken voor de ecologische studie en MKBA. Met de modellering worden vier beheersscenario's getoetst aan de hand van de voorspelde baggervolumes voor vaargeulonderhoud.

## 1.4 Aanpak

Het bestaande Dutch Wadden Sea Model - Water Quality (DWSM) in Delft3D Flexible Mesh Water Quality (D-WAQ), dat is opgezet in het kader van het project KRW slib, is lokaal verfijnd en ingezet voor deze studie. Met behulp van dit model wordt een inschatting gemaakt van baggervolumes onder de verschillende beheersscenario's (met verspreiden), zoals gedefinieerd door de projectgroep Evaluatie Beheer Vaargeul Boontjes:

- a. Stoppen met baggeren, terugkeer naar natuurlijke situatie. (N.B. Hiervoor gebruiken we nu scenario bodemligging 2020 met daarin de drempel teruggeplaatst).
- b. Handhaven profiel NAP -3,80 m en 100 m breed (huidige situatie, referentiesom).
- c. Aanbrengen van een overdiepte in het profiel, tot NAP -4,70 m en 100 m breed.

Met behulp van het model wordt een inschatting gemaakt van baggervolumes onder verschillende verspreidingsscenario's, te weten:

1. wegbrengen naar huidige verspreidingslocaties (huidige situatie, referentiesom)
2. slib uit het systeem halen (aan land brengen). Verschil van 1 en 2 geeft inzicht in de grootte van de retourstroom.

Het is belangrijk om te beseffen dat in D-WAQ alleen slib wordt gesimuleerd, dus geen zand. Zoals hierboven vermeld bestaat ongeveer 80% van het huidige gebaggerde sediment uit slib. De baggervolumes slib onder de verschillende scenario's worden met het model berekend voor het jaar 2019.

Daarnaast wordt een doorvertaling gemaakt van de modelresultaten om een inschatting te komen van het totale baggervolume (zand én slib) voor 2022. Hierbij worden de modelresultaten gebruikt om relatieve (procentuele) verschillen tussen scenario's te bepalen. De zandvolumes worden impliciet meegenomen in de doorvertaling naar te de te verwachten baggervolumes (zie ook paragraaf 4.2). Daarnaast wordt een ruwe inschatting gemaakt voor 2050 op basis van de modelresultaten voor 2022, trends in de morfologische ontwikkeling en trends in de baggervolumes.

## 2 Modelopzet

### 2.1 Update Waddenzee slibmodel

De hydrodynamische modelschematisatie *dflowfm3d-waddenzee\_200m-j17\_6-v1* is het uitgangspunt voor DFlow FM schematisaties in de Waddenzee. Het 3D-slibmodel (*dflowfm3d\_dwaq\_slib-waddenzee\_200m-j17\_6-v1*) maakt gebruik van deze hydrodynamische modelschematisatie voor simulaties van de slibdynamiek. De opzet en kalibratie van dit model zijn uitgebreid beschreven in Vroom, et al. (2020) en samengevat in een factsheet<sup>1</sup>. Het domein van het Dutch Wadden Sea Model (DWSM) omvat de Waddenzee, het Eems-Dollard estuarium en het nabijgelegen deel van de Noordzee.

Voor dit project is de resolutie lokaal verhoogd tot ongeveer 30 m in en rondom de vaargeul Boontjes, zie Figuur 2.1. Het Molenrak is opgenomen tot ongeveer 60 m resolutie en het Kimstergat valt gedeeltelijk binnen 30 m en gedeeltelijk binnen 60 m resolutie. Deze roosterresolutie was in dit project de maximale haalbare resolutie om de rekentijden praktisch

---

<sup>1</sup> Factsheet D-Flow FM 3D & D-Water Quality Slib Waddenzee

haalbaar te houden. Het kost hierbij ongeveer 6 dagen rekentijd om 3 maanden te simuleren (d.w.z. op 20 rekenkernen op het Deltares rekencluster).

Als simulatieperiode is de periode juni tot en met augustus 2019 gekozen. Binnen deze periode zien we een aardige variatie in windsnelheden en -richtingen (zie Figuur 2.2 en Figuur 2.3) en deze periode wordt als representatief beschouwd voor de gemiddelde condities in het kalenderjaar 2019. Extreme stormen blijven met de keuze voor de simulatieperiode echter buiten beschouwing. De randvoorwaarden voor waterbeweging, temperatuur en saliniteit op open modelranden waren voor deze periode reeds beschikbaar vanuit het 3D Dutch Continental Shelf Model (DCSM) model (Zijl et al., 2018). Meteorologische forcering is gebaseerd op ERA5 data. Afvoeren uit de Eems en bij de spuilsluizen van Den Oever, Kornwerderzand en Lauwersoog, zijn meegenomen op basis van gemeten (spui)debieten.

De slibdynamiek wordt in het model gesimuleerd aan de hand van de sedimentatie- en erosieformuleringen van Partheniades (1965) en het buffermodel (Van Kessel et al., 2011), waarbij onderscheid wordt gemaakt in een (mobiele) flufflaag en een (minder mobiele) bufferlaag. In het model wordt het slib dat in de vaargeul terechtkomt (boven de streefdiepte) gebaggerd en vervolgens verspreid op de daarvoor gespecificeerde stortlocaties. Daarmee wordt het aangeslibde materiaal in het model afhankelijk van het scenario herverdeeld of onttrokken.

## 2.2 Modelscenario's

Voor de modelscenario's is de bodemligging in de vaargeul aangepast (zie Figuur 2.4 en Figuur 2.5). Ook verschillen de toegepaste bagger- en verspreidingsstrategieën.

### Scenario A: terugkeer naar natuurlijke situatie

Aangezien een morfostatische simulatie niet geschikt is om de bodemligging voor een nieuw morfologisch evenwicht zonder baggeren en storten te berekenen, is ervoor gekozen om het scenario 'Terugkeer naar natuurlijke situatie' op een andere manier te simuleren. Gezien de meeste sedimentatie tegenwoordig (scenario B) plaatsvindt op en rond de vroegere drempel, is de drempel geprojecteerd op de huidige situatie. De bodemligging in de vaargeul is daarbij gebaseerd op de bodemligging van 2012, vóór de drempelverwijdering, terwijl de omliggende morfologie afkomstig is uit de periode 2015-2017. Op die manier wordt een inschatting gedaan van het onderhoud aan een vaargeul die niet veel verder is uitgebaggerd dan zijn natuurlijke ligging (d.w.z. geen drempelverwijdering).

We modelleren een baggerstrategie waarbij er wordt gebaggerd wanneer de geuldiepte netto boven de initiële bodemligging zou komen. Hierbij wordt het gebaggerde materiaal uit de noordelijke Boontjes (vakken 1-3, zie Figuur 3.1) binnen het stortvak Kimstergat 1 verspreid. Het slib dat uit de zuidelijke Boontjes gebaggerd wordt (vakken 4 en 5, zie Figuur 3.1) wordt tijdens eb in stortvak Boontjes (bij Kornwerderzand) verspreid.

### Scenario B: huidige situatie

Voor de huidige situatie zijn de streefdiepte van -3,80 m NAP en een breedte van 100 m aangehouden voor de vaargeul. De basis bodemdata uit het model *dflowfm3d\_dwaq\_slib-waddenzee\_200m-j17\_6-v1* is voor de Westelijke Waddenzee (Marsdiep t/m het Vlie bekken) vervangen met de meest recente Vaklodingen data die beschikbaar was bij aanvang van dit project, namelijk de Vaklodingen data uit 2015-2017. Deze data is geïnterpoleerd op de verhoogde roosterresolutie van ongeveer 30 m. In de vaargeul Boontjes is de bodem vervolgens vervangen door data afkomstig uit recente hoge-resolutie peilingen die zijn uitgevoerd t.b.v. vaargeulonderhoud (gemeten in januari 2019, nadat de geul op diepte was gebracht).

We modelleren een baggerstrategie waarbij er wordt gebaggerd wanneer de geuldiepte boven de streefdiepte zou komen. De verspreidingsstrategie van dit scenario is gelijk aan de strategie in scenario A. Hierbij wordt het gebaggerde materiaal uit de noordelijke Boontjes (vakken 1-3, zie Figuur 3.1) binnen het stortvak Kimstergat 1 verspreid. Het slib dat uit de zuidelijke Boontjes gebaggerd wordt (vakken 4 en 5, zie Figuur 3.1) wordt tijdens eb in stortvak Boontjes (bij Kornwerderzand) verspreid.

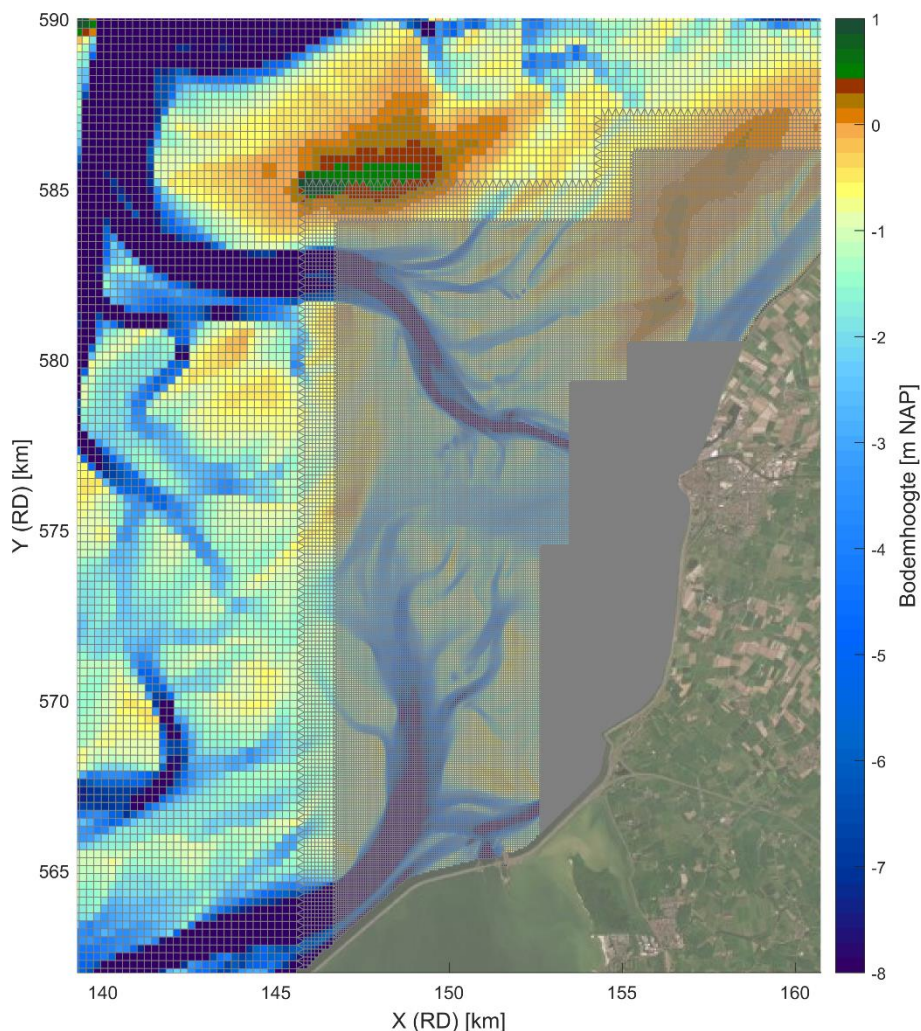
### Scenario C: verdiepte ligging

Voor het scenario met verdiepte ligging zijn een streefdiepte van -4,7 m NAP en een breedte van 100 m aangehouden. De bodemligging is binnen de vaargeul op minimaal -4,7 m geplaatst door, binnen het polygoon waar gepeild en gebaggerd is, de bodemdata die ondieper was dan -4,7 m te vervangen door -4,7 m.

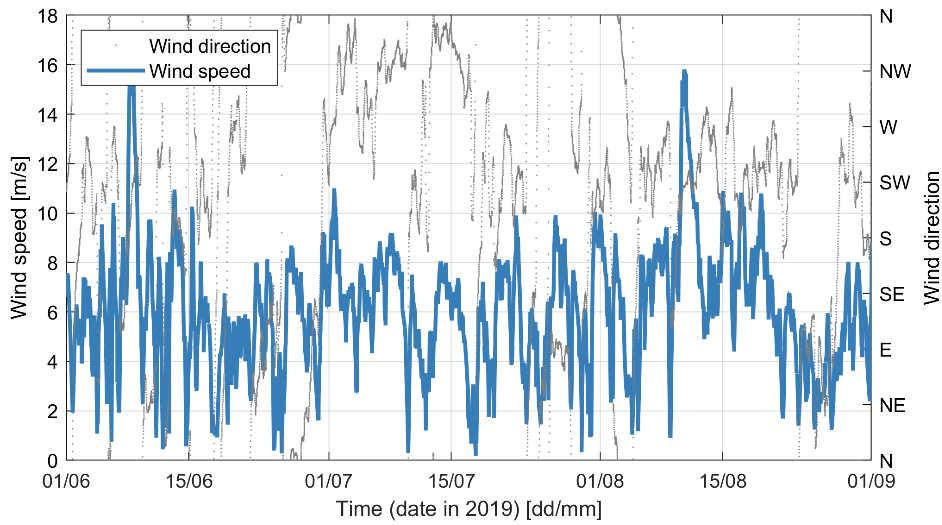
De bagger- en verspreidingsstrategie van dit scenario is gelijk aan de strategie in scenario's A en B. Hierbij wordt het gebaggerde materiaal uit de noordelijke Boontjes (vakken 1-3, zie Figuur 3.1) binnen het stortvak Kimstergat 1 verspreid. Het slib dat uit de zuidelijke Boontjes gebaggerd wordt (vakken 4 en 5, zie Figuur 3.1) wordt tijdens eb in stortvak Boontjes (bij Kornwerderzand) verspreid.

### Scenario D: wel baggeren maar niet verspreiden

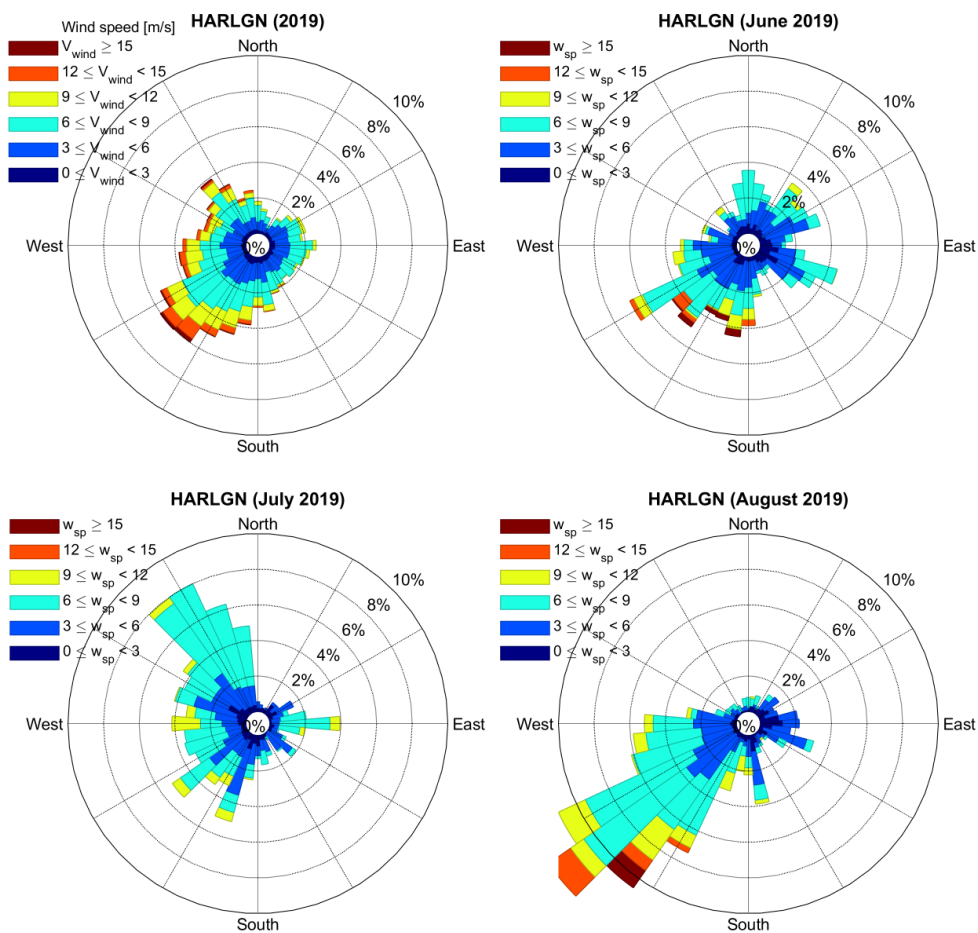
In dit scenario wordt het gebaggerde materiaal uit de vaargeul niet verspreid in de daarvoor bestemde stortvakken, maar onttrokken uit het model domein. De gehandhaafde bodemligging en streefdiepte zijn gelijk aan scenario B.



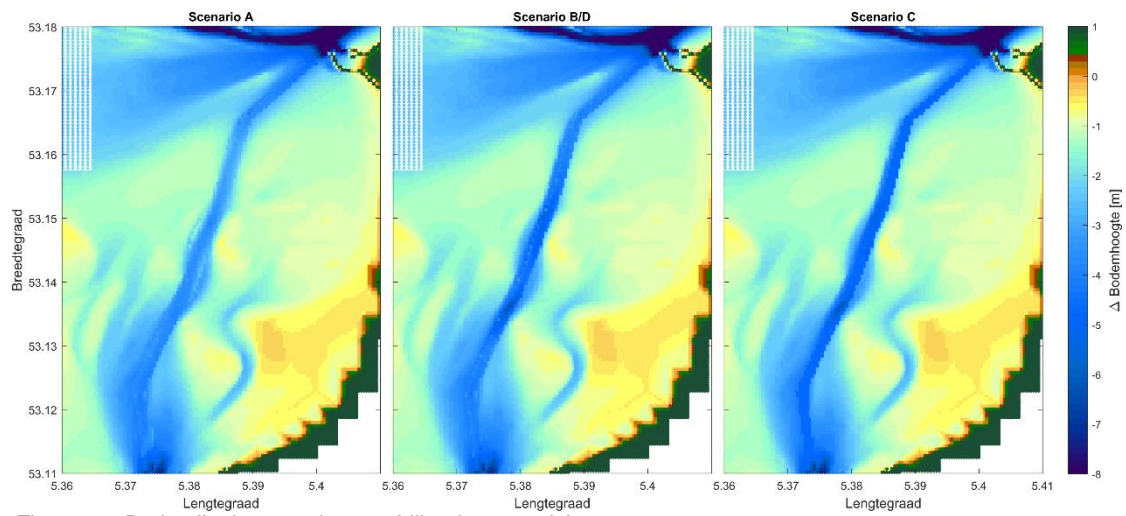
Figuur 2.1 Rooster met lokale roosterverfijningen geprojecteerd op bodemligging (grafische resolutie beperkt de zichtbaarheid van de individuele roostercellen). Eerst wordt er vanuit ~230 m resolutie van de omringende Waddenzee verfijnd naar ~115m resolutie; vervolgens wordt direct verfijnd naar ~60 m resolutie voor Molenrak en een gedeelte van het Kimstergat; uiteindelijk wordt verfijnd naar ~30 m resolutie voor de vaargeul Boontjes en de rest van het Kimstergat.



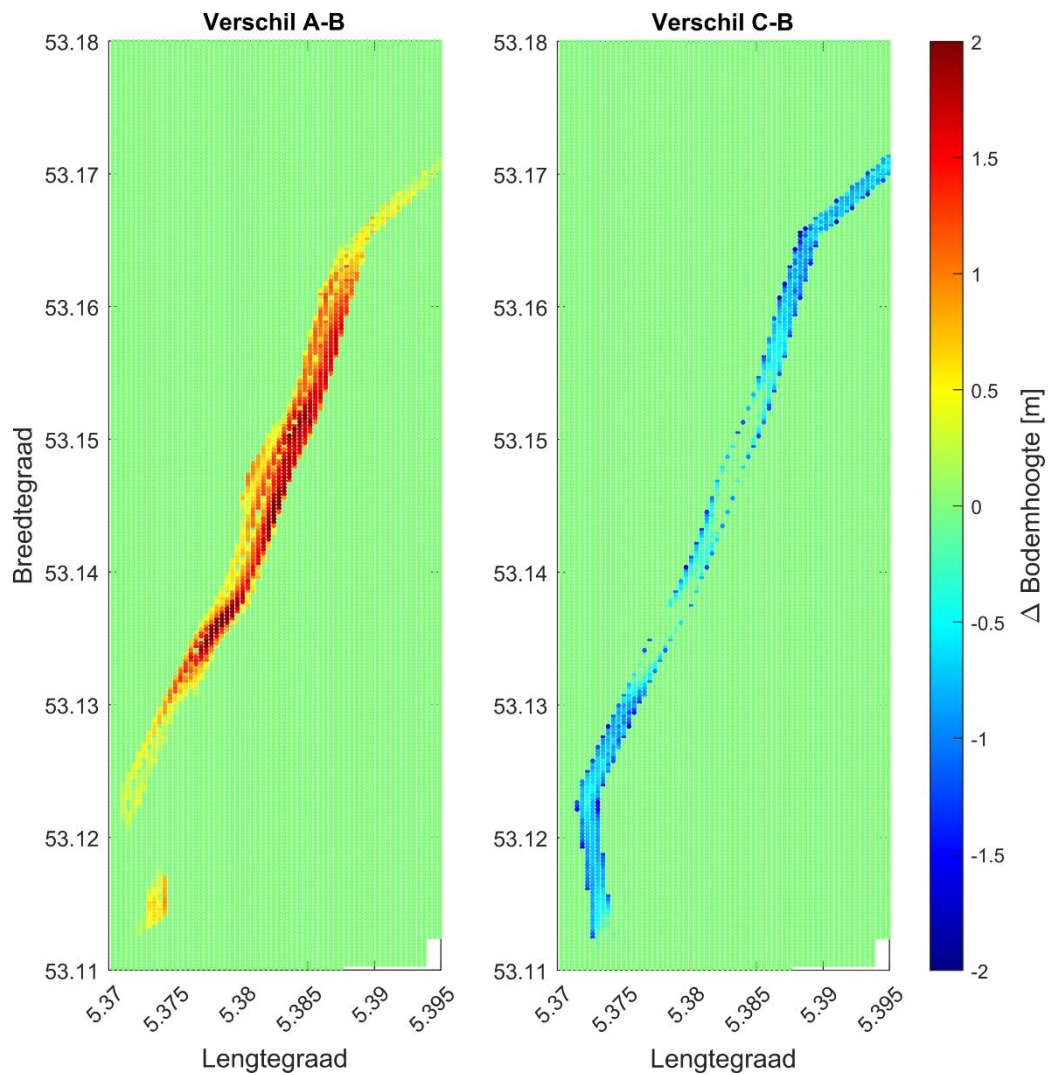
Figuur 2.2 Windsnelheden en -richtingen in de gemodelleerde periode in Harlingen.



Figuur 2.3 Windroos van Harlingen 2019 (linksboven) en per maand uitgesplitst voor juni-augustus



Figuur 2.4 Bodemligging van de verschillende scenario's



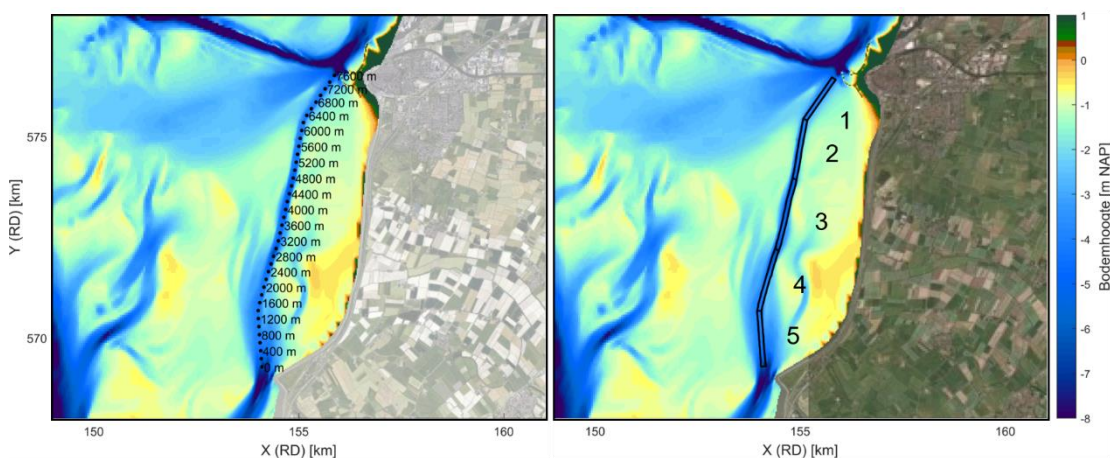
Figuur 2.5 Verschil in bodemligging tussen de verschillende scenario's. Rode kleuren geven een hogere bodemligging aan t.o.v. scenario B en blauwe kleuren een lagere bodemligging.



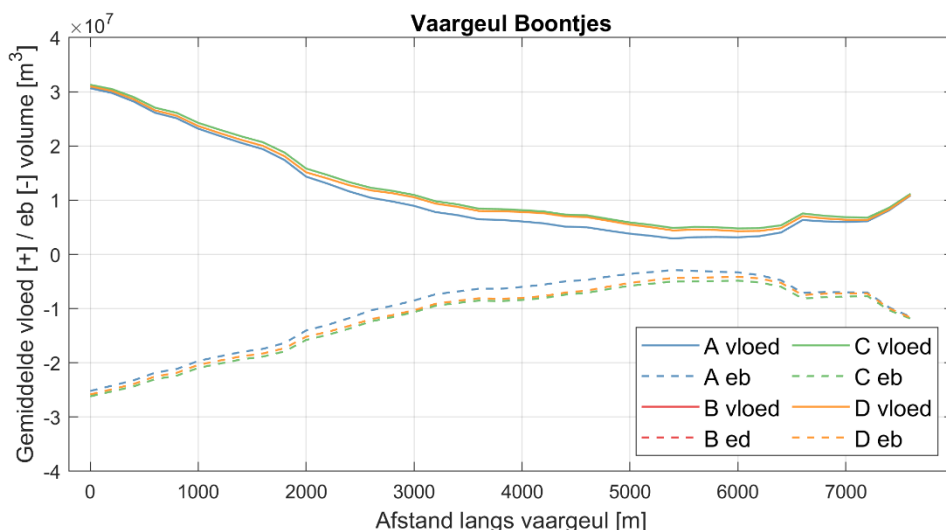
## 3 Modelresultaten

### 3.1 Samenvatting hydrodynamische modelresultaten

De verschillende bodemliggingen geven verschillende eb- enloedvolumes door de vaargeul. Deze effecten zijn ruimtelijk verschillend over de lengte van de vaargeul. Figuur 3.1 (linker plot) toont de definitie van de afstand langs de vaargeul die wij in deze analyse hanteren. Figuur 3.2 toont de gemiddelde volumes langs de vaargeul per scenario. De volumes zijn het grootst in het zuidelijke deel en nemen af richting het noorden. In de laatste 1,5 km (afstand = 6000-7600 m) nemen ze weer licht toe. In het geval er een drempel aanwezig is (scenario A) zorgt dit voor een vermindering van de gemiddelde getijddebieten t.o.v. de huidige situatie (scenario B). Dit effect zien we zowel in de eb- als in de loedvolumes terug en speelt met name in het middelste deel van de vaargeul (afstand: 2000-6500 m). Andersom leidt het verdiepen van de vaargeul (scenario C) tot een lichte toename van de debieten. Scenario D geeft dezelfde volumes als scenario B, gezien de bodemligging hierin gelijk is.



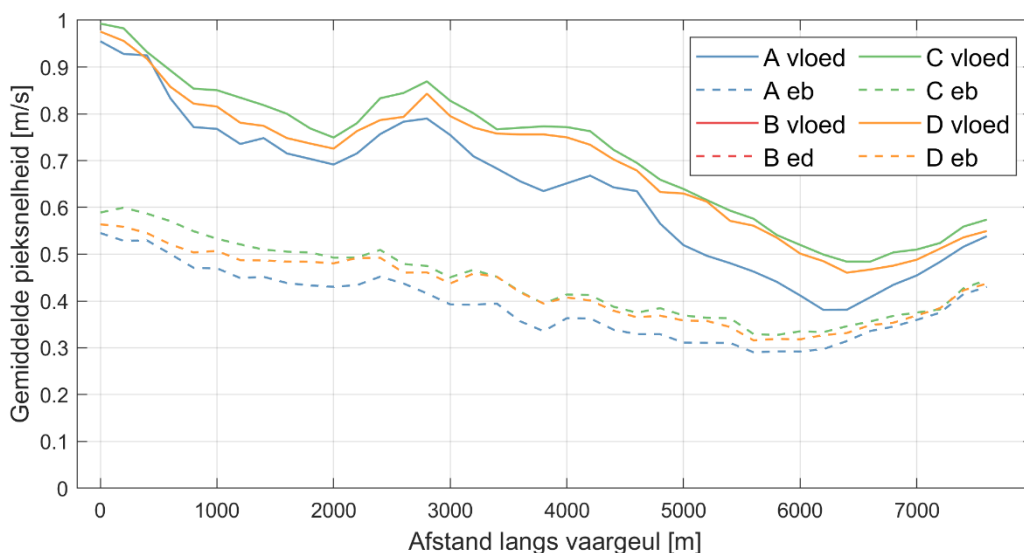
Figuur 3.1 Links: lengte langs de vaargeul. Rechts: definitie vakken zoals gebruikt voor de analyse van de baggervolumes



Figuur 3.2 Gemiddelde eb- enloedvolumes langs de vaargeul, per scenario. De afstand langs de vaargeul is van zuid naar noord gedefinieerd. De piek volumes laten gelijkaardige trends zien. De volumes in scenario's B en D zijn identiek.

Figuur 3.3 toont het verloop van de pieksnelheden (voor eb en vloed) langs de vaargeul en hoe de scenario's de pieksnelheden beïnvloeden. De snelheden in scenario B en D zijn gelijk. We zien een afname van de snelheden in noordelijke richting. Vloedsnelheden nemen rond 6500 m weer licht toe, terwijl snelheden iets zuidelijker ervan alweer toenemen.

Vloedsnelheden zijn tot ongeveer twee keer zo hoog als eb snelheden (vloed dominantie). Getij asymmetrie (de relatie tussen de vloed en eb snelheden) kan weer doorwerken in netto sedimenttransport, in dit geval richting het noorden van de vaargeul (vloedrichting). Een relatief ondiepe geul (scenario A) leidt tot een verlaging van de snelheden (vanwege de kleinere getijvolumes), en een diepe geul tot een verhoging ervan. Dit heeft een sterker effect op de vloedsnelheden dan op de eb snelheden.



Figuur 3.3 Gemiddelde pieksnelheden langs de vaargeul, per scenario. De afstand langs de vaargeul is van zuid naar noord gedefinieerd. De snelheden in scenario's B en D zijn identiek.

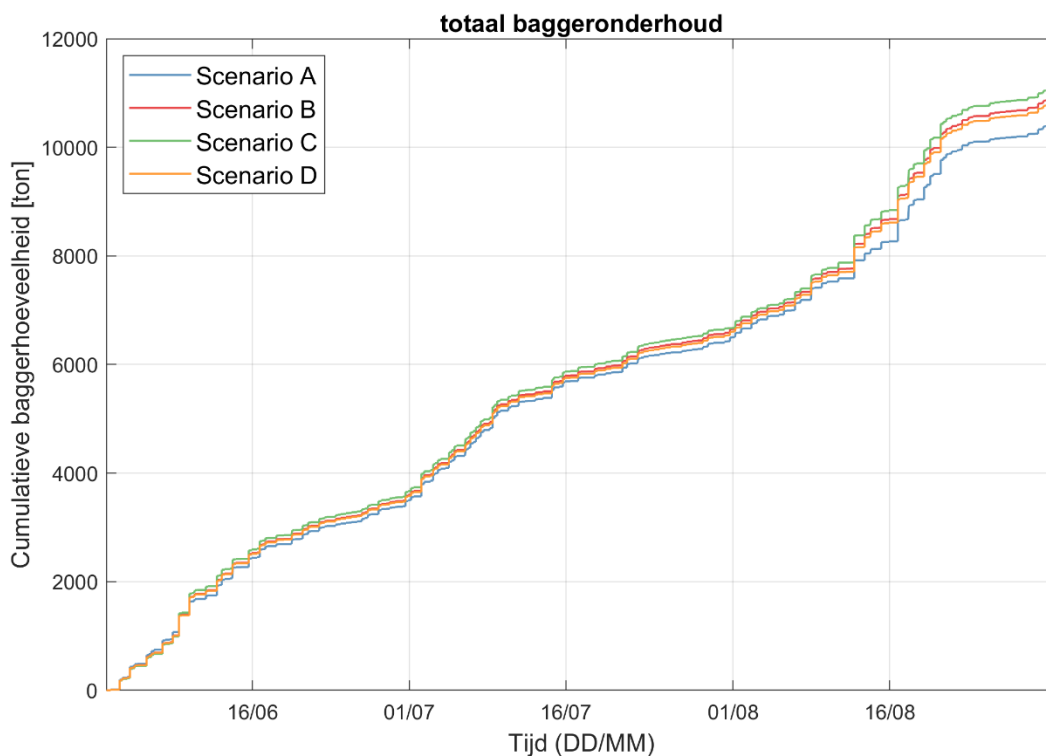
### 3.2 Per scenario: berekende sedimentatie vaargeul & baggercijfers

Figuur 3.4 toont de tijdseries met de berekende cumulatieve baggerhoeveelheden slib in de vaargeul per scenario. Hierbij is het ten eerste belangrijk om op te merken dat het model met de huidige situatie (scenario B) niet exact de waargenomen baggercijfers reproduceert (ongeveer 56.000 m<sup>3</sup>, ofwel 28.000 ton in de gemodelleerde periode), maar wel tot een benadering komt met de juiste orde grootte.

Het model toont dat het verwijderen van de drempel (scenario A vergeleken met scenario B) tot een verhoging van de baggerhoeveelheden slib heeft geleid (van 10.418 ton naar 10.893 ton per 3 maanden, zie Tabel 1). Dit zou betekenen dat in het geval van stoppen met baggeren (terugkeer naar de natuurlijke situatie), indien er opnieuw een drempel zou ontstaan, de sedimentatiesnelheden 4% lager zullen liggen. Het verdiepen van de vaargeul naar een streefdiepte van -4,7m (scenario C) heeft het tegenovergestelde effect: het totale baggervolume slib is in deze situatie 11.076 en dus bijna 2% hoger ten opzichten van de huidige situatie.

Het onttrekken van het gebaggerde slib uit het systeem i.p.v. het te storten in de daarvoor bestemde stortvakken (scenario D) zorgt voor een kleine verlaging van de baggerhoeveelheden, namelijk van 10.893 naar 10.797 ton. De huidige verspreidingsstrategie voor het gebaggerde materiaal Boontjes lijkt dus weinig effect te hebben op de netto sedimentatie binnen de eerste 3 maanden. Dit effect zal echter waarschijnlijk in de loop van de tijd groter worden, maar blijft zeer beperkt vergeleken met bijvoorbeeld het effect van verspreiden in de vaargeul Holwerd-Ameland waar het verder weg brengen slib zin heeft omdat de retourstroom dan minder wordt (Grasmeijer, et al., 2021).

Het verspreiden van materiaal uit de haven van Harlingen is nog niet meegenomen in het model, maar het is te verwachten dat dit wel effect kan hebben op de baggervolumes in de vaargeul Boontjes. Dit zal later dit jaar worden onderzocht. Volgens de MER-studie (op basis van een tracerstudie) kan ten noorden van de voormalige drempel tot wel ca. 50-70% van het materiaal uit de Boontjes terugstromen via een retourstroom en ter hoogte van de voormalige drempel ca. 20-30% (ACRB, 2009).



Figuur 3.4 Gemodelleerde cumulatieve baggerhoeveelheden (in ton) per scenario in de vaargeul Boontjes

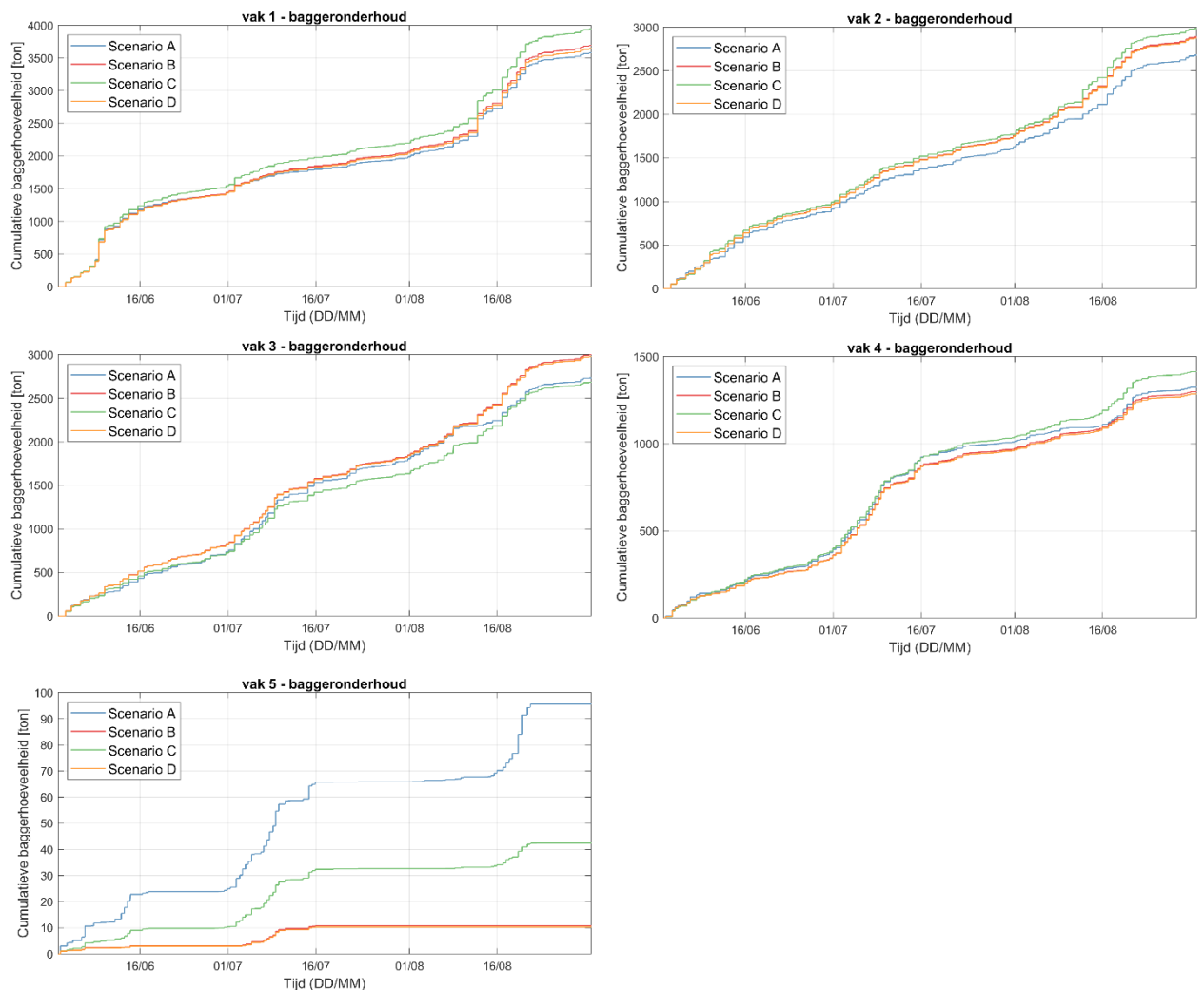
Tabel 1 Gemodelleerde totale baggerhoeveelheden (in ton) per scenario in de vaargeul Boontjes

Scenario	Slibsedimentatie [ton/ 3 maanden]	Slibsedimentatie [m <sup>3</sup> / 3 maanden]	Slibsedimentatie [m <sup>3</sup> /jaar]	Relatief scenario B [%]	t.o.v.
A	10.418	20.835	83.341	96%	
B	10.893	21.786	87.144	100%	
C	11.076	22.152	88.608	102%	
D	10.797	21.594	86.376	99%	

De verschillen tussen de scenario's worden groter tijdens de twee periodes met sterke windcondities (rond 8 juni en 10 augustus). Het is daarom te verwachten dat de totale onderlinge verschillen nog groter zullen worden in het geval van extreme stormcondities. Daarnaast tonen de resultaten dat de baggervolumes in alle scenario's aanzienlijk toenemen wanneer de windsnelheden boven de 10 m/s uitkomen.

De netto aanslibbing en dus ook het baggeronderhoud zijn niet uniform over de vaargeul verdeeld: de noordelijke Boontjes (vak 1-3, zie Figuur 3.1 voor de definitie van de vakken) sedimenteert het sterkst (zie Figuur 3.5). Dit komt overeen met eerdere bevindingen van een data-analyse van de baggerwerkzaamheden, waaruit bleek dat ook hier de meeste baggerwerkzaamheden plaatsvinden (Colina Alonso et al., 2021). De hierboven besproken effecten van de verschillende scenario's op de totale baggerhoeveelheden slib gelden grotendeels ook voor de individuele vakken. Echter kunnen deze effecten lokaal wel een kleiner of groter effect hebben: zo zien we bijvoorbeeld dat in vak 1 scenario A leidt tot een afname van 3% slibsedimentatie (terwijl dit gemiddeld over de vaargeul 4% is) en scenario C hier tot een toename zorgt van wel 7% (terwijl dit gemiddeld over de vaargeul 2% is). Dit wordt in het geval van scenario C dan weer gecompenseerd door een afname van de baggerhoeveelheden in vak 3. Om de oorzaak van deze afname te achterhalen zijn de bodemschuifspanningen en sedimentconcentraties geanalyseerd. Ten opzichte van scenario B nemen de bodemschuifspanningen in vak 3 toe terwijl de slibconcentraties afnemen. Dat betekent dus dat er meer bruto erosie is en minder bruto sedimentatie, wat beiden leidt tot minder netto

sedimentatie. Beide trends (van de bodemschuifspanning en de concentratie) zijn in de overige vakken tegenovergesteld. Dit kan worden verklaard met de bodemligging in dit scenario: deze ligt in vakken 1,2,4 en 5 duidelijk dieper dan in scenario B, terwijl vak 3 nagenoeg gelijk is gebleven (zie Figuur 2.5). Maar samenvattend zien we dus dat over het algemeen een diepere geulligging tot meer baggerwerkzaamheden leidt.



Figuur 3.5 Tijdreeksen van gemiddelde cumulatieve baggerhoeveelheden (in ton) per scenario en per vak

### 3.3 Baggercijfers berekend met versimpelde analyse

Om een betere inschatting te maken van onzekerheden in de modelresultaten is ook nog een versimpelde analyse toegepast om de aanslibbing in de vaargeul af te schatten aan de hand van de verticale sedimentatie- en erosiefluxen. In deze versimpelde benadering is geen buffermodel gehanteerd en wordt daarom gerekend met iets andere parameterinstellingen dan in het numerieke model.

De maximale (bruto) sedimentatieflux is het product van de valsnelheid ( $w_s$ ) en de sedimentconcentratie in de waterkolom ( $c_{bodemlaag}$ ). Via integratie over de tijd en ruimte wordt de totale (bruto) sedimentatie bepaald:  $\int_t \int_A w_s c_{bodemlaag} dA dt$ . Dit is een bovengrens, omdat de netto aanslibbing (sterk) beperkt wordt door resuspensie. Daarnaast kan ook de sedimentaanvoer limiterend zijn.

Met  $w_s = 0.1$  mm/s en  $c_{bodemlaag} = 65$  mg/L (gemiddelde afkomstig uit het model) bij de vaargeul Boontjes is de maximale (bruto) sedimentatieflux  $6.5 \times 10^{-6}$  kg/m<sup>2</sup>/s of 205 kg/m<sup>2</sup>/jaar. Dat is gelijk aan 0.2 m/jaar (volledig geconsolideerd materiaal) tot 0.4 m/jaar (ongeconsolideerd materiaal). Over de totale onderhouden vaargeuloppervlakte van  $1.65 \times 10^6$  m<sup>2</sup> geeft dat een totale (bruto) sedimentatieflux van  $6.76 \times 10^5$  m<sup>3</sup> per jaar.

Gezien de relatief hoge bodemschuifspanningen in het numerieke model, worden er aanzienlijke hoeveelheden resuspensie verwacht in de vaargeul in het model. De (maximale) resuspensieflux wordt bepaald aan de hand van de erosievergelijking van Partheniades (1965):  $\int_t \int_A M (\tau/\tau_{cr} - 1) dA dt$ , waarin  $M$  de erosieparameter is en  $\tau_{cr}$  de kritische schuifspanning voor erosie. De bodemschuifspanning ( $\tau$ ) is afkomstig uit het model. Met  $M = 2 \times 10^{-6}$  kg/m<sup>2</sup>/s en  $\tau_{cr} = 0.25$  Pa is de max. resuspensieflux  $1.69 \times 10^{-5}$  kg/m<sup>2</sup>/s of 534 kg/m<sup>2</sup>/jaar. Daarmee is er dus sprake van netto erosie.

Niet voor alle tijdsmomenten en locaties wordt echter netto erosie gevonden. Wanneer alleen de (positieve) netto aanslibbing in beschouwing wordt genomen (onder de aanname dat dit aangeslibte materiaal vervolgens gebaggerd wordt), wordt er een totale aanslibbing van 57.442 m<sup>3</sup> in 3 maanden gevonden, ofwel ongeveer 230.000 m<sup>3</sup>/jaar. Dit komt redelijk overeen met de gemiddelde baggervolumes over de afgelopen vijf jaar (225.000 m<sup>3</sup>/jaar). Deze versimpelde analyse uitgevoerd voor de verschillende scenario's om de resultaten te kunnen vergelijken, zie Tabel 2.

Tabel 2 Sedimentatie (slib) voor de verschillende scenario's op basis van de versimpelde analyse, incl. een vergelijking met de modelresultaten

Scenario	Slibsedimentatie [m <sup>3</sup> / 3 maanden]	Slibsedimentatie [m <sup>3</sup> /jaar]	Relatief t.o.v. scenario B [%]	Relatief verschil met modelresultaten [%]
A	54.389	218.000	95%	253%
B	57.442	230.000	100%	264%
C	60.758	243.000	106%	274%
D	57.038	228.000	99%	264%

## 4 Synthese

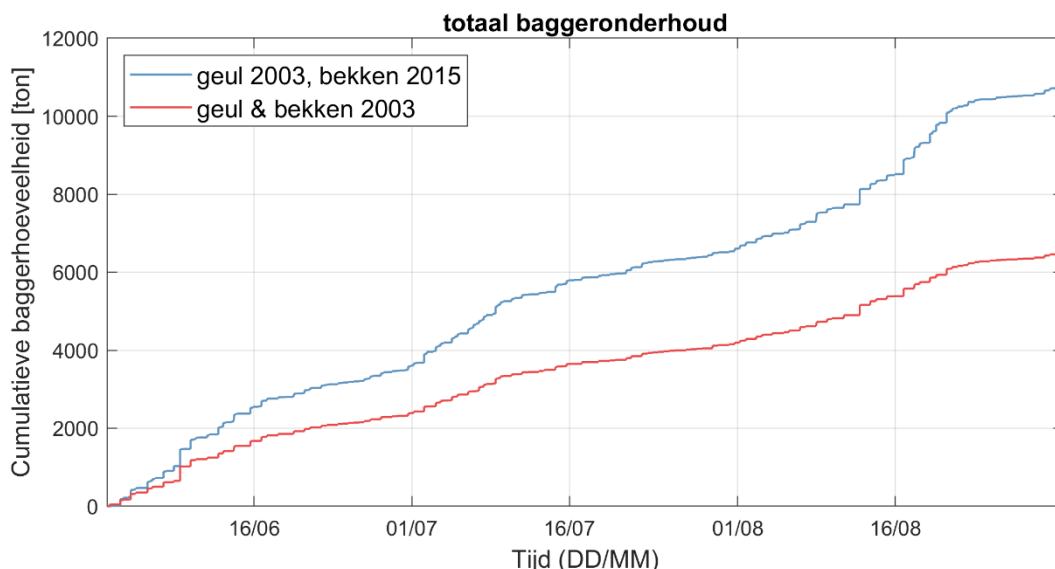
### 4.1 Systeemwerking

De modelresultaten tonen dat de beheersscenario's slechts beperkt invloed hebben op de voorspelde slib sedimentatie in de vaargeul en de baggervolumes (ongeveer ±5% t.o.v. scenario B). Dit suggereert dat de aanslibbing slechts voor een klein deel wordt gestuurd door de bodemligging van de vaargeul zelf en dat andere aspecten een grotere rol spelen. Deze aspecten worden hier beknopt besproken en zullen nader worden geanalyseerd in de vervolgrapportage die in 2022 zal worden opgeleverd.

#### Effect grootschalige morfologie

Uit de data analyse van de morfologische ontwikkeling (Colina Alonso, et al. 2021) kwam naar voren dat er sinds de afsluiting van de Zuiderzee een sedimenterende trend is in de omgeving waarin de vaargeul Boontjes zich bevindt. Het oorspronkelijke subgetijdengebied rondom de geul is zich trendmatig aan het ophogen en ontwikkelt zich mogelijk tot intergetijdengebied. De verlanding is het sterkst achterin de bekkens. Zodra dit deel van de Waddenzee zich van sublitoraal naar litoraal ontwikkelt kunnen deze afzettingen leiden een versnelde afname van het kombergingsvolume. Deze trends vinden tot op heden nog altijd plaats.

Om het effect van de grootschalige morfologische evolutie op de baggervolumes te onderzoeken, is er een modelberekening uitgevoerd met de bodemligging van 2003. Deze wordt vergeleken met een som waarin de bekkens de bodemligging van 2003 hebben, maar de vaargeul zelf de huidige bodemligging heeft. Volgens de modelresultaten hiervan (zie Figuur 4.1) zouden de baggervolumes met 65% zijn toegenomen door alleen al de grootschalige bodemligging. De toename in baggervolumes vindt over de hele vaargeul plaats (vak 1-5). Dit toont dat de sedimentatie en baggervolumes veel sterker worden gestuurd door de grootschalige evolutie dan door de ingrepen in de geul zelf.



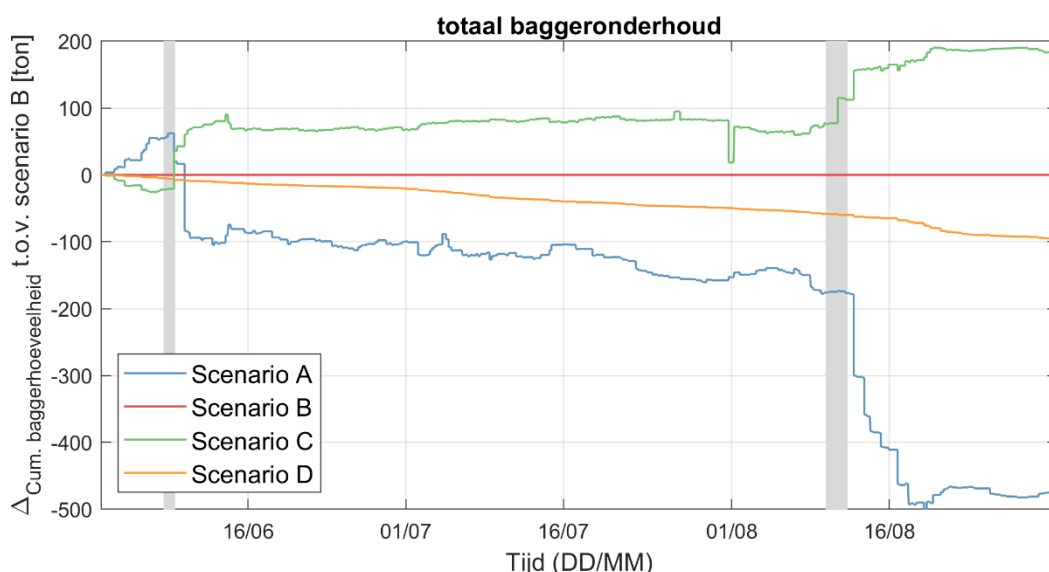
Figuur 4.1 Gemodelleerde cumulatieve baggerhoeveelheden (in ton) in de vaargeul Boontjes voor een fictief scenario met de bodemligging van 2003 (rood) en een fictief scenario met de met de bodemligging van 2003 behalve de vaargeul Boontjes, die de verdiepte ligging van 2015 heeft. Het verschil tussen beide scenario's toont het effect van de grootschalige morfologische evolutie op de baggervolumes.

### Stormen

Uit de door het model berekende baggervolumes (zie tijdreeksen in Figuur 4.1) blijkt dat de verschillen tussen de scenario's tijdens stormen verder uiteenlopen dan tijdens gemiddelde condities. Om deze verschillen te kwantificeren hebben we de verschillen tussen de baggervolumes t.o.v. de baggervolumes van scenario B geplot in Figuur 4.2.

Hierin is duidelijk te zien dat de grote verschillen tussen de beheersscenario's inderdaad tijdens stormen groter worden en/of ontstaan. De uitzondering hierop is scenario D: de verschillen tussen dit scenario en scenario B vinden geleidelijk plaats over de simulatieperiode en stormen lijken amper een rol te spelen. In scenario A zien we tijdens kalme periodes zeer geringe verschillen met scenario B en dat er tijdens en kort na stormen aanzienlijk minder wordt gebaggerd. In storm 1 is dit verschil 31% van het totale verschil (-150 ton) en in storm 2 is dit zelfs 67 % (-330 ton). Scenario C toont tijdens kalme condities geen grote verschillen met scenario B (let op: ook dit is een cumulatief effect en verschilt per baggervak), terwijl er tijdens stormen aanzienlijk meer sedimenteert en dus wordt gebaggerd. Beide stormen zorgen voor ongeveer 50% van de verschillen in baggervolumes tussen scenario B en C. Voor beide scenario's (A en C) geldt dat het effect van de storm nog in de dagen na de storm doorspeelt.

Het bovenstaande impliceert dat de voorspelde baggervolumes sterk zullen afhangen van de gemodelleerde stormen. In werkelijkheid zal het baggervolume naar verwachting ook sterk afhangen van de optredende stormen. Het effect van stormen op de aanslibbing in de vaargeul wordt nog nader onderzocht en zal later dit jaar gerapporteerd worden.



Figuur 4.2 Gemiddelde cumulatieve baggerhoeveelheden (in ton) per scenario t.o.v. scenario B in de vaargeul Boontjes. De grijze balken geven de twee stormen weer ( $10 < U_{wind} < 16$  m/s).

### Haven van Harlingen

Gebaggerd sediment afkomstig uit de haven van Harlingen wordt, net als het gebaggerde materiaal uit de vaargeul Boontjes, afhankelijk van de getijfase verspreid in de vakken Kimstergat en Pollendam. Het gaat hierbij echter om aanzienlijke grotere hoeveelheden, namelijk ruwweg 1 miljoen m<sup>3</sup> per jaar (ter vergelijking: er wordt ruwweg 200.000 m<sup>3</sup> per jaar verspreid afkomstig uit de vaargeul Boontjes). Dit zorgt voor een aanmerkelijke verhoging van het sedimentaanbod, die ook richting de vaargeul Boontjes getransporteerd kan worden. Mogelijk zorgt dit voor een grotere aanslibbing in de vaargeul Boontjes ten opzichte van de huidige modelresultaten. Dit effect wordt later dit jaar met het model nader onderzocht. Het effect zal echter voor alle scenario's vergelijkbaar zijn en zal daardoor geen wezenlijk verschil maken tussen de scenario's.

## 4.2 Doorvertaling modelresultaten naar prognose voor evaluatie beheersscenario's

De resultaten in hoofdstuk 3 geven een indicatie van de te verwachten baggervolumes slib per scenario, ten opzichte van de huidige situatie (scenario B). Bij de interpretatie hiervan en de doorvertaling naar een prognose, moeten de volgende punten worden meegenomen:

- De scenario's zijn doorgerekend voor de huidige grootschalige morfologie van de Westelijke Waddenzee. Hierin is dus nog geen rekening gehouden met de toekomstige ontwikkelingen.
- Het model berekent slibprocessen, waarbij onderscheid wordt gemaakt tussen een makkelijk erodeerbare sliblaag (flufflaag) en een onderlaag die moeilijker erodeerbaar is en ook zandig kan zijn (bufferlaag). In deze onderste laag kan slib tijdelijk worden opgeslagen. Opwoeling van het slib gebeurt tijdens dynamische condities, terwijl in de flufflaag ook tijdens laag energetische condities veel uitwisseling tussen de sliblaag en het water kan plaatsvinden. Hoewel het model er rekening mee houdt dat de bufferlaag zandig kan zijn, rekenen we alleen aan het slibtransport. Dat betekent dat we aanzanding in de geul buiten beschouwing laten. Een analyse van de baggerdata uit het verleden toont dat ongeveer 80% van het gebaggerde materiaal uit slib bestaat (Colina Alonso et al., 2021).
- De simulatieperiode omvat een variatie aan windsnelheden en -richtingen, wat erg belangrijk is aangezien slibdynamiek sterk afhankelijk is van de actuele condities. Hierin zitten twee periodes met energieke condities (windsnelheden tussen de 10 en 16 m/s, windkracht 6-7). Tijdens deze periodes zorgt de wind voor meer opwoeling en verhoogde slibconcentraties. Er zijn echter geen extreme stormcondities gesimuleerd, die wel te verwachten zijn wanneer er een heel jaar zou worden doorgerekend.

- Het effect van de aangepaste verspreidingsstrategie (scenario D), wordt groter naarmate er meer tijd verstrijkt. Het is daarom te verwachten dat dit effect op jaarbasis groter zal zijn dan nu voorspeld, al lijkt het relatief gezien beperkt vergeleken met de andere scenario's. Een extrapolatie van de huidige resultaten is hierbij vanwege feedbacks echter niet mogelijk om het langetermijneffect van de retourstroom te schatten. Wel kunnen we stellen dat dit effect vlakbij de stortlocaties het grootst zal zijn, met name in vak 1 gezien dit tegen de meest gebruikte stortlocatie aan grenst.
- Om de nauwkeurigheid van het model te bepalen kunnen we de voorspelde baggercijfers met de in jun-aug geregistreerde baggervolumes vergelijken. Een meer uitgebreide kalibratie aan de hand van sedimentconcentraties of stroomsnelheden is niet mogelijk vanwege het ontbreken van deze velddata. In juni t/m augustus 2019 registreerde baggeraar Gebroeders van der Lee een totale baggerhoeveelheid van 56.000 m<sup>3</sup>. De door het model voorspelde resultaten zijn een factor 2,5 kleiner. Samen met de versimpelde analyse geven de berekende resultaten echter goed inzicht in de relatieve effecten van de scenario's.
- In het model wordt geen rekening gehouden met het verschil tussen het in-situ volume en het volume in de beun, veroorzaakt door de geringe droge dichtheid van baggerspecie in de beun. Uit literatuur blijkt dat de verhouding beunvolume t.o.v. in-situ volume voor slibrijk materiaal kan oplopen tot 2 à 3.

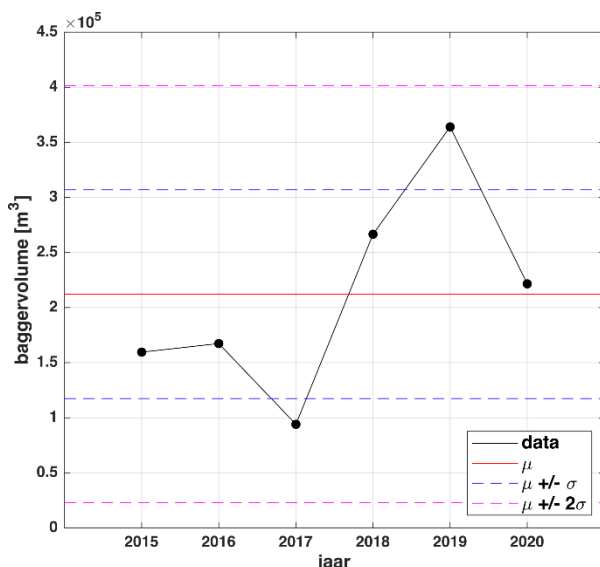
De resultaten van de gemodelleerde baggervolumes in juni tot en met augustus zijn samengevat in Tabel 3. Hierbij volgt de bandbreedte uit de resultaten van het model en de berekende baggervolumes met de versimpelde analyse.

*Tabel 3 Prognose baggervolumes voor de verschillende scenario's ten opzichte van scenario B (huidige situatie) voor juni-augustus 2019. De boven en ondergrens volgen uit de verschillen tussen de door het model berekende baggercijfers en de resultaten van de versimpelde analyse, incl. een vergelijking met de modelresultaten*

<b>Scenario</b>	<b>Ondergrens (t.o.v. scenario B, jun-aug)</b>	<b>Bovengrens (t.o.v. scenario B, jun-aug)</b>
<b>A</b>	95%	96%
<b>B</b>	100%	100%
<b>C</b>	102%	106%
<b>D</b>	99%	99%

De doorvertaling van deze resultaten naar een prognose voor jaarlijkse onderhoudsbaggercijfers is te vinden in Tabel 4. Hierbij zijn voor de huidige situatie (scenario B) de onder- en bovengrens bepaald aan de hand van de waargenomen jaarlijkse baggerhoeveelheden in de periode 2017-2021 (zie Figuur 4.3 en ook Colina Alonso et al., 2021). De grenzen zijn bepaald aan de hand van de gemiddelde baggervolumes in 2017-2020  $\pm$  de standaarddeviatie  $\sigma$ .





Figuur 4.3 Waargenomen variatie in baggeronderhoud

Vanwege de onzekerheid en onnauwkeurigheid van de door het model voorspelde baggervolumes, gebruiken we de modelresultaten om de scenario's ten opzichte van elkaar te vergelijken en deze te relateren aan het waargenomen baggervolume. De prognose voor scenario's A, C en D zijn ten opzichte van dit baggervolume berekend.

Tabel 4 Prognose voor de jaarlijkse baggervolumes voor vaargeulonderhoud per scenario

Scenario	Ondergrens [ $m^3$ /jaar]	Bovengrens [ $m^3$ /jaar]
A	111.000	294.000
B	117.000	307.000
C	119.000	325.000
D	116.000	304.000

Uit de resultaten in Tabel 4 (en ook bijvoorbeeld Figuur 3.4) kunnen we opmaken dat het model nog relatief weinig gevoelig is voor aanpassingen in de bodemligging van de vaargeul. Dit komt doordat op korte termijn hierdoor het aanbod van slib (d.w.z. slibconcentraties in de vaargeul) weinig verandert. Echter kunnen op lange termijn de verschillen groter worden naarmate de verdeling van slib in de omgeving zich meer heeft aangepast aan de nieuwe situatie. Daarnaast zien we dat de verschillen tussen scenario's toenemen tijdens dynamische condities, en verwachten we dat de onderlinge verschillen groter zullen worden onder invloed van stormen. Bovendien hebben variaties in hydro-meteo condities (met name combinaties van waterstandsopzet, wind en golven) vermoedelijk een sterkere invloed op de boven- en ondergrens dan de baggervolumes. Deze onzekerheid is in de huidige analyse niet volledig meegenomen.

Met de huidige modelopzet en -instellingen wordt de netto aanslibbing in de vaargeul Boontjes onderschat, waarschijnlijk omdat het slib in het model na depositie relatief makkelijk weer erodeert (d.w.z. makkelijker dan in werkelijkheid). Om toch tot een juiste orde van grootte van baggerhoeveelheden te komen is gekozen om de baggerfrequentie te verhogen, zodat de hoeveelheid gebaggerd materiaal niet alleen door de netto sedimentatie maar deels ook door de bruto sedimentatie wordt gestuurd. Dit betekent dat het dynamische evenwicht tussen sedimentatie en erosie in de vaargeul wordt verstoord door het vroegtijdig wegbaggeren van slib, en dat het aanpassen van erosieparameters (d.w.z. erosieweerstand en -snelheid) weinig effect zal hebben op de uiteindelijke resultaten. In werkelijkheid zal de erosieweerstand van afgezet slib geleidelijk toenemen, wat effect zou hebben op het evenwicht tussen sedimentatie en erosie en daarmee de netto aanslibbing en het baggeronderhoud. De opbouw van sterkte is op dit moment echter nog niet geïmplementeerd in het model. De versimpelde analyse in paragraaf 3.3 verschaft daarom belangrijke aanvullende informatie en resulteert in een wat

grotere bandbreedte van de resultaten. Deze bandbreedte is nog altijd beperkt, omdat de onderlinge verschillen in getijvolumes en snelheden tussen de scenario's ook beperkt zijn.

### 4.3 Geulontwikkeling zonder te baggeren

Voor een scenario waarin de vaargeul niet langer onderhouden wordt, is niet zozeer het baggervolume interessant (er wordt immers niet meer gebaggerd), maar wel de morfologische ontwikkeling van de geul. De geul zal in dat geval namelijk opvullen totdat een evenwichtsprofiel is bereikt. Een empirische relatie voor de verhouding tussen de evenwichtsdoorsnede en het kombergingsvolume, kan worden gehanteerd om een inschatting te maken van de evenwichtsdiepte. Zie voor een nadere beschrijving van deze empirische relatie bijlage A.1. Door gebrek aan historische data voor de evenwichtsdoorsnede en het kombergingsvolume vóór de drempelverwijdering is het echter niet mogelijk om de empirische coëfficiënten uit deze relatie te fitten op de data. Fits voor de empirische relatie uit de literatuur worden daarom gebruikt om een eerste inschatting te geven van de relatieve verandering van de evenwichtsdoorsnede op basis van de verandering in kombergingsvolume. Op basis van het huidige kombergingsvolume, uitgaande van gelijkmatige sedimentatie over de vaargeul, een vaste vaargeulbreedte van 100 m, zou de evenwichtsdiepte uitkomen op -2.4 m NAP. Dit is ongeveer 40 cm ondieper dan de (evenwichts)situatie vóór de drempelverwijdering, aangezien het kombergingsvolume sinds de drempelverwijdering met 7% is afgenomen.

Een ruwe inschatting van hoe lang het duurt om deze evenwichtsdiepte te bereiken volgt uit de initiële jaarlijkse sedimentatie in de vaargeul, ofwel het sedimentaanbod. Die sedimentatie zal echter na verloop van tijd af nemen en ophouden zodra de vaargeul zijn natuurlijke diepte en profiel heeft bereikt. Op basis van eerste ruwe berekeningen, waarin is aangenomen dat de jaarlijkse sedimentatie schaalt met de overdiepte (het verschil tussen de waterdiepte en de evenwichtsdiepte) en nog geen rekening is gehouden met de effecten van consolidatie, schatten we dat dit ongeveer 12 à 20 jaar zal duren. Echter lijkt er hier geen sprake van een statisch evenwicht, maar een constante aanpassing van de geuldimensies aan de veranderende komberging. Dat wil zeggen dat de geul in eerste instantie wel naar een tijdelijk evenwicht toe beweegt, maar dat de ontwikkeling van de omliggende morfologie een sturend effect zal blijven hebben op de ontwikkeling van de geul en dus een verdere verondieping in de toekomst zal veroorzaken. De evenwichtsdiepte voor 2050 is daardoor erg onzeker. Uitgaande van een voortzetting van de morfologische ontwikkeling van de afgelopen dertig jaar, neemt het kombergingsvolume in de komende dertig jaar opnieuw met 6% af. Op basis daarvan wordt de bijbehorende evenwichtsdiepte voor 2050 ruwweg geschat op ongeveer -2.0 m NAP. De verdere ontwikkeling van de geul en het eventueel verder dichtgroeien hangt er vanaf of de algehele verlanding van het gehele gebied doorzet, dan wel dat zeespiegelstijging dominant wordt voor de ontwikkeling.

### 4.4 Indicatie ontwikkeling baggervolumes richting 2050

Om een eerste indicatie te geven voor de ontwikkeling van de baggervolumes richting 2050 worden de drie voornaamste invloedsfactoren beschouwd: (1) de afwijking van de ontwerpdoorsnede ten opzichte van de evenwichtsdoorsnede, (2) de uitvoeringswijze van de baggerwerkzaamheden en (3) de sedimentaanvoer. Het eerste punt wordt verderop uitgewerkt. Voor de uitvoeringswijze van de baggerwerkzaamheden wordt er vanuit gegaan dat het onderhoudsbeleid hetzelfde blijft. Voor de sedimentaanvoer wordt er vanuit gegaan dat deze niet significant zal veranderen; over lange termijn lijkt er immers geen trendmatige ontwikkeling in de sedimentconcentraties te zijn (Herman et al., 2019) en het verwachte effect van zeespiegelstijging op het sedimentaanbod voor deze tijdschaal is gering.

Een inschatting voor de ontwikkeling van de baggervolumes kan worden gemaakt aan de hand van empirische relaties, vergelijkbaar met de methode gebruikt voor de Verkenning Bereikbaarheid Ameland 2030 (Witteveen+Bos, 2022). De eerste empirische relatie (1) geeft de verhouding tussen de evenwichtsdoorsnede en het kombergingsvolume, zoals ook gebruikt in paragraaf 4.4. Een tweede empirische relatie (2) geeft de verhouding tussen het baggervolume en de afwijking van de ontwerpdoorsnede van de evenwichtsdoorsnede. Zie voor een nadere beschrijving van deze empirische relaties bijlage A. Door gebrek aan historische data voor de evenwichtsdoorsnede en baggervolumes vóór de drempelverwijdering

is het echter niet mogelijk om empirische coëfficiënten uit deze relaties te fitten op de data. Wel kunnen de empirische relaties worden gebruikt om de relatieve effecten af te schatten.

Voor het invullen van de eerste empirische relatie is een inschatting gemaakt van de ontwikkeling van het kombergingsvolume op basis van de verwachte toekomstige morfologische ontwikkeling tussen heden en 2050. Aangenomen wordt dat deze ontwikkeling voornamelijk een voortzetting zal zijn van de recente morfologische ontwikkeling (verlanding van de afgelopen 30 jaar) en dat de morfologische gevolgen van zeespiegelstijging daaraan ondergeschikt zijn. Zeespiegelstijging heeft (naast een effect via de morfologie) ook een direct effect op de komberging, namelijk een verhoging van de waterstand waardoor de komberging toeneemt. Ook dit effect is naar verwachting een orde kleiner dan het effect van de autonome morfologische ontwikkeling.

De morfologische ontwikkeling van de platen was de afgelopen 30 jaar sedimentatie met zo'n 0,66 cm per jaar (Colina Alonso et al., 2021), waardoor het kombergingsvolume van het deelgebied rond de vaargeul Boontjes in de afgelopen 30 jaar afnam met 6%. Als conservatieve schatting wordt aangenomen dat deze sedimentatie de komende periode onverminderd zal doorzetten, waardoor de komberging in de komende 30 jaar opnieuw met 6% afneemt. Daarbij hoort een kleinere evenwichtsdoorsnede van de geul. Als de verschillende geuldimensies uit de scenario's worden gehandhaafd, zal dit dus toenemende baggervolumes veroorzaken. Op basis van de beschikbare waarden in de literatuur voor empirische relatie 1 (Biegel, 1992; Witteveen+Bos, 2022), gaat het eveneens om een afname van 6% van de evenwichtsdoorsnede. Vervolgens volgt uit empirische relatie 2 dat het baggervolume lineair afhangt van het doorsnedeoverschot. Zoals gezegd was het door gebrek aan data over de historische ontwikkeling van het baggervolume in dit gebied niet mogelijk om de empirische coëfficiënten af te leiden. Afhankelijk van de precieze fit van de coëfficiënten, toegelicht in bijlage A.2, wordt de toename geschat op tussen de 4% (voor  $\gamma = 0,46$ ) en 29% (voor  $\gamma = 1$ ). Door het hoge slibgehalte is de verwachting dat de toename meer richting 29% zal gaan, dan richting 4%. Er wordt aanbevolen om over vijf à tien jaar de ontwikkeling van de vaargeul Boontjes opnieuw te beschouwen, omdat er dan mogelijk wel een fit gemaakt kan worden voor deze empirische relatie.

Uitgaande van het huidige baggervolume van gemiddeld 220.000 m<sup>3</sup>/jaar en de huidige vaargeuldimensies, zou het onderhoudsbaggervolume richting 2050 kunnen toenemen tot gemiddeld ongeveer 274.000 m<sup>3</sup>/jaar als gevolg van de morfologische ontwikkeling. Merk op dat de fluctuaties van jaar tot jaar aanzienlijk groter kunnen zijn dan deze toename van het meerjarig gemiddelde (bijv. in 2019 was het gerealiseerde baggervolume 364.000 m<sup>3</sup>). Daarom wordt de toename van 29% ook toegepast op de onder- en bovengrens uit paragraaf 4.2, waarmee de ondergrens voor het jaarlijks gemiddelde baggervolume richting 2050 wordt geschat op 150.000 m<sup>3</sup>/jaar en de bovengrens op 397.000 m<sup>3</sup>/jaar.

## Referenties

- ACRB. (2009). *Startdocument Drempeelverwijdering Boontjes. Q134R1 - Startdocument PpPb Boontjes rA, 28 sep 2010*
- Alkyon (2008). *Haalbaarheidsstudie vaarweg Ameland - Fase 1: selectie van kansrijke alternatieven. Kenmerk: A2066R1r3.*
- Biegel, E.J. (1992). *Impact of sea level rise on the morphology of the Waddensea in the scope of its ecological function - Investigation on empirical morphological relations. Delft Hydraulics, ISOS\*2 project phase 2.*
- Colina Alonso, A., Smits, B.P., Vroom, J. (2021). *Stijging Baggerhoeveelheden Vaargeul Boontjes. Deltares rapport 11206799-007-ZKS-0001 versie 1.0.*
- D'Alpaos et al., (2010). *On the tidal prism-channel area relations. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 115(F1).*
- Grasmeijer, B., van Weerdenburg, R., van Kessel, T. (2021). *Invloed baggerstrategie op slibconcentraties en baggervolumes vaarweg Holwerd-Ameland. Deltares rapport 11206799-006-ZKS-0001.*
- Herman, P., Van Kessel, T., Vroom, J., Dankers, P., Cleveringa, J., De Vries, B., Villars, N. (2018). *Mud dynamics in the Wadden Sea. Towards a conceptual model. Deltares rapport 11202177-000-ZKS-0011 versie 1.0.*
- Kessel, van, T., Winterwerp, H., van Prooijen, B., van Ledden, M., & Borst, W. (2011). *Modelling the seasonal dynamics of SPM with a simple algorithm for the buffering of fines in a sandy seabed. Continental Shelf Research, 31, S124-S134.*

- Partheniades, E. (1965). Erosion and deposition of cohesive soils. Journal of the Hydraulics Division, ASCE 91 (HY 1), 105–139.*
- Vroom, J., Van Weerdenburg, R., Smits, B., Herman, P. (2020). Modelling slibdynamiek voor de Waddenzee Kalibratie voor KRW slib. Deltares rapport 1205229-001-ZKS-0001.*
- Witteveen+Bos. (2022). Verkenning Bereikbaarheid Ameland 2030: Ontwerpnota baggerbezwaar en mogelijke veerroutes. Ref 126248/22-007.541*
- Zijl, F, Veenstra, J. & Groeneboom, J. (2018) The 3D Dutch Continental Shelf Model – Flexible Mesh (3D DCSSM-FM): Setup and validation, s.l.: Deltares rapport 1220339-000-ZKS-0042.*

## A Empirische relaties

In deze bijlage worden de empirische relaties beschreven die zijn gebruikt om een eerste indicatie te geven voor de ontwikkeling van het baggervolume richting 2050.

### A.1 Komberging en evenwichtsdoorsnede

De eerste empirische relatie is die tussen het lokale kombergingsvolume en de evenwichtsdoorsnede van de geul. Deze relatie is uitgebreid beschreven in literatuur voor zeegaten (Biegel, 1992; D'Alpaos et al., 2010) en heeft de volgende algemene vorm:

$$A_{ce} = k * P^\alpha + C \quad (1)$$

Met:

- $A_{ce}$  is de evenwichtsdoorsnede van de geul [m<sup>2</sup>];
- $P$  is het (lokale) kombergingsvolume [m<sup>3</sup>];
- $k$  is een coëfficiënt [m<sup>-1</sup>];
- $\alpha$  is een coëfficiënt [-];
- $C$  is een coëfficiënt [m<sup>2</sup>]

De waarde van  $\alpha$  ligt grofweg tussen 0,85 en 1,10 (D'Alpaos et al., 2010). Voor zeegaten in de Waddenzee is een waarde van  $\alpha = 0,9$  afgeleid (Biegel, 1992).

Ter illustratie worden waarden gegeven die zijn afgeleid in literatuur:

- Algemeen voor zeegaten in de Waddenzee (Biegel, 1992):  
$$A_{ce} = 4,48 * 10^{-4} * P^{0,9} - 157$$
- Verkenning Bereikbaarheid Ameland 2030 (Witteveen+Bos, 2022):  
$$A_{ce} = 1,71 * 10^{-4} * P^{0,9} - 116$$

### A.2 Doorsnedeoverschot en baggervolume

De tweede empirische relatie is die tussen het baggervolume en het verschil tussen de evenwichtsdoorsnede van de geul en de ontwerpdoorsnede. Een vergelijkbare relatie is onder andere gebruikt in (Alkyon, 2008) voor de prognose van het baggerbezwaar en heeft de volgende vorm:

$$V = \beta * (A_d - \gamma * A_{ce}) \quad (2)$$

Met:

- $V$  is het baggervolume [m<sup>3</sup>];
- $A_d$  is de ontwerpdoorsnede van de geul [m<sup>2</sup>];
- $A_{ce}$  is de evenwichtsdoorsnede van de geul [m<sup>2</sup>];
- $\beta$  is een coëfficiënt [m];
- $\gamma$  is een correctiefactor [-]

Door het baggervolume uit te zetten tegen het doorsnedeoverschot kan deze empirische relatie worden gefit op de data. In de literatuur worden waarden voor correctiefactor  $\gamma$  gegeven van:

- $\gamma < 1$ , omdat de evenwichtsdoorsnede stroomopwaarts (richting het wantij) afneemt evenredig aan het kombergingsvolume. Een karakteristieke evenwichtsdoorsnede zal dus kleiner zijn dan een evenwichtsdoorsnede afgeleid aan het begin van het kombergingsgebied.
- $\gamma > 1$ , indien de relatie wordt toegepast voor slibrijke systemen (aangezien de relatie is afgeleid voor zandige systemen)

Voor de Verkenning Bereikbaarheid Ameland 2030 (Witteveen+Bos, 2022) was de waarde  $\gamma = 0,46$  afgeleid uit een fit van de data voor het jaar 1989 waarvoor bekend was dat het gebaggerde volume gelijk was aan nul. De parameter  $\beta$  werd gefit op  $7,3 * 10^3$  en daarnaast werd een onzekerheidsmarge toegepast van 2 maal de root-mean-squared-error ( $2 * RMSE = 1 * 10^5$  m<sup>3</sup>).