

## Morfologie en Onderhoud Vaargeul Boontjes

Systeembegrip en scenario's



enabling delta life

## **Morfologie en Onderhoud Vaargeul Boontjes**

Systeembegrip en scenario's

### **Auteur(s)**

Bob Smits

Julia Vroom

Roy van Weerdenburg

Ana Colina Alonso

Foto voorpagina: <https://beeldbank.rws.nl>, Rijkswaterstaat / Joop van Houdt

## Morfologie en Onderhoud Vaargeul Boontjes

Systeembegrip en scenario's

<b>Opdrachtgever</b>	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
<b>Contactpersoon</b>	de heer J. De Vries
<b>Referenties</b>	HV09 KPP Beheer en Onderhoud Waddenzee
<b>Trefwoorden</b>	Waddenzee, morfologische ontwikkeling, komberging, baggerbezwaar, slib, Boontjes

### Documentgegevens

<b>Versie</b>	1.0
<b>Datum</b>	25-11-2022
<b>Projectnummer</b>	11208040-004
<b>Document ID</b>	11208040-004-ZKS-0004
<b>Pagina's</b>	67
<b>Classificatie</b>	
<b>Status</b>	definitief

### Auteur(s)

	Bob Smits	
	Julia Vroom	
	Roy van Weerdenburg	
	Ana Colina Alonso	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord
1.0	Bob Smits	Thijs van Kessel	Toon Segeren
	Julia Vroom		
	Roy van Weerdenburg		
	Ana Colina Alonso		

# Samenvatting

In 2012 is een drempel in de Boontjes, tussen Kornwerderzand en Harlingen, verdiept van een streefdiepte van -2,80 m NAP naar -3,80 m NAP. De verwachting was dat de drempelverwijdering niet of nauwelijks zou leiden tot onderhoudsbaggerwerk (Ouwkerk & Vuik, 2012). Sinds de drempelverwijdering in 2012 is het baggerbezwaar in de vaargeul Boontjes echter groter dan van tevoren ingeschat en vertoont het grote fluctuaties tussen de jaren. Er waren en zijn zorgen over een sterke toename van het baggerbezwaar, hoewel het baggerbezwaar sinds 2019 weer wat lager is. In 2021 is als eerste stap in deze studie de morfologische ontwikkeling en het baggerbezwaar van de Boontjes geanalyseerd middels een data analyse (Colina Alonso, 2021). Voor deze vervolgstudie heeft Rijkswaterstaat aan Deltares gevraagd om in te schatten of (en zo ja hoeveel) het baggerbezwaar in de toekomst gaat stijgen bij de huidige geuldimensies en wat de invloed is van verschillende alternatieve geuldimensies op het baggerbezwaar. Ook de bijdrage van de retourstroom vanuit de verspreidingslocaties naar de vaargeul Boontjes is onderzocht.

De grootschalige morfologische ontwikkelingen in de westelijke Waddenzee, die gedomineerd worden door sedimentatie op de platen aan de landwaartse zijde van de getijdebekkens, blijken de hydrodynamica en daarmee ook de (slib)sedimentatie in de vaargeul op verschillende manieren te beïnvloeden:

1. Er stroomt meer debiet door de geul en minder over de platen.
2. Het kombergingsvolume (het volumeverschil tussen hoog- en laagwater) wordt kleiner zodra subgetijde platen aangroeien tot boven laagwater, en daardoor neemt het debiet door de geul op termijn af.
3. Een kleinere waterdiepte boven de platen leidt tot kleinere golven (indien de golven diepte-gelimiteerd zijn).
4. Golfgedreven resuspensie op de platen is toegenomen doordat de golven de bodem meer beroeren, maar niet in de geul.

De grootschalige sedimentatie van de afgelopen decennia zet in de komende decennia door, en is naar verwachting ook de komende decennia nog groter dan de verwachte zeespiegelstijging. Daarnaast ontwikkelt zich rondom een Boontjes een morfologisch wantij, waardoor de uitwisseling tussen de Boontjes en het Kimstergat vermindert. De resultaten van het onderzoek gepresenteerd in dit rapport laten zien dat de grootschalige morfologische ontwikkeling hoogstwaarschijnlijk zal leiden tot een sterke toename van het baggerbezwaar in de Boontjes, al is de bandbreedte rondom deze voorspelling groot.

De volgende scenario's zijn onderzocht:

- Stoppen met baggeren
- NAP-3,8 m: de huidige situatie,
- NAP-4,7 m: een verdiepte Boontjes, en
- Zonder terugstorten: de huidige situatie (streefdiepte van -3,8 m NAP) waarbij het gebaggerde slib niet wordt verspreid op de verspreidingslocaties, maar volledig uit het systeem wordt onttrokken.

Deze scenario's zijn met een numeriek model doorgerekend en de verschillende vaargeuldimensies veroorzaken een vergelijkbare hydrodynamische respons: de geul Boontjes gaat stroom trekken bij een diepere vaargeul. Dit komt overeen met berekeningen die zijn uitgevoerd voor de drempelverwijdering (Ouwkerk & Vuik, 2012). In principe is de verwachting dat bij een toename van de stroomsnelheden, de sedimentatie in de vaargeul afneemt. Omdat het baggerbezwaar na de drempelverwijdering in 2012 toch flink is toegenomen, moet er naast de hydrodynamische respons van de toename van

stroomsnelheden een ander mechanisme zijn dat de toename van de stroomsnelheden overschaduwet en leidt tot een toename van het waargenomen baggerbezwaar. Processen die hebben geleid tot een toename van het baggerbezwaar ondanks de toename van de stroomsnelheden zijn:

1. Een afname van de golfgedreven resuspensie in de vaargeul als deze dieper wordt (op korte termijn).
2. Een toename van de aanvoer van sediment naar de vaargeul (op korte termijn).
3. De invloed van de grootschalige morfologische veranderingen (sedimentatie op de platen). Deze respons voltrekt zich langzamer en geeft geen instantaan effect (maar effect op lange termijn).

Deze korte- en langetermijnprocessen versterken elkaar. Voor het waargenomen baggerbezwaar zijn alle drie deze processen van belang geweest, terwijl voor de toekomstige ontwikkeling met name het derde proces dominant zal zijn.

In deze studie wordt het baggerbezwaar in de verschillende vaargeuldieptes scenario's en voor 2050 ingeschat middels een combinatie van inzichten uit de data analyse (Colina Alonso et al., 2021), het 3D slijbtransportmodel, een 1DV model, empirische evenwichtsrelaties voor getijvolume, kombergingsvolume en baggerbezwaar, en expert inschatting. De expert inschatting van de verschillende scenario's voor de vaargeuldimensies in 2050 is gemaakt op basis van de combinatie van de verwachte voortzetting van de grootschalige morfologische ontwikkeling en de aanpassing in het te onderhouden oppervlak bij verschillende streefdiepte. De expert inschatting van het baggerbezwaar is (zie ook Tabel 3.4):

- Een scenario zonder vaargeulonderhoud leidt op korte termijn tot een bodemligging op ongeveer -2.4 m NAP en in 2050 naar het niveau van de omliggende platen (en dus een baggerbezwaar van 0 m<sup>3</sup>/jaar).
- Een scenario met de huidige vaargeuldimensies leidt tot een baggerbezwaar van 0,1-0,3 miljoen m<sup>3</sup>/jaar (huidig, o.b.v. recent gerealiseerde baggerbezwaar) en 0,3-1,5 miljoen m<sup>3</sup>/jaar (in 2050).
- Voor een verdiept profiel tot -4,7 m NAP komen we op een inschatting van de baggervolumes van 0,2-0,5 miljoen m<sup>3</sup>/jaar (huidig) en 0,5-1,3 miljoen m<sup>3</sup>/jaar (in 2050).

Tot slot lijkt de huidige verspreidingsstrategie, om afhankelijk van de getijfase te verspreiden op de locaties bij de Pollendam of in het Kimstergat, vrij effectief te zijn. De retourstroom van gebaggerd materiaal vanuit de verspreidingsvakken bleek op korte termijn (<3 maanden) marginaal te zijn (1,5%). Mogelijkerwijs wordt de retourstroom door het numerieke model wel onderschat. Metingen zijn aangewezen om het model op verschillende nog onzekere punten te valideren en indien noodzakelijk te verbeteren.

# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>8</b>
1.1	Aanleiding	8
1.2	Doelstelling en methode	8
1.3	Studiegebied	8
1.4	Leeswijzer	9
<b>2</b>	<b>Het effect van de grootschalige morfologie op de ontwikkeling van de Boontjes</b>	<b>10</b>
2.1	Morfologische veranderingen	10
2.2	Hydrodynamica	11
2.3	Invloed van de zoetwaterafvoer	19
2.4	Gesimuleerde baggervolumes in 2003 en 2015	20
2.5	Inschatting ontwikkeling tot 2050	24
<b>3</b>	<b>Het effect van verschillende vaargeuldimensies en verspreidingsstrategieën op het baggerbezwaar</b>	<b>27</b>
3.1	Verschillende bodemliggingen in de vaargeul	27
3.2	Alternatieve vaarroute Molenrak	28
3.3	Hydrodynamica bij verschillende geuldimensies	29
3.4	Baggervolumes bij verschillende geuldimensies	33
3.4.1	3D slibtransportmodel	33
3.4.1.1	Ongevoeligheid van het model voor vaargeuldimensies	35
3.4.2	Evenwichtsrelaties	36
3.4.3	Expertoordeel	36
3.5	Ontwikkeling geulligging en baggerbezwaar richting 2050	37
3.5.1	Geulligging op basis van empirische relaties en expertoordeel	38
3.5.2	Baggerbezwaar op basis van empirische relaties en expertoordeel	38
3.6	Retourstroom vanaf verspreidingslocaties	39
<b>4</b>	<b>Synthese</b>	<b>41</b>
4.1	Grootschalige morfologische ontwikkeling is sturend	41
4.2	Stroming en golven	41
4.3	Uitwisseling met het Kimstergat	42
4.4	Effect drempelverwijdering en invloed vaargeuldimensies	42
4.5	Andere verspreidingsstrategie, gravitatiecirculatie en rol verspreiding Harlingen	42
4.6	Samenvatting	43
<b>5</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>45</b>

5.1	Conclusies	45
5.2	Aanbevelingen	46
<b>Referenties</b>		<b>48</b>
<b>A</b>	<b>Modelopzet</b>	<b>49</b>
A.1	Modelschematisatie	49
A.2	Bodemdata voor verschillende scenario's	51
A.3	Simulatieperiode	52
<b>B</b>	<b>Aanvullende resultaten 3D-slibmodel</b>	<b>54</b>
B.1	Hydrodynamische modelsimulaties	54
B.1.1	Debietten door de vaargeul Boontjes	55
B.1.2	Stroomsnelheden in de vaargeul Boontjes	58
B.2	Slibsedimentatie en baggeronderhoud	59
B.2.1	Huidige situatie (referentie)	59
B.2.1.1.	Totaal baggeronderhoud	59
B.2.1.2.	Aanslibbing per vak	60
B.2.1.3.	Slibbalans	63
<b>C</b>	<b>Empirische relaties voor baggervolumes in 2050</b>	<b>64</b>
<b>D</b>	<b>Versimpelde 1D analyse</b>	<b>66</b>

# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding

In 2012 is een drempel in de Boontjes verdiept van een streefdiepte van -2,80 m NAP naar -3,80 m NAP. De verwachting was dat de drempelverwijdering geen tot nauwelijks effect zou hebben op het onderhoudsbaggerwerk (Ouwerkerk & Vuik, 2012). Sinds de drempelverwijdering in 2012 is het baggerbezwaar in de vaargeul Boontjes, tussen Kornwerderzand en Harlingen, echter groter dan van tevoren ingeschat. In navolging van de bestuursovereenkomst 'Financiering en realisatie van de Werken aan de Vaarweg Harlingen – Kornwerderzand (Boontjes)' uit 2009 is in 2021 en 2022 een evaluatie van het beheer van de vaargeul uitgevoerd. In dat kader zijn een morfologische studie, een ecologische studie en een MKBA (Maatschappelijke Kosten-Baten Analyse) uitgevoerd. De morfologische studie is door Rijkswaterstaat als opdracht gegeven aan Deltares als onderdeel van het project HV09 KPP Beheer en Onderhoud Waddenzee. Dit rapport beschrijft de resultaten van de morfologische studie, die als inbreng zijn meegenomen voor de ecologische studie en de MKBA. Het bouwt voort op de resultaten van de data analyse die in 2021 is uitgevoerd (Colina Alonso et al. 2021) en beschrijft resultaten van verschillende modelinstrumenten en het expertoordeel dat op basis hiervan is opgesteld.

## 1.2 Doelstelling en methode

De doelstelling van deze morfologische studie was om te komen tot:

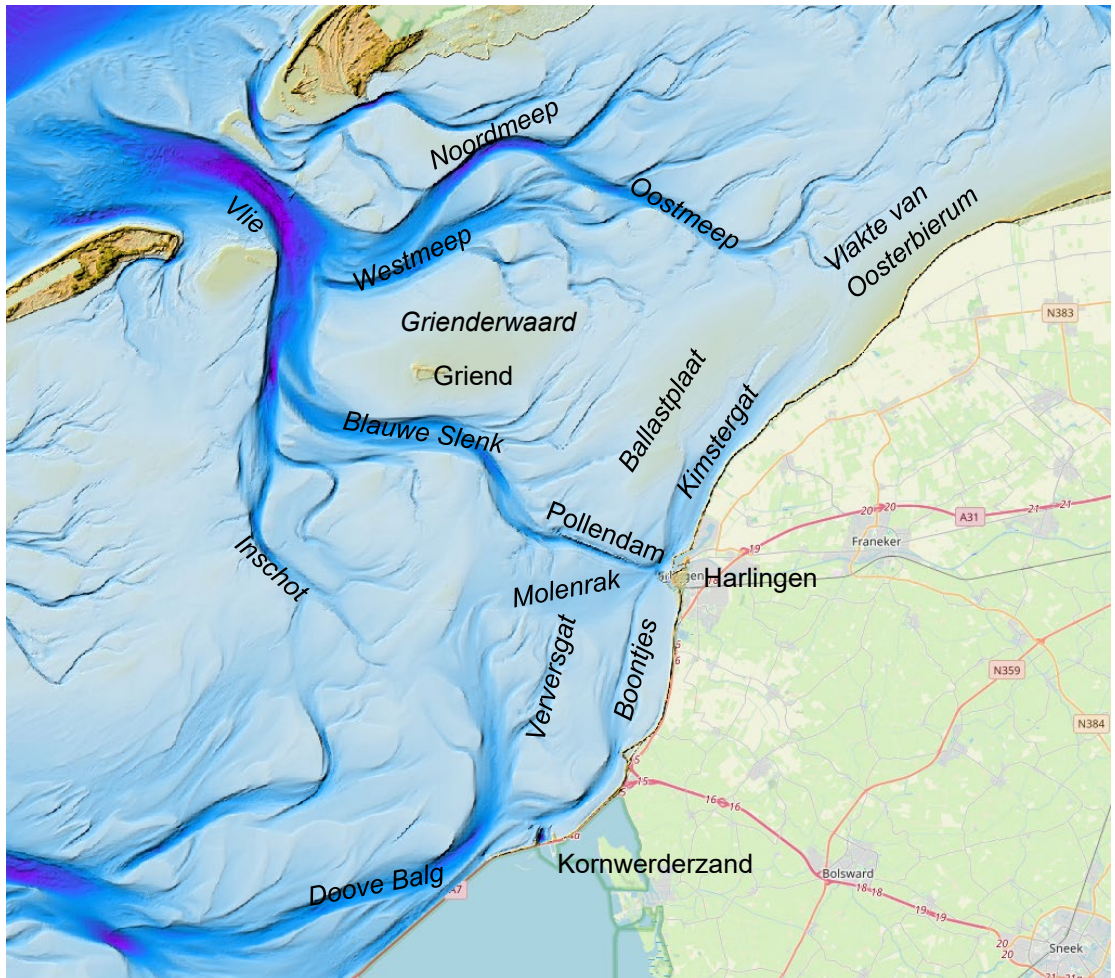
1. een verbeterd inzicht in het effect van de drempelverwijdering op de morfologische ontwikkeling en daarmee komend tot een nadere verklaring waarom de ontwikkeling van het waargenomen baggervolume anders verloopt dan tijdens de Planstudie Drempelverwijdering Boontjes was voorspeld;
2. inzicht in sturende processen en de te verwachten (autonome) morfologische ontwikkeling op basis van historische trends op verschillende tijd-ruimteschalen en inzichten uit numerieke modelstudie; en
3. doorvertaling van inzichten uit doelen 1 & 2 naar advies voor beheer (t.a.v. baggervolumes, verschillende vaargeuldimensies, tracé en verspreidingsstrategie).

Om tot goede inzichten te komen in de systeemwerking en in de gevolgen voor beheer zijn analyses uitgevoerd op basis van verschillende instrumenten, namelijk een 3D slibtransportmodel (de D-Flow FM software in combinatie met de D-Water Quality processenbibliotheek), een versimpelde 1D analyse, empirische relaties en expertoordeel. Deze analyses worden afzonderlijk aangehaald en toegelicht per hoofdstuk of per paragraaf.

## 1.3 Studiegebied

Voor een goede ruimtelijke context van de resultaten worden in Figuur 1.1 de bodemligging en de naamgeving van geulen en plaatgebieden getoond.





Figuur 1.1 Bodemligging van 2015 en namen van geulen en plaatgebieden.

## 1.4 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 beschrijft het effect van de grootschalige morfologische veranderingen op de hydrodynamica en de sedimentatie in de vaargeul Boontjes. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van het 3D slijbtransportmodel en de empirische evenwichtsrelaties. In hoofdstuk 3 beschouwen we verschillende vaargeuldimensies en proberen we een inschatting te maken van de retourstroom vanaf verspreidingsvakken naar de vaargeul Boontjes. In hoofdstuk 4 wordt een synthese gemaakt van de morfologische studie, waarbij inzichten uit de data analyse en modelstudie worden gecombineerd tot een update van de systeemwerking. Tot slot worden in hoofdstuk 5 conclusies van de morfologische studie gegeven en aanbevelingen voor te volgen beleid.

## 2 Het effect van de grootschalige morfologie op de ontwikkeling van de Boontjes

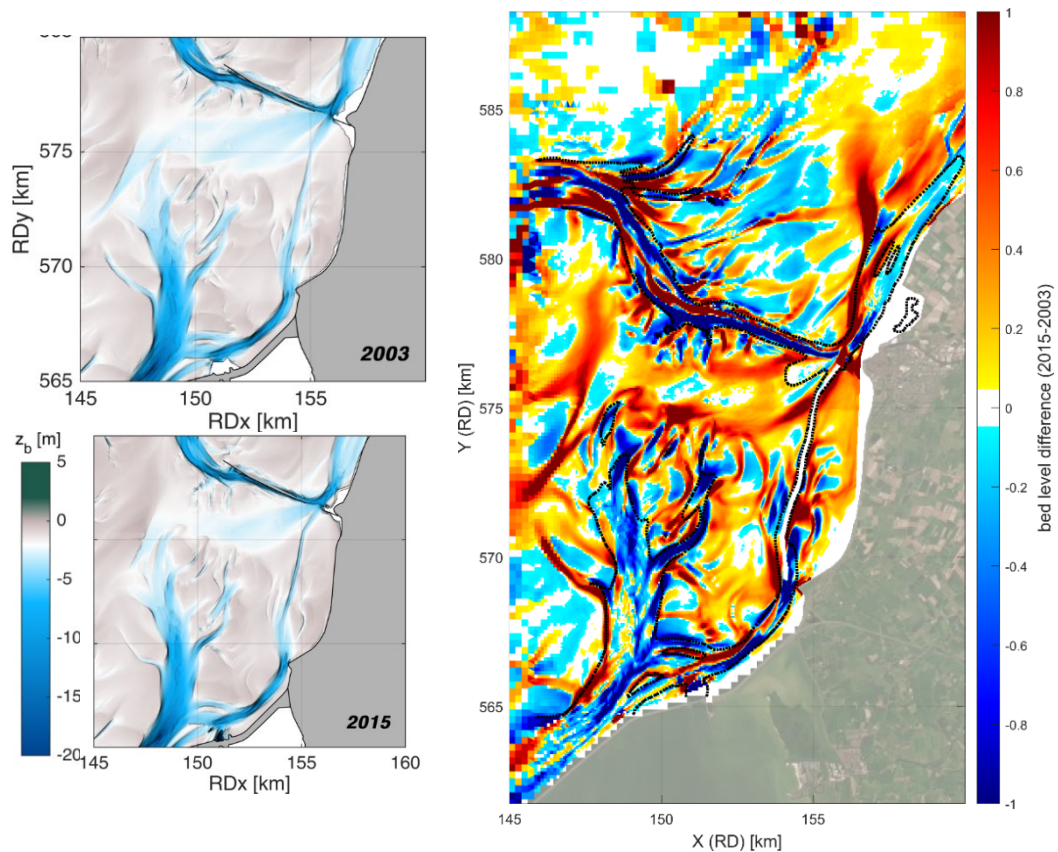
Dit hoofdstuk beschrijft het effect van de grootschalige morfologische veranderingen op de hydrodynamica en de sedimentatie in de vaargeul Boontjes. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de inzichten uit de data analyse (Colina Alonso et al., 2021), het 3D slijbtransportmodel en de empirische evenwichtsrelaties. In het volgende hoofdstuk wordt de drempelverwijdering nader bestudeerd.

### 2.1 Morfologische veranderingen

De morfologische veranderingen in het gebied rondom de Boontjes zijn in het datarapport van vorig jaar (Colina Alonso et al., 2021) uitvoerig beschreven en worden hier beknopt samengevat.

Sinds de afsluiting van de Zuiderzee vindt er op de platen die voor de vastelandskust liggen sedimentatie plaats. De geulen Doove Balg en het zuidelijk deel van de Boontjes zijn ruimer geworden. Vermoedelijk is dit een respons op de omhoogkomende platen en is deze verruiming van tijdelijke aard. In het verlengde van de Boontjes, ten noorden van Harlingen, ligt het Kimstergat. Het Kimstergat is de laatste decennia kleiner geworden, en de platen rondom het Kimstergat zijn flink opgehoogd. Door met het numeriek model de hydrodynamica te bestuderen bij twee verschillende bodemliggingen, krijgen we inzicht in wat deze veranderingen betekenen voor de stroming door en richting de Boontjes (zie volgende paragraaf).

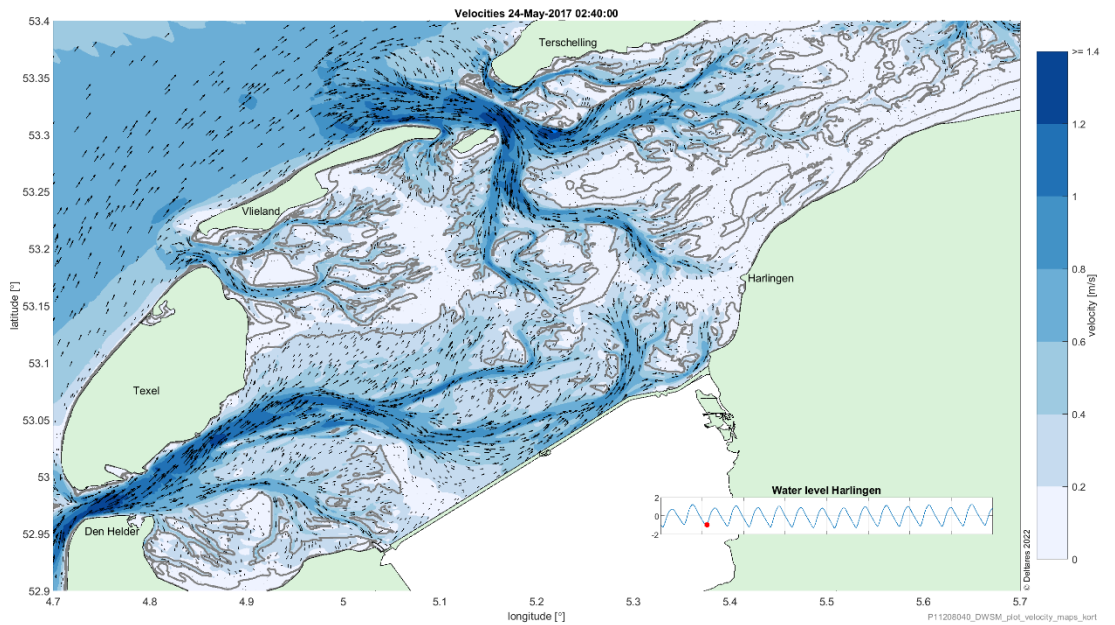
De bovengenoemde trend kan verder worden gekwantificeerd. In het gebied rondom de Boontjes heeft een sedimentatie plaatsgevonden van ca. 10 mm/j (over de periode 2003-2015; ter vergelijking 14 mm/j over de periode 1985-2015), zie ook Figuur 2.1. Hierdoor is de oppervlakte van het intergetijdengebied (gedefinieerd als het gebied tussen de -1,1 m NAP en de +1,1 m NAP) toegenomen van 8,7 km<sup>2</sup> naar 15,3 km<sup>2</sup>. Op het intergetijdengebied (in 2015) was de sedimentatiesnelheid aanmerkelijk hoger, namelijk gemiddeld 22 mm/j. Deze sedimentatie heeft geleid tot een afname van het kombergingsvolume met 8%. Deze afname is relatief klein, omdat veel sedimentatie heeft plaatsgevonden in het subtidaal en daarmee (nog) geen invloed heeft op het kombergingsvolume. De verwachting is dat de sedimentatie doorzet en daarmee een steeds groter gedeelte van het subtidale plaatgebied verschuift naar het intertidaal. Alleen sedimentatie in het intertidaal heeft een direct effect op het kombergingsvolume.



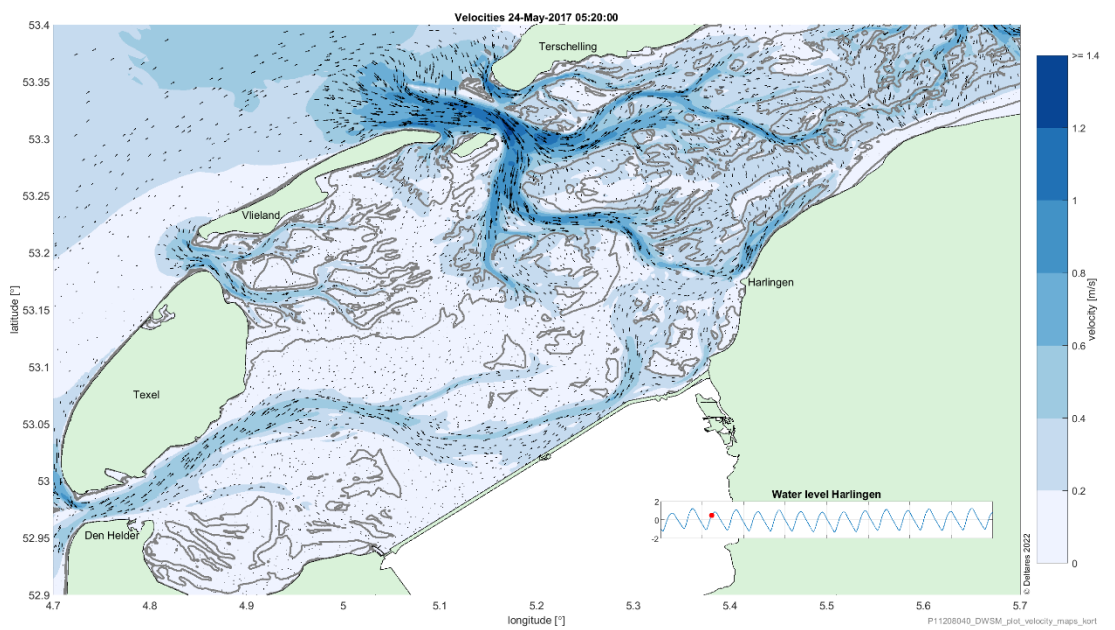
Figuur 2.1 Bodemliggingen 2003 (linksboven), 2015 (linksonder) en verschil (rechts). De zwarte stippellijn geeft de -3 m NAP contour in 2015 weer.

## 2.2 Hydrodynamica

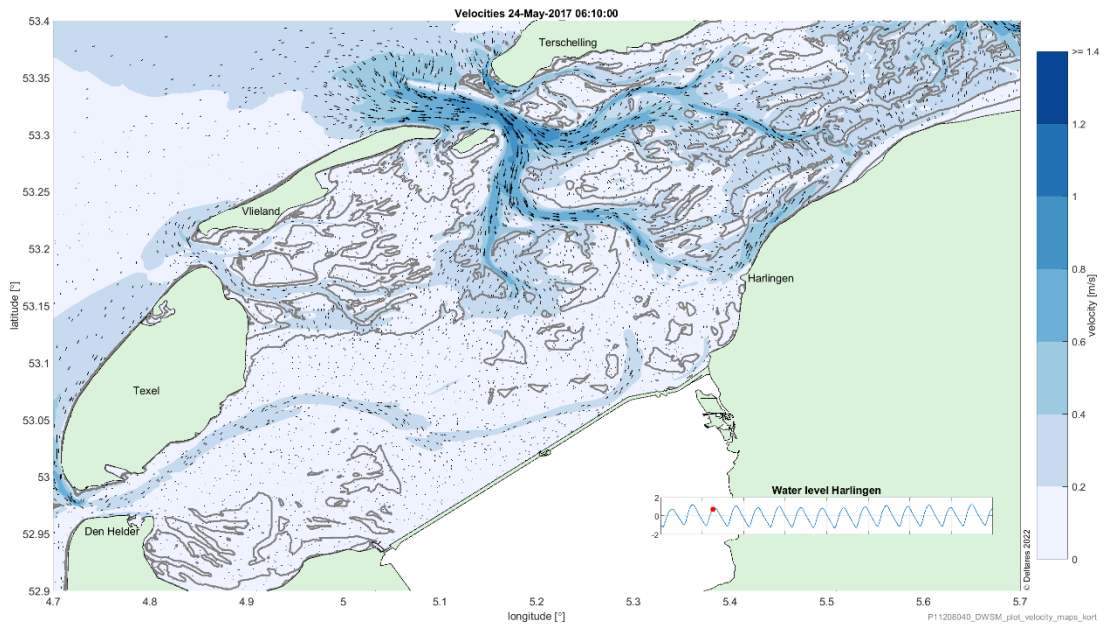
Het numerieke model van de Waddenzee (zie Bijlage A) geeft goed inzicht in de stromingspatronen in de westelijke Waddenzee als gevolg van het getij en onder invloed van wind. Eerst wordt gefocust op het effect van de getijstroming, waarna ook de invloed van stormen (via wind en golven) wordt beschouwd. Onderstaand zijn een aantal stromingsbeelden opgenomen van een getijperiode met weinig wind. Bij het opkomen van de vloed is te zien dat de vloed eerder via het Marsdiep naar binnen stroomt dan via het Zeegat van het Vlie. De getijgolf die via het Zeegat van het Vlie naar binnen komt, komt desondanks eerder aan bij Harlingen en het Kimstergat (Figuur 2.2). De route 'buitenom', via de diepere Noordzee, is sneller dan 'binnendoor' via de Doove Balg, Boontjes en Verversgat. Het getij stroomt vanuit het Verversgat oostwaarts via het Molenrak richting Harlingen en het Kimstergat. Vlak voor hoogwater in Harlingen is de vloedstroming in het Kimstergat maximaal, en deze lijkt dan duidelijk gevoed te worden door de Geul langs de Pollendam en het subgetijdengebied ten zuiden daarvan (Molenrak, Figuur 2.3). Tijdens eb stroomt het Kimstergat leeg via de Geul langs de Pollendam, het Verversgat en in mindere mate de Boontjes (Figuur 2.5). Later in de ebperiode is te zien hoe de stroming afneemt rond de vermoedelijke positie van het wantij, en hoe het Kimstergat voornamelijk leegstroomt via de Geul langs de Pollendam, terwijl het Verversgat en de Boontjes afwateren richting de Doove Balg (Figuur 2.6). Dit komt waarschijnlijk doordat de ebstroming in het Zeegat van het Vlie dan nog veel sterker is dan in het Marsdiep.



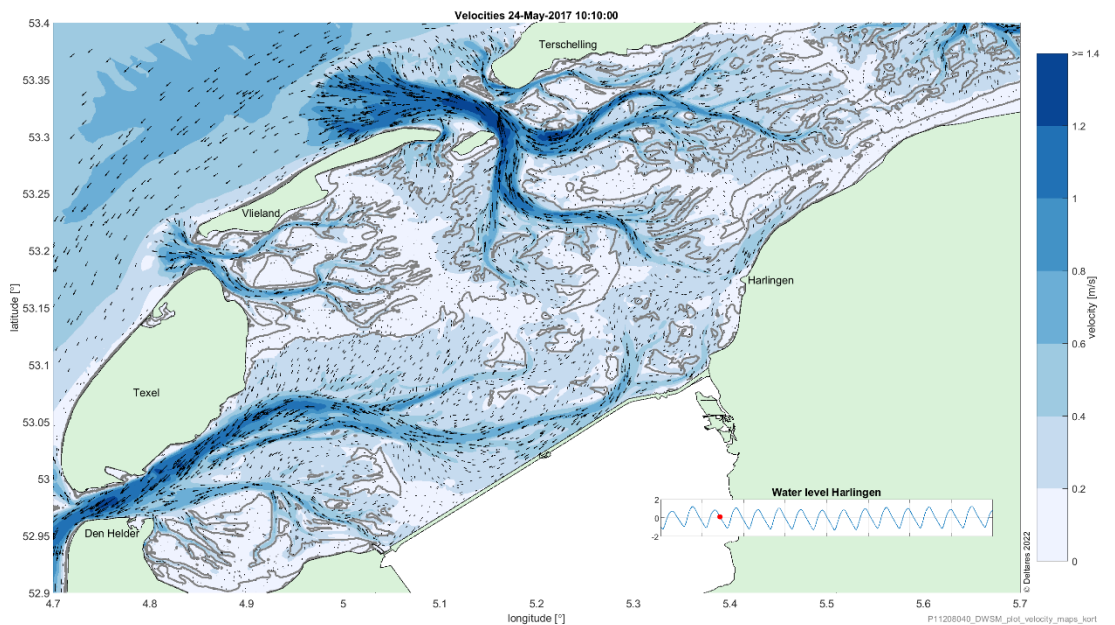
Figuur 2.2 Stroomsnelheden en vectoren bij het opkomen van de vloed in de Boontjes.



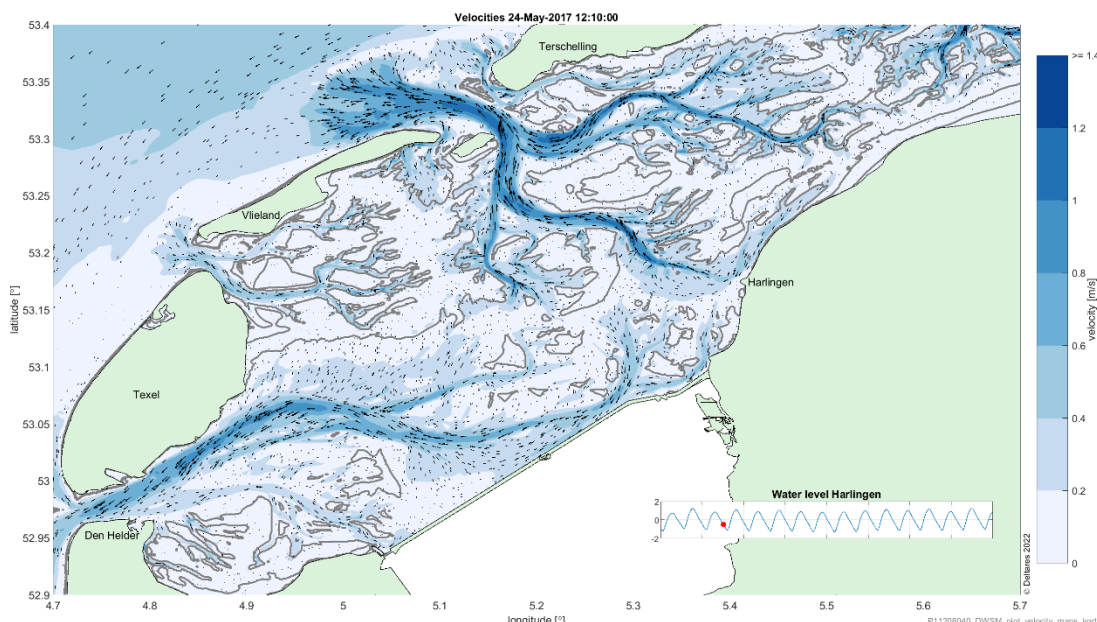
Figuur 2.3 Stroomsnelheden en vectoren bij maximale vloedstroming in het Kimstergat



Figuur 2.4 Stroomsnelheden en vectoren bij kentering in het Marsdiep en nog vloedstroming in het Vliebekken en het Kimstergat.



Figuur 2.5 Ebstroming in het Kimstergat, Verversgat en Boontjes.



Figuur 2.6 Stroomsnelheden en vectoren tijdens eb. Lage stroomsnelheden ten zuiden van de Pollendam geven een indicatie van de positie van het wantij.

De uitwisseling tussen het Kimstergat en de Boontjes is niet zo sterk en gedurende sommige fases van het getij zelfs vrij zwak. Als het getij tijdens vloed uit de Doove Balg stroomt, waaiert het uit over het Verversgat, Molenrak en de Boontjes. Als het getij tijdens eb uit het Kimstergat stroomt, waaiert het vooral uit over het Molenrak en de Geul langs de Pollendam. Het Kimstergat wordt vooral gevoed vanuit de Geul langs de Pollendam en het subgetijdengebied ten zuiden daarvan, en lijkt nauwelijks beïnvloed door de Boontjes (Figuur 2.9).

Om te kunnen bestuderen hoe een verandering in bodemligging invloed heeft op de stromingspatronen, is een simulatie gedraaid met een bodemligging van 2003 buiten de vaargeul. Door de bodem in de vaargeul niet te veranderen, wordt puur het effect van de omliggende morfologie inzichtelijk gemaakt en niet het effect van de drempelverwijdering. Deze simulatie wordt vergeleken met een simulatie met een bodemligging van 2015. Tabel 2.1 geeft een overzicht van de modelsimulaties en de benaming zoals gehanteerd in het vervolg van deze paragraaf. Dit hoofdstuk gaat verder in op het effect van de omliggende morfologie (vergelijking 1B met 2B), hoofdstuk 3 beschrijft de invloed van de drempelverwijdering.

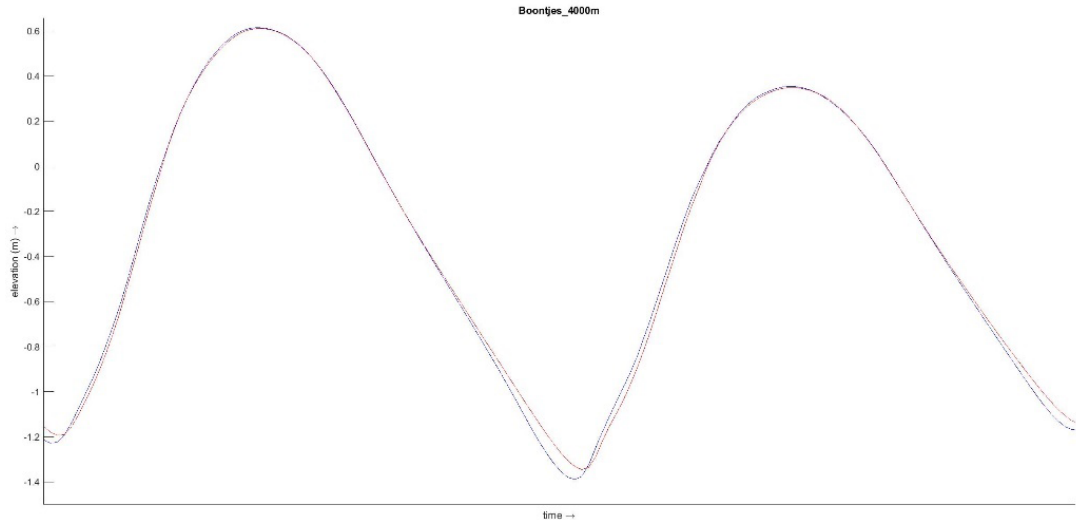
Tabel 2.1 Overzicht modelsimulaties met en zonder drempel in de vaargeul en voor bodemligging 2003 en 2015

		bodem westelijke Waddenzee	
		2003	2015
drempel in de vaargeul Boontjes	ja	1A	2A
	nee	1B	2B

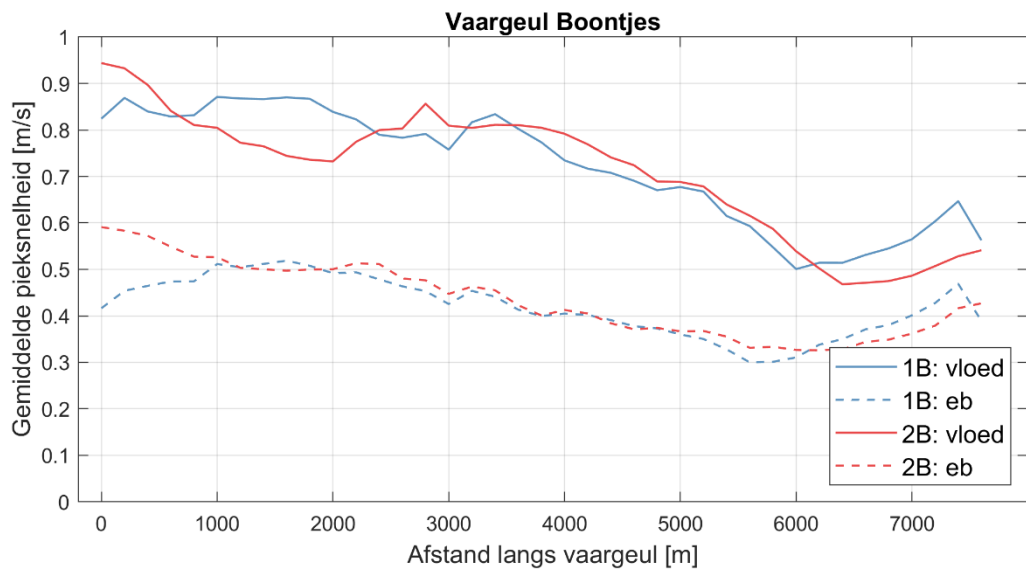
Door de morfologische veranderingen buiten de vaargeul treedt het laagwater in de Boontjes in 2015 eerder op en is het ook zo'n 5 cm lager dan in 2003 (Figuur 2.7). Ook de hoogwaterkentering treedt eerder op. Als gevolg van deze faseverschuiving laten verschilkaartjes van de stromingsbeelden een complex patroon zien (Figuur 2.9). De vloedfase is kort en de ebfase duurt langer dan de vloed, waardoor er een groot verschil zit

tussen de piekvloedsnelheden en de piekebsnelheden (Figuur 2.8). Als gevolg van de morfologische veranderingen tussen 2003 en 2015, nemen de pieksnelheden over grote delen van de vaargeul toe (Figuur 2.8). De toename is groter tijdens vloed dan tijdens eb. Alleen aan het noordelijke uiteinde nemen de pieksnelheden af (tussen km 6 en 7, zie ook Figuur 2.9). In het Kimstergat zijn de stroomsnelheden aan de oostzijde van de geul toegenomen, en aan de westzijde afgenomen (Figuur 2.9) ten opzichte van 2003. Als gevolg hiervan sluit de stroming in het Kimstergat beter aan op de Geul langs de Pollendam.

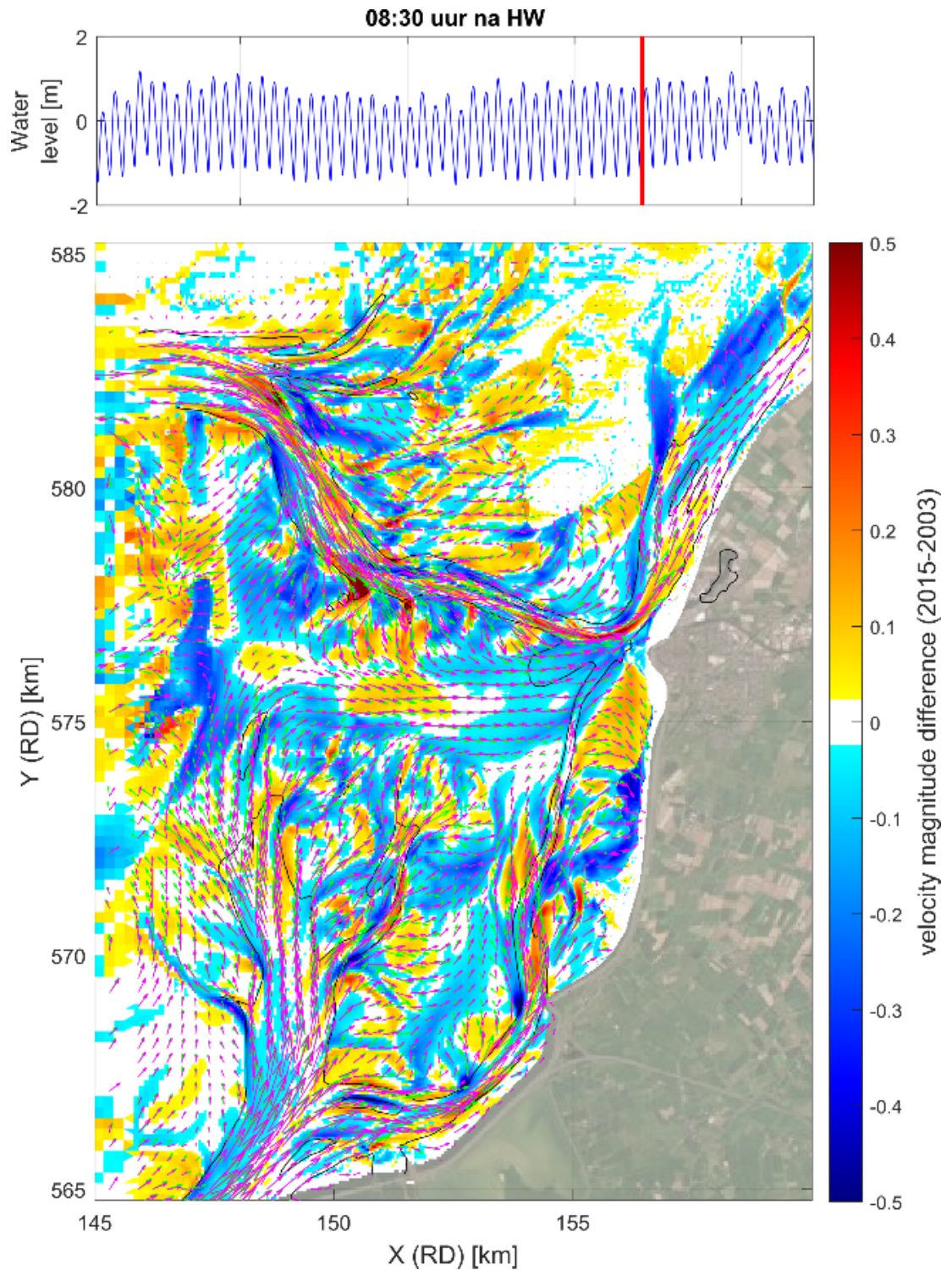
Tussen Boontjes km 1 en 2 nemen de snelheden ook af (Figuur 2.8), daar is de getijgeul breder dan de vaargeul en treden wat complexere stromingspatronen op.



Figuur 2.7 Waterstand in de geul Boontjes (op punt 4000m) in 2003 (rood) en 2015 (blauw). Enige verschil tussen beide simulaties is de bodemligging buiten de vaargeul.



Figuur 2.8 Piekvloedsnelheden (doorgetrokken lijn) en piekebsnelheden (stippellijn) in de vaargeul Boontjes voor 2003 (blauw) en 2015 (rood). Links in de grafiek is het zuidelijke uiteinde van de geul nabij Zurich, rechts het noordelijke uiteinde nabij Harlingen.



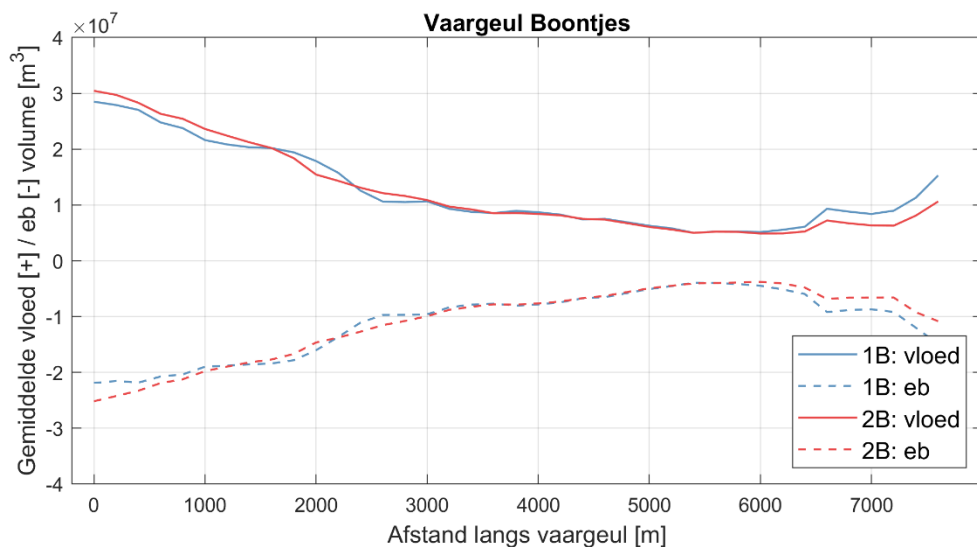
*Figuur 2.9 Snelheidsvectoren in 2003 (paars) en 2015 (groen). Het verschil in snelheidsgrootte is in kleur weergegeven, met geel/rood als toename in 2015 t.o.v. 2003 en in blauw een afname. De figuur toont een snapshot tijdens het begin van de vloedperiode.*

Door de morfologische veranderingen buiten de vaargeul tussen 2003 en 2015:

- neemt het getijvolume in het zuidelijk deel van de Boontjes toe
- neemt het getijvolume in het noordelijk deel van de Boontjes af
- blijft het getijvolume in het middendeel (tussen km 3 en 6) gelijk.

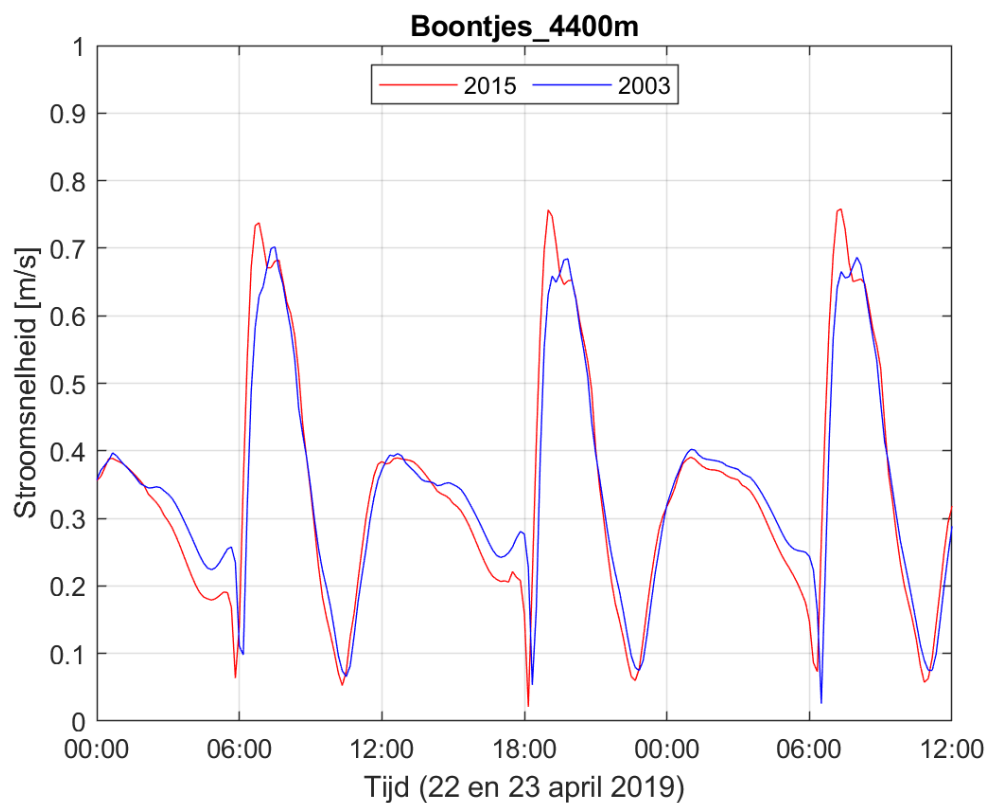
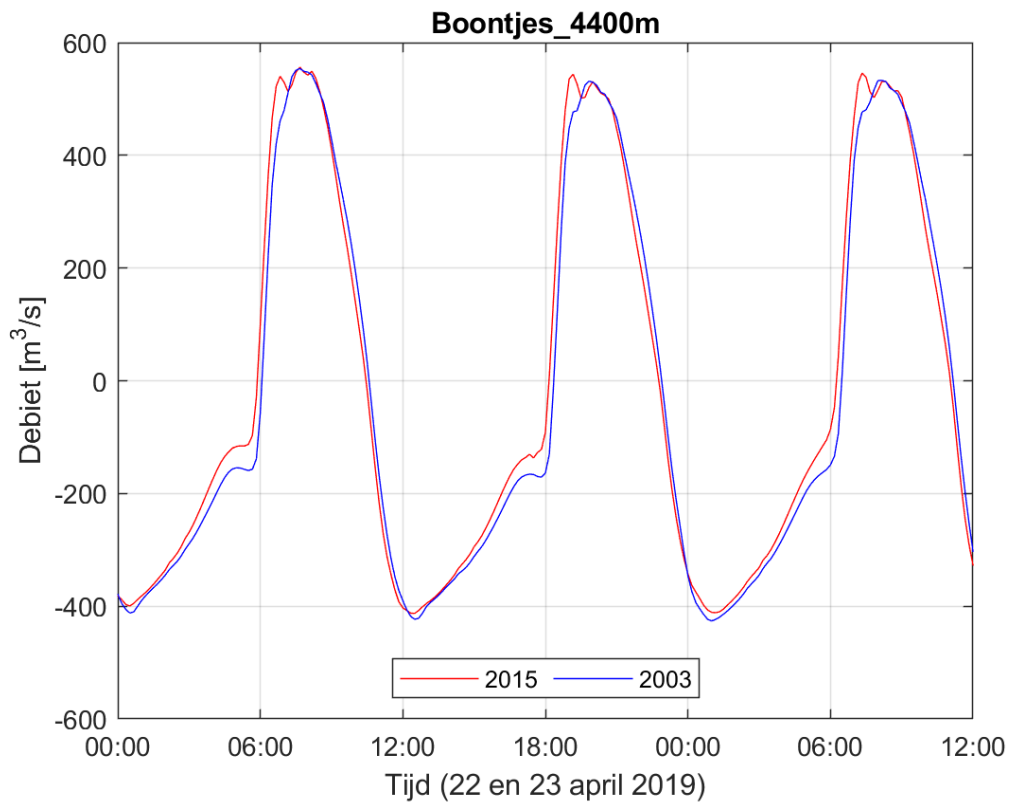


Figuur 2.10 toont de vloed- en ebvolumes langs de vaargeul voor de 2003 en 2015 situatie. De afname in het noordelijk deel lijkt vooral het gevolg van zwakke stroming in het subgetijdengebied ten zuiden van de Pollendam. De toename in het zuidelijk deel past in de (tijdelijke) uitruiming van de grotere geul (de geul is daar breder dan de vaargeul en de doorsnede ruimt uit), zoals besproken in Paragraaf 2.1. Dat het getijvolume tussen km 3 en 6 nauwelijks is veranderd, geeft aan dat de sedimentatie in het omliggende gebied niet direct invloed heeft op het getijvolume door de geul. Door het omhoog komen van de omliggende bodem, is de natte doorsnede van de vaargeul Boontjes en de taluds afgenomen (d.w.z. de rekenkundige doorsnede in het model). De vaargeul wordt als het ware vanaf de zijkanten 'geknepen'. Dit is ook goed te zien in de verschilbodem in Figuur 2.1. Met een gelijkblijvend debiet leidt dit tot een toename van de piekstromsnelheden in de vaargeul (Figuur 2.8). Kortom, de verschillende bodemligging heeft vooral heel lokaal een effect op de stroomsnelheden, omdat alleen het kleiner worden van de natte doorsnede effect heeft op de stroomsnelheden en het getijvolume voor het grootste deel gelijk blijft.



Figuur 2.10 Totaal vloedvolume (+) en ebvolume (-) door de vaargeul Boontjes uitgezet langs de vaargeulas voor de bodem van 2003 (blauw; let op zonder drempel in de vaargeul!) en voor de bodem van 2015 (rood). Links in de grafiek is het zuidelijke uiteinde van de geul nabij Zurich, rechts het noordelijke uiteinde nabij Harlingen.

Bij het analyseren van gemiddelde parameters zoals gemiddelde getijvolumes zijn de verschillen als gevolg van morfologische veranderingen klein. Binnen de getijcyclus treden echter wel subtiele veranderingen op. Als we bijvoorbeeld de geuldebieten op punt 4400 m in de Boontjes beschouwen (Figuur 2.11), vallen naast de eerder genoemde faseverschuiving (kentering treedt eerder op in 2015) ook de eerdere vloedpiek in 2015 en de lagere debieten in de tweede fase van de eb op. De stroomsnelheden op hetzelfde punt laten consequent lagere snelheden over de ebfase zien. Over de simulatieperiode middelen dit soort verschillen uit (Figuur 2.10).

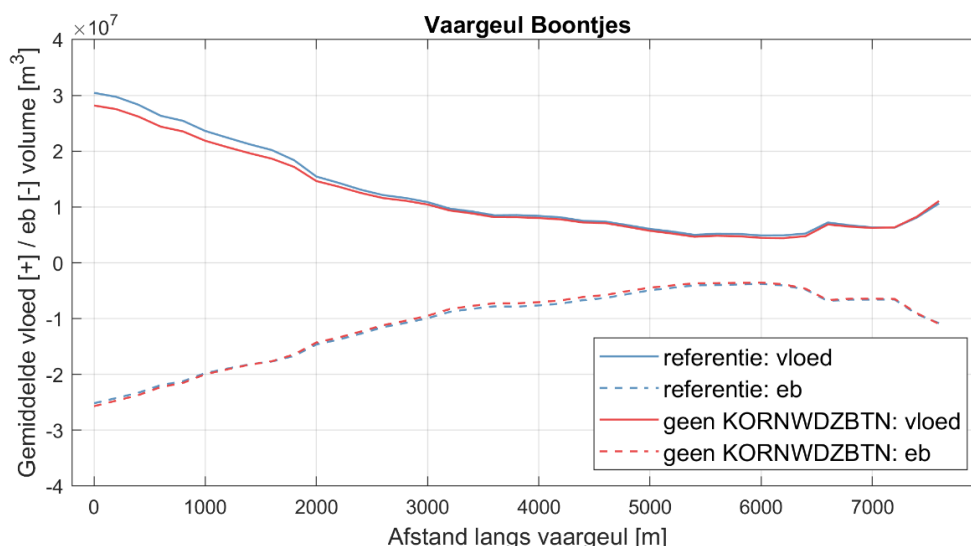


*Figuur 2.11 Boven: Debieten door de doorsnede op punt 4400 m in de Boontjes. Vloeddebiet is positief en eb is negatief. Onder: stroomsnelheid op het observatiepunt 4400 m in de Boontjes.*

## 2.3 Invloed van de zoetwaterafvoer

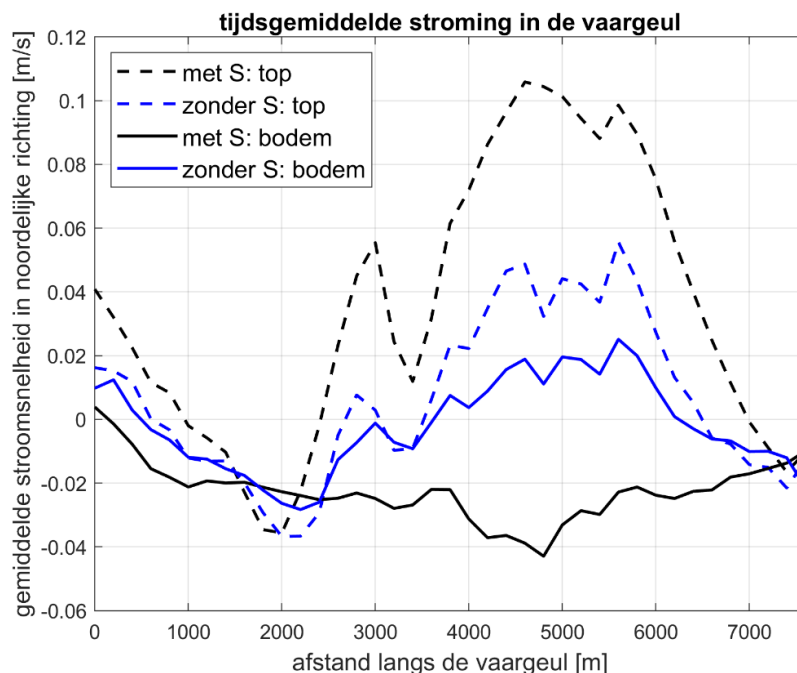
De analyse uit Paragraaf 2.2 gaat in op het effect van veranderende bodemligging op de stroming in en rondom de Boontjes. De stroming is hier complex, omdat deze ook beïnvloed wordt door het spuien van zoet water bij Kornwerderzand. Figuur 2.12 toont een simulatie met spuien ten opzichte van een simulatie zonder spuien (beide met saliniteit). Het advectieve effect van het spuien op het getijvolume in de Boontjes dooft vrij snel uit<sup>1</sup> en treedt logischerwijs voornamelijk op tijdens vloed.

Een belangrijker effect wordt gevormd door de gravitatiecirculatie, waarbij nabij de bodem een reststroming optreedt die naar de zoetwaterbron is gericht terwijl de reststroming bij het oppervlak de andere kant opstaat. Als gevolg hiervan wordt slib netto naar het zuiden getransporteerd, bij de bodem zijn de sedimentconcentraties immers hoger dan aan de wateroppervlakte. Zo kan slib vanuit (de verspreidingslocaties in) het Kimstergat de Boontjes in worden getrokken. Een simulatie zonder saliniteit en dus zoet-zoutgedreven dichtheidsstroming, maakt inzichtelijk wat het effect hiervan is (Figuur 2.13). Zonder saliniteit zit er flinke variatie in de richting van de reststroming bij de bodem en wisselen noordwaarts en zuidwaarts gerichte reststroming elkaar af. In de simulatie met saliniteit zien we een zuidwaarts gerichte reststroming bij de bodem over bijna de gehele vaargeullengte. Dit komt overeen met waargenomen reststromingspatronen in het Kimstergat uit veldmetingen (Schulz & Gerkema, 2018).



Figuur 2.12 Effect van het spuidebiet op het vloedvolume (+) en het ebvolume (-) in de vaargeul Boontjes. Links in de grafiek is het zuidelijke uiteinde van de geul nabij Zurich, rechts het noordelijke uiteinde nabij Harlingen.

<sup>1</sup> N.B. Punt 0 ligt bij Zurich, op ca. 5 kilometer vanaf de spuisluizen bij Kornwerderzand.



Figuur 2.13 Effect van zoet-zoutgedreven dichtheidsstroming op de residuele stroming in de Boontjes. Blauw geeft de simulatie zonder saliniteit weer en zwart de referentie met saliniteit (scenario NAP-3,8m). Doorgetrokken lijn geeft de stroming bij de bodem en gestreept bij het oppervlak.

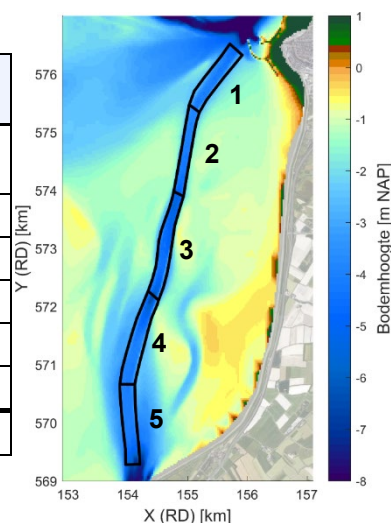
## 2.4 Gesimuleerde baggervolumes in 2003 en 2015

Na de bestudering van de hydrodynamica en de gravitatiecirculatie is het numerieke model van de Waddenzee ingezet om het baggervolume te simuleren zonder drempel in de vaargeul voor de morfologie in 2003 en 2015. Op basis van de stroomsnelheden in vaargeul voor beide bodemliggingen wordt een klein effect op baggerhoeveelheden in de Boontjes verwacht. In de uiterste noorden wordt een toename van het baggerbezwaar verwacht en in het zuiden een afname. De 3D slijbtransportsimulaties laten echter een ander beeld zien.

In de referentieberekening (2015 zonder drempel in de Boontjes) is het baggerbezwaar het grootste in de vakken 1 en 3 en klein in vak 5. Daarnaast laat het model zien dat er nauwelijks resuspensie plaatsvindt van de slijbsedimentatie in vak 1 en 2, alleen een klein beetje tijdens periodes met sterke wind (zie bijlage B.2.1.2). In de vakken 3-5 vindt wel resuspensie plaats, en deze wordt vooral veroorzaakt door het getij (de stroomsnelheden zijn immers ook groter in het zuidelijke deel).

Tabel 2.2 Baggerhoeveelheden per baggervak

Baggervak	km	Baggermassa per jaar (simulatieperiode x4) [kton/j]	
		Bodemligging 2015	Bodemligging 2003 (zonder drempel)
Vak 1	6.2-7.6	23,5	18,2
Vak 2	4.5-6.2	18,1	14,3
Vak 3	2.5-4.5	24,5	18,1
Vak 4	1.5-2.5	16,5	5,1
Vak 5	0-1.5	3,4	3,8
<b>Totaal</b>		<b>86,0</b>	<b>59,4</b>



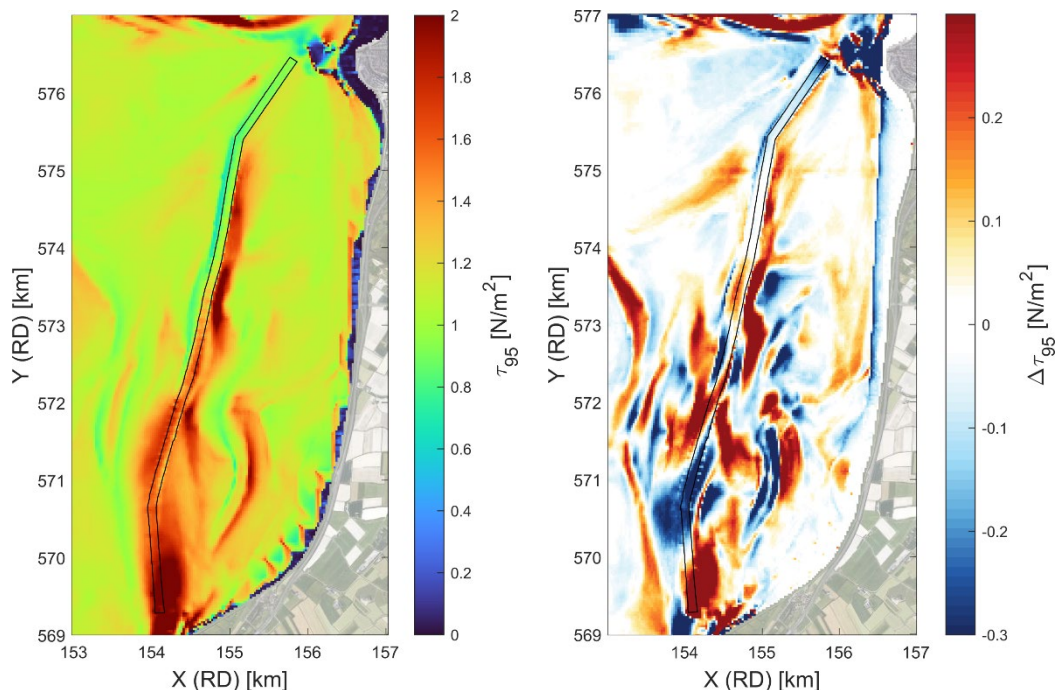
Met de bodemligging van 2003 (en zonder drempel in de vaargeul), zijn de baggervolumes in de vakken 1-4 zo'n 20-70% lager dan in 2015. Alleen in vak 5 zijn de baggervolumes hoger. Dit is consistent met de morfologische ontwikkeling: het zuidelijk deel van de Boontjes ruimt uit, terwijl de geul ten noorden daarvan kleiner wordt. Dat de baggervolumes toenemen bij toenemende pieksnelheden in vakken 2 en 3 (tussen km 3 en 6, zie Figuur 2.8), wordt enerzijds veroorzaakt door de trechterwerking in de Boontjes: aan de zuidzijde nemen de getijvolumes toe, terwijl deze rond km 6 zijn afgenomen. De stroomsnelheden nemen over de geul dus sterker af van zuid naar noord. Hierdoor wordt er vanaf de zuidzijde meer sediment aangevoerd, wat zich in de Boontjes kan afzetten. Anderzijds wordt er mogelijk door toegenomen golfgedreven resuspensie meer sediment vanaf de omgeving aangevoerd naar de Boontjes. Of de golfgedreven resuspensie inderdaad een rol speelt, maken we inzichtelijk via de bodemschuifspanningskaarten en de slibbalans.

Figuur 2.14 toont de bodemschuifspanning die 5% van de tijd wordt overschreden tijdens de simulatieperiode (d.w.z. 95-percentiel), wat een goed beeld geeft van de bodemschuifspanningen op de platen tijdens condities met flinke golfslag, of in geulen (waar de bijdrage van golven aan de bodemschuifspanning klein is) tijdens springtijcondities. Voor golven zijn in dit gebied de situaties met wind uit het zuidwesten maatgevend, omdat dan de strijklengte (de afstand waarover de wind over het water waait) het grootst is. In de huidige situatie zijn de bodemschuifspanningen het hoogst aan de zuidzijde van de vaargeul en getijgeul Boontjes. Hier zijn de stroomsnelheden immers ook hoog. De rode kleuren in het rechterpaneel van Figuur 2.14 laten zien waar de (piek)bodemschuifspanning is toegenomen, en blauwe kleuren tonen waar de (piek)bodemschuifspanning is afgenomen. In de vaargeul zien we aan de zuidzijde een toename van de schuifspanningen als gevolg van de toename in de stroomsnelheden. In vak 4 (zie figuur naast Tabel 2.2) en vak 1 nemen de schuifspanningen af en het baggerbezwaar sterk toe. In vakken 2 en 3 is het beeld afwisselender. De effecten van toegenomen piekstroomsnelheden en afgenomen golfresuspensie zijn vergelijkbaar en tegengesteld, waardoor de bodemschuifspanning soms een toename, dan weer een afname laten zien.

Op de platen zijn ook hoge bodemschuifspanningen aanwezig. Aan de westzijde van de vaargeul, op het talud, zijn de bodemschuifspanningen laag. De golfhoogte wordt beperkt door de geringe strijklengte vanaf de platen, terwijl de lokale waterdiepte toeneemt. Aan de oostzijde van de geul zijn de bodemschuifspanningen hoog, omdat er hogere golven kunnen optreden bij zuidwestenwind dan aan de westzijde van de geul. Op de platen zien we dat de meest ondiepe gebieden een toename in de schuifspanning tonen, terwijl de lokaal diepere delen van het ondiepe areaal een afname van de schuifspanning laten zien. Dit zou het gevolg kunnen zijn van toenemende schuifspanning op ondiepste delen en een meer beschutte ligging van de lokaal diepere delen. De geïmplementeerde strijklengteaanpak<sup>2</sup> in het numerieke model overschat hier mogelijk de golfhoogte op de platen direct ten oosten van de vaargeul, omdat deze vooral de waterdiepte in de vaargeul meeweegt, en te weinig het beschermende effect van de platen. Om hier mee inzicht in te krijgen, bevelen we aan het effect van de stroming en de golven op de bodemschuifspanningen in meer detail te onderzoeken. Daarbij raden we aan om een geavanceerder golfpropagatiemodel in te zetten.

---

<sup>2</sup> Bij de strijklengteaanpak wordt de golfhoogte in een roostercel bepaald door de waterdiepte en de afstand waarover de wind waait. Voor de waterdiepte wordt een gewogen gemiddelde genomen tussen de waterdiepte in de betreffende roostercel en de waterdieptes in de vijf roostercellen terugkijkend in de richting waar de wind vandaan komt.



Figuur 2.14 Linker paneel: piekbodemschuifspanningen (95-percentiel) van het modelscenario met bodem 2015 en de huidige vaargeuldimensies (zonder drempel); rechter paneel: verschil in piekbodemschuifspanning t.o.v. een scenario met omliggende morfologie uit 2003 (zonder drempel in de vaargeul).

Zonder veranderingen in de bodemligging in de vaargeul simuleert het numerieke model een ruim 30% lager baggerbezwaar in 2003 t.o.v. 2015. Het is lastig om dit te vergelijken met velddata, omdat de vaargeul in 2003 niet, of alleen incidenteel, gebaggerd werd. Mogelijk vond er wel sedimentatie plaats, maar deze was nog niet hinderlijk voor de scheepvaart. Bovendien analyseren we hier een 2003-situatie zonder drempel in de vaargeul (om enkel het effect van de omliggende morfologie in het baggerbezwaar inzichtelijk te maken), die in werkelijkheid niet is opgetreden. Desalniettemin is het waarschijnlijk dat de sedimentatie, als deze al optrad, lager was dan het model nu berekent. Daarmee onderschat het model het effect van de morfologische veranderingen (en de drempelverwijdering) op het baggerbezwaar in de Boontjes.

Ondanks dat de piekstromsnelheden in de simulaties toenemen in 2015 t.o.v. 2003 neemt het baggerbezwaar ook toe. Dat lijkt vergelijkbaar met het waargenomen effect van de drempelverwijdering in 2012. Ook daar voorspelden de modellen een toename van de snelheden, en dus werd er geen toename van het baggerbezwaar verwacht. Het baggerbezwaar is echter wel fors hoger dan voor de drempelverwijdering. De pieksnelheden zijn hiermee dus geen goede indicator voor het baggerbezwaar.

Mogelijk neemt het baggerbezwaar toe als gevolg van de afname in ebsnelheden, die bijna over de gehele ebperiode plaatsvindt, terwijl de piekebsnelheden nauwelijks wijzigen. De toegenomen depositie tijdens eb wordt mogelijk niet volledig opgeruimd tijdens de toegenomen pieksnelheden bij de volgende vloedperiode, met een groter baggerbezwaar tot gevolg. Daarnaast is de transportgradiënt tijdens vloed toegenomen (zoals beschreven in Paragraaf 2.2), waardoor er mogelijk meer materiaal naar de vaargeul wordt getransporteerd en in het middengedeelte aanslibt.

Om verschillende invloedsfactoren uit elkaar te trekken, worden de effecten beschouwd als onderdeel van de belangrijkste elementen in slibtransport<sup>3</sup>: (1) de aanvoer van slib, (2)bruto sedimentatie en (3) bruto erosie.

Bruto sedimentatie wordt vooral bepaald door de verhouding tussen de waterdiepte en de valsnelheid, wat beperkt veranderd is. Wel kan de bruto sedimentatie licht zijn toegenomen door de langere verblijftijd in de geul (als gevolg van de afname van de ebsnelheden). Aangezien in deze simulaties dezelfde geulbodem gehanteerd is, is ook de bruto erosie niet veel veranderd. Mogelijk is de bruto erosie licht afgenomen doordat er minder grote golven vanaf de platen voortplanten richting de geul en door de afname van ebsnelheden.

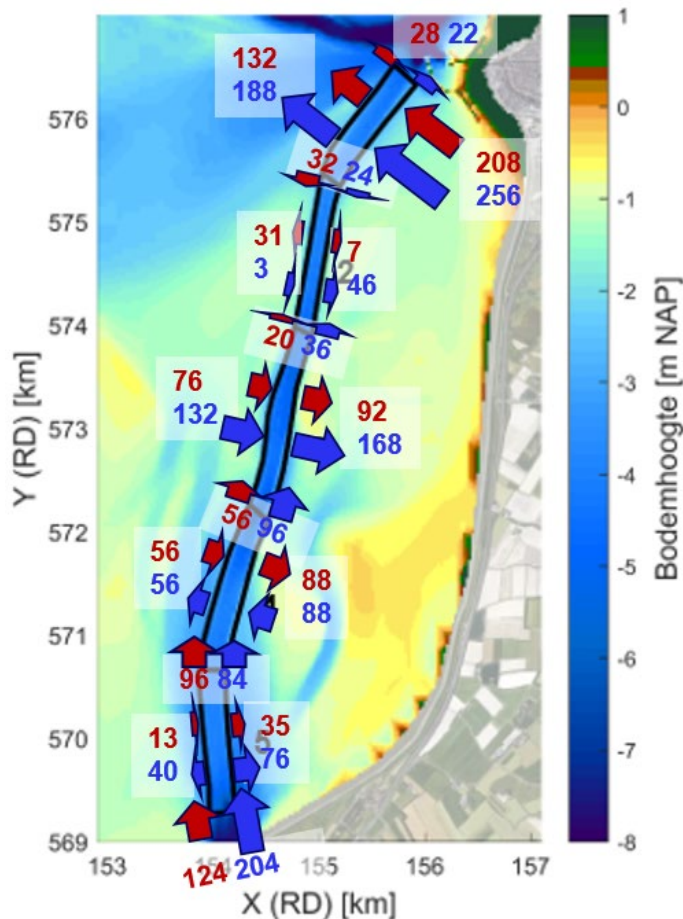
De aanvoer van slib richting de Boontjes lijkt dus de voornaamste oorzaak voor het toegenomen baggerbezwaar, aangezien bruto sedimentatie en erosie niet veel veranderd zijn. De aanvoer kan tussen 2003 en 2015 toegenomen zijn door:

- Meer aanvoer vanaf de platen wegens toegenomen golfgedreven resuspensie
- Meer aanvoer vanaf de Doove Balg wegens toename van de stroomsnelheden in het zuidelijke deel

Vanaf het zuiden wordt slib aangevoerd naar de platen ten oosten van de Boontjes, dat vervolgens weer in de Boontjes wordt afgezet. Het plaatgebied ten oosten van de Boontjes fungeert daarmee waarschijnlijk als een tijdelijke opslag van slib. Figuur 2.15 toont de slibbalans voor de bodemligging van 2003 (rood) en 2015 (blauw). In 2015 neemt de uitwisseling tussen de vaargeul en het omliggende gebied toe, waarschijnlijk als gevolg van toegenomen golfwerking. Ook de aanvoer vanuit het zuiden is flink toegenomen.

---

<sup>3</sup> N.B. slibtransport wordt over het algemeen en ook in de Boontjes niet gelimiteerd door de transportcapaciteit.



Figuur 2.15 Slibbalans van de vaargeul Boontjes op basis van modelresultaten, rode pijlen zijn voor het scenario met bodem 2003 en blauwe pijlen voor het scenario met bodem 2015. Getallen geven transporten in kton/j.

## 2.5 Inschatting ontwikkeling tot 2050

De ontwikkeling van de toekomstige baggervolumes wordt grotendeels gestuurd door de grootschalige morfologische ontwikkeling van de westelijke Waddenzee. De morfologische ontwikkeling van het grotere gebied in de afgelopen decennia kenmerkt zich door een gestage sedimentatie op het sub- en intergetijdengebied, zowel rondom de Boontjes als het noordelijker gelegen Kimstergat. In de Boontjes is er een ontwikkeling gaande, waarbij de dwarsdoorsnede in het noorden kleiner wordt, terwijl de dwarsdoorsnede in het zuiden toeneemt. Deze respons wordt ondersteund door hydrodynamische simulaties van de huidige geul (zonder drempel) met een omliggende bodemligging van 2003 versus een omliggende bodemligging van 2015 (zie Paragraaf 2.2). In het uiterste noordelijke deel van de vaargeul Boontjes zien we een afname van de stroomsnelheden, veroorzaakt door een afname van de stroming over het subgetijdengebied ten zuiden van de Geul langs de Pollendam (Molenrak), in combinatie met een toename van het debiet door de Geul langs de Pollendam. Ook in het Kimstergat nemen de debieten af. De stroming aan het noordelijke uiteinde van de Boontjes lijkt vooral door deze stroming vanuit het westen te worden beïnvloed. In het zuidelijk deel van de Boontjes zien we de getjebieten toenemen, wat past bij de uitruimende getjigeul (vermoedelijk van tijdelijke aard als de geul vanuit het noorden verder wordt geknepen). Over de hele geul wordt de snelheidsgradiënt groter, waardoor ook de transportgradiënt toeneemt. Daardoor wordt meer materiaal aangevoerd via de geul en kan meer aanslibbing plaatsvinden in de geul (doordat het materiaal niet meer uitstroomt).



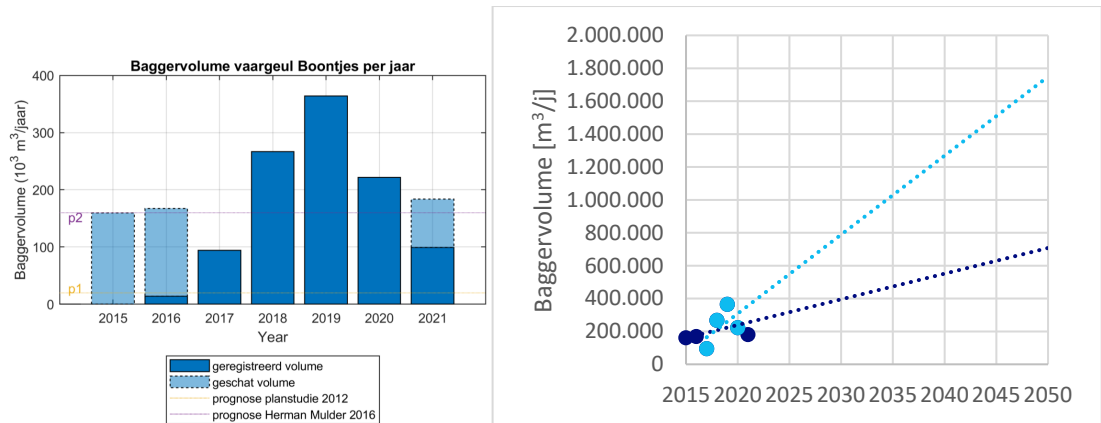
In het middelste gedeelte van de Boontjes zijn de getijvolumes nauwelijks veranderd als gevolg van morfologische veranderingen op de platen tussen 2003 en 2015 (n.b. dus buiten het effect van de drempelverwijdering). De sedimentatie tussen 2003 en 2015 heeft zich in het kombergingsgebied van de Boontjes vooral in het subtidaal voltrokken (de sedimentatie betreft ca. 20 cm tussen 2003 en 2015). Daardoor is het effect van de ophoging van de omliggende platen op het debiet door de Boontjes beperkt (het getijprisma wordt vooral door de hoogte van het intertidaal gestuurd). De getijgeul wordt echter wel wat geknepen, waardoor de taluds steiler worden. Als gevolg hiervan nemen de piekstromsnelheden door de Boontjes licht toe en wordt mogelijk meer materiaal aangevoerd vanaf de platen. Ook berekent het model een afname van de snelheden tijdens het tweede gedeelte van de ebfase, die mogelijk een belangrijke rol speelt in de toename van het baggerbezwaar.

Uit Paragraaf 2.3 blijkt dat de ontwikkeling van de omliggende morfologie tussen 2003 en 2015 van grote invloed is geweest op het toegenomen baggerbezwaar. De toename van het baggerbezwaar manifesteert zich echter niet alleen in het uiterste noorden, waar het debiet afneemt, maar strekt zich uit tot het zuiden. Alleen het uiterste zuidelijke deel laat een afname van het baggerbezwaar zien, omdat het debiet hier toeneemt (N.B. het zuidelijke deel van de vaargeul is voornamelijk zandig, wat niet in het model wordt meegenomen). Er wordt ook relatief weinig gebaggerd in het zuidelijke deel van de vaargeul, dat in recente jaren verruimt, dus dat ligt in lijn met de modelresultaten. Dat het model zo'n groot effect op de baggervolumes berekent als gevolg van de veranderingen in omliggende morfologie, terwijl de debieten over grote delen van de vaargeul vergelijkbaar blijven en de pieksnelheden toenemen, is waarschijnlijk het gevolg van toegenomen golfwerking op het omliggende plaatgebied. Door de hogere bodemligging zal er meer golfgedreven resuspensie plaatsvinden. Ook de afname van de ebsnelheden tijdens het tweede deel van de ebfase dragen hieraan bij.

De sedimenterende trend op de platen zet naar verwachting door in de toekomst (zie Paragraaf 2.1), en zal dan een groter effect gaan hebben op het kombergingsvolume rondom de Boontjes, omdat steeds grotere arealen rondom de Boontjes van subtidaal verschuiven naar intertidaal. Door het kleinere debiet door de Boontjes zullen de stroomsnelheden af gaan nemen en gaat de geul naar verwachting opvullen. Deze respons hebben we ook duidelijk gezien bij het landwaartse uiteinde van de vaargeul Holwerd-Ameland (Herman et al., 2016). Vanwege de verschuiving van opvulling van subtidaal naar intertidaal is het mogelijk dat de snelheid waarmee de komberging afneemt in de toekomst gaat toenemen.

Om het effect op het baggerbezwaar van deze toekomstige sedimentatie op de platen te kwantificeren, wordt gebruik gemaakt van evenwichtsrelaties. Hierin is de ontwikkeling van het kombergingsvolume leidend. Tussen 2003 en 2015, zijn de platen rondom de Boontjes met 10 mm/j en het intergetijdengebied met 22 mm/j opgehoogd. Lineair doorzetten van deze trend geeft tussen 2015 en 2050 nog een ophoging van 45-77 cm, die voornamelijk in het intergetijdengebied zal plaatsvinden aangezien het gebied nu op een hoogte van ongeveer gemiddeld laagwater ligt. Bij een getijslag van 1.9 m en een gelijkblijvend areaal wat op de Boontjes afwatert, leidt sedimentatie van 45-77 cm tot een verkleining van het kombergingsvolume van 20-30% (onder de aanname dat deze sedimentatie zich volledige boven de laagwaterlijn afzet en ca. 75% van het kombergingsgebied bestaat uit intergetijdengebied). Deze verkleining van het kombergingsvolume leidt tot een vergelijkbare afname van de evenwichtsdoorsnede en, vanwege de niet-lineaire relatie tussen stroomsnelheid en sedimenttransport, tot een ruime verdubbeling van het baggerbezwaar. Zie Bijlage C voor een nadere beschrijving van de analyse aan de hand van empirische relaties.

Ook kan een met een lineaire extrapolatie van de baggervolumes een inschatting worden gemaakt van het baggerbezwaar in de toekomst. Indien we een extrapolatie doen op basis van alle baggervolumes tussen 2015 en 2021, is dit inclusief de schattingen voor 2015, 2016 en 2021. Op basis van de registreerde volumes over de periode 2017-2020 komt de extrapolatie hoger uit. De combinatie van beide extrapolaties levert een bandbreedte van 0,7 tot 1,7 miljoen m<sup>3</sup>/j (Figuur 2.16). Er is echter geen significante, trendmatige toename aanwezig in de data tussen 2015 en 2021 (R<sup>2</sup> van 0.37). Een extrapolatie kan daardoor dus een onrealistische inschatting geven. We benoemen deze hier toch om een idee te krijgen van de mogelijke omvang in een uiterst denkbaar scenario.



Figuur 2.16 Ontwikkeling baggerbezwaar (linker paneel) en lineaire extrapolatie van deze getallen inclusief (donkerblauw) en exclusief (lichtblauw) de schattingen voor 2015, 2016 en 2021 (rechter paneel).

Ter vergelijking beschouwen we het baggerbezwaar bij de vaargeul Holwerd Ameland. Dit is een geulstaart die wordt onderhouden op een diepte van -4 m NAP, vergelijkbaar met de Boontjes. In de laatste ~4 km van deze geul wordt ruim 1,1 miljoen m<sup>3</sup>/j gebaggerd. De verkleining van het kombergingsgebied via sedimentierend intergetijdengebied wordt als belangrijkste aandrijvende kracht van de toenemende baggervolumes beschouwd. De ontwikkeling van deze geul geeft enig gevoel voor mogelijke orde van grootte van (toekomstig) baggerbezwaar en laat zien dat een lineaire toename van het baggerbezwaar voor een zeer lange periode mogelijk is; zeker wanneer het intergetijdengebied opvult met sediment (zoals in de nabije toekomst wordt verwacht voor de Boontjes).

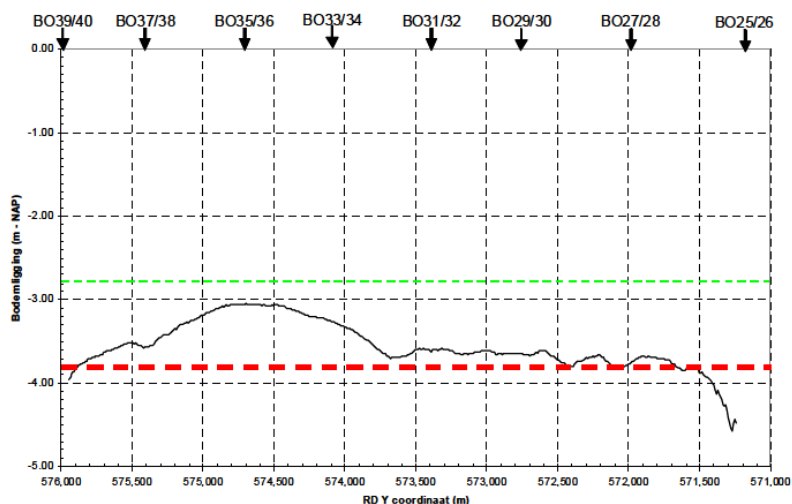
### 3 Het effect van verschillende vaargeuldimensies en verspreidingsstrategieën op het baggerbezwaar

In het voorgaande hoofdstuk is het effect van veranderingen in de omliggende morfologie op de stroming en het baggerbezwaar in de Boontjes beschreven. Mogelijke ingrepen om het baggerbezwaar te verkleinen hebben betrekking op het aanpassen van de vaargeuldimensies en het optimaliseren van de verspreidingsstrategie. In dit hoofdstuk beschouwen we verschillende vaargeuldimensies (inclusief de drempelverwijdering) en daarnaast proberen we een inschatting te maken van de retourstroom vanaf verspreidingsvakken naar de Boontjes. Hieruit kunnen lessen worden getrokken voor het beheer van de vaargeul. Ook in dit hoofdstuk wordt weer gebruik gemaakt van de inzichten uit de data analyse (Colina Alonso et al., 2021), het 3D slibtransportmodel en de empirische evenwichtsrelaties.

#### 3.1 Verschillende bodemliggingen in de vaargeul

Om het effect van de bodemligging in de vaargeul te beoordelen wordt gebruik gemaakt van drie verschillende scenario's waarin de bodemligging in de vaargeul verschilt. Daarnaast wordt een vierde scenario in dit hoofdstuk gebruikt om het effect van het verspreiden van baggerspecie op de verspreidingslocaties te kwantificeren. De verschillende scenario's zijn als volgt:

- A. 'NAP-3,8m' met bodemligging die representatief is voor de huidige situatie met de omgevingsbathymetrie zoals ingemeten in 2015 en dus zonder drempel in de Boontjes. In lijn met de huidige baggerpraktijk wordt ongeveer 70% van de baggerspecie uit de vaargeul Boontjes bij vloed gestort in het Kimstergat (d.w.z. stortlocatie K1) en wordt het overige deel bij eb gestort ten zuiden van de vaargeul Boontjes (d.w.z. stortlocatie Boontjes). Dit scenario wordt aangehouden als de referentie waarmee de andere scenario's worden vergeleken.
- B. 'Drempel' (uitgangssituatie vóór de drempelverwijdering): ten opzichte van de referentieberekening (A) is de bodemligging aangepast, zodat er weer een drempel in de vaargeul aanwezig is, zie Figuur 3.1. De bodemligging buiten de vaargeul is echter gelijk aan de bodemligging in de referentieberekening (A). Merk op dat deze combinatie van de bodemligging in en buiten de vaargeul in werkelijkheid nooit heeft bestaan.
- C. 'NAP-4,7m': ten opzichte van de referentieberekening (A) is de bodemligging in de vaargeul Boontjes verdiept tot een streefdiepte van -4,7 m NAP. Waar de bodemligging in de vaargeul in de referentieberekening al lager is dan -4,7 m NAP is de bodem niet veranderd ten opzichte van de referentieberekening (A).
- D. 'Zonder verspreiden': in deze variant wordt bij bodemligging NAP-3,8m het gebaggerde slib niet verspreid op de verspreidingslocaties, maar volledig uit het systeem onttrokken. Dit scenario varieert niet in bodemligging ten opzichte van de referentieberekening (A).

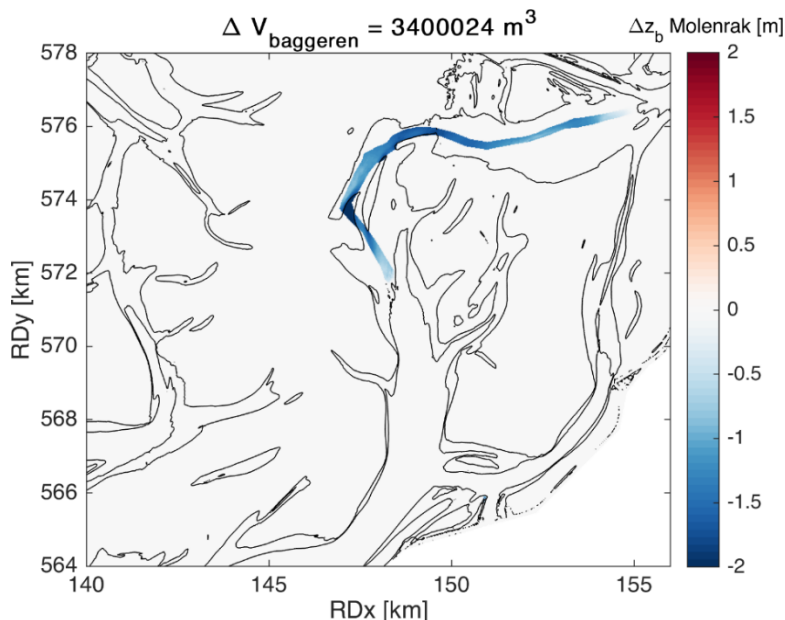


Figuur 3.1 Langsprofiel van de vaargeul Boontjes op basis van peiling maart 2006, zoals toegepast in scenario B. Ter indicatie zijn de oude streefdiepte (NAP-2,8m) in groen en de huidige streefdiepte (NAP-3,8m) in rood.

Hierbij is er een extra verdiept scenario toegevoegd om de gevoeligheid van het model . Om de gevoeligheid van het model voor een verdieping inzichtelijk te maken is er daarnaast een extra gevoeligheidsscenario 'NAP-6,0m' uitgevoerd, dat geen onderdeel uitmaakt van de evaluatiescenario's. Hierbij is de vaargeul Boontjes verder verdiept tot een streefdiepte van - 6,0 m NAP.

## 3.2 Alternatieve vaarroute Molenrak

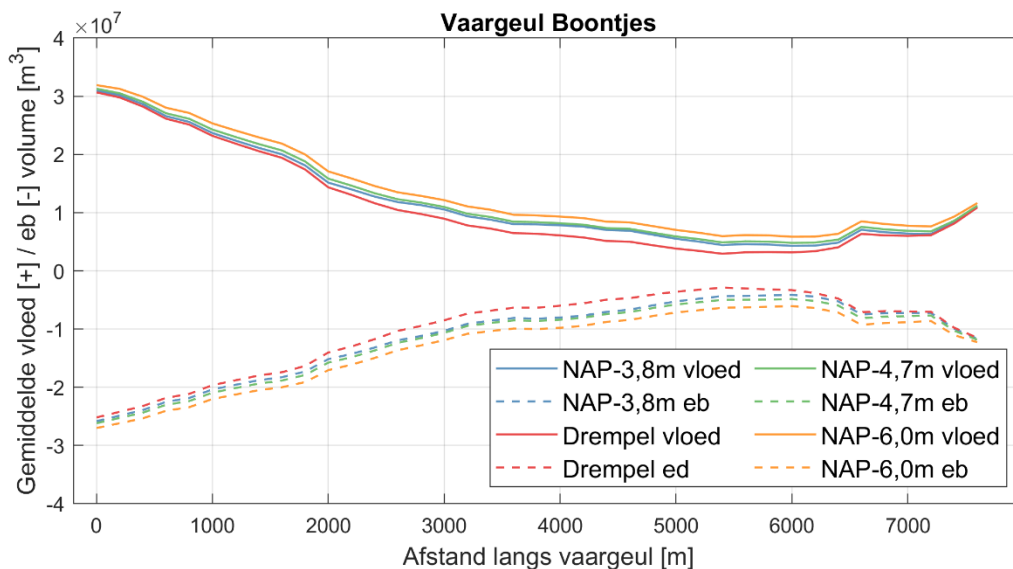
Bij aanvang van de studie is ook overwogen om een alternatief vaargeultracé te onderzoeken. Hiervoor werd het Molenrak aangewezen. De grootschalige morfologische ontwikkeling die sturend is voor de Boontjes, geldt ook voor aangrenzende gebieden als het Molenrak en het Kimstergat. Een eerste verkenning van een mogelijke vaarroute via het Molenrak blijkt, naast een langere vaarroute, ook op vergelijkbare problematiek qua ophoging van platen en te verwachten sedimentatie te stuiten. Het aanlegbaggerwerk daarvoor bedraagt al 3,4 miljoen m<sup>3</sup> (Figuur 3.2). Ter vergelijking was het aanlegbaggerwerk van de Boontjes (drempelverwijdering) 0,7 miljoen m<sup>3</sup>. Daarom is dit alternatief niet verder (modelmatig) onderzocht.



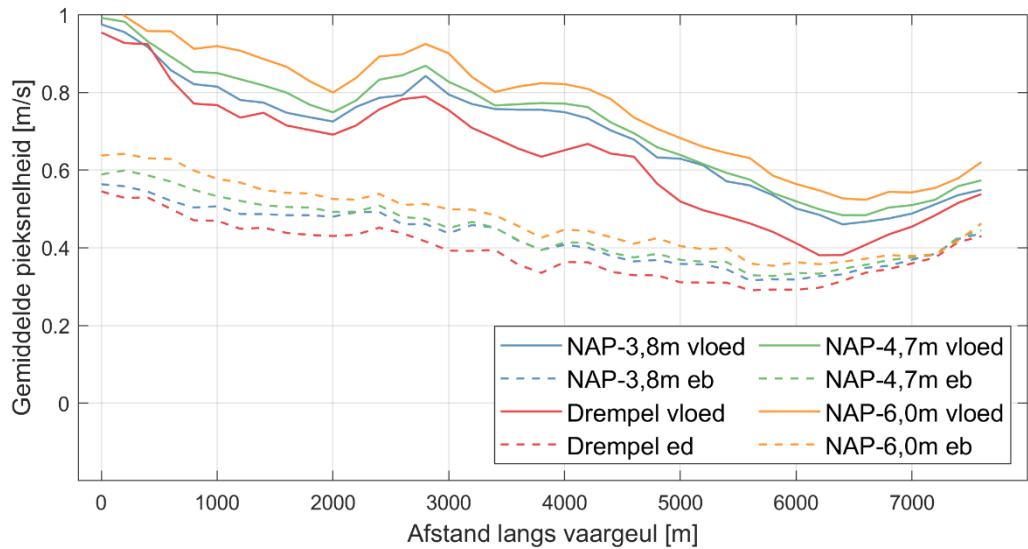
Figuur 3.2 Aanlegbaggerwerk voor een alternatieve vaarroute door het Molenrak.

### 3.3 Hydrodynamica bij verschillende geuldimensies

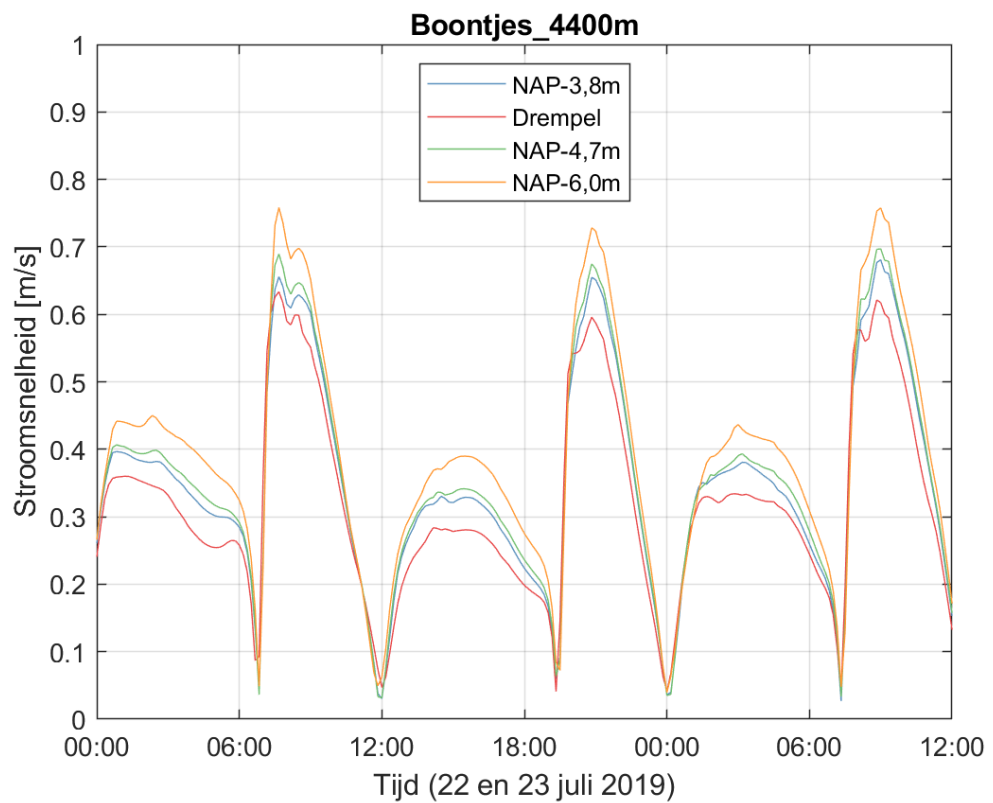
Als gevolg van een verdieping van de vaargeul nemen de getijvolumes door de Boontjes toe (Figuur 3.3). Deze respons treedt op zowel bij een drempelverwijdering (dan treedt het effect alleen ter plaatse van de drempel op) als bij een verdieping (effect over de gehele vaargeul). Deze respons is consistent met de resultaten uit de eerdere studies naar de drempelverwijdering uit 2009 (Ouwkerk & Vuik, 2012). Ook de pieksnelheden laten een toename zien bij toenemende geuldiepte (Figuur 3.4). Als we inzoomen op het verloop van de stroomsnelheden gedurende het getij op één punt in de vaargeul, zien we dat de stroomsnelheden over de gehele getijcyclus toenemen bij een verdieping van de geul (Figuur 3.5). De respons is dus minder subtiel of complex dan bij de respons op de grootschalige morfologische veranderingen. Ook zijn er geen veranderingen in de waterstanden berekend in de verschillende scenario's.



Figuur 3.3 Effect van vaargeuldimensies op de getijvolumes door de geul bij eb en vloed (NAP-3,8m; drempel; NAP-4,7m; NAP-6,0m). Links in de grafiek is het zuidelijke uiteinde van de geul nabij Zurich, rechts het noordelijke uiteinde nabij Harlingen.



Figuur 3.4 Effect van vaargeuldimensies op de pieksnelheden in de vaargeul (NAP-3,8m; drempel; NAP-4,7m; NAP-6,0m). Links in de grafiek is het zuidelijke uiteinde van de geul nabij Zurich, rechts het noordelijke uiteinde nabij Harlingen.



Figuur 3.5 Stroomsnelheid gedurende drie getijperiodes voor de verschillende geuldieptes (NAP-3,8m; drempel; NAP-4,7m; NAP-6,0m).

Figuur 3.6 toont stromingskaartjes met een verdieping van de Boontjes (vergelijk scenario NAP-3,8m en NAP-6,0m als maximale respons ten opzichte van de referentie) tijdens eb (5 uur na HW), begin van de vloed (8 uur na HW) en maximale vloed (10 uur na HW). Tijdens de eb zien we een toename van de stroomsnelheden in de Boontjes en een kleine afname van de snelheden in de Geul langs de Pollendam. Aan de zuidzijde, waar de getijgeul breder is dan de vaargeul, zien we een afname van de stroomsnelheden buiten de vaargeul. Ook aan het uiterste noordelijke uiteinde van de Boontjes nemen de snelheden af bij verdieping. Aan het begin van de vloed zien we aan het zuidelijk uiteinde lagere stroomsnelheden en in de overige delen een toename van de stroomsnelheden. Bij maximale vloedstroming zijn de snelheden in de geul hoger door de verdieping en aan de noord en zuidzijde op de platen lager.

Samenvattend kan worden geconcludeerd dat een verdieping van de vaargeul de stroomsnelheden in de Boontjes vooral doen toenemen, en het uitstralende effect op de platen relatief klein en lokaal is. Omdat er ook een effect is op de Geul langs de Pollendam, tijdens een deel van de ebfase, blijkt hieruit wel een communicerend effect van deze geulen dat toeneemt bij een verdieping.

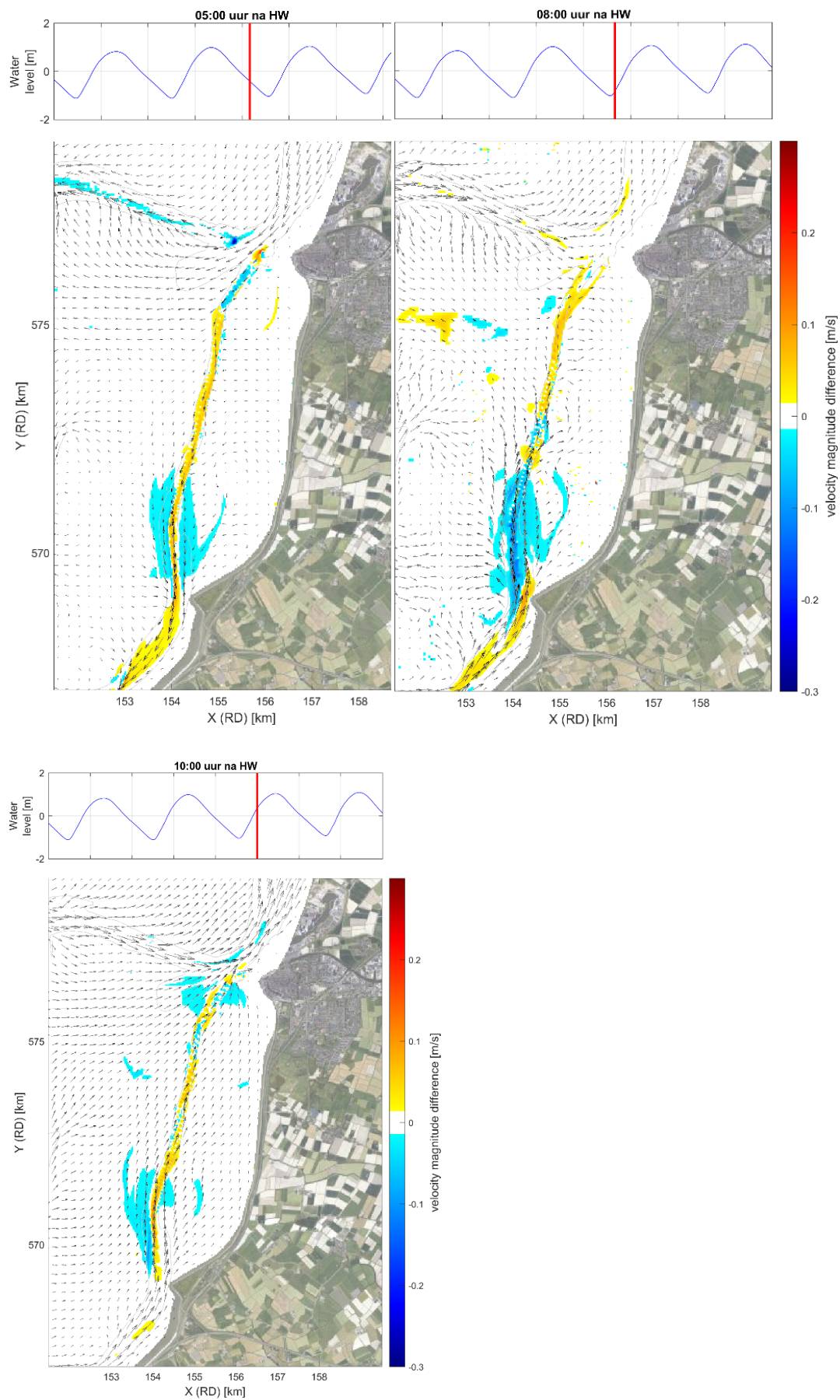
Net als in Paragraaf 2.3 wordt gekeken naar de bodemschuifspanning die 5% van de tijd wordt overschreden (d.w.z. 95 percentiel; zie Figuur 3.7 links). Het scenario 'drempel' (Figuur 3.7 midden) laat zien dat de bodemschuifspanningen aan de zuidzijde afnemen ten opzichte van het scenario NAP-3,8m, door de afname van de getijdebieten en stroomsnelheden. Ter plaatse van de drempel nemen de bodemschuifspanningen voornamelijk toe, waarschijnlijk als gevolg van toegenomen golfwerking. Aan de noordzijde is er weinig verschil. Direct ten oosten van de vaargeul nemen de bodemschuifspanningen sterk af, doordat minder hoge golven optreden in de ondiepere vaargeul. Door de strijklengte-aanpak<sup>4</sup> wordt dit effect overschat. Ook is er een verhoging van de bodemschuifspanning in de Geul langs de Pollendam te zien.

Bij het scenario NAP-4,7m (Figuur 3.7 rechts), nemen de bodemschuifspanningen aan het meest zuidelijke uiteinde toe en ook in het midden van de Boontjes zien we een toename, waarschijnlijk als gevolg van de toename in stroomsnelheden. Aan de noordzijde nemen de bodemschuifspanningen af door een afname in golfgedreven resuspensie.

Verder is opvallend dat zowel bij een verondieping, als bij een verdieping de bodemschuifspanningen rondom het zuidelijk uiteinde van geul afnemen, terwijl de stroomsnelheden en debieten in de geul voor deze scenario's respectievelijk afnemen en toenemen. Deze respons rond het zuidelijke uiteinde van de geul wordt nog niet goed begrepen.

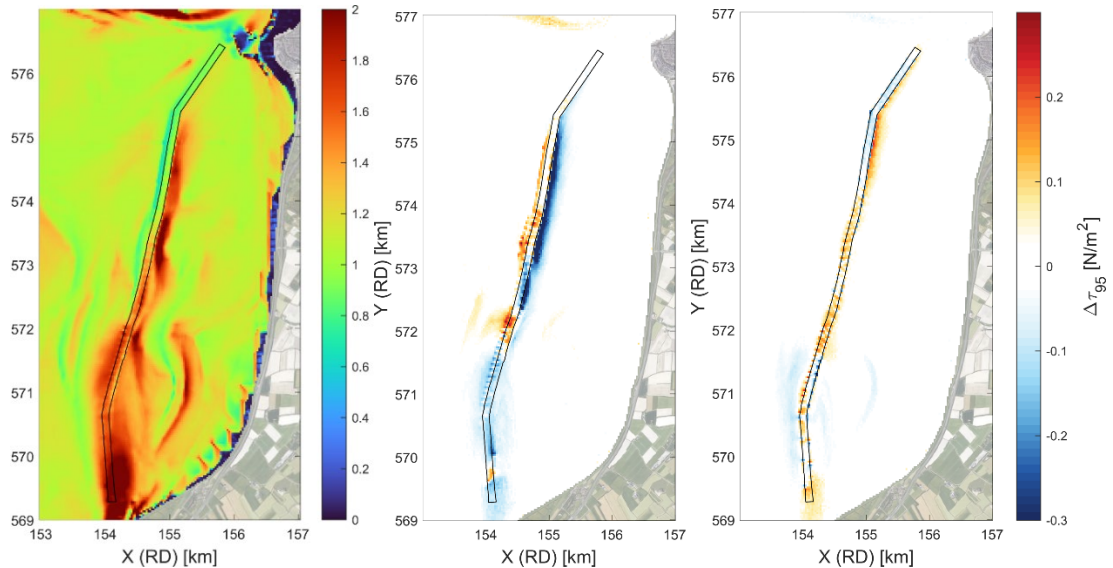
---

<sup>4</sup> Bij de strijklengteaanpak wordt de golfhoogte in een roostercel bepaald door de waterdiepte en de afstand waarover de wind waait. Voor de waterdiepte wordt een gewogen gemiddelde genomen tussen de waterdiepte in de betreffende roostercel en de waterdieptes in de vijf roostercellen terugkijkend in de richting waar de wind vandaan komt.



Figuur 3.6 Effect van een vaargeulverdieping naar -6 m NAP op de stroombeelden.





Figuur 3.7 Bodemschuifspanningen (95-percentiel). Links: bodemschuifspanningen in de huidige situatie (NAP-3,8m). Midden: bodemschuifspanningen in het scenario 'drempel' t.o.v. de huidige situatie (links). Rechts: bodemschuifspanningen in het scenario NAP-4,7m t.o.v. de huidige situatie (links).

### 3.4 Baggervolumes bij verschillende geuldimensies

Voor het inschatten van het baggerbezwaar bij de verschillende scenario's wordt, bij afwezigheid van een verdere herkalibratie van het model, naast het 3D slibtransportmodel (Paragraaf 3.4.1) ook geleund op het gebruik van een 1DV model (bijlage D) en evenwichtsrelaties (Paragraaf 3.4.2).

#### 3.4.1 3D slibtransportmodel

De resultaten van het 3D slibtransportmodel voor het baggerbezwaar onder de verschillende scenario's zijn samengevat in Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Modelresultaten voor het baggerbezwaar in kton per jaar voor de verschillende scenario's voor de vaargeuldimensies (NAP-3,8m; drempel; NAP-4,8m; NAP-6,0m)

Baggervak	km	Baggermassa per jaar (simulatieperiode x4) [kton/j]			
		NAP-3,8m	drempel	NAP-4,7m	NAP-6,0m
Vak 1	6,2-7,6	23,4	22,7	24,7	26,3
Vak 2	4,5-6,2	18,1	17,5	18,2	18,6
Vak 3	2,5-4,5	24,5	23,2	23,5	24,5
Vak 4	1,5-2,5	16,5	18,4	16,4	16,7
Vak 5	0-1,5	3,4	6,5	3,8	4,7
Totaal		86,0	88,0	86,6	90,8

Het 3D slibtransportmodel berekent kleine verschillen in aanslibbing in de vaargeul voor de verschillende scenario's. Het scenario 'drempel' levert in het model zelfs een iets hoger baggerbezwaar op, dan het scenario 'NAP-3,8m'. Ter plaatse van de drempel (vak 2) is het baggervolume wel afgenomen, maar dit wordt gecompenseerd door toegenomen baggervolumes aan de zuidkant van de vaargeul (vakken 4 en 5). Dat het terugplaatsen van de drempel in werkelijkheid een verhoging van het totale baggerbezwaar op zou leveren is onwaarschijnlijk. Daarnaast verwachten we op basis van vergelijkbare studies in andere

gebieden en de respons van de Boontjes op de drempelverwijdering, ook een groter effect van een vaargeulverdieping op het baggerbezwaar.

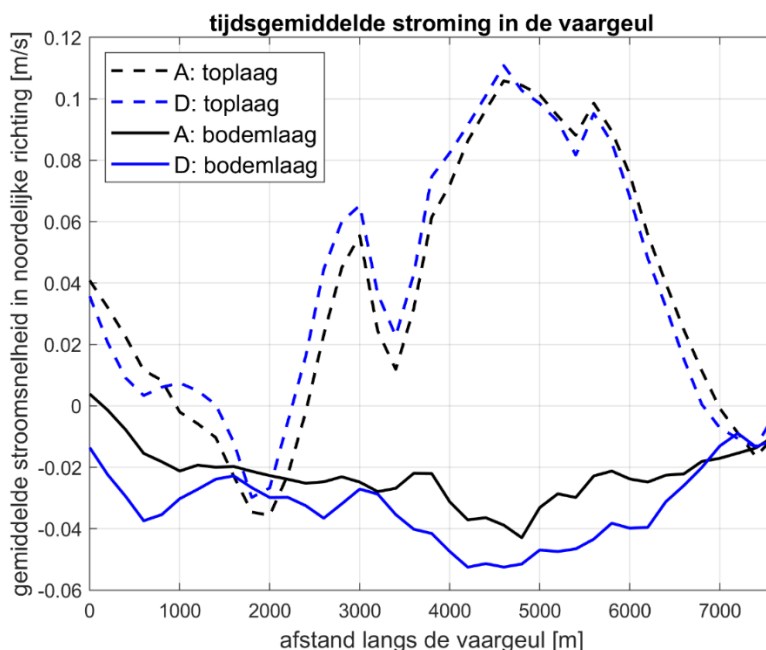
Het baggerbezwaar kan toenemen als gevolg van een verdieping van de vaargeul door:

- a. Afname van de resuspensie indien de verdieping leidt tot lagere stroomsnelheden (gelijkblijvend debiet bij grotere natte doorsnede). Ook wordt het sedimentconcentratieprofiel dan steiler, met grotere sedimentconcentratie bij de bodem en daardoor een grotere depositieflux.
- b. Afname van golfresuspensie uit de geul doordat de golven de verdiepte geulbodem minder beroeren.
- c. Toename van de zoutgedreven circulatiepatronen (met meer bodemtransport richting de zoetwaterbron).
- d. Toename van de te baggeren lengte (op basis van de huidige bodemligging zien we dat de te baggeren lengte van de vaargeul met 60% toeneemt bij een verdieping naar -4,7 m).

De hydrodynamische simulaties laten zien dat de stroomsnelheden niet afnemen bij toenemende geuldiepte. Het proces genoemd onder a. treedt bij de Boontjes dus niet op. De golfgedreven resuspensie (proces onder b.) neemt alleen aan de noordzijde van de vaargeul zoveel af bij een verdieping dat de gecombineerde bodemschuifspanningen van stroming en golven lager worden in de geul. Bij de andere plekken wordt dit overschaduwed door een toename in stroming. Deels kan dit veroorzaakt worden door de golfschematisatie in het model, zoals toegelicht in Paragraaf 2.4. Daarnaast beïnvloedt ook de hoeveelheid hoog energetische condities binnen de gekozen simulatieperiode deze resultaten.

Het is onwaarschijnlijk dat een verdieping van de vaargeul leidt tot een verandering van de aanvoer van sediment vanuit het omliggende gebied. Er is veel slib aanwezig in het gebied, en als de verdieping leidt tot andere stromingspatronen kan dit slib 'intern' worden herverdeeld. Omdat de Boontjes stroom gaat trekken bij verdiepen, nemen de stroomsnelheden over de platen af. Hierdoor kan de sedimentatie op de platen gaan versnellen. Dit sediment kan onder energetische condities weer de vaargeul in worden geveegd. Het effect van een vaargeulverdieping op de stroomsnelheden op de omliggende platen lijkt echter marginaal te zijn.

Of een verdiepte vaargeul meer slib naar de Boontjes trekt (bijvoorbeeld vanaf verspreidingslocaties nabij Harlingen) als gevolg van toegenomen gravitatiecirculatie bij grotere geuldiepte, kan worden onderzocht door de residuele stroming te analyseren (Figuur 3.8). Hieruit blijkt dat de residuele stroming bij de bodem als gevolg van een verdieping in de Boontjes inderdaad toeneemt. De reststroming is hier een aanwijzing voor de respons van de gravitatiecirculatie bij een verdieping. De slibtransporten moeten in detail bestudeerd worden om het effect op het baggerbezwaar te kennen. Uit de reststroming bij de wateroppervlakte zien we dat er aan de zuidkant van de Boontjes een neer aanwezig is (reststroming is afwisselend noord en zuidwaarts gericht).



Figuur 3.8 Noordwaarts gerichte residuele stroming in de Boontjes. Blauw geeft de simulatie met extra verdieping (NAP-6,0m) weer en zwart de referentie (NAP-3,8m). Doorgetrokken lijn geeft de stroming bij de bodem en gestreept bij het wateroppervlak.

### 3.4.1.1 Ongevoeligheid van het model voor vaargeuldimensies

Er zijn een aantal redenen dat het model ongevoelig is voor verschillende vaargeuldimensies. In deze subparagraaf wordt dit kort toegelicht.

De belangrijkste sedimentkarakteristieken waarop het model is afgeregeld zijn de sedimentconcentraties bij het wateroppervlak (MWTL metingen), de baggervolumes, de netto import vanaf de Noordzee naar de Waddenzee (slibsedimentatie o.b.v. de vaklodingen) en de ruimtelijke verdeling van het slibpercentage in de bodem. Er zijn niet tot nauwelijks veldmetingen beschikbaar van sedimentconcentratieprofielen over de verticaal. Hierdoor kan het model niet op het reproduceren van verticale concentratiegradiënten afgeregeld worden. Dit is wel belangrijk, omdat er door meerdere vrijheidsgraden voor de afregeling van een slibmodel meerdere sets van parameter-instellingen zijn die een goede inschatting geven van het baggerbezwaar voor de huidige situatie. Aanvullende meetdata rond de bodemsamenstelling, actieve laagdikte en verblijftijd kunnen ook helpen om het aantal vrijheidsgraden te beperken en de modelinstellingen verder aan te scherpen. Eerdere succesvolle toepassing van het 3D slibtransportmodel voor vragen rondom de Vaargeul Holwerd-Ameland, geeft wel enig vertrouwen in de afregeling van het model. De gemeten slibconcentraties in de vaargeul worden door het model goed gereproduceerd met uitzondering van het uiteinde van de vaargeul waar de slibconcentratie (mogelijk doordat scheepvaarteffecten niet in het model zijn opgenomen) worden onderschat (Grasmeijer en Van Weerdenburg, 2021). Voor de vaargeul Holwerd-Ameland zijn echter geen verdiepingsscenario's berekend.

Een mogelijke verkeerde inregeling van het model betreft de sedimentconcentraties bij de bodem. De waargenomen, incidentele fluid mud vorming die in de Boontjes plaatsvindt, wordt door het model niet berekend. Metingen voor de slibmotor bij Koehoal hebben laten zien dat de sedimentconcentraties bij de bodem heel hoog kunnen zijn (meerdere g/l). Als de sedimentconcentraties bij de bodem in het model te laag zijn, wordt de depositieflux vanuit de waterkolom naar de bodem onderschat. Omdat de gesimuleerde baggervolumes voor de huidige vaargeuldimensies wel overeen komen met observaties, wordt bij een te kleine

depositieflux ook de resuspensie onderschat. Als de depositie- en resuspensiefluxen groter zijn, leiden veranderingen hierin ook tot grotere verschillen in baggerbezwaar. In de twee noordelijke baggervakken vindt bijvoorbeeld al nauwelijks resuspensie plaats, waardoor een afname van de golfgedreven resuspensie door de toegenomen geuldiepte niet optreedt.

Het onderschatten van de sedimentconcentratie bij de bodem in het model kan worden veroorzaakt door het ontbreken van een dichtheidskoppeling, de beperkte verticale resolutie en/of het gebruik van sigma lagen. Alle drie deze effecten kunnen er voor zorgen dat er te veel verticale opmenging is, waardoor de variatie in concentratie over de diepte te klein is en slibconcentraties bij de bodem worden onderschat. Doordat het verticale sedimentconcentratieprofiel (met hogere sedimentconcentratie bij de bodem en lagere sedimentconcentratie bij de oppervlakte) door het model mogelijk niet goed wordt berekend, wordt mogelijk ook het effect van de zout-gedreven dichtheidsstroming (zie Paragraaf 2.3) onderschat. Door een verdieping van de vaargeul kan de zout-gedreven dichtheidsstroming sterker worden (zoutgedreven gravitatiecirculatie schaalt kwadratisch met de waterdiepte).

De totale depositieflux wordt in het model verdeeld over twee lagen, waarbij de flufflaag (S1) minder weerstand biedt tegen erosie dan de bufferlaag (S2). Met de manier waarop het model nu wordt gebruikt is er geen directe flux van de flufflaag naar de bufferlaag; slib komt alleen vanuit de waterkolom in de bufferlaag terecht. Slib in de flufflaag bouwt daardoor geen sterkte op in de tijd, terwijl dat door consolidatie wel verwacht mag worden. Deze methode is geschikt voor hoogdynamische gebieden waar het slib uit de flufflaag door resuspensie via de waterkolom in de bufferlaag terecht komt, maar is minder geschikt voor laagdynamische gebieden als havens en vaargeulen. Slib dat al enige tijd op de bodem van de vaargeul ligt blijft daardoor in het model makkelijk erodeerbaar. Dit kan ervoor zorgen dat de hoeveelheid slib in de bodem in het model te laag is. Een alternatieve methode is om het slib door *burial* van de flufflaag direct naar de bufferlaag te stoppen, zodat het meer weerstand krijgt tegen erosie. Dat vraagt echter een nieuwe afregeling van de modelparameters.

#### 3.4.2 Evenwichtsrelaties

Op basis van evenwichtsrelaties kan ook voor verschillende vaargeuldimensies een inschatting worden gemaakt van het baggervolume voor de hedendaagse situatie (d.w.z. bij gelijkblijvend kombergingsvolume). De aanpak is vergelijkbaar met de inschatting voor het baggervolume tot 2050 bij gelijkblijvende vaargeuldimensies (zie Paragraaf 2.5). Voor een verdiept profiel neemt de ontwerpgeuldoorsnede toe en dus een grotere afwijking van de evenwichtsdoorsnede. Ook wordt meegerekend dat de te onderhouden lengte van de vaargeul toeneemt van 4,4 km naar 6,4 km. Op basis van de evenwichtsrelaties leidt een verdieping naar -4,7 m NAP in de vaargeul in combinatie met de huidige omliggende morfologie, en daarmee onder de aanname van een gelijkblijvend kombergingsvolume, tot een gemiddeld baggervolume tussen 260.000 m<sup>3</sup>/jaar (ondergrens) en 660.000 m<sup>3</sup>/jaar (bovengrens).

#### 3.4.3 Expertoordeel

Op basis van de overwegingen uit de voorgaande paragrafen, gebruiken we niet alleen het 3D slibtransportmodel om het baggerbezwaar direct te berekenen, maar gebruiken we ook andere methodieken (elk met verschillende beperkingen) om tot een afgewogen oordeel te komen. Naast het 3D slibtransportmodel (Paragraaf 3.4.1) zijn dit de data analyse (Colina Alonso et al., 2021) de versimpelde 1DV-analyse (bijlage D), de evenwichtsrelaties (Paragraaf 3.4.2) en onze eerdere opgedane ervaring en kennis in dit gebied. Onze expert inschatting van het baggerbezwaar bevat een grote bandbreedte, omdat de resultaten van de verschillende methoden uiteenlopen en deze grote onzekerheden bevat. Door de complexe combinatie van processen die een rol spelen rond de Boontjes, zoals beschreven in dit rapport, is het niet mogelijk om een nauwkeurigere inschatting te geven. Het

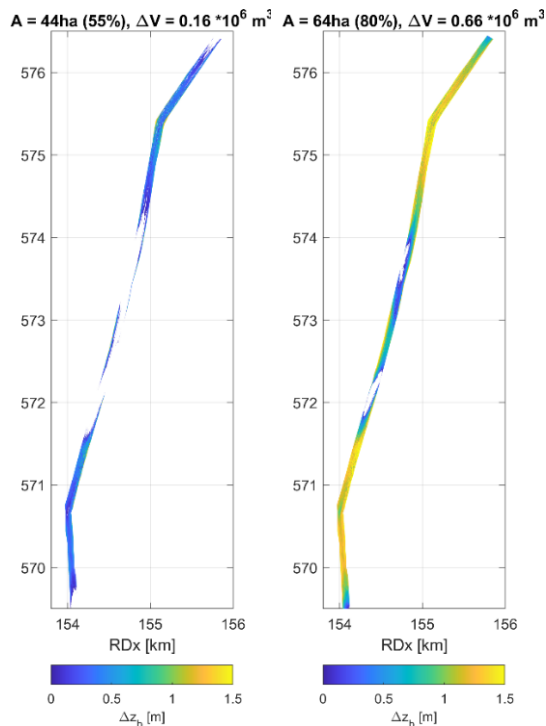
baggerbezwaar bij de huidige vaargeuldimensies (streefdiepte -3,8 m NAP) is het gerealiseerde baggerbezwaar op basis van data van de baggeraar. De andere volumes zijn inschattingen, per scenario wordt aangegeven waarop de getallen zijn gebaseerd. Een scenario zonder vaargeulonderhoud leidt per definitie tot een baggerbezwaar van 0 m<sup>3</sup>/jaar. Voor een verdiept profiel komen we op een inschatting van de baggervolumes op korte termijn van 0,2-0,5 miljoen m<sup>3</sup>/jaar.

Tabel 3.2 Inschatting van het huidige baggerbezwaar voor verschillende vaargeuldimensies

Scenario	Baggerbezwaar nu
Stoppen met baggeren	0 m <sup>3</sup>
Huidige geul op -3,8 m	220.000 m <sup>3</sup> ( <b>Bandbreedte: 120.000-310.000 m<sup>3</sup>/j</b> ) <sup>A</sup> Gebaggerde lengte vaargeul: ~4,4 km van de 8 km.
Verdiepen naar -4,7m	350.000 m <sup>3</sup> ( <b>Bandbreedte: 200.000-500.000 m<sup>3</sup>/j</b> ) <sup>B</sup> Te baggeren lengte vaargeul: ~6,4 km van de 8 km. Aanlegvolume: 660.000 m <sup>3</sup> in-situ

<sup>A</sup> zie Smits (2022)

<sup>B</sup> Op basis van de huidige bodemligging zien we dat de te baggeren lengte van de vaargeul met 60% toeneemt bij een verdieping naar -4,7 m. Daaruit kan in eerste instantie worden geschat dat het baggerbezwaar ook zoveel toeneemt ten opzichte van de referentie.



Figuur 3.9 Verskil tussen de huidige bodemligging en de streefdiepte van links: -3,8 m NAP + 0,5 m overdiepte en rechts: -4,7 m NAP + 0,5 m overdiepte.  $\Delta V$  geeft het totale verschilvolume en A het areaal van de vaargeul dat dan verdiept moet worden.

### 3.5 Ontwikkeling geulligging en baggerbezwaar richting 2050

Als benodigde input voor de MKBA is een inschatting gemaakt van de geulligging en het baggerbezwaar richting 2050. In de scenario's waarin de geul wordt onderhouden zal de geulligging dus moeten voldoen aan de betreffende streefdieptes. Voor het scenario 'terugkeer naar natuurlijke situatie' is een inschatting gemaakt van de geuldiepte richting 2050.

### 3.5.1 Geulligging op basis van empirische relaties en expertoordeel

Voor een scenario waarin de vaargeul niet langer onderhouden wordt, zal de geul opvullen totdat een evenwichtsprofiel is bereikt. De evenwichtsrelatie voor de verhouding tussen de evenwichtsdoorsnede en het kombergingsvolume kan opnieuw worden gehanteerd om een inschatting te maken van de evenwichtsdiepte (zie bijlage C). Bij gebrek aan historische data wordt een fit voor de empirische relatie uit de literatuur gebruikt om een eerste inschatting te geven van de relatieve verandering van de evenwichtsdoorsnede op basis van het veranderde 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 voor de huidige situatie. Dit is ongeveer 40 cm ondieper dan de (evenwichts)situatie vóór de drempelverwijdering, aangezien het kombergingsvolume sinds de drempelverwijdering met 7% is afgenomen. Lokaal kan echter verdere verondieping plaatsvinden, bijvoorbeeld door knippen van de geul door uitbreidende platen.

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 schaal 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 afname van het kombergingsvolume in de komende dertig jaar met 20-30% (zie Paragraaf 2.5) af. Op basis daarvan wordt de bijbehorende evenwichtsdiepte voor 2050 ruwweg geschat op ongeveer -0,6 m NAP. Op basis van expertoordeel wordt ingeschat dat de geul zich richting 2050 ontwikkelt naar het niveau van de omliggende platen (~0 m NAP). De verdere ontwikkeling van de geul en het eventueel verder dichtlopen hangt af van of de algehele verlanding van het gehele gebied doorzet, dan wel dat zeespiegelstijging dominant wordt voor de ontwikkeling (vermoedelijk pas na 2050).

Tabel 3.3 Inschatting van de geulligging voor verschillende beheersscenario's, inclusief de ontwikkeling richting 2050

Scenario	Huidige hoogteligging geul	Hoogteligging geul 2050
Stoppen met baggeren	~-2,4 m NAP <sup>A</sup>	Niveau omliggende platen (0 tot -0,6 m NAP)
Huidige geul	-3,8 m NAP ( <i>per definitie</i> )	-3,8 m NAP ( <i>per definitie</i> )
Verdiepte geul	-4,7 m NAP ( <i>per definitie</i> )	-4,7 m NAP ( <i>per definitie</i> )

### 3.5.2 Baggerbezwaar op basis van empirische relaties en expertoordeel

Na afzonderlijk de invloed van morfologie en het afnemende kombergingsvolume (Paragraaf 2.5) en de invloed van vaargeuldimensies (Paragraaf 3.4.2) te hebben beschouwd op basis van evenwichtsrelaties, wordt nu de combinatie gemaakt van een afname van het kombergingsvolume en een aanpassing van de vaargeuldimensies. Ook wordt de toegenomen lengte van de te onderhouden vaargeul verrekend. Voor het huidige profiel schatten we de baggervolumes in 2050 tussen 0,3 miljoen m<sup>3</sup>/jaar (ondergrens) en 0,7 miljoen m<sup>3</sup>/j (bovengrens). Voor een verdiept profiel komen we op een inschatting van de

baggevolumes in 2050 tussen 0,5 miljoen m<sup>3</sup>/jaar (ondergrens) en 1,3 miljoen m<sup>3</sup>/jaar (bovengrens). N.B. voor een scenario zonder vaargeulonderhoud wordt (dus) geen baggevolumen geschat.

Net als in het expertoordeel van het baggerbezwaar anno 2020 (Paragraaf 3.4.2) gebruiken we verschillende instrumenten, zoals onze eerdere opgedane ervaring en kennis in dit gebied, de data analyse (Colina Alonso et al., 2021) en evenwichtsrelaties (Paragraaf 3.5.2), om tot een afgewogen oordeel te komen voor de ontwikkeling van het baggerbezwaar richting 2050. Onze expert inschatting van het baggerbezwaar bevat een grote bandbreedte, omdat de resultaten van de verschillende methoden uiteenlopen en deze grote onzekerheden bevat. Door de complexe combinatie van processen die een rol spelen rond de Boontjes, zoals beschreven in dit rapport, is het niet mogelijk om een nauwkeurigere inschatting te geven.

Op basis van voorgaande overwegingen is onze inschatting voor het baggerbezwaar anno 2020 (Tabel 3.2) uitgebreid met de inschatting van het baggerbezwaar richting 2050 (Tabel 3.4). Voor de inschatting van het baggerbezwaar in 2050 met de huidige vaargeuldimensies wordt verwezen naar Paragraaf 2.5. Voor het verdiepte scenario in 2050 wordt voor de empirische relaties verwezen naar bijlage C. Voor de extrapolatie wordt de inschatting voor de streefdiepte van -3,8 m NAP vermenigvuldigd met een factor 1,5 op basis van de toename van de te baggeren lengte.

Tabel 3.4 Inschatting van het baggerbezwaar voor verschillende vaargeuldimensies, inclusief uitkomsten van verschillende instrumenten, uitgebreid met de ontwikkeling richting 2050

Scenario	Baggerbezwaar nu	Baggerbezwaar 2050
Stoppen met baggeren	<b>0 m<sup>3</sup>/jaar</b> <i>per definitie</i>	<b>0 m<sup>3</sup>/jaar</b> <i>per definitie</i>
Huidige geul op -3,8 m	<b>0,1 – 0,3 miljoen m<sup>3</sup>/jaar</b> <i>Data baggeraar: 220.000 m<sup>3</sup>/j (120.000-310.000 m<sup>3</sup>/j)</i> <i>3D-model: 170.000 m<sup>3</sup>/j</i> <i>1DV-model: 230.000 m<sup>3</sup>/j</i> <i>Gebaggerde lengte vaargeul: ~4,4 km van de 8 km.</i>	<b>0,3 – 1,5 miljoen m<sup>3</sup>/jaar</b> <i>Lineair voortzetten trend: 700.000 - 1.700.000 m<sup>3</sup>/j</i> <i>Evenwichtsrelaties: 300.000 - 700.000 m<sup>3</sup>/j</i>
Verdiepen naar -4,7m	<b>0,2 – 0,5 miljoen m<sup>3</sup>/jaar</b> <i>3D-model: 175.000 m<sup>3</sup>/j</i> <i>1DV-model: 243.000 m<sup>3</sup>/j</i> <i>Extrapolatie obv gebaggerde lengte: 320.000 m<sup>3</sup>/j (175.000-450.000 m<sup>3</sup>/j)</i> <i>Te baggeren lengte vaargeul: ~6,4 km van de 8 km.</i> <i>(Ter referentie: aanlegvolume bedraagt 660.000 m<sup>3</sup> in-situ)</i>	<b>0,5 – 2,5 miljoen m<sup>3</sup>/jaar</b> <i>Evenwichtsrelaties: 400.000 - 900.000 m<sup>3</sup>/j</i> <i>Extrapolatie obv gebaggerde lengte: 1-2,5 miljoen m<sup>3</sup>/j</i> <i>Ter referentie: geulvolume t.o.v. NAP bedraagt 3.300.000 m<sup>3</sup></i>

### 3.6 Retourstroom vanaf verspreidingslocaties

In Paragraaf 2.3 werd het effect van de zoetwaterafvoer op de stromingspatronen (via gravitatiecirculatie) geanalyseerd. De gravitatiecirculatie beïnvloedt ook de retourstroom van gebaggerd materiaal vanaf de verspreidingslocaties bij de Pollendam en in het Kimstergat. Om deze invloed van de gravitatiecirculatie in te schatten is een modelscenario met het 3D

slibtransportmodel gedraaid waarin het gebaggerde materiaal volledig wordt onttrokken (zonder terug te storten). Het baggerbezwaar met en zonder terugstorten zijn gepresenteerd in Tabel 3.5. Op korte termijn (<3 maanden) komt vrij weinig van dit materiaal opnieuw in de vaargeul terecht (verschil van 1,5%). Ook het materiaal dat vanuit de haven van Harlingen in het Kimstergat wordt verspreid lijkt op korte termijn geen grote rol te spelen in het baggerbezwaar van de Boontjes (<5%, niet hier gerapporteerd). Het aandeel van de retourstroom in het baggerbezwaar kan wel oplopen indien een langere periode wordt gesimuleerd. Daarnaast spelen de modelbeperkingen, zoals besproken in sectie 3.4.1.1, ook een rol. De retourstroom is sterk afhankelijk van de gravitatiecirculatie en de sedimentconcentratie nabij de bodem. Indien deze door het model wordt onderschat, zal ook het transport vanaf de verspreidingsvakken in het Kimstergat en de Geul langs de Pollendam (waar zowel specie vanuit de Boontjes als vanuit de haven naartoe wordt gebracht) naar de Boontjes worden onderschat. De gravitatiecirculatie neemt toe bij verdere verdieping. Ook is recent bekend geworden dat in de haven van Harlingen sinds enkele jaren gebruikt wordt gemaakt van airset. Hierbij wordt (vermoedelijk alleen tijdens eb) slib opgewoeld in de havenmond. Het is niet bekend welke invloed dit precies heeft op de slibeigenschappen (opbreken vlokken beïnvloedt de valsnelheid) en de verspreiding van het slib. Dit zou verder onderzocht moeten worden.

*Tabel 3.5 Modelresultaten voor het baggerbezwaar in kton per jaar voor de verschillende verspreidingsscenario's (met streefdiepte NAP-3,8m)*

Baggervak	km	Baggermassa per jaar (simulatieperiode x4) [kton/j]	
		Met terugstorten	Zonder terugstorten
<b>Vak 1</b>	6,2-7,6	23,4	23,0
<b>Vak 2</b>	4,5-6,2	18,1	17,9
<b>Vak 3</b>	2,5-4,5	24,5	24,2
<b>Vak 4</b>	1,5-2,5	16,5	16,2
<b>Vak 5</b>	0-1,5	3,4	3,3
<b>Totaal</b>		<b>86,0</b>	<b>84,7</b>



## 4 Synthese

In dit hoofdstuk worden de inzichten in de systeemwerking op basis van de data analyse (Colina Alonso et al, 2021) en op basis van de analyses uit dit rapport samengebracht. De aanzet voor een conceptueel denkmodel voor de systeemwerking van Colina Alonso (2021) wordt zo verder aangescherpt.

Om de ontwikkelingen in de Boontjes beter te begrijpen, kan deze worden beschouwd in drie delen. Het zuidelijke gedeelte is vooral zandig, waarbij relatief weinig wordt gebaggerd. Hier is de getijdegeul breder dan de onderhouden vaargeul en zien we migrerend geulgedrag. Het baggerbezwaar wordt hier voornamelijk veroorzaakt door migrerende bodemvormen. Het middengedeelte, waar voorheen de drempel lag, wordt getypeerd door een diepe, onderhouden vaargeul die sinds de drempelverwijdering veel wordt gebaggerd met een vrij hoog geleden plaatgebied, dat zeer slibrijk is (met soms ook fluid mud). Het noordelijke deel, tot slot, wordt beïnvloed door de uitwisseling met het Molenrak en een wegdraaiend geuluiteinde (Van der Vegt & Cleveringa, 2022). Ook dit gedeelte is zeer slibrijk (met soms ook fluid mud) met hoge baggervolumes sinds de drempelverwijdering.

### 4.1 Grootschalige morfologische ontwikkeling is sturend

De ontwikkeling van de Boontjes wordt gestuurd door grootschalige processen. Sinds de afsluiting van de Zuiderzee is er sprake van een sedimentatietrend langs de vastelandskust, waarbij grote hoeveelheden zand en slib worden afgezet. Indien de sedimentatie plaatsvindt op het intergetijdengebied, heeft dit invloed op het kombergingsvolume van de geulen die het intergetijdengebied bedienen. Rondom de Boontjes ontwikkelt het plaatgebied zich van subgetijden- naar intergetijdengebied, waarbij steeds grotere plaatgebieden droogvallen. Deze ontwikkeling zal in de toekomst een steeds groter effect op het kombergingsvolume hebben.

Over de Boontjes loopt ook het wantij tussen de komberging van het Vlie en het Marsdiep. Dit wantij is hier ontstaan na de afsluiting van de Zuiderzee, maar bestond tot nu toe uit laaggelegen gebied, waardoor er ook veel uitwisseling over het wantij plaatsvond. Op termijn zal het wantij zich verder ontwikkelen, waarmee de plaatgebieden ophogen. Over het wantij lopen normaalgesproken geen geulen.

### 4.2 Stroming en golven

De grootschalige sedimentatie op de platen van de westelijke Waddenzee van de afgelopen decennia beïnvloeden de getijstrooming en golfwerking rond de Boontjes. Het effect van de verkleining van de komberging door de grootschalige sedimentatie is modelmatig nog niet goed terug te zien in het getijvolume door de Boontjes. Alleen het uiterste noorden toont een afname van de debieten, maar deze lijken vooral beïnvloed door de aanstroming vanuit het Molenrak naar het Kimstergat. Uit de berekende slibtransporten en baggervolumes van het 3D slibtransport model blijkt, ondanks de beperkte invloed op de afvoer door de Boontjes, een aanzienlijke invloed van de hoger gelegen omliggende platen op het baggerbezwaar in de Boontjes (ongeveer 45% toename van slibsedimentatie tussen 2003 en 2015). Door de veranderde morfologie zijn de pieksnelheden in de Boontjes weliswaar toegenomen, maar de snelheden over een groot gedeelte van de eb fase afgenomen. Daardoor is de slibsedimentatie over de gehele getijcyclus toch toegenomen. Deze sedimentatie in de vaargeul vindt niet geleidelijk plaats, maar wordt sterk gestuurd door dynamische condities, wanneer golfgedreven resuspensie sediment opwoelen op de platen en afzetten in de geul.

De golfwerking op de platen is veranderd. Door de ophoging van de platen zijn de golven daar mogelijk kleiner geworden (indien golven diepte-gelimiteerd zijn), maar golfgedreven resuspensie is toegenomen doordat de golven de bodem meer beroeren. Dit heeft geleid tot een toename van het aanbod van slib richting de vaargeul.

### 4.3 Uitwisseling met het Kimstergat

De uitwisseling met het Kimstergat is nader bestudeerd op basis van hydrodynamische modelresultaten. De Boontjes wordt tijdens vloed vooral gevoed vanuit het Marsdiep en in mindere mate (en bovendien pas later) vanuit het Vlie. De getijvulling van het Kimstergat vindt grotendeels plaats vanuit het Vlie via de Geul langs de Pollendam en daarnaast via het Molenrak, waarbij de uitwisseling met de Boontjes dus beperkt lijkt. Als gevolg hiervan lijkt het Kimstergat zich ook meer te oriënteren op de Geul langs de Pollendam. Het vollopen van de verspreidingslocatie in het Kimstergat en de erosie nabij de noordelijke havendam hebben hier wellicht ook last van. De morfologische ontwikkeling van het Kimstergat is inzichtelijk voor de toekomstige ontwikkeling van de Boontjes, maar is daarin waarschijnlijk minder sturend dan eerder werd gedacht. Beide geulen reageren wel sterk op de grootschalige sedimentatie aan de landwaartse zijde van de bekkens. Vanwege de nieuwe inzichten in de uitwisseling met het Kimstergat hebben we de invloed van de Pollendam niet verder bestudeerd.

### 4.4 Effect drempelverwijdering en invloed vaargeuldimensies

Bij een verdieping van de vaargeul nemen het getijvolume en de stroomsnelheden over de gehele getijfase toe. Dit komt overeen met de berekeningen die zijn uitgevoerd in 2009 als voorstudie van de drempelverwijdering (Ouwkerk en Vuik, 2012). Afhankelijk van welk sedimentatiemechanisme dominant is, kan bij een toename van stroomsnelheden de sedimentatie in de vaargeul afnemen (indien erosie dominant is) of toenemen (indien sedimentaanvoer dominant is). Het baggerbezwaar is na de drempelverwijdering in 2012 flink toegenomen. Dit is veroorzaakt door de toegenomen sedimentaanvoer naar de vaargeul en daarnaast mogelijk door een afname van golfgedreven resuspensie in de vaargeul door de verdieping (drempelverwijdering). Ook de invloed van grootschalige morfologische veranderingen heeft een rol gespeeld in de toename van het baggerbezwaar in recente jaren, maar deze respons voltrekt zich langzamer en geeft dus geen instantaan effect bij een verdieping.

Bij een verdere verdieping van de vaargeul is de verwachting dan ook dat het baggerbezwaar verder toe zal nemen. Dit wordt veroorzaakt door een verdere afname van golfgedreven resuspensie uit de vaargeul en mogelijk een verdere toename van de sedimentaanvoer naar de vaargeul. Op de langere termijn is de verwachting dat de evenwichtsdoorsnede van de Boontjes verder afneemt (door sedimentatie op plaatgebieden en afnemende komberging), en zal een diepere vaargeul dus een nog hoger baggerbezwaar betekenen. Er zijn echter ook redenen om aan te nemen dat het baggerbezwaar niet blijft versnellen, als de komberging verder afneemt is er ook minder aanvoer van slib door het getij. Ook de aanvoer vanaf de platen zal afnemen naar mate de platen vaker droogvallen. Het is dus niet gezegd dat de aanslibbing louter versneld zal blijven toenemen.

### 4.5 Andere verspreidingsstrategie, gravitatiecirculatie en rol verspreiding Harlingen

Op basis van de modelresultaten lijkt de huidige verspreidingsstrategie van het gebaggerde materiaal uit de vaargeul Boontjes vrij effectief, aangezien vrij weinig van dit materiaal op korte termijn (<3 maanden) opnieuw in de vaargeul terecht lijkt te komen. Ook het materiaal dat vanuit de haven van Harlingen in het Kimstergat wordt verspreid lijkt op korte termijn

geen grote rol te spelen in het baggerbezwaar van de Boontjes (<5%). Indien een langere periode wordt gesimuleerd, kan het aandeel van de retourstroom in het baggerbezwaar oplopen. Ook de genoemde tekortkomingen in het numerieke slibtransportmodel kunnen leiden tot een onderschatting van de retourstroom, vooral via het proces van de gravitatiecirculatie. Het is goed hierbij te realiseren dat het baggerbezwaar uit de haven van Harlingen veel groter is dan dat van de Boontjes (factor 4-5). Ook wordt er sinds een aantal jaar een airset gebruikt om de toegang tot de haven van Harlingen op diepte te houden. Wij raden aan het effect hiervan op de omgeving, en daarmee op het baggerbezwaar in de Boontjes, te onderzoeken omdat een airset ook de slibeigenschappen (breken van vlokken, aanwezigheid luchtbelletjes) kan beïnvloeden.

## 4.6 Samenvatting

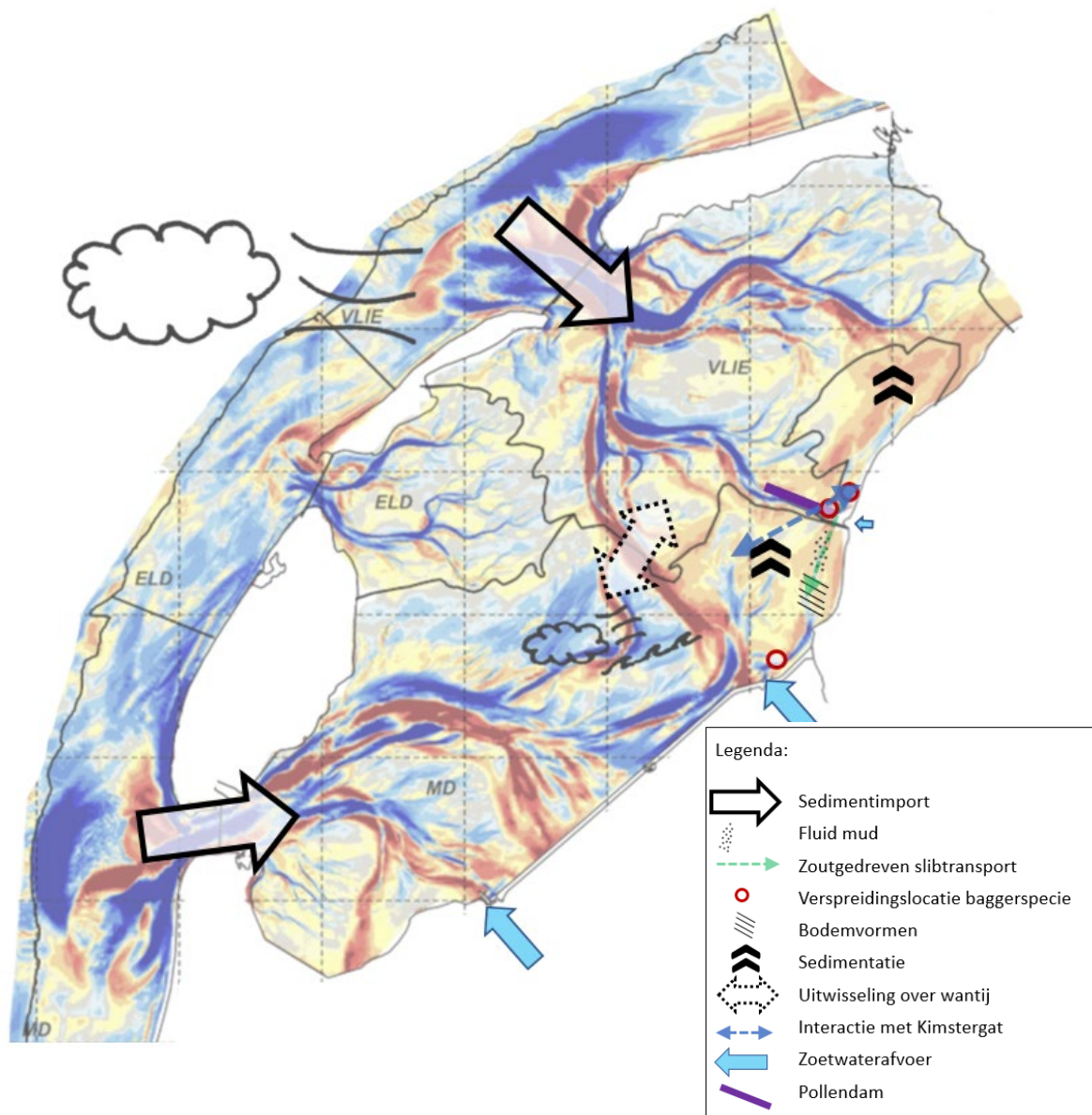
Figuur 4.1 toont de aangescherpte conceptuele figuur van de systeemwerking. Sturend voor de ontwikkeling is de grootschalige sedimentatie langs de vastelandskust, gevoed door de sedimentimport door de zeegaten. De geulen in het Marsdiep hebben zich steeds beter aangepast aan de configuratie na afsluiting van de Zuiderzee, waardoor de getijvoortplanting iets is versneld (Grasmeijer & Jaksic, concept). Het Kimstergat wordt vooral gevoed vanuit het Vlie, en in mindere mate door de Boontjes. Er is wel aanstroming vanuit het Molenrak naar het Kimstergat. De Geul langs de Pollendam is dieper geworden en het Kimstergat lijkt zich daar beter op te oriënteren, met een oostwaartse migratie van het zuidelijke uiteinde. De uitwisseling tussen het Molenrak en het Kimstergat hangt samen met wegdraaien of dichtlopen van het noordelijk uiteinde van de Boontjes. Het gebied wordt verder beïnvloed door de zoetwaterspui bij Kornwerderzand, die leidt tot een gravitatiecirculatie met zuidwaarts gerichte reststroming nabij de bodem.

De grootschalige sedimentatie zet in de komende decennia door, en zal voorlopig sterker zijn dan de zeespiegelstijging. De platen komen verder omhoog en een steeds groter gedeelte van de Boontjes zal van subgetijden- naar intergetijdengebied groeien. Hierdoor zal het kombergingsvolume van de Boontjes en daarmee de evenwichtsdoorsnede afnemen. Bij gelijkblijvende streefdiepte en een afnemende evenwichtsdoorsneden neemt het baggerbezwaar toe. Op korte termijn kan het verhogen van het plaatgebied eerst nog leiden dat er lokaal meer debiet door de geul wordt gedrukt. Met het numerieke model zien we dat het ophogen van de plaatgebieden leidt een toename van de pieksnelheden, maar lagere stroomsnelheden tijdens een groot gedeelte van de ebfase. Dit leidt tot een toename van het baggerbezwaar. Het tweede effect van het ophogend plaatgebied verloopt via de golven. Vanaf de hogere platen zal meer slib worden geresuspendeerd. Door wind en golven gedreven sedimenttransport leidt tot sedimentatie in de vaargeul, waarbij onder dynamische condities sediment vanaf de hoger gelegen omringende platen wordt opgewoeld en in de vaargeul wordt afgezet.

Het verwijderen van de drempel, en het eventueel verder verdiepen van de vaargeul, leidt tot een toename van stroomsnelheden in de Boontjes. Desalniettemin neemt het baggerbezwaar toe. Er zijn verschillende processen die hieraan bijdragen.

1. In een diepere geul kunnen golven de bodem minder goed beroeren, waardoor de golfresuspensie afneemt.
2. De toegenomen stroomsnelheden leiden tot meer aanvoer van sediment.
3. De toegenomen geuldiepte leidt tot sterkere gravitatiecirculatie, met meer zuidwaarts gerichte residuele stroming bij de bodem in de Boontjes. Hierdoor kan meer sediment vanaf het noorden (en daarmee vanaf de verspreidingslocaties) naar de Boontjes worden getransporteerd.

Indien besloten wordt te stoppen met baggeren en de geul terug te laten keren naar een natuurlijke situatie zal de geul naar verwachting gestaag dichtslibben.



*Figuur 4.1 Samenvatting van de systeemwerking. Ontwikkeling van de Boontjes wordt gestuurd door grootschalige processen: sedimentimport door de zeegaten, sedimentatie langs de vastelandskust en de ontwikkeling van het wantij. Door wind en golven gedreven sedimenttransport leidt tot sedimentatie in de vaargeul, waarbij onder dynamische condities sediment vanaf de hoger gelegen omringende platen wordt opgewoeld en in de vaargeul wordt afgezet. Het spuien van zoet water bij Kornwerderzand drijft een gravitatiecirculatie aan, waarbij nabij de bodem een reststroming van noord naar zuid ontstaat. Hierdoor kan slib vanaf de verspreidingslocaties naar de Boontjes worden getransporteerd. Het Kimstergat wordt vooral gevoed vanuit de Geul langs de Pollendam en het Molenrak, en in veel mindere mate door de Boontjes. In de noordelijke Boontjes is soms fluid mud aanwezig, terwijl de zuidkant juist wordt gekenmerkt door zandige bodemvormen.*

## 5 Conclusies en aanbevelingen

### 5.1 Conclusies

In 2012 is een drempel in de Boontjes verdiept van een streefdiepte van -2,80 m NAP naar -3,80 m NAP. De verwachting was dat de drempelverwijdering geen tot nauwelijks effect zou hebben op het onderhoudsbaggerwerk (Ouwkerk & Vuik, 2012). Sinds de drempelverwijdering in 2012 is het baggerbezwaar in de vaargeul Boontjes, tussen Kornwerderzand en Harlingen, echter groter dan van tevoren ingeschat en vertoont het sterke fluctuaties. In deze studie is de oorzaak van de fluctuaties en een mogelijke toename, zoals die in andere vaargeulen van de Waddenzee ook wordt waargenomen (zoals vaargeul Holwerd-Ameland), nader bestudeerd. Ook wordt een inschatting gemaakt voor de toekomstige ontwikkeling van de Boontjes bij verschillende onderhoudsscenario's en een doorvertaling gemaakt van de opgedane inzichten naar gevolgen voor het beheer van de vaargeul.

Het hogere baggerbezwaar dan volgens de prognose sinds de drempelverwijdering wordt veroorzaakt door een combinatie van factoren. Het omhoog komen van de omliggende platen in combinatie met de verdieping van de vaargeul (drempelverwijdering) heeft geleid tot een afname van golfgedreven resuspensie in de vaargeul en een toename van sedimentaanvoer naar de vaargeul vanaf het omliggende gebied. Daarbij speelt ook de gravitatiecirculatie, dat is de dichtheidsstroming die wordt aangedreven door het spuien van zoetwater bij Kornwerderzand, een rol (waarbij het netto slibtransport naar de Boontjes toeneemt bij een verdieping van de vaargeul). Het is een uitdaging gebleken deze processen modelmatig goed te reproduceren, en daardoor kunnen we de relatieve bijdrage van de processen nog niet goed vaststellen. Veldmetingen en verdere kalibratie van het numerieke model zijn hiervoor nodig.

Het effect van grootschalige sedimentatie in de westelijke Waddenzee speelt over langere tijdschalen en zal ook in de komende decennia een belangrijke rol blijven spelen, omdat de zeespiegel dan in verhouding nog beperkt stijgt. Het kombergingsvolume van de Boontjes zal naar verwachting versneld afnemen door een toename en ophoging van het intergetijdengebied. Ook de lengte waarover gebaggerd moet worden zal daardoor toenemen. Als gevolg hiervan zal de sedimentatie in de vaargeul en ook het baggerbezwaar in de toekomst verder toenemen bij gelijkblijvende geuldimensies (van 0,1 - 0,3 miljoen m<sup>3</sup>/jaar nu tot naar schatting 0,3 - 1,5 miljoen m<sup>3</sup>/jaar in 2050).

Bij een verdieping van de vaargeul naar NAP -4,7 m zal het jaarlijkse baggerbezwaar verder toenemen (tot naar schatting 0,2 - 0,5 miljoen m<sup>3</sup>/jaar nu) en daarnaast zal de stijging in de toekomst, met een afnemend kombergingsvolume, nog groter zijn dan bij gelijkblijvende geuldimensies (naar schatting 0,5 - 2,5 miljoen m<sup>3</sup>/jaar in 2050).

Daarnaast is op verzoek van Rijkswaterstaat door Arcadis een inschatting gemaakt van het baggervolume bij een streefdiepte van NAP-2,8m (uitgangssituatie PKB; Cleveringa, 2022). Dit viel buiten de scope van dit rapport, maar is voor de volledigheid toegevoegd aan Tabel 5.1.

Tabel 5.1 Inschatting van het baggerbezwaar voor verschillende vaargeuldimensies en de ontwikkeling richting 2050, uitgebreid met de uitgangssituatie PKB van NAP-2,8m

Scenario	Inschatting anno nu	Inschatting anno 2050
Stoppen met baggeren	Drempel verondiept naar NAP-2,4m  Onderhoudsbaggerwerk: 0 m <sup>3</sup> /jaar	Drempel verondiept naar NAP-0,6m à NAP+0,0m  Onderhoudsbaggerwerk: 0 m <sup>3</sup> /jaar
Uitgangssituatie PKB NAP-2,8m (buiten deze studie)	Drempel op NAP-2,8m  Onderhoudsbaggerwerk: 0,1 m <sup>3</sup> /jaar (Cleveringa, 2022)	Drempel op NAP-2,8m  Onderhoudsbaggerwerk: 0,7 m <sup>3</sup> /jaar (Cleveringa, 2022)
Huidige streefdiepte NAP-3,8 m	Streefdiepte NAP-3,8m  Onderhoudsbaggerwerk: 0,1-0,3 miljoen m <sup>3</sup> /jaar	Streefdiepte NAP-3,8m  Onderhoudsbaggerwerk: 0,3-1,5 miljoen m <sup>3</sup> /jaar
Verdiepte ligging NAP -4,7m	Streefdiepte NAP-4,7m  Onderhoudsbaggerwerk: 0,2-0,5 miljoen m <sup>3</sup> /jaar	Streefdiepte NAP-4,7m  Onderhoudsbaggerwerk: 0,5-2,5 miljoen m <sup>3</sup> /jaar

Een mogelijke vaarroute via het Molenrak is aan dezelfde grootschalige morfologische ontwikkeling onderhevig en biedt daardoor geen realistisch alternatief om tot een gelijkblijvend baggerbezwaar te komen. Bovendien is het aanlegvolume van een route via het Molenrak zeer omvangrijk (3,4 miljoen m<sup>3</sup>), wat ook direct een indicatie is voor het onderhoudsbaggerwerk na aanleg. De huidige route blijft daarom het meest voordehandliggende scenario.

De huidige verspreidingsstrategie, om afhankelijk van de getijfase te verspreiden op de locaties bij de Pollendam of in het Kimstergat, lijkt vrij effectief te zijn op basis van de modelresultaten uit deze studie, maar is wel afhankelijk van de beschreven modeltekortkomingen.

Het volledig stoppen met het onderhouden van de vaargeul zou ertoe leiden dat de geul op termijn dichtslibt (de geul groeit naar het niveau van omliggende platen), waardoor de geul niet meer bevaarbaar wordt.

## 5.2 Aanbevelingen

Gedurende deze studie is gebleken dat het met de op dit moment beschikbare kennis, gegevens en instrumenten nog altijd erg uitdagend is om een goede inschatting te maken van de ontwikkeling van het baggerbezwaar in dit complexe gebied. Dit wordt ook gereflecteerd in de grote bandbreedte van de prognoses voor het baggerbezwaar voor verschillende beheersscenario's, nu en in de toekomst. Om deze inschatting aan te scherpen en de bandbreedte te verkleinen, worden een aantal aanbevelingen gedaan:

- Veldmetingen voor het verbeteren van systeembegrip en modelkalibratie/-validatie. Verticale profielen van de stroomsnelheden en sedimentconcentratie in de waterkolom kunnen hierbij heel inzichtelijk zijn. Gezien de twijfels over het gedrag van het numerieke model (Paragraaf 3.4.1.1), kunnen deze metingen inzicht geven of er op dit punt een herkalibratie van het model nodig is. Bijzonder van belang is inzicht in de ruimtelijke variatie in eigenschappen van het sediment (dichtheid en weerstand tegen erosie).

- Om inzicht te vergroten in het belang van een retourstroom vanuit de verspreidingsvakken raden we aan om de effecten op langere termijn door te rekenen met het model en de effecten van een mogelijke dichtheidsstroom nabij de bodem nader te onderzoeken.
- De effecten van golven en stroming zouden in meer detail kunnen worden bestudeerd door de bodemschuifspanning in deze componenten te ontleden. Ook zou er een meer geavanceerd golfmodel kunnen worden gehanteerd (zie Paragraaf 2.2) en zouden langetermijnmetingen van slibtransport kunnen worden uitgevoerd op de platen.
- Onderzoek het effect van scheepsbeweging en de airset in de haven van Harlingen op het in suspensie houden van slib en daarmee het baggerbezwaar in de Boontjes.
- Nader bepalen onder welke condities vloeibaar slib (fluid mud) vormt of terecht komt in de vaargeul en hoe dit van invloed is op het baggerbezwaar. Op basis van onze ervaringen in de havens van Antwerpen (Deurganckdok), Rotterdam (Botlek) en Zeebrugge en uit de studie naar de vaargeul Holwerd-Ameland (Grasmeijer et al., 2021) is de verwachting dat fluid mud niet het belangrijkste proces is dat de toename van het baggerbezwaar veroorzaakt, maar een gebiedsspecifieke analyse is nodig om dit met meer zekerheid te kunnen vaststellen.
- Over de baggercijfers uit de periode voorafgaand aan de drempelverwijdering lijkt verwarring te bestaan. Onderzoek daarnaast hoeveel sedimentatie er destijds in de vaargeul plaatsvond, zodat er meer duidelijkheid komt over de historische ontwikkeling van de sedimentatie in de vaargeul en het baggerbezwaar.
- Verdere ontwikkeling van het modelinstrumentarium:
  - Voor het 3D-slibmodel zal verdere ontwikkeling zich vooral moeten richten op de verticale verdeling van de sedimentconcentraties over de verticaal (inclusief uitwisseling met de bodem), de interactie tussen zand en slib, de terugkoppeling van bodemveranderingen op de waterbeweging (morfologische terugkoppeling), het effect van scheepsbewegingen, het effect van de sediment-gedreven dichtheidskoppeling en de golfmodellering. Dit sluit grotendeels aan bij de aanbevelingen die zijn gedaan bij de studie naar de vaargeul Holwerd-Ameland (Grasmeijer et al., 2021).
  - Daarnaast zou het interessant zijn om combinaties van verschillende instrumenten (zoals empirische relaties, 1D-sommen, langjarige morfologische trendanalyse en het 3D-slibmodel) te ontwikkelen die kunnen worden ingezet om tot goede langetermijnschattingen van sedimentatie en baggerbezwaar te komen.

# Referenties

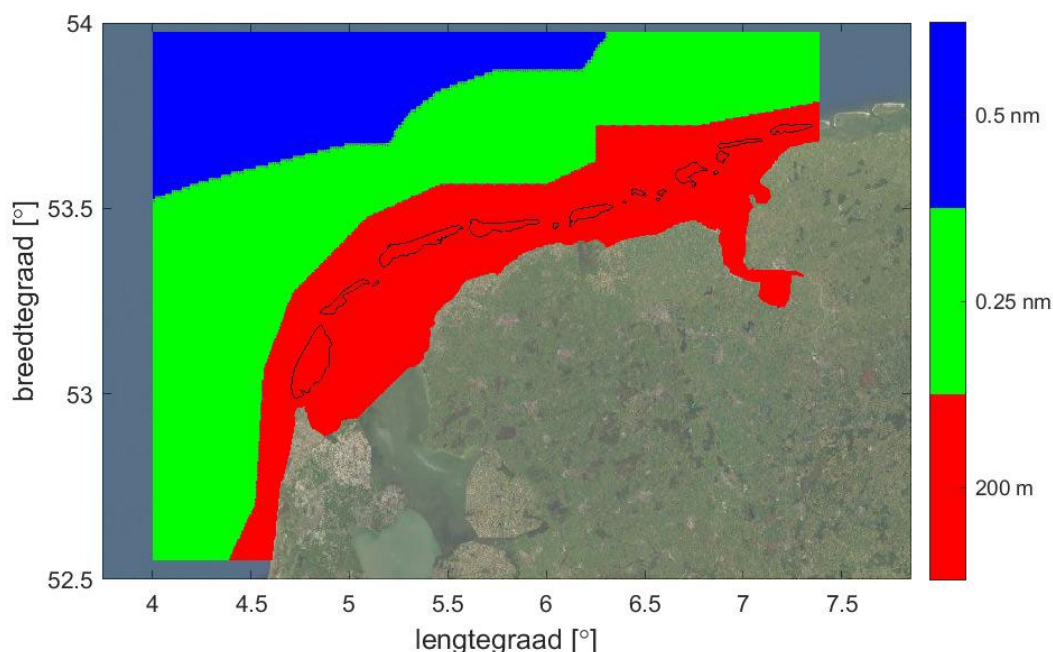
- Alkyon (2008). *Haalbaarheidsstudie vaarweg Ameland - Fase 1: selectie van kansrijke alternatieven*. Kenmerk: A2066R1r3.
- Biegel, E.J. (1992). *Impact of sea level rise on the morphology of the Waddensea in the scope of its ecological function - Investigation on empirical morphological relations*. Delft Hydraulics, ISOS\*2 project phase 2.
- Cleveringa, J. and B. Grasmeijer (2010). *Meegroeivermogen en de gebruiksruimte in de getjibekkens Vlie en Marsdiep Waddenzee*. Technical report.
- Cleveringa, J. (2022). *Vaargeul de Boontjes Ecologische scenariovergelijking aanvullend scenario NAP -2,8 m*. Arcadis memo.
- 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., Jaksic, L., Vroom, J. *Verkenning morfologische ontwikkeling westelijke Waddenzee*. Deltares rapport 1128040-005-ZKS-0001.
- Grasmeijer, B., van Weerdenburg, R., van Kessel, T. (2021). *Invloed baggerstrategie op slibconcentraties en baggervolumes vaarweg Holwerd-Ameland*. Deltares rapport. Kenmerk: 11206799-006-ZKS-0001. Versie 0.7.
- Herman, P. et al., 2016. *Analyse Vaargeul Holwerd-Ameland*. Deltares rapport 1230378-005-ZKS-001.
- 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.
- Ouwerkerk, S. en Vuik, V. (2012). *Drempelverwijdering Boontjes. Effecten op hydrodynamica en morfologie*. HKV rapport PR2051.10, maart 2012.
- Partheniades, E. (1965). *Erosion and deposition of cohesive soils*. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE* 91 (HY 1), 105–139.
- Schulz, K.; Gerkema, T. (2018). *An inversion of the estuarine circulation by sluice water discharge and its impact on suspended sediment transport*. *Est., Coast. and Shelf Sci.* 200: 31  
40. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2017.09.031>
- Smits, B.P. (2022). *Modelberekeningen morfologische studie vaargeul Boontjes*. Datum 18 augustus 2022. Deltares memo 11208040-004-ZKS-0001.
- Van der Vegt, H. & Cleveringa, J. (2022). *Dynamisch vaargeulbeheer*. Deltares conceptrapport 11208040-009-ZKS-0003.
- Vroom, J., Van Weerdenburg, R., Smits, B., Herman, P. (2020). *Modellering 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 DCMS-FM): Setup and validation, s.l.: Deltares rapport 1220339-000-ZKS-0042*.



# A Modelopzet

## A.1 Modelschematisatie

Voor het modelleren van de hydrodynamica en slibdynamiek in en rondom de vaargeul Boontjes wordt gebruikt gemaakt van een modelschematisatie van de Waddenzee met een lokale verhoging van de modelresolutie (d.w.z. roosterverfijning) in het interessegebied. De modelschematisatie van de Waddenzee die als uitgangspunt wordt gebruikt is bij Rijkswaterstaat bekend onder de referenties *dflowfm3d-waddenzee\_200m-j17\_6-v1* en *dflowfm3d\_dwaq\_slib-waddenzee\_200m-j17\_6-v1*, voor respectievelijk het hydrodynamische model en het gekoppelde model voor hydrodynamica en slib. Deze modelschematisatie maakt gebruik van de D-Flow FM software en de D-Water Quality processenbibliotheek. Figuur A.1 toont het modeldomein en de roosterresolutie; de resolutie in de Waddenzee en Eems-Dollard en langs de Noordzeekust van Holland en de Waddeneilanden is ongeveer 200 m. De opzet en de kalibratie van het model zijn uitgebreid beschreven in Vroom et al. (2020) en samengevat in een factsheet<sup>5</sup>.



*Figuur A.1 Modeldomein en roosterresolutie van de modelschematisatie van de Waddenzee die als uitgangspunt wordt gebruikt.*

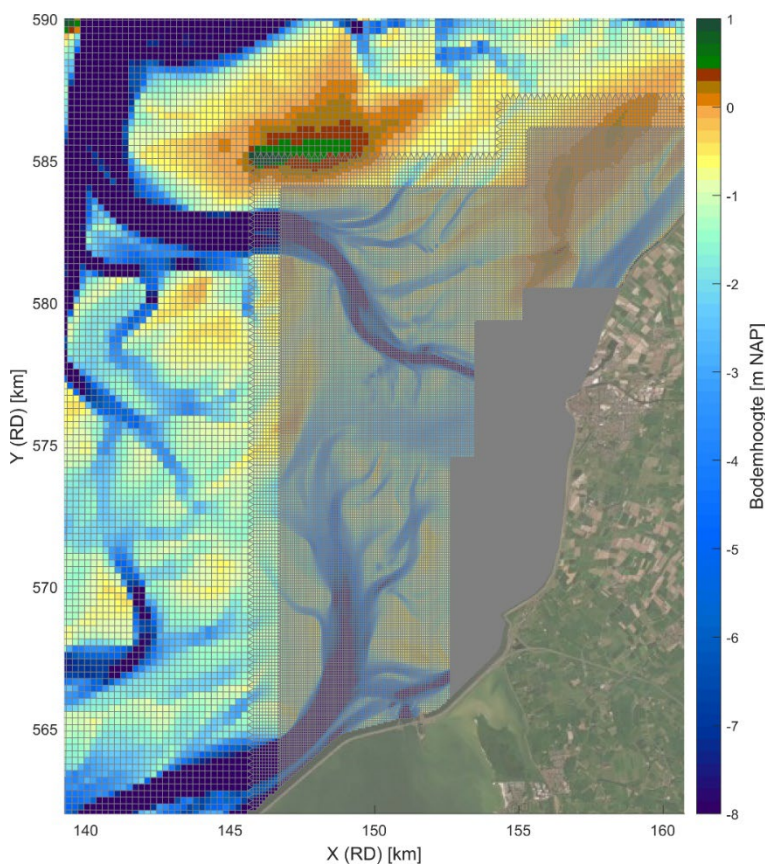
Voor de specifieke toepassing van het modelleren van slibdynamiek in en rondom de vaargeul Boontjes is de roosterresolutie van het model lokaal verhoogd tot ongeveer 30 m in het interessegebied (zie Figuur A.2). Dit betekent dat er drie verfijningsstappen nodig zijn vanaf de standaard resolutie om lokaal tot een resolutie van ongeveer 30 m te komen. Deze verfijningsstappen zijn terug te zien in Figuur A.2. Het Molenrak is in de aangepaste modelschematisatie opgenomen met een resolutie tot ongeveer 60 m resolutie en het Kimstergat valt gedeeltelijk binnen het deel met 30 m en gedeeltelijk binnen het deel met 60 m resolutie. Idealiter zou de roosterresolutie nog verder verhoogd worden, zodat ook kleinschaligere processen door het model opgelost kunnen worden. Met het verhogen van de horizontale resolutie neemt de rekentijd echter aanzienlijk toe (d.w.z een factor 2 tot 8 per

<sup>5</sup> Factsheet D-Flow FM 3D & D-Water Quality Slib Waddenzee

verfijningsstap). Met de huidige resolutie kost het ongeveer 6 dagen rekentijd om een periode van 3 maanden te simuleren (d.w.z. op 20 rekenkernen op het Deltares rekencluster). Daarmee is de huidige resolutie de maximale resolutie die binnen de looptijd van dit project werkbaar bleek.

Het model wordt gebruikt in 3D met 10 equidistante sigma lagen. Ook voor de verticale resolutie geldt dat een hogere resolutie leidt tot nauwkeurigere resultaten, maar dat de rekentijd van het model dan verder toeneemt.

Het 3D hydrodynamische model wordt geforceerd door randvoorwaarden voor waterbeweging, temperatuur en saliniteit op open modelranden die zijn afgeleid uit de modelresultaten van het 3D Dutch Continental Shelf Model (DCSM; Zijl et al., 2018). De meteorologische forcering (d.w.z. wind, atmosferische druk en de benodigde data voor het temperatuurmodel) zijn gebaseerd op ERA5 data. Afvoeren uit de Eems en bij de spuisluisen van Den Oever, Kornwerderzand en Lauwersoog zijn in de modelschematisatie opgenomen op basis van gemeten (spui)debieten.



Figuur A.2 Roosterverfijning rondom het interessegebied in vaargeul Boontjes, waarbij de roosterresolutie in drie stappen toeneemt tot ongeveer 30 m x 30 m.

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. De slibconcentraties die op de modelranden worden opgelegd zijn diepte- en seizoensafhankelijk, volgens de relaties die worden beschreven door Herman et al. (2018). De instellingen van het slibmodel in de standaard modelschematisatie van de Waddenzee zijn opgenomen in Tabel A.1. De modelkalibratie waar deze instellingen uit volgen wordt uitgebreid beschreven door Vroom et al. (2020).

Tabel A.1 Instellingen van het slibmodel in de modelschematisatie van de Waddenzee. Deze instellingen zijn als uitgangspunt gebruikt in deze studie, maar lokaal aangepast om de lokale slibdynamiek rond de vaargeul Boontjes beter te reproduceren.

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

Uit de eerste modelresultaten voor slibdynamiek rond de vaargeul Boontjes bleek dat de aanslibbing in de vaargeul onvoldoende wordt gereproduceerd met de standaard instellingen van het slibmodel (d.w.z. de instellingen benoemd in Tabel A.1). Daarom is ervoor gekozen om een lokale herkalibratie van het model uit te voeren, met als doel om de netto aanslibbing in de vaargeul Boontjes beter te reproduceren. Uiteindelijk zijn twee instellingen aangepast:

- de weerstand tegen erosie vanuit de bufferlaag in de vaargeul is verhoogd naar 1,0 Pa;
- de verdeling van de depositieflux over de twee bodemlagen is aangepast, zodat er een groter deel van de totale depositieflux naar de bufferlaag gaat.

De instellingen die zijn aangepast zijn benoemd in Tabel A.2. Er is gekozen om de instellingen alleen lokaal aan te passen, zodat de grootschalige slibdynamiek in de Waddenzee nauwelijks wordt beïnvloed.

Tabel A.2 Instellingen van het slibmodel die zijn aangepast ten opzichte van de standaard modelschematisatie van de Waddenzee.

Slibeigenschap	Standaard modelschematisatie Waddenzee	Aangepaste instellingen in vaargeul Boontjes
Fractie van depositieflux naar bodemlaag S2 [-]	0,05	0,1
Kritische bodemschuifspanning voor erosie uit bodemlaag S2 [Pa]	0,8	1,0

## A.2 Bodemdata voor verschillende scenario's

Met de aangepaste modelschematisatie worden modelsimulaties uitgevoerd voor de slibdynamiek rond de vaargeul Boontjes bij verschillende scenario's voor de bodemligging. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen de bodemligging in de vaargeul Boontjes en de bodemligging in de omgeving van de vaargeul Boontjes (d.w.z. de westelijke Waddenzee).

De bodemligging in de omgeving van de vaargeul Boontjes, ofwel de omgevingsmorfologie, volgt uit vaklodingen data die zijn ingewonnen in 2003 of in 2015. De vaklodingen uit 2015 worden hierbij gebruikt als recente of actuele omgevingsmorfologie. De vaklodingen uit 2003 worden gebruikt als omgevingsmorfologie die past bij de situatie vóór de drempelverwijdering

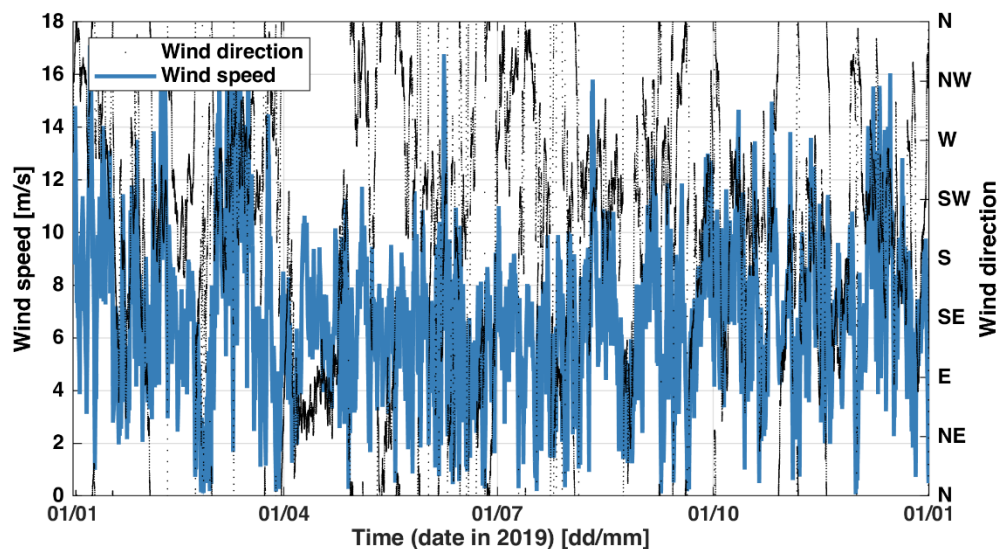
in 2012. Afhankelijk van het scenario dat wordt doorgerekend wordt één van deze twee datasets gebruikt voor de bodemligging in de modelschematisatie. Ten tijden van het opzetten van de modelberekeningen was de vaklodingen data die is ingewonnen in 2021 nog niet beschikbaar.

Voor de bodemligging in de vaargeul Boontjes in de modelschematisatie wordt gebruikt gemaakt van bodempeilingen die specifiek voor de vaargeul Boontjes zijn uitgevoerd. Deze peilingen hebben een hogere ruimtelijke resolutie dan de vaklodingen. De bodemligging in de vaargeul die wordt gebruikt voor modelscenario's voor de periode vóór de drempelverwijdering volgt uit bodempeilingen uit 2012 (d.w.z. uit een peiling voordat gestart werd met de werkzaamheden aan de drempelverwijdering). De bodemligging in de vaargeul die wordt gebruikt voor modelscenario's voor de periode na de drempelverwijdering volgt uit bodempeilingen uit januari 2019. In modelscenario's waarbij het effect van een verdere verdieping van de vaargeul wordt doorgerekend is een minimale diepte in de vaargeul toegepast, uitgaande van de bodempeilingen uit januari 2019.

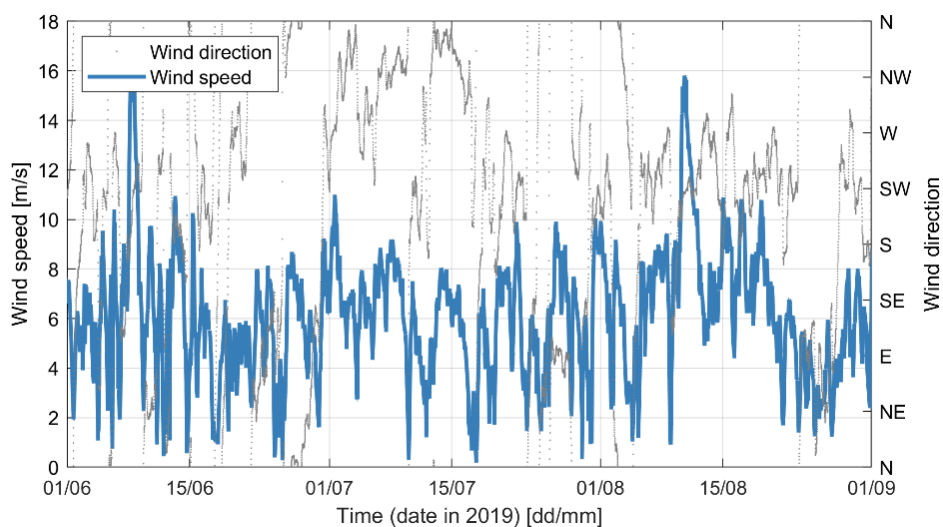
### A.3 Simulatieperiode

De simulatieperiodes die in deze studie worden gebruikt liggen in 2019. Omdat de bodemligging niet altijd representatief is voor de bodemligging in deze periode is dit vooral relevant voor de hydrodynamische en meteorologische randvoorwaarden. Voor veel van de hydrodynamische modelberekeningen (d.w.z. ter bepaling van stroomsnelheden en debieten door de geul) is een simulatieperiode van 1 maart tot 1 mei 2019 aangehouden. In deze periode zit veel variatie in de meteorologische forcering; over het algemeen was de maand maart 2019 een heel dynamische maand en was de maand april 2019 relatief kalm. Dit is terug te zien in tijdseries van de windsnelheid bij Harlingen in *Figuur A.3*.

Omdat er zo veel variatie in de meteorologische forcering zit in de maanden maart en april 2019 is deze periode niet representatief voor de gemiddelde slibdynamiek in een jaar. Daarom is voor de modelsimulaties voor slibdynamiek gekozen voor een simulatieperiode van drie maanden, van 1 juni 2019 tot 1 september 2019. De windsnelheid en windrichting in deze periode is weergegeven in *Figuur A.4*. In deze periode van drie maanden zitten een aantal momenten waarop de windsnelheid boven de 10 m/s uitkomt. Daarnaast zijn er ook kalme periodes, met windsnelheden onder de 5 m/s.



Figuur A.3 Tijdseries van de windsnelheid en windrichting bij Harlingen in 2019.



Figuur A.4 Tijdseries van de windsnelheid en windrichting bij Harlingen in de periode van 1 juni tot 1 september 2019.

## B Aanvullende resultaten 3D-slibmodel

In deze bijlage wordt een deel van de modelresultaten die in het hoofdrapport worden uitgelicht verder toegelicht. In tegenstelling tot hoe het hoofdrapport gestructureerd is worden de resultaten hier niet expliciet uitgesplitst in de effecten van de omgevingsmorfologie en de effecten van de diepte van de vaargeul. Daarentegen worden de hydrodynamische resultaten en de resultaten voor slibdynamiek in afzonderlijke paragrafen toegelicht. De labels die aan de verschillende scenario's worden toegekend zijn niet consistent met de labels die in het hoofdrapport worden gebruikt.

### B.1 Hydrodynamische modelsimulaties

Om de veranderingen in het debiet door de vaargeul Boontjes te kwantificeren zijn vier verschillende hydrodynamische modelsimulaties uitgevoerd. Het doel van deze vier simulaties is de veranderingen die zijn opgetreden uit te splitsen naar enerzijds een bijdrage door de drempelverwijdering in de vaargeul en anderzijds een bijdrage door de morfologische veranderingen die sinds de drempelverwijdering zijn opgetreden in het kombergingsgebied.

De vier verschillende modelscenario's verschillen in bodemligging:

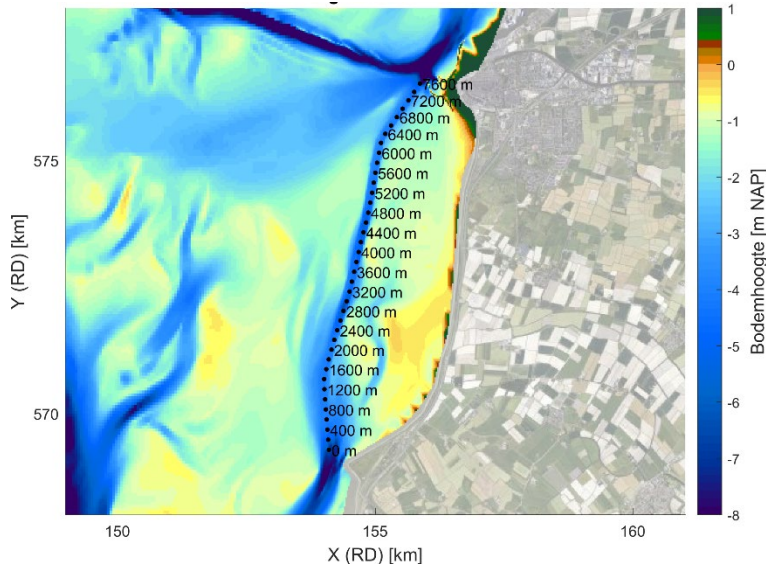
- 1A Bodemligging zoals in 2003 in het gehele interessegebied;
- 1B Bodemligging in de vaargeul Boontjes zoals in 2015, maar met de omliggende morfologie als in 2003;
- 2A Bodemligging in de vaargeul Boontjes zoals in 2003, maar met de omliggende morfologie als in 2015;
- 2B Bodemligging zoals in 2015 in het gehele interessegebied.

De inhoud van deze vier scenario's is ook schematisch weergegeven in Tabel B.1

*Tabel B.1 Verschillende scenario's voor de bodemligging in en rondom de vaargeul Boontjes die in deze paragraaf worden toegelicht.*

		bodem westelijke Waddenzee	
		2003	2015
drempel in de vaargeul Boontjes	ja	1A	2A
	nee	1B	2B

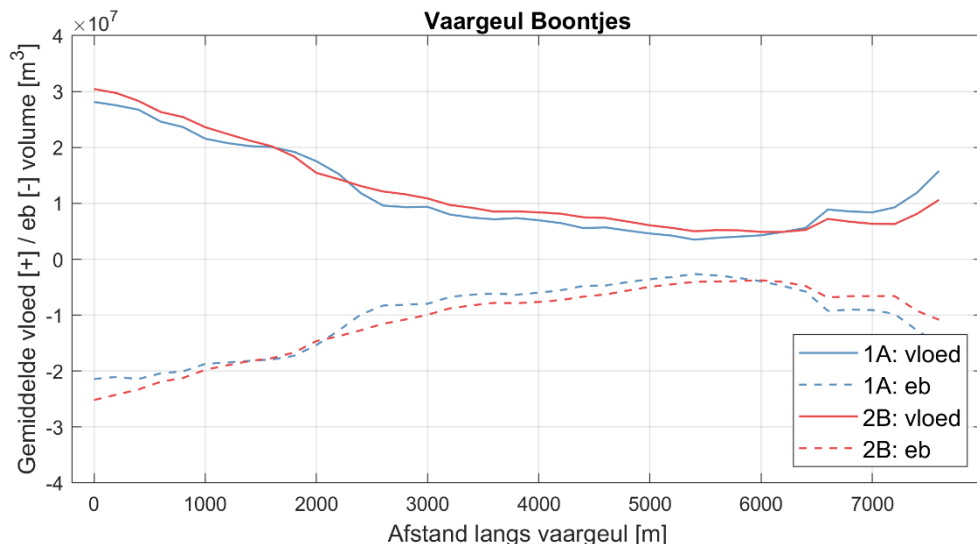
Voor de hydrodynamische resultaten zijn modelsimulaties gedaan voor de periode van 1 maart tot 1 mei 2019. Debieten door en stroomsnelheden in de vaargeul Boontjes worden gepresenteerd langs een lokale lengteas, die is te zien in Figuur B.1.



Figuur B.1 Lokale lengteas langs de vaargeul Boontjes, welke start aan het zuidelijke uiteinde van de vaargeul en doorloopt tot en met de uitstroming van de vaargeul Boontjes bij Harlingen.

### B.1.1 Debieten door de vaargeul Boontjes

Het volume water dat bij vloed en bij eb door de vaargeul Boontjes stroomt is relatief groot aan het zuidelijke uiteinde van de vaargeul en neemt af richting het noordelijke uiteinde van de vaargeul bij Harlingen. De veranderingen in de gemiddelde vloed- en ebvolumes door de vaargeul Boontjes door morfologische veranderingen tussen 2003 en 2015 zijn weergegeven in Figuur B.2. In een groot deel van de vaargeul is het debiet door de morfologische veranderingen toegenomen, zowel bij eb als bij vloed. Die toename is (relatief) het sterkst in het middendeel van de vaargeul, grofweg tussen  $L = 2500$  m en  $L = 6000$  m in Figuur B.2. In het noordelijke deel van de vaargeul, voorbij  $L = 6000$  m in Figuur B.2, is het debiet afgenomen.

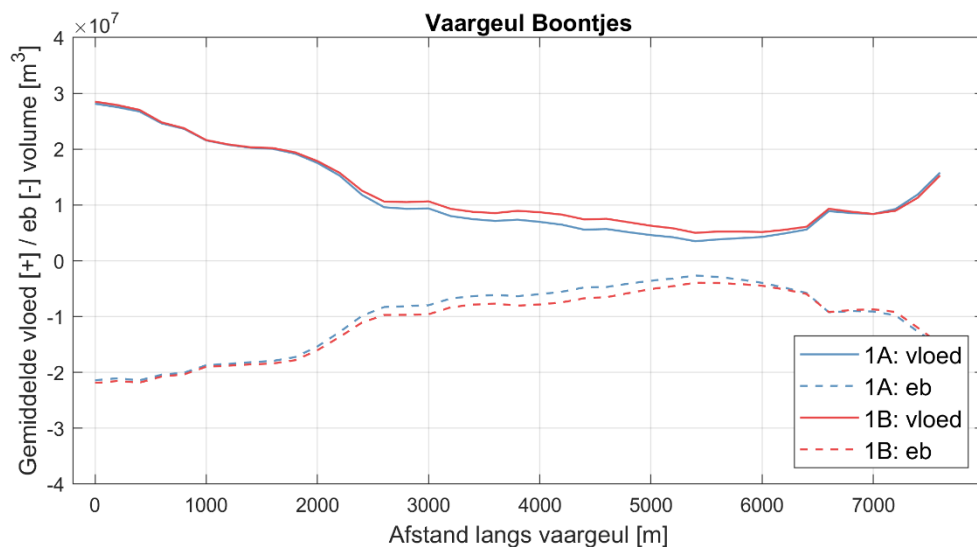


Figuur B.2 Gemiddeld debiet dat bij vloed (getrokken lijn) en bij eb (gestippelde lijn) door de doorsnedes in de vaargeul stroomt voor verschillende scenario's van de bodemligging.

Zoals eerder benoemd worden scenario's 1B en 2A gebruikt om te beoordelen welke veranderingen in de geuldebieten zijn toe te schrijven aan de drempelverwijdering en welke aan de morfologische ontwikkelingen die in het kombergingsgebied hebben plaatsgevonden.

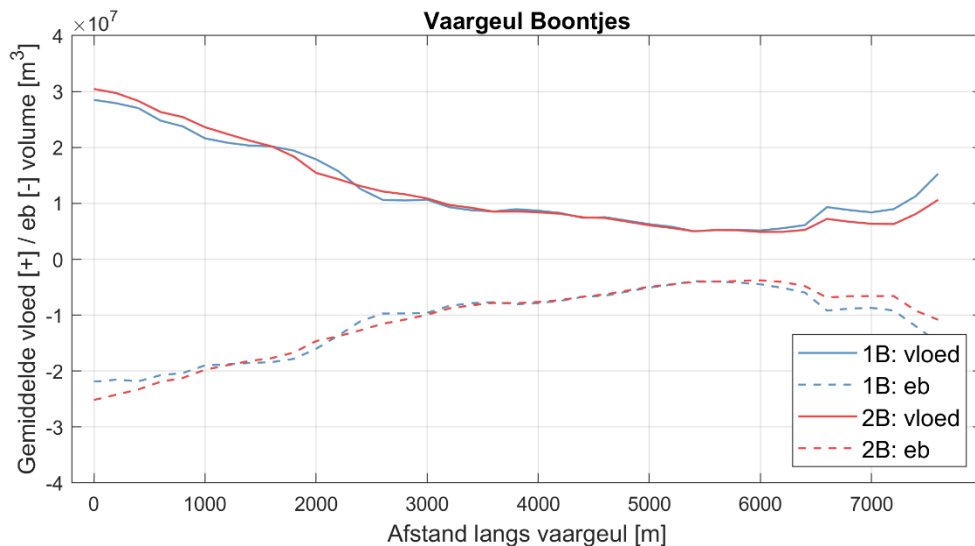
De bijdrage van de drempelverwijdering volgt uit het verschil tussen scenario's 1A en 1B, zoals weergegeven in Figuur B.3. Hieruit wordt duidelijk dat de drempelverwijdering ervoor zorgt dat het debiet in het middendeel van de vaargeul toeneemt, grofweg tussen  $L = 2000$  m en  $L = 6500$  m. Dit is het deel van de vaargeul dat door de drempelverwijdering verdiept is. Het effect van de drempelverwijdering op de debieten door de vaargeul kan ook worden bepaald door een vergelijking tussen scenario's 2A en 2B; dit geeft een vergelijkbaar beeld als in Figuur B.3, maar is hier niet weergegeven.

Uit een vergelijking tussen de resultaten voor scenario's 1B en 2B volgt het effect van de morfologische veranderingen in het kombergingsgebied op de geuldebieten (Figuur B.4). Eenzelfde resultaat volgt uit een vergelijking tussen scenario's 1A en 2A, waarbij ook de bodemligging in de vaargeul gelijk blijft maar de bodemligging in het omliggende kombergingsgebied verandert (hier niet weergegeven). Uit Figuur B.4 volgt dat de morfologische veranderingen juist zorgen voor veranderingen in de geuldebieten in het meest noordelijke en het meest zuidelijke deel van de vaargeul Boontjes. In het zuidelijke deel is dit niet eenduidig een toe- of afname van het debiet, waarschijnlijk omdat de geul hier breder is dan de vaargeul en morfologische veranderingen ervoor kunnen zorgen dat de verhouding tussen het debiet dat door de vaargeul stroomt en dat door de gehele geul stroomt verandert. In het noordelijke deel van de vaargeul Boontjes zorgen morfologische veranderingen duidelijk voor een afname van het geuldebiet, zowel bij eb als bij vloed.



Figuur B.3 Gemiddeld debiet dat bij vloed (getrokken lijn) en bij eb (gestippelde lijn) door de doorsnedes in de vaargeul stroomt voor verschillende scenario's van de bodemligging, namelijk met (1A) en zonder (1B) drempel in de vaargeul.

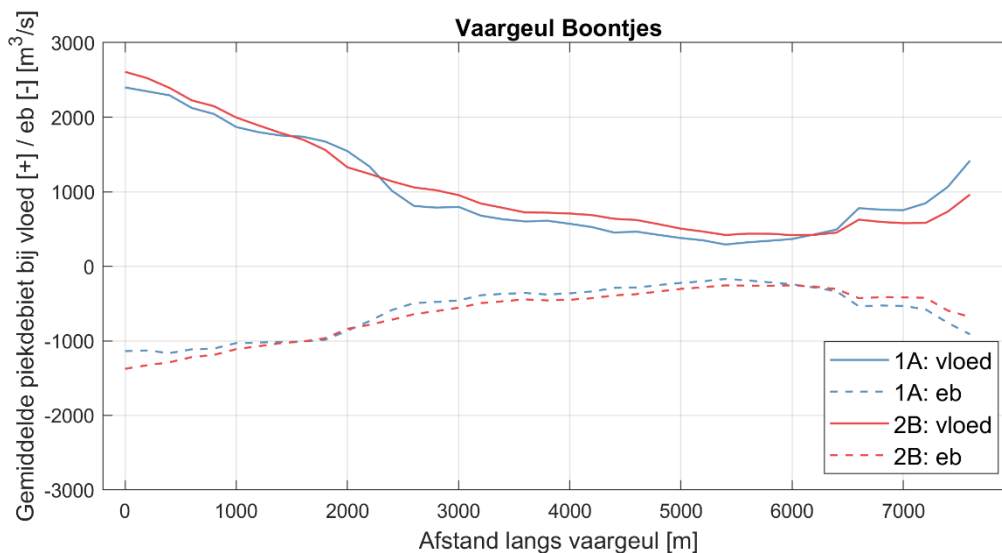




*Figuur B.4 Gemiddeld debiet dat bij vloed (getrokken lijn) en bij eb (gestippelde lijn) door de doorsnedes in de vaargeul stroomt voor verschillende scenario's van de bodemligging, namelijk voor de omgevingsmorfologie uit 2003 (1B) en 2015 (2B).*

Naast de gemiddelde volumes die bij eb en vloed door de vaargeul stromen is ook gekeken naar het gemiddelde piekdebiet bij eb en vloed. Het piekdebiet is hierbij bepaald als het maximale debiet in eb- of vloedrichting gedurende en getijperiode, en het gemiddelde piekdebiet is vervolgens bepaald als het gemiddelde piekdebiet gedurende de simulatieperiode van twee maanden. De gemiddelde piekdebieten geven een heel vergelijkbaar beeld van de gevolgen van bodemveranderingen op de geuldebieten als de gemiddelde eb- en vloedvolumes. Dit wordt geïllustreerd in Figuur B.5, waarin de gemiddelde piekdebieten zijn weergegeven voor scenario's 1A en 2B (d.w.z. vergelijkbaar beeld als in Figuur B.2).

Bodemveranderingen tussen 2003 en 2015 hebben dus gezorgd voor veranderingen in het debiet door vaargeul Boontjes. Uit bovenstaande resultaten blijkt dat de drempelverwijdering in de vaargeul gezorgd heeft voor een toename van het debiet, vooral in het middeldeel van de vaargeul, waar de drempelverwijdering het grootste effect had op de lokale diepte. Morfologische veranderingen die tussen 2003 en 2015 zijn opgetreden in het overige kombergingsgebied hebben er vooral voor gezorgd dat het debiet door het noordelijke deel van de vaargeul is afgenomen.

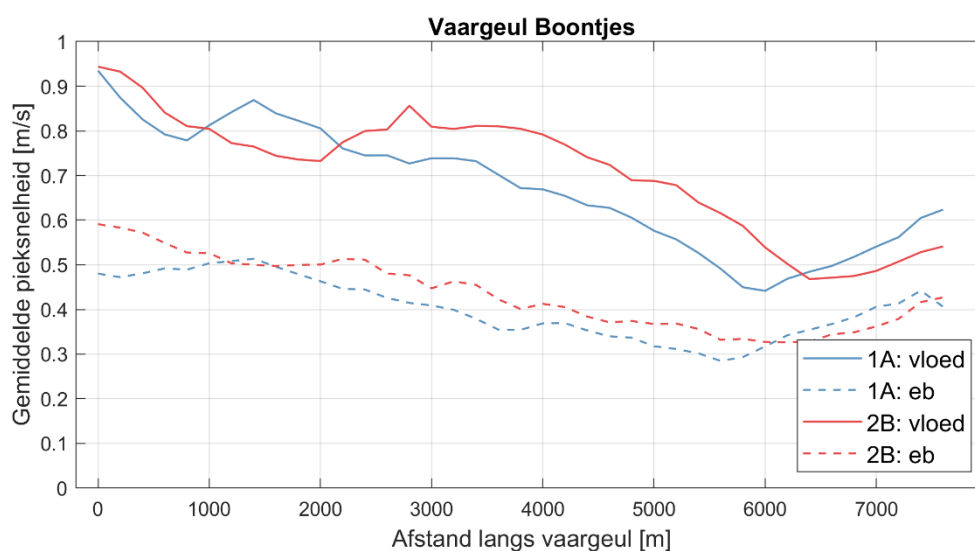


Figuur B.5 Gemiddeld piekdebiet bij vloed (getrokken lijn) en bij eb (gestippelde lijn) door de doorsnedes in de vaargeul voor verschillende scenario's van de bodemligging.

### B.1.2 Stroomsnelheden in de vaargeul Boontjes

De veranderingen in geuldebieten bij een andere morfologie kunnen enerzijds veroorzaakt worden doordat het doorstroomoppervlak (d.w.z. breedte en diepte) van de vaargeul verandert, en anderzijds doordat de stroomsnelheden veranderen.

Het effect van morfologische veranderingen tussen 2003 en 2015 op de gemiddelde pieksnelheden in de vaargeul is weergegeven in Figuur B.6. De verschillen tussen de twee scenario's zijn vergelijkbaar met de verschillen in gemiddelde piekdebieten (Figuur B.5), wat inderdaad aangeeft dat de stroomsnelheden met de geuldebieten zijn veranderd. Dit betekent dat de pieksnelheden zowel bij eb als bij vloed zijn toegenomen in het middeldeel van de vaargeul, en dat zij zijn afgenomen in het noordelijke deel van de vaargeul. Ook hier geldt dat de drempelverwijdering vooral effect heeft gehad op het middeldeel en dat de morfologische veranderingen vooral effect hebben gehad op het noordelijke deel van de vaargeul (hier niet weergegeven).



Figuur B.6 Gemiddelde pieksnelheden bij vloed (getrokken lijn) en bij eb (gestippelde lijn) op punten langs de lengteas in de vaargeul voor verschillende scenario's van de bodemligging.

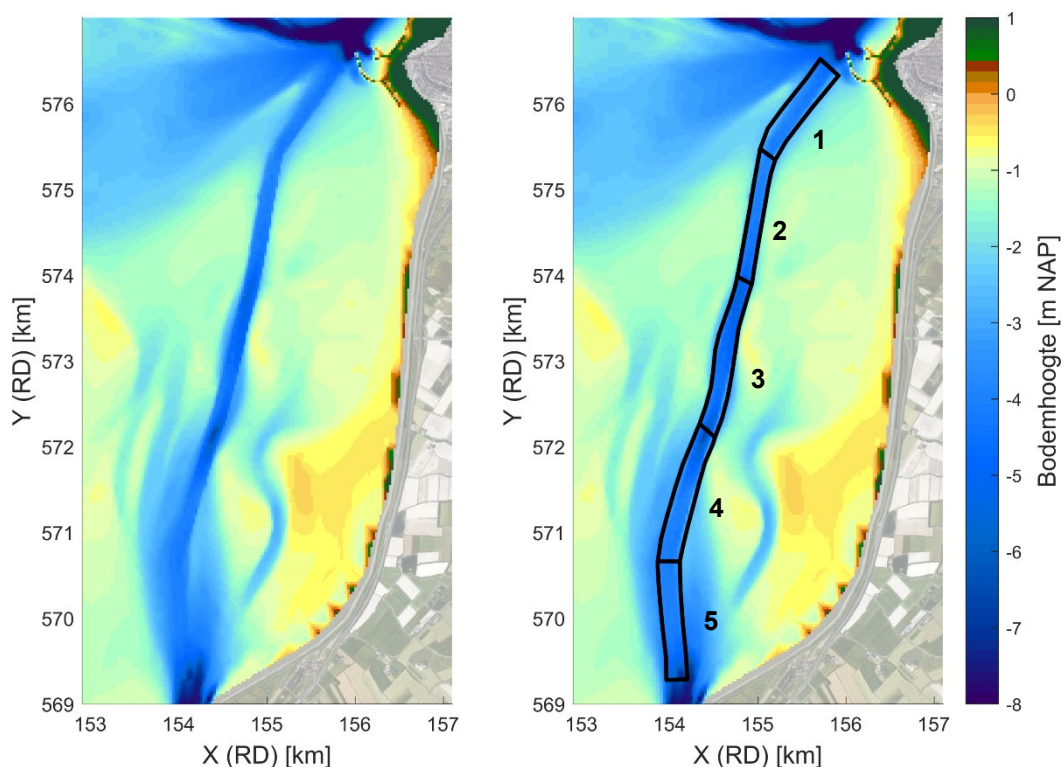
## B.2 Slibsedimentatie en baggeronderhoud

De simulatieperiode van de modelsimulaties voor slibdynamiek in de vaargeul Boontjes loopt van 1 juni tot 1 september 2019. Hier wordt de aanslibbing in de vaargeul in de referentieberekening uitgebreid besproken. Het effect van aanpassingen aan de bodemligging in de vaargeul of in de omgeving en het effect van een andere stortstrategie worden in het hoofrapport ten opzichte van deze referentieberekening besproken.

### B.2.1 Huidige situatie (referentie)

In de referentieberekening is de bodemligging representatief voor de periode kort na het verwijderen van de drempel in de vaargeul, net zoals in scenario 2B in de hydrodynamische modelberekeningen. De aanslibbing wordt besproken aan de hand van vijf vakken in de vaargeul, zoals weergegeven in Figuur B.7.

Het slib dat in de vaargeul Boontjes wordt gebaggerd wordt voor ongeveer 75% gestort bij vloed in het Kimstergat (d.w.z. stortlocatie K1). De overige 25% wordt bij eb gestort in stortvak Boontjes, ten zuiden van de vaargeul.

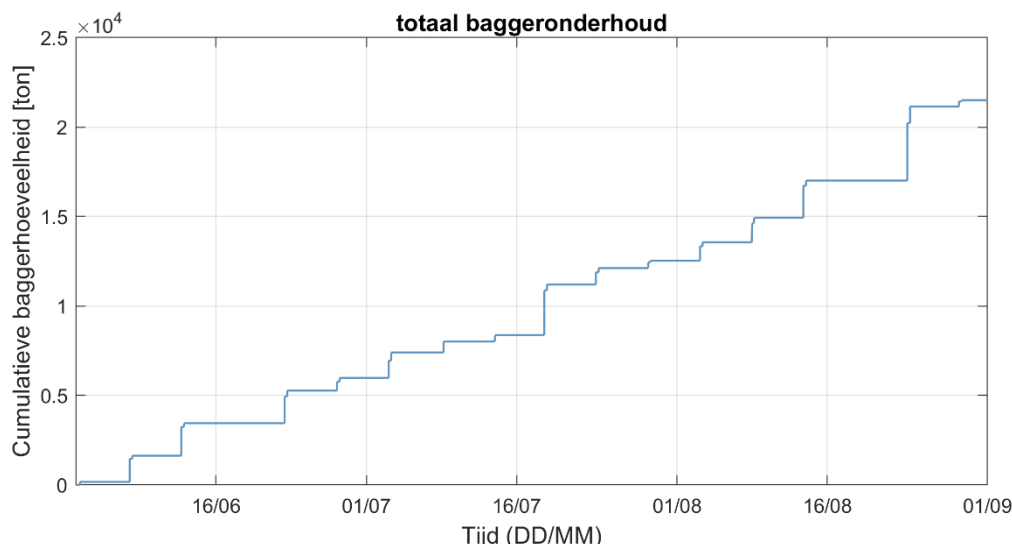


Figuur B.7 Bodemligging in de referentieberekening voor slibdynamiek (links) en de vijf vakken die worden gebruikt om de aanslibbing in de vaargeul te analyseren (rechts).

#### B.2.1.1. Totaal baggeronderhoud

Na de lokale herkalibratie van slibeigenschappen is het berekende baggervolume in de simulatieperiode gelijk aan 21.5 duizend ton droge stof. In Figuur B.8 is de cumulatieve baggerhoeveelheid te zien, geïntegreerd over de hele vaargeul. Momenten waarop veel gebaggerd werd om de dikte van de bodemlaag in de vaargeul te beperken zijn hierin terug te zien als grote verticale stappen. Merk op de baggerfrequentie in de modelsimulaties is ingesteld zodat er eens per 10 getijperiodes gebaggerd wordt. Als de cumulatieve baggerhoeveelheid in Figuur B.8 voor een langere periode dan 10 getijperiodes constant

blijft, dan was er op een bepaald moment dus geen baggeronderhoud nodig. Dat is medio juni en medio augustus het geval in deze modelsimulatie.



*Figuur B.8 Berekende cumulatieve baggerhoeveelheid in de vaargeul Boontjes gedurende de simulatieperiode van drie maanden in de referentieberekening.*

#### B.2.1.2. Aanslibbing per vak

Om de ruimtelijke variatie in vaargeulonderhoud inzichtelijk is de vaargeul onderverdeeld in vijf vakken. In Tabel B.2 staan de totale baggerhoeveelheden tijdens de simulatieperiode per vak. De baggerhoeveelheid is relatief klein in het zuidelijke deel van de vaargeul. Ongeveer 75% van de baggerhoeveelheid in het model is afkomstig uit het smalle, noordelijke deel van de vaargeul (d.w.z. vakken 1, 2 en 3).

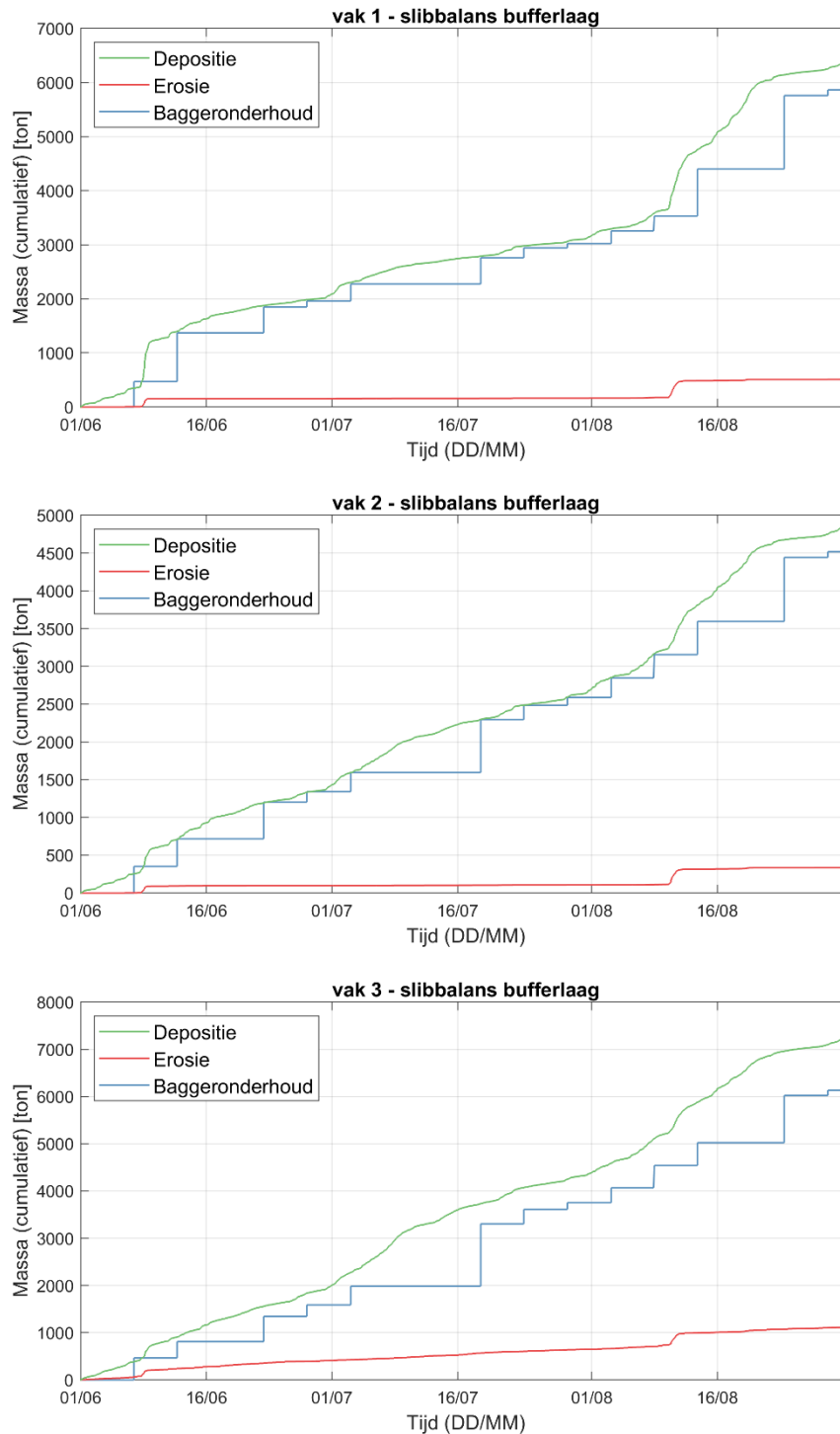
*Tabel B.2 Baggerbezwaar per vak gedurende de simulatieduur van drie maanden*

Baggervak	Baggerhoeveelheid
Vak 1	5867 ton
Vak 2	4518 ton
Vak 3	6133 ton
Vak 4	4127 ton
Vak 5	862 ton
<b>Totaal</b>	<b>21 506 ton</b>

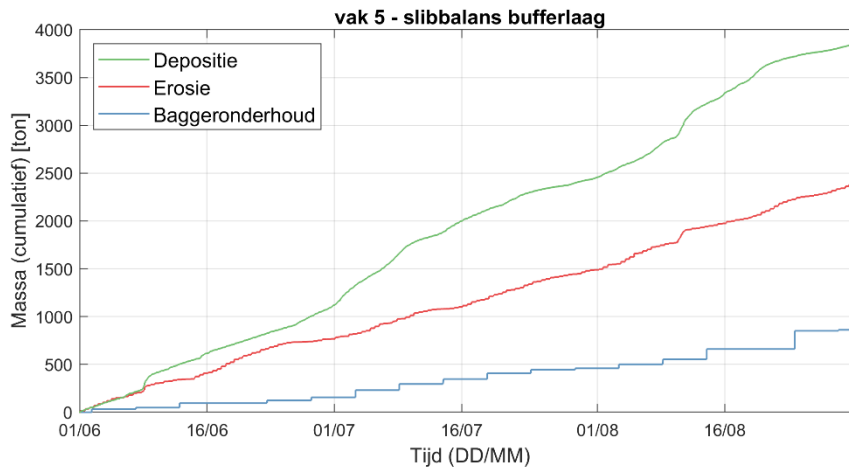
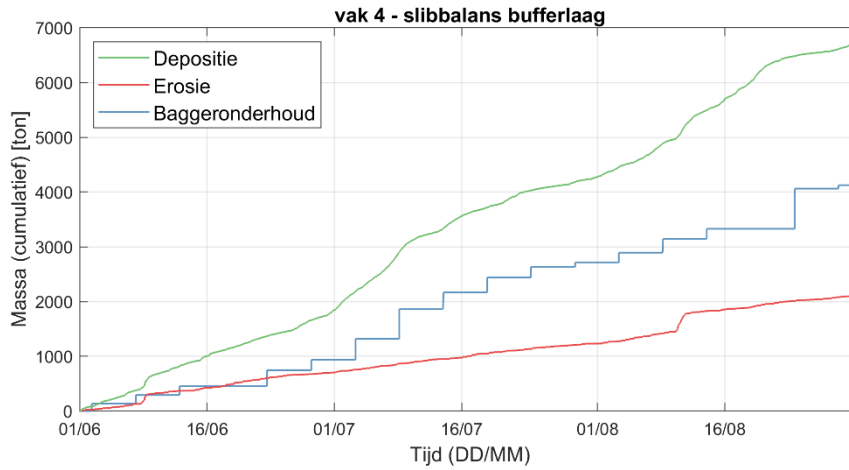
In Figuur B.9 en Figuur B.10 wordt de slibbalans voor de bufferlaag weergegeven voor vakken 1 tot en met 3 en voor vakken 4 en 5, respectievelijk. Zoals ook duidelijk wordt uit deze figuren wordt de depositieflux naar de bufferlaag gecompenseerd door de erosie vanuit de bufferlaag en het baggeronderhoud. Er zijn gedurende de simulatieperiode maar een aantal momenten waarop erosie vanuit de bufferlaag optreedt in het noordelijke deel van de vaargeul (d.w.z. in vakken 1 en 2). Verder zuidelijk in de vaargeul treedt wel regelmatig erosie op, wat is terug te zien aan een min of meer constant stijgende lijn in Figuur B.9 en Figuur B.10. Die regelmatige erosie zorgt ervoor dat in het zuidelijke deel van de vaargeul een kleiner deel van de depositieflux weggebaggerd moet worden dan in het noordelijke deel.

Het ruimtelijke verschil in hoe vaak erosie vanuit de bufferlaag optreedt wordt ook duidelijk aan de hand van karakteristieke waarden voor de berekende bodemschuifspanning (Figuur

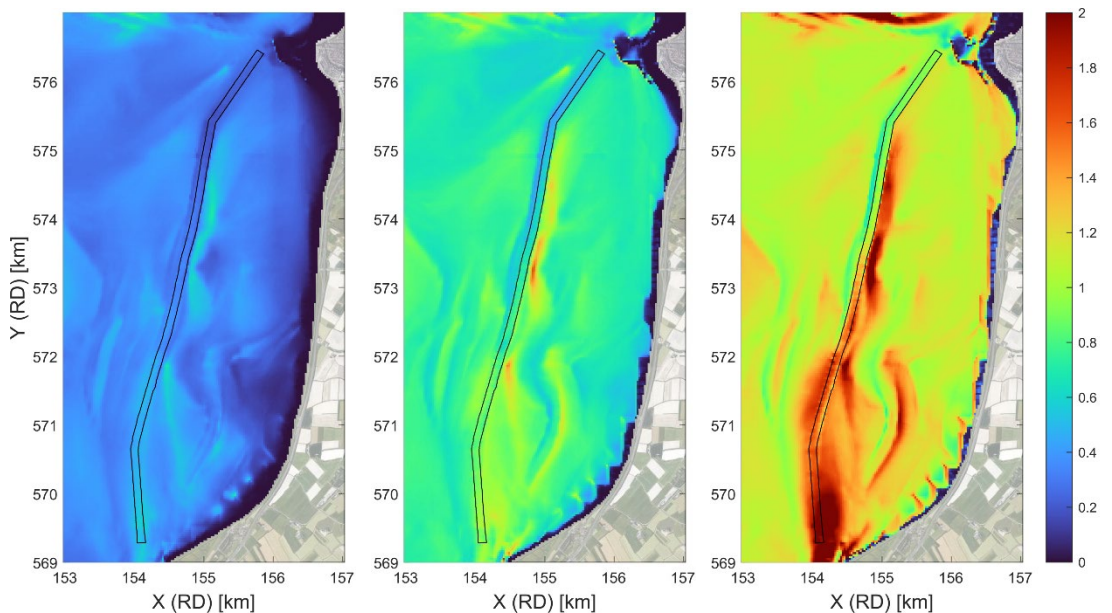
B.11). Na de lokale herkalibratie moet de bodemschuifspanning in de vaargeul groter zijn dan  $1 \text{ N/m}^2$  om het slib uit de bufferlaag te eroderen. In het zuidelijke deel van de vaargeul ligt de 80<sup>e</sup> percentielwaarde van de bodemschuifspanning rond de  $1 \text{ N/m}^2$ . In het noordelijke deel van de vaargeul is de bodemschuifspanning gewoonlijk een stuk lager en ligt de 95<sup>e</sup> percentielwaarde rond de  $1 \text{ N/m}^2$ .



Figuur B.9 Cumulatieve hoeveelheden depositie, erosie en baggeronderhoud in de vakken 1 (boven), 2 (midden) en 3 (onder) gedurende de simulatieperiode.



Figuur B.10 Cumulatieve hoeveelheden depositie, erosie en baggeronderhoud in de vakken 4 (boven) en 5 (onder) gedurende de simulatieperiode.



Figuur B.11 Karakteristieke waarden voor de optredende bodemschuifspanningen gedurende de simulatieperiode: 50- (links), 80- (midden) en 95-percentielwaarden voor de berekende totale bodemschuifspanning.

### B.2.1.3. Slibbalans

In aanvulling op de slibbalans in Figuur 2.15 staan in Tabel B.3 alle getallen opgenomen, inclusief de netto sedimentatie in de baggervakken. Merk op dat de netto sedimentatie (kolom 'Totaal') verschilt van het baggerbezwaar, omdat het totaal van deze transporten ook de sedimentatie in de flufflaag en hetgeen in de waterkolom aanwezig is, meetelt. Het baggerbezwaar betreft alleen de sedimentatie in de bufferlaag.

Tabel B.3 Slibbalans [kton/j] voor de verschillende vakken, positief betekent transport naar het balansvak.

		Noord	Oost	Zuid	West	Totaal
<b>Vak 1</b>	2003	-28	208	-31,6	-132	<b>16,8</b>
	2015	-22,4	256	-23,6	-188	<b>20,8</b>
<b>Vak 2</b>	2003	31,6	-7,2	20	-31,2	<b>12,8</b>
	2015	23,6	-45,6	36	3,2	<b>16,8</b>
<b>Vak 3</b>	2003	-20	-92	56	76	<b>17,6</b>
	2015	-36	-168	96	132	<b>23,2</b>
<b>Vak 4</b>	2003	-56	-88	96	56	<b>7,6</b>
	2015	-96	88	84	-56	<b>17,6</b>
<b>Vak 5</b>	2003	-96	-34,8	124	12,8	<b>6,4</b>
	2015	-84	-76	204	-40	<b>5,2</b>

## C Empirische relaties voor baggervolumes in 2050

In deze bijlage wordt een inschatting voor de ontwikkeling van de baggervolumes richting 2050 gemaakt aan de hand van evenwichtsrelaties. Deze aanpak is vergelijkbaar met de methode gebruikt voor de Verkenning Bereikbaarheid Ameland 2030 (Witteveen+Bos, 2022).

Een eerste empirische relatie is die tussen het lokale kombergingsvolume en de evenwichtsdoorsnede van de geul (1). 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>]

Deze relatie is algemeen geaccepteerd en al vele malen bevestigd en toegepast. De waarde voor de empirische coëfficiënten  $k$ ,  $\alpha$  en  $C$  zijn afhankelijk van lokale condities (type getij, golfklimaat, omvang van kombergingsgebied, aanwezigheid van gebouwde structuren en sedimenteigenschappen). 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):  
$$A_{ce} = 1,71 * 10^{-4} * P^{0,9} - 116$$

Een tweede empirische relatie (2) geeft de verhouding tussen het baggervolume en de afwijking van de ontwerpdoorsnede van de evenwichtsdoorsnede.

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  $7,3 \cdot 10^3$  en daarnaast werd een onzekerheidsmarge toegepast van 2 maal de root-mean-squared-error ( $2 \cdot \text{RMSE} = 1 \cdot 10^5 \text{ m}^3$ ).

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 waardes 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, 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 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.

## D Versimpelde 1D analyse

Om een beter inzicht te krijgen in de relevante processen en de gevoeligheid van de modelresultaten is 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 beperkt wordt door de optredende resuspensie. Daarnaast kan ook de sedimentaanvoer limiterend zijn.

Met  $w_s = 0.1$  mm/s en  $c_{bodemlaag} = 65$  mg/L (inschatting van de gemiddelde concentratie) 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.

Door de optredende bodemschuifspanning in het 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 tijdstippen en locaties wordt echter netto erosie gevonden. Wanneer alleen de (positieve) netto aanslibbing in beschouwing wordt genomen (onder de aanname dat dit aangeslibde 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. Dat wil zeggen dat de netto aanslibbing tussen 0 m<sup>3</sup>/jaar en 230.000 m<sup>3</sup>/jaar zou kunnen liggen, afhankelijk van hoe snel dit materiaal weer wordt gebaggerd. Deze bovengrens komt redelijk overeen met de gemiddelde baggervolumes over de afgelopen vijf jaar (225.000 m<sup>3</sup>/jaar).

Ook deze versimpelde analyse is weinig gevoelig voor de vaargeuldimensies (5% afname van baggervolumes bij een verondieping (scenario B) en 6% toename bij een verdieping (scenario C)). De relatief kleine aanpassingen in de vaargeuldimensies werken waarschijnlijk niet voldoende door in deze versimpelde analyse.

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)