Deltares

Enabling Delta Life

Analyse Vaargeul Holwerd-Ameland

Eindrapport

Deltares

Analyse Vaargeul Holwerd-Ameland

Eindrapport

P.M.J. Herman
N. Villars

H. Winterwerp
T. van Kessel
Z. Wang
C. Briere
L. van Rijn
J. Cleveringa

1230378-005

© Deltares, 2016, B

Deltares

Titel
Analyse Vaargeul Holwerd-Ameland

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
RWS	1230378-005	1230378-005-ZKS-0001	107

Trefwoorden
Waddenzee, Morfologie, zand-slib, fluid mud, vaargeulbeheer

Samenvatting
De veerverbinding Holwerd-Ameland staat al jaren in de publiciteit vanwege de regelmatig optredende vertragingen en de sterke toename van het baggerbezwaar in de vaargeul. De minister van I&M heeft medio 2015 in een kamerbrief toegezegd oplossingen te zullen zoeken. In 2015 heeft Deltares in opdracht van Rijkswaterstaat een eerste verkennende analyse hiernaar uitgevoerd. In het voorliggende rapport wordt die analyse uitgebreid met veldwaarnemingen, modelverbeteringen en het onderzoek van meerdere varianten voor vaargeulverkorting.

Door een geleidelijke afname van het kombergingsvolume van de vaargeul, en een vergroting (om nautische redenen) van de dwarsdoorsnede van de vaargeul, zijn de getijsnelheden in de geul afgenomen. Tegelijk is, mede als gevolg van lokale morfologische ontwikkelingen, de vloeddominantie in de geul toegenomen. Als resultaat is de netto sedimentafzetting in de vaargeul toegenomen. In tegenstelling tot wat eerder werd gedacht, speelt fluid mud geen belangrijke rol in de toename van het baggerbezwaar. Het gebaggerde materiaal is geconsolideerd en heeft een relatief hoge dichtheid, ondanks de korte tijd die beschikbaar is voor sedimentatie en consolidatie. Gemiddeld wordt een plaats in de vaargeul om de 9 dagen gebaggerd, waarbij ongeveer een halve meter sediment wordt weggenomen.

Een deel (2/3) van het gebaggerde materiaal wordt dichtbij de baggerlocatie op eb geloosd. Er zijn aanwijzingen dat deze strategie de aanslibbing van de vaargeul versterkt. Het 1/3 deel van het materiaal dat verderop (in de Zuiderspruit) wordt geloosd bij vloed, is wellicht betrokken in een langere cyclus. De waarnemingen aan slibeigenschappen, baggerpraktijk en slibconcentraties en –transporten in het veld, leiden tot een consistent beeld over de slibdynamiek. Ongeveer 60 % van het slib dat bij vloed in de geul wordt gebracht, blijft in de geul achter en kan consolideren binnen een getijperiode. De bagger- en stortstrategie oefenen een duidelijke invloed uit op de beschikbaarheid van sediment en op de sedimentatiesnelheden in de vaargeul.

Het hydrodynamisch model dat is gebruikt in de studie van 2015, is verbeterd door een recentere bodemligging te gebruiken en door een betere definitie van de randvoorwaarden. Validatie met veldwaarnemingen aan stroomsnelheid en waterstand tonen een uitstekende prestatie van het model. Het model berekent hydrodynamica, maar niet de transporten van zand en slib. Het is gebruikt om de hydrodynamica bij vijf varianten voor vaargeulverkorting door te rekenen. De varianten zijn geëvalueerd op de volgende criteria: verkorting vaartijd, inspanning voor aanleg, effect op onderhoudsbaggerwerk, effect op morfologische ontwikkeling, ecologische effecten. Uit de evaluatie is gebleken dat de meest kansrijke variant een ingreep is in de eb- vloedschaar, waarbij de vaargeul wordt verlegd van de eb- naar de vloedgeul. In deze variant kan baggerspecie worden aangewend voor het opvullen van de huidige vaargeul, waardoor dit sediment trager opnieuw beschikbaar komt en het baggerbezwaar op de korte termijn (enkele jaren) kan afnemen. De variant met een spoelmeer bij Holwerd werd als ongunstig beoordeeld, vooral omdat het spoelmeer geen merkbare invloed heeft op de ebstromen in de vaargeul.

Deltares

Titel
Analyse Vaargeul Holwerd-Ameland

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
RWS	1230378-005	1230378-005-ZKS-0001	107

Geen enkele van de onderzochte varianten kan op de langere termijn (5-10 jaar) een duurzame oplossing voor de baggerproblematiek leveren. In de varianten worden de hydrodynamische en morfologische omstandigheden niet dusdanig veranderd dat de oorzaken voor de hoge sedimentatie in de vaargeul worden weggenomen. Naast het nader onderzoek naar de effecten op korte termijn, blijft het exploreren van duurzame oplossingen voor de lange termijn geboden. Dit kan bestaan uit verbeteringen van de huidige varianten, of oplossingen van een andere aard.

Referenties
KPP project BO09 Analyse Vaargeul Holwerd-Ameland

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	aug. 2016	P.M.J. Herman		A. Bruens		F.M.J. Hoozemans	
		N. Villars					
		H. Winterwerp					
		T. van Kessel					
		Z. Wang					
		C. Briere					
		L. van Rijn					
		J. Cleveringa					
2	Sept 2016	idem		A. Bruens		F.M.J. Hoozemans	
3	Oct 2016	P.M.J. Herman		A. Bruens		F.M.J. Hoozemans	
		N. Villars					
4	Nov 2016	P.M.J. Herman		A. Bruens		F.M.J. Hoozemans	
		N. Villars					
5	Nov 2016	P.M.J. Herman		A. Bruens		F.M.J. Hoozemans	
		N. Villars					

Status
definitief

Inhoud

1 Inleiding **1**
1.1 Aanleiding en achtergrond 2
1.2 Resultaten van eerste verkennende analyse (2015) 3
1.3 Technisch-inhoudelijke doelstelling van de studie in 2016 5
1.4 Onderzoeksaanpak 5
1.5 Leeswijzer 6

2 Beschrijving en analyse van de baggerproblematiek **7**
2.1 Bevindingen uit de studie in 2015 7
2.2 Nieuwe analyses in 2016 10
2.3 Observaties over het baggerwerk 10
2.4 Mobilisatie van slib door baggeractiviteiten 10
2.5 Geul-plaat interacties. 13
2.6 Baggeren en dwarsprofiel van de geul 14
2.7 Invloed van de veerboot op het slib op de bodem. 15
2.8 Conclusies m.b.t. het baggerbezwaar 15

3 Morfologische factoren die hebben bijgedragen aan het baggerbezwaar **17**
3.1 Bevindingen uit de studie in 2015 17
3.2 Uitbochting van de vaargeul en veranderingen in de eb-vloedschaar bij Holwerd 18
3.3 Waterbeweging in het oostelijke deel van de vaargeul 23
3.4 Conclusies m.b.t. morfologische factoren 27

4 De slibdynamiek **29**
4.1 Bevindingen uit de studie in 2015 29
4.2 Nieuwe analyses in 2016 29
4.3 Samenstelling van de bodem in de vaargeul 30
4.4 Slibconcentraties in de vaargeul. 32
4.5 Voorkomen van fluid mud 33
4.6 Aanslibbingssnelheden: een kwantitatieve verkenning 35
4.7 Samenvatting: slibprocessen in de vaargeul 36
4.8 Conclusies van de empirische studies in Hoofdstukken 2-4: de oorsprong van het baggerbezwaar 37

5 Modelkalibratie en vaststellen criteria voor berekeningen **39**
5.1 Inleiding 39
5.2 Veldwaarnemingen aan bodemligging, stroomsnelheid en waterstand in 2016 39
5.3 Aanpassingen in het model 39
5.4 Modelkalibratie: Resultaten 40
5.5 Selectie van modeluitvoer voor evaluatie van varianten 40

6 Beschrijving van de varianten **43**
6.1 Inleiding 43
6.2 Variant REF 44
6.3 Variant VLOEDGEUL 49
6.4 Variant LANG 53
6.5 Variant LANGSPOEL 57

6.6 Variant DIEPBREED 61
6.7 Vergelijking van getijvolumes tussen zuidoostelijke varianten 64
6.8 Vergelijking van piekstroomsnelheden tussen zuidoostelijke varianten 69
6.9 Variant(en) REEGEUL-OOST 72

7 Vergelijking en evaluatie van varianten 83
7.1 Inleiding 83
7.2 Vaarlengte en vaartijd 83
7.3 Baggerbezwaar 84
7.4 Baggerwerken voor aanleg 86
7.5 Morfologische gevolgen 87
7.6 Ecologische gevolgen 89
7.6.1 Milieueffecten 89
7.6.2 Effecten op ecosysteemfunctioneren 89
7.6.3 Effecten op structurele natuurwaarden 90
7.7 Samenvatting en bespreking van de evaluatie van de varianten 93

8 Conclusies en aanbevelingen 97
8.1 Inleiding 97
8.2 Welke processen verklaren het baggerbezwaar? 97
8.2.1 Natuurlijke morfologische ontwikkelingen 97
8.2.2 De aanvoer van slib 98
8.2.3 De baggercycli: kort en lang 99
8.3 Evaluatie van de varianten voor bochtafsnijding 100
8.4 Conclusies over duurzame oplossingen 101
8.5 Aanbevelingen voor verdere studie 102
8.5.1 Nadere analyse van de statistiek van de vaartijden 102
8.5.2 Analyse van de schip-geul interactie 102
8.5.3 Nadere analyse van ecologische effecten van de baggerpraktijk en bochtafsnijdingen 103
8.5.4 Optimaliseren van de varianten / onderzoek van alternatieve varianten 103
8.5.5 Zand-slib modellering 103
8.5.6 Pilots met gewijzigde bagger- en stortstrategie 103
8.5.7 Morfodynamische modellering 104
8.5.8 Beter begrip van de systeemdynamiek 104

9 Referenties 105

Bijlage(n)

A Verklaring huidige situatie op basis van tekeningen A-1
A.1 Natuurlijk gedrag van een geul – effect geuldoorsnede en stroming A-1
A.2 Grootschalige morfologische ontwikkelingen in de Waddenzee A-2
A.3 Het baggeren van de vaargeul A-4

B Berekening van slibtransport en consolidatie in de geul B-1

C Besprekingen met Wagenborg (WPD) en ex-kapiteins C-1
C.1 Bespreekverslag met ex-kapiteins C-1

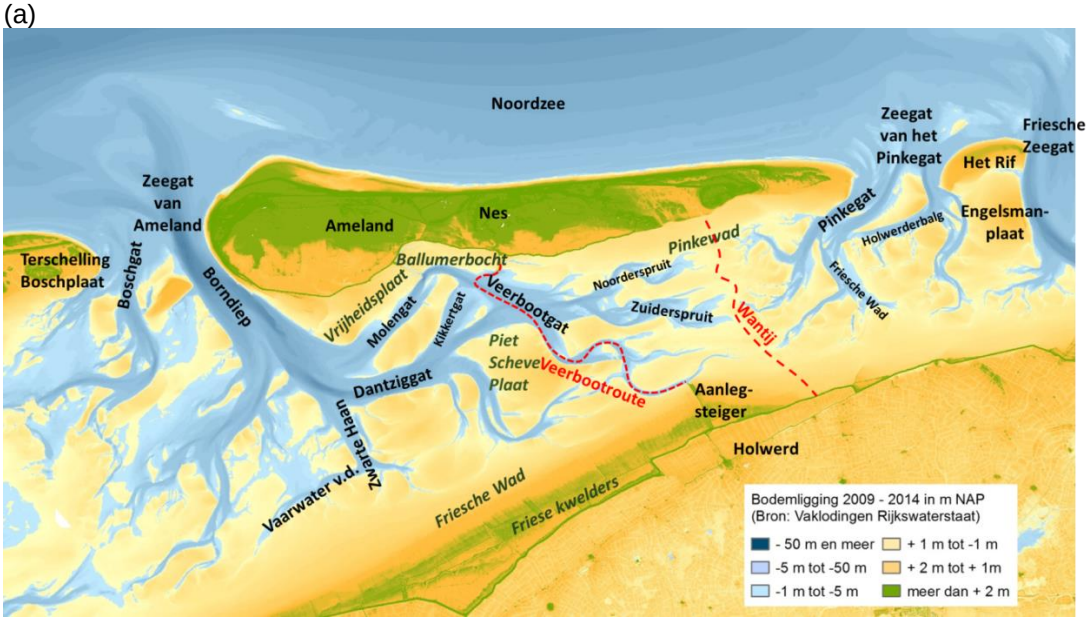
C.2 Bespreekverslag met Wagenborg (WPD) C-3

D Aanbevelingen voor verdere studie D-1

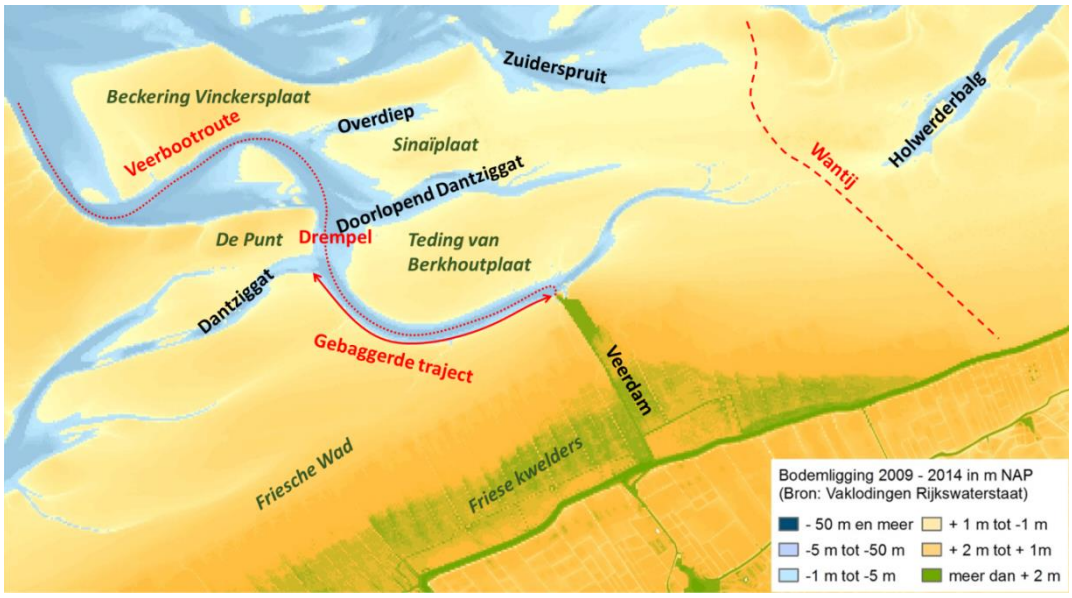
1 Inleiding

Deze studie behandelt de problematiek van de veerverbinding Holwerd-Ameland in de Nederlandse Waddenzee. Figuur 1.1 geeft een kaartoverzicht van het gebied, met aanduiding van de toponiemen die in deze studie worden gebruikt. In dit hoofdstuk bespreken we kort de achtergrond van de problematiek en de aanleiding tot deze studie, vatten we de resultaten van eerdere analyses samen, en specifiëren we de doelstellingen, onderzoeksaanpak en hypothesen van deze studie.

(a)



(b)



Figuur 1.1 Kaart van (a) de Waddenzee in de omgeving van Ameland en (b) de omgeving van de vaargeul bij Holwerd.Toponiemen volgen de zeekaart van de Dienst der Hydrografie.

1.1 Aanleiding en achtergrond

De veerverbinding Holwerd-Ameland komt al jaren in de publiciteit vanwege de regelmatig optredende vertragingen en de sterke toename van het baggerbezwaar in de vaargeul. In 2015 is in de tweede kamer een motie aangenomen waarin wordt gevraagd op korte termijn te komen tot oplossingen die haalbaar en realistisch zijn om de regelmatig optredende vertraging op de veerverbinding Holwerd – Ameland te beperken (zie kamerstukken 2014-2015, 31409, nr. 84). Daarbij is de minister van I&M verzocht om het verkorten (doorsteken) van de vaargeul naar Ameland te onderzoeken en de financiële gevolgen daarvan (structureel en incidenteel) in kaart te brengen. Deze opdracht is bij Rijkswaterstaat neergelegd, dat als uitvoeringsorganisatie van I&M de vaarweg Holwerd-Ameland beheert.

Rijkswaterstaat ziet een enkele of dubbele bochtafsnijding (ook wel doorsteek, geulafsnijding genoemd) van de vaargeul als een mogelijke (eerste) stap om op redelijk korte termijn een vermindering van de vertragingen te bewerkstelligen. Met een (enkele of dubbele) bochtafsnijding wordt de vaartijd verkort.

Mogelijke ingrepen in het gebied kunnen niet los gezien worden van de baggeractiviteit die nodig is om de vaargeul, in de huidige situatie, te onderhouden. Vertragingen zijn mede te wijten aan het feit dat het schip langzaam moet varen in bochtige en ondiepe delen van de vaargeul. Daarnaast brengt het baggeren aanzienlijk bezwaar met zich mee. De laatste jaren is dat baggerbezwaar in de vaargeul Holwerd-Ameland steeds verder toegenomen. Dit leidt tot hoge kosten en tot mogelijke ecologische schade in de Waddenzee. Gezien de doelstellingen van de PKB-Waddenzee, en de bescherming van het gebied door Natura2000, is het gewenst dat bochtafsnijding (of een andere alternatieve ingreep) niet leidt tot hoger baggerbezwaar, maar juist tot een reductie ervan.

De afgelopen jaren is er, in het kader van de problematiek van de vaargeul maar ook breder in het kader van regionale ontwikkeling, veel aandacht ontstaan voor het maken van een Spoelmeer bij Holwerd. Een spoelmeer heeft tot doel om de vaargeul open te houden, en wordt gezien als een middel om (toeristische) activiteit in de omgeving van Holwerd te ontwikkelen. Vanuit het project Holwerd aan Zee is gevraagd om de mogelijke rol van een spoelmeer in het beheer van de vaarweg nader te onderzoeken.

De vraag van Rijkswaterstaat aan Deltares is hoe het vaarwegonderhoud, in relatie tot een betrouwbaardere dienstregeling, tussen Holwerd en Ameland duurzamer kunnen worden verzorgd. Onderzocht dient te worden of bochtafsnijding op de korte termijn een bijdrage kan leveren aan een verkorting van de vaartijd en tegelijk aan een verbeterd onderhoudsregime van de vaargeul (vermindering van het baggerbezwaar). Daarbij is het handhaven van de huidige vaargeul de referentie, waarbij rekening wordt gehouden met de verdere autonome ontwikkeling. De vaargeul kan bijvoorbeeld verder uitbochten, en sedimentatie in de vaargeul zou verder kunnen toenemen.
Rijkswaterstaat heeft aan Deltares gevraagd om een onderzoek uit te voeren naar de effecten van bochtafsnijding op morfologie, baggerbezwaar en ecologie. De opgedane kennis en inzichten dienen inzicht te geven in de haalbaarheid van bochtafsnijding, en een basis te vormen voor het “Open Planproces”, waarin de betrokken partijen (Rijkswaterstaat, Rederij Wagenborg, Gemeente Ameland) de opgave hebben om een gezamenlijke verkenning uit te voeren naar alternatieven voor een goede verbinding tussen Holwerd en AmelandBij het verkennen van mogelijke oplossingen dienen zowel de morfologische als de ecologische effecten te worden beschouwd en moet helder worden of de ingreep haalbaar is binnen de vigerende Structuurvisie (PKB) Waddenzee.

1.2 Resultaten van eerste verkennende analyse (2015)

In het najaar van 2015 heeft Deltares, in opdracht van Rijkswaterstaat, een eerste verkennend onderzoek uitgevoerd naar de problematiek (Villars et al., 2016). Dit onderzoek bestond uit een literatuurstudie, een eerste compilatie van gegevens die de aard en ernst van het baggerbezwaar documenteren, en een modelstudie waarin een aantal verschillende situaties zijn doorgerekend op hun effect op getijvolume, getijasymmetrie, en stroomsnelheden. Door bodemliggingen van 1993, 1999 en 2011 in het model in te brengen is onderzocht welke invloed de autonome morfologische evolutie van het gebied heeft gehad op de lokale stroomsnelheden en het baggerbezwaarin de geul. Daarnaast is een eerste verkennende doorrekening gemaakt van een aantal varianten voor bochtafsnijding. Ten slotte zijn verkennende berekeningen gedaan om te onderzoeken of (en waar in de vaargeul) vorming van 'fluid mud' waarschijnlijk is.

De literatuurstudie heeft aangetoond dat het baggervolume in de vaargeul Holwerd-Ameland sterk toegenomen is in de afgelopen jaren, van vrijwel niets vóór 1998, tot 1,6 miljoen m^3/jaar in 2012-2015. De oorzaken kunnen in drie categorieën worden verdeeld:

(1) morfologische ontwikkelingen,
(2) slibdynamiek en het ontstaan van fluid mud (een hooggeconcentreerde maar vloeibare sliblaag aan de bodem),
(3) nautische factoren (veranderingen van meetmethode voor dieptebepalingen, veranderde eisen aan de diepte en breedte van de vaargeul en veranderingen in de baggerpraktijk).

De analyse van de morfologische ontwikkelingen toonde aan dat de verkleining van het kombergingsvolume in het gebied, als gevolg van het verhogen van platen en kwelders, de belangrijkste factor is die aan de oorsprong van de problemen met de vaargeul ligt. Het getijprisma in de geul neemt hierdoor af, en fysische processen leiden dan tot verondieping en vernauwing van de geul – deze tendens moet vervolgens door baggeren worden gekeerd. Daarnaast spelen lokale morfologische ontwikkelingen een rol, met name het lokaal sterk verhogen van sommige platen rond de vaargeul en de daaruit volgende degeneratie van de vloed-eb circulatie in het oostelijk deel van de vaargeul. Beide oorzaken (verkleining komberging, verandering eb-vloed circulatie) hebben ertoe geleid dat het zuidelijke deel van de vaargeul minder ebdominant (c.q. meer vloeddominant) is geworden. Deze veranderingen hebben geleid tot een van nature kleinere geul en een grotere aanvoer van vooral slib.

Analyse van de slibdynamiek suggereerde dat de combinatie van autonome morfologische ontwikkelingen (verkleining komberging en meer ebdominant worden van de stroming), in combinatie met verbreden en verdiepen van de geul, leidt tot lage stroomsnelheden in de geul, die kunnen leiden tot de vorming van fluid mud. Verder is duidelijk dat de verandering van baggerstrategie potentieel belangrijk is. Fijn sediment dat in de geul sedimenteert, wordt verwijderd met behulp van ploegen, agitatiebaggeren en hopperen, en tijdens eb "op stroom gezet". Het gebaggerde slib blijft in de buurt van de baggerlocatie, omdat stroomsnelheden klein zijn (lage transportcapaciteit van de stroming). Het verplaatste slib heeft bovendien een lage dichtheid, en is dus makkelijk te remobiliseren.

De berekeningen van stroomsnelheden en getijvolumes bij vloed en eb door enkele karakteristieke raaien dwars op de geul, die zijn uitgevoerd voor bodemliggingen van 1993, 1999 en 2011, bevestigen de analyse op basis van de literatuur. De komberging is over de jaren effectief afgenomen, en zowel in getijvolumes als in stroomsnelheden wordt een vermindering en een evolutie naar meer vloeddominantie gevonden. Hoewel het model nog niet is gekalibreerd aan veldmetingen, zijn de relatieve verschuivingen over de jaren een robuust resultaat.

Berekeningen met een kolommodel voor slibdynamiek suggereren dat de stroomsnelheden in de geul in de range liggen waarin een omslag naar een systeem met fluid mud waarschijnlijk is. Deze conclusie is echter sterk afhankelijk van de absolute waarde van de geschatte stroomsnelheden, en is daardoor minder robuust dan de relatieve vergelijking van getijvolumes en stroomsnelheden.

In de verkenning van alternatieven voor de oplossing van het probleem, zijn vijf varianten beschouwd. Geen enkele van deze varianten heeft geleid tot een significante toename van stroomsnelheden in de geul, of een omslag in getijasymmetrie van vloed- naar ebdominantie. Bij een aantal varianten waren details in de opzet duidelijk voor verbetering vatbaar.

De overall conclusie van de 2015 studie was het vermoeden dat de combinatie van autonome ontwikkeling, verruimen van de vaargeul en de bagger/stortstrategie gezamenlijk heeft bijgedragen aan de vorming van fluid mud in de vaargeul en het hoge baggerbezwaar. De onderzochte varianten konden deze trend niet keren, maar onderzoek naar geoptimaliseerde varianten werd aanbevolen.
Op basis van de verkenningen in 2015 zijn een aantal aanbevelingen geformuleerd, die de basis vormden voor de definitie van de studie in 2016. De belangrijkste aanbevelingen waren:

- Om de betrouwbaarheid van het model te verhogen is een geactualiseerde bodemligging van het gebied rond de vaargeul nodig.
- Om de modelberekeningen te kunnen gebruiken voor het evalueren van alternatieven, moet het model gekalibreerd worden aan waarnemingen over waterstanden en stroomsnelheden.
- Om de berekeningen over de waarschijnlijkheid van vorming van fluid mud te valideren, zijn waarnemingen nodig aan:
    - Het historische voorkomen van fluid mud in de vaargeul, af te leiden uit dual frequency echolodingen; het uitvoeren van een meetcampagne met dual frequency echolood voor de huidige situatie.
    - Metingen van de eigenschappen van gesuspendeerd materiaal, en materiaal uit de bodem van de vaargeul (korrelgrootteverdeling, valsnelheid, gelling concentratie, plastische limieten, sterkte).
    - Metingen van de stroomsnelheidsprofielen in de geul.
    - Metingen van verticale profielen van concentratie gesuspendeerd materiaal, gedurende een volledige getijcyclus op meerdere punten in de vaargeul.
- Om de toename van het baggerbezwaar in recente jaren beter te begrijpen, zijn observaties nodig van de huidige baggerpraktijk (locaties en hoeveelheden van baggeren en storten, bijkomende activiteiten als ploegen en waterinjectiebaggeren), en bepalingen van de korrelgrootteverdeling, droge en natte dichtheid van de baggerspecie. Daarnaast is een verbeterd inzicht in de historische gegevens over baggerhoeveelheden en kwaliteit van het gebaggerde materiaal nodig.
- Om de voorlopige conclusie uit de verkenning van varianten in 2015 te bevestigen, zijn modelberekeningen nodig met het stromingsmodel waarin geoptimaliseerde varianten worden doorgerekend.
- Om de mogelijke rol van een spoelmeer te evalueren, zijn berekeningen nodig met het stromingsmodel, waaraan de essentie van het vullen en leeglopen van het spoelmeer zijn toegevoegd. Het gemakkelijkst kan dit door het spoelmeer als een aparte entiteit te modelleren, en de output van dit model als randvoorwaarde aan het stromingsmodel op te leggen.

1.3 Technisch-inhoudelijke doelstelling van de studie in 2016

De hoofdvraag die aan de basis ligt van het hier gerapporteerde onderzoek is hoe het vaarwegbeheer en het vervoer naar Ameland duurzamer kunnen worden verzorgd. Daarbij diende onderzocht te worden of bochtafsnijding op de korte termijn een bijdrage kan leveren aan een verkorting van de vaartijd en tegelijk aan een verbeterd onderhoudsregime van de vaargeul (vermindering van het baggerbezwaar).

Deze hoofdvraag valt uiteen in twee delen:

1. Een beter inzicht verkrijgen in de belangrijkste dynamische processen in het systeem op het gebied van hydrodynamiek, morfologie en slibdynamiek, om vast te stellen welke processen het hoge baggerbezwaar verklaren. Tevens wordt de huidige baggerpraktijk in dat kader geëvalueerd.
2. De hydrodynamische gevolgen van verschillende varianten van bochtafsnijding in beeld brengen, en op basis daarvan in schatten wat de gevolgen zullen zijn m.b.t. vaartijd, baggerbezwaar, investeringen en ecologische gevolgen. Daarmee wordt bijgedragen aan de evaluatie van de haalbaarheid van die alternatieven, en van de duurzaamheid ervan op langere termijn.

Het technisch-inhoudelijke werk dat is uitgevoerd in 2016 had als doelstelling om:

1. de inzichten op basis van literatuur en verkennende modellering in de studie van 2015 te toetsen aan gerichte veldwaarnemingen, uitgevoerd in het eerste kwartaal van 2016;
2. het model te kalibreren aan deze veldwaarnemingen, zodat uitspraken over absolute stroomsnelheden te maken zijn;
3. verbeterde varianten van de bochtafsnijdingen, op basis van de ervaringen in de eerdere verkenningen, te evalueren aan de hand van modelsimulaties en expert judgement;
4. extra varianten door te rekenen en te evalueren, waaronder een variant met spoelmeer bij Holwerd en een variant met een verbrede en verdiepte vaargeul.

1.4 Onderzoeksaanpak

De onderzoeksaanpak is gebaseerd op de aanbevelingen op basis van de studie in 2015, zoals hoger samengevat. De werkzaamheden die daarvoor zijn verricht omvatten volgende punten, waarover deels in in technische achtergrondrapporten in detail wordt gerapporteerd:

- Veldbezoeken aan Holwerd en omgeving, om de optimale inzet van veldmetingen vast te stellen (zie van Kessel., 2016).
- Bezoek aan een baggerschip tijdens de baggeractiviteiten, en samenvatting van de observaties en waarnemingen aan de baggerspecie (zie van Rijn et al., 2016).
- Een veldwaarnemingscampagne, uitgevoerd door Aquavision, waarin gedurende 13 uur continu stroomsnelheidsprofielen zijn gemeten met een ADCP die op het schip was gemonteerd, continu diepte is opgenomen met dual frequency echolood, en profielen met CTD en instrumenten voor bepaling van gesuspendeerd materiaal zijn uitgevoerd. Het schip is continu heen en weer gevaren in het gebaggerde traject van de vaargeul, en heeft op drie plaatsen om het uur een dwarsprofiel gemeten met ADCP, en een CTD-SPM profiel bepaald. Vanaf het schip zijn bovendien monsters genomen van de bodem en het gesuspendeerde materiaal (zie van Kessel, 2016).
- Laboratoriumanalyses waarin de eigenschappen van het bodemmateriaal en het gesuspendeerde materiaal zijn bepaald (zie de Lucas et al., 2016).

- Meetcampagne van Rijkswaterstaat om een nieuwe bodemligging in te meten, die vervolgens in het model is ingebracht (verwerkt in de modelberekeningen in dit rapport).
- Doorrekenen van het spoelmeer, zodat geoptimaliseerde randvoorwaarden aan het stromingsmodel kunnen worden aangeboden (zie Cleveringa et al., 2016).
- Kalibratie van het stromingsmodel aan veldwaarnemingen (gerapporteerd in dit rapport).
- Doorrekenen met het stromingsmodel van de referentiesituatie voor 2016, en vijf varianten voor verandering van de vaargeul (gerapporteerd in dit rapport).
- Evaluatie op basis van expert judgement van de verschillende varianten voor optimaliseren van de vaargeul (gerapporteerd in dit rapport).

1.5 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 vat de observaties over de baggerproblematiek in de huidige vaargeul samen, op basis van de veldwaarnemingen en –bezoeken. Voor details wordt verwezen naar de aparte deelrapporten;Hoofdstuk 2 presenteert conclusies en interpretaties van deze rijke dataset. Hoofdstuk 3 analyseert in meer detail de morfologische factoren die hebben bijgedragen aan het baggerbezwaar, en Hoofdstuk 4 doet hetzelfde voor de slibdynamiek. In Hoofdstuk 5 wordt de kalibratie van het model gepresenteerd, en wordt ingegaan op de selectie en definitie van kansrijke alternatieven voor de vaargeul, die verderop in het document in detail worden besproken. Hoofdstuk 6 bespreekt op een feitelijke basis de verschillende varianten, waarna in Hoofdstuk 7 een vergelijking wordt gemaakt aan de hand van een aantal criteria. Conclusies en Aanbevelingen worden in Hoofdstuk 8 gepresenteerd.

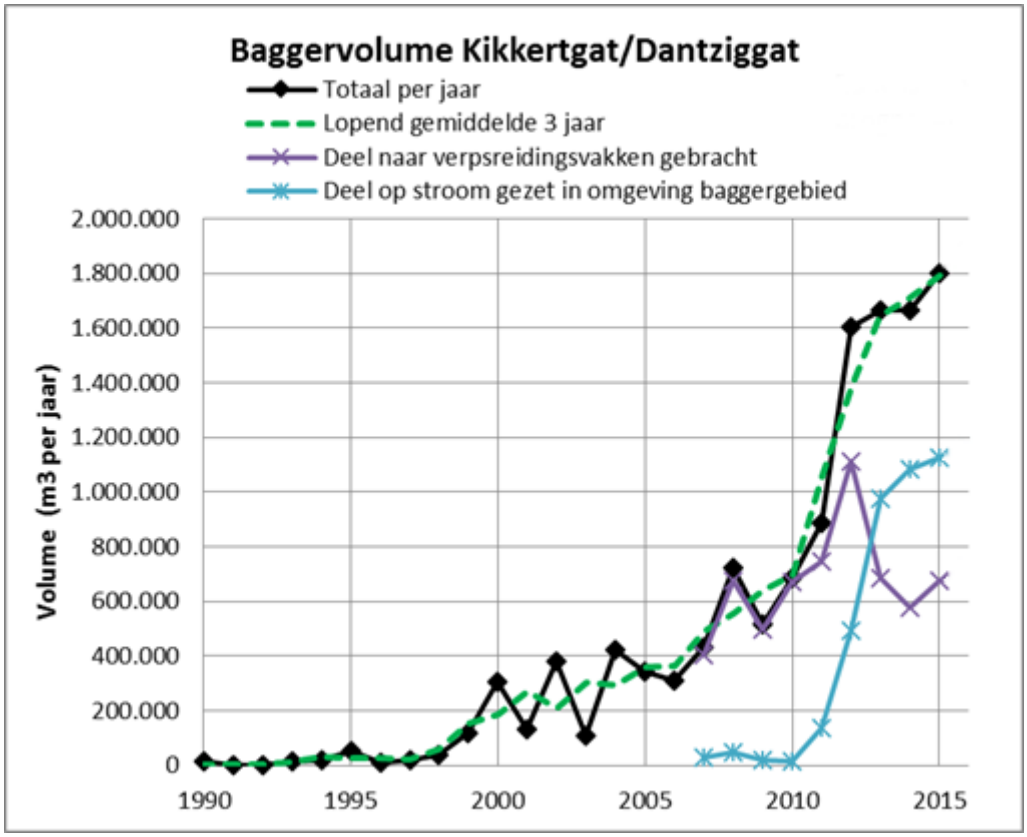
2 Beschrijving en analyse van de baggerproblematiek

In dit hoofdstuk bespreken wij de beschikbare gegevens over baggerhoeveelheden, de gangbare praktijk van het baggeren, en de processen die leiden tot het mobiliseren van slib (baggeren, storten, effect van de veerboot op slib in de vaargeul), en tot de hersedimentatie van het slib in de geul. Uit de beschikbare gegevens leiden wij af over welk materiaal het gaat, wat de typerende snelheden van sedimentatie zijn, hoe het baggeren hiermee interfereert, en over welke hoeveelheden mobiel slib het gaat.

2.1 Bevindingen uit de studie in 2015

In het rapport over de onderzoeken in 2015 (Villars et al., 2016) wordt een volledig overzicht gegeven van de historische ontwikkeling van het baggerbezwaar in de vaargeul Holwerd-Ameland. Het grootste deel van het baggerwerk wordt uitgevoerd in het oostelijk deel van de vaargeul, tussen de drempel en de pier van Holwerd (Figuur 2.2). Het betreft bijna uitsluitend slibrijk materiaal. In 2016 is dit algemene beeld verder verfijnd aan de hand van veldobservaties en interviews met de baggeraar. Hieronder wordt de bestaande kennis op hoofdlijnen samengevat, en aangevuld met de belangrijkste nieuwe waarnemingen.

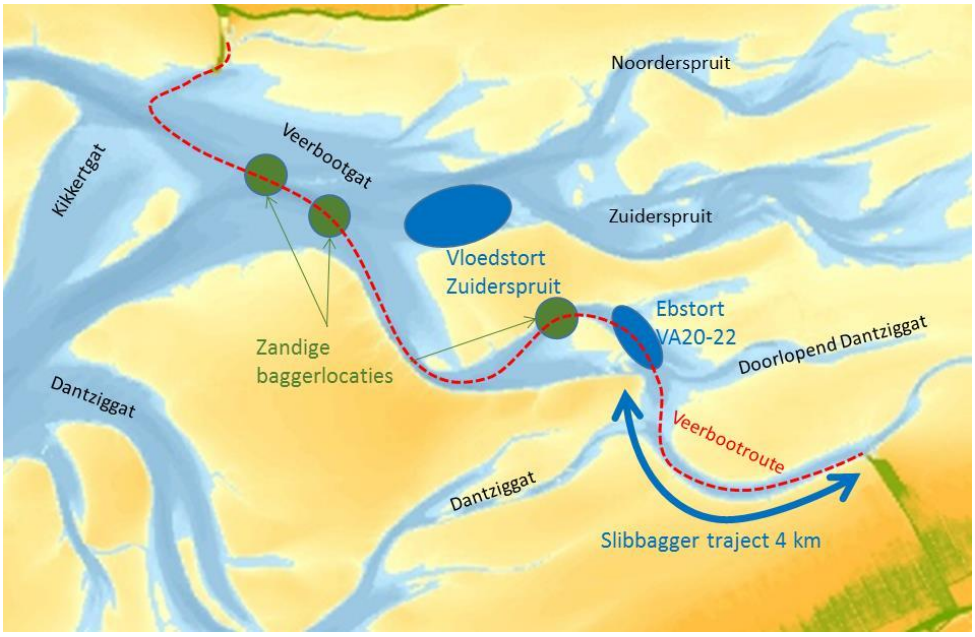
Hoewel al geruime tijd middels ploegen de geul op orde werd gehouden is het echte baggerwerk tegen het eind van de vorige eeuw begonnen, en de gebaggerde volumes hebben sindsdien een zeer sterke toename gekend (Figuur 2.1**)**. Er is vanaf 1997 een eerste periode van toename geweest, met een afvlakking tussen 2001-2003, waarna een tweede periode van toename is gevolgd die opnieuw na een aantal jaren is afgevlakt. De laatste jaren blijft het volume langzaam stijgen, met een volume van 1,8 miljoen m^3/jaar in 2015 en een geschatte lichte verhoging tot 1,9 miljoen m^3 in 2016..



Figuur 2.1 De ontwikkeling van het baggervolume in het baggergebied; stortvolumes zijn ook gegeven.

In de meest oostelijke 3-4 km van de vaargeul (het deel bij Holwerd) wordt hoofdzakelijk slib gebaggerd. Dit traject is in Figuur 2.2 aangegeven, tezamen met de huidige verspreidingslocaties. Deze bestaan uit:

1. De ebgeul, aangeduid met “Ebstort VA20-22”, waar slib al varend uit de sleephopperzuiger gepompt wordt tijdens eb,
2. Een locatie, aangeduid met “Vloedstort Zuiderspruit”, waar slib geklapt wordt, d.w.z. via loskleppen onder in de boot gedumpt wordt.



Figuur 2.2 Bagger- en stortlocaties in de omgeving van Holwerd.

Ten slotte wordt op drie drempels in de vaarroute, aangeduid met “Zandige baggerlocaties” met enige regelmaat zand gebaggerd om het hele vaartraject op diepte te houden.

In de loop van de tijd zijn een aantal belangrijke ingrepen in het baggerbeheer gebeurd. Ook is de contractstructuur en de wijze van controle veranderd. Een volledig overzicht van deze veranderingen is gegeven in de Deelstudie 5 (van Rijn et al., 2016). Voor de discussie over alternatieven zijn de meest essentiële wijzigingen in het baggerbeheer samengebracht in Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Overzicht belangrijkste menselijke ingrepen in beheer en onderhoud van de vaargeul.

1995	ingebruikstelling nieuwe veerboot Sier met waterjets
2003	ingebruikstelling nieuwe veerboot Oerd met waterjets
2006	Vergunning: VA1-VA25 minimale breedte 40 m (max 50), minimale diepte NAP-3,5 (tot max NAP-4,0)
2010	In contract opgenomen (maar niet meteen geïmlementeerd) minimale geulbreedte van 40 naar 50 m minimale geuldiepte van -3,5 naar -3,8 m NAP
2011	begin “storten op eb” o.a. in plaats van waterinjectiebaggeren
2012	Geul op breedte en diepte brengen (en houden) effectief geïmplementeerd
2014	substantiële toename “storten op eb”

De literatuur- en modelstudie uitgevoerd in 2015 naar de oorzaken van de toename in baggerbezwaar concludeerde dat er drie types factoren een rol spelen: morfologische ontwikkelingen, veranderingen in nautische omstandigheden (eisen gesteld aan de vaargeul, type schepen), en dynamiek van slib in het gebied. Deze factoren zijn samengevat in paragraaf 1.2, en de nieuwe bevindingen erover worden verder in detail behandeld.

2.2 Nieuwe analyses in 2016

In 2016 zijn nadere analyses uitgevoerd van de huidige baggerpraktijk, door:

- bestudering van historische data over het baggeren;
- bezoek aan het huidige baggerschip,
- bemonstering van de beun van het baggerschip,
- analyse van het sediment in de geul,
- bestudering van historische lodingsgegevens m.b.t. het profiel van de geulen

2.3 Observaties over het baggerwerk

Er wordt momenteel meestal met één sleephopperzuigeronderhoudsbaggerwerk uitgevoerd. Dit schip heeft een beuncapaciteit van 730 m^3, werkt zeven dagen per week, per dag 12 uur, met negen baggercycli per dag. Soms is in de winter een tweede schip nodig. Het schip baggert per baggercyclus 1,2 m brede en 0,5 m diepe gleuven langs de geul, en met een kleine ploegboot (2 m brede ploeg) worden die gleuven en richels geëgaliseerd. Er wordt vrijwel alleen langs de rand van de geul gebaggerd; het midden van de vaarweg blijft op diepte zonder ingrepen. Dit laatste is waarschijnlijk mogelijk door de grote snelheden geïnduceerd door de waterjet van de veerboot (zie verder). Gemiddeld komt de sleephopperzuiger elke 9 dagen op dezelfde locatie terug. Er is weinig seizoenale variatie in sedimentatiesnelheid en dus in baggerwerk. Wel is in de winter (stormseizoen) de terugkomtijd soms korter dan in de zomer, en moet soms een tweede schip worden ingezet.

Het gebaggerde sediment in de geul bestaat uit slib met een zandgehalte van 20 – 30% bij een bulk dichtheid van ca 1500 – 1600 kg m^{-3}. Tijdens het baggeren wordt het slib enigszins verdund tot een bulk dichtheid van ca 1300 kg m^{-3}. Tijdens eb wordt het gebaggerde slib geloosd in de ebgeul ten noorden van het te baggeren vaargeultraject (Figuur 2.2), tijdens vloed op de stortlocatie Zuider Spruit (Figuur 2.2). Het lozen gebeurt al varend door de 1300 kg m^{-3} slurry in ca 12 minuten over boord te pompen – het schip legt dan ongeveer 2 – 2,5 km af, dus de gehele ebgeul. Van alle gebaggerd slib wordt ongeveer 2/3 tijdens eb in de ebgeul geloosd, en de rest tijdens vloed in de Zuiderspruit. Deze bagger/stortstrategie (met een belangrijk aandeel “storten op eb”) wordt sinds 2011 toegepast. Daarvoor werd in de vaargeul ook waterinjectiebaggeren (WID) toegepast. Het is onduidelijk of de volumina slib die op deze wijze werden verplaatst zijn opgenomen in de statistiek van de baggercijfers in Figuur 2.1. Daardoor is er enige onzekerheid of de sterke toename in baggerbezwaar (exponentieel verloop tussen 2000 en 2012) een correcte weergave is van de hoeveelheid slib die zich netto in de vaargeul afzette. Ter plaatse van de aanlegsteiger van Holwerd wordt de vaargeul nog steeds met water-injectiebaggeren op diepte gehouden – dit is de plaats waar momenteel nog fluid mud wordt gevonden met diktes van een paar tientallen cm. Volgens onze schattingen wordt hier 50,000 m^3/jaar gemobiliseerd, c.q. verwijderd (van Rijn et al., 2016).

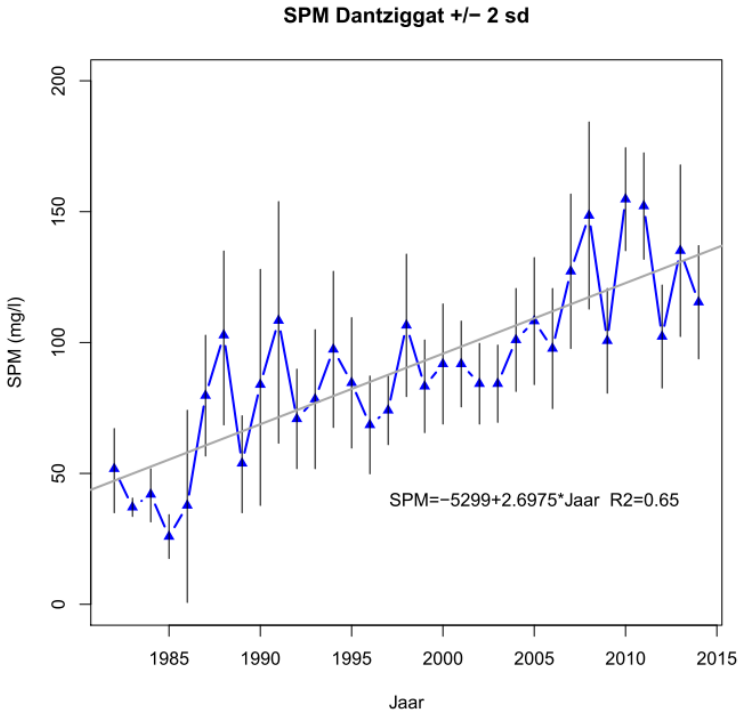
2.4 Mobilisatie van slib door baggeractiviteiten

Het baggeren en losmaken van grote hoeveelheden slib, en het terugstorten verderop in de vaargeul waar het slib niet permanent blijft liggen, leidt tot het mobiliseren van slib in de (wijde) omgeving van de gebaggerde vaargeul. Eén van de openstaande vragen uit de studie in 2015 was of deze mobilisatie kan geleid hebben tot een verhoging van het gehalte zwevende stof in de omgeving.

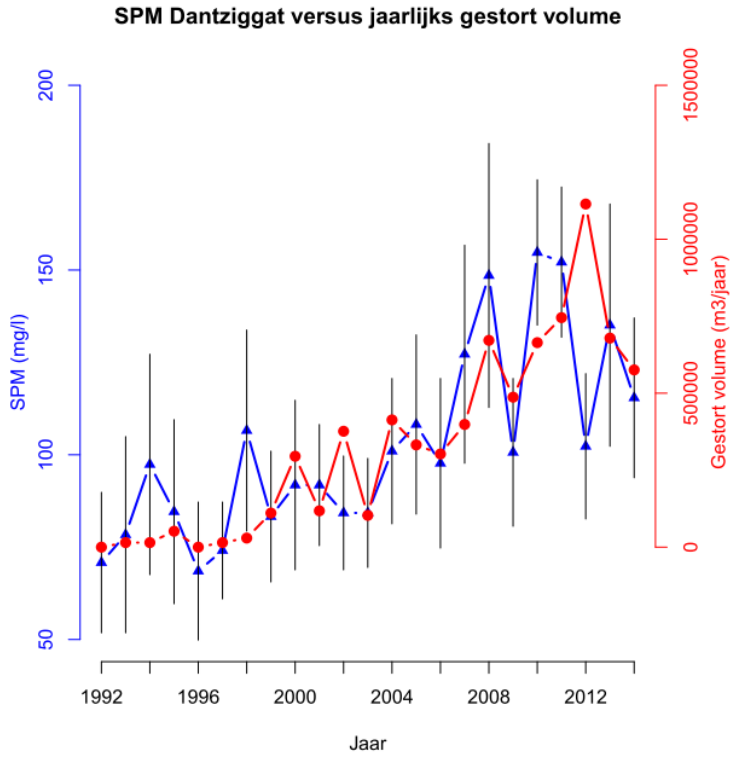
De gehaltes zwevende stof in het Dantziggat, een aantal kilometers verwijderd van de bagger- en stortlocaties maar binnen hetzelfde geulsysteem, tonen een duidelijke stijging over de tijd maar geen sterke correlatie met de veranderingen in de baggerpraktijk (Figuur 2.3). Er wordt een eerste stijging waargenomen tussen 1986 en 1987, die echter methodologisch kan zijn, omdat Rijkswaterstaat omstreeks deze periode de methode van slibbemonstering heeft veranderd (o.m. gebruik van andere filters, verandering in diepte van bemonstering – Blaas et al., 2006). Daarna blijven de concentraties ongeveer constant (en fluctuerend) tot omstreeks halverwege de jaren 1990, toen een stijging van concentraties is ingezet die doorloopt tot 2011, waarna een zekere daling is ingetreden. Er wordt zeker geen stijging waargenomen rond 2011, toen het storten op eb is begonnen. De gehaltes zwevende stof in het Dantziggat correleren daardoor niet goed in de tijd met de totale baggervolumes zoals getoond in Figuur 2.1. Wel vertonen de gehaltes zwevende stof in het Dantziggat een correlatie in de tijd met de volumes die zijn gestort in het stortvak in de Zuiderspruit (Figuur 2.4), maar het is onzeker of de correlatie wijst op een causaal verband. Tussen 2005 en 2011 vertonen ook andere tijdseries van zwevend stof in het Waddengebied een opvallende verhoging, wat kan wijzen op een gemeenschappelijke oorzaak vanuit de Noordzee. Daar staat tegenover dat de stijgende tendens over de periode 1990-2015 alleen in Dantziggat lijkt voor te komen (Figuur 2.5)

Het ontbreken van een correlatie tussen de hoeveelheid slib die op eb wordt geloosd, en de concentratie zwevend stof verderop in het systeem (Dantziggat) en het vrijwel ontbreken van een seizoenaal signaal in de baggervolumes, suggereren beiden dat het slib dat op eb wordt geloosd niet wordt opgenomen in een grote regionale buffer (als zwevende stof of als slib dat gemakkelijk wordt gemobiliseerd), maar in een korte lokale cyclus van baggeren, terugkeren en hersedimenteren. Hoogstwaarschijnlijk wordt het materiaal dat bij vloed op Zuiderspruit wordt gestort, wel betrokken in een langdurigere cyclus over een groot gebied. In elk geval blijft het materiaal niet permanent liggen op de plaats waar het wordt gestort, en moet het daarvandaan dus als materiaal in suspensie worden getransporteerd. Of dit signaal ook in de MWTL metingen op Dantziggat dominant aanwezig blijft (hemelsbreed is de afstand meer dan 5 km), is een interessante vraag die echter met de voor handen zijnde gegevens niet met zekerheid kan worden beantwoord.

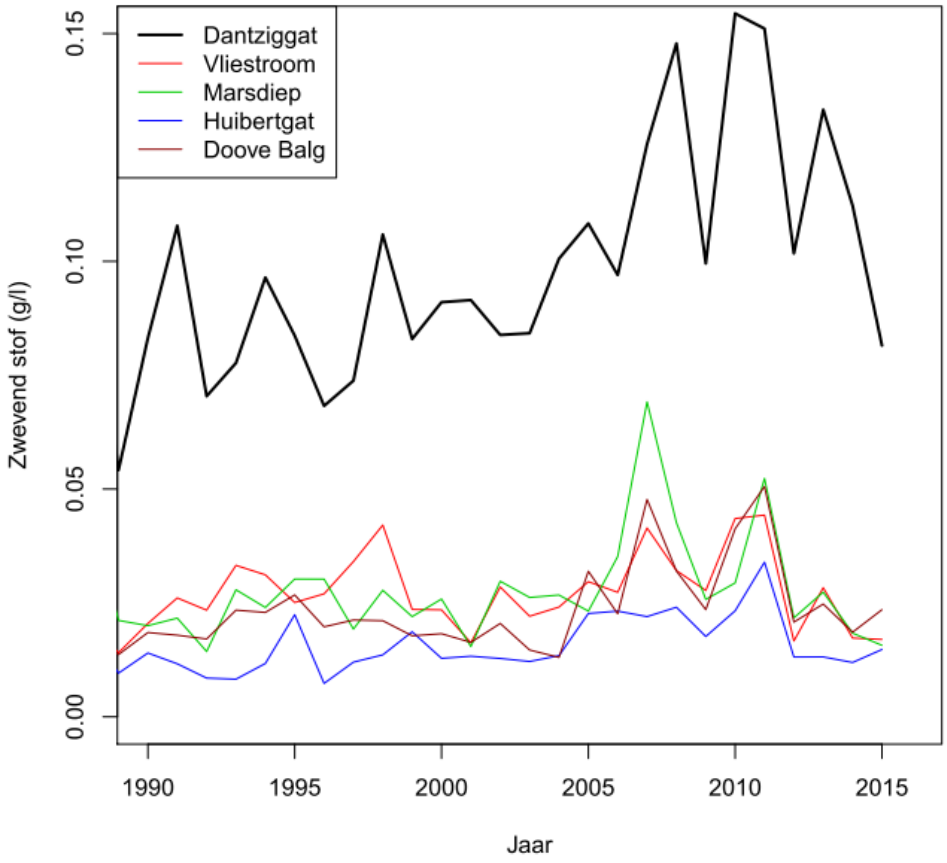
Het is moeilijk te becijferen hoeveel slib in de korte cyclus (storten op eb, terugkeer naar het oostelijk deel van de vaargeul, hersedimenteren) is betrokken. Minimaal gaat het om slechts 40000 m^3. Het baggervolume dat op eb wordt geloosd bedraagt 2/3 van het totale gebaggerde volume, ongeveer 1,2 miljoen m^3 per jaar. Als dit volume een massa slib betreft die zeer snel (d.i. even snel als de terugkeertijd van het schip, ongeveer 10 dagen) naar de vaargeul terugkeert, dan zou deze massa slib ongeveer 30 keer per jaar worden opgenomen en terugkeren. Dus bij een dergelijke situatie waarin het sediment met bijna 100% efficiëntie binnen ongeveer 10 dagen terugkeert, zou de massa gegeven worden als 1.200.000 / 30 = 40.000 m^3. Dit is ongetwijfeld een onderschatting, maar wellicht is de hoeveelheid beperkt en in de orde van één tot enkele honderdduizenden m^3. Immers, als het over een veel grotere hoeveelheid zou gaan (met minder cycli per jaar), dan zouden aanzienlijke voorraden slib in het systeem aanwezig moeten zijn, en zou verwacht worden dat die bij storm gemakkelijk en zeer snel gemobiliseerd zouden worden.



Figuur 2.3 Gehaltes zwevende stof (SPM) gemeten in het Dantziggat (RWS, MWTL).



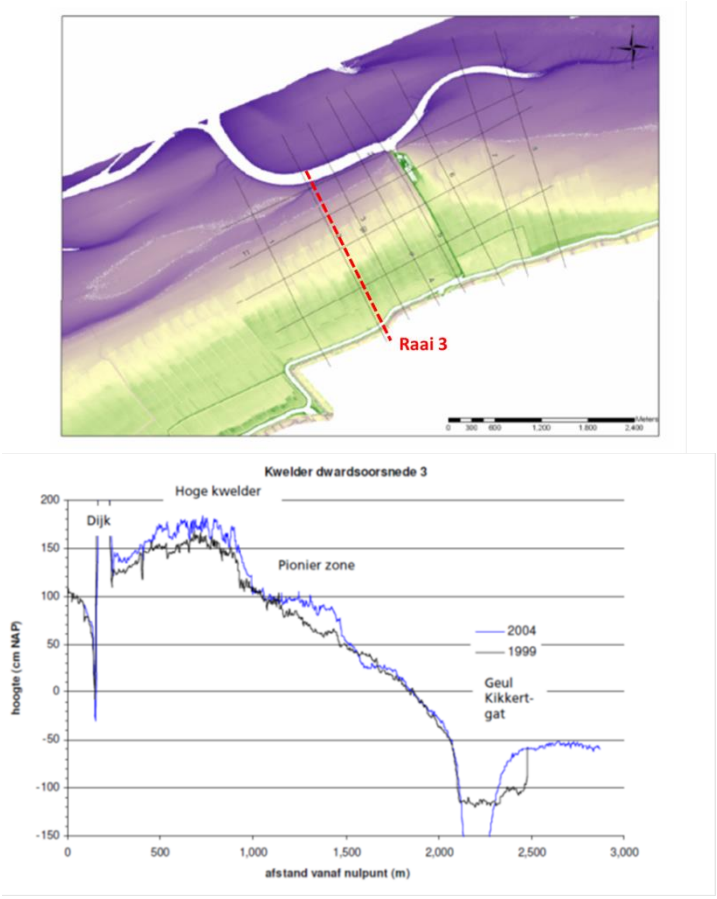
Figuur 2.4 Correlatie in de tijd tussen het gehalte zwevende stof (SPM) in het Dantziggat (blauw) en het volume gestort slib op de storlociatie Zuiderspruit (rood)



Figuur 2.5 Tijdseries van zwevend stof gehalte in verschillende MWTL meetpunten in het Waddengebied. Alle station waarvan data beschikbaar waren tot en met 2015 zijn getoond, met uitzondering van de Bocht van Wattum in de Eems, waarvoor de databeschikbaarheid in het begin van de serie zeer beperkt was. Data Rijkswaterstaat.

2.5 Geul-plaat interacties.

De eerste kilometer van de vaargeul doorsnijdt de voet van de slibrijke plaat ten westen van de veerbootsteiger, zoals in Figuur 2.6 is aangegeven. Dit betekent dat de voor sedimentatie effectieve breedte van de geul veel groter is dan de 50 meter die nodig is voor een veilige scheepvaart. Wij hebben waargenomen dat bij passage van de veerboot de waterspiegel op het slik snel verlaagt, en na passage weer snel stijgt. Deze golf, tezamen met de hek- en boeggolf van de veerboot neemt los slib van het slik mee naar de vaargeul. Omdat dit sediment daardoor in de geul terechtkomt, stellen wij dat de effectieve breedte van de geul (d.i. de breedte waarover de geul slib invangt), groter is dan de breedte van de geul zelf. Dit blijkt verder uit het verschil van de 1999 en 2004 doorsnede in Figuur 8. De hoge kwelder en pionierzone vertonen decimeters aanslibbing, terwijl het slik niet is veranderd, waar de natuurlijke netto sedimentatie ongeveer 2 cm per jaar bedraagt (Alkyon, 2005, 2008). Slib dat op dat slik bezinkt tijdens hoogwater, blijft daar dus niet liggen. Het komt, bij passage van de veerboot, alsnog in de geul terecht. Het slik fungeert als een deel van het slibvangmechanisme van de geul.



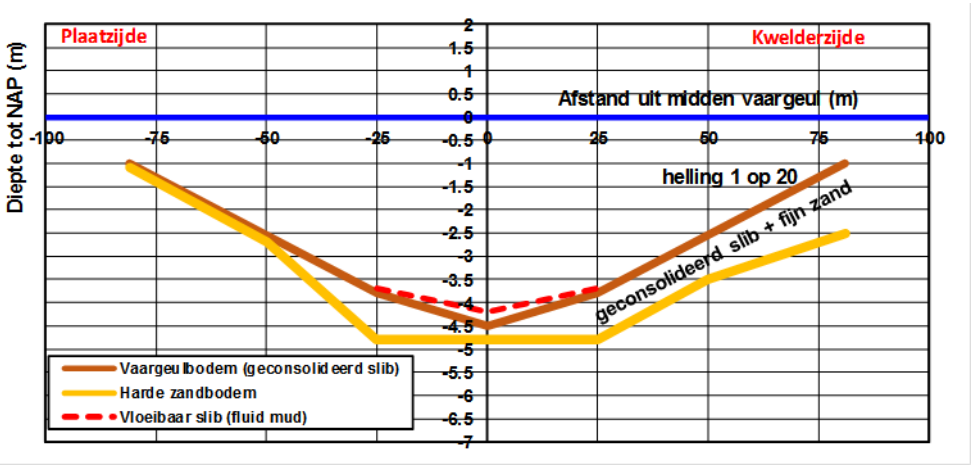
Figuur 2.6 Dwarsdoorsnede vaargeul 500 m ten westen van de veerbootstijger in 1999 en 2004. Merk op dat de vaargeul de voet van de slik doorsnijdt. Ten noorden van de vaargeul (rechts in de figuur) ligt een zandige plaat.

Geul-plaat interactie speelt waarschijnlijk ook een rol in de invang van zand in de geul. De stroomsnelheden in de meest oostelijke 3 km van de geul, het gebied dat intens wordt gebaggerd, zijn niet groot genoeg om zand door de geul te transporteren. Toch bestaat een substantieel percentage van het gebaggerde gedeelte van de bodem van de geul (orde 25 %) uit (zeer fijn) zand. Waarschijnlijk is dit zand afkomstig van de omringende platen, of wordt het gemobiliseerd als gevolg van de uitbochting van de vaargeul. De precieze herkomst en balans van het zand in de geulbodem blijft slecht bekend.

2.6 Baggeren en dwarsprofiel van de geul

Historische lodingsgegevens hebben aangetoond dat het dwarsprofiel van de geul, kort na baggeren, een opengeklapte U-vorm heeft met een relatief vlakke bodem. Deze bodem is zandhoudend en relatief hard (de kop van de sleephopper zinkt er niet in weg). Hij ligt dieper dan de streefdiepte van -3,8 m NAP, vooral in het midden van de vaargeul waar de diepte ongeveer -4,5 m NAP is. Na het baggeren vindt er netto sedimentatie en consolidatie van (matig zandhoudend) slib langs de randen van de geul plaats, maar niet in het midden. Het profiel ontwikkelt zich tot een V-vorm. Figuur 2.7 toont een schematische weergave van deze gegevens. In sommige historische profielen zijn aanwijzingen gevonden voor een fluid mud laag van ongeveer 0,3 m dikte, die in de loop van enkele weken consolideerde tot vaste bodem. Dit is echter niet altijd het geval. Er zijn geen aanwijzingen dat de sleephopper systematisch vloeibaar slib heeft opgebaggerd. Daarvoor is de gebruikelijke dichtheid van het

materiaal in de beun te hoog. De eigenschappen van het bodemmateriaal van de geul zijn zodanig dat transport als suspensie met hoge concentratie, en consolidatie in korte tijd, waarschijnlijk zijn (zie verder bij slibdynamiek).



Figuur 2.7 Geschematiseerde dwarsdoorsnede van de vaargeul – merk op dat dikte van de fluid-mudlaag waarschijnlijk overdreven is

2.7 Invloed van de veerboot op het slib op de bodem.

De baggeraar rapporteert dat er nooit gebaggerd hoeft te worden in het midden van de vaargeul, waar de veerboot over vaart. Het sediment is op die plaats relatief zandig en hard. Verondersteld kan worden dat agitatie van het slib door de veerboot de reden is voor deze afwezigheid van sedimentatie in het midden van de geul.

De veerboot wordt voortgestuwd door een waterjet, waarbij water met grote snelheid uitgestoten wordt. Wij hebben weinig precieze informatie over de waterjet van de veerboot. In gesprekken met de kapiteins is gesteld dat de uitstroom vrijwel horizontaal is. Of de hoge watersnelheden in de jets de bodem kunnen raken, zal afhangen van de kielspeling en de diameter van de jets. We vermoeden dat de watersnelheden onder de kiel erg groot kunnen zijn, vooral bij lage waterstanden, als gevolg van de sterke waterverplaatsing van het schip in ondiep water en door de jets. Dit zou verantwoordelijk kunnen zijn voor erosie van slibbig materiaal onder het schip.

Waarschijnlijk vindt sedimentatie van slib over de gehele geulbodem plaats, maar wordt het materiaal in het midden van de vaarweg opgewoeld tijdens de passage van een veerboot, waarna het zich definitief afzet langs de randen van de geul. Het lijkt daarnaast waarschijnlijk dat de sterke jets een rol spelen (hebben gespeeld) bij het mobiliseren van sediment in en rond de geul, bijvoorbeeld bij het snel uitbochten van de geul. Zij zijn waarschijnlijk ook de oorzaak dat de diepte in het midden van de vaargeul onder de streefdiepte ligt. Overigens hebben we niet onderzocht of vergelijkbare effecten ook bij schroefaangedreven schepen te verwachten zijn, en of het aandrijfmechanisme hiervoor een wezenlijk verschil maakt.

2.8 Conclusies m.b.t. het baggerbezwaar

1. Het materiaal dat wordt gebaggerd uit de geul heeft een relatief hoge droge dichtheid van ongeveer 800 kg m^{-3} (bulkdichtheid 1500-1600 kg m^{-3}) en wordt met ongeveer een factor 2 verdund bij het baggeren. Dat wijst op een redelijk hoge graad van

consolidatie van het slib in de geul. Het spreekt tegen dat de grote baggervolumes het gevolg zouden zijn van het baggeren van vloeibaar slib.

2. Het materiaal dat ‘op stroom wordt gezet’ tijdens de ebstroom vertoont geen correlatie met het zwevend stofgehalte in het MWTL station Dantziggat. Er is bovendien slecht weinig seizoenaliteit in het baggeren, wat beide suggereert dat het materiaal betrokken is bij een korte lokale cyclus van baggeren en terugkeren. Dit betreft ongeveer 2/3 van het baggervolume. De hoeveelheid materiaal die in deze cyclus is betrokken (orde één tot enkele hondderduizenden m^3), is waarschijnlijk relatief beperkt in vergelijking met de jaarlijkse baggervolumes (orde 1,2 miljoen m^3 voor het deel dat bij eb op stroom wordt gezet).
3. Er zijn aanwijzingen dat slib dat op de platen rond de geul sedimenteert, onder invloed van scheepsgolven en variaties in waterstand uiteindelijk in de geul terechtkomt. De effectieve oppervlakte waarover de geul sediment invangt is daardoor hoger dan de oppervlakte van de geul zelf. Het zand dat in het gebaggerde materiaal voorkomt is waarschijnlijk afkomstig van de platen.
4. Het varen van de veerboten met waterjets heeft waarschijnlijk een invloed op het patroon van slibafzetting in de geul. Zij zijn in staat op de huidige diepte van de geul resuspensie van alle slib boven de stevige zandbodem te bewerkstelligen. De overdiepte die gevonden wordt in het midden van de geul, waar niet wordt gebaggerd, suggereert dat de jets de geul lokaal verdiepen, waardoor zij misschien extra slib in het systeem hebben gebracht.

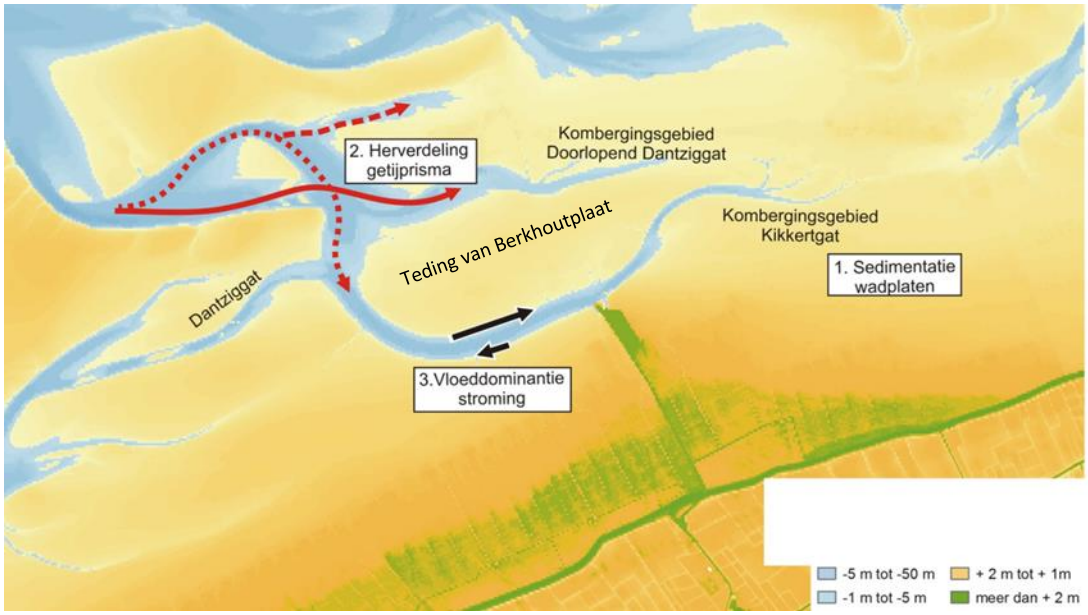
3 Morfologische factoren die hebben bijgedragen aan het baggerbezwaar

In dit hoofdstuk bespreken wij de recente inzichten in de morfologische factoren die bijdragen aan het baggerbezwaar in het gebied. Op basis van de studie in 2015 hebben wij een inzicht naar voren gebracht over zowel grootschalige, langjarige factoren, als lokaal-regionale factoren die hieraan bijdragen. Deze analyse blijft grotendeels geldig, maar wordt aangevuld met recente metingen en bijkomende observaties. Hieruit synthetiseren wij een conceptueel model voor de morfologische factoren die van belang zijn voor het baggerprobleem.

3.1 Bevindingen uit de studie in 2015

Met betrekking tot de relatie van het baggerbezwaar met de morfodynamiek in dit deel van de Waddenzee, werd op basis van literatuurstudie en een eerste modelverkenning, in Villars et al. (2016) geconcludeerd dat de volgende morfodynamische processen hebben bijgedragen tot de ontwikkeling van de huidige situatie:

- Op de schaal van de gehele Waddenzee is het gebied ten zuiden van Ameland al decennia een depositiegebied. De platen en kwelders zijn sneller in hoogte gestegen dan de zeespiegel. Dit heeft geleid tot een afname van het getijvolume door de geulen. Het natuurlijke proces is dan dat de geulen in dwarsoppervlak zullen afnemen, omdat de evenwichtsoppervlakte van de geuldoorsnede een functie is van het getijvolume (hoe meer water per getij door de geul stroomt, hoe groter het doorstroomoppervlak van de geul zal zijn). De reactie van geulen op een afname van het getijvolume is relatief traag, zodat kan worden verwacht dat de geulen in onevenwicht zijn met het huidige getijvolume en daardoor de neiging zullen hebben aan te zanden / slibben.
- Het baggeren vergroot de doorstroomoppervlakte van de geul door verbreding en verdieping. Daardoor komt de geul nog verder van de evenwichtstoestand, wat de sedimentatie van zand en/of slib in de geul bevordert. Recente aanpassingen van de nautische eisen (verbreding tot 50 m, verdieping tot 3,8 m) hebben dit versterkt en daardoor wellicht geleid tot verhoging van het baggerbezwaar.
- Rond het zuidelijke deel van de vaargeul, hebben een aantal lokale morfologische processen bijgedragen aan omstandigheden die sedimentatie in de geul bevorderen (Figuur 3.1):



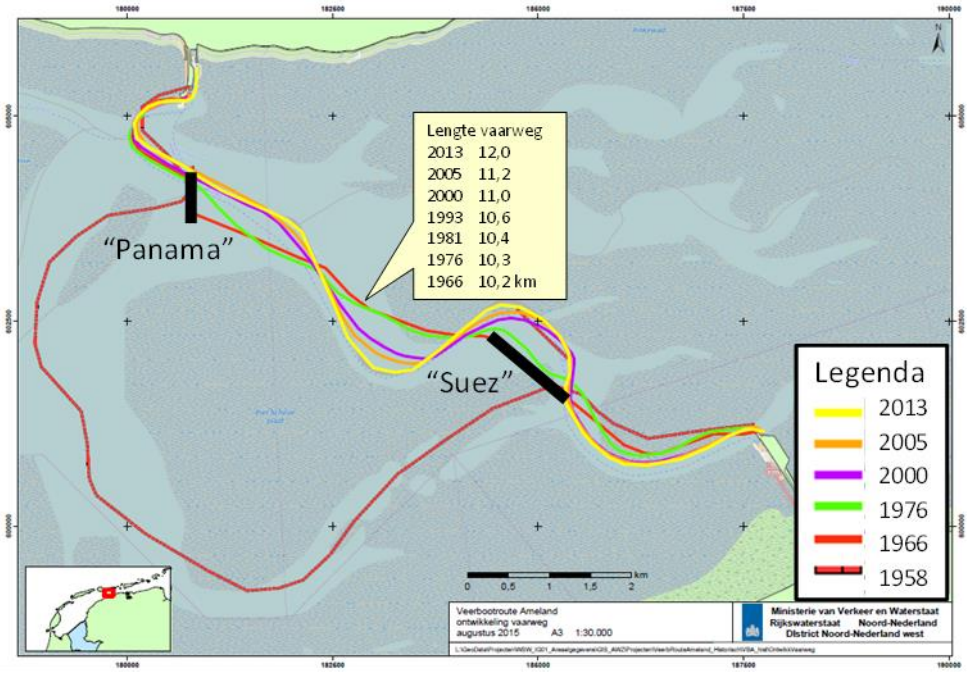
Figuur 3.1 . Conceptueel model voor de meest relevante morfologische ontwikkelingen in het zuidelijke deel van de vaargeul Holwerd-Ameland

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

Deze processen zijn ook op basis van tekeningen uitgelegd in Annex A.

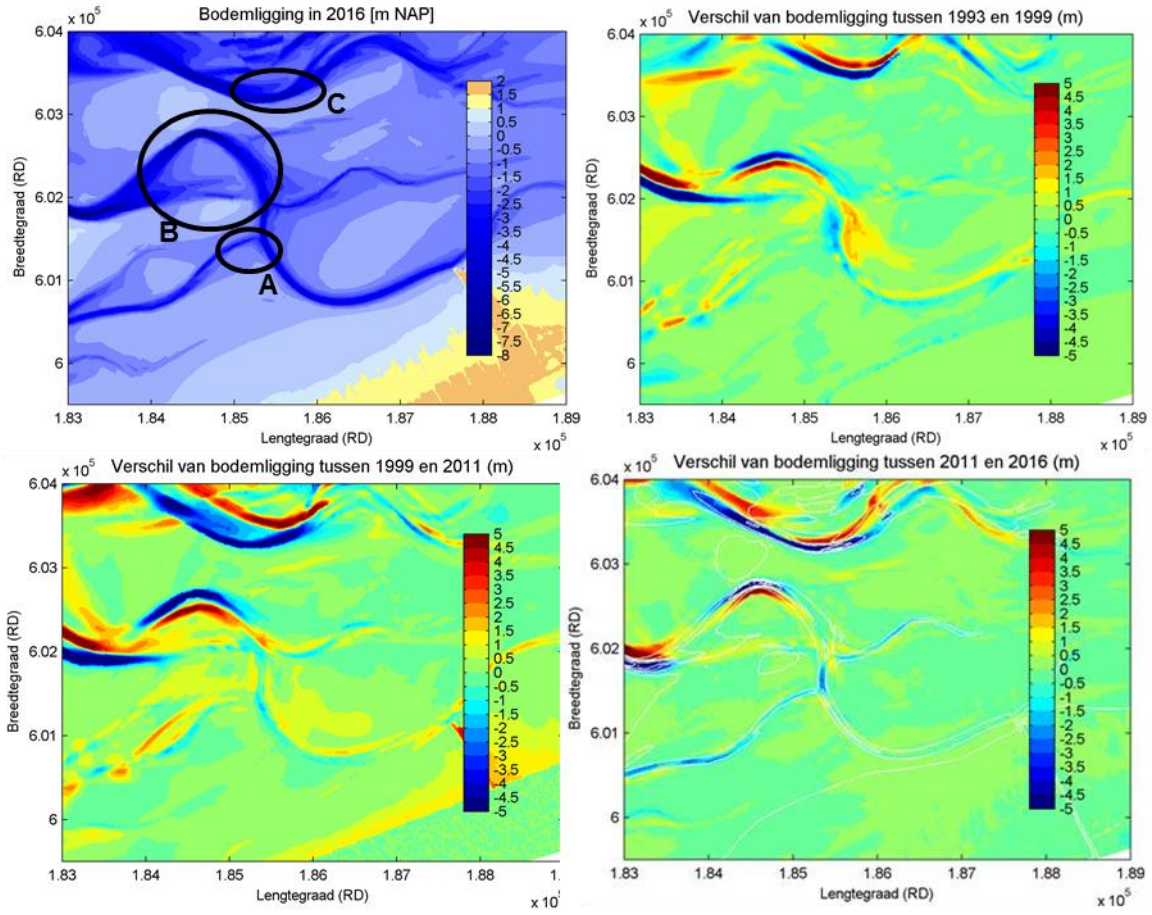
3.2 Uitbochting van de vaargeul en veranderingen in de eb-vloedschaar bij Holwerd

De vaarroute is sinds 1966 steeds bochtiger geworden (Figuur 3.2). Een bochtig traject is langer dan een rechte weg en bovendien kan de vaarsnelheid beperkt worden door die bochten. Afsnijding van één of meer van die bochten, wat voor het laatst in 1958 is gedaan, kan de vaartijd dus verkorten. Omdat bochtafsnijdingen niet natuurlijk zijn, is de kans groot dat de morfologische ontwikkelingen de geul weer ineen bochtige staat terugbrengen. De afgesneden vaarroute moet dan door baggerwerkzaamheden onderhouden worden. De grootte van dat baggeronderhoud hangt af van de sedimentbewegingen ter plaatse. Deze sedimentbewegingen hangen op hun beurt af van de lokale stroomsnelheden en golven, geïnduceerd door getij en wind, en de samenstelling van het sediment ter plaatse. Sediment bezinkt daar waar de stroomsnelheden klein zijn, en wordt verspreid bij hoge stroomsnelheden. De kritische stroomsnelheden voor opwerveling en sedimentatie zijn verschillend afhankelijk van de korrelgrootte van het sediment.



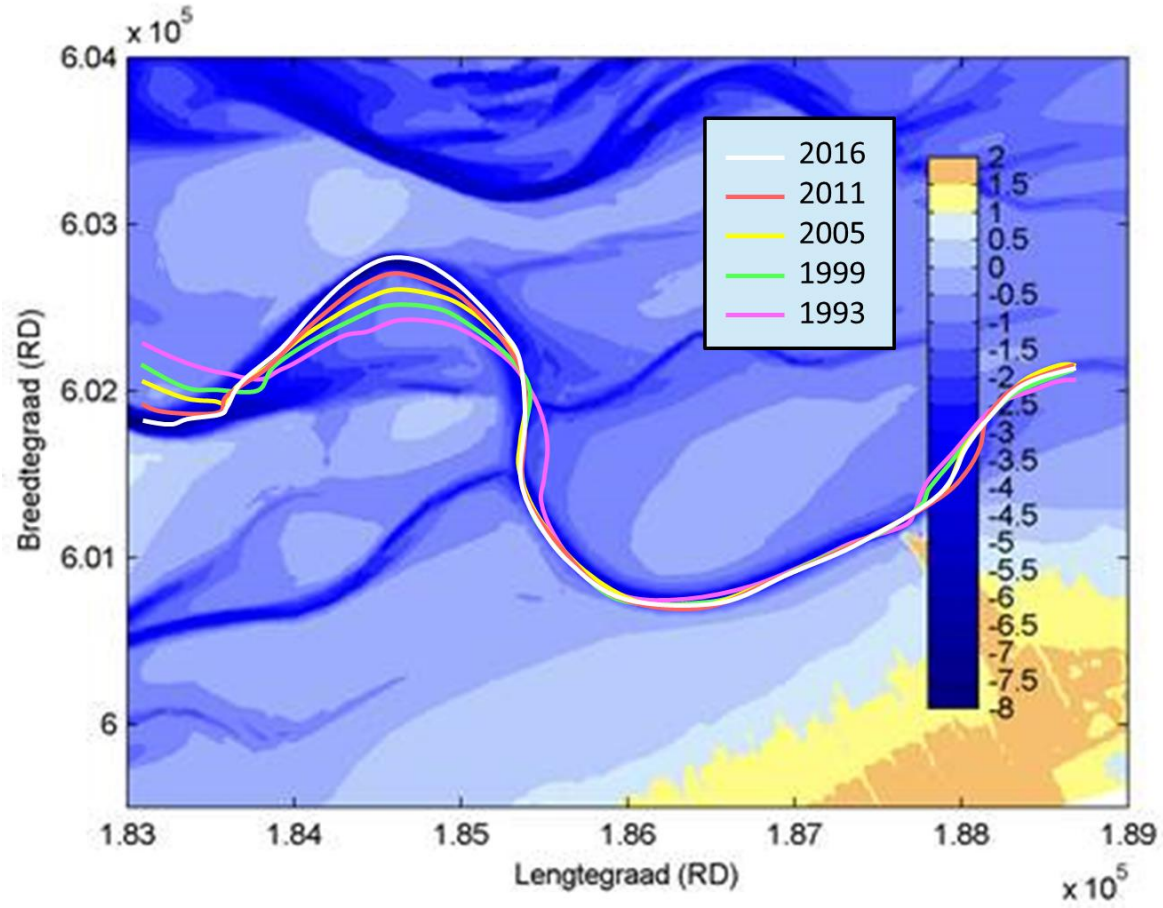
Figuur 3.2 Ligging van de veerbootroutes in verschillende jaren van 1958 tot en met 2013 (bron: Rijkswaterstaat) geplot op de huidige bodemligging. De kaart geeft ook de posities weer van de doorsteken "Suez" en "Panama" die rond 1958 zijn gerealiseerd.

Noordwestelijk van het vaargeultraject waar slib wordt gebaggerd bevindt zich een eb-vloedschaar (Figuur 3.3, cirkel B). Dit is een veel voorkomend morfologisch element, bestaande uit twee min of meer evenwijdige geulen, de ebgeul en de vloedgeul. In de ebgeul is de snelheid gemiddeld over een getijperiode in ebrichting, terwijl de gemiddelde snelheid in de vloedgeul in vloedrichting is. Over de getijperiode geïntegreerd, is in een ebgeul het watervolume in ebrichting dan dus groter dan in een vloedgeul. Een vloedgeul eindigt meestal op een drempel in de bodem (dit zijn de gebieden waar zand gebaggerd wordt als er een vaargeul is, zie bijvoorbeeld Figuur 2.2).
De natuurlijke evolutie van een eb-vloedschaar wordt gekenmerkt door het uitbochten van de ebgeul. Terwijl de ebgeul een steeds grotere bocht ontwikkelt, neemt haar capaciteit om water af te voeren normaliter af. Die rol wordt dan meer en meer overgenomen door de vloedgeul. Uiteindelijk verliest de ebgeul haar functie geheel, en ontstaat er een nieuwe eb-vloedschaar. De oude vloedgeul wordt de nieuwe ebgeul, en er wordt een nieuwe vloedgeul gevormd. Dit is een cyclisch proces met een periode van meerdere decennia.

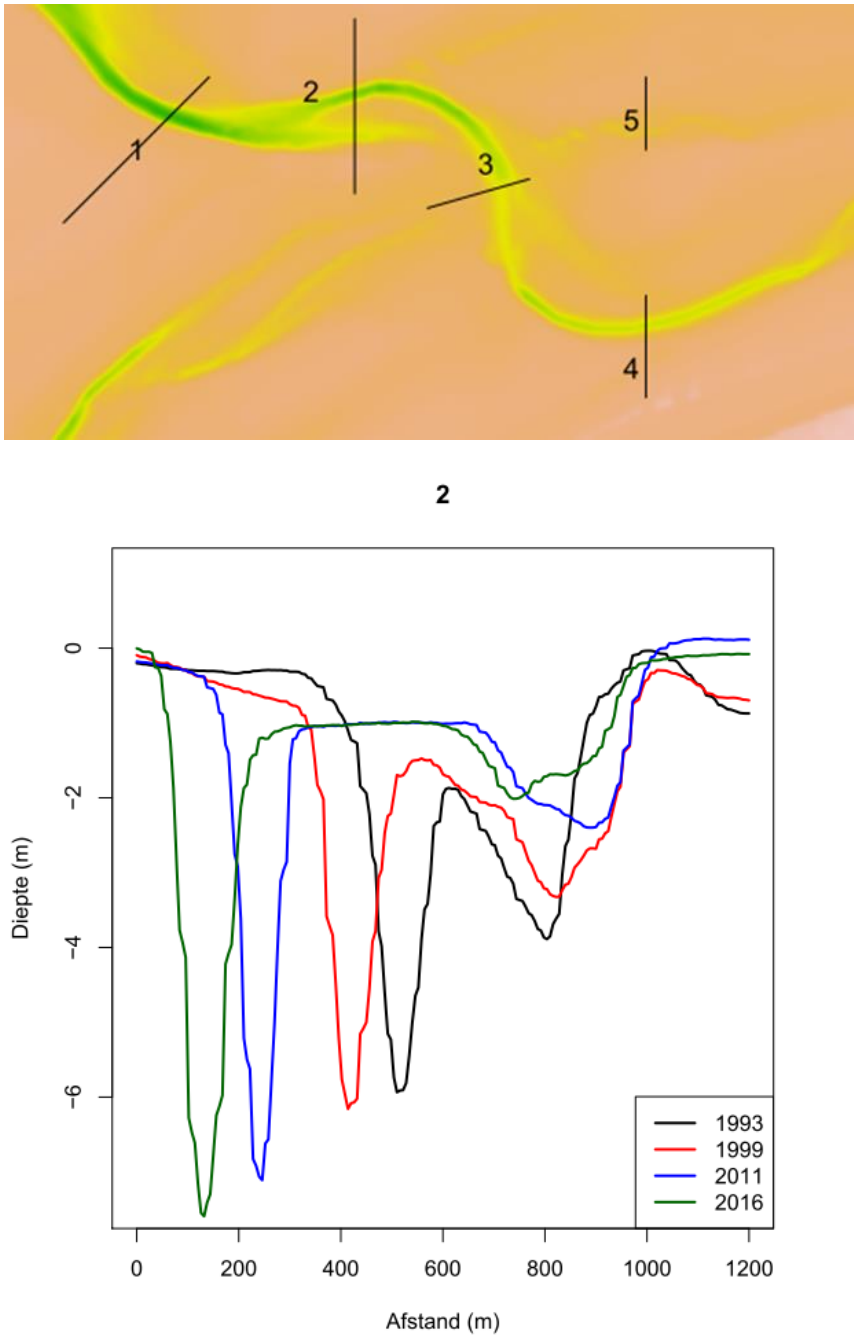


Figuur 3.3 . Linksboven de bodemligging in 2016, met aanduiding van gebieden die in de tekst worden besproken. De andere kaarten geven verschillen in bodemligging over een bepaalde periode weer. Rechtsboven: 1993-1999, linksonder 1999-2011, rechtsonder 2011-2016. Rood is depositie, blauw erosie.

In de hier besproken eb-vloedschaar (gebied B in Figuur 3.3a) is de ebgeul de noordelijke, en de vloedgeul de zuidelijke geul. De bodemliggingen gemeten in 1993, 1999, 2011 en 2016 laten zien dat de ebgeul, zoals verwacht, sinds 1993 uitbocht (Figuur 3.4), dus in noordelijke richting migreert. Een deel van de verwachte natuurlijke ontwikkeling zoals hoger geschetst, is duidelijk te zien in de veranderingen in bodemligging tussen 1993 tot 2011: de vloedgeul erodeert. Echter, tussen 2011 en 2016 sedimenteert de vloedgeul, de bodem is ongeveer een meter minder diep geworden. Daardoor is het stromingspatroon in 2016 significant veranderd in karakter, zoals uiteengezet in paragraaf 3.3. Verder lijkt de uitbochting van de ebgeul veel sterker dan die van andere geulen in de Waddenzee (Van Til, in prep.). Het verschil is met name dat in andere geulsystemen de vloedgeul versterkt en de ebgeul degenereert als de uitbochting te sterk wordt, terwijl in dit eb-vloedgeulsysteem de uitbochting doorzet zonder omslag.



Figuur 3.4 Migratie vaargeul tussen 1993 en 2016. De opeenvolgende posities van de vaargeul in 1993, 1999, 2005, 2011 en 2016 zijn geplot tegen de achtergrond van de bodemligging in 2016.(van Til, in prep.)



Figuur 3.5 Ontwikkeling bodem van de eb-/vloedschaar (langs raai 2, bovenste figuur) tussen 1993 en 2016. De profielen zijn gebaseerd op de modelschematisaties, en daardoor licht schokkerig.

Ten slotte is de ontwikkeling van de eb-/vloedschaar weergeven in Figuur 3.5 in de vorm van de evolutie van het diepteverloop langs een dwarsraai. Het blijkt dat de ebgeul sinds 1993 steeds dieper en wat smaller is geworden, terwijl de vloedgeul aanvankelijk verwijdt in de jaren 1990, maar bijna geheel is gedegenereerd sinds ongeveer 2011.

Deze morfologische ontwikkeling is waarschijnlijk het gevolg, enerzijds van factoren die de ebgeul in stand houden en doen uitbochten, en anderzijds de vloedgeul doen sedimenteren

terwijl verdere verdieping was verwacht. Verschillende factoren kunnen daaraan hebben bijgedragen. Het op diepte houden d.m.v. baggeren van de ebgeul verhindert dat sediment vanuit de vloedgeul in de ebgeul wordt afgezet. Dit sediment kan daardoor niet de weerstand in de ebgeul verhogen en de stroming door de vloedgeul bevorderen. Merk op dat in het afgelopen decennium ook een deel van het baggerwerk in het deel van de ebgeul ten noorden van de drempel met de vloedgeul plaatsvindt. Daarnaast heeft het sediment dat bij eb op stroom wordt gezet sinds 2011 een belangrijke rol kunnen spelen in de sedimentatie van de vloedgeul. Het materiaal bevat een aanzienlijke fractie zand, dat niet permanent in de ebgeul wordt afgezet maar dat wel beschikbaar is voor sedimentatie in de vloedgeul. Het is op dit ogenblik moeilijk uit te maken welke van deze twee factoren de belangrijkste rol heeft gespeeld. Wel is duidelijk dat de bagger- en stortactiviteiten leiden tot het stoppen en zelfs omkeren van een morfologische evolutie die van nature was te verwachten, namelijk het overnemen van de functie van de ebgeul door de vloedgeul. Tenslotte is het mogelijk (maar meer hypothetisch) dat de jets van de veerboot een effect hebben op het uitbochten van de ebgeul, omdat de jet bij het draaien naar de buitenbocht ‘blaast’.

Voor onze studie is verder van belang (Figuur 3.3):

A. Het Dantziggat lijkt in 2016 volledig aan te sluiten op de vaarroute. In zekere zin is dit een evolutie naar de situatie die bestond voor de geulafsnijding in de jaren 1950. De evolutie kan inhouden dat een steeds groter deel van de vloedstroom door het Dantziggat wordt overgenomen, en niet meer door de vaargeul ten noordwesten van de drempel gaat. Dit zou de stroming in de vaargeul kunnen beperken en aanzanding bevorderen. Het speelt tevens een rol bij de interpretatie van de sroming in de varianten.

B. De geul ten noorden van de eb-vloedschaar (deel van Zuider Spruit Ameland) migreert systematisch zuidwaarts. Dit kan een mogelijkheid openen voor een andere variant, waarbij de vaargeul na doorsteek van het wantij via de Zuiderspruit verderloopt. Deze variant is niet onderzocht in de huidige studie, en de morfologische consequenties ervan zijn moeilijk in te schatten zonder nadere studie.

C. Het wantij tussen schaar B en geul C wordt hoger, maar kleiner in oppervlakte. Dit brengt met zich mee dat het doorsteken van dit wantij niet gemakkelijk is, omdat sedimentatieprocessen in dit gebied kennelijk van belang zijn. Het eventueel doorsteken van dit wantij zal hier terdege rekening mee moeten houden.

3.3 Waterbeweging in het oostelijke deel van de vaargeul

Het waterbeweginsmodel dat gebruikt is in de 2015-studie is gebaseerd op de 2011 bodem, en afgeregeld met de randvoorwaarden van februari 2009. Alle simulaties met de historische bodemliggingen van 1993, 1999 en 2011 zijn met dat model uitgevoerd. Voor de 2016-studie is het waterbewegingsmodel opnieuw gekalibreerd voor de periode maart/april 2016, waarbij de nieuwe bodem van 2016 is geïmplementeerd (zie hoofdstuk 5 voor details). Er was in de studie geen ruimte om simulaties met het nieuwe model uit te voeren voor de historische bodems van 1993, 1999 en 2011. Een analyse van de evolutie van de waterbeweging over de periode 1993 – 2016 is daarom slechts kwalitatief mogelijk – de resultaten voor 2016 (met het 2016 model berekend) zijn niet goed vergelijkbaar met die voor de eerdere jaren, die met het 2015 model zijn berekend. De onzekerheid is relatief beperkt voor wat betreft de vloed- en ebvolumes (die sterk afhangen van de morfologie), maar potentieel belangrijker voor (piek)snelheden van het water bij vloed en eb. De ratio tussen pieksnelheden bij vloed en eb is waarschijnlijk wel tamelijk onafhankelijk van de modelcalibratie.

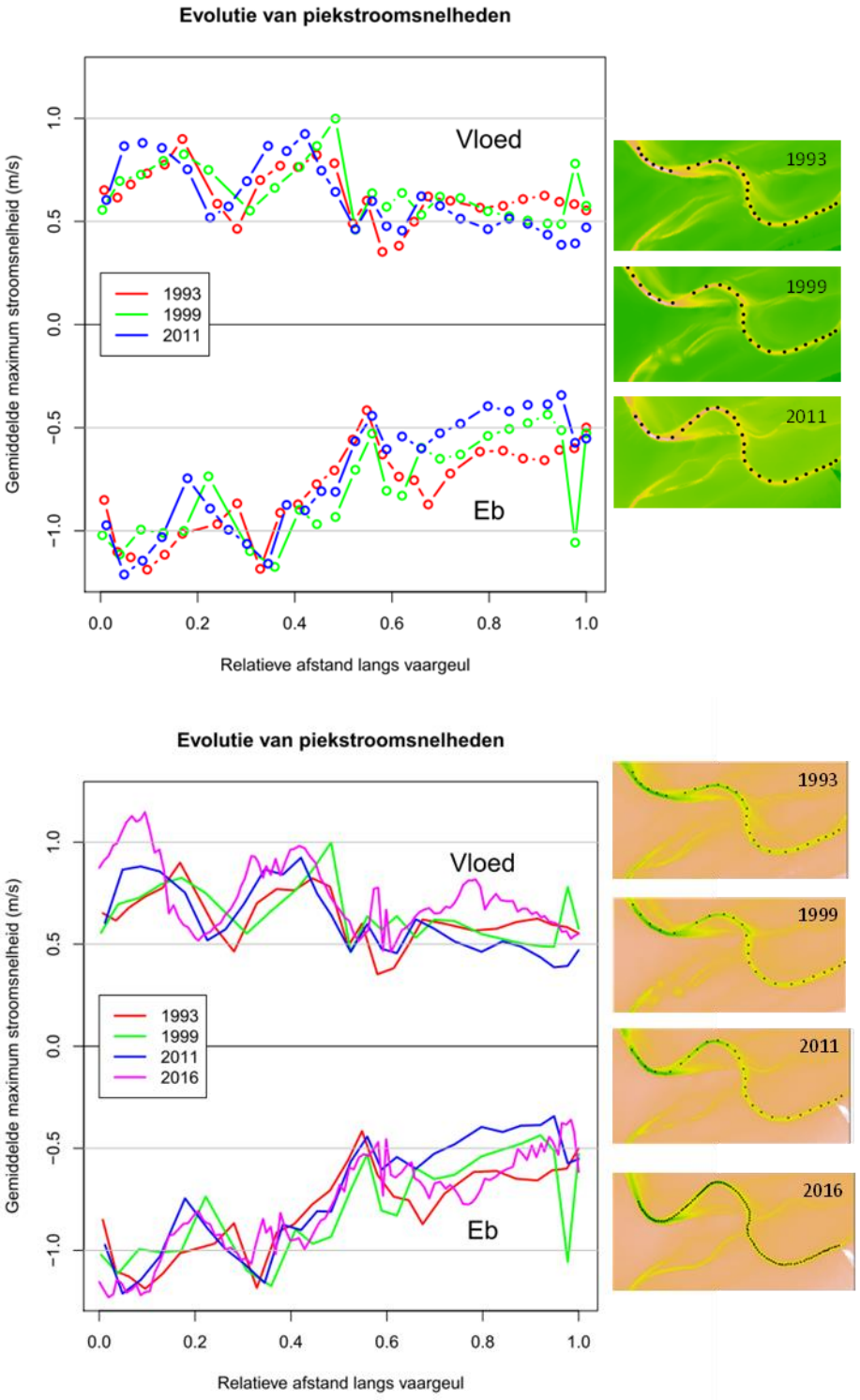
Desalniettemin levert een vergelijking van de resultaten van de waterbewegingsberekeningen interessante inzichten. Enige belangrijke modelresultaten, die helpen de historische ontwikkeling te begrijpen, staan in Figuur 3.6; de verhouding tussen de berekende vloed- en ebsnelheden gegeven in Figuur 3.7.

In Figuur 3.6 en Figuur 3.7 is te zien dat:

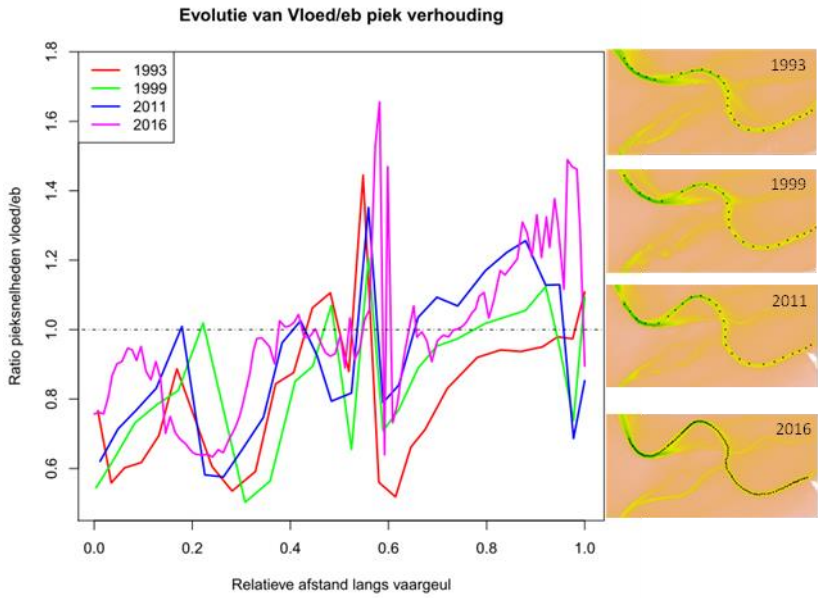
1. De stroomsnelheden in het zuidelijke deel van de geul (eerste 3 km) fors zijn afgenomen over de jaren 1993 - 2011, met name tijdens eb.
2. Sinds 2011 zijn de stroomsnelheden in die eerste 3 km tijdens vloed groter dan tijdens eb; dit is met name het geval in 2011, en in mindere mate in 2016. Grotere vloedsnelheden houdt in dat het slib makkelijker de geul in- dan uitstroomt, i.e. de geul is vloeddominant.
3. De zeer grote vloed/ebverhouding rond “relatieve afstand = 0,55” ligt op de drempel naar de eb-vloedschaar.
4. Verder naar buiten nemen de maximale ebsnelheden toe tot 0,7 – 1,2 m s^{-1}. De vloedsnelheid vertoont een dal op de overgang eb/vloedschaar en de volgende geul. De stroming is hier sterk ebdominant, hetgeen te verklaren is uit de grote intergetijdegebieden (platen) rondom de geul.

In Figuur 3.8 zijn de berekende maximale eb- en vloedsnelheden in de zuidoostelijke 7 km van de vaargeul voor de verschillende jaren gegeven. Zoals eerder opgemerkt is een kwantitatieve vergelijking moeilijk, omdat de resultaten met verschillende modellen zijn verkregen. De belangrijkste observatie is echter dat de snelheidsverdeling in de vloedgeul (C. ten zuiden van de ebgeul waar het gebaggerde slib wordt geloosd) in 2016 niet meer de oude vloedgeul volgt, maar nu zeer diffuus is. Dit diffuse patroon wordt veroorzaakt door de sterke verondieping van de vloedgeul – deze vloedgeul bestaat nu feitelijk uit een kleine depressie in de bodem. Het diffuse karakter van de stroming wordt bevestigd in Figuur 3.9, die de stromingsvectoren toont op piek van eb en vloed voor de jaren 2011 en 2016.

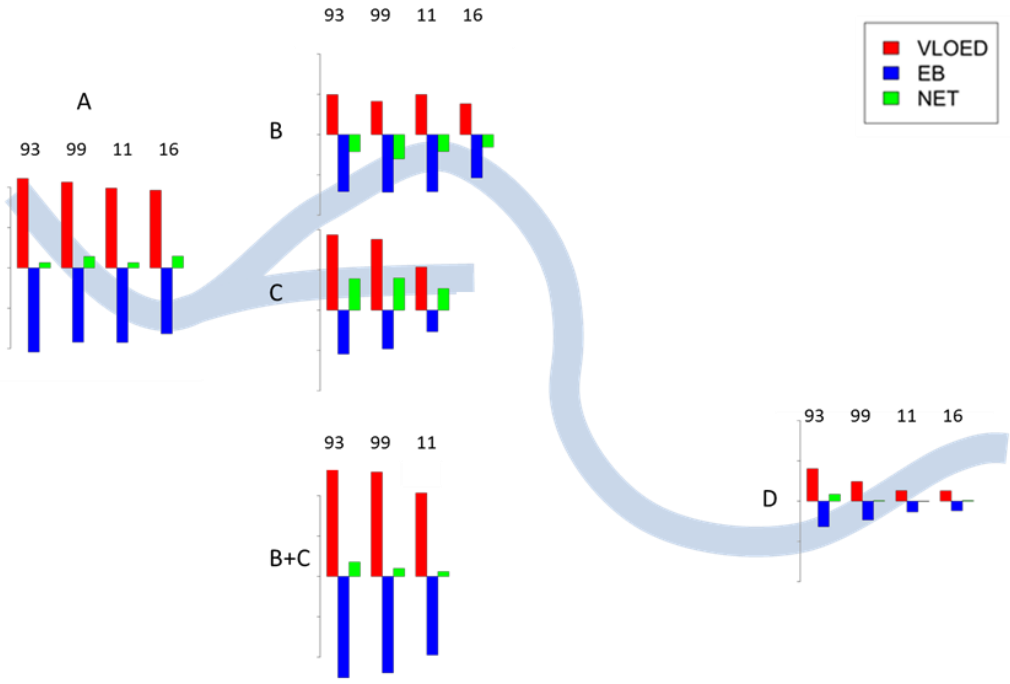
Zoals boven opgemerkt vermoeden wij dat deze verondieping mede het gevolg is van de gevolgde stortstrategie, i.e. “storten op eb”.



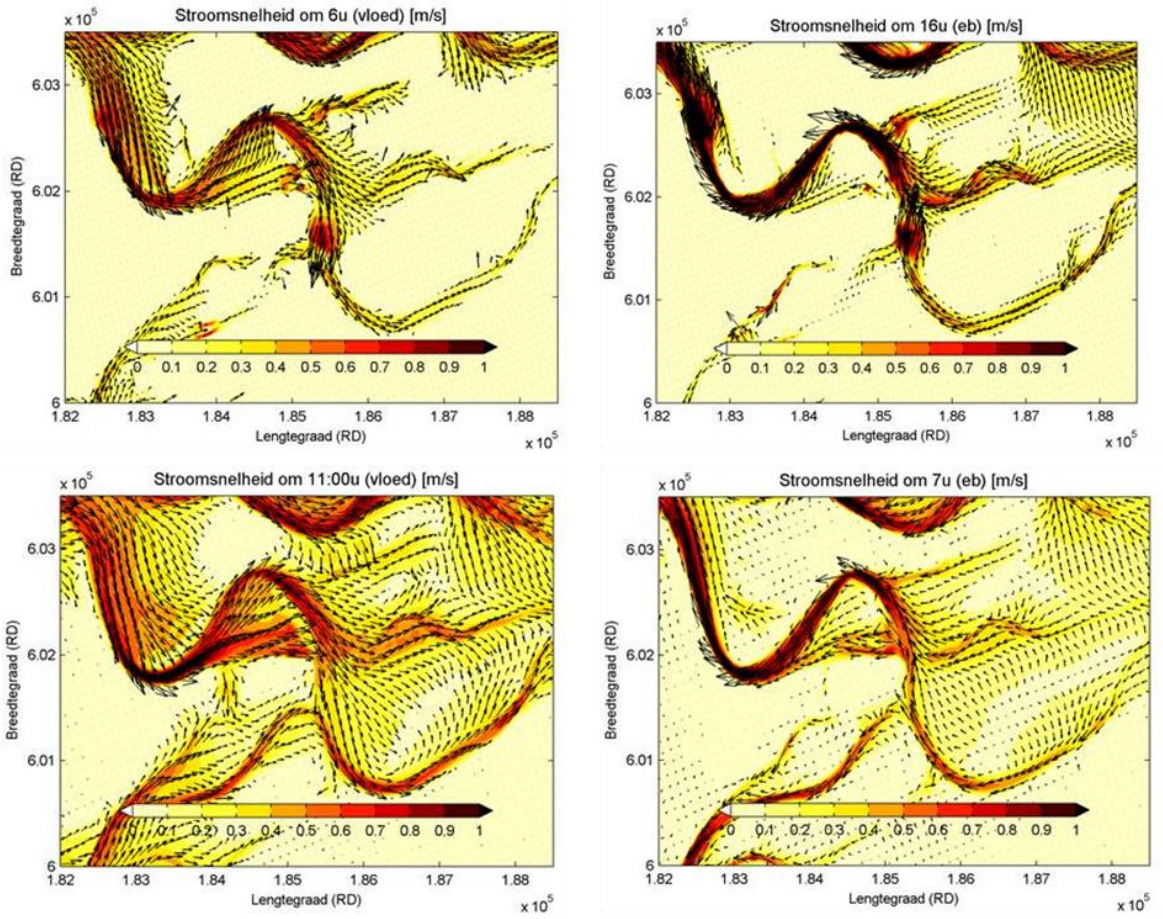
Figuur 3.6 Gemiddelde maximale stroomsnelheid langs de vaarroute voor de jaren 1993, 1999 en 2011 (boven) en voor deze jaren en 2016 (onder). De 2016 resultaten zijn met een ander model verkregen dan de andere jaren. De kaartjes rechts tonen de gegeven rekenpunten voor de diverse jaren. De relatieve afstand loopt langs de vaargeul vanaf de meest noordwestelijke punt (afstand = 0) tot de pier bij Holwerd (afstand = 1). De totale lengte van het traject bedraagt 6.8 km.



Figuur 3.7 Berekende verhouding maximale vloed- en ebsnelheden. Deze verhouding is minder gevoelig voor de verschillen in modelschematisatie. De kaartjes rechts tonen de onderzochte punten voor de drie jaren. De relatieve afstand loopt langs de vaargeul vanaf de meest noordwestelijke punt (afstand = 0) tot de pier bij Holwerd (afstand = 1). De totale lengte van het traject bedraagt 6.8 km



Figuur 3.8 Grafische weergave van vloedvolume, ebvolume en netto volume voor de jaren 1993, 1999, 2011 en 2016 in de punten A, B, C en D, ruimtelijk op de positie in de geul gesuperponeerd. Alle balkjes zijn ten opzichte van dezelfde schaal getekend. De figuur die onder de punten B en C ligt, geeft de som van beide weer. De blauwe balkjes zijn vloedvolume, de rode ebvolume, en de groene netto volume. Vloed is positief op de schaal, eb negatief. Merk op dat de resultaten voor de vloedgeul in 2016 niet vergelijkbaar zijn met die uit eerdere jaren, en daarom niet gegeven



Figuur 3.9 Stromingspatronen rondom de eb- en vloedgeul tussen de Punt en de Beckering Vinckersplaat. Bovenste rij: 2011 en onderste rij: 2016. Merk op dat de 2011 en 2016 resultaten met verschillende waterbewegingsmodellen zijn verkregen

3.4 Conclusies m.b.t. morfologische factoren

Het conceptuele model over de bijdrage van morfologische ontwikkelingen aan het baggerbezwaar steunde op twee verschillende ontwikkelingen, op onderscheiden schalen. Enerzijds leidt de Waddenzee-brede ontwikkeling (verhoging van de platen) tot verkleining van het getijvolume, en tot de natuurlijke neiging van de geul om daardoor te vernauwen. Anderzijds hebben lokale morfologische veranderingen geleid tot een verandering van de eb-vloed circulatie, waardoor de transporten in het oostelijk deel van de vaargeul meer vloeddominant zijn geworden. Beide factoren leiden tot een neiging tot sedimentatie in de geul. Het verwijden van de geul in respons op nautische eisen vergroot het onevenwicht, en doet de sedimentatiesnelheden verder toenemen.

Aan dit model zijn twee nieuwe, relatief lokale, elementen toegevoegd, namelijk:

1. De uitbochting van de ebgeul in de eb-vloedschaar gebeurt zeer snel, sneller dan het geval is bij andere geulen in de Waddenzee. We stellen de hypothese dat de jets van de veerboten hierbij een rol speelt, alsook de snelle afzetting van de ebstort in de binnenbocht
2. De morfologische evolutie van de eb-vloedschaar wordt de laatste jaren gekenmerkt door een verlanding van de vloedgeul en een verdieping en vernauwing van de ebgeul. Dat is in tegenspraak met het gebruikelijke beeld, waarbij wordt verwacht dat

de vloedgeul de functie van de ebgeul overneemt en die laatste degenereert. We stellen de hypothese dat de aanwezigheid van het gestorte materiaal in dit geulsysteem leidt tot de onverwachte en snelle verlanding van de vloedgeul. De eb-vloedschaar als geheel lijkt minder stroom te trekken dan voorheen, maar dit moet nader worden gecontroleerd omdat in de huidige resultaten met twee modelversies zijn verkregen.

Uit de kwalitatieve vergelijking van pieksnelheden bij eb en vloed, die voorlopig is omdat verschillende modelversies met elkaar zijn vergeleken, volgt de suggestie dat de vloeddominantie in het oostelijk deel van de vaargeul in 2016 verder is versterkt ten opzichte van de situatie 2011.

4 De slibdynamiek

In dit hoofdstuk gaan we in op de vraag of fluid mud een belangrijke rol speelt in het baggerbezwaar. Die hypothese was gesteld na de verkennende analyse in 2015. Daartoe bespreken we veld- en laboratoriumwaarnemingen, die de hypothese van een grote rol voor fluid mud hebben verworpen, en leveren we een verbeterd beeld over de slibdynamiek in het gebied. We besluiten dit hoofdstuk met een afrondende conclusie, waarin de resultaten over slibdynamiek in het perspectief worden geplaatst van de resultaten in hoofdstukken 2 en 3.

4.1 Bevindingen uit de studie in 2015

In het rapport over de werkzaamheden in 2015 (Villars et al. 2016) is geconcludeerd m.b.t. de toename van het baggerbezwaar:

> *Het baggervolume in de vaargeul Holwerd-Ameland is sterk toegenomen in de afgelopen jaren, van vrijwel niets vóór 1998, tot 1,8 miljoen m^3/jaar in 2015. De oorzaken kunnen in drie categorieën worden verdeeld:*
> *(1) morfologische ontwikkelingen,*
> *(2) slibdynamiek en het ontstaan van fluid mud, een hooggeconcentreerde maar vloeibare sliblaag aan de bodem,*
> *(3) veranderingen van meetmethode voor dieptebepalingen, veranderde eisen aan de diepte en breedte van de vaargeul en baggerpraktijk.*
>
> *Hoewel de drie categorieën oorzaken met elkaar samenhangen, is op basis van de literatuurstudie en de modelberekeningen geconcludeerd dat in de huidige studie de slibdynamiek een belangrijk aandeel heeft in de toename van het baggervolume, zeker in de meest recente periode (2010-2015). Overigens dient opgemerkt te worden dat de slibdynamiek een functie is van de hydrodynamiek, omdat stroomsnelheid en getijasymmetrie bepalend zijn voor de dynamiek van het slib.*

Met betrekking tot de slibdynamiek en de kans op het ontstaan van fluid mud, zijn de volgende hypothesen gesteld

1. *In het zuidelijke deel van de vaargeul naar Holwerd is de stroomsnelheid in de loop der jaren dermate afgenomen dat de kans op de vorming van fluid mud is toegenomen.*
2. *Doordat de ebsnelheid sterker is afgenomen dan de vloedsnelheid kan fluid mud moeilijk ontsnappen uit de vaargeul. Door scheepvaart of waterinjectiebaggeren opgewoeld slib blijft daardoor lokaal 'hangen' en opnieuw bijdragen aan fluid-mudvorming.*

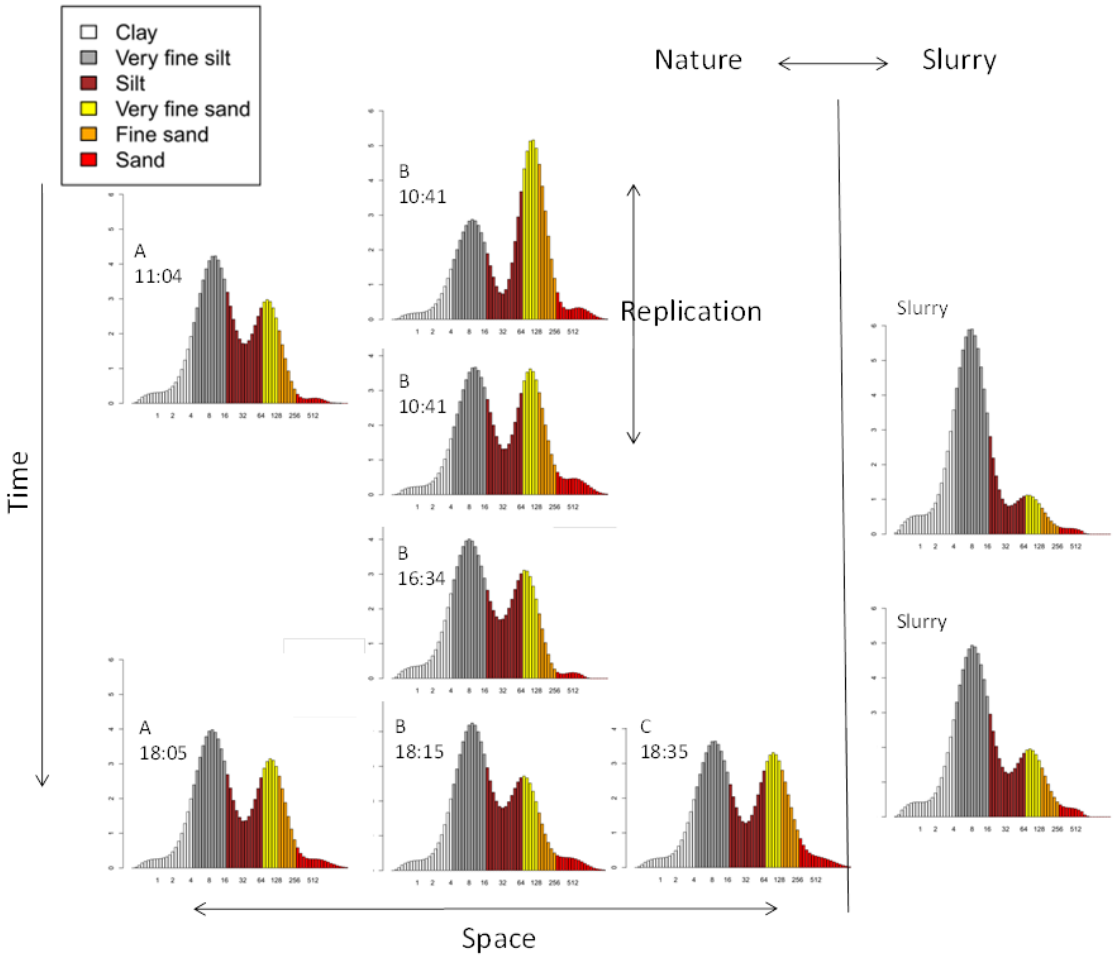
4.2 Nieuwe analyses in 2016

De analyses en waarnemingen in 2016 waren gericht op het aantonen van het voorkomen van fluid mud in de vaargeul, het bestuderen van de sedimenteigenschappen in de vaargeul en in het gebaggerde materiaal, en het uitklaren van de rol van slibdynamiek in de toename van het baggerbezwaar. Daartoe zijn veld- en laboratoriumanalyses uitgevoerd, die zijn gerapporteerd in de deelrapporten Veldwaarnemingen (van Kessel, 2016), laboratoriumanalyses (de Lucas et al., 2016) en Analyse van de baggerpraktijk (van Rijn et al. 2016). De belangrijkste resultaten worden hier samengevat.

4.3 Samenstelling van de bodem in de vaargeul

Op basis van de Sedimentatlas (1998), Alkyon (2005) en Arcadis (2012) kan geconcludeerd worden dat de bodem van de vaargeul en haar omgeving (de platen) uit fijn zand bestaat, behalve het traject langs/door het slik buitendijks bij Holwerd. Op deze zandbodem wordt over de meest oostelijke 3 km van de vaargeul (het te baggeren traject) slib afgezet. Slibgehaltes zijn hoger langs de zuid- en westzijde van dit deel van de geul, en zandgehaltes iets hoger langs de platen.

Figuur 4.1 Locaties monsternames in en naast vaargeul.



Figuur 4.2 Overzicht van de korrelgrootteverdelingen van de monsters, met aanduiding van de ruimtelijke en temporele variatie tussen monsterpunten en monstertijdstippen. Ook aangeduid is de korrelgrootteverdeling van de monsters die in de beun van het baggerschip zijn genomen ("slurry"). Deze figuur geeft een overzicht van ruimtelijk en temporele spreiding in de samenstelling. Voor details van de figuren wordt verwezen naar de Lucas et al., 2016.

Figuur 4.1 toont de locaties waar monsters in de vaargeul zijn genomen. Ook zijn monsters uit de beun van de sleephopperzuiger genomen. Op basis van de laboratoriumanalyses van deze monsters kunnen de volgende conclusies getrokken worden. Het sediment in en rondom de vaargeul bestaat uit zand en slib. Het zandgehalte is ongeveer 20 – 25%, en het zand heeft een mediane diameter van ongeveer 0,1 mm (Figuur 4.2). Er is weinig verschil tussen de monsters die op verschillende locaties en verschillende momenten zijn genomen. Relatief de grootste verschillen worden gevonden tussen replicate monsters die op dezelfde tijd en op enkele meters van elkaar zijn genomen (aangeduid met 'replication' in Figuur 4.2).

De monsters uit en naast de vaargeul hebben een bulk dichtheid van 1500 – 1600 kg m^{-3} (droge dichtheid ca. 800 – 900 kg m^{-3}). Dit zijn erg hoge dichtheden voor slib, zelfs in aanmerking nemend dat het zandgehalte ca. 25 % bedraagt. Bij die hoge dichtheid blijkt het slib niet sterk (ca. 100 – 150 Pa). Dit betekent dat het slib vrij makkelijk erodeert. Echter, bij het baggerproces moet water worden toegevoegd om het slib op te kunnen zuigen. Daardoor verkleint de sedimentconcentratie in de beun, tot bulkdichtheden van 1300 – 1400 kg m^{-3}.
De valsnelheid van het sediment (2 – 8 mm s^{-1}) blijkt erg hoog, terwijl de gelling concentratie (100 – 150 kg m^{-3}) gemiddelde waardes heeft. De gelling concentratie is een maat voor het

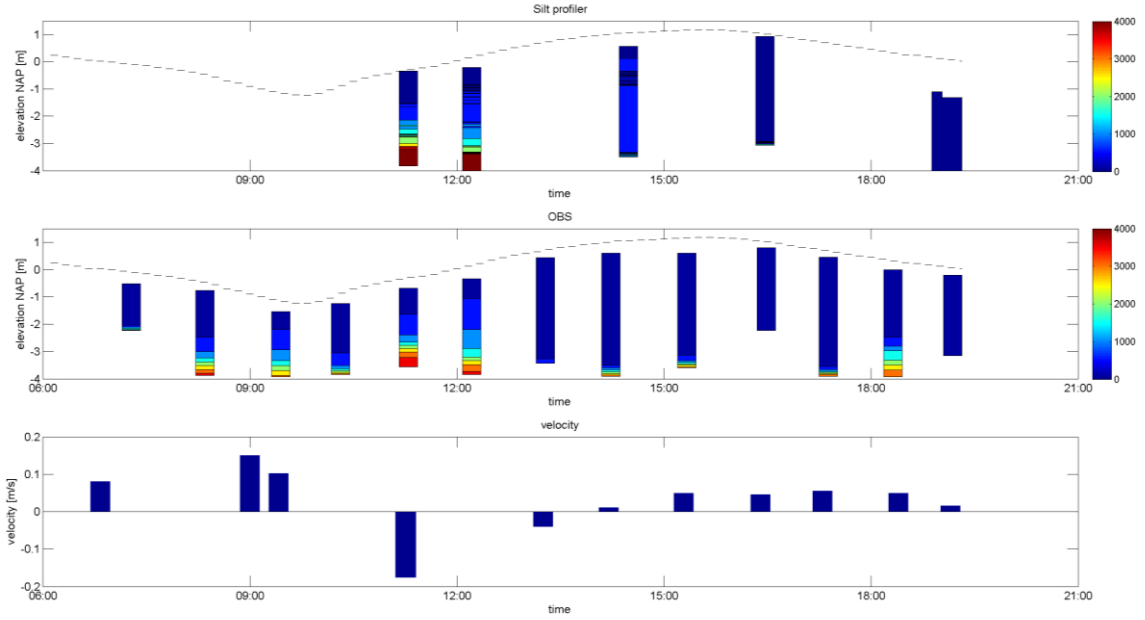
slibgehalte in fluid mud. Als de gelling concentratie hoog is, blijft het slib tot hoge concentraties mobiel. Dit blijkt dus niet het geval. De grote valsnelheid van het slib betekent dat snelle sedimentatie rond kentering kan plaatsvinden. Bij hoogwater kan een slibdeeltje binnen het tijdsbestek van één uur vanaf de bovenzijde van de waterkolom de geulbodem bereiken.

Het consolidatiegedrag wijkt niet af van ander slib in de Nederlands wateren, met een consolidatie-coëfficiënt ter grootte van 10^{-9} – 10^{-8} m^2 s^{-1}. Ook de Atterbergse grenzen, die de sterkte-eigenschappen van het slib samenvatten, zijn vergelijkbaar met eerdere waardes gevonden in het Eems-Dollard estuarium. Dit is verwacht, omdat het slib in de Waddenzee en in het Eems-Dollard estuarium dezelfde oorsprong hebben. Deze overeenkomsten geven vertrouwen in de waardes gevonden in deze studie.

In paragraaf 4.6 gebruiken wij de in het laboratorium gevonden waarden om een verdere analyse van de sedimentdynamiek in en rondom de vaargeul te maken.

4.4 Slibconcentraties in de vaargeul.

Op 14 april 2016 zijn slibconcentratiemetingen in punt B met een OBS gemeten, en in de punten A, B en C met een siltprofiler. De resultaten van de meting in punt B zijn gepresenteerd in Figuur 4.3. De OBS-verticalen vertonen slibconcentraties van 0,1 tot 0,3 g/L in het grootste deel van de waterkolom. Nabij de bodem lopen deze op tot 3 – 5 g/L. Alle concentratieverticalen zijn erg gelaagd; deze gelaagdheid is wat groter bij lage snelheden en wat minder bij hoge snelheden. Dit soort hoog geconcentreerde en gelaagde slibverticalen zijn kenmerkend voor geulen met grote aanslibbing en een opmaat voor de vorming van fluid mud. Ze zijn echter niet indicatief voor het daadwerkelijk voorkomen van fluid mud. Dit soort slibsuspensies kan veel grotere afstanden met de getijstroming afleggen dan fluid-mudlagen.

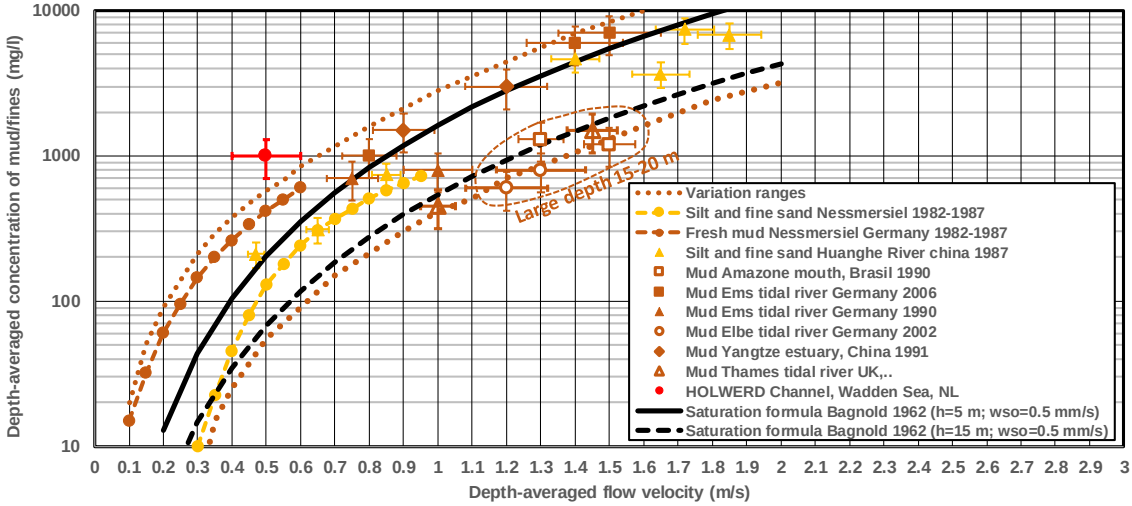


Figuur 4.3 Verticale slibconcentratie metingen in punt B op 14 april 2016 met siltprofiler (bovenste grafiek) en OBS (middelste grafiek). De onderste grafiek geeft de stroomsnelheid weer, met vloedstroom negatief en ebstroom positief. Streepjeslijnen geven de waterstand aan. De bodemhoogte in de slibprofielen varieert omdat de meetboot regelmatig moest uitwijken voor scheepvaart. Merk op dat de slibconcentraties afgekapt zijn voorbij het meetbereik van de instrumenten, dat op ca. 5 g/L ligt voor de siltprofiler, en op ca. 4 g/L voor de OBS.

Het blijkt dat de slibconcentraties gemeten met de OBS en siltprofiler vrijwel gelijk zijn, behalve nabij de bodem om 11:18 en 12:13 uur. Op die tijdstippen vertoont de siltprofiler een zeer sterke sprong in concentratie tot groter dan 5 g/L. Waarschijnlijk zijn die concentraties veel groter dan 5 g/L, omdat de sensor van de siltprofiler hogere concentraties niet kon meten.

De grote sprong in slibconcentratie gemeten met de siltprofiler kan duiden op de aanwezigheid van fluid mud. Dat zou dus fluid-mudlaagdiktes van ca. 0,5 m suggereren. Consolidatie van zulke dikke lagen fluid mud duurt zeker een week, ook voor het snel consoliderend slib dat in de vaargeul wordt gevonden. Het is daarom opmerkelijk dat de siltprofiler op tijdstippen daarvoor en daarna geen fluid mud detecteert. Wij vermoeden daarom dat de metingen niet wijzen op de aanwezigheid van fluid mud (zie ook paragraaf 4.5).

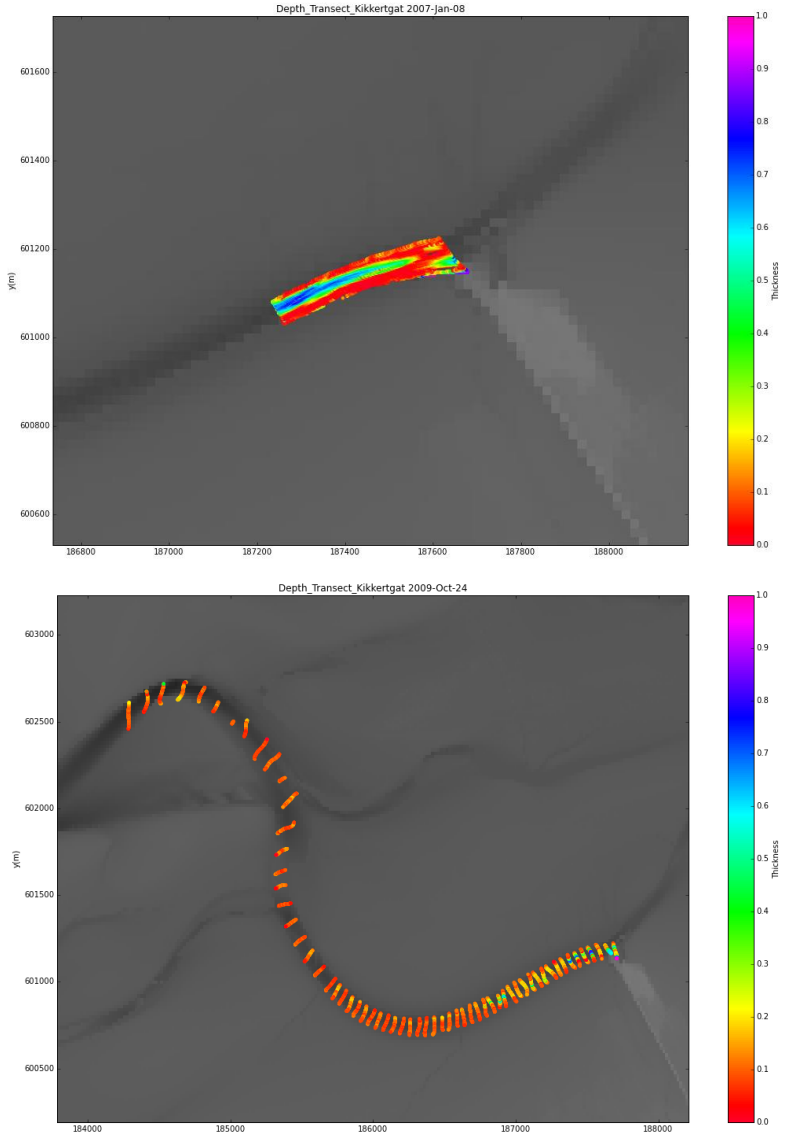
Figuur 4.4 toont de slibconcentraties tijdens de maximale vloedstroom in de vaargeul bij Holwerd in vergelijking met slib- en fijn zandconcentraties in andere estuaria (Europa, Zuid-Amerika en Azië). De meetgegevens zijn in zeer goede overeenstemming met de verzadigingsformule van Bagnold (1962), zie ook Winterwerp (2006) en Van Rijn (2007). De slibconcentraties bij Holwerd zijn aanzienlijk groter dan de bovengrenswaarde van het variatie-interval van de andere metingen, wat er op kan duiden dat de slibconcentraties bij Holwerd niet volledig op natuurlijke wijze tot stand komen, maar deels het gevolg zijn van de baggeractiviteiten (“op stroom zetten” van het baggermateriaal tijdens eb).



Figuur 4.4 Slib- en fijn zandconcentraties in getijgeulen in Europa, Zuid-Amerika en Azië

4.5 Voorkomen van fluid mud

Fluid mud kan gedetecteerd worden met akoestische meetmethodes, d.w.z. met een dubbel-frequentie echolood (33 en 210 kHz). Het hoogfrequente meetsignaal geeft de bovenste grens van een fluid mud laag weer, het laagfrequente signaal de ondergrens. Metingen tijdens onze meetcampagne tonen diepteverschillen tussen hoogfrequent en laagfrequent signaal in de orde van enkele centimeters tot enkele tientallen centimeters. Grotere verschillen worden ook waargenomen, maar lijken deel uit te maken van de ruis, omdat ook grote negatieve verschillen (laagfrequente diepte kleiner dan hoogfrequente) worden waargenomen. Gemiddeld dringt het hoogfrequente signaal 5 cm minder diep door dan het laagfrequente, en in die verschillen is geen patroon in ruimte en tijd te ontdekken. We denken dat hierin geen indicatie voor het voorkomen van fluid mud kan worden gevonden.



Figuur 4.5 Enkele voorbeelden van in het verleden (januari 2007; oktober 2012) gemeten fluid-mudlagen; deze metingen werden uitgevoerd met een dubbelfrequentie-echolood (210 kHz voor de top van de fluid-mudlaag en 33 kHz voor haar onderkant. De figuren tonen het verschil in dieptemeting tussen beide. De bovenste figuur is beperkt tot de onmiddellijke omgeving van de pier te Holwerd, de onderste figuur beslaat een flink deel van de oostelijke vaargeul, maar detecteerde enkel verschillen die op fluid mud kunnen wijzen in de omgeving van de pier.

Sommige historische lodinggegevens tonen echter een verschillend patroon, zoals geïllustreerd in Figuur 4.5 voor metingen in januari 2007 en oktober 2009 . Fluid-mud werd in het verleden met enige regelmaat gemeten. Voor 2010 kwamen diktes ter grootte van 1 m dikwijls voor, zij het alleen in de eerste paar honderd meter van de vaargeul. Wij vermoeden dat die dikke fluid-mudlagen door de toenmalig waterinjectie baggertechniek (WID) werden gegenereerd. Metingen na 2010 tonen geen tot zeer dunne lagen fluid mud (maximaal ca 10 cm). Deze lage waardes komen overeen met de visuele inspectie van het studieteam in 2016.

Uit bovenstaande analyse blijkt dat momenteel geen evidentie bestaat voor het voorkomen van dikke lagen fluid mud. Anekdotische informatie over zulke voorkomens zijn mogelijk gebaseerd op waarnemingen tijdens het waterinjectiebaggeren dat voor 2010 werd toegepast. Omdat het onwaarschijnlijk is dat fluid-mudlagen met diktes van 0,5 – 1 m kortstondig kunnen voorkomen, achten wij het onwaarschijnlijk dat de siltprofilerdata in Figuur 4.3 inderdaad fluid mud hebben gedetecteerd. In de voorliggende studie nemen wij daarom aan dat fluid mud momenteel misschien met diktes van een paar tientallen cm voorkomt in de buurt van de aanlegsteiger. Elders in de vaargeul veronderstellen wij dat geen fluid mud voorkomt, of tenminste niet op min of meer permanente basis.

4.6 Aanslibbingssnelheden: een kwantitatieve verkenning

Uit de diverse onderzoekingen in het veld en het laboratorium beschikken we over volgende informatie:

- Een schatting van de sedimentatiesnelheid in de geul, zoals kan worden afgeleid uit de baggerintensiteit en het baggerschema. In een cyclus van ongeveer 9 dagen wordt uit de randen van de geul in de oostelijke 3 km een hoeveelheid van ongeveer 6000 m^3 slib met een droge dichtheid van ongeveer 425 kg m^{-3} gebaggerd.
- Observaties over de sedimentsamenstelling van de geul: het betreft goed geconsolideerd slib met een droge dichtheid van ongeveer 850 kg m^{-3}, en met een zandfractie rond 25% op volumebasis.
- Observaties over de eigenschappen van het sediment, o.m. Atterbergse limieten, sterkte van het slib, consolidatieparameter, gelling concentratie.
- Observaties, met ADCP, OBS en silt meter, van stroomsnelheid en slibconcentratie in het water van de geul, langs verschillende dwarsraaien en over een getijcyclus.

De vraag is of deze verschillende elementen met elkaar een consistent beeld kunnen vormen van de slibdynamiek in de geul. De vragen die daarbij kunnen worden gesteld zijn:

- Is de flux van sediment door de dwarsraaien van de geul voldoende om te verklaren hoeveel sediment er in 9 dagen accumuleert (en in één cyclus wordt weggebaggerd)?
- Is de samenstelling, droge dichtheid en sterkte van het sediment in overeenstemming met de korte cyclus, m.a.w. kan dit sediment in deze korte tijd deze mate van consolidatie bereiken?
- Is de sterkte van het sediment, zoals in het laboratorium gemeten voor verschillende fasen van de consolidatie (zwak bij ‘gelling concentratie’, snel sterker wordend daarna) in overeenstemming met de noodzakelijke cyclus van enerzijds herhaaldelijk resuspenderen en transport (nodig om de flux in de geul hoog genoeg te houden), en anderzijds snel consolideren na definitieve sedimentatie (nodig om de hoge droge dichtheid te verklaren)?

Met een model berekenen we de volgende grootheden (zie Annex B voor berekening):

1. Uit de baggergegevens de sedimentatiesnelheid (na consolidatie) van het sediment in de geul, als 6 m $jaar^{-1}$, of 5000 kg m^{-2} $jaar^{-1}$.
2. Uit de ADCP en OBS observaties de sedimentflux opwaarts in de geul (in punt B) als 8 10^8 kg $jaar^{-1}$, waardoor de potentiële sedimentatie (bij 100 % trapping efficiency) 16000 kg/m^2 $jaar^{-1}$ zou kunnen bedragen. Dit is een factor 3 hoger dan de gerealiseerde sedimentatie, en lijkt de correcte orde van grootte omdat bij eb ook weer materiaal de geul verlaat (de efficiëntie is geen 100 %).
3. Uit de sedimentatiesnelheid (zie punt 1 hierboven) en de in het lab bepaalde gelling concentratie, berekenen we dat er per getijdeperiode 6 cm netto sedimentatie optreedt.

4. Uit de consolidatie-eigenschappen van het slib leiden we af dat een laagje met dergelijke dikte volledig consolideert in een periode van 19 h. Het laagje heeft dan zijn eindsterkte bereikt. Bij de gelling concentratie is de bezwijksterkte van het slib ongeveer 0,1 Pa, bij 450 kg m^{-3} ongeveer 60 Pa en als volledig geconsolideerd (850 kg m^{-3}) meer dan 2 kPa. Dit betekent dat de afzettingen snel erosieweerstand opbouwen, en dus inderdaad kunnen accumuleren.

Bovenstaande schattingen maken het aannemelijk dat het slib aangevoerd wordt door de geul. Een deel van die aanvoer bezinkt tijdens vloed (en mogelijk ook tijdens eb), in het bijzonder rond kentering. De afgezette lagen zijn gedeeltelijk beschikbaar voor resuspensie tijdens eb, maar consolideren snel, en bouwen snel sterkte op, zodat ze tevens aanzienlijk kunnen accumuleren.

Er zijn geen inconsistenties tussen de gegevens gevonden. De schattingen van fluxen en snelheden zijn gebaseerd op slechts één dag van intensief waarnemen, maar komen, binnen de meetfout, goed overeen met de observaties uit de baggerpraktijk die over meerdere jaren zijn verzameld.

4.7 Samenvatting: slibprocessen in de vaargeul

Het sediment in en rondom de vaargeul bestaat uit zand (20-25 %) en slib. Er is weinig verschil tussen de monsters die op verschillende locaties en verschillende momenten zijn genomen. De monsters uit en naast de vaargeul hebben een bulk dichtheid van 1500 – 1600 kg m^{-3}. Dit wijst er op dat het slib geconsolideerd is. Tijdens het baggeren wordt water bijgemengd, tot een bulkdichtheid van 1300-1400 kg m^{-3}. De eigenschappen van het slib maken het aannemelijk dat het slib snel kan sedimenteren en consolideren, en maken het voorkomen van fluid mud weinig waarschijnlijk.

Wij hebben in de beschikbare metingen geen aanwijzingen gevonden voor een systematische en belangrijke invloed van fluid mud op de sedimentdynamiek in de vaargeul. Geringe verschillen (5-10 cm) tussen de dieptemetingen met hoogfrequent en laagfrequent echolood worden regelmatig waargenomen, maar alleen nabij de aanlegsteiger zijn in het verleden dikkere lagen fluid mud gevonden. Deze voorkomens houden waarschijnlijk verband met het water-injectie baggeren dat ter plaatse gebeurt / gebeurde. Het slib sedimenteert en consolideert snel, dus eventuele fluid-mudlagen kunnen niet persistent zijn, en geen grote afstanden afleggen.

Veldmetingen tonen aan dat het slib bij vloed de geul binnenkomt als een hoog geconcentreerde bodemlaag, die zich snel met het getij kan verplaatsen. De dieptegemiddelde slibconcentraties zijn zeer hoog in vergelijking met andere systemen, wat wijst op de rol die het baggeren (en terugkeren) van het sediment speelt in de slibdynamiek.

Een samenvattende berekening toont aan dat veldmetingen, laboratoriumbepalingen van slibeigenschappen en langjarige observaties van het baggerwerk onderling consistent zijn, en gezamenlijk de conclusie ondersteunen dat slib snel landwaarts wordt getransporteerd door de geul, en snel in de geul sedimenteert en consolideert.

4.8 Conclusies van de empirische studies in Hoofdstukken 2-4: de oorsprong van het baggerbezwaar

Door grootschalige morfologische ontwikkelingen en verruiming van de vaargeul ten behoeve van de scheepvaart is de vaargeul erg veel dieper en breder dan haar evenwichtsafmetingen. De snelheden in de zuidelijke geul zijn daarom erg laag, wat de vorming van fluid mud mogelijk maakt. Toch wijzen historische metingen niet op een systematisch belang van fluid mud in de slibdynamiek in de vaargeul. De eigenschappen van het sediment, zoals gemeten in het laboratorium, maken het voorkomen van fluid mud ook niet waarschijnlijk.

De meest oostelijke kilometer van de vaargeul loopt door de voet van het slik ten westen van de aanlegsteiger. De door de veerboot opgewekte zuiging en hek- en boeggolf eroderen het slik effectief. Sediment dat op slik en plaat sedimenteert wordt daardoor de geul ingebracht. Als gevolg daarvan is de effectieve breedte van de geul voor slibinvang veel groter dan de actuele vaarweg. Door de lage stroomsnelheden in de geul en haar grote breedte is de vangstefficiëntie (trap efficiency) in de geul hoog: een groot deel van het slib dat in dit deel van de geul terecht komt kan daar sedimenteren.

Het baggeronderhoud vindt vooral plaats over de meest oostelijke drie kilometer van de vaargeul. Vanaf 2011 wordt het onderhoud met een sleephopperzuiger uitgevoerd. Dit schip baggert vooral langs de rand van de vaargeul. Het midden van de vaargeul wordt door de veerboot zelf op diepte (en zelfs op geringe overdiepte) gehouden, waarschijnlijk mede door de waterjet waarmee het schip wordt voortgestuwd. Twee derde van het gebaggerde slib wordt in de ebgeul direct na het te baggeren traject tijdens eb geloosd als een dikke slurry met een bulk dichtheid van ca. 1300 kg m^{-3}. Deze slurry bezinkt snel ter plaatse, en vormt een zachte sliblaag, die makkelijk erodeerbaar is.

De hoeveelheid materiaal in suspensie in het Dantziggat vertoont geen correlatie in de tijd met de totale hoeveelheid gebaggerd sediment. Dit suggereert dat het materiaal dat in de Zuiderspruit wordt gestort wel wordt opgenomen in de dynamiek van gesuspendeerd materiaal van het Dantziggat als geheel, maar het materiaal dat op ebstroom wordt geloosd niet. We vermoeden dat dit materiaal in een lokale cyclus van sedimentatie en baggeren, met een korte tijdscyclus, is opgenomen.

De ebgeul en het volgende deel van de vaarweg zijn sterk ebdominant. Desalniettemin zal het geloosde sediment niet ver komen, omdat het snel bezinkt. Dit betekent dat het geloosde sediment in de buurt van de baggerlocatie blijft, en makkelijk kan terugstromen, zij het moeilijk via de ebgeul zelf.

Het sediment van de vaargeul bevat een aanzienlijke (ongeveer 25 %) zandfractie. We vermoeden dat dit zand niet door de geul wordt getransporteerd, maar via de platen en de plaat-geul uitwisseling in de vaargeul terechtkomt. Dit zandige materiaal draagt bij aan de snelle consolidatie van het slib in de vaargeul.

De ontwikkeling van de bodemligging in de eb-/vloedschaar waar het gebaggerde sediment verspreid wordt is sinds 1993 sterk veranderd. De ebgeul (waar de stortingen tijdens eb gestort wordt – “op stroom zetten”) bocht sterk uit, verdiept sterk en vernauwt enigszins. De vloedgeul is sinds 2011 sterk gedegenereerd. De uitbochting van de ebgeul is sterker en gaat verder door dan in andere ebgeulen in het gebied, wat er op wijst dat de natuurlijke evolutie naar een overname van de rol van de ebgeul door de vloedgeul is tegengehouden. Dit kan worden verklaard als gevolg van de bagger- en stortactiviteiten, die enerzijds de accumulatie van sediment in de ebgeul tegenhouden (de ebgeul wordt diep en ‘glad’ gehouden en kan

daardoor moeilijker degenereren) en anderzijds extra sediment beschikbaar maken voor het aanzanden van de vloedgeul. Mogelijk spelen ook de jets van de veerboot nog een rol bij het uitbochten van de ebgeul.

In de oostelijke drie kilometer van de vaargeul, het traject waar gebaggerd wordt, verspreidt het slib zich snel in de vorm van een hooggeconcentreerde suspensie nabij de bodem bij concentraties van 3 – 5 g/l. In dit deel van de geul is de waterbeweging sinds 1993 steeds vloeddominanter geworden. Deze suspensie bezinkt op plaatsen waar de stroomsnelheid kleiner wordt. Tijdens dit bezinken wordt tijdelijk fluid mud gevormd. Deze fluid mud consolideert snel tot dichtheden van 1500 – 1600 kg m^{-3}, wat het sediment is dat door de sleephopperzuiger bij die dichtheid gebaggerd wordt. Dit beeld wordt gedragen door de veldmetingen, historische baggercijfers en de resultaten van de laboratoriumgegevens. Bovendien blijken de verschillende data onderling consistent, hetgeen de geloofwaardigheid van de resultaten uiteraard vergroot.

Ten slotte wordt opgemerkt dat de snelle stijging in baggercijfers sinds 2010 bedrieglijk kan zijn. Voor 2011 werd een onbekende (maar vermoedelijk niet zeer hoge) hoeveelheid sediment verwijderd d.m.v. water-injectiebaggeren. De hoeveelheid verwijderd sediment zit niet in de officiële baggercijfers. De baggercijfers van voor 2011 kunnen daarom een onderschatting zijn van het werkelijke baggerprobleem; misschien is de vertoonde stijging in baggercijfers geleidelijker en eerder ingezet.

De combinatie van:

1. natuurlijke morfologische ontwikkelingen, i.e. een geuldoorsnede ruimer dan haar evenwichtswaarde,
2. daarenboven verruiming van de vaargeul ten behoeve van de scheepvaart,
3. de grote effectieve breedte van de geul, omdat deze door de voet van het slik loopt (waarbij de veerboten via de extra retourstroom sediment loswoelen van het slik dat richting geul wordt getransporteerd),
4. het “voor de deur storten” van het gebaggerde slib,
5. het tegenhouden van de degeneratie van de ebgeul, waardoor de natuurlijke evolutie van het eb-vloedsysteem (doorbraak vloedgeul, degeneratie ebgeul) wordt omgekeerd.

verklaart het grote baggerbezwaar. Waarschijnlijk wordt bij de huidige bagger-stortstrategie een relatief kleine hoeveelheid baggerslib vrij snel rondgepompt. In tegenstelling tot eerdere studies veronderstellen wij nu dat fluid mud geen groot probleem vormt.

5 Modelkalibratie en vaststellen criteria voor berekeningen

5.1 Inleiding

In 2015 zijn modelverkenningen gemaakt met een voorlopig hydrodynamisch model, dat nog niet was gekalibreerd aan veldwaarnemingen. Om de betrouwbaarheid van de modelresultaten te verhogen, is aanbevolen om (1) de bodemligging in 2016 op te nemen en te gebruiken in het model en (2) veldwaarnemingen aan stroomsnelheden en waterstanden te verzamelen en te gebruiken voor modelkalibratie.

In dit hoofdstuk worden de resultaten beschreven van de modelkalibratie, om daarmee aan te geven welke betrouwbaarheid de modelresultaten hebben. Vervolgens wordt kort beschreven welke output met het model is gegenereerd, vergelijkbaar voor alle varianten.

Voor de technische beschrijving van het gebruikte model, het modeldomein, de randvoorwaarden en meegenomen processen verwijzen wij naar het rapport over de werkzaamheden in 2015 (Villars et al., 2016).

5.2 Veldwaarnemingen aan bodemligging, stroomsnelheid en waterstand in 2016

Lodingsgegevens voor de veerbootroute en omgeving zijn aangeleverd door RWS als 10 m grids. Waarnemingen voor de kwelders zijn niet opnieuw uitgevoerd, maar gebaseerd op LIDAR hoogtemetingen uit 2014.

Op 14 april 2016 is door Aquavision een uitgebreide veldcampagne uitgevoerd, waarin gedurende ruim een volledige getijcyclus met een ADCP die op het schip was gemonteerd, continu opnamen van stroomsnelheidsprofielen zijn gemaakt. Het schip voer heen en weer over het gebaggerde traject van de vaargeul, en voerde ongeveer eenmaal per uur een dwarstraject uit op drie plaatsen langs de geul. Waarnemingen die door allerlei verstoringen onbetrouwbaar waren, bv. door luchtbellen in de waterkolom na het passeren van een schip, zijn uit de dataset verwijderd. Waterstandsgegevens voor deze dag zijn verkregen uit een tijdelijk geplaatst waarnemingsstation in Holwerd.

Details over de veldcampagne en de post-processing van de data worden beschreven in van Kessel (2016). Voor de modelkalibratie is gebruik gemaakt van de metingen over de transecten. Daarbij is transect A, dat zeer dicht bij de modelgrens ligt en daardoor minder betrouwbare modelresultaten oplevert, alleen globaal meegenomen.

5.3 Aanpassingen in het model

De belangrijkste factor die tijdens de kalibratie is aangepast is de randvoorwaarde die het geneste model met hoge resolutie verbindt met het bovenliggende model met matige resolutie. In de modelruns van 2015 was deze randvoorwaarde opgegeven als een uniforme waterhoogte over de gehele modelgrens. Die randvoorwaarde vlakte de hoogteverschillen in de waterkolom uit tussen de geulen en de wadplaten, en zorgde daardoor voor een vervorming van de stroomsnelheden in de geulen. In het gekalibreerde model zijn de randvoorwaarden met zeer hoge resolutie doorgegeven, zodat hoogteverschillen tussen het waterniveau in geulen en wadplaten meespelen als randvoorwaarde in het geneste model met hoge resolutie.
De ruwheid van de bodem is gevarieerd in een gevoeligheidsanalyse, maar op dezelfde waarde gehouden als in het model dat in 2015 is gebruikt.

De horizontale viscositeitscoëfficiënt is in de nieuwe modelruns lager ingesteld dan in de modelruns van 2015, en is daardoor teruggebracht naar standaardinstellingen voor dit type modellen. Het effect van deze parameter op de resultaten was gering.

5.4 Modelkalibratie: Resultaten

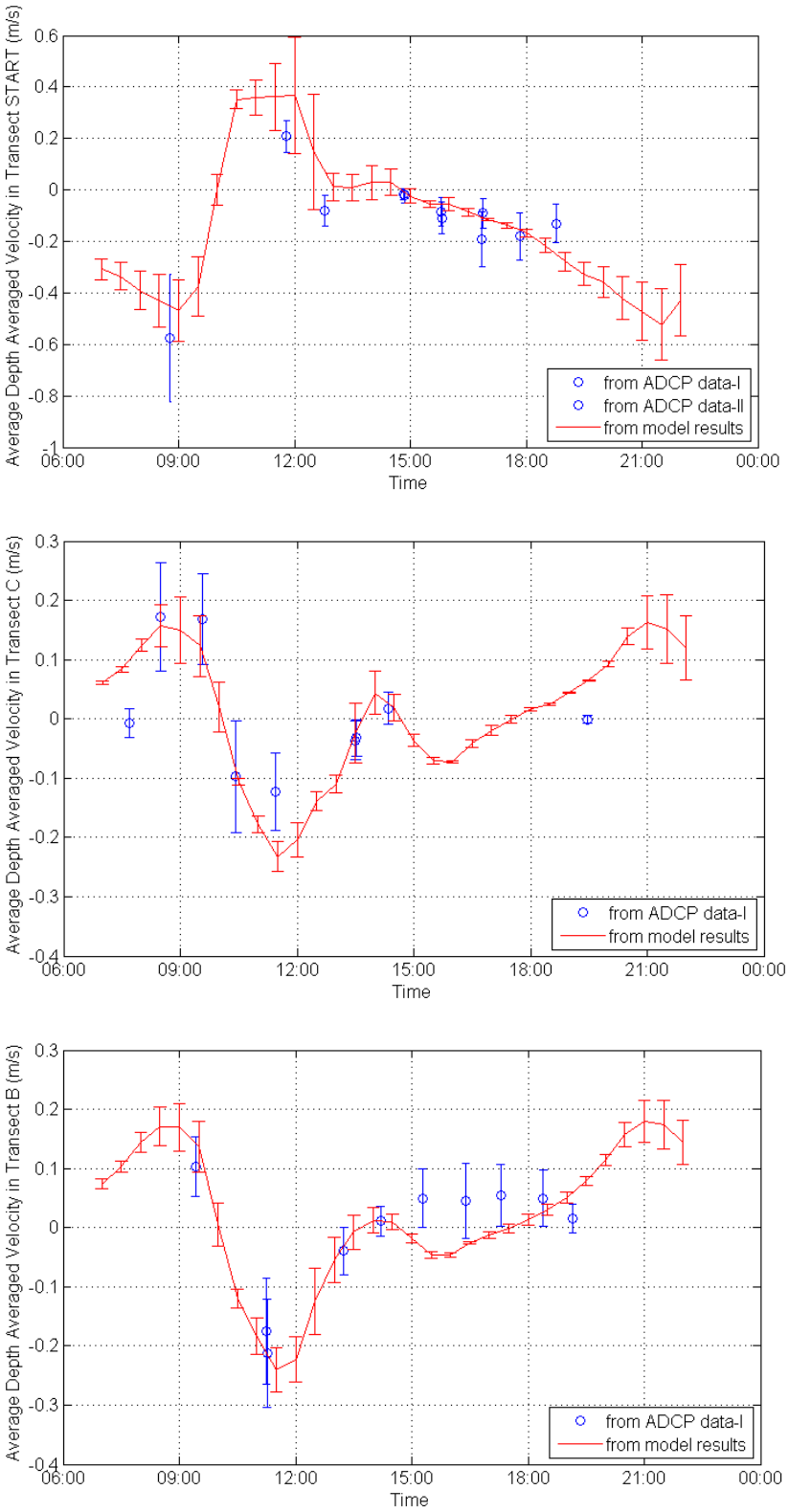
De vergelijking tussen modelresultaten en veldgegevens voor dieptegemiddelde snelheid over het dwarsprofiel op raaien Start, C en B (zie Figuur 4.1 voor positie van de raaien) wordt gegeven in Figuur 5.1. Er wordt een goede overeenkomst tussen modelresultaten en waarnemingen gevonden, zowel qua grootte als qua fase. Behalve stroomsnelheden zijn ook waterfluxen over deze raaien, en waterhoogtes, als testvariabelen meegenomen. Ook voor deze variabelen was de overeenkomst tussen model en observaties uitstekend.

5.5 Selectie van modeluitvoer voor evaluatie van varianten

Alle resultaten zijn verkregen met een 2-D simulatie met het gekalibreerde Delft3D model. Het model is morfostatisch en geeft niet aan welke morfologische evoluties kunnen worden verwacht na aanleg van de varianten.

Op basis van de systeembeschrijving in het eindrapport van de activiteiten in 2015 (Villars et al., 2016), en de inzichten op basis van veldwaarnemingen als uiteengezet in Hoofdstuk 2 van dit rapport, zijn uit de modelresultaten de volgende samenvattende parameters afgeleid:

- Absolute hoogte van de pieksnelheden tijdens eb en vloed. Voldoende hoge stroomsnelheden zijn nodig om vorming van fluid mud te verhinderen, en om sediment te kunnen transporteren.
- Verhouding tussen pieksnelheden bij eb en vloed. Sedimenttransport neemt sterk niet-lineair toe met stroomsnelheid. Als het water bij vloed sneller stroomt dan bij eb, is er meer landwaarts dan zeewaarts sedimenttransport te verwachten, en omgekeerd bij ebdominantie in stroomsnelheid.
- Getijvolumes bij vloed en eb, en hun onderlinge verhouding. De asymmetrie tussen vloed- en ebvolumes is van belang voor de slibbalans van het systeem. Voor een gelijke stroomsnelheid bij vloed en eb, heeft vloeddominantie in getijvolume als gevolg dat meer sediment het systeem wordt ingebracht dan er het systeem verlaat; ebdominantie heeft het omgekeerde effect; merk op dat het effect kan gemoduleerd worden door asymmetrie in stroomsnelheden.
- Voorkomen van dwarsstromen over de geul. Als de geul bij hoge waterstanden niet in het verlengde ligt van de algemene stromingsrichting in de omgeving, zullen de dwarsstromen leiden tot lateraal sedimenttransport naar de geul. Dat is ongunstig omdat het de sedimentaccumulatie in de geul verhoogt.



Figuur 5.1 Resultaten van de modelkalibratie. Vergelijking van dieptegemiddelde snelheden uit de ADCP waarnemingen (blauwe punten) met de gekalibreerde modelruns (rode lijnen). Onzekerheidsmarges geven de ruimtelijke variatie (standaarddeviatie) van gemeten en berekende snelheden over het dwarsprofiel weer.

6 Beschrijving van de varianten

6.1 Inleiding

Op basis van de eerdere analyse in 2015, waarin reeds een aantal varianten voor bochtafsnijding waren onderzocht, zijn vijf varianten opgesteld voor nadere analyse met het gekalibreerde model. Het doel van het onderzoek naar de varianten voor bochtafsnijding is om een bochtafsnijding te beschrijven die (a) de vaartijd verkort, door een kortere en rechtere vaarweg te keien; (b) het baggerbezwaar vermindert, door hogere stroomsnelheden en minder vloeddominantie in de stroming te creëren en (c) de aanlegkosten en de ecologische effecten minimaliseert door zo goed mogelijk bestaande geulen te volgen. Uitgaande van deze criteria is een aantal varianten gekozen, waarvan op het eerste gezicht positieve gevolgen konden worden verwacht.

In dit hoofdstuk beschrijven wij de verschillende varianten voor de verkorting van de vaarweg Holwerd-Ameland. Uitgaande van de huidige bathymetrie (2016), en het model dat is gekalibreerd op de veldwaarnemingen in 2016, zijn de hydrodynamische effecten van deze varianten doorgerekend. De varianten zijn geïmplementeerd door veranderingen door te voeren in de bodemligging van het model, waarna het model voor dezelfde periode, dezelfde externe forcering en dezelfde initiële condities is doorgerekend.

In dit hoofdstuk beschrijven wij de opzet van de varianten, met een korte toelichting op de onderliggende motivering voor het opstellen van de variant, details over de implementatie in het model, en een bespreking van de belangrijkste effecten op het stromingspatroon, de piekstroomsnelheden langs de vaarweg, en het getijvolume over een aantal vaste raaien dwars over de vaargeul. Die getijvolumes en piekstroomsnelheden worden vergelijkend over de verschillende varianten beschreven aan het eind van dit hoofdstuk. Ruimtelijke stromingspatronen van de eb- en vloedstroom worden getoond op het ogenblik dat de piekstroomsnelheden van eb en vloed worden bereikt. Deze tijdstippen verschillen licht tussen de verschillende varianten.

Een nadere afweging van de voor- en nadelen van de verschillende varianten wordt gegeven in Hoofdstuk 7. Daarvoor levert dit hoofdstuk de feitelijke informatie aan over aanleg, effect op vaarlengte, stroming en transport.

6.2 Variant REF[1]

Algemene opzet

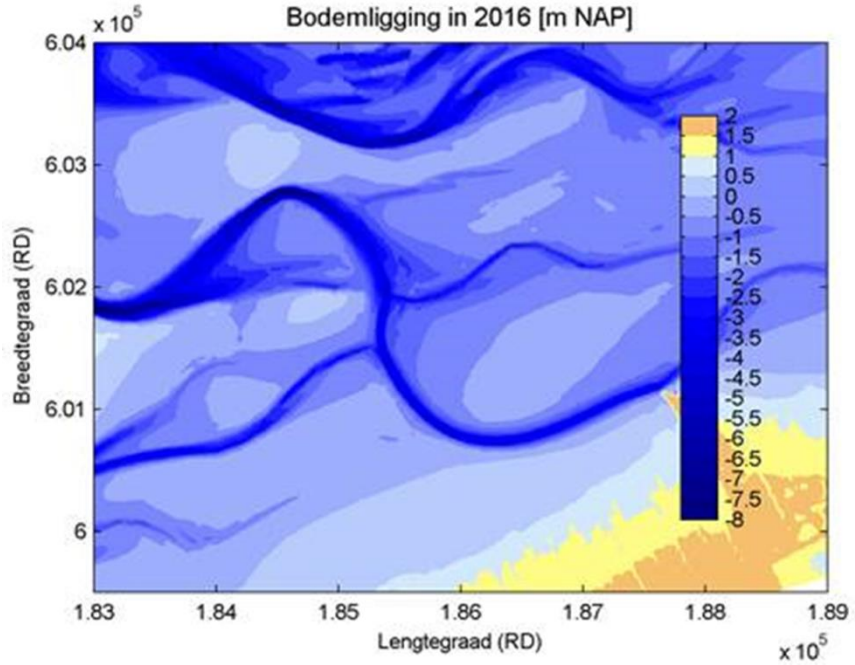
Deze variant is de huidige situatie van de vaargeul, zonder ingreep (Figuur 6.1). Hij fungeert als referentie voor de andere varianten. Autonome ontwikkeling van de referentiesituatie is niet berekend, omdat de modellering geen morfologische evolutie voorspelt. Er worden echter wel aanzienlijke veranderingen verwacht. Sinds 2011 is bijvoorbeeld de ebgeul ten noorden van De Punt aanzienlijk uitgebocht, terwijl de vloedgeul is gedegenereerd. Als geheel is het getijtransport door de eb-vloedschaar verminderd, wellicht ten voordele van het Dantziggat dat zich sterker heeft uitgediept.

Figuur 6.1 Algemene opzet van de variant REF: huidige situatie met autonome ontwikkeling

Implementatie

De bathymetrie 2016 is gebruikt in het model, zonder verandering (Figuur 6.2).

[1] *In deze paragraaf bespreken wij de variant REF uitsluitend voor wat betreft het zuidoostelijke deel van de vaargeul. Dit is de uitgangssituatie waarmee de andere varianten voor dit deel van de vaarweg kunnen worden vergeleken. De variant REF is ook gebruikt als toetssteen voor de afkorting van de Reegeul (variant REEGEUL-OOST), maar de referentiesituatie voor dat deel van de vaargeul zal worden besproken bij de presentatie van de varianten voor dit noordwestelijk deel van de vaargeul*



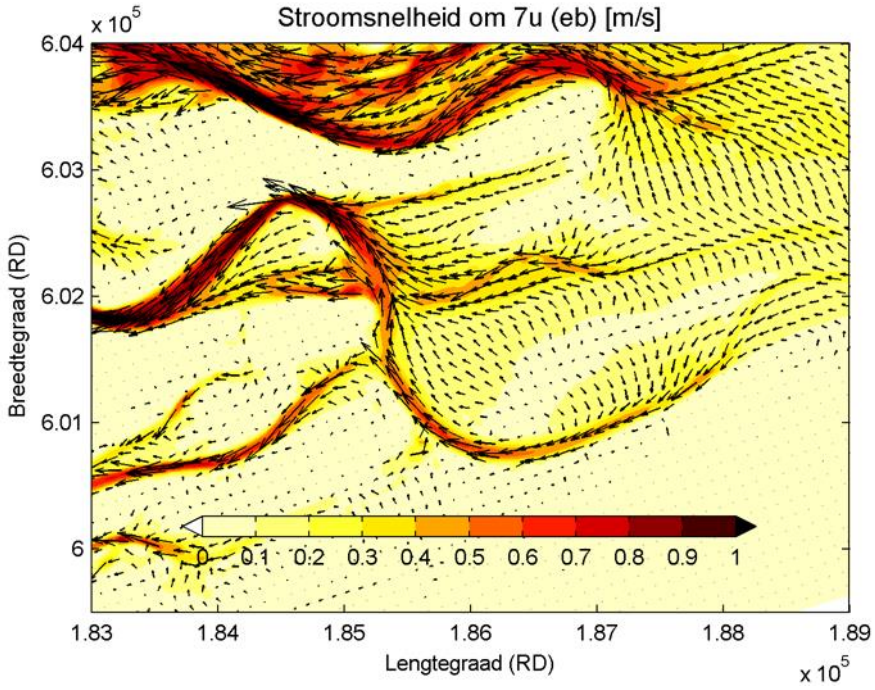
Figuur 6.2 Bodemligging gebruikt in de modelsimulatie van de variant REF

Aanlegbaggerwerk
Geen.

Verkorting vaarweg
Geen.

Stromingspatroon: eb

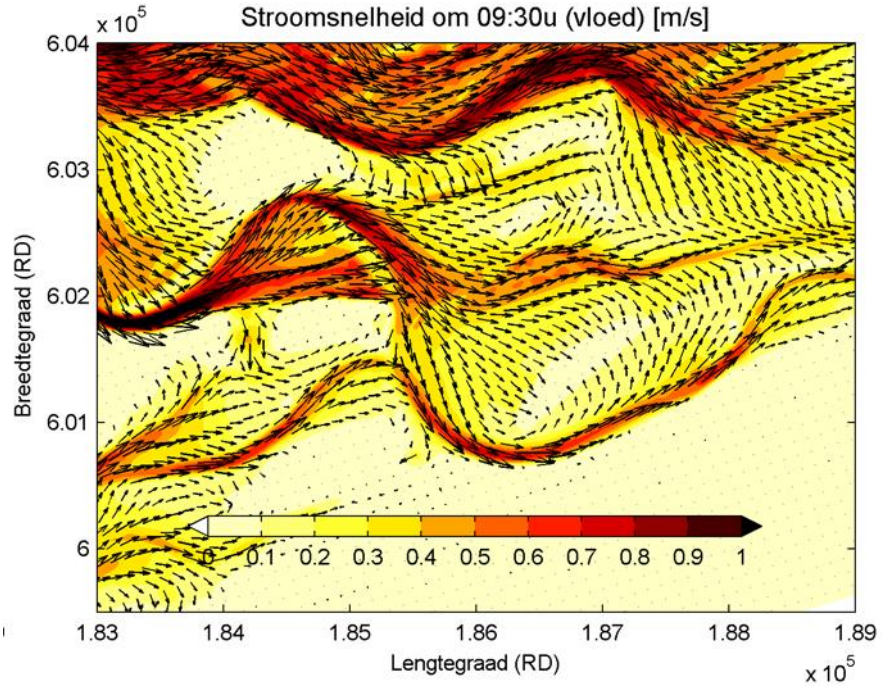
In de eb-vloedschaar ten noorden van De Punt wordt de ebstroom bijna volledig door de ebgeul getrokken (Figuur 6.3). Deze geul is relatief smal maar zeer diep (7-8 m). De vloedgeul is recent veel ondieper geworden; het oostelijk deel ervan is slechts decimeters dieper dan de omringende plaat, westelijk is de diepte ten opzichte van de plaat iets meer dan één meter. Het Dantziggat trekt niet veel ebstroom, in tegenstelling tot de vloedstroom (zie verder). In de laatste kilometers van de vaargeul voor Holwerd neemt de sterkte van de ebstroom af naarmate de geul de pier benadert. Deze afname in de richting Holwerd is sterker voor de ebstroom dan voor de vloedstroom.



Figuur 6.3 Variant REF: stromingspatroon op de piek van de ebstroom

Stromingspatroon: vloed

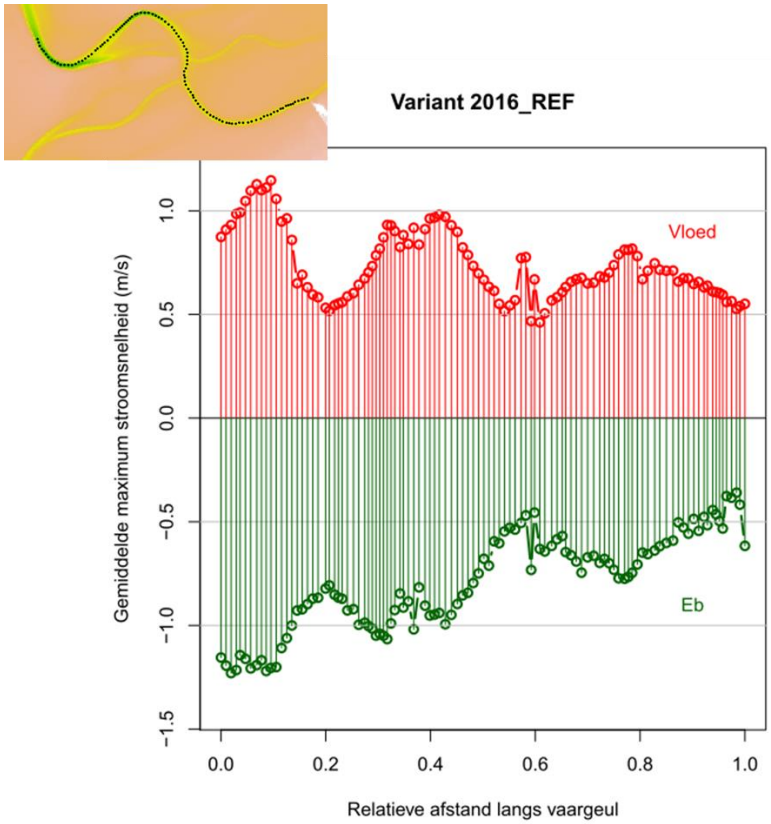
Opvallende kenmerken zijn dat de vloedgeul en omgeving relatief hoge stroomsnelheden laat zien (Figuur 6.4). Dit is vooral 'uitwaaierende' stroom over de wadplaten, omdat de geul zelf ondiep is. De vloedgeul is in het oosten door een drempel gescheiden van de vaargeul, en trekt dus vooral stroom voor de plaatselijke komberging over de platen. De vloedstroom naar het Doorlopend Dantziggat loopt via de ebgeul en via het Dantziggat, dat in vergelijking met eerdere bathymetrieën dieper is geworden en ook meer stroom lijkt te trekken. De vloedstroom naar het oostelijk gedeelte van de vaargeul, tot de pier van Holwerd en voorbij, loopt minstens voor een deel langs het Dantziggat. De drempel ten noorden van het Dantziggat lijkt de vloedstroom in de vaargeul te onderbreken. In vergelijking met eerdere jaren die zijn doorgerekend, lijkt de huidige situatie meer op die van vóór 1958, toen de vaargeul via het Dantziggat liep.



Figuur 6.4 Variant REF: stromingspatroon bij vloed

Piekstroomsnelheden

De piekstroomsnelheden (Figuur 6.5) zijn relatief laag in de eerste westelijke bocht (waar vloed- en ebgeul westelijk samenkomen), ter hoogte van de drempel (waar vloed- en ebgeul oostelijk samenkomen), en in de omgeving van de pier. Elders zijn ze hoger. In het oostelijk deel van de vaargeul is de stroom eerder ebgedomineerd, al zijn de verschillen tussen eb en vloed nooit groot. De drempel is vloedgedomineerd, en dat is ook het geval in het meest oostelijke deel van de vaargeul.



Figuur 6.5 Piekstroomsnelheid bij vloed en eb op controlepunten langs de vaargeul in variant REF. De punten zijn aangegeven op het kaartje. Afstanden langs de vaargeul zijn relatief uitgedrukt als fractie van de totale vaarweg. 0 komt overeen met het meest westelijke controlepunt, 1 met het punt bij de pier van Holwerd. De pieksnelheden van alle gesimuleerde getijen zijn berekend, en het gemiddelde over meerdere spring-doodtijcycli wordt hier getoond.

6.3 Variant VLOEDGEUL

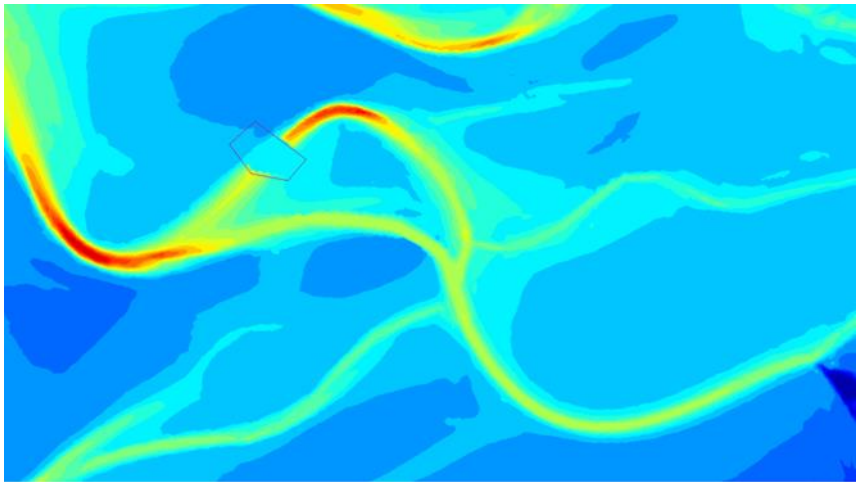
Algemene opzet

In deze variant (Figuur 6.6) wordt de bestaande vloedgeul nabij De Punt (oostelijk deel van de Piet Scheve Plaat) verdiept en met een nieuwe geul verbonden met de bestaande vaargeul. De variant is een versnelling van een verwachte natuurlijke evolutie, waarbij de ebgeul degenereert en de vloedgeul versterkt na voortgaande uitbochting en verlenging van de ebgeul. Merk op dat deze evolutie tussen 1993 en 2011 kon worden geobserveerd door een toenemende erosie van de vloedgeul, maar dat die tussen 2011 en 2016 is omgekeerd, wellicht als gevolg van de bagger- en stortstrategie (zie bespreking in paragraaf 3.2).

Figuur 6.6 Algemene opzet van de variant VLOEDGEUL

Implementatie

De bestaande vloedgeul is uitgebaggerd om aan de nautische eisen te voldoen (Figuur 6.7). Speciale aandacht is besteed aan de aansluiting op de bestaande vaargeul. De bestaande ebgeul is zo volledig mogelijk afgedamd, om te verhinderen dat zij stroming blijft trekken. De opvulling is tot op het niveau van de omringende platen uitgevoerd. De stabiliteit van deze afdamming tijdens en kort na de werken is niet onderzocht. In de realiteit kan worden verwacht dat de zandmassa niet op een identieke wijze in de geul zal liggen (zand verplaatst zich reeds tijdens de werken), maar er kan wel uitgegaan worden van een afdamming op het niveau van de platen.

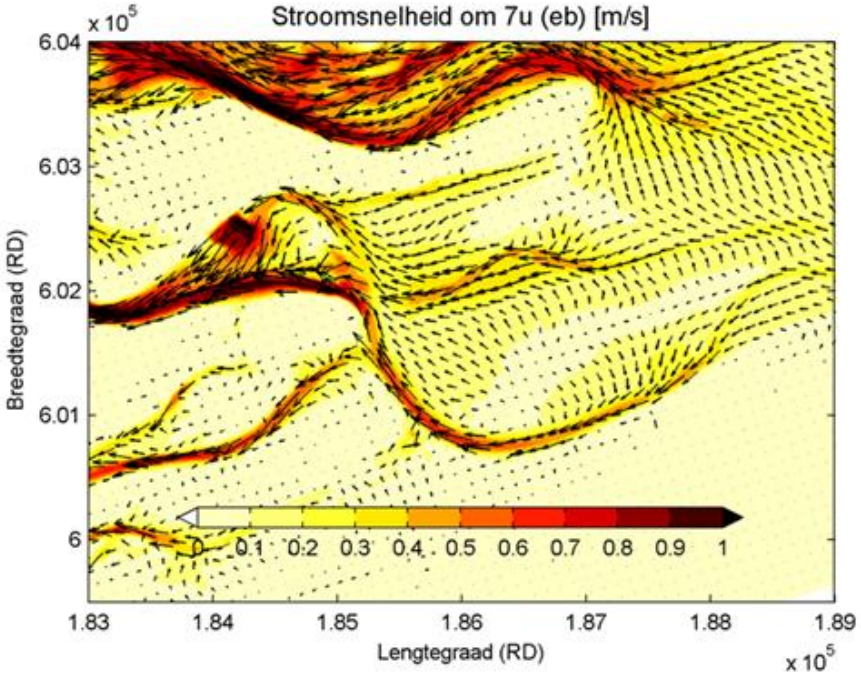


Figuur 6.7 Bodemligging gebruikt in de modelsimulatie van de variant VLOEDGEUL.

Aanlegbaggerwerk
358.000 m^3 is weggebaggerd. Dit bestaat naar verwachting voornamelijk uit zand met een aanzienlijke slibfractie.

Verkorting vaarweg
De vaarweg is 952 m korter dan de vaarweg van de variant REF.

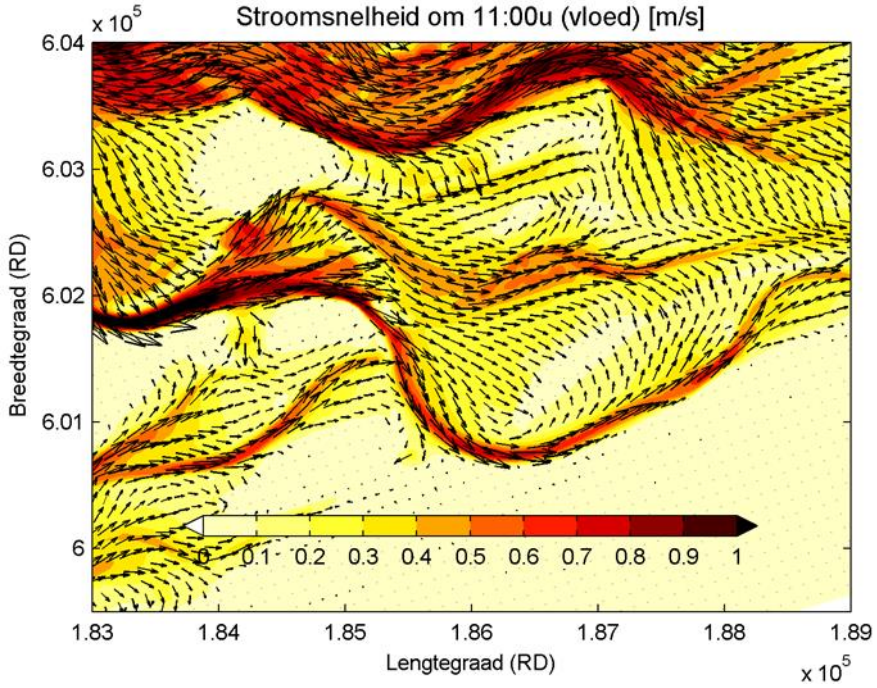
Stromingspatroon: eb
In vergelijking met de referentie is de verlegging van de stroom van eb- naar vloedgeul opvallend (Figuur 6.8). In de ondieptes ter hoogte van de plaats waar de ebgeul is afgedamd worden vrij hoge snelheden voorspeld. Deze zijn van belang voor de stabiliteit van de afdamming, omdat deze hoge snelheden kunnen leiden tot het transport van zand weg van de aangelegde drempel. Ze verdienen nadere aandacht bij een eventueel ontwerp. De aansluiting op de vaarweg bij de eb-vloedschaar heeft redelijk hoge snelheden bij piek eb.



Figuur 6.8 Stromingspatroon bij de piek van de ebstroom voor de variant VLOEDGEUL

Stromingspatroon: vloed

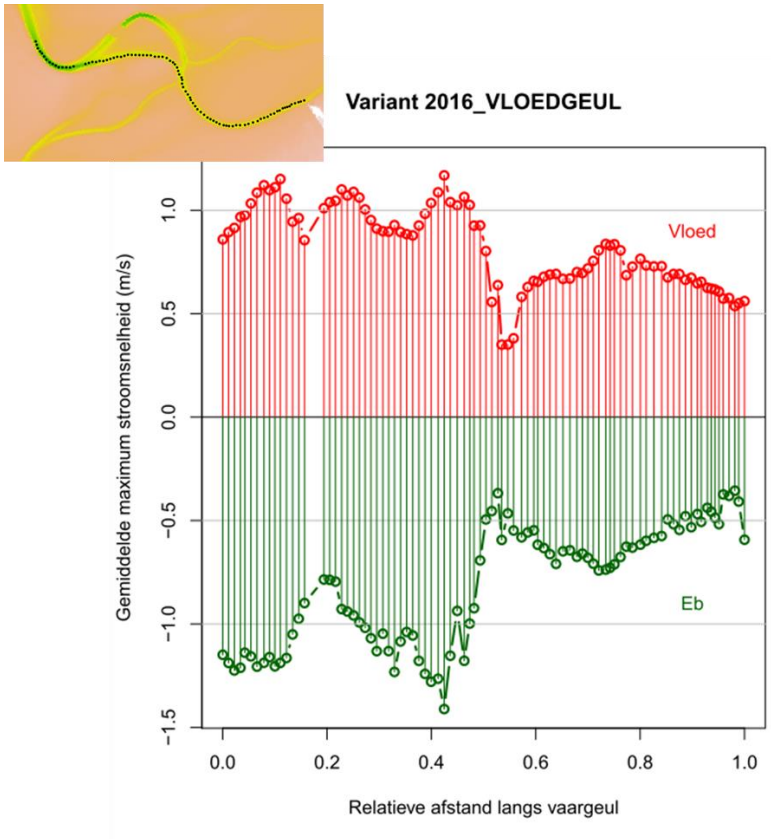
Ook bij vloedstroom is het afgenomen belang van de ebgeul duidelijk zichtbaar (Figuur 6.9). Uitwaaiering van de stroming over de platen is niet veel verminderd. De ebgeul neemt na de afdamming weer in belang toe, en lijkt het belangrijkste stromingspatroon richting Doorlopend Dantziggat te gaan vormen. Overwogen moet worden of de aansluiting tussen de nieuw aangelegde vloedgeul en het Doorlopend Dantziggat niet moet worden versterkt, om stroming door de oude ebgeul te verminderen, en de komberging van de nieuw aangelegde geul te vergroten.



Figuur 6.9 Stromingspatroon bij de piek van de vloedstroom voor de variant VLOEDGEUL

Piekstroomsnelheden

De aansluiting ter hoogte van de meest westelijke bocht is verbeterd; er treedt hier nauwelijks een stroomvertraging op (Figuur 6.10). De aansluiting ter hoogte van de eb-vloedschaar blijft problematisch, de stroomsnelheden zijn hier dermate laag dat aanzanding verwacht kan worden. Het gebaggerde deel van de vaargeul heeft pieksnelheden die goed vergelijkbaar zijn met deze in de referentie. Een verhoging van snelheden wordt niet waargenomen (zie voor vergelijking van piekstroomsnelheden in de varianten de bespreking in paragraaf 6.8).



Figuur 6.10 Piekstroomsnelheid bij vloed en eb op controlepunten langs de vaargeul in variant VLOEDGEUL. De punten zijn aangegeven op het kaartje. Afstanden langs de vaargeul zijn relatief uitgedrukt als fractie van de totale vaarweg. 0 komt overeen met het meest westelijke controlepunt, 1 met het punt bij de pier van Holwerd. De pieksnelheden van alle gesimuleerde getijen zijn berekend, en het gemiddelde over meerdere spring-doodtijcycli wordt hier getoond.

6.4 Variant LANG

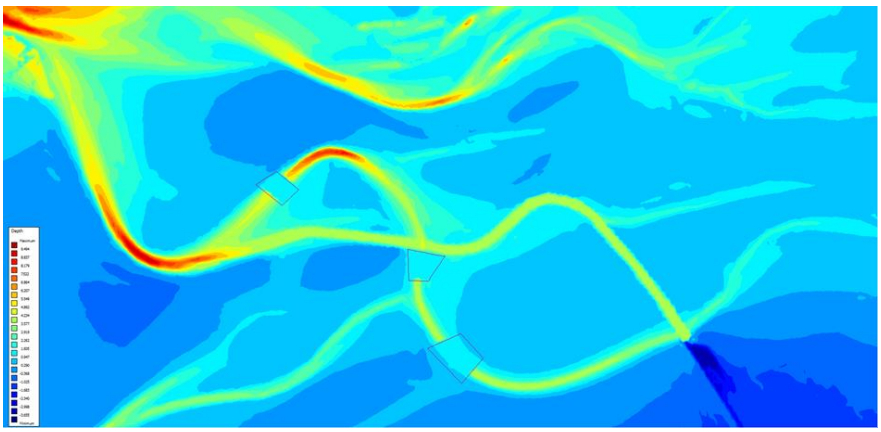
Algemene opzet

In deze variant (Figuur 6.11) wordt de bestaande vloedgeul nabij De Punt (oostelijk deel van de Piet Scheve Plaat) verdiept en vervolgens doorgetrokken via het Doorlopend Dantziggat, waarna de geul naar het zuiden afbuigt om de pier te Holwerd te bereiken.
De reden voor de afbuiging naar het zuiden is dat de geul op deze manier loodrecht de kust nadert, zodat een aanvoergeul van een eventueel Spoelmeer (zie volgende variant) er rechtdoor in uit kan komen. Deze variant is daarmee in zekere zin een controle voor de variant met Spoelmeer, omdat daarin dezelfde bathymetrie wordt gebruikt.

Figuur 6.11 Algemene opzet van de variant LANG

Implementatie

De nieuwe geul volgt in het Doorlopend Dantziggat zo veel mogelijk de bestaande geul, waardoor het nieuw aan te leggen stuk zo kort mogelijk wordt gehouden. Bestaande geulen die te veel stroom zouden kunnen trekken worden afgedamd tot op het niveau van de omringende platen (Figuur 6.12).



Figuur 6.12 Bodemligging gebruikt in de modelsimulatie van de variant LANG

Aanlegbaggerwerk

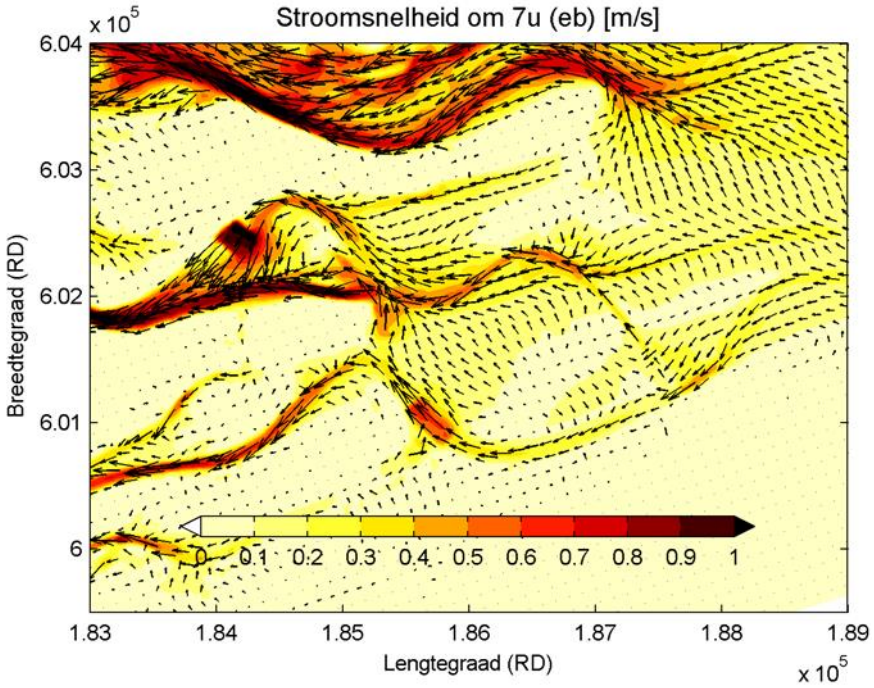
930.000 m^3 is weggebaggerd. Dit bestaat naar verwachting voornamelijk uit zand.

Verkorting vaarweg

954 m. Deze verkorting is vrijwel identiek aan die van de variant VLOEDGEUL. De verkorting wordt met name gerealiseerd door de ebgeul ten noorden van De Punt te vermijden.

Stromingspatroon: eb

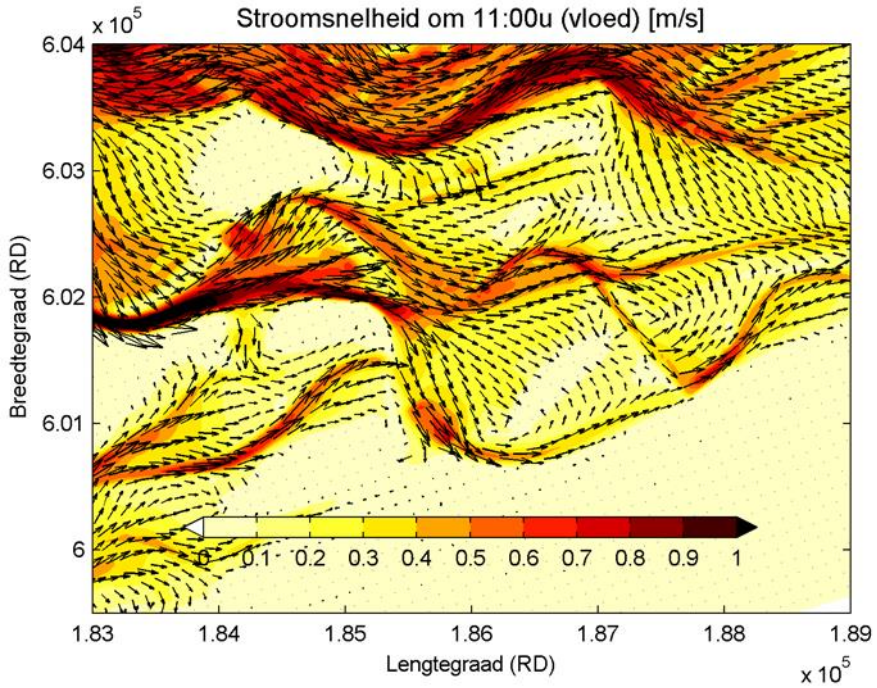
Het afdammen van de oude vaargeul lijkt effectief te zijn geweest. De stroomsnelheden zijn er laag, met lokaal een verhoging bij de ondieptes die zijn ontstaan door de afdammingen (Figuur 6.13). Vooral opvallend is dat de ebsnelheden in het oostelijk deel van de nieuwe vaargeul zeer laag blijven, en dat er op de platen ter hoogte van de nieuw aangelegde geul stromingen staan die dwars op de geul staan. Deze dwarsstromingen zijn nog beter te zien net voor de pieken van eb en vloed.



Figuur 6.13 Stromingspatroon bij de piek van de ebstroom voor de variant LANG

Stromingspatroon: vloed

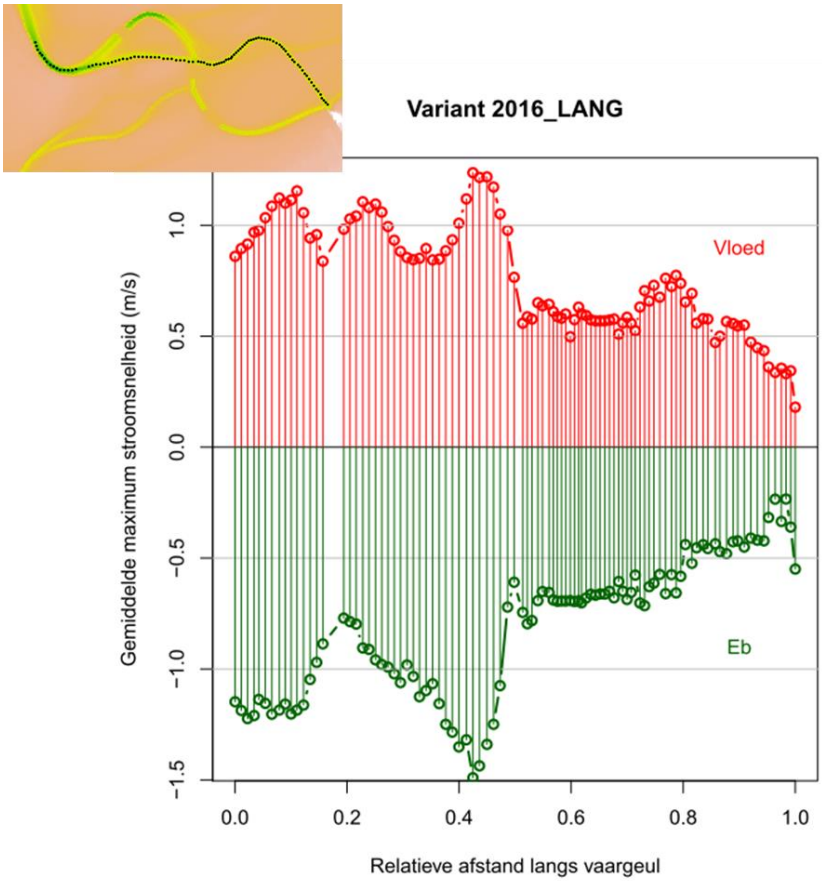
Bij vloed (Figuur 6.14) lijkt de oude ebgeul ondanks de afdamming nog een aanzienlijk deel van de stroming te trekken, vergelijkbaar met wat het geval is bij de variant VLOEDGEUL. De stroomsnelheden in de nieuwe geul zijn bij vloed wat hoger dan de stroomsnelheden bij eb, maar bereiken geen hoge waarden. Dwarsstromingen in de buurt van de pier lijken sterker te zijn dan bij piek eb.



Figuur 6.14 Stromingspatroon bij de piek van de vloedstroom voor de variant LANG

Piekstroomsnelheden

De piekstroomsnelheden (Figuur 6.15) in het oostelijke halve deel van de vaargeul zijn aanzienlijk lager dan in de referentiesituatie. Dit is de nieuw gebaggerde geul en deze trekt relatief weinig stroom. Wellicht gebeurt een groot deel van het transport over de platen, en dan vaak ook dwars op de geul.



Figuur 6.15 Piekstroomsnelheid bij vloed en eb op controlepunten langs de vaargeul in variant LANG. De punten zijn aangegeven op het kaartje. Afstanden langs de vaargeul zijn relatief uitgedrukt als fractie van de totale vaarweg. 0 komt overeen met het meest westelijke controlepunt, 1 met het punt bij de pier van Holwerd. De pieksnelheden van alle gesimuleerde getijen zijn berekend, en het gemiddelde over meerdere spring-doodtijcycli wordt hier getoond.

6.5 Variant LANGSPOEL

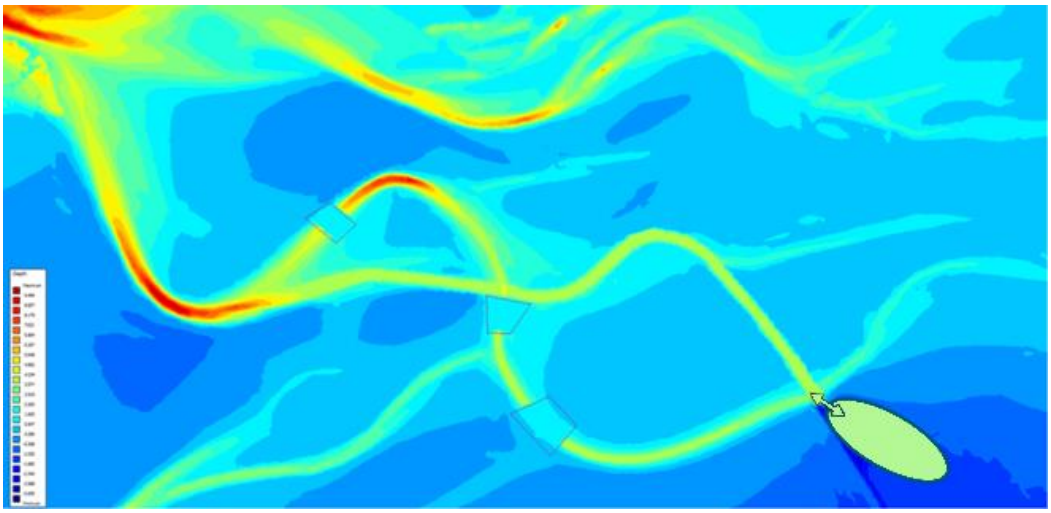
Algemene opzet

De ligging van de geul is dezelfde in deze variant als in de variant LANG (Figuur 6.16). Het verschil tussen beide varianten is dat in deze variant de werking van een spoelmeer is gesimuleerd.

Figuur 6.16 Algemene opzet van de variant LANGSPOEL

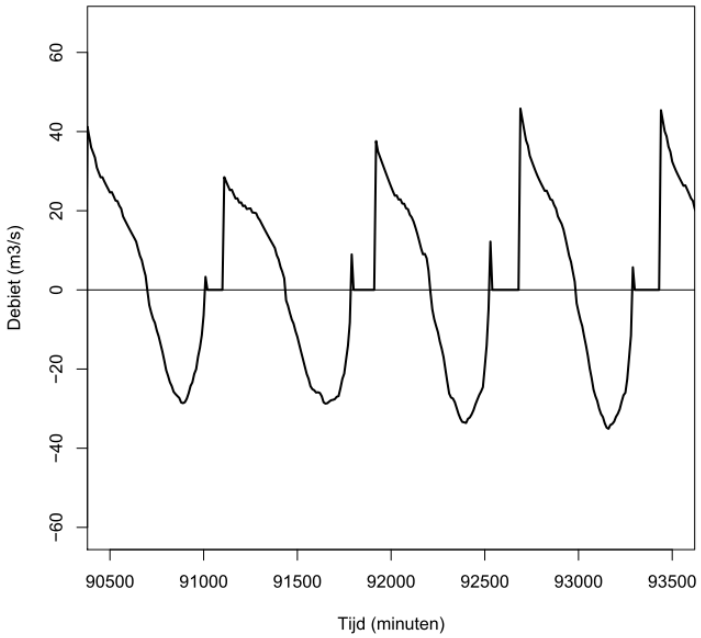
Implementatie

Het Spoelmeer is aan het model toegevoegd als een randvoorwaarde (Figuur 6.17). Op basis van aparte berekeningen is het debiet uit het Spoelmeer vastgesteld (Cleveringa et al., 2016). Het gebruikte debiet komt overeen met een spoelmeer met een oppervlakte van 31,5 ha. Dat debiet is als afvoerrandvoorwaarde aan het Delft3D model opgelegd. Dit wordt in onderstaand schema weergegeven door de dubbele pijl (de ellips symboliseert het Spoelmeer en zijn aanvoergeul). De bodem is geheel gelijk aan de voorgaande variant LANG, zowel wat betreft de nieuw gebaggerde geulen, als wat betreft de afgedamde delen van de oude vaargeul.



Figuur 6.17 Bodemligging gebruikt in de modelsimulatie van de variant LANGSPOEL. Het Spoelmeer is symbolisch aangeduid in deze figuur, maar maakt geen deel uit van de modelgeometrie (zie tekst voor details).

Het debiet van en naar het Spoelmeer is afhankelijk van het getij en de waterstand. Bij vloed wordt het Spoelmeer gevuld, daarna sluit het regelwerk tussen de piek van vloed en het begin van eb. Vervolgens opent het regelwerk, en wordt het water van het Spoelmeer naar de Waddenzee geloosd. In Figuur 6.18 wordt het debiet gedurende enkele getijden getoond.



Figuur 6.18 Voorbeeld van het debiet van en naar het Spoelmeer gedurende enkele getijdencycli. Positieve debieten komen van het Spoelmeer naar de Waddenzee, negatieve debieten vullen het Spoelmeer. Deze debieten worden opgelegd aan het model in een klein gebied in de omgeving van de pier van Holwerd.

Aanlegbaggerwerk

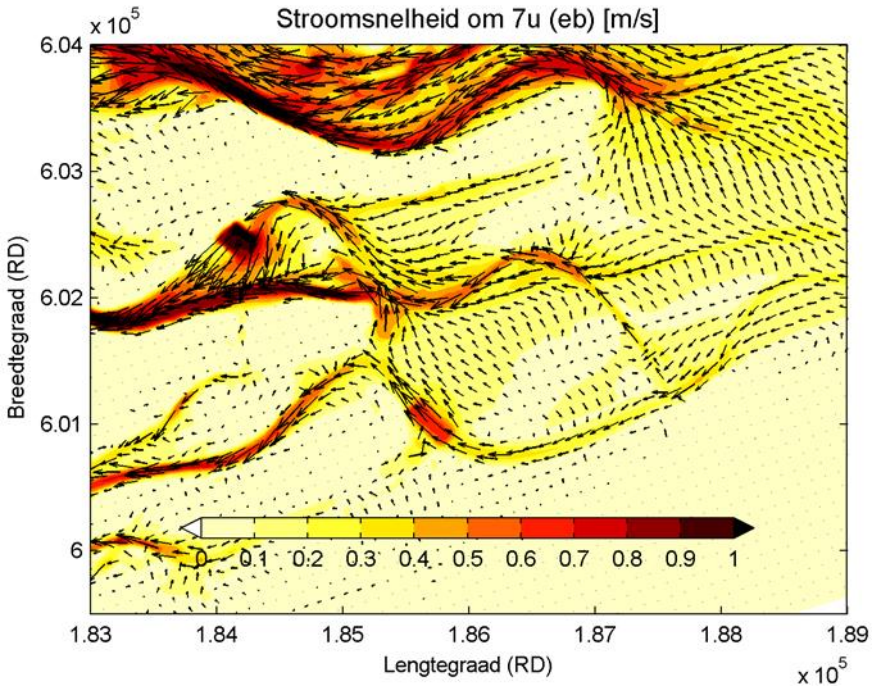
930.000 m^3 is weggebaggerd, net als in de vorige variant

Verkorting vaarweg

954 m, zoals in vorige variant.

Stromingspatroon: eb

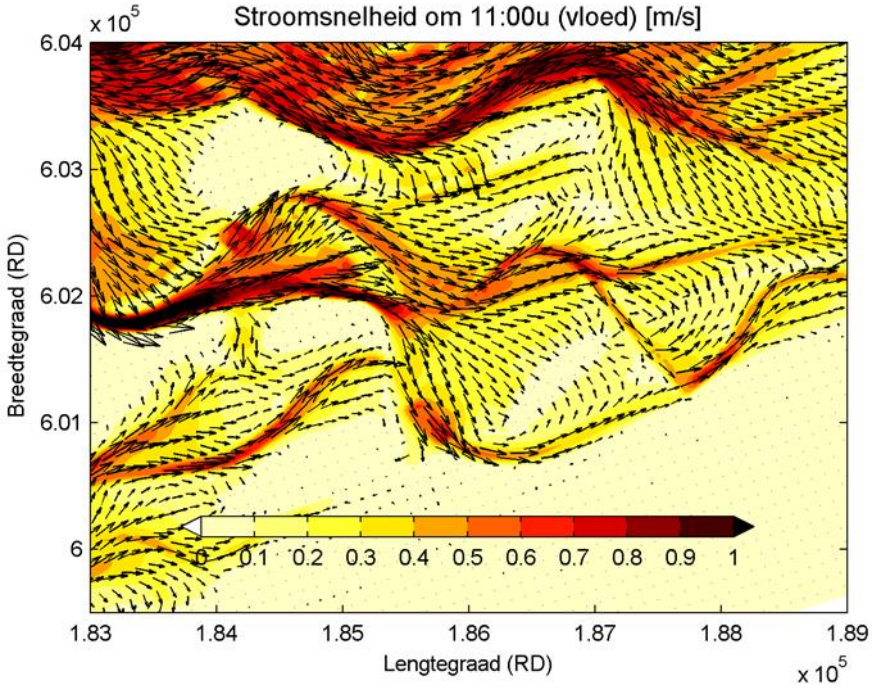
Hoewel een aanzienlijke verhoging van de stroomsnelheden in de nieuwe vaargeul in het verlengde van de veerdam bij eb was verwacht, is deze nauwelijks terug te vinden in de modelresultaten (Figuur 6.19). Immers, vanaf de veerdam wordt bij eb een aanzienlijk debiet de Waddenzee in gespuid. Nadere analyse van de resultaten toonde dat 75% van het extra debiet door het Spoelmeer niet door de nieuwe vaargeul bij eb wordt afgevoerd. Wellicht speelt uitwaaiering over de platen en opname in dwarse stromingspatronen een belangrijke rol.



Figuur 6.19 Stromingspatroon bij de piek van de ebstroom voor de variant LANGSPOEL

Stromingspatroon: vloed

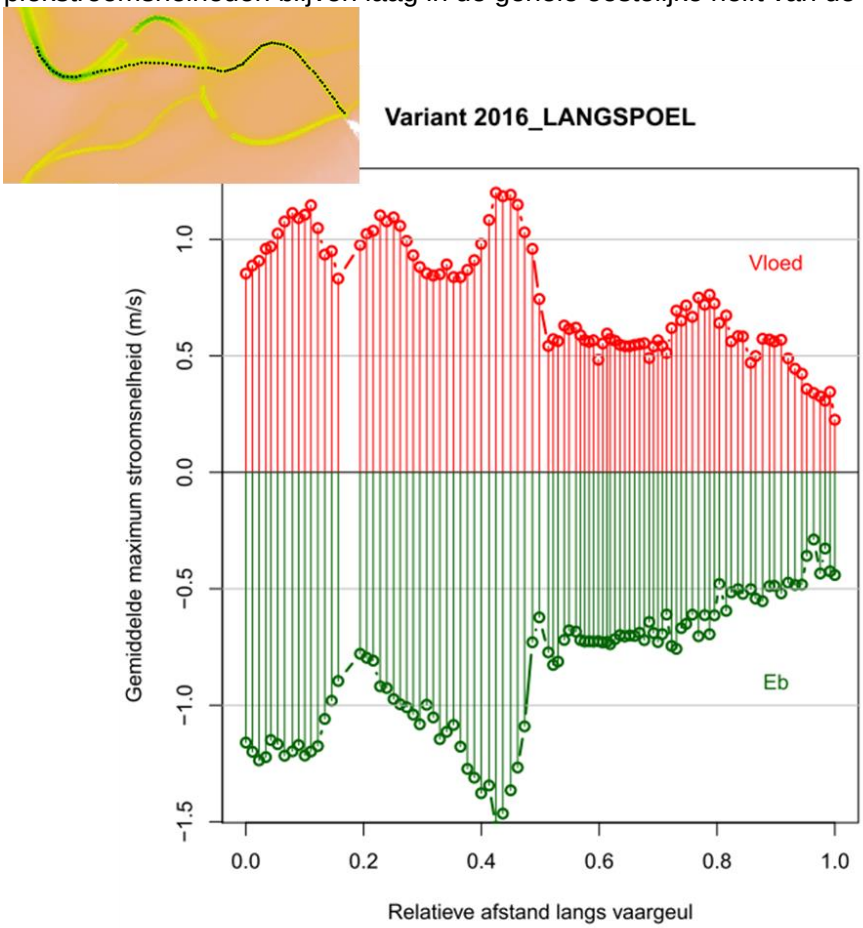
Bij vloed (Figuur 6.20) is de verhoging van stroomsnelheden, in vergelijking met LANG, nog kleiner dan bij eb. Ongeveer de helft van de waterstroom naar het Spoelmeer verloopt via de nieuwe vaargeul, maar dit gebeurt blijkbaar niet, of niet vooral, tijdens de periode van maximale vloedstroomsnelheid.



Figuur 6.20 Stromingspatroon bij de piek van de vloedstroom voor de variant LANGSPOEL

Piekstroomsnelheden

De piekstroomsnelheid (Figuur 6.21) in het meest oostelijke deel van de vaargeul is licht verhoogd bij eb (in vergelijking met variant LANG) en nauwelijks gewijzigd bij vloed. De piekstroomsnelheden blijven laag in de gehele oostelijke helft van de vaargeul.



Figuur 6.21 Piekstroomsnelheid bij vloed en eb op controlepunten langs de vaargeul in variant LANGSPOEL. De punten zijn aangegeven op het kaartje. Afstanden langs de vaargeul zijn relatief uitgedrukt als fractie van de totale vaarweg. 0 komt overeen met het meest westelijke controlepunt, 1 met het punt bij de pier van Holwerd. De pieksnelheden van alle gesimuleerde getijen zijn berekend, en het gemiddelde over meerdere spring-doodtijcycli wordt hier getoond.

6.6 Variant DIEPBREED

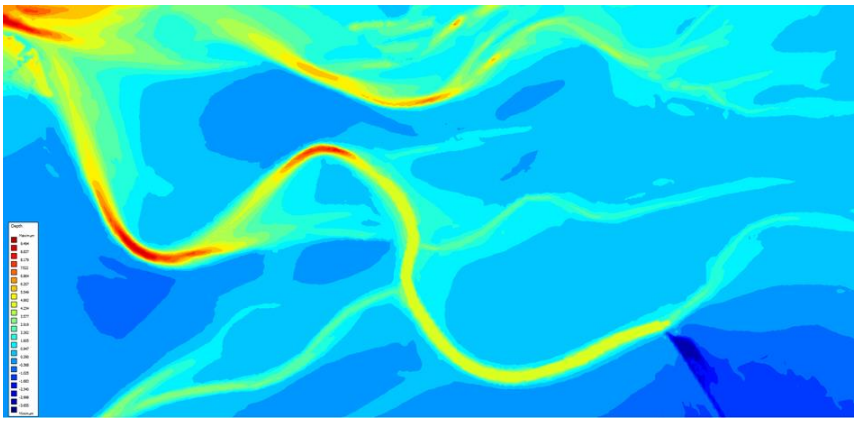
Algemene opzet

Deze variant (Figuur 6.22) is grofweg gebaseerd op nautische adviezen die de reder ontving over de optimale breedte en diepte van de vaargeul voor de huidige schepen. De variant gaat uit van de huidige vaargeul, maar verdiept en verbreed zodat overal aan de geadviseerde nautische eisen wordt voldaan: breedte van de vaargeul is verhoogd naar 75 m, de diepte is vergroot tot 4,8 m

Figuur 6.22 Algemene opzet van de variant DIEPBREED

Implementatie

De bodemligging in het model (Figuur 6.23) is aangepast aan de verhoogde normen, uitgaande van de bestaande vaargeul



Figuur 6.23 Bodemligging gebruikt in de modelsimulatie van de variant DIEPBREED

Aanlegbaggerwerk

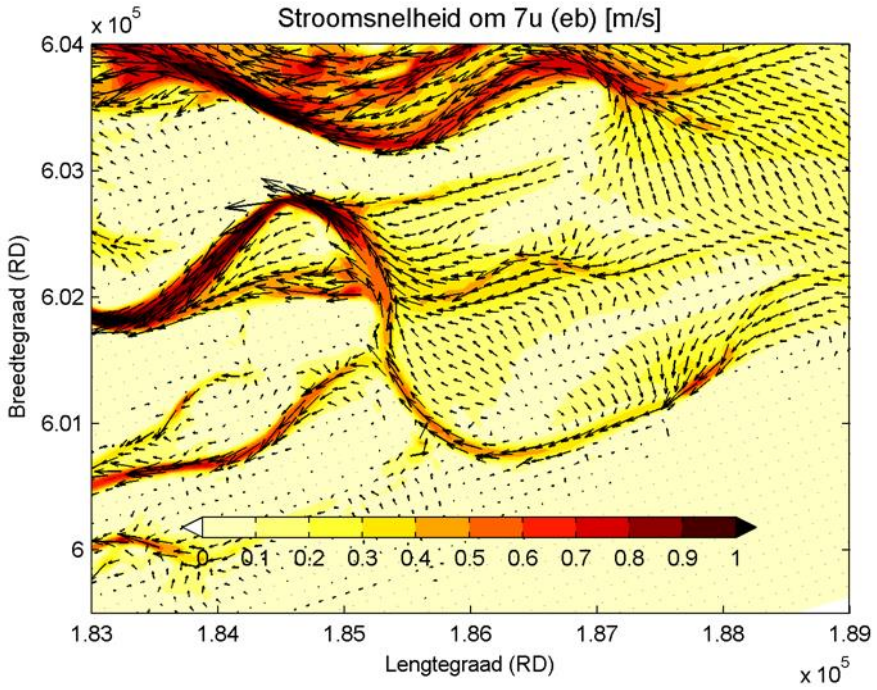
630.000 m^3 is weggebaggerd. Dit bestaat naar verwachting uit slib en zand. Het materiaal is niet in de onmiddellijke omgeving gestort; aangenomen is dat het verder weg is gebracht.

Verkorting vaarweg

Geen verkorting van de vaarweg. Merk op dat de vaar*tijd* wel verkort in dit scenario, omdat bij grotere kielspeling sneller kan worden gevaren, en omdat verbreding leidt tot minder tijdverlies wanneer schepen elkaar passeren. Vergroting van de kielspeling is vooral van belang bij eb, en zal zich dus niet over de gehele dag als voordeel laten gevoelen.

Stromingspatroon: eb

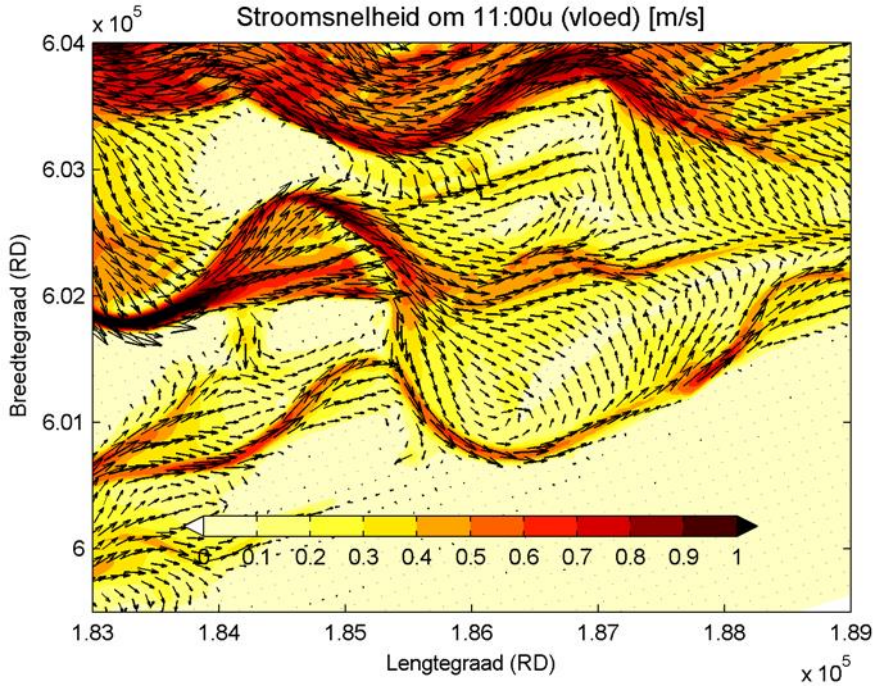
In vergelijking met de referentie is er weinig verandering in de ruimtelijke patronen (Figuur 6.24), maar de stroomsnelheden in het oostelijke deel van de vaargeul zijn verlaagd. Weliswaar is er een lichte toename van het eb- en vloedvolume, wellicht omdat de verwijde geul zelf meer komberging heeft (een gedeelte van de platen langs de oorspronkelijke geul, die tussen hoog- en laagwater inliggen, zijn afgegraven tot onder laagwater; dit volume wordt aan de komberging toegevoegd), maar deze toename van het volume compenseert niet voor het vergrote doorstroomoppervlak, en leidt dus tot verlaging van de stroomsnelheden.



Figuur 6.24 Stromingspatroon bij de piek van de ebstroom voor de variant DIEPBREED

Stromingspatroon: vloed

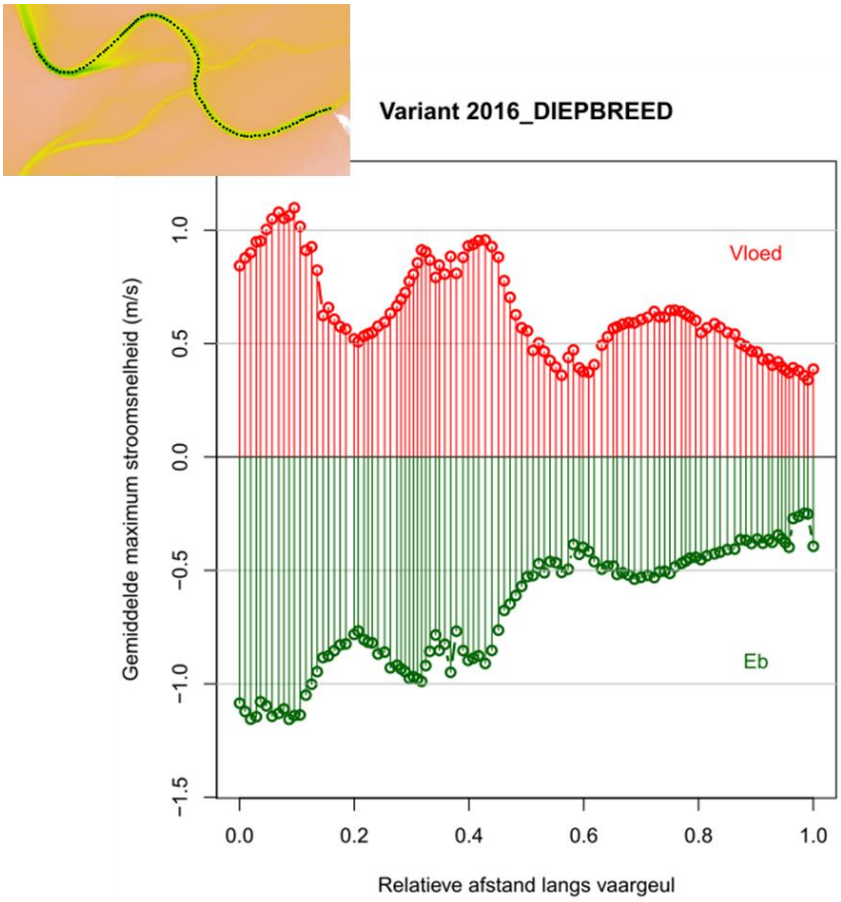
Het beeld voor de vloedstroom (Figuur 6.25) is vergelijkbaar met dat voor eb: het ruimtelijk patroon is gelijkaardig aan dat van de referentie, maar de snelheden zijn verlaagd.



Figuur 6.25 Stromingspatroon bij de piek van de vloedstroom voor de variant DIEPBREED

Piekstroomsnelheden

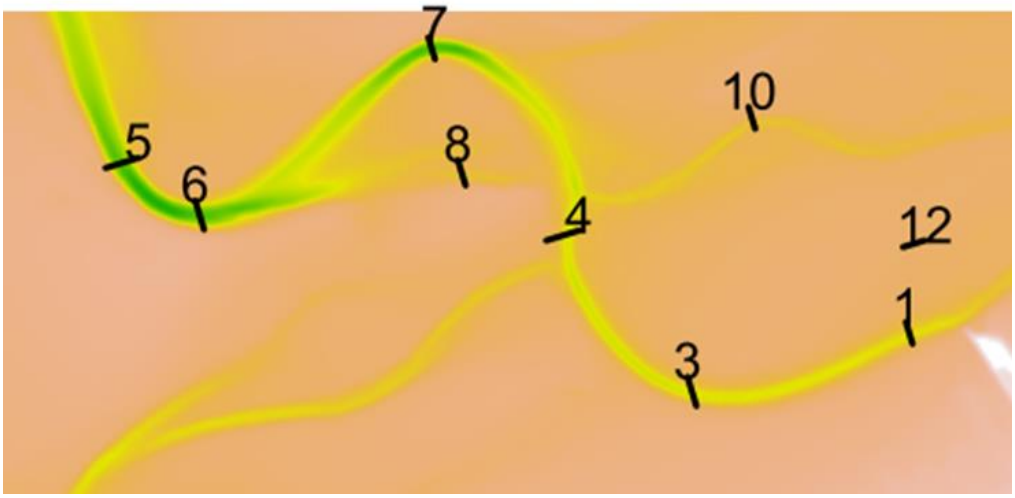
Piekstroomsnelheden (Figuur 6.26) zijn verlaagd in de oostelijke helft van de vaargeul, en liggen zo laag dat belangrijke sedimentatie kan worden verwacht.



Figuur 6.26 Piekstroomsnelheid bij vloed en eb op controlepunten langs de vaargeul in variant LANGSPOEL. De punten zijn aangegeven op het kaartje. Afstanden langs de vaargeul zijn relatief uitgedrukt als fractie van de totale vaarweg. 0 komt overeen met het meest westelijke controlepunt, 1 met het punt bij de pier van Holwerd. De pieksnelheden van alle gesimuleerde getijen zijn berekend, en het gemiddelde over meerdere spring-doodtijcycli wordt hier getoond.

6.7 Vergelijking van getijvolumes tussen zuidoostelijke varianten

Informatie over piekstroomsnelheden en getijvolumes kan het best in een vergelijking tussen varianten worden aangegeven. De getijvolumes zijn van belang om de transportcapaciteit voor sediment te berekenen, en om te controleren in hoeverre de varianten kunnen leiden tot het trekken van meer stroom door de geulen. Ook is de omvang van de geulen gerelateerd aan het getijvolume. De verschillen in de eb- en vloedvolumes geven inzicht in de dominantie van eb dan wel vloed en dit geeft weer inzicht in de richting van het netto transport van sediment. De getijvolumes op een aantal controleraaien over de geulen (Figuur 6.27 geeft zowel de ligging als de lengte van de berekeningsraaien weer) worden tabelmatig weergegeven in Tabel 6.1

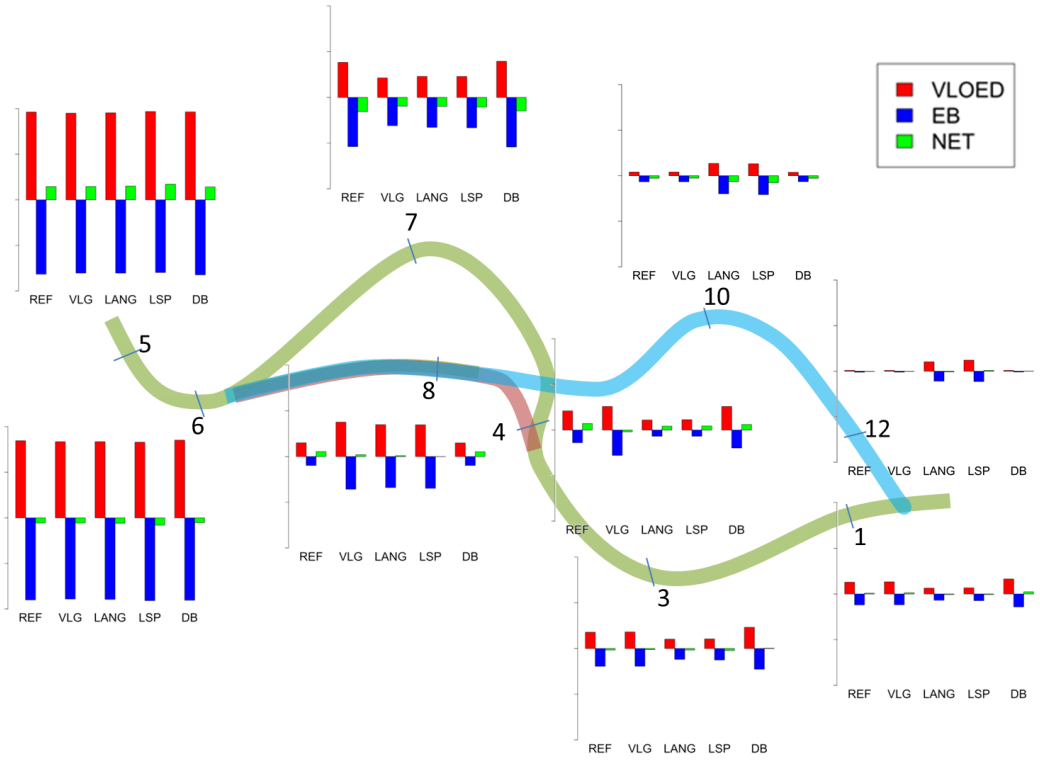


Figuur 6.27 Ligging van de controleraaien voor getijvolumes. De bodemligging van de variant REF is gebruikt als achtergrond. Raaien 8 en 12 liggen hier over ondieptes, maar bestrijken geulen in sommige varianten.

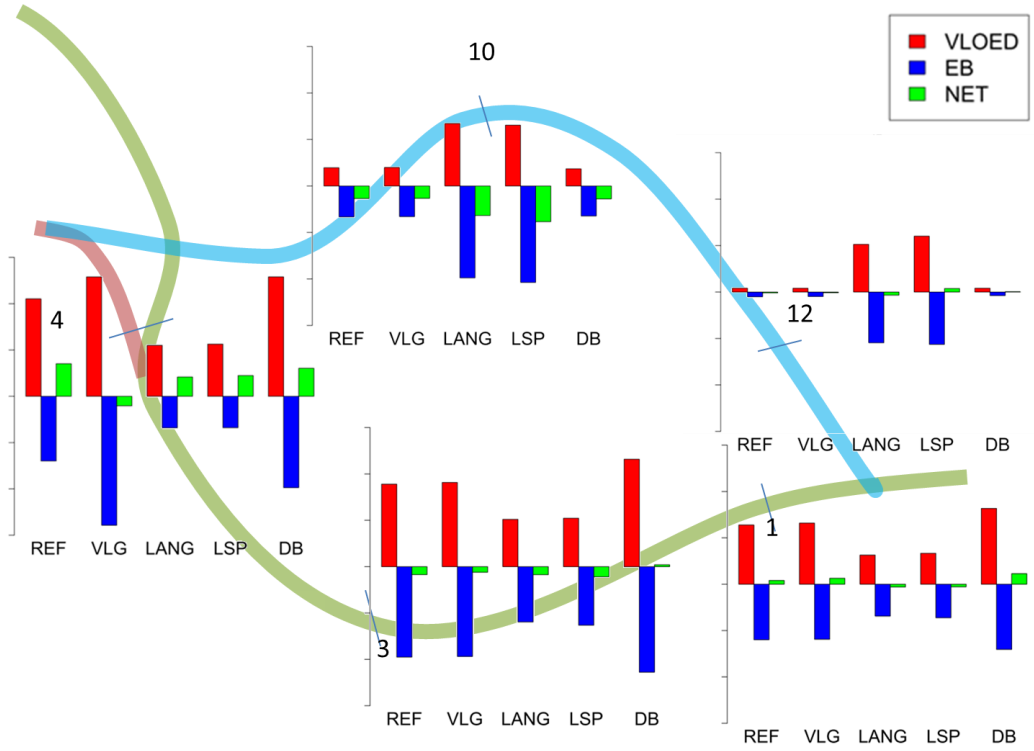
Figuur 6.28 toont de getijvolumes op deze dwarsraaien voor de verschillende varianten. Het oostelijk deel van het studiegebied wordt in meer detail gegeven (met tevens een andere schaal voor de volumes) in Figuur 6.29. De grote getijdegeul (dwarsdoorsnedes 5 en 6) heeft grote getijdevolumes en de kleine geulen hebben veel kleinere getijdevolumes. Bij de ebgeul (7) en de vloedschaar (8) wordt het getijvolume van de gehele geul verdeeld over beide takken, maar de optelsom van de getijvolumes uit de kleine geulen komt niet overeen met het getijvolume van de grote geulen, omdat veel van het volume wordt geborgen op de wadplaten. Dit patroon verandert niet wezenlijk door de ingrepen, maar wel is duidelijk dat lokaal verschillen optreden door de ingrepen.

Tabel 6.1 Getijvolumes (m^3/getij) voor vloed en eb in een aantal controleraaien over de verschillende geulen. De positie van de raaien is aangegeven in Figuur 6.27. Vloedvolumes zijn positief, ebvolumes negatief. Netto volumes zijn positief als het vloedvolume groter is dan het ebvolume, en negatief in het omgekeerde geval.

raai	Vloed (1000 m^3/getij)	Eb (1000 m^3/getij)	Netto (1000 m^3/getij)	raai	Vloed (1000 m^3/getij)	Eb (1000 m^3/getij)	Netto (1000 m^3/getij)
REF				**DIEPBREED**			
1	1277	-1198	79	1	1635	-1409	226
3	1780	-1953	-172	3	2318	-2277	41
4	2103	-1399	705	4	2579	-1973	607
5	9626	-8171	1456	5	9647	-8233	1414
6	8459	-9019	-560	6	8525	-9046	-521
7	3829	-5385	-1556	7	3948	-5425	-1477
8	1510	-970	540	8	1497	-971	526
10	392	-664	-272	10	369	-648	-279
12	84	-103	-19	12	84	-78	6
VLOEDGEUL							
1	1318	-1190	127				
3	1817	-1936	-120				
4	2578	-2786	-208				
5	9505	-8042	1463				
6	8347	-8908	-561				
7	2137	-3092	-955				
8	3768	-3574	195				
10	395	-660	-265				
12	82	-97	-15				
LANG				**LANGSPOEL**			
1	628	-688	-59	1	667	-723	-57
3	1021	-1194	-174	3	1045	-1264	-219
4	1101	-683	418	4	1128	-679	449
5	9549	-8048	1501	5	9689	-7980	1710
6	8356	-8952	-596	6	8296	-9092	-797
7	2299	-3271	-973	7	2284	-3329	-1045
8	3485	-3395	90	8	3463	-3477	-14
10	1342	-1979	-637	10	1308	-2077	-769
12	1026	-1094	-68	12	1204	-1127	77



Figuur 6.28 Getijvolumes (Tabel 6.1) door een aantal controleraaien voor de verschillende varianten. Alle figuren zijn op dezelfde schaal geplot. Vloedvolumes zijn positief, ebvolumes negatief.



Figuur 6.29 Detailbeeld van het oostelijk deel van het studiegebied. Volumes zijn op een andere schaal geplot, maar de getoonde data zijn dezelfde als in Figuur 6.28

Sommige karakteristieken van deze getijvolumes zijn verwacht en voor de hand liggend. Op raai 8 wordt aanzienlijk meer volume verplaatst in de varianten die de vloedgeul als vaargeul gebruiken, en in raai 7 is het omgekeerde het geval. De varianten LANG en LANGSPOEL verhogen uiteraard de volumes in raaien 10 en 12, en verminderen de volumes in raaien 7, 1, 3 en 4.

Opvallend is dat de variant DIEPBREED leidt tot een lichte verhoging van de volumes ten opzichte van de referentie, niet alleen in raaien 1, 3 en 4, maar ook in raaien 7 en 6, al is de verhoging zeer licht. Deze variant creëert zijn eigen komberging door het significant toegenomen volume van de vaargeul. In de nieuwe delen van de geul kan bij hoogwater meer water worden geborgen dan op de wadplaten. Merk op dat de toename van het getijvolume in deze variant niet leidt tot het handhaven of verhogen van de stroomsnelheid (zie paragraaf 6.8).

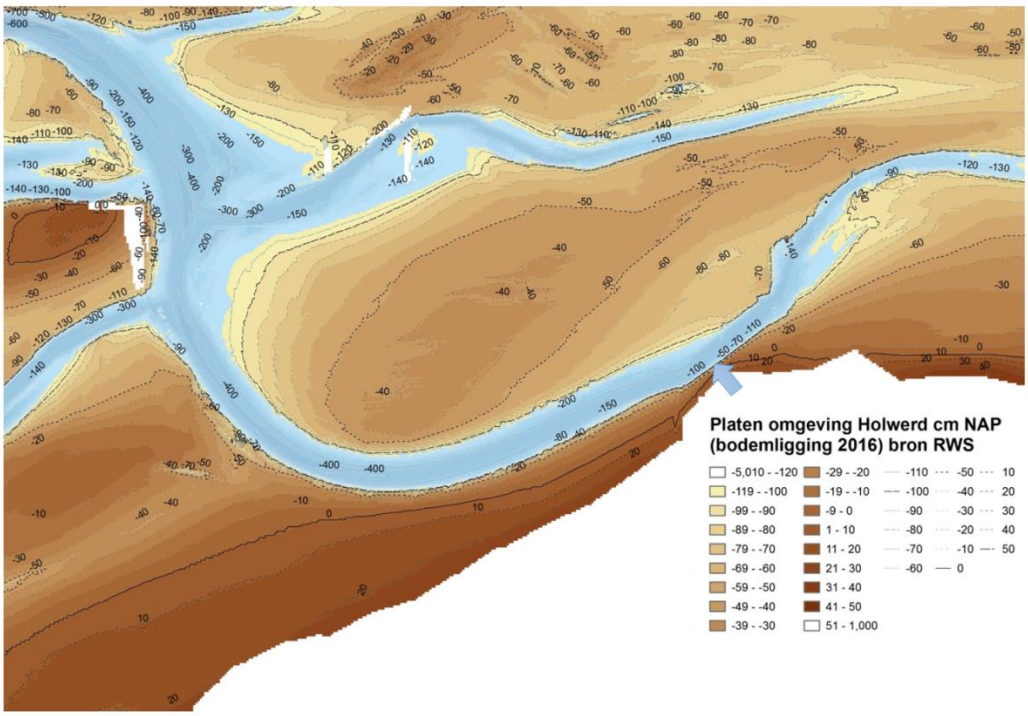
Het meest opvallende is echter dat de volumes, en dan met name de ebvolumes, weinig verschillen tussen LANG en LANGSPOEL. Het berekende (en aan het model opgelegde) ebvolume van het Spoelmeer is in de orde van 400000 m^3/getij, wat aanzienlijk is in vergelijking met de van nature voorkomende volumina (ongeveer 40 %, zie Tabel 6.1). Daarvan wordt echter maar ongeveer de helft teruggevonden als vermeerdering van het vloedvolume in LANGSPOEL, en een kwart in het ebvolume.

Tabel 6.2 Verschil in vloedvolume en ebvolume (m^3/getij) tussen varianten LANGSPOEL en LANG. Vullen van het Spoelmeer geeft naar verwachting (als alle stroom door de geulen loopt) een vermeerdering van het vloedvolume met ongeveer 400000 m^3/getij. Leeglopen van het Spoelmeer maakt het ebvolume met een gelijk getal negatiever. De gerealiseerde verschillen zijn veel kleiner dan de verwachtingen.

LANGSPOEL - LANG		
Raai	**Vloed**	**eb**
1	39.000	-35.000
3	24.000	-70.000
4	27.000	4.000
5	140.000	68.000
6	-60.000	-140.000
7	-15.000	-58.000
8	-22.000	-82.000
10	-34.000	-98.000
12	178.000	-33.000

De oorzaak van de afwijking tussen het geobserveerde ebvolume, en de verwachting waarin het volledige ebvolume van het spoelmeer aan het bestaande ebvolume wordt toegevoegd, moet gevonden worden in de ‘uitwaaiering’ van de ebstroom over de platen ter hoogte van de veerdam. De gemiddelde plaathoogte ten noorden van de vaarroute en ter hoogte van de veerdam, bedraagt slechts -70 cm NAP (Figuur 6.30) en dat betekent dat de stroming vanuit het spoelmeer niet wordt ‘gevangen’ tussen de platen en inderdaad kan uitwaaieren.
Om beter gebruik te maken van het debiet van het Spoelmeer is voorgesteld om het uitstromen vanuit het Spoelmeer te beperken tot de periode dat de platen droogliggen. Dit is echter niet makkelijk te bereiken bij Holwerd. Het gemiddeld laagwaterniveau bevindt zich op -117 cm NAP bij gemiddeld getij (springtij -135 cm; doodtij -94 cm). Als het spoelmeer begint

te spuien op het moment dat de waterstand onder het niveau van de platen van -70 cm NAP is gezakt, en doorgaat tot laagwater (omdat er niet tegen de vloedstroom kan worden gespuid), dan is er slechts een zeer beperkte periode beschikbaar: ongeveer 1 uur per getijcyclus voor gemiddeld getij, bijna geen tijd bij doodtij, max 2 uur bij springtij[2]. Het volledige ebdebiet van het spoelmeer in die korte periode spuien zou aanzienlijke extra eisen aan het spuiwerk stellen, en is wellicht niet realistisch.



Figuur 6.30 . Hoogteligging van de platen in de omgeving van de veerdam te Holwerd. Bron: RWS

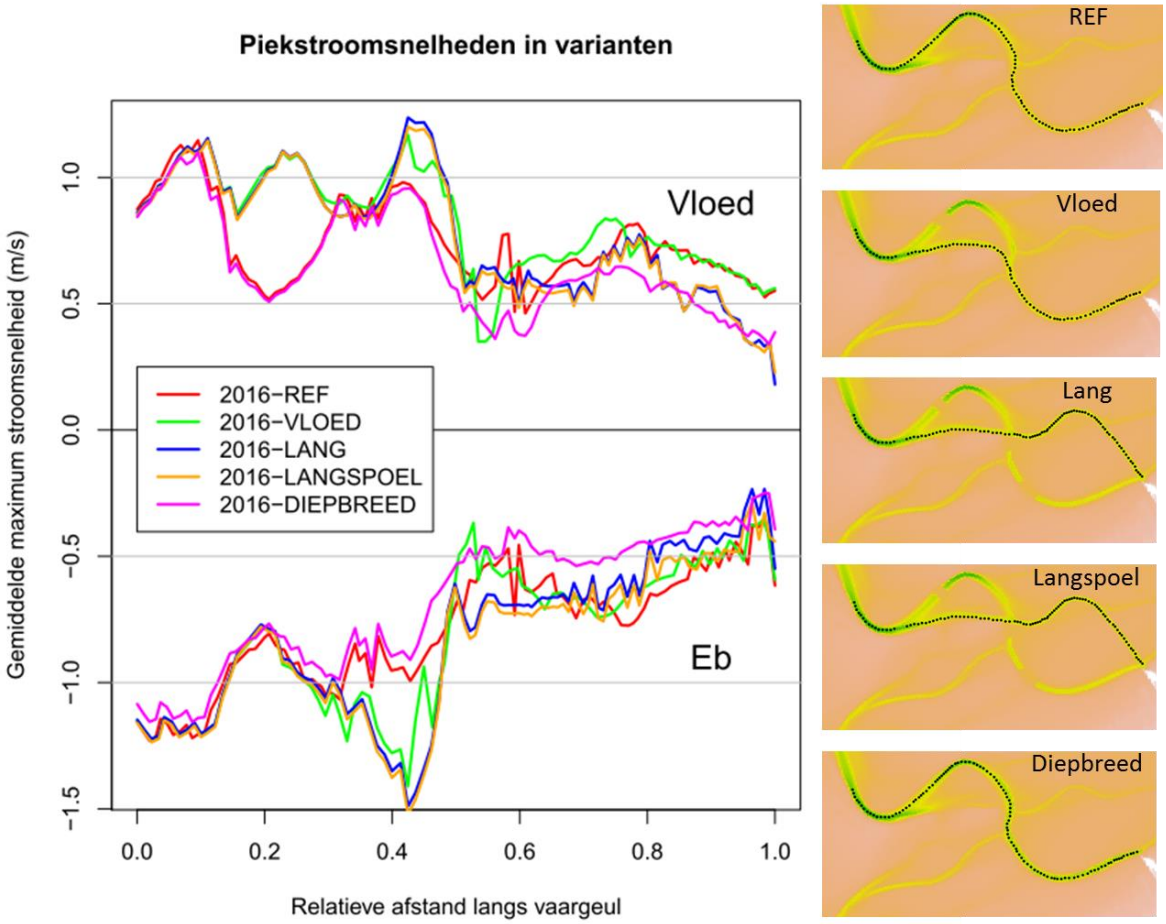
6.8 Vergelijking van piekstroomsnelheden tussen zuidoostelijke varianten

In Figuur 6.31 is de piekstroomsnelheid van alle varianten langs het beoogde vaargeultracé weergeven. Omdat de tracés in lengte verschillen is in deze figuur op de x-as de relatieve afstand langs het betreffende tracé getoond, waarbij 0 overeenkomt met het meest westelijke controlepunt, 1 met het punt bij de pier van Holwerd.

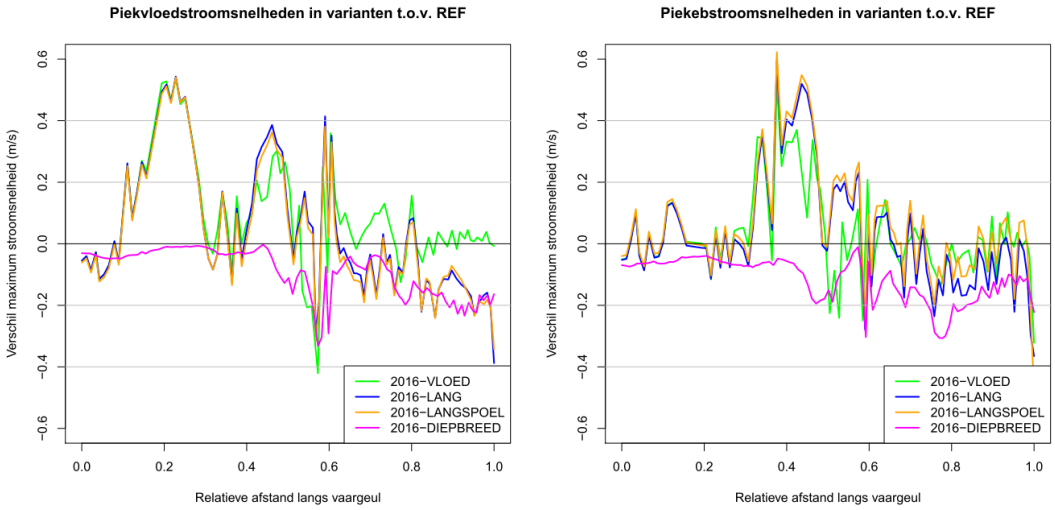
De varianten die de vloedgeul gebruiken om een (eerste) bochtafsnijding te realiseren (VLOEDGEUL, LANG en LANGSPOEL) leiden tot een aanzienlijk hogere piekstroomsnelheid in deze verdiepte vloedgeul, dan wordt gerealiseerd in de huidige vaarweg door de ebgeul. Tot ongeveer de helft van de hier beschouwde afstand hebben deze varianten een positieve uitwerking, in de zin dat ze de stroomsnelheid verhogen en daardoor de kans op sedimentatie verkleinen. Voorbij dit punt is er echter geen enkele variant die leidt tot significant hogere piekstroomsnelheden dan de referentie. De meeste varianten liggen aanzienlijk onder dit niveau. Dat betekent dat voor het stuk van de vaarweg waar het grootste baggerbezwaar

[2] *Merk op dat de plaathoogte op een meer westelijke locatie, ter hoogte van de bocht in de vaarweg, in principe gunstiger is voor de werking van een spoelmeer. De platen tussen de kwelder en de vaarweg liggen hier op een hoogte van ongeveer -10 cm NAP, die ten noordoosten van de vaarweg op ongeveer -40 cm NAP. Daardoor zou de potentiële spuitijd zonder wegstroming over de platen in de orde van 2-3 uur liggen.*

bestaat, geen vermindering van dit bezwaar als gevolg van sterkere stromingen (en daardoor bodemerosie of verminderde sedimentatie) te verwachten is. Het scenario LANGSPOEL heeft hogere ebsnelheden dan LANG, maar vergelijkbare vloedsnelheden. In het oostelijke deel van de vaargeul (vanaf relatieve afstand 0,7) komen deze nergens boven REF uit. Het scenario DIEPBREED heeft over de gehele lengte de laagste pieksnelheden.



Figuur 6.31 Vergelijking van de pieksnelheden bij vloed en eb voor de verschillende varianten. De curves worden gegeven en besproken bij de verschillende varianten, maar zijn hier ter vergelijking samengebracht in één figuur.



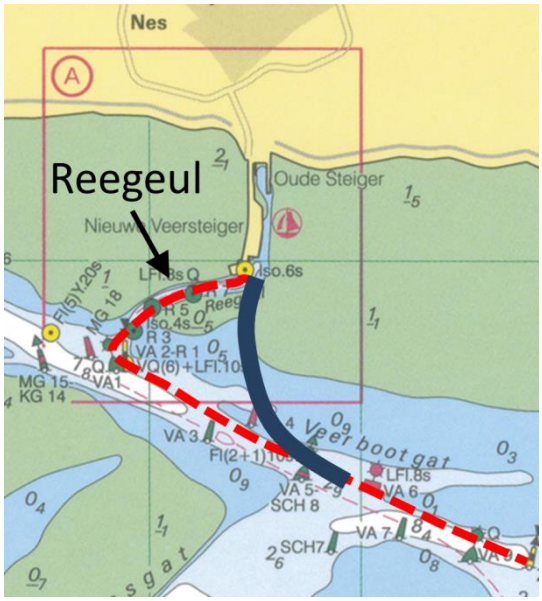
Figuur 6.32 Verschillen in (absolute) piekstroomsnelheden bij vloed en bij eb tussen de varianten en REF. Positieve waarden beteken dat de snelheid in de variant hoger is dan in REF. Ebsnelheden zijn absoluut (positief) gehouden, zodat de verschillen vergelijkbaar zijn met de grafiek voor vloedsnelheden.

6.9 Variant(en) REEGEUL-OOST

Algemene opzet

Deze variant betreft een vaarwegverkorting in een geheel ander deel van de vaarweg dan de andere varianten, namelijk dicht bij Nes (Ameland). De Reegeul is een relatief korte geul (< 1 km) die de haven van Nes op Ameland verbindt met de hoofdgeul waarin de vaarroute loopt. Deze geul (Figuur 6.33) maakt vanaf de pier een bocht naar het zuidwesten, en komt met een scherpe bocht in de hoofdgeul. Deze scherpe bocht vertraagt de navigatie. Er zou tijdswinst te boeken zijn als de aanvoergeul naar de haven van Nes beter in het verlengde van de veerbootroute zou liggen.

Het doel van de berekeningen is om na te gaan of een nieuwe, oostelijkere positie van de Reegeul, die qua oriëntatie maximaal aansluit op de veerbootroute, morfologisch stabiel kan zijn en een duurzame verkorting van de vaarweg kan opleveren.



Figuur 6.33 Uitsnede uit de navigatiekaart, die de Reegeul in de omgeving van Nes toont. De rode streepjeslijn geeft de huidige veerbootroute aan. De blauwe lijn geeft de onderzocht 'Reegeul-oost' aan.

Op basis van expert judgement was aanvankelijk ingeschat dat afkorting van de Reegeul kansrijk kon zijn. De verkorting zou ter hoogte komen van een natuurlijke diepte, die zichtbaar is op de navigatiekaart. Er werd verwacht dat de ebstroom, die vanaf de platen ten oosten van de pier van Nes naar de hoofdgeul stroomt, ook een meer oostelijkere positie van de Reegeul als gemakkelijkste weg zou kiezen. Een nuance bij die inschatting was wel dat de noordelijke zijgeulen in dit gebied allemaal een ZW-NO oriëntatie hebben en dat een sterk verschillende oriëntatie onstabiel zou kunnen zijn. Een nieuwe, oostelijkere geul heeft echter weinig nautisch voordeel als niet tegelijk de scherpe bocht kan worden vermeden. In de simulaties is dus gekozen voor een traject dat in het verlengde van de bestaande vaarroute ligt, om op die manier het nautisch voordeel te optimaliseren.

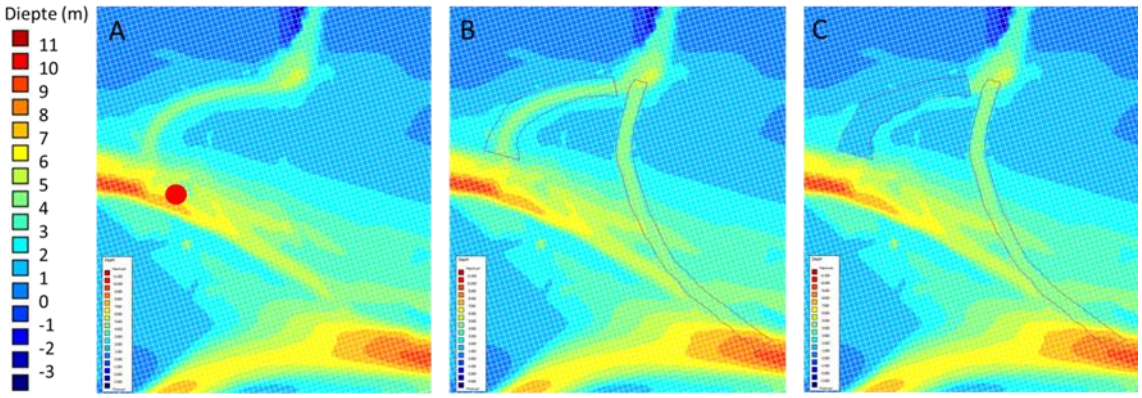
Implementatie

Er zijn drie modelsimulaties uitgevoerd:

- REF: de ongewijzigde bodemligging is gebruikt. Dit is dezelfde simulatie als de referentierun voor de zuidelijke bochtafsnijdingen, maar een nieuwe modelrun was noodzakelijk om de output te genereren in het gebied dat hier van belang is
- ReegeulOOST-ongedempt. De nieuwe oostelijke geul is aangebracht in de bodemligging, maar de oude geul is onveranderd gebleven. Dit stelt een cruciale fase in de aanleg voor. Immers de bestaande geul moet bruikbaar blijven voor de veerboten totdat de nieuwe geul klaar is.
- ReegeulOOST-gedempt. In dit scenario is de oude geul gedempt tot het niveau van -1 m NAP, wat iets hoger is dan de omringende platen, om te vermijden dat deze oude geul stroom blijft trekken en dat een depressie zou blijven bestaan op de positie van de oude geul.

De bodemligging in de drie varianten wordt getoond in Figuur 6.34.

De drie varianten zijn doorgerekend met dezelfde randvoorwaarden en tijdsperiode als gebruikt in de simulaties voor de zuidelijke bochtafsnijdingen. Dezelfde types modeloutput zijn gegenereerd: stromingspatronen, maximale vloed- en ebstroomselheid in verschillende punten langs de vaargeul, en getijvolumes voor eb en vloed over een aantal controletransecten dwars op de geulen.



Figuur 6.34. Bodemligging van de drie varianten: A. Referentie (REF); B: ReegeulOOST-ongedempt; C: ReegeulOOST-gedempt. De rode stip in Fig A geeft de positie weer van het punt waarvoor waterstanden en snelheden zijn weergegeven in Figuur 6.35.

Aanlegbaggerwerk

Het te baggeren volume, op basis van volumeverandering in de bodemligging van het model, is 70,000 m^3.

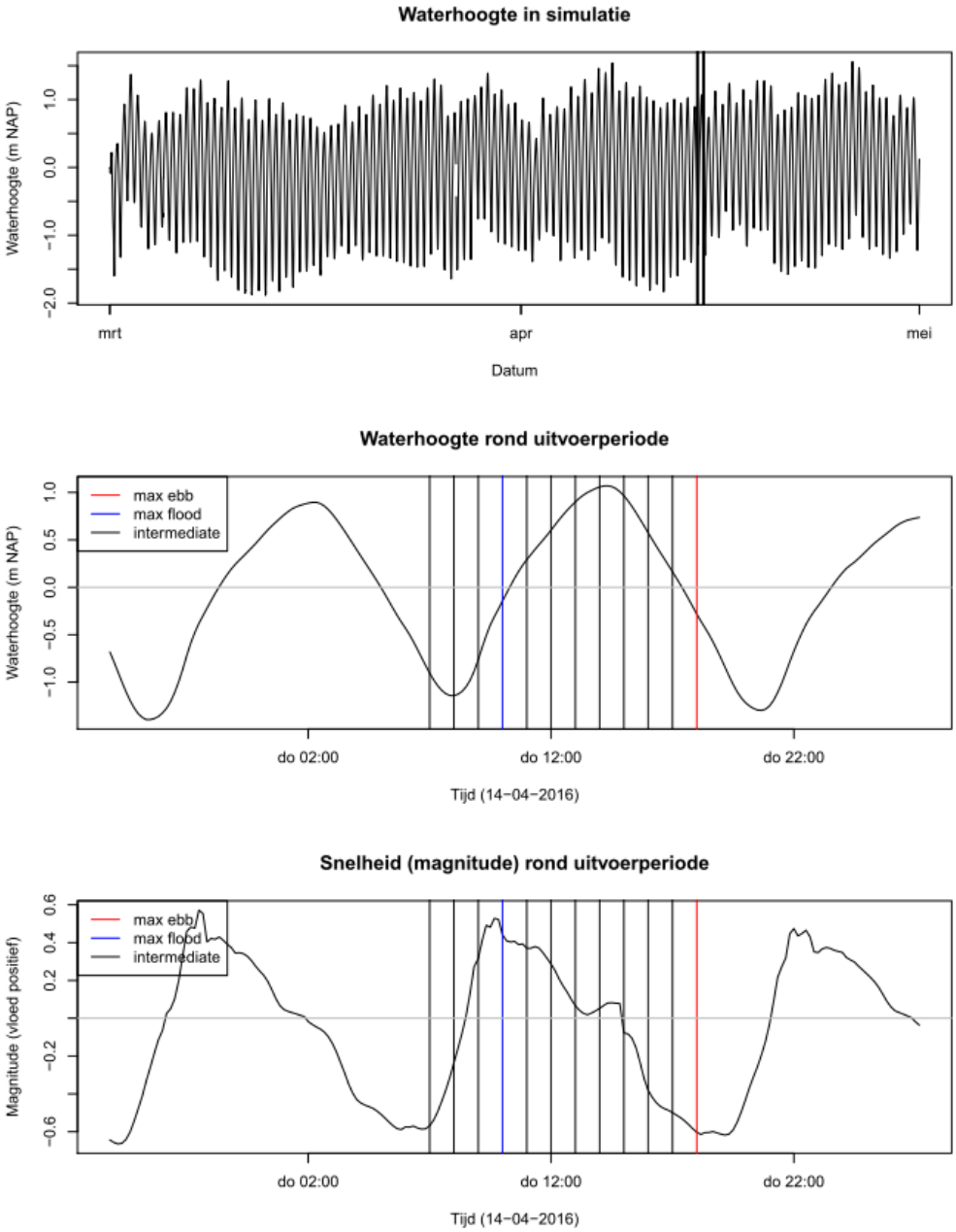
Verkorting vaarweg

De vaarweg is ongeveer 775 m korter. Dat levert naar verwachting een verkorting van de vaartijd met 2 minuten op. Daarnaast zal de vaartijd ook verkorten door het wegvallen van de

scherpe bocht; wij kunnen deze verkorting van de vaartijd niet inschatten met de beschikbare informatie.

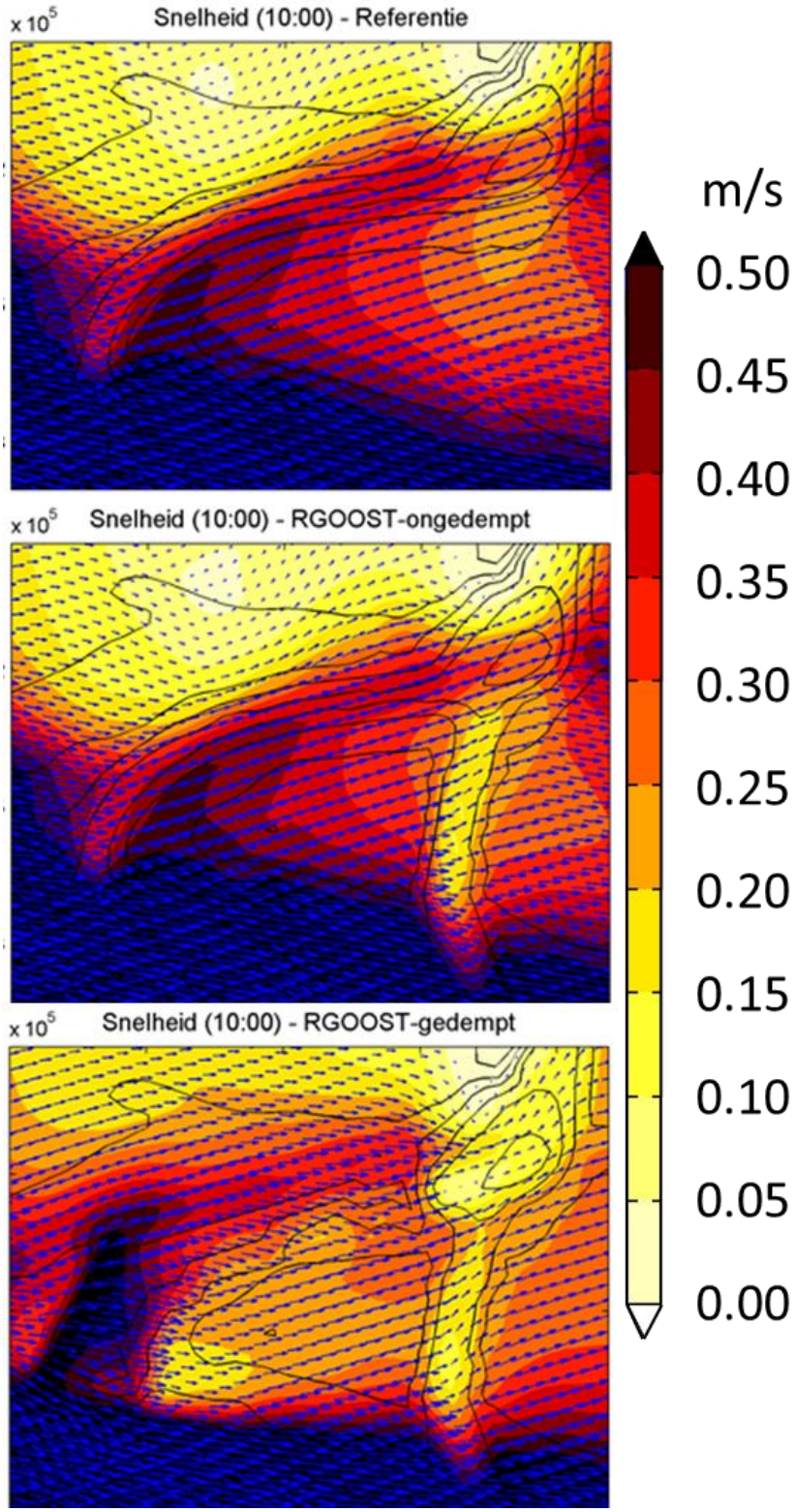
Stromingspatronen

Modeluitvoer van stromingspatronen is, overeenkomstig met de andere varianten, gegenereerd voor 14 april 2016. In Figuur 6.35 is de uitvoerperiode gekarakteriseerd aan de hand van waterhoogte en getijsnelheid in een punt in de geul (Veerbootgeul) ten zuiden van de Reegeul (zie Figuur 6.34 voor positie).



Figuur 6.35 Waterhoogte en stroomsnelheid tijdens de simulatie. De bovenste figuur toont waterhoogtes gedurende de gehele simulatieperiode, de middelste figuur geeft waterhoogte rond de uitvoerdag. De onderste figuur toont de magnitude van de snelheid rond de uitvoerdag, met vloed positief en eb negatief. Het tijdstip met maximale ebstroom is aangegeven in rood, dat met maximale vloedstroom in blauw.

Stromingspatroon: max vloed



Figuur 6.36. Stromingspatroon bij max vloed in (a) de referentie (b) de variant Reegeul-OOST zonder demping van de oude geul en (c) de variant Reegeul-OOST met demping van de oude geul. De kleurcodering geeft de magnitude van de stroom weer, de vectoren tonen de richting en relatieve grootte van de stroom.

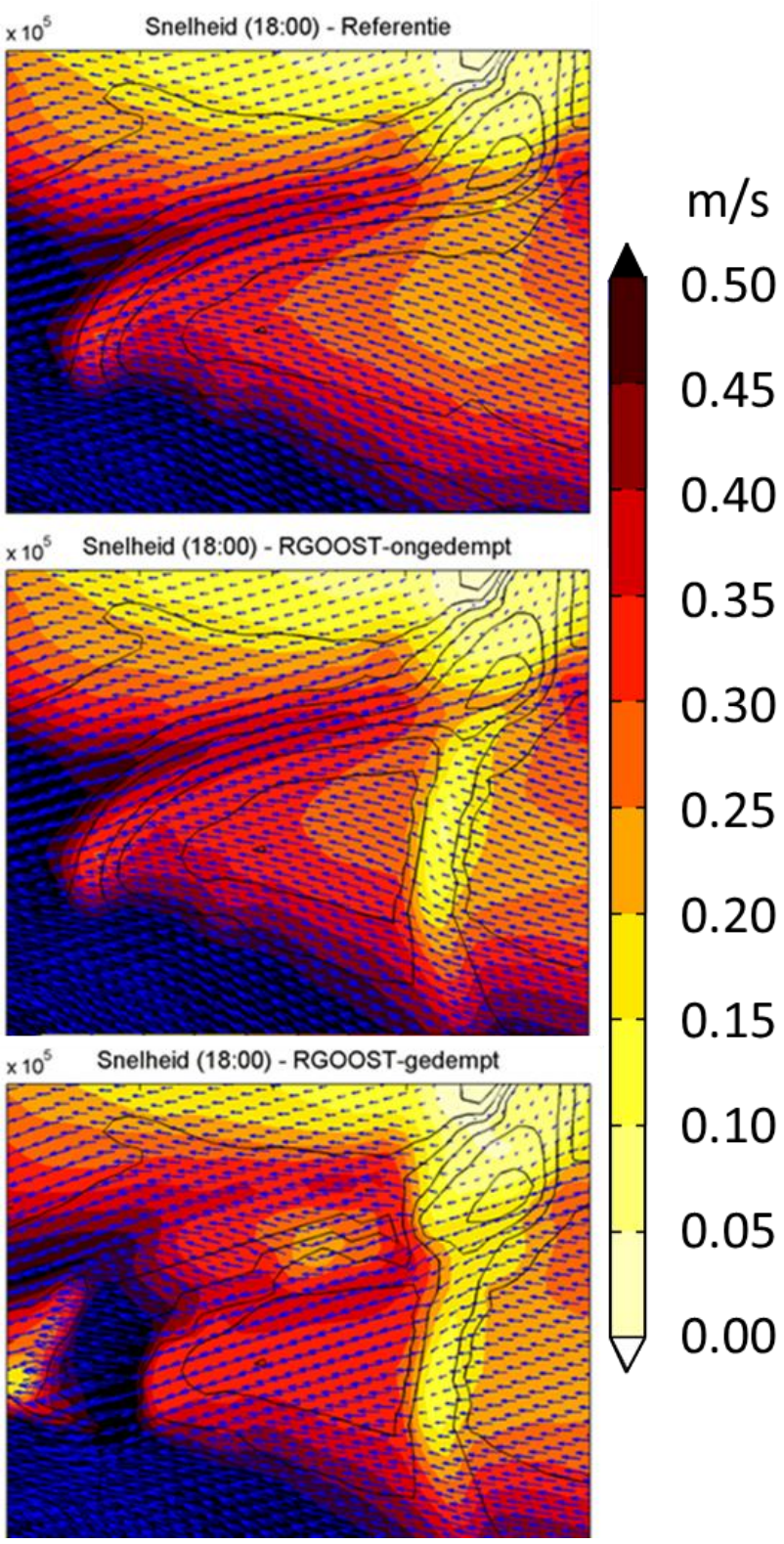
De vloedstroom (Figuur 6.36) is in de referentiesituatie significant hoger in de (bestaande) Reegeul dan over de platen in de omgeving. De geul heeft een aantrekkend effect op de stroming.

In de varianten ReegeulOOST, min of meer onafhankelijk van het dempen van de oude geul, wordt in de nieuwe geul geen stroom getrokken. Door de grotere diepte vertraagt de stroming over de nieuwe geul. De richting van de stroom wordt een beetje afgebogen naar het noordoosten, in vergelijking met de stromingsvectoren over de omringende platen, maar het effect is klein en er ontstaat geen duidelijke langsstroming in de nieuwe geul. De oude geul blijft stroom trekken, zeker wanneer ze niet is gedempt, maar zelfs na demping blijft er een hogere stroomsnelheid op deze locatie, in vergelijking met de onmiddellijke omgeving. Het dempen van de oude geul heeft een algemeen verkleinend effect op de vloedstroom ten oosten van de locatie van de oude geul.

Stromingspatroon: max eb

De ebstroom (Figuur 6.37) wordt, net als de vloedstroom, in de referentiesituatie naar de bestaande Reegeul getrokken. Er is een duidelijke verhoging van de stroomsnelheid in de geul, in vergelijking met de omringende platen. De stroomsnelheid in de nieuwe geul is lager na aanleg van die geul, dan de stroomsnelheid op dezelfde locatie in de referentie. De richting van de stroming wordt over de nieuwe geul licht afgebogen naar noordwest, in vergelijking met de vectoren in de referentie.

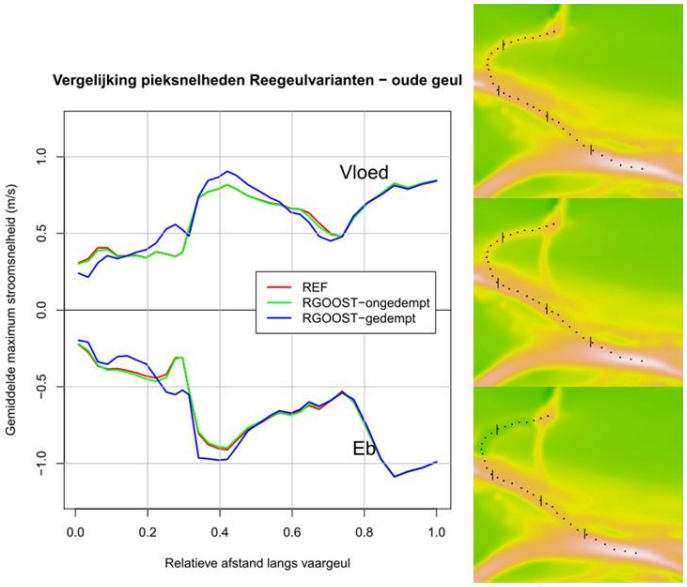
Na demping van de oude geul ontstaan er zones met verhoogde ebstroomsnelheid ten noorden en ten zuiden van de locatie van de oude geul. Deze kunnen te maken hebben met het feit dat de oude geul iets hoger is gedempt dan het niveau van de platen in de onmiddellijke omgeving. Op de locatie van de oude geul nemen de stroomsnelheden af. De algemene richting van de stroming in het gebied ten zuidoosten van de oude geul, verandert na demping van die oude geul. Zonder demping is de richting west-noordwest, na demping verandert ze in west-zuidwest. In geen van de twee varianten met een Reegeul-OOST zijn er tekenen dat de nieuwe geul stroom trekt.

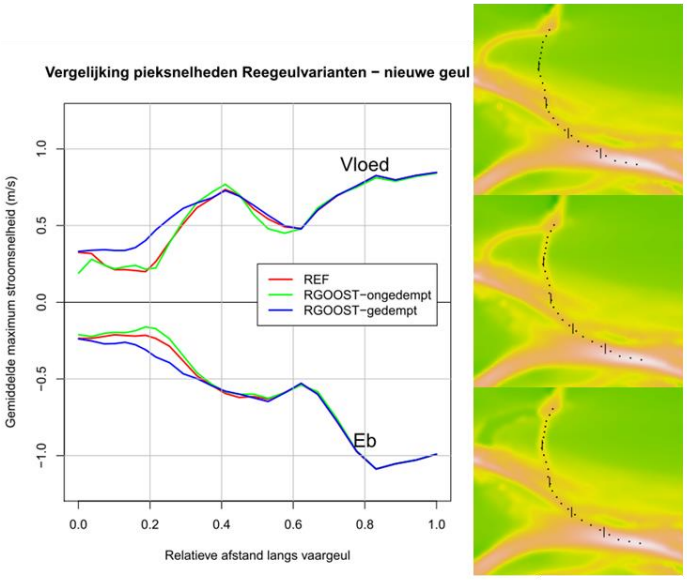


Figuur 6.37 Stromingspatroon bij max eb in (a) de referentie (b) de variant Reegeul-OOST zonder demping van de oude geul en (c) de variant Reegeul-OOST met demping van de oude geul. De kleurcodering geeft de magnitude van de stroom weer, de vectoren tonen de richting en relatieve grootte van de stroom.

Piekstroomsnelheden

Piekstroomsnelheden in de vaargeul worden getoond in Figuur 6.38 voor de drie varianten. De piekstroomsnelheden zijn lager in de nieuwe vaargeul, en dat wordt slechts in geringe mate veranderd door het dempen van de oude geul. Op de punten in de oude geul verandert de piekstroomsnelheid slechts weinig door de aanleg van de nieuwe geul, en zelfs door het dempen van de oude geul.

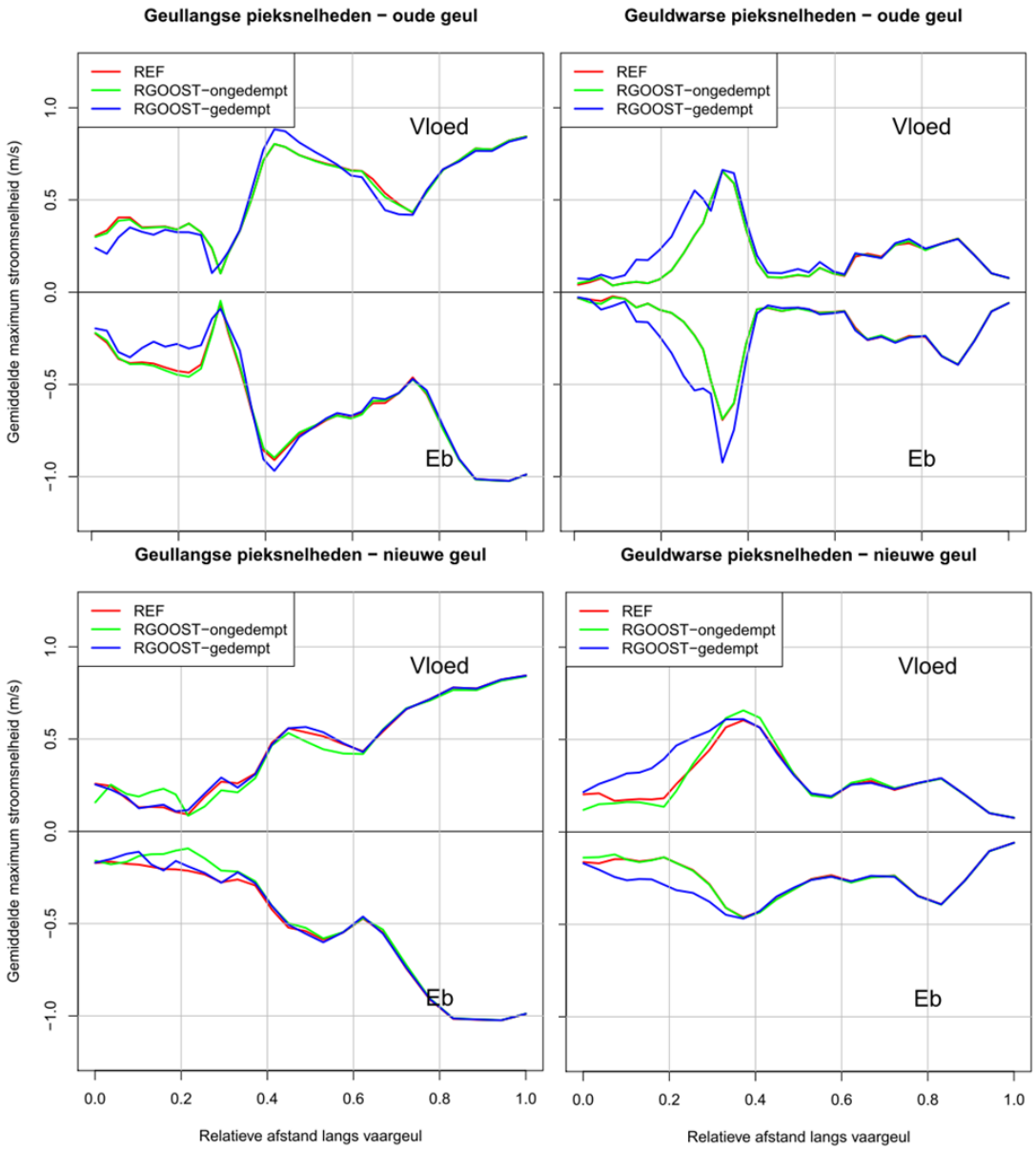




Figuur 6.38. Piekstroomsnelheden in de oude (boven) en de nieuwe (onder) vaargeul in de drie varianten. De positie van de controlepunten is aangeduid op de kaartjes. De relatieve afstand is t.o.v. het eerste controlepunt bij de veerhaven in Nes (bovenin de kaartjes). Streepjes op de kaartjes geven posities 0.2, 0.4, 0.6 en 0.8 weer.

In de grafieken geven de relatieve afstanden 0.0-0.4 zowel de oude geul als de nieuwe geul weer. De relatieve afstand 0.4-1.0 ligt in het Veerbootgat (figuur 6.33).

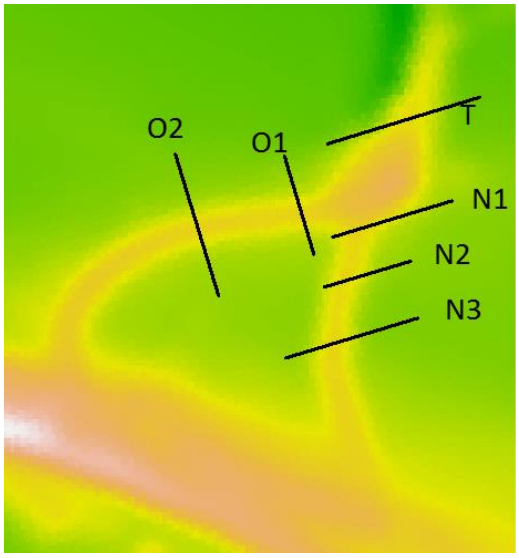
Een verder inzicht in de stromingspatronen kan worden verkregen door de snelheden te ontbinden in geullangse en geuldwarse componenten. We hebben deze decompositie uitgevoerd, en daarna de hoogste snelheden geullangs en geuldwars geplot voor de verschillende controlepunten. Merk op dat de piek in geullangse snelheid niet noodzakelijk in de tijd samenvalt met de piek in de geuldwarse snelheid. Onderscheid is opnieuw gemaakt tussen vloed- en ebsnelheid. Figuur 6.39 toont deze snelheden voor de verschillende varianten.



Figuur 6.39. Pieken in geullangse (links) en geuldwarse (rechts) stroomcomponenten voor de controlepunten in de oude geul (boven) en de nieuwe geul (onder). De relatieve afstand is t.o.v. het eerste controlepunt bij de veerhaven in Nes.

In de nieuwe geul zijn de geullangse snelheden aanzienlijk lager dan in de oude geul. Voor de geuldwarse componenten geldt het omgekeerde. Het dempen van de oude geul leidt niet tot een verhoging van de geullangse stroming in de nieuwe geul. Wel ontstaan meer geuldwarse stromingen in de oude geul, en neemt ook de geullangse component iets af. De geuldwarse stromingen nemen door het dempen echter ook toe in de nieuwe geul.

Getijvolumes



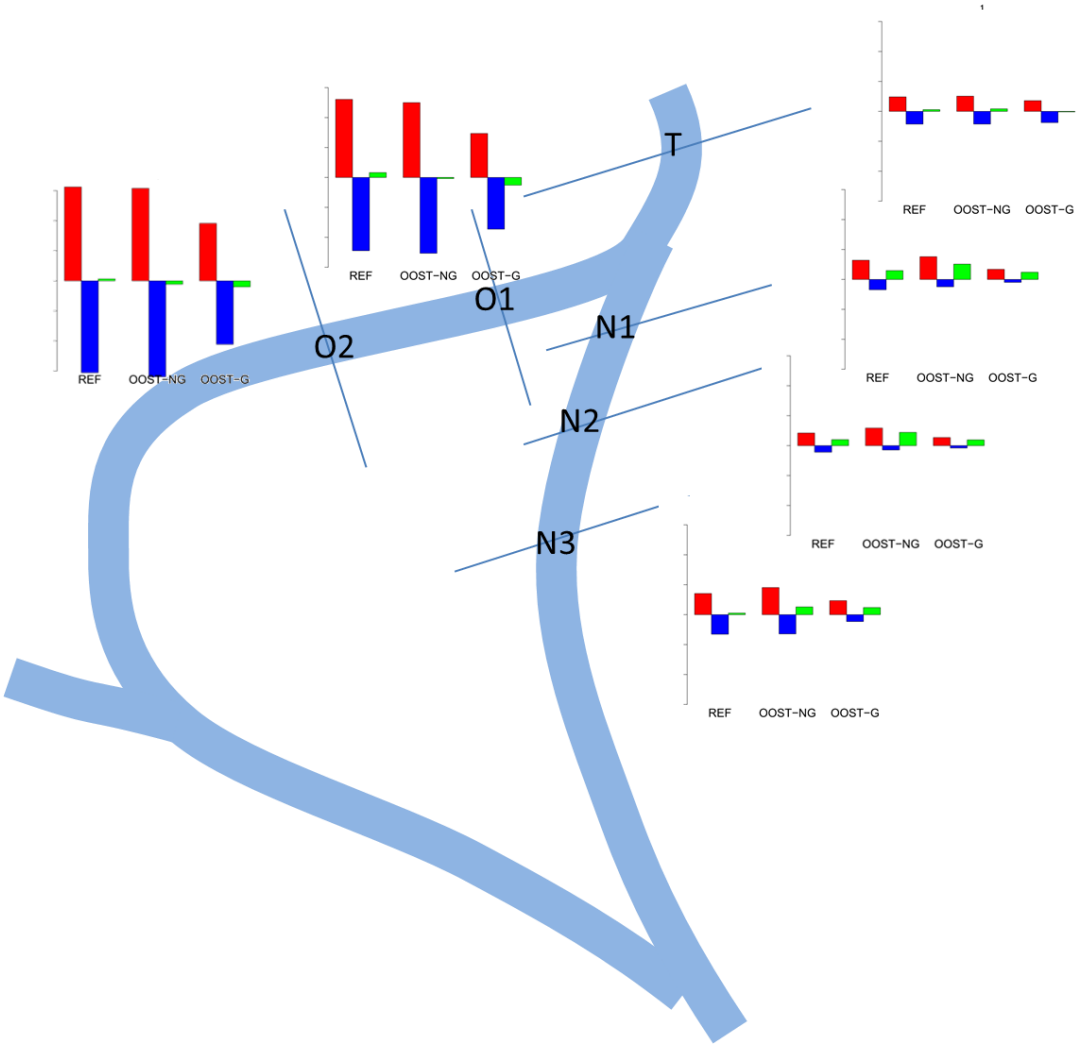
Figuur 6.40. Ligging van de controleraaien waarover de getijvolumes zijn berekend. Zowel de oude als de nieuwe geul zijn in de bodemligging aangegeven.

De getijvolumes door de controletransecten (Figuur 6.40) tonen een groot verschil tussen de oude geul en de nieuwe geul. Dit hangt samen met de oriëntatie van de geulen en van de controletransecten. Transecten kunnen alleen volgens de hoofdassen van het modelgrid worden geplaatst. Daarom staan ze niet precies haaks op de oriëntatie van de nieuwe geul, maar wel bijna. Onafhankelijk van de variant, vertonen de transecten door de nieuwe geul veel lagere volumes dan die door de oude geul. Dat wordt veroorzaakt doordat de dominantie oriëntatie van de getijstromen ongeveer dwars op de nieuwe geul verloopt. De stroming is dus min of meer parallel met de transecten. Als gevolg daarvan is het dwarse transport over de transecten zeer gering. Dit toont eveneens aan dat er in de langsrichting van de nieuwe geul nauwelijks significant watertransport optreedt.

Getijvolumes door de oude geul zijn ongeveer gelijk voor referentie en ongedempt scenario (Figuur 6.41, Tabel 6.3). Ze worden verminderd met een factor ½ in het scenario met gedempte oude geul. Het transport dat over de platen plaatsvindt is een significante bijdrage aan het totale transport over de transecten, en dit wordt niet verhinderd door het dempen van de oude geul.

Tabel 6.3. Getijvolumes van de controletransecten die gesitueerd worden in Figuur 6.41. De volumes zijn gegeven in 1000 m3/getij. Vloedvolume is positief, ebvolume negatief.

Transect	REF			RGOOST-ongedempt			RGOOST-gedempt		
	Vloed	Eb	Netto	Vloed	Eb	Netto	Vloed	Eb	Netto
T	483	-427	55	508	-426	81	356	-375	-19
O1	2608	-2446	161	2499	-2535	-36	1469	-1728	-258
O2	3124	-3059	65	3077	-3193	-116	1912	-2114	-202
N1	641	-346	295	758	-246	511	337	-98	238
N2	419	-220	199	586	-144	442	270	-80	190
N3	706	-654	52	903	-645	258	466	-230	236



Figuur 6.41. Getijvolumes door de controletransecten. Iedere grafiek toont vloedvolume (rood), ebvolume (blauw) en netto volume (groen) voor (in volgorde van links naar rechts) de varianten REF, RGOOST-ongedempt en RGOOST-gedempt. Alle grafieken zijn op dezelfde schaal getekend. Schaalindelingen zijn weggelaten, maar de absolute waarde van de volumes kan worden afgelezen in Tabel 6.3.

7 Vergelijking en evaluatie van varianten

7.1 Inleiding

In dit hoofdstuk vergelijken wij de varianten onderling, en geven wij een inschatting van de haalbaarheid en bestendigheid van de oplossing voor het vaarwegprobleem die door deze varianten kan worden geboden. Deze afweging is gebaseerd op de feitelijke informatie over de varianten die in Hoofdstuk 6 wordt gepresenteerd, en maakt gebruik van expert judgement waar nodig.

De aspecten die worden meegenomen bij de vergelijking en evaluatie van de varianten zijn gedefinieerd bij aanvang van dit project. Zij worden samengevat, samen met de essentie van de gebruikte methodiek voor evaluatie, in Tabel 7.1, en worden daarna verder in detail toegelicht.

Tabel 7.1 Overzicht van de criteria en de wijze van analyse voor de vergelijking en evaluatie van de varianten

Aspect	Wijze van analyse
Vaartijd	Op basis van vaarlengte plus informatie van WPD (*)
Baggerbezwaar	Op basis van berekende stroomsnelheden & expert judgement
Aanlegbaggervolume	Op basis van verandering bathymetrie
Morfologische gevolgen	Op basis van expert judgement
Ecologische gevolgen	Op basis van expert judgement

(*) Gesprek met Wagenborg (WPD) is gevoerd op 18 juli 2016, zie bespreekverslag in Annex C.

In de tabellen die de evaluatie van de varianten samenvatten, worden kleurcodes gebruikt om uit te drukken hoe gunstig of ongunstig de varianten uitvallen. De kleurcodering wordt toegelicht in Figuur 7.1.

Figuur 7.1 Kleurcodering in de tabellen met evaluatie van de varianten

7.2 Vaarlengte en vaartijd

De vaarlengte is berekend op basis van bodemligging in het model voor de verschillende varianten. De verkorting van de vaartijd is voor de meeste varianten berekend op basis van de verkorting van de vaarweg, met de aanname dat de gemiddelde snelheid 15 km/u bedraagt. Uitzondering vormen de varianten DIEPBREED en REEGEUL-OOST. De variant DIEPBREED verkort de vaarweg niet, maar door de verdieping en verbreding van de geul is het mogelijk sneller te varen en sneller andere schepen te passeren in de vaargeul. Daardoor wordt ingeschat dat de vaartijd met enkele minuten kan worden verkort. Voor de variant REEGEUL-OOST is ingeschat dat het wegvallen van de scherpe bocht de vaartijd met enkele minuten verkort, bovenop de verkorting van de vaarweg die zelf ook voor ongeveer 2 minuten verkorting van de vaartijd zorgt.

Verkorting van de vaartijd zou ook in de andere varianten kunnen voortkomen uit het feit dat de vaarweg rechter is, zodat minder moet vertraagd worden voor bochten. De schattingen die hier worden gegeven zijn dus voor de meeste varianten minimale inschattingen, omdat voor alle varianten (behalve DIEPBREED) de vaarweg rechter is dan voor REF. Daarnaast dient opgemerkt te worden dat met name de overschrijdingen van de voorziene vaartijd (1 uur inclusief laden en lossen) voor problemen zorgen. Die overschrijdingen hangen ook samen met toevallige omstandigheden van waterstand, wind en golven. De kans op overschrijding zou maatgevend moeten zijn voor de effectiviteit van ingrepen, maar voorlopig ontbreekt inzicht in de statistiek van de vaartijden om dit in detail uit te werken (zie ook aanbevelingen in Hoofdstuk 8).

Merk op dat de verkorting van de vaargeul voor de varianten LANG en LANGSPOEL nu vooral voorkomt uit het afsnijden van de vloedgeul, wat zij gemeenschappelijk hebben met de variant VLOEDGEUL. De lange varianten zijn zo ontworpen dat zij maximaal de natuurlijke geulen volgen; bij afwijking van dit principe zou een iets rechtere vaargeul kunnen worden verkregen, met een extra tijdswinst van ca. 1 minuut, maar tevens hogere aanlegkosten en grotere morfologische en ecologische gevolgen. Door het bochtige karakter van de varianten en de smalle geul bij het doorsnijden van de plaat voor Holwerd, wordt de kans op verkorting van de vaartijd in deze varianten iets minder gunstig ingeschat dan voor VLOEDGEUL. Dit kwalitatief verschil wordt weergegeven in de kleurcodering, maar kon met de beschikbare informatie niet kwantitatief (in minuten) worden uitgedrukt.

Tabel 7.2 Vergelijking van varianten m.b.t. verkorting van de vaargeul en vaartijd

Variant	Verkorting vaargeul	Verkorting Vaartijd
REF	nvt (huidige vaargeul = 11,8 km)	nvt
VLOEDGEUL	ca. 1 km	ca. 4 min (1)
LANG	ca. 1 km	ca. 4 min (1)
LANGSPOEL	ca. 1 km	ca. 4 min (1)
DIEPBREED	Geen verkorting, wel ruimere geul	0 tot enkele minuten (2)
REEGEUL-OOST	ca. 800 m	ca. 4 min (3)

(1) Schatting van verkorting vaartijd op basis van gemiddelde vaarsnelheid van 15 km/uur (afhankelijk van o.a. wind en getijcondities, mede afgestemd in stuurgroep Open Planproces (5 en 12 oktober 2016) met Wagenborg Passagiersdiensten)

(2) Verkorting vaartijd door hogere vaarsnelheid in diepere en bredere vaargeul met minder weerstand; vooral relevant tijdens laagwater en/of sterke wind, en als de boten elkaar moeten passeren

(3) Verkorting vaartijd door kortere route en door het vermijden van de scherpe bocht in de huidige vaargeul

7.3 Baggerbezwaar

De effecten van de verschillende varianten op het baggerbezwaar zijn niet gemakkelijk in te schatten. Een basis voor de inschatting zijn de stroomsnelheden, en dan vooral de pieksnelheden bij eb (die in principe slib verwijderen), en de verhouding tussen pieksnelheden bij eb en vloed. De modelresultaten die zijn besproken in Hoofdstuk 6 vormen hiervoor een basis.

Voor de variant REF wordt minimaal een handhaving van het huidige baggerbezwaar verwacht, bij continuering van de huidige baggerpraktijk. Er zijn uit de ontwikkelingen van de

laatste jaren geen argumenten te halen waarom dit baggerbezwaar zou dalen, trendmatig wordt eerder een (gematigde) stijging van het baggerbezwaar verwacht.

De analyse van de veldresultaten heeft aangetoond dat er een zeer snelle terugkeer van slib is vanaf de plaatsen waar op eb wordt geloosd, naar de plaatsen waar het slib wordt gebaggerd. Als dit slib kan worden gebruikt voor het vullen van de ebgeul, waardoor het minder snel recirculeert, dan zou het baggerbezwaar sterk kunnen afnemen, terwijl de hoeveelheden slib die daarbij moeten worden gebruikt relatief beperkt blijven. Mogelijkheden om slib stabieler te storten (d.w.z. zo te storten dat het langzamer weer in circulatie komt) doen zich waarschijnlijk voor bij enkele varianten, met name die varianten die gebruikmaken van de uitgediepte vloedgeul (VLOEDGEUL, LANG en LANGSPOEL). Door het vullen van de ebgeul zal de stroomsnelheid in deze diepe geul immers sterk afnemen, waardoor het waarschijnlijk is dat een slib-zandmengsel er niet snel weer resuspendeert. De verwachting is dat de op te vullen ebgeul gedurende enkele jaren kan worden gebruikt om baggerspecie te bergen. De bergruimte hangt echter af van de snelheid waarmee de afgesloten geul door natuurlijke processen verzandt. Op de korte termijn van enkele jaren verwachten wij een positief effect op het baggerbezwaar, omdat een aanzienlijk deel van het baggerbezwaar samenhangt met een beperkte massa snel terugkerend slib. Het gebruik van de baggerspecie om de ebgeul op te vullen zal ook inzicht geven in de dynamiek van het slib dat nu op eb wordt gestort. Als het onderbrengen van slib in de ebgeul op korte termijn leidt tot vermindering van het baggerbezwaar, dan kunnen die resultaten worden gebruikt om voor de verdere toekomst (na opvullen van de ebgeul) een duurzamere stortstrategie in te stellen. Dit is in de overwegingen meegenomen.

Voor de varianten LANG en LANGSPOEL geldt dat hun zuidelijke stuk tegen de algemene stroomrichting (die over de platen vooral oost-west is georiënteerd) in ligt. Daardoor ontstaan dwarsstromen die naar verwachting veel sediment in de geulen kunnen brengen. Verwacht wordt dat dit sediment zanderiger is dan het huidige baggermateriaal en daardoor stabieler kan worden geborgen, maar daar staat tegenover dat er een ruime bron van zand is op de platen, waardoor berging wellicht niet leidt tot substantiële vermindering van de nieuwe sedimentatie (wat voor slib in een snelle cyclus wel wordt verwacht). Tegenover dit nadeel staat het voordeel dat deze varianten niet door de voet van de kwelder (en aanliggend slik) lopen, waardoor de slibinvang als gevolg van geul-plaat interactie waarschijnlijk aanzienlijk kleiner zal zijn. Overall leidt dit tot aanzienlijke onzekerheid in de inschatting van het baggerbezwaar, wat in onderstaande tabel als “onzeker“ is aangeduid.

De variant DIEPBREED heeft alle negatieve eigenschappen van REF, maar versterkt deze door een verdere vermindering van de stroomsnelheden, waardoor een verdere toename van het baggerbezwaar wordt verwacht. Als hierdoor extra slib wordt aangetrokken uit de Waddenzee, dat vervolgens in de snelle cyclus van baggeren, storten en terugkeren intreedt, dan zou het baggerbezwaar sterk en sprongsgewijs kunnen stijgen.

Voor de variant REEGEUL-OOST verwachten wij dat het baggerbezwaar aanzienlijk zal toenemen, in vergelijking met de ongeveer 45.000 m^3 per jaar die nu in deze geul wordt gebaggerd. De oostelijke nieuwe geul trekt geen stroom, ook niet als de oude geul is gedempt. De stroming staat dwars op de geul, en verzwakt sterk ter hoogte van de geul tijdens de pieken van eb en vloed. Daardoor zal sediment, met name zand dat van de platen komt, de neiging hebben in de geul uit te zakken en daar te sedimenteren. Er is onvoldoende langsstroming in de geul om dit sediment opnieuw op te pikken en naar elders te transporteren. Hoe groot de toevoer vanaf de platen naar de nieuwe geul zal zijn is moeilijk in te schatten. Naast stroming zullen golven hierin een belangrijke rol spelen, omdat het

sediment met name door golfwerking op de platen zal worden gemobiliseerd. Wij schatten in dat de toename in REEGEUL-OOST in absolute hoeveelheden kleiner zal zijn dan het baggerbezwaar in het zuidoostelijke deel van de vaargeul, maar dat de relatieve toename groot zal zijn. Daarom wordt het baggerbezwaar als 'ongunstig' ingeschat.

Deze overwegingen worden samengevat in Tabel 7.3.

Tabel 7.3 Vergelijking van varianten m.b.t. effect op onderhoudsbaggerwerk (baggerbezwaar)

Variant	Baggerbezwaar (onderhoud)	Opmerking / argument
REF	1,8 Mm^3 per jaar (2015)	Verdere ontwikkeling: wellicht lichte toename
VLOEDGEUL	+	ruimte om baggerspecie te bergen in noordelijke bocht (ebschaar)
LANG	?	Positief: ruimte om baggerspecie te bergen in ebschaar; minder geul-plaat interactie. Negatief: dwarsstromingen;waarschijnlijk aanzanding; . Snelheden lager dan in REF – minst zekere uitkomst van alle varianten
LANGSPOEL	?	Niet wezenlijk verschillend van LANG
DIEPBREED	-	Stroomsnelheden zijn tussen 0,2-0,5 m s^{-1} in zuidelijke vaargeul bij Holwerd; 30% lager dan variant REF
REEGEUL-OOST	-	Huidige baggerbezwaar in Reegeul = 45.000 m^3/jaar; door gebrek aan langsstroming en sterke dwarsstroming in nieuwe oostelijke geul zal sedimentatie relatief sterk toenemen

7.4 Baggerwerken voor aanleg

Een belangrijk (maar onvolledig) deel van de aanlegkosten is gekoppeld aan het aanlegbaggervolume. Dit volume is per variant berekend op basis van de huidige bathymetrie en een vaargeul van ca. 55 m breed en 3,8 m diep, zoals gebruikt in de modelsimulaties. De modelbathymetrie op het modelrooster is gebruikt om het initiële baggervolume te schatten.

De baggerwerkzaamheden voor de aanleg van de kortsluitgeul zullen waarschijnlijk uitgevoerd worden met een zuiger. De zuiger perst het opgebaggerde zand-slib- en watermengsel door een tijdelijk leiding die over het wad wordt gelegd naar de verspreidingslocatie. Die locatie en de route van de leiding moeten zo worden gekozen dat de veerverbinding hier een minimale hinder van ondervindt. Een zuiger kan vrijwel continu doorwerken, ook tijdens laagwater, zodat het schip en de bemanning optimaal worden ingezet (waarbij geen rekening is gehouden met eventuele beperkingen die voortkomen uit bijvoorbeeld de vergunning voor natuurbeschermingswet). Mogelijk wordt voor de variant VLOEDGEUL een sleephopperzuiger ingezet (hetzelfde type baggerschip dat nu voor het onderhoud van de vaarweg wordt ingezet), omdat de te baggeren volumes voor die variant kleiner zijn. Verwacht wordt dat de afstand tussen de te baggeren geul en de verspreidingslocatie niet meer dan enkele kilometers bedraagt.

Een eerste schatting van de aanlegkosten kan worden verkregen door het te baggeren volume te vermenigvuldigen met de eenheidsprijs per kubieke meter baggerspecie. Bij een meer gedetailleerde kostenschatting zal o.a. rekening moeten worden gehouden met de

kosten voor mobilisatie van het baggerschip en de leidingen (die per variant hetzelfde zullen zijn) en de lengte van de leiding (die per variant verschilt, en hoger wordt naarmate de afstand toeneemt). Rijkswaterstaat zal, waar nodig, een nadere kostenraming leveren aan de hand van de geschetste varianten.

Bij de variant LANGSPOEL moeten ook de kosten voor de aanleg van het Spoelmeer en van de aanvoergeul worden bepaald. Deze kosten zijn afhankelijk van de omvang van het spoelmeer en de omvang van de sluis. De belangrijkste kostenposten zijn de grondverwerking, de aanleg van de sluis (met inbegrip van het regelwerk, de noodafsluiting en de elektronica) en het grondverzet (aanleg dijk, landschap Spoelmeer en verbindingsgeul). Naar verwachting bedragen de kosten enkele tientallen miljoenen euro's.

De kostenschatting voor aanleg moet ook rekening houden met de kosten voor de planvorming, vergunningentraject, opvolging van de werken en monitoring van de effecten. Dit zal de kosten naar verwachting aanzienlijk doen toenemen, maar er wordt geen groot verschil tussen de varianten verwacht, met uitzondering van LANGSPOEL dat een veel ingewikkelder dossier is dan de andere varianten.

Omdat een volledige kostenraming op dit ogenblik niet mogelijk is, worden in Tabel 7.4 alleen de geschatte baggervolumes voor aanleg aangegeven. Deze vormen een element voor de totale afweging, maar daarbij dient rekening te worden gehouden met het feit dat de uiteindelijke prijs per m^3 zal verschillen van de ene variant tot de andere. De aangegeven volumes zijn een minimumschatting, omdat is uitgegaan van een breedte van 55 m en een diepte van -3,8 m NAP. Bij aanleg wordt gewoonlijk gebaggerd tot de maximale onderhoudsmaten (60 m breed, -4 m NAP diep), waardoor een vermeerdering van ongeveer 15 % in de volumes kan worden verwacht.

Tabel 7.4 Vergelijking van varianten m.b.t. baggervolume voor aanleg

Variant	Aanleg baggervolume (m^3)
REF	nvt
VLOEDGEUL	358.000
LANG	930.000
LANGSPOEL	930.000(1)
DIEPBREED	630.000
REEGEUL-OOST	70.000

(1) te vermeerderen met de werken voor de aanleg van het Spoelmeer en de aanvoergeul

7.5 Morfologische gevolgen

Op basis van de grootschalige morfologische verandering in het systeem, zoals die in het verleden is waargenomen (zie voor gedetailleerde beschrijving het rapport over de werkzaamheden in 2015, Villars et al., 2016) is te verwachten dat op lange termijn (> 10 jaren) de verhoging van het wad in deze omgeving van het wantij door zal zetten. Daardoor wordt de komberging kleiner, verminderen de stroomsnelheden in de geulen nog verder, en ontstaat een neiging tot meer vloeddominantie in de stromingen. Die autonome ontwikkelingen zijn op de lange termijn ongunstig voor het onderhoud van de vaargeul op zijn huidige locatie.

Uit de simulaties is gebleken dat geen enkele variant in staat is deze trend te keren, maar dat in tegendeel de meeste doorgerekende varianten zelfs lagere stroomsnelheden dicht bij Holwerd laten zien, in vergelijking met de variant REF. Deze modelresultaten leiden tot de

conclusie dat de varianten geen oplossing op de lange termijn voor de problemen van het onderhoud van de vaargeul kunnen bieden. Het zal waarschijnlijk in alle doorgerekende varianten (inclusief REF) moeilijker worden om de geul open te houden en te onderhouden.

In de eb-vloedschaar die door VLOEDGEUL wordt afgekort, is geconstateerd dat het uitbochten van de vaargeul doorgaat, en dat deze uitbochting zelfs sneller lijkt te gaan dan voor andere geulen in het gebied is gemeten. Wij veronderstellen dat het intensieve baggerwerk en de invloed van de jets van de veerboten daarmee te maken hebben.
Samenhangend met de toegenomen uitbochting is tevens geconstateerd dat de vloedgeul in de eb-vloedschaar, tegen de morfologische verwachtingen in, in de laatste jaren is gedegenereerd. Dit is wellicht te wijten aan de bagger- en stortactiviteiten, en met name het sediment dat terugkeert naar de vaargeul na het lozen op eb. Toch is er enige twijfel over de effectiviteit van de varianten die gebruikmaken van een uitgediepte vloedgeul. Als de degeneratie ook te wijten is aan een autonoom proces (wat naar onze analyse onwaarschijnlijk maar niet geheel onmogelijk is), zou dit ook bij deze varianten voor problemen kunnen zorgen.

M.b.t. morfologische ontwikkelingen hebben de varianten LANG en LANGSPOEL extra risico's, omdat deze varianten dwars door de Teding van Berkhoutplaat snijden, waar nooit een geul is geweest, en omdat de geul in deze varianten een richting aanhoudt die dwars ligt op die van de natuurlijke geulen. Dat genereert dwarsstroming, waarschijnlijk toegenomen sedimentatie in de geul, maar zou ook morfologische ontwikkelingen kunnen induceren waarvan de aard en omvang moeilijk is in te schatten. Het is te verwachten dat de ingreep niet zonder een leidam in stand zal kunnen worden gehouden. Zonder een relatief lange leidam is bovendien een Spoelmeer weinig of niet effectief.

Door de vermindering van de komberging op de platen rond de vaargeul, is de natuurlijke neiging van de geul om een nieuwe evenwichtsconfiguratie te bereiken met een kleinere dwarsdoorsnede. Baggerwerken zijn noodzakelijk om de geul op voldoende breedte en diepte te houden, tegen deze neiging in. Bij het verder verdiepen en/of verbreden van de vaargeul, zoals in de variant DIEPBREED, wordt het onevenwicht tussen de vorm van de geul en de natuurlijke evenwichtssituatie nog sterker. Daardoor is deze variant, vanuit het oogpunt van morfologische ontwikkeling, zeer ongunstig.

Voor REEGEUL-OOST wordt verwacht dat deze morfologisch niet stabiel zal zijn. De modelberekeningen met de nieuwe geul geven aan dat, zelfs na demping van de oude geul, het water de weg van de bestaande geul wil blijven volgen. De huidige geul is historisch zeer stabiel gebleken: al sinds 1958 is de positie van de Reegeul niet veranderd. De geul is verankerd aan haar noordzijde door de pier bij Nes, en vanaf dat punt kiest het water de weg die het meeste overeenkomt met de algemene (ZW-NO) richting van de getijstroming in dit gebied. Daarom zal de vaargeul, mocht ze naar het oosten worden verlegd, continu de neiging hebben op te schuiven in de richting van de huidige geul.

Tabel 7.5 Vergelijking van varianten m.b.t. morfologische effecten

Variant	Morfologische ontwikkeling	Argument / opmerking
REF	nvt	Verdergaande verlanding en reductie komberging verwacht
VLOEDGEUL	+	Versnellen van een natuurlijk proces; risico van degeneratie door autonoom proces
LANG	--	Geen verandering negatieve autonome trend; bijkomende morfologische risico's
LANGSPOEL	--	Niet wezenlijk verschillend van LANG
DIEPBREED		Nog verder verwijderd van morfologisch evenwicht
REEGEUL-OOST	--	Ongunstig omdat de stroming de geul naar de huidige positie zal terugbrengen

7.6 Ecologische gevolgen

De ecologische gevolgen van het vaargeulonderhoud en van de varianten kunnen in drie groepen worden onderverdeeld: milieueffecten (CO_2 uitstoot, beroering, geluid), effecten op het ecosysteemfunctioneren, en effecten op specifieke structurele natuurwaarden.

7.6.1 Milieueffecten

Er is geen kwantificering gemaakt van de milieueffecten van de verschillende varianten. De huidige situatie (REF) leidt tot aanzienlijke CO_2 uitstoot, omdat de veerboot bij lage waterstand een zeer lage efficiëntie bereikt in de voortstuwing. Bij volle kracht vooruit is de snelheid in extreme gevallen maar enkele knopen (Wagenborg, pers. comm.). Bovendien leidt het baggerwerk tot aanzienlijke CO_2 uitstoot. Vermindering van deze milieubezwaren is evenredig met de verkorting van de vaartijd (voor de veerboot) en vermindering van het baggerbezwaar (voor de uitstoot van het baggeren). Beroering van de bodem en verstoring door geluid zijn eveneens min of meer evenredig met de grootte van het baggerbezwaar. Al deze elementen (verwachte verkorting vaartijd, baggerbezwaar) zijn elders al in de evaluatie en vergelijking van de varianten meegenomen, en leveren dus geen nieuwe informatie op die de vergelijking van de varianten kan beïnvloeden. Daarom worden zij in de tabel niet apart aangegeven.

7.6.2 Effecten op ecosysteemfunctioneren

Het ecosysteemfunctioneren van intertidale systemen zoals de Waddenzee wordt in sterke mate mee bepaald door de dynamiek van het slib. Gesuspendeerd slib in de waterkolom heeft een sterke invloed op de lichtdoordringing in de waterkolom. Gedurende het grootste deel van het jaar is de primaire productie (het vastleggen van koolstof in organisch materiaal door – vooral microscopische – algen) in de waterkolom beperkt door licht. Er zijn voldoende nutriënten aanwezig om bij volle belichting zeer snelle groei van de algen mogelijk te maken, maar troebelheid van het water beperkt de belichting en daardoor de groei van de algen. Een systematische toename van de hoeveelheid gesuspendeerd slib in de waterkolom in een deelgebied zal daardoor de hoeveelheid voedsel aan de basis van het voedselweb kunnen beperken. Merk op dat dit niet de totale primaire productie in het systeem betreft, omdat een aanzienlijke fractie wordt geleverd door algen die op het oppervlak van (intertidaal) sediment leven, het zogenaamde microfytobenthos, dat veel minder tot niet wordt beperkt door licht in de waterkolom, omdat primaire productie vooral bij laagwater plaatsvindt.

Slib heeft ook een groot effect op de opnamesnelheid van voedsel door organismen die afhankelijk zijn van filtreren voor hun voedselvoorziening. Dit betreft voornamelijk schelpdieren (bv. mossel, oester, kokkel) en zoöplankton. Hoe meer slib er in het water gesuspendeerd is, hoe moeilijker het is om algen (het voedsel) uit het algen-slib mengsel te halen. De kritische waarde van SPM (gesuspendeerd particulair materiaal) waarbij limitering van voedselopname ontstaat verschilt per soort, maar ligt meestal in de orde van 100 mg/l.

Als de huidige baggerpraktijk verantwoordelijk is voor een deel van de toename van gesuspendeerd slib in de waterkolom, zoals gemeten in het MWTL-punt Dantziggat (een onzeker maar niet onmogelijk resultaat, zie bespreking in paragraaf 2.4), dan zou de huidige situatie (variant REF) een negatieve invloed uitoefenen op het ecologisch functioneren van de Waddenzee. Omdat het punt 'Dantziggat' op aanzienlijke afstand ligt van de stortplaats, suggereert de correlatie immers dat een ruim gebied door het storten wordt beïnvloed. De nu beschikbare evidentie is echter te zwak om causaliteit aan te tonen. Kwalitatief wordt de conclusie ondersteund door de modelstudie van van Duren et al. (2015), maar kwantitatief duidt die laatste studie aan dat verspreiding in het gebied ten zuiden van Ameland maar leidt tot een verhoging van de gehaltes gesuspendeerd slib met ongeveer 5% tegenover de achtergrond[3]. Ondanks die mogelijk beperkte omvang zijn wij van mening dat een verbetering van de baggerpraktijk, die leidt tot minder baggerbezwaar, als een verbetering van de huidige ecologische situatie kan worden verdedigd. Een verbetering van de baggerpraktijk kan worden verkregen als weggebaggerd slib uit de vaargeul stabieler kan worden gestort, zodat de hoge mobiliteit van deze slibmassa kan worden tegengegaan. Wij vermoeden dat de varianten die gebruikmaken van de vloedgeul hiervoor mogelijkheden bieden, omdat baggerspecie wellicht stabieler kan worden gestort in de huidige ebgeul. Dit behoeft echter nadere, gedetailleerde onderbouwing voordat tot uitvoering kan worden overgegaan.

Op basis van effecten op ecologisch functioneren moeten wij de variant DIEPBREED als nog negatiever dan de variant REF beoordelen, omdat het baggerbezwaar, en daarmee de invloed op gesuspendeerd materiaal in de waterkolom, wellicht zal toenemen.

In overeenstemming met de inschatting van effecten op baggerbezwaar, schatten wij het effect van de variant VLOEDGEUL als licht gunstig in, terwijl de varianten LANG en LANGSPOEL als onzeker worden ingeschat en wellicht ongeveer neutraal zijn t.o.v. REF.

7.6.3 Effecten op structurele natuurwaarden

De beste ruimtelijke samenvatting van structurele ecologische waarden in de Waddenzee, op het ogenblik van het schrijven van dit rapport[4], werd geboden door de interactieve kaartapplicaties van het Waddensleutels-project[5] en WaLTER[6]. De kaart van Waddensleutels (Figuur 7.2) vat gegevens over bodemdieren (bron: NIOZ/SIBES) en het voorkomen van

[3] *Merk op dat van Duren et al. (2015) zelf stellen dat de invloed van baggeren bij Ameland misschien wordt onderschat, omdat baggervolumes van 2010 zijn gebruikt. Dat zal echter de orde van de invloed op de concentratie niet veranderen.*

[4] *De nieuwe ecotopenkaart van de Waddenzee (zie https://rijkewaddenzee.nl/nieuws/ecotopenkaart-geeft-inzicht-natuur-waddenzee/) is te laat gepubliceerd om nog in dit rapport verwerkt te worden. Een eerste inspectie toonde grote overeenkomst met de andere kaarten, maar ook enkele gedetailleerde verschillen m.b.t. de verspreiding van mossel/oesterbanken*

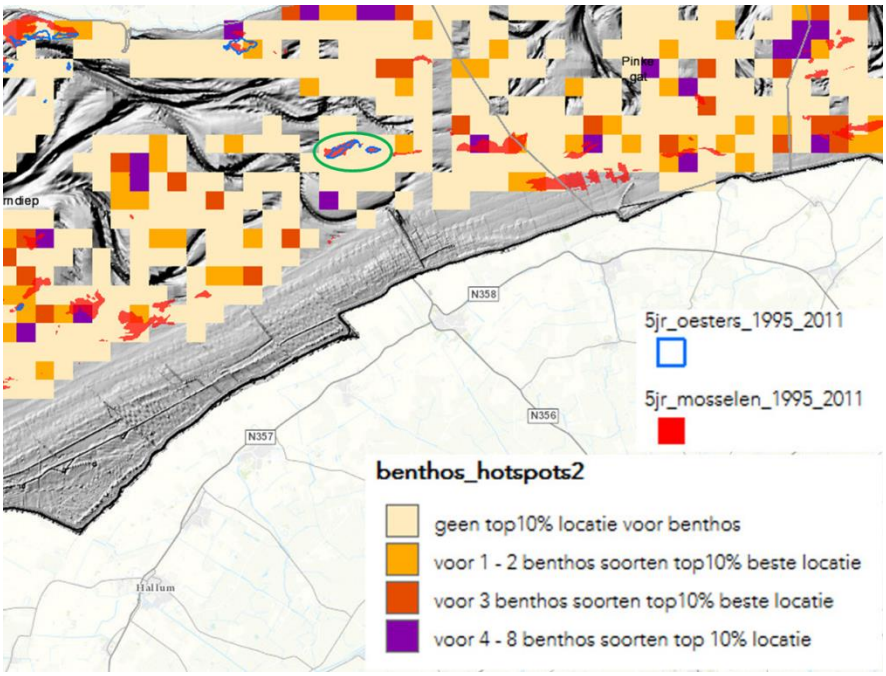
[5] *http://www.waddensleutels.nl, doorklikken op 'interactieve kaart Waddenzee'*

[6] *http://www.walterwaddenmonitor.org/en/tools/maps-portal/*

schelpdierbanken (bron: IMARES) samen. In het studiegebied komen enkele ‘hotspots’ voor bodemdieren voor, maar geen van deze hotspots wordt geraakt door de varianten. Wij vermoeden dat de varianten hierop weinig invloed zullen uitoefenen. Er zijn eveneens enkele plaatsen in de omgeving waar heel vaak mossel- en oesterbanken zijn gevonden, maar ook deze worden niet geraakt door de nu beschouwde varianten. Wel zouden de varianten LANG en LANGSPOEL een invloed kunnen uitoefenen (door verandering van stromingspatronen) op de relatief grote en belangrijke mossel- en oesterbank net ten noorden van het geplande traject (aangeduid met een groene ovaal in Figuur 7.2).

Meer details over het voorkomen van mosselbanken worden gegeven in de interactieve kaarten op de portal van WaLTER (Figuur *7.3*). Hieruit kan worden geleerd dat, naast de mosselbanken die reeds als ‘hotspots’ waren aangeduid, ook op de Teding van Borkhoutplaat sporadisch mossels worden gevonden.

Het afwegingskader van de PKB Waddenzee vereist dat het volgen van natuurlijke processen leidend is bij eventuele ingrepen. Het algemene doel is zoveel mogelijk mee te bewegen met de natuurlijke dynamiek, omdat daarmee de minste ecologische impact te verwachten is. Dit kader is, waar mogelijk, leidend geweest bij het ontwerpen van de varianten. Het uitdiepen van de vloedgeul in een aantal varianten kan worden beschouwd als een versnelling van een evolutie die van nature is te verwachten. Bij de varianten LANG en LANGSPOEL is zo veel mogelijk gebruik gemaakt van natuurlijke geulen (waardoor deze varianten iets langer zijn uitgevallen dan een rechte verbinding tussen de pier en de eb-vloedschaar), maar het laatste stuk van deze varianten blijft tegen de natuurlijke geulvorming ingaan. Dit element draagt bij aan een minder positieve evaluatie van deze varianten.

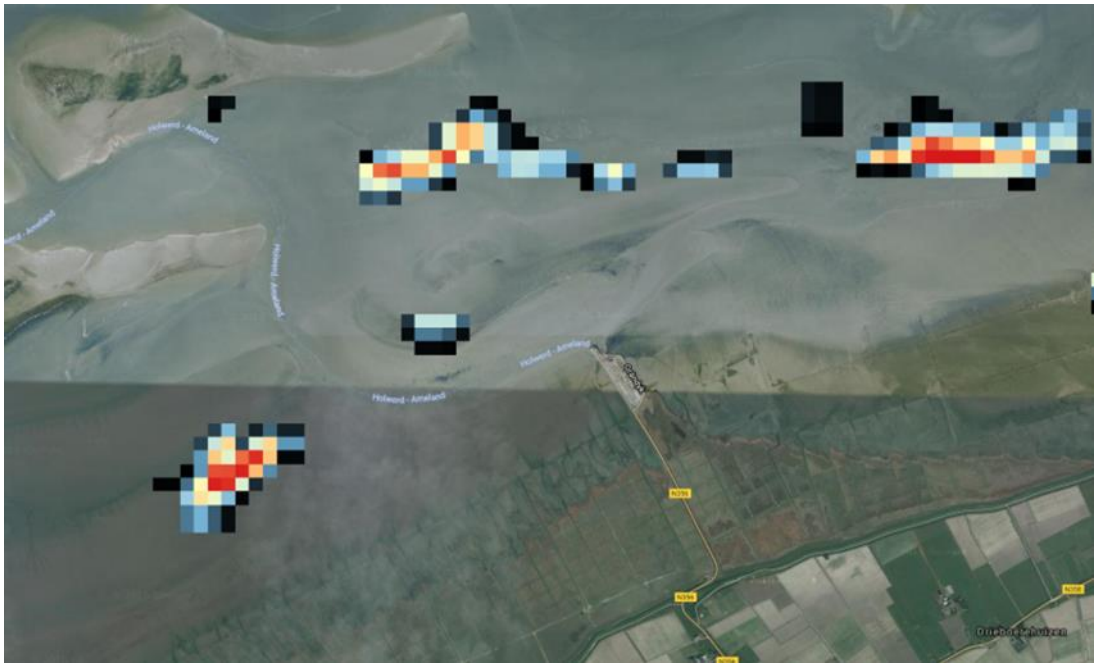


Figuur 7.2 Hotspots voor bodemdieren en voorkomen van mossel- en oesterbanken op het Wad in de omgeving van Ameland. De kleurcodering geeft aan voor hoeveel soorten bodemdieren een vak tot de 10% ‘beste’ locaties (locaties met hoogste dichtheid) behoort. De kleurcodering voor mossel- en oesterbanken geeft aan op welke locaties in de periode 1995-2011 minstens vijf jaren een bank aanwezig was. Bodemdiergegevens: NIOZ/SIBES; schelpdierbankgegevens: IMARES; diepte: Rijkswaterstaat; interactieve kaart: RUGroningen op www.waddensleutels.nl

Voor wat betreft de evaluatie van de varianten concluderen wij dat er geen directe impact (weggraven) van waardevolle structurele natuurelementen zal plaatsvinden in de beschreven varianten, maar dat de varianten LANG en LANGSPOEL misschien een indirecte invloed kunnen uitoefenen op een hotspot voor het vóórkomen van schelpdierbanken, waardoor een licht negatieve evaluatie van hun ecologische effecten wordt toegevoegd.

De varianten LANG & LANGSPOEL leiden daarnaast beide tot een afname van het plaatareaal, zonder dat de garantie bestaat dat deze afname door sedimentatie in de oude geul wordt gecompenseerd. Een dergelijke areaalafname zal op grond van de behoud/herstelopgave voor het littoraal in Natura2000 sterk negatief worden beoordeeld, ongeacht de aanwezigheid van waardevolle structurele natuurelementen. Dat geldt zowel voor het habitattype als voor de daar foeragerende vogels. VLOEDGEUL doet dit in veel mindere mate, omdat verwacht wordt dat plaatareaal zal worden gewonnen bij de afgedamde ebgeul. DIEPBREED leidt tot beperkt verlies van plaatareaal, omdat de oppervlakte van de geul wordt vergroot.

In de omgeving van de variant REEGEUL-OOST bij Nes worden geen hotspots voor bodemdieren of mosselbanken gerapporteerd. Deze variant zal ook niet leiden tot netto verlies van plaatareaal, omdat elders het areaal litoraal wordt hersteld en de uiteindelijke oppervlakte van de geul kleiner zal zijn dan in de huidige situatie.



Figuur 7.3 *Voorkomen van mosselbanken in het studiegebied. De kleurcodering geeft aan hoe vaak een pixel door een mosselbank was bezet in de historische database van IMARES (periode 2001-2013). Hoe roder de kleur, hoe vaker het punt door een mosselbank was bezet. Bron: data IMARES; kaart WaLTER map portal.*

De verwachte ecologische effecten van de verschillende varianten worden samengevat in Tabel 7.6.

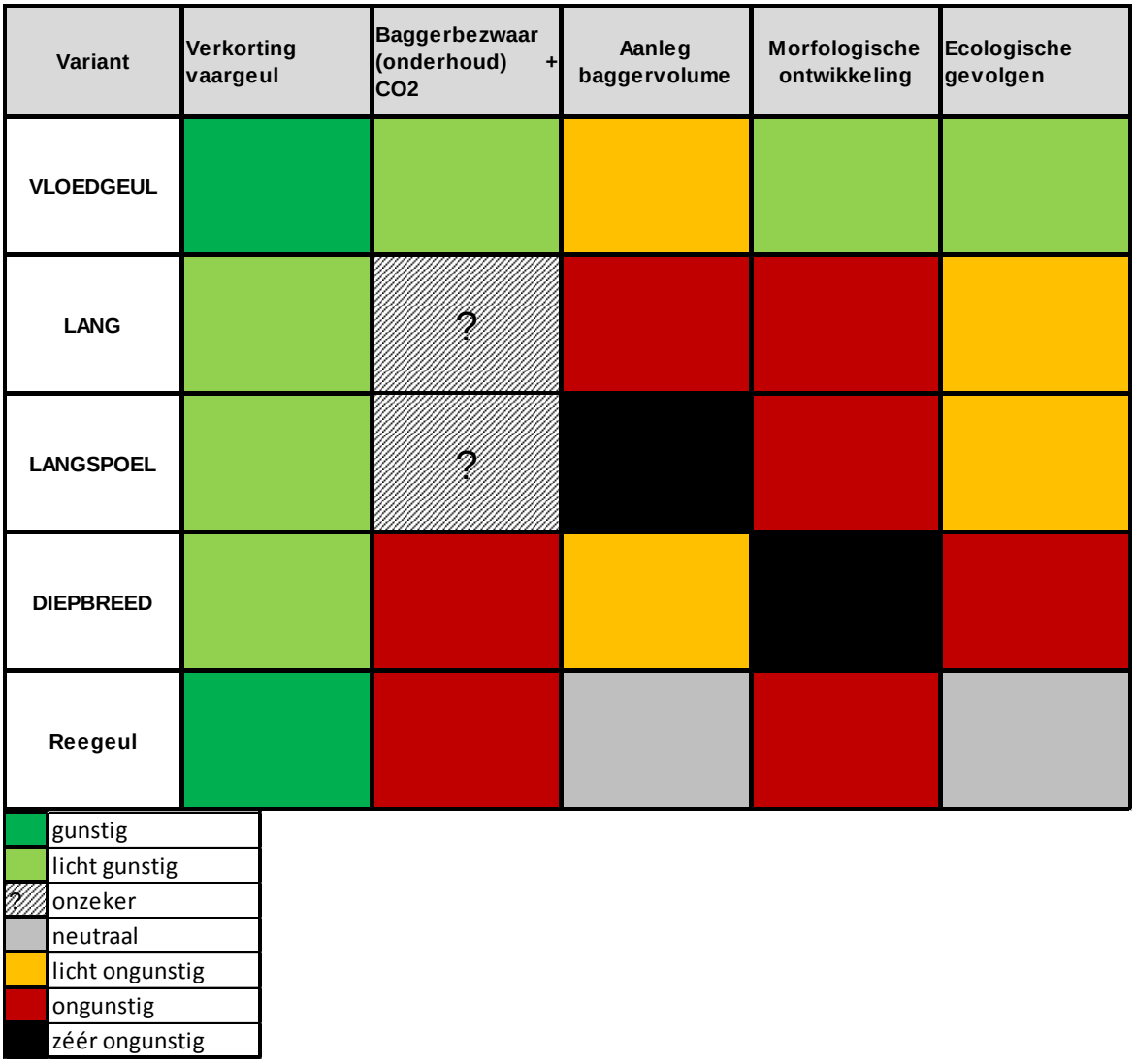
Tabel 7.6 Vergelijking van varianten m.b.t. ecologische gevolgen

Variant	Ecologische gevolgen	Argumenten / opmerkingen
REF	nvt	Negatief op ecosysteemfunctioneren door verhoging zwevende stof in deel Waddenzee – er is verbetering mogelijk
VLOEDGEUL	+	Kan gevolgen voor zwevende stof mitigeren als specie stabiel kan worden gestort. Geen negatieve gevolgen op structurele natuurwaarden
LANG	-	Neutraal op zwevende stof (zie VLOEDGEUL), maar risico voor mosselbed, afname plaatareaal
LANGSPOEL	-	Zelfde als LANG
DIEPBREED	--	Meer baggerbezwaar / effect op zwevende stof, verlies plaatareaal
REEGEUL-OOST	+/-	Neutraal voor ecologische gevolgen

7.7 Samenvatting en bespreking van de evaluatie van de varianten

De evaluatie van de verschillende aspecten wordt samengevat met kleurcodering in Figuur 7.4. Daarbij zijn de evaluaties in de voorgaande tabellen van dit hoofdstuk als basis gebruikt. De varianten zijn beoordeeld als relatieve verbetering of verslechtering ten opzichte van de variant REF. Daarbij dient opgemerkt te worden dat variant REF (de huidige situatie) door het publiek en de politiek als problematisch wordt ervaren (zie aanleiding tot deze studie in Hoofdstuk 1, en enkele details zoals beproken in dit hoofdstuk).

De varianten LANG, LANGSPOEL en DIEPBREED scoren alle ongunstiger dan REF op één of meerdere criteria. De variant VLOEDGEUL scoort over het algemeen positiever, al is aan deze score een onzekerheid verbonden, omdat veel afhangt van de vraag of met deze variant (althans tijdelijk) een eind kan worden gesteld aan het ‘rondpompen’ van baggerspecie in het systeem door de baggerspecie in de afgedamde geul te bergen. We hebben de kans daarop positief geëvalueerd, maar nadere studie is nodig om dit te bevestigen. Overigens geldt deze onzekerheid ook met betrekking tot de evaluaties van LANG en LANGSPOEL voor het criterium ‘baggerbezwaar’.



Figuur 7.4 Overzicht, met kleurcodering, van de evaluatie van de varianten. Dit overzicht is gebaseerd op de deeltabellen die in dit hoofdstuk worden besproken.

REEGEUL-OOST wordt neutraal geëvalueerd voor aanlegvolume en ecologische gevolgen, maar als ongunstig voor baggerbezwaar en morfologische ontwikkeling. Het is een relatief beperkte ingreep met, in verhouding, een gunstig effect op vaartijd. De modelberekeningen laten echter zien dat de verlegde vaargeul zo slecht is gesitueerd ten opzichte van de heersende stromingspatronen in het gebied, dat het niet mogelijk lijkt om zonder intensief en continu baggerwerk de geul op deze locatie te behouden. Het nauwkeuriger kwantificeren van de verwachte toename van het baggerbezwaar vereist nadere studie. Het baggerbezwaar in dit relatief zandige gebied is de resultante van de toevoer van zand vanaf de platen (voornamelijk een functie van golven en stromingen), en van de mate waarin de stroming in de geul dit zand uit de geul kan transporteren. Als de toevoer beperkend is, zou de toename van het baggerbezwaar klein kunnen zijn. Als daarentegen de stroming een belangrijke rol speelt, zou de toename groot zijn omdat de voorspelde stroomsnelheid in langsrichting van de nieuwe geul zeer klein is. Wij achten de laatste situatie het meest waarschijnlijk, maar hebben geen nadere berekeningen over golfgedreven sedimentmobilisatie op de platen uitgevoerd.

Samenvattend komt uit deze analyse één kansrijke variant. De variant VLOEDGEUL zou voor de komende jaren licht positieve (of minder negatieve) effecten kunnen hebben dan de variant REF, omdat deze variant een beperkte inspanning bij aanleg vraagt, naar verwachting in de komende jaren de mogelijkheid geeft om de mobiliteit van de baggerspecie te beperken en daardoor het rondpompen van slib kan reduceren, een (beperkte) verkorting van de vaartijd oplevert, en kan worden beschouwd als een 'natuurlijke' morfologische evolutie die niet tegen de fysica van het systeem ingaat. Ook het onnatuurlijk sterke uitbochtingsproces kan daarmee mogelijk worden doorbroken.

Geen enkele van de onderzochte varianten leidt tot een verhoging van de stroomsnelheden of een versterking van de ebdominantie in de omgeving van Holwerd. In die zin verbeteren de varianten de fysische omstandigheden, die leiden tot het baggerbezwaar, niet. Wel is het mogelijk (maar niet nader onderzocht en dus ook niet bewezen) dat het stabieler storten van het nu rondgepompte slib, in de varianten die de huidige ebgeul als stortgebied kunnen gebruiken, de snelheid van sedimentatie in de vaargeul bij Holwerd kan reduceren. Immers, als de massa slib die in beweging is afneemt, zou ook de sedimentatiesnelheid kunnen afnemen.

Nader onderzoek naar de mogelijkheden slib stabiel te storten, en naar de effecten daarvan op het baggerbezwaar, is ook van belang wanneer de variant VLOEDGEUL zou worden gecombineerd met een ingreep in het zuidelijkste deel van de vaargeul. Onder deze mogelijke ingrepen heeft de variant DIEPBREED gunstige maritieme eigenschappen, maar zeer slechte eigenschappen m.b.t. de stroming in de vaargeul bij Holwerd. Wellicht kan in de toekomst worden gezocht naar zuidelijke varianten die beter scoren op dit criterium en te combineren zijn met VLOEDGEUL.

Een mogelijk positief effect van het stabiel storten van slib zal naar verwachting slechts een tijdelijke oplossing van het baggerprobleem bieden. De natuurlijke morfologische evolutie van het ophogen van de platen in de omgeving van het wantij (waar de veerdam van Holwerd dicht bij ligt) toont aan dat er een natuurlijke flux van slib is in de Waddenzee richting vastelandskust. Omdat de varianten de fysische omstandigheden voor sedimentatie van slib niet kunnen verbeteren, is de verwachting dat onttrekking van slib aan de huidige snelle omloop op termijn geen duurzame oplossing zal bieden. Dit slib zal immers worden vervangen door nieuw slib, dat opnieuw in een snelle cyclus van baggeren en hersedimenteren dreigt te komen. Een duurzame oplossing van het baggerprobleem, op de langere termijn, vereist dus andere maatregelen. Deze zijn in de huidige studie niet nader beschouwd. Te denken valt aan oplossingen als verlenging of verplaatsing van de veerdam, verandering van de vloot, verandering van de dienstregeling, aanleg van leidammen, of combinaties van deze maatregelen.

Nadere studie, d.m.v. veldmetingen en modellering, van de slibstromen in de cyclus bagger-storten-remobilisatie-sedimentatie is niet alleen van belang voor de inschatting van de evolutie van het baggerbezwaar bij de meest kansrijke varianten, maar ook voor de inschatting van de ecologische gevolgen van het baggeren. De aanwijzingen uit de huidige studie suggereren dat het storten op Zuiderspruit leidt tot meer zwevend stof in de Waddenzee. Dat is in principe een negatieve invloed op de Waddenzee door baggeren en storten, al is het effect kwantitatief wellicht beperkt tot ongeveer 5 % van de achtergrond (van Duren et al., 2015). Effecten op zwevend stof in een deel van de Waddenzee impliceren dat er m.b.t. ecologie een marge voor verbetering bestaat, als het baggerbezwaar door ingrepen in de vaargeul kan worden beperkt.

De huidige analyses hebben geen bemoedigende resultaten opgeleverd die de aanleg van een spoelmeer kunnen verantwoorden. De hoogte van de platen bij de veerdam in Holwerd is niet voldoende om een spoelmeer toe te laten de ebstroom in de geul substantieel te bevorderen. Het ‘spoelen’ beperken in de tijd tot de tijdspanne waarin het water tot de geul is beperkt, lijkt geen reële optie omdat die tijd zo kort is dat een heel groot spuiwerk (in vergelijking met het volume van het spoelmeer) nodig zou zijn. Bovendien zou dit aanleiding kunnen geven tot zeer sterke stroming rond de veerdam. Als de beperking van de ebstroom tot de geul d.m.v. leidammen zou worden geforceerd, dan zouden zeer lange en relatief hoge dammen dwars over de Teding van Berkhoutplaat moeten worden geconstrueerd, die dwars staan op de natuurlijke stroming in het gebied en ongetwijfeld grote morfologische en ecologische gevolgen zouden hebben. Het alternatief om de veerdam, met spoelmeer, te verplaatsten naar het westen heeft als voordeel dat de platen daar hoger zijn, waardoor er een langere tijdspanne is waarin stroming tot de geul is beperkt en een spoelmeer die stroming kan versterken zonder ‘weglekken’ van de stroom over de platen. Het nadeel is dat er grote kosten aan verbonden zijn en dat ook een vrij lange pier met leidam zal moeten worden aangelegd. Een oplossing met Spoelmeer zal, net als andere opties voor een duurzame oplossing, extra studie en exploratie vereisen.

8 Conclusies en aanbevelingen

8.1 Inleiding

De hoofdvraag die aan de basis ligt van het hier gerapporteerde onderzoek is hoe het vaarwegbeheer en het vervoer naar Ameland duurzamer kunnen worden verzorgd. Daarbij diende onderzocht te worden of bochtafsnijding op de korte termijn een bijdrage kan leveren aan een verkorting van de vaartijd en tegelijk aan een verbeterd onderhoudsregime van de vaargeul (vermindering van het baggerbezwaar).

Deze hoofdvraag valt uiteen in twee delen:

1 Een beter inzicht verkrijgen in de belangrijkste dynamische processen in het systeem op het gebied van hydrodynamiek, morfologie en slibdynamiek, om vast te stellen welke processen het hoge baggerbezwaar verklaren. Tevens wordt de huidige baggerpraktijk in dat kader geëvalueerd.
2 De hydrodynamische gevolgen van verschillende varianten van bochtafsnijding in beeld brengen, en op basis daarvan in schatten wat de gevolgen zullen zijn m.b.t. vaartijd, baggerbezwaar, investeringen en ecologische gevolgen. Daarmee wordt bijgedragen aan de evaluatie van de haalbaarheid van die alternatieven, en van de duurzaamheid ervan op langere termijn.

8.2 Welke processen verklaren het baggerbezwaar?

Uit deze en voorgaande studie (Villars et al., 2016) is gebleken dat de problemen met de vaarweg naar Ameland (lange vaartijd, groot baggerbezwaar) veroorzaakt worden door morfologische ontwikkelingen op de lange termijn en de grote ruimteschaal, maar worden versterkt door processen op de korte termijn en kleinere ruimteschaal. Die laatste kunnen wellicht door een aanpassing van de vaarroute en een verandering van de bagger- en stortstrategie (tenminste tijdelijk) worden verbeterd.

Het grote baggerbezwaar wordt verklaard door de combinatie van:

1. Natuurlijke morfologische ontwikkelingen, i.e. een geuldoorsnede ruimer dan haar evenwichtswaarde,
2. Daarenboven verruiming van de vaargeul ten behoeve van de scheepvaart
3. De grote effectieve breedte van de geul, omdat deze door de voet van het slik loopt
4. Het “voor de deur storten” van het gebaggerde slib
5. Steeds langer worden van het gebaggerde vaargeultraject door het tegenhouden van de omslag van het eb-vloedschaarsysteem

8.2.1 Natuurlijke morfologische ontwikkelingen

De natuurlijke morfologische ontwikkelingen spelen vooral op grote schalen van ruimte en tijd. De ligging van de veerdam van Holwerd is historisch bepaald door de positie van de dam, die ongeveer over het wantij naar Ameland was geconstrueerd. De aanwezigheid van de dam vergemakkelijkte de aanleg van de veerhaven, maar had als groot nadeel dat de veerhaven is komen te liggen in een gebied dat van nature sedimenteert. De evolutie van de bodemligging over de afgelopen decennia bevestigt die trend: de platen in de omgeving van de veerdam te Holwerd zijn ongeveer een meter hoger geworden t.o.v. de waterstand.

Daardoor is de komberging van de vaargeul afgenomen, waardoor minder water per getij door de geul stroomt, en de stroomsnelheid dus afneemt. Sediment (zand, slib) in het water kan zich bij lage stroomsnelheid gemakkelijk afzetten, en heeft een geringe kans om tijdens de piek van de getijstroming weer in de waterkolom te worden opgenomen. Het natuurlijke proces is dat de geul hierdoor vernauwt (smaller en ondieper wordt), waardoor de watersnelheid weer toeneemt en een nieuw evenwicht wordt bereikt. Door het voortdurend uitbaggeren van de geul tot een grotere breedte en diepte wordt het bereiken van dit evenwicht onmogelijk, en blijven aanzienlijke hoeveelheden sediment zich afzetten in de geul.

De recente waarnemingen van de bodemligging (2016), en de modelresultaten met deze bodemligging, tonen aan dat deze tendens tot afname van de komberging zich ook in de afgelopen periode (tussen 2011 en 2016) heeft doorgezet.

Een verder gevolg van de natuurlijke evolutie van de morfologie in de omgeving van de pier te Holwerd is dat de stroming in de geul meer vloeddominant is geworden. Dit uit zich op twee manieren: het volume dat bij vloed door de geul gaat is groter dan het volume dat bij eb door de geul terugkeert. Daarmee samenhangend, zijn de vloedsnelheden in de geul groter dan de ebsnelheden. Stroming kan meer sediment meevoeren als ze sneller is, en dat effect is niet-lineair. Het gevolg van grotere vloed- dan ebstromingen is dat er bij vloed meer gesuspendeerd sediment in de geul wordt gebracht, dan er bij eb weer uitstroomt. Dit bevordert uiteraard het achterblijven van sediment in de geul, en het dichtslibben van de geul.

Omdat deze hyrdomorfologische ontwikkelingen langdurig zijn, en omdat de komberging in de omgeving van de geul verder verkleint, zijn de opties om op lange termijn een duurzame oplossing voor het baggerbezwaar te vinden beperkt. In deze studie zijn verschillende varianten onderzocht van bochtafsnijdingen als mogelijke oplossingen, en is een variant opgenomen die gebruikmaakt van een Spoelmeer. Er is echter, noch voor de varianten van bochtafsnijding, noch voor de variant met spoelmeer, een goede oplossing gevonden die leidt tot een duurzame verbetering van de hydrodynamische condities die de grondoorzaak van het baggerprobleem uitmaken: lage stroomsnelheden en vloeddominantie van de stroming.

8.2.2 De aanvoer van slib

De observaties en metingen in het veld en het laboratorium hebben een beter inzicht gegeven in de mechanismen van transport en sedimentatie van slib in de geul. In tegenstelling tot de werkhypothese bij het begin van deze studie, speelt de vorming van fluid mud in de geul geen belangrijke rol. Fluid mud is in het verleden occasioneel waargenomen, waarschijnlijk in relatie tot waterinjectiebaggeren, maar is nu geen algemeen fenomeen. Het slib dat wordt gebaggerd heeft een relatief hoge dichtheid, wat wijst op een redelijk hoge graad van consolidatie van het slib. Dit slib komt de geul bij vloed binnen als een hooggeconcentreerde suspensie. In de geul vindt bijmenging plaats van zeer fijn zand, dat van de platen afkomstig is. Het gebaggerde sediment bevat ongeveer 20-25 % zeer fijn zand. Het zand-slib mengsel heeft fysisch-chemische eigenschappen die een snelle sedimentatie en consolidatie bevorderen. De valsnelheid is relatief hoog, en de consolidatie van de lagen die zich tijdens één getijde afzetten kan binnen enkele uren plaatsvinden. Daardoor blijft een groot deel van het aangevoerde slib in de geul achter als geconsolideerd (en relatief moeilijk op te wervelen) slib. Slechts ongeveer één derde van het slib dat bij vloed wordt aangevoerd, verlaat bij eb opnieuw de geul.

De geul-plaat interactie is niet alleen van belang voor het bijmengen van zand, maar ook voor de vergroting van de ‘effectieve oppervlakte’ van de geul. In de omgeving van de pier van

Holwerd snijdt de geul door de voet van het slik. Dit slik vangt zelf eveneens sediment in, maar dit sediment wordt door scheepsgolven en natuurlijke golven geremobiliseerd, waardoor het uiteindelijk in de geul terechtkomt. Het oppervlak waarover de geul sediment invangt, is daardoor groter dan het eigenlijke oppervlak van de geul zelf.

8.2.3 De baggercycli: kort en lang

Het deel van de vaargeul dat regelmatig wordt gebaggerd (de meest zuidoostelijke 3-4 km), heeft vermoedelijk een zeer korte cyclus van terugkeer van het baggerschip. Gemiddeld komt het baggerschip om de negen dagen terug op dezelfde plek, en verwijdert het een halve meter slib in 1,2 m brede banen. Vervolgens worden met een ploegboot de geulen en richels geëgaliseerd. Het baggerschip baggert alleen aan de zijkanten van de vaargeul. In het midden blijft de geul op geringe overdiepte zonder baggeren, waarschijnlijk als gevolg van de waterjets die de veerboot voortstuwen. Het gevolg is dat de geul na baggeren een ‘uitgevouwen U-profiel’ heeft, dat daarna evolueert naar een V-vormig profiel. Er is weinig seizoenale variatie in de baggerintensiteit, al moet in de winter meestal wat frequenter worden gebaggerd (soms met een tweede schip).

Het gebaggerde materiaal wordt gedeeltelijk (ongeveer 1/3) tijdens vloed gestort in de Zuiderspruit, een geul die een aantal kilometer verwijderd ligt van de baggerlocatie. 2/3 van het gebaggerde materiaal wordt tijdens eb geloosd in de ebgeul van de eb-vloedschaar die vlakbij de baggerlocatie ligt (en er zelfs gedeeltelijk mee overlapt). Dit sediment wordt door de ebstroom uit de ebgeul weggevoerd; er zijn geen aanwijzingen dat het ter plaatse blijft liggen. Er zijn echter wel sterke aanwijzingen dat het sediment niet zeer ver van de baggerlocatie wordt weggevoerd door de stroming. Sinds de strategie van ‘lozen op eb’ wordt toegepast (ongeveer 2010-2011), is een omslag geobserveerd in de morfologische ontwikkeling van de eb-vloedschaar die ten westen van Holwerd ligt. Normaal wordt verwacht dat in een dergelijke schaar de vloedgeul ontwikkelt, terwijl de ebgeul degenereert. Die evolutie was in de bodemliggingen tussen 1993 en 2011 ook goed te herkennen. Echter, tussen 2011 en 2016 is het proces omgekeerd. De ebgeul (in dit systeem de vaargeul) bocht zeer sterk uit (sterker dan andere geulen in dit gebied) en wordt smaller en dieper, terwijl de vloedgeul degenereert en in het oostelijke deel niet veel meer is dan een depressie in het wad van enkele tientallen centimeters diep. Een mogelijke verklaring voor dit fenomeen is dat het gestorte sediment de sedimentatie in de vloedgeul sterk bevordert. Tegelijk wordt de doorgaande uitbochting van de ebgeul gefaciliteerd door het baggeren van de ebgeul. Tezamen verhinderen deze factoren de natuurlijke evolutie naar een omslag in het eb-vloedsysteem, waarin de vloedgeul de rol van de ebgeul overneemt. Het is mogelijk dat de snelle uitbochting van de ebgeul verder versterkt wordt door de waterjets van de veerboot.

Het materiaal dat op de Zuiderspruit bij vloed wordt gestort, blijft niet ter plaatse liggen. Het wordt door de stroming en golven weer opgepakt, en als gesuspendeerd slib door de Waddenzee getransporteerd. Het is mogelijk dat dit heeft bijgedragen aan de stijging van de gehaltes aan zwevende stof in het MWTL monsterpunt Dantziggat, waarmee een correlatie in de tijd wordt gevonden, maar de causaliteit van de relatie is zeer onzeker. Er zijn andere mogelijke verklaringen voor die stijging, omdat er Waddenzee-brede patronen worden teruggevonden in de tijdserie van Dantziggat.

Wat zeer duidelijk is, is het gebrek aan enige correlatie tussen het gehalte zwevende stof in het Dantziggat met de massa slib die op eb in de korte cyclus wordt geloosd. Dat gebrek aan correlatie met het zwevend stof elders in de Waddenzee, het feit dat aanslibbing weinig seizoenseffect vertoont (waardoor het onwaarschijnlijk is dat ergens grote massa’s

gemakkelijk mobiliseerbaar slib beschikbaar zijn), en de snelle verlanding van de vloedgeul, wijzen samen op een snelle terugkeer van het materiaal dat op eb wordt geloosd naar de vaargeul. Dezelfde massa slib wordt meerdere keren per jaar weggebaggerd. Het grote baggerbezwaar kan daardoor worden verklaard als het herhaaldelijk oppakken van een al bij al beperkte hoeveelheid slib met een korte terugkeertijd. Het is te verwachten dat de hoeveelheid baggerwerk kan worden beperkt, als het opgebaggerde slib zo kan worden gestort dat het minder snel terugkeert naar de vaargeul.

8.3 Evaluatie van de varianten voor bochtafsnijding

Er zijn vijf varianten voor bochtafsnijding geanalyseerd middels modelberekeningen en expert judgement. Op basis van deze resultaten is, ten tijde van afronding van dit rapport, nog een variant van een bochtafsnijding doorgerekend met het model. Deze variant bevat een verdergaande bochtafsnijding in het zuidelijk deel van het tracé tussen Holwerd en Ameland. Omdat de oplevering van het huidige rapport daarop niet kon wachten, zullen de resultaten in een aparte notitie worden gepresenteerd. Door Rijkswaterstaat wordt verwacht dat in kader van vervolgonderzoek nog nadere studies zullen plaatsvinden over mogelijk verdergaande maatregelen op de langere termijn. Daarin zal ook de studie naar verdergaande bochtafsnijding kunnen worden meegenomen.
De onderzochte varianten beogen, met de PKB Waddenzee in gedachten, zo goed mogelijk mee te bewegen met het natuurlijke systeem. De variant VLOEDGEUL herstelt de natuurlijke tendens tot het uitdiepen van de vloedgeul in de eb-vloedschaar, en realiseert daardoor een verkorting van de vaartijd. De variant LANG benadert de pier van Holwerd als het verlengde van de pier, en fungeert daarmee als een soort referentie voor de variant LANGSPOEL, die morfologisch gelijk is aan LANG maar de werking van een Spoelmeer simuleert. Beide varianten maken gebruik van de uitgediepte VLOEDGEUL in de eb-vloedschaar, en volgen daarna maximaal bestaande geulen. De variant DIEPBREED volgt het tracé van de huidige vaargeul, maar wordt verdiept en verbreed om het varen te vergemakkelijken. De variant REEGEUL-OOST volgt het aanwezige geulpatroon niet, maar betreft een relatief korte afsnijding, die aanvaardbaar zou kunnen zijn mocht hij leiden tot een nautisch gunstig resultaat.

Alle varianten zijn onderzocht als mogelijkheden om de vaartijd te verkorten en tegelijk het baggerbezwaar te verminderen, met als bijkomende voorwaarde dat ze geen grote ecologische effecten hebben op de Waddenzee. Ze zijn, op basis van de modelstudies en bijkomende informatie (bv. over kwetsbare ecosystemen in de omgeving) geëvalueerd op de criteria (1) verkorting vaartijd, (2) (kosten voor) aanlegbaggerwerk, (3) morfologische gevolgen en verwachtingen over onderhoudsbaggerwerk, (4) ecologische gevolgen.

Geen enkele van de onderzochte varianten was in staat om de hydrodynamische condities die het baggerbezwaar veroorzaken, duurzaam te verbeteren. Vooral in de omgeving van Holwerd was het effect op stroomsnelheden en vloeddominantie bij de meeste varianten zelfs een verslechtering ten opzichte van de referentie.

De variant met spoelmeer is weinig effectief gebleken, omdat het niveau van de platen in de omgeving van de pier relatief laag is. De extra stroming die bij eb wordt gecreëerd vanuit het Spoelmeer waaiert voor het grootste deel uit over de platen en blijft niet beperkt tot de geul. Daardoor heeft die stroming weinig effect op het sediment in de geul. Het is mogelijk dat variaties in de configuratie (bv. aanleggen van het Spoelmeer en de steiger op een andere plek, constructie van leidammen) het effect van het Spoelmeer kunnen verbeteren, maar

deze opties hebben zelf ook een aantal nadelen (aanlegkosten, eventueel effect op morfologie en ecologie). Daarnaar is geen verder onderzoek verricht in deze studie.

Hoewel geen duurzame verbetering van de condities die het baggerbezwaar veroorzaken kon gevonden worden, is er wel een variant die gedurende een relatief korte periode een verkorting van de vaartijd kan combineren met een vermindering van het baggerbezwaar. Dit betreft de variant VLOEDGEUL. In deze variant is de huidige ebgeul (de vaargeul), die relatief lang en diep is, beschikbaar om baggerslib te storten als onderdeel van de afdamming. Wij verwachten dat dit slib, bij de sterke afname van de stroomsnelheden in deze ebgeul, voor een deel zal blijven liggen en de geul opvullen, en voor een deel relatief traag opnieuw in het systeem zal worden opgenomen. Als dit de beperkte hoeveelheid slib die nu zeer snel in het systeem circuleert, een langere omlooptijd kan bezorgen, dan is de variant effectief om het baggerbezwaar te verminderen. Dit is echter geen definitieve oplossing. De ebgeul zal door natuurlijke processen in volume afnemen, waardoor het baggerslib hier op termijn niet meer (of in mindere mate) gestort kan worden. Ook zal de massa recirculerend slib in het zuidelijke deel van de vaarroute weer toenemen doordat import van slib vanuit de Waddenzee blijft doorgaan.

De variant REEGEUL-OOST had de potentie om met een beperkte inspanning een relevante verkorting van de vaartijd te realiseren, omdat het vermijden van een scherpe bocht mee bijdraagt aan die verkorting van de vaartijd. Het stromingspatroon in en rond de nieuwe oostelijke geul is echter dermate ongunstig dat deze optie niet kansrijk moet worden geacht. De nieuwe geul ligt ongeveer dwars op de overheersende stromingsrichting, en de aanleg leidt niet tot een verlegging van die richting zodat de geul alsnog stroom kan trekken.

De andere onderzochte varianten veroorzaken ook in één of meerdere aspecten een verslechtering van de situatie in vergelijking met de referentie. DIEPBREED (het verdiepen en verbreden van de huidige vaargeul) brengt de vaargeul nog verder uit morfologisch evenwicht, en zal daardoor het baggerbezwaar doen toenemen. Bovendien veroorzaakt deze variant een verlies aan plaatareaal. De variant LANG vereist een relatief grote investering, en is in het stuk bij Holwerd dwars op de heersende stroomrichting georiënteerd, waardoor hij veel zand dreigt in te vangen. De stroomsnelheden in dit deel van deze variant zijn ongunstig. De variant verandert mogelijk de omgeving vlakbij een belangrijke mossel- en oesterbank, en zal leiden tot verlies aan plaatareaal. De variant LANGSPOEL met spoelmeer gedraagt zich hydrodynamisch ongeveer hetzelfde als LANG, en deelt de belangrijkste nadelen met deze variant.

8.4 Conclusies over duurzame oplossingen

Het antwoord op de hoofdvraag van het hier gerapporteerde onderzoek is dat de onderzochte varianten voor de vaarweg geen duurzame oplossing bieden voor het vaarwegbeheer en het vervoer naar Ameland. Onder duurzame oplossing is daarbij verstaan oplossingen die aangrijpen op de onderliggende hydrodynamische mechanismen in de geul (afname stroomsnelheden, vloeddominantie) en de daardoor optredende snelle sedimentatie in de geul. Op de langere termijn zorgen de varianten daarmee niet voor een goede bereikbaarheid en werkbaar beheer.

Mogelijk bieden andere type oplossingen buiten de hier onderzochte varianten van bochtafsnijdingen wel mogelijkheden voor een duurzame lange termijn ontwikkeling. Verschillende categorieën oplossingen kunnen overwogen worden: (1) aanpassen van de

vloot en/of het vaarschema zodat in een nauwere geul kan worden gevaren, (2) verplaatsen van de veerdam naar een gebied verder van het wantij, waar de tendens tot ophogen minder uitgesproken is, (3) verder blijven baggeren om de geul op deze locatie open te houden, (4) aanleggen van een verlengde veerdam, leidammen of andere constructies waardoor de geul in de omgeving van de veerdam minder onderhevig is aan sedimentatie. Deze opties, en eventueel andere mogelijkheden, zijn in deze studie niet nader onderzocht.

8.5 Aanbevelingen voor verdere studie

Op basis van de resultaten van deze studie zijn een aantal onderwerpen geïdentificeerd, waarover nog kennislacunes bestaan. Nadere studie van deze onderwerpen kan bijdragen aan het beter kwantificeren van verwachte effecten van ingrepen. Deze lijst wordt hier kort voorgesteld en besproken, maar wordt verder gedetailleerd in Appendix 9D bij dit rapport.

De onderwerpen voor nadere studie komen alle voort uit de ervaringen en kennislacunes, die in dit rapport zijn aangeduid. De prioritering ervan zal afhangen van het pad van de besluitvorming. Wij zijn van oordeel dat een nadere analyse van de vaartijden voor alle opties behartenswaardig is. Ook geldt dat voor alle opties een beter inzicht in de consequenties van ingrepen kan voortkomen uit een zand-slib modellering, waarin het gedrag van sediment expliciet wordt gemodelleerd. Voor de korte-termijnoplossing met VLOEDGEUL bevelen wij aan, vóór uitvoering, een nadere analyse te maken van waterbeweging en initieel sedimenttransport, en de ecologische impact nader in te schatten op basis van bestaande gegevens. Voor het verkennen van oplossingen op de lange termijn bevelen wij aan om aangepaste varianten door te rekenen, andere varianten (bv. verplaatsing veerdam, leidammen) te onderzoeken, en de schip-geul interactie te onderzoeken i.v.m. eventuele vlootaanpassingen.

8.5.1 Nadere analyse van de statistiek van de vaartijden

Zoals aangegeven in paragraaf 7.2, bevelen wij aan om meer aandacht te besteden aan de analyse van de vaartijd en van de factoren die deze beïnvloeden. Omdat ook kleine verkortingen van de vaartijd grote gevolgen hebben voor het al dan niet volgen van de dienstregeling, is beter inzicht in deze factoren van groot belang. Dit zal toelaten om in de toekomst eventuele alternatieven beter te evalueren op de kenmerken die werkelijk van belang zijn. De inschatting van de verkorting van de vaartijd in onderhavige studie is, wat dat betreft, slechts een eerste grove benadering. Het analyseren van de statistiek van in het verleden gerealiseerde vaartijden kan helpen om de invloeden te verduidelijken van verschillende externe factoren op de vaartijd: stormomstandigheden, getij, seizoensafhankelijk aantal reizigers, invloed van vertragingen die eerder op de dag zijn opgelopen. Daarmee kan een duidelijker beeld worden verkregen van wat de maximale vaartijd kan zijn bij normale omstandigheden, als men ook in ongunstige condities de dienstregeling meestal wil waarborgen. In samenspraak met de reder en/of maritieme experts zou verder moeten worden uitgezocht welke factoren het beste bijdragen aan het waarborgen van de maximale vaartijd: lengte van de vaargeul, diepte/breedte van de vaargeul, bochtigheid van de vaargeul, etc.

8.5.2 Analyse van de schip-geul interactie

Twee aspecten in de observaties suggereren dat de jets van de veerboten een rol spelen bij het baggerbezwaar: (1) het feit dat sedimentatie alleen aan de randen van de geulen

plaatsvindt suggereert dat in het midden van de geul het slib wordt geresuspendeerd door de schepen en (2) de grote snelheid van de uitbochting van de ebgeul suggereert eveneens een effect van de jets op de stabiliteit van de geulranden. Als dit effect van de jets bijdraagt aan de hoogte van het baggerbezwaar, dan kan dit een belangrijk argument vormen bij het overwegen van veranderingen in de vloot als onderdeel van een duurzame oplossing op langere termijn.

Wij bevelen aan nadere studie te maken van de interactie tussen de veerboten en de vaargeul, omdat dit een beter inzicht kan verschaffen in de optimale configuratie van geul en veerboot voor mogelijke toekomstige scenario's. De mogelijke effecten van de veerboten op de geul hangen waarschijnlijk sterk af van de manier waarop de schepen worden aangedreven, maar ook van de relatieve dimensies van schip en geul.

8.5.3 Nadere analyse van ecologische effecten van de baggerpraktijk en bochtafsnijdingen

De ecologische evaluatie in de huidige studie is gebaseerd op relatief grove kaarten met belangrijkste ecologische elementen, maar de studie naar het effect van het mobiliseren van grote hoeveelheden slib op het ecosysteemfunctioneren is niet grondig gevoerd. Ook verdient het aanbeveling bestaande datasets, bv. data over bodemleven in de omgeving van de vaargeul, te onderzoeken op historische trends. Datasets zijn beschikbaar uit MWTL monitoring, uit het SIBES programma (NIOZ/NAM) en uit de monitoring van schelpdieren door IMARES.

8.5.4 Optimaliseren van de varianten / onderzoek van alternatieve varianten

Met het huidige modelinstrumentarium kan onderzocht worden of de varianten kunnen worden geoptimaliseerd om hun hydrodynamische karakteristieken te verbeteren. Gedacht kan worden aan het optimaliseren van de inzet van een spoelmeer (ander tracé vaargeul naar Holwerd en Spoelmeer, constructie van leidammen), het effect van combinaties van varianten, of details van de implementatie (bv. alternatieven voor het blokkeren van bestaande geulen ter stabilisering van de afkortgeul). Daarnaast dient met enige regelmaat het gebied te worden gepeild om op de laatste veranderingen van de morfologie te kunnen anticiperen en zo nodig de varianten daarop aan te passen.

8.5.5 Zand-slib modellering

Voor de variant VLOEDGEUL geldt dat het effect ervan op het baggerbezwaar positief wordt ingeschat, vooral vanwege de kans op licht herstel richting een meer natuurlijke evenwichtssituatie, met daarbij de mogelijkheid om sediment te storten als opvulling van de ebgeul, maar het is moeilijk het gedrag van dit sediment te voorspellen op basis van alleen hydrodynamica. Bovendien is het belangrijk om de verwachte levensduur van deze oplossing goed in te schatten. Wij bevelen aan de stabiliteit van het opvullen van de ebgeul nader te onderzoeken met een zand/slib model, waarmee deze vragen kunnen worden beantwoord. Een gekalibreerd zand/slib model is tevens noodzakelijk om een inschatting te maken van de fluxen van het slib dat in de Zuiderspruit bij vloed wordt gestort. Dit is een essentiële bijdrage aan de studie van de ecologische effecten van de huidige (en van de in de toekomst verbeterde) baggerpraktijk.

8.5.6 Pilots met gewijzigde bagger- en stortstrategie

Wij bevelen aan om de ontwikkeling van een zand/slib model te combineren met pilots waarbij in de praktijk de bagger- en stortstrategie wordt gewijzigd. Dit kan in de praktijk

gebeuren door één van de varianten (bv. VLOEDGEUL) te realiseren. Het nauwkeurig opvolgen in het veld, en modelleren van de slib- en zandtransporten kan het inzicht in de sedimentstromen in het gebied sterk verbeteren, en een basis bieden voor verdere optimalisatie. Ook zal hierdoor de schatting van de grootte van het onderhoudsbaggerbezwaar, en de voorspelling voor de evolutie daarvan op langere termijn, wezenlijk kunnen verbeteren.

8.5.7 Morfodynamische modellering

Zowel grootschalige als lokale morfodynamische ontwikkelingen bepalen in belangrijke mate het baggerbezwaar, zoals in dit rapport gespecifieerd. Morfologische ontwikkelingen hebben vooral belang voor de lange termijn. Als er ingegrepen wordt in het systeem, bv. door bochtafsnijdingen, kan worden verwacht dat de ontwikkeling van platen en geulen zich aan de ingrepen zal aanpassen. Deze aanpassingen kunnen de ingrepen op langere termijn tegenwerken, waardoor intensiever baggeren noodzakelijk zal zijn, en dit aspect is belangrijk om mee te nemen in de evaluatie van de varianten. Bovendien zal een voorspelling van de morfologische reactie van het systeem belangrijk zijn bij het formuleren van oplossingen op de langere termijn. Wij bevelen aan om de morfologische modellering te koppelen aan een intensieve analyse van bestaande data, bijvoorbeeld over trends in de verschillende komgebieden, trends in ontwikkeling van geuldoorsneden en getijdeprisma's van de geulen, sedimentsamenstelling in geulen en platen. De koppeling van modellen met historische gegevens kan niet alleen de kalibratie van de modellen verbeteren, maar tevens het inzicht in de trends verhogen en daardoor de voorspelling van toekomnstige ontwikkelingen verbeteren.

8.5.8 Beter begrip van de systeemdynamiek

Deze studie heeft opnieuw aangetoond dat de dynamiek van slib en van zand-slib mengsels in de Waddenzee, een complex samenspel vormt tussen hydrodynamiek, morfodynamiek en (vaak kleinschalige) dynamische processen van resuspensie, sedimentatie, consolidatie. Dit is een kennisveld waarin de fundamentele proceskennis nog steeds beperkt is, terwijl de implicaties voor natuur en inrichting van het kustgebied groot zijn. Een verbetering van de fundamentele kennis kan wellicht het beste bereikt worden door academisch of gemengd toegepast-academisch onderzoek. Het verdient aanbeveling om vanuit de praktijk een stem te laten horen bij de programmering van onderzoek, bijvoorbeeld in het kader van NKWK, zodat dit onderwerp de aandacht krijgt die het verdient. Daarbij dient ruimschoots aandacht te worden geschonken aan het verzamelen van veldgegevens.

9 Referenties

Bagnold, R.A., 1962. Auto-suspension of transported sediment; turbidity currents, p. 315-319. Proc. Royal Society A, No. 1322, London, UK

Blaas, M, S. Tatman, T. van Kessel, D. Twigt. 2006. Inventory and evaluation of observational data for monitoring SPM fluxes in the Dutch coastal zone. WL Delft Hydraulics Report Z4046.40.

Cleveringa, J., L. van Rijn en N. Villars. 2016. Analyse Vaargeul Holwerd-Ameland: Verkennende berekeningen spoelmeer. Deltares rapport. 51 pp + annexes.

De Lucas, M., M. Ibanez and H. Winterwerp. 2016. Analyse Vaargeul Holwerd Ameland: Overview Laboratory Analyses. Deltares rapport. 35 pp + annexes.

van Duren, L.A., van Kessel, T., Brinkman, A.G., de Kluijver, A., Fey, F. en Schmidt, C.A. 2015. Verkenning Slibhuishouding Waddenzee. Een samenvatting van twee jaar modelleren en kennis verwerven. Deltares rapport

Van Kessel, T. 2016. Analyse Vaargeul Holwerd-Ameland:
Veldmetingen vaargeul Holwerd . Deltares rapport, 21 pp + annexes

Van Rijn, L.C. 2007. Unified view of sediment transport by currents and waves, Part II Suspended Transport. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 133, 668-689

Van Rijn, L., J. Cleveringa en T. van Kessel. 2016. Analyse Vaargeul Holwerd-Ameland: Analyse historische baggergegevens en lodingen. Deltares rapport. 49 pp + annexes.

Villars, N., T. van Kessel, H. Winterwerp, Z. Wang, C. Briere, M. de Lucas Pardo, J. Cleveringa, L. van Rijn, P.M.J. Herman. 2016. Analyse vaargeul Holwerd-Ameland: Verkennende studie naar maatregelen om vertragingen en baggerbezwaar op te lossen. Deltares rapport. 69 pp. + annexes.

Winterwerp, J.C., 2006. Stratification effects by fine suspended sediment at low, medium and very high concentrations. Journal of Geophysical Research, Vol. 111, C05012

Geraadpleegde webbronnen:

http://www.waddensleutels.nl, doorklikken op ‘interactieve kaart Waddenzee’ (geraadpleegd september 2016)

http://www.walterwaddenmonitor.org/en/tools/maps-portal/ (geraadpleegd september 2016)

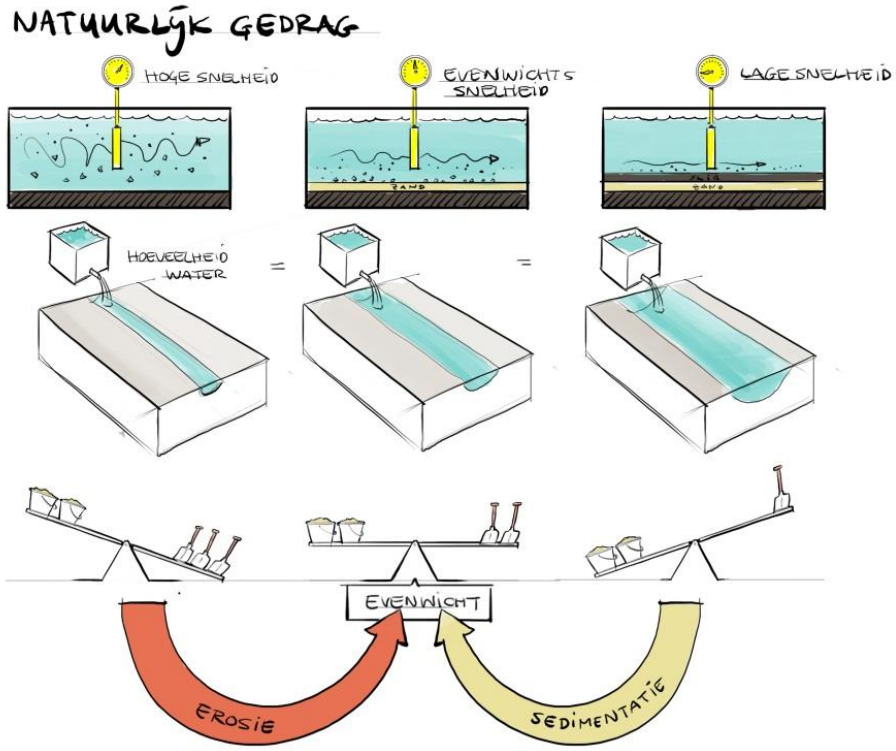
https://rijkewaddenzee.nl/nieuws/ecotopenkaart-geeft-inzicht-natuur-waddenzee/
(geraadpleegd november 2016)

A Verklaring huidige situatie op basis van tekeningen

A.1 Natuurlijk gedrag van een geul – effect geuldoorsnede en stroming

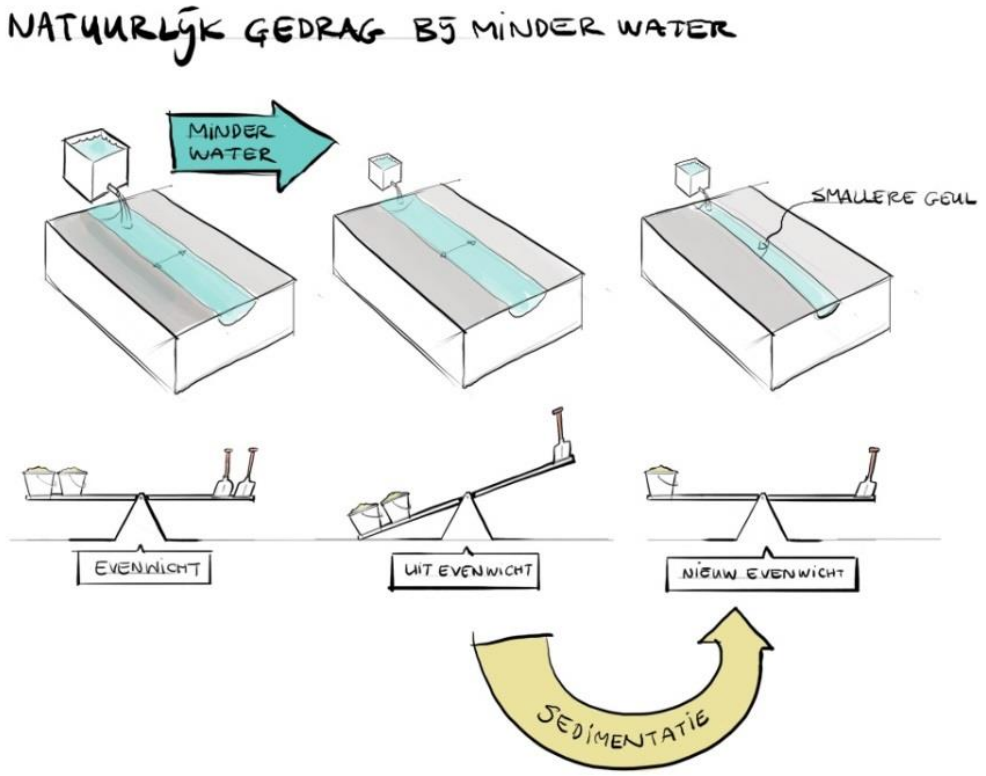
De natuurkunde leert ons dat de diepte en breedte van een geul in evenwicht zijn met de hoeveelheid water die door die geul stroomt. Lokaal treedt echter nog steeds erosie en sedimentatie in de geul op, maar die zijn even groot. Iedere eroderende zandkorrel wordt door een andere korrel vervangen. Er is geen netto effect.

Als de geuldoorsnede te klein of te groot is voor die hoeveelheid water, zal de stroomsnelheid door die geul groter of kleiner worden dan de evenwichtssnelheid. Als de geuldoorsnede te klein is, treedt netto erosie op, en de geul verwijdt weer. Omgekeerd zal netto sedimentatie in de geul optreden als de geul te groot is, dus zal de geul vernauwen, zie Figuur A.1.



Figuur A.1 Natuurlijk gedrag van een geul die probeert in evenwicht te komen door sedimentatie of erosie, afhankelijk van diepte en breedte van de geul en de stroomsnelheid.

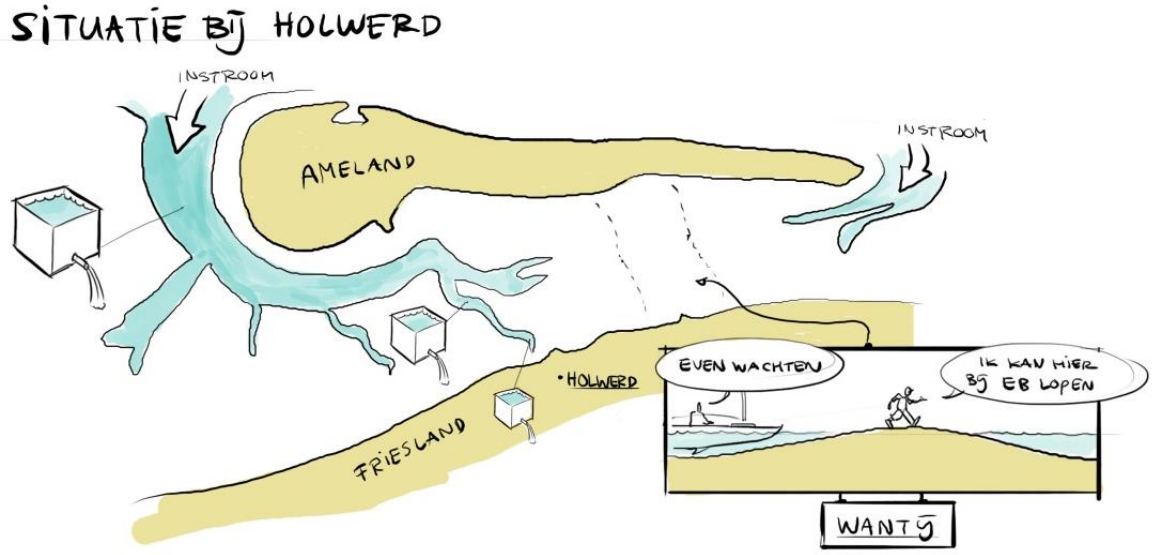
Veronderstel nu dat niet de geuldoorsnede verandert, maar dat de hoeveelheid water die door die geul stroomt kleiner wordt. Dan is dus feitelijk de geuldoorsnede te groot. En zoals boven uitgelegd, zal de geul dan vernauwen door sedimentatie. Bij het nieuwe evenwicht zullen erosie en sedimentatie weer even groot zijn, maar beide zijn kleiner dan bij het evenwicht met de oorspronkelijke hoeveelheid water. Er is dan weer geen netto effect, zie Figuur A.2.



Figuur A.2 Natuurlijk gedrag van een geul als er minder water doorheen stroomt. Door sedimentatie zal de geul verkleinen en wordt een nieuw evenwicht bereikt.

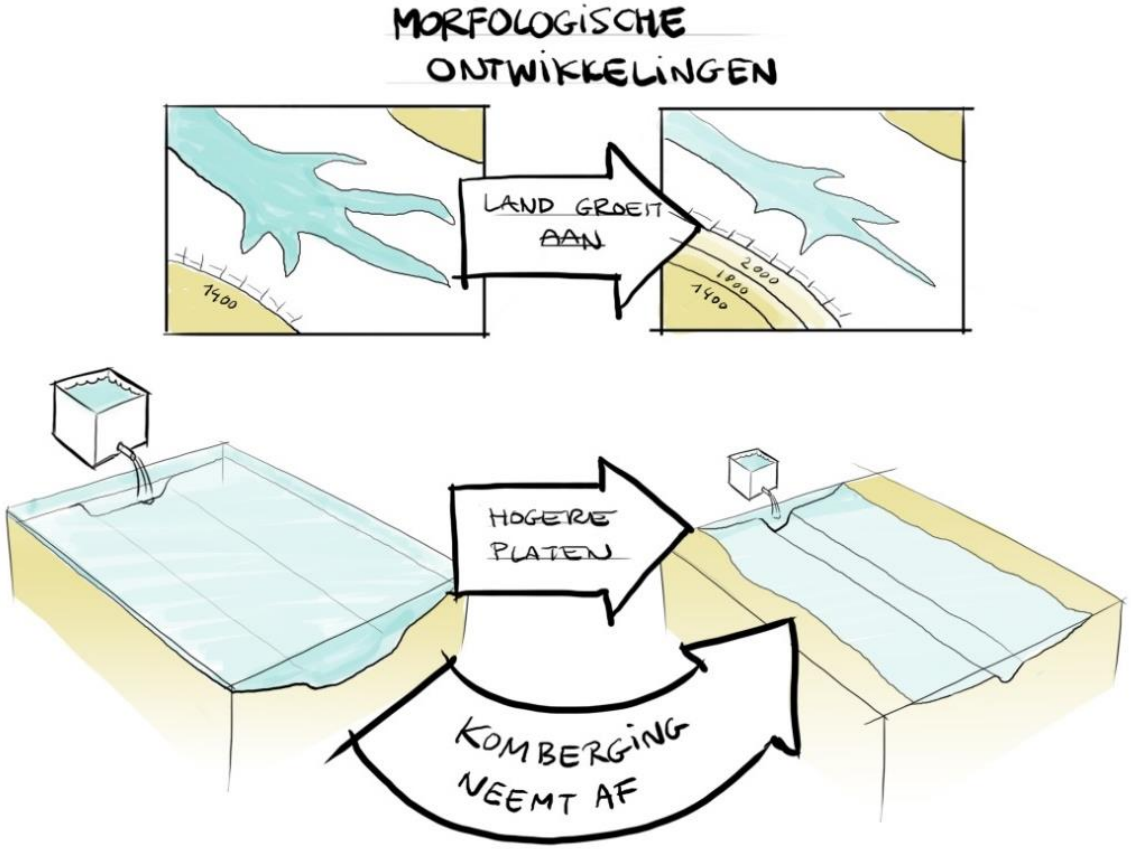
A.2 Grootschalige morfologische ontwikkelingen in de Waddenzee

Bij stijgend water (rijzend tij) stroomt erg veel water de Waddenzee in om haar te vullen; immers de waterstand stijgt in de hele Waddenzee. Dezelfde hoeveelheid water stroomt de Waddenzee weer uit tijdens afgaand tij. Dichter bij het vasteland blijft een steeds kleiner stuk Waddenzee over dat gevuld of geledigd moet worden. Dus hoe dichter bij het vasteland, hoe minder water door de geulen stroomt. Zoals uitgelegd hierboven worden de geulen van de Noordzee naar het vasteland land daarom smaller en ondieper, zie Figuur A.3.



Figuur A.3 Het water stroomt de Waddenzee in; hoe dichter bij het vasteland hoe minder water stroomt door de geulen. De geulen dichtbij het vasteland land zijn daarom smaller en ondieper dan vlakbij de instroom van Noordzee.

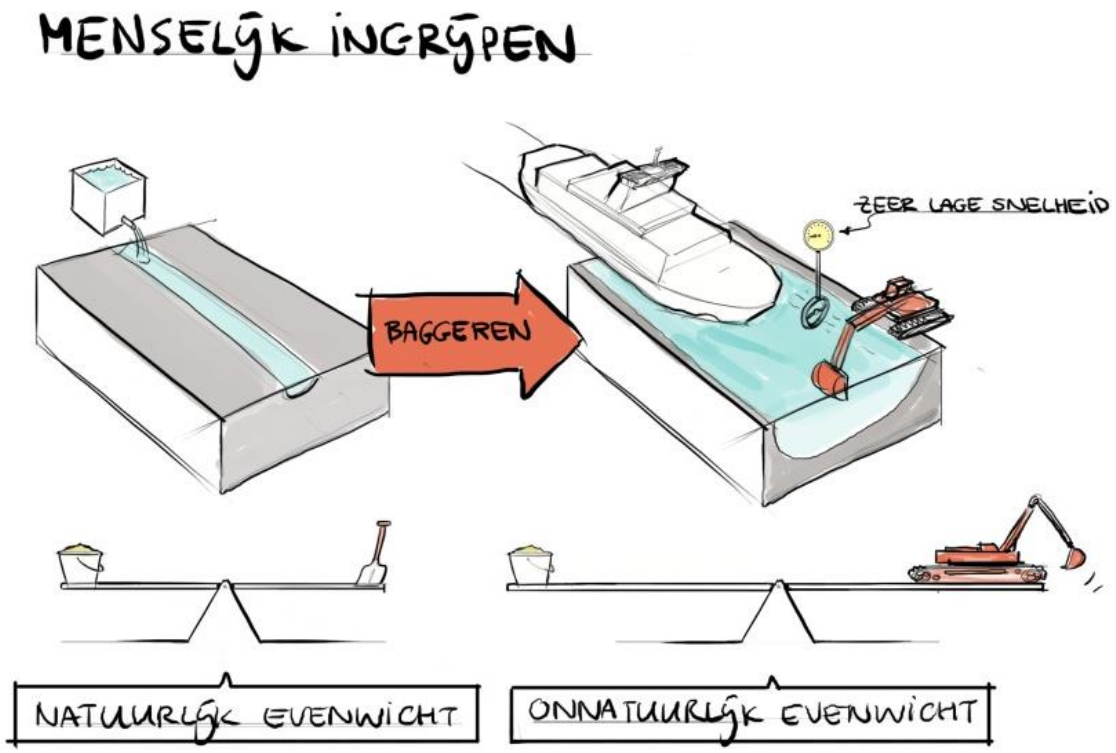
Sinds lange tijd worden de platen achterin de Waddenzee hoger, bijvoorbeeld door landaanwinning langs het vasteland. Maar er zijn ook andere oorzaken voor deze grootschalige morfologische ontwikkelingen. Hier is echter van belang dat door het stijgen van de platen de inhoud van de Waddenzee kleiner word en er dus tijdens rijzend tij steeds minder water nodig is om de Waddenzee te vullen. Er stroomt dus steeds minder water door de geulen. Deze geulen zullen daarom willen vernauwen, hetgeen de huidige situatie in de Waddenzee is, zoals geïllustreerd in Figuur A.2. Dit effect speelt in belangrijke mate in het laatste deel van de vaarroute, nabij Holwerd, zie Figuur A.4.



Figuur A.4 Komberging bij Holwerd neemt af door verhoging van platen. Dit proces is al veel jaren gaande en is onderdeel van de grootschalige morfologische ontwikkelingen van de Waddenzee.

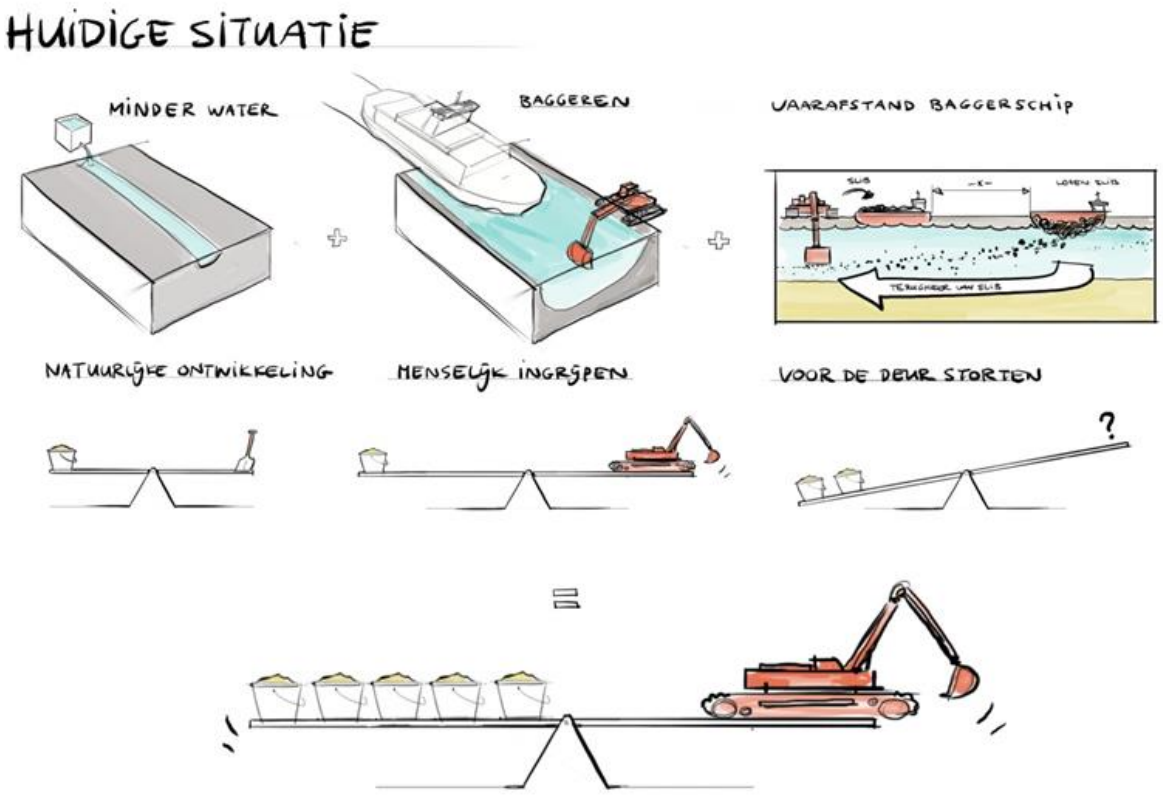
A.3 Het baggeren van de vaargeul

Zoals hierboven is uitgelegd, zien we dat de geulen nu sedimenteren omdat ze te ruim zijn als gevolg van het afnemen van de inhoud van de Waddenzee. Maar de vaargeul is niet ruim genoeg om als vaargeul te dienen, en is daarom door middel van baggeren verder verdiept en verbreed, zie Figuur A.5. Er zijn dus twee redenen waarom de vaargeul te ruim is (afnemende instroom van de Waddenzee en het op breedte en diepte te houden om als vaargeul te dienen).



Figuur A.5 Een brede en diepe geul heeft een laag stroomsnelheid en wil kleiner woorden door sedimentatie. Door baggeren wordt door geul in een onnatuurlijk evenwicht gehouden. Deze baggeren is nodig om de vaargeul op breedte en diepte te houden voor de veerboot.

Het gebaggerde slib moet vervolgens ergens gestort worden. Tijdens eb gebeurt dit in de vaargeul nabij de locatie waar deze het Dantziggat kruist. Dit is dicht bij het te baggeren traject. Het gestorte slib kan daarom waarschijnlijk gemakkelijk terugkeren naar het te baggeren geultraject, ondanks storting tijdens eb, zie Figuur A.6. Deze retourstroom van slib is het derde element dat de grootte van het huidige baggerbezwaar bepaalt.



Figuur A.6 Gebaggerd slib wordt tijdens eb gestort in de vaargeul nabij de locatie waar deze het Dantziggat kruist, waardoor het terug kan stromen in de vaargeul.

B Berekening van slibtransport en consolidatie in de geul

In deze annex beschrijven we het model waarmee we hebben onderzocht (hoofdstuk 4.6) of de divers verzamelde informatie consistent is en onze analyses plausibel zijn. Hierbij gebruiken we de volgende gemiddelde waardes (Tabel B.1):

Tabel B.1 Karakteristieke parameters voor vaargeulparameters.

waterdiepte vaargeul	h	4 m
breedte vaargeul	b	50 m
lengte te baggeren traject	L_b	3 km
lengte vaarroute langs slik vanaf meetpunt B	L_B	1 km
totaal baggerbezwaar	V_b	$1{,}8 \cdot 10^6$ m^3/yr
droge dichtheid in beun	ρ_{beun}	425 kg m^{-3}
droge dichtheid vaargeul	ρ_b	850 kg m^{-3}
gelling concentratie	c_{gel}	125 kg m^{-3}
consolidatie coëfficiënt	c_v	$5 \cdot 10^{-8}$ m^2 s^{-1}
gemiddelde SPM in onderste 2 m punt B	c_B	2 g/L
gemiddelde vloedsnelheid in onderste 2 m punt B	$U_{B,v}$	0,25 m s^{-1}
gemiddelde vloedsnelheid in onderste 2 m punt B	$U_{B,e}$	0,2 m s^{-1}

De totale massa M_d die gebaggerd wordt, en dus gelijk is aan de totale massa die sedimenteert bedraagt:

$$M_d = V_b \rho_{beun} = 1.8 \cdot 10^6 \times 425 = 7.65 \cdot 10^8 \quad \mathrm{kg/yr} \tag{1}$$

Het totale volume V_s dat aanslibben is dus de helft kleiner i.v.m. het feit dat de in-situ droge dichtheid een factor twee groter is dan de droge dichtheid in de beun:

$$V_s = V_b \frac{\rho_{beun}}{\rho_b} = 0.9 \cdot 10^6 \quad \mathrm{m^3/yr} \tag{2}$$

We nemen vervolgens aan dat de aanslibbing egaal over het te baggeren deel van de vaargeul plaatsvindt. Dus dan wordt de aanslibbing m_s (massa) en v_s (volume) per eenheid van oppervlak

$$m_{s,yr} = \frac{M_d}{bL_b} = 5.10 \cdot 10^3 \quad \mathrm{kg/m^2 yr} \tag{3}$$

$$m_{s,T_v} = \frac{m_{s,yr}}{365 \times 2 \times 12/12.5} = 7.28 \quad \mathrm{kg/m^2 T_v}$$

$$v_s = \frac{V_s}{bL_b} = 6.0 \quad \mathrm{m/yr}$$

waarin T_v = vloedperiode, benaderd als T/2 met T de getijperiode (T=45000 s). Laten we vervolgens aannemen dat de aanslibbing in de laatste kilometer van de geul wordt aangevoerd door de vaargeul, i.e. de sedimentflux door de dwarsdoorsnede bij punt B (Figuur 4.1). De SPM concentratie volgt uit de OBS-metingen (rapport veldmeting en Figuur 4.3), en de snelheid ter plaatse uit Figuur 4.3. De totale sedimentflux f_B bij punt B kan goed benaderd worden met het product van SPM en snelheid in de onderste 2 m van de waterkolom:

$$f_B = c_B U_B h_{2m} b = 2 \times 0.25 \times 2 \times 50 = 50 \quad \mathrm{kg/s}$$

$$F_{B,T_v} = f_B T/2 = 50 * 45000 / 2 = 1.13 \cdot 10^6 \quad \mathrm{kg/T_v} \tag{4}$$

$$F_{B,y} = f_B T/2 \times 365 \times 2 \times \frac{12}{12.5} = 1.13 \cdot 10^6 \times 365 \times 2 \times \frac{12}{12.5} = 7.9 \cdot 10^8 \quad \mathrm{kg/yr}$$

waar $F_{B,Tv}$ = totale sedimentflux door punt B, geïntegreerd over de vloed periode, en $F_{B,y}$ de vloedflux geïntegreerd over het hele jaar, aannemend dat er per dag bijna twee vloedperiodes bestaan. Uit deze laatste flux kan dan een schatting worden gemaakt van de aanslibbing per eenheid van oppervlakte, als we aannemen dat de totale flux door punt B in de laatste kilometer van de vaargeul bezinkt. Deze potentiele aanslibbing wordt m_B genoemd:

$$m_B = \frac{F_{B,y}}{bL_B} = \frac{7.9 \cdot 10^8}{50 \times 1000} = 15.8 \cdot 10^3 \quad \mathrm{kg/m^2 yr} \tag{5}$$

De potentiele aanslibbing m_B is een factor 3 – 4 groter dan de waargenomen aanslibbing $m_{s,yr}$ in dit deel van de geul. Er wordt tijdens eb echter ook weer sediment wordt afgevoerd, en bovendien zitten er nogal wat onnauwkeurigheden in de aannames bij deze berekeningen. Daarom kunnen we concluderen dat de gemeten concentraties en droge dichtheden en de waargenomen baggercijfers onderling consistent zijn. Met andere woorden: de enkele metingen die nu beschikbaar maken het aannemelijk dat de totale hoeveelheid sediment die in de vaargeul bezinkt, en dus moet worden verwijderd als een hooggeconcentreerde suspensie door de geul wordt aangevoerd.

Per vloedperiode wordt per eenheid van oppervlakte in het laatste deel van de geul afgezet:

$$m_{B,v} = \frac{F_{B,v}}{bL_b} = \frac{1.13 \cdot 10^6}{50 \times 1000} = 22.6 \quad \mathrm{kg/m^2 T_v} \tag{6}$$

Als we aannemen dat dit sedimenterend slib initieel de droge dichtheid van de gelling concentratie aanneemt, dan wordt er dus per vloedperiode een laagdikte $\delta_{B,v}$ afgezet:

$$\delta_{B,v} = \frac{m_{s,T_v}}{c_{gel}} = \frac{7.28}{125} = 5.8 \quad \mathrm{cm/T_v} \tag{7}$$

De consolidatietijd van deze laag kan worden bepaald m.b.v. de consolidatievergelijking van Terzaghi (Winterwerp en Van Kesteren, 2004):

$$\frac{\partial c}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \quad \text{dus} \quad T_c \sim \frac{\delta^2}{c_v} \tag{8}$$

waarin T_c = consolidatie tijdschaal en δ = dikte consoliderende sliblaag. Substitutie van de afgeschatte dikte van de sedimenterende sliblaag per vloedperiode en een gemiddelde waarde van de in het laboratorium gemeten consolidatie coëfficiënt vinden we voor de consolidatietijd:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \quad \text{dus} \quad T_c \sim \frac{\delta^2}{c_v} = \frac{0.058^2}{5 \cdot 10^{-8}} = 6.8 \cdot 10^4 \ \mathrm{s} = 19 \ \mathrm{hr} \tag{9}$$

C Besprekingen met Wagenborg (WPD) en ex-kapiteins

Hieronder de puntsgewijze aantekeningen van gesprekken gehouden op 18 juli 2016, op Ameland, door Ernst Lofvers en Herman Mulder (RWS) en Nicki Villars en Han Winterwerp (Deltares).

C.1 Bespreekverslag met ex-kapiteins

Punten uit overleg met oud-kapiteins en –schipper van het eiland: Jaap Bruin (oud-schipper RWS), Germ Brouwer (kapitein WPD tot 2006), Gerbrand Bruin (kapitein WPD tot 2013):

- De hoogste prioriteit is een betrouwbare dienstregeling. Dit is veel belangrijker dan een 1uur dienstregeling (huidige regeling), de overtocht mag best wat langer duren. Om dit moment is er geen zekerheid dat de boot op tijd vaart.
- De kapiteins/eilandbewoners zien voor de korte termijn een 5/4 dienstregeling als best haalbaar. De eerste boot kan om 06:00 vanuit Nes vertrekken, vervolgd door 07:15 bij Holwerd, etc.
- Huidige dienstregeling houdt geen rekening met de heersende natuurlijke dynamiek
- Ze geloven (vertrouwen) niet dat 1 of meer bochtafsnijdingen een vaartijd van 45 minuten kan garanderen om een uursdienstregeling te kunnen handhaven. De huidige vaartijd is nu gemiddeld 50-55 minuten (bij HW doet schip er ook ongeveer 50 min over). Laden en lossen is nu ca. 20 minuten. Een 5/4 dienstregeling geeft waarschijnlijk voldoende tijd om vertragingen bij laagwater, tegenstroom en/of wind op te vangen.
- De huidige schepen met waterjets komen in de problemen als er niet genoeg water onder de boot is (snelheid loopt sterk terug). Ze zijn ook erg gevoelig voor wind vanwege hun geringe diepgang en grote hoogte boven de waterlijn (1,5 m diep; 8 m boven water). De schepen zijn echter speciaal ontwikkeld voor ondiep water. De kapiteins zijn hier unaniem over, de aandrijving vindt (vond) men ideaal. Er is slechts 20 cm water nodig onder de boot. De 4 schottelpompen (2 voor, 2 achter) maken de manouvreerbaarheid en het varen van bochten beter dan met een schroef. De waterstraal uit de pompen loopt vrijwel horizontaal onder het schip. Schip zit minder vaak vast dan met schroeven: ‘de schottels drukken schip gewoon door’. Uitgebreid getest in Hamburg (ondiepe rivierbeddingen). Problemen met de pompjets doen zich alleen voor als het schip op hard zand vastloopt, en de jets hun water niet meer kwijt kunnen (overdruk). IJsgang vrijwel geen probleem (ijs wordt verpulverd).

- **Belangrijke data:**
  - tot 1959 werd op getij gevaren, vervolgens werd pier Holwerd verlengd en werden doorsteken gegraven. Investeren op die plek – zo dicht bij wantij – is eigenlijk een verkeerde keuze geweest, er is te weinig komberging om geulen open te houden.
  - In 1985 is de 1 uur dienstregeling begonnen
  - In 1995 is een grotere boot ingezet (Sier).
  - In 2003 is een 2e boot erbij gekomen (Oerd)
- De grotere schepen sinds 1995 hebben meer tijd nodig voor laden en lossen, maar de dienstregeling is niet aangepast.
- De Sier had in begin te weinig vermogen. In 1998 zijn de schottelpompen vervangen door zwaardere, dat vergrootte de manouvreerbaarheid en snelheid. Direct bij het in de vaart brengen ontstonden vertragingen: niet alleen vanwege het motorvermogen, maar ook door de grotere waterverplaatsing waardoor meer weerstand in de (toen ook al) smalle en ondiepe geul werd ondervonden. Scheepstype wel ideaal voor ondiepe Wad, maar ze hebben teveel waterverplaatsing voor de geul (zeer veel weerstand, energieverlies).

- de eilanders vermoeden dat het weer in onderhoud nemen van de kwelderwerk en positief zou kunnen werken (om 'heen en weer reien' van slib te voorkomen)
- Voor de toekomst moeten andere alternatieven dan geulverleggingen overwogen worden. Ze denken dat het baggeren niet gereduceerd kan worden zonder rigoureuze maatregelen. Een ingreep in de geul zal niet veel soelaas bieden. Ze denken aan kleinere, smallere, lichtere schepen (minder windgevoelig en makkelijker om elkaar te passeren in de vaargeul), vooral minder waterverplaatsing. De huidige schepen zijn te groot voor de huidige geul (dat bleek al bij één van de eerste afvaarten: onmiddellijk vertraging). Wel zelfde aandrijving vinden de oud-schippers.
- Huidige concessie loopt tot 2029, dat maakt voortijdig investeren in nieuwe schepen weinig aantrekkelijk

Waarnemingen:

- Observaties over de Reegeul: deze is aan het inkorten, naar het oosten aan het verplaatsen. In de laatste 3-4 jaar is dit gunstiger geworden.
- zeer diepe zandwinput (18 m) in de vloedschaar jaren 80 t.b.v. dijkverzwaring: liep binnen enkele maanden weer helemaal vol.
- Dantziggat vertoonde lang tekenen van verzanding, laatste jaren lijkt er weer verdieping.
- de geul nabij Holwerd was altijd al zeer troebel, ook 30 jaar geleden.
- in jaren 90 werden de laatste mosselen van het wad geschept, dat heeft mogelijk ook een negatief effect gehad op het baggeren.
- baggeren is frustratie die goed begrepen wordt: als geul op orde is en daarna storm bij W-NW 7 zit alles onmiddellijk weer dicht.
- je moet realistisch zijn, niet naar één aspect kijken en naar elkaar wijzen, je moet alles 'integraal' bekijken en gezamenlijk nieuwe keuzes maken.
- kijk ook naar scheiden van goederen en passagiers (goederen met hoogwater, passagiers op kleinere schepen).

Mogelijke maatregelen (in de geulen) die genoemd zijn:

- Kortsluiting maken tussen Zuiderspruit en uitbochtende geul van het Kikkertgat en deze doortrekken naar Holwerd.
- Herstel van rijshouten dammen op het slik westelijk van Holwerd (meer slibvang)
- Bredere en diepere geul en minder scherpe bochten, waardoor: sneller in de bochten, boten hoeven niet op elkaar te wachten bij passeren. M.n. het laatste gedeelte naar Holwerd is een probleem. Er moet 1600 ton water verplaatst worden. Neem bijvoorbeeld de gemiddelde breedte tussen MARIN-rapport en RWS-maatvoering.
- Maken van putten als slibvang.

C.2 Bespreekverslag met Wagenborg (WPD)

Punten uit het overleg met WPD (kapiteins Gert-Jan Verbeek en Robert Boelens) en Wim Durans (hoofd administratie WPD):

Vertragingen, oorzaken, oplossingsrichtingen veerverbinding Holwerd-Ameland

- De vertraging is een groot probleem. Evenals eilanders wil ook WPD een betrouwbare dienstregeling.
- De vaargeul is sinds 1972 15 - 20% langer geworden (van ca. 10 km in 1972 tot 11,8 à 11,9 km nu).
- Het tracé is bochtiger geworden, waardoor route niet alleen langer maar óók minder snel gevaren kan worden.
- In 1985 is er een uursdienstregeling. De vaartijd was volgens Wim toen ongeveer 40 minuten.
- In 2015 is de vaartijd gemiddeld 51 minuten.
- Laden en lossen is minstens 11 minuten (gemeten bij vertraagde boot), maar vaak langer (als er bijvoorbeeld veel fietsers zijn)
- Sinds 1985 ook een flinke toename in passagiers, auto's, vrachtwagens en goederen. Dit kost meer laad-lostijd. Vraagt ook op vrijdagen en zaterdagen 2 boten continu.
- Samengevat: De huidige vaartijd + laden/lossen past niet (meer) in 1 uur dienstregeling. Door combinatie van factoren: het vergrote vervoersaanbod (waardoor meer laad/lostijd nodig is) en de veranderde morfologie (in verhouding ondiepere, langere, bochtigere geul)
- 2 bochtafsnijdingen ("vloedgeul" en Simonsgeul) kan 5-6 minuten winst opleveren, zou WPD erg helpen. Dit is binnen de huidige logistiek significant, de afsnijdingen kunnen het mogelijk maken om aan de huidige dienstregeling te voldoen. De risico's zijn echter groot. De kapiteins verwijzen naar begin tachtiger jaren toen in de huidige "vloedgeul" ten zuiden van de noordelijke bocht (VA19-VA33) enorm veel zand gewonnen voor de dijkversterking. Het gat zat echter in mum van tijd dicht. Ze begrijpen het risico van een eventuele bochtafsnijding. Moet goed onderzocht worden.
- Een aangepast dienstregeling van 5/4 vindt WPD geen goede optie:
  - Aantal retourtochten zou dan teruglopen van 7 naar 6. Dat is minder inkomen voor Wagenborg; tickets moeten dan mogelijk duurder worden.
  - Het heeft volgens WPD weinig toegevoegde waarde om een extra tocht (eerder of later in de dag) in te plannen om toch 7 retour tochten te maken. Met de huidige vaartijden (eerste boot om 6:30 vanuit Nes, laatste boot om 19:30 vanuit Holwerd (20:30 in de zomer)) is er nu al beperkte belangstelling/gebruik van de eerste en laatste boot.
  - Netto zou 5/4-regeling op drukke dagen betekenen dat veel mensen niet mee kunnen en gedwongen worden om laat op de avond te reizen. Dat betekent ook langere werkdagen en extra kosten.
- Een dieper en breder vaargeul in zuidelijk bocht bij Holwerd zou helpen: de boten kunnen dan sneller varen, en elkaar passeren is ook makkelijker en sneller. Nu bij passage soms slechts 5 m afstand. WPD wil graag de afmetingen van de PIANC richtlijn zoals MARIN heeft geadviseerd: 66,5 x 4,35 meter. Overigens is erg onduidelijk wie de (huidige) afmetingen bepaalt (of mag/moet bepalen). Hierover is voor toekomst duidelijkheid nodig!
- Pompjets stralen vrijwel horizontaal, ca. 10 graden. Gegevens over de pompjets (zoals debiet/snelheid door de pompen) zijn op te vragen via Wim Durans of Pieter de Wit.
- Aanzanding is mogelijk het gevolg van kustsuppleties, is de beleving.

- Het uitbaggeren van de zuidzijde van de geul bij Holwerd vóór 2010 (door vorige aannemer) was een grote vergissing: nog dichter onder de kwelder en met meer aanslibbing tot gevolg (?)
- Laatste gedeelte naar Holwerd is bottle-neck ("gebed zonder end"). Hier is meer diepte en breedte nodig om de waterverplaatsing van het schip te kunnen opvangen (nu ondervindt het schip zeer veel weerstand).
- Andere bottle-necks zijn VA4-VA9/9a qua diepte (zanddrempels), bochtigheid en de dwarsstroom bij de oversteek van de lijn Scheepsgat-Zuiderspruit.

Langere termijn, vervolgonderzoek

- Op de lange termijn, zijn andere oplossingen waarschijnlijk nodig. Wat is het morfologisch perspectief? Holwerd is misschien niet houdbaar als opstap locatie. Ferwerd wordt meermalen genoemd, aldaar aantakken op het diepere Dantziggat. Maar ook andere oplossingen dan schepen zouden kunnen worden beschouwd, het gaat om een samenhangende integrale afweging waarin alle relevante aspecten worden meegewogen.
- Oplossing mogelijk door scheiding passagiers en vracht, maar zou investering vragen (bijvoorbeeld 1 vrachtboot en 3 passagiersboten zou 80 M€ kosten). In 2029 is er pas een nieuwe concessie. Tot dan is het bedrijfsmatig niet slim om zo'n grote nieuwe investering te doen. Maar het gaat om kosten/baten-afweging binnen een totaal pakket waarin afweging ander type vloot moet worden gemaakt t.o.v. ingrijpen in vaargeul.
- Naast de trends in morfologie (steeds meer baggeren, grotere kosten) moeten ook de trends in de toekomstige ontwikkelingen van het eiland worden meegewogen: verdere groei van economie, toerisme, meer luxe voorzieningen (meer bagage, goederen) etc. vragen om fundamentele keuzes (meer varen, grotere schepen), tenzij je wilt 'down sizen'. Dit vergt een maatschappelijk debat.
- van belang om er SAMEN uit te komen, komen tot totaaloplossing. Men ziet ook graag DGB zelf aan tafel (niet via afvaardiging RWS), want afspraken uit concessie zijn sterk bepalend.
- Ook van belang om naast de PKB-eisen naar uitstoot te kijken (cumulatie schepen èn baggeren), ofwel PAS-regeling

D Aanbevelingen voor verdere studie

Uit de analyse van het baggerbezwaar en de varianten in deze studie zijn een aantal onderwerpen naar voren gekomen die nadere studie vereisen, voordat tot een definitieve keuze en implementatie kan worden overgegaan. We vermelden hier de belangrijkste punten, maar gaan niet diep in op de mogelijke uitvoering van nadere studies. Deze zal in nader overleg eventueel moeten worden vastgesteld.

1. **Analyse vaartijd t.b.v. verbetering varianten**:

   Aanleiding
   Uit gesprekken, gevoerd aan het eind van het onderzoeksproject (zie ook Annex C) is gebleken dat een minimale verkorting van de vaartijd, zelfs met niet meer dan één tot enkele minuten, van groot belang is voor het handhaven van de dienstregeling. In de huidige situatie is de vaartijd net te lang om deze dienstregeling betrouwbaar te waarborgen.

   Aanpak
   Het analyseren van de statistiek van in het verleden gerealiseerde vaartijden kan helpen om de invloeden te verduidelijken van verschillende externe factoren op de vaartijd: stormomstandigheden, getij, seizoensafhankelijk aantal reizigers, invloed van vertragingen die eerder op de dag zijn opgelopen. Daarmee kan een duidelijker beeld worden verkregen van wat de maximale vaartijd kan zijn bij normale omstandigheden, als men ook in ongunstige condities de dienstregeling meestal wil waarborgen.
   In samenspraak met de reder en/of maritieme experts zou verder moeten worden uitgezocht welke factoren het beste bijdragen aan het waarborgen van de maximale vaartijd: lengte van de vaargeul, diepte/breedte van de vaargeul, bochtigheid van de vaargeul, etc.

   Verwachte resultaat
   Deze analyse zou kunnen leiden tot een prioritering van nautische eisen, en een correctere evaluatie van de reeds onderzochte varianten met betrekking tot het aspect ‘vaartijd’.

2. **Veldmetingen t.b.v. beter begrip van sedimentdynamiek en optimalisering baggerpraktijk**

   Aanleiding
   De veldmetingen die zijn uitgevoerd in het kader van de hier gerapporteerde studie zijn beperkt tot het meest zuidoostelijke deel van de vaargeul. Zij hebben empirisch aangetoond dat de fluxen van slib de snelle sedimentatie in de vaargeul kunnen verklaren, en zijn over het algemeen zeer consistent met de waarnemingen aan de baggerpraktijk, en met de in het laboratorium gemeten eigenschappen van het zand-slibmengsel (zie paragraaf 4.6 en Annex B). Er is echter geen duidelijk beeld van de transporten van slib vanaf de plaatsen waar dit slib op eb wordt gestort terug naar de vaargeul, noch van de transporten van slib dat tijdens vloed wordt gestort in de Zuiderspruit. Ook ontbreekt een duidelijk beeld van de rol die de platen spelen bij het invangen van slib in de geul (geul-plaat interactie). Het lot van het slib dat op eb wordt

gestort is van bijzonder belang om de relatie tussen ebstort en de dynamiek van de eb-vloedschaar beter te beschrijven en te begrijpen.

Aanpak
Voor de veldwaarnemingen zal het noodzakelijk zijn op een aantal goed gekozen trajecten dwarsraaien middels ADCP en turbiditeitssensor gedurende minimaal 13 uur door te meten. Tevens zal een ruimtelijke survey van SPM-gehaltes noodzakelijk zijn, die idealiter kan worden ondersteund door het gebruik van remote sensing beelden (waardoor extrapolatie van de meetdag(en) naar een groter aantal omstandigheden mogelijk wordt).

Voor de geul-plaat interactie is het van belang de metingen, die zich nu strikt tot de vaargeul hebben beperkt, uit te breiden met metingen op de omringende platen. Slibgehaltes en –fluxen tijdens vloed, sedimentatie op de platen, en resuspensie van gesedimenteerd slib door invloeden van de veerboot (scheepsgolven) en tijdens stormen zijn daarvoor van belang.

Vooral op de platen is de studie van de dynamiek en het transport van zand van groot belang. Ruimtelijke verdelingen van sedimentsamenstelling, en transportmetingen van bedload en gesuspendeerd zand over de platen, in-situ metingen van valsnelheid zijn daarbij van belang. Omdat zandtransport erg afhankelijk is van weersomstandigheden, zou bij verschillende omstandigheden moeten worden gemeten. Een inzicht in de ruimtelijke verspreiding van zand en slib (en daaraan gekoppeld bulkdichtheden van sediment) is eveneens van belang.

Verwachte resultaat
De relatief gunstige evaluatie van de variant VLOEDGEUL is sterk afhankelijk van de aanname dat in deze variant het slib stabiel kan worden geborgen in de huidige ebgeul. Nader onderzoek van deze mogelijkheid zal gebruik moeten maken van slib/zand modellering, maar de kwaliteit van een dergelijke modellering zal kritisch afhangen van het voorhanden zijn van veldwaarnemingen aan de huidige situatie.

Het transport van slib dat wordt gestort in de Zuiderspruit is van belang om de correlatie in de tijd tussen deze gestorte volumes en het SPM in het Dantziggat nader te onderzoeken op causaliteit. Dit is een essentieel onderdeel van de evaluatie van ecologische effecten van de varianten (en vooral van de variant REF, waarvan we nu inschatten dat deze significante negatieve effecten heeft op het ecologisch functioneren van de Waddenzee). Veldmetingen aan deze slibfluxen zijn ook van belang voor de nadere analyse van het baggerbezwaar, omdat de bijdrage van het slib dat op Zuiderspruit wordt gestort aan de retourfluxen van slib onduidelijk is, maar potentieel wel 1/3 van deze retourfluxen voorstelt.

Metingen aan zandtransport zijn essentieel om de samenstelling van het sediment in de geulen te verklaren. De huidige bijdrage van zand (ongeveer 25 %) in de samenstelling van het sediment in de geul kan niet verklaard worden door zandtransport in de geul. Het moet te wijten zijn aan geul-plaat interactie en dus aan zandtransport over de platen. Dit zandtransport zal naar verwachting ook bepalend zijn voor de stabiliteit van een aangelegde variant, en voor de levensduur van de stortmogelijkheid in afgedamde geulen.

3. **Analyse van het effect van de veerboot (jets) op de stabiliteit van het sediment in de vaargeul**

   Aanleiding
   Twee aspecten in de observaties suggereren dat de jets van de veerboten een rol spelen bij het baggerbezwaar: (1) het feit dat sedimentatie alleen aan de randen van de geulen plaatsvindt suggereert dat in het midden van de geul het slib wordt geresuspendeerd door de schepen en (2) de grote snelheid van de uitbochting van de ebgeul suggereert eveneens een effect van de jets op de stabiliteit van de geulranden. Als dit effect van de jets bijdraagt aan de hoogte van het baggerbezwaar, dan kan dit een belangrijk argument vormen bij het overwegen van veranderingen in de vloot als onderdeel van een duurzame oplossing op langere termijn.

   Aanpak
   Het is van belang om inzicht te verkrijgen in de operationele eigenschappen van de gebruikte waterjets, i.e. de uittreesnelheden en dimensies van de jet. Met behulp van geschematiseerde berekeningen kan worden vastgesteld in hoeverre die jets bodem en of geuloevers beroeren. Indien deze berekeningen substantiële effecten suggereren, zullen veldmetingen noodzakelijk zijn om de geïnduceerde snelheden, en de daarmee samenhangende sedimentdynamiek, daadwerkelijk te meten. Daartoe zullen meetinstrumenten moeten worden geplaatst op de bodem van de vaargeul, en gedetailleerde metingen van stroomsnelheid en gesuspendeerd materiaal moeten worden uitgevoerd bij elke passage van een veerboot.

   Verwachte resultaat
   Inzicht in de rol die de jets spelen in de sedimentdynamiek in de geul zal toelaten beter af te wegen of een verandering in de vloot positief kan bijdragen aan het reduceren van het baggerbezwaar.

4. **Hydrodynamisch Modelleren** (met gebruik van het huidige, gekalibreerde 2D model)

   Aanleiding
   Tijdens de analyse van de varianten is een aantal aspecten naar voren gekomen, die met de huidige versie van het model zouden kunnen worden ingeschat, maar die niet meer aan de orde konden komen. We vermelden de volgende:

   - Spoelmeer variant verbeteren/optimaliseren en doorrekenen. De mogelijkheden om het ‘spoelen’ in de tijd te optimaliseren, zodat het grootste deel van het gespuide water niet over de platen uitwaaiert maar tot de geul wordt beperkt, kunnen met behulp van het model nader worden geanalyseerd. Tevens zou hierbij rekening kunnen worden gehouden met de komberging die in de aanvoergeul wordt gerealiseerd, en die bij een juiste dimensionering bij de werking van het spoelmeer kan worden bijgeteld.
   - LANG/LANGSPOEL variant verkorten qua vaarweg. Onderzocht kan worden of deze varianten in een rechtere lijn (dus minder afhankelijk van de natuurlijke geulen) kunnen verbinden tussen de veerdam en de vloedgeul. Dit kan effect hebben op de vaartijd, de nabijheid tot de bestaande grote mossel/oesterbank ten noorden van het nu onderzochte tracé, maar ook op de effectiviteit van het spoelen.

- Combinaties van varianten onderzoeken. Daarbij wordt in de eerste plaats gedacht aan de combinatie VLOEDGEUL-DIEPBREED.
- Nieuwe of andere varianten onderzoeken. Een mogelijke variant die in gesprekken herhaaldelijk naar voren wordt gebracht is de verbinding van de huidige ebgeul, die naar het noorden migreert, met de Zuiderspruit die zuidelijk migreert. Een verbinding door de plaat zou een nieuw type hydrodynamiek in de omgeving veroorzaken maar is niet bij voorbaat een kansloos alternatief.
- Een alternatieve locatie voor de veerdam, al dan niet in combinatie met het spoelmeer, onderzoeken. Een mogelijkheid is een meer westelijke locatie, die middels een aanvoergeul zou kunnen aantakken op de huidige vaargeul ter hoogte van de scherpe bocht naar Holwerd.

Aanpak
Het aantal mogelijkheden voor (combinaties van) varianten is zeer groot. Het is van groot belang vooraf zorgvuldig de meest kansrijke varianten te selecteren, en vast te stellen op welke basis de evaluatie zal worden uitgevoerd. Voorgesteld wordt om de evaluatiecriteria zoals gebruikt in dit rapport te handhaven, en de keuze van door te rekenen varianten te laten afhangen van een inschatting vooraf van hun kansrijkdom (op basis van de reeds bestudeerde varianten) en van de waarschijnlijkheid van realisatie (op basis van het maatschappelijk debat).

Verwachte resultaat
Een set van varianten die aansluiten bij de maatschappelijke wensen, en die op een consistente wijze zijn geëvalueerd met een vergelijkbare methodiek.

5. **Modelleren van de zand-slib dynamiek**

Aanleiding
Het huidige hydrodynamische model kan worden gebruikt als basis van een zand/slib model dat de transporten van zand en slib in het studiegebied kan afschatten. Een dergelijk instrumentarium levert de enige mogelijkheid om in te schatten hoe de varianten, die de vloedgeul gebruiken en potentieel sediment kunnen bergen in de huidige ebgeul, zullen functioneren met betrekking tot het baggerbezwaar. De essentiële elementen die het model zal moeten inschatten zijn de natuurlijke snelheid van opvulling van de ebgeul (bepalend voor de tijd waarin bergingsruimte voorhanden is), de stabiliteit van slibbig sediment dat in deze geul wordt geborgen (bepalend voor de effectiviteit van deze oplossing om het ‘rondpompen’ van het sediment te beperken), en de snelheid waarmee het geborgen sediment wordt vervangen door slib en zand dat uit de natuurlijke fluxen naar de vaargeul wordt getransporteerd.

Een gekalibreerd slib/zand model is tevens noodzakelijk om context te bieden aan veldstudies naar de fluxen van het slib dat in de Zuiderspruit bij vloed wordt gestort. Dit is een essentiële bijdrage aan de studie van de ecologische effecten van de huidige (en van de in de toekomst verbeterde) baggerpraktijk.

Aanpak
Ontwikkeling van het zand/slib model op basis van het huidige gekalibreerde hydrodynamisch model. Kalibratie en validatie van de slib/zand transporten op basis van (1) gerichte veldwaarnemingen aan stroming, slib- en zandconcentraties en –transporten in de geulen en over de platen (2) mogelijkheid met het model de

historische evolutie van het baggerbezwaar te verklaren. Gebruik van het zand/slib model om de geschetste problematiek te analyseren (stabiliteit/levensduur van slibberging in huidige varianten; ecologische effecten van bagger- en stortstrategie door beïnvloeding van SPM).

Verwachte resultaat
Verbeterd inzicht in de baggerproblematiek, door het expliciet modelleren van de relevante zand- en slibfluxen in en rondom de vaargeul. Evaluatie van de effectiviteit en levensduur van oplossingen die uitgaan van stabiel bergen van slib. Eventueel onderzoek van alternatieve varianten die kansrijk zijn.

6. **Modelleren van morfologische ontwikkelingen.**

Aanleiding
Zowel grootschalige als lokale morfodynamische ontwikkelingen bepalen in belangrijke mate het baggerbezwaar, zoals in dit rapport gespecifieerd. Morfologische ontwikkelingen hebben vooral belang voor de lange termijn. Als er ingegrepen wordt in het systeem, bv. door bochtafsnijdingen, kan worden verwacht dat de ontwikkeling van platen en geulen zich aan de ingrepen zal aanpassen. Deze aanpassingen kunnen de ingrepen op langere termijn tegenwerken, waardoor intensiever baggeren noodzakelijk zal zijn, en dit aspect is belangrijk om mee te nemen in de evaluatie van de varianten. Wij vermoeden bijvoorbeeld dat het uitgraven van geulen dwars op de heersende stroming in de varianten LANG en LANGSPOEL om die reden ongunstig kan zijn, maar kunnen zonder morfodynamische modellering moeilijk inschatten of deze varianten de verspreiding van zand in het systeem, en daardoor de morfologische ontwikkeling van platen en geulen in de omgeving, sterk zullen veranderen.

Aanpak
Een morfologisch model werkt op een langere tijdschaal dan het zand-slibmodel dat is besproken in de voorgaande paragraaf. De resultaten van een zand-slibmodel kunnen wel een aanwijzing geven voor de richting waarin de morfologie zich zal ontwikkelen. Het zand-slibmodel is echter niet over lange periodes door te rekenen.

Verwachte resultaat
Evaluatie van de morfologische stabiliteit van kansrijke varianten. Optimalisatie van het design van de varianten. Evaluatie van areaalverschuivingen (platen / geulen) als gevolg van de varianten. Inschatting van de stabiliteit op langere termijn van de varianten, en van de bijdrage die zij kunnen bieden aan het reduceren van het baggerbezwaar.

7. **Analyse van de ecologische ontwikkelingen in de afgelopen decennia**

Aanleiding
Een belangrijk aspect van ecologische impact van het baggeren is de verhoging van SPM in de wateren rondom de vaargeul. Wij stellen voor dit aspect aan de hand van veldwaarnemingen en slib-zandmodellering nader uit te werken (zie hoger).

Het baggerbezwaar in de afgelopen decennia, en de daarmee misschien in relatie staande verhoging van het SPM in de omgeving, kunnen effect gehad hebben op de ontwikkelingen van de bodemdiergemeenschappen in de omgeving van de vaargeul.

Een nadere analyse van de tijdsevolutie van deze gemeenschappen kan hierover uitsluitsel geven, en daarmee bijdragen aan het evalueren van de mogelijke effecten van het baggerbezwaar op de ecologie van een ruimer deel van de Waddenzee.

Aanpak
Er is een MWTL benthosbemonsteringspunt op de Piet Scheve Plaat, dat is gevolgd vanaf ongeveer 1990. De dataset hiervan wordt door RWS beheerd tot 2008. Die gegevens hebben wij ter beschikking gekregen. Er zijn echter nog gegevens verzameld in 2011 en 2014, en die gegevens ontbreken nog, maar zijn wel heel relevant voor de problematiek. Daarnaast zijn er gegevens verzameld in het kader van de SIBES benthosmonitoring van de Waddenzee, die gebiedsdekkend zijn (voor het intertidaal) maar een kortere periode beslaan (2008-heden). Tenslotte is er een langjarige dataset van IMARES over de ligging en status van mosselbanken in de Waddenzee.

Verwachte resultaat
Analyseren of de waargenomen vertroebeling van het water in het Dantziggat leidt tot veranderingen in de sedimentsamenstelling op de platen, en/of tot veranderingen in de kwaliteit van de benthische habitats in de omgeving van de vaargeul. Inzetten van beschikbare informatie om de mogelijke ecologische effecten van varianten beter in te schatten.