

Monitorings- en onderzoeksplan Friesche Zeegat t.b.v. pilot studie verdieping Westgat

Kees Kuijper
Tommer Vermaas

1230043-001

Titel

Monitorings- en onderzoeksplan Friesche Zeegat t.b.v. pilot studie verdieping Westgat

Opdrachtgever
RWS-WVL

Project
1230043-001

Kenmerk
1230043-001-ZKS-0003

Pagina's
24

Trefwoorden

Waddenzee, Zoutkamperlaag, Westgat, pilot studie, vaargeul, baggeren, verspreiden, monitoring, modellering

Samenvatting

De huidige diepte van de vaarroute vanuit de Waddenzee (Lauwersoog) via de geulen Zoutkamperlaag en het Westgat belemmert de getijongebonden doorgang van de scheepvaart. Door Rijkswaterstaat wordt bekeken of verdieping van één van de geulen in de buitendelta van het Friesche Zeegat tussen Ameland en Schiermonnikoog, bijvoorbeeld het Westgat, een realistische optie is om deze doorgang weer mogelijk te maken.

Een grote onzekerheid betreft het onderhoudsbaggerwerk dat nodig zal zijn om de geul op de gewenste diepte te onderhouden. De oorzaak van deze onzekerheid betreft de grote morfologische dynamiek in de buitendelta. Om de onzekerheden te verkleinen wordt overwogen een pilot studie uit te voeren, zodat de morfologische veranderingen én de netto sedimentatie ter plaatse van de verdiepte geul, en daarmee het onderhoudsbaggervolume, nauwkeuriger kan worden bepaald. In dit rapport worden de hiervoor benodigde metingen beschreven. De metingen dragen ook bij aan de kennisverdieping van sedimenttransportprocessen in een buitendelta. Ten slotte worden de metingen gebruikt voor de validatie en eventuele verbetering van een hydromorfologisch model voor de buitendelta van de Zoutkamperlaag.

Dit monitoring- en onderzoeksplan geeft een beschrijving van de uit te voeren metingen tijdens de pilot studie en het hiermee samenhangende onderzoek. Een eerste kostenraming maakt deel uit van het plan.

Referenties

KPP 2016 B&O Kust

Advies regionale advisering & Evaluatie suppleties

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
0.1	apr. 2016	Kees Kuijper		Ad van der Spek		Frank Hoozemans	
		Tommer Vermaas					

Status

concept

Dit document is een concept en uitsluitend bedoeld voor discussiedoeleinden. Aan de inhoud van dit rapport kunnen noch door de opdrachtgever, noch door derden rechten worden ontleend.

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Aanleiding	1
1.2 Doelstelling	1
1.3 Leeswijzer	2
2 Kostenraming	3
2.1 Monitoring	3
2.1.1 Onderdelen	3
2.1.2 Uitgangspunten	3
2.1.3 Kostenraming	4
2.2 Onderzoek	4
2.2.1 Onderzoeksvragen	4
2.2.2 Kostenraming	5
3 Monitoring	7
3.1 Bodem	7
3.1.1 Doel	7
3.1.2 Type metingen	8
3.1.3 Gebied	8
3.1.4 Frequentie metingen	9
3.2 Stroomsnelheid en sedimentconcentratie	10
3.2.1 Doel	10
3.2.2 Type metingen	10
3.2.3 Gebied	11
3.2.4 Frequentie metingen	12
3.3 Golfhoogte en -periode	13
3.3.1 Doel	13
3.3.2 Type metingen	13
3.3.3 Gebied	13
3.3.4 Frequentie metingen	14
3.4 Sedimenteigenschappen	14
3.4.1 Doel	14
3.4.2 Type metingen	14
3.4.3 Gebied	14
3.4.4 Frequentie metingen	15
3.5 Landelijk Meetnet Water	15
3.6 Additionele metingen	16
4 Onderzoek	17
4.1 Hypothesen	17
4.2 Verwerking en analyse metingen	17
4.2.1 Bodem	17
4.2.2 Stroomsnelheid en sedimentconcentratie	18
4.2.3 Golfhoogte en -periode	18
4.2.4 Sedimenteigenschappen	18
4.3 Validatie numerieke model	18
4.3.1 Bodem	18

4.3.2	Stroomsnelheid en sedimentconcentratie	18
4.3.3	Golfhoogte en –periode	19
4.3.4	Sedimenteigenschappen	19
5	Referenties	21
 Bijlage(n)		
A	Morfologie buitendelta Zoutkamperlaag	A-1

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

De huidige diepte van de vaarroute vanuit de Waddenzee (Lauwersoog) via de geulen Zoutkamperlaag en het Westgat belemmert de getijongebonden doorgang van de scheepvaart. Door Rijkswaterstaat wordt bekeken of verdieping van één van de geulen in de buitendelta van het Friesche Zeegat tussen Ameland en Schiermonnikoog, bijvoorbeeld het Westgat, een realistische optie is om deze doorgang weer mogelijk te maken.

Een grote onzekerheid betreft het onderhoudsbaggerwerk dat nodig is om de geul op de gewenste diepte te onderhouden. De oorzaak van deze onzekerheid betreft de grote morfologische dynamiek in de buitendelta (de verplaatsing van geulen en platen). Om de onzekerheden te verkleinen wordt overwogen een pilot studie uit te voeren, zodat de netto sedimentatie ter plaatse van de verdiepte geul, en daarmee het onderhoudsbaggervolume, nauwkeuriger kan worden bepaald. Een analyse van de morfologie van het zeegat en veranderingen daarin gedurende de afgelopen 100 jaar wordt gegeven door Oost et al. (2015). Een beknopte samenvatting, samen met een classificatie van de buitendelta van de Zoutkamperlaag, is opgenomen in Appendix A.

1.2 Doelstelling

Om een geïnformeerde beslissing te kunnen nemen over het wel of niet uitvoeren van de pilot studie is inzicht in de inhoud en omvang daarvan nodig. Het doel van dit document is het op hoofdlijnen beschrijven van het onderzoek en de monitoring die nodig zijn om de gewenste kennis te verkrijgen met een pilot studie, en een raming te maken van de kosten daarvan.

Voor een aantal zaken is nog geen definitieve keuze gemaakt: welke geul verdiept wordt, de streef- en baggerdiepte en de verspreidingslocatie van het vrijgekomen sediment. Dit onderzoeks- en monitoringsplan is daarom in principe generiek opgesteld, een aantal voorbeelden wordt wel gegeven voor specifieke locaties.

Het benodigde onderzoek is afhankelijk van de doelstellingen van de pilot studie zelf, de belangrijkste daarvan zijn aangegeven door Rijkswaterstaat in (Mulder, 2016):

- 1 Een nauwkeuriger **voorspelling van het onderhoudsbaggervolume** voor de verdiepte vaargeul dan op voorhand kan worden gedaan met de beschikbare kennis en modellen. Dit vormt een belangrijke input voor de kosten-baten analyse, die (mede) bepalend is voor het al dan niet doorgaan van het project, i.c. het op diepte brengen en houden van het Westgat. De kosten die gemoeid zijn met de uitvoering van de pilot studie vormen onderdeel van deze kosten-baten analyse.
- 2 **Kennisverdieping** van de sedimenttransportprocessen in een buitendelta, in het bijzonder de aanzanding van geulen onder invloed van getij, golven en wind, de effecten van de verdieping op de morfologie en de gevolgen van de wijze van verspreiding van het vrijkomend sediment. Dit draagt bij aan de onderbouwing van de voorspelling van het onderhoudsbaggervolume, zowel ten behoeve van de kosten-baten analyse als de grootte van de effecten op het milieu (Natura2000).

3 **Verbetering van hydromorfologische modellen.**

Een model kan worden gebruikt om de effecten van ingrepen te voorspellen mits het model de relevante processen goed beschrijft. De metingen voor de pilot studie zijn nodig voor de validatie, en eventueel kalibratie, van het toe te passen model. Met een gevalideerd model voor het gebied kunnen beter voorspellingen worden gemaakt voor andere ingrepen.

In dit monitorings- en onderzoeksplan worden metingen voorgesteld die nodig zijn om tegemoet te komen aan de drie hoofddoelstellingen van de pilot studie. De voorgestelde bodemmetingen gaan het meest direct in op de eerste onderzoeksvraag (voorspelling van het onderhoudsbagervolume) en kunnen worden beschouwd als noodzakelijk voor de pilot studie (prioriteit 1). De overige metingen zijn vooral ondersteunend aan de interpretatie van de metingen en de inzet van het model en de analyse van de modelresultaten (prioriteit 2). Bij de kostenramingen voor de monitoring en het onderzoek wordt dit onderscheid gemaakt om een bandbreedte te kunnen aangeven, die gebruikt kan worden bij de kosten-baten analyse van het project (het verdiepen en onderhouden van het Westgat inclusief de pilot studie). Op basis van de verschillende beschreven opties kan het definitieve plan voor monitoring en onderzoek worden ingevuld.

1.3 **Leeswijzer**

In Hoofdstuk 2 wordt de kostenraming gegeven, waarbij onderscheid wordt gemaakt tussen de monitoring en het onderzoek. De voorgestelde monitoring wordt in detail beschreven in Hoofdstuk 3, waarbij voor alle te meten grootheden wordt ingegaan op het doel van de metingen, het type metingen, het gebied waar wordt gemeten en in welke perioden gedurende de looptijd van de pilot studie zal worden gemeten. Hoofdstuk 4 gaat in op het voorgestelde onderzoek, i.c. de analyse van de metingen en de validatie van het numerieke model.

2 Kostenraming

2.1 Monitoring

2.1.1 Onderdelen

De monitoring voor de pilot studie Westgat wordt in detail beschreven in Hoofdstuk 3. Samengevat bestaat het monitoringsplan uit de volgende onderdelen:

- 1 Opnames van de bodemligging met multibeam rondom het Westgat (9 tijdstippen) en ter plaatse van de verspreidingslocatie (4 tijdstippen).
- 2 Stroomsnelheidsmetingen en sedimentconcentratietingen met ADCP gedurende 13 uur in twee raaien in het Westgat, voorafgaand aan de verdieping en direct volgend op de verdieping.
- 3 Metingen van stroomsnelheid, sedimentconcentratie, golfhoogte en golfperiode, temperatuur en geleidbaarheid met een meetframe in een vaste locatie.
- 4 Golfmetingen met meetboeien.
- 5 Eigenschappen van bodemsediment (korrelverdeling) en suspensief sediment (korrelverdeling en concentratie).

Verder wordt gebruik gemaakt van de reguliere metingen van het Landelijk Meetnet Water (waterstanden, golven en meteo).

2.1.2 Uitgangspunten

- Voor de kostenraming is uitgegaan van 'in house' kennis en ervaring. Er is geen offerte opgevraagd bij een 'Surveyor'. Voorgesteld wordt om hiervoor AquaVision te benaderen.
- Metingen en verwerking van de bodemligging worden gedaan door RWS. De kosten hiervan en scheepstijd zijn nog niet begroot.
- Stroomsnelheid- en sedimentconcentratietingen worden door een 'Surveyor' uitgevoerd. Rijkswaterstaat stelt een meetschip en bemanning ter beschikking; deze zijn niet begroot. Vanwege de duur van de meting is 1 meetdag geteld als 2 dagen en is er uitgegaan van de aanwezigheid van 2 meettechnici.
- Voor de golfmetingen wordt gebruik gemaakt van 3 bestaande boeien uit het Landelijk Meetnet Water. Deze metingen worden door Rijkswaterstaat ter beschikking gesteld. Er wordt door RWS 1 extra boei geplaatst. Hiervoor zijn nog geen kosten begroot.
- Voor het nemen van bodemonsters stelt RWS een schip met bemanning ter beschikking. Hiervoor zijn nog geen kosten begroot.

2.1.3 Kostenraming

De kostenraming is vermeld in Tabel 2.1. Bedragen zijn exclusief BTW. De bodemopnames (geel) zijn essentieel voor de bepaling van de aanzandingssnelheid en de bepaling van het onderhoudsbaggervolume. De overige metingen zijn additioneel voor analyse van processen en validatie van het model.

De bandbreedte voor de kosten van de 13-uur metingen geeft de nauwkeurigheid weer, waarmee op dit moment de kosten kunnen worden geschat.

Voor de metingen 2 t/m 5 wordt in totaal 18 scheepsdagen voorzien. Hierbij is elke 13-uur meting dubbel geteld.

Multibeam en single beam metingen, die momenteel al regulier plaatsvinden, kunnen voor de pilot studie worden gebruikt.

Als het aantal 13-uur metingen wordt vergroot, bijvoorbeeld extra metingen tijdens springtij of doodtij, of als metingen voor de T0-situatie tweemaal worden uitgevoerd (zie Par. 3.2.4), worden de geraamde kosten voor dit onderdeel globaal evenredig groter.

Tabel 2.1 Kostenraming monitoring.

	Type meting	Kosten in k€ (excl. BTW)	Opmerking
1	Bodemopnames	PM	Ter plaatse van de bagger- en verspreidingslocaties RWS
2	13-uur meting	50 tot 100	4 metingen
3	Golfmetingen	PM	Extra boei RWS
4	Meetframe	PM	2 keer plaatsen en meten
5	Bodem- en suspensiemonsters	20	voor 4 perioden
	Totaal	70 tot 120 + PM	

Bovenvermelde kostenraming heeft nog een aantal onzekerheden (PM posten). Een voorlopige schatting voor de inzet van het meetframe is 100 k€ inclusief het optuigen van het frame en het plaatsen van waakpalen. Met multibeam kan per dag een oppervlak van 1 km² worden opgemeten (geschatte kosten 5 k€/km²). De gehele buitendelta van de Zoutkamperlaag (~ 50 km²) kan in ongeveer 4 dagen met een single beam echolood worden gemeten.

2.2 Onderzoek

2.2.1 Onderzoeksvragen

De volgende onderzoeksvragen zijn geformuleerd in (Mulder, 2016) en hier aangevuld (tussen haakjes):

- Hoe snel en waar vindt sedimentatie plaats op de baggerlocatie? (specifiek: hoe snel ontstaat een drempel en onder welke condities?).
- Welke invloed heeft de ingreep op de morfologie in de omgeving van de baggerlocatie? (specifiek: (i) waar komt het sediment vandaan dat de geul vult en (ii) hoe verhouden de effecten van de ingreep zich tot de natuurlijke, morfologische dynamiek?)

- Welke invloed heeft de ingreep op de waterbeweging in en rond de baggerlocatie? (specifiek: wat is het effect op het getij en de golven?).
- Hoe groot is het sedimenttransport? Hieraan gekoppeld zijn vragen omtrent:
 - stroomsnelheden en waterstanden
 - wind en golven
 - eigenschappen van het sediment (korrelgrootteverdeling, valsnelheid)
 - bodemvormen (ribbels, duinen)
- Hoe snel verdwijnt het zand van de verspreidingslocatie en in welke richting?
- Zijn de effecten op de beschermde natuurwaarden conform de verwachting?

Met de voorgestelde metingen zullen de bovengenoemde onderzoeksvragen worden geanalyseerd. De metingen worden ook gebruikt voor validatie van het numerieke model met stroming, golven, sedimenttransport en morfologie. Het uitvoeren van modelsimulaties voor verschillende scenario's voor de pilot studie vormt geen onderdeel van de kostenraming.

2.2.2 Kostenraming

De kostenraming is vermeld in Tabel 2.2. Bedragen zijn exclusief BTW. De analyse van de bodems is essentieel voor de bepaling van de aanzandingssnelheid en de bepaling van het onderhoudsbaggervolume. De overige kostenposten zijn additioneel voor analyse van processen en validatie van het model.

Tabel 2.2 Kostenraming onderzoek.

	Type meting	Kosten in k€ (excl. BTW)	Opmerking
1	Analyse bodems	20 tot 40	
2	Analyse metingen stroming en golven	30 tot 50	
3	Modellering	50 tot 70	
4	Overleg en rapportage	30 tot 50	
	Totaal	130 tot 210	

3 Monitoring

De pilot studie wordt uitgevoerd als een eenmalige verdieping tot een bepaalde diepte. Daarna worden de ontwikkelingen gemonitord zonder dat de geul op diepte wordt gehouden. Er wordt bij de pilot studie één wijze van verspreiding van sediment onderzocht, namelijk die van het vrijgekomen sediment tijdens de aanleg (al kan overwogen worden om op meerdere locaties te verspreiden). De locatie waar het sediment moet worden gestort is nog niet bekend; in dit monitoringsplan worden twee mogelijkheden bekeken i.v.m. de benodigde monitoring.

De pilot studie zal alleen iets zeggen over de omstandigheden en effecten van ingrijpen bij de huidige configuratie van geulen en platen. Deze configuratie zal op termijn zo sterk veranderen dat de inzichten m.b.t. het onderhoudsbaggervolume die men tijdens de pilot studie heeft opgedaan slechts een beperkte tijd (5-15 jaar) bruikbaar zijn. De verkregen systeemkennis en het belang van de metingen voor de validatie van modellen zijn uiteraard 'langer houdbaar'.

3.1 Bodem

3.1.1 Doel

De effecten van de verdieping zullen niet beperkt blijven tot alleen de vaargeul. In de verdiepte vaargeul zal netto sedimentatie optreden en elders mogelijk erosie. Om deze effecten in beeld te brengen zal ook in de omgeving van de vaargeul de bodem worden opgemeten. De T0-meting voorafgaand aan de verdieping wordt hierbij gebruikt als referentie voor de metingen na de verdieping. Voor het bepalen van de sedimentatiesnelheid in de vaargeul na de verdieping moet de bodemligging direct na de ingreep (T1-meting) en tijdens opvolgende tijdstippen (T2, T3, etc.) worden gemeten en vergeleken.

De bevaarbaarheid van de geul hangt niet alleen af van de volumeontwikkeling maar wordt ook bepaald door de ondiepste delen van de geul. Hierbij kunnen kleinschalige bodemvormen (megaribbels) een belangrijke rol spelen. Het is zelfs denkbaar dat de gemiddelde diepte van de geul niet verandert terwijl de vorming van megaribbels (waarbij geen volumeverandering optreedt) toch tot onbevaarbaarheid kan leiden. Dit vereist dat de bodem in detail wordt opgemeten en verwerkt met voldoende resolutie (in beide horizontale richtingen 1 m) om de bodemvormen te kunnen analyseren.

De aanzanding van de geul zal in de tijd niet gelijkmatig verlopen maar afhankelijk zijn van de forceringen (getij, golven, wind). De metingen moeten hierop worden afgestemd door ook direct volgend op een storm de bodem op te meten. Dit vereist flexibiliteit bij de planning van de metingen.

Op de verspreidingslocatie zal de ontwikkeling van de bodem na de verspreiding worden gevolgd. Het gaat hierbij om de snelheid waarmee de bodemverondieping weer ongedaan wordt gemaakt en op welke wijze het sediment wordt opgenomen in de omgeving, i.e. de richting waarin het sediment vanaf de verspreidingslocatie getransporteerd zal worden.

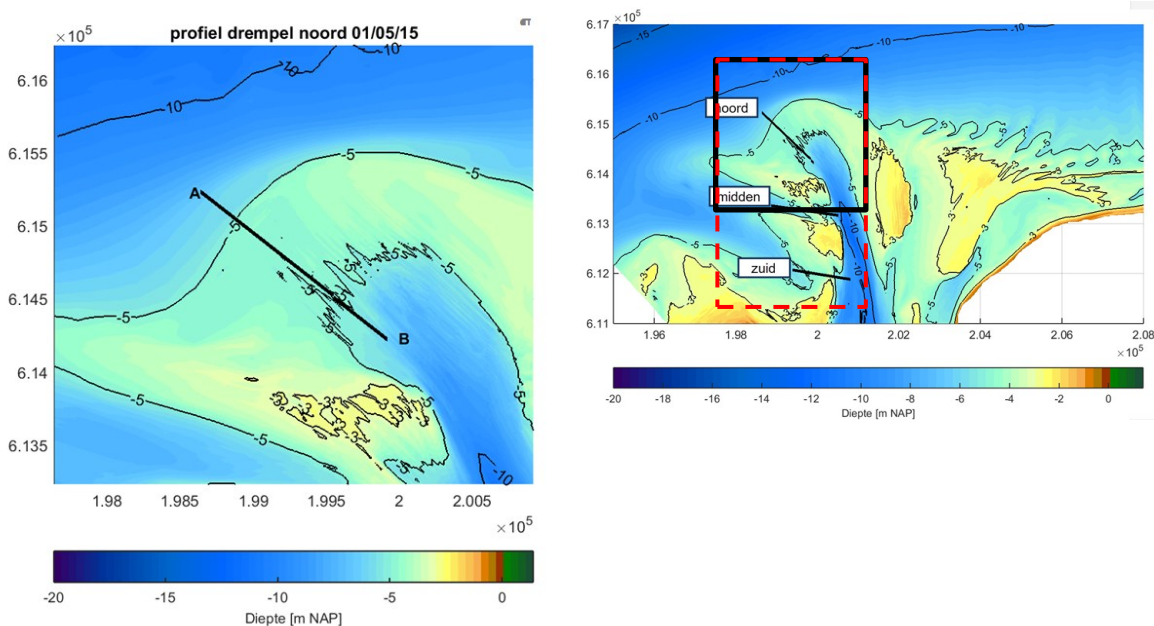
3.1.2 Type metingen

Bodems kunnen worden gemeten met single beam en multibeam echolood. In het eerste geval worden lijnen gemeten, terwijl de multibeam metingen meer gebied dekkend zijn. Vooral het meten langs lijnen met een single beam echolood beperkt de resolutie dwars op de lijnen. Voor het gebied rondom de te verdiepen geul is een hoge resolutie vereist om de ontwikkeling van bodemvormen te kunnen monitoren. Voor de verspreidingslocatie is een hoge resolutie niet noodzakelijk, zodat daar kan worden volstaan met single beam metingen.

Aanvullend op de specifieke metingen voor de pilot studie wordt gebruik gemaakt van de metingen met single beam echolood, die regulier (jaarlijks) voor de gehele buitendelta worden uitgevoerd (voor en na de verdieping). Verder zal gebruik worden gemaakt van de in- en uitpeilingen van de aannemer die de baggerwerkzaamheden uitvoert. Dit zal echter voor een relatief beperkt gebied zijn, namelijk alleen waar het werk wordt uitgevoerd, en mogelijk met afwijkende frequenties van het echolood. Deze metingen zijn niet geschikt om de bodems op de verschillende tijdstippen vast te leggen, zie Par. 3.1.4, maar kunnen wel aanvullend worden gebruikt, bijvoorbeeld om de nauwkeurigheid van de peilingen vast te stellen.

3.1.3 Gebied

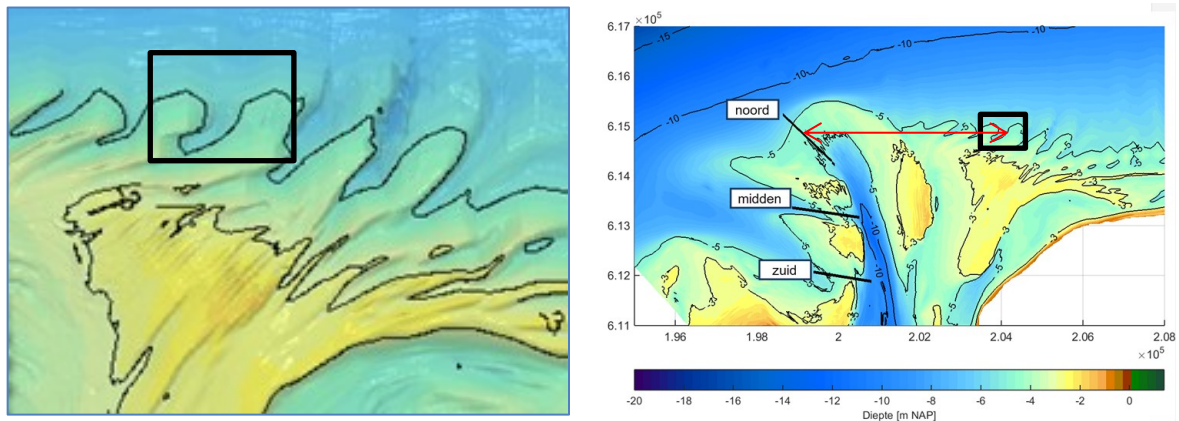
Het met multibeam echolood te meten gebied rondom de drempel in het Westgat is weergegeven in Figuur 3.1. De afmetingen van het gebied zijn ongeveer 3,5x3,5 km. Een keuze voor het verspreidingsgebied van het gebaggerde sediment is nog niet gemaakt. Eén van de mogelijkheden is om het sediment te verspreiden in de middelste of zuidelijke vloedgeul, zoals weergegeven in Figuur 3.1 (rechter venster). In dat geval kan het te bemonsteren gebied worden vergroot in zuidelijke richting, zodat tegelijk met het baggergebied de verspreidingslocatie wordt meegemeten, zie het rode vierkant in Figuur 3.1 met afmetingen van 3,5x5 km (rechter venster).



Figuur 3.1 Gebied met multibeam-metingen ter plaatse van verdieping.

Een alternatieve verspreidingslocatie kan zijn een locatie 5 km oostwaarts van het Westgat, zie Figuur 3.2. In dat geval wordt gemeten met een single beam echolood, omdat een hoge resolutie hier niet vereist is (de vraag m.b.t. het voorkomen van bodemvormen is hier minder

relevant dan voor de baggerlocatie). Het sediment zal zich tijdens de verspreiding door het baggerschip verplaatsen over een afstand van tientallen tot honderden meter onder invloed van dichtheidsstromen, waarbij de afstand afhankelijk is van de waterdiepte, de korrelgrootte en de wijze van verspreiden door het baggerschip.



Figuur 3.2 Gebied met multibeam metingen ter plaatse van een mogelijke verspreidingslocatie (zwarte rechthoek). De veronderstelde verspreidingslocatie bevindt zich in dit geval 5 km oostelijk van de baggerlocatie.

3.1.4 Frequentie metingen

Zowel direct vóór de verdieping (T0) als direct na de verdieping (T1) wordt de bodem opgemeten. Volgend op de T1-meting wordt gedurende een jaar de bodem gemeten, eerst met intervallen van 2 weken en oplopend tot intervallen van 2-4 maanden, zoals weergegeven in Tabel 3.1. Tijdens de duur van de pilot studie kan dit worden bijgesteld afhankelijk van de morfologische ontwikkeling. Voor de T0 en de metingen vanaf T4, met intervallen van 2 maanden, kan gebruik worden gemaakt van de reguliere metingen zoals die momenteel al plaatsvinden, waaronder de metingen voor de gehele buitendelta. Het is belangrijk om de T0-meting nauwkeurig uit te voeren, omdat deze na de verdieping niet over gedaan kan worden. Overwogen kan worden de meting tweemaal uit te voeren, zodat ook de nauwkeurigheid van de meting kan worden vastgesteld. Het belang van de T1-meting is echter ook groot, omdat alle opvolgende metingen met deze bodem worden vergeleken om de netto sedimentatiesnelheid te bepalen en het effect van de verdieping op de omgeving vast te stellen. Als de T1-meting plaatsvindt direct na het wegbaggeren van de drempel zal de omgeving hierdoor nog niet zijn beïnvloed, zodat het in duplo uitvoeren van de T1-meting i.p.v. de T0-meting ook een optie is. Een afweging hieromtrent moet nog worden gemaakt.

Tabel 3.1 *Tijdstippen multibeam bodemmetingen na de verdieping.*

Meting	Tijdstip
T0	vóór de verdieping
T1	na de verdieping
T2	2 weken na T1
T3	4 weken na T1
T4	2 maanden na T1
T5	4 maanden na T1
T6	6 maanden na T1
T7	8 maanden na T1
T8	12 maanden na T1

Als het sediment wordt verspreid in de middelste of zuidelijke vloedgeul, zie Par. 3.1.3, wordt in dit gebied op dezelfde tijdstippen gemeten als vermeld in Tabel 3.1. Als de verspreidingslocatie zich elders bevindt kan volstaan worden met minder metingen, zie Tabel 3.2. Voor de $T0_{\text{ver}}$, $T2_{\text{ver}}$ en $T3_{\text{ver}}$ -metingen kan in dat geval gebruik gemaakt worden van de reguliere metingen in het gebied.

Tabel 3.2 *Tijdstippen single beam bodemmetingen t.p.v. verspreidingslocatie verder weg.*

Meting	Tijdstip
$T0_{\text{ver}}$	vóór de verdieping (reguliere meting)
$T1_{\text{ver}}$	direct na de verspreiding
$T2_{\text{ver}}$	6 maanden na T1
$T3_{\text{ver}}$	12 maanden na T1

3.2 Stroomsnelheid en sedimentconcentratie

3.2.1 Doel

De bodemveranderingen geven geen informatie over de grootte en richting van de sedimenttransporten; hiervoor zijn snelheids- en concentratiemetingen nodig. Dit zal echter slechts in een beperkt aantal locaties uitgevoerd kunnen worden gedurende een volledige getijperiode, gegeven de meetinspanning die hiermee gemoeid is. De metingen zullen worden gebruikt voor de validatie/kalibratie van het numerieke model en de analyse van de effecten van de verdieping. Bij deze analyse zal vooral naar bruto transporten worden gekeken, omdat de bepaling van netto transporten tijdens een 13-uurs meting niet voldoende nauwkeurig kan worden uitgevoerd. Op langere tijdschalen kan met de metingen vanaf een vast meetframe wel een netto transport worden bepaald maar dan betreft het alleen de locatie waar wordt gemeten.

De bodemmetingen (Par. 3.1) en stroomsnelheids- en sedimentconcentratiemetingen moeten zoveel mogelijk in eenzelfde korte periode worden uitgevoerd.

3.2.2 Type metingen

Metingen van stroomsnelheden en sedimentconcentraties worden uitgevoerd in een vaste locatie met een meetframe en vanaf een varende schip. Metingen in een vaste locatie hebben een hoge temporele resolutie. Ook zijn deze metingen nodig om de effecten van verschillende condities gedurende een langere periode, in het bijzonder tijdens stormen, vast te stellen. Metingen vanaf een varende schip geven ruimtelijke informatie langs het traject dat

wordt gevaren. Met een vaarsnelheid tijdens de metingen van 10 km/uur en een raailengte van 2 km worden profielen met intervallen van een half uur of kleiner verkregen. Er wordt voor de monitoring uitgegaan van een combinatie van beide type metingen, d.w.z. vanaf een varend schip en met een meetframe. Het meetschip moet voldoende zeewaardig zijn maar tegelijk moet de diepgang beperkt blijven om te kunnen meten boven ondieptes.

Bij de varende metingen wordt zowel gemeten in een dwarsraai als een langsdraai ter plaatse van de drempel. Met de metingen in de dwarsraai kan het (bruto) transport door de geul tijdens eb en vloed worden bepaald en de verdeling van het transport over de breedte. Met deze metingen kan de positie van de langsraai worden vastgesteld. De metingen in de langsraai moeten inzicht geven in hoe de stroomsnelheid, de suspensieconcentratie en het transport veranderen in de lengterichting van de geul: zeewaarts, op en voorbij de drempel. De metingen in de dwars- en langsraai kunnen tegelijkertijd worden uitgevoerd met twee schepen of op twee opeenvolgende dagen met 1 schip. Voor de meetinspanning en bijbehorende kostenraming maakt dit geen verschil; voor de planning uiteraard wel. Eventueel kan op 1 dag met hetzelfde schip zowel in de langs- als dwarsraai worden gemeten door een vliegervormig vaarpatroon te volgen. De verwachting is dat dit ten koste gaat van de temporele resolutie van de metingen. Daarom wordt deze optie niet in dit plan overwogen.

De uit te voeren metingen vanaf een varend schip en met behulp van een meetframe zijn vermeld in Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Te meten grootheden vanaf een varend schip en met een meetframe.

Varend schip	Meetframe ¹
<ul style="list-style-type: none"> Stroomsnelheid en richting (verticale verdeling m.u.v. zones bij de bodem en het wateroppervlak) Suspensieconcentratie (verticaal) 	<ul style="list-style-type: none"> Stroomsnelheid en -richting (verticale verdeling m.u.v. zones bij de bodem en het wateroppervlak) Suspensieconcentratie Golfhoogte en –periode Bodemvormen (PM) Temperatuur en geleidbaarheid

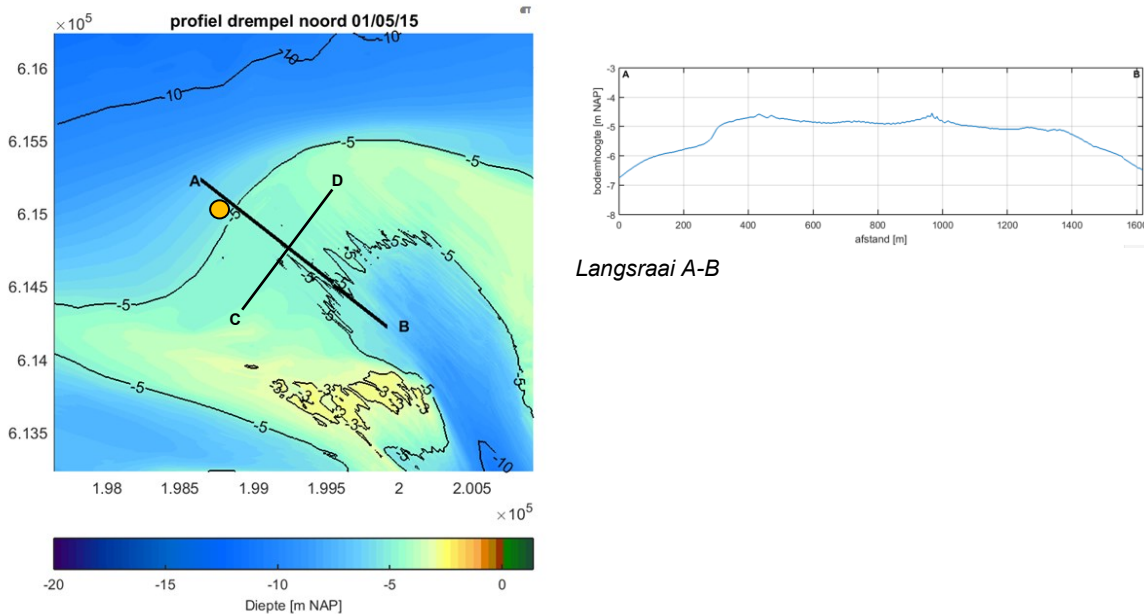
De stroomsnelheid en sedimentconcentratie worden gemeten met een ADCP. Indien mogelijk wordt ook gebruik gemaakt van een akoestische zandtransport meter (AZTM). Voor de noodzakelijke kalibratie van de ADCP zullen tijdens de varende metingen suspensiemonsters genomen moeten worden. Ter plaatse van het meetframe worden de golfkarakteristieken gemeten met een druksensor (alleen hoogte; geen richting). Met een 'ripple profiler' wordt de ontwikkeling en migratie van bodemvormen gevolgd.

3.2.3 Gebied

Tijdens een volledige getijperiode (13 uur) wordt varend gemeten in een dwarsraai halverwege de drempel en in een langsraai in de vaargeul ter plaatse van de drempel en in het verlengde hiervan (lengte 2 km), zie Figuur 3.3. Het meetframe zal niet op de drempel zelf worden geplaatst, omdat volgend op de verdieping het frame zal worden bedolven door zand of omver worden gevaren of weggetrokken door netten. Verondersteld wordt dat de netto sedimentatie vooral het resultaat is van een transport vanaf de Noordzee door golven, zodat

¹ De Universiteit Utrecht (Afdeling Fysische Geografie) heeft veel ervaring met het inzetten van meetframes. Zij zijn echter niet in staat om deze metingen voor de pilot studie uit te voeren in verband met andere verplichtingen (pers. comm. Prof. Gerben Ruesink).

het meetframe zeewaarts van de drempel zal worden geplaatst. De exacte positie van het frame moet worden vastgesteld, mede bepaald door nautische eisen.



Figuur 3.3 Varende metingen in langsraai A-B en dwarsraai C-D en positie meetframe bij A (oranje bolletje). De lengte van de langsraai zal groter kunnen zijn dan is aangegeven (bv. 2 km i.p.v. 1,6 km), zie rechtervenster.

3.2.4 Frequentie metingen

Er wordt met een varend schip (of met meerdere schepen) gemeten vóór de verdieping (T0) en direct na de verdieping (T1). In beide gevallen zullen de getijcondities vergelijkbaar moeten zijn om de metingen zo goed mogelijk met elkaar te kunnen vergelijken, bijvoorbeeld gemiddeld tij. Overwogen kan worden om zowel voor de T0 als de T1 een meting tijdens springtij en een meting tijdens doottij uit te voeren in plaats van alleen tijdens gemiddeld tij². Afhankelijk van de gekozen optie bedraagt het aantal 13-uursmetingen 4 tot 8. Met het meetframe wordt continu gemeten gedurende 1 maand voorafgaand aan de verdieping en 1 maand direct na de verdieping. Optioneel kunnen de 13-uur metingen voor de T0 tweemaal worden uitgevoerd, omdat deze metingen niet over gedaan kunnen worden na de verdieping. Tevens geeft het inzicht in de reproduceerbaarheid van de metingen. De diverse opties zijn weergegeven in Tabel 3.4.

² *Conditie met gemiddeld tij treden elke 7 dagen op; voor springtij- en doottijcondities zijn de intervallen ruim 14 dagen.*

Tabel 3.4 Opties voor de 13-uur metingen in de dwars- en langsraaien.

	Referentie		Alternatief	
	T0	T1	T0	T1
13-uur metingen in dwars- en langsraai	2 gemiddeld tij	2 gemiddeld tij	2 springtij	2 springtij
			2 doodtij	2 doodtij
Totaal	4		8	

Voor de kostenraming in Par. 2.1.3 is uitgegaan van de Referentie. Voor alternatieven neemt de kostenraming evenredig toe met het aantal 13-uur metingen.

3.3 Golfhoogte en -periode

3.3.1 Doel

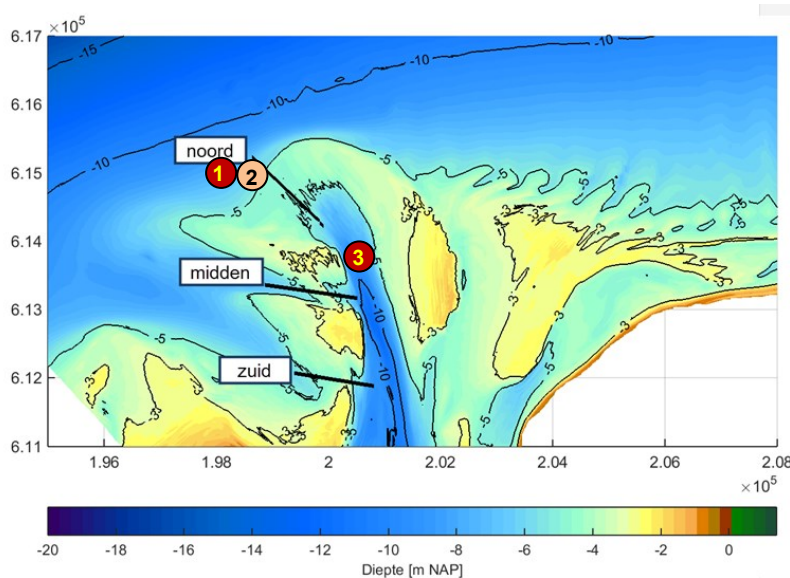
Golven hebben een belangrijke invloed op de morfologie van de buitendelta, zie Appendix A. Voor de aansturing van het golfmodel zijn metingen nodig van golfhoogte en –periode op dieper water. Daarnaast dient tenminste in één andere locatie het golfmodel te worden geverifieerd door metingen te vergelijken met resultaten van het model. De golfhoogtemetingen worden gebruikt om de invloed van de omstandigheden (stormen) op de netto sedimentatie te analyseren.

3.3.2 Type metingen

Golfhoogtemetingen en –richtingen worden uitgevoerd met meetboeien. Voor de metingen zeewaarts van de drempel wordt gebruik gemaakt van de meetboeien *Amelanders Zeegat Boei 1-2*, *Schiermonnikoog Noord boei* en *Schiermonnikoog Westgat* uit het Landelijk Meetnet Water, zie ook Par. 3.5. De beide eerstgenoemde boeien worden gebruikt voor de aansturing van het model; de derde boei voor vergelijking met het model. Voor het meten van golven in het binnengebied wordt een extra boei geplaatst. De golfhoogte (geen richting) wordt ook gemeten met een druksensor bevestigd aan het meetframe (zie Par. 3.2.2).

3.3.3 Gebied

De meetboei *Schiermonnikoog Westgat* uit het Landelijk Meetnet Water is bij benadering aangegeven in Figuur 3.4 (nr. 1). De extra te plaatsen meetboei is weergegeven als nr. 3. Het meetframe met de druksensor (nr. 2) staat in de nabijheid van meetboei 1. Bij de keuze van de definitieve locaties van meetboei 3 en het meetframe zal rekening gehouden moeten worden met de scheepvaart. De twee overige boeien uit het Landelijk Meetnet Water zijn weergegeven in Figuur 3.7.



Figuur 3.4 Locaties met golfhoogtemetingen aangegeven met bolletjes. Golfboeien: 1 en 3. Meetframe: 2. De twee overige golfboeien uit het Landelijk Meetnet Water zijn weergegeven in Figuur 3.7.

3.3.4 Frequentie metingen

De metingen worden continu uitgevoerd met een duur van 1 maand voor en 1 maand na de verdieping. Eventueel kan de meetduur na de verdieping worden verlengd indien geen stormen zijn opgetreden.

3.4 Sedimenteigenschappen

3.4.1 Doel

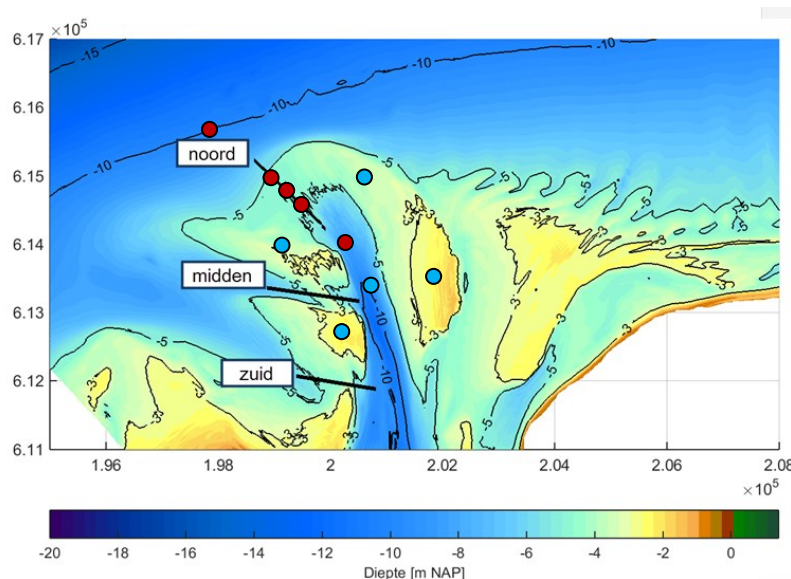
De transporten zijn sterk afhankelijk van de sedimenteigenschappen, in het bijzonder de korrelgrootteverdeling. Bij goed gesorteerd zand kan worden volstaan met 1 korreldiameter als invoer voor het numerieke model; bij slecht gesorteerd zand moeten meerdere fracties worden onderscheiden. De ruimtelijke variatie van de korrelgrootte is van belang omdat gradiënten hierin van invloed zijn op gradiënten in transporten en dus op bodemveranderingen.

3.4.2 Type metingen

Er zal een vijftal bodemmonsters met een box-corer worden genomen, waaruit op basis van visuele beoordeling deelmonsters worden gestoken om de verticale variatie in korrelgrootteverdeling vast te stellen. De sedimentaire structuren kunnen daarbij inzicht geven in de processen, die zijn opgetreden tijdens depositie. Van de deelmonsters wordt de korrelverdeling in het laboratorium bepaald. Aanvullend zullen ongeveer vijf geroerde monsters worden genomen met een van Veen grijper waarvan ook de korrelverdeling zal worden bepaald. Tegelijk met de bodemmonster zullen op dezelfde locaties monsters in de waterkolom worden genomen voor de bepaling van concentratie en korrelgrootteverdeling (indien voldoende materiaal kan worden afgezogen). Dit zal gebeuren tijdens in- en uitgaand tij.

3.4.3 Gebied

De box-corer monsters worden genomen ter plaatse van de drempel in het Westgat en zee- en landwaarts hiervan. De monsters met de van Veen grijper worden genomen in het gebied rondom, zie Figuur 3.5. Op dezelfde locaties worden suspensiemonsters genomen.



Figuur 3.5 Locaties voor bodemmonsters. Box-cores: rood. Van Veen: blauw.

3.4.4 Frequentie metingen

De bodemmonsters worden genomen voorafgaand aan de verdieping (T0), direct na de verdieping (T1), direct na een storm en aan het eind van de pilot studie. De locaties zijn hierbij voor alle perioden hetzelfde. Door de verdieping kunnen bodemlagen met een andere korrelverdeling aan de oppervlakte komen te liggen. Tijdens tenminste 2 perioden met monsternames zal een medewerker van Deltares aanwezig zijn om de monsters te beoordelen. Tegelijk met de bodemmonsters worden de suspensie monsters genomen tijdens in- en uitgaand tij. In totaal worden zo 40 bodemmonsters en 80 suspensie monsters verkregen.

3.5 Landelijk Meetnet Water

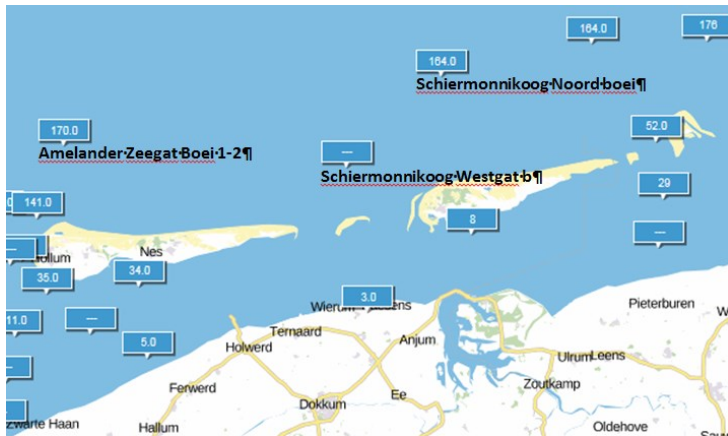
Aan het Landelijk Meetnet Water worden de volgende metingen ontleend:

- **Waterstand:** Wierumergronden, Schiermonnikoog en Lauwersoog. De metingen zullen worden gebruikt voor de validatie van het model en voor de analyse van de metingen.



Figuur 3.6 Locaties uit het Landelijk Meetnet Water met waterstandsmetingen.

- *Golfhoogte en –periode:* Amelanders Zeegat Boei 1-2, Schiermonnikoog Westgat, en Schiermonnikoog Noord boei. Schiermonnikoog Westgat zal worden gebruikt voor de validatie van het golfmodel; de beide andere locaties voor de aansturing van het model.



Figuur 3.7 Locaties uit het Landelijk Meetnet Water met golfmetingen.

- *Windsnelheid en –richting:* Wierumergronden, Wierumerwad. De metingen zullen worden gebruikt voor de aansturing van het model.



Figuur 3.8 Locaties uit het Landelijk Meetnet Water met meteo metingen.

3.6 Additionele metingen

Beddingvormen veranderen instantaan tijdens de getijperiode. Om deze mobiliteit waar te nemen kan gedacht worden aan het gebruik van een 'ripple profiler' (Universiteit Utrecht) of aan het maken van video-opnamen.

Door gebruik te maken van echolood metingen door de scheepvaart kan de ontwikkeling van de bodem in de scheepvaartgeul worden gevolgd. Hierover kunnen eventueel afspraken worden gemaakt met de visserijbranche.

4 Onderzoek

4.1 Hypothesen

De processen in de buitendelta die leiden tot drempelvorming zijn complex. Morfologische veranderingen zijn het gevolg van getij- en golfwerking en de interactie hiertussen. Daarbij spelen ook de veranderingen van de grootschalige morfologie (geulen en platen) een rol.

De volgende hypothesen op hoofdlijnen met betrekking tot de te verwachten effecten van de verdieping worden onderscheiden. Zij zijn afgeleid van de bevindingen van Oost et al. (2015), waarvan een samenvatting is opgenomen in Appendix A.

- 1 Door de meer noordwaartse oriëntatie van het Westgat is de invloed van de golfwerking in het Westgat toegenomen, wat heeft geleid tot de netto aanvoer van sediment en de vorming van een drempel. Door het wegbaggeren van de drempel wordt het morfologisch evenwicht verstoord en zal bij gelijkblijvende gemiddelde golfcondities weer aanzanding plaatsvinden.
- 2 Door het wegbaggeren van de drempel in de vaargeul nemen de stroomsnelheden af. Deze afname wordt slechts voor een deel gecompenseerd door een toename van het getijdebiet als gevolg van de afgenomen ruwheid. De verdieping leidt daarom tot een afname van de stroomsnelheid met als gevolg een verondieping van de geul.
- 3 De grootste morfologische veranderingen in de vorm van een verondieping treden op tijdens perioden met storm.

Voorgesteld wordt om deze en aanvullende hypothesen meer in detail uit te werken voorafgaand aan de analyse van de meetdata en ook om de keuze van de verspreidingslocatie te onderbouwen.

4.2 Verwerking en analyse metingen

De volgende opsomming geeft een eerste overzicht van de uitwerking en analyse van de metingen.

4.2.1 Bodem

- Reguliere verwerking door RWS: correctie waterstand, interpolatie, ruimtelijke resolutie 1x1 m i.v.m. bodemvormen.
- Verschilbodem T1-T0 voor beoordeling aangebrachte verondieping in de baggerlocatie (incl. volumeverandering). Hiervoor worden aanvullend de in- en uitpeilingen van de aannemer gebruikt maar deze zullen betrekking hebben op alleen het baggergebied zonder de wijdere omgeving.
- Verschilbodems T2, T3 etc. t.o.v. T1 voor beoordeling ruimtelijk sedimentatiepatroon in de vaargeul en bodemveranderingen rondom de baggerlocatie en bij de verspreidingslocatie.
- Sedimentvolumeontwikkeling binnen de polygoon van de vaargeul sinds T1 en hieruit afgeleid het initiële aanzandingsvolume.
- Sedimentvolumeontwikkeling binnen de polygoon van de verspreidingslocatie sinds T1.

- Bepaling minimale geuldiepte in de vaargeul (of het percentage van het geuloppervlak dat ondieper is dan de te onderhouden diepte).
- Beoordeling ontstaan en ontwikkeling van bodemvormen (hoogte, lengte en migratiesnelheid) in een aantal langs- en dwarsraaien in de vaargeul.

4.2.2 Stroomsnelheid en sedimentconcentratie

- De metingen worden verwerkt tot langs- en dwarsprofielen op opeenvolgende tijdstippen voor stroomsnelheid, sedimentconcentratie en sedimenttransport.
- De langs- en dwarsprofielen worden gebruikt om stroomsnelheid, sedimentconcentratie en sedimenttransport voor en na de verdieping te vergelijken.
- De langs- en dwarsprofielen voor stroomsnelheid, sedimentconcentratie en sedimenttransport worden vergeleken met resultaten van het numerieke model.
- Tijdseries van stroomsnelheid, sedimentconcentratie, waterstand, golfhoogte en temperatuur tijdens het getij en op langere tijdschaal (meetframe) en vergelijking met modelresultaten.
- Analyse tijdseries in relatie tot gemeten bodemveranderingen (o.a. effecten golven).

4.2.3 Golfhoogte en –periode

- Bepaling van de significante golfhoogte en golfperiode.
- Vergelijking golfhoogte en –periode zeewaarts en landwaarts van de drempel vóór en na de verdieping.
- Vergelijking waargenomen golven met modelresultaten (golfdamping).

4.2.4 Sedimenteigenschappen

- Vergelijking korrelgrootteverdelingen op basis van kentallen ($\% < 63 \mu\text{m}$, d_{50} , d_{90}) ter plaatse van de verdieping voor de vier perioden.
- Vergelijking korrelverdeling bodem- en suspensief sediment voor de vier perioden.
- Vergelijking korrelverdeling suspensief sediment tijdens in- en uitgaand tij voor de vier perioden (direct voor en na de verdieping, na een storm en aan het eind van de pilot studie).

4.3 Validatie numerieke model

De metingen worden gebruikt voor de validatie van het numerieke model met betrekking tot de volgende aspecten.

4.3.1 Bodem

- Vergelijking T0 en T1 voor bepaling van de initiële verdieping.
- Volumeontwikkeling van de geul na de verdieping.
- Erosie-/sedimentatiepatroon in en rondom de vaargeul.
- Erosie-/sedimentatiepatroon ter plaatse van en rondom de verspreidingslocatie.
- Erosie-/sedimentatiepatroon voor en na de verdieping in de gehele buitendelta.

4.3.2 Stroomsnelheid en sedimentconcentratie

- Vergelijking gemeten langs- en dwarsprofielen voor stroomsnelheid, sedimentconcentratie en sedimenttransport voor en na de verdieping met modelresultaten.
- Vergelijking tijdseries van gemeten stroomsnelheid, sedimentconcentratie en sedimenttransport met modelresultaten.

4.3.3 Golfhoogte en –periode

- Vergelijking tijdseries van gemeten significante golfhoogte met modelresultaten.
- Damping van golven over de drempel vóór en na de verdieping volgens metingen en model.

4.3.4 Sedimenteigenschappen

- Bepaling korreldiameters (d_{50} , d_{90}) en slibfractie ($\% < 63 \mu\text{m}$) als invoer voor het model.
- Beoordeling sortering van het sediment ten behoeve van het eventueel modelleren van het sediment met meerdere korrelfracties.

5 Referenties

Mulder, H., 2016. Opdrachtformulering voorbereiding pilot Westgat. Notitie d.d. 9-2-2016. Rijkswaterstaat-WVL.

Oost, A.P., T. Vermaas en L.M. Vonhögen-Peeters, 2015. Morfologische beschouwing ontwikkeling vaarweg buitendelta Zoutkamperlaag. Rapport 1220040-001. Deltares.

Van Rijn, Leo C., 1998. Principles of Coastal Morphology. Aqua Publications, Amsterdam, The Netherlands.

A Morfologie buitendelta Zoutkamperlaag

Zeegaten kunnen worden geclassificeerd op basis van de hydrodynamica, gekarakteriseerd door de verhouding van golf- en getijwerking. Onderscheiden worden (Van Rijn, 1998):

- Golf-gedomineerd;
- Gemengd;
- Getijgedomineerd.

In Tabel 5.1 zijn kentallen voor elk van deze klassen opgenomen samen met de waarden voor het zeegat Zoutkamperlaag. De kentallen hebben betrekking op de verhouding tussen getijslag en golfhoogte (TR/H), de verhouding tussen 'cross-shore ebb delta length' en 'alongshore ebb delta width' ($cs\ L/as\ W$) en de verhouding tussen 'ebb delta area' en 'inlet area' ($ed\ area/inlet\ area$). Voor de Zoutkamperlaag is als gemiddelde getijslag 2,3 m gebruikt en voor de golfhoogte is 1-3 m verondersteld (zie Oost et al., 2015). De afmeting van de buitendelta loodrecht op de kust is 3,5 km en parallel aan de kust 12 km. Het oppervlak is op basis van de 5 m dieptecontour geschat op 20-30 km². Het dwarsoppervlak van de geul die binnen- en buitendelta met elkaar verbindt is ongeveer 20.000 m² (Oost et al., 2015).

Tabel 5.1 Classificatie zeegaten op basis van hydrodynamica (Van Rijn, 1998).

Klasse	TR/H	cs L/as W	ed area/ inlet area
golf-gedomineerd	0,5 – 1		2000 – 8000
gemengd	1 - 3	0,2 – 0,5	1000 – 3000
getij-gedomineerd	> 3		500 – 1500
Zoutkamperlaag	1 - 2	0,3	1000 - 1500

De Zoutkamperlaag kan dus worden geclassificeerd als gemengd en golf- en getijwerking zijn beide in gelijke mate van invloed op de morfologie van het zeegat. Dit type is het meest stabiel met betrekking tot afmetingen en vorm (Van Rijn, 1998).

De morfologie van de buitendelta van de Zoutkamperlaag en de ontwikkeling ervan sinds het begin van de vorige eeuw worden in detail beschreven in Oost et al. (2015). Relevante bevindingen voor de pilot studie zijn:

- De ontwikkeling van de drempels hangt samen met de ontwikkelingen gerelateerd aan het "met de klok meedraaien" van de buitendeltageulen. In de zuidwestzijde van de buitendelta ontwikkelen zich nieuwe vloedgeulen met een grillig variërende morfologie, waardoor drempelhoogtes en vaarwegroutes sterk kunnen veranderen.
- De vloedgeulen schuiven geleidelijk in noordelijke richting, veranderen daarbij vaak in ebgeulen en beginnen te migreren met de klok mee. Het getijvolume van de geul neemt toe, de geul diept uit en er kan een ebschild worden gevormd. Het huidige Westgat is op deze wijze ontstaan. Door de meer noordwaartse oriëntatie is de invloed van de golfwerking toegenomen wat heeft geleid tot de vorming van een hogere drempel. De verhouding tussen de golfwerking en de getijdewerking is uiteindelijk bepalend voor de hoogte van de drempel.
- De drempel in het Westgat is de afgelopen 2 jaar, na de verondieping, weer met ongeveer 0,5 m verdiept tot NAP-4 m à NAP-4, 5 m en ligt nu dus niet veel hoger dan de vereiste vaardiepte. Dit suggereert een relatieve afname van de golfwerking ten opzichte van de getijdenwerking. Tegelijk roteert het Westgat met een snelheid van 2 graden/jaar wat leidt tot een verplaatsing van west naar oost van vooral de mond

(zeewaartse zijde). De effecten van de voorgenomen ingreep treden dus tegelijk op met de beschreven autonome ontwikkeling van de morfologie.

Relatief grof sediment wordt afgezet in de buitendelta, terwijl fijn sediment door golfwerking van de naburige stranden en vanuit de buitendelta wordt opgepikt en getransporteerd naar het getijdenbekken achter de eilanden. Het bodemsediment van ondiepten (banken) is grof omdat het fijne sediment wordt uitgespoeld door golfwerking. Op de bodem van de geul in het zeegat worden meestal megaribbels aangetroffen met een lengte gelijk aan ongeveer de waterdiepte (Van Rijn, 1998).