

# **Gedifferentieerde vooroeversuppletie bij Heemskerk**

**Evaluatie van de morfologische ontwikkeling en de  
zwemveiligheid**

Claire van Oeveren  
Pieter Koen Tonnon

1202345-000



## Titel

Gedifferentieerde vooroeversuppletie bij Heemskerk

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat Waterdienst (Gemma Ramaekers)	1202345-000	1202345-000-ZKS-0002	41

## Trefwoorden

Heemskerk; onderwatersuppletie; gedifferentieerde onderwatersuppletie; bollensuppletie; Delft3D; morfologie; zwemveiligheid

## Samenvatting

Uit aandacht van de Waterdienst voor efficiencywinst binnen Kustlijn­zorg, zijn in 2010 door Deltares een viertal korte studies uitgevoerd, waarvan deze studie de laatste is. In de eerdere studies werd onder meer gekeken naar efficiencywinst in aanlegtechnieken en alternatieve suppletieontwerpen. Hieruit kwam onder andere naar voren dat onderwater- bollensuppleties efficiënter zouden kunnen zijn dan reguliere suppleties.

Naar aanleiding hiervan heeft de Waterdienst gekozen voor een praktijkproef bij Heemskerk, met een aangepaste configuratie, de "gedifferentieerde onderwatersuppletie". Vanwege onzekerheden over de risico's van meerdere openingen in een suppletie, is in deze configuratie het aantal openingen beperkt tot één enkele, op een locatie waar het risico gering wordt geacht. Om bovendien het effect van een diepere onderwatersuppletie te onderzoeken, wordt één zandlichaam lager aangelegd.

In deze vierde studie is voor dit ontwerp een analyse gemaakt van de risico's van op het gebied van morfologie en zwemveiligheid, en zijn aanbevelingen gedaan voor monitoring. Dit is onderzocht aan de hand van een modelstudie met drie scenario's: een referentie zonder suppletie, een reguliere suppletie en het ontwerp. Mede door de korte doorlooptijd, was het op basis van deze studie niet mogelijk om een voorspelling te geven van de exacte bodemligging na 6 maanden binnen de brekerzone. De studie kon daarentegen wel bruikbare informatie geven over de relatieve (en globale) volumeveranderingen – en daarmee de effectiviteit – van het ene scenario ten opzichte van het andere.

Uit de vergelijking van de resultaten bleek het invloedsgebied van het gat zich uit te strekken over circa 2 km langs de kust. Langs de kust was afwisselend een licht positieve en negatieve invloed op de morfologie zichtbaar. Binnen de MKL zone resulteerde dit echter niet in een netto toe- of afname van het zandvolume ten opzichte van de reguliere suppletie. Buiten de MKL zone bleek het netto zandvolume in relatieve zin wel te zijn toegenomen. Als dit zand op langere termijn in de MKL zone terechtkomt, kan het ontwerp alsnog effectiever zijn dan de reguliere suppletie.

De invloed van het ontwerp op de zwemveiligheid was nihil, omdat deze vooral werd bepaald door de bathymetrie ter plaatse van de binnenste brekerbank, ver van de suppleties vandaan. Zowel de kritieke dwarsstromingen als de condities (stroomsnelheid, waterdiepte, golfhoogte) die gemiddeld optreden op het moment van overschrijding van de kritieke dwarsstroming, verschilden bij het ontwerp nauwelijks van die bij de reguliere suppletie of bij het referentie scenario.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	jan. 2011	ir. C. van Oeveren		ir. M. van Ormondt			
		ir. P.K. Tonnon					
9	jul. 2011	ir. C. van Oeveren		ir. M. van Ormondt		ir. T. Schilperoort	

## Status

definitief



## Inhoud

<b>1 Inleiding</b>	<b>1</b>
1.1 Achtergrond	1
1.2 Aanleiding	1
1.3 Vraagstelling en hypothesen	2
<b>2 Aanpak en modelopzet</b>	<b>3</b>
2.1 Aanpak en scenario's	3
2.2 Grid en bathymetrie	3
2.3 Randvoorwaarden	5
2.4 Morfologische berekening	8
2.5 Sedimenttransport	9
2.6 Zwemveiligheid berekening	10
<b>3 Morfologische ontwikkeling</b>	<b>11</b>
3.1 Erosie- en sedimentatiepatronen	11
3.2 Volumeveranderingen in kustzone	13
3.3 Conclusies en discussie	18
<b>4 Zwemveiligheid</b>	<b>21</b>
4.1 Beoordelen van de zwemveiligheid	21
4.2 Vergelijking van globale stromings- en golfpatronen	21
4.3 Vergelijking m.b.t. overschrijding van de kritieke dwarsstroming	21
4.4 Vergelijking m.b.t. condities bij overschrijding	22
4.5 Conclusies en discussie	24
<b>5 Aanbevelingen voor monitoring</b>	<b>25</b>
5.1 Aandachtspunten	25
5.2 Monitoringsplan voor de morfologie	26
5.3 Monitoringsplan voor de hydrodynamica en de zwemveiligheid	27
5.4 Gekozen monitoringsplan	28
<b>6 Eindconclusies</b>	<b>29</b>
6.1 Met betrekking tot de prestaties van het model	29
6.2 Met betrekking tot de resultaten	29
6.3 Met betrekking tot de monitoring	30

## **Bijlage(n)**

### **A Suppletie ontwerp**

### **B Figuren morfologische ontwikkeling**

- B.1 Overzicht interessegebied en indeling in balansvakken
- B.2 Initiële bodem en bodem na 6 maanden, map-plots
- B.3 Initiële bodem en bodem na 6 maanden, transect-plots
- B.4 Cumulatieve erosie en sedimentatie na 6 maanden
- B.5 Verschillen in sedimentatie na 6 maanden
- B.6 Verschil in golfhoogtes ten opzichte van referentie scenario, golven uit het noordwesten
- B.7 Verschil in golfhoogtes ten opzichte van referentie scenario, golven uit het zuidwesten
- B.8 Netto transportpatronen

### **C Figuren zwemveiligheid**

- C.1 Dieptegemiddelde snelheid en richting tijdens maximale ebstroming
- C.2 Dieptegemiddelde snelheid en richting tijdens maximale vloedstroming
- C.3 Dieptegemiddelde snelheid en richting tijdens laagwaterkentering
- C.4 Maximale golfhoogtes in kustnabije zone
- C.5 Maximale zeewaartse dwarsstroming over gehele getijcyclus
- C.6 Percentage van de tijd dat de zeewaartse dwarsstroming > 0.3 m/s
- C.7 Aaneengesloten tijdsduur dat de zeewaartse dwarsstroming > 0.3 m/s

### **D Voorafgaand onderzoek**

- D.1 Terugmelding quickscan Innovatieve Technieken voor Efficiencyverbetering
- D.2 Verdiepingsslag aanlegtechnieken
- D.3 Advisering Innovatieve Suppletie Heemskerk

# 1 Inleiding

## 1.1 Achtergrond

Binnen Rijkswaterstaat is er al sinds enige tijd extra aandacht voor kostenbesparing en efficiencyverbetering. In het door de Waterdienst opgestelde *verbeterplan Efficiency Hoofdwatersysteem* is aangegeven dat binnen Kustlijnzorg op een aantal vlakken efficiencywinst geboekt kan worden.

Naar aanleiding hiervan heeft Deltares medio maart 2010 een quickscan uitgevoerd naar mogelijke kostenbesparingen in het suppletieprogramma, binnen de randvoorwaarden van het huidige uitvoeringskader en kustlangse onderverdeling (Vonhögen, 2010). Hierbij is geconcludeerd dat kostenbesparingen mogelijk zijn door (1) grotere vrijheden van de baggeraars in de aanbesteding van BKL suppleties en (2) door het minder rigide toepassen van BKL methodiek (bijvoorbeeld in Zeeland en op Ameland) en (3) door het clusteren van kustfundament suppleties.

Uit overleg met de Waterdienst bleek vervolgens dat er behoefte was aan een verdiepingsslag met betrekking tot de aanlegtechnieken (Tonnon, 2010). Het doel van de verdiepingsslag was om, wederom binnen het huidige uitvoeringskader, op basis van bestaande kennis en onderzoeksresultaten te komen tot een beperkte lijst van suppletieontwerpen met de meeste potentie voor kostenbesparing. Hierin werd onder andere geconcludeerd dat onderwater- bollensuppleties, wat betreft geïntegreerd kustwaarts transport, vergelijkbaar zijn met reguliere onderwatersuppleties van een groter volume, en daardoor efficiënter zijn dan de reguliere suppleties.

De Waterdienst overwoog hierna om een bollensuppletie toe te passen in een praktijkproef bij Heemskerk en heeft Deltares gevraagd om, op basis van bestaande kennis en onderzoeksresultaten, de werking en de mogelijke gevolgen van een bollensuppletie bij Heemskerk te beschrijven, een voorlopig ontwerp op te stellen en verdere aanbevelingen te geven voor het toepassen en monitoren van dergelijke suppleties. In juni 2010 is hiervoor door Deltares een review uitgevoerd van een eerder uitgevoerde beknopte modelstudie (L. Koster, 2006), waaruit naar voren kwam dat de optimale lengte van de zandlichamen ('bollen') van de suppleties 1000 m zou zijn (Tonnon, 2010). Hierbij is gerekend met een afstand van 500 m tussen de zandlichamen in een geschematiseerde kust.

In Bijlage D zijn de betreffende documenten van de eerdere fasen in deze studie terug te vinden (het memo van de quickscan, D-1, de verdiepingsslag, D-2, en de review van de modelstudie, D-3).

## 1.2 Aanleiding

In de eerdergenoemde beknopte modelstudie is uitgegaan van een uniform kustprofiel, zonder brekerbanken. In de situatie bij Heemskerk zijn deze banken wel aanwezig, waardoor nog enige onzekerheden bestaan over de interactie van dit ontwerp met de zandbanken aan de kust bij Heemskerk.

Omdat de Waterdienst de onzekerheden over de risico's van meerdere openingen in een suppletie nog te groot acht voor de eroderende kust van Heemskerk, heeft de Waterdienst gekozen voor een aangepaste configuratie. In deze configuratie is het aantal openingen beperkt tot één enkele opening op een locatie waar de risico's voor de kustlijn gering worden geacht. Om bovendien het effect van een diepere onderwatersuppletie te onderzoeken, wordt één van de twee zandlichamen lager aangelegd. Hierdoor is het ontwerp een combinatie van

twee, nog niet eerder in de praktijk toegepaste typen suppleties: de eerdergenoemde bollensuppletie en de diepere onderwatersuppletie.

Dit gecombineerde ontwerp is de “gedifferentieerde onderwatersuppletie” genoemd. Omwille van bondigheid, zullen we hier in dit rapport ook wel naar refereren als ‘ontwerpsuppletie’. Het voorgestelde ontwerp bestaat uit twee zandlichamen met een verschillende aanleghoogte (NAP -5 m en -6 m), gescheiden door één opening van 500 m. Het detailontwerp, opgesteld door de Waterdienst, is weergegeven in bijlage A.

### 1.3 Vraagstelling en hypothesen

De Waterdienst heeft nu aan Deltares gevraagd om voor het voorgestelde ontwerp een analyse te maken van de risico's op het gebied van de morfologie en de zwemveiligheid. Er werden hierbij drie concrete vragen gesteld, die wij op basis van bestaande kennis hebben vertaald naar bijbehorende hypothesen:

1. Wat zijn de effecten van een gedifferentieerde onderwatersuppletie op de morfologie (met als voornaamste aandachtspunt het effect van de opening)?

*Hypothesen:*

- a. *De zandlichamen krommen ter plaatse van de koppen naar de kust toe, waardoor het netto kustwaartse zandtransport groter is dan bij een reguliere suppletie.*
- b. *Het netto kustwaartse zandtransport is iets lager bij het zandlichaam op NAP -6 m dan bij het zandlichaam op NAP -5 m, maar de verschillen zullen relatief gering zijn, waardoor de variant op NAP -6 m kostentechnisch aantrekkelijker is.*

2. Wat zijn de effecten van een gedifferentieerde onderwatersuppletie voor de zwemveiligheid, met als voornaamste aandachtlocatie het gebied achter de opening?

*Hypothese: onder representatieve condities voor de zwemveiligheid, zijn de zeewaarts gerichte stroomsnelheden rondom de gedifferentieerde onderwatersuppletie vergelijkbaar met de zeewaarts gerichte stroomsnelheden die optreden rondom een reguliere suppletie. (Onder representatieve condities worden in dit geval de relatief milde condities bedoeld, waarbij zwemrecreatie bij uitstek plaatsvindt.)*

Ten slotte vroeg de Waterdienst om een voorstel te doen voor monitoring, zodat de suppletie verder kan worden uitgewerkt binnen het kennispoor van Kustlijnzorg. Deze vraag is verder uitgewerkt in hoofdstuk 5.

In de volgende hoofdstukken bespreken we de aanpak van de studie (hoofdstuk 2) en de resultaten van het onderzoek naar de morfologie (hoofdstuk 3) en naar de zwemveiligheid (hoofdstuk 4).



## 2 Aanpak en modelopzet

In dit hoofdstuk geven we een overzicht van de aanpak van de studie en de opzet van het gebruikte model.

### 2.1 Aanpak en scenario's

De hypothesen zijn aan de hand van 3 verschillende scenario's getoetst:

1. zonder suppletie: bodemgegevens van 2010, ongestoorde bodem
2. reguliere suppletie: suppletie met hetzelfde volume als in het voorgestelde ontwerp, maar dan in één strook aangelegd, met een aanleghoogte op NAP - 5 m.
3. ontwerpsuppletie: suppletie volgens voorgesteld ontwerp (zie bijlage A), bestaande uit twee zandlichamen op verschillende aanleghoogtes van NAP -5 m en -6 m. De opening tussen de twee suppleties bedraagt ongeveer 500 m.

Voor het bestuderen van de morfologie is een morfodynamisch Delft3D-model opgezet. Voor het evalueren van de zwemveiligheid is dezelfde opzet gebruikt, maar hierbij is de bodem constant gehouden (morfostatisch). Aanvankelijk was besloten om een periode van 12 maanden te simuleren, maar dit bleek vanwege de lange rekentijd niet haalbaar binnen het gestelde tijdsbestek. Daarom is uiteindelijk een periode van 6 maanden gesimuleerd.

Voor het evalueren van de morfologische impact hebben we gekeken naar de resultaten na 6 maanden van:

- de vervorming van de suppleties (kromming, sedimentatie en erosie patronen, etc.)
- de totale netto volumeveranderingen aan de kust,
  - voor het gehele gesuppleerde gebied
  - bij de zandlichamen op -5 en -6
  - bij de koppen en het gat;

Voor het evalueren van de impact op de zwemveiligheid hebben we gekeken naar:

- de zeewaarts gerichte dwarsstroming;
- de totale tijd dat de zeewaarts gerichte dwarsstroming een bepaalde limietwaarde overschrijdt (in deze studie is een limiet van 0.3 m/s aangehouden);
- de duur van een dergelijke overschrijding;
- het totale oppervlak van het gebied waarbinnen overschrijdingen optreden;
- de condities die tijdens een dergelijke overschrijding optreden (waterdiepte, golfhoogte, langsstroming).

Bij de evaluatie zijn steeds de resultaten van de drie verschillende scenario's met elkaar vergeleken. Uit de resultaten van dit onderzoek zijn vervolgens aanbevelingen afgeleid voor de monitoring (hoofdstuk 5).

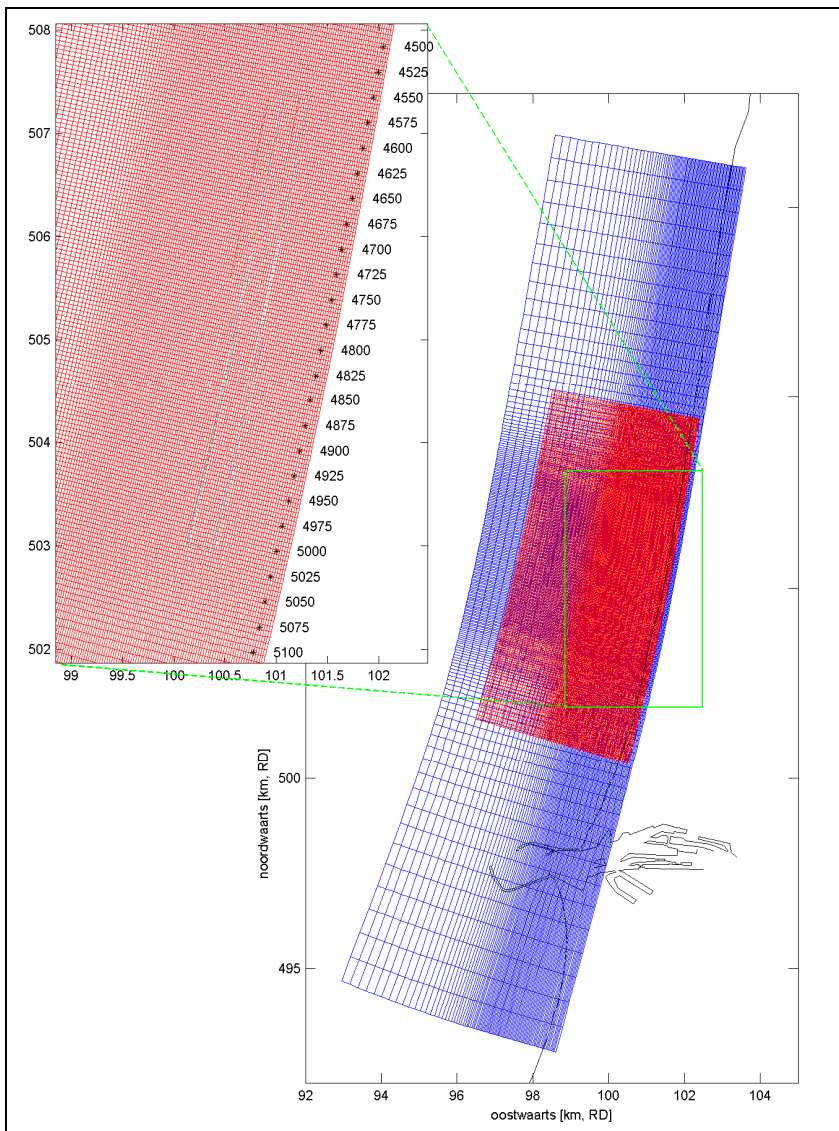
### 2.2 Grid en bathymetrie

Het rekendomein voor de hydrodynamische berekening beslaat een gebied van circa 9 km kustlangs en circa 4 km kustdwars, gecentreerd rond het gebied van de suppletie. Er is gerekend met een 3-dimensionaal rekengrid, bestaande uit 12 lagen. De maximale horizontale resolutie van het grid, in het gebied van de suppletie, is circa 20 m kustdwars en

40 m kustlangs. Nabij de domeinranden is de resolutie lager (circa 60 m kustdwars en circa 100 m kustlangs).

De golven zijn op een groter domein berekend, om randeffecten in de hydrodynamica te voorkomen. Het golfdomein beslaat circa 24 km kustdwars en circa 6 km kustdwars. In het interessegebied is de resolutie van het golfdomein ongeveer gelijk aan die van het stromingsmodel.

Figuur 2-1 toont de beide rekengrids.



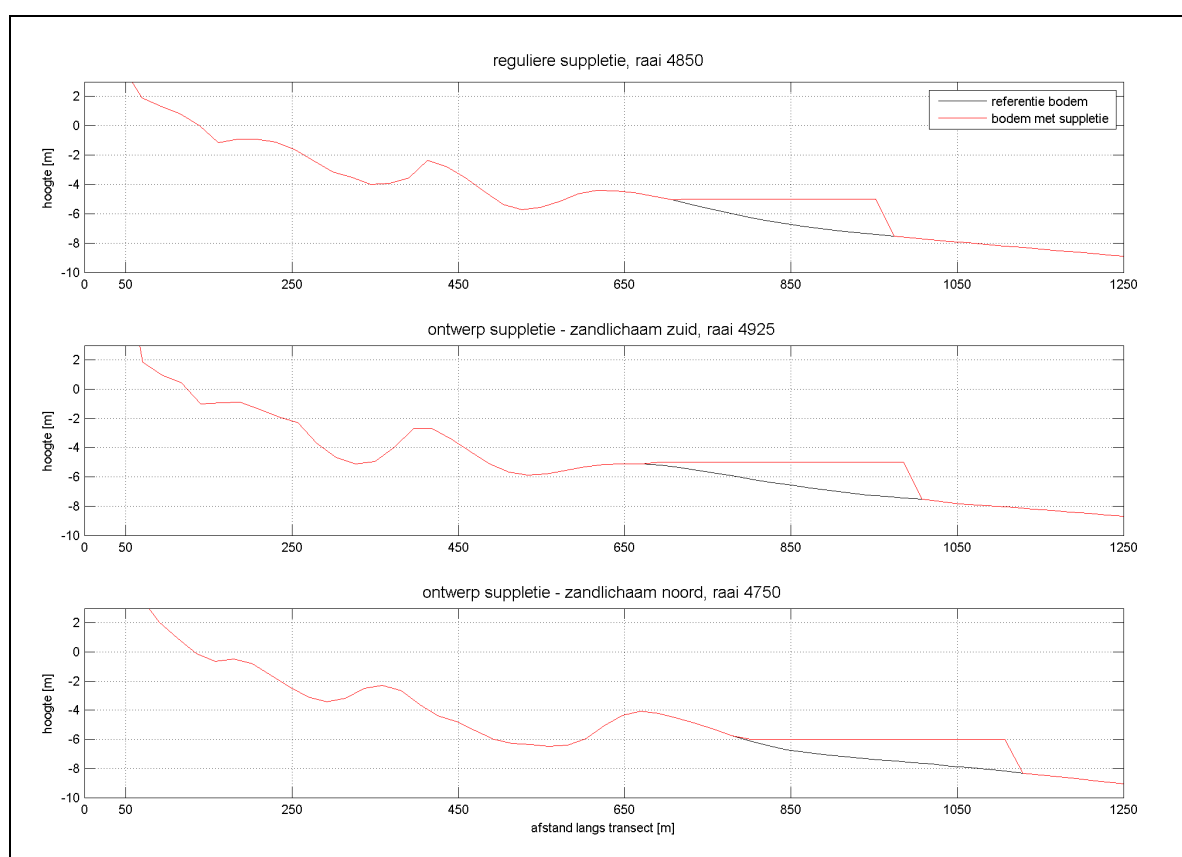
Figuur 2-1. Gebruikte rekengrids voor stromingsberekening (rood) en golfberekening (blauw).

Voor de ongestoorde bodem zijn we uitgegaan van de gegevens afkomstig van de meest recente Jarkus metingen (2010). Bovendien zijn bij scenario's 2 en 3 de suppleties in de bodem aangebracht, volgens de specificaties in Tabel 2-1 en Figuur 2-2. Hierbij moet worden opgemerkt, dat de lengte van de suppletie niet exact gelijk is aan de afstand tussen de raaien, omdat de suppleties niet exact eindigen op de raai, maar doorlopen tot halverwege het raai vak [mond.comm. Waterdienst, okt. 2010]. Bij de reguliere suppletie (zonder gat),

loopt de suppletie dus aan beide zijden 125 m door, voorbij de raaien 4575 en 5000. Bij de gedifferentieerde suppletie eindigen de zandlichamen ter plaatse van de opening daarentegen wel exact op de raaien 4750 (noord) en 4800 (zuid). Dit is nodig om een opening van 500 m te kunnen houden.

Tabel 2-1. Suppletiekenmerken behorend bij de scenario's

Scenario	Raaien	L <sub>suppletie</sub> [m]	Aanleghoogte [m +NAP]	Volume	
				[m <sup>3</sup> /m]	[m <sup>3</sup> ]
1. referentie scenario	4575 – 5000	-	-	-	-
2. reguliere suppletie	4575 – 5000	4500	-5	375	1.7 * 10 <sup>6</sup>
3. zandlichaam noord zandlichaam zuid	4575 – 4750	1875	-6	425	0.8 * 10 <sup>6</sup>
	4800 – 5000	2125	-5	425	0.9 * 10 <sup>6</sup>



Figuur 2-2. Dwarsdoorsneden van de gesuppleerde profielen

## 2.3 Randvoorwaarden

### 2.3.1 Getijschematisatie

De randvoorwaarden van de hydrodynamische berekeningen zijn bepaald aan de hand van een interpolatie methode op basis van 95 getijcomponenten van getijstations bij IJmuiden en Petten.

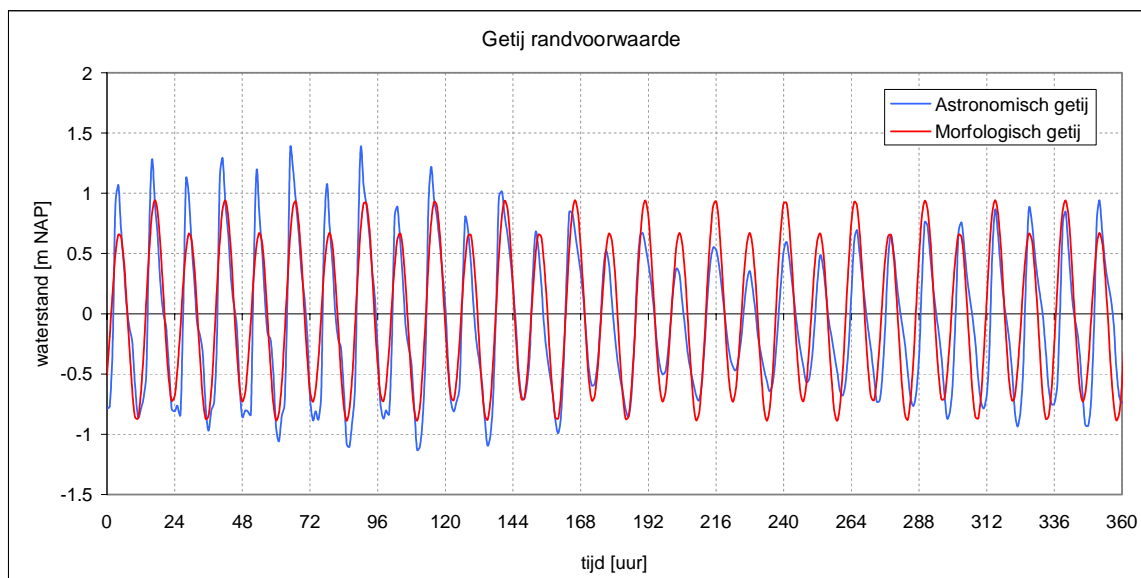
Op basis hiervan is een morfologisch getij afgeleid, bestaande uit slechts twee componenten [Lesser, 2009].

- een component met de amplitude en de fasen van het dubbeldaags maangetij, M2,
- een extra 'morfologische' component, gebaseerd op de amplitude en de fasen van de K1 en de O1. Deze component geeft het getij een dagelijkse ongelijkheid.

Dit is een (deels) analytische benadering, gebaseerd op de netto sedimenttransporten die door het astronomische getij kunnen worden opgewekt. De twee componenten zijn zo geschematiseerd dat zij, gemiddeld over het getij, ongeveer hetzelfde netto transport genereren als een springtijdoortij cyclus van het astronomische getij. De transportgradiënten zijn hier vervolgens een afgeleide van, als gevolg van lokale verschillen in de bodem, sedimentaanbod, golven, etc.

Het voordeel is, dat de twee componenten na een cyclus van 1490 minuten (twee maal de M2 periode) weer terug in fase zijn, in plaats van na een gehele springtijdoortij cyclus van ongeveer 15 dagen. Voor elke golfconditie wordt vervolgens alleen deze karakteristieke periode van 1490 minuten doorgerkend. Door gebruik te maken van een morfologische versnellingsfactor, kunnen hiermee de bodemveranderingen van een langere periode worden benaderd (zie paragraaf 2.4).

Figuur 2-3 laat de opgelegde morfologische getijrandvoorwaarde zien, samen met het geïnterpoleerde astronomische getij van 95 getijcomponenten. Hierin is te zien dat de springtijdoortij cyclus in het morfologische getij ontbreekt, maar dat het getij gemiddeld wel een iets sterkere dagelijkse ongelijkheid heeft.



Figuur 2-3. Morfologische getijrandvoorwaarde (rood) versus het geïnterpoleerde astronomische getij (blauw).

### 2.3.2 Golschematisatie

De golfberekening is uitgevoerd met een geschematiseerd golfklimaat. Voor het schematiseren van een klimaat in een aantal golfcondities geldt in de regel dat een groter aantal condities in het algemeen een betere representatie van het golfklimaat geven. Maar een groter aantal condities levert ook een groter aantal berekeningen op. Het aantal golfcondities wat kan worden doorgerkend wordt in de meeste gevallen dus bepaald door de beschikbare tijd. Vanwege het korte tijdsbestek voor deze studie is daarom gekozen om het

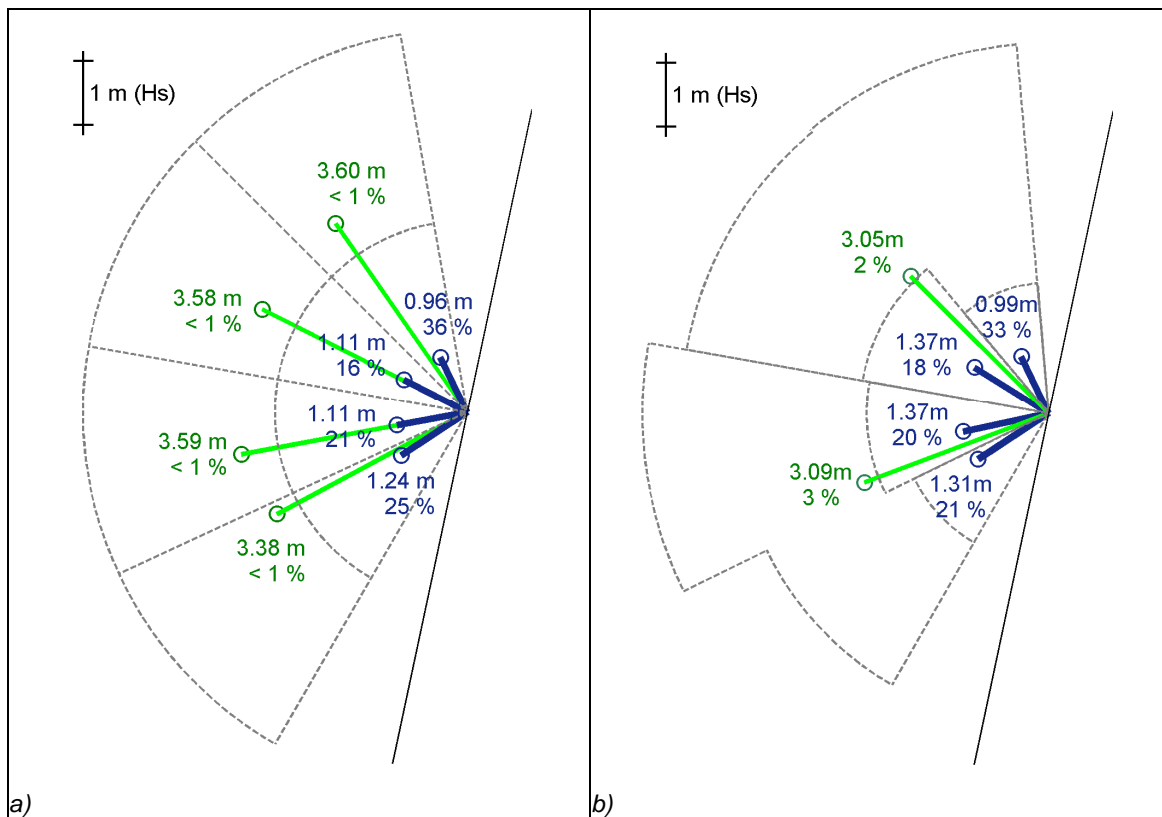
klimaat te schematiseren tot maximaal 6 golfcondities. Door gebruik te maken van een alternatieve methode voor het vaststellen van de condities, kon hierbij weer iets aan nauwkeurigheid worden teruggewonnen.

Allereerst zijn hiervoor de randvoorwaarden afgeleid met behulp van een relatief nieuwe interpolatiemethode, die is ontwikkeld binnen het Building With Nature programma (De Fockert, 2010). Deze methode maakt gebruik van golfboei gegevens van de IJmuiden Munitiestortplaats, het Europlatform en het Eierlandse Gat. Deze meetgegevens zijn vervolgens geïnterpoleerd, om een tijdreeks te verkrijgen met golfhoogtes, golfrichtingen en golfperiodes ter plaatse van de zeerand van het golfdomein.

Daarna moest deze geïnterpoleerde tijdreeks worden vertaald naar een golfklimaat met 6 condities. Bij het indelen van een golfklimaat in golfcondities worden normaliter vaste klassengroottes gebruikt, gebaseerd op de golfhoogte en golfrichting. In Figuur 2-4.a staat een voorbeeld weergegeven waarbij het golfklimaat bij Heemskerk is geschematiseerd tot 8 reguliere golfcondities. Bij de reguliere methode kan het dikwijls voorkomen dat, bijvoorbeeld bij het indelen in 8 condities (zoals in het geval van Figuur 2-4.a), 4 van de 8 condities minder dan 1% van het golfklimaat vertegenwoordigen. Het meest significante deel van het golfklimaat wordt eigenlijk dus maar 'gevangen' in 4 condities. Als de beschikbare (reken)tijd het slechts toestaat om een beperkt aantal condities door te rekenen, zoals ook in dit geval, dan is het des te meer wenselijk dat elke conditie een significant aandeel van het golfklimaat representeert. Met andere woorden: je zou een hogere klassenresolutie willen hebben in de richtingen/golfhoogtes waar meer golfenergie vandaan komt, en minder resolutie in klassen bij een geringe golfenergie.

De energieflex methode [Dobrochinski, 2009] speelt hierop in, door geen vaste klassengrenzen te hanteren, maar door de golfklassen in te delen op basis van hun opgewekte energieflex, dat als maat dient voor het potentiële transport dat door de golf kan worden aangedreven. Deze totale flux hangt niet alleen af van de momentane energie van een enkele golf, maar ook van de frequentie van voorkomen van de golf. Bovendien wordt, per golfklasse, de representatieve golfhoogte niet bepaald op basis van het gemiddelde van alle golven in de klasse, maar op basis van de golfhoogte die – gegeven de frequentie van de gehele klasse – dezelfde energieflex oplevert als de afzonderlijke golven in de klasse. De methode maakt het dus mogelijk om een realistischer golfklimaat te krijgen, zonder het aantal golfcondities te moeten verhogen, wat extra rekentijd zou opleveren.

Figuur 2-4.b laat het voor deze studie gebruikte golfklimaat, bestaande uit 6 condities en bepaald met behulp van de energieflex methode. Elk 'vakje' in figuur b levert ongeveer dezelfde energieflex. De 4 golfcondities van minder dan 1% uit het klimaat van figuur a, zijn hier min of meer gebundeld in 2 golfcondities. Ook voor de lagere golfcondities zijn de klassengrenzen iets verschoven, zowel in golfrichting als in golfhoogte. Het resultaat is een ongelijkmatige verdeling in golfklassen, maar met een gelijkmatige verdeling wat betreft de bijdrage aan het sedimenttransport in langs- en dwarsrichting.



Figuur 2-4. a) Golfklimaat bestaande uit 8 condities (waarvan 4 condities met een frequentie van voorkomen < 1%), met behulp van de conventionele methode; b) golfklimaat bestaande uit 6 condities met behulp van de energieflex methode.

De kenmerken van de 6 gebruikte golfcondities staan weergegeven in de tabel hieronder (Tabel 2-2). Bij de golfcondities zijn ook de bijbehorende windcondities bepaald, op basis van de meest voorkomende windrichtingen en -snelheden.

Tabel 2-2. Karakteristieken van de 6 golfcondities voor de morfologische berekeningen, bepaald met behulp van de energieflex methode (Dobrochinski, 2009).

H <sub>s</sub> [m]	T <sub>p</sub> [s]	golf Dir [° N]	frequentie [%]	windrichting (modus) [° N]	windsnelheid (modus) [m/s]
1.32	5.42	237	21 %	220	10.10
1.37	5.53	258	20 %	240	10.10
1.37	5.96	302	18 %	280	7.40
0.99	6.06	335	33 %	350	4.90
3.08	7.93	249	3 %	230	14.70
3.05	8.74	315	2 %	300	13.30

## 2.4 Morfologische berekening

Met elke golfconditie wordt een getijcyclus van 1490 minuten (24 uur en 50 minuten) doorgerekend. Om in totaal toch hetzelfde morfologische resultaat te verkrijgen als voor een half jaar, wordt een morfologische versnellingsfactor gebruikt. Bij een morfodynamische berekening worden de bodemveranderingen na elke tijdstap (in dit geval 6 seconden) teruggekoppeld naar de hydrodynamica. Door deze bodemveranderingen bij elke tijdstap te

vermenigvuldigen met een versnellingsfactor, kan het effect worden nagebootst van de morfodynamica van een veel langere periode. Aan deze versnellingsfactor zit echter wel een zekere limiet; het rekenen met een te hoge versnellingsfactor geeft onrealistische resultaten.

De 6 verschillende golfcondities worden in één berekening (serieel) doorgerekend, wat betekent dat na elke getijcyclus de golfrandvoorwaarden en de morfologische versnellingsfactor in de berekening worden aangepast. Op die manier wordt het totale effect van het golfklimaat op de migratie van de zandbanken beter weergegeven; bij losstaande berekeningen zouden de cumulatieve effecten elkaar kunnen uitmiddelen. Bij de overgang naar een nieuwe golfconditie is steeds een korte inspeelperiode van ongeveer 30 minuten aangehouden. Tijdens deze inspeeltijd kan de hydrodynamica zich aanpassen aan de nieuwe conditie, voordat er bodemveranderingen worden toegepast.

De volgorde waarin de golfcondities elkaar opvolgen zijn dusdanig gekozen dat er optimale afwisseling is in golfhoogte en golfrichting. Voor extra afwisseling in de golfcondities hebben we er bovendien voor gekozen om elke golfconditie niet in één keer 1490 minuten te laten doorrekenen, maar twee keer een periode van 745 minuten.

Tabel 2-3 toont de golfrandvoorwaarden in volgorde van opkomst en de morfologische versnellingsfactor. De gesimuleerde periode voor de morfologie bedroeg in totaal ongeveer 175 dagen, gelijk aan een half jaar.

Tabel 2-3. Volgorde van de golfcondities en de gesimuleerde morfologische periode. (NB. de volgorde in deze tabel wijkt af van de volgorde gepresenteerd in Tabel 2-2.)

Golf conditie	H <sub>s</sub> [m]	T <sub>p</sub> [s]	golf Dir [° N]	Δ t simulatie [minuten]	mor.factor [-]	Δ t morfologie [dagen]
1	3.08	7.93	249	745	4.58	2.4
2	1.37	5.96	302	745	31.08	16.1
3	1.32	5.42	237	745	36.21	18.7
4	3.05	8.74	315	745	4.13	2.1
5	1.37	5.53	258	745	35.62	18.4
6	0.99	6.06	335	745	57.46	29.7
1	3.08	7.93	249	745	4.58	2.4
2	1.37	5.96	302	745	31.08	16.1
3	1.32	5.42	237	745	36.21	18.7
4	3.05	8.74	315	745	4.13	2.1
5	1.37	5.53	258	745	35.62	18.4
6	0.99	6.06	335	745	57.46	29.7
						175.0

## 2.5 Sedimenttransport

In onderstaande lijst staan de belangrijkste parameterinstellingen die zijn gebruikt voor de sedimenttransportberekening. De instellingen zijn gebaseerd op het model voor de casestudie bij Egmond (Deltares, 2010), voor een gedetailleerder overzicht van alle parameterinstelling wordt verwezen naar dit rapport.

Tabel 2-4. Belangrijkste parameterinstellingen voor de sedimenttransportberekening.

Parameter	Gebruikte instelling
formulering voor bodem en zwevend sedimenttransport	bijgewerkte formulering van de TRANSPOR2004 formule van Van Rijn
formulering voor schuifspanningen	Van Rijn ruwheidvoorspelling
sedimenttype: D <sub>10</sub> , D <sub>50</sub> , en D <sub>90</sub>	zandig, respectievelijk: 150 µm, 200 µm, en 300 µm
dichtheid materiaal; droge bed	2650 kg/m <sup>3</sup> ; 1600 kg/m <sup>3</sup>
randvoorwaarde zwevend stof	evenwichtsconcentratie

## 2.6 Zwemveiligheid berekening

Vanwege het korte tijdsbestek waarin de studie is uitgevoerd, hebben we gerekend met een relatief lage golfconditie die ook bij de morfologische studie is gebruikt. De terugkoppeling van het effect van bodemveranderingen op de stroming is hierbij niet meegenomen.

De gebruikte golfconditie had een significante golfhoogte van 0.99 m en een golfrichting van 335 °N. In ongeveer 50% van de gevallen komt de wind bij de gestelde golfklasse uit de richtingen tussen west en noord. Hier komt ook de gemiddeld sterkste wind vandaan. Bij deze golf is, net als bij de morfologische berekeningen, de meest voorkomende windconditie aangehouden met windrichting van 350 °N. Hiermee is voor alle drie de scenario's een hele getijcyclus doorgerekend.

Desalniettemin is het ook mogelijk dat de wind uit een geheel andere richting komt dan de golven. Omdat de wind vooral invloed heeft op de bovenste waterlagen, is te verwachten dat landwaartse windrichtingen een vergelijkbare invloed op de zwemveiligheid zullen hebben. Een afluende wind zou mogelijk wel een toename in de zeewaarts gerichte dwarsstroming bovenin de waterkolom kunnen opwekken. Maar in een eerdere studie naar de zwemveiligheid bij Egmond (Deltares, 2003), bleek de invloed van afluende wind op de zwemveiligheid nagenoeg verwaarloosbaar.

Wel is gekeken naar de invloed van recht invallende golven, omdat dit het risico op het ontstaan van muistromen kan vergroten (het water dat tegen de kust wordt opgestuwd zal dan dikwijls via een mui weer terug naar zee stromen). De drie scenario's zijn daarom ook doorgerekend met dezelfde golfhoogte, maar met een inval haaks op de kust.



### 3 Morfologische ontwikkeling

Op basis van de resultaten van de morfodynamische berekeningen hebben we de morfologische ontwikkelingen van de drie scenario's met elkaar vergeleken. We hebben hierbij gekeken naar de globale erosie- en sedimentatiepatronen (paragraaf 3.1) en de volumeveranderingen in de kustzone (paragraaf 3.2).

Om de vergelijking makkelijker te maken, is het interessegebied opgedeeld in balansvakken. Een overzicht van die indeling is weergegeven in bijlage B1. De nummers van de transecten zullen ook terugkomen in figuren van de doorsneden.

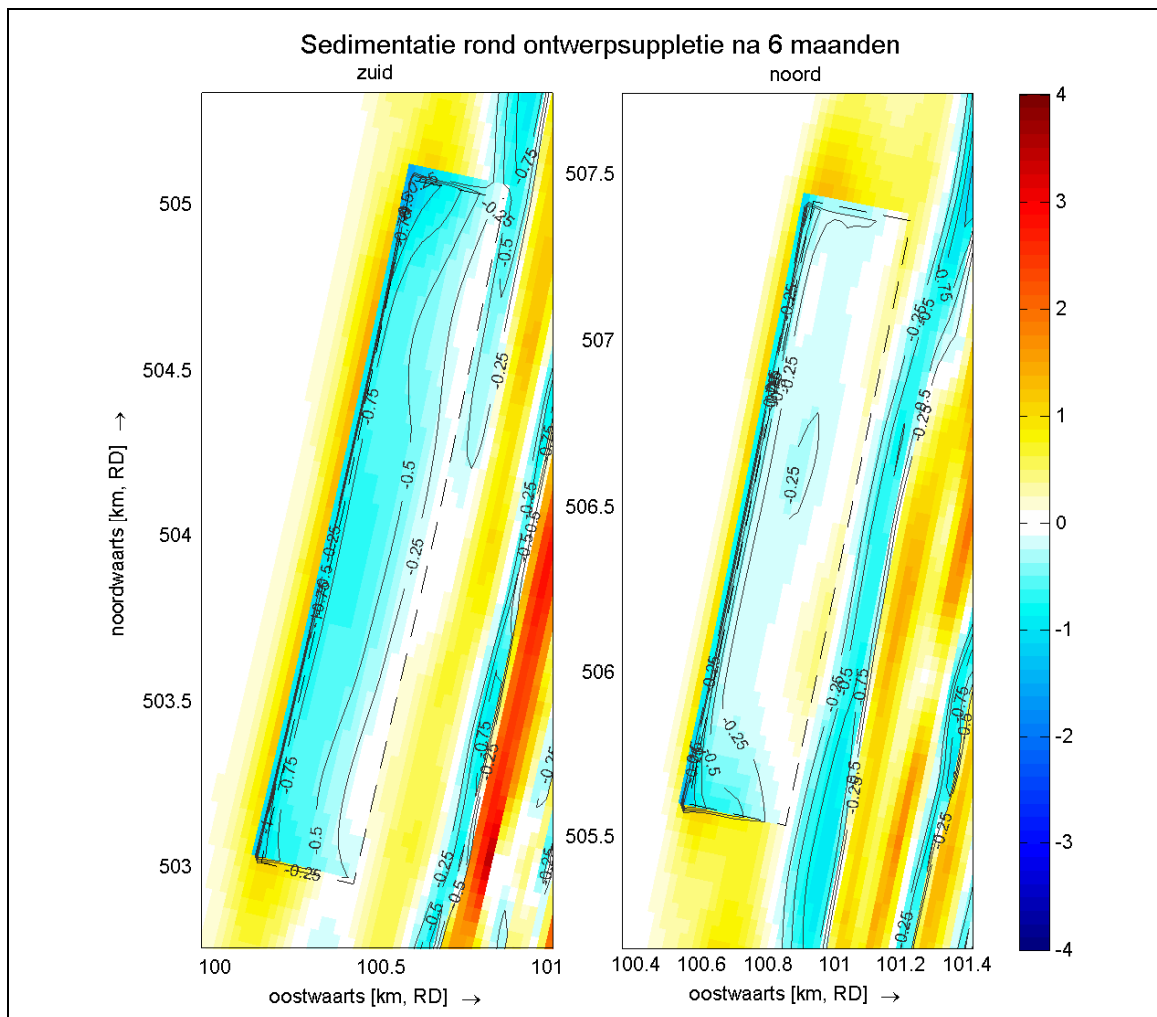
Als eerste moeten we opmerken dat, bij elk scenario, het model niet in staat was om het zandbankensysteem te handhaven. (Ruimtelijke figuren van de begin- en de eindbodem na 6 maanden zijn te zien in bijlage B2.a t/m c. Enkele karakteristieke doorsneden hiervan zijn te zien bijlage B3.a t/m c.) Met name de binnenste brekerbank vlakke vrijwel volledig af. Dit kan te maken hebben met de gekozen golfschematisatie van 6 golfcondities, waardoor de golfcondities die verantwoordelijk zouden kunnen zijn voor het in stand houden van de brekerbanken onvoldoende zijn vertegenwoordigd. Maar de voornaamste oorzaak ligt in de beperkingen van het (state-of-the-art) model zelf, waardoor de vele complexe processen in de brekerzone nog niet voldoende worden gesimuleerd. Hetzelfde probleem werd eerder ook al geconstateerd tijdens een casestudie bij Egmond (Deltares, 2010). Hierin werd geconcludeerd dat meer onderzoek nodig is naar het modelleren van de morfodynamische en hydrodynamische processen in de brekerzone. Dit valt echter buiten de scope van deze studie. Door nu vooral te kijken naar de relatieve vergelijking tussen de drie scenario's onderling, kunnen we toch een beeld krijgen over de verwachte morfologische respons van de ontwerpsuppletie.

#### 3.1 Erosie- en sedimentatiepatronen

Ruimtelijke figuren van de cumulatieve erosie en sedimentatie zijn terug te vinden in bijlage B4.a en b.

De figuren laten zien dat bij beide suppletiescenario's de erosie aan de zandlichamen iets sterker is ter plaatse van de koppen. In de figuren is dit extra geïllustreerd aan de hand van contourlijnen op erosiewaarden van -0.75, -0.5 en -0.25 m. De lijnen vertonen een kromming rond de koppen, wat op plaatselijke grotere erosie duidt. Dit effect lijkt het sterkste te zijn bij de koppen rond het gat.

In Figuur 3-1 is het gebied rondom de zandlichamen van de ontwerpsuppletie nog iets verder ingezoomd. De contourlijnen geven duidelijk de vorm van de erosie aan. Bij beide zandlichamen is een lichte M-vormige kromming zichtbaar. Dit komt ook ongeveer overeen met de kromming die (minder sterk) bij de reguliere suppletie zichtbaar is (in bijlage B4.a). Bij het lager gelegen zandlichaam (noord), op -6, is aan de binnenkant van het zandlichaam zelfs enige sedimentatie te zien.



Figuur 3-1. Detail van de bathymetrie en de sedimentatie rond de gedifferentieerde onderwatersuppletie. De suppleties vertonen een lichte M-vormige kromming.

Voor de onderlinge vergelijking tussen de scenario's hebben we de bodemveranderingen van elkaar afgetrokken. Het resultaat is weergegeven in bijlage B5.a en b. Bij figuur a) zijn de globale patronen weergegeven, en in figuur b) zijn de resultaten ruimtelijk geïntegreerd over de balansvakken.

De eerste twee afbeeldingen in de figuren laten steeds het verschil zien tussen de suppletie-scenario's en het referentie scenario, de derde afbeelding laat het verschil zien tussen de suppletiescenario's onderling. Een positieve waarde in de figuren kan ofwel betekenen dat de sedimentatie is toegenomen, ofwel dat de erosie is afgenomen (en andersom voor een negatieve waarde).

De figuren laten het volgende zien:

- Bij beide scenario's hebben de suppleties een positief effect op het volume zand aan de kust, ten opzichte van de referentie situatie (te zien in de eerste twee afbeeldingen).
- Bij de ontwerpsuppletie strekt het invloedsgebied van de opening zich uit over een afstand van ongeveer 2 km kustlangs.
- In dit invloedsgebied zijn zowel positieve als negatieve invloeden zichtbaar (aangegeven met (A), respectievelijk (B) in figuur B5.a). Vooral aan de kust iets ten

noorden en zuiden van de openingen zijn potentiële negatieve invloeden zichtbaar (tussen raaien 4650 – 4700 en tussen 4850 – 4875).

- De ontwerpsuppletie heeft, ten opzichte van de reguliere suppletie, langs de kust afwisselend positieve en negatieve invloeden. De verschillen worden veroorzaakt door gradiënten in het langtransport. Dit patroon zal deels het gevolg zijn van de golfdoordringing- en refractiepatronen rond de zandlichamen van de gebruikte golfcondities. Een groter aantal golfhoogtes en –richtingen zou tot een meer afgevlakt resultaat kunnen leiden.
- De negatieve effecten zijn iets duidelijker achter de lagere suppletie (op NAP-6m ). Dit kan komen doordat de lagere suppletie ook iets minder bescherming biedt tegen hogere golven. Bovendien kunnen golven uit het zuidwesten iets makkelijker doordringen door het gat, vanwege de ongelijke afstand van de suppleties tot de kust.

De breedte van het invloedsgebied van het gat zal onder andere te maken hebben met de golfindringing- en refractiepatronen rond het gat. Bijlage B6 en B7 tonen het verschil in golfhoogtes van de twee suppletie scenario's ten opzichte van het referentie scenario bepaald, voor golven uit het noordwesten (B6) en golven uit het zuidwesten (B7). Hierin is het invloedsgebied van het gat duidelijk zichtbaar. Door de golfindringing door het gat heeft elke golfrichting een andere projectie aan de kust. De golfhoogteverschillen door refractie zijn beperkt, in de orde van centimeters.

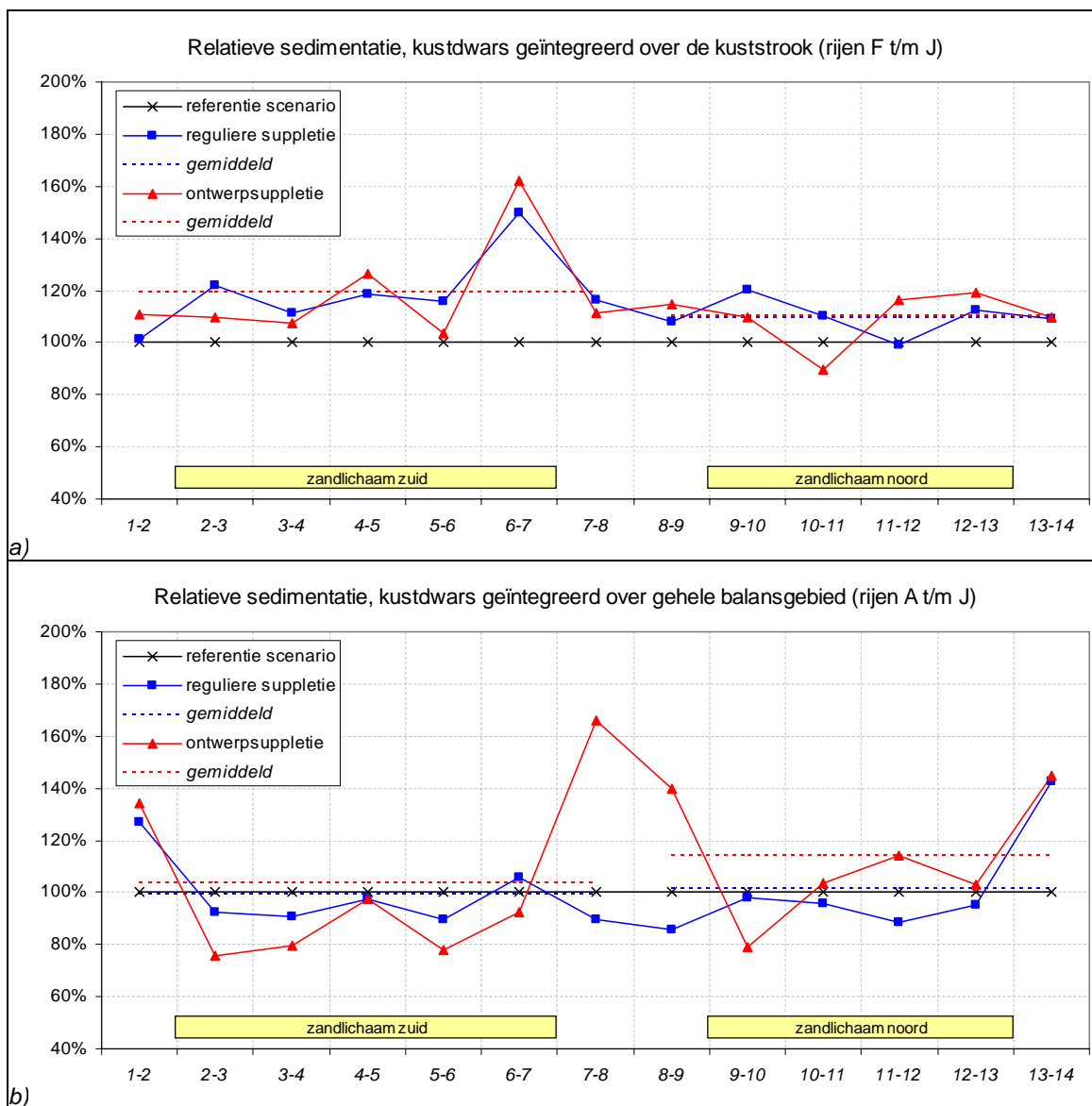
Ondanks de lokale verschillen met de reguliere suppletie, zijn er bij de ontwerpsuppletie op basis van deze resultaten nog geen significante negatieve, danwel positieve invloeden zichtbaar voor de kustzone.

## 3.2 Volumeveranderingen in kustzone

Om de hoeveelheid aanzanding in de kustzone te beoordelen, zijn de volumeveranderingen geïntegreerd over de eerste 3 (kustnabije) rijen met balansvakken. Dit gebied omvat grofweg de MKL-schijf. Op die manier krijgen we een overzicht van de kustlangse variaties in de aanzanding in het interessegebied. De volumeveranderingen ter plaatse van de zandlichamen geven grofweg aan hoeveel van het gesuppleerde zand er al is getransporteerd.

### 3.2.1 Vergelijking tussen ontwerpsuppletie en reguliere suppletie

Zie Figuur 3-2; afbeelding (a) laat de relatieve sedimentatie ten opzichte van het referentie scenario zien, kustdwars geïntegreerd over de kuststrook. De kuststrook beslaat de 3 kustnabije rijen (F t/m J). Bij afbeelding (b) is de relatieve sedimentatie kustdwars geïntegreerd over het gehele balansgebied (rijen A t/m J). De waarden zijn uitgezet tegen de kustlangse as (kolommen 1 t/m 14).



Figuur 3-2. De relatieve sedimentatie ten opzichte van het referentie scenario, kustdwars geïntegreerd over de kuststrook (a) en kustdwars geïntegreerd over het gehele balansgebied (b). De waarden zijn uitgezet tegen de kustlangse as (kolommen 1 t/m 14).

Met betrekking tot de sedimentatie aan de kust (afbeelding (a)) kunnen we het volgende zien:

- De toename in sedimentatie, varieert bij beide scenario's sterk met de kustlangse positie.
- Beide suppletiescenario's volgen hierbij globaal dezelfde trends, maar bij de ontwerpsuppletie zijn de variaties in het algemeen iets groter (afwisselend positieve / negatieve invloed)
- Aan de kust is geen duidelijke invloed te zien van eventuele kopeffecten van de ontwerpsuppletie, de variaties lijken vooral bepaald door lokale invloeden, zoals de bathymetrie van de brekerzone en het afvlakken van de binnenste brekerbank.
- gemiddeld over de hele kustzone neemt de sedimentatie bij beide scenario's vrijwel evenveel toe (met circa 19% in het zuiden en 10% in het noorden)

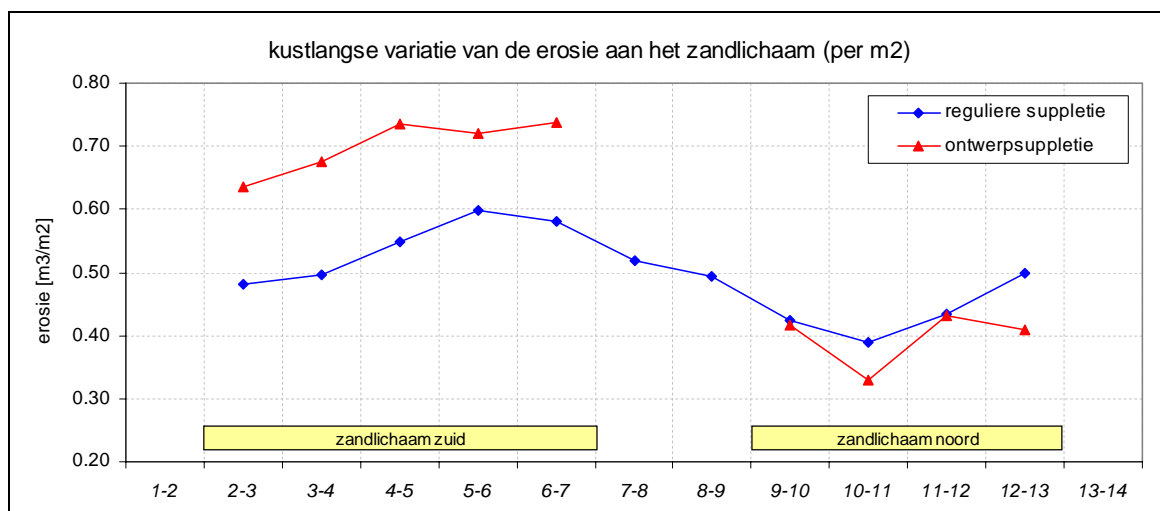
- ter plaatse van het gat is de sedimentatie aan de kust niet toegenomen ten opzichte van de reguliere suppletie

Met betrekking tot de sedimentatie in het gehele balansgebied (afbeelding (b)), zien we:

- Bij het ontwerpscenario is de sedimentatie ter hoogte van de opening sterk toegenomen. Dit komt vooral door de sterke sedimentatie in de opening zelf, zoals ook te zien is in bijlage B5.b. Het zand is dus (nog) niet ten gunste gekomen aan de kuststrook.
- In het zuiden is bij beide suppletiescenario's, ter hoogte van de zandlichamen, volume aan zand verdwenen ten opzichte van het referentie scenario. Dit is vooral het gevolg van het volumeverlies aan de zandlichamen zelf. Hierbij is het volumeverlies bij de ontwerpsuppletie groter dan bij de reguliere suppletie.
- In het noorden is bij de ontwerpsuppletie lokaal juist volume bijgekomen.

De volumeverandering (erosie) aan de zandlichamen is ook kustdwars geïntegreerd, over de breedte van de zandlichamen. Figuur 3-3, hieronder, laat het resultaat in langsrichting zien, per  $m^2$ . Hierin zien we dat:

- bij de ontwerpsuppletie de erosie aan het zuidelijke zandlichaam groter is dan bij de reguliere suppletie;
- de erosie aan het noordelijke zandlichaam van de ontwerpsuppletie juist licht is afgenomen ten opzichte van de reguliere suppletie.

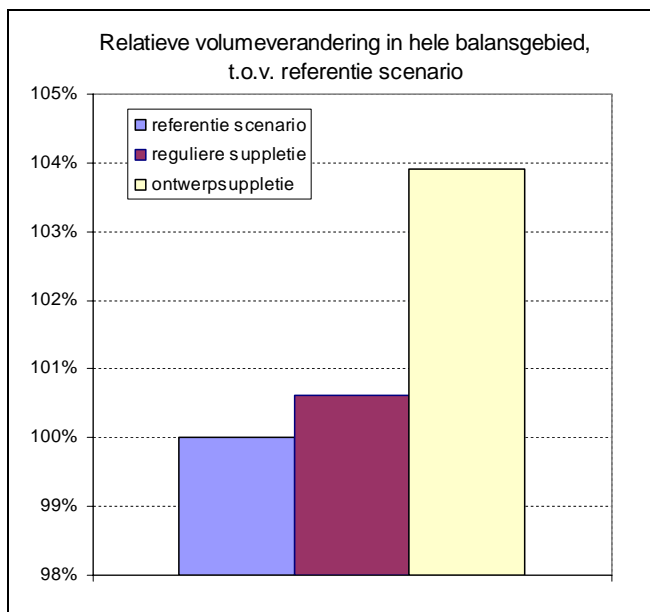


Figuur 3-3. De erosie (per  $m^2$ ) ter plaatse van de zandlichamen, kustdwars geïntegreerd.

Het valt dus op dat er aan het zuidelijke zandlichaam meer volume is verdwenen, terwijl er aan de kust in het zuiden niet meer sedimentatie is opgetreden dan bij de reguliere suppletie. Ook geïntegreerd over de kustnormaal was de totale sedimentatie afgenomen. Het extra geërodeerde zand van het zuidelijke zandlichaam zal in langsrichting zijn getransporteerd en deels hebben bijgedragen aan de sedimentatie in het noordelijke gebied (en verder).

Samenvattend, is er bij de ontwerpsuppletie globaal iets meer van het gesuppleerde zand weggespoeld, terwijl dit extra zand (nog) niet heeft bijgedragen aan de kuststrook. Op deze korte termijn was de ontwerpsuppletie dus niet effectiever dan de reguliere suppletie.

Om te beoordelen of dit zand buiten het interessegebied terecht is gekomen ('verloren is gegaan'), hebben we de totale volumeveranderingen binnen het hele balansgebied met elkaar vergeleken, zie het diagram in Figuur 3-4. Hieruit blijkt dat de ontwerpsuppletie in het *gehele* balansgebied wel tot een significante toename heeft geleid, vergeleken met de reguliere suppletie. Een deel van dit extra zand ligt na 6 maanden nog direct zeewaarts en landwaarts van de zandlichamen (en in het gat), maar het is mogelijk dat dit zand op de langere termijn alsnog extra bijdraagt aan de MKL-zone. In dat geval zal de ontwerpsuppletie uiteindelijk inderdaad effectiever zijn dan de reguliere suppletie.

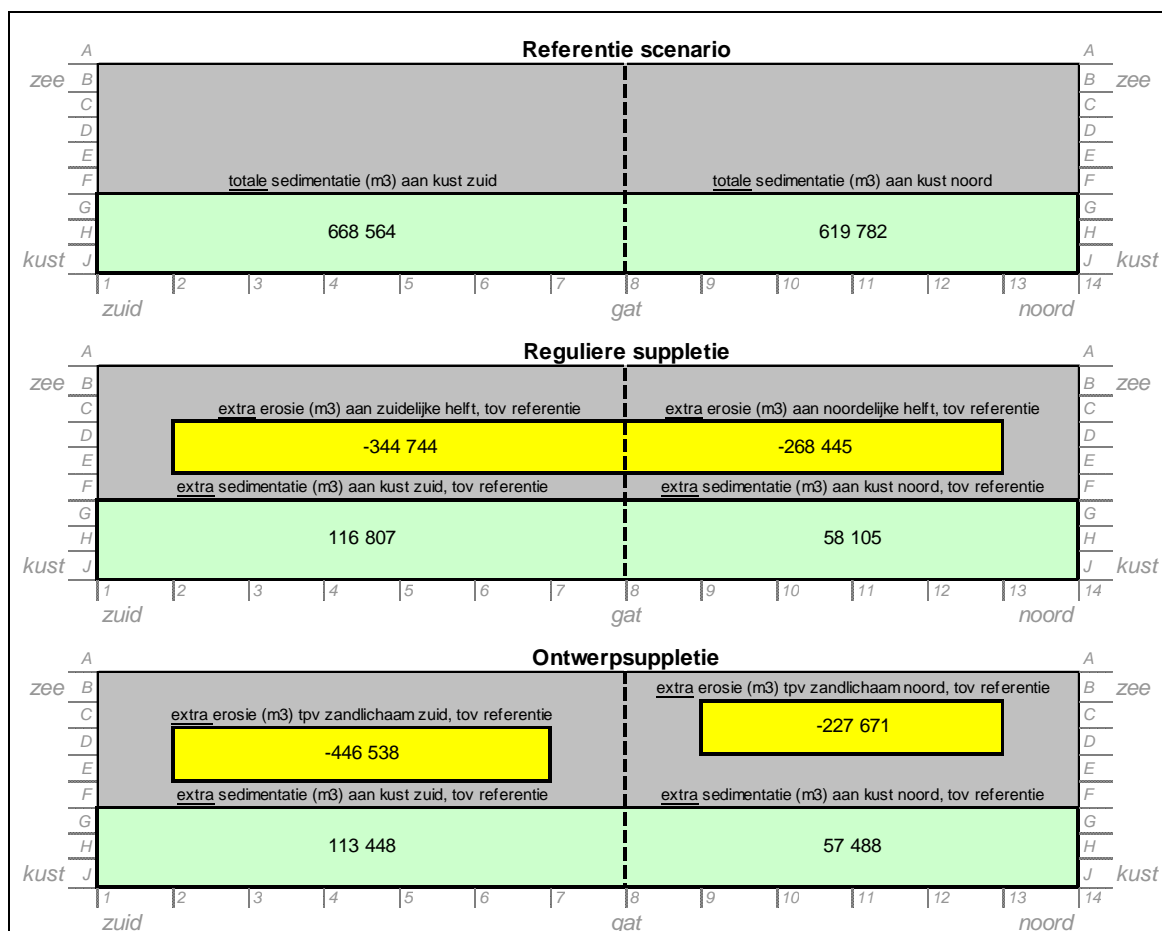


Figuur 3-4. Totale volumeveranderingen in het hele interessegebied, gerelateerd aan de totale volumeverandering bij het referentie scenario.

Het totale volume aan erosie van de zandlichamen (noord en zuid samen) is voor beide suppletiescenario's van dezelfde orde. De totale levensduur van de ontwerpsuppletie zal waarschijnlijk dus vergelijkbaar zijn met die van de reguliere suppletie.

### 3.2.2 Vergelijking tussen de zandlichamen op -5 en -6m

De toename in de sedimentatie aan de kust, ten opzichte van het referentie scenario, is geïntegreerd over een globaal balansgebied in het zuiden en een globaal balansgebied in het noorden, met de overgang ter hoogte van het gat. Ook het totale zandverlies aan de zandlichamen is bepaald. Bij de reguliere suppletie is hierbij eveneens onderscheid gemaakt tussen een zuidelijk en een noordelijk deel. Dit is gedaan om zo goed mogelijk de lokale effecten te kunnen onderscheiden van de effecten door het verschil in aanleghoogtes. De resultaten zijn ruimtelijk (schematisch) weergegeven in Figuur 3-5.



Figuur 3-5. Schematische weergave van de hoeveelheid extra erosie ter plaatse van het zandlichaam en de hoeveelheid extra sedimentatie in het gebied achter het zandlichaam, uitgesplitst voor noordelijke en zuidelijke balansgebieden.

Als we de resultaten van beide suppletie scenario's onderling vergelijken, zien we (voor de ontwerpsuppletie ten opzichte van de reguliere suppletie):

- in het zuidelijke balansgebied
  - er is meer van het gesuppleerde volume geërodeerd. Dit zou te maken kunnen hebben met de kopeffecten bij het gat.
  - de sedimentatie aan de kust is iets afgenomen. Dit zal onder andere het gevolg zijn van veranderingen in de gradiënten in het langstransport.
- in het noordelijke balansgebied
  - er is iets minder van het gesuppleerde volume geërodeerd. Mogelijk wordt hier de invloed van de extra kopeffecten (toename erosie) gecompenseerd door de lagere ligging van de suppletie (afname erosie).
  - de hoeveelheid sedimentatie aan de kust is ongeveer gelijk (lichte toename). Dit zand zal deels ook afkomstig zijn van de zuidelijke suppletie

Deze resultaten lijken te suggereren dat de suppletie op -6, zelfs in termen van volumes, effectiever zou zijn dan de reguliere suppletie. Maar dit beeld is iets vertekend, omdat een deel van het gesedimenteerde zand in het noorden ook afkomstig zal zijn van het zuidelijke zandlichaam. Door de ongelijke ligging van de zandlichamen en de opening ertussen, kunnen

bij de ontwerp-suppletie de gradiënten in het langstransport anders zijn dan bij de reguliere suppletie, waardoor het afzonderlijke effect van de zandlichamen moeilijk is af te leiden.

We moeten dus opmerken dat de aanwezigheid van overige invloeden het maken van een zuivere vergelijking tussen de verschillende aanleghoogtes complex maakt. (Deze invloeden kunnen onder andere zijn: lokale bodemverschillen, kustlangse zanduitwisseling, de invloed van de opening en interacties tussen de zandlichamen zelf.) De conclusies uit de hier gemaakte vergelijking zijn dus vooral indicatief.

Met deze beperking in het achterhoofd, kunnen we uit de resultaten van deze studie het volgende opmaken:

- Er erodeerde minder zand van het zandlichaam op -6m, vergeleken met de reguliere suppletie in hetzelfde gebied. Het verschil in de erosie was echter klein, maar dit komt mogelijk ook doordat bij het zandlichaam van de ontwerp-suppletie extra kopeffecten kunnen hebben meegespeeld, wat de erosie weer iets zou hebben bevorderd.
- Door de afname in de erosie zal de suppletie een langere levensduur hebben. Of dit een kostentechnisch voordeel oplevert, zal onder andere afhangen van het netto kustwaartse transport over de gehele levensduur van de suppletie. Het was in deze studie alleen niet goed mogelijk om het netto effect op de kust te onderscheiden van dat van het hogere zandlichaam. We kunnen daarom nog geen heldere uitspraken doen over de effectiviteit van de lagere suppletie.
- Voor een meer gedegen onderzoek naar het verschil in effectiviteit van suppleties met verschillende aanleghoogtes zijn andere berekeningen nodig, waarin andere invloeden zoveel mogelijk worden uitgesloten. Om de totale effectiviteit te kunnen relateren aan de verwachte levensduur, zou een langere periode doorgerekend moeten worden. Deze berekeningen vielen echter buiten de scope van deze opdracht.

### 3.3 Conclusies en discussie

#### 3.3.1 Met betrekking tot de opening en de kopeffecten

De volgende bevindingen kwamen tijdens de studie naar voren:

- De erosie was iets sterker ter plaatse van de koppen, waardoor een lichte kromming in de vorm van de zandlichamen zichtbaar was.
- Bij het zuidelijke zandlichaam nam de erosie (aan het zandlichaam zelf) toe, ten opzichte van de reguliere suppletie. Dit zou mogelijk een gevolg kunnen zijn van de kopeffecten.
- Bij het noordelijke zandlichaam nam de erosie (aan het zandlichaam zelf) af, ten opzichte van de reguliere suppletie. Dit valt te verklaren door de lagere aanleghoogte van het zandlichaam.
- In de opening zelf nam de sedimentatie toe, maar er was geen duidelijke toename te zien in de sedimentatie aan de kust achter de opening.
- Het invloedsgebied van de opening kan zich uitstrekken over ongeveer 2 km langs de kust, waar afwisselend positieve en negatieve invloeden zichtbaar zijn.
- De totale sedimentatie aan de kust van het interessegebied was nagenoeg gelijk aan dat van de reguliere suppletie. De ontwerp-suppletie lijkt hierdoor na 6 maanden dus niet effectiever dan de reguliere suppletie.
- De totale sedimentatie in het gehele (beschouwde) interessegebied is bij de ontwerp-suppletie wel significant toegenomen. Veel van dit extra zand ligt na 6 maanden



nog direct rondom de zandlichamen en in de opening. Als dit zand op langere termijn alsnog richting kust getransporteerd wordt, kan de ontwerpsuppletie uiteindelijk toch effectiever zijn dan de reguliere suppletie.

Opgemerkt moet worden dat de periode van de simulatie, met 6 maanden, relatief kort was. Aanvankelijk was besloten om een periode van 12 maanden door te rekenen, maar vanwege de te lange rekentijd is de periode ingekort tot 6 maanden. Hierdoor kunnen de waargenomen verschillen tussen de scenario's minder duidelijk zijn dan wanneer een heel jaar (of langer) was doorgerekend. Daar staat tegenover dat de morfologische veranderingen juist in het begin sneller zullen gaan dan na een half jaar.

Verder bleek het model niet goed in staat om het zandbankensysteem in stand te houden; de meeste sedimentatie is vooral ten gunste is gekomen aan het afvlakken van de binnenste brekerbank. Dit maakt het moeilijk om de voorspelde volumeveranderingen in deze zone één-op-één te koppelen aan de werkelijk te verwachten volumeveranderingen. Daarom hebben we in deze studie vooral gekeken naar de relatieve vergelijking tussen scenario's onderling.

De monitoring zal dus moeten uitwijzen dat de toename van erosie aan de koppen op de langere termijn ook daadwerkelijk leidt tot een toename van het zandvolume in de MKL-zone achter het gat. Aanbevelingen voor de monitoring komen aan bod in hoofdstuk 5.

### 3.3.2 Met betrekking tot de verschillende aanleghoogtes

In deze studie zagen we:

- Er erodeerde minder zand van het zandlichaam op -6m, vergeleken met de reguliere suppletie in hetzelfde gebied. Hierdoor zou het zandlichaam een langere levensduur kunnen hebben.
- De sedimentatie aan de kust achter het zandlichaam is nagenoeg gelijk aan dat van de reguliere suppletie. Het was bij het gekozen ontwerp alleen niet goed mogelijk om het netto effect op de kust te onderscheiden van dat van het hogere zandlichaam.

We kunnen daarom op basis van deze studie nog geen heldere uitspraken doen over de kosteneffectiviteit van de lagere suppletie. Een meer gedetailleerde studie naar de effectiviteit van suppleties op verschillende aanleghoogtes lijkt zinvol. Hierbij zou een langere periode doorgerekend moeten worden en zouden andere invloeden zoveel mogelijk moeten worden uitgesloten, door bijvoorbeeld te rekenen met een uniform profiel in langsrichting. Bovendien zijn modelaanpassingen nodig, zodat het bankengedrag beter kan worden gesimuleerd.



## 4 Zwemveiligheid

### 4.1 Beoordelen van de zwemveiligheid

Er bestaan momenteel nog geen officiële criteria voor het beoordelen van de zwemveiligheid. In een eerdere studie (Deltares, 2003) is een zeewaarts gerichte kustdwars-snelheid van 0.4 m/s aangehouden als criterium voor de zwemveiligheid. Bij de interpretatie van de resultaten is daarbij nog eens een veiligheidsmarge (of foutmarge) van 25% aangehouden, waardoor de gestelde limiet voor de zwemveiligheid uitkwam op een zeewaartse snelheid van 0.3 m/s. Anders dan in deze eerdere studie, betreft het huidige model een 3-D berekening en is (onder andere) wel rekening gehouden met het roller-effect (de aandrijvende kracht van de golven op de stroming). In de huidige studie hanteren wij hetzelfde criterium, maar de bovengenoemde foutmarge van 25% zal dus waarschijnlijk aan de conservatieve kant zijn.

Bij de beoordeling hebben we bovendien alleen gekeken naar de snelheden die optraden bij een momentane waterdiepte groter dan 0.5 m. (Hierbij dus wel rekening houdend met waterstandvariaties door het getij.)

Zoals in hoofdstuk 2 werd uitgelegd, is met twee verschillende golfcondities gerekend: een relatief schuin invallende golf ( $H_s$  0.99m, 355 °N) en dezelfde golf met een loodrechte hoek van inval (ca. 280 °N). Omdat de loodrecht invallende golf maatgevend bleek, tonen we hier alleen de resultaten van de berekeningen met deze golf.

### 4.2 Vergelijking van globale stromings- en golfpatronen

Allereerst bekijken we de globale stromingspatronen en golfpatronen die bij de verschillende scenario's optreden.

Bijlage C1, C2 en C3 tonen de stromingspatronen en snelheden bij maximale ebstroom, vloedstroom, respectievelijk laagwaterkentering, voor alle drie scenario's. Het linkerplaatje geeft telkens de snelheid in de bovenlaag van de waterkolom weer, het rechterplaatje toont de dieptegemiddelde snelheid. Hierin zien we dat, voor alle drie tijdstippen, de snelheden van de stroming rond de suppleties iets afwijken van de snelheden bij het referentie scenario. Maar in geen van de gevallen is een significante afbuiging van de stroming of toename van de dwarsstromen rond de suppleties zichtbaar.

Bijlage C4 toont de patronen van de golfhoogtes voor alle drie scenario's. Rondom de suppleties zijn (lichte) refractiepatronen zichtbaar, maar de verschillen zijn in de orde van centimeters. Dicht aan de kust, waar de meeste zwemmers zich bevinden, zijn de verschillen ten opzichte van het referentie scenario nihil.

Aan de hand van deze globale patronen is dus nog geen duidelijke toename van de risico's voor de zwemveiligheid te signaleren.

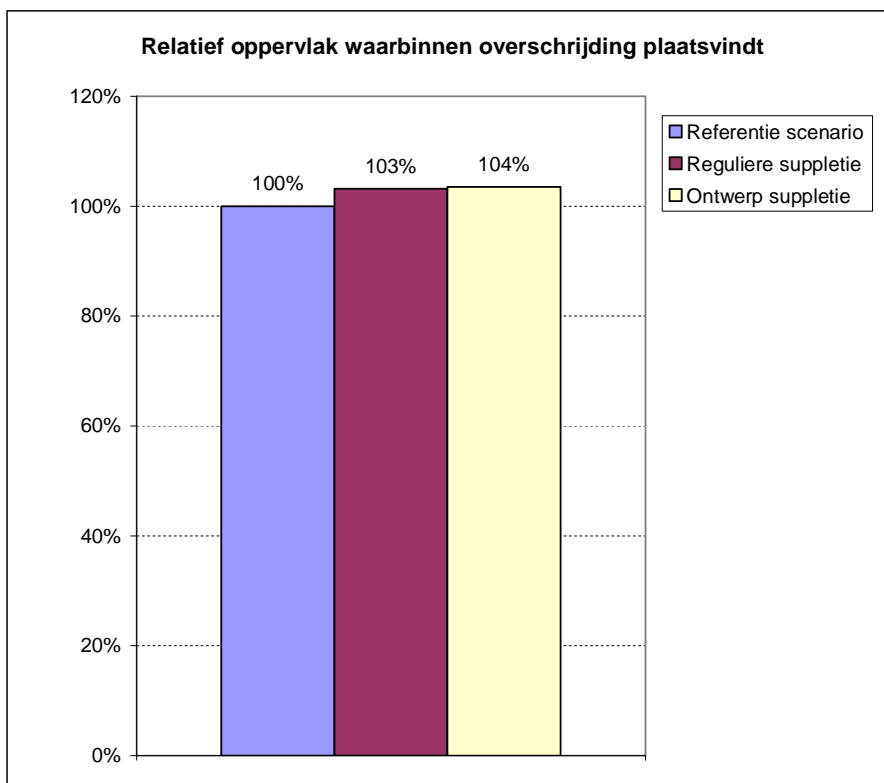
### 4.3 Vergelijking m.b.t. overschrijding van de kritieke dwarsstroming

Bijlagen C5.a-c tonen, respectievelijk voor elk scenario, de maximale zeewaartse dwarsstroming die optreedt gedurende een getijcyclus.

Voor een gedetailleerde vergelijking van de risico's voor zwemveiligheid, is in iedere gridcel de frequentie bepaald waarmee de dwarsnelheden de limiet van 0.3 m/s overschrijden. Dit is ruimtelijk weergegeven in bijlage C6.a-c, voor de snelheden bovenin de waterkolom (linker plaatje) en de dieptegemiddelde snelheden (rechter plaatje). Ook is de maximale aaneengesloten tijdsduur van de overschrijding bepaald, zie bijlage C7.a-c.

De figuren laten zien dat, bij alle scenario's, de overschrijding van de kritieke dwarsnelheid voornamelijk wordt bepaald door de lokale bathymetrie in de binnenste brekerzone (ongeveer tussen NAP en NAP-3m). De suppleties liggen veel verder uit de kust en rondom de suppleties blijven de dwarsnelheden veel lager dan 0.3 m/s.

Het kolomdiagram in Figuur 4-1 laat het totale oppervlak zien waar overschrijdingen plaatsvinden (binnen de grenzen van het model en gerelateerd aan het overschrijdingsoppervlak van het referentie scenario). Ook hieruit blijkt dat het verschil tussen de suppletie-scenario's en het referentie scenario beperkt is. De verschillen tussen de suppletie scenario's onderling zijn verwaarloosbaar.

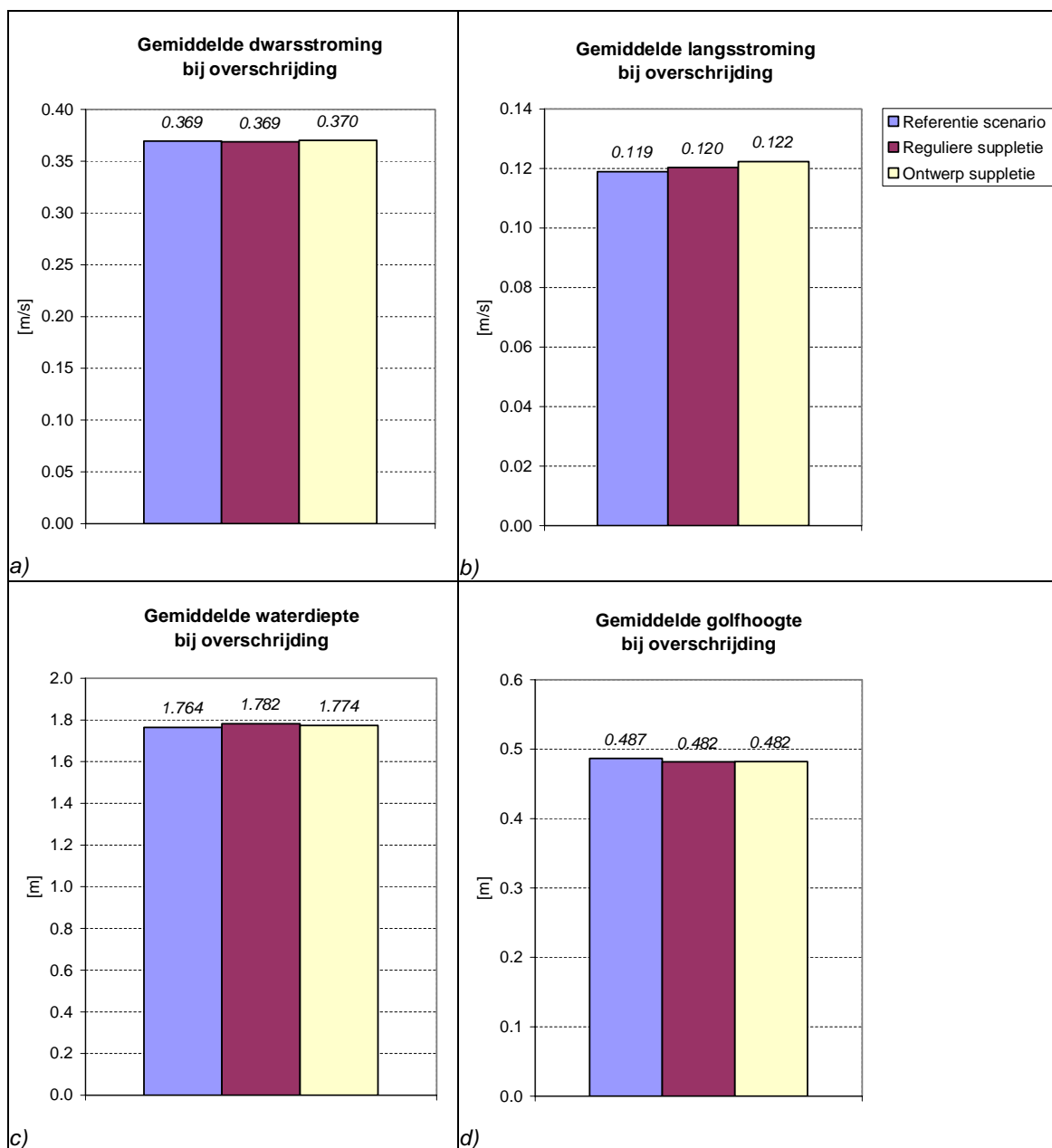


Figuur 4-1. Relatief oppervlak (binnen de grenzen van het model en gerelateerd aan het referentie scenario) waarbinnen overschrijding van de kritieke dwarsnelheid plaatsvindt.

#### 4.4 Vergelijking m.b.t. condities bij overschrijding

Ten slotte hebben we gekeken naar de condities die in een gridcel optreden op het moment dat de (dieptegemiddelde) kritieke dwarsnelheid in die cel wordt overschreden. De resultaten zijn weergegeven in de diagrammen in Figuur 4-2. We hebben hierbij gekeken naar:

- de dwarsstroming (diagram a);
- de langsstroming (diagram b);
- de waterdiepte (diagram c);
- de golfhoogte (diagram d);



Figuur 4-2. Vergelijking van de condities die gemiddeld optreden op het moment van overschrijding van de kritieke dwarsrsnelheid.

Voor alle beschouwde condities blijken de verschillen tussen de scenario's verwaarloosbaar. De ontwerpsuppletie leidt, wat betreft deze condities, dus niet tot een significante verslechtering van de zwemveiligheid.

## 4.5 Conclusies en discussie

Uit de huidige studie kwam naar voren:

- De stromingen die voor zwemmers mogelijk kritiek zouden kunnen zijn, worden voornamelijk bepaald door de lokale bathymetrie in de binnenste brekerzone. Aangezien de suppleties vlak buiten de buitenste brekerbank liggen, zal hun invloed op de zwemveiligheid dus minimaal zijn.
- De condities (stroomsnelheid, waterdiepte, golfhoogte) die gemiddeld optreden op het moment van overschrijding van de kritieke dwarsstroming, verschilden bij de gedifferentieerde onderwatersuppletie nauwelijks van die bij de reguliere suppletie of het referentie scenario.

Op basis van deze resultaten verwachten we daarom dat de gedifferentieerde onderwatersuppletie, ten opzichte van een reguliere onderwatersuppletie, zeer waarschijnlijk geen extra gevaar voor de zwemveiligheid zal opleveren.

### 4.5.1 Discussie

In de eerdere studie van 2003 is ook het effect bekeken van een afluende wind, omdat dit iets hogere zeewaartse snelheden bovenin de waterkolom zou kunnen opleveren. Uit de studie kwam echter naar voren dat het effect hiervan op de toename in dwarsnelheden en de tijdsduur verwaarloosbaar was. Daarbij moet wel worden opgemerkt dat deze eerdere studie een 2D-berekening betrof, waardoor de snelheden aan de oppervlakte iets onderschat zouden kunnen zijn. Toch valt, mede op basis van de huidige resultaten, te verwachten dat het totale effect van afluende wind op de zwemveiligheid voor alle scenario's ongeveer gelijk is. We verwachten daarom dat ook bij afluende wind de suppleties geen extra risico zouden vormen ten opzichte van de ongesuppleerde (referentie) situatie.

Verder is in deze studie ook alleen gekeken naar de stromingscondities voor de beginsituatie vlak na aanleg van de suppleties. Op dat moment is de verstoring van het profiel namelijk het grootst, en zijn de grootste veranderingen in de stromingspatronen te verwachten. Dit sluit alleen niet volledig uit dat de gedifferentieerde onderwatersuppletie, als gevolg van morfologische veranderingen in en rond het gat, eventueel ook in een later stadium nog tot een toename van de muistromen zou kunnen leiden, met de bijbehorende risico's voor de zwemveiligheid. Het is daarom van belang om de morfologische veranderingen en de stroomsnelheden in het gat goed te monitoren (met name vlak voor het zomerseizoen), zodat mogelijke negatieve ontwikkelingen op tijd kunnen worden geïdentificeerd. Aanbevelingen voor de monitoring komen aan bod in het volgende hoofdstuk.

## 5 Aanbevelingen voor monitoring

Dit hoofdstuk beschrijft een monitoringsstrategie, die is gericht op het vastleggen van: a) de morfologische ontwikkelingen van de suppletie, en b) de veranderingen in de hydrodynamica als gevolg van de aanleg van de suppletie. Een belangrijke opmerking hierbij is dat, waar modellen het mogelijk maken om verschillende scenario's in een gecontroleerde (model)omgeving met elkaar te vergelijken, de monitoring van een pilot met name alleen informatie oplevert over één specifiek scenario, op een specifieke locatie (en in een specifieke periode). Daar komt bij, dat er nog niet eerder een onderwatersuppletie in dit gebied is toegepast.

De effectiviteit van het ontwerp, in termen van sedimenttransport en morfologie, ten opzichte van een reguliere suppletie is daarom niet eenvoudig aan de hand van monitoring aan te tonen. Ook de afzonderlijke effectiviteit van het lager en het hoger gelegen zandlichaam is niet duidelijk aan te tonen, omdat langstransporten (en gradiënten) het verhinderen om de herkomst van het zand te achterhalen.

Het doel van de monitoring is daarom vooral gericht op het beheersen van de risico's, door de veranderingen in de morfologie en hydrodynamica te registreren, en hierop in te kunnen spelen in geval van negatieve ontwikkelingen. Verder kan validatie aan de hand van de veldwaarnemingen een zinvolle bijdrage leveren aan de verdere modelontwikkelingen. Dit kan de betrouwbaarheid en de nauwkeurigheid van de modellen vergroten, waarmee onzekerheden kunnen worden weggenomen bij toekomstige studies naar suppleties.

### 5.1 Aandachtspunten

Voor de evaluatie van de suppletie, en het beheersen van de mogelijke risico's, zou de monitoring in ieder geval aandacht moeten besteden aan de volgende punten. Voor de evaluatie van het gebruikte model worden de waarnemingen teruggekoppeld naar de modeluitkomsten.

Bij het monitoren van de morfologie zal vooral gekeken moeten worden naar:

- morfodynamiek rond de zandlichamen, met name:
  - de eventuele vervormingen ter plaatse van de koppen
  - de eventuele sedimentatie rondom de zandlichamen en ertussen
  - de afvlakking (en daarmee de levensduur) van de verschillende zandlichamen
- de morfodynamiek in de brandingszone, met name:
  - de invloed op het MKL volume in het gebied achter het gat
  - eventuele ontwikkelingen die de hydrodynamica (en daarmee de zwemveiligheid) negatief kunnen beïnvloeden
- de respons van de suppletie en de kust op een storm (bij voorkeur gemeten vóór en na de storm).

Bij het monitoren van de hydrodynamica zal vooral gekeken moeten worden naar:

- de hydrodynamica vóór de aanleg van de suppletie, en de veranderingen hierin als gevolg van de suppletie
- het signaleren en registreren van eventuele muistromen of kritieke dwarsstromingen

Ten slotte wordt opgemerkt dat, voor een goede correlatie tussen de gemeten hydrodynamica en morfologie, beiden het liefst tegelijkertijd worden gemeten.

## 5.2 Monitoringsplan voor de morfologie

Als startpunt voor de monitoring van de morfologie is een goede referentiemeting nodig. Bij voorkeur is dit:

- een vlakdekkende referentiemeting van het gebied, van zowel de onderwateroever als het strand (kustlangs, met een marge rondom de zandlichamen). Voor de onderwatermeting is dit bij voorkeur een multibeam opname, omdat het vlakdekkende informatie oplevert.
- een gebiedsdekkende uitloding van de baggeraar, waarbij behalve de gesuppleerde volumes ook de volledige onderwateroever wordt ingemeten.

Voor het volgen van de morfologische ontwikkelingen wordt een combinatie van verdichte Jarkus- en Jetski-metingen sterk aanbevolen (RWS, respectievelijk TU Delft / SHORE). Voor de nauwkeurigheid en betrouwbaarheid van de analyse (en de berekende volumeveranderingen), is een goede vergelijking van de beide opnamemethoden noodzakelijk. Hiervoor dienen minstens 1 keer (bij voorkeur 2 keer) de Jetski- en de verdichte Jarkus-metingen gelijktijdig en over dezelfde raaien te worden opgenomen.

### 5.2.1 Meten van de veranderingen op lange termijn (verdichte Jarkus-meting)

De verdichte Jarkus-meting (RWS) kan het beste worden ingezet bij het monitoren van grootschalige veranderingen op de langere termijn. Hiermee kunnen de volumeveranderingen in het gehele gesuppleerde gebied (met een zekere marge eromheen) gemeten worden.

Om voldoende informatiedichtheid te bereiken, dient de verdichte Jarkus-meting tweemaal per jaar en gedurende de levensduur van de suppletie (enkele jaren) te worden uitgevoerd. Het meten van de verdichte Jarkus op het strand kan worden gedaan met LIDAR of met dGPS. In tegenstelling tot dGPS is LIDAR in staat om het strand in 1 dag vlakdekkend te meten. Bovendien introduceert het gebruik van dGPS in combinatie met een quad weer een extra variabele in de data.

De duinvoet, die zowel van belang is voor de strandbreedte als voor de erosie van de duinen (en o.a. voor de aanleiding tot suppleren), is in het algemeen stabiel genoeg om met de verdichte Jarkus-meting gemonitord te kunnen worden. Het is daarom raadzaam om de Jarkus-meting tot en met de duinvoet door te laten lopen.

### 5.2.2 Meten van de veranderingen op korte termijn (Jetski-metingen)

De jetski-meting (TU Delft / SHORE) leent zich het beste voor het monitoren van kleinschalige veranderingen op de korte termijn. Hierbij valt te denken aan het meten van een regelmatig grid over de zandlichamen (met een zekere marge eromheen) en het gat daartussen. Het is zinvol om dit gebied vooraf af te kaderen, zodat de opnames ruimtelijk vergelijkbaar zijn. Dit kader kan later altijd worden uitgebreid, als dit door de ontwikkeling van de suppletie noodzakelijk blijkt.

Het is verstandig de Jetski-metingen qua tijd zoveel mogelijk tussen de Jarkus-metingen in te plannen, afgezien van de overlappende opname ten behoeve van de vergelijking tussen die twee. Voorgesteld wordt om de Jetski in te zetten als hydrodynamische grenswaarden zijn overschreden (en bij voorkeur zelfs ook vlak vóór de storm). De impact van een dergelijke gebeurtenis op de suppletie kan dan direct worden ingemeten.



### 5.2.3 Overige, optionele metingen

- Het meten van de gemiddelde laagwater- of gemiddelde hoogwaterlijn (bijvoorbeeld door TU Delft / SHORE) levert een zinvolle bijdrage aan de evaluatie van de stranbreedteontwikkeling. De lijnen geven ook een indicatie waar de erosie toeneemt en hoe dit zich bijvoorbeeld verhoudt tot de locatie van het gat. Deze metingen zouden gedurende 1 jaar maandelijks kunnen plaatsvinden.
- Continue metingen van de erosie-/ sedimentatie in het gat zou de onzekerheid over de risico's weg kunnen nemen. De technieken hiervoor zijn echter nog innovatief en zouden los van de reguliere monitoring besproken moeten worden.



Figuur 5-1. Jetski met RTK GPS en single-beam echosounder (links), Nortek AWAC (midden) en GPS drifters (rechts)

## 5.3 Monitoringsplan voor de hydrodynamica en de zwemveiligheid

De belangrijkste locatie om de hydrodynamica te meten is in en rond het gat, en eventueel ook rond de koppen van de suppletie.

### 5.3.1 Meten van de veranderingen op korte termijn

Voor de validatie van de hydrodynamische berekening is het belangrijk om de initiële veranderingen van de hydrodynamica, als gevolg van de suppletie, in de brandingszone te monitoren. Dit kan worden gedaan aan de hand van metingen vlak vóór en vlak na de aanleg van de suppletie, tijdens eb en vloed. Aangeraden wordt:

- driftermetingen (TU Delft / SHORE), voor de stromingen in de bovenlaag
- ADCP/AWAC metingen (RWS), voor de stromingen in de verticaal

### 5.3.2 Registreren van veranderingen op lange termijn

Verder wordt aanbevolen om het optreden van eventuele muien en hun positie door de reddingsbrigade te laten vastleggen, indien deze aanwezig is. Deze waarnemingen kunnen een globaal beeld geven van de ontwikkelingen in de hydrodynamica en de zwemveiligheid na verloop van tijd.

Daarnaast kunnen ze ook helpen bij het gericht inzetten van gedetailleerde metingen in een later stadium (ad hoc), bijvoorbeeld wanneer op een specifieke plek frequent muien worden waargenomen.

### 5.3.3 Overige, optionele metingen

Optioneel kan, voor en na aanleg van de suppletie, gedurende enkele weken een meetframe (bv HMS tripod, UU) worden ingezet. Het meetframe kan ook voor een bepaalde tijd worden ingezet op plaatsen waar frequent muien worden waargenomen. Het meetframe dient te zijn uitgerust met:

- Acoustic Sand Transport Meter (ASTM),
- enkele Electra Magnetic Flow Meters (EMF) op verschillende hoogte,
- een Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP),
- 2 pressure transducers inclusief batterij en dataopslag module.

### 5.4 Gekozen monitoringsplan

Op basis van (onder andere) de eerder verspreide informatie en aanbevelingen uit deze studie, heeft de Waterdienst een voorlopige monitoringsstrategie gekozen.

Tot en met 2013 zal tweejaarlijks een verdichte Jarkus meting worden uitgevoerd (in het voor- en najaar). Van 2014 tot en met 2016 zal eenmaal per jaar een verdichte Jarkus uitgevoerd worden.

Hierbij is, na overweging, ervoor gekozen om de metingen met de jetski vooralsnog niet mee te nemen. Vanwege de mogelijk interessante ontwikkelingen in het gat, zien Deltares en de Waterdienst vanuit een kennisperspectief wel meerwaarde in de jetski metingen. Deltares zoekt daarom uit of aanvullende monitoring met de jetski in samenwerking met de TU Delft haalbaar is. Deze zou dan kunnen plaatsvinden in de periode tot en met 2013.

Verder is ervoor gekozen om geen extra stromingsmetingen uit te voeren, omdat op basis van de resultaten uit deze studie geen extra risico's te verwachten zijn. Bovendien ligt het gat tegen de zandbank aan en lopen beide suppleties in dwarsrichting ook door tot aan de zandbank, wat het risico mogelijk verder verkleint. Daaraan wordt toegevoegd dat, indien toch negatieve effecten blijken op te treden, er besloten kan worden om het gat te dichten.

## 6 Eindconclusies

### 6.1 Met betrekking tot de prestaties van het model

Het 3-dimensionale Delft3D model bleek nog niet goed in staat om het zandbankensysteem te handhaven. Vooral de binnenste brekerbank vlakke vrijwel geheel af, wat de sedimentatie- en erosiepatronen in de kustzone sterk heeft beïnvloed (door mogelijke overschatting van de golfdoordringing tegen het einde van de simulatie). Dit heeft onder andere te maken met de state-of-the-art van de huidige modellen; er spelen in de brekerzone nog veel complexe processen een rol, die op dit moment nog niet voldoende in een model gesimuleerd kunnen worden.

Daarnaast is ook de mate van schematisatie van invloed op de nauwkeurigheid van de uitkomsten. Vooraf aan elke modelstudie worden belangrijke afwegingen gemaakt tussen de beschikbare middelen (tijd, budget) en het gewenste detailniveau en betrouwbaarheid van de uitkomsten, dat wordt bepaald door het doel van het onderzoek. Bij deze studie was het van belang dat de eerste resultaten al binnen twee maanden konden worden gecommuniceerd, wat om een pragmatische aanpak vroeg. Dit legde beperkingen op (onder andere) het aantal golfcondities dat kon worden doorgerekend, en liet tevens minder ruimte voor uitvoerige kalibratie van het model. Als gevolg hiervan neemt het detailniveau van de uitkomsten af en nemen de onzekerheden toe.

Om bovengenoemde redenen was het daarom niet mogelijk om voor de verschillende scenario's de exacte bodemligging na een bepaalde periode te bepalen. De studie kan echter wel bruikbare informatie opleveren over de relatieve (en globale) volumeveranderingen – en daarmee de effectiviteit – van het ene scenario ten opzichte van het andere.

### 6.2 Met betrekking tot de resultaten

#### 6.2.1 Morfologische ontwikkelingen

De belangrijkste bevindingen die uit deze studie naar voren kwamen, zijn – met betrekking tot de invloed van het gat en de mogelijke kopeffecten:

- Het invloedsgebied van het gat strekte zich uit over ongeveer 2 km langs de kust, waar afwisselend positieve en negatieve invloeden zichtbaar waren. Maar gemiddeld was er geen duidelijke toename te zien in de sedimentatie aan de kust direct achter de opening. In de opening zelf nam de sedimentatie wel duidelijk toe.
- Van het zuidelijke zandlichaam van de ontwerpsuppletie was meer volume geërodeerd dan bij het zuidelijke deel van de reguliere suppletie. Dit zou mogelijk een gevolg kunnen zijn van de kopeffecten. Bij het noordelijke zandlichaam erodeerde juist minder van het gesuppleerde zand dan bij de reguliere suppletie, maar dit valt te verklaren door de lagere aanleghoogte van het zandlichaam. Bij beide zandlichamen was de erosie iets sterker ter plaatse van de koppen, waardoor na 6 maanden een lichte kromming in de zandlichamen zichtbaar was.
- Geïntegreerd over de kustzone was geen significante toename in de sedimentatie te zien, ten opzichte van de reguliere suppletie. De ontwerpsuppletie lijkt hierdoor na 6 maanden dus niet effectiever dan de reguliere suppletie. Geïntegreerd over het gehele (beschouwde) interessegebied is het zandvolume echter wel significant toegenomen. Veel van dit extra zand ligt na 6 maanden nog vlak rondom de zandlichamen en in de

opening. Als een deel van dit zand op langere termijn alsnog richting kust getransporteerd wordt, kan de ontwerpsuppletie dus alsnog effectiever blijken dan de reguliere suppletie.

– en met betrekking tot de lagere aanleghoogte:

- Er erodeerde minder zand van het zandlichaam op -6m, vergeleken met de reguliere suppletie in hetzelfde gebied. De sedimentatie aan de kust achter het lagere zandlichaam was daarentegen nagenoeg gelijk aan dat van de reguliere suppletie. Maar vanwege de nabijheid en de interactie met het hogere zandlichaam in het zuiden, is het niet goed mogelijk om het netto effect op de kust te onderscheiden van dat van het hogere zandlichaam. Het in het noorden gesedimenteerde zand zal namelijk ook deels afkomstig zijn van het zuidelijke zandlichaam. We kunnen daarom op dit moment nog geen heldere uitspraken doen over de kosteneffectiviteit van de lagere suppletie.
- Een meer gedetailleerde studie naar de effectiviteit van suppleties op verschillende aanleghoogtes lijkt zinvol. Hierbij zou een langere periode doorgerekend moeten worden en zouden andere invloeden zoveel mogelijk moeten worden uitgesloten, door bijvoorbeeld te rekenen met een uniform profiel in langsrichting. Bovendien zijn modelaanpassingen nodig, zodat het bankengedrag beter kan worden gesimuleerd.

### 6.2.2 Zwemveiligheid

In deze studie kwam naar voren dat de stromingen, die voor zwemmers mogelijk kritiek zouden kunnen zijn, voornamelijk worden bepaald door de lokale bathymetrie in de binnenste brekerzone. De suppleties, die vlak buiten de buitenste brekerbank liggen, hadden daarom een minimale invloed op de zwemveiligheid.

Ook wat betreft de gemiddelde condities (stroomsnelheid, waterdiepte, golfhoogte) die tegelijk kunnen optreden bij een voor de zwemveiligheid kritieke stroming, leidde de gedifferentieerde onderwatersuppletie niet tot een significante verslechtering voor de zwemveiligheid, ten opzichte van een reguliere onderwatersuppletie.

Hierbij moet wel worden benadrukt dat in deze studie alleen is gekeken naar de stromingscondities in de beginsituatie vlak na aanleg van de suppleties, wanneer de verstoring van het profiel het grootst is. Dit sluit alleen niet volledig uit dat de gedifferentieerde onderwatersuppletie, als gevolg van morfologische veranderingen in en rond het gat, eventueel in een later stadium alsnog tot een toename van de muistromen zou kunnen leiden. Het is daarom van belang om de morfologische veranderingen in het gat goed te monitoren (met name vlak voor het zomerseizoen), zodat mogelijke negatieve ontwikkelingen op tijd kunnen worden geïdentificeerd. Indien daar indicaties voor zijn, kunnen vervolgens aanvullende monitoring van stroomsnelheden of modelsommen worden ingezet. In hoofdstuk 5 zijn hiervoor aanbevelingen gedaan.

### 6.3 Met betrekking tot de monitoring

Omdat het monitoren van een pilot met name alleen informatie over één specifiek scenario oplevert, is de effectiviteit van het ontwerp, in termen van sedimenttransport en morfologie, ten opzichte van een reguliere suppletie niet eenvoudig aan te tonen. Daar komt bij, dat er nog niet eerder een onderwatersuppletie in dit gebied is toegepast. Ook kan monitoring geen duidelijke informatie opleveren over de afzonderlijke effectiviteit van verschillende zandlichamen, omdat langstransporten (en gradiënten) het verhinderen om de herkomst van het zand te achterhalen.

Het doel van de monitoring is daarom vooral gericht op het beheersen van de risico's, door de veranderingen in de morfologie en hydrodynamica te registreren, en hierop in te kunnen

spelen in geval van negatieve ontwikkelingen. Verder levert validatie aan de hand van de veldwaarnemingen een zinvolle bijdrage aan de verdere modelontwikkelingen. Dit kan de betrouwbaarheid en de nauwkeurigheid van de modellen vergroten, waarmee onzekerheden kunnen worden weggelaten bij toekomstige studies naar suppleties.



## Literatuur

- Deltares, 2010. (A. Giardino; J. van der Werf; M. van Ormondt). Simulating Coastal Morphodynamics with Delft3D: case study Egmond aan Zee. Deltares rapport, 1200635.005
- Deltares, 2003. (D.J.W. Walstra, M.A.G. van der Helvert). Zwemveiligheid Megasuppletie Egmond. Deltares rapport, Z3485.
- Dobrochinski, J.P.H., 2009. Wave climate reduction and schematization for morphological modelling. MSc thesis, University of Itajaí, Brazil.
- Fockert, A. de, 2010. Wave look-up table for Building With Nature. Deltares Memo, 1002337-002-ZKS-001.
- Koster, L., 2006, Humplike nourishing of the shoreface: a study on more efficient nourishing of the shoreface. MSc thesis, TU Delft, Faculty of Civil Engineering and Geosciences.
- Lesser, G.R., 2009. An approach to medium-term coastal morphological modelling. Doctoral thesis, Unesco-IHE / TU Delft.
- Tonnon, P.K., 2010. Verdiepingsslag aanlegtechnieken. Deltares werkdocument, versie 1, april 2010.
- Tonnon, P.K., 2010. Advisering innovatieve suppletie Heemskerk. Deltares werkdocument, versie 1, juni 2010.
- Vonhögen, L., 2010, Terugmelding Quickscan Innovatieve Technieken voor Efficiencyverbetering, Deltares memo 15 maart 2010.

## Fotoverantwoording

Foto op kaft: Rijkswaterstaat, [www.kustfoto.nl](http://www.kustfoto.nl). "Oceaan, paalnummer 48", 2005





## **Bijlagen**

### **A Suppletie ontwerp**



## **B Figuren morfologische ontwikkeling**

- B.1 Overzicht interessegebied en indeling in balansvakken
- B.2 Initiële bodem en bodem na 6 maanden, map-plots
  - a. Referentie scenario
  - b. Reguliere suppletie
  - c. Ontwerpsuppletie
- B.3 Initiële bodem en bodem na 6 maanden, transect-plots
  - a. Referentie scenario
  - b. Reguliere suppletie
  - c. Ontwerpsuppletie
- B.4 Cumulatieve erosie en sedimentatie na 6 maanden
  - a. map-plots
  - b. balansvakken
- B.5 Verschillen in sedimentatie na 6 maanden
  - a. map plots
  - b. balansvakken
- B.6 Verschil in golfhoogtes ten opzichte van referentie scenario, golven uit het noordwesten
  - a. Reguliere suppletie
  - b. Ontwerpsuppletie
- B.7 Verschil in golfhoogtes ten opzichte van referentie scenario, golven uit het zuidwesten
  - a. Reguliere suppletie
  - b. Ontwerpsuppletie
- B.8 Netto transportpatronen
  - a. map-plots
  - b. relatief verschil in dwarstransport, geïntegreerd over balansvakken
  - c. relatief verschil in langstransport, geïntegreerd over balansvakken



## C Figuren zwemveiligheid

- C.1 Dieptegemiddelde snelheid en richting tijdens maximale ebstroming
  - a. Referentie scenario
  - b. Reguliere suppletie
  - c. Ontwerpsuppletie
- C.2 Dieptegemiddelde snelheid en richting tijdens maximale vloedstroming
  - a. Referentie scenario
  - b. Reguliere suppletie
  - c. Ontwerpsuppletie
- C.3 Dieptegemiddelde snelheid en richting tijdens laagwaterkentering
  - a. Referentie scenario
  - b. Reguliere suppletie
  - c. Ontwerpsuppletie
- C.4 Maximale golfhoogtes in kustnabije zone
- C.5 Maximale zeewaartse dwarsstroming over gehele getijcyclus
  - a. Referentie scenario
  - b. Reguliere suppletie
  - c. Ontwerpsuppletie
- C.6 Percentage van de tijd dat de zeewaartse dwarsstroming  $> 0.3$  m/s
  - a. Referentie scenario
  - b. Reguliere suppletie
  - c. Ontwerpsuppletie
- C.7 Aaneengesloten tijdsduur dat de zeewaartse dwarsstroming  $> 0.3$  m/s
  - a. Referentie scenario
  - b. Reguliere suppletie
  - c. Ontwerpsuppletie



## **D Voorafgaand onderzoek**

- D.1 Terugmelding quickscan Innovatieve Technieken voor Efficiencyverbetering
- D.2 Verdiepingsslag aanlegtechnieken
- D.3 Advisering Innovatieve Suppletie Heemskerk