

## **Verkenning Capaciteit Maasgeul**

J.G. de Ronde  
J.J. van der Werf  
A. Giardino  
S. van Heteren  
J.M. de Kok

**Titel**

Verkenning Capaciteit Maasgeul

**Opdrachtgever**

Rijkswaterstaat Waterdienst

**Project**

1200725-000

**Pagina's**

39

**Trefwoorden**

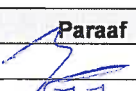



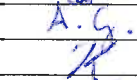
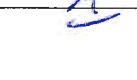

Maasgeul, zandwinning, sedimentsamenstelling, slibverspreiding en onderhoud geul

**Samenvatting**

Door het Havenbedrijf Rotterdam is geconstateerd dat steeds meer schepen gebruik moeten maken van de Maasgeul en dat dit op termijn (mede door aanleg MV2) tot vertragingen kan leiden. De Maasgeul is niet overal breed genoeg om twee (semi) geulgebonden elkaar te laten passeren. In deze studie zijn drie varianten voor verbreding onderzocht, een Noordvariant met een verbreding van 400 meter, een Tweestrooksvariant met aan weerszijden een verbreding van 100 meter en de zogenaamde MARIN variant met een verbreding aan de noordkant met ongeveer 100 tot 200 meter (totale breedte 820 meter). Onderzocht zijn het toekomstig geulonderhoud, de sedimentsamenstelling, de mogelijke slibverspreiding, het toekomstig geulonderhoud en het gebruik van het vrijkomende sediment. Het baggeronderhoud zal met maximaal 2 % toenemen. Het te verwijderen materiaal bevat naast zand veel klei, veen en leem en is nauwelijks voor suppleties te gebruiken. Voor de Maasvlakte is het wellicht wel te gebruiken als zetting en klink geen onoverkomelijke problemen geeft.

**Referenties**

Vaargeul, verbreding, sedimentsamenstelling, sedimenttransport, onderhoud

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
0.2	2009-06-02	J.G. de Ronde		L. C. van Rijn		T. Schilperoort	
		J.J. van der Werf					
		S. van Heteren					
		A. Giardino					
		J.M. de Kok					

**Status**

Definitief

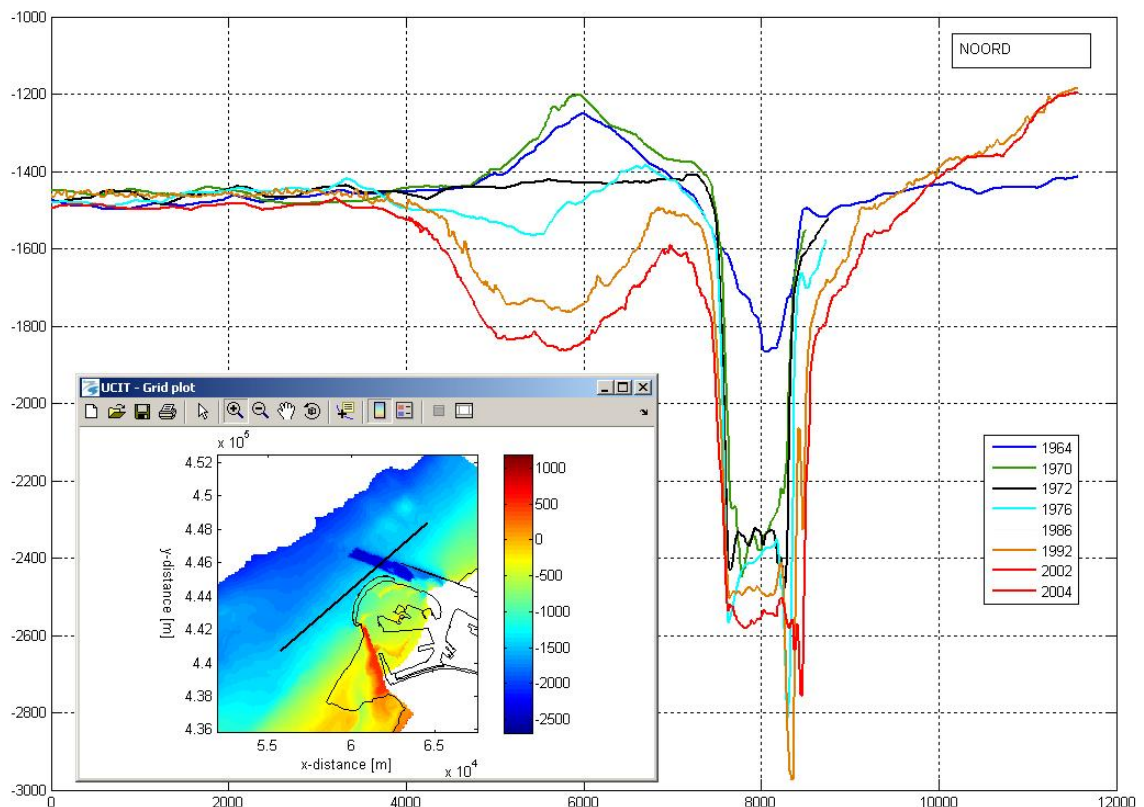
## Inhoud

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Sedimentsamenstelling randen Maasgeul</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Hergebruik te baggeren sediment</b>	<b>12</b>
<b>4</b>	<b>Slibverspreiding</b>	<b>13</b>
4.1	Verspreiding rondom de winning.	13
4.2	Verspreiding rondom de storting	14
<b>5</b>	<b>Sedimentatie Maasgeul</b>	<b>15</b>
5.1	Belangrijkste fysische processen	15
5.2	Aanzanding van de Maasgeul	15
<b>6</b>	<b>SED TUBE model Maasgeul</b>	<b>19</b>
6.1	Beschrijving van SED TUBE	19
6.2	Bodemschematisatie	19
6.3	Getijschematisatie	22
6.4	Golfschematisatie	23
6.5	Overige instellingen	24
<b>7</b>	<b>Effect varianten op volume onderhoudsbaggerwerkzaamheden</b>	<b>26</b>
7.1	Calibratie en validatie model	26
7.2	Beschrijving varianten	28
7.3	Invloed varianten op jaarlijks baggeronderhoud	29
<b>8</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>32</b>
<b>9</b>	<b>Referenties</b>	<b>34</b>
	<b>Bijlage(n)</b>	
<b>A</b>	<b>Appendix A Belangrijkste vergelijkingen SED TUBE model</b>	<b>35</b>
<b>B</b>	<b>Appendix B Richtingsafhankelijke golfgegevens afkomstig van het Europlatform voor de periode 1979-2001</b>	<b>36</b>

## 1 Inleiding

Door het Havenbedrijf Rotterdam is geconstateerd dat steeds meer schepen gebruik moeten maken van de Maasgeul en dat dit op termijn (mede door aanleg MV2) tot vertragingen kan leiden. De Maasgeul is niet overal breed genoeg om twee (semi) geulgebonden schepen elkaar te laten passeren. Ook een ontmoeting van een semi-geulschip met een geulgebonden schip is op dit moment uitgesloten. Hierdoor is volgens het Havenbedrijf binnen afzienbare tijd de vlotte en veilige vaart in het geding en treden er ontoelaatbare wachttijden op. Het Havenbedrijf heeft V&W gevraagd om een verkenning uit te voeren, welke wordt uitgevoerd door RWS Noordzee in opdracht van DGLM. In deze verkenning wordt de capaciteit van de Maasgeul inclusief mogelijkheden voor de verbetering hiervan beschouwd om te komen tot een besluit over het vervolgtraject (Planstudie). Hierbij zal op het vooronderzoek van het Havenbedrijf worden aangesloten, het zogeheten TBA-onderzoek. Uit dat onderzoek kwam naar voren dat de extra wachttijd voor de periode 2010 tot 2035, wanneer de Maasgeul niet wordt verbreed, in totaal 6.120 uur bedraagt. De totale wachttijd voor klasse 5 in de periode van 2010 tot en met 2035 met een verbrede Maasgeul is 7.340 uur. Indien de Maasgeul niet verbreed wordt, dan loopt deze wachttijd op tot 13.550.

Aan de hand van een dwarsdoorsnede (figuur 1.1) zijn de ontwikkelingen van de Maasgeul in de jaren na 1964 goed te onderkennen. In 1964 was er nog nauwelijks sprake van een geul.



Figuur 1.1 Dwarsdoorsneden Maasgeul 1964 - 2004

Over de periode 1970 – 2004 is de verdere verdieping van de geul van ongeveer 23 meter naar ruim 25 meter goed te zien. De noord en zuid rand zijn in de loop van de tijd behoorlijk geërodeerd. Ook de ontwikkeling van de erosiekuil voor de Maasvlakte is duidelijk zichtbaar van ongeveer 0,5 meter in 1976 (-15 m NAP) tot ongeveer een 3,5 meter in 2004 (-18,5 m NAP).

## Vraagstelling

Ten aanzien van een mogelijke verbreding van de Maasgeul heeft RWS twee morfologische vragen.

### 1. Kwaliteit bodemmateriaal

Het Havenbedrijf wil het zand dat bij de verbreding/verdieping uit de Euro-Maasgeul wordt gehaald, graag gebruiken t.b.v. de aanleg van Maasvlakte 2. Dit stelt bepaalde voorwaarden aan de kwaliteit van het bodemmateriaal dat opgebaggerd wordt. De vraag is:

- Wat is de samenstelling (korreldiameter) van het aanwezige zand op de locatie waar de verbreding / verdieping van de Euro-Maasgeul voorzien is?
- Is dit zand geschikt om te worden gebruikt voor aanleg MV2 of voor kustsuppleties?
- Zo niet, waar kan het materiaal dan het beste worden afgezet (stortlocatie, commerciële doeleinden)?

### 2. Raming van het toekomstige jaarlijks beheer&onderhoud van een verbrede Maasgeul

Er is een reële kans dat na de verbreding – om de geul op diepte te houden - er jaarlijks meer zand uit de geul moet worden gehaald in vergelijking met de huidige situatie. De vraag is inzichtelijk te maken wat het effect van een gewijzigde dimensionering van de Maasgeul is op de jaarlijkse onderhoudsbehoefte. Dit moet gedaan worden voor 3 gevallen:

- De 2 ontwerpen waarmee het Havenbedrijf in hun eigen onderzoek gerekend hebben:
  - Noordstrook-variant: verbreding geul aan de noordzijde met een strook met breedte van 400 m, lengte van ca. 5,5 km (beginnend 500 meter buiten de havendammen). Het aanlegniveau is -22,5 m MV (middenstandsvlak), opgebouwd uit een nautisch gegarandeerde diepte van 21,8 m beneden MV plus een bagger marge van 0,7 m. Dit correspondeert met een aanlegniveau van -22,5 m MV of -22,41 m NAP (MV = NAP + 0.09 m). De schatting van het baggervolume bij aanleg is 6,5 Mm<sup>3</sup>.
  - Tweestrooks variant met een verbreding van 100 m aan de noordkant en van 100 m aan de zuidkant met een lengte van ongeveer 5,5 km en met dezelfde diepte als de Noordstrook variant. De schatting van het baggervolume bij aanleg is 3,6 Mm<sup>3</sup>.
- MARIN variant. Een totale geulbreedte van 820 m met een diepte van 22,5 m beneden MV over de eerste 6 km van de geul. Eventuele verbreding van de

- geul moet aan de noordzijde plaatsvinden. Ruwe schatting van het baggervolume bij aanleg is  $0,7 \text{ Mm}^3$

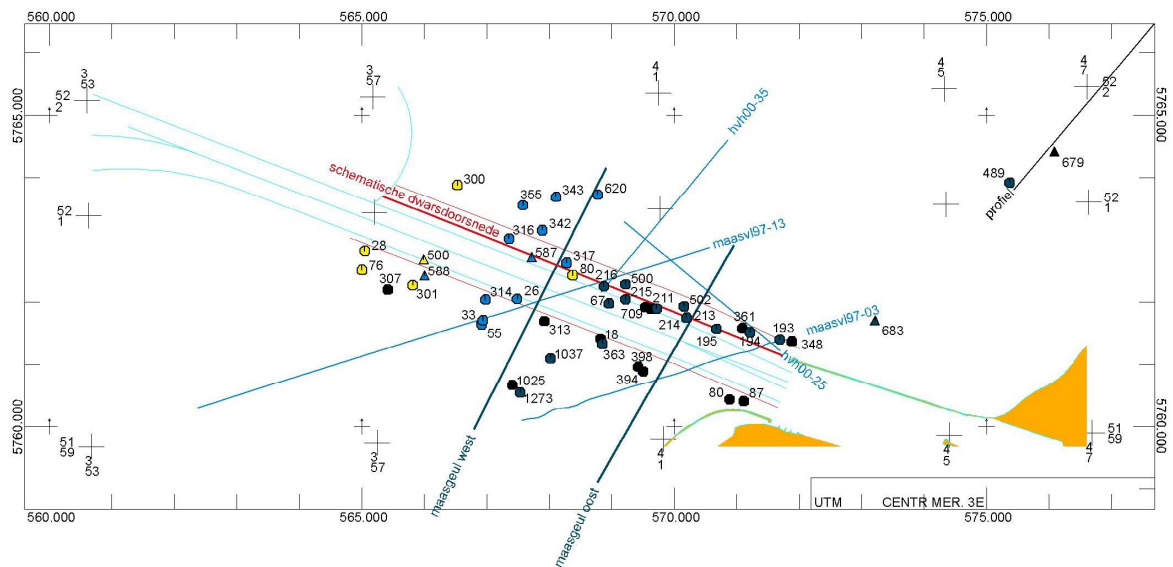
In het voorliggende rapport zullen deze vragen beantwoord worden en zal tevens eerder onderzoek naar de sedimentatie in de Maasgeul samengevat en meegenomen worden, alsmede een verklaring gegeven worden van de betreffende fysische processen en van de verandering in sedimentatie veroorzaakt door de verbreding.

Ten slotte zal op basis van expert judgement een inschatting gegeven worden van de slibverspreiding en de veranderingen in de slibconcentraties.

## 2 Sedimentsamenstelling randen Maasgeul

### Opbouw van de ondiepe ondergrond

De opbouw van de ondiepe ondergrond ter plaatse van de geplande vaargeulverbreding is bepaald aan de hand van boorbeschrijvingen en seismische profielen uit het databestand van Deltares Utrecht (Figuur 1). Daarnaast is gebruik gemaakt van eerder onderzoek in de regio (Van Heteren et al., 2002; Hijma et al., 2009).



*Figuur 1. Locatie van gebruikte boringen (zwarte punten: boringen met veen; donkerblauwe punten: boringen met klei (al dan niet met zandlaagjes); lichtblauwe punten: zand met (enkele) kleilaagjes; gele punten: zand), seismische lijnen (lichtblauwe lijnen), geologisch dwarsprofiel (zwarte lijn) en bathymetrische dwarsdoersneden door de Maasgeul (donkerblauwe lijnen).*

#### *Regionale geologische opbouw*

De ondiepe ondergrond in de regio bestaat uit negen eenheden. Aan de basis ligt een dikke laag fijn tot grof zand (150-600  $\mu\text{m}$ ) met lokale grind- en leemlagen (unit 1 in Figuur 2). Het zand is scheefgelaagd en bevat vrijwel geen schelpen. Organisch materiaal is alleen in de leemlagen aangetroffen. Deze kenmerken wijzen erop dat het zand door een rivier is afgezet, voordat de zee het gebied overstroomde. Op dit rivierzand liggen her en der fijne, goed gesorteerde zanden (105-210  $\mu\text{m}$ ) met een maximum dikte van een paar meter (unit 2 in Figuur 2). De top van deze eenheid is licht golvend en bevat wortelresten. Het gaat om sediment dat aan het eind van de laatste ijstijd door de wind is afgezet. Gedrapeerd op het rivierzand ligt een discontinue, dunne leemlaag (unit 3 in Figuur 2) met een of meer bodems. Deze eenheid is gevormd door periodieke overstrooming van een rivierlakte bij hoge afvoer, na het einde van de laatste ijstijd.

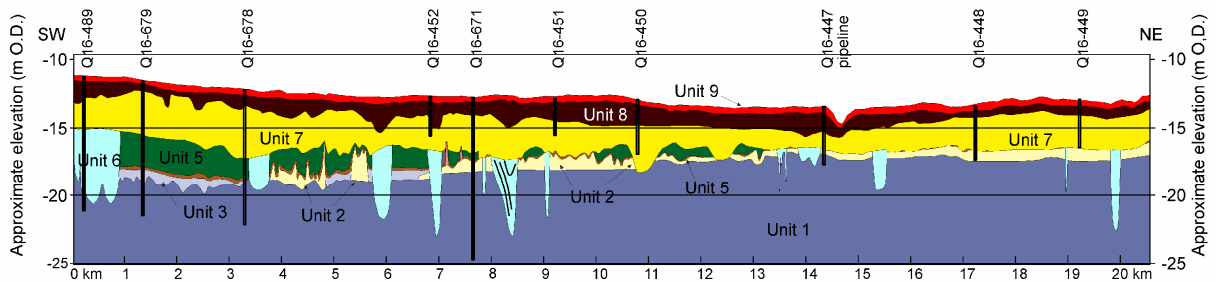
Eenheden 2 en 3 zijn over grote oppervlaktes bedekt met een dunne laag veen (unit 4 in Figuur 2). Dit veen vormde zich toen door de stijgende zeespiegel het grondwater in het gebied ook omhoog kwam. Vernatting leidde tot moerasvorming. In het veen komen vooral

veel houtresten voor. Waar eenheid 4 niet is geërodeerd, is hij bedekt door een enkele meters dik pakket klei (unit 5 in Figuur 2) dat veenbrokken, verspoeld organisch materiaal en wat zoetwaterschelpen bevat. Deze klei is ongeveer 8000 jaar geleden gevormd in een lagune waarin de toenmalige Rijn uitmondde.

Bovenstaande eenheden zijn ingesneden door geulopvullingen (unit 6 in Figuur 2) die bestaan uit een afwisseling van fijn tot middelgrof zand (105-300  $\mu\text{m}$ ) and slib (fractie fijner dan 63  $\mu\text{m}$ ). Het aandeel slib neemt zeewaarts af. De schelpenfauna wijst op vorming in een getijbekken, te vergelijken met de huidige Waddenzee. De betreffende getijgeulen reikten tot meer dan 30 meter onder gemiddeld zeeniveau, waren lokaal meer dan een kilometer breed en vulden zich tussen 8000 en 7000 jaar geleden met sediment.

Een erosievlak scheidt deze oudere afzettingen van open mariene eenheden (units 7 en 8 in Figuur 2). Dit erosievlak is het gevolg van het feit dat de kust zich voortdurend terugtrok en de zee daarbij de oudere lagen erodeerde. De mariene afzettingen vormden zich tussen 6500 en 4000 jaar geleden op de lage vooroever. Ze bestaan uit fijn tot middelgrof zand (150-300  $\mu\text{m}$ ) met schelpenlagen, weinig klei en lokaal verspoeld organisch materiaal.

Helemaal aan de top bevindt zich een dunne laag schelpenrijk zand (300-600  $\mu\text{m}$ ) dat voortdurend door getij- en golfwerking wordt omgewerkt in de huidige Noordzee (unit 9 in Figuur 2). Eenheden 2, 7 en 8 ontbreken ter plaatse van de geplande vaargeulverbreding.

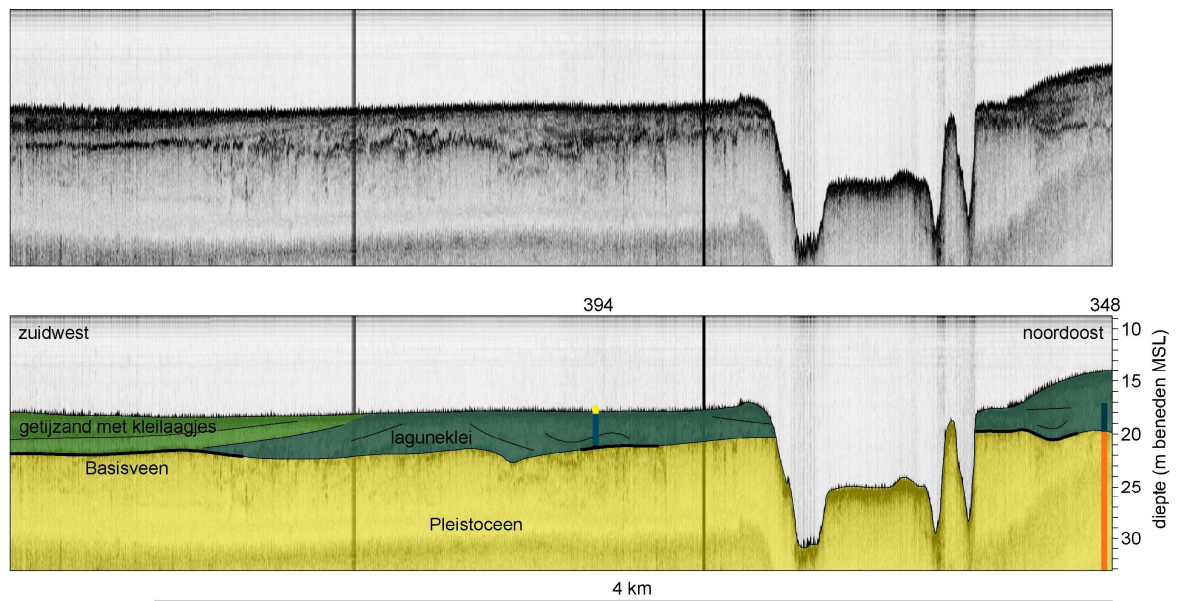


*Figuur 2. Regionale geologische opbouw. De locatie van dit dwarsprofiel is weergegeven in Figuur 1).*

#### *Ondergrond ter plaatse van de geplande vaargeulverbreding*

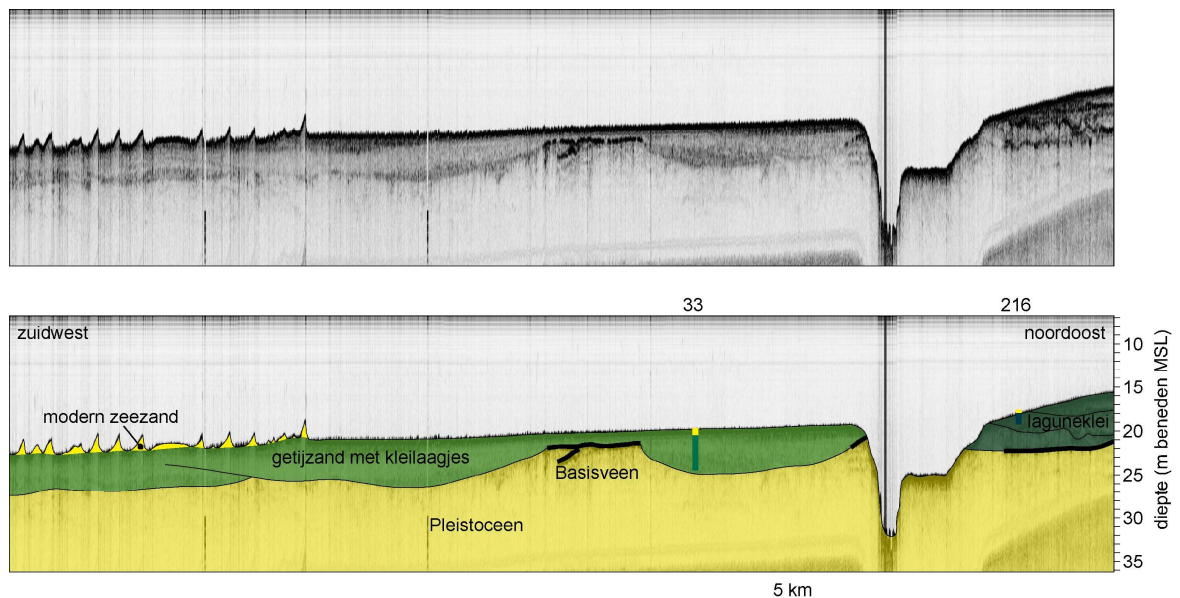
Een overzicht van de opbouw van de ondiepe ondergrond nabij de Maasgeul is gegeven in vier seismische profielen (Figuren 3 t/m 6). Dichtbij de havenhoofden bestaan de bovenste 3 tot 5 meter uit Holocene afzettingen (Figuur 3), voornamelijk behorende tot de bovengenoemde eenheden 3, 4, en 5. Stevige lagunaire klei met plantenresten en lokaal dunne zandlaagjes (eenheid 5) komt het meeste voor en is plaatselijk meer dan 3 meter dik. Daaronder bevindt zich op veel plaatsen een dunne veenlaag (eenheid 4, maximaal een halve meter), en daar weer onder is op enkele locaties een leemlaag (eenheid 3) aangetroffen.



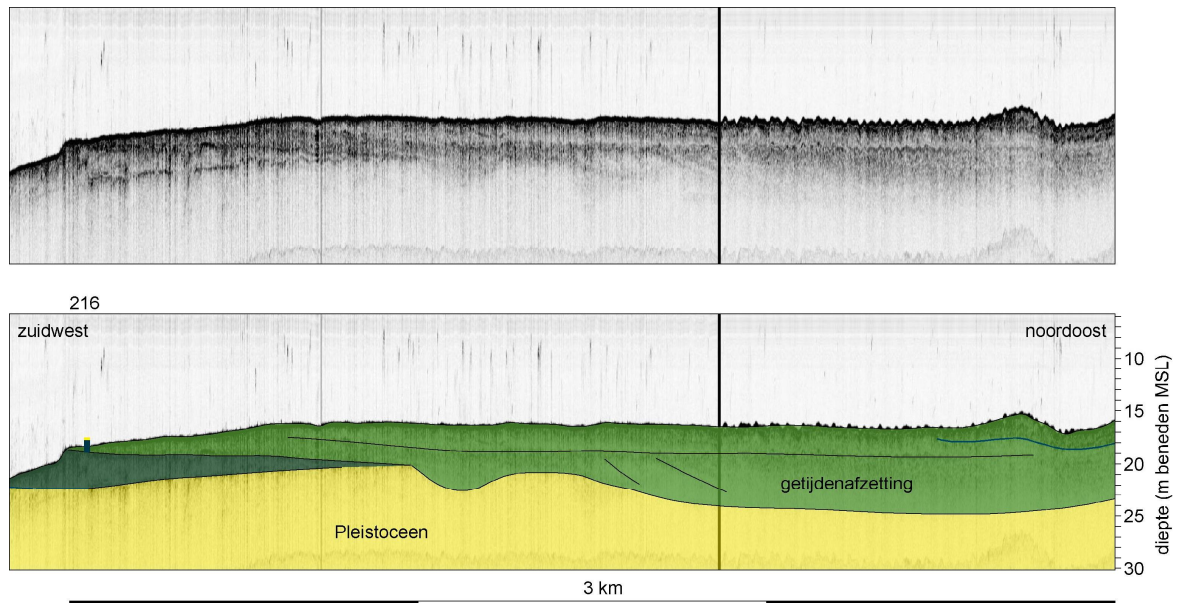


*Figuur 3. Kustlangs seismisch profiel maasvl97-03. Het met Basisveen bedekte Pleistocene oppervlak is hier op veel plaatsen nog intact. Boorlocaties 348 en 394 zijn op het profiel aangegeven. De top van de boringen bevindt zich niet op het huidige zeebodemoppervlak, deels omdat de locaties zich op 100 tot 200 meter van het profiel bevinden en deels omdat de bodemligging is veranderd sinds de boringen zijn gezet. De verticale zwarte lijnen zijn het gevolg van digitale databewerking en hebben geen sedimentologische betekenis.*

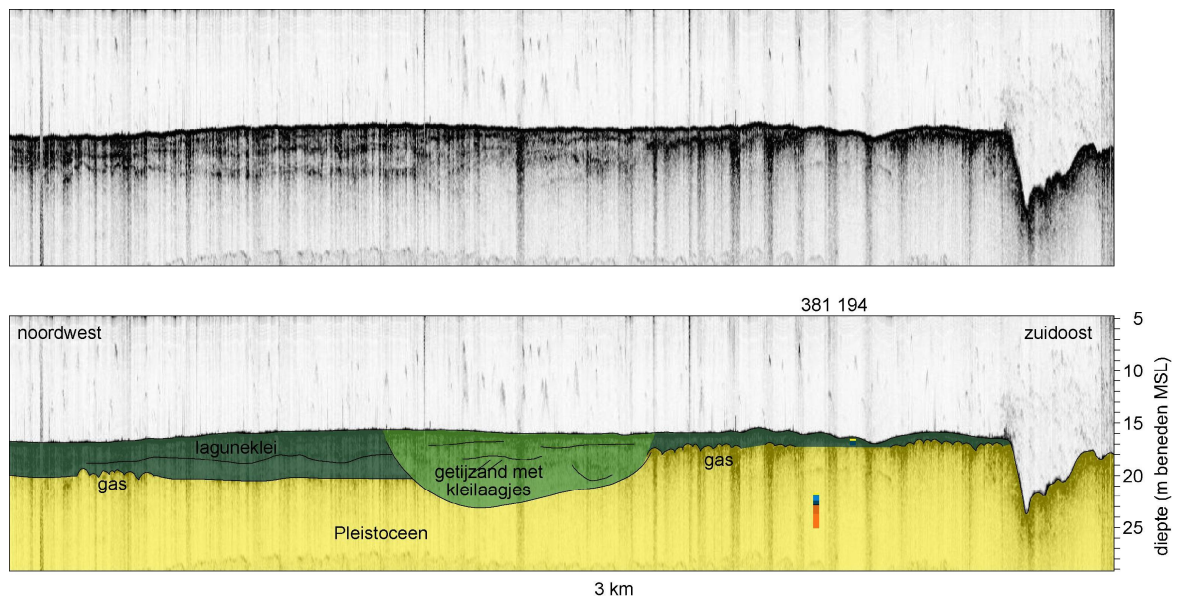
Verder van de havenhoofden is veel van het Basisveen (eenheid 4) en de bovenliggende lagunaire klei (eenheid 5) verdwenen door latere erosie (Figuur 4 en 5). Hier zijn de getijdenafzettingen zandiger (fijn tot middelgrof, 105-300  $\mu\text{m}$ ), met slib, een enkel kleilaagje en verspoeld veen. De dikte varieert van 1 tot 5 meter.



*Figuur 4. Kustlangs seismisch profiel maasvl97-13. Het met Basisveen bedekte Pleistocene oppervlak is hier op veel plaatsen geërodeerd door migrerende getijgeulen. Aan de noordkant van de Maasgeul bevindt zich nog wel een dikke laag lagunaire klei. Boorlocaties 33 en 216 zijn op het profiel aangegeven.*



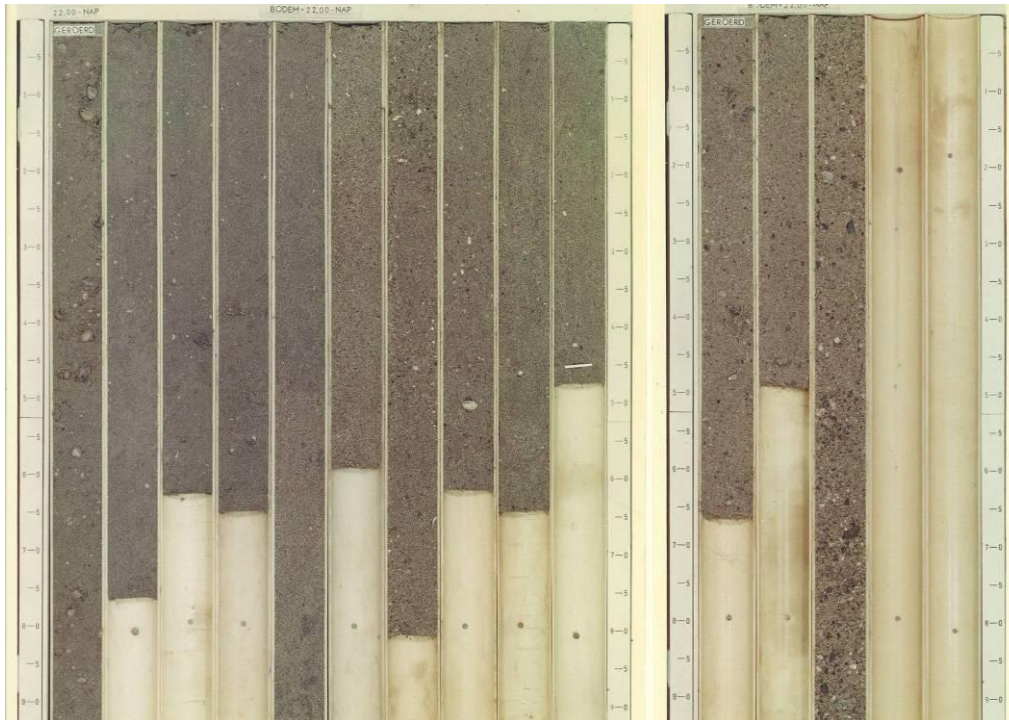
Figuur 5. Kustlangs seismisch profiel hvh00-35. Alleen nabij de Maasgeul, in het zuidwesten, bevindt zich nog een laag lagunaire klei. Elders komen tot 8 meter dikke geulafzettingen voor die in verschillende fasen zijn afgezet. Deze fasen zijn van elkaar gescheiden door erosievlakken. Boorlocatie 216 is op het profiel aangegeven.



Figuur 6. Kustdwars seismisch profiel hvh00-25. Nabij de havenhoofden maskeert ondiep gas de onderliggende lagen. Verder zeewaarts doorsnijdt een getijgeulopvulling een 3 tot 5 meter dikke laag lagunaire klei. Boorlocaties 194 en 381 zijn op het profiel aangegeven.

*Sedimentsamenstelling en bijbehorende verbreiding*

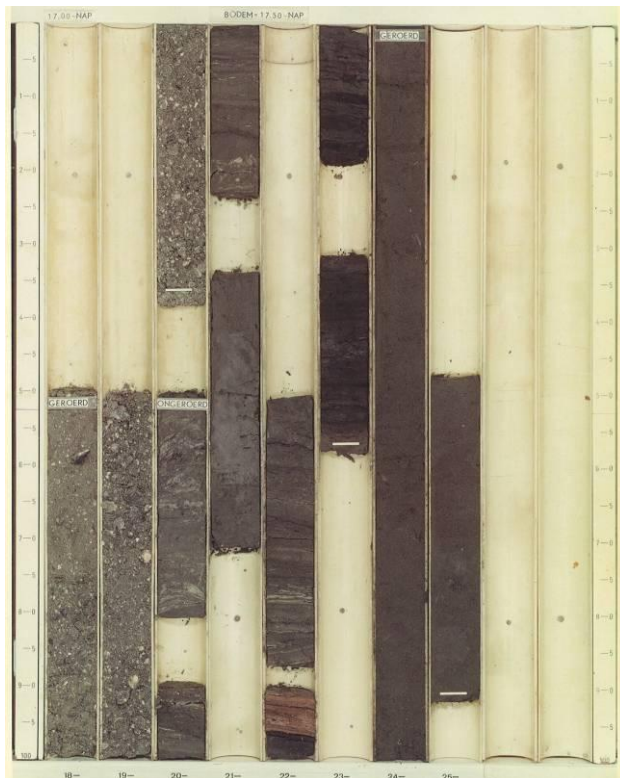
Het Pleistocene zand (eenheid 1) is middelgrof tot grof (200-340  $\mu\text{m}$ ) en bevat 2-17 % slib (gemiddeld 5%). Lokaal komt wat fijn tot middelgrof grind voor. Het zand wordt met de diepte grover en minder slibrijk (Figuur 7). De top ligt tussen de 20 (waar niet geërodeerd) en 25 meter onder NAP. De basis ligt beneden de bodem van de huidige Maasgeul.



*Figuur 7. Boring P18-28. Een dunne laag schelpenrijk zeezand ligt op fijn tot middelgrof rivierzand dat met de diepte grover en grindrijker wordt.*

De rivierleem (eenheid 3) bevat ongeveer 50% slib en is doorworteld. Er is onvoldoende informatie om de verbreiding goed in kaart te kunnen brengen. De maximale dikte is enkele meters. De top ligt tussen de 19 en 23 meter onder NAP.

Het Basisveen (eenheid 4) bevat veel hout en is lokaal gelaagd en kleilig (Figuur 8). Het is niet meer dan 0,75 meter dik. De top ligt tussen de 18 (kustnabij) en 22 meter (verder zeewaarts) onder NAP.



*Figuur 8. Boring T1-18. Meters 21, 22 en 23 bevatten lagunaire klei met hout op Basisveen. Het Pleistocene zand onder het Basisveen is relatief fijn.*

De stugge lagunaire klei (eenheid 5) bevat veenbrokken, verspoeld en *in situ* organisch materiaal (hout en riet) en wat zoetwaterschelpen (Figuur 8). Het merendeel van het sediment bestaat uit materiaal fijner dan 63  $\mu\text{m}$ . De dikte van deze eenheid is maximaal 5 meter (oosten) en neemt naar het westen toe af. Ongeveer 3 kilometer buiten de havenhoofden is de klei volledig geërodeerd. De top ligt tussen de 14 (kustnabij) en 19 meter (verder zeewaarts) onder NAP, de basis tussen de 18 en 22 meter onder NAP.

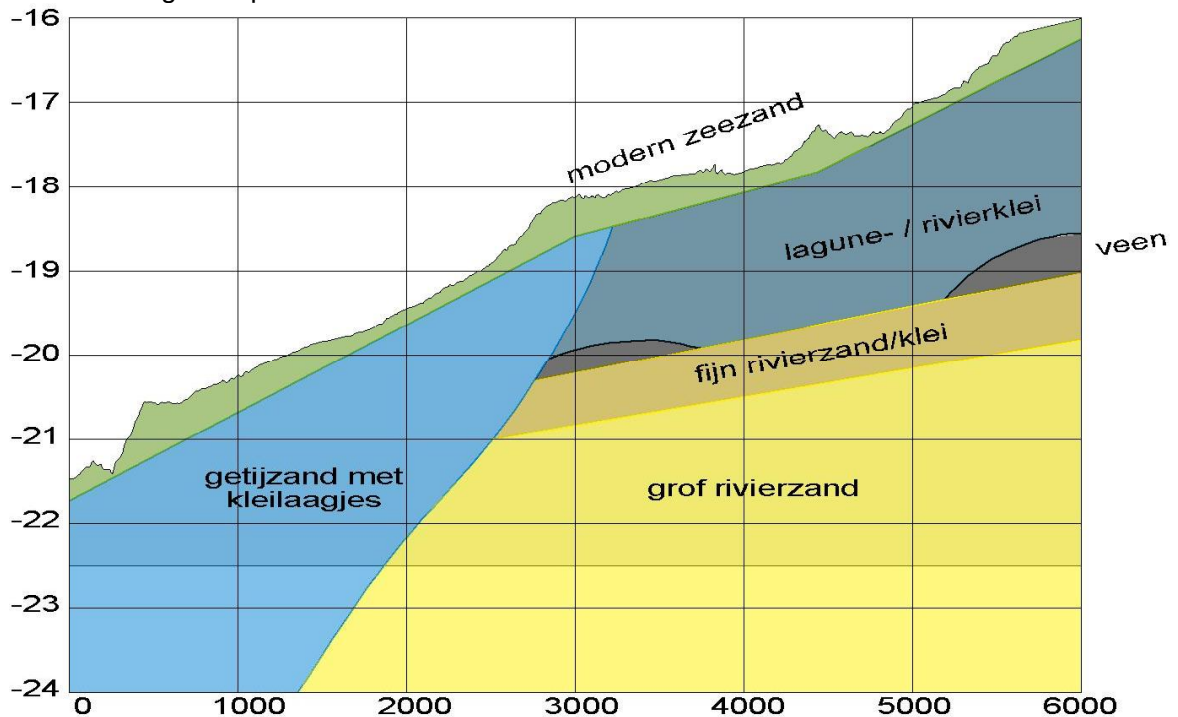
De getijgeulafzettingen (eenheid 6) bestaan uit een tot meer dan 8 meter dikke zandlaag (180-280  $\mu\text{m}$ ) met enkele kleilaagjes en een spoor verspoeld veen. Het slibgehalte is 2-17 % (gemiddeld 7%). De top ligt tussen de 17 en 22 meter onder NAP, de basis op 28 m onder NAP.

Het moderne zeezand is middelgrof (180-250  $\mu\text{m}$ ) en op de meeste plaatsen niet meer dan 0,5 meter dik. Het bevat 1-5% slib (gemiddeld 3%).

#### *Eigenschappen van het te baggeren sediment (tot 22 meter onder NAP)*

Ter visualisatie van de te baggeren strook is een schematische dwarsdoorsnede gemaakt (Figuur 9). Gemiddeld kan ervan worden uitgegaan dat de bovenste 0,5 meter bestaat uit modern zeezand met een  $d_{50}$  van 180-250  $\mu\text{m}$  en een slibgehalte van ongeveer 3%. Daaronder moet nabij de havenhoofden grotendeels fijnkorrelig sediment worden weggebaggerd. Een tot 5 meter dikke laag stugge lagunaire klei strekt zich uit tot ongeveer 3 kilometer zeewaarts van de havenhoofden. Onder deze klei bevindt zich Basisveen en lokaal rivierleem. Naarmate de afstand tot de havenhoofden toeneemt, wordt de laag te baggeren klei en veen dunner. Ten westen van de kleilaag en deels erboven liggen zandige getijdenafzettingen (180-280  $\mu\text{m}$ ) met enkele kleilaagjes en een gemiddeld slibgehalte van

7%. Pas ruim 6 kilometer buiten de havenhoofden ligt grover fluviatiel zand (200-340  $\mu\text{m}$ , slibgehalte 2%) onder het moderne zeezand. Ook onder de klei en het veen is relatief grof fluviatiel zand aanwezig (200-340  $\mu\text{m}$ , slibgehalte 5%), maar dat ligt grotendeels onder de nieuwe vaargeuldiepte.



Figuur 9. Schematische dwarsdoorsnede langs de te baggeren strook. De streefdiepte van 22,5 meter is gemarkeerd.

De onnauwkeurigheid van de schematische dwarsdoorsnede is relatief groot. In werkelijkheid is de laterale variabiliteit van laagdiktes en -dieptes groter dan hier aangegeven. Bovendien variëren de eigenschappen van de weergegeven eenheden ook aanzienlijk. Zo bevat het getijzand lokaal op de ene locatie veel meer kleilaagjes dan op de andere. Gezien deze onzekerheden kan alleen voor de Noordstrookvariant en voor de tweestrooksvariant een schatting worden gemaakt van de percentages zand, silt, klei en veen die bij baggeren zullen worden verwijderd. In de Noordstrookvariant zal van de 6,5  $\text{Mm}^3$  sediment ongeveer 2,2  $\text{Mm}^3$  bestaan uit silt en minder dan 0,1  $\text{Mm}^3$  uit veen. In de tweestrooksvariant zal van de 3,6  $\text{Mm}^3$  sediment ongeveer 1,2  $\text{Mm}^3$  bestaan uit silt en minder dan 0,05  $\text{Mm}^3$  uit veen. Deze hoeveelheden hebben een onzekerheidsmarge van minimaal 25%. Het te baggeren materiaal voor de Marin variant betreft een nauwe hoogteband, vanwege de beperkte hoeveelheid die verwijderd moet worden. In deze nauwe band is niet met enige betrouwbaarheid aan te geven welk materiaal er zich bevindt.

### 3 Hergebruik te baggeren sediment

Een groot gedeelte van het te baggeren materiaal bestaat uit klei, veen en leem. De belangrijkste kleilaag is tot 5 meter dik. De toplaag bestaande uit modern zeezand is niet meer dan 0,5 meter dik. Het onderste gedeelte bestaat uit Pleistoceen zand. Vlak bij de havendam reikt het Pleistoceen tot ongeveer -20 meter NAP. Naar het westen toe ligt deze dieper (tot -25 meter NAP).

De lagunaire klei, het Basisveen en eventuele rivierleem kunnen niet als suppletie- of ophoogmateriaal dienen. Gezien het geconsolideerde karakter van dit sediment zal het niet volledig in losse korrels uiteenvallen, maar toch zal er bij het baggeren een aanzienlijke hoeveelheid slib vrijkomen. De zandige getijdenafzettingen zijn qua gemiddelde korrelgrootte geschikt om als suppletie- of ophoogzand in aanmerking te komen, maar vanwege het relatief hoge slibgehalte is alleen gebruik voor Maasvlakte 2 een optie. Door de relatief kleine hoeveelheid sediment is het absolute volume aan slib beperkt. Het weinige rivierzand dat gebaggerd zal worden, is waarschijnlijk te grof om als suppletiezand te dienen. Het kan worden gebruikt bij de aanleg van Maasvlakte 2. Vanwege de dikke en variabele storende laag (veen en klei) in de eerste 3 kilometer vanaf de havenhoofden zal het gescheiden baggeren van opeenvolgende lagen in dit bereik niet eenvoudig zijn.

Het gebaggerde moderne zeezand kan worden gebruikt als vooroever suppletiezand of als ophoogzand voor Maasvlakte 2. Het heeft een gemiddelde korrelgrootte die lijkt op die van het huidige strandzand in de regio. Deze laag is echter slechts 0,5 meter dik en is niet eenvoudig apart te winnen.

Het zand dat voor suppleties gebruikt wordt dient een korreldiameter te hebben tussen de 200 en 350  $\mu\text{m}$  en mag geen klei of veenresten bevatten. Alleen de toplaag en de onderste laag (het Pleistocene zand) is dus geschikt als suppletiezand. Baggertechnisch zijn deze lagen echter lastig apart te winnen.

#### Conclusie:

Het te baggeren materiaal is niet te gebruiken als suppletie materiaal, ook niet als een vooroeversuppletie. Alleen de toplaag (minder dan 0,5 m dik) en de onderste laag (het Pleistocene zand) is hiervoor geschikt. Baggertechnisch zijn deze lagen echter lastig apart te winnen.

Het materiaal is wellicht te gebruiken als materiaal voor Maasvlakte 2, indien er rekening gehouden wordt met het feit dat er veel klei, veen en leem in zit. Dit heeft mogelijk consequenties voor de bouwtechnische aspecten van de Maasvlakte ten aanzien van klink. Consequenties ten aanzien van slibverspreiding komen in het volgende hoofdstuk aan bod.

## 4 Slibverspreiding

De winning van zand uit de taluds van de Maasgeul zal tot gevolg hebben dat er slib, klei en leem en ander particulier materiaal in suspensie komt, dat bijdraagt aan het totale gehalte aan gesuspendeerd materiaal. De hoeveelheden waar het om gaat zijn echter veel kleiner dan de hoeveelheden baggerspecie die jaarlijks op de nabije loswallen worden gestort, 3 tot 4 Mton slib en 4 Mton zand. (ongeveer 6 – 8 Mm<sup>3</sup> slib en 2,5 Mm<sup>3</sup> zand).

Het maximale scenario (Noordstrook variant) voor winning uit de taluds van de Maasgeul gaat uit van 6,5 Mm<sup>3</sup> sediment, te winnen in een jaar. Bij de tweestrooksvariant is dit 3,6 Mm<sup>3</sup> en in het geval van de Marin variant betreft dit slechts 0,7 Mm<sup>3</sup> sediment.

### 4.1 Verspreiding rondom de winning.

Uitgaande van de Noordstrook variant en van een hoge schatting van het percentage fijn materiaal (< 63 µm ) hierin van 50% komt dit neer op een totale massa van 5200 kton (bij een droge dichtheid van 1600 kg/m<sup>3</sup>).

Dit fijne materiaal zal niet allemaal op de plaats van de winning in het water komen. Een groot deel bestaat uit geconsolideerde klei-, leem- en veenbrokken die in de beun van het zandwingschip blijven en deze pas op de los locatie weer verlaten. Een ruime schatting van de hoeveelheid fijn materiaal die ter plaatse van de Maasgeultaluds in het water zal komen is 2000 kton, bijna 40% van de opgezogen fines.

Dit materiaal komt via de overstort (een buis dwars door het schip ) onder het schip in het water terecht op ca. 10 m onder het wateroppervlak en zal in een dichtheidsstroom naar de bodem vallen. Daar wordt de valsnelheid omgezet in een horizontale snelheid waarmee het materiaal zich langs de bodem uitspreidt. Deze snelheid kan zo groot zijn, dat het materiaal, geholpen door de getijstrooming, tegen het talud opstroomt en de Maasgeul verlaat.

Rond de Maasgeul zijn echter alle resttransportvectoren van de bodemstroming gericht naar de Maasmond (de Kok, 1999, 2000, 2002) als gevolg van zoet-zoutverschillen in het lokale zeewater. Het meeste materiaal zal daarom na een of meerdere getijcycli via de Maasgeul de Maasmond bereiken en sedimenteren in het havengebied. Daar wordt het vroeg of laat weer opgebaggerd in het kader van het normale vaargeulonderhoud en op de verdiepte loswal of op Loswal NoordWest gestort. De 2000 kton uit de taluds van de Maasgeul betekenen een toename van maximaal 30% van het normale baggeronderhoud (zand en slib) en een toename van maximaal 60% van de op de loswallen gestorte hoeveelheid slib gedurende een jaar. Voor de tweestrooks variant is dit de helft van bovengenoemde bedragen en voor de MARIN variant 10 % ervan.

De slibconcentraties in het water rondom de plek van de verbreding van de Maasgeul zullen tijdelijk toenemen gedurende de werkzaamheden. De verhoging is als volgt in te schatten.

In het rapport MER Winning suppletiezand Noordzee 2007 is een simpele berekening gemaakt voor de verspreiding van het slib. Uitgaande van de winning van 1 Mm<sup>3</sup> in 25 dagen met een slibpercentage van 2,5 en een waterdiepte van 20 m wordt op een afstand van 10 km een concentratie verhoging van 1 mg/l gevonden (verticaal gemiddeld).

Voor de Maasgeul situatie geldt:

- de slibhoeveelheid is 50 maal zo hoog
- de gemiddelde waterdiepte is 1,5 maal zo klein
- de winperiode is 7 maal zo groot uitgaande van 6 maanden voor de verbreding

- een grootschalige neer veroorzaakt door de Rijnuitstroom en havendammen bij hoek van Holland (factor 2)

Dit geeft voor de Maasgeul situatie een verhoging van de slibconcentratie met ongeveer 22 mg/l (verticaal gemiddeld op een afstand van 10 km van de baggerlocatie). Lokaal zal de verhoging van de slibconcentratie vele malen groter zijn (tot 10 maal hoger). Door de sterke zoutstratificatie ten gevolge van de Rijnuitstroom zal de concentratieverhoging aan het oppervlak veel lager zijn en aan de bodem veel hoger (Verlaan P. & Spanhoff, R., 1992).

Voor de tweestrooks variant zijn de waarden ongeveer de helft hiervan en voor de MARIN variant 10 procent.

De natuurlijke achtergrondconcentraties in dit gebied bedragen gemiddeld 10 – 30 mg/l. Tijdens stormachtige perioden lopen deze op tot 100 – 500 mg/l.

#### 4.2 Verspreiding rondom de storting

Het deel van de opgezogen fines die niet op de winlocatie in de overstort terecht komen maar in de beun blijven, zal ter plaatse van de storting vrijkomen. Dit betreft maximaal ongeveer 600 kton in het geval van de Noordstrook variant, 300 kton in het geval van de tweestrooks variant en 60 kton in geval van de MARIN variant.

Indien het gewonnen materiaal gebruikt wordt ten behoeve van de Maasvlakte zal het binnen de gesloten buitencontour gestort worden. Vanaf Maasvlakte2 zal dan een deel van de fines mogelijk via een overstort in zee terecht komen. De slibtransportpaden vanaf deze locatie zijn alle gericht naar de Maasmond en ook dit materiaal zal in vak F sedimenteren en uiteindelijk op een loswal terecht komen. De hoeveelheid die hiermee is gemoeid is echter gering. Een ruwe, ruime schatting is ca 300 kton. De effecten hiervan op de schaalgrootte van kustcompartimenten zoals ze in het MER aanleg Maasvlakte2 worden gehanteerd, zijn in dit MER beschreven. Dit betreft vooral de impact op de nabij gelegen Natura 2000 gebieden (monding Haringvliet). De extra hoeveelheid slib veroorzaakt minder doorzicht en daardoor minder primaire productie met vervolgens mogelijke effecten op het voedsel van de Eidereenden en aldus op de aantallen Eidereenden.

De hoeveelheid van 300 kton extra fines valt ruim binnen de marge die aangehouden is bij de effectberekeningen die voor het MER zijn gebruikt (12 - 18 Mton in 2-5 jaar).

Indien het storten ten noorden van de Maasgeul plaatsvindt binnen (of buiten het kustfundament) zullen aldaar lokaal verhogingen van de slibconcentraties plaatsvinden. Deze hebben zullen echter geen effecten op Natura 2000 gebieden hebben. Bij de winlocatie is uitgegaan van de worst case namelijk 100 % van het slib komt aldaar vrij. Indien een gedeelte hiervan noordelijker in het water terecht komt geeft dit geen extra gevolgen. Door de grotere verspreiding zullen deze zelfs geringer zijn.

Conclusie:

Bij winning van het te baggeren materiaal bestaande uit zand, klei, veen en leem zal bij de grootste variant (verbreding noordzijde met 400 meter) maximaal ongeveer 2000 kton slib in het water vrijkomen in een tijdsperiode van minder dan een jaar. Dit materiaal zal voor een groot gedeelte in vak F weer neerslaan. Voor de tweede variant (verbreding weerszijden met 100 meter) is dit ongeveer 1000 kton slib en voor de Marin variant 200 kton slib.

Indien het bij de verbreding vrijkomende materiaal gebruikt wordt voor de Maasvlakte zal het grootste gedeelte van het slib achterblijven op de stortlocatie zelf en een kleiner gedeelte zal zich in zee verspreiden.



Deze laatste hoeveelheid bedraagt maximaal 300 kton (150 kton voor variant 2 en 30 kton voor de Marin variant).

Deze hoeveelheden zijn gering ten opzichte van de in de MER aanleg Maasvlakte gehanteerde marge van 12 – 18 Mton in 2-5 jaar.

## 5 Sedimentatie Maasgeul

### 5.1 Belangrijkste fysische processen

De morfologische ontwikkeling van een vaargeul in kustwateren wordt bepaald door de afname van de sediment transport capaciteit in de geul vanwege de lagere stroomsnelheden gerelateerd aan de grotere diepte en, in geval van overwegend bodemtransport van sediment, de invloed van de zwaartekracht op de sediment korrels op het talud van de vaargeul.

De oriëntatie van de stroming ten opzicht van de vaargeul is de meest bepalende parameter voor de sedimentatie en de morfologische ontwikkeling van de geul. Als de getijstroming nagenoeg loodrecht op de as van de geul staat, zoals bij de Maasgeul, zullen de bovenste delen van de zijkanalen van de geul aan weerszijde (door de heen- en weergaande stroming) eroderen en de diepere delen van de geul aanzanden door de eerder genoemde afname in transport capaciteit (voornamelijk suspensie- of zwevend stof transport, het bodemtransport is hier vrij gering). Golven zorgen voor extra opwoeling van sediment waardoor de sedimentconcentraties groter zullen zijn waardoor er meer aanzanding optreedt. De gemiddelde diepte is hier ongeveer 15 meter, waarop de golfwerking nog goed merkbaar is. De getijstroming is grotendeels verantwoordelijk voor het sediment transport.

Het simuleren van de morfologische ontwikkeling van de vaargeul bestaat uit twee elementen: het berekenen van de hoeveelheid sediment die aangevoerd wordt door de stroming welke afhangt van de stromings-, golf- en sedimenteigenschappen en de effectiviteit van de vaargeul als zandvang die afhangt van de vorm, afmetingen en oriëntatie van de geul alsmede de sedimenteigenschappen (Van Rijn, 2005).

### 5.2 Aanzanding van de Maasgeul

Vanwege het economische belang van de haven van Rotterdam, wordt de bodemligging van de Maasgeul frequent gemeten en gebaggerd. Tabel 5.1 laat de hoeveelheden jaarlijks gebaggerd sediment zien voor de periode van 1992 tot 2008. Het betreft baggervolumes voor "Vak G"; de eerste 5 km van de Maasgeul vanaf de havendammen. Deze gegevens komen van RWS-Noordzee, meer specifiek: uit "Database Jan Andrea" (1992-2004), "Database BAS" (2005 en 2006) en uit de opzet van het huidige baggercontract (2007 en 2008).

Tabel 5.1: Totaal sediment volume gebaggerd in Vak G voor de periode 1992- 2008.

Jaar	Totaal gebaggerd volume in Vak G ( $10^6 \text{ m}^3$ )
1992	1,67
1993	1,89 <sup>1</sup>
1994	2,02
1995	3,17
1996	5,12
1997	2,86
1998	0,44
1999	0,60
2000	0,77
2001	1,08
2002	0,83
2003	1,29
2004	0,67
2005	0,85
2006	0,33
2007	2,16
2008	1,39
<b>Totaal</b>	<b>27,14</b>

In 1996 en 1997 is de “Trog van Haksteen” gegraven aan de zuidkant van Vak G. Deze was bedoeld voor zandwinning, maar fungeerde jaren erna als zandvang, zoals blijkt uit de lagere baggervolumes vele jaren na 1997. Over de jaren 1992-2008 is er jaarlijks gemiddeld  $1,60 \times 10^6 \text{ m}^3$  sediment gebaggerd, wat correspondeert met  $1,60 \times 10^6 / 5000 = 320 \text{ m}^3/\text{m}$ . Evaring leert dat gemiddeld 80% wordt gebaggerd aan de zuidkant van de centrale as van de Maasgeul en 20% aan de noordkant.

In het kader van de MER voor de aanleg van MV2 hebben Roelvink & Aarninkhof (2005) een dieptegemiddeld gebiedsmodel van de Haringvliet en omgeving (zie Figuur 6.4) gemaakt met de Delft3D software. Hiermee is onder andere onderzoek gedaan naar het lange termijn effect van verschillende MV2 varianten op de aanzanding in de Euro-Maasgeul in vergelijking met de situatie zonder MV2. Tabel 5.2 geeft de berekende gemiddelde jaarlijkse sedimentatie volumes weer voor de eerste 3,3 km van de geul en voor km 3,3 tot 5,5. “Doorsteekvariant fase 2” is in grote lijnen identiek aan de uiteindelijke variant. De zone waarvoor Tabel 5.2 de sedimentatie volumes geeft komt overeen met Vak G met uitzondering van de laatste 500 m, waar aanzanding minimaal is.

<sup>1</sup> Gebaggerd volume van  $1.40 \times 10^6 \text{ m}^3$  in verband met de aanleg van de AMOCO geul is hierin niet meegenomen.

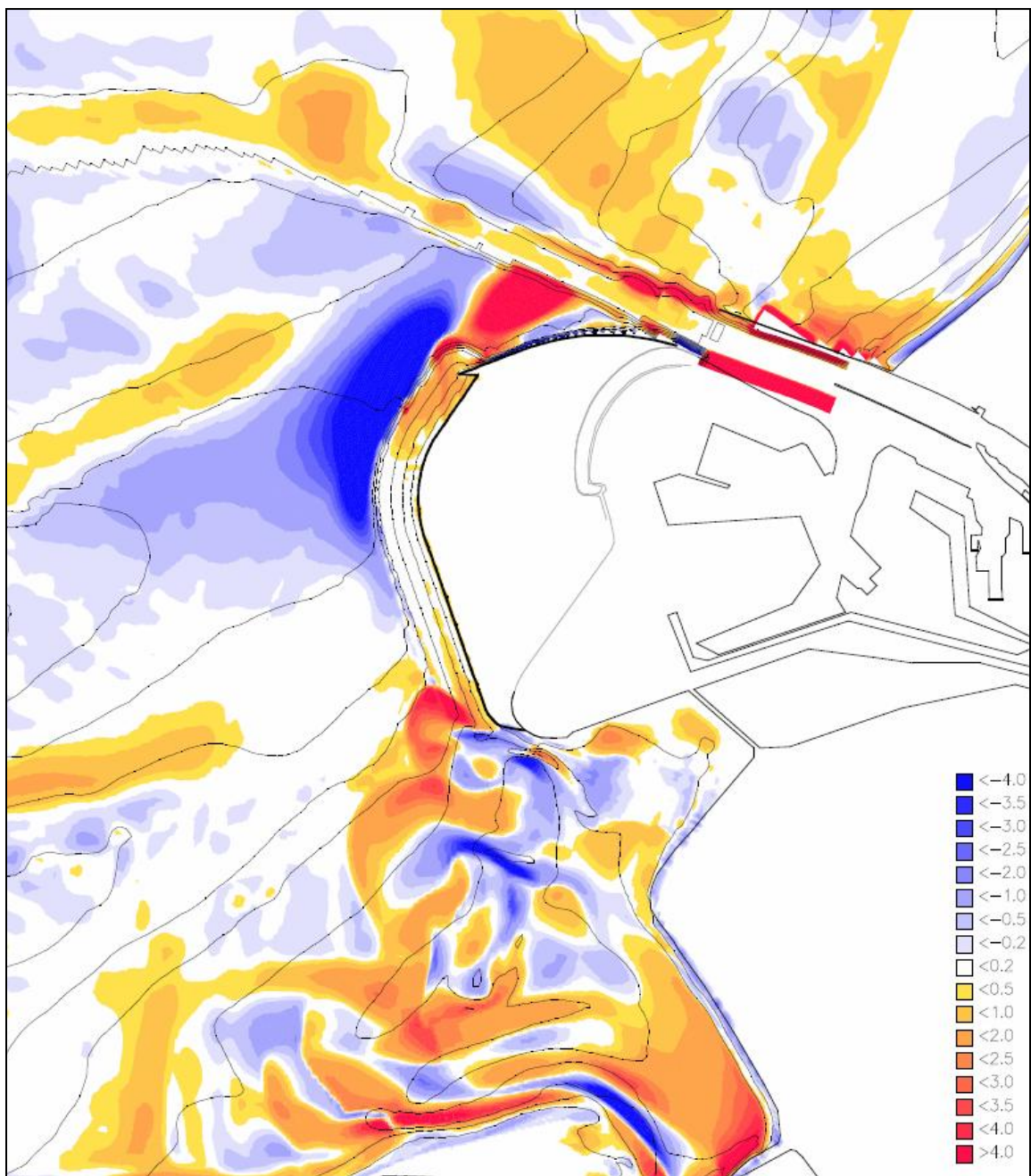
Tabel 5.2: Berekende hoeveelheden sediment die de Maasgeul inkomen en uitgaan.

Periode	Variant	Inkomend sediment (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /jaar)		Uitgaand sediment (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /jaar)	Netto (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /jaar)
		0-3,3 km	3,3-5,5 km	0-5,5 km	
1986-2000	geen MV2	1,50	0,45	0,29	1,66
2000-2020	geen MV2	1,40	0,44	0,31	1,54
2000-2020	doorsteekvariant fase 2	0,15	2,22	0,34	2,03

De tabel laat zien dat het model voor Vak G een netto aanzanding berekent van  $1,95 - 0,29 = 1,66 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{jaar}$  voor de periode 1986-2000 en  $1,54 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{jaar}$  voor de periode 2000-2020 voor de situatie zonder MV2. Het model levert dus een betrouwbare schatting op van het benodigd onderhoud in de Maasgeul.

In de autonome situatie is de hoeveelheid jaarlijks inkomend sediment  $1,45 \times 10^6 / 3300 \approx 440 \text{ m}^3/\text{m}$  voor het eerste gedeelte van de geul en  $0,45 \times 10^6 / 2200 \approx 200 \text{ m}^3/\text{m}$  voor het laatste gedeelte. De hoeveelheid jaarlijks uitgaand sediment is  $0,30 \times 10^6 / 5500 \approx 55 \text{ m}^3/\text{m}$ . Ervan uitgaande dat de hoeveelheid uitgaand sediment constant is in kustdwarse richting, geeft dit een jaarlijkse aanzanding van  $380 \text{ m}^3/\text{m}$  en  $150 \text{ m}^3/\text{m}$ , respectievelijk, voor de twee secties zonder MV2. Dit komt goed overeen met de waarden genoemd door Van Rijn (2005). Volgens Van Rijn varieert de sedimentatie van  $800 \text{ m}^3/\text{m}/\text{jaar}$  nabij de kust tot  $50 \text{ m}^3/\text{m}/\text{jaar}$  5 km van de kust op basis van de baggerdata voor de periode 1985-1994. Eenzelfde exercitie voor de situatie met MV2 geeft een totaal sedimentatie volume van  $2,0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{jaar}$  en  $940 \text{ m}^3/\text{m}/\text{jaar}$  voor de 3,3-5,5 km sectie. Deze waarden zullen gebruikt worden om het SEDTUBE model te kalibreren (zie Hoofdstuk 6).

De modeluitkomsten laten zien dat de onderhoudsbehoefte van het eerste gedeelte van de Maasgeul afneemt door de aanleg van MV2. De aangevoerde hoeveelheid sediment voor het meer zeewaarts gelegen gedeelte gaat echter flink omhoog. Dit is zand afkomstig uit de grote ontgrondingskuil die ontstaat ten noordwesten van MV2 (zie Figuur 5.1).



Figuur 5.1: Berekende sedimentatie/erosie in [m]. Doorsteekvariant fase 2: 2000-2020. Afkomstig uit Roelvink & Aarninkhof (2005).

Deze kuil ontstaat door contractie van de getijstrooming bij de punt van de MV2, waardoor stroomsnelheden - en daarmee transporten - toenemen. Aangezien het sediment transport de geul uit nauwelijks toeneemt door de aanleg van MV2, zal ook het onderhoud aan de Euro-Maasgeul aanzienlijk toenemen. De toename van de uitwisseling met de Euro-Maasgeul raakt vooral het deel van de geul op 3 tot 10 km van de kop van de Noorderdam, inclusief de draaicirkel voor de scheepvaart. Dichtbij de kust, binnen 3 km van de Noorderdam, neemt door afscherming de uitwisseling juist sterk af.

## 6 SEDTUBE model Maasgeul

### 6.1 Beschrijving van SEDTUBE

SEDTUBE, ontwikkeld door Van Rijn (2005), is een eendimensionaal horizontaal (1DH) model om de morfologische ontwikkeling van een vaargeul onder invloed van golven en stroming te simuleren. Het model berekent het stromingsgerelateerde bodem- en suspensietransport met opwoeling van golven. Het is een parameterisatie van het meer geavanceerde tweedimensionaal verticale (2DV) model SURTRECH en alleen geschikt voor relatieve lange vaargeulen met de as loodrecht of bijna loodrecht op de stroming, zoals in geval van de Maasgeul. Er is gekozen voor SEDTUBE omdat het opzetten van het model relatief eenvoudig is en simulaties relatief snel gaan. De belangrijkste vergelijkingen van SEDTUBE staan in Appendix A.

SEDTUBE heeft de volgende invoer:

- $h(y)$ , waterdiepte langs raai dwars op de vaarheul [m t.o.v. NAP]
- $Q$ , debiet op de rand van het model [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
- $z_w$ , waterstand [m NAP]
- $H_s$ , significante golfhoogte op de rand van het model [m]
- $T_p$ , piek golfperiode op de rand van het model [s]
- $Q_{s,0}$ , suspensietransport op de rand van het model [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
- $D_{50}$  en  $D_{90}$ , karakteristieke diameters van het bodem sediment [m]
- $w_s$ , valsnelheid gesuspendeerd sediment [m/s]
- $p_{\text{mud}}$ , percentage slib in de bodem [-]
- $\rho_w$ , dichtheid van het water [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
- $\rho_s$ , dichtheid van het sediment [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
- $u$ , kinematische viscositeit van het water [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
- $k_s$ , ruwheidshoogte [m]
- $\rho$ , porositeit bodem [-]
- $K$ , calibratie coëfficiënt, zie Vgl. (A.2) [-]
- $\alpha$ , calibratie coëfficiënt, zie Vgl. (A.4) [-]
- $\Delta t$ , tijdstap [uren]
- aantal tijdsstappen per half getij
- totaal aantal door te rekenen getijden
- rekenrooster

Het SEDTUBE model is in het verleden succesvol toegepast om sedimentatie in vaargeulen te bepalen (zie Van Rijn, 2005), onder meer de sedimentatie van een proefgeul nabij Scheveningen (Svasek, 1964).

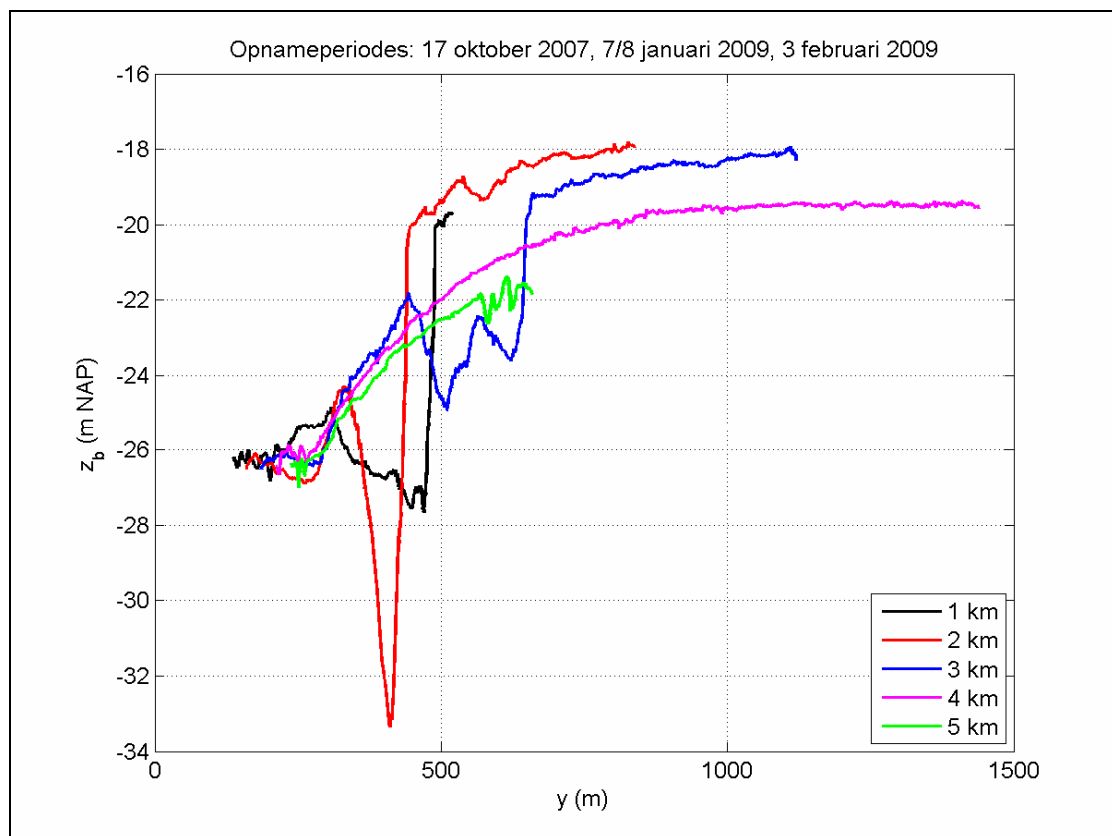
### 6.2 Bodemschematisatie

Voor de schematisatie van de bodem hadden we beschikking over de volgende recente gegevens van de bodemligging van de Maasgeul:

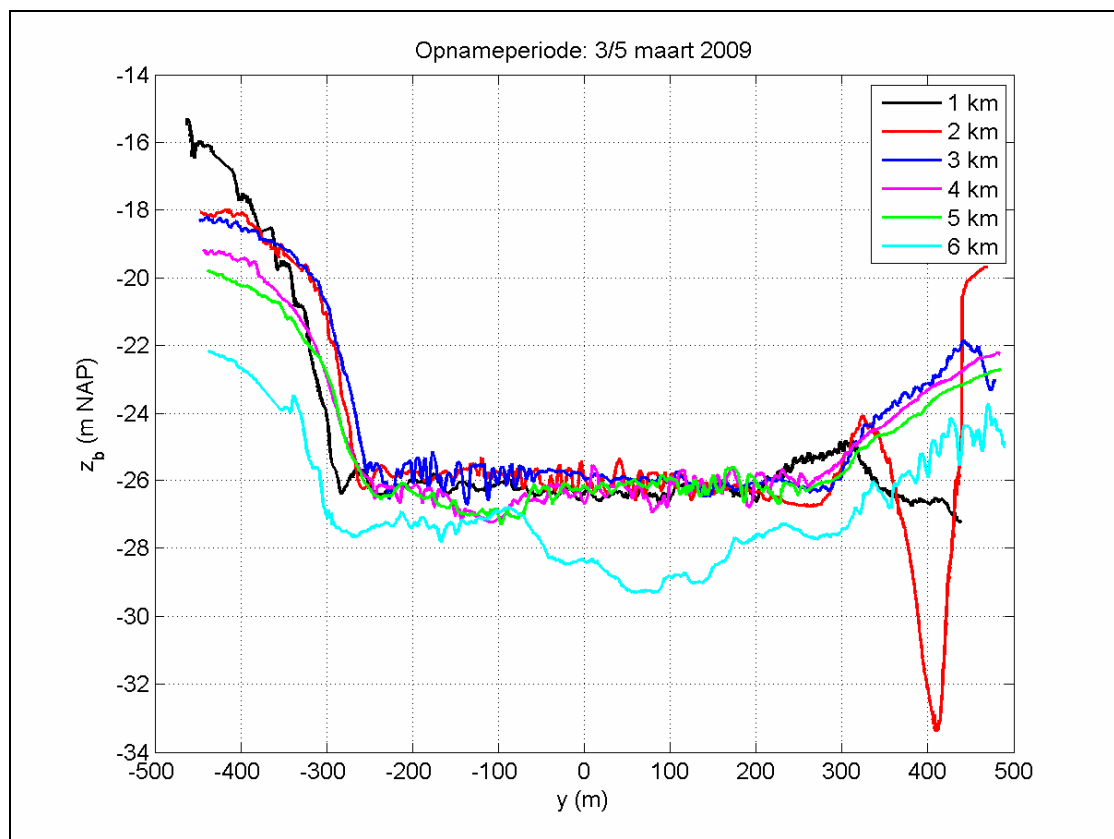
- Maasgeul Wig Noord en omgeving (RWS Noordzee, kaartnummer NZWA 2009-0031). Opnameperiodes: 17 oktober 2007, 7/8 januari 2009, 3 februari 2009.
- Maasgeul 0-6 km (RWS Noordzee, kaartnummer NZWA 2009-0057). Opnameperiode: 3/5 maart 2009.

Het betreft de bodemligging van de Maasgeul en een gedeelte ten noorden hiervan op een 1 x 1 m grid.

Figuren 6.1 en 6.2 laten de bodemligging zien langs een zestal raaien dwars op de Maasgeul. Deze raaien staan op een afstand van  $x = 1, 2, 3, 4, 5$  en  $6$  km van het begin van de Maasgeul, gedefinieerd als het punt tussen het einde van de havendammen ( $x$  is gedefinieerd als positief in zeewaartse richting). Als coördinaten voor de oorsprong van de Maasgeul is genomen: 571895.835 Easting en 5760679.78 Northing (ED50, UTM zone 31N), wat correspondeert met 62861.974 xRD en 445501.806 yRD (Rijksdriekcoördinaten). De (aangenomen) oriëntatie van de Maasgeul is  $291^\circ\text{N}$ . De  $y$ -as staat loodrecht op de geul; negatief is naar het zuidzuidwesten.



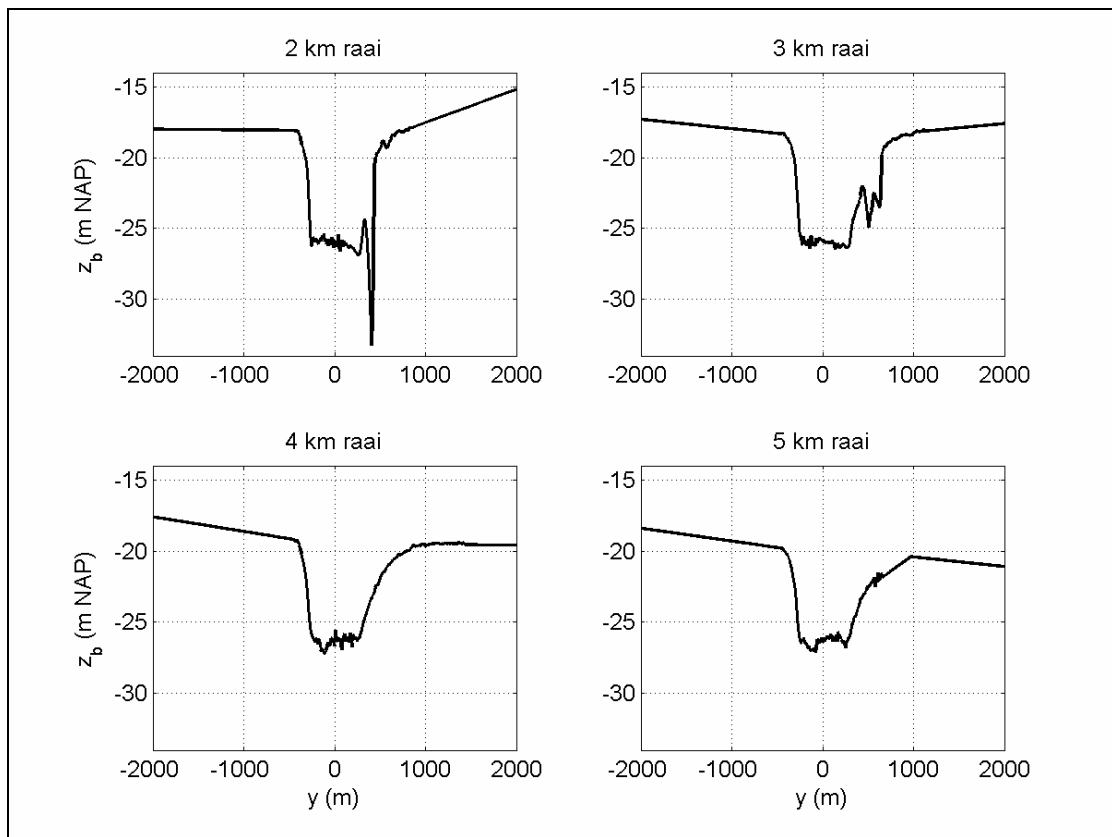
Figuur 6.1: Bodemligging Maasgeul langs vijf raaien loodrecht op de as van de geul op basis van RWS Noordzee, kaartnummer NZWA 2009-0031. Het betreft hier het noordelijke gedeelte van de vaargeul.



Figuur 6.2: Bodemligging Maasgeul langs zes raaien loodrecht op de as van de geul op basis van RWS Noordzee, kaartnummer NZWA 2009-0057.

De maart 2009 meting (Figuur 6.2) beslaat de gehele Maasgeul; de andere meting (Figuur 6.1) alleen het noordelijke gedeelte van de geul. De diepe geul aan de noordkant van de 2 km raai is opvallend. Deze geul loopt van ongeveer  $x = 1$  km tot  $x = 3$  km.

De bodemligging buiten de geul is gebaseerd op vaklodingen gedaan in 2004. Figuur 6.3 geeft de bodemligging langs de raaien op 2, 3, 4 en 5 km afstand van de oorsprong van de geul op basis van de drie verschillende data sets. Van de 6 km raai hebben we niet genoeg data om een realistische bodem te schematiseren. We zullen de 4 en 5 km raai modelleren met SEDTUBE, aangezien dichterbij de kust het zuidelijke gedeelte van de raai op de MV2 liggen en het getij hier niet geuldwars aanstroomt.

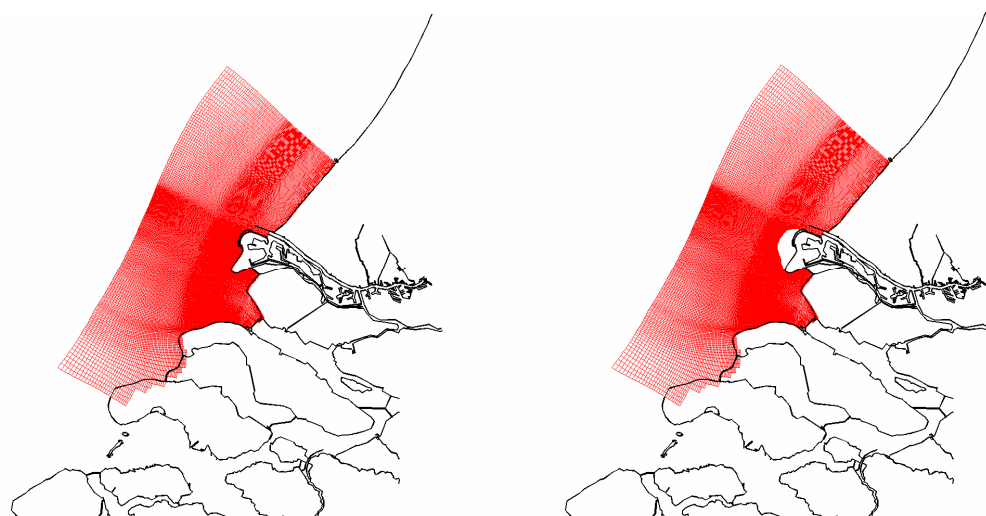


Figuur 6.3: Bodemligging Maasgeul langs vier raaien loodrecht op de as van de geul op basis van de Maasgeul metingen en de 2004 vaklodgingen.

### 6.3 Getijschematisatie

SED TUBE heeft de afvoeren en waterstanden tijdens eb en vloed als invoer. Deze zijn berekend met het "Haringvlietmond" (HVM) model van Roevink & Aarninkhof (2005), aangepast door De Vries (2007). Dit is een dieptegemiddeld gebiedsmodel van de Haringvliet en omgeving (zie Figuur 6.4) gemaakt met de Delft3D software. We hebben alleen de stromingsmodule aangezet om de getijkarakteristieken af te leiden. Dit betekent dus dat we golfgedreven stromingen negeren, wat gezien de diepte ( $> 15$  m) gerechtvaardigd is, aangezien golven hier niet of nauwelijks breken. Dit hebben we gedaan met en zonder de aanwezigheid van MV2. In het HVM model wordt het effect van wind niet meegenomen, de rivierafvoeren wel.





Figuur 6.4: Rekenrooster van het HVM model zonder (links) en met (rechts) MV2.

Tabel 6.1 geeft de berekende getijkarakteristieken op de zuidelijke rand van de twee verschillende dwarsraaien. Hierbij is  $z_b$  het bodemniveau,  $z_w$  de waterstand,  $|U|$  de dieptegemiddelde snelheid en  $Q = hb|U|$  het debiet met  $h = z_w - z_b$  de waterdiepte en  $b = 1$  m de breedte.

Tabel 6.1: Getijkarakteristieken op de zuidelijke rand van twee raaien dwars op de Maasgeul, zoals berekend met het HVM model.

MV2	Raai	Eb				Vloed		
		$z_b$ (m NAP)	$z_w$ (m NAP)	$ U $ (m/s)	$Q$ (m <sup>3</sup> /s)	$z_w$ (m NAP)	$ U $ (m/s)	$Q$ (m <sup>3</sup> /s)
zonder	4 km	-17,16	-0,70	-0,71	-11,7	0,93	0,84	15,2
	5 km	-18,12	-0,69	-0,67	-11,7	0,92	0,81	15,4
met	4 km	-17,16	-0,73	-0,94	-15,4	1,14	1,14	20,9
	5 km	-18,12	-0,71	-0,82	-14,3	1,02	1,02	19,5

Deze tabel laat zien dat de verschillen tussen de twee raaien klein zijn. Verder heeft MV2 weinig effect op het verticale getij (waterstand), maar is de invloed op de stroomsnelheid wel goed zichtbaar. Stromingscontractie zorgt voor een ongeveer 30% hogere snelheid gedurende eb en vloed.

#### 6.4 Golfschematisatie

Voor het bepalen van een representatief golfklimaat hebben we gebruik gemaakt van de golfgegevens afkomstig van het meetstation "Europlatform" (9.963 xRD, 447.601 yRD; 51°59'55" N, 03°16'35" E), zie [www.golfklimaat.nl](http://www.golfklimaat.nl). Het betreft richtingsafhankelijke golfgegevens voor de periode 1979-2001 (alle beschikbare jaren). In Appendix B staan de kans van voorkomen, de significante golfhoogte en de golfperiode in tabellen als functie van golfklassen van 1 m en golfrichtingsklassen van 45°. De golven met richtingen tussen de 180 en 360°N hebben we gecombineerd tot een golfconditie, aangezien golfrichting geen rol speelt in het SEDTUBE model, alsmede golven hoger dan 4 m. Golven met een andere richting nemen we niet mee, omdat deze niet richting de kust propageren (het aantal dagen dat zulke golven voorkomen, vormen samen conditie "w0"). De piekperiode volgt uit de  $T_{m02}$  periode vermenigvuldigt met een factor 1,2 (De Vries, 2007). Deze exercitie geeft het golfklimaat op diep water zoals gegeven in Tabel 6.2.

Tabel 6.2: Diep water golfklimaat op basis van de golfgegevens afkomstig van het meetstation Europlatform voor de periode 1979-2001.

Conditie	$\theta_{\text{golf}}$ (°N)	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	Kans (%)	Aantal dagen
w0	-	-	-	28,62	104
w1	280	0,63	4,68	28,90	105
w2	268	1,44	5,39	27,89	102
w3	265	2,41	6,28	10,80	39
w4	270	3,37	7,09	3,18	12
w5	285	4,49	7,96	0,62	2

Het Europlatform meet de golven op een diepte van ongeveer 32 m en staat hemelsbreed ongeveer 50 km van de kust af. Het kustdwarse model UNIBEST-TC is gebruikt om de diep water golfcondities te vertalen naar golfcondities ter plekke van de dwarsraaien die gemodelleerd zullen worden met SEDTUBE. Hiervoor is gebruik gemaakt van de bodem uit de 2004 vaklodingen. Verder zijn standaard UNIBEST-TC instellingen gebruikt. Tabel 6.3 geeft het resulterende golfklimaat op de 4 en 5 km raai.

Tabel 6.3: Lokaal golfklimaat voor de Maasgeul gebruikt als invoer voor het SEDTUBE model.

Conditie	Raai 4		Raai 5		Aantal dagen
	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	
w0	0,00	0,00	0,00	0,00	104
w1	0,63	4,68	0,63	4,68	105
w2	1,40	5,39	1,41	5,39	102
w3	2,29	6,28	2,30	6,28	39
w4	3,17	7,09	3,19	7,09	12

## 6.5 Overige instellingen

Naaste de bodem, het getij en de golven zijn de nu volgende parameterinstellingen genomen:

- $Q_{s,0} = 0 \text{ m}^3/\text{s}$  (dit betekent dat het sediment transport op de rand van het model gelijk is aan het berekende evenwichtstransport)
- $D_{50} = 0,2 \text{ mm}$ ,  $D_{90} = 0,3 \text{ mm}$
- $w_s = 0,018 \text{ m/s}$  (berekend met de formule van Soulsby, 1997 en een representatieve diameter  $D_s = 0,8D_{50}$ )
- $\rho_{\text{mud}} = 0,05$
- $\rho_w = 1020 \text{ kg/m}^3$
- $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$
- $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
- $k_s = 0,05 \text{ m}$
- $\rho = 0,4$

Dit zijn representatieve waarden voor het gebied en gebruikt in eerdere, vergelijkbare studies (zie Van Rijn, 2005). We hebben een rekenrooster genomen met een resolutie van 10 m, een tijdstap van 2 uur en rekenen met 1 tijdstap per half getij.

Dit betekent dat de getijstroming wordt geschematiseerd als blokstroming met 2 uur piek vloed snelheid, gevolgd door 2 uur piek eb snelheid.

Dit is in lijn met eerdere studies (Van Rijn, 2005; Tonnon, 2009). We rekenen in totaal 1 jaar door. Rest de calibratie parameters,  $K$  en  $\alpha$ , zie Vgl.-en (A.2) en (A.4). We hebben  $\alpha = 0,1$  genomen en kalibreren met behulp van  $K$ , zoals beschreven in het volgende hoofdstuk.

## 7 Effect varianten op volume onderhoudsbaggerwerkzaamheden

### 7.1 Calibratie en validatie model

We calibreren het SEDTUBE model van de Maasgeul aan de hand van de representatieve sedimentatie volumes gebaseerd op baggergegevens en modelsimulaties, zoals beschreven in paragraaf 5.2. Dit bedraagt  $150 \text{ m}^3/\text{m}/\text{jaar}$  in de huidige situatie zonder Maasgeul. We draaien hiertoe aan coëfficiënt  $K$ . De sedimentatievolumes worden bepaald aan de hand van de bodemveranderingen in de vaargeul, waarbij we alleen gebieden die eroderen (komen bij uitzondering voor) niet meenemen.

$K = 0,4$  geeft een sedimentatie van  $185 \text{ m}^3/\text{m}/\text{jaar}$  in Raai 4 en  $150 \text{ m}^3/\text{m}/\text{jaar}$  in Raai 5. Goede overeenkomst met de data is dus verkregen met een acceptabele aanpassing van  $K$  (standaardwaarde is 1.0). Tabel 7.1 laat de invloed van calibratie coëfficiënt  $K$  zien op de berekende aanzanding van de twee dwarsraaien.

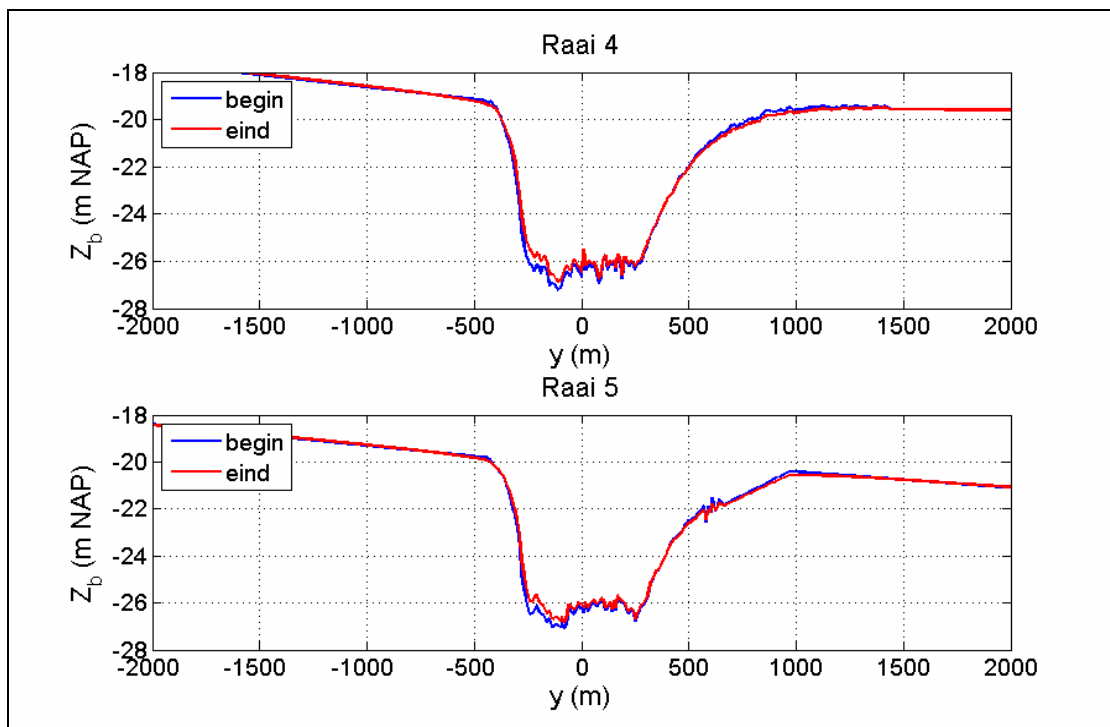
Tabel 7.1: Invloed calibratie coëfficiënt  $K$  op de aanzanding van de twee dwarsraaien van de Maasgeul in de situatie zonder MV2.

Calibratie coëfficiënt $K$ (-)	Aanzanding Raai 4 ( $\text{m}^3/\text{m}/\text{jaar}$ )	Aanzanding Raai 5 ( $\text{m}^3/\text{m}/\text{jaar}$ )
0.3	135	115
0.4	185	150
0.5	230	190

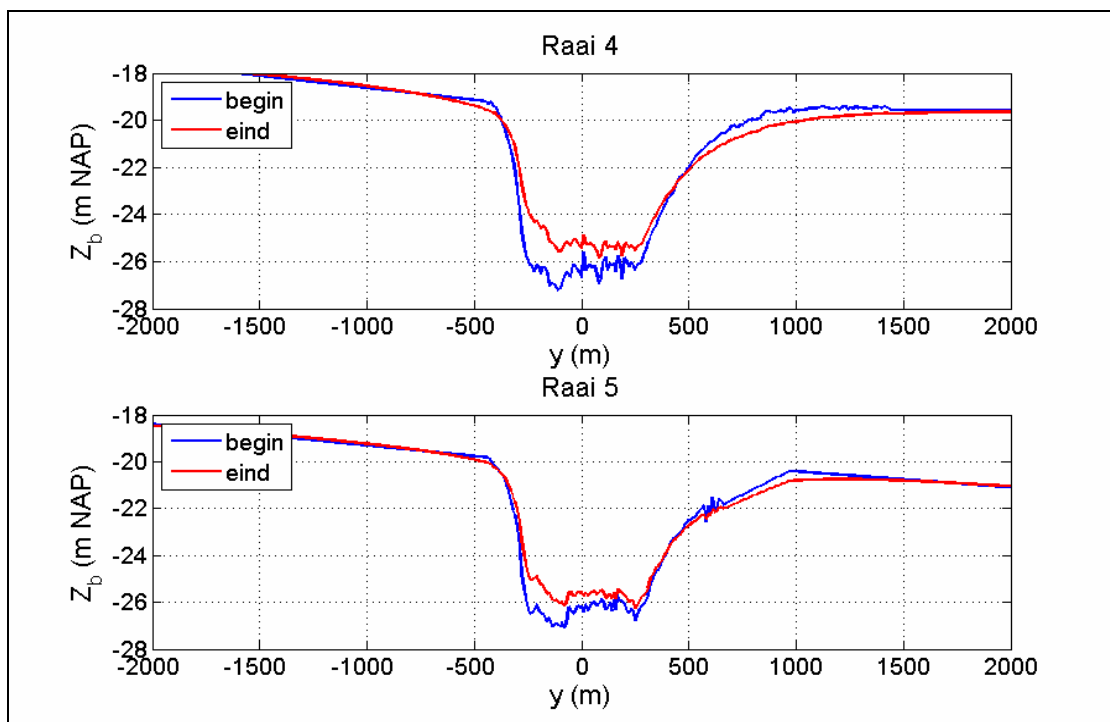
Figuur 7.1 laat de voorspelde ontwikkeling van de bodem langs de raaien zien. Het is duidelijk dat het meeste zand accumuleert aan de zuidkant van de geul, hetgeen ook in werkelijkheid het geval is.

Met dezelfde  $K$ -waarde hebben de situatie met MV2 doorgerekend waar de verwachte sedimentatie op basis van de Delft3D simulaties  $900 \text{ m}^3/\text{m}/\text{jaar}$  bedraagt. SEDTUBE berekent  $830$  en  $490 \text{ m}^3/\text{m}/\text{jaar}$  voor de 4 en 5 km raai, respectievelijk. De door SEDTUBE berekende waarden zijn dus aan de lage kant in vergelijking met de resultaten van Roelvink & Aarninkhof (2004), maar hebben wel de goede orde van grootte. Zeker gezien het beperkte aantal raaien dat doorgerekend is en de relatief eenvoudige schematisatie van het getij en de golven, mag dit een goed resultaat worden genoemd. Volgens de SEDTUBE berekeningen neemt de aanzanding toe met 450% voor Raai 4 en met 320% voor Raai 5.

Figuur 7.2 laat de voorspelde ontwikkeling van de bodem langs de raaien zien.



Figuur 7.1: Voorspelde morfologische ontwikkeling van twee dwarsraaien van de Maasgeul na 1 jaar. Geen verbreding, zonder MV2.



Figuur 7.2: Voorspelde morfologische ontwikkeling van twee dwarsraaien van de Maasgeul na 1 jaar. Geen verbreding, met MV2.

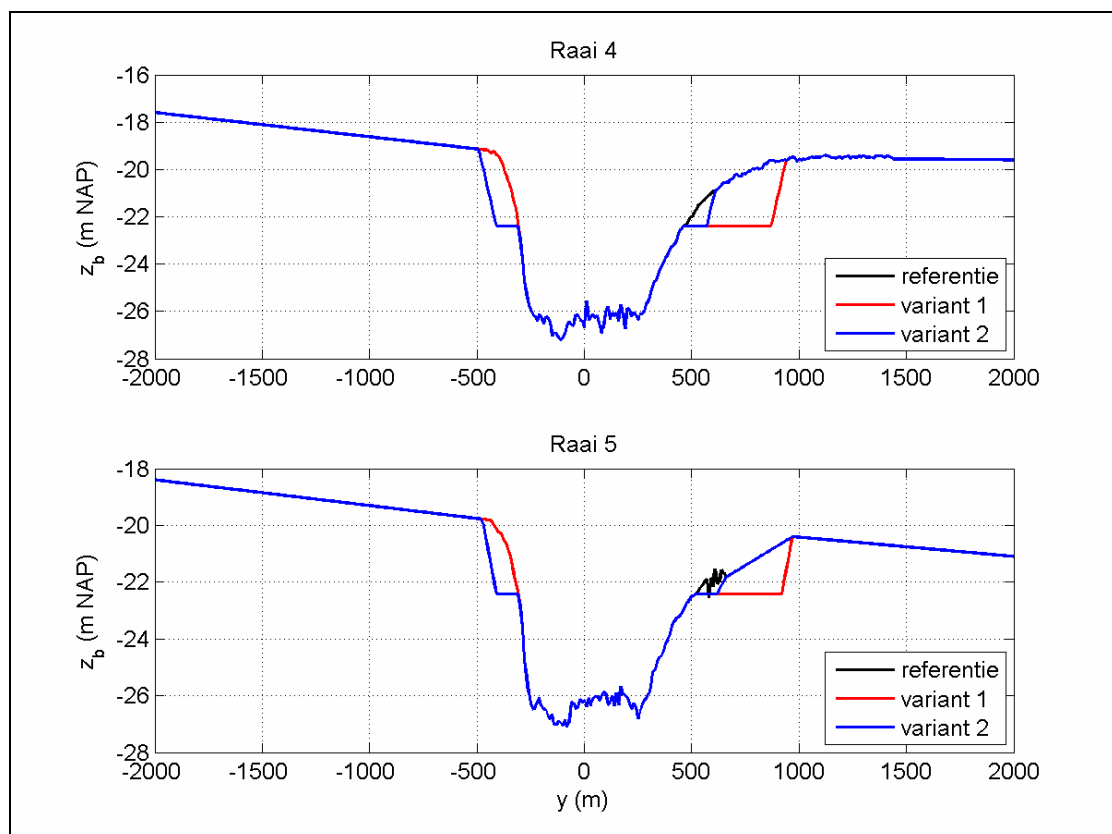
## 7.2 Beschrijving varianten

We bestuderen de invloed van drie varianten op de aanzanding in de Maasgeul:

1. Noordstrook variant. Verbreding van de geul aan de noordzijde met 400 m over een lengte van 5,5 km, beginnend 0,5 km buiten de havendammen. Aanlegniveau is -22,5 m MV (middenstandsvlak), opgebouwd uit een nautisch gegarandeerde diepte van 21,8 m beneden MV plus een bagger marge van 0,7 m. Dit correspondeert met een aanlegniveau van -22,5 m MV of -22,41 m NAP (MV = NAP + 0,09 m).
2. Tweestrooks variant. Verbreding van de geul aan zowel de noord- als zuidzijde met 100 m over dezelfde afstand als de Noordstrook variant en met dezelfde diepte.
3. MARIN variant. Een totale geulbreedte van 820 m met een diepte van 22,5 m beneden MV over de eerste 6 km van de geul. Eventuele verbreding van de geul moet aan de noordzijde plaatsvinden.

Er is een helling van 1:25 aangehouden welke een representatieve waarde is van de huidige helling van de vaargeul. Uitgangspunt is de situatie na aanleg van MV2.

De 4 en 5 km raaien hebben al een breedte van ongeveer 750 en 800 m bij -22,5 m MV. Het is de verwachting dat de verbreding naar 820 m, zeker aan de noordzijde, een minieme invloed heeft op het te verwachten baggervolume, zeker gegeven modelonzekerheden. Daarom wordt deze variant niet doorgerekend met SEDTUBE. Figuur 7.3 laat de Noordstrook en Tweestrooks varianten zien.



Figuur 7.3: De Noordstrook variant (no. 1) en de Tweestrooks variant (no. 2) voor de 4 en 5 km raai.

Voor de 2, 3, 4 en 5 km raai is berekend hoeveel sediment gebaggerd moet worden bij de aanleg van de drie varianten. Deze nemen over het algemeen af naarmate je verder van de kust af zit, aangezien de omgevingsdiepte toeneemt. Deze waarden zijn gemiddeld en vermenigvuldigd met de afstand waarover de varianten worden aangelegd (5500 m voor de Noordstrook en Tweestrooks variant en 6000 m voor de MARIN variant). Dit geeft  $6,5 \times 10^6 \text{ m}^3$  voor de Noordstrook variant,  $3,6 \times 10^6 \text{ m}^3$  voor de Tweestrooks variant en  $0,7 \times 10^6 \text{ m}^3$  voor de MARIN variant. Dit is een ruwe schatting van het benodigde baggervolume. Een betere schatting kan verkregen worden door de gehele bodem mee te nemen in de berekening in plaats van maar 4 dwarsraaien.

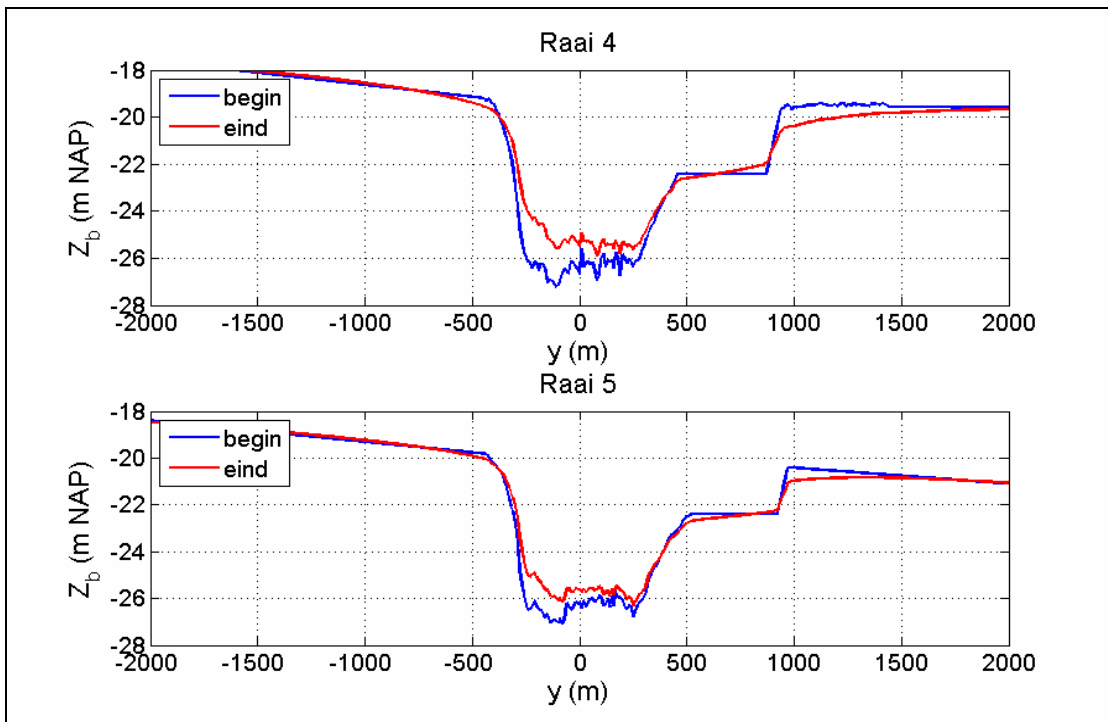
### 7.3 Invloed varianten op jaarlijks baggeronderhoud

Tabel 7.2 toont de modelresultaten voor de verschillende varianten. Hierbij veronderstellen we dat de invloed van de verbreding van de Maasgeul op de randvoorwaarden verwaarloosbaar klein is.

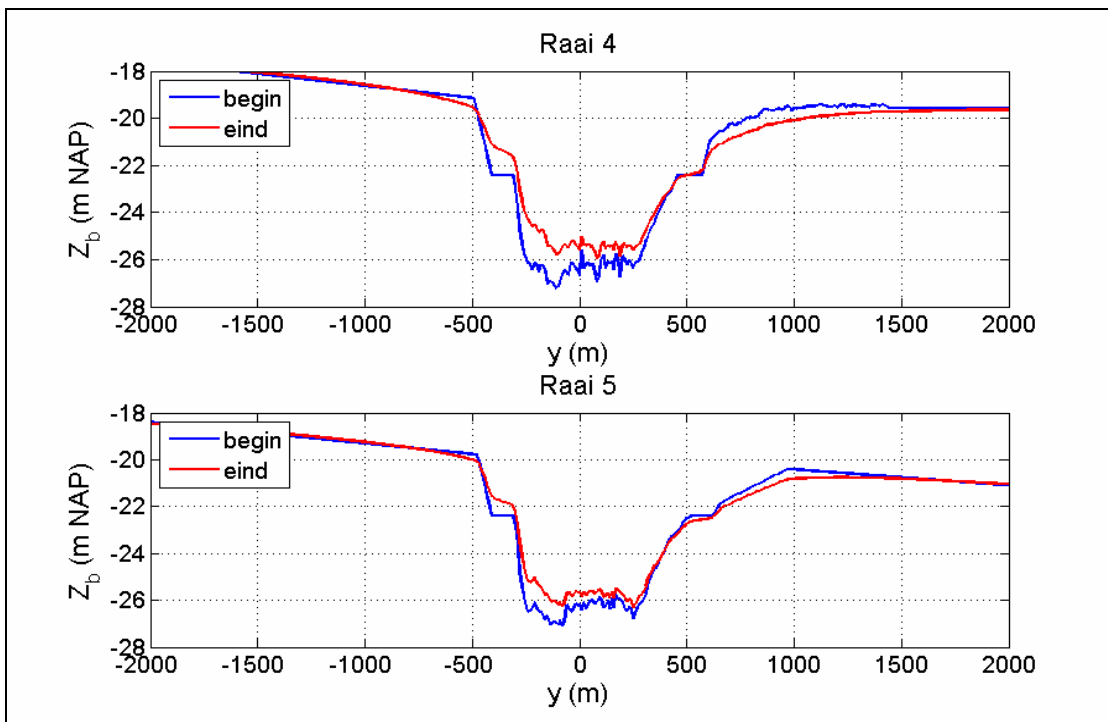
Tabel 7.2: Aanzanding van de twee dwarsraaien van de Maasgeul in de situatie met MV2.

Variant	Aanzanding Raai 4 ( $\text{m}^3/\text{m}/\text{jaar}$ )	Aanzanding Raai 5 ( $\text{m}^3/\text{m}/\text{jaar}$ )
Referentie	830	490
Noordstrook	830	495
Tweestrooks	845	500

Deze tabel laat zien dat variant 1 nauwelijks invloed heeft op de hoeveelheid sediment die in een jaar accumuleert in de vaargeul. Dit heeft te maken met het feit dat het overgrote deel van het sediment wordt aangevoerd vanuit het zuiden, meegevoerd door de hogere vloodsnelheden. Dit sediment zakt uit in het centrale deel van de geul voordat de noordelijke helling van de geul bereikt wordt. Als variant 1, wat een verbreding van 400 m aan de noordzijde betreft, al geen invloed heeft op de aanzanding, dan de MARIN variant met een veel kleinere verbreding aan dezelfde zijde zeker niet. Variant 2 resulteert in een toename van 15 en 10  $\text{m}^3/\text{m}/\text{jaar}$ , respectievelijk, voor Raai 4 en 5. Deze kleine toename is voornamelijk toe te schrijven aan extra uitzakking van sediment aan de zuidzijde van de geul. Er vindt bijna geen verandering plaats aan de noordzijde. Figuren 7.4 en 7.5 laten de voorspelde morfologische ontwikkeling van beide varianten langs de twee raaien zien.



Figuur 7.4: Voorspelde morfologische ontwikkeling van twee dwarsraaien van de Maasgeul na 1 jaar. Noordstrook variant (no. 2), met MV2.



Figuur 7.5: Voorspelde morfologische ontwikkeling van twee dwarsraaien van de Maasgeul na 1 jaar. Tweestrooks variant (no. 2), met MV2.



De relatieve toename van de aanzanding van de Maasgeul is 0,2% in geval van de Noordstrook variant en 2% in geval van de Tweestrooks variant. Dit correspondeert met  $\approx 3000 \text{ m}^3/\text{jaar}$  en  $\approx 35000 \text{ m}^3/\text{jaar}$  uitgaande van het door Delft3D berekende baggervolume van  $2,0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{jaar}$  voor de situatie met MV2 en zonder vaargeul verbreding, een constante relatieve toename over de gehele lengte van de Maasgeul.

De verwachting is dat een kleine verandering ( $\pm 1 \text{ m}$ ) in aanlegdiepte (in de doorgerekende varianten nu -22,5 MV) weinig invloed heeft op de aanzanding van de vaargeul, zeker in geval van de Noordstrook en MARIN variant.

## 8 Conclusies en aanbevelingen

Ten behoeve van de verbreding van de Maasgeul zijn drie varianten onderzocht

- Noordstrook variant. Verbreding van de geul aan de noordzijde met 400 m over een lengte van 5,5 km, beginnend 0,5 km buiten de havendammen. Aanlegniveau is -22,5 m MV (middenstandsvlak), opgebouwd uit een nautisch gegarandeerde diepte van 21,8 m beneden MV plus een bagger marge van 0,7 m. Dit correspondeert met een aanlegniveau van -22,5 m MV of -22,41 m NAP (MV = NAP + 0,09 m).
- Tweestrooks variant. Verbreding van de geul aan zowel de noord- als zuidzijde met 100 m over dezelfde afstand als de Noordstrook variant en met dezelfde diepte.
- MARIN variant. Een totale geulbreedte van 820 m met een diepte van 22,5 m beneden MV over de eerste 6 km van de geul. Eventuele verbreding van de geul moet aan de noordzijde plaatsvinden.

### Sedimentsamenstelling

- Het te baggeren materiaal bestaat uit zand, klei, veen en leem
- De bovenste 0,5 meter bestaat uit modern zeezand met een d50 van 180-250  $\mu\text{m}$  en een slibgehalte van ongeveer 3%
- Daaronder bevindt zich tot 3 km uit de havenpielen een tot 5 meter dikke laag stugge lagunaire klei
- Onder deze klei bevindt zich Basisveen en lokaal rivierleem
- Onder de klei en het veen is relatief grof fluviatiel zand aanwezig (200-340  $\mu\text{m}$ , slibgehalte 5%), maar dat ligt grotendeels onder de nieuwe vaargeuldiepte

### Slibverspreiding

- Bij winning van het te baggeren materiaal bestaande uit zand, klei, veen en leem zal bij de grootste variant (verbreding noordzijde met 400 meter) maximaal ongeveer 2 Mton Slib in het water vrijkomen in een tijdsperiode van minder dan een jaar. Dit materiaal zal voor een groot gedeelte in het havengebied weer neerslaan. Voor de tweede variant (verbreding weerszijden met 100 meter) is dit ongeveer 1 Mton slib en voor de Marin variant 0,2 Mton slib.
- Indien het bij de verbreding vrijkomende materiaal gebruikt wordt voor de Maasvlakte zal een gedeelte van het slib achterblijven in de stort zelf en een gedeelte zal zich in het water verspreiden. Deze laatste hoeveelheid bedraagt maximaal 300 kton (150 kton voor variant 2 en 30 kton voor de Marin variant).
- Deze hoeveelheden zijn zeer gering ten opzichte van de in de MER aanleg Maasvlakte gehanteerde marge van 12 – 18 Mton in 2-5 jaar.
- Indien het materiaal ten noorden van de Maasgeul gestort wordt zijn geen extra effecten te verwachten omdat bij de winning al aangenomen is dat 100% van het slib in het water terecht zal komen. Een grotere verspreiding in een richting waar zich niet direct Natura 2000 gebieden bevinden geeft zelfs kleinere effecten

### Onderhoud vaargeul

- Met een simpel raaimodel (SED-TUBE) kunnen de eerdere resultaten met Delft3D en het gemiddelde jaarlijkse volume baggeronderhoud in de huidige Maasgeul goed worden gereproduceerd. SED-TUBE is daarom geschikt om ook de verandering in jaarlijks volume baggeronderhoud na verbreding te voorspellen.
- De relatieve toename van de aanzanding van de Maasgeul is 0,2% in geval van de Noordstrook variant en 2% in geval van de Tweestrooks variant.
- De relatieve toename van de MARIN variant is nog veel kleiner dan die van de Noordstrook variant (< 0,2 %)
- Gezien de marginale toename van het sedimentatievolume lijkt vervolg onderzoek met behulp van een gedetailleerder en nauwkeuriger model waarbij de gehele Maasgeul wordt beschouwd niet noodzakelijk.

### Gebruik vrijkomend materiaal

- Bij de verbreding komt maximaal 6,5 Mm<sup>3</sup> vrij in het geval van de Noord variant, 3,6 Mm<sup>3</sup> in het geval van de Tweestrooks variant en 0,7 Mm<sup>3</sup> in het geval van de Marin variant.
- Het vrijkomende materiaal bevat veel klei, veen en leem.
- Het vrijkomende materiaal kan daarom niet gebruikt worden als suppletie materiaal.
- De onderste laag (het Pleistocene zand) is wel geschikt als suppletie materiaal, baggertechnisch is deze echter lastig apart te winnen, omdat deze laag grotendeels onder de te baggeren laag ligt.
- Geadviseerd wordt na te gaan of het door de verbreding vrijkomende materiaal te gebruiken is bij de aanleg van de 2e Maasvlakte. Het vrijkomende slib zal waarschijnlijk niet tot problemen leiden omdat de hoeveelheden verwaarloosbaar zijn ten opzichte van de hoeveelheden waarmee in de MER Maasvlakte rekening is gehouden. Ten aanzien van de bouwtechnische aspecten van de Maasvlakte moet bij gebruik van het vrijkomende materiaal rekening gehouden worden met o.a. zetting en klink. Of dit toelaatbaar is dient nagegaan te worden.

## 9 Referenties

De Vries, M., 2007. Morphodynamic modelling of the Haringvlietmonding using Delft3D. M.Sc. thesis, University of Twente, The Netherlands.

Van Heteren, S., Van der Spek, A.J.F. en De Groot, T.A.M., 2002. Architecture of a preserved Holocene tidal complex offshore the Rhine-Meuse mouth, the Netherlands. TNO-rapport NITG 01-27-A.

Hijma, M.P., Van der Spek, A.J.F. en Van Heteren, S., 2009. Development of a mid-Holocene estuarine basin near the Rhine-Meuse mouth, offshore the Netherlands. Manuscript in review, Marine Geology.

Infram, 2004. Landaanwinning t.b.v. aanleg Tweede Maasvlakte. Onderhoudsaspecten Doorsteekvariant. Rapport 04i100, Infram, Nederland.

De Kok, J.M., - Effecten van de aanleg van een tweede Maasvlakte op de aanslibbing in de Maasmond. RIKZ/99.013.

De Kok, J.M., - Slibtransport rond de Maasmond. Resultaten van het Siltman onderzoek. RIKZ/2000.027.

De Kok, J.M., - Getijafhankelijk storten van baggerspecie. Resultaten van numeriek modelonderzoek. RIKZ/2002.027.

Milieueffectrapport Aanleg Maasvlakte 2, Hoofdrapport, april 2007

Roelvink, J.A., Aarninkhof, S.G.J, 2005. Onderbouwend onderzoek MER Maasvlakte-2. Onderdeel Morfologie. Rapport Z3959, WL|Delft, Nederland.

Soulsby, R. 1997. Dynamics of marine sands. Thomas Telford Publications, UK.

Svasek, J.N., 1964. Behaviour of trial dredge trench in the sea bed of the North Sea near Scheveningen. Report K 272, Deltadienst, The Netherlands.

Tonnon, P.K., 2009. BritNed interconnector Project Maasvlakte, The Netherlands – Inshore Natural Backfill Study. Report 1200422, Deltares, The Netherlands.

Van Rijn, L.C., 2005. Principles of sedimentation and erosion engineering in rivers, estuaries and coastal seas. Aqua publications, Nederland.

## A Appendix A Belangrijkste vergelijkingen SEDTUBE model

De aanpassing van het dieptegemiddelde suspensie transport,  $Q_{s,x}$ , in een stroombuis wordt benaderd met:

$$\frac{dQ_{s,x}}{dx} = -A(Q_{s,x} - Q_{s,x,eq}) \quad (\text{A.1})$$

met  $x$  de horizontale coördinaat dwars op de vaargeul en  $A$  een relaxatie factor bepaald aan de hand van het SURTRENCH model:

$$A = \alpha \frac{w_s u_*}{h} \left( 1 + \frac{2w_s}{u_*} \right) \left( 1 + \frac{H_s}{h} \right)^2 \quad (\text{A.2})$$

met  $\alpha$  een calibratie coëfficiënt (0.05-0.20),  $w_s$  de valsnelheid van gesuspendeerd sediment,  $u_*$  de schuifspanningssnelheid,  $H_s$  de significante golfhoogte en  $h$  de waterdiepte.

Het bodemtransport wordt als volgt berekend:

$$q_{b,c} = 0.015(1 - p_{mud}) f_{silt} u h M_e^{1.5} \left( \frac{D_{50}}{h} \right)^{1.2} \quad (\text{A.3})$$

met  $f_{silt}$  de siltfactor (= 1 voor het geval  $D_{50} > 0.062$  mm),  $u$  de dieptegemiddelde snelheid en

$$M_e = \frac{(u_e - u_{cr})}{\sqrt{(s-1)gD_{50}}} \quad (\text{A.4})$$

met  $u_e = u + \gamma U_w$  de effectieve snelheid,  $\gamma = 0.4K$ ,  $K$  een calibratie parameter,  $U_w$  de orbitaalsnelheid gegenereerd door golven,  $u_{cr}$  de kritische stroomsnelheid,  $s$  de relatieve sediment dichtheid en  $g$  de zwaartekrachtsversnelling.

Het evenwichtsuspenstietransport wordt berekend met de volgende vergelijking:

$$q_{s,c} = 0.012(1 - p_{mud}) f_{silt} u h M_e^{2.4} D_*^{-0.6} \quad (\text{A.5})$$

met  $D_*$  de dimensieloze korreldiameter.

## B Appendix B Richtingsafhankelijke golfgegevens afkomstig van het Europlatform voor de periode 1979-2001

Tabel B.1: Kans van voorkomen [%] per golfrichting [°N] en golfhoogte [m] klasse.

	0-45	45-90	90-135	135-180	180-225	225-270	270-315	315-360	Totaal
0.0-1.0	9.56	3.34	1.89	1.95	5.27	8.14	4.99	10.50	45.63
1.0-2.0	6.15	2.08	0.92	0.77	6.72	9.58	3.75	7.84	37.80
2.0-3.0	1.23	0.36	0.05	0.08	2.25	4.50	1.54	2.51	12.52
3.0-4.0	0.19	0.02	0.00	0.02	0.41	1.49	0.55	0.73	3.41
4.0-5.0	0.03	0.00	0.00	0.00	0.03	0.21	0.15	0.15	0.57
5.0-6.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.03	0.07
6.0-7.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
7.0-8.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8.0-9.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9.0-10.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
> 10.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>Totaal</b>	17.15	5.79	2.87	2.81	14.68	23.95	10.99	21.76	100.00

Tabel B.2: Significant golfhoogte  $H_s$  [m] per golfrichting [°N] en golfhoogte [m] klasse.

	0-45	45-90	90-135	135-180	180-225	225-270	270-315	315-360
0.0-1.0	0.64	0.62	0.63	0.60	0.68	0.65	0.60	0.62
1.0-2.0	1.38	1.39	1.30	1.35	1.45	1.45	1.44	1.42
2.0-3.0	2.37	2.33	2.32	2.28	2.38	2.43	2.41	2.41
3.0-4.0	3.38	3.16	3.79	3.40	3.30	3.37	3.41	3.40
4.0-5.0	4.36	4.69	0.00	4.44	4.29	4.37	4.38	4.33
5.0-6.0	5.01	-	-	-	5.76	5.29	5.38	5.34
6.0-7.0	-	-	-	-	-	6.29	-	6.26
7.0-8.0	-	-	-	-	-	-	-	-
8.0-9.0	-	-	-	-	-	-	-	-
9.0-10.0	-	-	-	-	-	-	-	-
> 10.0	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabel B.3: Golfperiode  $T_{m02}$  [s] per golfrichting [°N] en golfhoogte [m] klasse.

	0-45	45-90	90-135	135-180	180-225	225-270	270-315	315-360
0.0-1.0	4.01	3.70	3.51	3.46	3.54	3.68	3.83	4.27
1.0-2.0	4.66	4.42	4.10	4.06	4.24	4.36	4.48	4.88
2.0-3.0	5.42	5.20	4.98	4.88	5.01	5.19	5.24	5.52
3.0-4.0	6.19	5.86	5.80	5.72	5.65	5.84	5.93	6.18
4.0-5.0	6.82	6.50	0.00	6.87	6.31	6.46	6.53	6.79
5.0-6.0	7.10	-	-	-	6.80	6.88	6.89	7.36
6.0-7.0	-	-	-	-	-	7.40	-	7.90
7.0-8.0	-	-	-	-	-	-	-	-
8.0-9.0	-	-	-	-	-	-	-	-
9.0-10.0	-	-	-	-	-	-	-	-
> 10.0	-	-	-	-	-	-	-	-