

Bachelor Eindopdracht Morfodynamische verwachtingen voor het zandgolfveld ten westen van de Maasvlakte 2

Robbin Schipper S1118013



Externe begeleiders:

Drs. Ad Stolk Rijkswaterstaat Zee en Delta

Dr. Ir. Leendert Dorst Dienst der Hydrografie, Koninklijke Marine

Begeleider Universiteit Twente:

Dr. Ir. Bas Borsje

Datum: 11-07-2014

In dit verslag leest u het onderzoek dat is uitgevoerd voor de bachelor eindopdracht van de opleiding Civiele Techniek aan de Universiteit Twente. Dit onderzoek is uitgevoerd bij de Koninklijke Marine, in samenwerking met Rijkswaterstaat. Het is een onderzoek naar de gedragingen van een zandgolfveld voor de kust van Nederland, onder invloed van grootschalige zandwinputten. Tevens wordt het gedrag van de bodemvormen in de zandwinputten onderzocht.

Voorwoord

De periode van eind april tot eind juni heb ik in Den Haag doorgebracht, op de Frederikkazerne. Dit was een hele ervaring, omdat ik nog nooit op een militaire kazerne geweest was. En hoewel er erg veel 'burgers' rondliepen, heerste er toch een soort militaire sfeer die anders is dan bijvoorbeeld op de Universiteit Twente. Naast de verschillen tussen marechaussee, marine en landmacht ben ik ook veel andere zaken te weten gekomen. De Dienst der Hydrografie was mij tot voor afgelopen maart bijvoorbeeld onbekend. Toch heb ik een erg leuke en leerzame tijd doorgemaakt bij de Dienst der Hydrografie. Binnen de Dienst valt het op dat de medewerkers erg gedreven, enthousiast en behulpzaam zijn. Dit vertaalde zich ondermeer in de betrokkenheid van de medewerkers en hun behulpzaamheid, wanneer ik hier beroep op deed. Nu ik mijn onderzoek heb afgerond wil ik graag van de gelegenheid gebruik maken om enkele personen binnen de Dienst der Hydrografie, maar ook bij andere organisaties te bedanken. Ten eerste wil ik mijn begeleider Leendert Dorst van de Dienst der Hydrografie bedanken, voor zijn kritische blik op delen van mijn onderzoek en zijn objectieve inbreng. Ook Ad Stolk van Rijkswaterstaat wil ik graag bedanken, vanwege zijn bijdrage, feedback en enthousiaste houding. Mijn begeleider vanaf de Universiteit Twente, Bas Borsje wil ik ook bedanken. Bas heeft mij gedurende het gehele onderzoek van positieve feedback voorzien en mij in de goede richting gewezen wanneer dit nodig was. Daarnaast zijn er inspanningen geweest om mij over te halen tot het volgen van de master waterbeheer aan de Universiteit Twente volgend jaar, dit is helaas niet gelukt. Ik zal namelijk een andere weg inslaan door Geoengineering te gaan studeren aan de TU Delft, toch wil ik Bas Borsje en Pieter Roos van de Universiteit Twente bedanken voor de enthousiaste inspanning om mij te interesseren voor het vakgebied waterbeheer en hun hulp bij de literatuur omtrent het onderzoek. Tijdens het onderzoek heb ik vele uren doorgebracht in de kamer van Thijs Ligteringen en Ronald Kuilman, die onder het genot van een kop koffie altijd in waren voor een leuke discussie of goed gesprek. Tevens hebben zij mij geholpen met uiteenlopende zaken in mijn onderzoek, hiervoor wil ik beide heren bedanken. Daarnaast wil ik Marcel Lans, Bart Vergeer, Riejet Willemsen en Daniëlle van Kuijk bedanken voor de vele vragen die ze voor mij hebben kunnen beantwoorden en de hulp die ze mij hebben geboden omtrent de bathymetrie. Daarnaast wil ik de overige medewerkers van de Dienst der Hydrografie bedanken voor de tijd die ze hebben genomen om mij wegwijs te maken binnen de Dienst der Hydrografie en voor de beschrijving van de vele taken die de Dienst op zich neemt. Ook wil ik Marloes van den Boomgaard van Svašek Hydraulics bedanken voor de feedback en discussie omtrent de inschattingen die in 2013 zijn gemaakt over het gebied. Ook wil ik Hans van der Gouwe bedanken voor zijn inbreng en objectieve kijk op het onderzoek.

Inhoudsopgave

Samenvatting	4
1 Inleiding	6
1.1 Inleiding op het onderwerp	6
1.2 Methodiek.....	10
1.3 Afbakening onderzoek	10
1.4 Leeswijzer	10
2 Algemeen	11
2.1 Bodemvormen in de Noordzee.....	11
2.2 Rijkswaterstaat	12
2.3 De Dienst der Hydrografie	13
3 Theorie	14
3.1 Zandgolven.....	14
3.2 Zandwinputten.....	16
3.3 Pijpleidingen en kabels	22
4 Gemodelleerde gedragingen zandwinputten.....	23
4.1 Huidige situatie	23
4.2 Samenvatting rapport Svašek Hydraulics	24
4.3 Kritische kanttekeningen rapport Svašek Hydraulics	26
5 Inschatting van effecten zandwinputten	28
5.1 Hoe zullen de zandwinputten en het gebied vervormen in de toekomst?	28
5.2 Hoe zal het zandgolfveld zich gedragen onder invloed van de zandwinputten?	29
5.3 Hoe zullen de Euro- en Maasgeul beïnvloed worden?	32
5.4 Wat is de invloed van de zandwinputten op pijpleidingen en kabels in het gebied?	33
6 Data analyse.....	34
6.1 Wat zijn de gedragingen van het gebied geweest in de afgelopen jaren?	34
6.2 Is er een mogelijkheid tot het herstel van bodemvormen in de zandwinputten?	45
7 Koppeling data analyse en inschatting effecten zandwinputten.....	48
8 Conclusies	50
9 Vooruitblik	52
10 Bibliografie	53
11 Bijlagen.....	55
Bijlage 1: Resultaten simulaties en berekeningen Svašek Hydraulics	55
Bijlage 2: Typische eb- en vloedstroming tijdens hoog- en laagwater	56
Bijlage 3: Verschil in stroomrichting voor maximale ebstroming.....	59
Bijlage 4: Actieve zandwingebieden rondom de Euro- en Maasgeul	60
Bijlage 5: Herstel van bodemvormen in zandwinputten	61
Bijlage 6: Contacten	62

Samenvatting

Zandgolfvelden zijn gebieden in de Noordzee waar zandgolven waargenomen worden. Zandgolven zijn bodempatronen die hoogtes tot wel 5 meter en golflengtes tot wel 500 meter kunnen bereiken. Omdat de Noordzee onderhevig is aan getijdenstroming verplaatsen deze zandgolven zich. De verplaatsing van zandgolven kan ertoe leiden dat het scheepvaartverkeer in de Noordzee in gevaar komt. Ook is het mogelijk dat pijpleidingen en kabels door verplaatsing van zandgolven kunnen breken of beschadigd worden. Om deze reden is kennis over zandgolven gewenst, omdat toekomstige veranderingen op deze manier voorspeld kunnen worden zodat hierop geanticipeerd kan worden.

Aan de bodem van de Noordzee wordt constant gemeten. Deze metingen worden gebruikt om kaarten te maken, om de scheepvaart te informeren over de diepgang van gebieden in de Noordzee. Omdat de gehele Noordzee niet elk jaar opgemeten kan worden, zijn de dieptes die opgemeten zijn niet altijd actueel. Kennis van zandgolven kan hierbij uitkomst bieden, om strategieën op te kunnen stellen zodat de scheepvaart toch een veilige doorgang zal kunnen hebben. Daarnaast kan de kennis gebruikt worden om schade aan pijpleidingen en kabels te voorkomen.

In de jaren 2009 tot 2013 heeft er een zandonttrekking in de Noordzee plaatsgevonden. Het zand is op 2 locaties gewonnen en uit deze zandwinning zijn zogenaamde zandwinputten ontstaan. Het totale volume van het zand dat onttrokken is, is 200 miljoen m³. Dit zand is gebruikt om de uitbreiding van Rotterdam te realiseren: de Tweede Maasvlakte. De zandwinputten bevinden zich dicht bij een grote scheepvaartroute. De Euro- en Maasgeul bevinden zich dicht bij de zandwinputten en worden gebruikt door diepstekend scheepvaartverkeer. De diepten van deze geulen wordt op peil gehouden door Rijkswaterstaat, zodat deze diepstekende schepen de haven van Rotterdam kunnen bereiken. De aanwezige zandwinputten zullen hun invloed hebben op het gebied. Hierdoor kunnen de zandgolven die aanwezig zijn zich anders gaan gedragen. Dit zou kunnen leiden tot grotere onzekerheden in het gebied voor scheepvaart, schade aan pijpleidingen en kabels of een toename in aanzanding van de Euro- en Maasgeul. Vanwege deze redenen is het onderzoek dat u nu leest uitgevoerd. Vanuit Rijkswaterstaat en de Koninklijke Marine is een inschatting van de effecten van de aangelegde zandwinputten gevraagd, om hierop te kunnen anticiperen. Naast veranderingen in het gebied, zullen de zandwinputten zelf ook veranderingen doormaken. Het verdiepen of vullen van de zandwinputten zal interessant zijn voor de veranderingen in de toekomst. Daarnaast zou het ook mogelijk kunnen zijn dat er zich in de zandwinputten weer zandgolven voordoen.

Zandgolven zijn in het verleden uitvoerig onderzocht. Ook zijn er onderzoeken geweest naar zandwinputten. Zandgolven in de Noordzee ontstaan doordat de getijdenstroming in de Noordzee in aanraking komt met de onregelmatige bodem. Dit zorgt ervoor dat zand verplaatst kan worden, zodat zandgolven kunnen ontstaan. Deze zandgolven bewegen in de Noordzee van zuidwest naar noordoost, met de getijdenstroming mee. De verplaatsing van de zandgolven is erg afhankelijk van de locatie. Over het algemeen blijken de zandgolven zich enkele meters per jaar te verplaatsen. Zandwinputten zullen vanwege hun vorm en locatie een invloed hebben op het stromingspatroon. Hierbij verandert het patroon in een gebied om de zandwinputten. Dit zorgt er voor dat de stroomsnelheden in het gebied veranderen en dat de richtingen van de stroming in het gebied ook veranderen. De mate waarin dit gebeurt is afhankelijk van de vorm en de oriëntatie van de zandwinputten ten opzichte van de stroming. Over het algemeen zal de stroomsnelheid ter hoogte van de zandwinputten dalen. Dit zorgt ervoor dat het zand dat in de waterkolom aanwezig is zich af zal kunnen zetten in de zandwinput, waardoor deze zich verdiept. Daarnaast zullen de hellingen van de zandwinputten onder invloed van stroming vervlakken.

De gedragingen en invloeden van de zandwinputten en het zandgolfveld eromheen zijn onderzocht door ingenieursbureau Svašek Hydraulics. Hierin is onderzocht welke invloeden de zandwinputten hebben op de stroomsnelheden, stroomrichtingen, golfrichtingen en golfhoogtes. Tevens is door Svašek Hydraulics onderzocht wat de bodemveranderingen in het gebied zullen zijn in de toekomst. Uit het onderzoek is gebleken dat de Euro- en Maasgeul op specifieke locaties aanzanden en dat ook de beide zandwinputten zullen aanzanden. De inschatting is dat over een periode van 30 jaar, de zandwinputten tussen de 25 en 30% zullen aanzanden. Uit hetzelfde onderzoek is gebleken dat de zandwinputten zelf zich niet verplaatsen. Het onderhoud aan de Maasgeul blijkt met 25% toe te nemen in de komende 30 jaar.

De veranderingen in de stromingspatronen in het gebied rondom de zandwinputten, zal kunnen leiden tot veranderingen in de toekomst. Deze veranderingen zouden kunnen leiden tot het ontstaan van nieuwe zandgolven, of een verandering in het huidige zandgolfveld. De zandgolven zullen namelijk een ander patroon kunnen aannemen door de veranderingen in het gebied. Pijpleidingen en kabels zijn in de nabijheid van de zandwinputten niet aanwezig, maar bevinden zich op een geruime afstand. Vanwege deze afstand is de inschatting dat deze pijpleidingen en kabels niet beïnvloed zullen worden door de zandwinputten.

De opnemingen van de bodem van de Noordzee zijn in het onderzoek geanalyseerd. Hierbij is gekeken naar veranderingen in patronen, dieptes en verplaatsingen van zandgolven. Uit deze analyse is gebleken dat ten zuidwesten van de zandwinputten een toegenomen verplaatsing van zandgolven heeft plaatsgevonden in de jaren 2008 tot 2012. Daarnaast lijken de dieptes van de gebieden rondom de zandwinputten toegenomen en lijken de dieptes in gebieden ten zuidoosten van de zandwinputten juist afgenomen. Aan de hand van stromingsgegevens, waterdieptes en gegevens over de bodem in de Noordzee is de inschatting gemaakt dat er een mogelijkheid is tot het herstel van zandgolven in de noordelijke zandwinput.

De waargenomen aanzanding van de Euro- en Maasgeul lijken overeen te komen met de veranderingen die ingeschat zijn door ingenieursbureau Svašek Hydraulics.

Het onderzoek heeft de volgende belangrijkste conclusies opgeleverd:

- De zandwinputten zullen aanzanden in de toekomst, waarbij het waarschijnlijk is dat de aanzanding grofweg overeenkomt met de ingeschatte 25 tot 30% door ingenieursbureau Svašek Hydraulics.
- De zandwinputten zullen zich niet verplaatsen in de toekomst.
- De veranderingen in de stromingspatronen in het gebied zullen kunnen leiden tot een toegenomen onzekerheid over het gebied in de toekomst.
- Binnen het gebied zal de komende 30 jaar zowel aanzanding als erosie plaatsvinden.
- De bodemveranderingen die waargenomen zijn in de opnemingen van het gebied lijken overeen te komen met de veranderingen in het gebied zoals ingeschat is door Svašek Hydraulics.
- Er is een mogelijkheid dat er zich opnieuw bodemvormen voordoen in de noordelijke zandwinput.
- De inschatting is dat pijpleidingen en kabels niet beïnvloed zullen worden door de aangelegde zandwinputten.

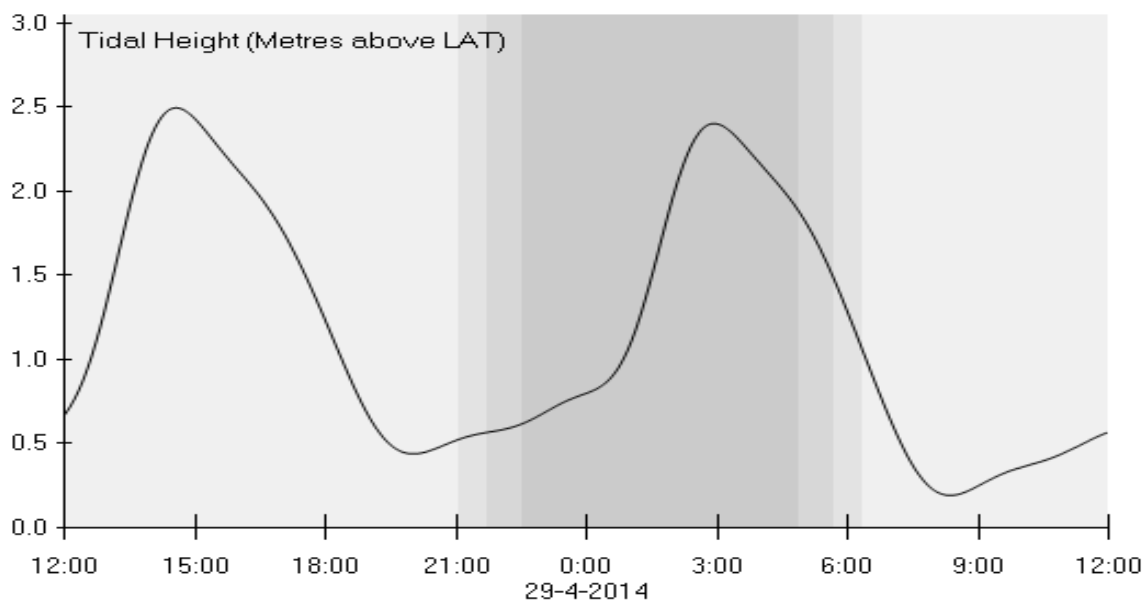
Naast deze conclusies is het advies gegeven voor aanvullend onderzoek in de toekomst. Dit onderzoek zou door middel van een modellering van de veranderingen in het gebied en een aanvullende data analyse een nauwkeurigere inschatting kunnen geven van de veranderingen in het gebied.

1 Inleiding

1.1 Inleiding op het onderwerp

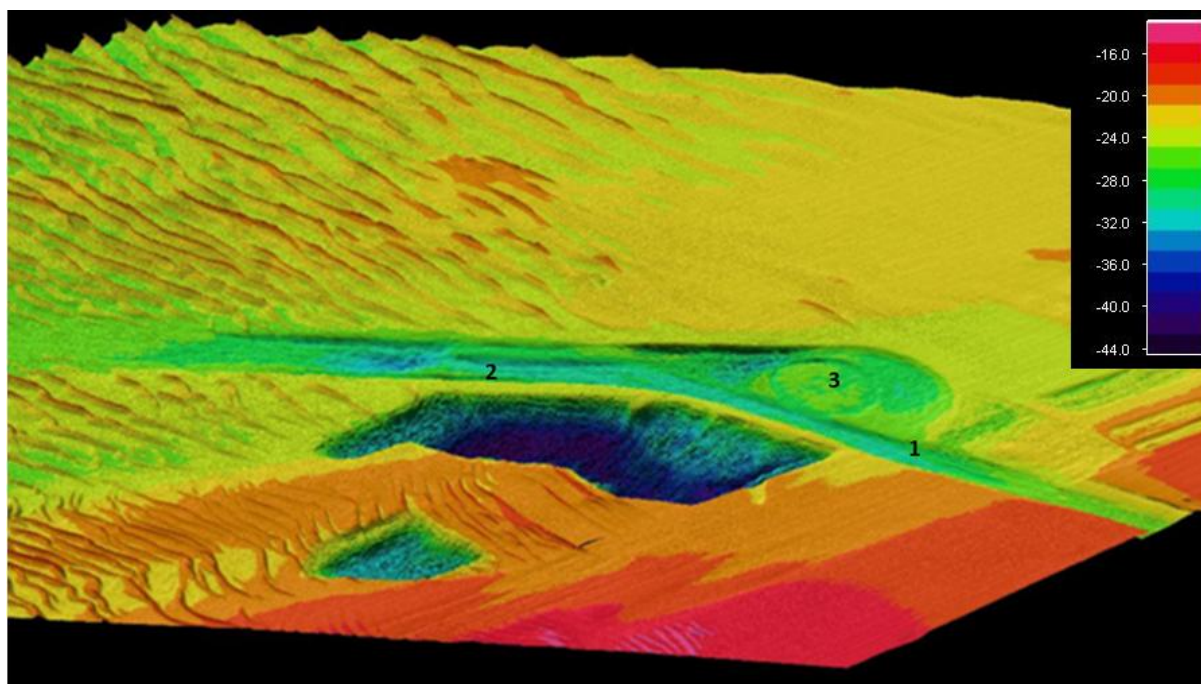
De Noordzee biedt ruimte aan een grote verscheidenheid van activiteiten. Naast scheepvaart, is er ook sprake van visserij, zandwinning en zijn er olie- en gasboringen. De Noordzee wordt begrensd door Nederland, Groot Brittannië, Noorwegen, Denemarken, België, Duitsland en Frankrijk. Het grootste gedeelte van de bodem van de Noordzee bestaat uit fijn, tot grof zand (125 - 500µm). De korrelgrootte van het sediment wordt geleidelijk fijner richting het noordoosten (Van Der Veen et al., 2006). De Noordzee is een ondiepe zee met waterdieptes die in de tientallen meters lopen (Németh, 2003).

De Nederlandse kust is onderhevig aan getijdenstromingen. Elke 12 uur en 25 minuten vindt er een getijdencyclus plaats. Hierin is het eenmaal hoog, en eenmaal laagwater. Dit is de reden dat men de getijdenstroming in de Noordzee een M2 getij noemt, waarin de M voor 'maan' staat en 2 het aantal cycli per dag beschrijft. De getijdenstroming stroomt om een amfidromisch punt heen, waarbij het amfidromisch punt zelf verticaal gezien niet beweegt. In de Noordzee, tussen Nederland en Groot-Brittannië is zo'n amfidromisch punt aanwezig, verder zijn in de Noordzee zijn nog twee amfidromische punten aanwezig, voor de kust van Denemarken en Noorwegen (Hisgen & Laane, 2004). In figuur 1 is voor een periode van 24 uur te zien hoe de waterhoogte ten opzichte van LAT varieert (Lowest Astronomical Tide ofwel laagste waterstand onder invloed van getijden) voor Lichteiland Goeree in de Noordzee. Hierin is duidelijk het M2 getij te zien. Deze getijdenstroming zorgt in Nederland dus voor de hoog- en laagwaterstanden. Daarnaast zorgen deze getijdenstromingen voor verschillende processen op de bodem van de Noordzee.



Figuur 1: Waterhoogtes Lichteiland Goeree bron: NL Tides (2014).

Zandwinning in de Noordzee is in de afgelopen jaren enorm toegenomen. Waar in de jaren '80 sprake was van 5Mm³ zandwinning per jaar, is er in 2005 meer dan 25Mm³ aan zand gewonnen. De oorzaak hiervoor is de toegenomen schaarheid van zand op land en een verandering van het kustbeleid in 1990, waarbij de kust van Nederland niet verder achteruit mocht gaan. Zodoende zou de zandextractie in de toekomst zelfs kunnen toenemen tot 110Mm³ per jaar (Boers, 2005; de Boer et al., 2011). In de Noordzee wordt zand voor verschillende doeleinden onttrokken. Ten eerste komt het winnen van zand uit zandwinputten voor in de Noordzee. Daarnaast worden geulen op diepte gebaggerd en worden zandgolven afgetopt, om de veiligheid voor de scheepvaart te waarborgen.



Figuur 2:DTM locaties zandwinputten en Maas- en Eurogeul bron: Hr. Ms. Snellius (2012)

In 2009 is men begonnen met de aanleg van een uitbreiding van de haven van Rotterdam: Maasvlakte 2 (Stolk & Dijkshoorn, 2009). Om aan de zandbehoefte van de Maasvlakte 2 te voldoen, is er gekozen voor de aanleg van zandwinputten. Waar in het verleden tot slechts 2 meter afgegraven mocht worden, is het voor de aanleg van de Maasvlakte 2 toegestaan om dieper te graven om aan de grondbehoefte te voldoen. Dit is uitgewerkt in het Regionaal Ontgrondingenplan Noordzee 2 en de Nota Ruimte, 2004 (VROM, 2004). Onder dit ontgrondingenplan en de Nota Ruimte is het mogelijk geworden om diepe zandwinputten aan te leggen. Vervolgens is in een milieueffectrapportage van het Havenbedrijf Rotterdam onderzocht hoe het ontwerp van de zandwinputten eruit zou kunnen zien. In figuur 2 is een DTM (Digital Terrain Model) afkomstig uit hydrografische opnemingen van de Dienst der Hydrografie te zien, waarin beide zandwinputten, het zandgolfveld en zowel de Maas- als de Eurogeul aanwezig zijn en in tabel 1 zijn de gegevens van de aangelegde zandwinputten te zien. De dieptes zijn aangegeven ten opzichte van LAT.

In figuur 2 zijn de zandwinputten duidelijk te onderscheiden. Daarnaast zijn de Maas- en Eurogeul te zien. De Maasgeul heeft een lengte van 6 kilometer en verbindt de Eurogeul met de haven van Rotterdam. De Eurogeul is de route voor diepstekende scheepvaart. De Maasgeul is in figuur 2 weergegeven met nummer 1, de Eurogeul met nummer 2. Naast beide geulen is tevens een keergeul aanwezig. Deze is aangegeven met nummer 3 en zorgt ervoor dat schepen kunnen keren indien nodig.

De gegevens van de gerealiseerde zandwinputten zijn in tabel 1 weergegeven. Zoals te zien is er een grote en een kleine zandwinput aangelegd, die tevens verschillen in diepte. In totaliteit is er een volume van circa 200 miljoen m³ zand gewonnen uit deze zandwinputten.

Tabel 1: Gerealiseerde zandwinputten bron: Dorst (2014)

	Grote zandwinput	Kleine zandwinput
Afmetingen	6000m x 2200 m	2000m x 1300 m
Diepte zandwinput beneden LAT	35-40 m	30-32 m
Diepte zeebodem beneden LAT	25 m	20 m
Gebaggerd volume	170 miljoen m ³	30 miljoen m ³

Zoals in de figuur 2 te zien is, zijn er bodemvormen aanwezig rondom de zandwinputten en de Maas- en Eurogeul. Deze bodemvormen worden zandgolven genoemd. Deze zandgolven zullen in het volgende hoofdstuk uitgebreid besproken worden. Het deel van de bodem waarop deze zandgolven

aanwezig zijn, wordt een zandgolfveld genoemd. De aanleg van zandwinputten in het zandgolfveld voor de kust van de Noordzee heeft ertoe geleid dat er onzekerheid is ontstaan over de gedragingen van de bodem in het gebied (Dorst et al., 2013). Dit komt omdat de zandwinputten een invloed kunnen hebben op de migratiepatronen in het gebied. Vanwege deze onzekerheid is het moeilijk te voorspellen of er in de toekomst meer verzanding van de Euro- of Maasgeul plaats zal vinden, of dat de diepte van de Euro- of maasgeul vaker gemeten zal moeten worden. Daarnaast is het ook mogelijk dat door veranderingen in migratiepatronen pijpleidingen of kabels op de bodem van de Noordzee bloot komen te liggen. Ook zullen de zandwinputten zelf ook in de loop der tijd kunnen veranderen. Het is namelijk mogelijk dat deze zandwinputten zullen vervormen, wat weer een invloed kan hebben op de migratiepatronen in het gebied. Ook is het mogelijk dat er zich bodemvormen zullen ontwikkelen op de bodem van de zandwinputten.

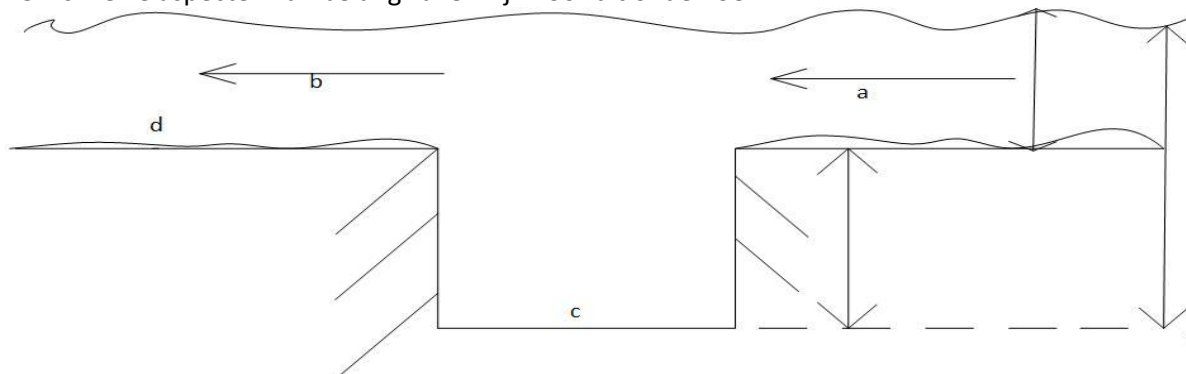
Samengevat kunnen de zandwinputten op de volgende zaken een effect hebben:

1. De mate van verzanding van de Euro- en Maasgeul
2. Het verdiepen of vullen van de aangelegde zandwinputten
3. Het herstel van bodemvormen in de zandwinputten
4. Het blootleggen van pijpleidingen, kabels, mijnen of munitie
5. Het veranderen van de minste diepten in het zandgolfveld

Deze onzekerheden zullen onderzocht worden. Het onderzoek is uitgevoerd bij de Dienst der Hydrografie van de Koninklijke Marine, in samenwerking met Rijkswaterstaat. Hierbij is Rijkswaterstaat geïnteresseerd in de gedragingen van de zandwinputten, het herstel van bodemvormen hierin en de effecten van de zandwinputten op het beheer van de Euro- en Maasgeul. Vandaar dat alle punten van belang (kunnen) zijn voor Rijkswaterstaat. De Dienst der Hydrografie is met name geïnteresseerd in punten 3, 4 en 5, omdat deze een invloed kunnen hebben op de veiligheid van de scheepvaart buiten de Euro- en Maasgeul. Het onderzoek zal uitgevoerd worden om de effecten van de zandwinputten in te schatten, om zodoende maatregelen te kunnen nemen, mochten deze nodig zijn. Voor de Dienst der Hydrografie zou dit kunnen betekenen dat men vaker metingen moet doen, of dat er vaker kaarten uitgebracht zullen moeten worden. Daarnaast zou het voor Rijkswaterstaat kunnen betekenen dat men vaker metingen moet doen, of vaker moet baggeren om de Maas- en Eurogeul op diepte te houden. Rijkswaterstaat is namelijk verantwoordelijk voor het beheer van het Nederlands zeegebied en het hydrografisch opnemen van de Euro- en Maasgeul. De Koninklijke Marine is verantwoordelijk voor het in kaart brengen van het Nederlands Continentaal Plat en het publiceren van nautische informatie.

De doelstelling voor het onderzoek is om te bepalen welke invloed de zandwinputten zullen hebben op het gebied en hoe deze zandwinputten zich zullen gedragen in de toekomst.

Voor de uitvoering van het onderzoek en het bereiken van de doelstelling zullen enkele aspecten van belang zijn voor het onderzoek. In figuur 3 is een ruwe schets gegeven van een zandwinput, waarin te zien is welke aspecten van belang zullen zijn voor dit onderzoek.



Figuur 3: Ruwe schets zandwinput en aspecten van belang voor het onderzoek

- a) De instroomsnelheid en oriëntatie van de stroming ten opzichte van de zandwinput en de bijbehorende migratie van sediment, in de richting van de zandwinput.
- b) De uitstroomsnelheid en oriëntatie van de stroming ten opzichte van de zandwinput en migratie van sediment, uitgaand van de zandwinput.
- c) De bodemvorm van de zandwinput en de verandering hiervan.
- d) De bodemvorm van het zandgolfveld om de zandwinput en de verandering hiervan.
- e) De afmeting en positie van de zandwinput

De onderzoeksvragen die voor de uitwerking van deze doelstelling beantwoord zullen worden, sluiten bij deze aspecten aan en zijn onderstaand weergegeven, samen met de hoofdstukken waarin zij beantwoord worden:

- Verkennende onderzoeksvragen
 - o Wat is er bekend over het gebied? (Hoofdstuk 2 en 3)
 - o Wat is de vorm en richting van de zandwinputten? (Hoofdstuk 4)
 - o Hoe zal het stromingspatroon zich in de zandwinputten gedragen? (Hoofdstuk 3 en 4)
 - o Wat is het huidige stromingspatroon in het gebied? (Hoofdstuk 3 en 4)
- Inschatting van invloeden en effecten
 - o Welke factoren kunnen een invloed hebben op de vervorming van de zandwinputten? (Hoofdstuk 3, 5 en 7)
 - o Wat zijn de te verwachten effecten van deze factoren op de zandwinputten in de toekomst? (Hoofdstuk 4 en 5)
 - o Welke effecten hebben de zandwinputten op de stromingspatronen in het gebied? (Hoofdstuk 4, 5 en 7)
 - o Welke effecten hebben de zandwinputten op de morfodynamische effecten in het gebied? (Hoofdstuk 4 en 5)
- Inschatting toekomstige veranderingen
 - o Hoe zal het gebied zich onder invloed van de zandwinputten in de toekomst gedragen? (Hoofdstuk 4 en 5)
 - o In hoeverre is de verandering van morfo- en hydrodynamische effecten gevaarlijk voor pijpleidingen en kabels? (Hoofdstuk 3 en 5)
 - o Welke voorwaarden zijn er voor het herstel van bodemvormen in de zandwinputten? (Hoofdstuk 3 en 6)
 - o Welke mogelijkheid is er tot het herstel van bodemvormen in de zandwinputten? (Hoofdstuk 6.2 en 7)
- Analyse van data
 - o Welke data wordt er gemeten in de Noordzee door Rijkswaterstaat en de dienst der hydrografie? (Hoofdstuk 2 en 6.1)
 - o Welke data die gemeten wordt sluit aan bij het onderzoek? (Hoofdstuk 6)
 - o Welke gegevens zijn er zowel voor, tijdens als na de aanleg van de zandwinputten? (Hoofdstuk 6)
 - o Hoe kunnen de gegevens van deze eigenschappen geïnventariseerd worden? (Hoofdstuk 6)

1.2 Methodiek

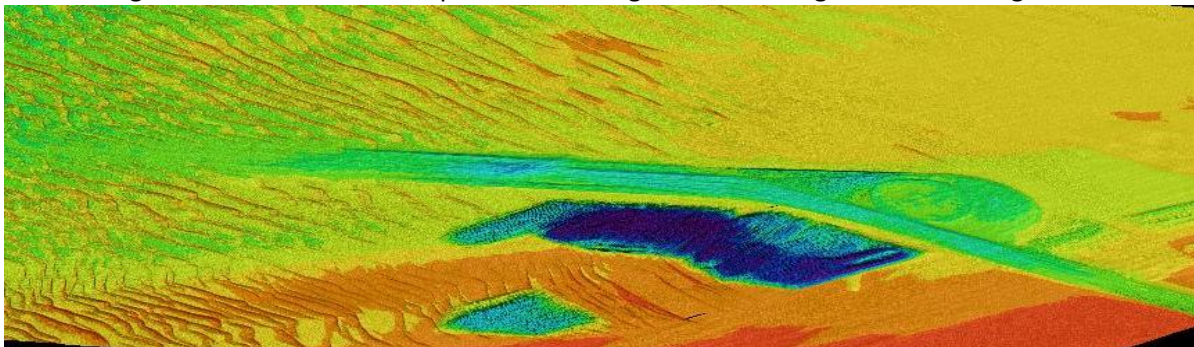
Om tot een beantwoording van de deelvragen en het bereiken van de doelstelling te komen, wordt allereerst een uitgebreide literatuuranalyse gemaakt. Deze literatuuranalyse richt zich op de literatuur omtrent (grootschalige) zandwinputten en zandgolven.

Vervolgens zal gekeken worden naar de modellering van het gebied, zoals deze gemaakt is door Svašek Hydraulics, in opdracht van Rijkswaterstaat. Dit zal een inschatting geven van de stromingen in het gebied en de morfologische verwachtingen in de toekomst. De koppeling tussen de conclusies uit het Svašek rapport en de literatuuranalyse zullen een eerste beantwoording van de deelvragen opleveren. Vervolgens zal een eenvoudige data analyse gemaakt worden uit de beschikbare data die gemeten is door Rijkswaterstaat en de Dienst der Hydrografie. Er zal getracht worden uit deze data analyse een conclusie te trekken over de gedragingen van het gebied. Afrondend zal de data analyse gekoppeld worden aan de literatuur analyse en de modellering van het gebied door Svašek Hydraulics, om zodoende de deelvragen te beantwoorden.

1.3 Afbakening onderzoek

Binnen het onderzoek zullen de gedragingen van zandwinputten en zandgolven onderzocht worden. Er zal onderzocht worden wat de effecten van zandwinputten zijn op het gebied, hoe het gesteld is met de sedimentatie van de zandwinputten en of er de mogelijkheid is tot het herstel van bodemvormen binnen de zandwinputten. Voor de zandgolven zal onderzocht worden welke voorwaarden er zijn voor het ontstaan van zandgolven, hoe bestaande zandgolven zich gedragen en welke invloeden zandwinputten hierop kunnen hebben. Hierbij dient opgemerkt te worden dat specifiek niet gekeken zal worden naar literatuur over zandbanken, megaribbels, zandribbels of literatuur over de gedragingen van pijpleidingen op zandbodems. Binnen de data analyse die gedaan zal worden zal gebruik gemaakt worden van de data die de Dienst der Hydrografie beschikbaar heeft over het gebied en de zandwinputten. Ook zal gebruik gemaakt worden van data die beschikbaar is over de stromingen en korrelgroottes binnen het gebied en de zandwinputten, afkomstig van Rijkswaterstaat. Tevens zal er data gebruikt worden afkomstig uit een rapport van Klein & Van Den Boomgaard (2013).

De afbakening is geografisch gezien in figuur 4 als DTM weergegeven. Te zien is dat het een rechthoekig kader is met de zandwinputten de Maasgeul en de Eurogeul en het zandgolfveld.



Figuur 4: DTM geografisch gebied onderzoek (Hr.Ms. Snellius, 2012).

1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 zal allereerst een algemene beschrijving worden gegeven van bodemvormen in de Noordzee. Hierin wordt beschreven wat de afmetingen, karakteristieken en gedragingen zijn. Daarnaast zal een korte beschrijving worden gegeven van de werkzaamheden en verantwoordelijkheden van Rijkswaterstaat en de Dienst der Hydrografie, aansluitend bij dit onderzoek. Vervolgens zal in hoofdstuk 3 een literatuuranalyse te lezen zijn. In deze literatuuranalyse wordt gekeken naar literatuur over zandwinputten en zandgolven en hoe deze zich gedragen en veranderen. In hoofdstuk 4 wordt gekeken naar de modellering die is uitgevoerd door Svašek

Hydraulics (Klein & Van Den Boomgaard, 2013) in opdracht van Rijkswaterstaat. Hierin is te lezen hoe het onderzoek is uitgevoerd door Svašek Hydraulics en welke resultaten hieruit naar voren komen. In dit hoofdstuk zijn tevens kritische kanttekeningen opgenomen ten aanzien van het rapport van Svašek Hydraulics. In hoofdstuk 5 zal een inschatting gegeven worden van de vervormingen van de zandwinputten en het gebied en de gedragingen van het zandgolfveld. Ook wordt in dit hoofdstuk ingeschat hoe de Euro- en Maasgeul beïnvloed zullen worden en hoe de pijpleidingen en kabels in het gebied beïnvloed worden. Dit wordt gedaan op basis van de modellering uit het rapport van Svašek Hydraulics (Klein & Van Den Boomgaard, 2013) en de uitgevoerde literatuuranalyse uit hoofdstuk 3. In hoofdstuk 6 is een data analyse uitgevoerd. Beschikbare data wordt visueel gepresenteerd om zodoende kwalitatieve inschattingen te kunnen maken van de invloeden van de zandwinputten en de gedragingen van het gebied. Tevens wordt een inschatting gemaakt van de mogelijkheid tot het herstel van bodemvormen in de noordelijke zandwinput. In hoofdstuk 7 vindt vervolgens de koppeling tussen de data analyse, literatuuranalyse en modellering uit het rapport Svašek Hydraulics (Klein & Van Den Boomgaard, 2013) plaats, hier worden vervolgens inschattingen gegeven voor de invloeden van de zandwinputten op het gebied. In hoofdstuk 8 zijn de conclusies van het onderzoek gepresenteerd en in hoofdstuk 9 is de vooruitblik te lezen voor de toekomst. Daarnaast is in bijlage 6 is te lezen welke contacten informatie hebben bijgedragen aan dit onderzoek.

2 Algemeen

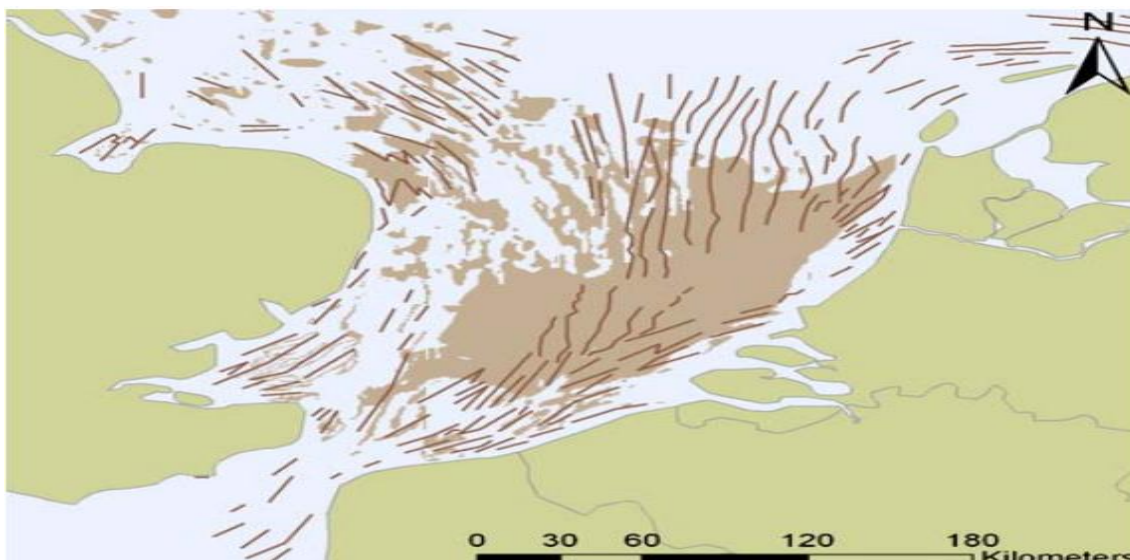
2.1 Bodemvormen in de Noordzee

Op de bodem van de Noordzee zijn verschillende vormen aanwezig. Deze vormen zijn in tabel 2 gedefinieerd en gespecificeerd wat betreft typische golflengte, maximale hoogte en typische migratiesnelheid.

Tabel 2: Bodemvormen in de Noordzee, afmetingen en migratiesnelheden bron: Dorst (2009).

Bodemvorm	Golflengte(m)	Maximale hoogte(m)	Migratiesnelheid
Zandbanken	6 000	10	1 m/jaar
Lange bodemgolven	1 500	5	Onbekend
Zandgolven	500	5	10 m/jaar
Megaribbels	10	0,1	1 m/dag
Zandribbels	1	0.01	1 m/uur

De zandbanken zijn de meest stabiele bodemvormen, die tevens de grootste hoogtes en golflengtes hebben. Zandbanken komen op specifieke locaties in de Noordzee voor. Daarnaast zijn lange bedgolven geobserveerd door Knaapen et al. (2001). Hiervan is de migratiesnelheid nog onbekend. De zandgolven zijn op grote gebieden van de Noordzee aanwezig en kunnen tot wel 10 meter per jaar migreren. Vervolgens zijn megaribbels en zandribbels aanwezig, die zeer instabiel zijn en geringe afmetingen hebben. Zandbanken en zandgolven komen in grote delen van de Noordzee voor (figuur 5).



Figuur 5: Zandbanken en zandgolven in de Noordzee, waarbij de zandgolfvelden gekleurd zijn en de zandbanken als lijnen zijn weergegeven bron: Hulscher & Knaapen (2006).

Voor de kust van Nederland in de Noordzee is een groot oppervlak aanwezig, waarop zich zandgolven bevinden. Dit wordt het zandgolfveld genoemd. Daarnaast zijn ook enkele zandbanken aanwezig. Ter hoogte van Rotterdam is de Maasgeul aanwezig. Deze Maasgeul verbindt de haven met de Eurogeul. Dit is de internationale vaargeul die Rotterdam met de rest van de wereld verbindt op het gebied van scheepvaart.

2.2 Rijkswaterstaat

Rijkswaterstaat en de Koninklijke Marine hebben beide eigen verantwoordelijkheden en werkgebieden ten aanzien van de dieptemetingen, zowel in de Noordzee als binnen Nederland. Allereerst is Rijkswaterstaat verantwoordelijk voor de dieptemetingen in het gebied dat begrensd wordt door de 10 meter diepte lijn voor de kust van Nederland. Naast dit gebied zijn tevens de Euro- en Maasgeul en de IJgeul de verantwoordelijkheid van Rijkswaterstaat.

De Euro- en Maasgeul worden door Rijkswaterstaat nauwgezet onderhouden, om de diepgang te garanderen. Dit wordt gedaan door de hele Eurogeul minstens 1 maal per jaar op te meten. Daarnaast wordt de Maasgeul maar liefst 12 keer per jaar opgemeten.

Zowel de Euro- als de Maasgeul heeft een bepaalde Nautisch Gegarandeerde Diepte (NGD), dit wil zeggen een diepte die voor de scheepvaart gegarandeerd wordt. Deze dieptes dienen gegarandeerd te worden, omdat schepen met een grote diepgang gebruik maken van beide geulen.

Afhankelijk van de diepte in de Maasgeul kan het voorkomen dat de Maasgeul maandelijks of zelfs wekelijks gebaggerd wordt. Deze frequentie is afhankelijk van de schepen die de haven van Rotterdam bezoeken.

Naast de Euro- en Maasgeul, is er ook een zogenaamd aanloopgebied van de Eurogeul. Dit aanloopgebied bevindt zich verder op zee en biedt ruimte voor schepen om voor anker te gaan, wanneer zij moeten wachten op het hoogwater om de haven van Rotterdam in te kunnen varen. Ook in dit aanloopgebied vindt onderhoud in de vorm van baggerwerkzaamheden plaats. Hier komt het namelijk vanwege de dynamische zeebodem voor dat zandgolven in het aanloopgebied migreren. Gebieden worden gebaggerd wanneer dit noodzakelijk is en er wordt een bepaalde marge ingebouwd. Deze marge wordt ingebouwd zodat tussen opeenvolgende baggerwerkzaamheden een bepaalde tijd zit en men niet elke week hoeft te baggeren. Daarnaast tracht men het zodanig te plannen, dat wanneer gebaggerd wordt de hoeveelheid baggerwerk ook kostentechnisch rendabel is. Het totaal aan metingen, onderhoud en beheer zorgt ervoor dat schepen met een grote diepgang de haven van Rotterdam kunnen bereiken.

2.3 De Dienst der Hydrografie

De Dienst der Hydrografie is de afdeling binnen de Koninklijke Marine die als belangrijkste taak heeft het verzamelen en controleren van gegevens en de verwerking van deze gegevens in nautische publicaties zoals zeekaarten en boekwerken ten behoeve van veilige navigatie op zee. De Dienst der Hydrografie is verantwoordelijk voor het hydrografisch opnemen van gebieden die zich bevinden op het Nederlands Continentaal Plat, buiten de 10 meter diepte lijn en de wateren rondom de Nederlandse Antillen. Daarbij is men verantwoordelijk voor het voorlichten van het scheepvaartverkeer over de diepgang van deze scheepvaartgebieden, de internationale vaarroutes en overige zaken zoals belichting en algemene regels.

Het in kaart brengen van het gebied waarvoor de Dienst der Hydrografie verantwoordelijk is, begint met de gegevensverzameling. Deze gegevens worden verzameld aan boord van hydrografische opneemvaartuigen (HOV's). De bemanning van deze opneemvaartuigen brengt de bodem van de Noordzee in kaart en zoekt hierbij ook naar wrakken en andere objecten op de zeebodem. De verzamelde gegevens van beide HOV's worden aan land verwerkt, bij de Dienst der Hydrografie in Den Haag. Hier worden de gegevens gebruikt om zeekaarten te maken, zowel elektronisch als op papier.

De Dienst der Hydrografie heeft een totaal van circa 140 kaarten in omloop. Deze kaarten zijn er in verschillende schalen, waarbij zowel overzichten van de Noordzee als specifieke kaarten voor havens in omloop zijn. Omdat de bodem van de Noordzee dynamisch kan zijn en omdat objecten als boeien en betonningen verplaatst worden, is het noodzakelijk om de kaarten constant bij te werken, om ze actueel te houden. Dit doet de Dienst der Hydrografie door wekelijks zogenaamde berichten aan zeevarenden (BaZ) uit te geven. De veranderingen in de kaarten wordt online bijgehouden door de Dienst der Hydrografie. De wijzigingen die volgen uit het BaZ, zullen bij de papieren kaarten met de hand moeten worden bijgewerkt. Dit zal de stuurman aan boord van het schip zelf kunnen doen, aan de hand van het BaZ register. Daarnaast kan de scheepvaart die elektronische kaarten bezit de bijwerkingen automatisch laten uitvoeren.

Wanneer er veel veranderingen in een bepaalde kaart zijn geweest, besluit de Dienst der Hydrografie om de desbetreffende kaart opnieuw uit te geven, bijgewerkt met alle BaZ's. De scheepvaart kan dan de desbetreffende kaart kopen bij agenten van de Dienst der Hydrografie.

Elk land dat grenst aan zee is verantwoordelijk voor het informeren van de scheepvaart en het bijhouden van de kaarten die hiervoor gemaakt zijn. Zodoende is er internationaal gezien een samenwerking tussen verschillende hydrografische diensten, zodat de scheepvaart te allen tijde de beschikking heeft over zeekaarten, voor de veilige navigatie. Deze samenwerking vindt plaats binnen de Internationale Hydrografische Organisatie (IHO). De Dienst der Hydrografie voert haar taak uit voor de scheepvaart, waar ook de wapenspreuk "Ex Usu Nautae" ofwel "Ten dienste van de zeeman" vandaan komt.

3 Theorie

Om de verschillende onderzoeksvragen te kunnen beantwoorden, zal allereerst een analyse gemaakt worden van de literatuur die beschikbaar is. Zodoende zal voor de zandgolven en de zandwinputten een theoretisch kader opgesteld worden.

3.1 Zandgolven

3.1.1 Algemeen

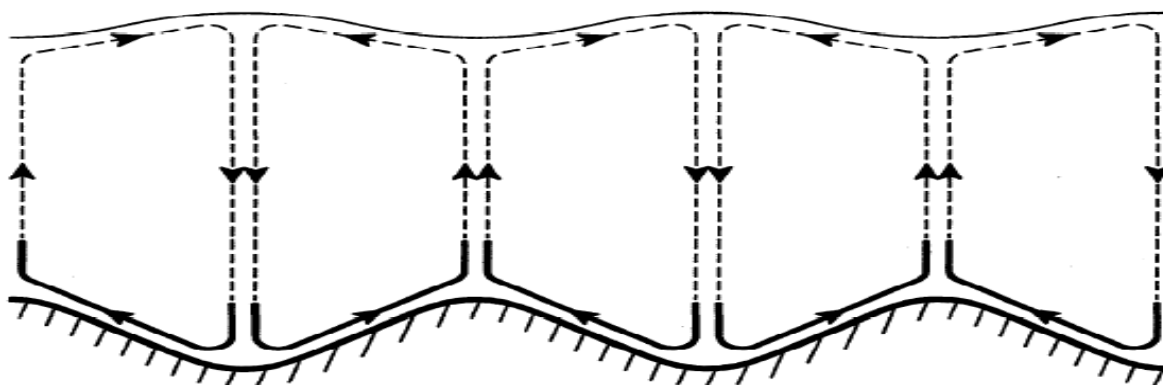
De zeebodem in de Noordzee bestaat voor het grootste deel uit fijn tot grof zand met korrelgroottes 125 – 500 μm (Van Der Veen et al., 2006). Een zandgolfveld is slechts een van de bodempatronen die aanwezig is op de bodem van de Noordzee. Omdat zandgolven gegroepeerd voorkomen op het Nederlands Continentaal Plat, spreekt men ook wel van een zandgolfveld. Zandgolven kunnen golflengtes hebben tot circa 500 meter en kunnen tot 5 meter hoog worden (Dorst, 2009). Van deze zandgolven is bekend dat ze bewegen over de bodem van de Noordzee (Németh et al., 2002). Zandgolven worden veelal waargenomen bij waterdieptes tot 30 meter (Németh et al., 2006). Zandgolven kunnen scheepvaartroutes migreren en zodoende de nautische diepte van de scheepvaartroutes negatief beïnvloeden of door middel van migratie pijpleidingen beschadigen en kabels blootleggen (Van Maren, 1998; Hulscher & Van Den Brink, 2001; Németh et al., 2002; Van Santen et al., 2011; Morelissen et al., 2003).

Er zijn vele studies gedaan om het ontstaan en de migratie van zandgolven in te kunnen schatten. Hierbinnen kunnen 2 typen modellen onderscheiden worden: stabiliteitsmodellen en complexe numerieke modellen. De stabiliteitsmodellen voorspellen de stabiliteit van de zeebodem, het voorkomen van grootschalige bodemvormen en de golflengtes van deze vormen onder bepaalde voorwaarden. De numerieke modellen voorspellen het transport van sediment, onder invloed van hydrodynamische en sedimentspecifieke data (Tonnon et al., 2007).

Ten eerste heeft Hulscher (1996) door middel van een model met een 3 dimensionale getijdenstroming getracht de groei en het ontstaan van zandgolven te verklaren en dit werk is uitgebreid door Besio et al. (2003). De migratie van zandgolven is gemodelleerd door Németh et al. (2002) en daarnaast hebben Knaapen & Hulscher (2002) onderzoek gedaan naar het herstel van een gebaggerde zandgolf. Tonnon et al. (2007) hebben de zandgolven onderzocht door middel van een numeriek morfodynamisch model.

3.1.2 Het ontstaan van zandgolven

De oorzaak voor het ontstaan en de groei van zandgolven zijn getijdengemiddelde verticaal recirculerende watercellen. Deze worden veroorzaakt doordat reststroming in aanraking komt met oneffenheden op bodem van de zee (Hulscher, 1996; Komarova & Hulscher, 2000; Van Dijk & Kleinhans, 2005). Om inzichtelijk te maken hoe dit precies werkt, is in figuur 6 deze verticale circulatie weergegeven.



Figuur 6: Ontstaan zandgolven door verticale circulatie bron: Hulscher (1996).

De stroming uit de eb- en vloedbeweging komt in aanraking met oneffenheden op de zeebodem. Deze interactie zorgt ervoor dat er verticale stromingen ontstaan. De verstoring in het stromingspatroon leidt ertoe dat er een reststroming en een restdruk ontstaat. Dit zorgt ervoor dat zand dat aanwezig is aan de bodem meegenomen kan worden door de verticale cellen, zodat een golfpatroon gevormd kan worden (Hulscher 1996; Besio et al., 2003; Van Dijk & Kleinhans, 2005; Tonnon et al., 2007). Er is echter ook zwaartekracht aanwezig, dat het sediment naar beneden trekt. Wanneer de verticaal circulerende cellen minder kracht uitoefenen op het sediment dan de zwaartekracht, dan zal het sediment niet naar de top, maar naar de trog verplaatst worden (Hulscher, 1996; Komarova & Hulscher, 2000; Besio et al., 2003).

Er zijn bepaalde voorwaarden waaraan voldaan moet zijn voordat zandgolven kunnen ontstaan. Deze voorwaarden zijn in verschillende onderzoeken door ondermeer Hulscher (1996) en Tonnon et al. (2007) onderzocht. Ten eerste worden zandgolven geobserveerd op locaties waar sterke stromingen zijn, die snelheden van 0.4 tot 1 m/s bereiken (Hulscher, 1996; Blondeaux, 2001; Knaapen & Hulscher, 2002; Tonnon et al., 2007; Borsje et al. 2009a). Daarnaast is ook de sedimentgrootte van belang. Een grote korrelgrootte zal lastiger zijn om in beweging te zetten, vanwege de hogere zwaartekracht die erop werkt. De korrelgrootte, zo blijkt uit onderzoek, moet tussen 0.2 en 0.5mm liggen (Tonnon, 2007). Dit is de reden dat zandgolven bijna uitsluitend worden waargenomen in zandige bodems met slibpercentages <15% en grindpercentages <5% (Hulscher & Van Den Brink, 2001). Daarnaast is van zandgolven bekend dat zij op het noordelijk halfrond vrijwel loodrecht op de reststroming staan, met een maximale hoek van circa 10° tegen de klok in (Hulscher 1996; Blondeaux, 2001; Hulscher & Brink, 2001; Van Dijk & Kleinhans, 2005).

3.1.3 Gedragingen van zandgolven

Voor de migratie van de zandgolven is de asymmetrie tussen eb en vloed van belang. De stroming in vloedrichting bereikt namelijk hogere snelheden dan die van de ebrichting, waardoor een zogenaamde reststroming ontstaat, die in de Noordzee een noordoostelijke richting heeft doordat de stroming in vloedrichting dominant is (Wang et al., 1999; Németh et al., 2002). De verklaring voor de migratie van zandgolven wordt gezocht in deze reststroming. De verticale circulerende cellen die de zandgolven creëren zullen onder invloed van de reststroming niet langer symmetrisch zijn, maar ervoor zorgen dat sediment migreert. Netto zal er een transport van zand in noordoostelijke richting ontstaan, door de reststroming (Blondeaux, 2001; Németh et al., 2002; Besio et al., 2003). Deze migratie kan tot enkele meters per jaar groot zijn (Besio et al., 2003; Tonnon et al., 2007). Wanneer naar de zandgolven gekeken wordt, zijn verschillende migratiesnelheden aanwezig. Uit onderzoek gedaan door Van Dijk & Kleinhans (2005) is gebleken dat zandgolven verder van de kust migratiesnelheden hebben van 6.5 tot 20 meters per jaar. Daarnaast is uit onderzoek door Tonnon et al., (2007) gebleken dat een zandgolf aanwezig in de Noordzee voor de kust van Rotterdam met een snelheid van circa 7 meter per jaar migreert.

Naast het effect van de getijdenstroming op het ontstaan en verplaatsen van zandgolven is van zandgolven die zich voor de kust van Nederland bevinden bekend dat deze mede beïnvloed worden door golfactiviteit (Passchier & Kleinhans, 2005; Van Dijk & Kleinhans, 2005). De aanwezigheid van golven nabij de zandgolven zal ervoor zorgen dat het sediment dat aanwezig is in de top van de zandgolf gesuspenseerd wordt. Dit zal als gevolg hebben dat de hoogte van de top afneemt en het zand gesuspenseerd weggevoerd zal worden door de stroming (Tonnon et al., 2007). Daarnaast is uit onderzoek gebleken dat zandgolven verder van de kust beïnvloed worden door getijdenstromingen. De golfactiviteit is van invloed op deze zandgolven, maar zal slechts in enkele gevallen voldoende sterk zijn om de zandgolf te beïnvloeden. De verplaatsing van sediment wordt dan ook gedomineerd door bodemtransport en niet door gesuspenseerd transport (Komarova & Hulscher, 2000; Van Dijk & Kleinhans, 2005).

Vanwege de risico's van zandgolven in vaargeulen worden zandgolven gebaggerd. Om baggerkosten zo laag mogelijk te houden, is onderzoek naar het herstel van zandgolven gewenst. Het herstel van gebaggerde zandgolven is onderzocht door Knaapen & Hulscher (2002), op een locatie voor de kust van Japan. Na het baggeren van zandgolven blijken de oorspronkelijke hoogtes van de zandgolven in circa 10 jaar wederom bereikt te worden (Knaapen & Hulscher, 2002). Dit is in overeenstemming met het onderzoek gedaan door Hulscher (1996). De verschillende voorwaarden, eigenschappen en invloeden van verschillende factoren op het ontstaan, de groei en de migratie van zandgolven is in tabel 3 samengevat.

Tabel 3: Zandgolven en gevonden voorwaarden, eigenschappen en invloeden uit literatuur

Voorwaarden		Eigenschappen		Invloeden	
Stroomsnelheid	0.4 tot 1 m/s	Oriëntatie t.o.v. stroming	-10° tot +0°	Golven	Aftopping (negatief)
Sedimentgrootte	0.2 tot 0.5mm	Groeitijd	Circa 10 jaar		
		Migratiesnelheid	Enkele meters per jaar		
		Migratierichting	Noordoostelijk		

3.2 Zandwinputten

Zandwinputten vertonen bepaalde hydrodynamische effecten en gedragingen. Hieraan gekoppeld zijn morfologische gedragingen waarneembaar. Beide gedragingen hebben invloed op elkaar en worden apart beschreven.

3.2.1 Hydrodynamische gedragingen algemeen

Er is recentelijk onderzoek gedaan naar de invloed en gedragingen van zandwinputten door Hommes (2004), Boers (2005), Peters & Hulscher (2006) en Roos et al. (2008). De gedragingen van zandwinputten zijn gemodelleerd door Roos et al. (2008) en de fysische effecten van zeezandwinning zijn tevens onderzocht door Hoogewoning & Boers (2001). Daarnaast is een onderzoek gedaan door Klein (1999) naar de hydro- en morfodynamische gedragingen van grootschalige zandwinputten en door Hoitink (1997) naar de morfodynamische invloed van grootschalige zandwinning. Walstra et al. (2003) hebben een hydro- en morfodynamisch model geverifieerd en toegepast om de invloeden van zandwinputten te kunnen inschatten. Tevens hebben Hommes (2004) en Boers (2005) onderzoek gedaan naar grootschalige zandwinputten op het Nederlands Continentaal Plat en heeft De Groot (2005) de morfologische gedragingen van zandwinputten gemodelleerd. In een onderzoek door De Boer et al. (2011) is een modelstudie gedaan naar de invloed van grootschalige zandwinning. De verschillende onderzoeken bestaan meestal uit procesmodelstudies, omdat data van zandwinputten niet beschikbaar zijn (Roos et al., 2004).

Uit onderzoek is gebleken dat zowel de positie van de zandwinput ten opzichte van de dominante stroomrichting als de afmeting van de zandwinput van invloed is op de hydro- en morfodynamische aspecten van de zandwinputten (Klein, 1999; Hoogewoning & Boers 2001; Van Rijn & Walstra, 2002; Roos et al., 2004; Roos et al., 2008). De posities en afmetingen van de zandwinputten zijn van invloed op de stroomsnelheid en stroomrichting in en rondom de zandwinput (Hoogewoning & Boers 2001; Van Rijn & Walstra, 2002; Roos et al., 2008). Er zijn een aantal aspecten die de invloed van de zandwinput op het locale stromingspatroon bepalen, zo stelt De Groot (2005). Dit zijn de volgende aspecten:

- Afmetingen van de zandwinput
- Hoek tussen de langste zijde van de zandwinput en de stroming
- Kracht van de stroming
- Bathymetrie van de omgeving (aanwezigheid bodemvormen, geulen etc.)

3.2.2 Stromingen

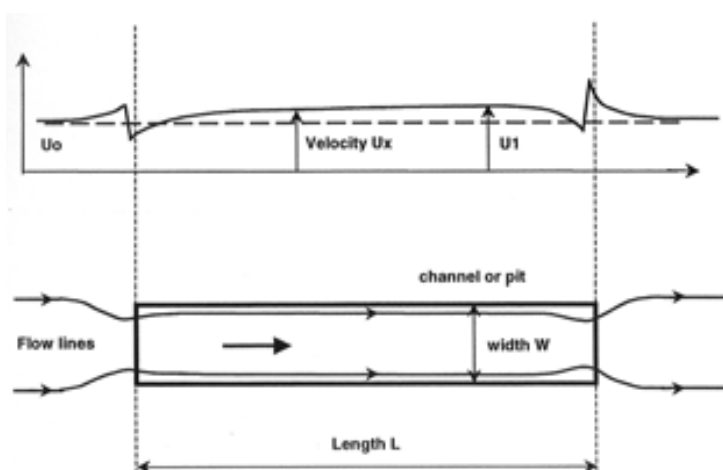
Uit de verschillende onderzoeken is gebleken dat er enkele opties zijn voor de oriëntatie van de zandwinput ten opzichte van de stroming, ook genoemd in de Groot (2005). De volgende opties worden onderscheiden:

- Zandwinput met hoofdas evenwijdig aan de stroming
- Zandwinput met hoofdas loodrecht op de stroming
- Zandwinput met hoofdas schuin ten opzichte van de stroming

Deze verschillende oriëntaties hebben specifieke invloeden op de stromingen in en rond de zandwinput. De verschillende onderzoeken, die in het vervolgstuk ook genoemd zullen worden beschrijven 2 effecten die enerzijds een toename en anderzijds een afname in stroomsnelheid kunnen veroorzaken. Enerzijds zal de toename in waterdiepte ter hoogte van de zandwinput ervoor zorgen dat bij een gelijkblijvend debiet de stroomsnelheid af zal nemen. Anderzijds is het mogelijk dat er een extra debiet door de zandwinput zal stromen, waardoor de stroomsnelheid toeneemt. Dit is voor de verschillende oriëntaties beschreven in de literatuur en zal in het vervolgstuk uitgewerkt worden.

Hoofdas evenwijdig aan de stroming

Afhankelijk van de afmetingen en de oriëntatie van de zandwinput, is over het algemeen bekend dat wanneer de hoofdas van de zandwinput evenwijdig staat aan de stroming, de stroomsnelheid in de



**Figuur 7: Gedraging stroomsnelheid langs de as van een zandwinput
bron: Van Rijn & Walstra (2002)**

deze de zandwinput binnenkomt en vervolgens daalt wanneer deze de zandwinput bijna binnen is gekomen. Vervolgens stijgt de stroomsnelheid over de lengte van de as geleidelijk en bereikt een constante snelheid. Voor het verlaten van de zandwinput daalt de stroomsnelheid weer en direct na het verlaten van de zandwinput stijgt deze wederom. De toename en afname in stroomsnelheid is te

zandwinput zal toenemen door een afname in bodemwrijving. Daarnaast zal lokaal samentrekking van stroming plaatsvinden, waardoor de zandwinput extra water zal aanzuigen uit de omgeving en de stroomsnelheid binnen de zandwinput toeneemt. De stroomsnelheid zal dalen bij de randen van de zandwinput door toename in waterdiepte en bodemwrijving (figuur 7).

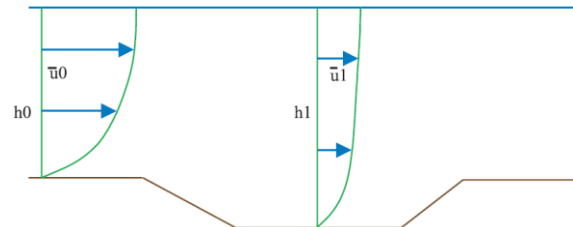
Het is duidelijk te zien dat de stroomsnelheid toeneemt voordat

verklaren door de samentrekking van de stroming, die leidt tot een toename in debiet binnen de zandwinput zoals onderzocht door Van Rijn & Walstra (2002).

Hoofdas loodrecht op de stroming

Wanneer een zandwinput bekeken wordt, die loodrecht georiënteerd is ten opzichte van de stroming, dan is bekend dat er zich een afname in stroomsnelheid voordoet. De afname in stroomsnelheid wordt veroorzaakt doordat er stroomverlamming plaatsvindt ter hoogte van de zandwinput. Dit komt, omdat de hoeveelheid water die wordt aangevoerd altijd even groot zal zijn als de hoeveelheid water die wordt afgevoerd.

Wanneer de waterdiepte toeneemt, zal het water gemiddeld minder snel stromen (de Groot, 2005) (figuur 8). Deze toename in waterdiepte blijkt het dominante effect te zijn bij zandwinputten met een oriëntatie loodrecht op

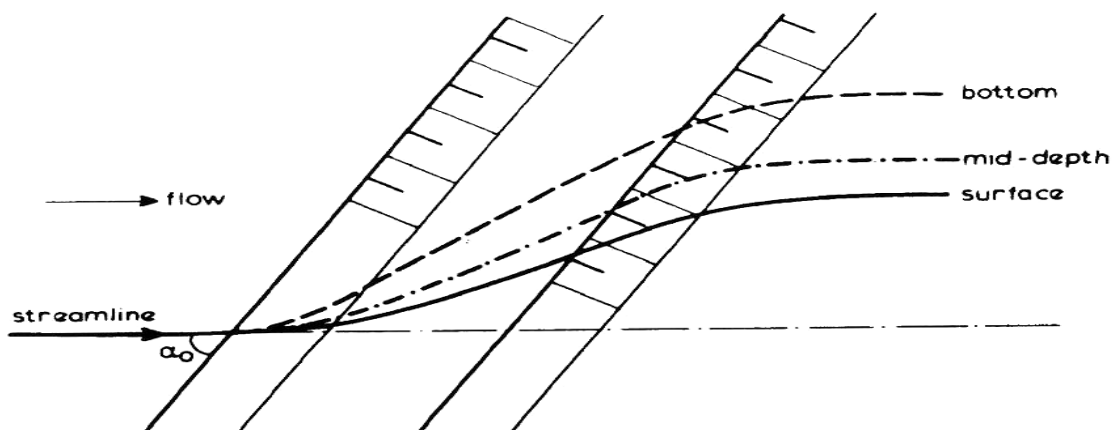


Figuur 8: Afname in stroomsnelheid door grotere waterdiepte bron: Hoogewoning & Boers (2001)

de stroming en een lengte/breedte verhouding die groot is. Dit is met name het geval wanneer geulen bekeken worden, die over het algemeen een grote lengte en kleine breedte hebben.

Hoofdas schuin ten opzichte van de stroming

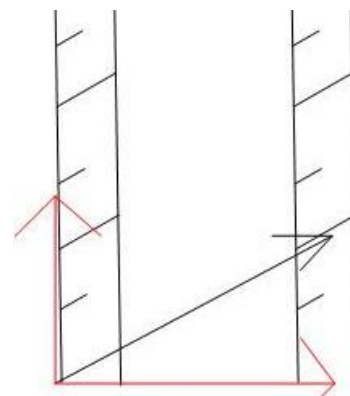
Wanneer de zandwinput schuin georiënteerd is ten opzichte van de stroming, dan zullen zich beide effecten voordoen, die zich voordoen bij zandwinputten evenwijdig en loodrecht ten opzichte van de stroming. Enerzijds zal de toename in waterdiepte zorgen voor een snelheidstoename door afname in wrijving en een snelheidstoename door een toename in debiet (samentrekking van stroming) en anderzijds zal deze leiden tot een afname in snelheid, door een toename in diepte. Omdat verschillende effecten zich voordoen, ontstaat een breking in de stroming (Van Rijn & Walstra, 2002; de Groot 2005; Roos et al., 2008) (figuur 9).



Figuur 9: Stromingsbreking onder invloed van de hoek ten opzichte van de stroming bron: Van Rijn & Walstra (2002)

De gestreepte zijdes in figuur 9 stellen de taluds van een geul voor. Vervolgens is te zien hoe de stromingen aan het oppervlak, de bodem en in het midden van de waterkolom vervormen onder invloed van de oriëntatie van de geul ten opzichte van de stroming.

In figuur 9 is duidelijk te zien dat deze breking het grootst is op de stroming aan de bodem en het minst bij de stroming aan het oppervlak. Hierin zijn de effecten van zowel een oriëntatie van de stroming loodrecht op de zandwinput, als effecten van stroming evenwijdig aan de zandwinput te zien.



Figuur 10: Stroming op een zandwinput

De gedragingen van de stroming binnen een zandwinput die schuin georiënteerd is ten opzichte de stromingsrichting kunnen beschreven worden door de schuine stroomrichting op te delen in een evenwijdige en loodrechte component van de stroming (figuur 10).

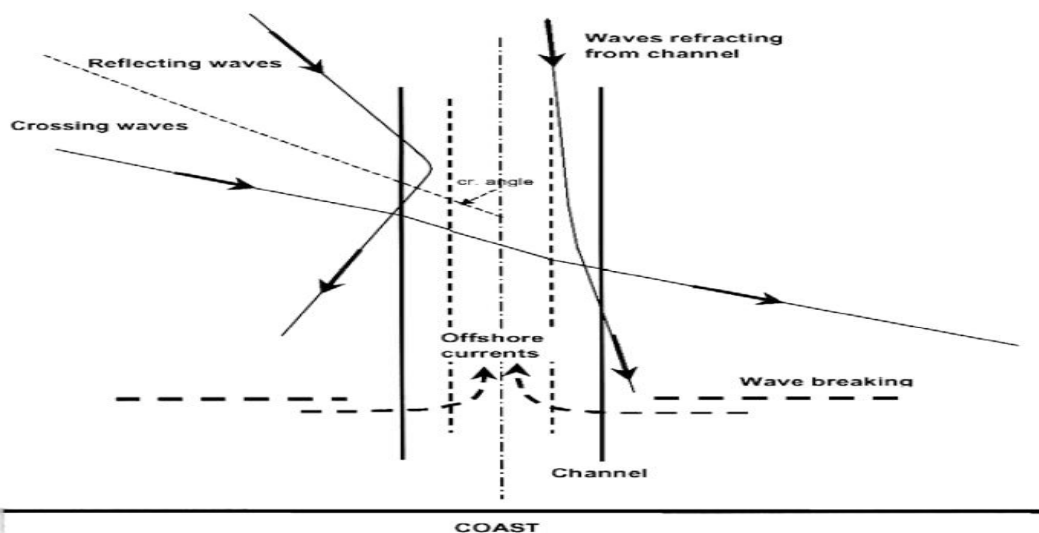
De evenwijdige component van de stroming zal een effect veroorzaken dat gelijkwaardig is aan het ingeschatte effect van de stromingsrichting parallel aan de zandwinput. De loodrechte component zal een effect veroorzaken gelijkwaardig aan een loodrechte oriëntatie van de stromingsrichting op de zandwinput.

Hierdoor zal enerzijds de stroomsnelheid afnemen door een toename in waterdiepte loodrecht op de zandwinput en anderzijds toenemen door een afname in wrijving en toename in debiet evenwijdig aan de zandwinput. Dit leidt tot een stromingsbreking.

Een oriëntatie van de zandwinputten tussen de 20° en 30° ten opzichte van de stroming kan leiden tot een toename in stroomsnelheid, afhankelijk van afmetingen en bodemruwheid (Van Rijn & Walstra, 2002). Uit onderzoek gedaan door Boers (2005) in het zogenaamde PUTMOR project is gebleken dat bij een zandwinput met een diepte van 7 tot 12 meter de stroomsnelheid binnen de zandwinput lager was dan buiten de zandwinput, met name aan de bodem van de zandwinput. Gebleken uit dit onderzoek is dat het waterniveau binnen en buiten de zandwinput een maximaal verschil van 1 cm had (verwaarloosbaar). Ook stellen Hoogewoning & Boers (2001) dat een toe- of afname in stroomsnelheid ter hoogte van de zandwinput afhankelijk is van de afmetingen en dat bij een beperkte toename in debiet ter hoogte van de zandwinput de stroomsnelheid zal afnemen vanwege de grotere doorsnede. Daarnaast is uit onderzoek door De Boer et al. (2011) gebleken dat de aanleg van een grootschalige zandwinning voor de kust van Nederland als gevolg zal hebben dat de getijdenstroming in een gebied van tientallen tot honderden kilometers afstand van de zandwinning significant beïnvloed zal worden.

3.2.3 Golfvorming

Voor de vorming en invloed van golven op de zandwinput, zijn wederom de oriëntaties loodrecht, evenwijdig en schuin van de zandwinputten ten opzichte van de stroming te onderscheiden (figuur 11). Afhankelijk van de diepte van de zandwinput, is de verwachting dat de golfhoogte zal dalen (Van Rijn & Walstra, 2004; de Groot, 2005).



Figuur 11: Golven met verschillende oriëntaties ten opzichte van de zandwinput bron: Van Rijn & Walstra (2002).

Het onderzoek door Van Rijn & Walstra (2002) heeft aangetoond dat elke mogelijke oriëntatie van zandwinputten ten opzichte van de golfrichting een daling in golfhoogte zal veroorzaken, door toename van waterdiepte. Een zandwinput met een oriëntatie **loodrecht** ten opzichte van de

golfrichting zal ervoor zorgen dat golven aan de zijde van de zandwinput zullen reflecteren. Daarnaast zullen zandwinputten **evenwijdig** aan de golfrichting de zandwinput uit bewegen. Voor zandwinputten met een **schuine** oriëntatie ten opzichte van de golfrichting zal onder invloed van zowel reflectie als breking een verstoord golfpatroon kunnen ontstaan. Golven met een kleine hoek ten opzichte van de hoofdas van de zandwinput zullen de zandwinput uit reflecteren (de Groot 2005; Van Rijn & Walstra, 2002). Er zijn in het verleden echter ook onderzoeken gedaan door Allersma & Ribberink (1992) en Roelvink (2001) die concludeerden dat de golfhoogte juist toenam door de aanwezigheid van de zandwinput. Allersma & Ribberink (1992) kwamen namelijk tot de conclusie dat de golfhoogte met circa 5% toenam, bij een zandwinput met een diepte van 5 meter in een gebied met oorspronkelijke diepte 14 meter. Uit onderzoek door Boers (2005) is echter gebleken dat de invloed van deze golven kleiner zal zijn naarmate de diepte van de zandwinput toeneemt.

3.2.4 Morfologische gedragingen algemeen

Naast de reeds genoemde onderzoeken is er door Hoogewoning & Boers (2001) een onderzoek uitgevoerd naar de invloeden en gedragingen van kleinschalige zandwinputten, vaargeulen en grootschalige zandwinputten. Hierin komt wederom de afhankelijkheid van de afmetingen en oriëntatie naar voren. Zodoende concluderen Hoogewoning & Boers (2001) verschillende morfologische effecten, afhankelijk van de afmetingen en oriëntatie. Voor langgerekte wingebieden loodrecht op de stroming worden de volgende effecten genoemd, die vergelijkbaar zijn met die van vaargeulen:

- De grootste veranderingen in bodemligging zullen aanwezig zijn bij de in- en uitstroomzones van het wingebied
- De taludhellingen zullen verflauwen
- Het middendeel ondervindt lichte sedimentatie
- Het zwaartepunt van het wingebied verplaatst zich in de richting van het netto zandtransport.

Deze effecten, genoemd door Hoogewoning & Boers (2001) zijn in overeenstemming met de ingeschatte effecten door Van Rijn & Walstra (2004), die tevens opmerken dat het neerslaan van sediment in het midden van de zandwinput, de dominante vorm van sedimenttransport is, in het midden van de zandwinput.

Hoogewoning & Boers (2001) schatten de effecten van een zandwinput met een afwijkende oriëntatie en afmetingen (schuin of parallel aan de stroming) als volgt in:

- De exacte geometrie bepaalt de mate van debiettoename over de in- en uitstroomranden
- Deze toename in debiet leidt tot een toename in sedimenttransport waarvoor:
 - o De afvlakking van de taluds sneller zal verlopen
 - o Een groter resttransport plaatsvindt, waardoor de verplaatsing van het zwaartepunt toeneemt
- Wanneer over de zijranden ook een debiettoename plaatsvindt, is een lichte erosie van het middendeel te verwachten. Dit is met name het geval bij een zandwinput die langgerekt is, met de lengte as parallel aan de stroming.

De morfologische gedragingen van zandwinputten zijn in enkele studies in detail gemodelleerd. Om een inschatting te kunnen geven van deze gedragingen zal gekeken worden naar de aspecten zoals uiteengezet door Roos et al. (2004). Hierbij zal gekeken worden naar sedimentatie, migratie en ontwikkeling van de hellingen.

3.2.5 Sedimentatie

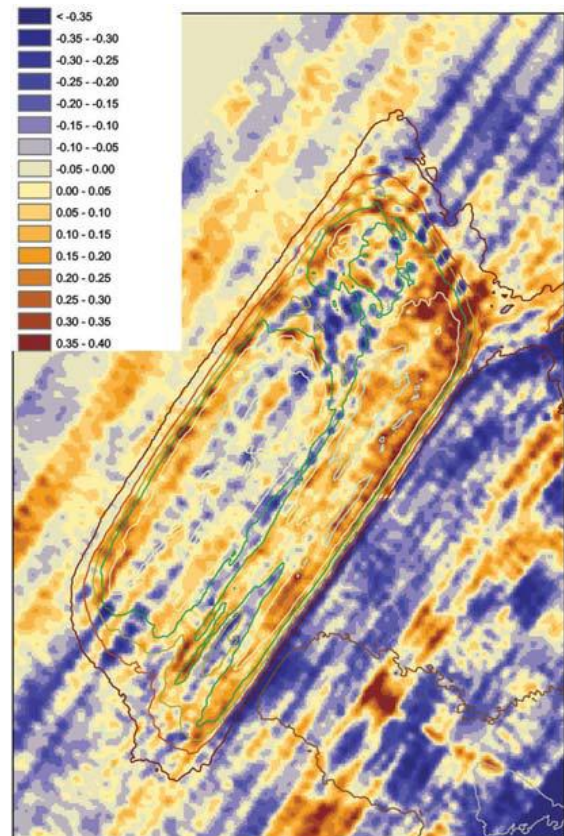
De versnelling danwel vertraging van de stroomsnelheid, in combinatie met de stromingsrichting binnen de zandwinput zal als gevolg hebben dat de zandwinput erodeert of aanzandt. Uit de verschillende onderzoeken kan geconcludeerd worden dat de gedragingen van zandwinputten erg

afhankelijk zijn van de stromingen in het gebied en de vorm, afmeting en oriëntatie van de zandwinputten (Van Rijn & Walstra, 2002; Roos et al., 2004; Boers, 2005; Roos et al., 2008).

Wat de morfologische verwachtingen van de zandwinputten betreft, komt uit verschillende onderzoeken naar voren dat bij grootschalige zandwinputten een lagere stroomsnelheid binnen de zandwinput gevonden wordt (Hoogewoning & Boers, 2001; Walstra & Van Rijn, 2003; Boers, 2005). Dit is met name gebleken uit het zogenaamde PUTMOR project, waarin de gedragingen van een zandwinput met een diepte van 7 tot 12 meter onderzocht zijn. Hieruit is gebleken dat ter hoogte van de zandwinput de stroomsnelheid afnam, terwijl deze aan de randen van de zandwinput juist hoger waren (Boers, 2005). Dit leverde voor de desbetreffende zandwinput een erosie en sedimentatiepatroon op gedurende 1 jaar zoals deze in de figuur 12 is weergegeven. Hierbij duiden de blauwe gebieden een erosie aan en duiden de bruine gebieden een sedimentatie aan. De zandwinput vult zich langzaam, tot een vlak profiel ontstaat. Ook blijken de randen van de zandwinput langzaam maar zeker af te vlakken, zo concludeert Boers (2005). Daarnaast is uit hetzelfde onderzoek gebleken dat het eeuwen duurt voordat de zandwinput weer gevuld is.

Wanneer een stroming een zandwinput passeert die schuin is ten opzichte van de stroming, of er loodrecht op staat, zal de toegenomen waterdiepte ervoor zorgen dat de stroomsnelheid binnen de zandwinput afneemt. Deze afname in stroomsnelheid leidt ertoe dat grootschalige zandwinputten sediment 'vangen', vanwege de lagere stroomsnelheid binnen de zandwinput. Zodoende zal gesuspendeerd sediment neer kunnen slaan in de zandwinput en zal de zandwinput zodoende verzanden (Van Rijn & Walstra, 2004; Hoogewoning & Boers, 2001; Boers, 2005). Daarnaast heeft de afname in stroomsnelheid ook het gevolg dat er minder sediment gesuspendeerd zal worden (Hoogewoning & Boers, 2001). Dit effect zal groter worden, naarmate de diepte van de zandwinput toeneemt, omdat de stroomsnelheid daalt met een toenemende waterdiepte.

Van het gebied net buiten de zandwinput is bekend dat deze een toename in stroomsnelheid vertoont (Van Rijn & Walstra, 2002). De toename in stroomsnelheid buiten de zandwinput, door de samentrekking van stroming zoals onderzocht door Van Rijn & Walstra (2002) zal als gevolg hebben dat het sedimenttransport over de grond buiten de zandwinput vergroot wordt (Ribberink, 2004). Gecombineerd zou het gebied buiten de zandwinput dus een toename in zandtransport kunnen krijgen en zodoende kunnen eroderen, terwijl de zandwinput zelf door het neerslaan van gesuspendeerd sediment en de toename in zandtransport zal aanzanden. Verschillende onderzoeken concluderen verschillende invloeden voor de zandwinputten. Ten eerste komt uit het onderzoek van Roos et al. (2008) naar voren dat een zandwinput slechts op een klein oppervlak invloed uitoefent. Naast de conclusie van Boers (2005), dat het vullen van de zandwinput enkele eeuwen duurt, concluderen Van Rijn & Walstra (2004) tevens dat de verwachte vultijd van een diepe zandwinput in waterdieptes dieper dan 15 meter circa 100 jaar is. Er wordt in onderzoeken



Figuur 12: Sedimentatie gedurende een enkel jaar in de PUTMOR zandwinput bron: Boers (2005).

tevens gesproken over een zogenaamde voorkeursoriëntatie van de zandwinput, waarvoor middenerosie optreedt. Een zandwinput die gedraaid is tegen de klok in, zal een middenerosie vertonen, terwijl een zandwinput die met de klok mee is gedraaid, in het midden zal aanzanden (Klein, 1999; Boers, 2005). Roos et al., (2004) hebben geconcludeerd dat wijde zandwinputten zullen sedimenteren, zoals ook blijkt uit Hoogewoning & Boers (2001) en Boers, (2005).

3.2.6 Migratie

Onder de migratie van zandwinputten wordt een verplaatsing van het zwaartepunt van de zandwinput verstaan. Deze verplaatsing wordt verwacht onder invloed van getijdenstromingen en reststromingen (Roos et al., 2004). Zandwinputten kunnen in zowel kustrichting als dominante stromingsrichting verplaatsen, zoals ook beschreven is door Klein (1999) en Boers (2005). Klein (1999) vermeldt een migratie van de zandwinput tot 9 meter over een tijdspan van 1000 jaar. Allersma en Ribberink (1992) beschrijven hogere migratiesnelheden voor ondiepe gebieden dan voor diepe gebieden waar een zandwinput wordt aangelegd. Daarnaast migreren diepe, smalle zandwinputten minder dan wijde en ondiepere zandwinputten (Walstra et al., 1998).

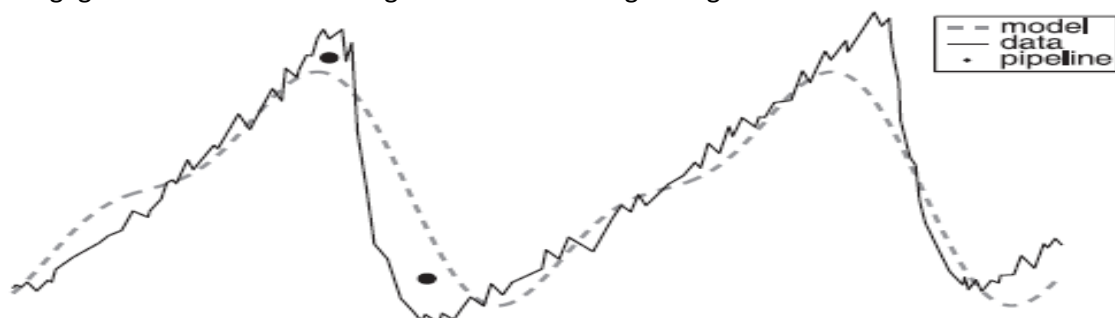
3.2.7 Ontwikkeling hellingen.

Onder invloed van stroming, sedimentatie en migratie is het mogelijk dat de hellingen van zandwinputten zullen veranderen. Hellingen zullen vervlakken, waardoor het oppervlak van een zandwinput toe kan nemen (Klein 1999; Roos et al. 2004; Boers 2005).

Verwacht kan dus worden dat de morfologische effecten van de zandwinput direct afhankelijk zijn van de hydrodynamische gedragingen en de afmetingen en oriëntatie van deze zandwinput. Voor verschillende vormen van zandwinputten zijn verwachtingen ten aanzien van de gedragingen. Daarnaast is het mogelijk dat de vultijd in ordergrootte honderden jaren zal vallen en zullen zandwinputten over een lange periode kunnen migreren en hellingen kunnen vervlakken.

3.3 Pijpleidingen en kabels

Van de bodem van de Noordzee is bekend dat er enkele typen bodemvormen aanwezig zijn. Onder deze bodemvormen zijn verschillende kabels en pijpleidingen aangelegd. De diameters van de pijpleidingen zijn over het algemeen tussen 0.1 en 1.5 meter en worden minimaal 0.2 meter en maximaal 2 meter ingegraven (Morelissen et al., 2003). De zandgolven die in hoofdstuk 3.1 beschreven zijn, zullen door migratie de blootlegging van deze pijpleidingen als gevolg kunnen hebben. Morelissen et al. (2003) hebben hier onderzoek naar gedaan. In figuur 13 is visueel weergegeven wat er zou kunnen gebeuren door zandgolf migratie.



Figuur 13: Zandgolf migratie en blootlegging pijpleidingen bron: Morelissen et al. (2003).

Zoals te zien is door Morelissen et al. (2003) een model gemaakt dat de migratie van zandgolven voorspelt en hier is tevens de pijpleiding zelf te zien. Er is door Morelissen et al. (2003) onderzocht hoe de pijpleiding in de toekomst bloot zal komen te liggen onder invloed van zandgolven. Het onderzoek heeft aangetoond dat voor een pijpleiding met een diameter van 0,4 meter en zandgolven met een migratiesnelheid van 10 – 20 meter per jaar, de pijpleiding slechts aan de bovenkant een enkele keer bloot komt te liggen.

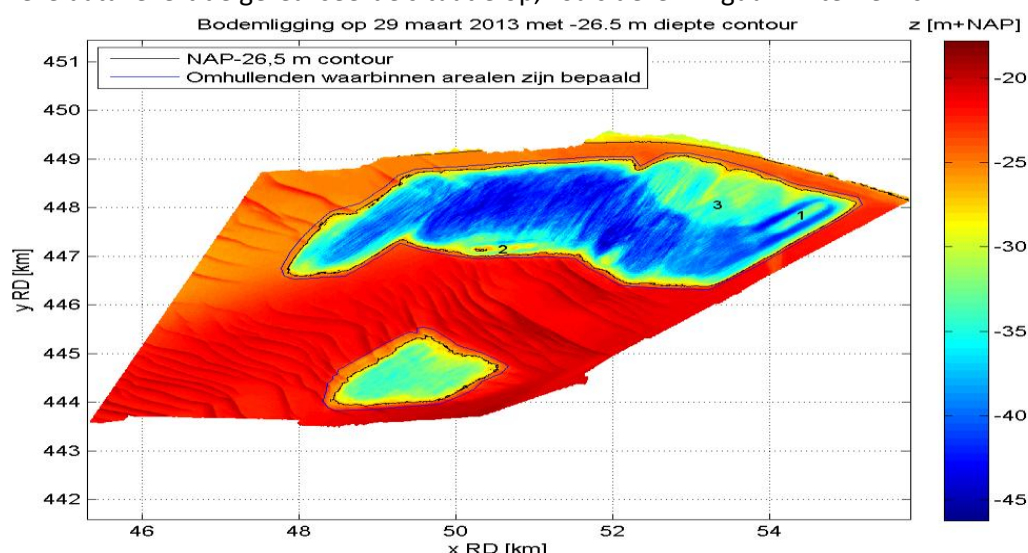
4 Gemodelleerde gedragingen zandwinputten

Het grootste gedeelte van de zandwinning voor de Maasvlakte 2 in de Noordzee is voltooid (www.maasvlakte2.com). Om een inschatting te kunnen geven van de stromingspatronen in het gebied rondom de zandwinputten en de vervorming van de zandwinputten in de toekomst, heeft Rijkswaterstaat Zee en Delta het ingenieurbureau Svašek Hydraulics gevraagd om de zandwinputten te onderzoeken. Hierbij zijn morfologische kaarten van de zandwinputten opgesteld, is de waterbeweging zowel in, als rond de zandwinputten gemodelleerd en is in opdracht van Rijkswaterstaat een voorspelling gedaan over de morfologische ontwikkeling van de zandwinputten over een periode van 30 jaar. Omdat de hydrologische aspecten van de zandwinputten van invloed zijn op dit onderzoek, zal allereerst kritisch gekeken worden naar de bevindingen van het rapport van Klein & Van Den Boomgaard (2013). Om zodoende in te kunnen schatten wat de gedragingen van het gebied en de zandwinputten kunnen zijn onder invloed van deze hydrologische aspecten. In dit hoofdstuk zal het rapport van Svašek Hydraulics kort worden samengevat. Hierbij wordt het rapport aangeduid met de verwijzingen naar de auteurs: Klein & Van Den Boomgaard.

4.1 Huidige situatie

De zandwinputten die gerealiseerd zijn, hebben beide een andere vorm. Bij de ontwikkeling van de zandwinputten is ervoor gekozen om de hellingen van de taluds niet te steil te maken. Dit zou er namelijk voor kunnen zorgen dat een deel van het water in de zandwinputten niet ververst zal worden en daarom vrijwel geen zuurstof zal bevatten, wat een sterk negatieve invloed heeft op het leven in de bodem van de zandwinputten. Aan het programma 'Building with Nature' is de mogelijkheid geboden om in de zandwinput enkele bodemvormen te laten staan, zodat onderzocht kan worden of het bodemleven daardoor sneller en beter hersteld.

Voor de uitwerking van de invloeden van de zandwinputten op het gebied heeft Svašek Hydraulics gebruik gemaakt van bathymetrische data uit maart 2013, zoals aangeleverd door Rijkswaterstaat. Deze data levert de gerealiseerde situatie op, zoals deze in figuur 14 te zien is.



Figuur 14: Gerealiseerde zandwinputten bron: Klein & Van Den Boomgaard (2013).

Zoals te zien, ligt de oorspronkelijke bodemligging van het gebied in het noordelijke gedeelte rond de -25 meter NAP (-26,1 meter LAT) en in het zuidelijke gedeelte tussen -20 en -25 meter NAP (-21,1 tot -26,1 meter LAT). De noordelijke zandwinput is afgegraven tot -35 tot -45 meter NAP (-36,1 tot -46,1 meter LAT) en de zuidelijke zandwinput is afgegraven tot -30 tot -35m NAP (-31,1 en -36,1 meter LAT).

4.2 Samenvatting rapport Svašek Hydraulics

In het rapport van Klein & Van Den Boomgaard (2013) zijn verschillende zaken onderzocht. Allereerst is van de aangelegde zandwinputten onderzocht welke dieptes en hellingen deze in de huidige situatie hebben. De gemiddelde diepte van de noordelijke zandwinput bedraagt 14,1 meter, terwijl de gemiddelde diepte van zuidelijke zandwinput 10,4 meter bedraagt. De hellingen van beide zandwinputten zijn flauwer dan 1:10 op een enkele sectie in de zuidelijke zandwinput na. Naast dieptes en hellingen is een hydraulische effectbepaling gemaakt voor de stroming en de waterstand. Hierbinnen zijn de maximale stroomsnelheden, gemiddelde stroomrichtingen en waterstanden bekeken. Dit is gedaan door gebruik te maken van het zogenaamde FINEL2D model. Binnen dit model is een rekenrooster gemaakt van de zuidelijke Noordzee met circa 130.000 elementen. De simulaties die worden uitgevoerd binnen het FINEL2D model zijn in tabel 4 weergegeven.

Tabel 4: Simulaties uitgevoerd met het FINEL2D model bron: Klein & Van Den Boomgaard (2013).

Simulatie	Zandwinputten	Windsnelheid (m/s)	Windrichting(°N)
Run 1	Geen	0	-
Run 2	Geen	15	240
Run 3	Wel	0	-
Run 4	Wel	15	240

De uitgevoerde simulaties maken gebruik van windsnelheden en –richtingen die een extreme situatie beschrijven. Zodoende zijn maximale stroomsnelheden, veranderingen in stroomrichtingen en waterstandverschillen berekend. De resultaten van deze berekening zijn in bijlage 1, tabel 11 weergegeven.

Naast stroomsnelheden, -richtingen en waterstanden heeft Svašek Hydraulics tevens een effectbepaling gedaan voor de golven. Hierbij is gebruik gemaakt van een SWAN model, waarbinnen golf- en windmetingen tussen de jaren 1996-2002 beschikbaar zijn. Hiervoor is een rekenrooster gemaakt met circa 220.000 elementen. Binnen deze effectbepaling is gebruik gemaakt van de condities als weergegeven in tabel 5.

Tabel 5: Condities effectbepaling golven bron: Klein & Van Den Boomgaard (2013).

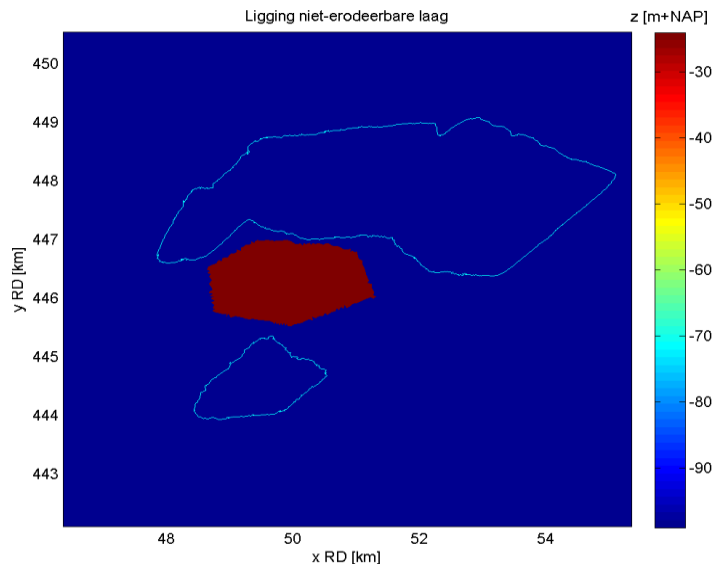
Conditie	Windsnelheid [m/s]	Golf- en windrichting [°N]	Significante golfhoogte H_s [m]	Golfperiode T_{m02} [s]	Piek periode T_p [s]
Set 1	14,8	240	2,66	5,5	7,0
Set 2	14,9	330	3,46	6,2	7,9
Set 3	14,9	0/360	3,44	6,2	7,9

De 3 sets leveren door gebruik te maken van het SWAN model, verschil op in de hoogtes van de golven, de frequenties van de golven en de richtingen van de golven. De toegepaste sets beschrijven extreme situaties, waardoor de resultaten een beschrijving zullen geven van de meest extreme veranderingen. De resultaten van de 3 sets zijn weergegeven in bijlage 1, tabellen 12 t/m 15.

Om een inschatting te geven van de morfologische ontwikkeling van de zandwinputten is door Svašek Hydraulics gebruik gemaakt van het genoemde FINEL2D en SWAN model. Deze modellen berekenen samen met de bodemligging de hoeveelheid sediment die in het gebied getransporteerd wordt. Dit gebeurt door golfparameters afkomstig uit het SWAN model in te voeren in het FINEL2D model, om zodoende het sediment transport te berekenen. Na een vastgestelde periode wordt de SWAN berekening opnieuw uitgevoerd, om actuele golfparameters in te kunnen voeren in het FINEL2D model. Hierbinnen is een versnellingsfactor toegepast, die de bodemverandering per tijdstap vermenigvuldigt. Dit is ten behoeve van de rekentijd. Een schematische weergave van de opzet van deze modellen is te zien in bijlage 1, figuur 52.

Voor het SWAN model zijn golfklimaten en windcondities toegepast, deze zijn weergegeven in bijlage 1, tabel 16. De golfklimaten en windcondities zijn opgesteld door gebruik te maken van een gemeten golftijdserie van Europlatform in de jaren 1979-2002. Deze golftijdserie is gebruikt om een jaarlijks gemiddelde opwoeling van sediment te bepalen. De gebruikte sets in tabel 16 bijlage 1 worden toegepast, om de jaarlijks gemiddelde opwoeling van sediment mee te nemen in het model. Beide sets worden even vaak en even lang opgelegd.

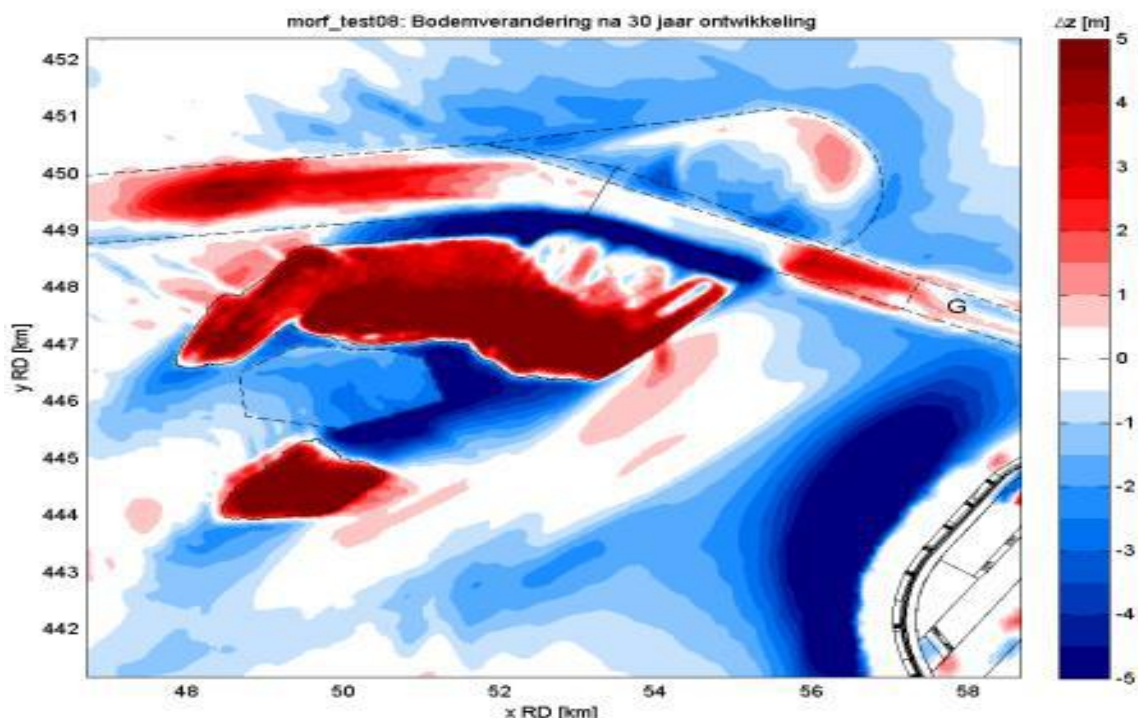
Voor de morfologische inschatting is Svašek Hydraulics tevens uitgegaan van een niet-erodeerbare kleilaag, die aanwezig is tussen beide zandwinputten (figuur 16). Deze niet-erodeerbare laag bevindt zich op een bepaalde diepte, dit betekent dat het sediment dat op de niet-erodeerbare laag ligt zal kunnen migreren, totdat de laag bereikt is.



Figuur 16: Niet-erodeerbare laag tussen beide zandwinputten
bron: Klein & Van Den Boomgaard (2013).

Na toepassing van de niet-erodeerbare laag en de uitvoering van de simulaties, heeft Svašek Hydraulics een inschatting kunnen maken van de bodemveranderingen in en rondom de zandwinputten en de hoeveelheid onderhoudsbaggerwerk. In figuur 17 is te zien wat de bodemverandering na 30 jaar zal zijn, wanneer de niet-erodeerbare laag beschouwd wordt, tezamen met de aangegeven golfklimaten en windcondities.

Zoals in figuur 17 te zien, is de bodemverandering van het gebied rondom de zandwinputten groot over een periode van 30 jaar. Daarnaast wordt een aanzanding van Euro- en Maasgeul gevonden uit de simulaties.



Figuur 17: Gemodelleerde bodemverandering na 30 jaar bron: Klein & Van Den Boomgaard (2013).

De ingeschatte hoeveelheid onderhoud aan de Maasgeul (vak G in figuur 17) bedraagt gemiddeld $2,0\text{Mm}^3$ per jaar, een stijging van 25% ten opzichte van het huidige onderhoud. Daarnaast wordt ingeschat dat het onderhoud van de gehele Eurogeul $2,9\text{Mm}^3$ zal bedragen. De zandwinputten zelf zullen volgens de inschatting van Svašek Hydraulics sterk aanzanden. De noordelijke zandwinput zal $44,2\text{Mm}^3$ aanzanden in 30 jaar, terwijl de zuidelijke zandwinput $8,9\text{Mm}^3$ aan zal zanden. Dit betekent een aanzanding van 25% voor de noordelijke zandwinput en een aanzanding van 30% voor de zuidelijke zandwinput over de periode van 30 jaar. Door Svašek Hydraulics is geconcludeerd dat er zich geen resonantieverschijnsel voordoet. Dat wil zeggen: er is geen sprake van een verdieping van de zandwinputten, zoals uit onderzoeken door Klein (1999) en Roos (2005) beschreven wordt. Daarnaast is er geen sprake van migratie van de zandwinputten, de putranden zullen echter wel vervlakken, waardoor het oppervlak van de zandwinput toeneemt.

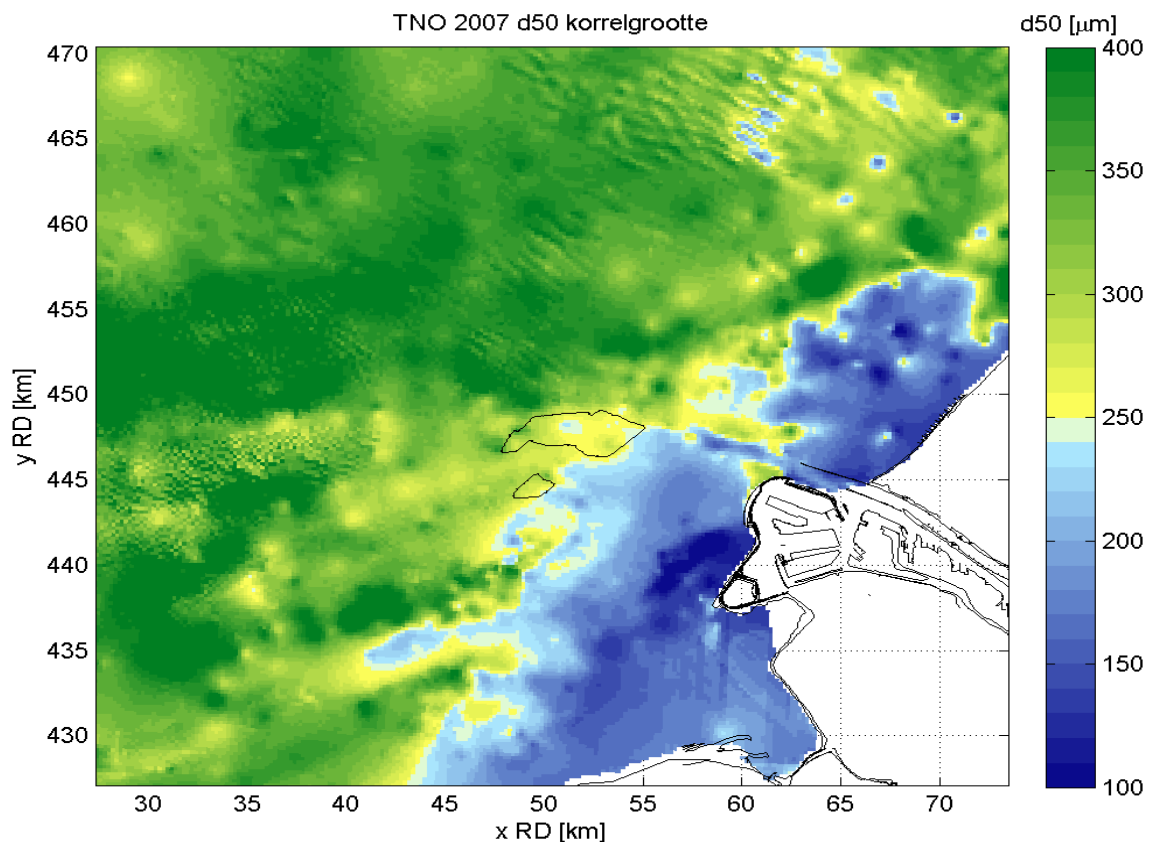
4.3 Kritische kanttekeningen rapport Svašek Hydraulics

Binnen de werkwijze van Svašek Hydraulics zal in dit hoofdstuk getracht worden kritische kanttekeningen te plaatsen, om zodoende in te schatten hoe het rapport geïnterpreteerd kan worden.

Allereerst wordt het golfklimaat, en de windcondities dus zodanig gekozen, dat er opwoeling op zal treden. Deze opwoeling, gecombineerd met de hydrodynamische aspecten van het gebied, worden in het zandtransportmodel gebruikt om de bodemveranderingen te berekenen. Waar deze gemiddelde opwoeling vandaan komt en hoe deze berekend wordt, blijkt niet uit het rapport van Svašek Hydraulics. Het gebruik van een jaarlijks gemiddelde opwoeling is in essentie correct. Het is echter de vraag of deze toegepast kan worden op de locatie van de zandwinputten, omdat de werkelijke opwoeling in dit gebied anders kan zijn vanwege de toegenomen waterdiepte.

Daarnaast worden zowel het golfklimaat als de windcondities bepaald aan de hand van deze jaarlijks gemiddelde opwoeling. Dit betekent dat men gebruik maakt van windsnelheden van 10 en 12 m/s, om de golven te creëren die de gemiddelde opwoeling veroorzaken. Dit betekent dat golven gesimuleerd worden die niet de gemiddelde golfrichting en -hoogtes representeren, maar de gemiddelde opwoeling. Voor de bodemveranderingen in de zandwinputten zal dit een correcte methode zijn, omdat breking van golven ter hoogte van de zandwinputten niet voorkomt. Wanneer echter gekeken wordt naar het gebied waarvoor een morfologische inschatting gegeven wordt, dan valt duidelijk te zien dat er wel degelijk locaties in het gebied zijn waar de gebruikte golven zullen breken, zoals bij de Maasvlakte 2. Omdat de golfhoogtes en piekperiodes gezocht zijn bij de gemiddelde opwoeling en omdat deze dus niet de gemiddelde situatie van het gebied representeren, is het mogelijk dat op de locaties waar de golven zullen breken, een andere morfologische verandering wordt berekend dan in werkelijkheid het geval is. De precieze invloed hiervan op de morfologische ontwikkelingen in het gebied is niet in te schatten, maar zal wel degelijk verschillen kunnen opleveren tussen werkelijke en gesimuleerde morfologische veranderingen in het gebied.

Naast toegepaste golfklimaten en windcondities, zijn ook de korrelgroottes binnen het gebied van belang. Binnen het rapport van Svašek Hydraulics worden korrelgroottes gebruikt afkomstig van TNO (figuur 18).



Figuur 18: Gebruikte korrelgroottes in modellering afkomstig van TNO bron: Klein & Van Den Boomgaard (2013)

De gebruikte korrelgroottes stammen uit 2007 en geven dus een situatie weer, waar de zandwinputten nog niet aanwezig zijn. Svašek Hydraulics gebruikt een korrelgrootte D50 van 250 µm voor het gehele gebied. Dit terwijl uit de gegevens van TNO wel degelijk blijkt dat de korrelgroottes verschillen in het gebied. Door gebruik te maken van een enkele korrelgrootte en niet actuele waarden voor deze korrelgrootte, wordt aan verandering in de korrelgrootte en variatie hierin binnen het gebied voorbij gegaan, wat ervoor kan zorgen dat het sedimenttransport onjuist berekend wordt.

De kanttekeningen die geplaatst zijn geven aan waar de inschatting van Svašek Hydraulics af zou kunnen wijken van de werkelijke situatie. Er zijn een aantal punten aangegeven waar dit het geval is. Hoewel het hierom niet precies is aan te duiden wat de bodemveranderingen in de toekomst zullen zijn, zal echter toch de verwachting zijn dat de ingeschatte bodemveranderingen door Svašek Hydraulics in hoge mate overeenkomen met de te verwachten ontwikkelingen in het gebied.

5 Inschatting van effecten zandwinputten

Voor de inschatting van de effecten voortkomend uit de zandwinputten, zal uitgegaan worden van zowel de theorie zoals beschreven in hoofdstuk 3 als de gemodelleerde invloed van Klein & Van Den Boomgaard (2013) zoals beschreven in hoofdstuk 4. De effecten die onderzocht worden sluiten aan bij de onderzoeksvragen zoals gesteld in hoofdstuk 1. De volgende effecten zullen in dit hoofdstuk onderzocht worden:

- Hoe zullen de zandwinputten en het gebied vervormen in de toekomst?
- Hoe zal het zandgolfveld zich gedragen onder invloed van de zandwinputten?
- Hoe zullen de Euro- en Maasgeul beïnvloed worden?
- Wat is de invloed van de zandwinputten op pijpleidingen en kabels in het gebied?

5.1 Hoe zullen de zandwinputten en het gebied vervormen in de toekomst?

De vervorming van het gebied is gemodelleerd door Klein & Van Den Boomgaard (2013). Op basis van het gebruikte model, is een bodemverandering voorspeld voor de komende 30 jaar. Deze verwachte verandering is in figuur 17 weergegeven.

Zoals in figuur 17 te zien is, is de voorspelling van Svašek Hydraulics dat de zandwinputten over een periode van 30 jaar sterk dicht zullen lopen. De noordelijke zandwinput zal 25% aanzanden, terwijl de zuidelijke zandwinput 30% aanzandt (Klein & Van Den Boomgaard, 2013). Naast de aanzanding van de zandwinputten, is de gemodelleerde verwachting dat vrijwel het gehele gebied zal eroderen. Op de locaties met kleine afstanden tot de zandwinputten of Maasvlakte 2 is deze erosie het sterkst. Daarnaast wordt op de hoeken van de zandwinputten lichte aanzanding verwacht en wordt een aanzanding van de Euro- en Maasgeul verwacht. Ook blijkt uit de modellering door Klein & Van Den Boomgaard (2013) dat de randen van de zandwinputten zullen vervlakken, maar dat er geen sprake zal zijn van een migratie van de zandwinputten.

De verwachting voor de morfologische veranderingen van het gebied, onder invloed van de zandwinput zijn zeer groot. Dit is met name het geval wanneer de uitkomsten van dit rapport vergeleken worden met onderzoeken gedaan door Klein (1999), Boers (2005) en Roos et al. (2008). Deze onderzoeken spreken namelijk van kleine morfologische veranderingen onder invloed van zandwinputten, over periodes van 100 jaar. Hierbij dient echter opgemerkt te worden, dat de aanleg van de Maasvlakte 2 in het rapport Klein & Van Den Boomgaard (2013) meegenomen is. Dit zou voor grote stroomsnelheden zorgen en de bodemverandering kunnen beïnvloeden. Een bodemverandering zonder de effecten van de Maasvlakte 2 is niet gemodelleerd. Vanwege deze reden is het lastig in te schatten wat de invloed van de zandwinputten precies is en hoe deze invloeden zich verhouden tot onderzoeken die er naar gedaan zijn in het verleden. De kwalitatieve effecten zijn echter overeenkomstig met verschillende onderzoeken die in het verleden gedaan zijn. Zo is de aanzanding van de zandwinputten te verklaren door de lagere stroomsnelheden ter hoogte van de zandwinput en de hogere snelheden voor de zandwinput, waardoor het sediment net voor de zandwinput erodeert en het sediment in de zandwinput gevangen wordt (Hoogewoning & Boers, 2001; Van Rijn & Walstra, 2004; Boers, 2005). De gebieden achter de zandwinputten zullen kunnen eroderen vanwege de toename in stroomsnelheid en de gepaarde toename in sedimenttransport.

Het model dat gebruikt is om tot deze morfologische verandering te komen bestaat uit een samenvoeging van het FINEL2D model (hydrodynamisch), samen met het SWAN (golven) model. Bij de modellen zijn al een aantal kritische kanttekeningen gezet, waardoor de voorspelling voor de morfologische verwachting uiteen kan lopen met de werkelijke situatie. De precieze invloed van de gebruikte parameters door Svašek Hydraulics is moeilijk aan te duiden. Echter wordt toch de inschatting geplaatst dat de gemodelleerde veranderingen in hoge mate overeenkomen met de veranderingen die er in de werkelijkheid zullen zijn.

De vraag “hoe zullen de zandwinputten en het gebied vervormen in de toekomst?” kan dus beantwoord worden door de kwalitatieve effecten, zoals ingeschat door Klein & Van Den Boomgaard (2013), waarbij de morfologische veranderingen van het gebied gelijksoortig zullen zijn aan de veranderingen over 30 jaar die Svašek Hydraulics voorspelt. Daarnaast is de inschatting dat de zandwinputten niet zullen migreren en is de verwachting dat de hellingen zullen vervlakken.

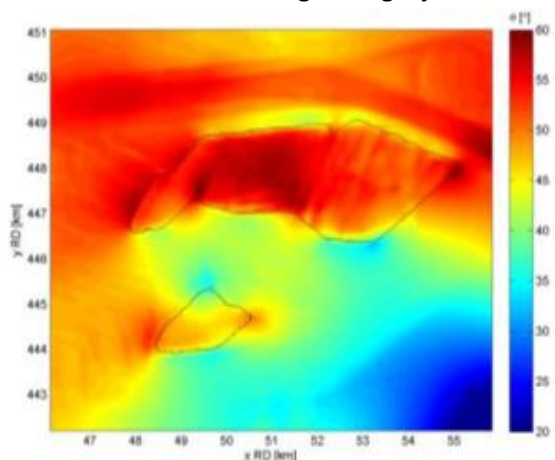
5.2 Hoe zal het zandgolfveld zich gedragen onder invloed van de zandwinputten?

Zoals blijkt uit de inschatting van Svašek Hydraulics, zullen grote delen van het gehele gebied om de zandwinputten en de Maasvlakte 2 heen eroderen met uitzondering van enkele hoekpunten van de zandwinputten en de Euro- en Maasgeul (figuur 17). Uit de literatuur is bekend dat de migratie van zandgolven gebaseerd is op de reststroming (Németh et al., 2002). Daarnaast zullen de zandgolven loodrecht op de reststroming staan, met maximaal 10° afwijking tegen de klok in (Hulscher 1996; Hulscher & Brink, 2001). Dit betekent dat de reststroming in het gebied de oriëntatie van de zandgolven zal bepalen. Omdat de reststroming afhankelijk is van de eb- en vloedstroming, zal een verandering in stromingspatronen in eb- en vloedrichting een invloed kunnen hebben op het zandgolfpatroon.

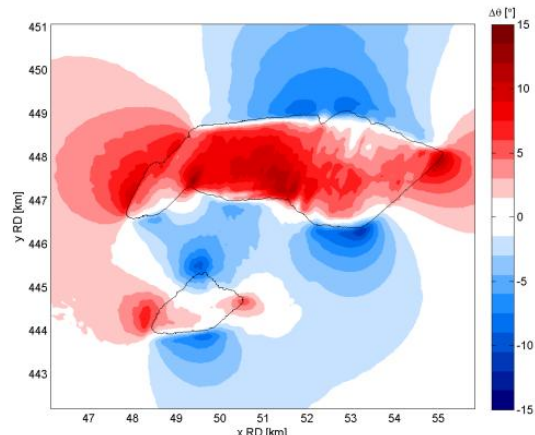
Daarnaast is bekend dat zandgolven ontstaan door verticale circulerende cellen, die bij een bepaalde stroomsnelheid sterk genoeg zijn om sediment in beweging te brengen (Hulscher, 1996). Op specifieke locaties in het gebied zou het mogelijk zijn dat de stroomsnelheden dusdanig dalen, dat de verticaal circulerende cellen niet meer genoeg kracht hebben om sediment in beweging te brengen. Ook is het mogelijk dat de stroomsnelheid stijgt op specifieke locaties, waardoor er juist een mogelijkheid is tot het ontstaan van zandgolven.

5.2.1 Stromingsrichting

Om een inschatting te maken van de (eventuele) verandering van de oriëntatie van zandgolven in het gebied, zal gekeken worden naar de huidige zandgolven en de richting van de stroming. Door Klein & Van Den Boomgaard (2013) is een inschatting gegeven van stroomrichtingen bij zowel eb- als vloedstroming, met en zonder wind. De typische eb- en vloedstroming voor het gebied is te zien in bijlage 2. Hierin zijn snelheden en richtingen weergegeven. De veranderingen in stroomrichtingen zijn voor zowel de eb- als vloedstroming soortgelijk en kunnen leiden tot veranderingen in richting van de reststroming in het gebied. In figuur 19 is de stroomrichting bij maximale vloedstroming zonder wind weergegeven. Zoals te zien zijn er binnen het weergegeven gebied nog grote verschillen tussen stromingsrichtingen. Het verschil in stromingsrichting tussen de oorspronkelijke situatie zonder en de nieuwe situatie met zandwinputten is in figuur 20 te zien voor de vloedstroming. Hetzelfde verschil voor de ebstroming is te zien in bijlage 3 figuur 55. Hierbij is te zien dat zowel de eb- als de vloedstroming soortgelijke hoekverdraaiingen vertonen.

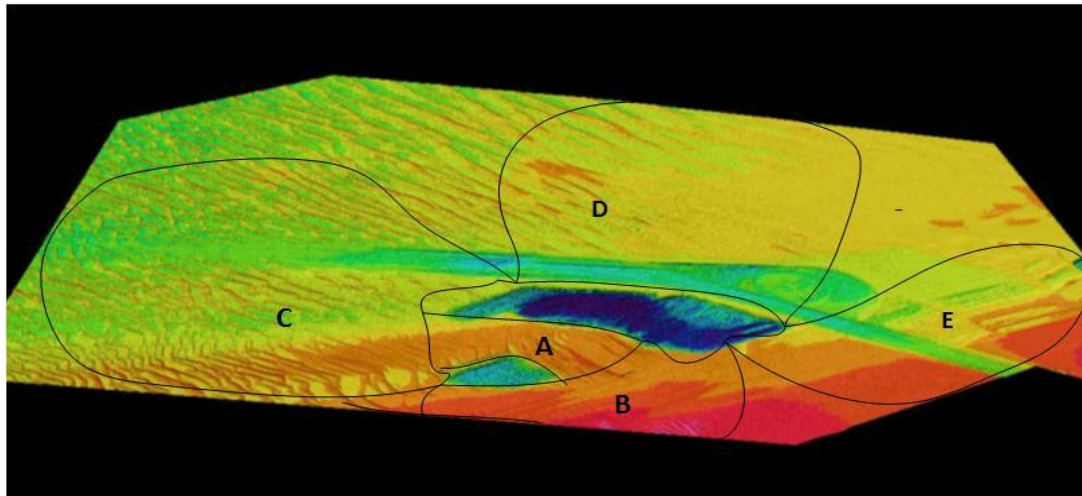


Figuur 19: Stromingsrichtingen in het gebied bij maximale vloedstroming zonder wind bron: Klein & Van Den Boomgaard (2013)



Figuur 20: Verschil in stroomrichtingen tussen situatie met en situatie zonder zandwinputten voor maximale vloedstroming zonder wind bron: Klein & Van Den Boomgaard (2013)

Om een inschatting te geven van locaties in het gebied die een verandering zouden kunnen doormaken, is het gebied opgedeeld in subgebieden. Deze subgebieden zijn ingericht op stromingsrichtingen (figuur 21).

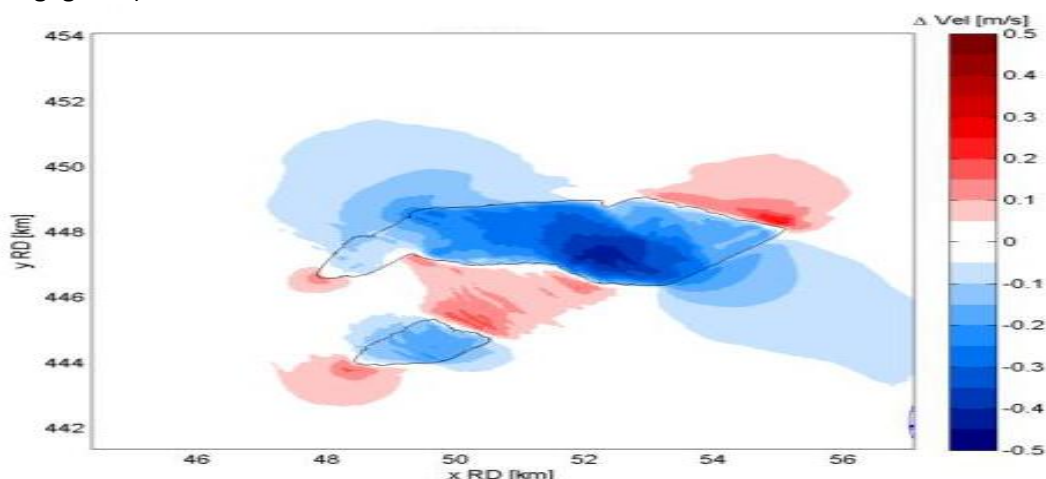


Figuur 21: Zandgolfveld in verschillende gebieden in een DTM. bron: Hr.Ms Snellius(2012).

Wanneer gekeken wordt naar de stromingsrichting, dan zijn bepaalde gebieden waarbinnen de stroomrichting een kloksgewijze draaiing krijgt. Dit zijn gebieden C en E. In de overige gebieden A, B en D verandert de stromingsrichting negatief. In gebieden C, D en A zijn zandgolven aanwezig. Binnen deze gebieden zouden dan ook veranderingen in patronen kunnen ontstaan. Voor gebied C zou het mogelijk zijn dat de zandgolven in dit gebied een lichte kloksgewijze draaiing krijgen. Voor gebieden D en A zou een anti kloksgewijze draaiing mogelijk zijn. Wanneer gekeken wordt naar gebieden C en D, dan is te zien dat in beide gebieden de Eurogeul hier aanwezig is. Vanwege de mogelijke kloksgewijze rotatie van de zandgolven in gebied C, zou het mogelijk kunnen zijn dat de zandgolven uit dit gebied verder (meer in de richting van de Maasgeul) in de Eurogeul migreren dan in de oorspronkelijke situatie. Dit zou kunnen betekenen dat dit gebied meer onzekerheid zal hebben in de toekomst en zal kunnen aanzanden.

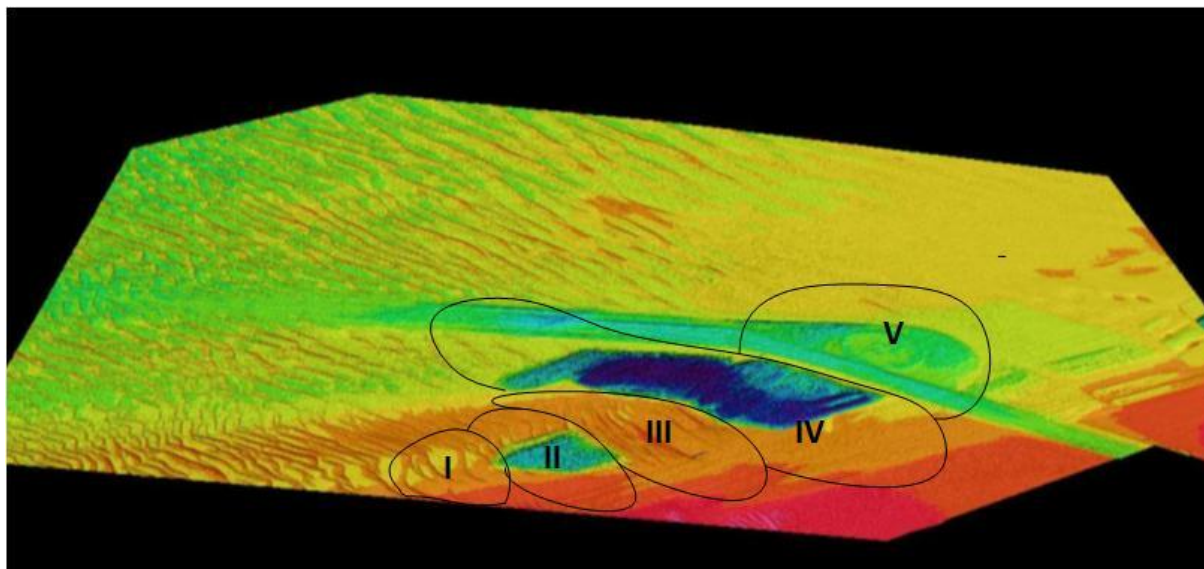
5.2.2 Stroomsnelheid

Wanneer naar de stroomsnelheden gekeken wordt, zijn andere gebieden van belang. In figuur 22 zijn de verschillen tussen oorspronkelijke en huidige situatie te zien voor maximale vloedstroming met wind (de typische eb- en vloedstroming is te zien in bijlage 2. Hierin zijn snelheden en richtingen weergegeven).



Figuur 22: Stromingsverandering maximale vloedstroming met wind en bodemverandering komende 30 jaar bron: Klein & Van Den Boomgaard (2013).

Voor de stroomsnelheid zijn gebieden geselecteerd die mogelijk in de toekomst veranderingen kunnen veroorzaken in het zandgolf patroon (figuur 23).



Figuur 23: DTM gebieden van belang voor veranderingen onder invloed stroomsnelheid bron: Hr.Ms Snellius(2012).

Van de gebieden is duidelijk de verandering van stroomsnelheid te zien. Ten eerste zal in gebied I de stroomsnelheid toenemen. Dit zou er toe kunnen leiden dat het sedimenttransport van dit gebied toeneemt, vanwege de directe relatie tussen stroomsnelheid en bodemtransport van sediment (Ribberink, 2004). Dit zou ertoe kunnen leiden dat dit gebied ontzand, zoals ook voorspeld wordt door het model van Klein & Van Den Boomgaard (2013). De toename in stroomsnelheid in gebied I zal een invloed kunnen hebben op de aanwezige zandgolven in dat gebied. Welke invloed deze toename in stroomsnelheid precies zal hebben, is slecht te duiden. De veranderingen van de afmetingen of oriëntatie van zandgolven onder invloed van een toename in stroomsnelheid is onbekend.

Gebied II zal onder invloed van een lagere stroomsnelheid sediment kunnen vangen. Daarnaast zullen de aanwezige zandgolven uit gebied I, de zandwininput in kunnen migreren en dus verdiepen. Voor gebied III is duidelijk te zien dat de stroomsnelheid toeneemt. Ook hier is slecht aan te duiden wat er precies gebeurt met de hoogte en oriëntatie van de zandgolven. Binnen dit gebied zou de migratie kunnen toenemen als gevolg van de toename in stroomsnelheid. Een andere mogelijkheid voor dit gebied zou zijn het ontstaan van nieuwe zandgolven, vanwege toename in stroomsnelheid. Het is waarschijnlijk dat gebied III in de toekomst een verandering zal doormaken.

Binnen gebied IV is de noordelijke zandwininput aanwezig. Deze zal in de toekomst aanzanden. Het is duidelijk te zien dat de stroomsnelheid in het noordwesten van gebied IV zal afnemen. In dit deel van het gebied zijn zandgolven aanwezig. Hierop zal de afname in snelheid invloed kunnen hebben. Wanneer naar gebied V gekeken wordt is duidelijk te zien dat de stroomsnelheid in het gebied toeneemt. In dit gebied zijn in de huidige situatie geen zandgolven aanwezig. De toename in stroomsnelheid zou ertoe kunnen leiden dat in dit gebied zandgolven ontstaan. Het deel van het gebied binnen de Euro- Maasgeul zal mogelijk eroderen, door de toename in sedimenttransport vanwege de toename in stroomsnelheid. De gedragingen van de rest van het gebied zijn erg slecht te voorspellen, met name omdat de mogelijkheid bestaat dat bodemvormen zich voor gaan doen.

5.2.3 Golven

De golfrichting en –hoogte is door Svašek Hydraulics ook gemodelleerd. De resultaten uit de gebruikte simulaties, voor 3 verschillende windrichtingen geven de volgende toename in golfhoogtes, verandering in golfrichting en golfvertraging, zoals weergegeven in tabel 6.

Tabel 6: Veranderingen in golfhoogte, golfrichting en golfvertraging bron: Klein & Van Den Boomgaard (2013).

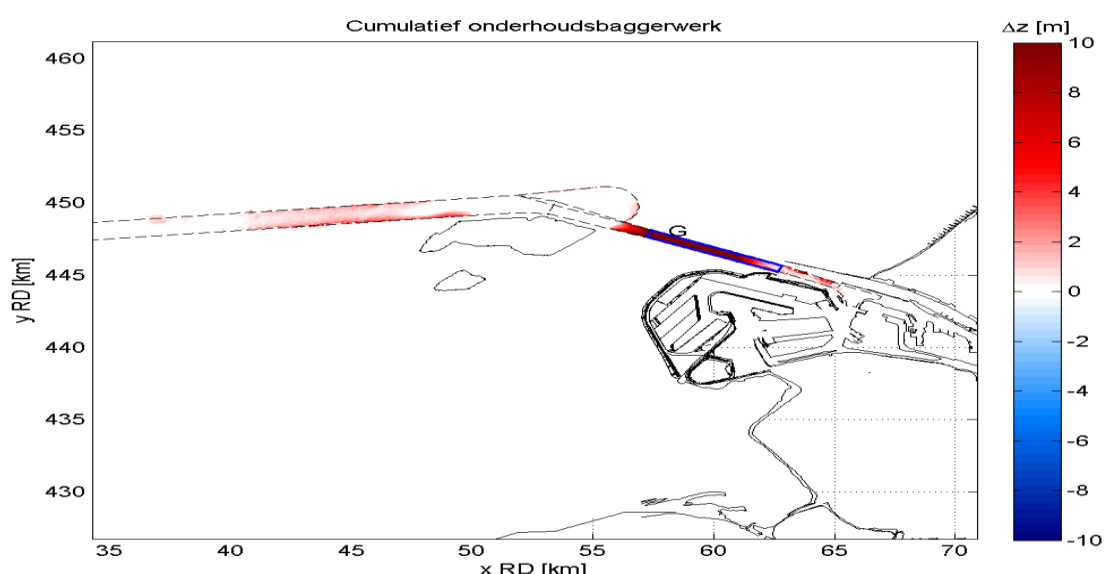
Parameter	$\theta=240^\circ$		$\theta=330^\circ$		$\theta=0/360^\circ$	
	Noordelijke zandwinput					
	Absoluut	Relatief	Absoluut	Relatief	Absoluut	Relatief
ΔH_s	0,2 m	7%	0,2 m	5%	0,2 m	4%
ΔT_p	0,2 s	3%	0,04 s	<1%	0,04 s	<1%
$\Delta \theta$	4°		5°		6°	
	Zuidelijke zandwinput					
	Absoluut	Relatief	Absoluut	Relatief	Absoluut	Relatief
ΔH_s	0,15 m	5%	0,15 m	4%	0,15 m	5%
ΔT_p	0,15 s	2%	0,02 s	<1%	0,04 s	<1%
$\Delta \theta$	3°		4°		4°	

Zoals te zien zijn de veranderingen in golfhoogtes, richtingen en golfvertragingen zeer klein. Uit de literatuur is bekend dat golven een negatieve invloed hebben op de aanwezigheid van zandgolven, vanwege het suspenderen van sediment aanwezig in de top van de zandgolf. Echter is tevens bekend dat deze invloed zeer gering is en slechts bij een extreme golfhoogte echt invloed zal hebben. Vandaar dat het moeilijk is om in te schatten of de veranderingen in golfhoogte en -richting een significante invloed zullen hebben.

De vraag “Hoe zal het zandgolfveld zich gedragen onder invloed van de zandwinputten?” kan dus niet exact beantwoord worden. Er kunnen echter op basis van stroomsnelheden en stroomrichtingen wel gebieden geselecteerd worden die in de toekomst veranderingen door kunnen maken. Daarnaast zal de verwachting zijn dat vrijwel het gehele zandgolfveld zal eroderen.

5.3 Hoe zullen de Euro- en Maasgeul beïnvloed worden?

Voor de beïnvloeding van de Euro- en Maasgeul zal allereerst gekeken worden naar de modellering die gemaakt is door Svašek Hydraulics. Deze modellering wordt visueel weergegeven in figuur 24, waarin het cumulatieve onderhoudsbaggerwerk te zien is.

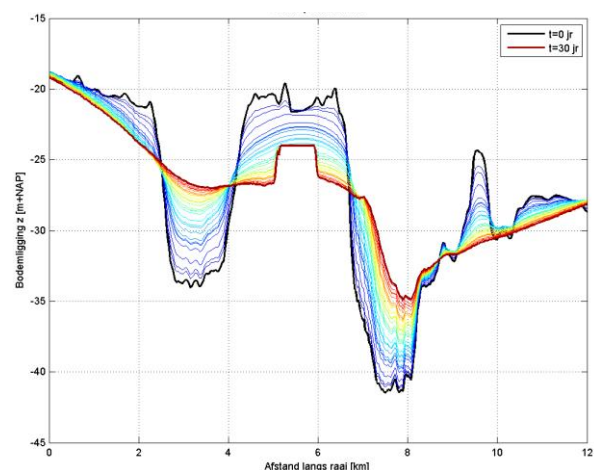


Figuur 24: Onderhoudsbaggerwerk Euro- en Maasgeul bron: Klein & Van Den Boomgaard (2013).

Uit de resultaten van de modellering uitgevoerd door Svašek Hydraulics komt naar voren dat de Maasgeul in de toekomst met 2Mm^3 per jaar gebaggerd zal moeten worden: een stijging van 25% ten opzichte van de oorspronkelijke situatie. Daarnaast is uit de modellering gebleken dat de Eurogeul met $2,9\text{Mm}^3$ per jaar gebaggerd zal moeten worden. In de huidige situatie wordt het gedeelte van de Eurogeul dat aanzand nauwelijks gebaggerd. Om de diepgang van dit gebied in de toekomst te garanderen, zal dus gebaggerd dienen te worden. Dit is in overeenstemming met de aanzanding van de geul, zoals te zien is in de ingeschatte veranderingen van het gebied (figuur 17). Hierin is duidelijk te zien dat de Eurogeul zal aanzanden in de periode van 30 jaar.

Naast de aanzanding van de Euro- en Maasgeul is tevens te zien dat de richel die in de huidige situatie aanwezig is tussen de noordelijke zandwininput en de Euro- en Maasgeul langzaam maar zeker zal eroderen (figuur 17). Dit betekent dat deze richel zal kunnen verdwijnen. Dit is tevens te zien in figuur 25, waarin door Svašek Hydraulics een doorsnede is gemaakt van de verwachte bodem over 30 jaar. Daarnaast is in zowel figuur 24 als de gemodelleerde verandering van het gebied (figuur 17) te zien dat het keergebied voor nood dat aangelegd is ten noorden van de Euromaasgeul lichtelijk zal kunnen aanzanden in de periode van 30 jaar.

De vraag “Hoe zullen de Euro- en Maasgeul beïnvloed worden?” kan dus beantwoord worden door de toegenomen aanzanding van zowel de Euro- als de Maasgeul, waarbij tevens de richel tussen de zandwinputten en de beide geulen langzaam maar zeker zal verdwijnen.



Figuur 25: Doorsnede zandwinputten en Euromaasgeul bron: Klein & Van Den Boomgaard (2013).

5.4 Wat is de invloed van de zandwinputten op pijpleidingen en kabels in het gebied?

5.4.1 Gegevens

Om een inschatting te geven van de invloed van de zandwinputten op de pijpleidingen en kabels in het gebied, zal het allereerst van belang zijn om te kijken waar de pijpleidingen en kabels zich bevinden in het gebied.



Figuur 26: Pijpleidingen en kabels in aanloopgebied Rotterdam bron: Dienst der Hydrografie (2014).

In figuur 26 is het gebied te zien waarnaar in dit onderzoek gekeken wordt. Dit gebied is omlind weergegeven. In de figuur is te zien dat het gebied dat bekeken wordt in het noordoosten kabels en pijpleidingen bevat. Daarnaast zijn buiten het gebied in noordoostelijke richtingen ook enkele kabels en pijpleidingen aanwezig. Ter plaatse van de noordoosthoek van het gebied zijn kleine zandgolven met hoogtes van circa een meter aanwezig.

Uit de ingeschatte bodemveranderingen van Svašek Hydraulics (figuur 17) is gebleken dat er geen bodemverandering verwacht wordt voor de noordoosthoek van het gebied dat beschreven wordt in figuur 26. Hetzelfde geldt voor de veranderingen in stroomrichtingen en stroomsnelheden, zoals te lezen is in hoofdstuk 5.2. Omdat de pijpleidingen en kabels zich aan de rand van het gebied bevinden, is het moeilijk in te schatten of het oppervlak waarop de zandwinputten invloed hebben groot genoeg is om ook invloed uit te oefenen op de pijpleidingen en kabels in het gebied. Wanneer echter gekeken wordt naar de onderzoeken van Roos et al. (2008) en Klein (1999), dan lijkt het onwaarschijnlijk dat de zandwinputten op een dusdanig groot oppervlak invloed zullen uitoefenen, dat ook de kabels en pijpleidingen in het noordoosten van het gebied beïnvloed zullen worden. Als de pijpleidingen en kabels in het noordoosten van het gebied beïnvloed zouden worden, dan zou het gebied van invloed van de zandwinputten circa 800km² moeten zijn. Dit gebied is een stuk hoger dan wat blijkt uit de onderzoeken door Roos et al. (2008) en Klein (1999) en het onderzoek door Svašek Hydraulics. De vraag “Wat is de invloed van de zandwinputten op pijpleidingen en kabels in het gebied?” kan dan ook beantwoord worden door te stellen dat de invloed van de zandwinputten op de pijpleidingen en kabels die aanwezig zijn in het gebied naar alle waarschijnlijkheid nihil zal zijn.

6 Data analyse

Voor de inschatting van de effecten en de gedragingen van de zandwinputten, zal een data analyse gedaan worden. In deze data analyse zullen de volgende zaken onderzocht worden:

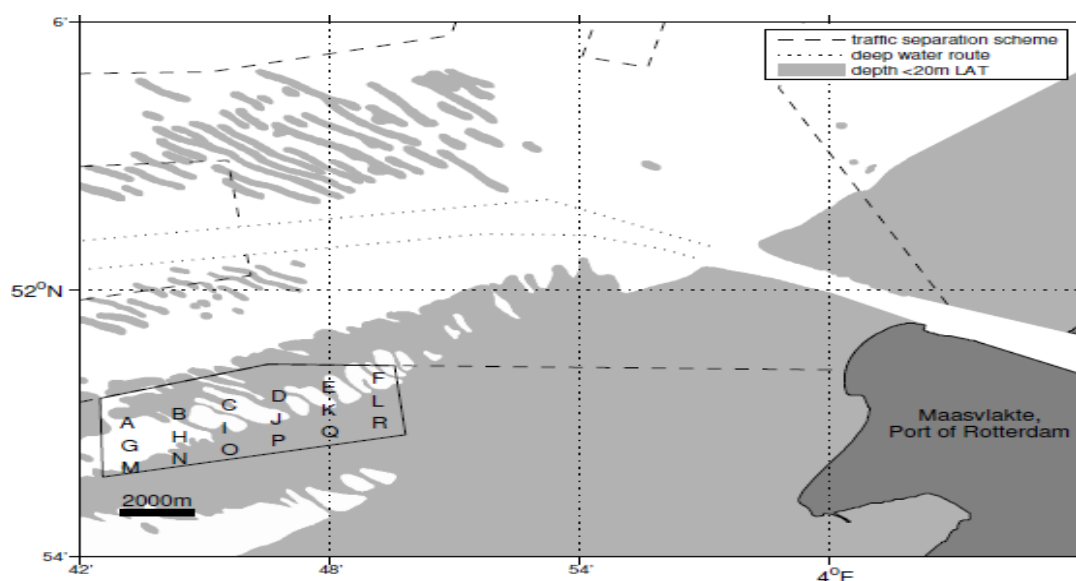
- Wat zijn de gedragingen van het gebied geweest in de afgelopen jaren?
- Is er een mogelijkheid tot het herstel van bodemvormen in de zandwinputten?

Voor de uitvoering van de data analyse zal gekeken worden naar datagericht onderzoek dat in het verleden is gedaan naar de gedragingen van het gebied. Dit zal gebruikt worden om een inschatting te geven van de veranderingen in het gebied. Vervolgens zal door gebruik te maken van bathymetrische opnemingen van de Dienst der Hydrografie bekeken worden hoe het gebied zich over een aantal jaren heeft ontwikkeld, wat vergeleken kan worden met de jaarlijkse veranderingen in het gebied dat gebleken is uit onderzoek. Daarnaast zal gekeken worden naar aanvullende gegevens die beschikbaar zijn over het gebied, om zodoende in te kunnen schatten of er een herstel van bodemvormen mogelijk is. Opgemerkt dient te worden dat alle figuren die dieptes aangeven ten opzichte van LAT zullen zijn.

6.1 Wat zijn de gedragingen van het gebied geweest in de afgelopen jaren?

6.1.1 Onderzoek in het verleden

In het verleden is onderzoek gedaan door Dorst (2009) naar de migratie van een klein deel van het zandgolfveld in de Noordzee. Hiervoor zijn de gegevens van 5 bathymetrische opnemingen gebruikt, die gedaan zijn tussen 1994 en 2006. Het geselecteerde gebied is opgedeeld in 18 subgebieden (figuur 27).



Figuur 27: Onderzochte gebied met subgebieden bron: Dorst (2009).

Van het gekozen gebied is uit een richtingsberekening van de zandgolven gebleken dat de zandgolven een richting noordoost/zuidwest hebben. Voor het tijdsbestek 1994 tot 2006 is geanalyseerd wat de veranderingen van het zandgolfveld zijn, per subgebied. Gebleken is dat de gemiddelde migratiesnelheid 4.2 meter per jaar is, waarbij de hoogste migratiesnelheden waargenomen worden bij de zuidoostelijke subgebieden. De migratiesnelheden zijn uitgezet tegen de diepte. Hieruit komt naar voren dat er een lineair verband is tussen diepte en migratiesnelheid, waarbij de migratiesnelheid toeneemt met afnemende diepte. Daarnaast is uit het onderzoek gebleken dat er geen sprake is van groei van zandgolven in het gebied (Dorst, 2009).

6.1.2 Opnemingen Dienst der Hydrografie

Voor de analyse van de gedragingen van het gebied is bathymetrische data gebruikt van de Dienst der Hydrografie en Rijkswaterstaat. Deze data is afkomstig uit de jaren 2003, 2006 t/m 2009 en 2012. De gebruikte datasets met de bijbehorende eenheden en verticale referentie zijn in tabel 7 te lezen.

Tabel 7: Gebruikte datasets met dimensies

Dataset (jaar)	Eenheid	Verticale referentie
HY11324 (2012)	Meters LAT	MBES
HY12111 (2012)	Meters LAT	MBES
HY08111-1 (2007)	Meters LAT	MBES
HY08111 (2008/2009), HY07113 (2007), 511-09, 420-09, 350-09, 199-08 (2009)	Meters LAT	MBES
HY06169 (2006)	Meters LAT	MBES
HY02144 (2003)	Meters LAT	SBES

De aangegeven verticale referenties beschrijven de manier waarop de bathymetrische data is opgenomen, MBES staat hierin voor Multibeam Echosounder en SBES staat voor Singlebeam Echosounder. MBES opnemingen worden gemaakt door een oppervlaktescan onder het hydrografische opneemvaartuig. Dit betekent dat de datasets die hierdoor geproduceerd worden slechts gecorrigeerd worden op onzekerheden, maar dat elk punt van de opname waargenomen wordt. Bij een SBES meting worden puntmetingen gedaan. Deze puntmetingen worden geïnterpoleerd om een complete dataset te maken. Dit betekent dat naast het corrigeren op onzekerheden, de SBES datasets ook geïnterpoleerd zijn en daarom grotere onzekerheid hebben dan MBES metingen, waarvoor interpolatie niet noodzakelijk is.

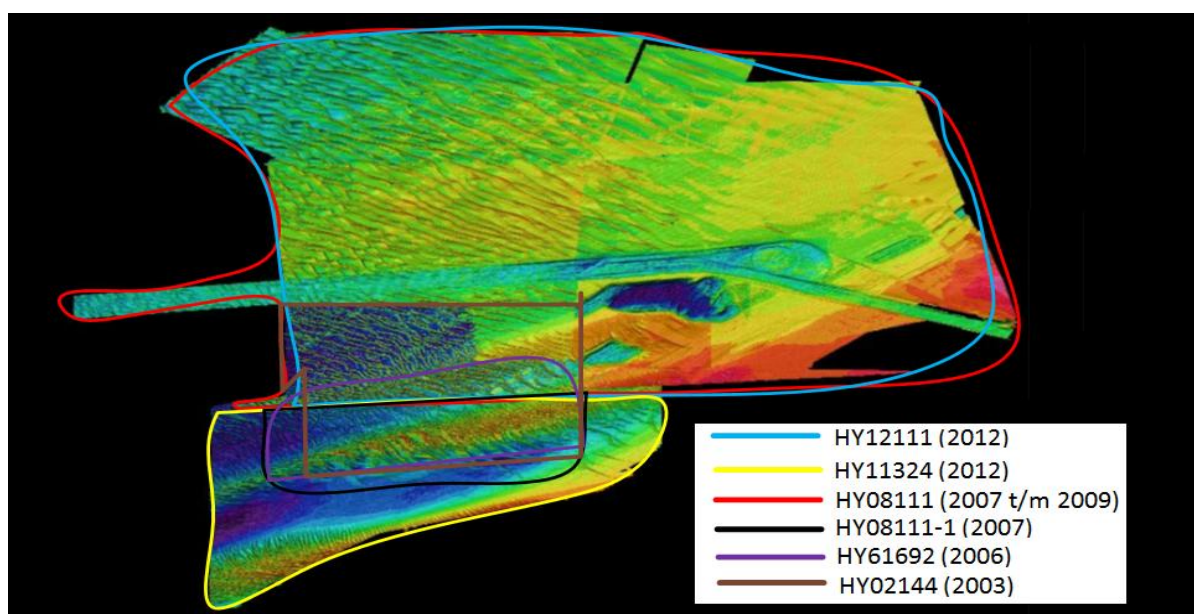
6.1.3 Veranderingen bodempatroon inleiding

Om een inschatting te kunnen geven van de veranderingen van de bodempatronen in het gebied, zullen opnemingen gebruikt worden die gemaakt zijn door de Dienst der Hydrografie en Rijkswaterstaat. Er zal van opeenvolgende opnemingen gekeken worden naar de ontwikkelingen die deze gebieden hebben doorgemaakt. Dit zal gedaan worden door van de metingen die gedaan zijn in Fledermaus de verschillen te bepalen. In tabel 8 is weergegeven voor welke datasets dit gedaan is en in welke paragraaf dit behandeld wordt.

Tabel 8: Gebruikte metingen en verschillen

Meting (jaar)	Verskil met meting (jaar)	Paragraaf
HY06169 (2006)	HY02144 (2003)	6.1.4 en 6.1.5
HY08111-1 (2007)	HY06169 (2006)	6.1.4 en 6.1.5
HY11324 (2012)	HY08111-1 (2007)	6.1.6
HY12111 (2012)	HY08111 (2007 t/m 2009)	6.1.6 en 6.1.7
HY08111 (2007 t/m 2009)	HY02144 (2003)	6.1.6

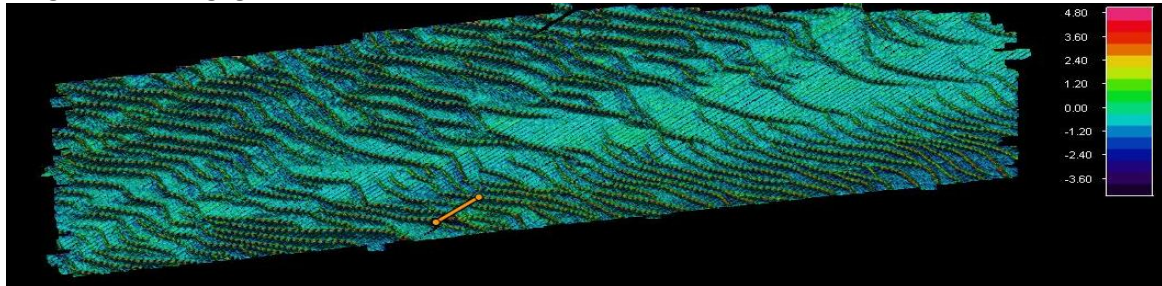
Een deel van deze opnames komt overeen met het gebied dat bekeken is voor de jaren 1994 t/m 2006 door Dorst (2009). Om te bekijken hoe het gebied zich gedraagt, zal in chronologische volgorde gewerkt worden, zoals ook is gedaan in tabel 8. Dit betekent dat allereerst de opnames bekeken zullen worden die ook gebruikt zijn in het onderzoek van Dorst (2009). Bij de gebruikte datasets dient opgemerkt te worden dat niet alle datasets hetzelfde gebied beschrijven. Een overzicht van de datasets en de locatie die zij bestrijken is te zien in figuur 28. De datasets HY12111 (2012) en HY08111 (2007 t/m 2009) beschrijven een gebied dat elkaar overlapt. Daarnaast overlappen de overige datasets elkaar en overlapt HY02144 alle datasets. Vanwege deze reden zal eerst gekeken worden naar het zuidelijke deel: de datasets HY02144 (2003), HY06169 (2006), HY08111-1 (2007) en HY11324 (2012) in chronologische volgorde. Vervolgens zal gekeken worden naar het noordelijke deel: de datasets HY08111 (2007 t/m 2009) en HY12111 (2012), die zowel met elkaar als met HY02144 (2003) vergeleken worden. De vergelijkingen worden gemaakt door de datasets in een bathymetrisch programma (Fledermaus) in te voeren, om zodoende verschillen te kunnen bepalen tussen metingen.



Figuur 28: Gebieden uit datasets bron: Dienst der Hydrografie (2014).

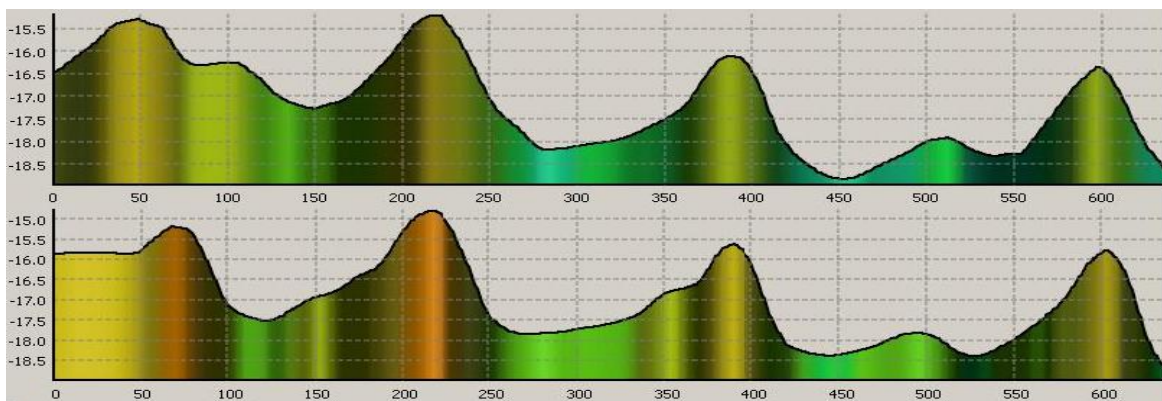
6.1.4 Verschillen voor het zuidelijke deel

Allereerst zal het verschil bekeken worden tussen dataset HY06169 (2006) en HY02144 (2003). Dit is in figuur 29 weergegeven.



Figuur 29: Verschil tussen HY06169 (2006) en HY02144 (2003) bron: Dienst der Hydrografie (2014).

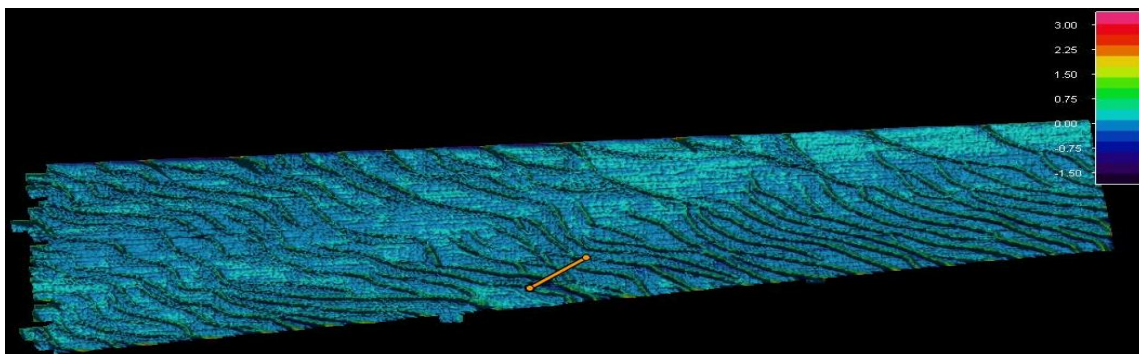
In het gebied in figuur 29 zijn de zandvormen duidelijk te zien. Om het verschil aan te duiden tussen de meting in 2006 en die in 2003, is een locatie in het gebied geselecteerd waarnaar gekeken zal worden. Dit gebied wordt bekeken vanwege de grote verandering die het heeft doorgemaakt. Om een vergelijking tussen datasets mogelijk te maken, zal een doorsnede gemaakt worden op de locatie die in figuur 29 met de oranje lijn is aangegeven. Deze doorsnede wordt voor beide datasets gemaakt en is te zien in figuur 30.



Figuur 30: Doorsnede HY06169 (2006) boven en HY02144 (2003) onder bron: Dienst der Hydrografie (2014).

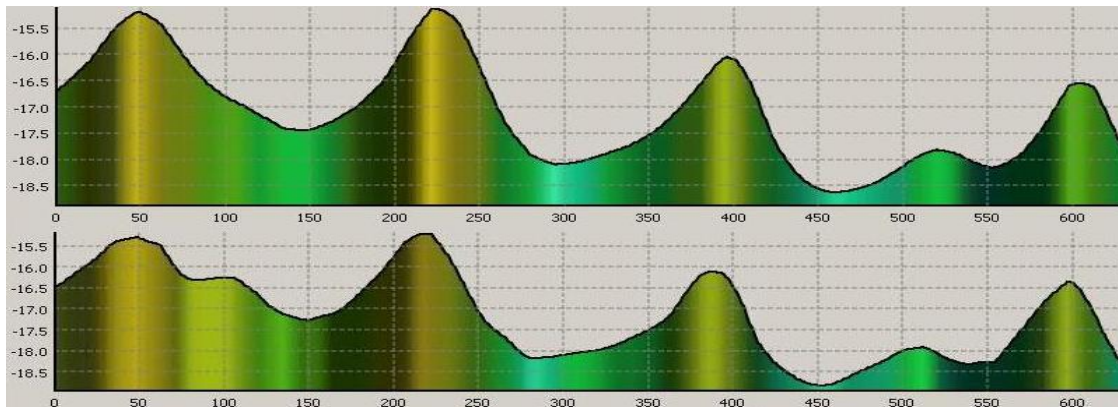
Wanneer goed gekeken wordt naar figuur 30, dan is duidelijk te zien dat bij de bovenste doorsnede de zandgolven naar rechts verplaatst zijn ten opzichte van de onderste doorsnede die de data van 2003 weergeeft. Deze richting komt overeen met richting noordoost, tevens te zien in figuur 29. Dit is in overeenstemming met het onderzoek gedaan door Dorst (2009), waarbinnen deze beide datasets ook onderzocht zijn. De migratie van de zandgolven die bekeken worden, lijkt vrij laag te zijn.

Nu zal gekeken worden naar het verschil tussen HY08111-1 (2007) en HY06169 (2006), dit is in figuur 31 te zien.



Figuur 31: Verschil tussen HY08111-1 (2007) en HY06169 (2006) bron: Dienst der Hydrografie (2014).

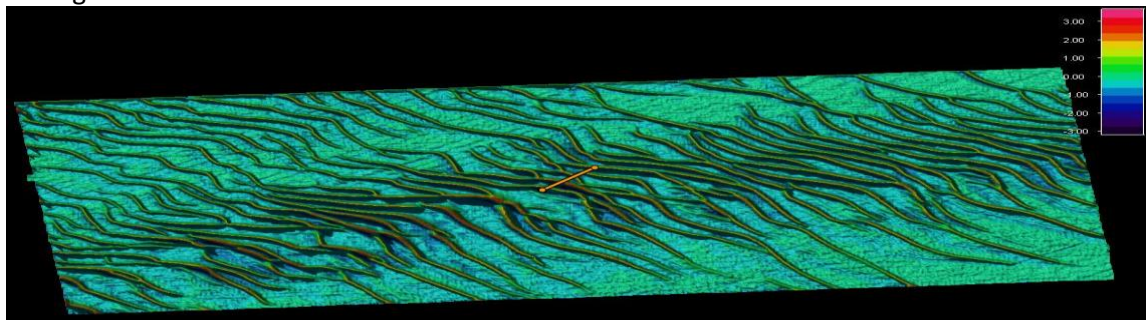
In figuur 31 is een golfpatroon in de verschillen tussen beide datasets te zien. Om een verschil te kunnen analyseren tussen beide datasets, zal de doorsnede gebruikt worden die in figuur 31 met de oranje lijn is aangegeven. De locatie van deze doorsnede is dezelfde als in figuur 29. De doorsnede van beide datasets zijn weergegeven in figuur 32.



Figuur 32: Doorsneden HY08111-1 (2007) boven en HY06169 (2006) onder bron: Dienst der Hydrografie (2014).

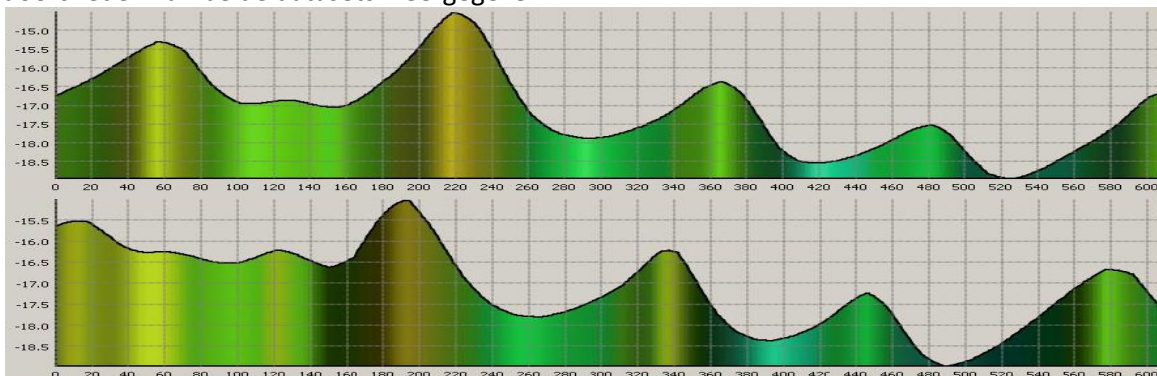
In figuur 32 is te zien dat er een verschil zit tussen de bovenste en onderste doorsnede, hoewel dit verschil erg klein is. De verklaring hiervoor zou het korte tijdsbestek kunnen zijn. Dit is in overeenstemming met het onderzoek gedaan door Dorst (2009), waaruit naar voren is gekomen dat hetzelfde gebied migratiesnelheden tot 4.2 meter per jaar kende.

Van hetzelfde gebied is de meting HY11324 (2012) gemaakt, deze zal vergeleken worden met de meting daarvoor HY08111-1 (2007). Wederom is in figuur 33 de verschil DTM weergegeven van beide metingen.



Figuur 33: Verschil tussen HY11324 (2012) en HY08111-1 (2007) bron: Dienst der Hydrografie (2014)

In figuur 33 is een duidelijk zandgolfpatroon te herkennen. Om voor het verschil een verklaring te zoeken, zal een doorsnede bekeken worden voor beide datasets. De oranje lijn wordt hiervoor gebruikt. De locatie van de doorsnede is wederom dezelfde als in figuur 31 en 29. In figuur 34 zijn de doorsneden van beide datasets weergegeven.



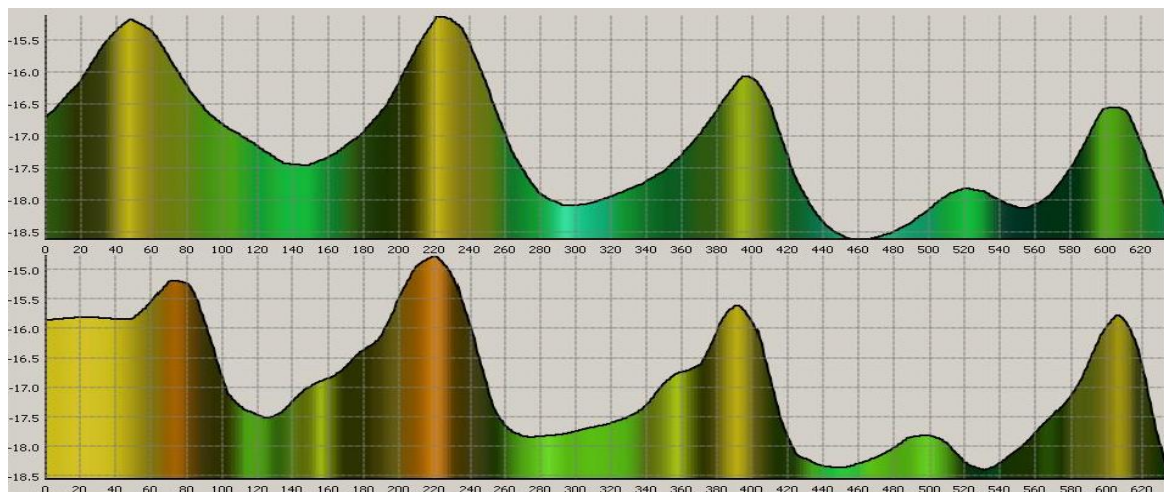
Figuur 34: Doorsneden HY11324 (2012) boven en HY08111-1 (2007) onder bron: Dienst der Hydrografie (2014).

In figuur 34 is duidelijk te zien dat er een verandering heeft plaatsgevonden in de jaren 2007 tot 2012. Met name wanneer de tweede piek bekeken wordt, is duidelijk te zien dat er een grote verplaatsing is tussen 2012 boven en 2007 onder. Wat tevens opvalt, is dat de hoogte van de zandgolven eigenlijk vrijwel gelijk blijft.

6.1.5 Analyse voor het zuidelijke deel

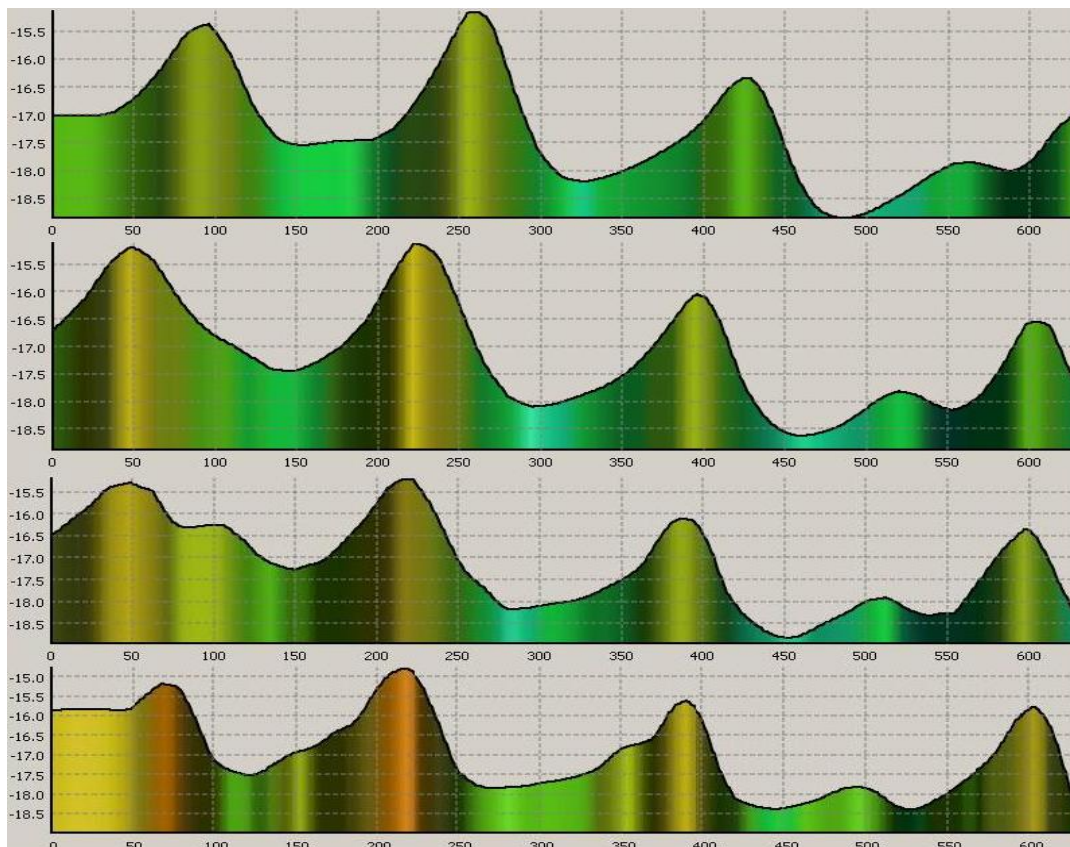
Op het eerste gezicht lijkt de migratie tussen 2012 en 2007 aanzienlijk groter te zijn dan de migratie die eerder beschreven is voor de periode 2003-2006 en 2006-2007. Dit verschil in veranderingen zou verklaard kunnen worden door de periode waarbinnen de veranderingen hebben plaatsgevonden. 5 Jaar is langer dan 3, of 1 jaar. Om te onderzoeken of de migratie de afgelopen jaren daadwerkelijk is toegenomen ten opzichte van eerdere jaren, is het daarom nodig om te kijken wat de veranderingen tussen 2003 en 2007 zijn geweest. Hoewel de veranderingen hierin niet direct te vergelijken zijn met de veranderingen tussen 2012 en 2007, kan er echter wel een inschatting gemaakt worden.

In figuur 35 is voor de datasets van 2003 en 2007 dezelfde doorsnede gemaakt, op dezelfde locatie als figuur 33, 31 en 29.



Figuur 35: Doorsnede dataset HY08111-1 (2007) boven en HY02144 (2003) onder bron: Dienst der Hydrografie (2014).

Zoals in figuur 35 te zien, is er wel degelijk migratie in het gebied. Wederom is deze migratie in richting noordoost, zoals overeenkomt met het onderzoek uitgevoerd door Dorst (2009). De migratie over de periode van 4 jaar lijkt uit deze doorsneden laag te zijn, zeker wanneer deze vergeleken wordt met de periode van 2012 t/m 2007. Om een inschatting te kunnen geven hoe dit werkelijk zit, zal in figuur 36 een vergelijking worden gemaakt tussen de doorsneden van 2012, 2007, 2006 en 2003. Hierbij dient rekening gehouden te worden met de interpolatie effecten van de SBES meting in het jaar 2003. Dit zou een afwijking kunnen veroorzaken, waardoor het verschil tussen de jaren 2007 en 2003 een minder regelmatig patroon zou kunnen weergeven dan het verschil tussen 2012 en 2007.



Figuur 36: Doorsneden boven naar beneden: HY11324 (2012) HY08111-1 (2007), HY06169 (2006), HY02144 (2003) bron: Dienst der Hydrografie (2014).

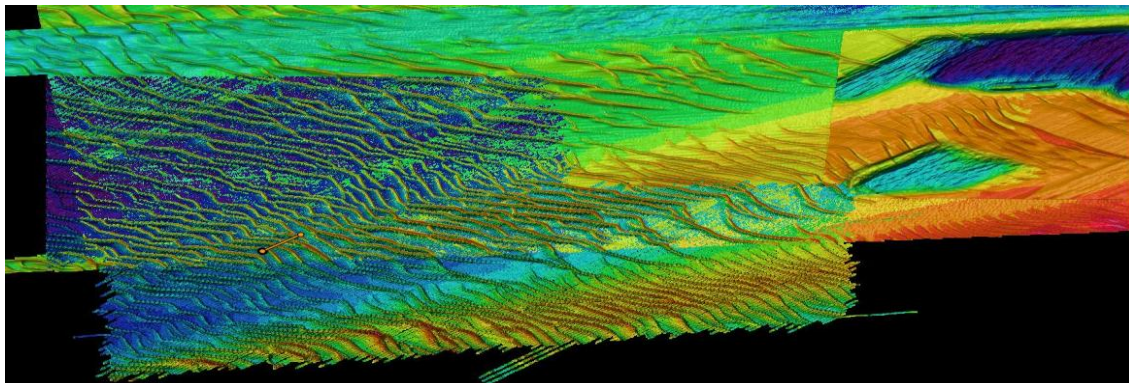
Zoals in figuur 36 te zien is, lijkt er een verschil aanwezig te zijn in bodemligging tussen 2012 en de overige jaren. Waar te zien is dat tussen 2003 en 2007 een lichte verandering in het bodempatroon aanwezig is, verandert de bodem in 2012 sterk ten opzichte van 2007. Een visuele vergelijking toont aan dat de migratie voor de hoogste zandgolf in de doorsneden tussen 2012 en 2007 circa 35 meter is, terwijl dit verschil tussen 2007 en 2003 slechts 15 meter is.

Dit verschil kan men op verschillende manieren verklaren. Allereerst wordt tussen 2007 en 2012 over een periode van 5 jaar gemeten, terwijl dit tussen 2003 en 2007 slechts 4 jaar is, waardoor een verschil in verandering op kan treden. Ook is het zo dat de dataset van 2003 opgemeten is door middel van singlebeam echosounders (SBES). Deze singlebeam echosounders nemen puntmetingen van de bodem van de Noordzee. Om van deze singlebeam metingen een complete dataset op te stellen, zijn deze metingen geïnterpoleerd om het gehele gebied te beschrijven. Hier zit dus een onzekerheid in, waardoor er een verschil mogelijk is in verandering doordat de dieptes minder nauwkeurig zijn dan de dieptes van de overige datasets die gemeten zijn met multibeam echosounders (MBES).

Naast deze onzekerheden, lijkt er echter ook een toename in migratie aanwezig te zijn in het gebied. Dit is tevens zo, wanneer het onderzoek gedaan door Dorst (2009) wordt bekeken. Hierin komt naar voren dat hetzelfde gebied een migratiesnelheid van circa 4.2 meter per jaar had, tussen 1994 en 2006. Deze migratiesnelheid komt overeen met de periode van 2003 tot 2007, maar de periode van 2012 en 2007 heeft voor deze locatie een migratiesnelheid tot wel 7 meter per jaar, wanneer deze visueel ingeschat wordt. De gebieden die geanalyseerd zijn bevinden zich op een grote afstand van de zandwinputten. Hierdoor is het onwaarschijnlijk dat de toename in migratie toe te schrijven valt aan de aangelegde zandwinputten.

6.1.6 Verschillen en analyse voor het noordelijke deel ver van de zandwinputten

Om te kijken of deze toename in migratie ook in andere datasets waar te nemen is, is gekeken naar de verschillen tussen datasets HY12111 (2012), HY08111 (2007 t/m 2009) en HY02144 (2003). Een overzicht van deze gebieden is in figuur 37 te zien. De doorsnede die gemaakt zal worden van de gebieden om ze te kunnen vergelijken is te zien aan de oranje lijn. Deze doorsnede zal zich even ver van de zandwinput bevinden als de doorsnede die gemaakt is voor de datasets HY02144 (2003), HY06169 (2006), HY08111-1 (2007) en HY11324 (2012), om er zeker van te zijn dat beide gebieden een even grote invloed zullen hebben van de zandwinputten, mocht deze er zijn.

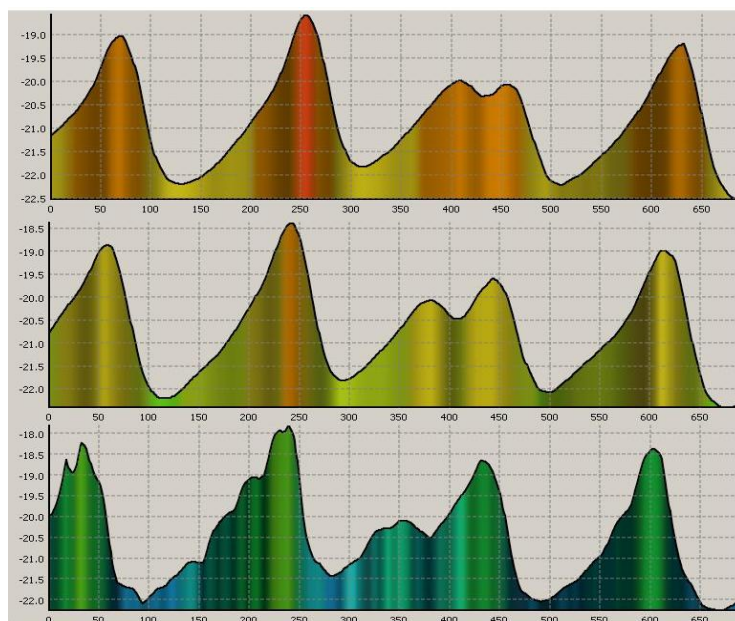


Figuur 37: Overzicht HY02144 (2003), HY08111 (2007 t/m 2009) en HY12111 (2012) bron: Dienst der Hydrografie (2014).

Om te kijken naar de migratie van de 3 datasets, zullen de doorsneden van de datasets boven elkaar worden gezet, om een inschatting te kunnen geven van de veranderingen in migratie. Dit is in figuur 38 te zien, waarin van boven naar beneden de doorsneden van HY12111 (2012), HY08111 (2008) en HY02144 (2003) te zien zijn.

Zoals in figuur 38 te zien is, lijkt er zich bij de gekozen doorsnede in de laatste jaren een toename migratie voor te doen, zoals ook het geval is bij het zuidelijke deel. Dit is met name het geval wanneer de zandgolven visueel met elkaar vergeleken worden.

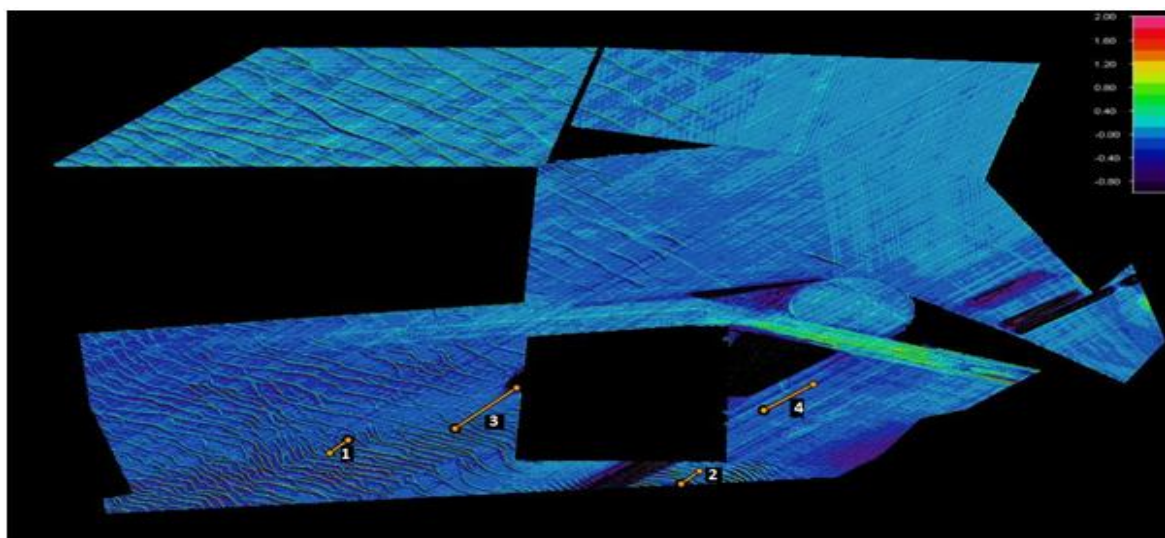
Hier dient opgemerkt te worden dat de dataset van het jaar 2003 een grotere onzekerheid zal hebben door de aangegeven interpolatie effecten, dit zou een verschil kunnen veroorzaken tussen de dataset van 2003 en de overige datasets. Wanneer gekeken wordt naar de verschillen in migratie tussen 2003 en 2008 en 2008 en 2012, lijkt deze in de laatste jaren toegenomen te zijn. Het absolute verschil in migratie tussen de jaren 2003 en 2008 en 2008 en 2012 lijkt kleiner te zijn dan het geval is bij het zuidelijke deel. Wanneer echter visueel een vergelijking wordt gemaakt in figuur 38, dan is te zien dat de migratie de laatste jaren sterker lijkt te zijn, dan in de jaren 2003 tot 2008, omdat de toppen van de zandgolven in de jaren 2008-2012 sterker zijn verplaatst dan in de periode 2003-2008.



Figuur 38: Doorsneden van boven naar beneden: HY11324 (2012), HY08111(2008) en HY02144 (2003) bron: Dienst der Hydrografie (2014).

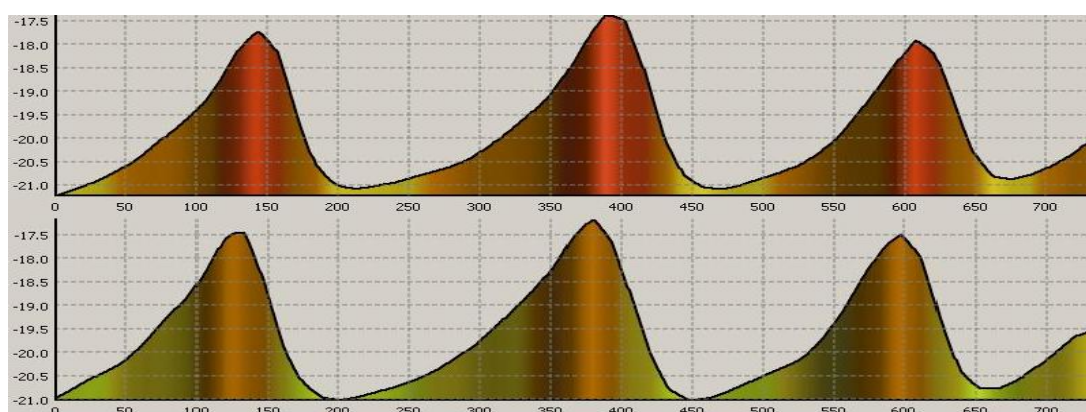
6.1.7 Verschillen en analyse noordelijke deel nabij de zandwinputten

Nu de datasets bekeken zijn over het gebied dat tevens onderzocht is door Dorst (2009), zullen de datasets bekeken worden die een wat groter gebied beschrijven. Hiervoor zullen de datasets HY12111 (2012) en HY08111 (2007 t/m 2009) bekeken worden. Hierbij dient opgemerkt te worden dat dataset HY08111 (2007 t/m 2009) een kleinere dekking heeft dan HY12111 (2012). Hierdoor is het gebied waar de huidige zandwinputten gelegen zijn niet opgenomen in dataset HY08111 (2007 t/m 2009). In onderstaande figuur 39 is het verschil tussen metingen HY12111 (2012) en HY08111 (2007 t/m 2009) te zien. Hierin is in het oranje aangegeven welke doorsneden specifiek bekeken zullen worden. Voor de vergelijking in het vervolg zal aangegeven worden in welk jaar de opmeting HY08111 (2007 t/m 2009) voor dat gebied is gemaakt.



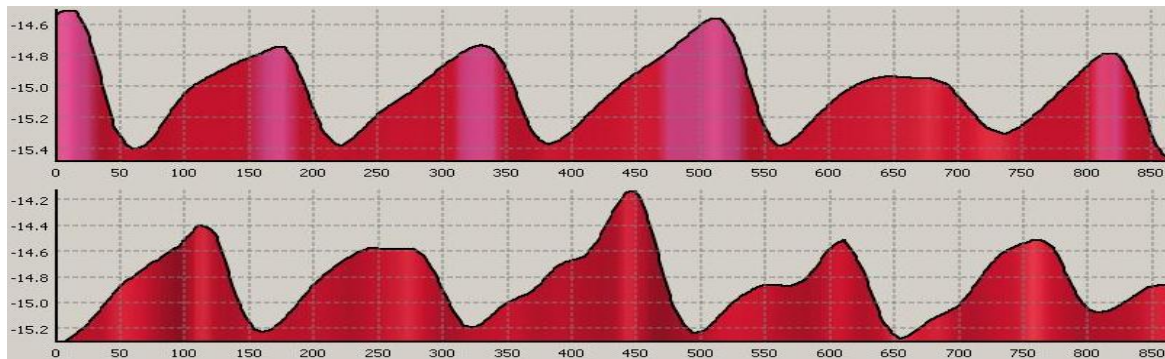
Figuur 39: Verschil DTM tussen HY12111 (2012) en HY08111 (2007 t/m 2009) bron: Dienst der Hydrografie (2014)

Zoals te zien in figuur 39, zullen vier doorsneden bekeken worden. Deze doorsneden zijn om twee redenen gekozen. Ten eerste vertonen doorsneden 1 en 2 de grootste verschillen tussen de beide datasets. Hierdoor is het interessant om deze gebieden nader te bekijken, omdat er een sterkere verandering heeft plaatsgevonden dan in de overige gebieden van de datasets. Daarnaast is in hoofdstuk 5 te zien dat ter hoogte van doorsneden 3 en 4 een erosie danwel aanzanding verwacht wordt, hierom zullen deze doorsneden ook van belang zijn. Er zijn daarnaast ook enkele paarse gebieden aanwezig, die de vorm van geulen hebben en een sterke verandering aangeven, vanwege hun paarse kleur. In deze gebieden is het bekend dat zand gewonnen wordt, zoals te zien is in bijlage 4 figuur 56. Allereerst zal gekeken worden naar de doorsneden van beide datasets voor locatie 1 (figuur 40), waarna vervolgens de doorsneden voor locatie 2 bekeken zal worden (figuur 41).



Figuur 40: Doorsneden op locatie 1 voor HY12111 (2012) boven en HY08111 (2008) onder bron: Dienst der Hydrografie (2014).

In figuur 40 is te zien dat in vergelijking met 2008, de bodem op locatie 1 lichtelijk gemigreerd lijkt te zijn in 2012. De richting van deze migratie is wederom noordoost en lijkt overeenkomstig te zijn met de migratiesnelheden gevonden in het onderzoek door Dorst (2009). Daarnaast lijkt de doorsnede in het jaar 2012 dieper te liggen dan in 2008.

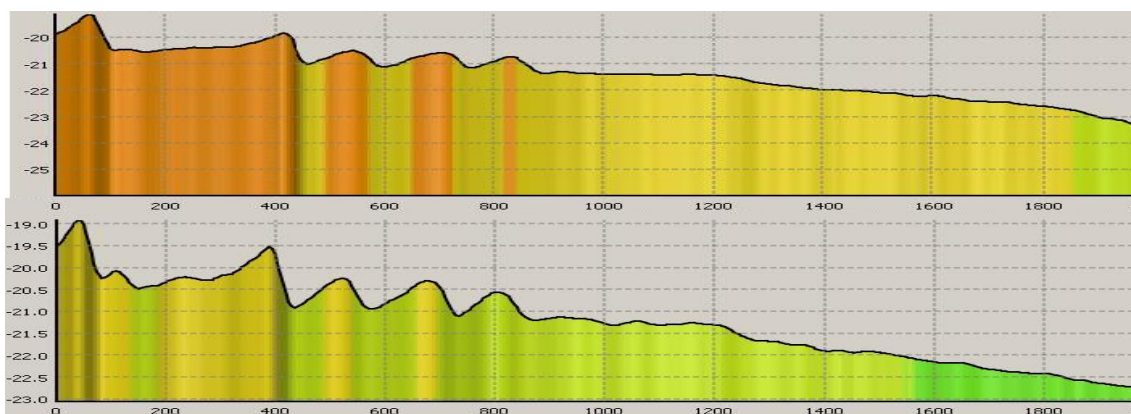


Figuur 41: Doorsneden op locatie 2 voor HY12111 (2012) boven en HY08111 (2008) onder bron: Dienst der Hydrografie (2014).

In figuur 41 is het resultaat van de doorsnede te zien voor het jaar 2012 en 2008 voor locatie 2. Hierin is te zien dat het patroon dat zich voordoet erg veranderlijk lijkt te zijn. Het is daarom niet duidelijk, of in het jaar 2012 naar dezelfde zandgolf gekeken wordt, als het geval is in 2008, hoewel de vormen van de zandgolven dit wel degelijk doen vermoeden. Mocht het echter zo zijn dat in figuur 41 dezelfde zandgolven te zien zijn voor de doorsnede van 2012 als die van 2008, dan kan men concluderen dat de migratie erg sterk lijkt te zijn, vooral wanneer deze vergeleken wordt met figuur 40. De migratie in figuur 41 lijkt namelijk een stuk hoger te zijn dan de migratiesnelheden die gevonden zijn in het onderzoek door Dorst (2009).

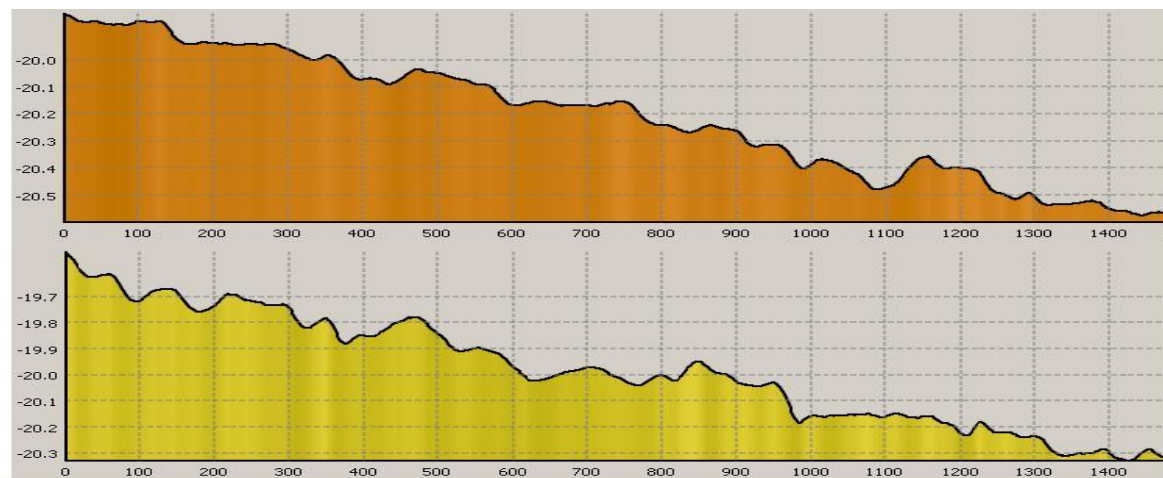
Daarnaast is het opvallend dat in figuur 41 te zien is dat de doorsnede voor 2012 een minder diep patroon weergeeft dan de doorsnede in 2008, het lijkt hierbij dus dat het gebied minder diep is geworden.

De oorzaak voor het verschil in migratie tussen locaties 1 en 2 zou op verschillende manieren te verklaren kunnen zijn. Uit het onderzoek door Dorst (2009) naar een gebied ten zuidwesten van het gebied dat in 39 getoond wordt, is gebleken dat een afname in bodemdiepte in dat specifieke gebied een toename in migratiesnelheid met zich meebrengt. Dit zou (een deel van) het verschil kunnen verklaren tussen de veranderingen op locatie 1 en locatie 2. Een andere verklaring zou de aanwezigheid van de aangelegde zandwinputten kunnen zijn. Wanneer de doorsnede op locatie 2 bekeken wordt, is duidelijk dat deze zich erg kort bij de aangelegde zandwinputten bevindt. Omdat men in de jaren 2009 en 2010 een enorme hoeveelheid zand (169Mm^3) heeft onttrokken aan het gebied (Stolk & Dijkshoorn, 2009), zou het mogelijk zijn dat de winning van zand een verstoord stromingspatroon heeft gegeven in een gebied eromheen, waardoor het mogelijk zou zijn dat de zandgolven aanwezig dichtbij locatie 2 een sterke migratie hebben doorgemaakt.



Figuur 42: Doorsneden dataset HY12111 (2012) boven en HY08111 (2008) onder voor doorsnede 3 bron: Dienst der Hydrografie (2014)

Nu de doorsneden op locatie 1 en 2 bekeken zijn, zullen om een vergelijking mogelijk te maken tussen de datasets in 2012 en 2008 de doorsneden op locatie 3 en 4 bekeken worden. Om dit te doen, is in figuur 42 de doorsnede van locatie 3 gegeven en is in figuur 43 de doorsnede van locatie 4 gegeven voor beide datasets.



Figuur 43: Doorsneden dataset HY12111 (2012) boven en HY08111 (2008) onder voor doorsnede 4 bron: Dienst der Hydrografie (2014)

In figuur 42 is te zien dat er geen sprake is van een duidelijk zandgolfpatroon, maar dat het gebied in 2012 dieper lijkt te liggen dan in 2008. Deze verdieping zou veroorzaakt kunnen zijn door zowel sedimenttransport, als de afgravingen die gedaan zijn om de zandwinputten te creëren. Ook zou het mogelijk zijn dat dit diepteververschil te wijten valt aan onzekerheden in de metingen van het gebied. In figuur 43 is de doorsnede van de locatie 4 weergegeven. Hierbij is te zien dat de doorsnede in 2012 lager lijkt te liggen dan in 2008. Dit zou wederom veroorzaakt kunnen zijn door sediment transport, maar ook door de afgravingen die gedaan zijn, of onzekerheden in de metingen.

Naast de waarnemingen op locaties 1 t/m 4 is uit de verschillen tussen 2008 en 2012 te zien dat de Euromaasgeul een aanzanding heeft doorgemaakt. Deze aanzanding is echter dusdanig klein, dat deze veroorzaakt zou kunnen zijn door een verschil in onderhoud tijdens de opnamen van de datasets of door meetonzekerheid in de datasets. De aanzanding die waargenomen wordt zal hierom verklaard kunnen worden door meetonzekerheden, natuurlijke processen, of aanzanding ten gevolge van de aangelegde zandwinputten.

6.1.8 Conclusie

Uit de analyse van de verschillende datasets die gemeten zijn door zowel Rijkswaterstaat als de Dienst der Hydrografie is gebleken dat de verandering in de dieptes in de zuidelijke datasets met de jaren toegenomen lijkt te zijn. De datasets in de jaren 2007 en 2012 vertonen voor het zuidelijke deel een grotere verandering dan de datasets in de jaren 2003 en 2007. Wanneer een visuele vergelijking plaatsvindt, is deze verandering factor 2 tot factor 2.5 groter voor de jaren 2007 tot 2012, dan voor 2003 tot 2007. Vandaar dat geconcludeerd wordt dat voor het zuidelijke deel van het gebied in de jaren 2007 tot 2012 er een toename in migratie heeft plaatsgevonden.

Daarnaast is er gekeken naar de doorsneden van de noordelijke datasets. Deze doorsneden lijken in de jaren 2008 tot 2012 ook een toegenomen migratie te hebben doorgemaakt. Hoewel het verschil in migratie kleiner lijkt te zijn dan voor de zuidelijke datasets, lijken de noordelijke datasets een gelijkwaardige trend te vertonen.

De noordelijke en zuidelijke datasets bevinden zich op ruime afstand van de zandwinputten. Het lijkt hierom onwaarschijnlijk dat de toegenomen migratie te wijten valt aan de aangelegde zandwinputten. Omdat beide locaties echter gelijkwaardige trends vertonen en zich op gelijke

afstand van de zandwinputten bevinden, zou de oorzaak gezocht kunnen worden in de toegenomen aanwezigheid van stormen in de jaren 2007 tot 2012. Uit de gegevens van het KNMI blijkt namelijk dat er in het jaar 2007 een zware storm heeft plaatsgevonden, terwijl dit in de jaren 2003 t/m 2006 niet het geval is geweest. Hoewel gegevens over de jaren 2008 tot 2012 aanduiden dat er geen zware stormen zijn geweest (windsnelheden >24.5 m/s), zijn er in deze jaren wel windsnelheden boven de 20 m/s waargenomen. Om in te schatten of de stormen werkelijk de oorzaak zijn, zal een analyse van stormdata gemaakt kunnen worden. Dit is omwille van tijd in dit onderzoek niet gedaan.

Voor de vergelijking tussen noordelijke datasets rondom de zandwinputten zijn verschillende resultaten voor de verschillende doorsneden gevonden. Op locatie 1 lijkt de migratie die zich voor heeft gedaan geen bijzondere trend te vertonen. De migratie lijkt gelijk te zijn aan de hoeveelheid migratie die verwacht wordt in het gebied ten zuidwesten hiervan. Wel lijkt de doorsnede dieper te zijn geworden in de periode 2008 tot 2012. Op locatie 2 is een verschil tussen beide datasets gevonden. Ten eerste lijkt het zo te zijn dat de bodem hier erg dynamisch is, waardoor het onzeker is of dezelfde zandgolven in beide doorsneden worden waargenomen, hoewel de golflengte van de waargenomen zandgolven dit wel degelijk doet vermoeden. Wanneer dezelfde zandgolven in beide doorsneden gevonden worden dan kan geconcludeerd worden dat de migratie in deze doorsnede sterk is geweest. Daarnaast lijkt het zo te zijn dat de dieptes de afgelopen jaren zijn afgenomen in de doorsnede 2, wat een aanzanding van dit gebied kan aantonen. Voor de locaties 3 en 4 zijn uit de doorsneden naar voren gekomen dat op beide locaties de dieptes zijn toegenomen.

6.2 Is er een mogelijkheid tot het herstel van bodemvormen in de zandwinputten?

6.2.1 Beschikbare gegevens

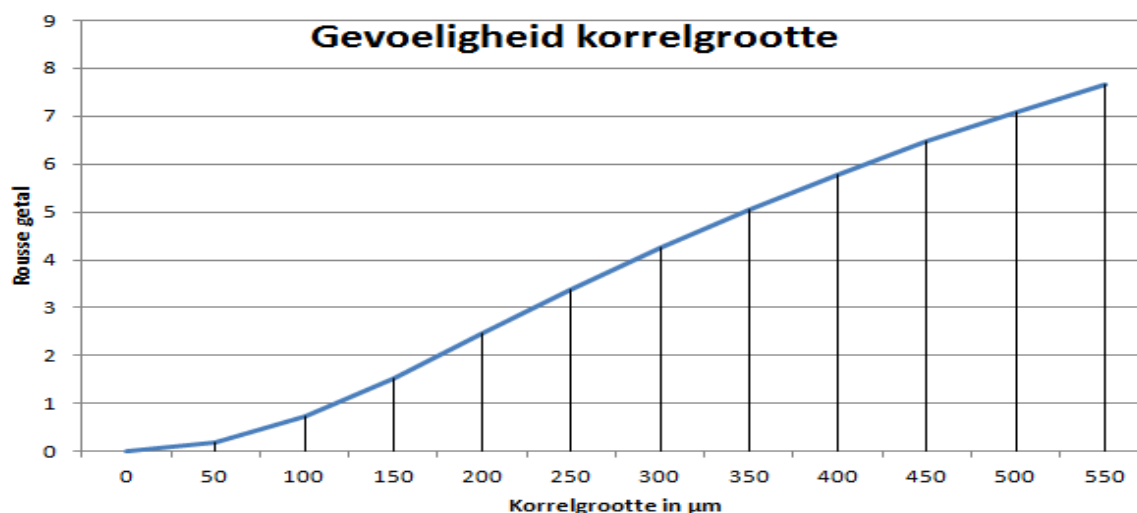
Er zijn voor de inschatting voor het herstel van bodemvormen in de zandwinputten een aantal gegevens verzameld. Allereerst zullen de waterdieptes ter hoogte van de zandwinputten, zoals gemeten door de Dienst der Hydrografie gebruikt worden. Daarnaast zijn dieptegemiddelde stroomsnelheden van belang, deze zullen gebruikt worden uit het onderzoek gedaan door Borsje et al. (2009b). Ook is de grootte van het sediment binnen de zandwinputten van belang. Deze sedimentgroottes zijn afkomstig van het Havenbedrijf Rotterdam en zijn gemeten in het jaar 2013. Door gebruik te maken van deze gegevens, zal een inschatting gegeven kunnen worden van het herstel van bodemvormen in de zandwinputten.

6.2.2 Analyse

De analyse die uitgevoerd wordt, richt zich op twee zaken. Ten eerste zal gekeken worden naar de kritieke Shields (θ_{cr}) parameter en de optredende Shields (θ) parameter (dimensieloos). De kritieke Shields parameter beschrijft namelijk de voorwaarde voor het optreden van sedimenttransport over de bodem. Voor het ontstaan van bodemvormen, zal dit een voorwaarde moeten zijn. Dit betekent dat bodemvormen alleen ontstaan als de optredende Shields parameter groter is dan de kritieke Shields parameter. De formule voor de optredende Shields parameter is terug te vinden in bijlage 5, vergelijkingen 1 t/m 4. De kritieke Shields parameter wordt beschreven in vergelijkingen 5 t/m 10. Naast de voorwaarde die voortkomt uit de Shields parameter, is uit onderzoek gebleken dat er nog een tweede voorwaarde is. Deze voorwaarde beschrijft het soort transport dat optreedt. Er is namelijk gesuspendeerd sedimenttransport en sedimenttransport over de bodem. Om in te schatten welk soort sedimenttransport plaatsvindt, is de zogenaamde Rouse (P) parameter (dimensieloos) ingevoerd. Voor $P < 1.2$ geldt gesuspendeerd sedimenttransport, voor $1.2 < P < 2.5$ geldt een tussenfase waarin zowel gesuspendeerd sedimenttransport als sedimenttransport over de bodem plaatsvindt en voor $P > 2.5$ geldt dat er slechts sedimenttransport over de bodem plaatsvindt. Uit het onderzoek gedaan door Borsje et al. (2014), is gebleken dat voor het ontstaan van bodemvormen, een algemene voorwaarde is dat het Rouse getal groter zal moeten zijn dan 1.9. De vergelijkingen voor het Rouse getal zijn tevens terug te vinden in bijlage 5, in vergelijkingen 11 en 12.

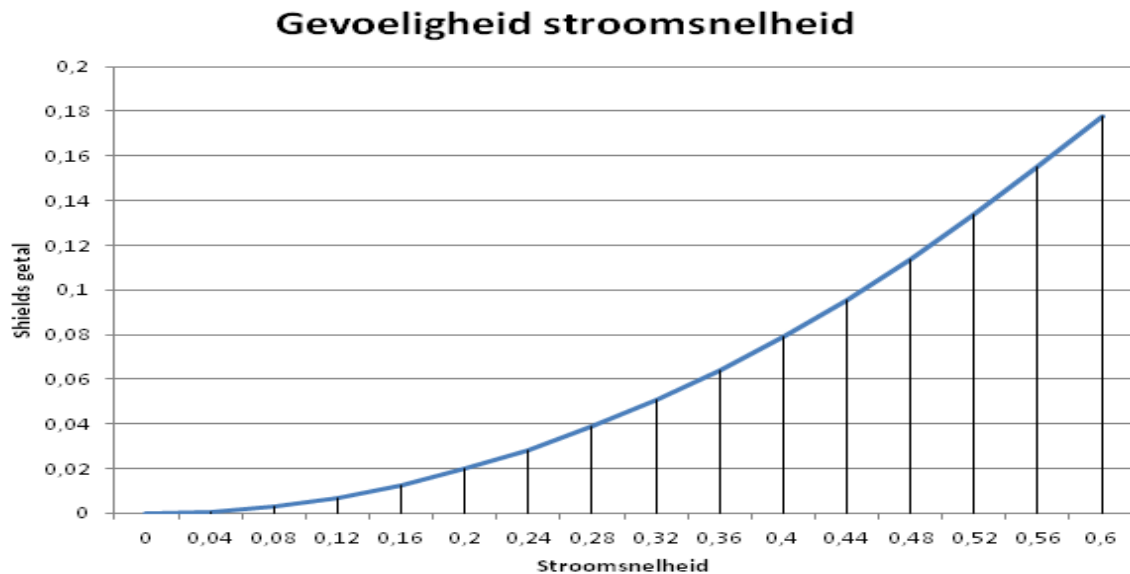
Uit de beschreven vergelijkingen zal nu een inschatting gegeven kunnen worden over de mogelijkheid tot het ontstaan van bodemvormen. Allereerst is de sedimentgrootte van grote invloed op de mogelijkheid tot het ontstaan van deze bodemvormen. De sedimentgroottes binnen de diepe zandwinput zijn in 2013 na afronding van de zandwinning op 5 locaties gemeten en liggen afhankelijk van de locatie binnen de zandwinput tussen de 290 en 305 μm (Havenbedrijf Rotterdam, 2013). De waterdieptes zijn gemeten door de Dienst der Hydrografie en zullen voor de diepe zandwinput tussen de -36 en -43 meter LAT liggen. De stroomsnelheden binnen de zandwinput zullen tussen de 0.4 en 0.6 m/s liggen (Borsje et al., 2009b). Op basis van deze parameters zal een gevoeligheidsanalyse gemaakt worden, waarin de parameter die onderzocht wordt gevarieerd wordt, terwijl de overige parameters gemiddelde waarden aan zullen nemen. Op deze manier zal enerzijds gekeken kunnen worden naar de parameters die een grote invloed hebben op het ontstaan van zandgolven en anderzijds zal gekeken worden welke voorwaarden voor stroomsnelheid, waterdiepte en korrelgrootte aanwezig zijn voor het ontstaan van zandgolven in de diepe zandwinput.

Allereerst zal het van belang zijn om de voorwaarden te specificeren voor het ontstaan van de zandgolven. Zoals reeds verklaard zullen dit het Rouse getal en de Shields parameter zijn. Het Rouse getal zal te allen tijde groter moeten zijn dan 1.9, terwijl de Shields parameters afhankelijk zijn van de korrelgroottes.



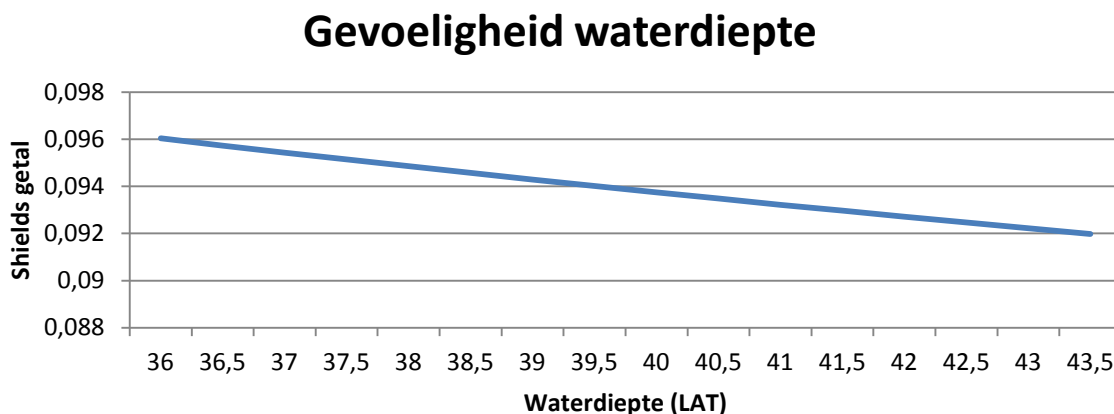
Figuur 44: Gevoeligheid Rouse getal van de korrelgroottes

In figuur 44 is de gevoeligheid van de korrelgroottes weergegeven. Allereerst dient hierbij opgemerkt te worden dat de optredende Shields parameter voor de waarden van korrelgroottes groter dan 0 μm en kleiner dan 1050 μm groter is dan de kritieke Shields parameter. Omdat korrelgroottes op zee geen 1050 μm bereiken, zal het Rouse getal hier de voorwaarde aangeven. In bovenstaande figuur is te zien hoe dit Rouse getal zich ontwikkelt onder invloed van een groter wordende korrelgrootte. Omdat het Rouse getal groter moet zijn dan 1.9, zal de korrelgrootte ten minste 170 μm moeten zijn. De metingen gedaan door Havenbedrijf Rotterdam in het jaar 2013, gaven korrelgroottes aan tussen de 290 en 305 μm . Dit betekent dat aan de voorwaarde voor de korrelgroottes voldaan wordt. Hierbij dient opgemerkt te worden dat ook het slibgehalte van belang zal zijn voor het voorkomen van zandgolven. Een te hoog slibgehalte zal dit kunnen voorkomen.



Figuur 45: Gevoeligheid Shields getal van de stroomsnelheid

In figuur 45 is de gevoeligheid van het Shields getal van de stroomsnelheid aangegeven. Het Rouse getal geeft voor de stroomsnelheid als voorwaarde dat deze maximaal 1.12 m/s kan zijn, dit is iets dat niet voor zal komen op de gegeven locatie, vandaar dat het Shields getal bekeken zal worden. In figuur 45 is de relatie tussen het Shields getal en de stroomsnelheid weergegeven. Hierbij is de optredende kritieke Shields parameter (θ_{cr}) gelijk aan 0.04. Dit betekent zoals te zien is in figuur 45 dat de stroomsnelheid ten minste 0.29 m/s zal moeten zijn. De stroomsnelheid voor deze locatie wordt ingeschat op 0.4 tot 0.6 m/s. Dit betekent dat wat betreft de stroomsnelheid aan de voorwaarde voor de mogelijkheid tot het ontstaan van bodemvormen in de diepe zandwininput is voldaan.



Figuur 46: Gevoeligheid Shields getal van waterdiepte

In figuur 46 is te zien wat de gevoeligheid van het Shields getal is van de waterdiepte. Hierbij is de waterdiepte verwerkt in de Chézy (ruwheid) coëfficiënt, die in bijlage 5 in vergelijking nummer 12 te zien is. De Chézy coëfficiënt is hier dus afhankelijk gemaakt van de waterdiepte om zodoende de gevoeligheid van de Shields parameter voor de waterdiepte uit te rekenen. Hierbij heeft het kritieke Shields getal (θ_{cr}) een waarde van 0.04. Te zien in figuur 46, is dat voor alle waarden van de waterdiepte het optredende Shields getal groot genoeg is. Daarnaast is de maximale waterdiepte waarvoor aan het Rouse getal voldaan wordt 65 meter. Dit betekent dat aan de voorwaarde wat betreft waterdieptes voor de mogelijkheid tot het ontstaan van bodemvormen voldaan wordt.

Samenvattend is in tabel 9 weergegeven welke voorwaarden er zijn ten aanzien van waterdieptes, stroomsnelheden en korrelgroottes en welke waarden de parameters binnen de noordelijke zandwinput hebben.

Tabel 9: Voorwaarden voor het ontstaan van bodemvormen in de noordelijke zandwinput en waarden in het gebied

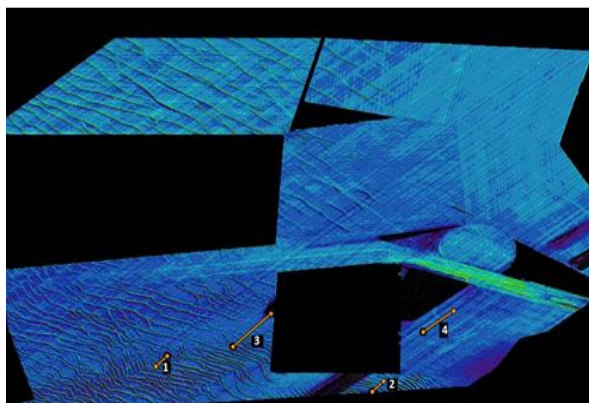
Voorwaarde	Minimale waarde	Maximale waarde	Waarde in het gebied
Waterdiepte	n.v.t.	65 meter	36 tot 43 meter
Stroomsnelheid	0.29 m/s	1.12 m/s	0.4 tot 0.6 m/s
Korrelgrootte	170 μm	1050 μm	290 tot 305 μm

6.2.3 Conclusie

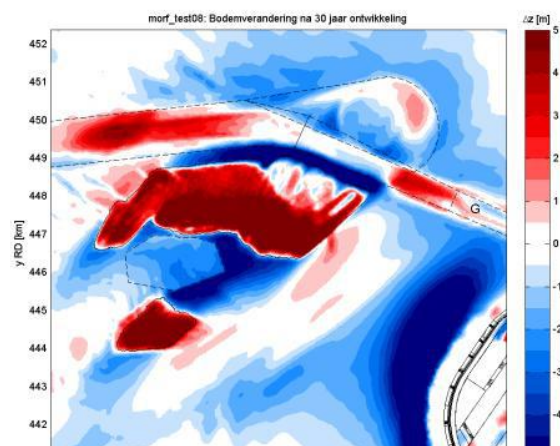
De waardes voor de verschillende parameters in de noordelijke zandwinput vallen binnen de voorwaarden die uit de literatuur naar voren komen voor het ontstaan van bodemvormen. Het zou hierom binnen de gestelde voorwaarden mogelijk kunnen zijn dat er zich bodemvormen voordoen in de noordelijke zandwinput, mits het slibgehalte niet te hoog zal zijn. Het voorkomen van bodemvormen is echter een complex proces, waarbinnen zich andere voorwaarden voor kunnen doen. Het is daarom niet met zekerheid te zeggen dat de bodemvormen zich daadwerkelijk zullen herstellen in de zandwinput.

7 Koppeling data analyse en inschatting effecten zandwinputten

Voor de koppeling tussen de data analyse en de inschatting van de effecten van de zandwinputten, zal allereerst gekeken worden naar hoe de waargenomen bodemveranderingen zich verhouden tot de vervorming van de zandwinputten en het gebied in de toekomst. Om dit te doen, zal gekeken worden naar de resultaten van de doorsneden 1 t/m 4 voor de datasets HY12111 (2012) en HY08111 (2008). Deze resultaten worden vergeleken met de inschattingen die gemaakt zijn door Svašek Hydraulics voor de aanzanding van het gebied. In figuur 48 is de aanzanding die voorspeld is door Svašek Hydraulics voor de komende 30 jaar weergegeven. Daarnaast is in figuur 47 het overzicht van de doorsneden weergegeven die gemaakt zijn voor datasets HY12111 (2012) en HY08111 (2008).

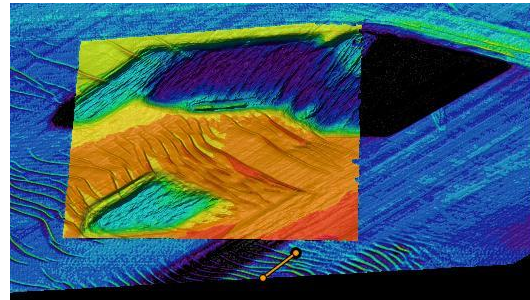


Figuur 47: Overzicht doorsneden HY12111 (2012) en HY08111 (2008) bron: Dienst der Hydrografie (2014).

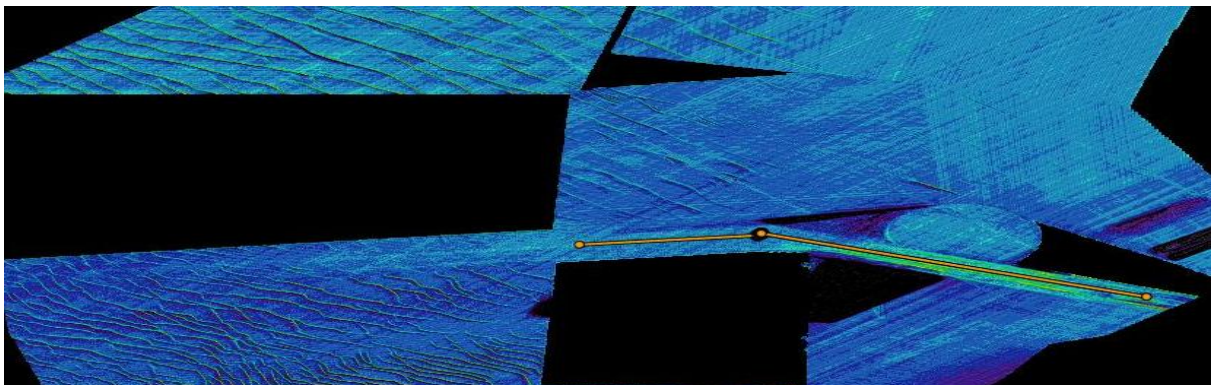


Figuur 48: Gemodelleerde bodemverandering na 30 jaar bron: Klein & Van Den Boomgaard (2013).

Uit de doorsneden in figuur 47 is gebleken dat de doorsneden 3 en 4 dieper lijken te zijn geworden in de periode 2008 tot 2012, terwijl doorsnede 2 juist minder diep lijkt te zijn geworden. Wanneer deze waarnemingen vergeleken worden met de voorspellingen in figuur 48, dan is te zien dat de gedragingen in doorsnede 3 overeenkomen met hetgeen dat gemodelleerd is door Svašek Hydraulics. Dit gebied lijkt zowel in de metingen als in de voorspellingen een erosie te vertonen. Doorsnede 4, lijkt echter een tegenover gesteld beeld van hetgeen dat verwacht wordt door Svašek Hydraulics te geven. Waar de voorspelling is dat dit gebied zal aanzanden, lijkt uit de metingen dat dit in de periode 2008 tot 2012 niet het geval is geweest en dat de doorsnede juist dieper is geworden. De locatie van doorsnede 2 is moeilijk te zien in figuren 47 en 48. Daarom is in figuur 49 te zien waar deze doorsnede zich bevindt. Wat te zien is in figuur 49, is dat locatie 2 zich ten zuidoosten van de zuidelijke zandwinput bevindt. Svašek Hydraulics heeft hiervoor de inschatting geplaatst dat dit gebied aan zal zanden. Dit is in overeenstemming met hetgeen dat gevonden lijkt te zijn in de vergelijking tussen de dataset in 2008 en 2012, hieruit lijkt de doorsnede 2 minder diep te zijn geworden. Vanwege de mogelijke onzekerheden in de meting is dus niet met alle zekerheid te zeggen of de waarneming en de voorspelling overeenkomen.



Figuur 49: Locatie doorsnede 2 ten opzichte van de zandwinputten bron: Dienst der Hydrografie (2014).

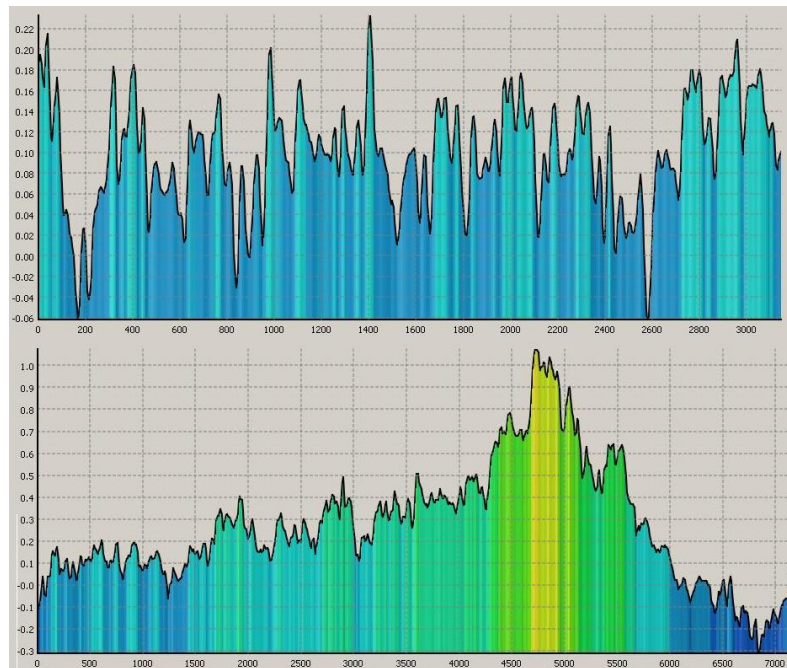


Figuur 50: Overzicht doorsneden Euro- en Maasgeul bron: Dienst der Hydrografie (2014).

Naast deze doorsneden bevindt locatie 1 zich buiten het gebied waarvoor een beïnvloeding verwacht wordt door Svašek Hydraulics. De resultaten uit locatie 1 geven een migratie aan die overeen lijkt te komen met de migratiesnelheden gevonden door Dorst (2009) uit het gebied ten zuidwesten van locatie 1. Dit wil echter niet zeggen dat locatie 1 niet beïnvloed wordt door de zandwinputten, dit kan namelijk wel degelijk het geval zijn. Uit de doorsneden in de jaren 2008 en 2012 lijkt deze locatie namelijk dieper te liggen. Dit is echter moeilijk te concluderen, wanneer over een dusdanig kleine doorsnede gekeken wordt. Om in te kunnen schatten of locatie 1 beïnvloed wordt door de zandwinputten, zal in de toekomst gebruik moeten worden gemaakt van nieuwe metingen, om een vergelijking te maken tussen migratiesnelheden en bathymetrische data voor en na de aanleg van de zandwinputten. Naast veranderingen in bodemhoogtes en migratiesnelheden, is het tevens interessant om te kijken naar de veranderingen in de Euro- en Maasgeul. In de data analyse is het verschil tussen de opnemingen in 2012 en 2009 getoond voor de Euro- en Maasgeul. Vanwege de inschatting van de aanzanding van de Euro- en Maasgeul, zal het interessant zijn om de veranderingen in de geulen te vergelijken met wat voorspeld wordt door Svašek Hydraulics. Om dit te doen is allereerst een overzicht van de doorsneden gegeven van het verschil tussen 2012 en 2009 voor zowel de Euro- als de Maasgeul. Hierbij dient opgemerkt te worden dat het verschil wordt

getoond van opnemingen die gemaakt zijn in 2012 en opnemingen die gemaakt zijn in 2009. De doorsneden die gemaakt zijn, zijn weergegeven in figuur 50 en komen overeen met de gebieden die Svašek Hydraulics verwacht die zullen aanzanden.

In figuur 51 is de doorsnede van de verandering tussen 2012 en 2009 voor zowel de Eurogeul (boven) als de Maasgeul (onder) weergegeven. Uit beide doorsneden komt naar voren dat er een aanzanding heeft plaatsgevonden over de jaren 2009 tot 2012. Hierbij dient opgemerkt te worden dat voor beide jaren onbekend is wanneer het onderhoud van beide geulen heeft plaatsgevonden. Daarnaast vindt er ook een natuurlijke aanzanding van beide geulen plaats. Wanneer de bodemverandering ter hoogte van de zandwinputten (figuur 48) vergeleken wordt met de doorsneden in figuur 51, dan is duidelijk te zien dat de aangegeven gebieden met de grootste bodemveranderingen ook in de datasets het meest veranderd zijn. Daarnaast is te zien dat de gebieden waarvan verwacht wordt dat zij de minste verandering doormaken, dit in de werkelijkheid ook doen.



Figuur 51: Overzicht veranderingen tussen 2012 en 2009 voor de Euro- en Maasgeul bron: Dienst der Hydrografie (2014).

8 Conclusies

De verschillende hoofdstukken leiden samen tot een beantwoording van de gestelde onderzoeksvragen. Uit de beantwoording van deze vragen kunnen conclusies getrokken worden.

Allereerst kan geconcludeerd worden dat de zandwinputten zullen aanzanden. Uit zowel de literatuur als de gemaakte modellering door Svašek Hydraulics is gebleken dat de stroomsnelheid ter hoogte van de zandwinputten zal dalen. Naast deze daling in stroomsnelheid ter hoogte van de zandwinputten zullen op andere locaties in het gebied de stroomsnelheden stijgen. De combinatie van beide factoren leiden ertoe dat de zandwinputten zullen aanzanden. De vorm en oriëntatie van de zandwinputten blijkt dusdanig te zijn dat de zandwinputten niet verdiept zullen worden en dat er ook geen migratie van de zandwinput zal zijn. Ook is gebleken dat de hellingen van de zandwinputten zullen vervlakken. De inschatting van Svašek Hydraulics is dat de zandwinputten tussen de 25% en 30% van het afgegraven volume zullen aanzanden over een periode van 30 jaar na de zandwinning. Uit de verschillende vormen van literatuur is gebleken dat de gemodelleerde bodemverandering erg sterk is. Voor de modellering van de bodemveranderingen is echter ook de aangelegde Maasvlakte 2 meegenomen. De inschatting van Svašek Hydraulics lijkt echter in grote mate overeen te komen met de veranderingen die verwacht kunnen worden.

De zandwinputten zullen de stroming in het gebied beïnvloeden, waardoor stroomrichtingen en stroomsnelheden zullen veranderen. Naast aanzanding van de zandwinputten zullen uit deze veranderingen locaties in het gebied zijn die zullen eroderen en locaties die zullen aanzanden. Hetgeen dat ingeschat is door Svašek Hydraulics op dit gebied komt overeen met de kwalitatieve effecten die de verschillende vormen van literatuur stellen. De inschatting is dat de Euro- en Maasgeul langzaam maar zeker zullen aanzanden. Hierbij is er naast natuurlijke aanzanding een toegenomen aanzanding als gevolg van de veranderingen in het gebied. De toegenomen aanzanding is niet toe te schrijven aan de zandwinputten alleen, maar zal ook veroorzaakt kunnen worden door de aangelegde Maasvlakte 2. Deze voorspelde aanzanding van de geulen lijkt ook waargenomen te worden in de opnemingen van de bodem.

De invloed van de zandwinputten op het gebied zal naast erosie of sedimentatie ook kunnen leiden tot veranderingen in de oriëntatie, of het voorkomen van zandgolven in de toekomst. Hiervoor zijn op basis van veranderingen in stroomsnelheden en stroomrichtingen gebieden geselecteerd die in de toekomst kunnen veranderen. De geselecteerde gebieden zijn te lezen in hoofdstuk 5.1 en 5.2. Tabel 10 geeft aan welke gebieden geselecteerd zijn en welke mogelijkheid tot verandering hierbij ontstaat.

Tabel 10: Geselecteerde gebieden en mogelijke veranderingen in de toekomst

Gebied	A	B	C	D	E
	Anti kloksgewijze rotatie stroomrichting, oriëntatie zandgolven zal hierdoor kunnen veranderen.	Anti kloksgewijze rotatie stroomrichting, oriëntatie zandgolven zal hierdoor kunnen veranderen.	Kloksgewijze rotatie stroomrichting, daardoor mogelijk verandering in oriëntatie van zandgolven, in de toekomst mogelijke migratie van zandgolven verder in de Eurogeul (richting de Maasgeul).	Anti kloksgewijze rotatie stroomrichting, daardoor mogelijke verandering in oriëntatie van zandgolven in de toekomst.	Kloksgewijze rotatie stroomrichting, vanwege ontbreken zandgolven geen directe inschatting voor veranderingen in de toekomst.
Gebied	I	II	III	IV	V
	Toename in stroomsnelheid. Hierdoor mogelijk toegenomen migratiesnelheden of afmetingen zandgolven.	Afname in stroomsnelheid. Verwachte sedimentatie.	Toename in stroomsnelheid. Mogelijkheid tot een toename in migratie of het ontstaan van nieuwe zandgolven.	Afname in stroomsnelheid en verwachte sedimentatie.	Toename in stroomsnelheid. Dit zou kunnen leiden tot het ontstaan van zandgolven, of een toenemend sedimenttransport.

De mogelijke veranderingen in het gebied zouden kunnen leiden tot meer onzekerheid van dit gebied in de toekomst.

Binnen het gebied is uit opnemingen gebleken dat er zich een toegenomen migratie van zandgolven heeft voorgedaan in de afgelopen jaren. Deze toename in migratie zou toegeschreven kunnen worden aan de toename in het aantal stormen die hebben plaatsgevonden in de jaren 2008 tot 2012. Ook hebben de opnemingen in het gebied aangetoond dat rondom de zandwinput veranderingen lijken te hebben plaatsgevonden in dieptes. Ter zuidoosten van de zuidelijke zandwinput lijkt er een aanzanding te hebben plaatsgevonden, terwijl ten oosten en westen van de noordelijke zandwinput

erosie lijkt te hebben plaatsgevonden. Deze veranderingen in waargenomen dieptes zouden (ten dele) veroorzaakt kunnen zijn door meetonzekerheden. Voor de locaties dicht bij de zandwinputten is tevens een toename in migratie waargenomen. Dit zou verklaard kunnen worden door de aanwezigheid van de zandwinputten, die een verstoord stromingspatroon als gevolg kunnen hebben. Pijpleidingen en kabels bevinden zich op geruime afstand van de aangelegde zandwinputten. Uit de literatuur komen verschillende inschattingen naar voren van het gebied waarop een zandwinput invloed kan hebben. Vanwege dit gebied waarop de zandwinput van invloed kan zijn en de afstand van de pijpleidingen en kabels tot de zandwinputten, zullen de pijpleidingen en kabels naar alle waarschijnlijkheid niet beïnvloed worden door de zandwinputten. Uit het onderzoek is tevens gebleken dat er een mogelijkheid bestaat dat er zich bodemvormen zullen voordoen in de noordelijke zandwinput.

9 Vooruitblik

Het onderzoek dat is uitgevoerd en de daarbij gevonden conclusies zijn gebaseerd op wetenschappelijke onderzoeken, het rapport gemaakt door ingenieursbureau Svašek Hydraulics en bathymetrische data. Het onderzoek en de conclusies zijn zodoende inschattingen van effecten en geven aan welke mogelijkheden er bestaan binnen de ontwikkelingen van zowel de zandwinputten als het gebied er omheen. Dit wil zeggen dat de conclusies die getrokken worden uit het rapport aangeven wat de mogelijkheden zijn ten aanzien van deze ontwikkelingen.

Om een duidelijke inschatting te kunnen krijgen van de invloeden van de zandwinputten en de gedragingen van het gebied, het herstel van bodemvormen in de zandwinputten, de aanzanding van de geulen en de beïnvloeding van pijpleidingen en kabels zal verder onderzoek noodzakelijk zijn. Dit verdere onderzoek zou een gebaseerd kunnen zijn op een modellering van het gebied, om de optredende effecten in te kunnen schatten. Op deze manier zou de aanzanding van het gebied exact onderzocht kunnen worden, om zodoende een duidelijke inschatting te kunnen geven. Daarnaast zal er in de toekomst gekeken kunnen worden naar nieuwe data. Deze nieuwe data zal vergeleken kunnen worden met de data die in dit onderzoek beschreven wordt, om te onderzoeken hoe de ontwikkeling van het gebied en de zandwinputten verloopt. Daarnaast zou door een analyse van stormdata gekeken kunnen worden of de waargenomen toename in migratie veroorzaakt wordt door stormen, of dat er andere invloeden zijn geweest die dit hebben veroorzaakt.

10 Bibliografie

- Allersma, E., & Ribberink, J. S. (1992). *Zeezandwinning. Analyse van de morfologische effecten van zeezandwinning in het Euro- Maaskanaal*. WL| Delft Hydraulics.
- Besio, G., Blondeaux, P., Brocchini, M., & Vittori, G. (2003). Migrating sand waves. *Ocean Dynamics*, 53, 232-238.
- Besio, G., Blondeaux, P., Brocchini, M., & Vittori, G. (2004). On the modeling of sand wave migration. *Journal of Geophysical Research*, 109, C04018, doi:10.1029/2002JC001622.
- Blondeaux, P. (2001). Mechanics of Coastal Forms. *Annual Reviews Fluid Mechanics*, 33, 339-370.
- Boers, M.; Netherlands Ministry of Transport, Public Works and Water Management, Rijkswaterstaat, North Sea Directorate. (2005). *Effects of a deep sand extraction pit*. Den Haag: Rijkswaterstaat National Institute for Coastal and Marine Management/RIKZ.
- Borsje, B. W., Buijsman, M. C., Besio, G., Hulscher, S. J., Herman, P. M., & Ridderinkhof, H. (2009). *Bio-geomorphological interactions in sandwave migration*.
- Borsje, B. W., De Vries, M. B., Bouma, T. J., Besio, G., Hulscher, S. J., & Herman, P. M. (2009). Modeling bio-geomorphological influences for offshore sandwaves. *Continental Shelf Research*, (29), 1289-1301.
- Borsje, B. W., Kranenburg, W. M., Roos, P. C., Matthieu, J., & Hulscher, S. J. (2014). The role of suspended load transport in the occurrence of tidal sand waves. *Journal of Geophysical Research*, (119), doi:10.1002/2013JF002828.
- Borsje, B. W., Roos, P. C., Kranenburg, W. M., & Hulscher, S. J. (2013). Modeling tidal sand wave formation in a numerical shallow water model: The role of turbulence formation. *Continental Shelf Research*, 60, 17-27.
- De Boer, W. P., Roos, P. C., Hulscher, S. J., & Stolk, A. (2011). Impact of mega-scale sand extraction on tidal dynamics in semi-enclosed basins An idealized model study with application to the Southern North Sea. *Coastal Engineering*, 58, 678-689.
- De Groot, P. J. (2005). *Modelling the morphological behaviour of sandpits*. Enschede.
- Dorst, L. L. (2009). Estimating sea floor dynamics in the Southern North Sea to improve bathymetric survey planning. *Publications on Geodesy*, 69 ISBN 978-90-365-2878-8.
- Dorst, L. L., Dehling, T., & Howlett, C. (2013, 15 & 16 April). Developments in North Sea wide resurveying and charting of dynamics and wave areas. *Marine and River Dune Dynamics MARID IV*. Bruges, Belgium.
- Dorst, L. L. (2014). *Zandwinning Noordzee: persoonlijke communicatie*.
- Havenbedrijf Rotterdam. (2013). *Korrelgroottes zuidelijke Noordzee, persoonlijke communicatie*.
- Hisgen, R. G., & Laane, R. W. (2004). In *Geheim van het getij*. Den Haag: Sdu Uitgevers.
- Hoitink, A. J.F.; National Institute for Marine and Coastal Management/RIKZ. (1997). *Morphological impact of large scale marine sand extraction*.
- Hommès, S.; National Institute for Marine and Coastal Management/RIKZ. (2004). *Large-scale sand extraction on sand ridges offshore of the Netherlands*.
- Hoogewoning, S. E.; Boers, M.; RIKZ. (2001). *Fysische effecten van zeezandwinning*. Ministerie van Verkeer en Waterstaat.
- Hulscher, S. J. (1996). Tidal-induced large-scale regular bed form patterns in a three-dimensional shallow water model. *Journal of Geophysical Research*, 101 (C9), 20,727-20,744.
- Hulscher, S. J., & Van Den Brink, G. (2001). Comparison between predicted and observed sand waves and sand banks in the North Sea. *Journal of Geophysical Research*, 106 (C5), 9327-9338.
- Klein, M. D.; National Institute for Coastal and Marine Management/RIKZ/WL| Delft Hydraulics. (1999). *Large-scale sandpits - Hydrodynamic and morphological modelling of large-scale sandpits*. Delft.
- Knaapen, M. A., & Hulscher, S. J. (2002). Regeneration of sand waves after dredging. *Coastal Engineering*, (46) 277-289.
- Knaapen, M. A., Hulscher, S. J., De Vriend, H. J., & Stolk, A. (2001). A new type of sea bed waves. *Geophysical Research Letters*, (28), 7, 1323-1326.

- Komarova, N. L., & Hulscher, S. J. (2000). Linear instability mechanisms for sand wave formation. *Journal of Fluid Mechanics* , (413), 219-246.
- (2004). *Modelling of tidally generated large scale bedforms*.
- Morelissen, R., Hulscher, S. J., Knaapen, M. A., Németh, A. A., & Bijker, R. (2003). Mathematical modelling of sand wave migration and the interaction with pipelines. *Coastal Engineering* , (48), 197-209.
- Németh, A. A., Hulscher, S. J., & De Vriend, H. J. (2002). Modelling sand wave migration in shallow shelf seas. *Continental Shelf Research* , (22), 2795-2806.
- Németh, A. A., Hulscher, S. J., & Van Damme, R. (2006). Simulating offshore sand waves. *Coastal Engineering* , (53), 265-275.
- Passchier, S., & Kleinhans, M. G. (2005). Observation of sand waves, megaripples, and hummocks in the Dutch coastal area and their relation to currents and combined flow conditions. *Journal of Geophysical Research* , (110) doi:10.1029/2004JF000215.
- Peters, B. G., & Hulscher, S. J. (2006). Large-scale offshore sand extraction: What could be the results of interaction between model and decision process? *Ocean & Coastal Management* , (49), 164-187.
- Ribberink, J. S. . (2004). *Migration and infill of trenches in the marine environment: an analytical engineering model*. Enschede: University of Twente.
- Roelvink, J. A. (2001). *Large-scale hydrodynamic impacts of airport islands*. ONL FLYLAND report.
- Roos, P. C., Hulscher, S. J., & De Vriend, H. J. (2008). Modelling the morphodynamic impact of offshore sandpit geometries. *Coastal Engineering* , 55, 704-715.
- Roos, P. C., Hulscher, S. J., & Knaapen, M. A. (2004). The cross-sectional shape of tidal sandbanks: Modeling and observations. *Journal of Geophysical Research* , (109), doi:10.1029/2003JF000070.
- Stolk, A., & Dijkshoorn, C. (2009). Sand extraction Maasvlakte 2 Project: License, environmental Impact Assessment and Monitoring. *EMSAGG Conference, 7-8 May*. Rome, Italy.
- Svašek Hydraulics. (2013). *Evaluatie van zandwinputten MV2*. Rotterdam.
- Tonnon, P. K., Van Rijn, L. C., & Walstra, D. J. (2007). The morphodynamic modelling of tidal sand waves on the shoreface. *Coastal Engineering* , (54), 279-296.
- Van Der Veen, H. H., Hulscher, S. J., & Knaapen, M. A. (2006). Grain size dependency in the occurrence of sand waves. *Ocean Dynamics* , (56), 228-234, DOI 10.1007/s10236-005-0049-7.
- Van Dijk, T. A., & Kleinhans, M. G. (2005). Processes controlling the dynamics of compound sand waves in the North Sea, Netherlands. *Journal of Geophysical Research* , (110), doi:10.1029/2004JF000173.
- Van Maren, D. S. (1998). *A state-of-the-art review and bibliography*. Rijswijk: Ministry of Transport, Public Works and Water Management, North Sea Directorate, the Netherlands.
- Van Rijn, L. C., & Walstra, D. J. (2004). *Analysis and modelling of sand mining pits*.
- Van Rijn, L. C., & Walstra, D. J. (2002). *Morphology of pits, channels and trenches part I: Literature review and suggested study approach*. Delft Hydraulics.
- Van Santen, R. B., De Swart, H. E., & Van Dijk, T. A. (2011). Sensitivity of tidal sand wavelength to environmental parameters: A combined data analysis and modelling approach. *Continental Shelf Research* , (31), 966–978.
- Walstra, D. J., Van Rijn, L. C., & Aarninkhof, S. G. (1998). *Sand transport at the middle and lower shoreface of the Dutch coast*. WL| Delft Hydraulics.
- Walstra, D. J.R.; Van Rijn, L. C.; Boers, M.; Roelvink, D.; . (2003). *Offshore sand pits: Verification and application of a hydrodynamic and morphodynamic model*.
- Walstra, D. J.R.; Van Rijn, L. C.; Van Helvert, M. A.G. /RIKZ Directorate North Sea. (2002). *Morphology of Pits, Channels and Trenches*.
- Wang, Z. B.; Jeuken, C.; De Vriend, H. J. WL|Delft Hydraulics. (1999). *Tidal asymmetry and residual sediment transport in estuaries*.

11 Bijlagen

Bijlage 1: Resultaten simulaties en berekeningen Svašek Hydraulics

Tabel 11: Maximale stroomsnelheden, veranderingen in stroomrichtingen en verschillen in waterstanden waar ΔV staat voor de verandering in stroomsnelheid, ΔH voor verandering in waterstaand en $\Delta \theta$ voor verandering in oriëntatie.

Bron: Klein & Van Den Boomgaard (2013).

bron: Klein & Van Den Boogaard (2015).

Parameter	Zonder wind				Met wind			
	Max. verlaging (Met putten – zonder putten)		Max. verhoging (Met putten – zonder putten)		Max. verlaging (Met putten – zonder putten)		Max. verhoging (Met putten – zonder putten)	
	Absoluut	Relatief	Absoluut	Relatief	Absoluut	Relatief	Absoluut	Relatief
ΔV max	0,40 m/s	35%	0,29 m/s	26%	0,45 m/s	34%	0,27 m/s	23%
ΔV (max ebstroming)	0,34 m/s	36%	0,21 m/s	23%	0,25 m/s	33%	0,18 m/s	26%
ΔV (max vloedstroming)	0,39 m/s	35%	0,29 m/s	26%	0,44 m/s	37%	0,28 m/s	23%
ΔH (hoogste HW)	2 cm		3 cm		2 cm	2 cm	2 cm	2 cm
ΔH (laagste LW)	1 cm		1 cm		1 cm	1 cm	1 cm	1 cm
			Absoluut		Absoluut			
$\Delta \theta$ (max ebstroming)	15°				18°			
$\Delta \theta$ (max vloedstroming)	13°				14°			

Tabel 12: Resultaten in en rond de noordelijke zandwininput waarin ΔH_s staat voor verandering in golfhoogte, ΔT_p staat voor de verandering in het faseverschil (tijd tussen opeenvolgende golven) en $\Delta \theta$ staat voor verandering in oriëntatie.

Bron: Klein & Van Den Boomgaard (2013).

Parameter	$\theta=240^\circ$		$\theta=330^\circ$		$\theta=0/360^\circ$	
	Abs.	Rel.	Abs.	Rel.	Abs.	Rel.
ΔH_s	0,2 m	7%	0,2 m	5%	0,2 m	4%
ΔT_p	0,2 s	3%	0,04 s	<1%	0,04s	<1%
$\Delta \theta$	4°		5°		6°	

Tabel 13: Resultaten in en rond de zuidelijke zandwininput bron: Klein & Van Den Boomgaard (2013).

Parameter	$\theta=240^\circ$		$\theta=330^\circ$		$\theta=0/360^\circ$	
	Abs.	Rel.	Abs.	Rel.	Abs.	Rel.
ΔH_s	0,15 m	5%	0,15 m	4%	0,15 m	5%
ΔT_p	0,15 s	2%	0,02 s	<1%	0,04 s	<1%
$\Delta \theta$	3°		4°		4°	

Tabel 14: Resultaten SWAN model randen noordelijke zandwininput bron: Klein & Van Den Boomgaard (2013).

Zandwininput noord		$\theta=240^\circ$	$\theta=330^\circ$	$\theta=0/360^\circ$
Hs	Maximaal verschil [m]	0,06	0,05	0,09
	Verskil > 0,04 m	1%	4%	3%
	0,01 m ≤ verschil ≤ 0,04 m	21%	37%	40%
	Verskil < 0,01 m	78%	60%	57%
Tp	Maximaal verschil [s]	0,05	0,01	0,01
	Verskil > 0,03 s	1%	0%	0%
	0,01 s ≤ verschil ≤ 0,03 s	12%	0%	0%
	Verskil < 0,01 s	87%	100%	100%

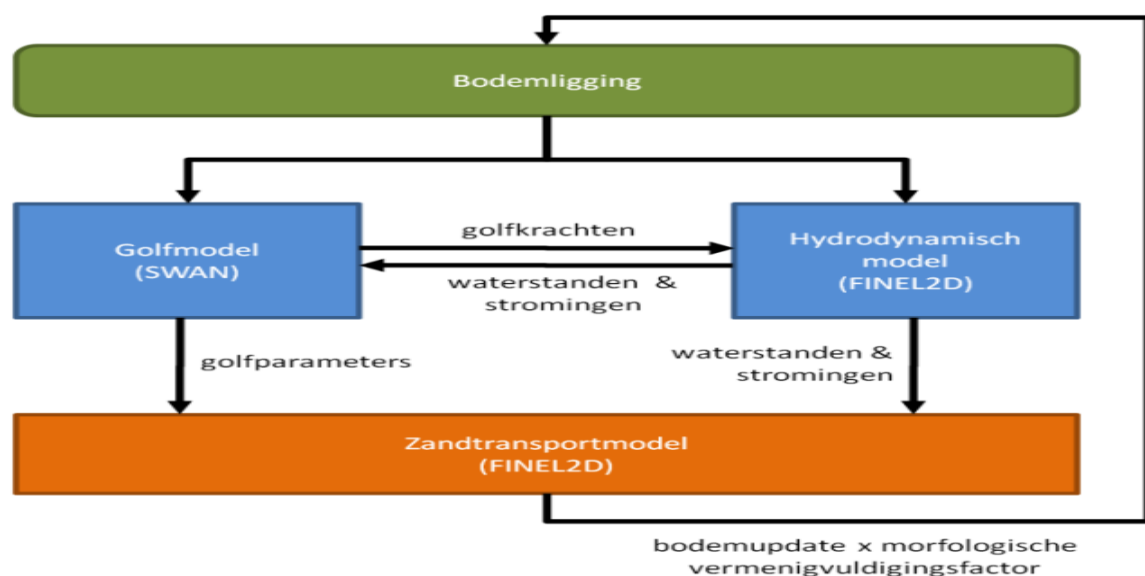
Θ	Maximaal verschil [θ]	0,9	1	1,7
	Vershil > 0,5 θ	4%	8%	9%
	0,1 $\theta \leq$ verschil < 0,5 θ	56%	59%	55%
	Vershil < 0,1 θ	40%	33%	36%

Tabel 15: Resultaten SWAN model randen zuidelijke zandwinput bron: Klein & Van Den Boomgaard (2013).

Zandwinput noord		$\theta=240^\circ$	$\theta=330^\circ$	$\theta=0/360^\circ$
Hs	Maximaal verschil [m]	0,03	0,05	0,06
	Vershil > 0,04 m	0%	4%	5%
	0,01 m $\leq$ verschil $\leq$ 0,04 m	24%	41%	42%
	Vershil < 0,01 m	76%	55%	53%
Tp	Maximaal verschil [s]	0,02	0,01	0,01
	Vershil > 0,03 s	0%	0%	0%
	0,01 s $\leq$ verschil $\leq$ 0,03 s	7%	0%	0%
	Vershil < 0,01 s	93%	100%	100%
Θ	Maximaal verschil [o]	0,8	1,1	1,1
	Vershil > 0,5o	5%	7%	17%
	0,1o $\leq$ verschil < 0,5o	60%	65%	65%
	Vershil < 0,1o	35%	28%	18%

Tabel 16: Toegepaste golfklimaat en windcondities

Set	Significante golfhoogte [m]	Piek Periode [s]	Richting [$^\circ$ N]	Windsnelheid [m/s]
1	2,05	7,2	240	12,0
2	2,05	7,2	330	10,0



Figuur 52: Gebruikte modellen en opzet bron: Klein & Van Den Boomgaard (2013).

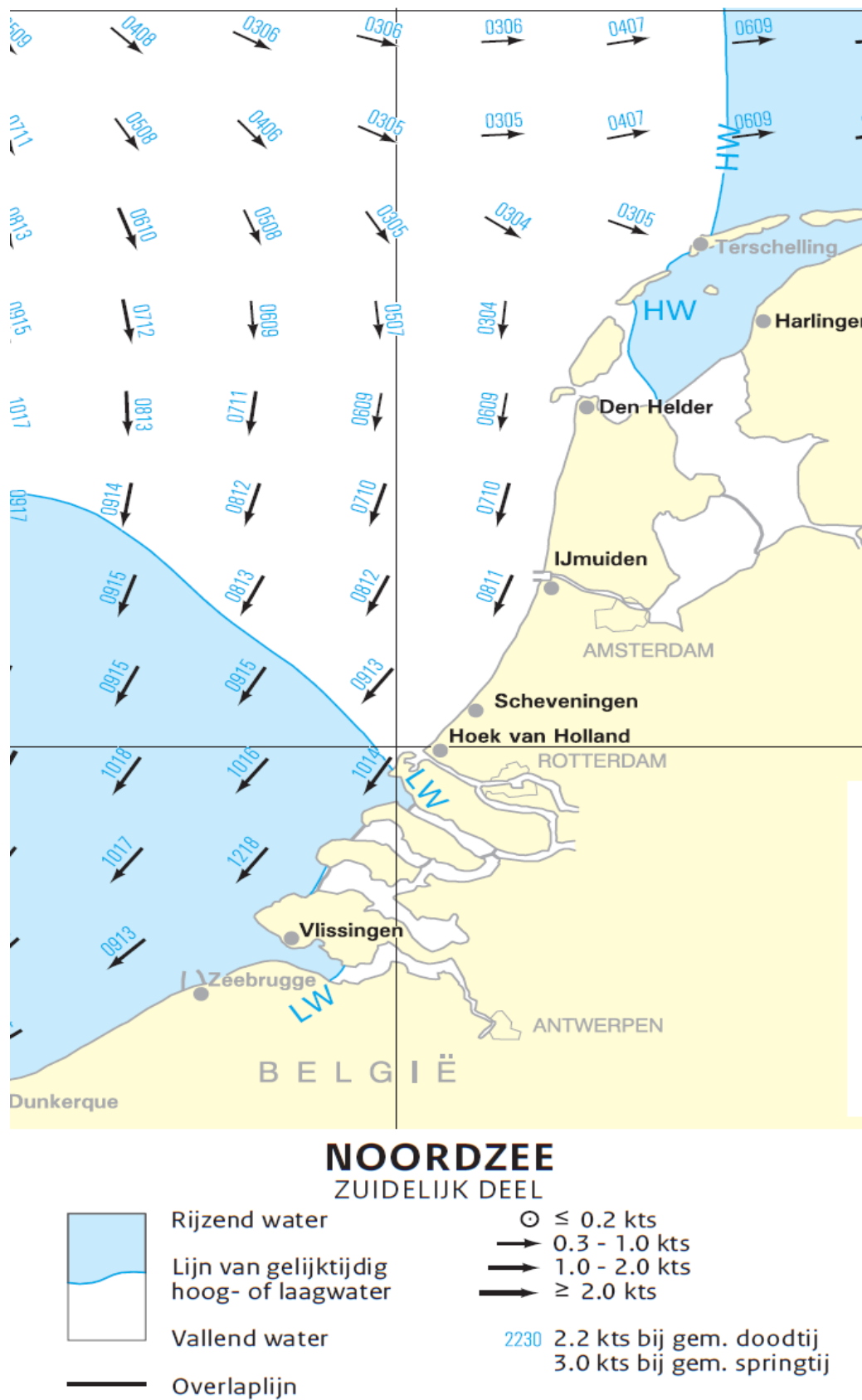
Bijlage 2: Typische eb- en vloedstroming tijdens hoog- en laagwater

De typische stroomsnelheden en stroomrichtingen voor de kust van Nederland zijn hier weergegeven voor hoog- en laagwater. Hierin zijn de snelheden die te lezen zijn in knopen. Omgerekend zal 1 knoop circa 0.5 m/s zijn. De stroomsnelheden zijn aangegeven voor zowel doottij als springtij.

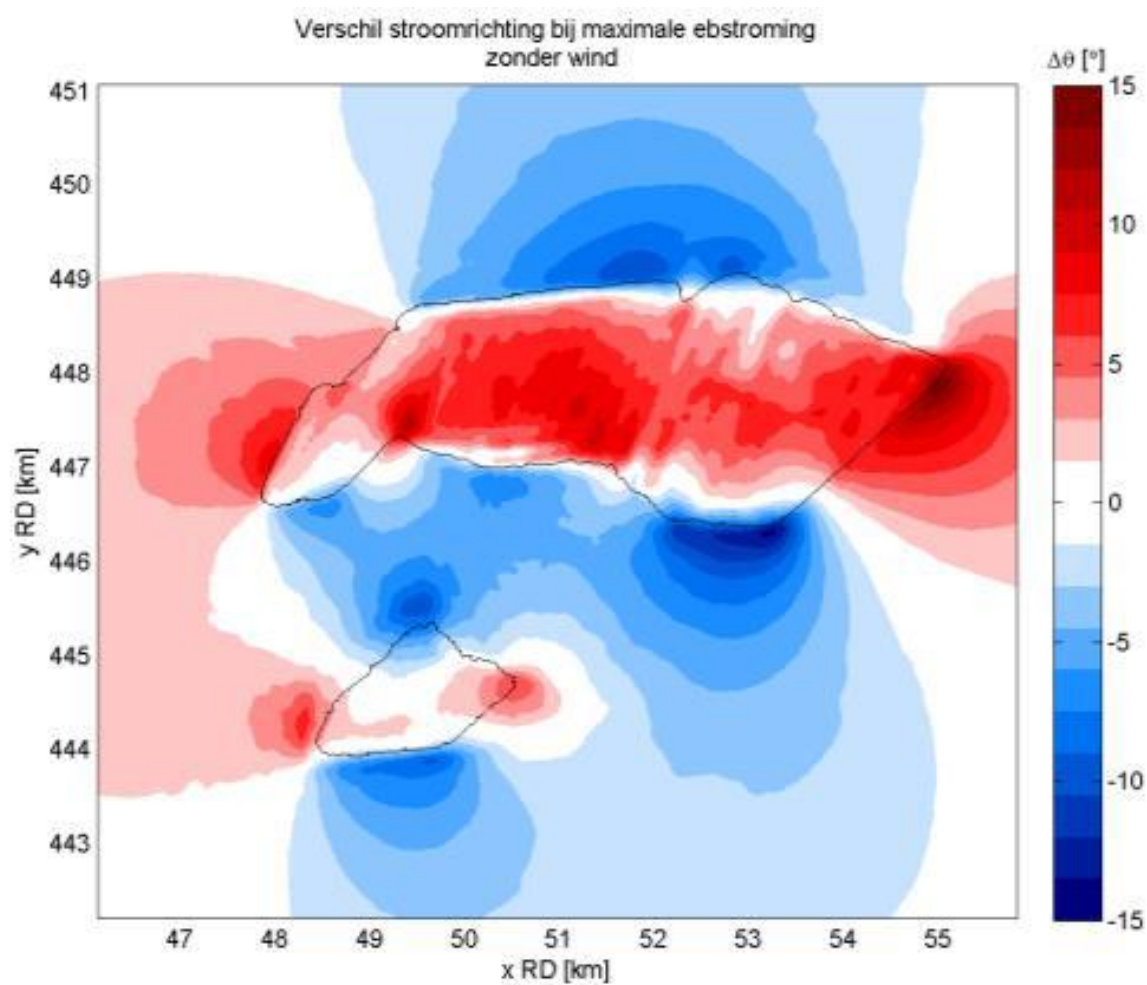
Vloedstroming tijdens hoogwater



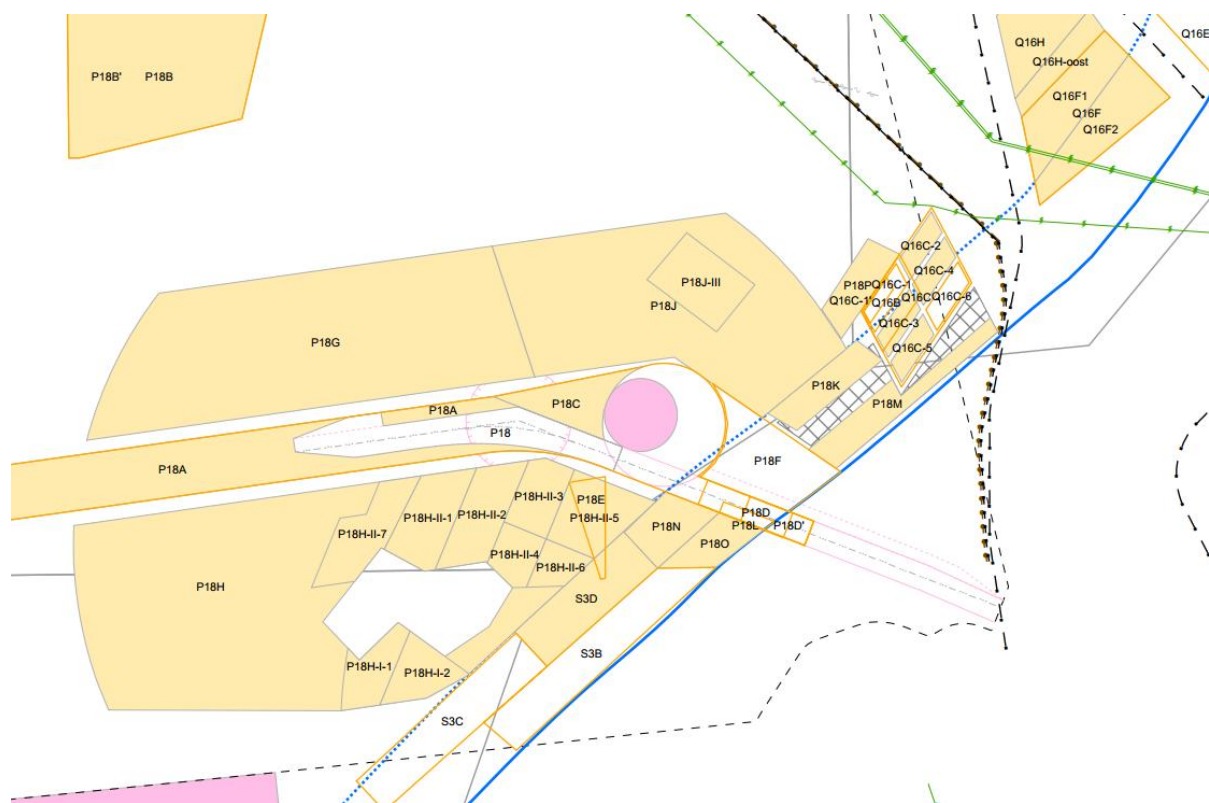
Figuur 53: Vloedstroming tijdens hoogwater bron: HP33, Dienst der Hydrografie (2014)



Figuur 54: Ebstroming tijdens laagwater bron: HP33, Dienst der Hydrografie (2014)



Figuur 55: Verschil in stroomrichting bij maximale ebstroming zonder wind bron: Klein & Van Den Boomgaard, 2013



Figuur 56: Gebieden waarin actief zand gewonnen wordt rondom de Euro- en Maasgeul bron: Rijkswaterstaat, 2014

Bijlage 5: Herstel van bodemvormen in zandwinputten

Constanten

$$\rho_s = 2650 \frac{kg}{m^3} ; \rho_w = 1020 \frac{kg}{m^3} ; g = \frac{9,81m}{s^2} ; v_w = 1,05 * 10^{-6} \frac{m^2}{s} ; R = 0,41 \frac{m}{s^{\frac{1}{2}}}$$

$$ks = 0.074 m^{\frac{1}{2}} s$$

Vergelijkingen

$$\theta = \frac{u_*^2}{g \Delta D} \quad (-) \quad (1)$$

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho_w}} \quad \left(\frac{m}{s} \right) \quad (2)$$

$$\tau_b = \rho_w * g * \frac{u^2}{C^2} \quad \left(\frac{kg}{ms^2} \right) \quad (3)$$

$$\Delta = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \quad (-) \quad (4)$$

$$\theta_{cr} = \frac{0,24}{D_*} \text{ als } 1 < D_* \leq 4 \quad (-) \quad (5)$$

$$\theta_{cr} = \frac{0,14}{D_*^{0,64}} \text{ als } 10 < D_* \leq 10 \quad (-) \quad (6)$$

$$\theta_{cr} = \frac{0,04}{D_*^{0,1}} \text{ als } 10 < D \leq 20 \quad (-) \quad (7)$$

$$\theta_{cr} = 0,013 D_*^{0,29} \text{ als } 20 < D_* \leq 150 \quad (-) \quad (8)$$

$$\theta_{cr} = 0,055 \text{ als } D_* > 150 \quad (-) \quad (9)$$

$$D_* = \sqrt[3]{\frac{\Delta g}{v_w^2}} * D \quad (-) \quad (10)$$

$$W_s = \frac{10 v_w}{D} \left(\sqrt{1 + \frac{0,01 \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) g d^3}{v_w^2}} - 1 \right) \quad \frac{m^2}{s^{\frac{3}{2}}} \quad (11)$$

$$P = \frac{W_s}{R u_*} \quad (-) \quad (12)$$

$$C = 18 \log \left(\frac{12 * H}{ks} \right) \quad \left(\frac{m^{\frac{1}{2}}}{s} \right) \quad (13)$$

Voorwaarden

$$P > 1,9 ; \theta \geq \theta_{cr}$$

Bijlage 6: Contacten

Tabel 17: Contacten tijdens het onderzoek

Naam	Organisatie
Jan van den Berg	Van Oord
Sjoerd van den Brom	Boskalis
Hans van der Gouwe	Rijkswaterstaat
Marloes van den Boomgaard	Svašek Hydraulics
Pieter Roos	Universiteit Twente
Daniëlle van Kuijk	Dienst der Hydrografie
Thijs Ligteringen	Dienst der Hydrografie
Ronald Kuilman	Dienst der Hydrografie
Marcel Lans	Dienst der Hydrografie
Bart Vergeer	Dienst der Hydrografie
Riejet Willemsen	Dienst der Hydrografie
Michel Standaert	Dienst der Hydrografie
John Loog	Dienst der Hydrografie
Leen Oosterling	Dienst der Hydrografie
Ben Timmerman	Dienst der Hydrografie
Onno van Tongeren	Havenbedrijf Rotterdam

In tabel 17 zijn de contacten te zien die zijn opgedaan tijdens het onderzoek. Hierbij zijn zowel externe organisaties gecontacteerd als personen binnen de Dienst der Hydrografie. Al deze contacten hebben een wezenlijke bijdrage geleverd aan het onderzoek.