

Morfologie Zwakke Schakel Cadzand-Bad

Definitief

1638/U12221/SPo/B

30 augustus 2012

SVASEK
HYDRAULICS

Document titel Morfologie Zwakke Schakel Cadzand-Bad

Verkorte Titel Morfologie Cadzand-Bad

Status Definitief

Datum 30 augustus 2012

Project naam Zwakke Schakels Zeeuws Vlaanderen

Project nummer 1638

Opdrachtgever Projectbureau Zwakke Schakels West Zeeuws-
Vlaanderen / Waterschap Scheldestromen

Referentie 1638/U12221/SPo/B

Auteur Sanne Poortman

Gecontroleerd door Bram Blik

SAMENVATTING

Introductie

Op verzoek van het Projectbureau Zwakke Schakels heeft Svašek Hydraulics een morfologische modelstudie verricht naar de morfologie rond de nieuw aan te leggen strekdammen bij Cadzand-Bad.

Er is in de modelberekeningen onderscheid gemaakt in de volgende varianten:

- Bestaande toestand (autonome ontwikkeling)
- Variant Kustversterkingsplan (KVP)
- Variant Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP)
- Variant jachthaven smal
- Variant jachthaven breed

De berekeningen zijn uitgevoerd met het morfodynamische modelinstrumentarium FINEL/SWAN, waarbij per variant een periode van ca. 10 jaar is doorgerekend.

Voor de bestaande toestand is een korte validatie van het model uitgevoerd, gericht op de reproductie van de volumes aan strandsuppletie tussen de grens en de Verdrongen Zwarte Polder, en op de algemene morfologische ontwikkeling van de vooroever. Vanwege de tijdsdruk op de studie kon geen gedetailleerde kalibratie uitgevoerd worden.

Bij de varianten met jachthaven is niet alleen de kustontwikkeling ter weerszijden van de strekdammen in beeld gebracht, maar ook de mogelijke aanzanding in de haventoeegang. Naast de morfologische berekeningen is een expert judgement uitgevoerd naar de aanslibbing in de geul (haven) in het luwtegebied tussen de beide strekdammen.

Validatie van het model

Uit de berekeningen van de bestaande toestand blijkt dat het model redelijk in staat is de morfologie van het gebied te reproduceren, zij het dat de veranderingen in het model over het algemeen worden overschat ten opzichte van de natuurlijke ontwikkeling. Dit geldt zowel voor de berekende volumes aan strandsuppleties als voor de morfologische ontwikkeling van de vooroever.

Kustonderhoud

Voor het kustonderhoud na aanleg van de strekdammen zijn de verschillende varianten weinig onderscheidend. Over het algemeen geldt dat hoe verder de uitbouw van de kustlijn de zee ingaat, hoe sterker de toename van het kustonderhoud.

Bij de KVP variant is het verwachte kustonderhoud ongeveer 5% meer, bij de HWBP variant 10% meer en bij de beide jachthaven varianten 15% meer dan in de bestaande toestand. Overigens geldt hierbij dat in de berekeningen het spuivolume van de sluis bij Cadzand-Bad niet is meegenomen. Dit kan vooral in de bestaande situatie een verhogend effect hebben op de kusterosie, waardoor de genoemde percentages (nog) lager zouden worden.

Aanzanding haventoeegang

Als de haventoeegang wordt onderhouden op NAP –6 m kan een snelle verzanding in de mond optreden, tot een paar meter na een (noord)westerstorm. De jaarlijkse onderhoudsbehoefte in de haventoeegang kan oplopen tot ca. 50.000 m³. Wanneer de diepte in de haventoeegang beperkt wordt tot ca. NAP –4 m is de aanzanding veel beter beheersbaar. In dat geval wordt verwacht dat de aanzanding in de havenmond minder dan

10.000 m³ per jaar bedraagt.

Aanslibbing in de haven

De aanslibbing in de haven zelf bedraagt ongeveer 0,5 meter per jaar, als geen rekening gehouden wordt met het spuien. Door de zoetwaterlozing van het gemaal (bij hoge buitenwaterstanden) kan de hoeveelheid aanslibbing toenemen. Met behulp van de zoetwaterlozing tijdens het spuien onder vrij verval (bij lage buitenwaterstanden) kan echter een vermindering van de aanslibbing optreden. Door onderlinge afstemming van spuibeheer en havenonderhoud kan een situatie worden bereikt waarbij in de natte wintermaanden de haven tegen relatief weinig kosten kan worden doorgespoeld.

INHOUDSOPGAVE

	Pag.
1 ALGEMEEN	1
1.1 Achtergrond	1
1.2 Probleemstelling	2
1.3 Aanpak en leeswijzer	2
2 INTERESSEGEBIEDEN EN ONTWERPVARIANTEN	3
2.1 Huidige situatie	3
2.2 Ontwerpvarianten	5
2.2.1 KVP	5
2.2.2 HWBP	6
2.2.3 Smalle jachthaven	7
2.2.4 Brede jachthaven	8
3 OPZET EN KALIBRATIE HYDRODYNAMISCH FINEL2D MODEL	10
3.1 Modelschematisatie FINEL2D Westerschelde model	10
3.1.1 Rekendomein en randvoorwaarden	10
3.1.2 Rekenrooster	11
3.1.3 Modelbodem	12
3.1.4 Strekdammen als overlaten	13
3.1.5 Hydraulische bodemruwheid	13
3.2 Validatie hydrodynamica FINEL2D Westerschelde model	13
3.3 Simulatieperiode	16
4 REPRESENTATIEF GOLFKLIMAAT EN OPZET GOLFMODEL (SWAN)	17
4.1 Golfklimaat Cadzand-Bad	17
4.1.1 Gebruikte golfdata	17
4.1.2 Vertaling naar langstransport	18
4.1.3 Bepaling representatieve golfcondities Cadzand-Bad	18
4.1.4 Vertaling naar representatief klimaat SWAN modelrand	19
4.2 Opzet SWAN model Cadzand-Bad	19
4.2.1 Domein en randvoorwaarden	20
4.2.2 Rekenrooster	20
4.2.3 Bodem-, waterstand- en stromingsvelden	21
4.2.4 Dammen als obstacles	21
4.2.5 Validatie SWAN model en overige instellingen	21
5 OPZET FINEL2D-SWAN MORFOLOGISCH MODEL	23
5.1 Gekoppeld FINEL2D-SWAN model	23
5.2 Validatie morfologie Cadzand-Bad	24
5.3 Conclusie morfologisch model	26
6 SIMULATIE SCENARIO'S	28
6.1 Implementatie scenario's	28
6.1.1 Autonome situatie	28
6.1.2 KVP variant	29
6.1.3 HWBP variant	29
6.1.4 Smalle havenvariant	30

6.1.5	Brede havenvariant	30
6.2	Uitkomsten scenario's	31
6.2.1	Autonome situatie	32
6.2.2	KVP variant	35
6.2.3	HWBP variant	40
6.2.4	Smalle havenvariant	44
6.2.5	Brede havenvariant	49
6.3	Morfologie havenbekken	53
6.4	Conclusies	54
7	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	56
7.1	Conclusies	56
7.2	Aanbevelingen	56
	REFERENTIES	58
	BIJLAGE A: MORFODYNAMISCH MODEL FINEL2D	59

1 ALGEMEEN

1.1 Achtergrond

Het project Zwakke Schakel West Zeeuws-Vlaanderen bestaat uit een vijftal deelgebieden zie Figuur 1.1, namelijk van west naar oost: Cadzand-Bad, Herdijkte Zwarte Polder, Nieuwvliet-Groede, Waterdunen, en Breskens. De uitvoering van deelgebied Cadzand-Bad staat gepland in 2013/2014 en betreft de laatste in de rij van de vijf Zwakke Schakels.



Figuur 1.1: Overzicht Zwakke Schakels West Zeeuws-Vlaanderen (bron: www.kustversterking.nl)

Het project is gericht op het versterken van de primaire waterkering. Het bijzondere van het project is dat er ook aandacht is voor het versterken van de ruimtelijke kwaliteit van het West Zeeuws-Vlaamse kustgebied. Hierdoor kunnen (mits eenvoudig inpasbaar en er beperkte kosten mee gemoeid zijn) recreatie, economie en natuur een impuls krijgen en optimaal profiteren van de kustversterking. Waar mogelijk kunnen plaatselijke ondernemers en overheden aanhaken bij de dijkverbeteringswerkzaamheden.

Projectbureau Zwakke Schakels Zeeuws-Vlaanderen is momenteel bezig met het ontwerp van de Zwakke Schakel Cadzand-Bad. Het principe ontwerp van deze Zwakke Schakel is beschreven in het Kustversterkingsplan (KVP) Zwakke Schakel West Zeeuws-Vlaanderen, zie DHV et al (2007). Dit ontwerp is weergegeven zie Figuur 1.2. De motivatie van het ontwerp is beschreven in de MER Zwakke Schakels Zeeuws-Vlaanderen, zie DHV (2007).



Figuur 1.2: Principe ontwerp Cadzand-Bad uit Kustversterkingsplan, DHV et al (2007).

Op basis van het principe ontwerp, de kustversterkingsplanvariant (KVP), is een tweede variant ontwikkeld, de Hoogwaterbeschermingsplanvariant (HWBP). Op basis van de HWBP variant zijn vervolgens twee jachthavenvarianten ontwikkeld. Op moment van schrijven wordt ook een derde jachthavenvariant ontwikkeld. Dit rapport bespreekt de invloed op de morfologie van de diverse ontwerpen voor de Zwakke Schakel Cadzand-Bad, welke onderdeel is van het project Zwakke Schakel West Zeeuws-Vlaanderen. Een eventuele derde jachthavenvariant wordt in deze studie niet meegenomen.

1.2 Probleemstelling

De KVP variant is reeds beschreven in de MER Zwakke Schakels Zeeuws-Vlaanderen, zie DHV (2007). De KVP variant wordt beschreven in paragraaf 2.2.1. Het principeontwerp uit het KVP is bij de uitwerking van het ontwerp verder geoptimaliseerd, in overeenstemming met de aanpak van de andere Zwakke Schakels Zeeuws-Vlaanderen. Daarbij is een aantal wijzigingen doorgevoerd, die hebben geleid tot de HWBP variant, zie paragraaf 2.2.2.

Op basis van de HWBP variant zijn twee varianten ontwikkeld waarin een jachthaven is opgenomen. Deze varianten wijken zo veel af van de varianten in de bestaande MER uit 2007, dat een aanvullende MER studie wordt uitgevoerd. De wijzigingen van de HWBP variant t.o.v. de KVP variant worden in deze aanvullende MER eveneens behandeld. Er wordt onderzocht of de nieuwe varianten leiden tot een andere morfologische ontwikkeling en een andere onderhoudsbehoefte dan bij KVP variant het geval was. Voor de jachthavenvarianten wordt ook de verwachte sedimentatie in de havenmond en het havenbekken, en de invloed van het aanleggen van de haven zelf op de sedimentatie beschouwd. Daaraan gekoppeld wordt gekeken naar de verwachte onderhoudsbaggerwerkzaamheden in de haven.

1.3 Aanpak en leeswijzer

Het interessegebied, Cadzand-Bad, zal worden besproken in hoofdstuk 2. Vanuit de omschrijving van de huidige situatie zullen vervolgens de verschillende ontwerpvarianten behandeld worden.

De invloed van verschillende varianten op de morfologie zal worden onderzocht met behulp van een gekoppeld hydrodynamisch-golf-morfologisch model. Dit model wordt gepresenteerd in hoofdstuk 3 tot en met hoofdstuk 5 met respectievelijk het FINEL2D hydrodynamisch Westerschelde model (hoofdstuk 3), het SWAN golfmodel (hoofdstuk 4) en het FINEL2D morfologisch model (hoofdstuk 5). In hoofdstuk 6 worden de resultaten van de modelstudie voor elk van de varianten gepresenteerd.

In twee van de vier varianten is een jachthaven opgenomen. De sedimentatie in de havenmonding en –bekken zelf en de invloed van de verschillende jachthavenvarianten op de onderhoudsbaggerwerkzaamheden zal worden geschat op basis van expert judgement, en worden eveneens besproken in Hoofdstuk 6. Hoofdstuk 7 geeft tot slot de conclusies en aanbevelingen.

2 INTERESSEGEBIEDEN EN ONTWERPVARIANTEN

2.1 Huidige situatie

Het projectgebied Cadzand-Bad heeft een lengte van ongeveer 1000 meter en is globaal met paars aangegeven in Figuur 2.1.



Figuur 2.1: Huidige situatie dammen en suatiegeul Cadzand-Bad (bron: Google Earth), waarbij met paars het projectgebied is aangeduid

Aan de westzijde bestaat de huidige primaire waterkering uit een basaltbekleding, welke overgaat in een kleidijk (zie Figuur 2.2 links). Voor deze dijk bevindt zich een duin. Het projectgebied loopt door tot ca. 300 meter ten westen van het gemaal. Ten oosten van de suatiegeul bestaat de waterkering uit een bekleding van basalt met een berm van asphalt (zie Figuur 2.2 rechts). Deze bekleding loopt door tot ca. 700 meter ten oosten van het gemaal, waar deze overgaat in een overgangsconstructie met een duin.



Figuur 2.2: Glooiing ten westen van het gemaal (links) en glooiing ten oosten van het gemaal (rechts).

Op het strand zijn strandhoofden aanwezig met daarop palenrijen. Het strand loopt vanaf de duinvoet geleidelijk af tussen de strandhoofden. Zeewaarts van de strandhoofden versteilt

de vooroever voordat deze de ca. NAP -10 m lijn bereikt. Daarna loopt de vooroever geleidelijk verder af. Het netto dwarstransport van sediment is zeewaarts gericht en er is een gradiënt in het langstransport richting het oosten. Beide zorgen voor sedimentverlies in het kustvak waardoor er om de 3 tot 5 jaar wordt gesuppleerd ($0,2 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$) om aan de BKL-richtlijn te voldoen.

De zwakste plek van de primaire waterkering is de directe omgeving van het gemaal (zie Figuur 2.3). Het gemaal is in 1955 gebouwd ter vervanging van de vroegere uitwateringssluis en bestaat uit een sluis met twee maalkokers in de waterkering. De primaire functie van het gemaal is waterbeheersing, maar omdat deze is opgenomen in de primaire waterkering heeft deze ook een waterkerende functie. Bij hoge buitenwaterstanden wordt het waterbezwaar verpompt (ca. 100 keer per jaar), bij lage waterstanden kan het gemaal onder vrij verval lozen (vrijwel dagelijks). Door de aanwezigheid van dit kunstwerk is kruinverhoging zeer lastig uitvoerbaar.



Figuur 2.3: Suatiegeul met gemaal, ten westen van gemaal bevinden zich hotel de Wielingen en het gebouw van de KNRM

De bekleding is langs het gehele traject 'onvoldoende' getoetst, met uitzondering van de basaltbekleding in de omgeving van het gemaal.¹ De aansluitingconstructies en duinen scoren allen 'onvoldoende'. Daarnaast scoort de primaire waterkering 'onvoldoende' op basis van de gestelde eisen met betrekking tot het faalmechanisme golfoverslag, wat inhoudt dat de kruinhoogte te laag is.

De uitstroomopening van het gemaal is beschut gelegen in de kruin van de waterkering en mondt uit in een afvoerkanaal naar zee (de suatiegeul). Het afvoerkanaal ligt beschut tussen een tweetal strekdammen, welke zijn bekleed met basalt. De huidige hoogte van deze dammen is ca. NAP +4,5 m bij de aansluiting met de doorlopende waterkering en loopt richting zee geleidelijk af. Deze strekdammen geleiden het onder hoge snelheid uitstromende water. De westzijde van de suatiegeul is aanzienlijk verzand, maar de hoofdgeul wordt open gehouden door het uitstromende water. Alleen na een droge zomer

¹ Mondelinge informatie Waterschap Scheldestromen

moet aan de zeezijde een kleine opening gemaakt worden om het vrij verval spuien op gang te krijgen.

2.2 Ontwerpvarianten

2.2.1 KVP

Het principe ontwerp van de Zwakke Schakel Cadzand-Bad is beschreven in het Kustversterkingsplan (KVP) Zwakke Schakel West Zeeuws-Vlaanderen (DHV et al, 2007) en is weergegeven in Figuur 2.4. De motivatie van het ontwerp is beschreven in de MER Zwakke Schakels Zeeuws-Vlaanderen (DHV, 2007). Het ontwerp is opgedeeld in een drietal deelgebieden.

Cadzand-Bad West:

Op dit traject wordt het bestaande duin afgegraven om een dijk aan te leggen die vervolgens met zand wordt afgedekt. De hoogte van het bestaande duin is NAP +9,5 m tot +10m. De nieuwe dijk heeft een hoogte van NAP +10,35 m en heeft een berm van 35 meter breed en taludhellingen van 1:8 op het onder- en bovenbeloop, welke zijn bekleed met betonzuilen. De bekleding wordt afgedekt met een laag zand van minimaal 1,5 m dikte, welke alleen een cosmetische functie heeft. De BKL moet zeewaarts worden verplaatst. Aan de westzijde van het traject moet een nieuwe aansluitingsconstructie worden aangebracht.



Figuur 2.4: Principe ontwerp Cadzand-Bad uit Kustversterkingsplan (KVP), DHV et al (2007).

Cadzand-Bad gemaal:

De bestaande dammen langs de suatiegeul moeten worden versterkt, verlengd en verhoogd. Versterking is noodzakelijk, zodat deze onder maatgevende stormomstandigheden (1/4000 jaar stormomstandigheden) hun golfreducerende functie blijven vervullen. Hierdoor worden de golven in de directe omgeving van het gemaal dusdanig gereduceerd, zodat er geen verhoging van de kruin benodigd is. In het principe ontwerp wordt voor zowel de westelijke als de oostelijke dam uitgegaan van een kruinhoogte van NAP +5,5 m, kruinbreedte van 6 m

en een zeewaarts talud van 1:4, gebruikmakende van losse breuksteen. Beide dammen wordt verlengd (orde 60 meter) en daarnaast wordt er een haak aan de dam gemaakt om golfdoordringing te beperken.

Cadzand-Bad Oost:

De bestaande waterkering wordt verbreed in de vorm van een extra duin. Dit nieuwe duin krijgt een hoogte van NAP +10 m tot NAP +11 m en sluit aan op de top van de huidige waterkering. Het bestaande duin wordt verbreed met 50 tot 60 meter, waarbij het profiel richting de zee aflopend wordt aangelegd. Daarnaast worden de duinen landschappelijk ingepast, waarvoor 25% extra zand benodigd is, welke in de vorm van reliëf en het doorzetten van de kustboog wordt verwerkt. De bestaande BKL moet ca. 20 m zeewaarts worden verplaatst. Doordat de aan te leggen duinregel door wordt getrokken voorbij de bestaande aansluitingsconstructie behoeft deze niet versterkt te worden.

2.2.2 HWBP

Het principeontwerp uit het Kustverstekingsplan (KVP), zie DHV et al (2007) is bij de uitwerking van het ontwerp geoptimaliseerd, overeenkomstig de aanpak van de andere Zwakke Schakels Zeeuws-Vlaanderen. Daarbij is een aantal wijzigingen doorgevoerd, welke hieronder per deelgebied zijn beschreven. Per deelgebied zijn de belangrijkste aandachtspunten en de keuze criteria uit de MER, zie DHV (2007), meegenomen bij de keuze om het principe ontwerp al dan niet aan te passen. Belangrijke aandachtspunten in de MER zijn effecten van de versterking op de strandrecreatie en het zicht op zee vanuit hotels en appartementsgebouwen. Doorslaggevend bij de keuzen van het gekozen alternatief waren de investeringskosten, de effecten op de natuur, de ruimtelijke kwaliteit en robuustheid van de oplossing. De in deze paragraaf beschreven aanpassingen van het principe ontwerp uit het KVP hebben geen negatieve effecten op deze criteria.

Cadzand-Bad West:

Uit controleberekeningen van het duinvolume aan de westzijde van het projectgebied blijkt dat het bestaande volume een minder groot tekort heeft dan eerder aangenomen. Met een relatief kleine zandaanvulling (duinverbreding van 25 m en aanvulling vooroever) kan het duin op veiligheid worden gebracht, zonder dat daarachter een dijk met steunberm behoeft te worden aangebracht. De kruin van het duin blijft gelijk aan de huidige hoogte, zodat het zicht op zee vanuit hotels en appartementsgebouwen niet verminderd wordt. De kruin van de westelijke dam moet op voldoende hoogte liggen om het duin op te sluiten. Deze dam moet daarom geleidelijk oplopen van NAP +7,5 m tot NAP +11,0 m richting de doorlopende primaire waterkering.

Deze oplossing brengt minder kosten met zich mee dan het alternatief uit het KVP. Bijkomend voordeel is dat dit alternatief overeenstemt met de voorkeur uit de MER, namelijk toename van het duinvolume. Dit compenseert grotendeels de minder grote zandaanvulling bij Cadzand-Bad West (zie verder op in deze paragraaf). Gekozen is bij Cadzand-Bad West over te stappen van een 'harde' naar deze 'zachte' oplossing.

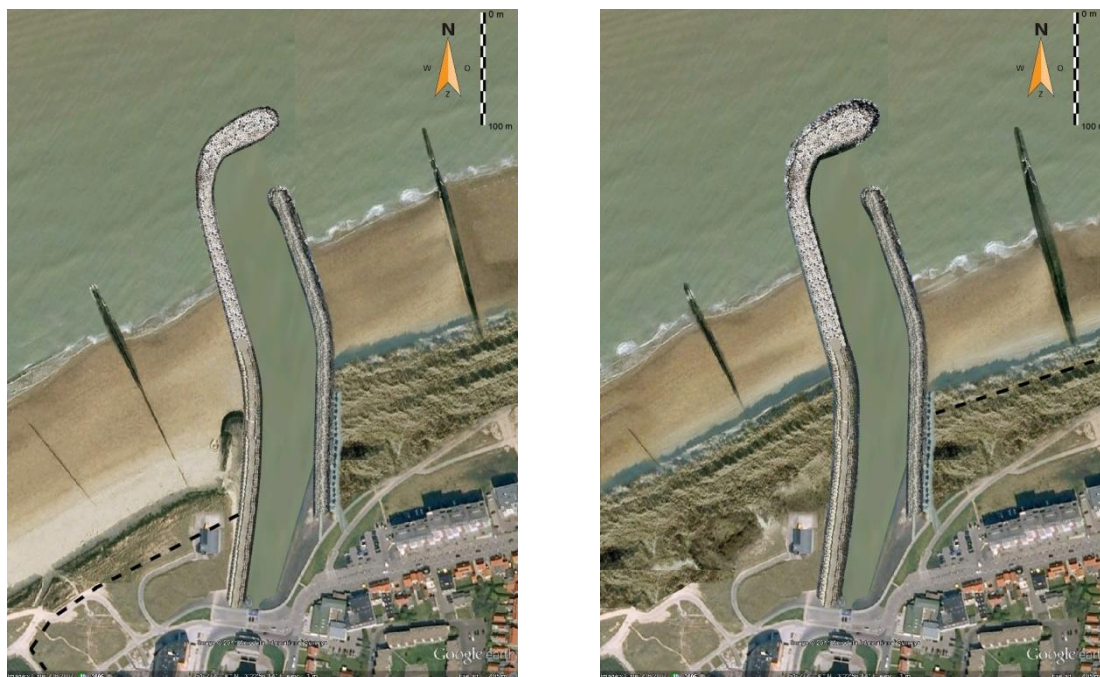
Cadzand-Bad gemaal:

In het KVP is geadviseerd het ontwerp van de dammen verder te optimaliseren. Hiervoor is een optimalisatiestudie uitgevoerd, waarbij vele verschillende lay-outs zijn doorgerekend en verschillende aspecten zijn gevarieerd en geoptimaliseerd. Gedurende deze optimalisatiestudie is gebleken dat de beperkte verhoging van de strekdammen, zoals opgenomen in het vastgestelde KVP, onvoldoende bescherming biedt tegen een

maatgevende storm die eens per 4000 jaar voor kan komen. Daarvoor is een verdere verhoging van de westelijke strekdam benodigd tot NAP +7,5 m, wat ook gepaard gaat met verbreding van deze dam. De ligging en lengte van de dammen is ongewijzigd. Ten opzichte van het principeontwerp uit het KVP is lengte van de haak van de westelijke dam enigszins aangepast om de golfreductie tussen de dammen te optimaliseren. De haak van de oostelijke dam is verwijderd, omdat deze juist indringing van golven bevordert. De kruin van de oostelijke dam is verlaagd van NAP +5,5 m naar NAP +5,0 m.

Cadzand-Bad Oost:

Het principe ontwerp uit het KVP bestaat uit aanvulling van het duingebied tezamen met verhoging van de strandligging. Deze oplossing zorgt echter voor veel aanzanding van de monding. Daarnaast bestaat er de wens om in het gebied ruimte te creëren voor gebiedsontwikkeling, zoals de aanleg van parkeerplaatsen. Er is daarom een alternatief gecreëerd, bestaande uit een dijk met een harde steunberm, welke alternatief aan deze wensen voldoet. Dit alternatief is verder uitgewerkt, waarbij de kosten in dezelfde orde lagen als de kosten van het KVP alternatief. Gekozen is daarom het principe ontwerp te wijzigen. Het nieuwe ontwerp bestaat uit behoud van de huidige kruinhoogte van NAP +11,0 m, taluds op onder- en bovenbeloop van 1:5 bekleed met gepenetreerde breuksteen en een berm van 20 meter breed bestaande uit waterbouwasfalt. De bekleding wordt afgedekt met zand, zodat het natuurlijke karakter behouden blijft.



Figuur 2.5: Variant KVP (links) en variant HWBP (rechts)

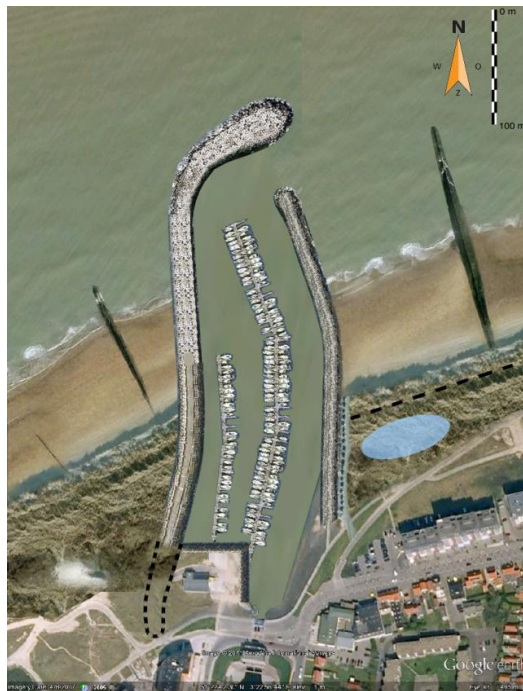
2.2.3 Smalle jachthaven

In 2007 is ten tijde van het opstellen van het KVP al gesproken over het realiseren van een haven tussen de strekdammen. In 2009 heeft Stichting Promotie Cadzand het idee van een haven tussen de strekdammen verder onderzocht, waarbij het realiseren van een haven economisch haalbaar werd geacht. Tijdens het onderzoek bleek er bovendien een groot draagvlak voor de ontwikkeling van een jachthaven te bestaan. Gekozen is binnen het projectbureau dit alternatief verder uit te werken.

Het ontwerp van de jachthaven is gebaseerd op de onderdelen van de primaire waterkering overeenkomstig het ontwerp HWBP. Het enige verschil is de ligging van de westelijke dam, welke bij het ontwerp van de haven ca. 50 meter verder naar het westen is opgeschoven, waardoor ruimte voor de haven wordt gecreëerd. De totale lengte van de westelijke dam neemt hierdoor toe met ca. 30 m. De smalle jachthavenvariant is gevisualiseerd in Figuur 2.6.

Bijkomende verschillen tussen de ontwerpen zijn dat:

- In het geval van de jachthaven moet de bestaande westelijke dam worden afgebroken, terwijl in de variant HWBP deze dam de basis vormt voor de te versterken dam. Het vrijgekomen materiaal kan vervolgens worden gebruikt in de kern van de nieuwe westelijke dam.
- Bij de variant HWBP hoeft de bodem niet te worden verdiept om het spuien van water mogelijk te maken. Bij het ontwerp van de haven is verdieping van het havenbekken benodigd om genoeg diepgang voor de boten te creëren. Er wordt uitgegaan van een bodemligging van NAP -6 m. Bij de havenvariant moet daardoor het binnentalud van de beide golfbrekers worden doorgetrokken tot NAP -6 m. Hierdoor worden de dammen aanzienlijk breder.
- Bij de havenvariant moet de zuidzijde van het havenbassin bij het gebouw van de KNRM worden verdedigd, terwijl bij de HWBP variant kan worden volstaan met de bestaande basaltglooiing.



Figuur 2.6: Variant smalle jachthaven

2.2.4 Brede jachthaven

De haven lay-out zoals beschreven in paragraaf 2.2.3 en die is weergegeven in Figuur 2.7, is gebaseerd op een haven met 100 à 125 ligplaatsen. Er zijn nog vele andere haven lay-outs denkbaar, waarbij in Figuur 2.7 een voorbeeld is gegeven van een haven met het dubbele aantal ligplaatsen. Het ontwerpprincipe is geheel gelijk aan de smalle havenvariant,

met uitzondering van de westelijke dam, welke meer westwaarts komt te liggen.



Figuur 2.7: Variant brede jachthaven

3 OPZET EN KALIBRATIE HYDRODYNAMISCH FINEL2D MODEL

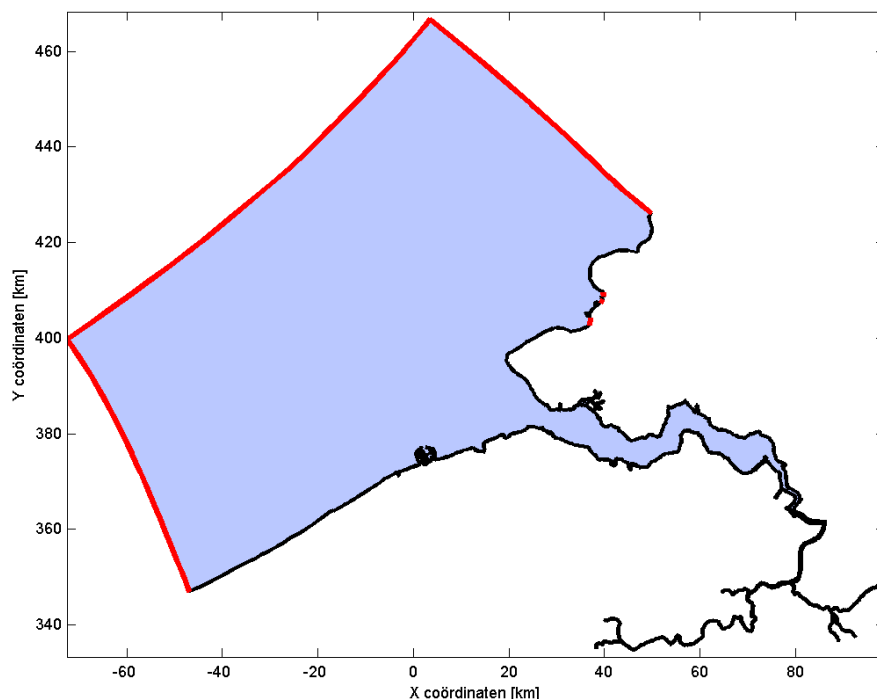
Voor het onderzoeken van effect op de morfologie voor de verschillende varianten wordt in dit project gebruikt gemaakt van een gekoppeld hydrodynamisch-golf-morfologiemodel. Dit model bestaat uit drie – min of meer – afzonderlijke delen: (1) een hydrodynamisch model (FINEL2D), (2) een golfmodel (SWAN) en (3) een morfologisch model (FINEL2D). Deze drie onderdelen worden gepresenteerd in respectievelijk Hoofdstuk 3, Hoofdstuk 4 en Hoofdstuk 5.

In dit hoofdstuk wordt de opzet van het hydrodynamische FINEL2D model van de Westerschelde behandeld. FINEL2D is een dieptegemiddeld stromings- (en morfologie)model, dat gebruik maakt van een ongestructureerd driehoeksrooster. Dit rooster is zeer flexibel en specifieke gebieden kunnen eenvoudig met hoge resolutie worden doorgerekend, zonder dat daarvoor de resolutie in de rest van het model hoeft te worden verhoogd. FINEL2D wordt ontwikkeld door Svašek Hydraulics. Een meer uitgebreide beschrijving van FINEL2D is opgenomen in Bijlage A.

3.1 Modelschematisatie FINEL2D Westerschelde model

3.1.1 Rekendomein en randvoorwaarden

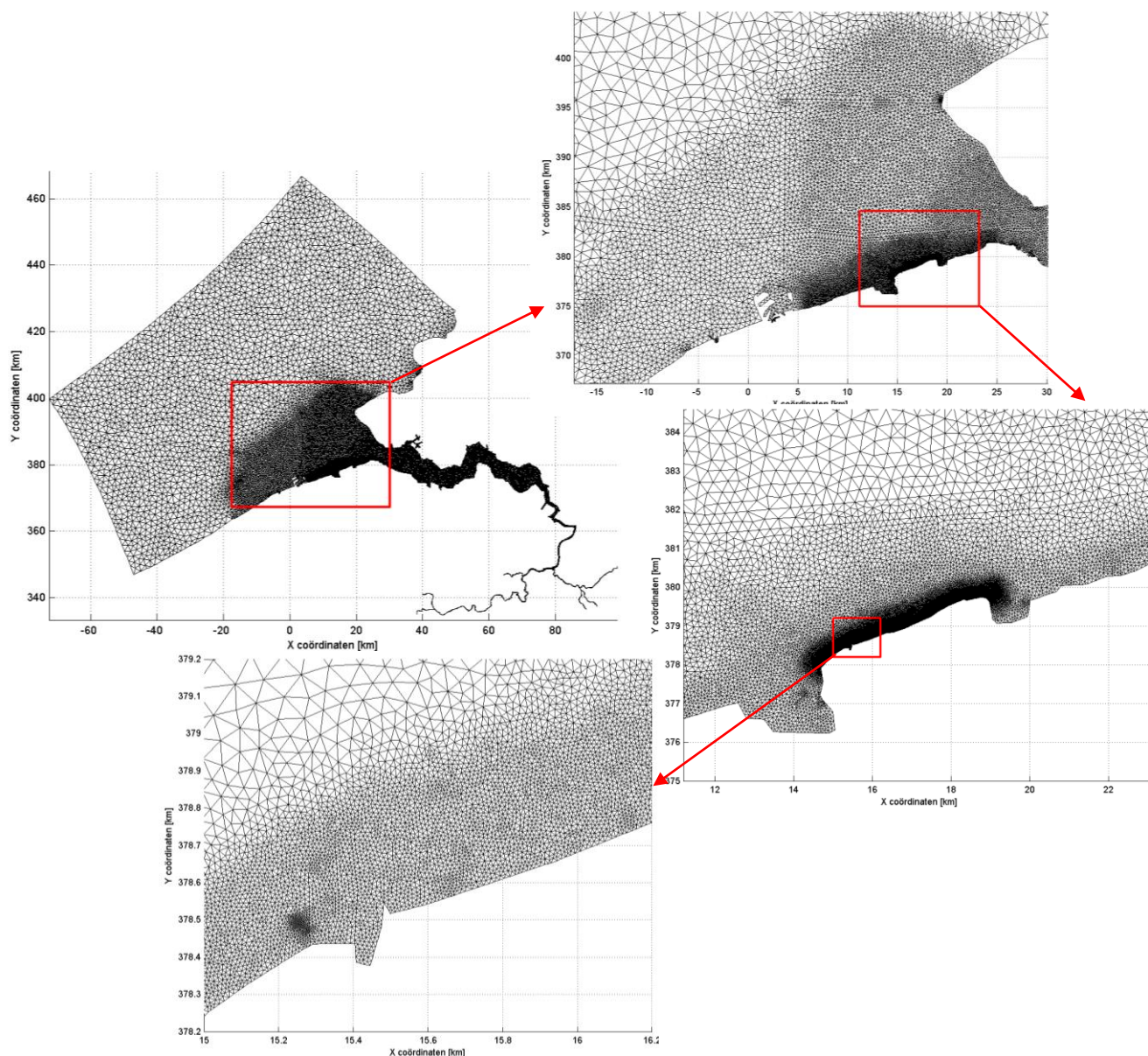
Het model beslaat een deel van de Noordzee, de Westerschelde zelf, de Zeeschelde en een deel van de Bovenschelde, de Rupel, Zenne, Dijle en Nete, zie Figuur 3.1. Op de randen van het model worden randvoorwaarden opgelegd: gedetailleerde harmonische getijdenranden op de Noordzee en de Oosterscheldekering (rood in Figuur 3.1), en constante rivierafvoeren op de Schelde, Rupel, Zenne, Dijle en Nete.



Figuur 3.1: Randvoorwaarden Westerschelde model.

3.1.2 Rekenrooster

Het rooster is opgezet met behulp van TRIANGLE². Hierbij is een grote variatie in de celgrootte aangebracht. Cellen op de Noordzee hebben zijden van ongeveer 1,5 km. Voor de monding neemt de celgrootte af naar 480 m, en in de monding zelf bedraagt de celgrootte 320 m. Wanneer de kust van Cadzand-Bad genaderd wordt neemt de grootte van de cellen nog verder af naar 80 m. Ter plaatse van Cadzand-Bad zelf bedraagt de celgrootte 10 m. Een overzicht van het rekenrooster is gegeven in Figuur 3.2.

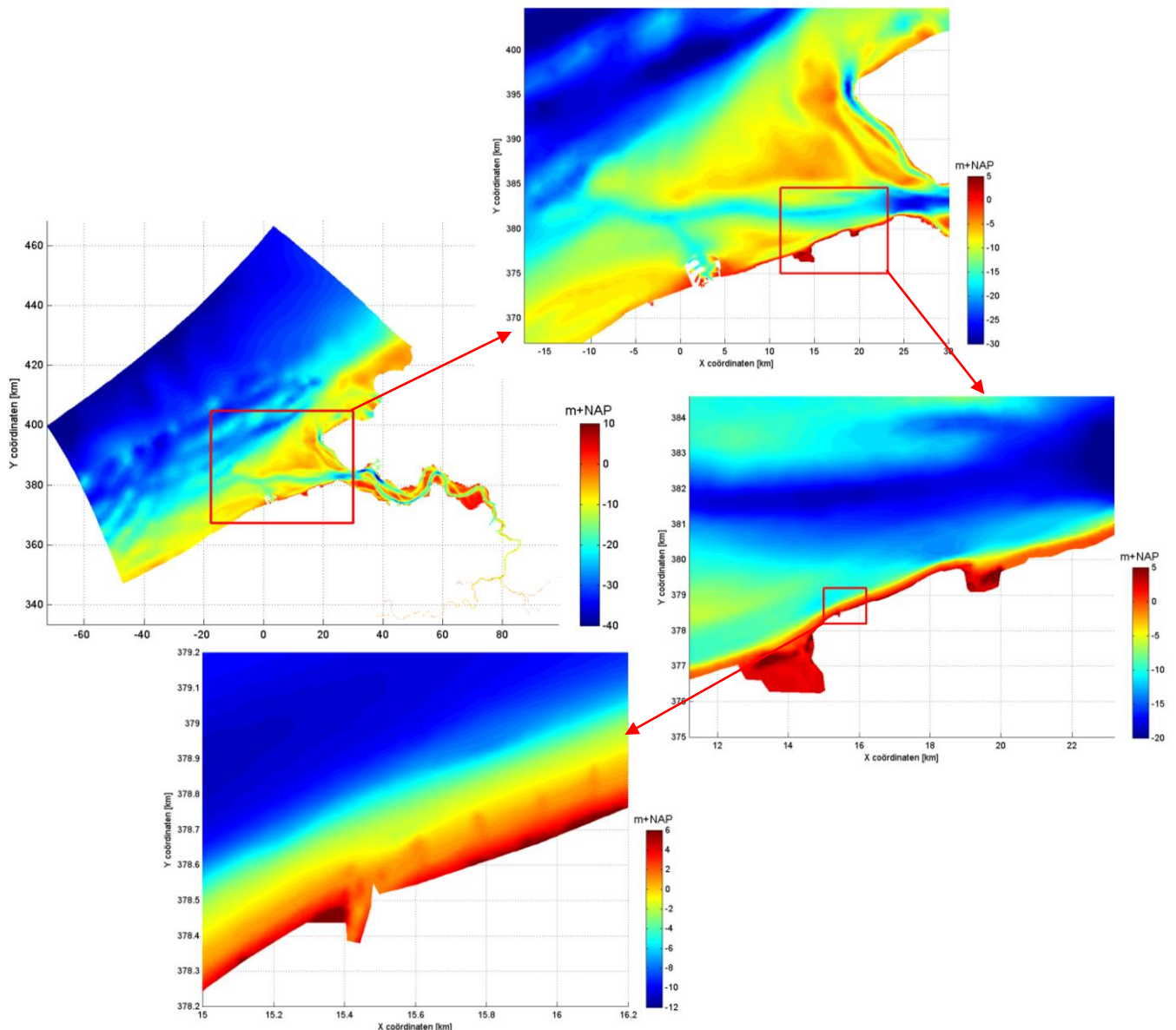


Figuur 3.2: FINEL2D Westerschelde rooster

² Zie <http://www.cs.cmu.edu/~quake/triangle.html>.

3.1.3 Modelbodem

De modelbodem is uit diverse bestanden opgebouwd. De initiële modelbodem die in deze studie is toegepast bestaat voor het grootste deel uit een 20x20 m² GIS bodem van de Westerschelde en een 20x20 m² GIS bodem van monding van de Westerschelde, beide uit 2011. Gebieden op open zee zijn afkomstig uit het WAQUA model Kuststrook Zuid. Voor het strand bij Cadzand is gebruik gemaakt van satellietdata uit het Algemeen Hoogtebestand Nederland (AHN). Voor de voeroever is gebruikt gemaakt van Jarkusraaien uit 2009. De bestanden zijn samengevoegd en naar het rekenrooster geïnterpoleerd. Het resultaat is weergegeven in Figuur 3.3.



Figuur 3.3: Modelbodem voor het FINEL2D Westerschelde model

3.1.4 Strekdammen als overlaten

De strekdammen op het strand van Zeebrugge tot Breskens zijn in het model opgenomen als overlaten. Hierbij wordt, indien het water boven de hoogte van de strekdam uitkomt, een energieverlies uitgerekend. De hogere havendammen zijn eveneens op deze manier geïmplementeerd. De hoogte van de strekdammen wordt per variant in hoofdstuk 6 besproken.

3.1.5 Hydraulische bodemruwheid

Er is een globale Nikuradse ruwheid toegepast van 0,01 m. Deze waarde kan worden voorgesteld als een orde van grootte van de ruwheidselementen op de bodem. De waarde is consistent met andere hydraulische simulaties met zandige bodems zoals uitgevoerd door Svašek Hydraulics.

3.2 Validatie hydrodynamica FINEL2D Westerschelde model

De hydrodynamica van het FINEL2D Westerschelde model is uitgebreid gevalideerd in Svašek Hydraulics (2012). Waterstandsmetingen uit het jaar 2006 zijn vergeleken met modelresultaten van zowel FINEL2D als het beheersmodel van Rijkswaterstaat NEVLA. Het resultaat is te zien in Figuur 3.4 en Figuur 3.5 waar de amplitude en fase van de M2, M4 en M6 componenten getoond zijn langs de as van de (Wester)schelde. Het matlab programma `t_tide` is gebruikt om de componenten te bepalen van de meting en beide modellen, zodat geen verschillen aanwezig zijn in de gebruikte methode voor het bepalen van amplitudes en fases.

Te zien is dat FINEL2D de M2 componenten goed kan berekenen. In de Westerschelde is de reproductienauwkeurigheid van FINEL2D voor de M2 component iets beter dan NEVLA. NEVLA onderschat de M2 component consequent in de Westerschelde. In de Bovenschelde is NEVLA iets beter. Voor de M4 component is FINEL2D iets te laag in de Westerschelde en iets te hoog in de Zeeschelde (let op de kleine amplitudes van de M4 component). NEVLA kan de M4 component iets beter berekenen, terwijl de M6 component door FINEL2D beter berekend wordt dan door NEVLA. Figuur 3.5 laat de fasen zien van de drie componenten. Te zien is dat de modellen vrijwel op de meting liggen.

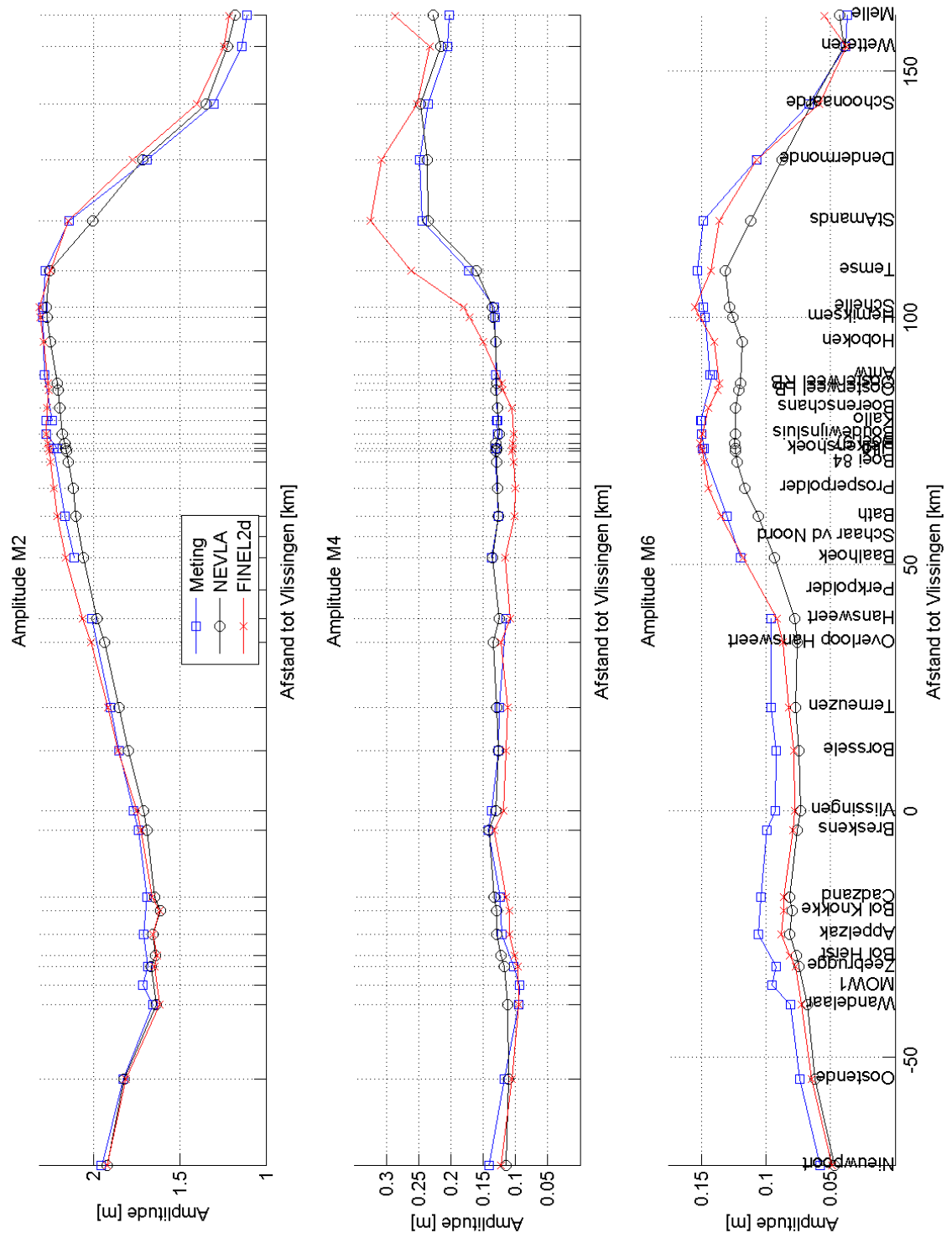
De afwijkingen in fase en amplitude voor de Noordzee, Westerschelde en Zeeschelde tot en met Antwerpen zijn alleszins acceptabel voor de FINEL2D uitkomsten.

Het FINEL2D model is eveneens vergeleken met stroommetingen op de volgende locaties, zie Svašek Hydraulics (2012):

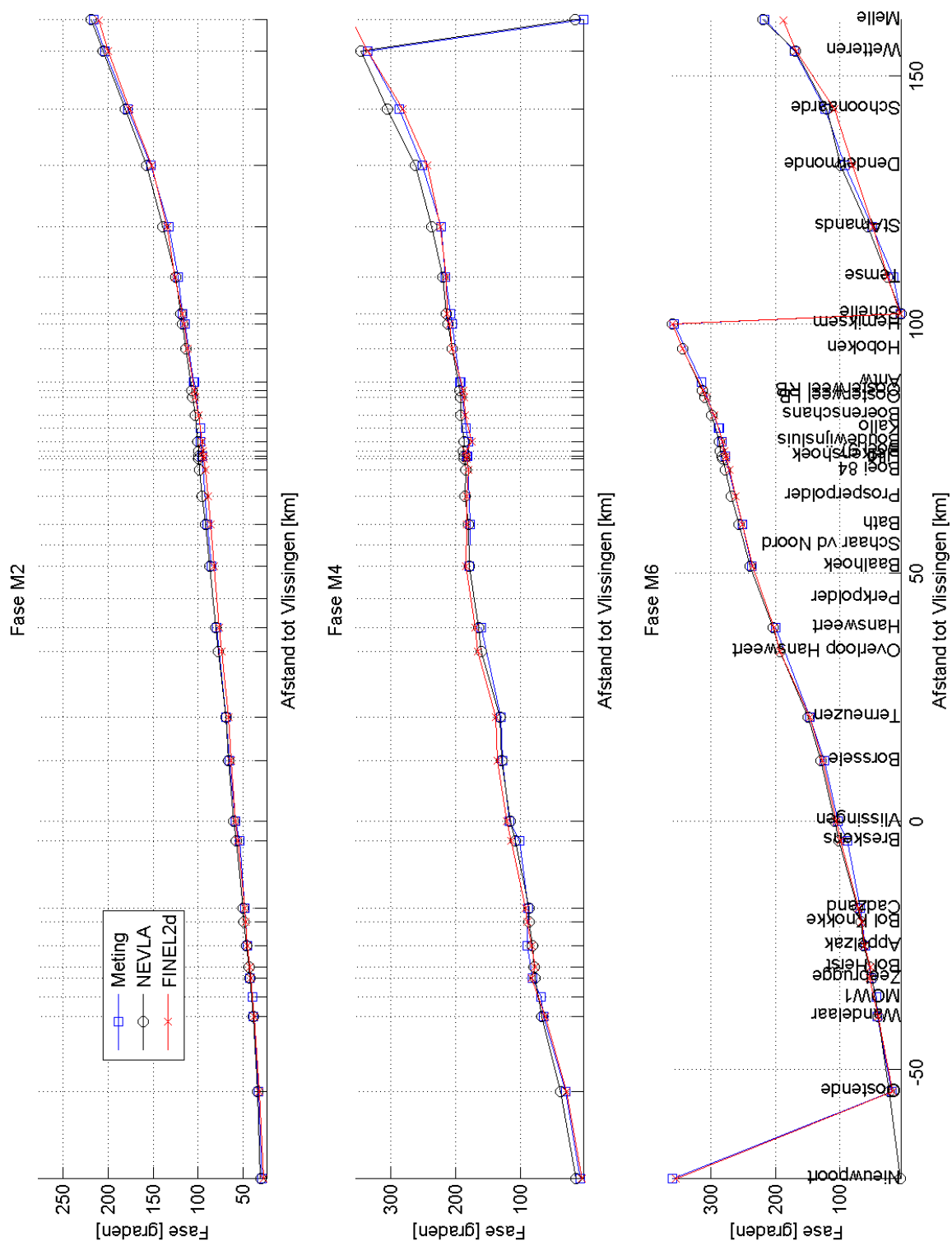
- Put van Borssele
- Debietraaien bij Bath
- Stroommetingen Plaat van Ossensisse
- Debietraaien bij Gat van Ossensisse/ Middelgat

Over het algemeen kan geconcludeerd worden dat het model goed in staat is om de gemeten stroomsnelheden te reproduceren. In alle gevallen zijn de uitkomsten acceptabel. Afwijkingen zijn gevonden tijdens de vloedstroming bij de Put van Borssele waar een sterke onderstroom zorgt voor een afwijking van het logaritmisch snelheidsprofiel. Een tweedimensionaal model is dan niet afdoende voor het berekenen van de lokale stromingscondities, een driedimensionaal model laat al veel betere resultaten zien.

Geconcludeerd kan worden dat FINEL2D goed in staat is om zowel de waterstanden als de stroomsnelheden te reproduceren.



Figuur 3.4: Amplitudes van M2, M4, M6 voor meting, NEVLA en FINEL2D in 2006.



Figuur 3.5: Fases van M2, M4, M6 voor meting, NEVLA en FINEL2d in 2006.

3.3 Simulatieperiode

In een morfologische simulatie is het van belang dat de doorgerekende periode representatief is voor de natuurlijke variatie in de stromingen. Als invloeden van wind en golven (zie volgend hoofdstuk) buiten beschouwing worden gelaten – en er dus uitgegaan wordt van astronomisch getij – wordt deze variatie vrijwel volledig gerepresenteerd door een zogenaamde dood-tij-springtij cyclus. Een cyclus beslaat 28 getijden en duurt zodoende ongeveer 14,5 dag. Voor de uiteindelijke morfologische simulatie worden vijf dood-tij-springtij-cycli gesimuleerd, beginnend op 8 januari 2012.

4 REPRESENTATIEF GOLFKLIMAAT EN OPZET GOLFMODEL (SWAN)

Golven spelen een belangrijke rol in morfologische processen langs kusten. Zo zorgen golven voor opwoeling van sediment en golfgedreven stroming. Langtransport van zand op de Hollandse kust is een proces dat wordt gedomineerd door golfgedreven stroming. Het is daarom van belang om golven mee te nemen in de morfologische berekening. In dit hoofdstuk wordt een representatief golfklimaat opgesteld. Tot slot wordt een SWAN golfmodel opgezet om de golfvoortplanting naar en de breking bij Cadzand te berekenen.

In vergelijking met de variatie in stroming (waar vrijwel alle variatie wordt gerepresenteerd in een doortij-springtij-cyclus) is de variatie in golven zeer groot. Zo komen zware stormen maar eens in de paar jaar voor en is daarnaast de dagelijkse variatie groot. Het is zodoende niet mogelijk om een tijdserie van golven in het SWAN model op te nemen, daarvoor is de simulatietijd simpelweg te kort. Een dergelijk tijdserie zou een momentopname zijn, waarbij wellicht grote stormen of perioden van kalmte worden gemist. Belangrijker is echter dat het effect van golven niet lineair is. Zeer hoge golven die slechts zelden voorkomen hebben een groot morfologisch effect. Het is daarom zaak om het gehele golfklimaat te bekijken en het morfologische effect ervan in te schatten, om vervolgens een *representatief* klimaat te kiezen dat dezelfde morfologische gevolgen heeft. Dit hoofdstuk gaat in op het opstellen van het representatieve golfklimaat en het opstellen van het SWAN model.

4.1 Golfklimaat Cadzand-Bad

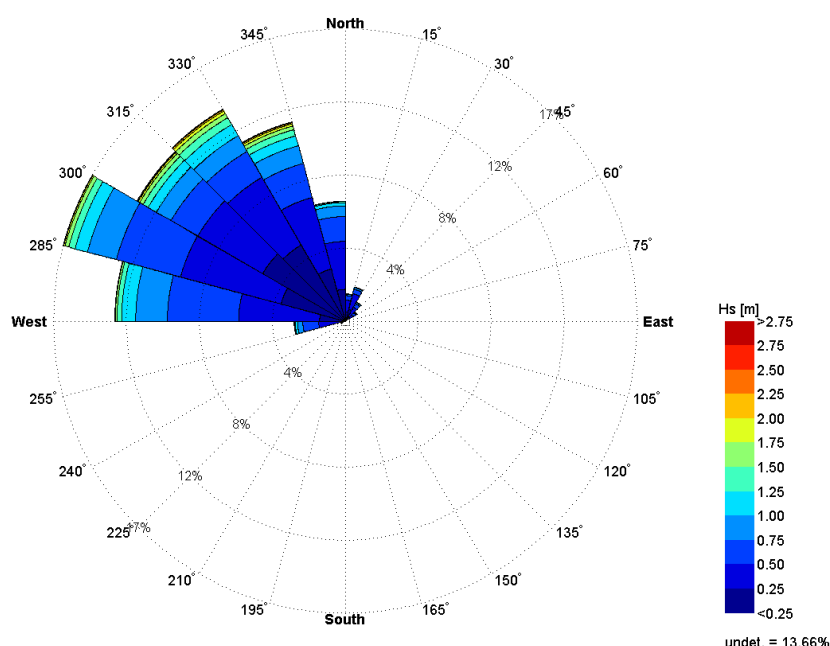
4.1.1 Gebruikte golfdata

Voor het opstellen van een representatief golfklimaat is allereerst beschikbare golfdata van een locatie nabij Cadzand geanalyseerd. Golfdata van de jaren 2000 tot en met 2005 voor meetlocatie CADW afkomstig van Hydro Meteo Centrum Zeeland (HMCZ) is daartoe gebruikt.

In Figuur 4.1 en Tabel 4.1 is de gemeten golfhoogte uitgezet tegen de gemeten golfrichting. Opvallend is dat er geen golven zijn met een golfrichting tussen de 60 en 240 graden. Gezien de oriëntatie van de kust houdt dit in dat alle golven afkomstig zijn van zee. Het overgrote merendeel van de golven komt uit westelijke tot noordelijke richting. Golfhoogtes hoger dan 2 m komen nauwelijks voor.

Tabel 4.1: Golfhoogte versus golfrichting voor Cadzand voor de periode 2000-2005

	Golfrichting [graden noord]										
Hs [m]	onbep.	-15-15	15-45	45-75	75-225	225-255	255-285	285-315	315-345	Totaal	Cumulatief
onbep.	13.3%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.1%	0.1%	13.7%	100.0%
0.00-0.25	0.0%	3.0%	1.1%	0.1%	0.0%	0.0%	1.6%	9.0%	8.3%	23.1%	86.3%
0.25-0.50	0.0%	4.3%	1.5%	0.5%	0.0%	0.1%	5.3%	10.4%	8.6%	30.8%	63.2%
0.50-0.75	0.0%	2.1%	0.5%	0.2%	0.0%	0.0%	4.6%	5.8%	3.6%	16.9%	32.4%
0.75-1.00		0.9%	0.2%	0.1%	0.0%	0.0%	2.0%	2.7%	2.1%	7.9%	15.5%
1.00-1.25		0.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.9%	1.3%	1.3%	3.8%	7.6%
1.25-1.50		0.1%	0.0%			0.0%	0.3%	0.7%	0.8%	1.9%	3.8%
1.50-1.75	0.0%	0.0%				0.0%	0.1%	0.4%	0.5%	1.1%	1.9%
1.75-2.00	0.0%	0.0%				0.0%	0.0%	0.2%	0.3%	0.5%	0.9%
2.00-2.25							0.0%	0.1%	0.2%	0.2%	0.4%
2.25-2.50		0.0%						0.0%	0.1%	0.1%	0.1%
>2.50								0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Totaal	13.3%	10.7%	3.4%	0.9%	0.0%	0.3%	14.8%	30.7%	25.9%	100.0%	



Figuur 4.1: Golfroos voor Cadzand voor de periode 2000-2005

4.1.2 Vertaling naar langtransport

Om een representatief klimaat te kiezen dat dezelfde morfologische effecten heeft als het daadwerkelijke golfklimaat, wordt een analyse gemaakt van het langtransport. De CERC-formulering (zie Van der Velden, 2000) is een empirische formulering die het langtransport ($\text{m}^3 \text{m}^{-1} \text{s}^{-1}$) berekend op basis van golfrichting en hoogte in de brekerzone. Hieruit volgt dat het van 2000 tot 2005 opgetreden golfklimaat een transport van $0,2 \text{ Mm}^3 \text{m}^{-1}$ per jaar in westelijke richting en een transport van $0,4 \text{ Mm}^3 \text{m}^{-1}$ per jaar in oostelijke richting veroorzaakt. Netto is dit een transport van $0,2 \text{ Mm}^3 \text{m}^{-1}$ per jaar in oostelijke richting, wat overeenkomt met de onderhoudsbehoefte, zie paragraaf 2.1.

4.1.3 Bepaling representatieve golfcondities Cadzand-Bad

De mate van vereenvoudiging wordt bepaald door de lengte van de uiteindelijke morfologische berekening. In principe moet iedere golfconditie samenvallen met een geheel getij, zodat iedere combinatie van getij (eb en vloed) en golven wordt meegenomen. Aangezien er 28 getijden in een doortij-springtijcyclus zitten, is besloten ook 28 golfcondities toe te passen, voor ieder getij één.

De golfcondities worden bij iedere doortij-springtij-cyclus anders opgelegd, zodat bijvoorbeeld niet steeds een bepaalde golfconditie samenvalt met springtij. Iedere conditie dient dus – minimaal – zo vaak voor te komen als één getij per 28 (3,6%). Om tot een representatief klimaat te komen is de golfrichting opgedeeld in sectoren van 30 graden. Omdat er geen golven optreden met een golfrichting tussen de 60 en 240 graden, zijn deze sectoren vanzelfsprekend achterwege gelaten.

Vervolgens is voor alle binnen de sectoren vallende transporten en gewogen middeling gemaakt naar tijd van voorkomen. De gemiddelde golfrichting per sector is in het

representatieve golfklimaat toegepast. Voor dit uiteindelijke gevonden transport is een representatieve golfhoogte gekozen die tot dat transport leidt. Een golfrichting komt twee keer voor: de eerste bijbehorende golfhoogte is de golfhoogte in normale omstandigheden, de tweede bijbehorende golfhoogte representeert een storm. Het opgestelde golfklimaat is weergegeven in Tabel 4.2.

Tabel 4.2: Opgesteld representatief golfklimaat voor Cadzand-Bad.

Conditie	Golfrichting	Golfhoogte	Aantal getijden waarvoor de conditie wordt toegepast
A	15 °N	0,48 m	2
B	45 °N	0,49 m	1
C	255 °N	0,53 m	1
D	285 °N	0,53 m	9
E	315 °N	0,54 m	8
F	345 °N	0,44 m	6
G	315 °N	1,79 m	1

4.1.4 Vertaling naar representatief klimaat SWAN modelrand

De rand van het modeldomein van het SWAN model, zie Figuur 4.2, is verder zeewaarts gelegen dan de locatie van de in de voorgaande paragraaf gebruikte golfmetingen. Om met het SWAN model een correct golfklimaat ter plaatse van Cadzand-Bad te genereren, zijn de gemeten golfhoogtes nabij Cadzand-Bad vergeleken met de golfhoogten van meetlocatie Deurlo, gelegen ter plaatse van de rand van het SWAN modeldomein. De golfhoogte bij Deurlo is gemiddeld 1,56 keer groter dan de golfhoogte bij Cadzand. Om een representatief golfklimaat als randvoorwaarde voor SWAN te generen, is het golfklimaat bij Cadzand-Bad met deze factor vermenigvuldigd. De golfrichting is gelijk gebleven. Het resultaat is weergegeven in Tabel 4.3.

Tabel 4.3: Opgesteld representatief golfklimaat voor de rand van het SWAN model.

Conditie	Golfrichting	Golfhoogte	Aantal getijden waarvoor de conditie wordt toegepast
A	15 °N	0,75 m	2
B	45 °N	0,76 m	1
C	255 °N	0,82 m	1
D	285 °N	0,84 m	9
E	315 °N	0,85 m	8
F	345 °N	0,86 m	6
G	315 °N	2,79 m	1

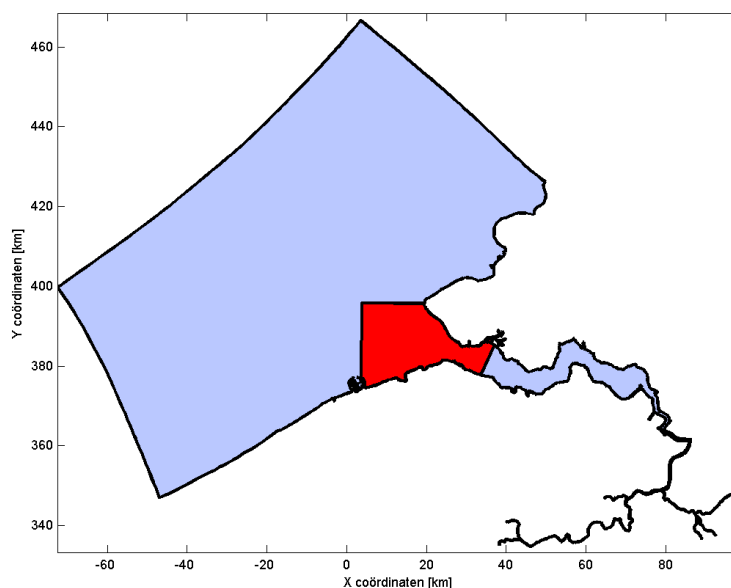
4.2 Opzet SWAN model Cadzand-Bad

In deze paragraaf wordt een SWAN golfmodel opgezet voor Cadzand-Bad. De delen waaruit dit model is opgebouwd komen deels overeen met het hydrodynamische model: een rooster,

randvoorwaarden, bodem en instellingen. Daarbij wordt gebruik gemaakt van waterstands- en stromingsvelden die door het hydrodynamische FINEL2D model worden uitgerekend. In deze paragraaf worden deze elementen besproken.

4.2.1 Domein en randvoorwaarden

Het SWAN modeldomein is kleiner dan het domein van het hydrodynamische model. Het domein van het SWAN model en het domein van het FINEL2D Westerschelde model zijn weergegeven in Figuur 4.2.



Figuur 4.2: Het SWAN modeldomein, met rood weergegeven. Het blauw gearceerde gebied beslaat het FINEL2D Westerschelde modeldomein.

Het golfklimaat als gepresenteerd in Tabel 4.3 wordt op de noordelijke en westelijke rand van het SWAN model opgelegd. Golven kunnen ook vanuit de Westerschelde het model inlopen. Deze zijn echter niet relevant voor morfologische ontwikkelingen bij Cadzand-Bad en worden dus niet opgelegd. De golven worden uniform op de randen van het SWAN model opgelegd.

4.2.2 Rekenrooster

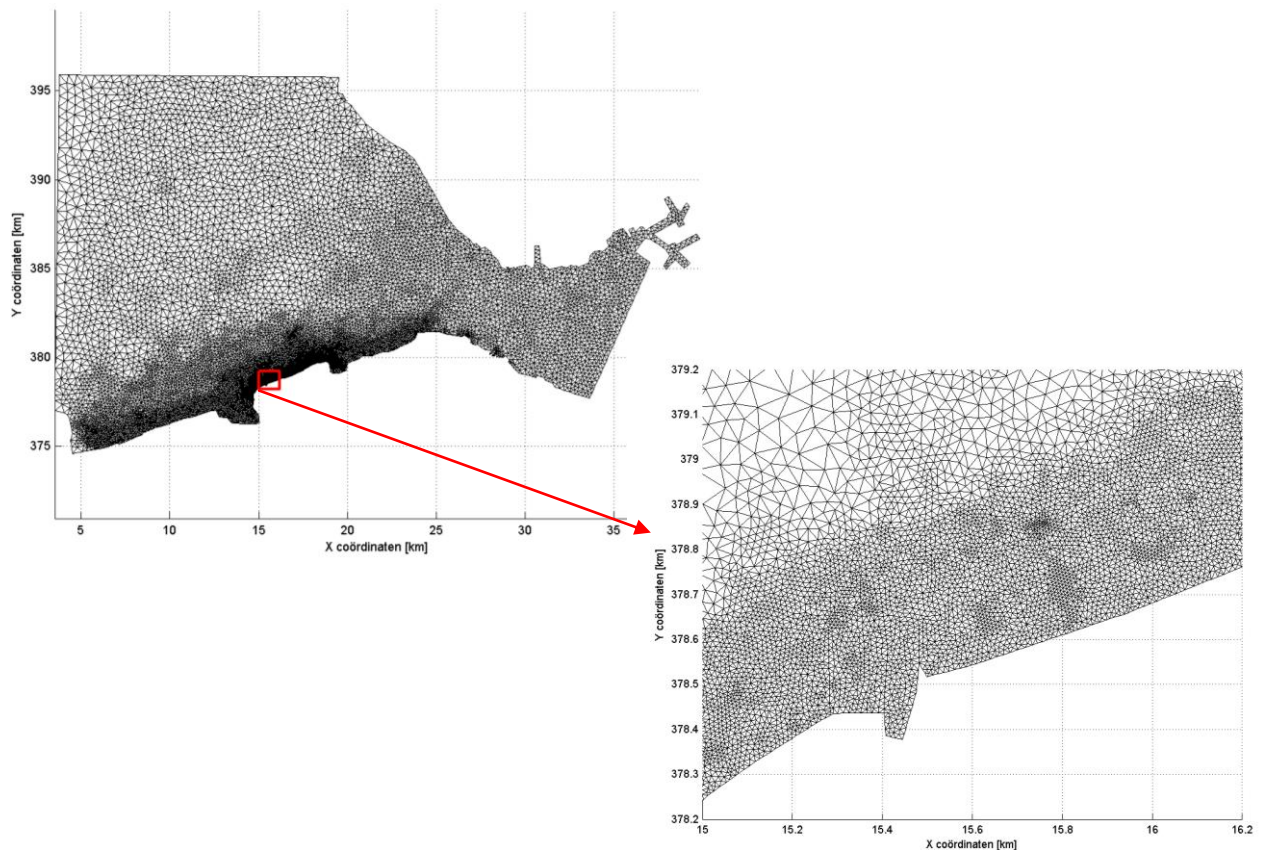
SWAN kan overweg met ongestructureerde driehoeksroosters, en om afwijkingen door interpolatie van en naar het FINEL2D rooster zo klein mogelijk te houden, is er voor gekozen het SWAN rooster zoveel mogelijk identiek aan het FINEL2D rooster te maken. Daartoe zijn een deel van de randen, de interne randen en afmetingen van de roosterzellen uit FINEL2D overgenomen, en als invoer meegegeven aan TRIANGLE. De roosters zijn niet identiek, maar wel vergelijkbaar.

Aan de westrand van het SWAN rooster zijn de elementen 480 m groot. Aan de noordrand en in het grootste deel van het verdere modeldomein bedraagt de celgrootte 320 m. Wanneer de kust van Cadzand-Bad genaderd wordt neemt de grootte van de cellen nog verder af naar 80 m. Ter plaatse van Cadzand-Bad zelf bedraagt de celgrootte 10 m. Een

overzicht van het rekenrooster is gegeven in Figuur 4.3.

4.2.3 Bodem-, waterstand- en stromingsvelden

De bodem, waterstand en stroming worden allen uit het gekoppelde hydromorfologische FINEL2D verkregen. Met behulp van een matlabroutine worden deze velden automatisch van het driehoeksrooster van FINEL2D naar het driehoeksrooster van SWAN geïnterpoleerd.



Figuur 4.3: SWAN rekenrooster

4.2.4 Dammen als obstacles

De strekdammen op het strand van Zeebrugge tot Breskens zijn in het SWAN model opgenomen als obstacles. De golftransmissie over de dam is afhankelijk van de inkomende golfconditie. De hogere havendammen bij Cadzand-Bad zelf zijn eveneens op deze manier geïmplementeerd. De hoogte van de dammen wordt per variant in hoofdstuk 6 besproken.

4.2.5 Validatie SWAN model en overige instellingen

Het SWAN model is vanwege de hoge tijdsdruk op het project niet uitgebreid gevalideerd. Desondanks komt de golfhoogte uit de SWAN resultaten ter plaatse van Cadzand aardig goed overeen met de golfhoogte afkomstig uit de golfmetingen ter plaatse van Cadzand. Daarbij moet gezegd worden dat de *default* instellingen van het SWAN model zijn gebaseerd op een uitgebreide toepassing van deze modelsoftware voor uiteenlopende condities. De ervaring leert dat deze invoer over het algemeen leidt tot realistische voorspellingen van de

golfhoogte.

De volgende (standaard) instellingen zijn gebruikt:

- 3^e generatie mode
- Bodemfrictie: JONSWAP; cfjon coefficient: $0.039 \text{ m}^2\text{s}^{-3}$
- Triad golf-golf interactie staat aan (met default instellingen).

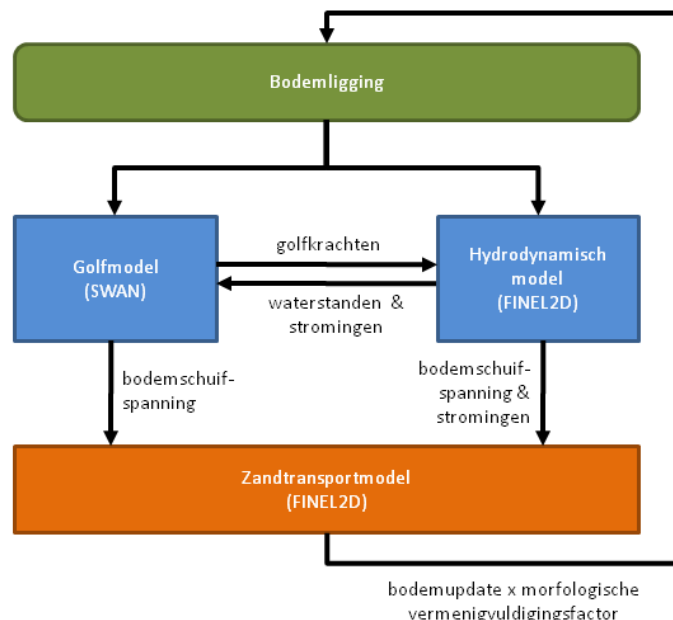
Er is gerekend met SWAN versie 40.85. Zie de SWAN manual voor een verdere beschrijving van de diverse input parameters (TU Delft, 2011).

5 OPZET FINEL2D-SWAN MORFOLOGISCH MODEL

De effecten van verschillende varianten op de morfologie kunnen worden bepaald met een morfologisch model van Cadzand-Bad. In dit hoofdstuk wordt de opzet en validatie van dit morfologisch model behandeld.

5.1 Gekoppeld FINEL2D-SWAN model

Er is een gekoppeld FINEL2D-SWAN morfologisch model opgezet dat bestaat uit drie – min of meer – afzonderlijk delen. Het hydrodynamisch model (onderdeel van FINEL2D) rekent stromingen en waterstanden uit. Het golfmodel (SWAN) van de monding van de Westerschelde simuleert golven en golfkrachten. Stromingen en bodemschuifspanning uit het hydrodynamisch model, en bodemschuifspanning uit het golfmodel worden toegepast in het sedimenttransportmodel (onderdeel van FINEL2D). Het sedimenttransportmodel bepaalt de bodemverandering (die wordt vermenigvuldigd met een versnellingsfactor) welke wordt meegenomen in de invoerbodem van de volgende iteratie van zowel het hydrodynamisch als het golfmodel. Zie Figuur 5.1 voor een schematisering van het gekoppelde model.



Figuur 5.1: Overzicht gekoppeld FINEL2D-SWAN morfologisch model.

Er bestaat een interactie tussen stroming en golven. Ten eerste kunnen golven stroming beïnvloeden door golfgedreven stroming, en ten tweede kunnen stromingen en waterstanden golven beïnvloeden. Deze interacties worden periodiek verwerkt door informatie tussen het golfmodel en het hydrodynamische model uit te wisselen.

Vanwege de grote rekentijden die benodigd zijn voor dergelijke modellen is het noodzakelijk om een morfologische versnellingsfactor te gebruiken. De berekende bodemontwikkeling wordt vermenigvuldigd met deze versnellingsfactor. De gebruikte factor is in dit geval 49,5. Deze versnellingsfactor is gevonden tijdens het kalibreren van het morfologisch model van de Noord-Hollandse kust (Svašek Hydraulics, 2009). Concreet betekent dit dat een doottij-springtij cyclus van ongeveer 14 dagen wordt opgeschaald naar 2 jaar.

Voor het FINEL2D Westerschelde model wordt meestal gebruik gemaakt van een versnellingsfactor van 24,75 (Dam, 2006). Vanwege de hoge tijdsdruk op het project is een kortere rekentijd echter wenselijk. De modelresultaten van een simulatie met een versnellingsfactor van 24,75 zijn vergeleken met de modelresultaten met een versnellingsfactor van 49,5. Uit deze vergelijking volgt dat het aanpassen van de versnellingsfactor niet tot significante verschillen in de morfologische ontwikkeling leidt.

Gerekend wordt met het werkelijke astronomisch getij op de rand van het model. Dit betekent dat de waterstanden en stromingen in het modeldomein de gehele astronomische cyclus zullen meemaken. Dit astronomische getij wordt gecombineerd met het golfklimaat zoals is beschreven in het vorige hoofdstuk.

5.2 Validatie morfologie Cadzand-Bad

In hoofdstuk 2 is geconcludeerd dat de erosie van de kust bij Cadzand ongeveer $0,2 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ is. Dit gegeven kan worden gebruikt om het morfologisch model te kalibreren. Vanwege de tijdsdruk op het project zijn echter geen kalibratieberekeningen uitgevoerd. Wel is de autonome situatie doorgerekend en met de erosiegegevens vergeleken om de nauwkeurigheid van het morfologische model te kwalificeren. De modelinstellingen gebruikt voor het sedimenttransportmodel zijn gepresenteerd in Tabel 5.1.

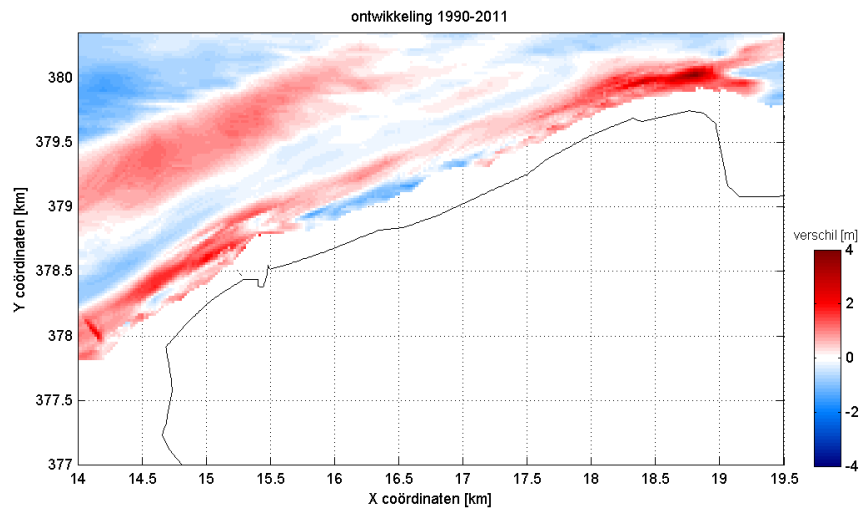
Tabel 5.1: Instellingen afgeregeld morfologisch model

Sediment transport formule	Engelund-Hansen (omgeschreven voor golven)
Morfologische ruwheid golven (voor bodemschuifspanning)	0,01 m
Morfologische ruwheid stroomsnelheid (voor bodemschuifspanning)	0,01 m
Versnellingsfactor	49,5
Korrelgrootte (d_{50})	300 μm in de monding
Valsnelheid	1,5 cm/s
Update golfveld	3 uur hydraulisch
Inspelen waterbeweging	1 dag hydraulisch
Startbodem	Uit 2011
Inspelen morfologie	1 jaar morfologisch
Niet-erodeerbare laag	Volgens TNO/RIKZ en Dam (2012)
Morfologisch actief gebied	Van Zeebrugge tot aan Westkapelle, en tot aan Vlissingen

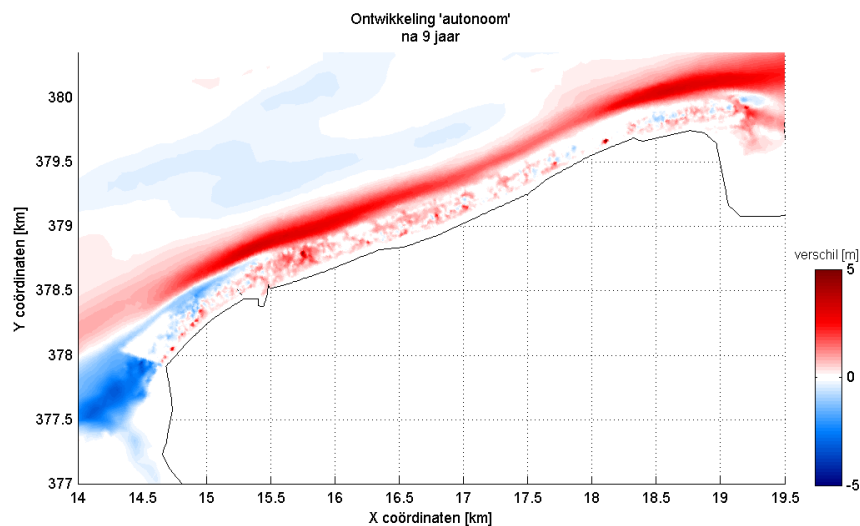
In Figuur 5.2 is de gemeten morfologische ontwikkeling tussen 1990 en 2011 in het interessegebied weergegeven. Figuur 5.3 geeft de morfologische ontwikkeling aan het eind van 10 jaar morfologisch simuleren. Het eerste jaar morfologisch rekenen, dat dient om de morfologie in laten spelen, is niet in de resultaten meegenomen. De figuur presenteert dus 9 jaar morfologische ontwikkeling. Zowel het model als de meting vertoont depositie langs het grootste deel van de kust. Halverwege tussen Cadzand-Bad en de Zwarte Polder is de sedimentatie in de modelresultaten veel minder sterk. Dit komt overeen met de meting, waar op sommige plaatsen zelf lichte erosie gemeten is.

De voornaamste afwijking vindt plaats ter plaatse van het Zwin. De meting vertoont depositie, waar de modelresultaten erosie vertonen. Door in de modelberekening het

suppleren van de Belgische kust in beschouwing te nemen, wat in de huidige berekening niet gedaan is, wordt de erosie van het Zwin in de modelresultaten vermindert. Wanneer satellietbeelden van het Zwin worden bekeken, zie Figuur 5.4, is ten oosten van de laatste strekdam op Belgisch grondgebied een knik in de kust aanwezig. Deze knik duidt, in tegenstelling tot wat is weergegeven in Figuur 5.2, op erosie. Wanneer men specifiek geïnteresseerd is in de ontwikkeling van het Zwin, wordt aanbevolen de werkelijke ontwikkeling van het Zwin nader te onderzoeken.



Figuur 5.2: Gemeten morfologische ontwikkeling van het interessegebied tussen 1990 en 2011. Positief houdt in dat sedimentatie is opgetreden; blauw erosie.



Figuur 5.3: Berekende morfologische ontwikkeling in het interessegebied na 9 jaar simuleren. Positief houdt in dat sedimentatie is opgetreden; blauw erosie.

Wanneer de depositie in het interessegebied, zie Figuur 5.2 en Figuur 5.3, nader geïnspecteerd wordt, valt op dat de depositie in de modelresultaten (Figuur 5.3) hoger is dan in de meetresultaten (Figuur 5.2), zeker wanneer wordt meegenomen dat de simulatieperiode korter is dan de tijd tussen de twee peilingen. Daarnaast is de

waargenomen depositie over een breder deel van de vooroever verspreid dan de modelresultaten weergegeven. Lokaal zijn er dus afwijkingen tussen het model en de meting, maar over het algemeen genomen kan het patroon redelijk goed berekend worden door het model.

In paragraaf 2.1 is aangegeven dat bij de kust bij Cadzand-Bad gemiddeld jaarlijks $0,2 \text{ Mm}^3$ gesuppleerd wordt. In de modelsimulatie zijn suppleties meegenomen door de modelbodem nabij de kust elk jaar terug te brengen tot minimaal de hoogte die in de startbodem is opgegeven. De jaarlijkse suppletie die in de modelsimulatie is uitgevoerd ligt tussen de $0,3 \text{ Mm}^3$ en $0,4 \text{ Mm}^3$. Het model overschat dus ook de erosie van het strand iets, maar de orde grootte is goed.



Figuur 5.4: Het Zwin (bron: Google Earth)

Uit bovenstaande kan worden geconcludeerd dat het model de erosie- en depositiepatronen redelijk goed weergeeft. Zowel de erosie als de depositie wordt met ongeveer een factor 2 overschat, d.w.z. de morfologische ontwikkeling gaat te snel, maar de orde grootte van de erosie en depositie is acceptabel. Door het model verder te kalibreren, dus door modelinstellingen als bijvoorbeeld de morfologische ruwheid aan te passen, kunnen de resultaten verbeterd worden. Vanwege de tijdsdruk op dit project is een gedetailleerde kalibratie echter niet uitgevoerd.

Voor een morfologisch model in het algemeen zijn de waargenomen verschillen van ongeveer een factor 2 alleszins acceptabel omdat de volumes in dezelfde orde grootte liggen (geen factor 10 groter of kleiner), en omdat het globale beeld goed door het model berekend wordt. Daarbij worden de modelresultaten voor de verschillende scenario's (zie paragraaf 2.2 en paragraaf 6.1) ten opzichte van de hier reeds gepresenteerde autonome situatie beschouwd. Het relatieve effect van de ingreep wordt zodoende getoond, waarmee de gevoeligheid voor afwijkingen van het model verkleind wordt.

5.3 Conclusie morfologisch model

Uit de resultaten gepresenteerd in dit hoofdstuk blijkt dat het morfologisch model FINEL2D goed in staat is om de opgetreden erosie en depositie te berekenen. Enige verschillen

tussen model en meting zijn desondanks aanwezig. De verschillen zijn acceptabel omdat het globale beeld door het FINEL2D model berekend kan worden en de orde grootte van de erosie en depositie correct is.

6 SIMULATIE SCENARIO'S

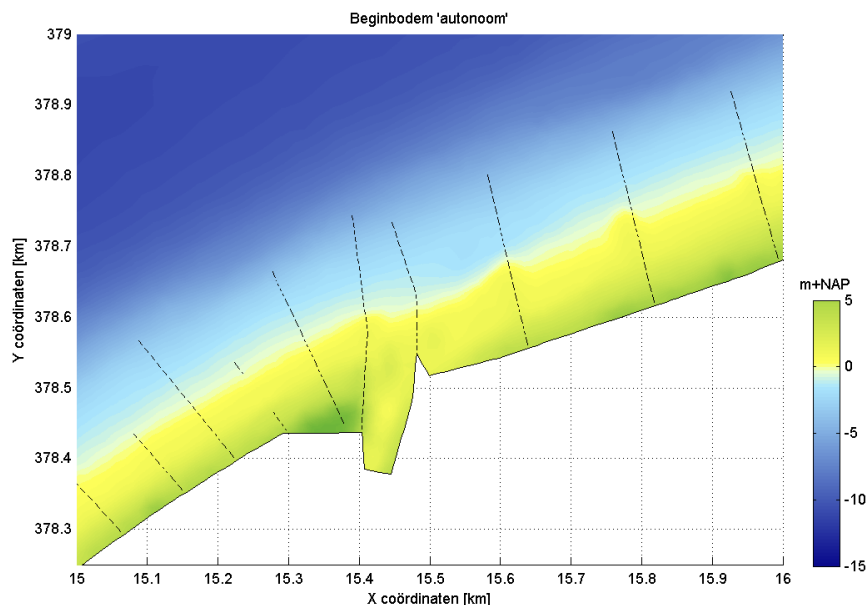
In dit hoofdstuk worden verschillende scenario's beschouwd. Allereerst wordt in paragraaf 6.1 de implementatie van de verschillende scenario's besproken. In paragraaf 6.2 worden de uitkomsten van de scenario's behandeld, en de in paragraaf 1.2 geformuleerde onderzoeksvragen beantwoord. Op de onderhoudsbehoefte van het havenbekken wordt in paragraaf 6.3 ingegaan. Conclusies met betrekking tot de verschillende scenario's worden geformuleerd in paragraaf 6.4.

6.1 Implementatie scenario's

6.1.1 Autonome situatie

De autonome situatie is omschreven in paragraaf 2.1. Voor de simulatie van de autonome situatie is de modelbodem zoals omschreven in paragraaf 3.1.3 en weergegeven in Figuur 3.3 gebruikt. De strekdammen van Zeebrugge tot aan Breskens zijn in het model opgelegd in de vorm van overlaten (weirs), zie paragraaf 3.1.4. Hierbij is uitgegaan van een hoogte van NAP +3,5 m op het strand en een hoogte van NAP -2 m aan het zeewaartse uiterste van de strekdammen. Ook de strekdammen aan weerszijden van de suatiegeul zijn op deze wijze gemodelleerd. De startbodem inclusief strekdammen voor de autonome situatie is weergegeven in Figuur 6.1.

In de huidige situatie wordt het strand om de paar jaar gesuppleerd. In de modelsimulatie is deze suppletie meegenomen. Aan het einde van elk morfologisch jaar wordt het strand en de vooroever tot aan het einde van de strekdam hersteld tot aan het bodemniveau van de startbodem. Wanneer het strand in de berekening hoger is komen te liggen dan de startbodem, wordt uiteraard niet gesuppleerd. De zoetwaterlozing van het gemaal en de spuisluis is niet in de modelberekening meegenomen.



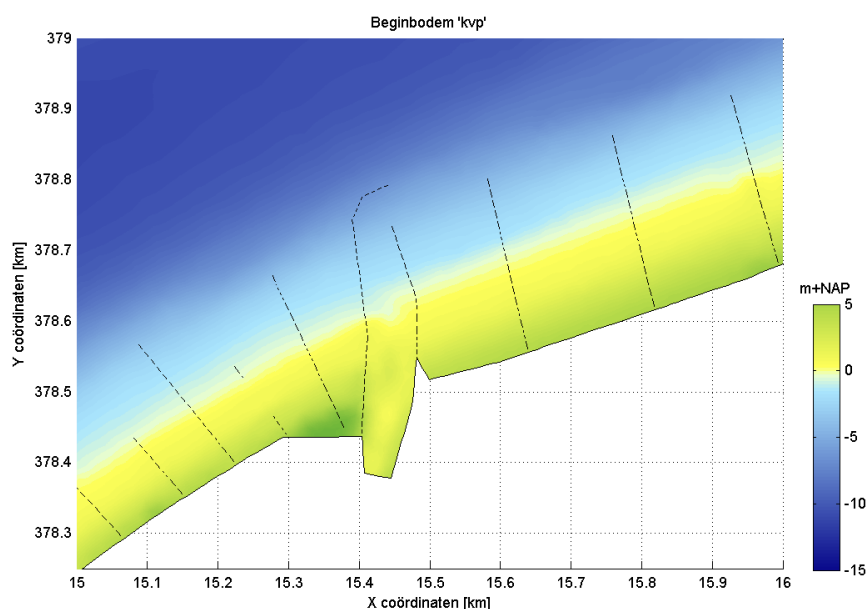
Figuur 6.1: Startbodem autonome situatie. De overlaten zijn door middel van zwarte stippellijnen in de figuur opgenomen.

6.1.2 KVP variant

De KVP variant is omschreven in paragraaf 2.2.1. Voor de simulatie van de KVP variant is de autonome situatie, zoals besproken in voorgaande paragraaf, als uitgangspunt genomen en zijn enkele wijzigingen aangebracht.

De bestaande dammen aan weerszijden van de suatiegeul worden versterkt, verlengd en verhoogd. Hierbij wordt de kruinhoogte van zowel de oostelijke als de westelijke havendam NAP +5.5 m. Eveneens wordt er een haak aan de westelijke dam gemaakt om golfdoordringing te beperken. Aan de oostzijde van de suatiegeul wordt een kustlijn zeewaarts verplaatst. Met betrekking tot de kustuitbouw is een aanname gedaan. De startbodem inclusief sterkdammen voor de KVP variant is weergegeven in Figuur 6.2.

De zandsuppleties zijn in deze variant op gelijke wijze geïmplementeerd als bij de hiervoor besproken autonome variant.



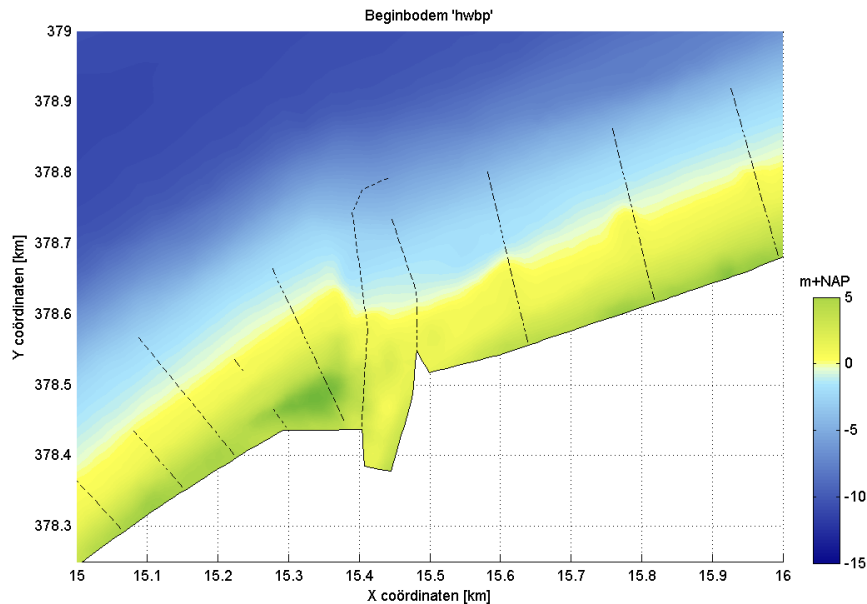
Figuur 6.2: Startbodem KVP variant. De overlaten zijn door middel van zwarte stippellijnen in de figuur opgenomen.

6.1.3 HWBP variant

De HWBP variant is omschreven in paragraaf 2.2.2. Voor de simulatie van de HWBP variant is de autonome situatie, zoals besproken in paragraaf 6.1.1, als uitgangspunt genomen en zijn enkele wijzigingen aangebracht.

De bestaande dammen aan weerszijden van de suatiegeul worden versterkt, verlengd en verhoogd. Hierbij wordt de kruinhoogte van de oostelijke havendam NAP +5 m en de kruinhoogte van de westelijke havendam NAP +7.5 m. Eveneens wordt er een haak aan de westelijke dam gemaakt om golfdoordringing te beperken. Aan de westzijde van de suatiegeul wordt de kustlijn zeewaarts verplaatst. De startbodem inclusief sterkdammen voor de HWBP variant is weergegeven in Figuur 6.3.

De zandsuppleties zijn in deze variant op gelijke wijze geïmplementeerd als bij de in paragraaf 6.1.1 besproken autonome variant.



Figuur 6.3: Startbodem HWBP variant. De overlaten zijn door middel van zwarte stippellijnen in de figuur opgenomen.

6.1.4 Smalle havenvariant

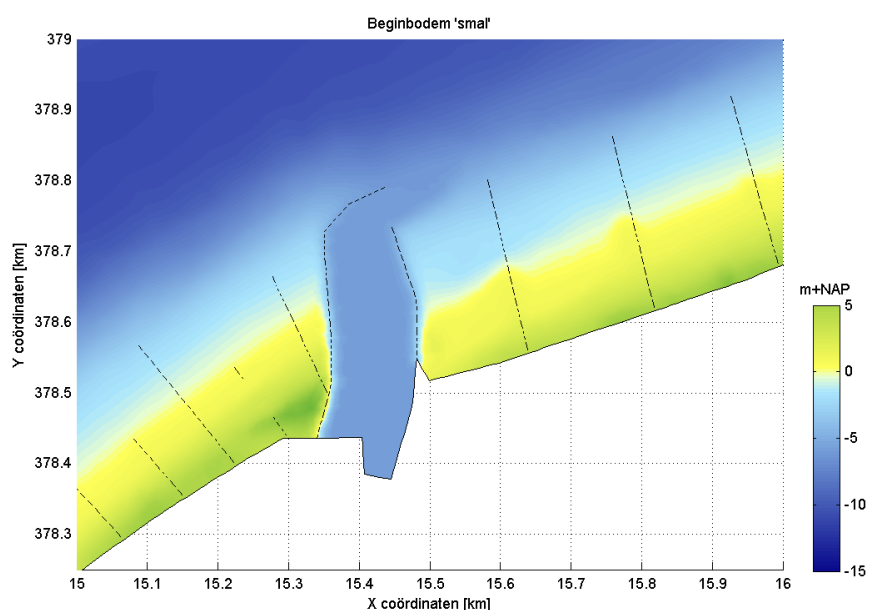
De smalle havenvariant is omschreven in paragraaf 2.2.3. Voor de simulatie van de smalle havenvariant is de HWBP variant, zoals besproken in paragraaf 6.1.3, als uitgangspunt genomen en zijn enkele wijzigingen aangebracht.

In de smalle havenvariant is de oostelijke havendam in vergelijking met de HWBP variant gelijk gebleven. De westelijke havendam is naar het westen verplaatst, waarmee het gebied binnen de strekdammen vergroot is en ruimte voor een haven gecreëerd wordt. Het gebied binnen de sterkdammen, de haven, wordt daarbij verdiept tot NAP -6 m. Vanaf de haven wordt een geul aangelegd die de haven met dieper water verbindt. De minimale diepte die in de geul wordt aangehouden is NAP -6 m. De startbodem inclusief sterkdammen voor de smalle havenvariant is weergegeven in Figuur 6.4.

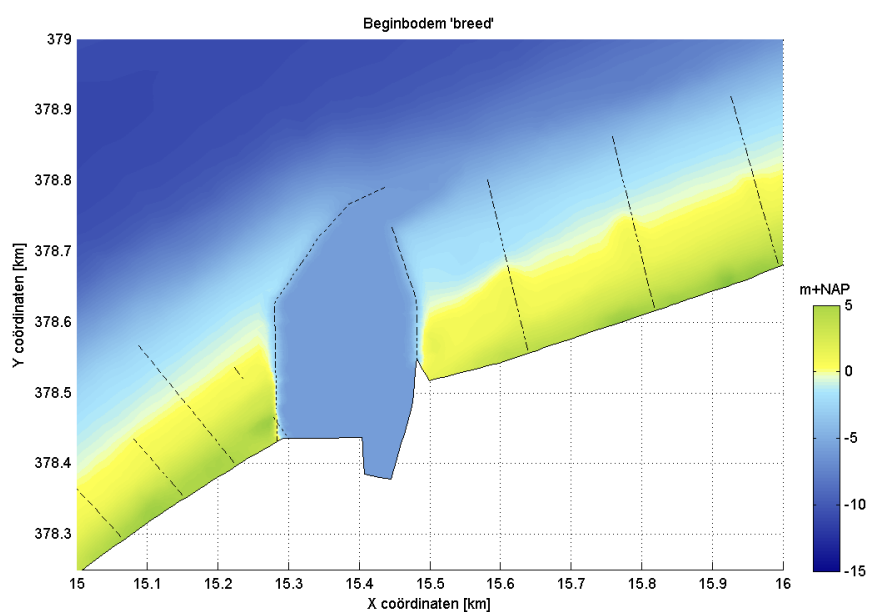
Het uitvoeren van suppleties vindt op dezelfde wijze plaats als bij de hiervoor besproken varianten. De haven en de geul worden in de simulatie op diepte gehouden door middel van het uitvoeren van baggerwerkzaamheden aan het eind van elke morfologisch jaar.

6.1.5 Brede havenvariant

De brede havenvariant is omschreven in paragraaf 2.2.4. Voor de simulatie van de brede havenvariant is uitgegaan van de smalle havenvariant, besproken in paragraaf 6.1.4, waarbij de westelijke havendam verder westwaarts verplaatst is. De startbodem inclusief sterkdammen voor de brede havenvariant is weergegeven in Figuur 6.5.



Figuur 6.4: Startbodem smalle havenvariant. De overlaten zijn door middel van zwarte stippellijnen in de figuur opgenomen.



Figuur 6.5: Startbodem brede havenvariant. De overlaten zijn door middel van zwarte stippellijnen in de figuur opgenomen.

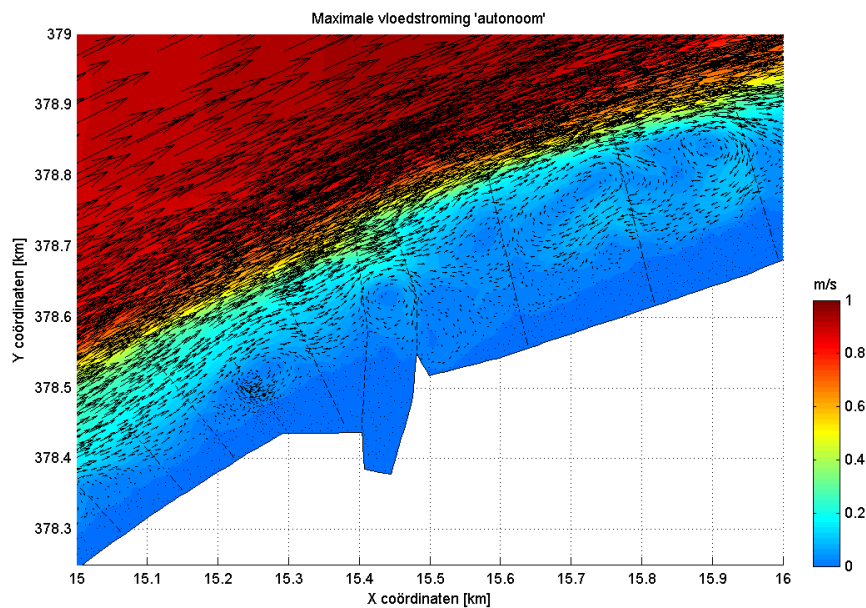
6.2 Uitkomsten scenario's

Deze paragraaf bespreekt de uitkomsten van de verschillende gemodelleerde scenario's, en geeft zo volledig mogelijk antwoord op de in paragraaf 1.2 geformuleerde onderzoeksvragen. Om de effecten van de verschillende ingrepen op de morfologie goed te kunnen kwantificeren, zal de morfologische ontwikkeling van de autonome situatie allereerst beschouwd worden. Voor de andere scenario's zal de relatieve morfologische ontwikkeling

ten opzichte van de autonome situatie behandeld worden.

6.2.1 Autonome situatie

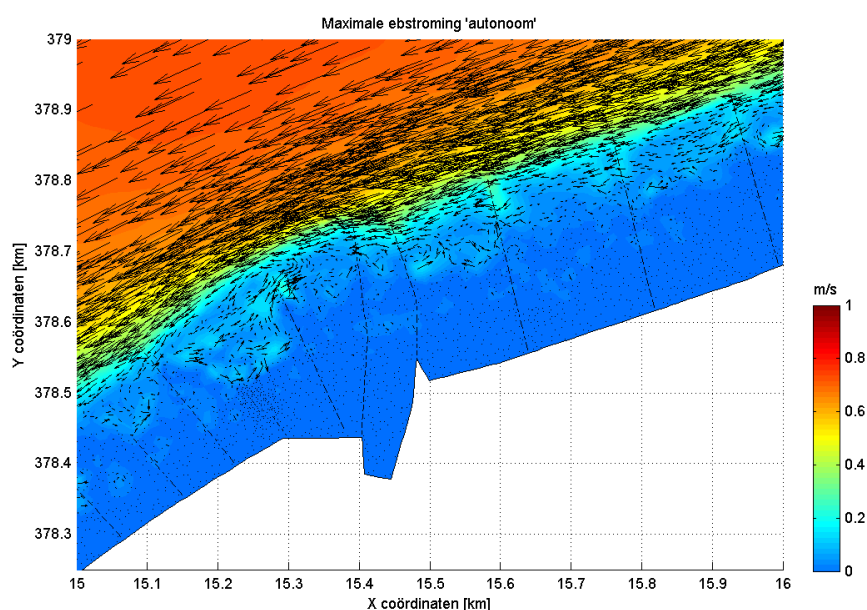
Met behulp van FINEL2D is de stroming in het gehele modeldomein berekend. Hierbij is zowel getijstroming als golfgedreven stroming in de modelberekening meegenomen. Figuur 6.6 en Figuur 6.7 geven de maximale vloedstroming en de maximale ebstroming voor de autonome situatie weer zoals het model deze berekend heeft. De figuren laten zien dat de stroming grotendeels parallel aan de kust loopt. Ter plaatse van de strekdammen ontstaan hier en daar kleine neren, en komen verhoogde stroomsnelheden over de strekdammen heen voor. De effecten bij de strekdammen zijn niet erg uitgesproken.



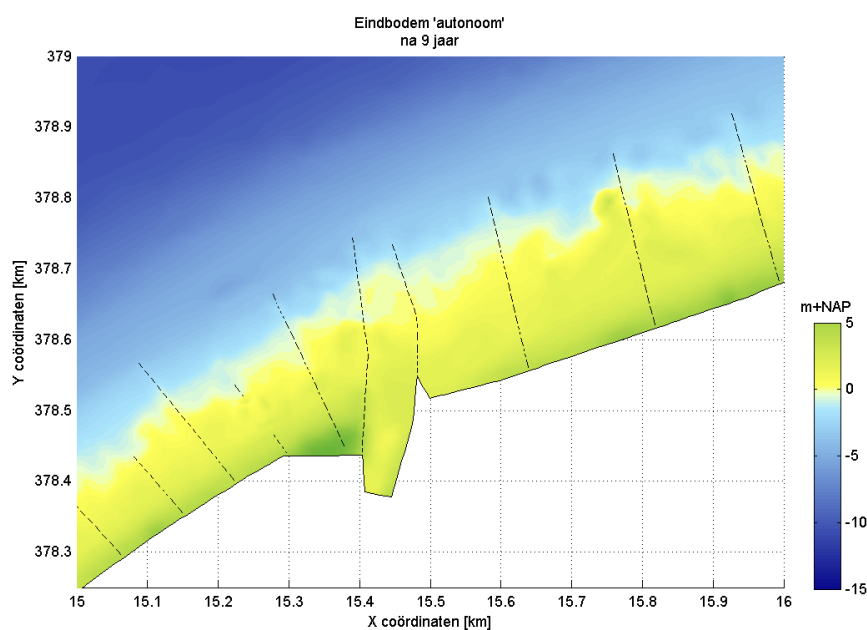
Figuur 6.6: Maximale vloedstroming in interessegebied voor de autonome situatie.

De stroming induceert het sedimenttransport in het morfologisch actieve gebied van het modeldomein, en bepaalt waar erosie en depositie plaatsvinden en daarmee hoe de bodem zich in de loop der tijd ontwikkelt. Figuur 6.8 geeft de modelbodem aan het einde van 10 jaar morfologisch simuleren met behulp van FINEL2D. De morfologische ontwikkeling in deze periode is gegeven in Figuur 6.9. Hierbij is ingezoomd op de kust bij Cadzand-Bad. De morfologische ontwikkeling in een groter deel van het modeldomein is reeds gepresenteerd in Figuur 5.3. Het eerste jaar morfologisch rekenen, dat dient om de morfologie in laten spelen, is niet in de resultaten meegenomen. De figuren presenteren dus 9 jaar morfologische ontwikkeling.

Figuur 6.9 geeft weer dat er vrijwel alleen depositie is opgetreden. Merk op dat de figuur het einde van een morfologisch jaar presenteert en eventuele erosie op het strand en de vooroever door middel van suppleties aan het einde van elk morfologisch jaar wordt gecompenseerd. In paragraaf 5.2 is reeds ingegaan op de werkelijke morfologische trend in het interessegebied, waarbij de ontwikkeling tussen 1990 en 2011 in Figuur 5.2 is weergegeven. De depositie in Figuur 6.9 komt overeen met het patroon in Figuur 5.2.



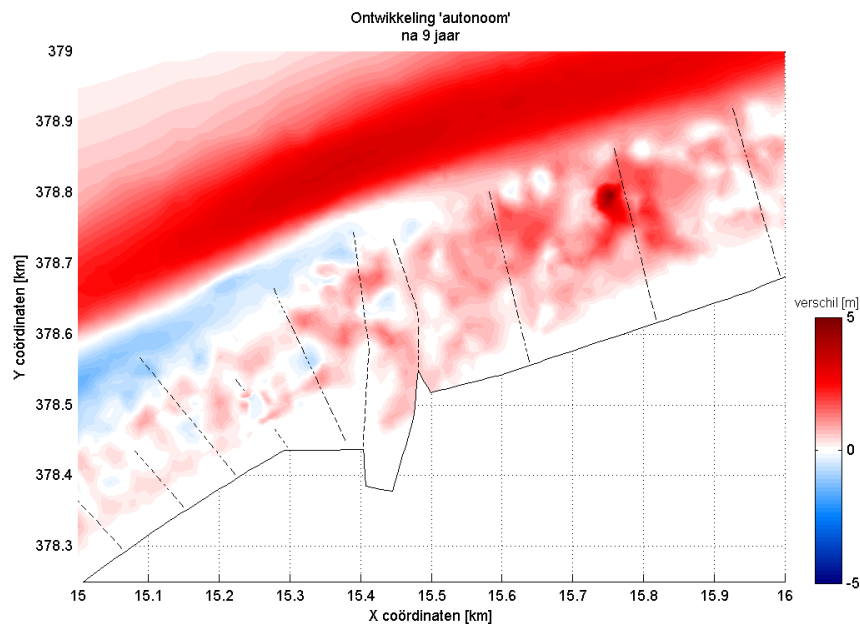
Figuur 6.7: Maximale ebstroming in interessegebied voor de autonome situatie.



Figuur 6.8: Eindbodem autonome situatie na 9 jaar morfologisch simuleren. De zwarte stippellijnen geven de strekdammen weer.

Opvallend in Figuur 6.9 is dat de depositie in de twee kribvakken direct ten oosten van de suatiegeul hoger is dan in de andere kribvakken. Dit is vermoedelijk het gevolg van het niet meenemen van de uitwatering van het gemaal in de modelberekening. Op de luchtfoto, zie Figuur 6.10, valt te zien dat de zoetwaterlozing ook in het eerste kribvak vertroebeling teweeg brengt. De vertroebeling is een indicatie voor verhoogde stroomsnelheden in het betreffende kribvak in vergelijking met de andere kribvakken. De erosie die dit veroorzaakt is dus niet in de modelberekening meegenomen, maar wel merkbaar in de startbodem van de

modelberekening, die ter plaatse van het eerste en in minder mate tweede kribvak een teruggetrokken waterlijn vertoont.



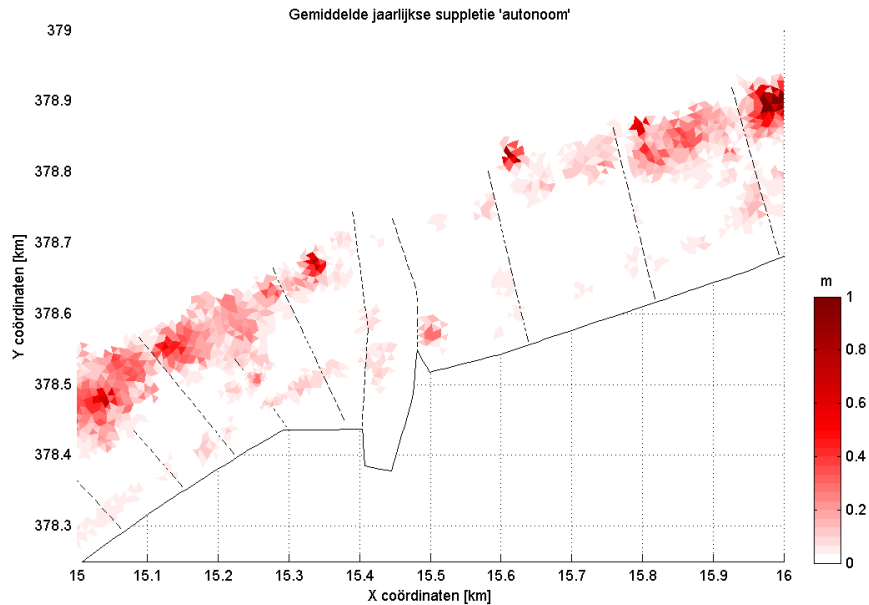
Figuur 6.9: Morfologische ontwikkeling autonome situatie na 9 jaar morfologisch simuleren.



Figuur 6.10: Uitwatering onder vrij verval.

Een meer kwantitatieve manier om de morfologische ontwikkelingen in het interessegebied te beschrijven is door middel van in de modelberekening gesuppleerde hoeveelheden zand. Gedurende de modelberekening is jaarlijks ongeveer $0,35 \text{ Mm}^3$ zand gesuppleerd. Echter, in de eerste twee kribvakken is vanwege het niet meenemen van de uitwatering via het gemaal in de modelberekening meer depositie opgetreden dan in werkelijkheid het geval is, waardoor het suppletievolume dat uit de modelberekening volgt wordt onderschat. De

ruimtelijke verdeling van de gemiddelde jaarlijks uitgevoerd suppletie is weergegeven in Figuur 6.11. Ook hier is te zien dat de suppletie in de twee kribvakken afwijkt van de suppletie in de overige kribvakken.



Figuur 6.11: Gemiddelde jaarlijks uitgevoerde suppletie in de autonome situatie.

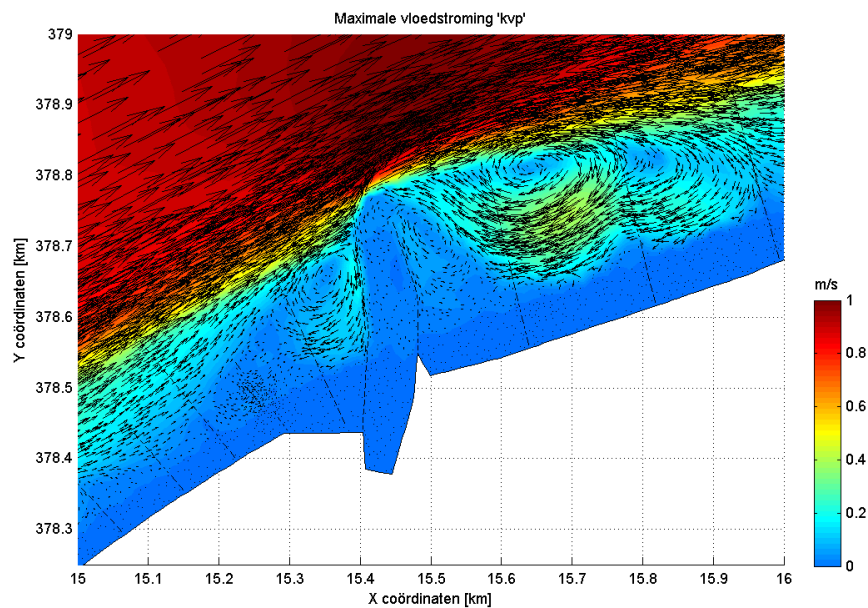
6.2.2 KVP variant

Figuur 6.12 geeft de maximale vloedstroming nabij Cadzand-Bad voor de KVP variant volgend uit de modelsimulatie. In het eerste en tweede kribvak ten oosten van de oostelijke havendam is een neer zichtbaar, die zich deels uitstrekt tot in het derde kribvak. Het ontstaan van de neren is een gevolg van het verhogen van de strekdammen en het aanbrengen van haak in het verlengde van de westelijke strekdam. Door de verhoging van de strekdam kan het water niet meer over de strekdam heen stromen, maar dient het de strekdam te volgen. Aan het uiteinde van de haak, waar de strekdam abrupt eindigt, vindt loslating van de stroming plaats, en ontwikkelt zich een neer.

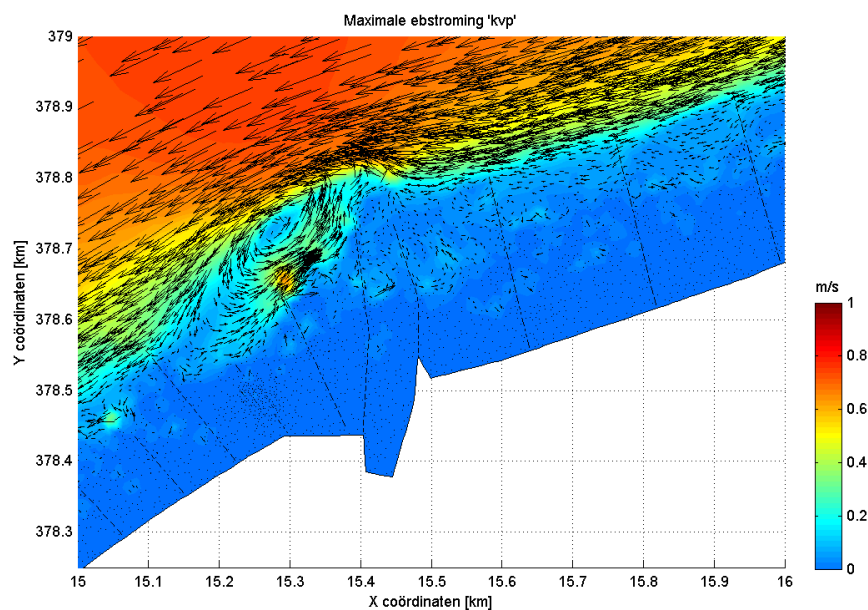
Aan de westzijde van de suatiegeul is eveneens een kleine neer zichtbaar. Daar waar contractie van de stroming bij de haak plaatsvindt, botst de stroming als het ware tegen de dam aan, en wordt deze kleine neer geïnduceerd.

De maximale ebstroming is weergegeven in Figuur 6.13. Ook hier ontstaat een neer achter de constructie. Echter, de strekdam maakt een hoek richting de kust in plaats van dat deze abrupt eindigt, waardoor de loslating iets geleidelijker plaatsvindt en de ontwikkelde neer een stuk kleiner is dan de neer die zich tijdens vloedstroming ontwikkelt.

De modelbodem aan het eind van 9 jaar morfologisch simuleren is afgebeeld in Figuur 6.14. De morfologische ontwikkeling in deze periode is gegeven in Figuur 6.15 en Figuur 6.16, waarbij in Figuur 6.16 is ingezoomd op de kust bij Cadzand-Bad. Het eerste jaar morfologisch rekenen, dat dient om de morfologie in laten spelen, is niet in de resultaten meegenomen. De figuren presenteren dus 9 jaar morfologische ontwikkeling.

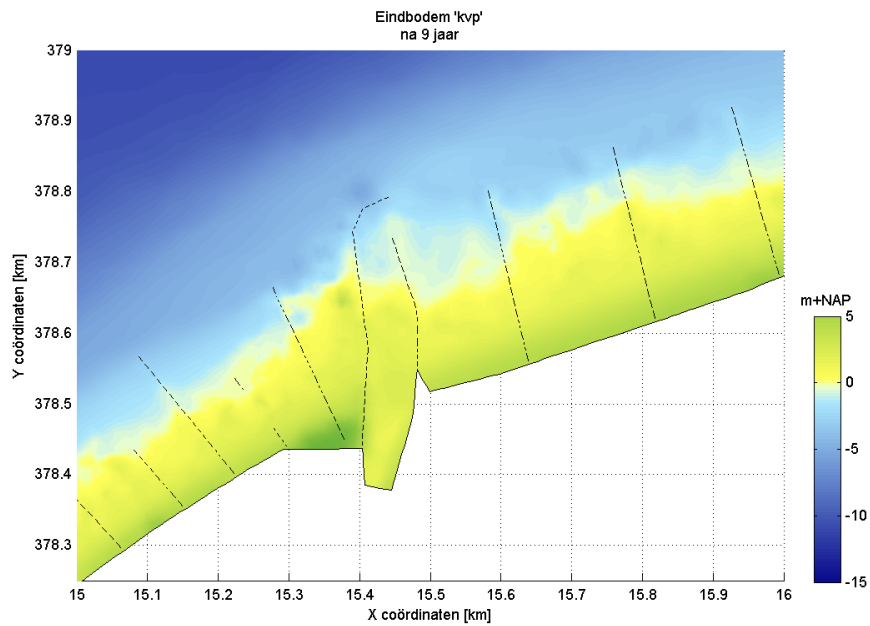


Figuur 6.12: Maximale vloedstroming in interessegebied voor de KVP variant.

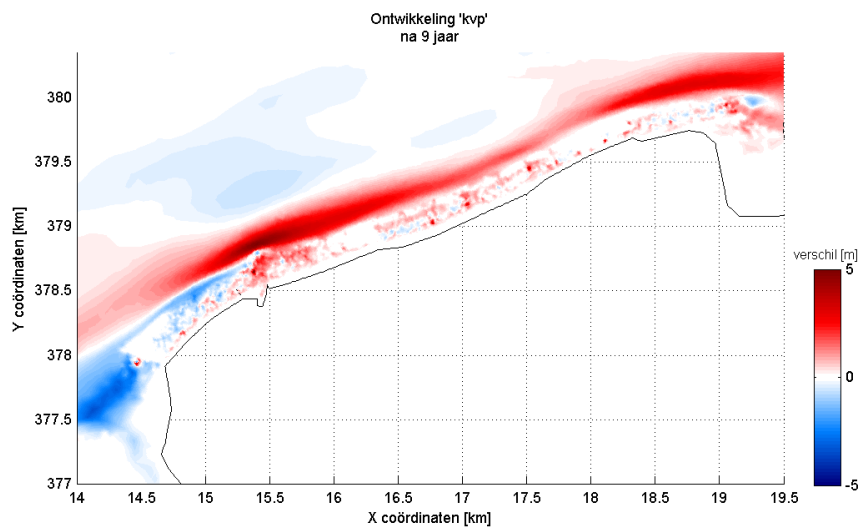


Figuur 6.13: Maximale ebstroming in interessegebied voor de KVP variant.

In Figuur 6.15 is te zien dat ter hoogte van Cadzand-Bad en ter hoogte en ten westen van de Zwarte Polder depositie plaats vinden. In het gebied tussen Cadzand-Bad en de Zwarte Polder vindt nauwelijks depositie plaats. Bij het Zwin volgt erosie uit de modelresultaten, zowel bij de KVP variant als in de autonome situatie, zie Figuur 5.3. De erosie in de KVP variant is ietwat minder hoog dan de erosie van in de autonome situatie, waarmee de invloed van de KVP variant op de ontwikkeling van het Zwin beperkt is.

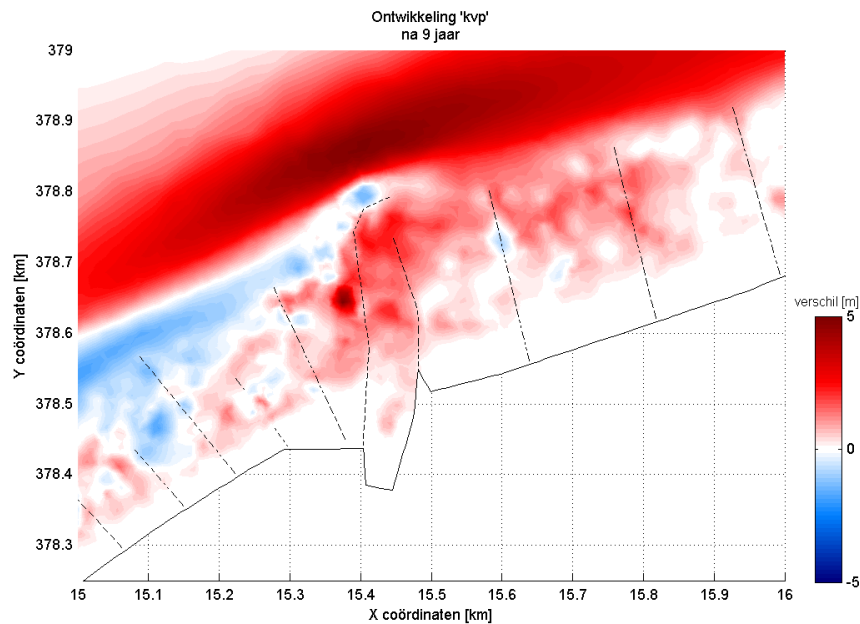


Figuur 6.14: Eindbodem KVP variant na 9 jaar morfologisch simuleren. De zwarte stippellijnen geven de strekdammen weer.

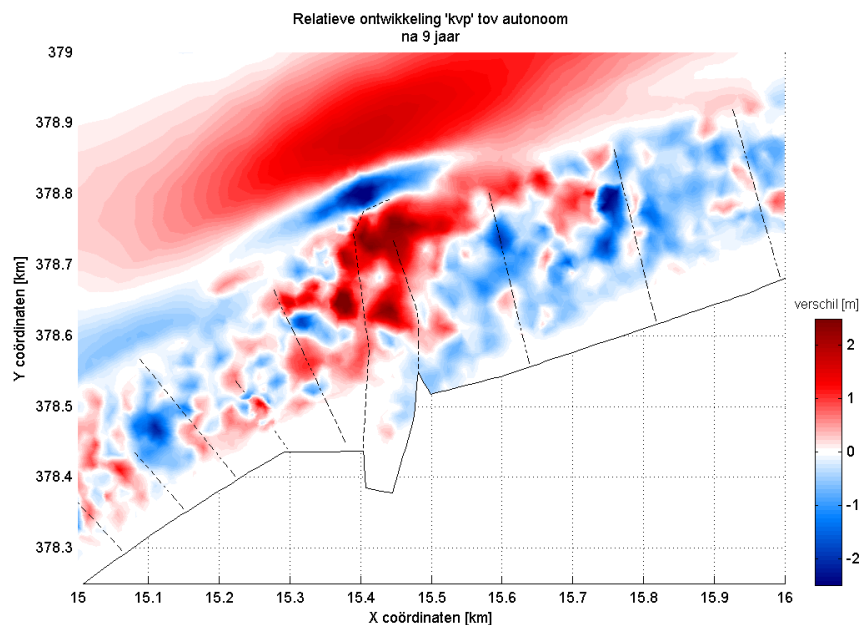


Figuur 6.15: Morfologische ontwikkeling KVP variant na 9 jaar morfologisch simuleren.

Figuur 6.16 laat zien dat evenals in Figuur 6.9, die de morfologische ontwikkeling in de autonome situatie weergeeft, depositie plaatsvindt, en er meer depositie optreedt in de eerste twee kribvakken ten oosten van de suatiegeul dan in andere kribvakken. Opvallend is dat er in absolute zin nauwelijks een ontgrondingskuil ten noorden van de haak ontstaat. Wel is de depositie direct ten noorden van de haak lokaal vrijwel nul. Doordat de strekdammen aan weerszijden van de suatiegeul weinig verder in zee steken dan de omliggende strekdammen is de contractie van de stroming bij de haak beperkt, en nemen de stroomsnelheden lokaal met slechts 9% tot 10% toe. De contractie van de stroming is niet sterk genoeg om in absolute zin een ontgrondingskuil te bewerkstelligen. In relatieve zin kan de vermindering van depositie wel als een ontgrondingskuil beschouwd worden.



Figuur 6.16: Morfologische ontwikkeling KVP variant na 9 jaar morfologisch simuleren, ingezoomd op de kust bij Cadzand-Bad.



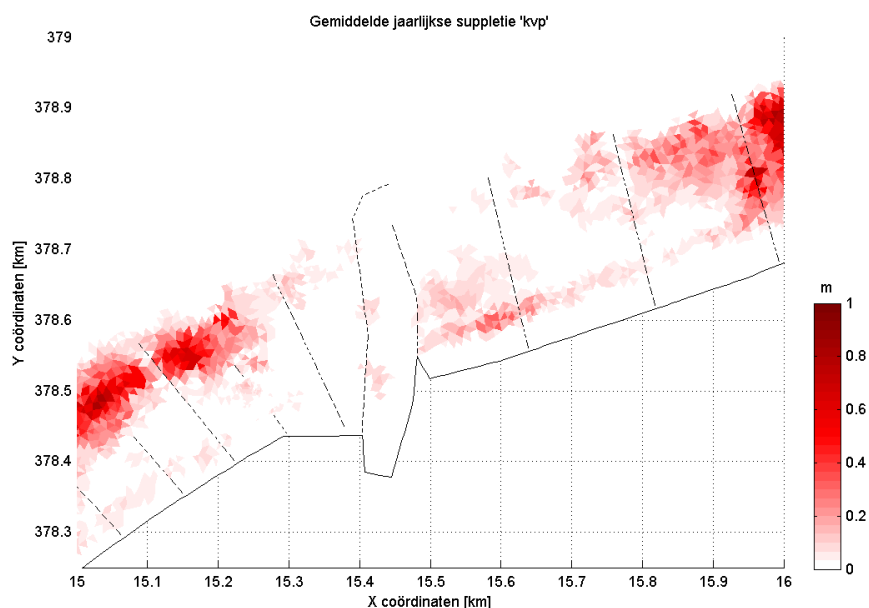
Figuur 6.17: Relatieve morfologische ontwikkeling KVP variant ten opzichte van de autonome situatie na 9 jaar morfologisch simuleren.

Ten opzichte van de morfologische ontwikkelingen in de autonome situatie, verschilt de ontwikkeling in het geval van de KVP variant. Om de verschillen in kaart te brengen is de morfologische ontwikkeling van de autonome situatie afgetrokken van de morfologische ontwikkeling van de KVP variant. Het resultaat is weergegeven in Figuur 6.17, waarbij een positief verschil (rood in de figuur) duidt op meer depositie dan wel minder erosie bij de KVP variant dan bij de autonome situatie, en een negatief verschil (blauw in de figuur) duidt op minder depositie dan wel meer erosie bij de KVP variant. Het verschil in beginbodem van

beide varianten is verdisconteerd in de resultaten.

In Figuur 6.17 is te zien dat in vrijwel alle kribvakken minder depositie plaatsvindt voor de KVP variant dan voor de autonome situatie. Buiten de kribvakken vindt meer depositie plaats, behalve direct ten noorden van de haak, waar juist meer erosie plaatsvindt, en kan worden gezien als relatieve ontgrondingskuil. Dit komt overeen met het uitblijven van depositie op deze locatie, zichtbaar in Figuur 6.16, en wordt veroorzaakt door contractie van de stroming bij de haak.

In de twee kribvakken ten westen van de suatiegeul vindt voor de KVP variant eveneens minder depositie plaats dan in de autonome situatie. In de KVP variant is het strand in de eerste twee kribvakken ten oosten van de suatiegeul iets naar het noorden uitgebreid. Daarmee heeft een deel van de depositie die in de autonome situatie zichtbaar is, in zekere mate al voor de start van de berekening plaatsgevonden, waardoor de depositie bij de KVP variant in de betreffende kribvakken lager is dan in de autonome situatie. Ook draait er bij vloed een neer in deze kribvakken, die lokaal hogere stroomsnelheden oplevert en opwoeling van sediment veroorzaakt en het bezinken van sediment bemoeilijkt. Direct ten oosten van de haak treedt lokaal juist meer depositie op. Tijdens vloed ligt dit gebied in de luwte van de dam, en zijn de stroomsnelheden die optreden bij de KVP variant lager dan in de autonome situatie, waardoor het sediment gemakkelijker bezinkt.



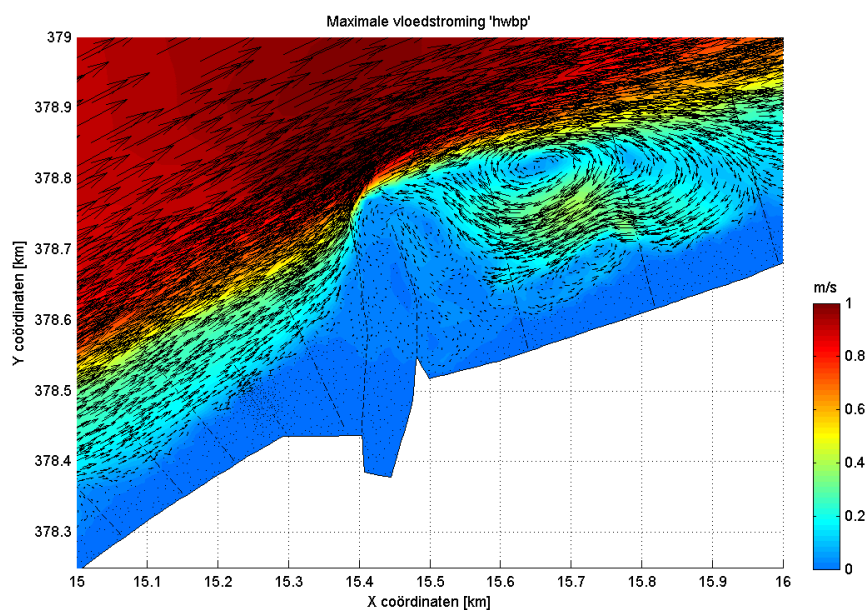
Figuur 6.18: Gemiddelde jaarlijks uitgevoerde suppletie voor de KVP variant.

De onderhoudsbehoefte voor de KVP variant bedraagt jaarlijks ongeveer $0,37 \text{ Mm}^3$. Ten opzichte van de autonome situatie is dit een toename van ongeveer 5%. In de autonome situatie worden de suppletievolumes echter onderschat, doordat erosie in de twee kribvakken ten oosten van de suatiegeul door uitwatering niet in de berekening is meegenomen. Voor de KVP variant zijn de dammen dusdanig verhoogd dat de erosie ten gevolge van uitwatering niet plaatsvindt. De implementatie van de KVP variant heeft maximaal een toename in de onderhoudsbehoefte van een paar procent tot gevolg. De ruimtelijke verdeling van de gemiddelde jaarlijks uitgevoerde suppletie voor de KVP variant is weergegeven in Figuur 6.18.

6.2.3 HWBP variant

Figuur 6.19 geeft de maximale vloedstroming nabij Cadzand-Bad voor de HWBP variant volgend uit de modelsimulatie. Evenals bij de KVP variant, is in het eerste en tweede kribvak ten oosten van de oostelijke havendam een neer zichtbaar, die zich deels uitstrekt tot in het derde kribvak. De kleine neer die bij de KVP aan de westzijde ontstaat, is in de HWBP variant afwezig. Doordat het strand aan de westzijde in de HWBP variant naar het noorden is uitgebreid, wordt de stroming meer naar het uiteinde van de dam geleid dan bij de KVP variant het geval is.

De maximale ebstroming is weergegeven in Figuur 6.20. Ook hier ontstaat een neer achter de constructie. Doordat in de HWBP variant de kust ten westen van de suatiegeul naar het noorden is uitgebreid, is de positie van deze neer westelijker dan bij de KVP variant.



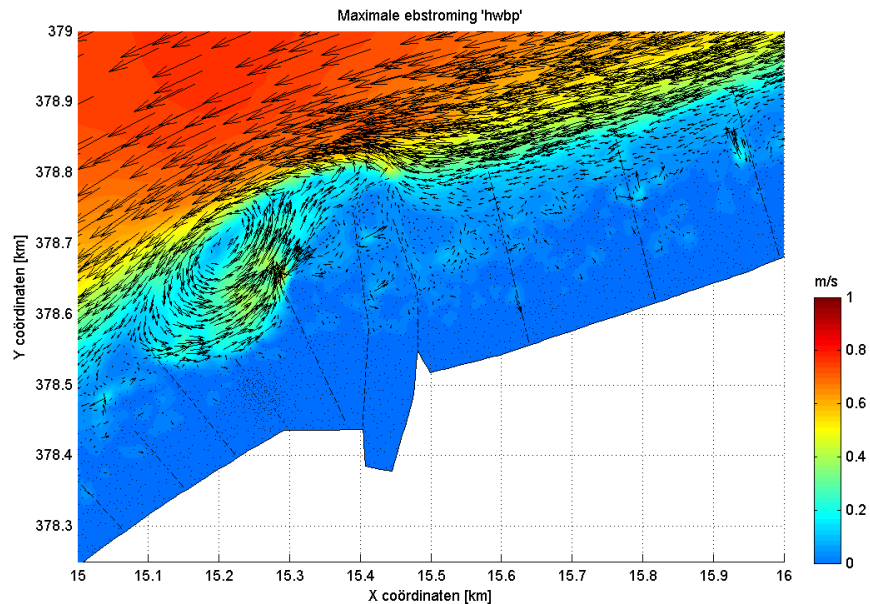
Figuur 6.19: Maximale vloedstroming in interessegebied voor de HWBP variant.

De modelbodem aan het eind van 9 jaar morfologisch simuleren is afgebeeld in Figuur 6.21. De morfologische ontwikkeling in deze periode is gegeven in Figuur 6.22 en Figuur 6.23, waarbij in Figuur 6.23 is ingezoomd op de kust bij Cadzand-Bad. Het eerste jaar morfologisch rekenen, dat dient om de morfologie in laten spelen, is niet in de resultaten meegenomen. De figuren presenteren dus 9 jaar morfologische ontwikkeling.

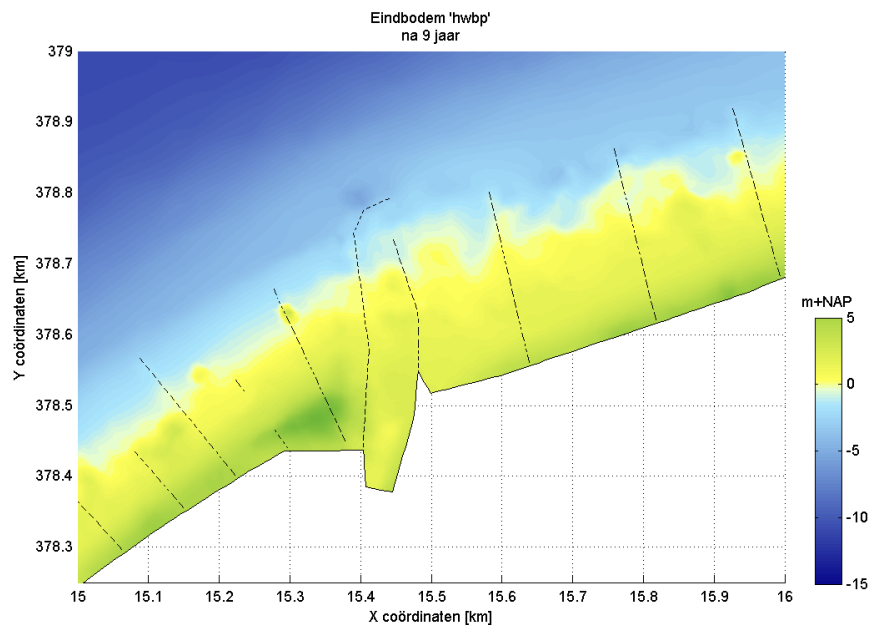
In Figuur 6.22 is te zien dat ter hoogte van Cadzand-Bad en ter hoogte en ten westen van de Zwarte Polder depositie plaats vinden. In het gebied tussen Cadzand-Bad en de Zwarte Polder vindt nauwelijks depositie plaats. Bij het Zwin volgt erosie uit de modelresultaten, zowel bij de HWBP variant als in de autonome situatie, zie Figuur 5.3. De erosie is in de HWBP variant gelijk aan de erosie van in de autonome situatie, waarmee de invloed van de KVP variant op de ontwikkeling van het Zwin minimaal is.

Figuur 6.23 laat zien dat evenals in Figuur 6.9, die de morfologische ontwikkeling in de autonome situatie weergeeft, depositie plaatsvindt, en er meer erosie optreedt in de eerste twee kribvakken ten oosten van de suatiegeul dan in andere kribvakken. Evenals bij de KVP

variant ontstaat in absolute zin nauwelijks een ontgrondingskuil ten noorden van de haak, maar wordt de depositie direct ten noorden van de haak onder invloed van de contractie van de stroming rondom de dam lokaal tot een minimum teruggebracht. In relatieve zin kan wel gesproken worden over een ontgrondingskuil.



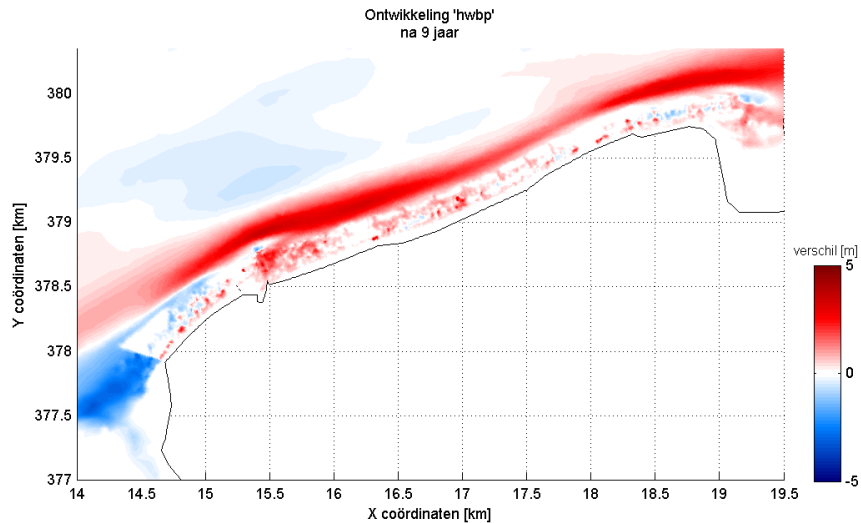
Figuur 6.20: Maximale ebstroming in interessegebied voor de HWBP variant.



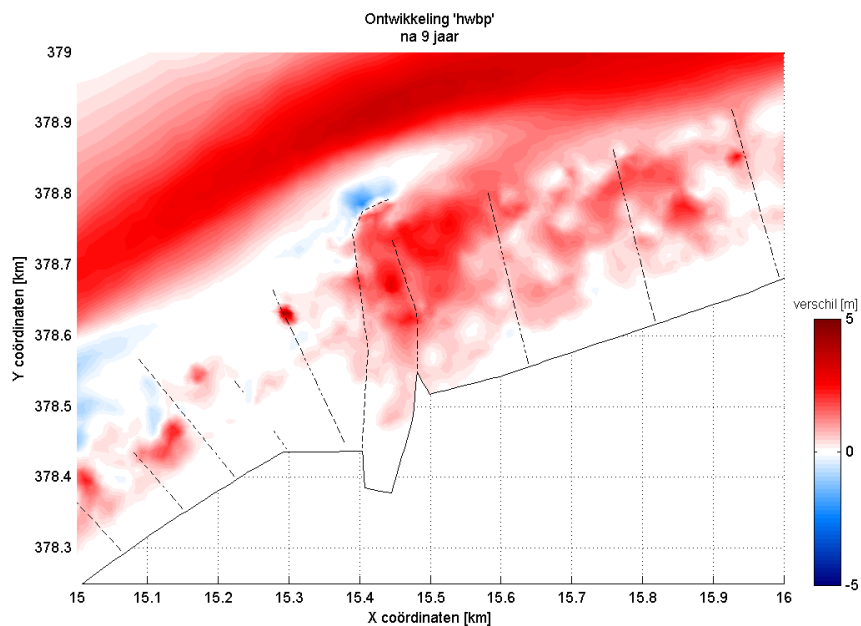
Figuur 6.21: Eindbodem HWBP variant na 9 jaar morfologisch simuleren. De zwarte stippellijnen geven de strekdammen weer.

Het verschil in morfologische ontwikkeling tussen de autonome situatie en de HWBP variant is weergegeven in Figuur 6.24. Het verschil in beginbodem van beide varianten is

verdisconteerd in de resultaten. Te zien is dat ten noorden van de strekdammen meer depositie plaatsvindt dan in de autonome berekening, behalve direct ten noorden van de haak aan de strekdam, waar juist meer erosie plaatsvindt en kan worden gezien als een relatieve ontgrondingskuil. Dit komt overeen met het uitblijven van depositie op deze locatie, zichtbaar in Figuur 6.23, en veroorzaakt door contractie van de stroming bij de haak.



Figuur 6.22: Morfologische ontwikkeling HWBP variant na 9 jaar morfologisch simuleren.

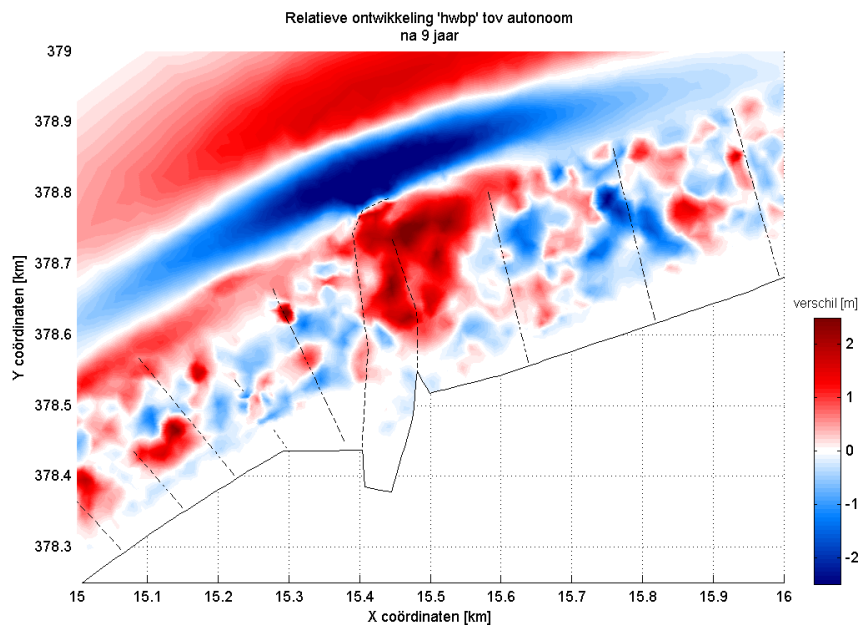


Figuur 6.23: Morfologische ontwikkeling HWBP variant na 9 jaar morfologisch simuleren, ingezoomd op de kust bij Cadzand-Bad.

De hierboven omschreven ontwikkeling vertoont dezelfde trend als de morfologische ontwikkeling van de KVP variant. Wanneer Figuur 6.24 en Figuur 6.17 vergeleken worden, blijkt de relatieve erosie bij de HWBP variant hoger dan bij de KVP variant. Vermoedelijk heeft de uitbouw van het strand aan de westzijde van suatiegeul een efficiëntere contractie

van de stroming rond de dammen tot gevolg, met daarop aansluitend hogere stroomsnelheden en dus netto minder depositie dan bij de KVP variant.

In Figuur 6.24 is te zien dat ten westen van de suatiegeul minder depositie plaatsvindt voor de HWBP variant dan voor de autonome situatie. In de HWBP variant is het strand ten westen van de suatiegeul iets naar het noorden uitgebreid, en wordt die profiel door middel van jaarlijkse suppleties onderhouden. Daarmee heeft een deel van de depositie die in de autonome situatie zichtbaar is, in zekere mate al voor de start van de berekening plaatsgevonden, waardoor de depositie bij de HWBP variant lager is dan in de autonome situatie.



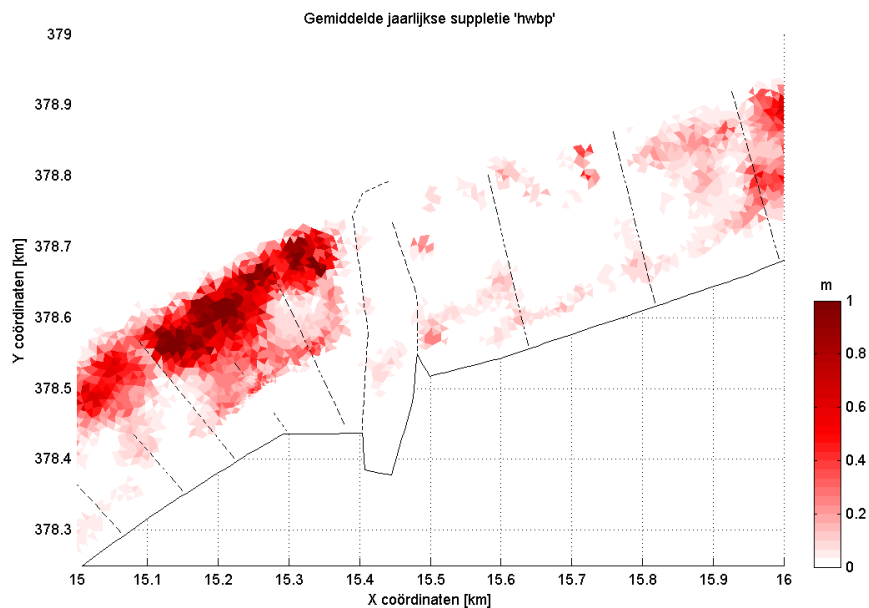
Figuur 6.24: Relatieve morfologische ontwikkeling HWBP variant ten opzichte van de autonome situatie na 9 jaar morfologisch simuleren.

Het verschil in morfologische ontwikkeling kan ook deels veroorzaakt worden door een verschil in erosie. Tijdens eb draait er een neer in het noordelijkste deel van de kribvakken, waardoor lokaal hogere stroomsnelheden voorkomen en sediment enerzijds wordt opgewoeld en anderzijds minder gemakkelijk bezinkt. In de autonome situatie is deze neer afwezig en in de KVP variant is deze neer minder uitgesproken. Ten opzichte van zowel de autonome situatie als de KVP variant zal in de HWBP variant lokaal meer erosie optreden ten gevolge van deze neer.

In de twee kribvakken ten westen van de suatiegeul vindt voor de HWBP variant eveneens minder depositie plaats dan in de autonome situatie. De neer die tijdens vloedstroming in deze kribvakken draait, zorgt voor lokaal hogere stroomsnelheden die opwoeling van sediment veroorzaken en bezinken van sediment bemoeilijken. De depositie voor de HWBP variant is ongeveer gelijk aan de depositie bij de KVP variant.

Direct ten oosten van de haak en dus in het meest noordelijke deel van het eerste kribvak ten oosten van de suatiegeul treedt lokaal juist meer depositie op. Tijdens vloed ligt dit gebied in de luwte van de dam, en zijn de stroomsnelheden die optreden bij de HWBP variant lager dan in de autonome situatie, waardoor het sediment gemakkelijker bezinkt. Ten

opzicht van de KVP variant lijkt de depositie lokaal iets hoger.



Figuur 6.25: Gemiddelde jaarlijks uitgevoerde suppletie voor de HWBP variant.

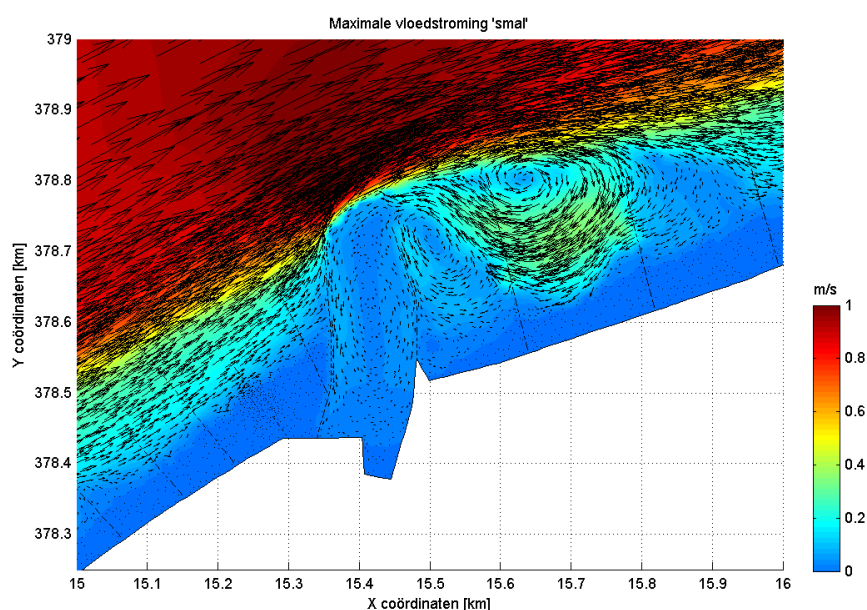
De onderhoudsbehoefte voor de HWBP variant bedraagt jaarlijks ongeveer $0,38 \text{ Mm}^3$. Ten opzichte van de autonome situatie is dit een toename van ongeveer 10%. In de autonome situatie worden de suppletievolumes echter onderschat, doordat erosie in de twee kribvakken ten oosten van de suatiegeul door uitwatering niet in de berekening is meegenomen. Voor de HWBP variant zijn de dammen dusdanig verhoogd dat deze erosie ten gevolge van uitwatering niet plaatsvindt. De toename van 10% is dus aan de hoge kant.

De ruimtelijke verdeling van de gemiddelde jaarlijks uitgevoerd suppletie voor de HWBP variant is weergegeven in Figuur 6.25. Opvallend is de hoge suppletie direct ten westen van de suatiegeul. De uitbouw van het strand aan de westzijde van de suatiegeul blijkt te eroderen, wat door middel van de jaarlijkse suppleties gecompenseerd wordt. In de KVP variant en de autonome situatie, waar deze uitbouw niet geïmplementeerd is, is het suppletievolume beduidend lager.

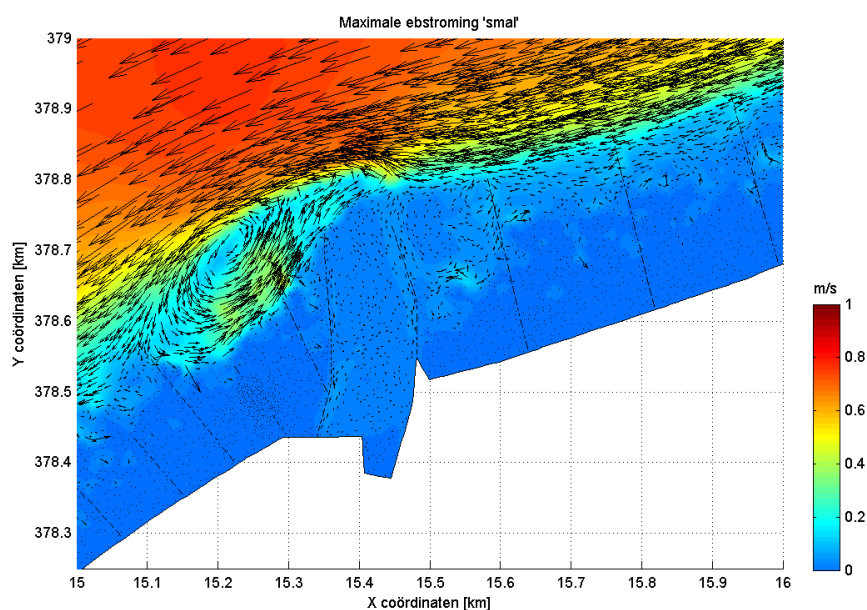
6.2.4 Smalle havenvariant

Figuur 6.26 geeft de maximale vloedstroming nabij Cadzand-Bad voor de smalle havenvariant volgend uit de modelsimulatie. Evenals bij de HWBP variant, is in het eerste en tweede kribvak ten oosten van de oostelijke havendam een neer zichtbaar. Verschil met de HWBP variant is dat de neer zich bij de smalle havenvariant niet uitstrekt tot in het derde kribvak. De kop van de westelijke havendam is breder dan bij de HWBP variant, en de hoek met de westelijke havendam zelf geleidelijker dan bij de HWBP variant, wat leidt tot zowel een geleidelijkere contractie als loslating van de stroming.

De maximale ebstroming is weergegeven in Figuur 6.27. Ook hier ontstaat een neer achter de constructie. De neer is minder uitgesproken dan bij de HWBP variant, vermoedelijk eveneens door de bredere kop van de westelijke haven, en de geleidelijke hoek tussen de kop en het overige deel van de dam.



Figuur 6.26: Maximale vloedstroming in interessegebied voor de smalle havenvariant.

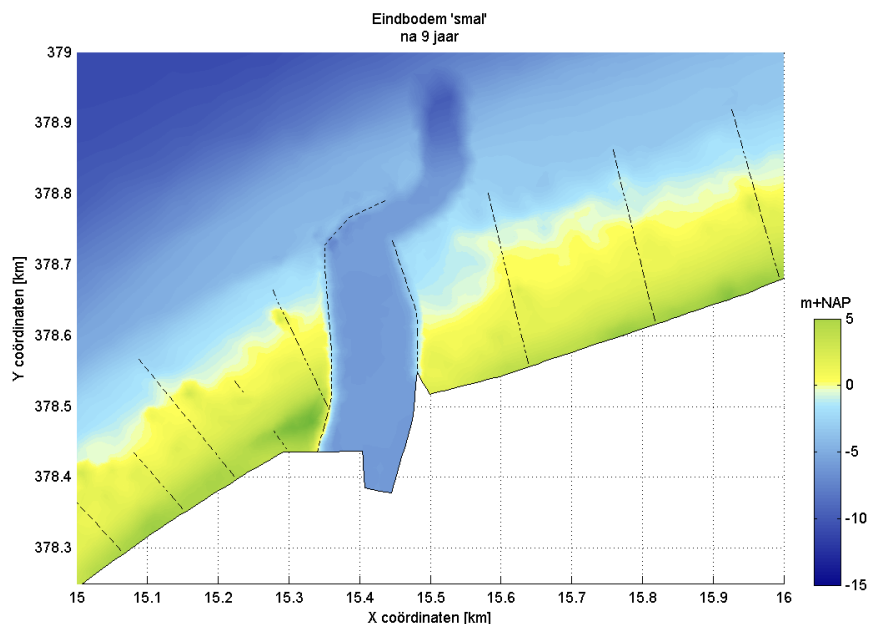


Figuur 6.27: Maximale ebstroming in interessegebied voor de smalle havenvariant.

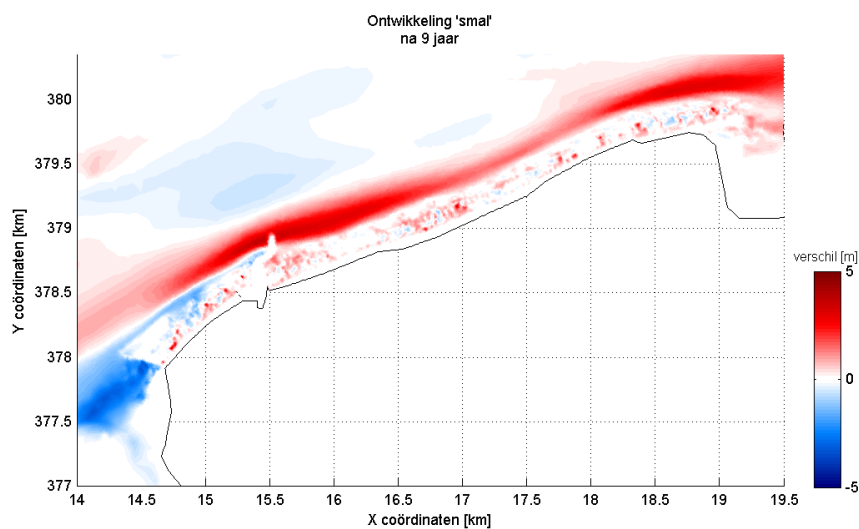
De modelbodem aan het eind van 9 jaar morfologisch simuleren is afgebeeld in Figuur 6.28. De morfologische ontwikkeling in deze periode is gegeven in Figuur 6.29 en Figuur 6.30, waarbij in Figuur 6.30 is ingezoomd op de kust bij Cadzand-Bad. Het eerste jaar morfologisch rekenen, dat dient om de morfologie in laten spelen, is niet in de resultaten meegenomen. De figuren presenteren dus 9 jaar morfologische ontwikkeling.

In Figuur 6.29 is te zien dat ter hoogte van Cadzand-Bad en ter hoogte en ten westen van de Zwarte Polder depositie plaats vinden. In het gebied tussen Cadzand-Bad en de Zwarte

Polder vindt in mindere mate depositie plaats. Bij het Zwin volgt erosie uit de modelresultaten, evenals bij de HWBP variant, en in ongeveer gelijke mate, waarmee de invloed van de KVP variant op de ontwikkeling van het Zwin minimaal is.



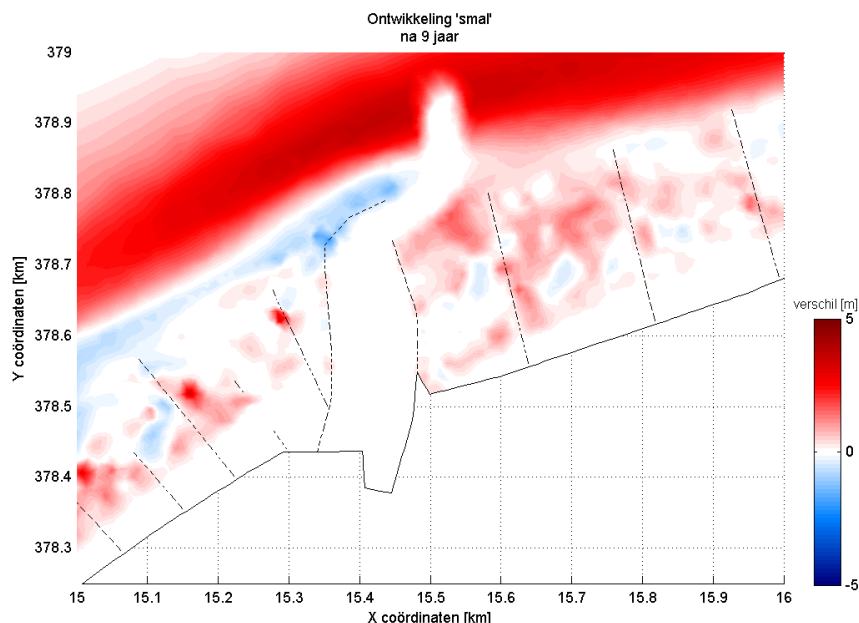
Figuur 6.28: Eindbodem smalle havenvariant na 9 jaar morfologisch simuleren. De zwarte stippellijnen geven de strekdammen weer.



Figuur 6.29: Morfologische ontwikkeling smalle havenvariant na 9 jaar morfologisch simuleren.

Figuur 6.30 laat zien dat evenals in Figuur 6.9, die de morfologische ontwikkeling in de autonome situatie weergeeft, depositie plaatsvindt, en er meer erosie optreedt in de eerste twee kribvakken ten oosten van de suatiegeul dan in andere kribvakken. In de smalle havenvariant is dit effect minder sterk dan in de HWBP variant. Ten westen van de westelijke havendam zijn de ontwikkelingen ongeveer gelijk aan de HWBP variant. Evenals bij de HWBP variant ontstaat in absolute zin nauwelijks een ontgrondingskuil ten noorden

van de haak, maar wordt de depositie direct ten noorden van de haak onder invloed van de contractie van de stroming rondom de dam lokaal tot een minimum teruggebracht. In relatieve zin kan dit wel als ontgrondingskuil worden beschouwd. Het effect is in de smalle havenvariant iets minder sterk dan bij de HWBP variant.



Figuur 6.30: Morfologische ontwikkeling smalle havenvariant na 9 jaar morfologisch simuleren, ingezoomd op de kust bij Cadzand-Bad.

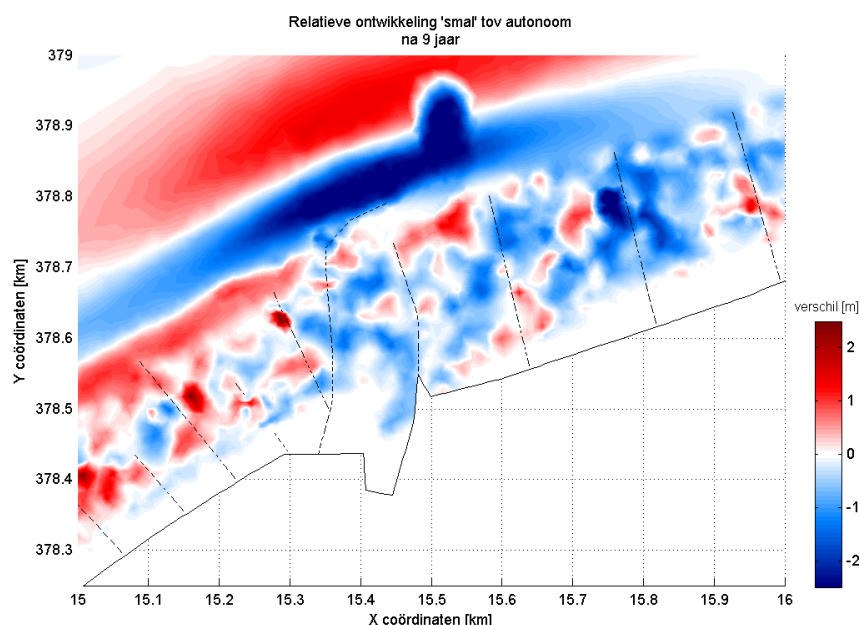
In het verlengde van de haven is een geul aangelegd die de haven met dieper water verbindt. Deze geul wordt in de modelberekening door middel van jaarlijks uitgevoerde baggerwerkzaamheden onderhouden op een diepte van NAP -6 m, evenals de haven zelf, waar in paragraaf 6.3 meer aandacht aan besteed wordt. Jaarlijks wordt gemiddeld 47.000 m³ sediment verwijderd, voornamelijk uit de geul. Merk op dat in paragraaf 5.2 is vermeld dat de morfologische ontwikkeling te snel lijkt te gaan, en de depositie te geconcentreerd plaatsvindt. In dat geval is het hiervoor genoemde volume een overschatting.

Het blijkt echter dat de geul al binnen enkele maanden volledig aangezand is, en dat in de praktijk één keer per jaar baggeren niet voldoet. Het is goed mogelijk dat een enkele storm in staat is om de geul volledig te laten sedimenteren, en is een baggerbezwaar van 47.000 m³ juist onderschat. De evenwichtdiepte in de geul, zie ook Figuur 6.28, bedraagt ongeveer NAP -4 m. Het baggerbezwaar kan significant verminderd worden door het aanpassen van de onderhoudsdiepte van de geul.

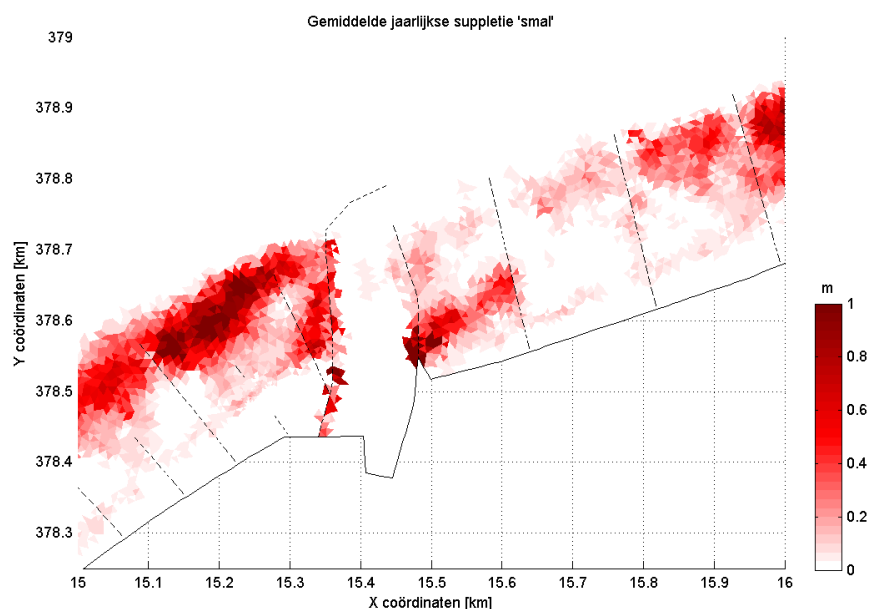
Het verschil in morfologische ontwikkeling tussen de autonome situatie en de smalle havenvariant is weergegeven in Figuur 6.31. Het verschil in beginbodem van beide varianten is verdisconteerd in de resultaten. Te zien is dat ten noorden van de strekdammen meer depositie plaatsvindt dan in de autonome berekening, behalve direct ten noorden van de haak aan de strekdam, waar juist meer erosie plaatsvindt. Dit komt overeen met het uitblijven van depositie op deze locatie en het ontstaan van een relatieve ontgrondingskuil, zichtbaar in Figuur 6.30, en veroorzaakt door contractie van de stroming bij de haak.

De hierboven omschreven ontwikkeling vertoont dezelfde trend als de morfologische

ontwikkeling van de HWBP variant. Wanneer Figuur 6.24 en Figuur 6.31 vergeleken worden, blijken ook de relatieve erosie en depositievolumes aardig overeen te komen.



Figuur 6.31: Relatieve morfologische ontwikkeling smalle havenvariant ten opzichte van de autonome situatie na 9 jaar morfologisch simuleren.



Figuur 6.32: Gemiddelde jaarlijks uitgevoerde suppletie voor de smalle havenvariant.

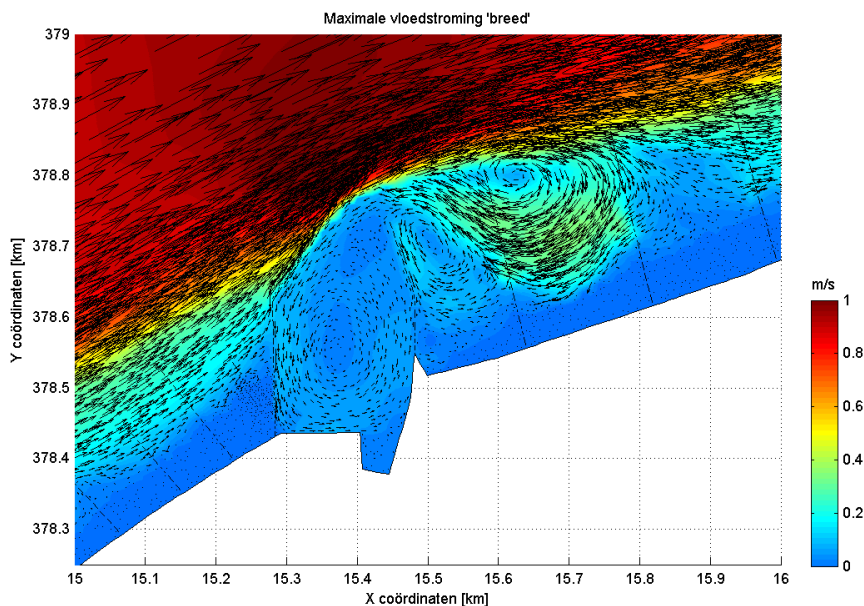
De onderhoudsbehoefte voor de smalle havenvariant bedraagt jaarlijks ongeveer 0,40 Mm³. Ten opzichte van de autonome situatie is dit een toename van ongeveer 15%, en een toename van 5% ten opzichte van de HWBP. In de autonome situatie worden de suppletievolumes echter onderschat, doordat erosie in de twee kribvakken ten oosten van de

suatiegeul door uitwatering niet in de berekening is meegenomen. Voor de smalle havenvariant zijn de dammen dusdanig verhoogd dat deze erosie ten gevolge van uitwatering niet plaatsvindt. De toename van 15% ten opzichte van de autonome situatie is dus aan de hoge kant.

De ruimtelijke verdeling van de gemiddelde jaarlijks uitgevoerd suppletie voor de smalle havenvariant is weergegeven in Figuur 6.32. Het patroon is vergelijkbaar met het suppletiepatroon in de HWBP variant. Opvallend is de hoge suppletie direct ten westen van de suatiegeul. De uitbouw van het strand aan de westzijde van de suatiegeul blijkt te eroderen, wat door middel van de jaarlijkse suppleties gecompenseerd wordt. In de KVP variant en de autonome situatie, waar deze uitbouw niet geïmplementeerd is, is het suppletievolume beduidend lager.

6.2.5 Brede havenvariant

Figuur 6.33 geeft de maximale vloedstroming nabij Cadzand-Bad voor de brede havenvariant volgend uit de modelsimulatie. In het eerste en tweede kribvak ten oosten van de oostelijke havendam een neer zichtbaar, gelijk aan de neer die tijdens maximale vloedstroming bij de smalle havenvariant draait. Stroomsnelheden lopen in de neer op tot maximaal 0,5 m/s.



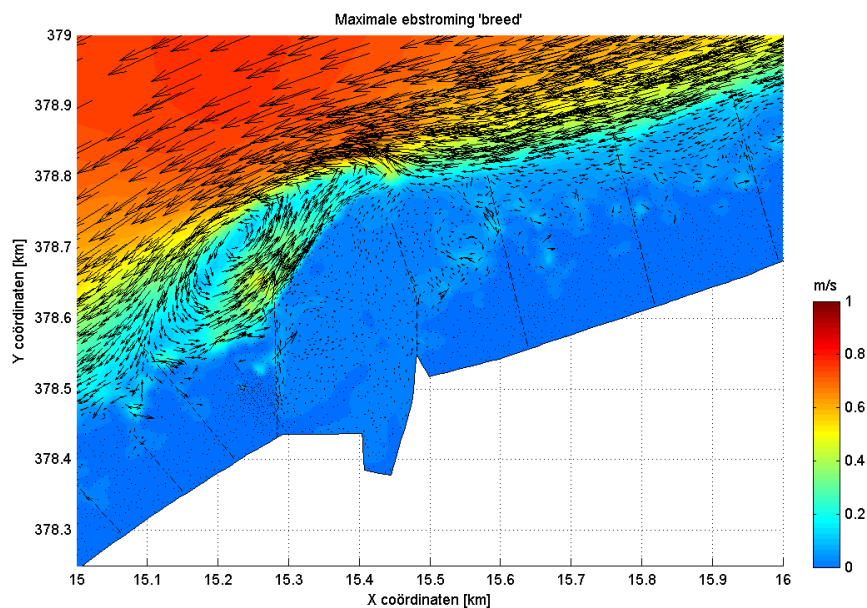
Figuur 6.33: Maximale vloedstroming in interessegebied voor de brede havenvariant.

De maximale ebstroming is weergegeven in Figuur 6.34. Ook hier ontstaat een neer achter de constructie. De neer is vrijwel gelijk aan de neer die ontstaat bij de smalle havenvariant, ondanks dat de westelijke havendam meer westelijk geplaatst is dan bij de smalle havenvariant het geval is.

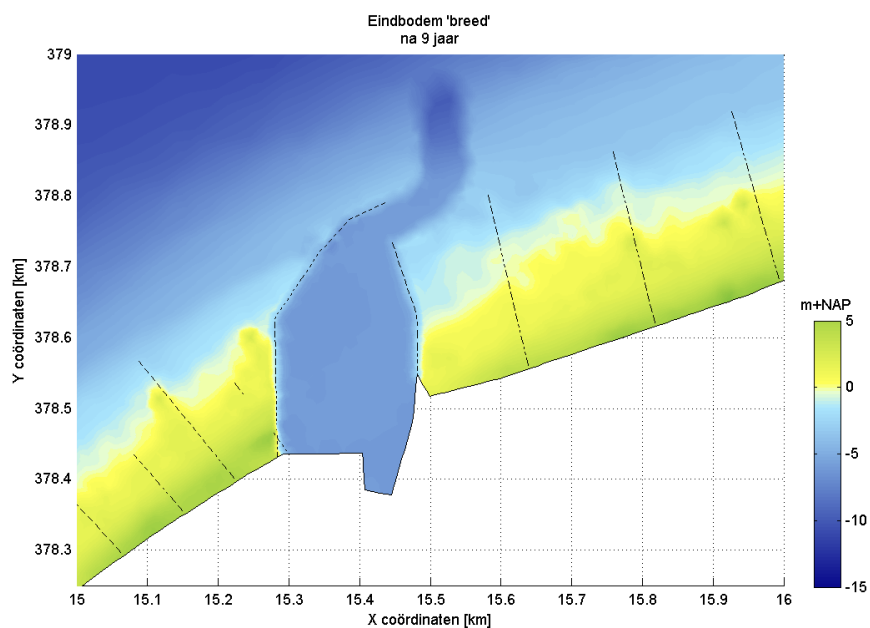
De modelbodem aan het eind van 9 jaar morfologisch simuleren is afgebeeld in Figuur 6.35. De morfologische ontwikkeling in deze periode is gegeven in Figuur 6.36 en Figuur 6.37, waarbij in Figuur 6.37 is ingezoomd op de kust bij Cadzand-Bad. Het eerste jaar morfologisch rekenen, dat dient om de morfologie in laten spelen, is niet in de resultaten

meegenomen. De figuren presenteren dus 9 jaar morfologische ontwikkeling.

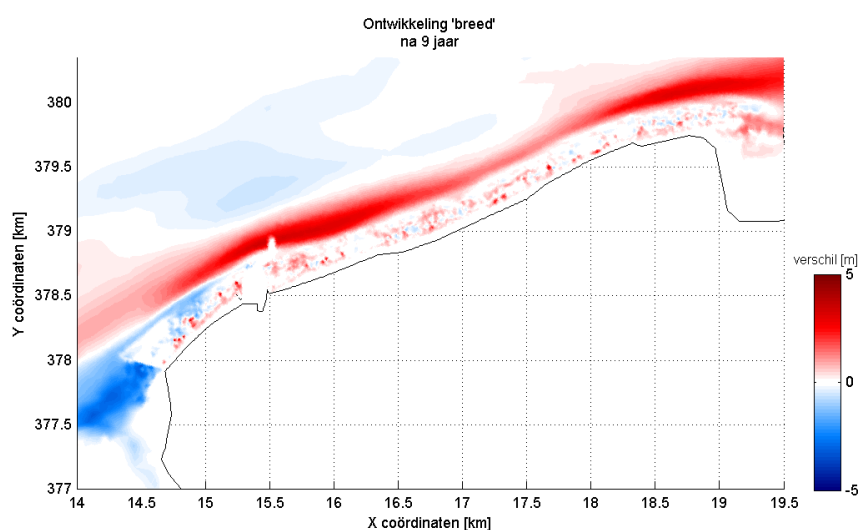
De morfologische ontwikkeling bij de brede havenvariant is vrijwel identiek aan de ontwikkeling van de smalle havenvariant, die is besproken in de voorgaande paragraaf. Wederom ontstaat in absolute zin nauwelijks een ontgrondingskuil (wel in relatieve zin), en is de depositie in de eerste twee kribvakken ten oosten van de haven hoger dan in de andere kribvakken.



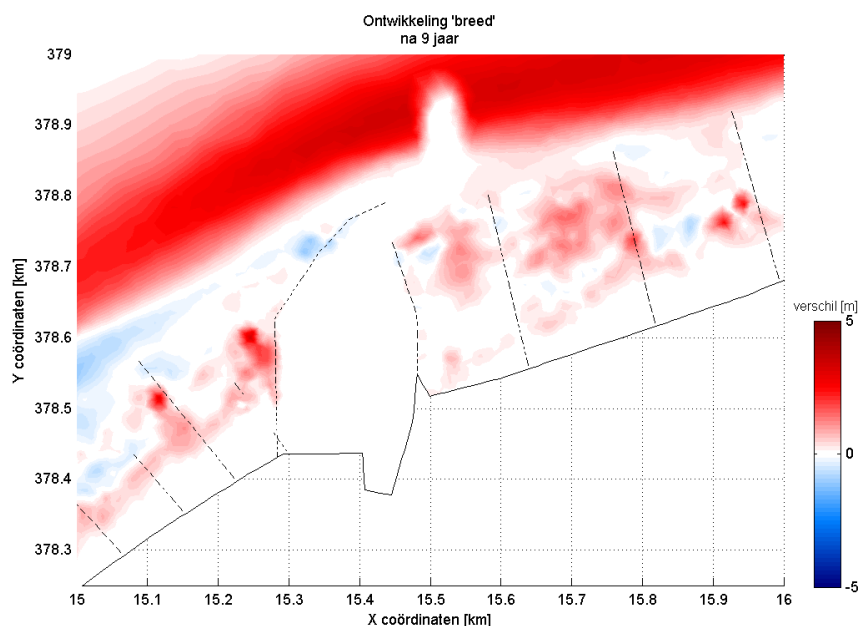
Figuur 6.34: Maximale ebstroming in interessegebied voor de brede havenvariant.



Figuur 6.35: Eindbodem brede havenvariant na 9 jaar morfologisch simuleren. De zwarte stippellijnen geven de strekdammen weer.



Figuur 6.36: Morfologische ontwikkeling brede havenvariant na 9 jaar morfologisch simuleren.

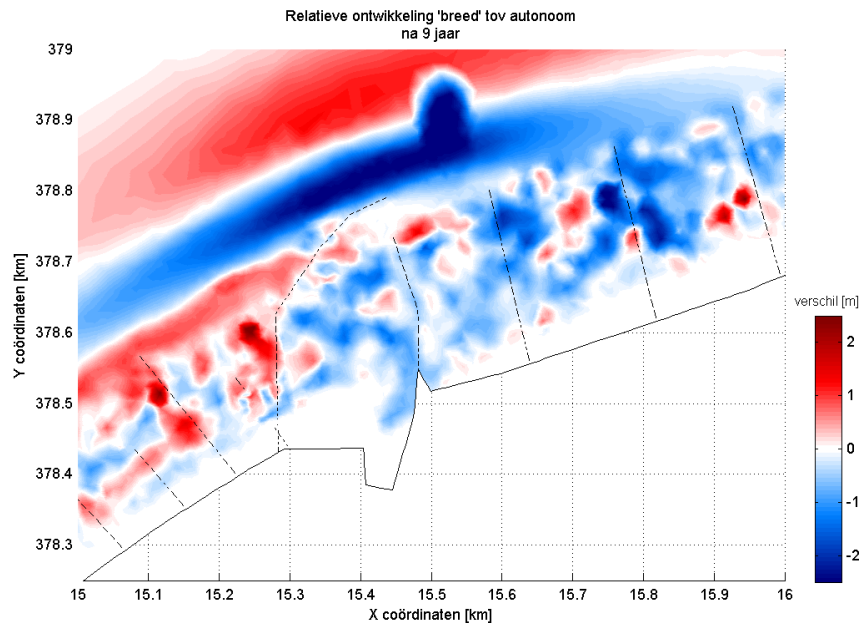


Figuur 6.37: Morfologische ontwikkeling brede havenvariant na 9 jaar morfologisch simuleren, ingezoomd op de kust bij Cadzand-Bad.

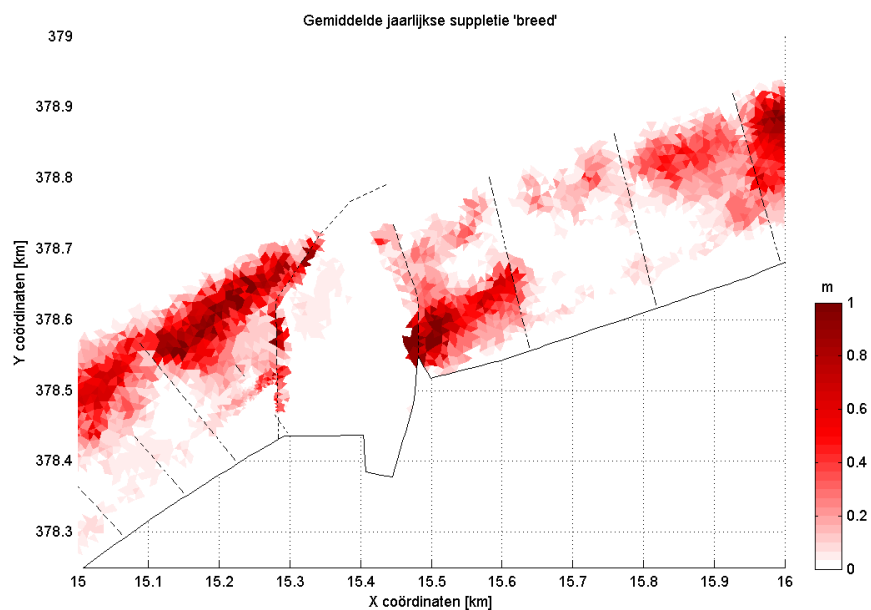
Een klein verschil is aanwezig in het baggerbezwaar. In de brede havenvariant bedraagt het baggerbezwaar 50.000 m^3 , ruim 5% hoger dan bij de smalle havenvariant. Aangezien het havenoppervlak en daarmee het te onderhouden gebied is vergroot, is de lichte toename van het baggerbezwaar goed te verklaren. Ook in deze variant geldt dat het baggerbezwaar significant verminderd kan worden door de onderhoudsdiepte van de geul die de haven met dieper water verbindt te verminderen.

Het verschil in morfologische ontwikkeling tussen de autonome situatie en de brede havenvariant is weergegeven in Figuur 6.38. Het verschil in beginbodem van beide varianten is verdisconteerd in de resultaten. De relatieve ontwikkeling is vrijwel gelijk aan die van de

smalle havenvariant, zie voorgaande paragraaf.



Figuur 6.38: Relatieve morfologische ontwikkeling brede havenvariant ten opzichte van de autonome situatie na 9 jaar morfologisch simuleren.



Figuur 6.39: Gemiddelde jaarlijks uitgevoerde suppletie voor de brede havenvariant.

De onderhoudsbehoefte voor de brede havenvariant bedraagt jaarlijks ongeveer $0,40 \text{ Mm}^3$. Dit is gelijk aan de onderhoudsbehoefte van de smalle havenvariant. Ten opzichte van de autonome situatie is dit een toename van ongeveer 15%, en een toename van 5% ten opzichte van de HWBP variant. In de autonome situatie worden de suppletievolumes echter onderschat, doordat erosie in de twee kribvakken ten oosten van de suatiegeul door

uitwatering niet in de berekening is meegenomen. Voor de brede havenvariant zijn de dammen dusdanig verhoogd dat deze erosie ten gevolge van uitwatering niet plaatsvindt. De toename van 15% ten opzichte van de autonome situatie is dus aan de hoge kant.

De ruimtelijke verdeling van de gemiddelde jaarlijks uitgevoerd suppletie voor de brede havenvariant is weergegeven in Figuur 6.39, en vrijwel gelijk aan de ruimtelijke verdeling van de suppleties bij de smalle havenvariant.

6.3 Morfologie havenbekken

Op basis van de HWBP variant zijn twee varianten ontwikkeld waarin een jachthaven is opgenomen: de smalle jachthavenvariant en de brede jachthavenvariant. In de voorgaande paragraaf is reeds ingegaan op de effecten op de morfologie rond de haven. In deze paragraaf zal het havenbekken zelf behandeld worden. De in deze paragraaf gegeven analyse is gebaseerd op 'expert judgement', en niet op modelresultaten zoals in voorgaande paragrafen het geval was.

Tussen de strekdammen bij Cadzand-Bad vindt sedimentatie plaats. In de bestaande situatie betreft dit voornamelijk zand dat door de stroming en de wind over de westelijke strekdam wordt gevoerd en in de geul bezinkt. In het luwtegebied dicht bij de spuisluis kan er (op dagen dat er niet gespuid wordt) ook afzetting van slib ontstaan. Door de turbulentie die optreedt als er vervolgens weer gespuid wordt zal dit slib snel richting zee worden afgevoerd. Dit geldt overigens ook voor de zandcomponent, zij het dat soms na een lange droge periode een klein geultje gegraven moet worden om het spuidebiet op gang te brengen.

Na verhoging van de strekdammen zal het transport van zand over de westelijke havendam (vrijwel) volledig tot stilstand komen, en daarmee ook de aanzanding tussen de dammen. Voor de KVP en HWBP variant betekent dit dat de situatie enigszins gunstiger wordt dan de bestaande toestand: minder aanzanding in de geul betekent dat er ook minder uitspoeling van zand richting zee optreedt tijdens spuien.

Een tweede effect van de hoge dammen is dat het luwtegebied in de uitwateringsgeul voor de spuisluis veel groter wordt dan in de bestaande situatie. Het gebied waarin aanslibbing kan optreden wordt hierdoor ook navenant groter. Bij de KVP en de HWBP variant is dit van ondergeschikt belang, aangezien het daarbij niet nodig is de geul op een bepaalde diepte te onderhouden. Dit verandert op het moment dat het luwtegebied tussen de dammen wordt gebruikt als jachthaven. In dat geval dient altijd voldoende waterdiepte aanwezig te zijn om de jachten te accommoderen. In de plannen voor de jachthaven wordt hiervoor een diepte van NAP -6,0 m aangehouden.

De grotere gewenste diepte in de haven heeft tot gevolg dat de eroderende werking van de spuistroom die van tijd tot tijd door de haven naar zee stroomt veel minder is dan bij een ondiepe geul. Zonder aanvullende maatregelen is het daarom onwaarschijnlijk dat de haven op een natuurlijke wijze door middel van het spuien van (zoet) water op diepte gehouden kan worden. Dit geldt zowel voor de brede als voor de smalle variant.

In de analyse van de aanslibbing wordt gebruik gemaakt van een eerder onderzoek van Alkyon (2008) in dezen. In paragraaf 4.4 van dit rapport wordt een berekening gepresenteerd van de sedimentatie van slib in de haven tijdens hogere waterstanden, op het moment dat via het gemaal zoet water de haven ingepompt wordt. Deze berekening leidt op

jaarbasis tot een aanzienlijke aanslibbing in de haven. De uitslag van zoet water via het gemaal betreft echter slechts een deel van de zoetwaterlozing. De voorkeur van de beheerder (het waterschap) gaat uit naar spuien tijdens laag water onder vrij verval. Dit vanwege de besparing op energiekosten. Alleen als de capaciteit van vrij verval lozen onvoldoende is wordt het gemaal bijgeschakeld.

Vrij verval lozen vindt plaats bij een lage buitenwaterstand, en met relatief hoge spuidebieten (orde $20\text{m}^3/\text{s}$). Dit heeft als voordeel dat de stroomsnelheid in de geul naar verwachting voldoende sterk is om een eroderend effect te hebben op niet geconsolideerd slib. Dit betekent dat de spuistroom gebruikt kan worden (vooral in de wintermaanden met hoge spui volumes) om de haven door te spoelen.

De spuistroom is niet overal in de haven even groot. Naarmate gekozen wordt voor een bredere variant zal de spuistroom in de westelijke zone over een steeds groter gebied onvoldoende zijn om het slib op te woelen. Dit geldt overigens ook voor slib in de geul zelf dat al enigszins geconsolideerd is. Daarom wordt aanbevolen iedere winter tijdens omstandigheden met grote spuidebieten in de haven slib kunstmatig op te woelen door middel van agitatiebaggeren en/of ploegen. Het opgewoelde slib wordt dan vervolgens door de spuistroom naar zee afgevoerd. Voor deze werkwijze is een goed overleg tussen waterschap en havenexploitant vereist om beide activiteiten (opwoelen en maximaal spuien) tegelijkertijd te doen plaatsvinden.

Zonder het effect van spuien op het doorspoelen van slib wordt de aanslibbing in de haven geraamd op een laagdikte van ongeveer 0,5 m per jaar. Het verdient dus alleszins aanbeveling om een plan uit te werken waarin de genoemde combinatie van opwoelen en spuien wordt toegepast.

6.4 Conclusies

De effecten op de morfologie zijn voor de vier varianten weinig onderscheidend, en beperken zich vooral tot relatief lokale effecten. De invloed op het Zwin en de Zwarte Polder is minimaal.

Voor de vier varianten heeft het verhogen en verlengen van de strekdammen bij Cadzand-Bad heeft een vrijwel gelijke verandering van het stroombeeld tot gevolg. Voor alle vier de varianten treedt bij de kop van de havendammen contractie van de stroming op, waardoor lokaal hogere stroomsnelheden plaatsvinden. Na het passeren van de strekdammen treedt loslating van de stroming op, en ontstaan neren. Tijdens ebstroming draait er een neer ten westen van de westelijke strekdam, en tijdens vloedstroming een neer ten oosten van de oostelijke strekdam.

De lokaal hogere stroomsnelheden bij de kop van de havendam veroorzaken ter plaatse een vermindering van de depositie, maar leidt niet of nauwelijks tot een ontgrondingskuil in absolute zin. In relatieve zin, dus ten opzichte van de autonome situatie, kan dit wel worden gezien als een ontgrondingskuil. Ten noorden van deze relatieve ontgrondingskuil vindt relatieve (en absolute) depositie plaats.

In de onderhoudsbehoefte treden voor de verschillende varianten slechts kleine verschillen op. Bij de KVP variant is het onderhoud ongeveer 5% meer, bij de HWBP variant 10% meer en bij de beide jachthaven varianten 15% meer dan in de bestaande toestand. Overigens geldt hierbij dat in de berekeningen het spui volume van de sluis bij Cadzand-Bad niet is

meegenomen. Dit kan vooral in de bestaande situatie een verhogend effect hebben op de kusterosie, waardoor de genoemde percentages (nog) lager zouden worden. De toename van de onderhoudsbehoefte betreft vooral de eerste paar kribvakken aan weerszijden van de strekdammen.

In het geval van de jachthavenvarianten treedt een snelle verzanding van de haveningang op. De jaarlijkse onderhoudsbehoefte in de haventoeegang kan oplopen tot ca. 50.000 m³, waarbij vooral een noordwesterstorm plotseling tot enkele meters aanzanding kan leiden. Door de diepte in de haventoeegang te beperken tot ca. NAP -4 m is de aanzanding veel beter beheersbaar. In dat geval wordt verwacht dat de aanzanding in de havenmond minder dan 10.000 m³ per jaar bedraagt.

In de huidige situatie vindt sedimentatie tussen de dammen plaats. Door middel van spuien onder vrij verval wordt dit sediment regelmatig uitgespoeld. Door de realisatie van een van de havenvarianten neemt de grootte van het luwtegebied tussen de strekdammen toe. Het gebied waarin aanslibbing plaats kan vinden neemt hierdoor eveneens toe. Daarbij wordt de haven onderhouden op de diepte van NAP -6 m, wat bijdraagt aan een nog groter doorstroomoppervlak. Daardoor nemen de stroomsnelheden onder invloed van spuien in de haven af en wordt de eroderende werking van het spuien verminderd.

Wanneer geen rekening wordt gehouden met het effect van spuien, wordt de aanslibbing in de haven geraamd op 0,5 m per jaar. Ondanks dat de eroderende werking is afgenomen, kan de zoetwaterlozing nog steeds bijdragen aan de verwijdering van het slib uit de haven. Aanbevolen wordt om, voornamelijk in de wintermaanden wanneer de spuidebieten hoog zijn, slib kunstmatig op te woelen en door de spuistroom naar zee af te voeren, en zo efficiënt gebruik te maken van de eroderende capaciteit van de zoetwaterlozing. Voor deze werkwijze is een goed overleg tussen waterschap en havenexploitant vereist om beide activiteiten (opwoelen en maximaal spuien) tegelijkertijd te doen plaatsvinden.

7 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

7.1 Conclusies

De berekeningen zijn uitgevoerd met het morfodynamische modelinstrumentarium FINEL/SWAN. Daar er geen tijd was om een gedetailleerde kalibratie uit te voeren, is enkel een validatie van de modelresultaten uitgevoerd. Uit de berekeningen van de bestaande toestand blijkt dat het model redelijk in staat is de morfologie van het gebied te reproduceren, zij het dat de veranderingen in het model over het algemeen worden overschat ten opzichte van de natuurlijke ontwikkeling. Dit geldt zowel voor de berekende volumes aan strandsuppleties als voor de morfologische ontwikkeling van de vooroever.

De effecten op de morfologie zijn voor de vier varianten weinig onderscheidend, en beperken zich vooral tot relatief lokale effecten. De invloed op het Zwin en de Zwarte Polder is minimaal. In de onderhoudsbehoefte treden voor de verschillende varianten slechts kleine verschillen op. Bij de KVP variant is het onderhoud ongeveer 5% meer, bij de HWBP variant 10% meer en bij de beide jachthaven varianten 15% meer dan in de bestaande toestand. In de berekeningen is het spuivolume van de sluis bij Cadzand-Bad niet meegenomen, wat vooral in de bestaande situatie een verhogend effect op de suppletiebehoefte kan hebben. Bovenstaande percentages zijn in dat geval een overschatting. De toename van de onderhoudsbehoefte betreft vooral de eerste paar kribvakken aan weerszijden van de strekdammen.

Met betrekking tot de havenvarianten kan een snelle verzanding van de haventoeegang optreden wanneer wordt ervoor wordt gekozen deze haventoeegang tot NAP -6 m te onderhouden, tot een paar meter na een (noord)westerstorm. De jaarlijkse onderhoudsbehoefte in de haventoeegang kan oplopen tot ca. 50.000 m³. Wanneer de diepte in de haventoeegang beperkt wordt tot ca. NAP -4 m is de aanzanding veel beter beheersbaar. In dat geval wordt verwacht dat de aanzanding in de havenmond minder dan 10.000 m³ per jaar bedraagt.

Wanneer geen rekening wordt gehouden met het effect van spuien, wordt de aanslibbing in de haven geraamd op 0,5 m per jaar. Door middel van zoetwaterlozing tijdens het spuien onder vrij verval (bij lage buitenwaterstanden) kan een vermindering van de aanslibbing optreden. Door onderlinge afstemming van spuibehoor en havenonderhoud kan een situatie worden bereikt waarbij in de natte wintermaanden de haven tegen relatief weinig kosten kan worden doorgespoeld.

7.2 Aanbevelingen

Bij de validatie van de modelresultaten met de werkelijke waargenomen ontwikkeling is een afwijking in het ontwikkelingspatroon tussen de model- en meetresultaten ter plaatse van het Zwin waargenomen. Een knik aanwezig in de kustlijn duidt op erosie, en spreekt daarmee de meetresultaten tegen. Wanneer men specifiek in de ontwikkeling van het Zwin geïnteresseerd is, dient nader onderzoek naar de werkelijke morfologische ontwikkeling van het Zwin uitsluitend te geven. Op de uitkomst van deze studie, dat de varianten een minimale ontwikkeling hebben op de morfologie van het Zwin, heeft de uitkomst van nader onderzoek geen invloed.

In de modelresultaten is goed te zien hoe aan weerszijden van de nieuw aan te leggen strekdammen neren ontstaan. Deze neren strekken zich tot vlak aan het strand uit, en

stroomsnelheden lopen op tot 0,5 m/s. Mogelijkerwijs veroorzaken deze neren gevaarlijke situaties voor zwemmers. Aanbevolen wordt de invloed van de neervorming op de zwemveiligheid nader te onderzoeken.

REFERENTIES

Alkyon, (2008). *Morfologisch onderzoek alternatieven strekdammen Cadzand-Bad*". Alkyon rapportage A2179R1r2. September 2008.

Dam G. (2006). *Morfologische berekeningen van de Westerschelde met behulp van "FINEL2D"*. Svasek Hydraulics rapportage GD/06119/1339. 2006.

Dam, G. (2012). *Update niet-erodeerbare lagen kartering Westerschelde*. Svašek Hydraulics memo U12072/1630/GD. 2012.

Svašek Hydraulics (2009). *Morfologisch onderzoek Zwakke Schakels Noord-Holland*. Svašek Hydraulics rapportage GD/08297/1491/E. Mei 2009.

DHV (2007). *MER Zwakke Schakels Zeeuwsch-Vlaanderen*. November 2007

DHV en Waterschap Zeeuws-Vlaanderen (2007). *Ontwerp Kustversterkingsplan Zwakke Schakel West Zeeuws-Vlaanderen*. December 2007.

Svašek Hydraulics (2012). *Actualisatie van het FINEL2d model van de Westerschelde ten behoeve van Lange Termijn Visie Schelde-estuarium, Veiligheid en Toegankelijkheid*. Svašek Hydraulics rapportage 1630/U11274/GD/D. Februari 2012.

TU-Delft, (2011). *Swan User Manual*. TU Delft. 2011.

Van der Velden, E.T.J.M., (2000). *Kustmorfologie en kustprotectie. Dictaat CT5309 Civiele Techniek*. TU Delft. 2000.

BIJLAGE A: MORFODYNAMISCH MODEL FINEL2D

A.1: General

FINEL2d is a 2DH numerical model based on the finite elements method and is developed by Svašek Hydraulics. The following sections describe the governing equations of the FINEL2d model. This appendix was partly taken from Dam et. al. (2007).

A.2: Hydrodynamic module

The depth-integrated shallow water equations are the basis of the flow module. For an overview on shallow water equations see Vreugdenhil (1994).

The model equations are the continuity equation:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uD}{\partial x} + \frac{\partial vD}{\partial y} = 0, \quad (1)$$

the x-momentum balance:

$$\frac{\partial Du}{\partial t} + \frac{\partial Du^2}{\partial x} + \frac{\partial Duv}{\partial y} + f_c Dv + gD \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \tau_{x,b} + \frac{1}{\rho} \tau_{x,w} + \frac{1}{\rho} \tau_{x,r} = 0, \quad (2)$$

and the y-momentum balance:

$$\frac{\partial Dv}{\partial t} + \frac{\partial Duv}{\partial x} + \frac{\partial Dv^2}{\partial y} - f_c Du + gD \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \tau_{y,b} + \frac{1}{\rho} \tau_{y,w} + \frac{1}{\rho} \tau_{y,r} = 0. \quad (3)$$

where:

u	=depth averaged velocity in x-direction	[m/s]
v	=depth averaged velocity in y-direction	[m/s]
h	=water level	[m]
z_b	=bottom level	[m]
D	=water depth	[m]
f_c	=Coriolis coefficient	[1/s]
g	=gravitational acceleration	[m/s ²]
ρ	=density of water	[kg/m ³]
τ_b	=bottom shear stress	[N/m ²]
τ_w	=wind shear stress	[N/m ²]
τ_r	=radiation stress	[N/m ²]

In addition to the effect of advection and pressure gradients, external forces like the Coriolis force, bottom shear stress, wind shear stress and radiation stress due to surface waves can be taken into account. It is noted that turbulent shear stresses are not taken into account: the application is therefore restricted to advection dominated flows only.

As a solution method, the discontinuous Galerkin method is adopted (Hughes, 1987) in which the flow variables are taken constant in each moment. This method has advantages in dealing with drying elements.

As the momentum equations contain first order derivatives in space, they can be written as:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{F} = \mathbf{H} \quad (4)$$

where:

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} h \\ uD \\ vD \end{pmatrix}, \quad \mathbf{F} = \begin{pmatrix} uD & vD \\ u^2D + \frac{1}{2}gh^2 & uvD \\ uvD & v^2D + \frac{1}{2}gh^2 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{H} = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{\rho} \tau_{x,tot} - f_c vD - gDi_{b,x} \\ \frac{1}{\rho} \tau_{y,tot} + f_c uD - gDi_{b,y} \end{pmatrix} \quad (5)$$

in which $\tau_{tot,x}$ and $\tau_{tot,y}$ are summations of the external stresses in x- and y-direction respectively, while $i_{b,x}$ and $i_{b,y}$ are the bed level gradients in x- and y-direction respectively.

The equation can be integrated over an element resulting in:

$$\int_{\Omega_e} \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} d\Omega + \int_{\Gamma_e} \mathbf{F} \mathbf{n} d\Gamma = \int_{\Omega_e} \mathbf{H} d\Omega, \quad (6)$$

where Ω_e denotes an element, Γ_e the associated element boundary, while $\mathbf{n}$ is the outward pointing vector normal to Γ_e .

The problem is now reduced to the determination of the fluxes $\mathbf{F}$ along the boundaries. As the variables are determined at the elements and not at the sides, the flux $\mathbf{F}$ is not known beforehand, but involves the solution of a local Riemann problem. An approximate Riemann solver according to Roe (Glaister, 1993) is applied. This method guarantees strict mass and momentum conservation, but suffers from some numerical diffusion in stream-wise direction. An explicit time integration scheme is used. As this method restricts the time step, the time step is controlled automatically for optimum performance.

A special problem in shallow waters like for example estuaries is the drying and flooding of large areas during a tidal cycle. A discontinuous discretisation is used in combination with an explicit time-stepping. In this way this flooding and drying of the elements can be treated relatively easily. If an element tends to dry, the corresponding characteristic wave is partially reflected from this element which guarantees mass conservation.

A.3: Sediment transport module

FINEL2d uses the following sediment balance equation for the evolution of the bed level:

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

In which z_b [m] is the bed level and (q_x, q_y) [m^2/s] are the components of the sediment flux in x- and y-direction respectively.

The applied sediment transport formula is the Engelund-Hansen formula (Engelund-Hansen, 1967):

$$q_{t,c} = \frac{0.05\bar{u}^5}{(s-1)^2 g^{0.5} d_{50} C^3}$$

In which:

$q_{t,c}$	= volumetric current-related total load transport	[m^2/s]
$\bar{u}$	= depth averaged velocity	[m/s]
C	= Chézy coefficient	[$m^{1/2}/s$]
s	= specific density ($=\rho_s/\rho$)	[-]
ρ_s	= density sand	[kg/ m^3]
ρ	= density water	[kg/ m^3]
g	= gravitational acceleration	[m^2/s]
d_{50}	= median particle size of bed material	[m]

In this form the formula is only written for sediment transport caused by currents. The formula can be rewritten in a form where the stirring by the current is written as a shear stress.

$$\tau_{b,c} = \frac{\rho g \bar{u}^2}{C^2}$$

In which:

$\tau_{b,c}$	= shear stress due to current	[N/ m^2]
--------------	-------------------------------	-------------

The Engelund-Hansen formula then becomes:

$$q_{t,c} = \frac{0.05\bar{u}^3}{(s-1)^2 g^{1.5} d_{50} C \rho} \tau_{b,c}$$

The stirring effect of waves, which is also written as a shear stress, then can be included into the formula.

$$q_{t,cw} = \frac{0.05\bar{u}^3}{(s-1)^2 g^{1.5} d_{50} C \rho} (\tau_{b,c} + \tau_{b,w})$$

In which:

$q_{t,cw}$	= volumetric related total load transport due to currents and waves	[m^2/s]
$\tau_{b,w}$	= shear stress due to waves	[N/ m^2]

A time lag effect is introduced in the model according to Gallapatti & Vreugdenhil (1985). First a dimensionless equilibrium concentration is calculated:

$$c_e = \frac{S}{D\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (8)$$

where c_e is equilibrium concentration [-] and S the magnitude of the equilibrium sand transport [m^2/s] according to Engelund and Hansen.

The concentration c [-] is then calculated according from:

$$\frac{dc}{dt} = \frac{1}{T_A} [c_e(t) - c(t)] \quad (9)$$

In which T_A is a characteristic timescale [s].

Equation 9 shows that if the concentration is lower than the equilibrium concentration erosion will occur ($dc/dt > 0$). If the concentration is higher than the equilibrium concentration sedimentation will occur ($dc/dt < 0$). The coefficient T_A characterises the time needed for the adjustment of the concentration and is defined as $T_A = h/w_s$; where w_s [m/s] is the settling velocity of the sand particles. In relative shallow areas the time scale is small and the concentration almost immediately adjusts to the equilibrium concentration.

References

Dam, G., Blik, A.J., Labeur, R.J., Ides, S. Plancke, Y., 2007, Long term process based morphological model of the Western Scheldt Estuary, Proceedings of the 5th River, Coastal and Estuarine Morphodynamics conference, the Netherlands, p1077-1084.

Engelund, F., Hansen, E., 1967, A monograph on sediment transport in alluvial channels, Teknik Forlag, Copenhagen.

Gallapatti, R., Vreugdenhil, C. B., 1985, A depth-integrated model for suspended sediment transport. Journal of Hydraulic Research 23, p. 359-277.

Glaister, P. 1993. Flux difference splitting for open-channel flows, Int. J. Num. Meth. Fluids, 16, p. 629-654

Hughes, T.J.R, 1987, The finite element method, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
Vreugdenhil, C.B., 1994, Numerical methods for shallow water flow, Institute for Marine and Atmospheric Research Utrecht (IMAU), Utrecht University, The Netherlands