

# Samenvatting

## Waddeneilanden

Langs de Nederlandse, Duitse en Deense kust ligt een lange reeks van eilanden, de zogenaamde Waddeneilanden (zie Figuur 1.6, Pag. 7). De ligging van de eilanden is niet willekeurig, maar het lijkt juist alsof de reeks eilanden een ritmisch patroon vertoont. De golflengte van dit ritmische patroon is niet constant. De eilanden Texel, Ameland en Terschelling zijn het langst, terwijl de lengte van de Waddeneilanden afneemt in de richting van Duitsland. In de Duitse Bocht zijn de eilanden zelfs afwezig. Voorbij de Duitse bocht verschijnen de eilanden weer en neemt de lengte langzamerhand weer toe. Waarnemingen suggereren dat de lengte van de Waddeneilanden omgekeerd evenredig is met de sterkte van het getij (verschil waterstand tussen eb en vloed). Bij Texel is het verschil in waterstand tussen eb en vloed het kleinst, terwijl deze maximaal is in de Duitse bocht.

Tussen twee Waddeneilanden ligt een zeegat dat de open zee met een half afgesloten bekken verbindt. Gedurende vloed wordt het bekken gevuld met water van zee dat via het zeegat naar binnen stroomt. Gedurende eb stroomt het water van het bekken naar zee en wordt het bekken gelegegd. Aan de zeewaartse (buiten) kant van het zeegat is in veel gevallen een gebied dat relatief ondiep is ten opzichte van de omgeving. Dit gebied wordt de buitendelta of eb-getijde delta genoemd. De buitendelta ligt aan het eind van een diepe geul die gekarakteriseerd wordt door ebgedomineerde stromingen (maximum stroomsnelheid tijdens eb is groter dan tijdens vloed). Aan beide zijkanten van de buitendelta liggen in veel gevallen twee vloedgedomineerde geulen. De maximum diepte van deze geulen is kleiner dan die van de ebgedomineerde geul.

Alhoewel de verschillende buitendelta's die gevonden worden langs de Waddeneilanden veel met elkaar gemeen hebben, zijn er ook onderlinge verschillen. Een belangrijk verschil tussen de verschillende delta's is de oriëntatie van de ebgedomineerde geul. Deze geul is bij de Nederlandse Waddeneilanden naar links georiënteerd (kijkend in zeewaartse richting) en bij de Duitse naar rechts (zie Figuur 4.1, pag. 75). Als de ebgedomineerde geul naar rechts wijst, is het meeste sediment van de buitendelta ook rechts van de middenas door het zeegat te vinden. De buitendelta noemen we in dit geval dan rechts georiënteerd.

## Oostkust van de Verenigde Staten

Langs de oostkust van de VS komt ook een reeks eilanden voor. De lengte van deze eilanden varieert van enkele tot vele tientallen kilometers. Net als bij de Waddeneilanden, is het verschil in waterstand tussen eb en vloed maximaal voor de kortste eilanden en minimaal voor de langste eilanden. Ook blijkt de golfvloed in de buurt van de langste eilanden maximaal te zijn en minimaal in de buurt van de kortste eilanden. Een twee overeenkomst tussen de oostkust van de VS en de Waddenkust is de aanwezigheid van

buitendelta's. Het grote verschil met die van langs de Waddenkust is dat in veel gevallen hier de ebgedomineerde geul een kustdwarse orientatie heeft en dus geen hoek heeft t.o.v. de middenas door het zeegat. In sommige gevallen is het sediment ook symmetrisch verdeeld t.o.v. de middenas door het zeegat. In dat specifieke geval is er sprake van een symmetrische buitendelta.

### **Bestaande kennis**

Er is nog geen fundamentele verklaring voor de waargenomen lengteschaal van eilanden. Er is gesuggereerd dat een groter verschil in waterstand tussen eb en vloed er voor zorgt dat gedurende vloed meer water het bekken in stroomt. Er zijn dan meer openingen nodig om de bekkens met water te vullen. Deze conceptuele verklaring is echter niet bevredigend. Zo heeft bijvoorbeeld het zeegat van Texel het grootste getijprisma (volume van het water dat gedurende vloed en eb het bekken in- en uitstroomt) terwijl de getijamplitude hier minimaal is. Bovendien wordt zand geërodeerd door schuifspanningen aan de bodem. Deze worden veroorzaakt door waterbewegingen in de buurt van de bodem. De waterbeweging zorgt ook voor het transport van het sediment van de ene plaats naar de andere. Convergenties en divergenties in het sedimenttransport zorgen voor een verandering van de bodem. Door terugkoppelingseffecten tussen waterbeweging, sedimenttransport en de bodemligging, kunnen ritmische bodemvormen ontstaan. Een fysische verklaring voor de lengte van eilanden dient expliciet danwel impliciet de stroomsnelheden aan de bodem in beschouwing te nemen. Wat dat betreft is er op dit moment nog geen bevredigende fysische verklaring voor de lengte van de eilanden in waddenkusten.

Over de waterbeweging in de buurt van buitendelta's is redelijk veel bekend. Tijdens eb stroomt het water uit het bekken naar zee. Het water stroomt vooral kustdwars en heeft slechts een kleine component in de kustlangse richting. Dit wordt de eb-jet genoemd. Tijdens vloed wordt het water als het ware het bekken ingezogen en stroomt het water van alle kanten het bekken in. Het water stroomt dan radiëel naar binnen.

Over het sedimenttransport en de uiteindelijke bodem patronen bestaat minder fundamentele kennis. Volgens conceptuele modellen wordt de symmetrische delta gevormd tijdens eb. Het sediment wordt dan van het zeegat in zeewaartse richting getransporteerd naar plaatsen waar de stromingen zwakker zijn. Tijdens vloed wordt een gedeelte van het sediment van de delta weer naar het zeegat getransporteerd, maar die hoeveelheid is kleiner dan de hoeveelheid sediment dat tijdens eb verplaatst is. Aangezien eb en vloed zich voortdurend herhalen, betekent dit dat er zich een steeds diepere geul vormt en er een delta ontstaat die steeds groter en ondieper wordt. Waarnemingen suggereren echter dat de buitendelta een morfodynamisch evenwicht is van het bekken-zee systeem. In een morfodynamisch evenwicht zijn de stromingen, het sedimenttransport en de bodem dusdanig dat er gemiddeld over meerdere getijperiodes geen verandering van de bodem is. Bovendien is het zandvolume van de buitendelta middels een machtsrelatie aan het getijprisma gerelateerd. Het conceptuele model biedt geen verklaring of en waarom er een eventueel morfodynamisch evenwicht bestaat. Bovendien verklaart het conceptuele model niet waarom langs de oostkust van de VS de buitendelta's in sommige gevallen symmetrisch zijn en de ebgedomineerde geul kustdwars georiënteerd zijn, terwijl langs de Nederlandse en Duitse kust de buitendelta's asymmetrisch zijn en de ebgedomineerde

geulen een duidelijke oriëntatie hebben.

### **Resultaten: Lengte van eilanden**

In hoofdstuk twee van dit proefschrift is onderzocht of er verklaring te vinden is voor de lengte van een eiland. Dit is gedaan middels een stabiliteitsanalyse. Met een stabiliteitsanalyse wordt de dynamica van kleine verstoringen van een evenwicht onderzocht. Als deze verstoringen groeien in de tijd, is het evenwicht instabiel. Als de verstoringen weer uitdempen, is het evenwicht stabiel. Er is onderzocht of een rechte, zandige kust stabiel is voor kleine golfvormige verstoringen van de positie van de kustlijn. De achterliggende aanname is dat op plaatsen waar de kust zich heeft teruggetrokken, de kust gedurende een storm makkelijker kan doorbreken en dat daar dan een zeegat ontstaat. Daar waar de kust is uitgebouwd zal zich een eiland vormen. Een verstoring met een golflengte die harder groeit dan verstoringen met een andere golflengte, is het meest effectief. Deze golflengte wordt de preferente lengteschaal genoemd. Bij een kust die zich net ontwikkelt van een rechte kustlijn naar een meanderende kust, zullen na verloop van tijd vooral de meanderingen met deze specifieke golflengte zichtbaar worden. Dit geeft de lengteschaal van de eilanden aan.

De waterbeweging in het model wordt veroorzaakt door zowel golven als getij. Sedi-ment wordt opgewoeld door de golven en vervolgens getransporteerd door getijstromen en golfgedreven stromingen. De centrale vraag in hoofdstuk twee is of de interactie tussen kustlangse getijstromen en golfgedreven stromingen met de positie van de kustlijn dusdanig is, dat er sediment getransporteerd wordt van de plek waar de kust is teruggetrokken naar nabijgelegen locaties waar de kust is uitgebouwd. Dit zorgt er voor dat een initiële verstoring van de kust groeit in de tijd. Het nieuwe aspect in dit onderzoek is dat ook de invloed van getijstromen op de stabiliteit van de kustlijn is meegenomen. Daarom zijn eerst experimenten gedaan waarin de golfinvloed dusdanig is dat zij noch voor groei noch voor demping van de verstoringen van de kustlijn zorgt. De resultaten laten zien dat voor parameterwaardes gebaseerd op de Nederlandse kust, verstoringen van de kustlijn met een golflengte kleiner dan 8 km, groeien. De verstoringen met de kleinste golflengte groeien het hardst. Verstoringen van de kustlijn groeien met een typische tijdschaal van 100 jaar. De verstoringen groeien niet alleen, maar migreren ook met een typische snelheid van 10 meter per jaar. In het geval van de Nederlandse kust betekent dit dat de Waddeneilanden naar het oosten bewegen. Voor verstoringen met golflengtes langer dan 8 km is de interactie tussen de verstoring van de kustlijn en de kustlangse getijstromen dusdanig dat de verstoringen uitdoven.

Hoewel golfvormige verstoringen van de kustlijn kunnen groeien, laten de resultaten zien dat wanneer het sediment alleen maar getransporteerd wordt door getijstromingen, geen verklaring gegeven kan worden voor de lengte van een eiland. Het model voorspelt geen golflengte die het hardst groeit. Er is geen mechanisme dat voor demping van de verstoringen met de kleinste lengteschaal zorgt.

Uit eerder onderzoek is bekend dat golfgedreven stromingen voor een demping van de verstoringen zorgen. Daarom is de gecombineerde invloed van golfgedreven stromingen en getijstromingen op de stabiliteit van de kustlijn onderzocht. Voor bepaalde combinaties van parameters is er dan een golflengte die het snelst groeit. De bijbehorende

lengteschaal varieert, voor verschillende parameter combinaties, tussen bijna nul en 15 kilometer. Gevoeligheidsstudies laten zien dat bij gelijkblijvende golfinvloed en toenemende magnitude van de kustlangse getijstromen de preferente lengteschaal afneemt. Bij constante magnitude van de kustlangse getijstromen en toenemende golfinvloed neemt de preferente lengteschaal juist toe. Deze theoretische voorspellingen zijn vergeleken met waarnemingen van lengtes van eilanden en de sterkte van de kustlangse getijstromen. Hieruit blijkt dat langs de Waddenkust niet alleen het verschil tussen eb en vloed toeneemt, maar ook de sterkte van de kustlangse getijstromingen. Tegelijkertijd neemt de lengte van de Waddeneilanden af. De modelresultaten zijn op dit punt in overeenstemming met de waarnemingen. Bovendien voorspellen de modelresultaten dat Terschelling op dit moment erg lang is in verhouding tot de hydrodynamische condities. De modelresultaten voorspellen dat wanneer de natuur op Terschelling de vrije hand zou krijgen dit eiland zou kunnen opsplitsen in meerdere kleine eilanden. De modelresultaten zijn ook in overeenstemming met waarnemingen langs de oostkust van de V.S.

### **Resultaten: Symmetrische buitendelta's**

In de rest van het proefschrift is de dynamica van buitendelta's bestudeerd. Een belangrijke vraag is of de buitendelta als een morfodynamisch evenwicht beschouwd kan worden. Om deze vraag te beantwoorden is gebruik gemaakt van een geïdealiseerd model. Zowel de geometrie als de beschrijving van de fysische processen zijn geïdealiseerd. De geometrie bestaat uit een zee die aan één kant begrensd wordt door een lange, gesloten kust. Deze kust is over een afstand van een paar kilometer open. Deze opening stelt het zeegat voor. De snelheden in het zeegat volgen niet uit fysische behoudswetten, maar worden als bekend verondersteld en als dusdanig voorgeschreven. Om symmetrische oplossingen te krijgen is aangenomen dat alle stromingen in het domein veroorzaakt worden door de stromingen door het zeegat, dat de invloed van de Coriolis-kracht op de dynamica verwaarloosbaar klein is, dat het uitstroomprofiel over het zeegat symmetrisch is t.o.v. de middenas door het zeegat en dat de golven loodrecht op kust invallen. Het sedimenttransport wordt met een zogenaamde bed-load formulering beschreven. Hierin zijn twee componenten van belang: een component van het sedimenttransport dat door stromingen alleen geïnduceerd wordt en een gedeelte dat veroorzaakt wordt door de aanwezigheid van bodemhellingen. Deze laatste component beschrijft in feite dat het makkelijker is om sediment met de helling mee te transporteren dan tegen de helling op. Convergenties en divergenties in het sedimenttransport zorgen voor een verandering van de bodem. In morfodynamisch evenwicht wordt de convergentie van het sedimenttransport door stromingen alleen, gecompenseerd door de divergentie van het sedimenttransport door de aanwezigheid van bodemhellingen.

Om evenwichtoplossingen van het stelsel vergelijkingen dat de dynamica beschrijft te vinden, is een zogenaamde continueringsmethode gebruikt. Uitgangspunt is dat er een bestaande evenwichtoplossing bekend is. In hoofdstuk drie beschrijft deze zogenaamde referentietoestand een kustlangs uniforme bodem. In de kustdwarse richting neemt de waterdiepte toe. Door het zeegat zijn geen stromingen. Vervolgens wordt een parameter een klein beetje veranderd, bijvoorbeeld de magnitude van de stromingen door het zeegat. Als de verandering van de parameter erg klein is, kan aangenomen worden dat het evenwicht

behorend bij de oude parameter waarde, een redelijke schatting is voor het evenwicht dat bij de nieuwe parameterwaarde hoort. Met behulp van de oude evenwichtsooplossing wordt de waterbeweging en het sedimenttransport t.g.v. de stromingen voor de nieuwe parameterwaarde berekend. Vervolgens wordt een nieuwe schatting voor de evenwichtsbodem berekend door de evenwichtsconditie toe te passen. Omdat de stromingen zelf weer afhangen van de waterdiepte, moet de waterbeweging, het sedimenttransport en de evenwichtsconditie opnieuw uitgerekend worden. Dit wordt herhaald totdat het verschil tussen twee opeenvolgende schattingen van de evenwichtsbodem kleiner is dan een vooraf bepaalde waarde. Vervolgens kan opnieuw een parameter veranderd worden.

De resultaten beschreven in hoofdstuk drie laten zien de buitendelta inderdaad beschouwd kan worden als de bodem behorend bij het morfodynamisch evenwicht door de interactie tussen de zee en het bekken. De berekende symmetrische bodempatronen lijken sterk op waargenomen bodempatronen van buitendelta's. Bovendien is de gemodelleerde relatie tussen het getijprima en het zandvolume in de delta ongeveer gelijk aan die van de waarnemingen. Ook de gemodelleerde waterbeweging komt goed overeen met waarnemingen. De modelresultaten zijn robuust. De gemodelleerde bodempatronen worden voor een grote reeks verschillende parameterwaardes gevonden. Zelfs het toevoegen van sterke golfinvloed heeft slechts een kleine invloed op de gemodelleerde bodempatronen: de delta is iets groter en de twee vloedgeulen iets dieper.

Er zijn echter ook verschillen tussen de gemodelleerde en waargenomen bodempatronen van buitendelta's. De gemodelleerde ebgeul is veel korter dan waargenomen. Bovendien lijkt het in waarnemingen haast alsof de delta om de ebgeul heengevouwen is. De ebgeul snijdt in de buitendelta. Ook dit wordt niet gereproduceerd met het model. Een ander belangrijk verschil is dat de gemodelleerde zandvolumes van de buitendelta ongeveer een factor vijf kleiner zijn dan de waargenomen zandvolumes. Waar worden deze verschillen door veroorzaakt? Zoals reeds gezegd, het geïdealiseerde model heeft zeer veel beperkingen en aannames. De gevoeligheid van de resultaten voor deze aannames kan niet met het geïdealiseerde model zelf onderzocht worden. Bovendien moet gecontroleerd worden of de aannames wel hout snijden. Hier moet een ander model voor ontwikkeld worden. Dit is gedaan in hoofdstuk vijf. De hydrodynamische modules van Delft3D (FLOW en SWAN) zijn gebruikt als state-of-the-art model om de waterbeweging te berekenen. Vervolgens is ongeveer dezelfde formulering van het sedimenttransport gebruikt (alleen wordt de invloed van hogere harmonische componenten van het getij op het residuele sedimenttransport in dit geval wel meegenomen) en dezelfde evenwichtsconditie toegepast. Ook in hoofdstuk vijf is een continueringstechniek gebruikt om evenwichtsbodems te berekenen.

Allereerst is geprobeerd om de configuratie en parameterwaardes van het numerieke model zo dicht mogelijk bij die van het geïdealiseerde model te kiezen. In dat geval lijken de resultaten van beide modellen erg op elkaar. De verschillen zijn vooral kwantitatief van aard en worden veroorzaakt door de randvoorwaarden in het zeegat die niet gelijk aan elkaar te krijgen zijn.

Gevoeligheidsexperimenten laten zien dat de resultaten niet al te gevoelig zijn voor de intern gegenereerde hogere harmonischen van het getij. Als echter een extern M4 getij wordt voorgeschreven hangen de gemodelleerde bodempatronen af van het relatieve faseverschil tussen het M4 en het M2 getij. In het geval dat het zeegat ebgedomineerd of neutraal is, zijn de bodempatronen hetzelfde, maar hebben een ze grotere amplitude

dan in het geval dat er geen extern M4 getij is. Een vloedgedomineerd zeegat leidt tot een afwezigheid van de buitendelta. Op de plaats waar in alle andere gevallen zich een buitendelta bevond, is nu een vloedgedomineerde geul.

Uit een andere serie experimenten blijkt dat de gemodelleerde bodempatronen een stuk beter met de waarnemingen te vergelijken zijn als er een kwadratische bodemwrijvingsformulering gebruikt wordt i.p.v. een gelineariseerde. De zeewaartse lengte van de ebgeul is groter en er is een eerste indicatie dat de buitendelta om de ebgeul heen buigt. Bovendien ligt het gemodelleerde zandvolume een stuk dichterbij de waargenomen waarden.

Het laatste aspect dat in Hoofdstuk 5 is onderzocht, is in hoe verre de resultaten gevoelig zijn voor golfparameters berekend met een state-of-the-art golfmodel i.p.v. berekend met een zeer geïdealiseerd golfmodel. Er blijkt een verschil te zijn: Als de buitendelta ondieper wordt en de golfhoogte toeneemt, kunnen de effecten van brekende golven belangrijk worden.

### **Resultaten: Asymmetrische delta's**

In Hoofdstuk drie en vijf stond de symmetrische buitendelta centraal. Alle processen die tot asymmetrie leiden waren niet meegenomen. Waarnemingen laten echter zien dat langs de Nederlandse Waddenkust de ebgeulen een oriëntatie hebben t.o.v. de middenas door het zeegat en dat het sediment asymmetrisch is verdeeld. Daarom is het geïdealiseerde model uit hoofdstuk drie uitgebreid met processen die tot asymmetrie kunnen leiden. De aandacht is vooral gericht op processen die gerelateerd zijn aan getij. De resultaten laten zien dat de Coriolis-kracht weinig invloed heeft op de asymmetrie van de buitendelta. Het gebied met ebgedomineerde stromingen is iets naar rechts (kijkend in zeewaartse richting) verschoven t.o.v. de symmetrische situatie. Ook de buitendelta is iets naar rechts verschoven, maar de buitendelta is amper asymmetrisch. Een tweede effect dat belangrijk kan zijn voor de asymmetrie van de buitendelta zijn de kustlangse getijstromen. Deze kustlangse getijstromen interacteren met de kustdwarse stromingen door het zeegat. Als de kustlangse en kustdwarse stromingen in fase zijn (ongeveer de situatie langs de Nederlandse Waddenkust) leidt dit tot sterke ebgedomineerde stromingen aan de linkerkant van het zeegat en zwakke vloedgedomineerde stromingen aan de rechterkant. Het systeem is links georiënteerd. De buitendelta bevindt zich links van de middenas van het zeegat. Er wordt echter geen ebgedomineerde geul gemodelleerd, wel een vloedgedomineerde geul rechts van de middenas. Een verandering van het faseverschil tussen de kustlangse en kustdwarse getijstromen zodanig dat de kustlangse getijstromen voor lopen op de kustdwarse getijstromen, leidt tot een verandering van de asymmetrie-eigenschappen. Bij toenemend faseverschil ligt het sediment steeds meer rechts van de middenas en bij een faseverschil van meer dan 80 graden bevinden zich zowel het gebied met ebgedomineerde stromingen als het meeste sediment van de buitendelta zich rechts van de middenas. Een grootschalige reststroom op zee veroorzaakt door getij heeft ook een sterke invloed op de asymmetrie. Wanneer de reststroom in het geval van de Nederlandse Waddenkust van west naar oost is gericht, liggen zowel het gebied met ebgedomineerde stromingen als het grootste deel van het sediment van de buitendelta rechts van de middenas door het zeegat. Dit kan dus mogelijk het effect van de interactie tussen de kustdwarse en kustlangse getijstromen teniet doen.