

Kustdynamica

Weer, klimaat en kust

Huib de Swart (IMAU)

In veel kustzeeën vinden complexe wisselwerkingen plaats tussen stromingen, golven en de zandige bodem. Hierdoor vormen zich zandbanken en verandert de kustlijn. Belangrijke factoren die deze ontwikkelingen bepalen zijn de stand van de zeespiegel en het stormklimaat. In dit artikel wordt besproken wat in grote lijnen het gedrag is van zandige kusten, welke processen daarbij belangrijk zijn en welke problemen zich voordoen bij het simuleren van verwachte kustontwikkelingen. Er wordt ondermeer gebruik gemaakt van inzichten die verkregen zijn door onderzoekers van het IMAU (Instituut voor Marien en Atmosferisch Onderzoek Utrecht).

PROBLEMATIEK EN RELEVANTIE

Strand en zee; ze zijn een bron van zowel plezier, fascinatie als zorg. Al deze aspecten zijn te herkennen in figuur 1, een foto van de kust bij Egmond. De bezoekers van de terrassen en de wandelaars genieten. Fascinatie is er bij mensen die oog hebben voor de golven die vanaf open zee de kust naderen en daar breken. Ook de fraaie vorm van de kustlijn en de structuur van zandbanken zijn aandachtstrekkers.

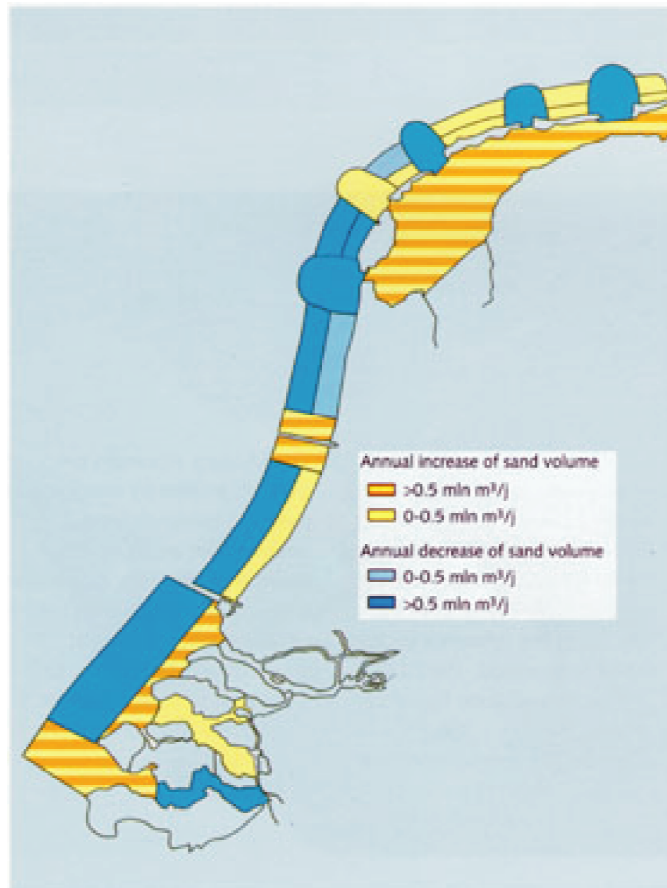


Figuur 1. Strand nabij Egmond aan Zee, 1993 (bron: RIKZ, Den Haag, <http://www.rikz.nl>).

Dat de zee ook een bedreiging voor de mens kan zijn blijkt ondermeer uit de vuurtoren. Maar ook uit de diepe geul die zich ter hoogte van de vuurtoren uitstrekt richting zee, de steile duinen en de vorm van het dorp. De geul is een mui, waarin een sterke zeewaartse stroming bestaat van zo'n 1 ms^{-1} . Muien zorgen voor veel kustafslag en zijn ook een groot gevaar voor zwemmers. Uit statistieken (<http://www.ripcurrents.noaa.gov>) blijkt dat in de Verenigde Staten elk jaar ongeveer 100 mensen verdrinken omdat muistromingen ze

richting open zee trekken. Gemiddeld gezien is dat aantal slachtoffers zelfs groter dan dat ten gevolge van stormvloed, d.w.z. wateropzet door een combinatie van wind en getij.

De steile duinen duiden er op dat er in de maanden voor het tijdstip waarop de foto is gemaakt stormen zijn geweest, waarbij golven stukken duin hebben weggeslagen. Een duidelijke indicatie dat kustafslag hier een punt van zorg is. Het probleem is echter niet overal even groot en in sommige regio's zelfs afwezig (figuur 2). De pier van IJmuiden blijkt zelfs een effectieve 'zandvanger' te zijn. De figuur toont ook de invloed van de politiek op het Nederlandse kuststelsel. In 1990 besloot de regering dat de kustlijn moest worden gehandhaafd op een vastgestelde basiskustlijn. Sindsdien wordt jaarlijks, daar waar nodig, zand naar het strand gebracht.



Figuur 2. Zandbalans van de Nederlandse kust (bron: Rijkswaterstaat).

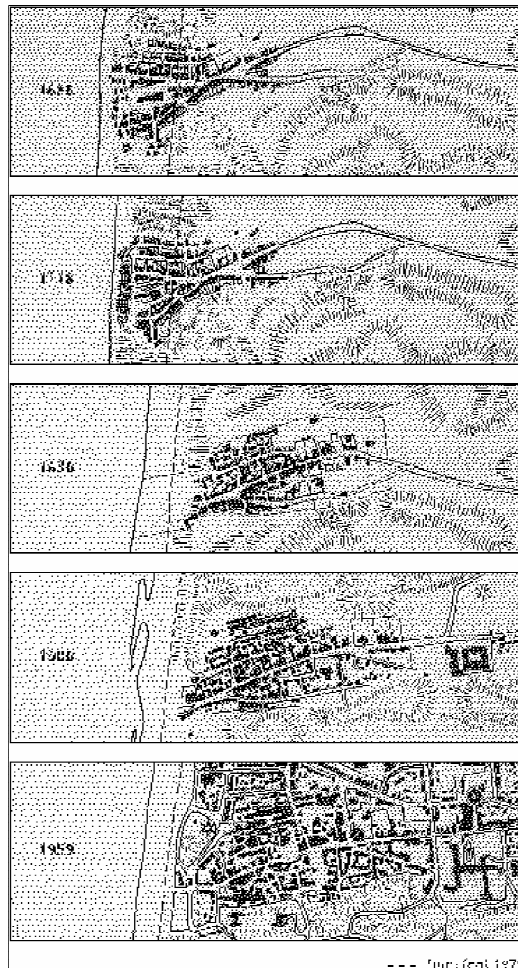
De ligging van het dorp Egmond aan Zee is in de laatste eeuwen sterk veranderd (zie figuur 3). Als gevolg van ondermeer de stijgende zeespiegel trok de kustlijn zich terug en is een gedeelte van het dorp onder water verdwenen. Dit blijkt geen simpel 'verdrinkingsproces' te zijn, de kust heeft zich over een grotere afstand teruggetrokken dan op grond van de verticale zeespiegelstijging en de steilheid van het strandprofiel verwacht mag worden.

Uit het voorgaande blijkt dat er maatschappelijke interesse en behoefte is aan kennis over hoe het kuststelsel zich gedraagt. Belangrijke vragen zijn bijvoorbeeld: onder welke omstandigheden ontstaan er muien en zandbanken, welke rol spelen zandbanken bij de bescherming van de kust tegen golfwerking, hoe reageert de zandbalans van de kust op stormen, zeespiegelstijging en menselijke ingrepen (zoals zandwinning, baggeren, bouw van havens, etc.).

DYNAMIEK VAN ZANDIGE KUSTEN

Om op voorgaande vragen in te kunnen gaan is het belangrijk om eerst een conceptueel beeld te hebben van kustprocessen. Deze processen zijn het gevolg van wisselwerkingen

tussen de waterbeweging, geforceerd door wind, inkomende golven en getijkrachten, en de bodem. Als de waterbeweging een voldoende grote schuifspanning op de bodem uitoefent wordt er zand opgewerveld. Dit wordt vervolgens door de aanwezige stromingen getransporteerd en elders gedeponerd. Als gevolg hiervan ontstaan veranderingen in de bodem en kustlijn: daar waar erosie plaatsvindt ontstaat een geul en/of trekt de kustlijn zich terug, terwijl in gebieden waar zandoverschot is zich een zandbank vormt en de kustlijn zich richting zee uitbouwt. Dit heeft uiteraard zijn invloed op de waterbeweging: het gedrag van golven en stromingen wordt in sterke mate bepaald door de waterdiepte.



Figuur 3. Ontwikkelingen van de kustlijn nabij Egmond aan Zee (bron: Rijkswaterstaat).

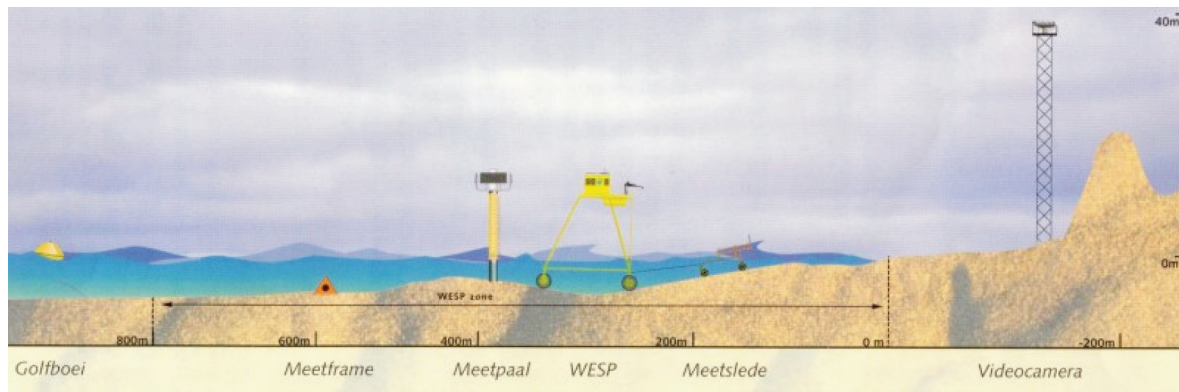
Dit beeld van het kuststelsel lijkt tamelijk eenvoudig, maar wanneer men het gedrag wil doorgronden en modelleren dienen zich grote problemen aan. Zo is er sprake van verschijnselen met zeer verschillende tijd- en ruimteschalen. Bijvoorbeeld, een typische windgolf heeft een periode van orde 10 s en een golflengte van 50 m, terwijl een grote zandbank een omvang van enkele km kan hebben en zich ontwikkelt op een tijdschaal van vele tientallen jaren. Ook de forcering van het kuststelsel kenmerkt zich door 'snelle' variaties (bijvoorbeeld van de wind) en langzame variaties (bijvoorbeeld van de zeespiegel). Het in detail simuleren van al deze verschijnselen is niet mogelijk, vanwege beperkingen in snelheid en geheugen van computers. Maar eigenlijk zou dat wel moeten, want al deze fenomenen beïnvloeden elkaar via niet-lineaire wisselwerkingen. En dan is er nog er het probleem dat de kennis van diverse deelprocessen (bijvoorbeeld breken van golven, zandtransport) te wensen over laat. Daarmee worden in modellen fouten (onnauwkeurigheden) geïntroduceerd met verregaande gevolgen. Niettemin blijkt het toch mogelijk om diverse facetten van kustgedrag te begrijpen en te modelleren.

KUSTONDERZOEK

Voor onderzoek worden een drietal werkmethodes gevolgd. Ten eerste nemen onderzoekers deel aan (dikwijls) internationale veldexpedities, waarbij nieuwe gegevens van golven, stromingen en bodemligging worden ingewonnen. Deze worden vervolgens geanalyseerd en gebruikt om belangrijke verschijnselen te identificeren. Ten tweede worden relatief simpele begripsmodellen ontworpen en geanalyseerd. Deze hebben tot doel om een beter inzicht te krijgen in de precieze werking van specifieke verschijnselen. En ten derde worden simulaties uitgevoerd met complexe numerieke modellen met als doel inzicht te krijgen in bijvoorbeeld kustgedrag op tijdschalen van jaren en langer. Een korte schets van de methodieken en van een aantal aansprekende resultaten die daarmee zijn behaald komen in de volgende secties aan de orde.

VELDMETINGEN

Gegevens over waterbeweging, zandtransport en bodemligging worden op diverse manieren verkregen (zie figuur 4). Boeien en meetpalen registreren golfgegevens (b.v. gemiddelde hoogte, periode en richting) en waterstanden. Dicht bij de kust wordt de WESP (de Water-En Strand Profiler, zie http://www.geog.uu.nl/fg/wesp_nl.html) gebruikt om de bodemligging vast te leggen. De WESP is ongeveer 11 meter hoog en kan tot zo'n 800 meter uit de kust worden ingezet. In dieper water worden meetgegevens vanaf schepen ingewonnen.



Figuur 4. Overzicht van meetsystemen (bron: Rijkswaterstaat).

Verder worden langs de gehele Nederlandse kust al sinds 1964 ieder jaar om de 250 meter kustdwarse bodemprofielen opgenomen, vanaf de duinvoet tot ongeveer 1 km uit de kust. Het zo ontstane gegevensbestand (JARKUS, een acroniem voor JAaRlijkse opname van de KUST) is uniek vanwege de lengte van de registratieperiode.

Bovengenoemde meettechnieken hebben nadelen: ze zijn tijdrovend en geven slechts een beeld van de kust gedurende een korte periode en in een klein gebied. Verder kunnen geen metingen worden gedaan tijdens stormen en juist dan gebeurt er veel. De laatste jaren zijn er belangrijke hulpmiddelen bijgekomen om kustgedrag vast te leggen. Zo worden o.a. opnamen uit satellieten gebruikt om temperatuur en hoeveelheid zwevend stof in de waterkolom te bepalen. In figuur 4 worden 'remote sensing' gegevens ingewonnen met behulp van een videocamera, die zich in de top van de meetmast bij de duinvoet bevindt. Deze videocamera detecteert het witte schuim van brekende golven. Aangezien golfbreking met name plaatsvindt in ondiep water geven de videobeelden een goede indruk van de ligging van zandbanken. Weliswaar in een klein gebied, maar met een hoge resolutie in zowel ruimte als tijd. Ook kunnen m.b.v. videobeelden de ligging van de kustlijn, de golfloop op het strand en oppervlaktstromingen worden bepaald. En de videocamera registreert ook wat er gebeurt tijdens stormachtig weer, alleen daglicht en mist zijn beperkende factoren.

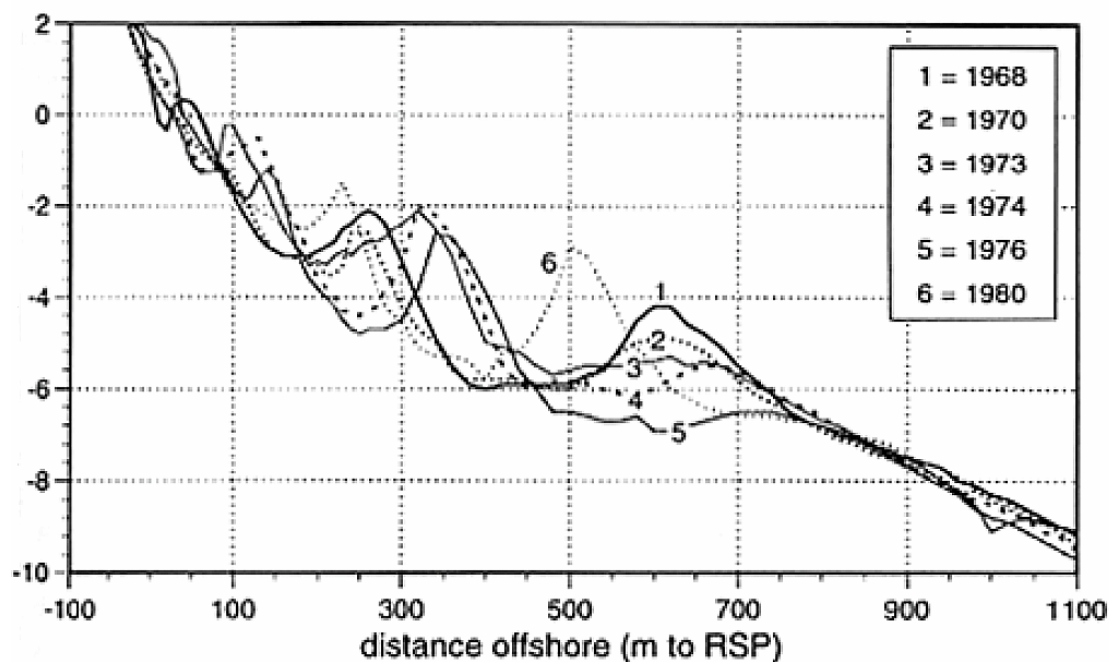
Inmiddels zijn er op een groot aantal plaatsen in de wereld videocamera's geïnstalleerd, waaronder in de vuurtoren van Egmond aan Zee en op het dak van een hotel in Noordwijk aan Zee. De beelden kunnen on-line worden bekeken (<http://cil-www.oce.orst.edu:8080>) en

worden door onderzoekers gebruikt voor analyse van kustprocessen, toetsen van theorieën, enz.

ANALYSE VAN VELDMETINGEN

De analyse van de gegevens heeft tot belangrijke nieuwe inzichten geleid. Zo is uit de analyse van JARKUS data (Wijnberg, 1995; Van Enckevort, 2003) gebleken dat zandbanken die vrijwel parallel aan de kust liggen cyclisch gedrag vertonen. Dat wil zeggen, de banken ontstaan vlakbij de kust en verplaatsen zich vervolgens in de loop van jaren netto richting zee, totdat ze op zo'n kilometer buiten de kust inzakken en verdwijnen. Ondertussen hebben zich al weer nieuwe banken bij de kust gevormd.

Een voorbeeld van dit gedrag is te zien in figuur 5, waarin een aantal kustdwarse bodemprofielen nabij Egmond aan Zee uit verschillende jaren worden getoond. De zeewaartse verplaatsing blijkt vooral tijdens stormen plaats te vinden; tijdens rustig weer bewegen de banken juist richting de kust. De netto verplaatsing is echter zeewaarts.



Figuur 5. Bodemprofielen nabij Egmond aan Zee (uit: Wijnberg, 1995).

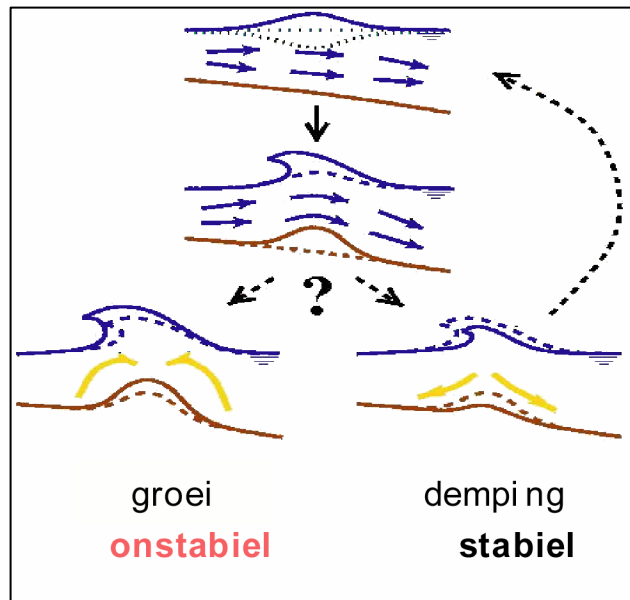
Een ander opmerkelijk feit betreft de levensduur van deze zandbanken; deze blijkt langs de Zuid-Hollandse kust veel korter te zijn dan langs de Noord-Hollandse kust: 4, respectievelijk 15 jaar. Deze vaststelling heeft de laatste jaren tot veel onderzoek geleid, maar de precieze reden voor dit verschil is nog niet duidelijk.

Verder laten de JARKUS data, maar ook videobeelden zien dat bij rustig weer driedimensionale structuren in de zandbanken ontstaan. Deze hebben dikwijls een ritmische structuur, kijkend in de kustlangse richting. Deze structuren van zandbanken en ertussen gelegen muien blijken zich per dag tientallen meters te kunnen verplaatsen. Tijdens stormen verdwijnen de driedimensionale structuren weer.

MORFODYNAMISCHE ZELFORGANISATIE

De vorming van zandbanken met een min of meer periodieke structuur in de kustlangse richting blijkt te kunnen verklaard met het principe van *morfodynamische zelforganisatie*. Het ontstaan van zandbanken is vergelijkbaar met dat van depressies in de atmosfeer. In dit

geval is het zo dat kleine verstoringen van de bodem kunnen groeien door positieve terugkoppelingen tussen de waterbeweging en de bodem. Dit principe is geïllustreerd in figuur 6. Het vertaalt zich in wiskundige modellen als een instabiliteit van een zogeheten basistoestand, die de situatie van stroming, golven en bodem beschrijft in de afwezigheid van zandbanken.

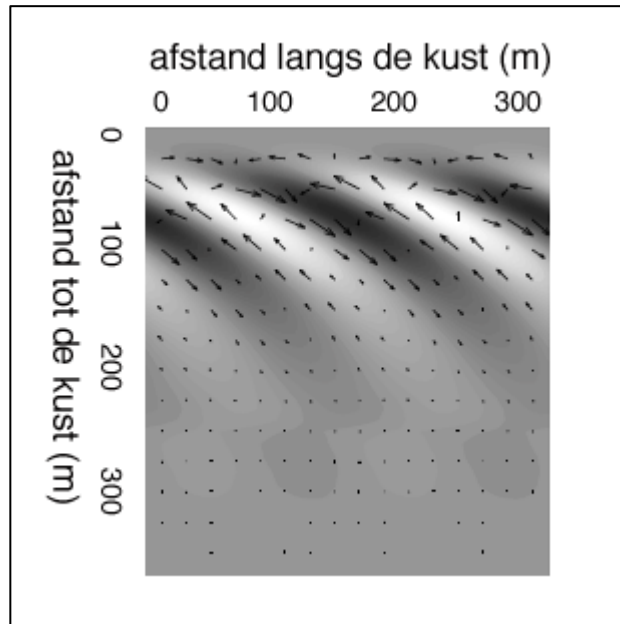


Figuur 6. Morfodynamische zelforganisatie.

Figuur 6 toont zijaanzichten, waarbij de golven zijn weergegeven met de getrokken lijn, de stroming met de donkere pijlen, de bodem met de lichte doorgetrokken lijn en het zandtransport met de lichte pijlen. In de basistoestand (boven) is er sprake van evenwicht: het netto zandtransport heeft op elke positie dezelfde waarde. Het is een evenwicht, maar dit is instabiel voor kleine verstoringen. Hetzelfde kan in het kuststelsel gebeuren: in de figuur eronder is een kleine, willekeurige verstoring van de bodem aangebracht. Zoals in elk natuurlijk systeem zullen dergelijke verstoringen zich altijd voordoen. Vervolgens is de vraag hoe de golven, stromingen en daarmee het zandtransport hier op reageren. Dit is te zien onderaan figuur 6. In de situatie links resulteert de bodemverstoring in een netto depositie van zand boven de bank; deze zal dus groeien en de basistoestand is instabiel. In de situatie rechts gebeurt het omgekeerde: het zandtransport zorgt voor demping van de verstoring en de basistoestand is stabiel. Wat ook kan gebeuren is dat de meeste depositie van zand enigszins rechts (of links) van de top van de bank plaatsvindt; in dat geval zal de bank groeien en zich ondertussen ook verplaatsen.

Er zijn in de loop van de jaren diverse begripsmodellen ontwikkeld, o.a. op het IMAU, die het ontstaan en de daarop volgende ontwikkeling van zandbanken beschrijven. Het blijkt dat de karakteristieken van de zandbanken (afmeting, vorm, verplaatsingssnelheid) sterk afhangen van golfhoogte en hoek van inval van de golven. Figuur 7 toont een voorbeeld van een modeluitkomst bij schuin invallende golven (hier: hoek van 20 graden, kloksgewijs t.o.v. de as loodrecht op de kust). De lichte (donkere) tinten duiden hier op zandbanken (muien). Het patroon beweegt met een snelheid van ongeveer 30 meter per dag naar rechts.

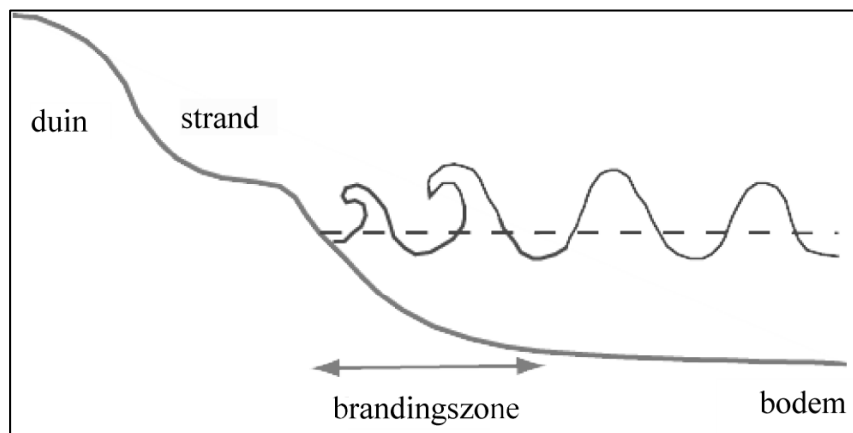
De modelresultaten zijn deels in overeenstemming met veldwaarnemingen, maar er zijn ook duidelijke verschillen. Deze worden toegeschreven aan het feit dat de modellen een geïdealiseerd beeld van de werkelijkheid geven. Zo houden ze bijvoorbeeld geen rekening met veranderingen van golfcondities in de tijd en met variaties van stromingen met de diepte. Ook de gebruikte formuleringen voor zandtransport zijn sterk vereenvoudigd. Momenteel wordt veel in het werk gesteld om de modellen op deze punten te verbeteren.



Figuur 7. Bovenaanzicht van een berekend zandbankenpatroon.

DECADAAL GEDRAG VAN ZANDBANKEN

Het is niet zo dat de ontwikkeling van alle zandbanken met behulp van morfodynamische zelforganisatie te verklaren is. Zo lijkt het ontstaan van zandbanken evenwijdig aan de kust en hun zeewaartse verplaatsing het gevolg te zijn seizoensvariaties in golfcondities. Figuur 8 laat zien hoe dit ongeveer in zijn werk gaat.



Figuur 8. Het ontstaan van een brandingsbank.

Golven, die zich vanaf diep water richting het strand bewegen, hebben een asymmetrisch profiel. Daardoor transporteren ze netto zand richting de kust. Als de golven dicht bij de kust komen breken ze. Daardoor ontstaat een krachtige kustwaartse onderstroming en daarmee een zeewaarts zandtransport. Ook de bodemhelling zelf zorgt voor transport richting zee. Het zijn vooral deze drie mechanismen die, op tijdschalen van jaren en langer, voor netto transport richting zee zorgen. Buiten de brandingszone overheerst het netto zandtransport ten gevolge van golfasymmetrie; in figuur 8 is dat met de rechter donkere pijl aangegeven. In de brandingszone overheerst juist het zeewaartse zandtransport ten gevolge van onderstroming en bodemhelling. Het uiteindelijk beeld is dat er aan de zeewaartse kant van de brandingszone zich zand ophoopt: hier ontstaat een brandingsbank. Het ontstaan van zo'n bank vindt plaats tijdens rustig weer. De brandingszone is dan vrij smal, omdat de golven laag zijn, dus de bank ligt dicht bij de kust. Tijdens een daaropvolgende storm zijn de golven gemiddeld hoger, ze breken verder uit de kust en zodoende verplaatst de bank zich richting zee. Als het daarna weer rustig weer wordt kan de bank zich een beetje richting land

verplaatsen, maar de snelheid is laag vanwege de relatief grote waterdieptes. Uiteindelijk verplaatst de bank zich tot zo'n 1 km uit de kust, waarna de bank verdwijnt. Het laatste proces is nog niet goed begrepen, maar het lijkt er op dat op deze locatie de golven er voor zorgen dat het zand van de bank weer richting land wordt verplaatst.

KLIMAAT EN KUST

Wat is nu de invloed van klimaatveranderingen op de kust? Er zijn drie belangrijke factoren, namelijk veranderingen in zeespiegelstand, veranderingen in getijcondities en mogelijke veranderingen in het stormklimaat. Al in 1962 publiceerde Per Bruun een eenvoudig model dat verklaarde waarom stijging van de zeespiegel tot sterke kusterosie kan leiden. Het model gaat er van uit dat zich, bij constant zeeniveau en op tijdschalen van vele jaren, zich een evenwichtsbodemprofiel instelt. Dus de zandtransporten t.g.v. de in de vorige sectie besproken drie mechanismen (samenhangend met golfasymmetrie, onderstroming en bodemhelling) maken, op deze tijdschaal bekeken, balans met elkaar.

Wat gebeurt er nu als de zeespiegel stijgt (in figuur 9 van niveau z1 naar z2), bijvoorbeeld door thermische expansie van het zeewater als gevolg van het broeikaseffect? Het model laat zien dat er niet alleen 'verdrinking' plaatsvindt, maar dat de kustlijn een stuk verder landwaarts komt te liggen, omdat het gehele bodemprofiel sterk verandert (getrokken lijn behoort bij niveau z1, gestreepte lijn bij z2). Het is namelijk zo dat bij een hogere zeespiegelstand de golven tijdens stormen een stuk hoger het strand oplopen, daar zand weghalen en dat vervolgens richting zee afvoeren. Het resultaat van dit model is de zogeheten 'Bruun-regel', die stelt dat de kusterosie een orde 100 groter is dan de zeespiegelstijging. Waarnemingen van vele kusten bevestigen het globale gelijk van de Bruun-regel.

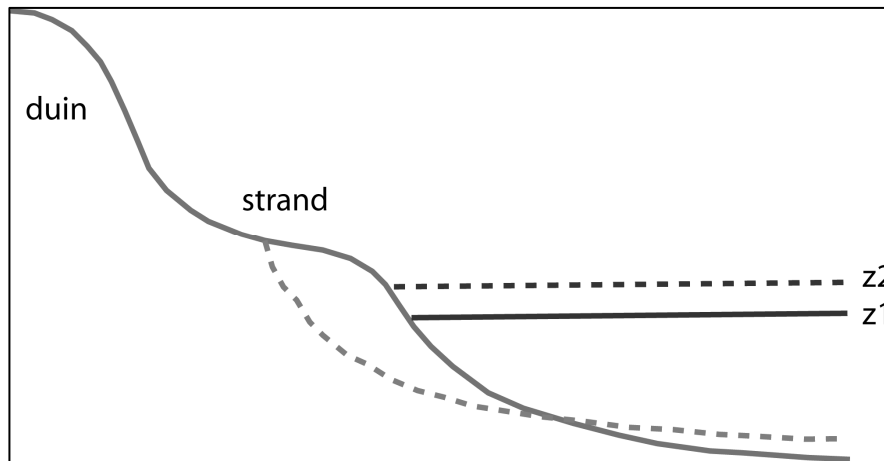
In dit kader is het belangrijk om op te merken dat veranderingen in de zeespiegelstand ook het gevolg zijn van decadaal variaties in de atmosferische circulatie (bijvoorbeeld de Noord-Atlantische Oscillatie, waarover hieronder meer) en langjarige getijcomponenten (zoals de 18.6 jaarlijkse cyclus). Omgekeerd geldt dat de lokale kenmerken van getijden afhangen van de zeespiegelstand. Zo blijkt (<http://ds122.xs4all.nl/waterstat/applicatie/wslNetApp.asp>) dat het verschil tussen hoogwater en laagwater in de Noordzee de afgelopen 100 jaar met enkele tientallen cm is toegenomen. Dit heeft tot gevolg dat, als het stormklimaat onveranderd blijft, de stormvloed (een combinatie van wateropzet door wind en hoogwater) meer intens kunnen zijn. Of het stormklimaat ook op een tijdschaal van eeuwen verandert is niet overtuigend aangetoond. Wel is er een duidelijke positieve correlatie tussen de jaarlijks gemiddelde golfhoogte in de Noordzee en de NAO index. Laatstgenoemde kenmerkt de sterkte van de Noord-Atlantische Oscillatie, een lange-termijn (decadale) mode van de atmosferische circulatie. Bij een positieve index is het drukverschil tussen het Azoren hogedrukgebied en het IJsland lagedrukgebied groot, de westelijke circulatie in Noord-West Europa is sterk en in de Noordzee komen veel stormen voor. Beheerders van kusten dienen terdege rekening te houden met al deze factoren.

KUSTMODELLEN EN VOORSPELBAARHEID

In de vorige secties zijn vooral begripsmodellen aan de orde gekomen. Er bestaan daarnaast ook meer complexe modellen, die ontworpen zijn om het kuststelsel, met alle bijbehorende dynamiek op verschillende tijd- en ruimteschalen, zo goed mogelijk te beschrijven. Deze modellen lossen numeriek de bewegingsvergelijkingen op voor waterbeweging en bodemligging, volgens het schema van figuur 3. Ze worden in de praktijk ook ingezet voor het maken van verwachtingen, b.v. om na te gaan hoe de kust reageert op de verlenging van havenpiers bij IJmuiden op de aanleg van een Tweede Maasvlakte bij Rotterdam Europoort.

De kwaliteit van de modellen is de afgelopen 15 jaar enorm toegenomen. Met de huidige generatie van driedimensionale modellen kunnen betrouwbare simulaties van golven, stromingen en bodemligging worden uitgevoerd over een tijdspanne van enkele jaren. Langer doorrekenen is enerzijds (nog) niet mogelijk vanwege beperkingen in de hardware, maar anderzijds ook niet zinnig vanwege onzekerheden in de modelformulering en de

inherente onvoorspelbaarheid van het kuststelsel zelf. In die zin verschilt de problematiek van het maken van 'kustverwachtingen' niet van die van weersverwachtingen.



Figuur 9. Kustdwars bodemprofiel voor verschillende zeespiegelstanden.

TOT SLOT

Dit verhaal beoogt geen compleet overzicht te bieden van de huidige stand van zaken met betrekking tot kustonderzoek; daarvoor is het onderwerp te breed en te divers. Er is vooral aandacht besteed aan het gedrag van de zandige, centrale Nederlandse kust; ruwweg het gebied tussen Hoek van Holland en Den Helder. Zuidelijk en noordelijk daarvan is het gedrag nogal anders, vanwege de invloed van de zeegaten. Voor inleidende teksten over deze en andere kustgebieden zij ondermeer verwezen naar de literatuur hieronder.

Literatuur

- Enkevort, I.M.J. van, 2001. Daily to yearly nearshore bar behaviour. Nederlandse Geografische Studies nr. 288, KNAG, Utrecht.
- Leatherman, S.P. 2001. Social and economic costs of sea level rise. Hoofdstuk 8 in: Douglas, B.C., M.S. Kearney & S.P. Leatherman, Sea level rise, history and consequences. Academic Press, San Diego.
- Rijkswaterstaat, 2006. Kennis voor de kust, Resultaten KUST2005 programma. Brochure, Den Haag.
- Wijnberg, K.M. 1995. Morphologic behaviour of a barred beach over a period of decades. Nederlandse Geografische Studies nr. 195, KNAG, Utrecht.