
Bijlage 1.2 Nieuwe inzichten in de voorspelbaarheid van het waddensysteem

RIKZ, juni 2004

Vraagstelling

In het commentaar op het Integrale Bodemdalingrapport Waddenzee (IBW, Oost e.a., 1998) kwam het volgende punt naar voren:

"er bestond verschil van mening over de mate van voorspelbaarheid van het Waddensysteem, mede vanwege de grote natuurlijke dynamiek en de mate van bodemdaling. Aan de orde is of er voldoende garanties vooraf en voldoende risicodekking in relatie tot het voorgestelde gaswinningsysteem gegeven kunnen worden."

Inleiding

Bij de opzet van het IBW is gekozen voor een voorzichtige aanpak. Zo zijn er vier morfologische modellen ingezet om na te gaan wat de reactie van het systeem op de bodemdaling is. De uitkomst daarvan was dat de modellen een zekere mate van onzekerheid geven over hoeveel zandhonger het systeem jaarlijks kan opvangen: de WL-modellen gaven aan dat een bodemdaling van 100 cm/eeuw nog zou kunnen worden opgevangen, terwijl het historische AEGHIS-model aangaf dat - op grond van de langzaamste van de waargenomen maximale historische reponses - in ieder geval een zeespiegelstijging van 30 (grote getijdebekkens) - 60 (kleine getijdebekkens) cm/eeuw kon worden opgevangen.

Verder is gewerkt met de cumulatieve effecten van bestaande plus toekomstige maximaal optredende bodemdaling binnen een beperkte winningsperiode in combinatie met diverse zeespiegelstijgingsscenario's. Daarbij moet bedacht worden dat de NAM heeft gewerkt met een complete depletie van het gas plus (onrealistische overschatting!) het water dat in een reservoir aanwezig is en met de aanname dat alle prospects winbaar zouden blijken te zijn. Ook het tempo van winning verliep volgens een snel standaardscenario, waarbij tevens eventueel aanwezige meerdere velden binnen één getijdebekken tegelijk gewonnen werden. De mogelijkheden van spreiding in de tijd van de winning van meerdere velden binnen één getijdebekken en de mogelijkheid van het langzamer winnen van een veld zijn alleen als theoretische mogelijkheden besproken (bij mitigatie).

Nieuwe inzichten

Sinds het verschijnen van het Integrale Bodemdalingrapport Waddenzee (IBW) in 1998 zijn nieuwe inzichten verkregen met betrekking tot de voorspelbaarheid van het Waddensysteem, namelijk:

I. De modellen: *Het verschil van inzicht over waar de kritische grens ligt van de zeespiegelstijgingssnelheid waarboven de zeespiegelstijging niet langer geheel gecompenseerd kan worden door sedimentatie (en dus verdrinkt) is verkleind.*

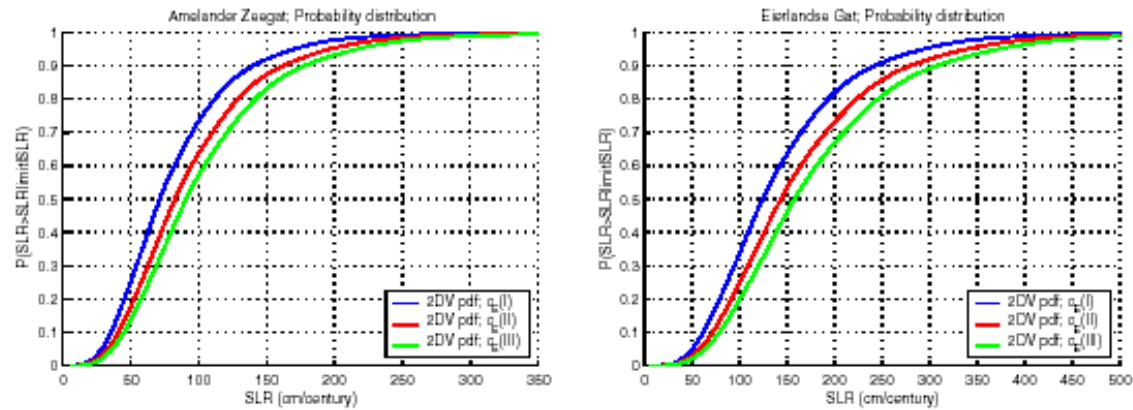
Deze ligt volgens de nieuwste inzichten tussen ca. 30 cm/eeuw (grote getijdebekkens) tot ca. 60 cm/eeuw (kleine getijdebekkens).

In de afgelopen jaren zijn een groot aantal onderzoeken met het meest veelbelovende model ASMITA¹ geschreven, waarbij voortdurend een fijn-tuning van de modellen met de werkelijke ontwikkelingen heeft plaatsgevonden (Buijsman, 1997; Oost et al., 1998; Stive et al., 1998; van Goor, 2001; van Goor e.a., 2001; Kragtwijk, 2001; Wang en van der Weck, 2002; Van Goor et al., 2003, Stive en Wang, 2003, Kragtwijk et al., 2004, Wang et al., 2003, Jeuken et al., 2003; Nortier, 2004).

Door deze modelexercities en hun confrontatie met de werkelijkheid is het inzicht in de natuurgrenzen gegroeid. Zo kan met het model ASMITA de kansverdeling worden berekend voor het risico dat de kritische grenswaarde wordt overschreden, waarbij tevens rekening wordt gehouden met de mogelijkheid dat het golfklimaat verandert (figuur 1; van Goor, 2001; van Goor e.a., 2001). Als het golfklimaat ruwer wordt, zal meer zand naar de getijdebekkens worden getransporteerd en verdrinken zij minder gemakkelijk. Daarbij blijkt dat bij acceptatie van een 10% kans dat de sedimentatie de zeespiegelstijging niet kan bijhouden het systeem een zeespiegelstijging kan bijhouden van 30 cm/eeuw voor grote zeegaten zoals het Amelander Zeegat en 60 cm/eeuw voor kleine zeegaten zoals het Eierlandse Gat. Dit komt goed overeen met de uitgangspunten van het in het IBW ingezette AEGHIS model. Aangezien de sedimentatie die nodig is om de bij bovengenoemde zeespiegelstijgingssnelheden optredende zandhonger ook op te vangen inderdaad ook historisch mogelijk zijn gebleken (het uitgangspunt van AEGHIS: zie IBW), onderbouwt e.e.a. het inzicht dat dit ook bij toekomstige zandhonger het geval zal zijn. Hogere sedimentatiesnelheden zijn bij ASMITA theoretisch mogelijk en zijn in praktijk ook waargenomen, maar onduidelijk is vooralsnog of dit gedurende meerdere decennia ook kan worden volgehouden.

Bij dit alles past verder de kanttekening dat onder de kritische grens getijdeplaten altijd met een zekere achterstandsdiepte volgen, die toeneemt naarmate de stijging van de zeespiegel sneller is. Dit impliceert ook dat er initieel altijd een effect zal zijn (dit is benoemd als het 'resteffect' in het advies van de Adviesgroep Waddenzeebeleid) indien bodemdaling optreedt: Eerst moet er een zekere daling optreden alvorens er een reactie van het systeem volgt.

¹ ASMITA is de afkorting van 'Aggregated Scale Morphological Interaction between a Tidal inlet system and the Adjacent coast' (Buijsman, 1997; Stive e.a., 1998; van Goor, 2001; Kragtwijk, 2001)). Het model werkt met één of meerdere morfologische onderdelen van het getijdesysteem (bijvoorbeeld getijdeplaten, geulen en buitendelta's), op basis van een aantal relaties die voor deze onderdelen zijn aangetoond tussen de hydraulische condities en de morfologische afmetingen. Daarnaast wordt nog gebruik gemaakt van fysische parameters waarmee de snelheden van de morfologische reacties van het systeem worden berekend. Het gaat hierbij met name om de sedimentconcentratie in de diverse onderdelen (c_e) ten opzichte van de algemene evenwichtsconcentratie (c_E). Onder evenwichtscondities is $c_e = c_E$. Als $c_e > c_E$ neigt het systeem tot sedimentatie (bijvoorbeeld bij te diep liggende platen), terwijl als $c_e < c_E$ dan neigt het systeem tot erosie (bijvoorbeeld bij te ondiepe geulen).



Figuur B.1.2.1

Waarschijnlijkheidsverdeling waarop bij een bepaalde zeespiegelstijgingsnelheid de kritische drempel wordt overschreden waarbij de zeespiegelstijging (horizontale as) niet meer kan worden bijgehouden voor het Amelandse zeegat (links) en het Eierlandse Gat (rechts) voor het huidige golfklimaat ($C_E(I)$; blauwe lijn linkerkant); een arbitrair nieuw golfklimaat met een andere golfrichtingsverdeling en een grotere hoogte ($C_E(II)$; rode lijn midden), en de voorgaande met een vergrootte kans van voorkomen van hogere golven ($C_E(III)$; groene lijn rechterkant). Bijvoorbeeld: bij een zeespiegelstijgingsnelheid van 100 cm/eeuw is de kans dat de intergetijde platen van het Amelandse gat verdrinken 55% (ruw golfklimaat) tot 75% (huidig golfklimaat) afhankelijk van het toekomstige golfklimaat. Voor het kleinere Eierlandse Gat is de kans 20 tot 35%. Omgekeerd: accepteren we een 10% kans op verdrinking dan blijkt dat daarbij een zeespiegelstijging van ca. 30 cm/eeuw kan worden opgevangen door sedimentatie, voor het kleinere Eierlandse Gat is een zeespiegelstijging van 60 cm/eeuw nog bij te houden (van Goor, 2001)

In principe lijkt het waarschijnlijk dat 3-6 mm/jaar als een eerste indicatie kan worden gehanteerd voor de natuurgrens waarboven zeespiegelstijging niet volledig meer kan worden gecompenseerd door sedimentatie. Op basis van dit uitgangspunt valt ook uit te rekenen hoeveel zand er op jaarbasis in ieder geval beschikbaar is om andere zandhonger op te vangen. Dit is namelijk de tenminste de hoeveelheid die aangevoerd kan worden bij de grenswaarde minus de hoeveelheid die nodig is om zeespiegelstijging op te vangen. Dit uitgangspunt wordt in het advies van de Adviesgroep Waddenzeebeleid als uitgangspunt gebruikt om op zoek te gaan naar de minimale effecten. Opgemerkt dient nog wel te worden dat de natuurgrens van 3-6 mm/jaar, zoals ook aangegeven in de formule op pag 46 van het rapport van de Adviesgroep Waddenzeebeleid, niet meer is dan een eerste ruwe indicatie: staat het stoplicht op oranje of niet? In algemeenheid wordt aanbevolen om voor elke getijdebekken waar men wil winnen een serie probabilistische berekeningen uit te voeren met ASMITA, waarbij alle vormen van zandhonger in mee worden genomen evenals een suite winningsscenario's: alleen zo kan een voor het ecosysteem optimale winningsstrategie worden uitgewerkt.

Conclusie modellen

De onzekerheid over de kritische grens van zeespiegelstijging waaronder de gemiddelde jaarlijkse sedimentatie nog de zeespiegelstijging kan compenseren, is door bovenstaande onderzoeken aanmerkelijk verkleind. Historische gegevens en de modellen komen beiden uit op een kritische grens van 3 (grote bekkens)-6 (kleine bekkens) mm/jaar waaronder in zeespiegelstijging hoogstwaarschijnlijk volledig kan worden opgevangen door sedimentatie. Is de zeespiegelstijging lager dan deze grens dan heeft het systeem nog reserves om andere belastingen op jaarbasis op te vangen. Deze natuurwaarden kunnen gehanteerd worden als een eerste indicatie of en in hoeverre het systeem te zwaar belast wordt. Voor een nadere inschatting van de effecten dient modelonderzoek te worden gedaan (bijvoorbeeld met ASMITA).

II. Belang eigen dynamiek

Het feit dat de verticale morfologische dynamiek van de Waddenzee vele malen groter is dan de bodemdaling en daarmee de bodemdaling a.h.w. wordt 'uitgesmeerd' over de getijdebekken onderbouwt de aanname die in het IBW gemaakt is dat de effecten van bodemdaling moeten worden berekend op grond van het bodemdalingsvolume per getijdebekken en niet op het naar het centrum toe toenemende aantal cm zakking zoals voorspeld door de bodemdalingmodellen (dit m.u.v. de kwelders). Dit ondervangt voor de intergetijde platen tevens de onzekerheid hoe om te gaan met de diepte van bodemdaling in het centrum van de bodemdalingsschotel: het bodemdalingsvolume wijkt namelijk nauwelijks af.

De grote bestaande dynamiek, zo wordt wel gesteld, maakt het voorspellen van de effecten van bodemdaling tot op grote hoogte onmogelijk. Evenals in de Noordzeekustzone heerst in de Waddenzee een sterke dynamiek. Deze zorgt er voor dat de bodem in de actieve delen tot meters op en neer gaat (met name door geul en prielverplaatsing) en in de 'slome' delen nog altijd ca. een dm op en neer gaat. In de afgelopen jaren is vrij veel aandacht besteed aan de dynamiek van de Waddenzee en van de aangrenzende Noordzeekustzone op diverse schalen van tijd en ruimte (o.a. Louters & Gerritsen, 1995; Tanczos, 1996; Israel, 1998; Cleveringa & Oost, 1999; Schoorl, 1999a&b; 2000a&b; Eysink et al, 2000; Gerritsen, 2000; Cleveringa, 2001; NAM, 2001; Oost et al, 2001, 2002; 2004; Oost en Kleine Punte, 2003; Walburg, 2001; Israel & Oost, 2001; Elias et al, 2002, 2003; Sniijders & Uit den Boogaard, 2003; Rommel, 2004). Uit deze literatuur komt duidelijk naar voren dat bijvoorbeeld de jaarlijkse verticale dynamiek meerdere tot honderden malen (centimeters tot meters per jaar) groter is dan de ter plekke optredende jaarlijkse bodemdaling (millimeters tot 2 centimeter per jaar). Binnen een getijdebekken is de interne netto zandverplaatsing over meerdere jaren gemeten een orde 10 maal groter dan de netto import van sediment van buitenaf (Oost & de Haas, 1992, 1993). Dit alles impliceert dat in het gebied onder de hoogwaterlijn de bodemdaling in eerste instantie wordt 'uitgesmeerd' over het getijdebekken t.g.v. de grote dynamiek. Een lokale voorspelling voor het getijdebekken onder de HW-lijn is derhalve zinloos gezien het feit dat de bodemdaling relatief veel kleiner is dan de dynamiek: lokaal kan het gebied door de eigen dynamiek stijgen of dalen; aangroei of afslaan door de bestaande dynamiek die veelal autonoom van aard is.

Bij wijze van voorbeeld volgt hieronder een brief met veldwaarnemingen van Waddenschilder Geurt Busser die verschenen is in het Reformatorisch Dagblad, voorzien van commentaar op grond van de beschikbare kennis. E.e.a. geeft een beeld van de dynamiek in het gebied.

"Het is feest in Waddenland! Economen, ecologen, wetenschappers, politici, milieudeskundigen, natuurontwikkelaars en gasboeren dansen vrolijk rond, wapperend met Waddengasmiljarden, jubelend over alle goeds dat ze daarmee gaan doen! Arme Waddenzee. Natuurlijk moeten we op de barricaden voor de Waddenzee! Ameland is nu 28 cm gezakt; daar zit een gat in de zeebodem van 250 vierkante km. Er is ruwweg 50 miljoen kubieke meter zand weg, daar heerst zandhonger. De golven van de zee klauwen van boven af om dat gat te vullen."

Commentaar

De bodemdalingsschotel van Ameland had in februari 1999 een diepte van 22 cm in het hart en een volume van 9 miljoen kubieke meter (Eysink et al, 2000), waarvan ca 3 miljoen in de Waddenzee zelf. Daarnaast zijn er ook nog velden in de Noordzee die mogelijk een vergroting leveren van dit volume. In het IBW (Oost et al, 1998) wordt een totaal volume van 10,1 miljoen kubieke meter

gegeven tot 2000 (Wadden + Noordzeekustzone, Zeegat v. Ameland en Pinkegat): 50 miljoen kuub is niet correct. Het is wel correct dat door bodemdaling zandhonger ontstaat. De Noordzeekustzone verdiept zich door daling t.o.v. het evenwichtsprofiel en zal zand nodig hebben om het evenwicht te herstellen (daarbij moet bedacht worden dat er een sterke 'jaarlijkse gang' is van het zomerprofiel dat steiler is met duidelijke zandbanken naar het stormwinterprofiel dat vlakker is: hierdoor treden op jaarbasis verticale fluctuaties op tot ca. 1 meter). Jaarlijkse dalingen van 1 mm tot 1 cm zullen daardoor worden 'uitgesmeerd' over een groter gebied. Het effect van dit mechanisme is dus vergelijkbaar met de effecten van dynamiek in de Waddenzee.

Ook in de Waddenzee treedt zandhonger op. Voor het Waddengebied moet onderscheid worden gemaakt tussen de platen en de geulen. De geulen handhaven een evenwichtsdoorsnede die is afgestemd op het getijdvolume dat er doorheen stroomt. De platen zullen in eerste instantie dieper komen te liggen. Daardoor zal de golfwerking minder invloed hebben, terwijl er tegelijk meer water+zand over de platen stroomt. Het zand komt door deze twee effecten gemakkelijker tot bezinking en de platen komen daarmee weer omhoog (zolang er tenminste zand genoeg voorradig is: bij zeespiegelstijgingsnelheden van 30 cm/eeuw voor de grote zeegaten (Vlie) en 60 cm/eeuw voor de kleinere (Pinkegat) wordt waarschijnlijk al het zand dat uit de Noordzee kan worden aangevoerd gebruikt om de zeespiegelstijging op te vangen. Bij een daling van de platen zal meer getijdvolume door de geulen stromen naar de platen. Pas na het herstel van de oorspronkelijke plaathoogte kunnen ook geulen hun oorspronkelijke dwarsdoorsneden terug krijgen.

"Ameland had het breedste strand van Europa, 3 km breed. De gasten klaagden dat ze zover moesten lopen naar de zee. Dat strand is weg. Jaar in jaar uit wordt er vergeefs zand opgespoten. Er staan bordjes op het strand: Verboden toegang, vanwege drijfzand, slik en een moordende stroom langs de duinen."

Commentaar

Het verdwijnen van het brede strand van Ameland heeft betrekking op de NW-kant van Ameland. Daar heeft zich (evenals in 1903-1926) in 1980-86 een strandhaak gevormd door het aanlanden van een zandplaat uit de buitendelta. Dit hangt samen met het normale cyclische gedrag van buitendelta's, waardoor geulen van oriëntatie veranderen en zandplaten uit de buitendelta kustwaarts worden verplaatst (Israel, 1998; Oost et al, 2000; Israel & Oost, 2001). In 2000 en 2001 is uitgebreid gekeken naar de ontwikkeling van de strandhaak, die éénmaal geland afgebroken wordt door de golven en uitgesmeerd langs de kust en het Amelanders zeegat in. De verwachting dat deze strandhaak geheel zal worden afgebroken is toen al uitgesproken: het hoort bij de natuurlijke dynamiek van het gebied. De 'moordende stroom' ontstond ten gevolge van het insluiten door de strandhaak van een miniatuur waddengebiedje dat via een strandparallele geul werd voorzien van water. Ook dit is een normaal deel van de dynamiek van dit soort haken: het komt meer voor, zoals in het rapport van 2001 aan de hand van historische voorbeelden kon worden laten gezien (Israel & Oost, 2001). De verwachting is ook dat op termijn het strand smaller wordt, precies zoals waargenomen door Busser.

"De Boschplaat onder Terschelling, een droogvallende zandplaat van 7 km. breed, is weg. Op Engelsmanplaat, tussen Ameland en Schiermonnikoog, waren duintjes, daar groeide helmgras en er broedden vogels. Nu is de Engelsmanplaat een kale vlakte waar elke vloed overheen spoelt. De fundamente van voorgaande kapen, die nog nooit iemand gezien had, steken nu troosteloos boven het zand uit. Het verschil tussen leven of dood is maar een paar centimeter. De onderste tree van de trap naar het vogelhuisje zit nu op 1.20 meter hoogte, daar zijn 5 nieuwe treden bij aan gemaakt!"

Schiermonnikoog heeft nu het breedste strand van Europa, het Westerstrand. Dit is over 4 vierkante kilometer een tot anderhalf meter lager dan een paar jaar geleden. Daar is 4 miljoen kubieke meter zand weg. Tot voor kort kon ik vanaf de Reede naar Schiermonnikoog de schepen in het Westgat niet zien, daar zat een hoge bult tussen. Nu zie je de schepen, het hefeiland boven Ameland, de kaap en het vogelhuisje van Engelsmanplaat.

Enorme hoeveelheden zand zijn in beweging, dat zwerft nog jaren rond voor dat NAM gat bij Ameland opgevuld is. Het gif uit de Rijn bezonk in de Waddenzee, misschien trekt het zand van de Noordzeekust hier ook wel heen. De hoogste delen van het Wad onder de eilanden, de wantijen, waren altijd ongeveer even diep. Ze veranderden wel van plaats maar nauwelijks van diepte. Nu zijn alle wantijen tientallen centimeters minder diep. Het Wad wordt plat, de hoge platen verdwijnen razendsnel, de geulen slibben dicht.

De Waddenzee was een compleet systeem; er was evenwicht tussen afslag en aangroei. Dat is nu al ernstig verstoord. In het rapport Meijer staat dat de NAM gas zal winnen: "met de hand aan de gaskraan en als er aantoonbare schade is draaien we die kraan onmiddellijk dicht." De schade rondom Ameland is nu al zo enorm dat de gaskraan daar onmiddellijk dicht moet! Onderzoek eerst waar al dat zand gebleven is en wacht tot het Wad zich hersteld heeft, als dat nog mogelijk is. Pas dan mag de gaskraan bij Ameland weer op een kiertje, maar zeker geen nieuwe gaswinning!"

Commentaar

Door de inherente grote dynamiek van het Waddenzeesysteem kan inderdaad weinig gezegd worden over de lokale effecten in het getijdebekken onder de HW-lijn. Het uitmiddelen van de bodemdaling (die ook nog eens relatief klein is t.o.v. de dynamiek) binnen een getijdebekken is echter wel een impliciet uitgangspunt binnen de modelstudies van het IBW (Oost et al, 1998): dit uitgangspunt wordt door een veelheid van rapporten aangaande dynamiek en door de rapporten over bodemdaling bevestigd (zie o.a. Eysink et al, 2000; Vlas, de & Marquenie, 2003; Oost, in prep.; Rommel, 2004). De ingezette modellen die het gedrag van het systeem beschrijven zijn allen empirisch van aard en beschrijven het gemiddelde lange-termijn gedrag (meerdere jaren tot decennia) van het waddensysteem op het niveau van een getijdebekken. De huidige stand van kennis en techniek (computerfaciliteiten) staat nog niet toe effectberekeningen uit te voeren op een schaal die veel fijnmaziger is dan deze. De vraag dringt zich echter ook op of dit zinnig is. Gezien de sterke eigen dynamiek van het systeem is ook de voorspelbaarheid van de kleinschalige ontwikkeling van het gebied over langere tijd (bijvoorbeeld de migratie en ontwikkeling van een geul) relatief beperkt. Op die schaal is het systeem te vergelijken met het weer: een korte tijd vooruit voorspellen is mogelijk, maar een langere tijd niet. Toch kan er op hoofdlijnen wel wat gezegd worden over het gedrag van het systeem op grotere schaal, omdat er sprake is van vele –voor zover bekend robuuste- wetmatigheden in het systeem (bijvoorbeeld geuldoorsnede en getijdevolume; geulareaal vs. getijdevolume; plaathoogte en waterhoogte). Naar analogie met het weer: op grond van wetmatigheden kan voorspeld worden dat de zomers gemiddeld warmer zijn dan de winters.

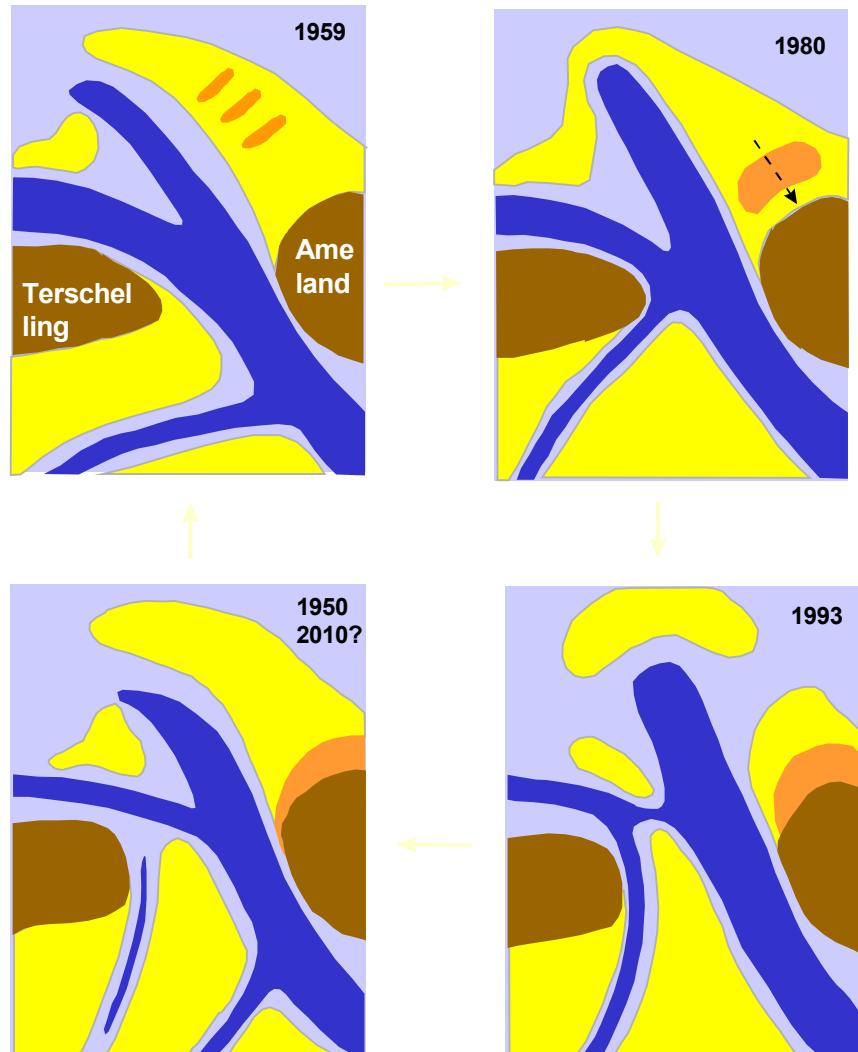
Toch kan wel wat gezegd worden over de dynamiek van het gebied op hoofdlijnen uitgaande van de waarnemingen over de afgelopen honderden jaren:

Boschplaat

Met de Boschplaat wordt waarschijnlijk de Koffiebonenplaat bedoeld. Deze plaat wordt door het eigen cyclische gedrag van het Boschgat, nauw samenhangende met het gedrag van het Westgat, opgeruimd (rapport Israël, 1998): vermoedelijk verwijst de waarneming van Geurt Busser naar dit proces. Daarnaast kan zijn opmerking ook slaan op de Boschplaat die het oosteinde van Terschelling vormt. Ten gevolge van het loslaten van de stuifdijken op de westpunt (die voor een dramatische verlenging van Terschelling hebben gezorgd in de afgelopen eeuwen; Oost, 1995; Schoorl, 2000b) en de hiervoor (en hieronder) beschreven cyclische dynamiek is de afslag ook daar sterk toegenomen in het laatste decennium (fig. B.1.2. 2).

Figuur B.1.2.2

Morfologische cyclus van de buitendelta van Het Zeegat van Ameland (Israël, 1998)



De dynamiek van de buitendelta van het Zeegat van Ameland

De buitendelta's van de Waddenzee zijn altijd in beweging: de geulen en platen verschijnen, verplaatsen en verdwijnen in de loop van de tijd. Een mooi voorbeeld wordt gegeven door de ontwikkeling van de buitendelta van het Amelander Zeegat, in de afgelopen eeuwen (Israël, 1998). In het zeegat zijn in elke periode van 50 tot 60 jaar vier stadia te zien (figuur B.1.2.2). Ieder stadium van de cyclus heeft gevolgen voor de aangrenzende kust van Ameland (Oost et al, 2000) en Terschelling. Sinds de jaren '40 van de 20ste eeuw wordt de kustlijn van Ameland met zandsuppleties en harde kustverdedigingsmaatregelen op zijn plaats gehouden, terwijl de oostpunt van Terschelling zich vrij kan ontwikkelen. De morfologische cyclus wordt hier kort weergegeven (naar Israël, 1998):

In Fase 1 (1903 & 1959) is er sprake van een één-geul situatie in het zeegat tussen de twee eilanden. Met maar één geul in het zeegat is er ruimte voor de kust: de westkust van Ameland strekt relatief ver naar het westen en oostkust van Terschelling strekt ver uit naar het oosten. In deze situatie behoeft de kust bij Ameland slechts beperkte verdedigingsmaatregelen.

In Fase 2 (1926 & 1980) is er sprake van een kruispunt van geulen in het zeegat. Het zand uit het Bornrif is gemigreerd in zuidoostelijke richting en landt als strandplaat op noordwest Ameland. Een uitgebreide beschrijving van het proces van aanlanding en de vorming van strandhaken wordt gegeven in het rapport 'strandhaakontwikkeling op de koppen van de Waddeneilanden' (Israël en Oost, 2001). De oostpunt van Terschelling heeft in dit stadium nog de ruimte en strekt ver oostwaarts, terwijl de westkust van Ameland in breedte afneemt. De noodzaak voor kustbeheermaatregelen neemt in deze situatie toe. Wel levert de aangelande zandplaat een tijdelijke bijdrage aan de strandbreedte van de westkust.

Fase 3 (1934 & 1993) is een twee-geulen situatie in het zeegat, de geulen worden van elkaar gescheiden door de Koffiebonenplaat. Met twee geulen in het zeegat is er weinig ruimte voor de kust: de Boschplaat is in omvang afgenomen en de westkust van Ameland is op zijn smalst. De noodzaak voor kustverdedigingsmaatregelen voor de westkust van Ameland is maximaal.

Fase 4 (1892 & 1950) is de overgang van twee geulen naar één geul in het zeegat. Terschelling is een stuk verlengd naar het oosten en langzamerhand komt er meer ruimte voor de westkust van Ameland. De noodzaak voor kustverdedigingsmaatregelen neemt af.

Vervolgens begint de cyclus weer opnieuw met fase 1.

De geschetste cyclische ontwikkeling van het zeegat wordt veroorzaakt door de combinatie van golfgedreven zandtransport en getijwerking, waarbij zowel het getijdvolume per geul -het debiet-, als de kracht van de stroming door waterstandverschillen -het verhang- een rol spelen (Israël, 1998).

Engelsmanplaat

De ontwikkeling van de Engelsmanplaat kent – zo blijkt uit historisch onderzoek van data sinds 1786 (Oost, 1995) - een cyclisch karakter. In het begin strekt de Engelsmanplaat zich ver zeewaarts uit en wordt hoger door de afzetting van zand. Dan treedt geulerosie op aan de noordzijde. De geulen migreren in zuidoostelijke richting. Noordelijk van deze geulen (dus aan de Noordzeezijde) ontstaat dan een nieuwe plaat o.i.v. golfwerking (tegenwoordig het Rif). Deze plaat vangt het zand weg met name als de hoogte boven de hoogwaterlijn uitkomt, waardoor de Engelsmanplaat lager wordt doordat weinig zand wordt aangevoerd (door de hoge ligging is er haast geen getijdewerking en het golfgetransporteerde zand wordt door het Rif opgevangen) terwijl de plaat wel wordt afgebroken tijdens stormen. Dit gebeurt met name sinds 1970. De tussen Rif en Engelsmanplaat liggende geul Smeriggat is aan het verzanden en uiteindelijk zullen Engelsmanplaat en Rif weer samensmelten waardoor Engelsmanplaat weer aangroeit in zeewaartse richting en hoger wordt en zo begint de cyclus opnieuw. Een cyclus duurt tussen de 50-100 jaar. Dit staat los van de bodemdaling en is een autonoom proces (Oost, 1995).

Schiermonnikoog

Ook bij Schiermonnikoog is sprake van een strandhaak die zich in een afbraakstadium bevindt. Deze haak was extreem groot en het oostwaarts in de luwte ervan liggende strand was extreem breed ten gevolge van de afsluiting van de Lauwerszee in 1969. Daarbij nam het getijvolume met 30% af en kon het zandvolume van de buitendelta niet meer op haar plek gehouden worden. De golven droegen het naar het strand waar de strandhaak extra groot werd. Net als op Ameland is deze strandplaat aan het verdwijnen onder invloed van de golven (ze vormen een kaap die extra hard door golven wordt aangevallen). Dat het strand dus nu verlaagt, evenals de haak, ligt in de lijn der verwachting (Oost, 1995; Israel & Oost, 2001; Jaarboek Waddenzee, 2003).

Zand in beweging

Wat betreft de hoeveelheden zand die in beweging zijn: éénvoudige berekeningen geven aan dat er per jaar bruto door alle Nederlandse Waddenzeegaten samen met het water ongeveer 40 tot 56 miljoen kubieke meter zand heen en weer stroomt tussen Waddenzee en Noordzee (slib niet meegenomen; Oost et al, 1998). Op grond van reacties op zeer zware verstoringen (afsluiting Zuiderzee en Lauwerszee) kun je laten zien dat er in Wadden een sedimentatie kan optreden die gelijk is aan de minimaal berekende zandtransporten. Zo zijn voor de Zoutkamperlaag sedimentatiesnelheden gemeten van 3 miljoen kubieke meter per jaar na de Afsluiting van de Lauwerszee.

Een ander misschien nog wel krachtiger argument dat er inderdaad sedimentatie optreedt in de Waddenzee is dat tijdens de Holocene zeespiegelstijging in de laatste 5000 jaar de Noordzeewaddenkust teruggetrokken is over 15 km (ter hoogte van Schiermonnikoog) tot 10 km (ter hoogte van Ameland) tot 6 km (ter hoogte van Terschelling). Al het zand dat daar lag is grotendeels weggeslagen. Het ligt niet in de diepere Noordzee (Sha, 1992; Molen, van der & Swart, 2001; Molen, van der, 2002), terwijl in de Waddenzee wel een laag ligt van gemiddeld 5 meter dikte over een oppervlak van 2000 vierkante kilometer. Het zand komt ook qua mineralogie overeen met het zand aan de kust.

Historische waarnemingen laten zien dat de Waddenkust zich nooit met snelheden van meer dan 8 meter/jaar (voor het midden van de eilanden) heeft teruggetrokken over langere periodes (Oost et al, 1998). Wordt dit inzicht gebruikt om te berekenen hoeveel zeespiegelstijgingsnelheid gecompenseerd zou kunnen worden in de getijdebekkens dan is dat voldoende om 4-6,6 mm/jaar mee op te vangen, hetgeen ook uit andere modelberekeningen naar voren komt (zie boven).

Dat de wantijen zouden verlagen wordt deels tegengesproken door waarnemingen van wadloopgidsen die het tegendeel beweren (bijvoorbeeld bij Rottumeroog, pers. obs. Dijkema), anderzijds zou wel verlaging optreden bij het zuidelijke deel van het wantij van Ameland (pers. obs. De Vries). Om precies te weten wat er gebeurd zou nader onderzoek moeten worden gedaan. Figuren tot 2000 suggereren sterk dat de geulen van Zeegat van Ameland en Pinkegat beter verbonden raakten waardoor verdieping optrad. Van de periode daarna zijn de gegevens nog niet beschikbaar (deze komen binnenkort beschikbaar).

De hoge platen van NW-Ameland, NW-Schiermonnikoog, Engelsmanplaat en deels Rottumeroog zitten momenteel inderdaad in een afbraakfase. Zoals boven beschreven lag dit in de lijn der verwachting. Andere platen zoals het Rif en Richel zijn niet in een afbraakfase.

Dat geulen dichtslibben is gemiddeld niet correct; lokaal natuurlijk wel, door de natuurlijke dynamiek waarbij nieuwe geulen openschuren en door eb- en vloed-schaarvorming. Over het algemeen houden de geulen hun evenwichtsdiepten, zoals uit onder andere de ISOS-onderzoeken blijkt.

"De Waddenzee was een compleet systeem; er was evenwicht tussen afslag en aangroei. Dat is nu al ernstig verstoord."

Commentaar

Dit is niet in overeenstemming met de waarnemingen: de evenwichten tussen erosie en sedimentatie zijn er nog zoals ze er ook al duizenden jaren zijn geweest. Wij leven eenvoudigweg te kort om cycli van 50-100 jaar in erosie en sedimentatie op hun waarde te kunnen schatten. Als gevolg daarvan denken wij veel te statisch over de Waddenzee en aangrenzende Noordzeekustzone. We gaan de autonome lange termijn veranderingen dan ook gemakkelijk toedragen aan allerlei menselijke ingrepen die niet de verklaring zijn voor de waarnemingen. Dit vasthouden aan een ons bekend beeld over de laatste 10-20 jaar als zijnde 'zoals het hoort' is trouwens iets waar ook onze voorouders al last van hadden (Schoorl, 1999a&b). De dankzij onze technologie ontstane 'maakbaarheid' brengt echter het gevaar met zich mee dat wij als dollemannen in gaan grijpen om de natuurlijke dynamiek tegen te gaan. E.e.a. heeft zich in het verleden al voorgedaan op de eilanden (bijv. stuifdijken) en zou zich in de toekomst kunnen gaan voordoen in het Waddengebied zelf.

"In het rapport Meijer staat dat de NAM gas zal winnen: "met de hand aan de gaskraan en als er aantoonbare schade is draaien we die kraan onmiddellijk dicht."

De schade rondom Ameland is nu al zo enorm dat de gaskraan daar onmiddellijk dicht moet! Onderzoek eerst waar al dat zand gebleven is en wacht tot het Wad zich hersteld heeft, als dat nog mogelijk is. Pas dan mag de gaskraan bij Ameland weer op een kiertje, maar zeker geen nieuwe gaswinning!"

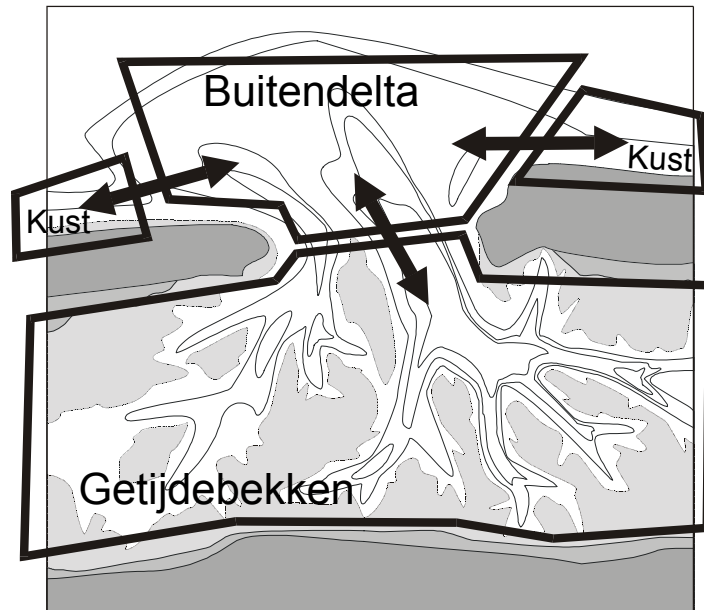
Commentaar

Wat is er momenteel aan de hand op Ameland? Enerzijds is daar de waarneming van het Bodemdalingrapport Ameland (2000) die nieuwe inzichten heeft gegeven hoe het systeem reageerde op de bodemdaling. Daaraan voorafgaande (Oost et al, 1998) is het IBW geschreven, waarin werd gesteld dat de bodemdaling een verstoring zou veroorzaken t.o.v. de evenwichtscondities. Voorts werd het waarschijnlijk geacht dat door de grote dynamiek de dalingsschotel zou worden uitgesmeerd over het getijdebekken in kwestie. Pas in de loop van een aantal decennias zouden de bodemdalingsschotels volledig worden opgevuld met zand uit het Noordzeebekken. De diverse onderdelen: kust, buitendelta en getijdebekken (geulen en platen tussen twee wantijen)

wisselen zand en water uit bij elk getijde (figuur B.1.2.3). Dit impliceert overigens ook dat uiteindelijk alle bodemdaling in de Waddenzee en Noordzeekustzone (tot NAP-20 m) door middel van zandsuppleties gecompenseerd dient te worden, wil de kustlijn gehandhaafd worden (zie daarvoor Mulder, 2000).

Figuur B.1.2.3

De belangrijkste componenten van een zanddelend systeem: de buitendelta's, de aangrenzende kusten en de geulen en platen van de Waddenzee (Cleveringa et al, 2004)



Op het Noordzeestrand zijn door NAM weinig waarnemingen gedaan. Toch zijn er aanwijzingen dat daar inderdaad aanzienlijke zandaanvoer plaats vond richting de bodemdalingsschotel, zo blijkt uit het promotieonderzoek van Tanczos (1996; ten onrechte niet meegenomen in Oost et al, 1998 of in Eysink et al, 1998). Zij deed gedurende de periode augustus 1991 tot december 1994 lange termijn waarnemingen op het Noordzeestrand van Ameland (tussen Rijksstrandpaal 23,2 en 24), waarbij onder andere op 27 tijdstippen gekeken werd naar de hoogteligging. Voor het beschouwde strandgebied bleek dat de gemiddelde ophoging door sedimentatie even snel verliep als de gemiddelde bodemdaling, waardoor het resulterende netto effect op nul uitkwam (p.133). Dit zand moet op andere plaatsen zijn onttrokken: zo zijn er bijzonder sterke aanwijzingen dat een deel afkomstig was van een strandsuppletie die in 1992 werd uitgevoerd tussen RSP 12 en 20 en die opmerkelijk snel werd geërodeerd (Tanczos, 1996).

Aan de Waddenzeezijde is meer aandacht besteed in het Bodemdalingsrapport Ameland (Eysink et al, 2000). Zo bleek dat de sedimentatie op het wad in het dalingsgebied de bodemdaling overtrof. De rapportages van Kersten uit 2003 bevestigen dit beeld en laten zelfs zien dat in de periode 2000-2003 de sedimentatie de bodemdaling bijhoudt. De oorzaak is - wederom - de natuurlijke dynamiek. De geulen van het Pinkegat bewegen zich cyclisch (20-40 jaar; Oost, 1995; Jaarboek Waddenzee, 2003) naar het oosten waarbij van tijd tot tijd de aangroeiende oostpunt van Ameland wordt afgesneden door nieuwe geulen die zich vormen. Daarbij verandert - t.g.v. de verplaatsing van het zeegat - ook de positie van de hoofdgeul en de in het wad liggende geulen. Het gevolg van al deze verschuivingen is dat er sterke erosie en sedimentatie optreedt nabij het zeegat met hoogtes tot meerdere meters. De bodemdaling Ameland (max. cm/jaar) viel samen met een periode van sterke sedimentatie (meer dan 10 cm gemiddeld over een gebied van 20 vierkante kilometer en bijna 1 meter nabij de oostpunt van Ameland).

Het is dus waarschijnlijk dat een belangrijk deel van het zand dat afgezet is, naar binnen is vervoerd door de grote geul gelijk zuidelijk van het eiland en komt uit

de Noordzeekustzone. Wil dat dan zeggen dat al het zand uit de Noordzeekustzone komt? Dat ligt, gezien de modelinzichten, niet in de lijn der verwachting. Het Bodemdalingsonderzoek Ameland heeft niet het hele Pinkegat bekeken en een deel zou dus uit de omgeving kunnen zijn gehaald. Indien ervan uitgegaan wordt dat de bodemdaling in het Pinkegat tot 2000 (4,9 miljoen kuub) in het geheel niet zou zijn gecompenseerd via zandaanvoer uit de Noordzee maar slechts uitgesmeerd over het Pinkegat (53 vierkante kilometer) dan zou dat een lagere ligging van het gebied met gemiddeld 9 cm betekenen over het hele gebied. Aangezien dit niet het geval is in het onderzochte gebied (ca. 40%), zou het resterende deel gemiddeld 2 dm dieper moeten liggen. Dit lijkt op het eerste gezicht niet het geval, maar voor een precieze inschatting is een nader onderzoek nodig.

Zou het dan nog kunnen komen van de Engelsmanplaat? Zoals boven besproken is de natuurlijke dynamische cyclus verantwoordelijk voor de hoogteafname van deze plaat. Deze is al sinds 1970 in hoogte aan het afnemen, dus ruim voor de gaswinning. Het zand zal in eerste instantie terecht zijn gekomen in het Smeriggat en vooral in de Zoutkamperlaag die door de afsluiting van de Lauwerszee een enorme zandhonger kende. E.e.a. neemt niet weg dat een deel van het thans afgevoerde zand gebruikt kan worden om de bodemdaling bij Ameland op te vullen. Maar dit is dan een gevolg van de zandafvoer van de Engelsmanplaat en niet de oorzaak; de oorzaak is de autonome cyclische ontwikkeling van het gebied.

Kwelders

Afwijkend is de situatie voor de kwelders (boven de gemiddelde hoogwaterlijn); de snelle sedimentatie in dit gebied is vooral afhankelijk van de opslibbing, die weer gerelateerd is aan het HW-niveau. Daarmee is de situatie simpeler dan in het getijdebekken onder de hoogwaterlijn. Daarvan is vrij goed bekend hoe snel dit verloopt. Er kan dan ook vrij nauwkeurig aangegeven worden hoe groot over meerdere jaren/decennia de gemiddelde sedimentatie in de diverse kwelderzones is (Dijkema en anderen). Gedetailleerdere berekeningen van de te verwachten effecten zijn dan ook mogelijk

Conclusies dynamiek

Uit de bestaande en uit nieuwe literatuur blijkt dat de dynamiek van het systeem overheersend is t.o.v. gaswinning. De dynamiek is dermate overheersend dat het zinloos lijkt om lokale effecten van bodemdaling in de getijdebekken onder de HW-lijn nauwkeurig te willen voorspellen. Gezien de dynamiek, de duur van de bodemdaling, en de stand van kennis en techniek (computers) is het niet reëel om nauwkeuriger te willen werken. En ook al zou het mogelijk zijn om gedetailleerdere lange termijn berekeningen uit te voeren, dan maakt de eigen dynamiek met een sterke toevalsfactor erin zulks onmogelijk. Lange termijn modellen die het gemiddelde gedrag van grotere onderdelen van het waddensysteem (bijvoorbeeld getijdebekken) beschrijven lijken daarmee vooralsnog de enig mogelijke beschrijving van het gebied over dergelijke tijdstervijnen (meerdere decennia). Een alternatieve aanpak waarbij verfijndere modellen probabilistisch langere perioden doorrekenen (zoals momenteel met het weer al gebeurt) zijn vooralsnog niet haalbaar en zullen naar schatting nog enkele decennia op zich laten wachten. Maar zelfs met een dergelijke aanpak moet men zich realiseren dat ook weervoorspellers er regelmatig naast zitten.

Ten gevolge van de dynamiek mag verwacht worden dat de zich lokaal ontwikkelende bodemdaling over een getijdebekken wordt 'uitgesmeerd'. Hetzelfde geldt voor bodemdaling in de Noordzeekust. Het bij het IBW gehanteerde uitgangspunt dat gerekend werd met gemiddelde daling over een getijdebekken of over een Noordzeevak (beiden onder de HW-lijn) i.p.v. de lokale schotel blijkt daarmee een juiste aanpak. Uiteindelijk zal de bodemdaling

in de Noordzeekustzone (tot NAP-20 m) plus de bodemdaling in de Waddenzee geheel gecompenseerd dienen te worden door kustsuppleties (met zand vanuit dieper water) om structurele Noordzeekusterosie tegen te gaan.

III. Betrouwbaarheid van de ingezette morfologische modellen

Over het algemeen zijn de morfologische modellen die gebruikt worden overwegend empirisch van aard: dat wil zeggen dat ze gebaseerd zijn op de beschikbare kennis over: 1) snelheden waarmee processen verlopen; 2) evenwichtsrelaties tussen hydraulica en morfologie in en om de Waddenzee en 3) de bestaande morfologie. Over het algemeen zal gelden dat de modellen gevalideerd en waar nodig gecallibreerd zijn op grond van het gedrag van getijdebekken in de afgelopen eeuw. Daarbij dienen ontwikkelingen als grote menselijke ingrepen (bv. afsluiting Zuiderzee of Lauwerszee) en/of zeespiegelstijging naar behoren te worden weergegeven (bijvoorbeeld: Oost et al., 1998; Kragtwijk, 2001; van Goor 2001; van Goor et al 2001; Wang en van der Weck., 2002; Van Goor et al., 2003, Stive en Wang, 2003, Kragtwijk et al., 2004, Wang et al., 2003, Jeuken et al., 2003, Nortier, 2004). Dergelijke veranderingen leveren een netto zandhonger op van het bekken die qua orde-grootte vergelijkbaar of zelfs groter is dan de zandhonger veroorzaakt door bodemdaling.

Vanuit een theoretisch wetenschappelijk standpunt is het bijna onmogelijk om waterdicht te bewijzen dat dergelijke modellen kloppen: er kan alleen aannemelijk gemaakt worden dat ze kloppen op grond van een vergelijking van de modelresultaten met de werkelijkheid. Sinds de IBW studie is ons vertrouwen van de gebruikte (semi-)empirische modellen wel vergroot; ook door onderzoeken met de proces-gebaseerde modellen. De kloof tussen onze empirische kennis en onze proces kennis is verkleind. Voor een overzicht van de voortgangen in het onderzoek naar morfodynamische modellering voor systemen als de Waddenzee zie Stive en Wang (2003). Het belangrijkste uitgangspunt van de (semi-)empirische modellen is dat er een morfologische evenwichtstoestand bestaat en dat de evenwichtstoestand sterk gerelateerd is aan hydrodynamische parameters. Dit uitgangspunt is steeds meer bevestigd door de resultaten van studies aan de hand van proces-gebaseerde modellen. Vooral de studies met de geïdealiseerde modellen (Schuttelaars en De Swart, 1996, 2000) hebben theoretisch bewijs gegeven dat voor de relatieve korte tijdsintervallen in de Waddenzee het morfologische evenwicht inderdaad bestaat en dat het inderdaad moet voldoen aan de relaties zoals door de (semi-)empirische modellen worden gehanteerd. Een ander principe dat de (semi-)empirische modellen hanteren is dat wanneer het evenwicht wordt verstoord het systeem de neiging heeft zich weer te ontwikkelen naar een toestand die weer voldoet aan de evenwichtsrelaties. De onderzoeken met de proces-gebaseerde modellen hebben ook meer inzicht geleverd over waarom dit gebeurt. Vooral het onderzoek naar de relatie tussen de getij asymmetrie (die netto sediment transport veroorzaakt) en de morfologie van een bekken heeft hieraan bijgedragen (Dronkers, 1998, Van de Kreeke en Dunsbergen, 2000, Wang et al, 2002). Fundamenteel onderzoek aan de hand van complexe proces-gebaseerde modellen zoals Delft3D hebben ook meer inzicht geleverd over gedrag van de getijdenbekken in meer detail zoals het platen-geulen systeem (Hibma, 2004) en zand-slib segregatie (Van Ledden, 2003). De toegenomen fundamentele kennis maakt een dergelijk complex model steeds beter inzetbaar voor studies zoals die naar het effect van bodemdaling.

De voorspellingen door de modellen op getijdebekken-niveau worden verder geschraagd door:

- 1) De historische waarnemingen die aangeven dat in het verleden Noordzeekusterosiesnelheden zijn opgetreden en sedimentatiesnelheden die ook door de modellen worden voorspeld (zie ook Oost et al, 1998).

-
- 2) De waarnemingen aan Ameland en Zuidwal, waarbij de bodemdalingsschotel zelf door de dynamiek en de sedimentatie geheel, respectievelijk gedeeltelijk zijn opgevuld (Eysink e.a., 2000; Rommel, 2004; conform verwachting).
 - 3) Het niet bekend zijn van extreme effecten langs het Slochterenveld in morfologische en ecologische waarnemingen.
 - 4) De waarneming dat na de afsluiting van de Zuiderzee het hoogwaterniveau nabij het Balgzand met ca. 40 cm is gestegen. In de periode na de afsluiting 1933-1997 stegen de platen 33-38 cm en de hoge platen en kwelders met 33-47 cm (Grolle, 2001). Van voor de afsluiting zijn helaas geen hoogtedata bekend van de Balgzand. Waarnemingen wijzen er echter op dat de hoogtetoename nog groter zou zijn geweest als deze hoogtedata wel beschikbaar zouden zijn geweest (o.a. Dankers pers. com.).
 - 5) Het ontbreken in de waarnemingen van de morfologische ontwikkelingen over de afgelopen 500 jaar in de Nederlandse Waddenzee op getijdebekkenschaal, van aanwijzingen dat de door de Swart voorgestelde mogelijkheid van uitruiming zich heeft voorgedaan, ondanks het feit dat: a) het plaatniveau door het eigen autonome gedrag van getijdebekkens over perioden van meerdere decennia gemiddeld al meerdere dm op en neer kan gaan; b) de jaargemiddelde hoog- en gemiddeld waterniveau's gedurende meerdere jaren hoogteverschillen kunnen laten zien tot dm (Bossinade e.a. 1993; Heinen & Hoogkamer, 1993) en c) er ook grote menselijke ingrepen zijn geweest die een dergelijk uitruimen zouden kunnen veroorzaken. De door hem voorgestelde modellen geven deze mogelijkheid te zien bij getijdebekkens die voldoende lang zijn (meer dan 50 km lang met een voldoende sterk M4 getij aan de Noordzeekant) of waarvan de breedte afneemt in de richting van het vasteland. De bekkens vanaf Ameland tot de Eems voldoen aan geen van beide criteria.

Conclusie betrouwbaarheid

Tot nog toe zijn er geen aanwijzingen dat de in het IBW gehanteerde modelbenadering van het gedrag van getijdebekkens niet kloppen. Voor een uitruimscenario zoals voorgesteld door de Swart zijn geen aanwijzingen gevonden over de afgelopen 500 jaar in het morfologisch gedrag van de Nederlandse Waddenzee.

Eindconclusie punt a)

Op grond van het toegenomen inzicht in de modellen, de betrouwbaarheid van de modellen en de dynamiek, kan gesteld worden dat de modellen zoals gehanteerd in het IBW (Oost et al, 1998) aangevuld met nieuwe inzichten en verbeteringen (met name ASMITA) de effecten van bodemdaling

hoogstwaarschijnlijk bekkengemiddeld en tijdgemiddeld goed weergeven². 100% zekerheid kan om theoretische redenen echter nooit worden gegeven. Wel is het onwaarschijnlijk dat binnen enkele decennia veel betere modellen beschikbaar komen voor de voorspelling van het lange termijn gedrag. Dit wordt veroorzaakt door de sterke eigen dynamiek van de morfologie. Gezien

² De grote dynamiek draagt bij tot het 'uitsmeren' van de bodemdalingsschotel over een getijdebekken, waardoor de lokale maximaal optredende effecten geringer zijn op de getijdeplaten (maar niet voor de kwelders) en ook de voorspellingen zoals gedaan met ASMITA uitgaan van het juiste uitgangspunt dat de bodemdaling moet worden uitgemiddeld over een getijdebekken.

het feit dat de bodemdaling relatief veel kleiner is dan de dynamiek is een veel nauwkeurigere voorspelling van de effecten van bodemdaling bovendien zinloos.

Om blijvend zandtekort en structurele kustachteruitgang tegen te gaan zal de bodemdaling in de Noordzeekustzone (tot NAP-20 m) plus de bodemdaling in de Waddenzee geheel gecompenseerd dienen te worden door kustsuppleties (met zand vanuit dieper water). Deze maatregel is een essentiële randvoorwaarde wil zekerheid verkregen worden omtrent minimalisatie van de effecten van bodemdaling.

Literatuur

- Buijsman, M.C., 1997. The impact of gas extraction and sea-level rise on the morphology of the Wadden Sea. WL | Delft Hydraulics, Report H3099.30.
- Cleveringa, J., 2001. Zand voor zuidwest Texel. Technisch advies RIKZ over vier mogelijke ingrepen in het Zeegat van Texel. Rapport RIKZ/OS/2001/031.
- Cleveringa, J. en A.P. Oost, 1999. The fractal geometry of tidal-channel systems in the Dutch Wadden Sea. *Geologie en Mijnbouw* 78, 21-30.
- Cleveringa, J., Mulder, S. Oost, A., 2004. Kustverdediging van de koppen van de Waddeneilanden. De dynamiek van de kust nabij buitendelta's en passende maatregelen voor het kustbeheer. Rapport RIKZ/2004.017.
- Dronkers, J., 1998. Morphodynamics of the Dutch delta. In: Dronkers, J. and Scheffers, M. (eds), *Physics of estuaries and coastal seas*, Rotterdam, Balkema, pp.297-304.
- Duijts, R.W., 2002. Tidal asymmetry in the Dutch Wadden Sea, a model study of morphodynamic equilibrium of tidal basins. Delft Cluster, Z2822.50.
- Elias, E.P.L., Stive, M.J.F., Bonekamp, J.G. en Roelvink, J.A., 2002. Morphodynamics at the Updrift side of inlets. Proc. of the 28th ICCE, Cardiff, Wales.
- Elias, E.P.L., Bonekamp, J.G., Stive, M.J.F., 2003. Decadal ebb tidal delta behavior. A response to large scale human interventions. Proc. of Coastal Sediments, Sint Petersburg, Florida (in preparation).
- Eysink, W.D., Dijkema, K.S., van Dobben, H.F., Slim, P.A., Smit, C.J., Sanders, M.E., Schouwenberg, E.P.A.G., Wietsz, J. & De Vlas, J., 2000. Samenvatting monitoring effecten van bodemdaling op Ameland-Oost: evaluatie na 13 jaar gaswinning.
- Gerritsen, F., 2000. Response time scales for Dutch Wadden Sea. 46 pag.
- Grolle, L., 2001. Hydrologische en Morfologische Ontwikkeling Platen en Geulen Balgzand. Van verleden tot toekomst?. Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ) werkdocument.
- Goor, M.A. van, 2001. Influence of Relative Sea-level Rise on Coastal Inlets and Tidal Basins. WL | Delft Hydraulics/Delft Cluster, Report Z2822/DC03.01.03a.
- Goor, M.A. van, Stive, M.J.F., Wang, Z.B., en Zitman, T.J., 2001. Influence of Relative Sea-level Rise on Coastal Inlets and Tidal Basins. Proc. 4th Conference on Coastal Dynamics, ASCE, Lund, Sweden, 2001, pp. 242-252.
- Goor, M.A. van, T.J. Zitman, Z.B.Wang, & M.J.F. Stive, 2003. Impact of sea-level rise on the morphological equilibrium state of tidal inlets. *Marine Geology* 202, pp. 211-227.
- Hibma, A., 2004. Morphodynamic modelling of estuarine channel-shoal systems. Doctoral thesis, Delft University of Technology.
- Israël, C.G., 1998. Morfologische ontwikkeling Amelander Zeegat. Rijkswaterstaat RIKZ, werkdocument RIKZ/OS-98.147x, 32 pag., 11 bijlagen.

Israël, C.G., en A.P. Oost, 2001. Strandhaakontwikkeling op de koppen van de Waddeneilanden. Rijkswaterstaat RIKZ, werkdocument RIKZ/OS/2001.116x, 27 pag., 1 appendix en 12 bijlagen.

Jeuken, M.C.J.L., Z.B. Wang, D. Keiller, I. Townend & G.A. Liek, 2003. Morphological response of estuaries to nodal tide variation. In: Proc. Int. Conf. Estuaries and Coasts, Hangzhou, China, pp. 166-173.

Kersten, M., 2003. Effecten van sedimentatie en erosie op de hoogteligging van het wad onder Oost-Ameland - Tussentijdse rapportage tot en met maart 2003.

Kragtwijk, N.G., 2001. Aggregated scale modelling of tidal inlets of the Wadden Sea. WL | Delft Hydraulics/Delft Cluster, Report Z2822/DC03.01.03a.

Kragtwijk, N., T.J. Zitman, M.J.F. Stive & Z.B. Wang, 2004. Morphological response of tidal basins to human interventions. Coastal Engineering 51, pp 207-221.

Louters, T., en Gerritsen, F., 1994. Het Mysterie van de Wadden: Hoe een Getijdesysteem Inspeelt op Zeespiegelstijging. Rapport RIKZ -94.040, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 70 pp.

Van de Kreeke, J. and J. Dunsbergen, D.W., 2000. Tidal asymmetry and sediment transport in Friesian Inlet. In: Yanagi, T. (Ed.), Interaction between estuaries, Coastal Seas and Shelf seas, Terra Scientific publishing company, Tokyo.

Van Ledden, M., 2003. Sand-mud segregation in estuaries and tidal basins Doctoral thesis, Delft University of Technology.

Van der Molen, J. & de Swart, H.E., 2001. Holocene tidal conditions and tide-induced sand transport in the southern North Sea. Journal of Geop. Res., 106, C5, 9339-9362.

Van der Molen, J., 2002. The influence of tides, wind and waves on the net sand transport in the North Sea. Cont. Shelf Res., 22, 2739-2762.

Mulder, J.P.M., 2000. Zandverliezen in het Nederlandse kuststelsel. Rijkswaterstaat RIKZ, rapport RIKZ/2000.36, 54 pag.

NAM, 2001. Actualisatie MER proefboring Noordzeekustzone. Rapport Milieu-effectstudie winning Moddergat, Lauwersoog.

Nortier, R.-J., 2004. Morphodynamics of the Lister Tief tidal basin. Report Z2839, WL | Delft Hydraulics.

Oost, A.P. & de Haas, H., 1992. Het Friesche Zeegat. Morfologisch-sedimentologische veranderingen in de periode 1970-1987. Deel 1 & 2. Rapport Coastal Genesis, Univ. Utrecht, Aardwetenschappen, 68 pp.

Oost, A.P. & de Haas, H., 1993. Het Friesche Zeegat. Morfologisch-sedimentologische veranderingen in de periode 1927-1970. Deel 1 & 2. Rapport Coastal Genesis, Univ. Utrecht, Aardwetenschappen, 83 pp.

Oost, A.P., 1995. Dynamics and sedimentary development of the Dutch Wadden Sea with emphasis on the Frisian Inlet; a study of the barrier islands, ebb-tidal deltas and drainage basins. Proefschrift U. Utrecht, Geologica Ultraiectina, 126, 518 pp.

-
- Oost, A.P., Ens, B.J., Brinkman, A.G., Dijkema, K.S., Eysink, W.D., Beukema, J.J., Gussinklo, H.J., Verboom, B.M.J., Verburgh, J.J., 1998. Integrale Bodemdalingstudie Waddenzee. Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V., Assen, 372 pp.
- Oost, A.P., Israël, C.G. en D.W. Dunsbergen, 2000. Kusterosie van noordwest Ameland: ontwikkelingen op verschillende tijdschalen. Rijkswaterstaat RIKZ, rapport RIKZ/2000.057, 38 pag., 4 tab. en 18 figuren.
- Oost, A.P. & P.A.H. Kleine Punte, 2003. Autonome morfologische ontwikkeling westelijke Waddenzee. Concept rapport RIKZ (versie 31 juli 2003), Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 91 pp.
- Schoorl, H., 1999a(+). De Convexe Kustboog, deel 1, het westelijk Waddengebied en het eiland Texel tot circa 1550. pp. 1-187.
- Schoorl, H., 1999b(+). De Convexe Kustboog, deel 2, het westelijk Waddengebied en het eiland Texel vanaf circa 1550. pp. 188-521.
- Schoorl, H., 2000a(+). De Convexe Kustboog, deel 3, de convexe kustboog en het eiland Vlieland. pp. 522-707.
- Schoorl, H., 2000b(+). De Convexe Kustboog, deel 4, de convexe kustboog en het eiland Terschelling. pp. 708-962.
- Schuttelaars, H.M. and H.E. De Swart, 1996. An idealized long-term morphologic model of a tidal embayment. *Eur. J. Mech. B*, 15, 55-80.
- Schuttelaars, H.M. and H.E. De Swart, 2000. Multiple morphodynamic equilibria in tidal embayments. *J. of Geophysical Res.* Vol.105, No. C10, 24,105-24,118.
- Sha, L.P., 1992. Geological Research in the Ebb-tidal delta of "Het Friesche Zeegat", Wadden Sea, The Netherlands. *State Geol. Survey-Proj.* 40010: 20 pp.
- Snijders, G.H. en L.A. Uit den Bogaard, 2003. Kustlijnkarten 2003. Rijkswaterstaat, Rapport RIKZ-2003.021, 27 pag. en 2 bijlagen.
- Stive, M.J.F., Capobianco, M., Wang, Z.B., Ruol, P., Buijsman, M.C., 1998. Morphodynamics of a tidal lagoon and the adjacent coast. In: J. Dronkers and M. Scheffers (eds.), *Physics of estuaries and coastal seas*, Balkema, Rotterdam, p. 397-407.
- Tanczos, I.C., 1996. Selective transport phenomena in coastal sands. Proefschrift, RU Groningen, 184 pp.
- Vlas, J. de en J. Marquenie, 2003. The impact of subsidence and sea level rise in the Wadden sea: prediction and field verification.
- Walburg, L., 2001. De zandbalans van het Zeegat van Texel, bepaald met verschillende buitendelta-definities. Rijkswaterstaat RIKZ, werkdocument, RIKZ/OS/2001.136x, 46 pag. en 1 bijlage.
- Stive, M.J.F. & Z.B. Wang, 2003. Morphodynamic modeling of tidal basins and coastal inlets. In: *Advances in coastal modelling*, V.C. Lakhan (ed.), Elsevier Oceanography Series, 67, Amsterdam-Boston etc, pp.367-392.
- Wang, Z.B. & van der Weck, A., 2002. Sea-level rise and Morphological development in the Wadden Sea, a desk study. Report Z3441, WL I Delft Hydraulics.
-

Wang, Z.B., M.C.J.L. Jeuken, H. Gerritsen, H.J. De Vriend en B.A. Kornman, 2002. Morphology and asymmetry of the vertical tide in the Westerschelde estuary. *Continental Shelf Research* 22 (2002), 2599-2609.

Wang, Z.B., M.C.J.L. Jeuken & B.A. Kornman, 2003. A model for predicting dredging requirement in the Westerschelde. In: *Proc. Int. Conf. Estuaries and Coasts*, Hangzhou, China, pp. 429-435.