

Opdrachtgever
Rijkswaterstaat RIKZ

Niet lineaire gedrag van het
morfologische systeem van de
Waddenzee

juni 2004

Niet lineaire gedrag van het morfologische systeem van de Waddenzee

Zheng Bing Wang

juni 2004

Inhoud

1	Inleiding	2
2	Het werk van Schuttelaars en De Swart	2
	2.1 Algemeen	2
	2.2 Geïdealiseerde modellering	3
	2.3 Validatie gebruikt model	3
	2.4 Toepassing van de resultaten	4
	2.5 Conclusie	6
3	Beschouwing op basis van waarnemingen	6
4	Conclusies en aanbevelingen	7
5	Referenties	8

1 Inleiding

Deze notitie is bedoeld om de vraag over het zogenaamde “niet-lineaire gedrag” te beantwoorden. De vraag is als volgt geformuleerd:

Ik verzoek u in te gaan op het in het advies van de AGW (Aviesgroep Waddenzeebeleid c.q. Commissie Meijer) genoemde risico op niet-lineair gedrag van de Waddenzee en hierbij in ieder geval de standpunten van Joordens, De Swart en De Jonge te betrekken. Concreet is de vraag welke waarde gehecht moet worden aan dit naar voren gebrachte risico.

Met het niet-lineaire gedrag wordt in dit geval bedoeld het bestaan van meerder stabiele morfologische evenwichtstoestanden. Als er meer dan één stabiele morfologische evenwichtstoestanden bestaan, dan kan het systeem onder invloed van natuurlijke ontwikkeling gecombineerd met menselijke ingrepen van de ene evenwichtstoestand overgaan naar een andere. Zo bestaat dan het gevaar dat een kleine ingreep grote gevolgen heeft. Concreet voor het geval van gaswinning wordt door Joordens en De Swart in hun brief aan de AGW gewezen op het gevaar dat de bodemdaling tot gevolg heeft dat de Waddenzee overgaat naar een morfologische evenwichtstoestand waarin het typische wadden-karakter van het systeem, met droogvallende platen en geulen, is verdwenen (uitruimen).

Om een oordeel te geven hoe groot het genoemde gevaar van omklappen is wordt in deze notitie nader ingegaan op werk van Schuttelaars en De Swart (2000), dat de belangrijkste basis van de uitspraken over het niet-lineaire gedrag vormt. Na een korte analyse van het gebruikte model wordt vooral ingegaan op de interpretatie van de modelresultaten. Een belangrijke vraag hierbij is: wat zeggen deze resultaten over de morfologie van de Waddenzee en over de eventuele effecten van de bodemdaling en zeespiegelrijzing? Verder wordt ook ingegaan op de werkelijke morfologische ontwikkelingen van de Waddenzee, met name de natuurlijke fluctuaties en de menselijke verstoringen in het verleden. Door deze te vergelijken met de bodemdaling t.g.v. gaswinning kan men een beeld krijgen over hoe belangrijk het effect van gaswinning op de morfologische ontwikkeling kan zijn.

Deze notitie beperkt zich tot het niet-lineaire gedrag van de morfologische ontwikkeling en zal niet ingaan op mogelijk niet-lineair gedrag van bijvoorbeeld het ecologische systeem zoals ook door Joordens en De Swart in hun brief is genoemd.

2 Het werk van Schuttelaars en De Swart

2.1 Algemeen

Het bestaan van meerder morfologische evenwichtstoestanden van getijdebekkens is beschouwd door Schuttelaars en De Swart (2000). Dit werk is een uitbreiding van hun

eerdere werk (Schuttelaars en De Swart, 1996, Schuttelaars, 1997) over korte bekkens en beschouwt bekkens van willekeurige lengte in de voortplantingsrichting van het getij. Uit dit werk is geconcludeerd dat onder bepaalde voorwaarden een bekken met een lengte binnen een klein bereik meerdere morfologische evenwichtstoestanden kan hebben.

2.2 Geïdealiseerde modellering

Het onderzoek van Schuttelaars en De Swart (1996, 2000) is gebaseerd op een zogenaamd geïdealiseerde model. Hiermee wordt bedoeld dat het model sterke schematisaties van zowel de geometrie als de fysische procesbeschrijving bevat, om alleen de essentie van de te beschouwen verschijnsel mee te nemen in de analyse. Het onderliggende modellerings-principe is hetzelfde als in het geval van complexe proces-gebaseerde modellen zoals Delft3D, d.w.z. de ondiepwatervergelijkingen in combinatie met een sedimenttransportmodel en een sedimentbalans. Sterke vereenvoudigingen maken een semi-analytische benadering mogelijk en een overzichtelijke interpretatie van de modelresultaten. Door deze sterke punten vormt dit type modellen een belangrijke aanvulling op de complexe modellen in het onderzoek naar de morfologie van systemen zoals de Waddenzee.

In het geval van het model van Schuttelaars en De Swart (2000) wordt een getijdebekken als een rechthoek beschouwd, met drie gesloten zijden (landzijde en twee zijkanten) en een open zijde (zeerand). Het is verder een 1-D model, d.w.z. alleen over de breedte gemiddelde grootheden worden beschreven en dus niet de variatie in de dwarsrichting. Alleen het getij, bestaande uit een dubbeldaags component (M2) en een viermaal-daags component (M4), is meegenomen als aandrijvende kracht van de morfologische ontwikkeling. Het sediment in het model is beschouwd als fijn zand en alleen zwevend transport is meegenomen. Op de zeerand wordt de waterdiepte vast gehouden als morfologische randvoorwaarde. Verder bevat de analyse de aanname dat de verhouding (ϵ) tussen de getijamplitude en de waterdiepte bij de zeerand en de verhouding (β) tussen de amplitudes van de M4- en M2-componenten van het maansgetij klein zijn.

De hierboven genoemde aannames zijn gebruikelijk in dit type modellering en algemeen geaccepteerd in de literatuur. T.o.v. de werkelijkheid is één vereenvoudiging wel opvallend: door de schematisatie van een bekken tot een rechthoekige bak is het intergetijdengebied alleen nog aan de landzijde aanwezig, wat vooral bij lange bekkens niet overeenkomt met de werkelijkheid.

2.3 Validatie gebruikt model

Ondanks de sterke vereenvoudigingen heeft het gebruikte model zijn waarde bewezen. Dit blijkt uit de gepresenteerde verificatie met de veldwaarnemingen. Voor de korte Waddenzeebekkens neemt de breedte-gemiddelde diepte, zowel volgens het model als volgens waarnemingen in het veld, monotoon af van openzee naar de landzijde (zie ook De Swart en Blaas, 1998). Het diepteverloop is vrijwel lineair met de afstand tot het zeegat en zelfs de kleine afwijking t.o.v. het lineaire verloop is volgens de auteurs te verklaren met het model. Ook voor het Schelde Estuarium, een langer bekken, toont het model redelijke overeenkomst met de velddata.

Wat niet met waarnemingen is gevalideerd is het niet-lineaire gedrag. Er is geen voorbeeld in de publicaties beschreven waarbij een bekken van het ene morfologische evenwicht omkapt naar een ander. In de brief van Joordens en De Swart aan de AGW is het Deense-Duitse bekken Lister Tief als mogelijk voorbeeld genoemd. Maar uit recente analyse (Wang en Van der Weck, 2002, Nortier, 2004) is echter gebleken dat ook dit bekken, in de huidige toestand, goed voldoet aan de empirische relaties voor morfologisch evenwicht zoals uit gegevens van andere Waddenzeebekkens zijn afgeleid. Analyse van de morfologische veranderingen geeft ook niet aan dat het bekken aan het leeglopen is. Bovendien voldoet dit bekken volgens het model ook niet aan de voorwaarden voor het bestaan van meerdere morfologische evenwichtstoestanden (zie volgende paragraaf). Daarom kan dit bekken niet als verificatie van het niet-lineaire gedrag worden beschouwd.

Door Hibma et al (2003) is een vergelijking tussen het geïdealiseerde model en het Delft3D model uitgevoerd. De vergelijking bevestigt dat de meeste vereenvoudigende aannames in het geïdealiseerde model geoorloofd zijn. Het enige verschil tussen de twee modellen dat significante invloed heeft op de resultaten is de morfologische randvoorwaarde aan de zeerand (in Delft3D wordt bij export van sediment bij de rand de bodem niet vastgehouden). Nadat Delft3D was voorzien van eenzelfde randvoorwaarde aan de zeerand, kon het gedrag van het geïdealiseerde model worden gereproduceerd, inclusief het bestaan – onder speciale condities - van een tweede, diep gelegen evenwicht (het niet-lineaire gedrag) voor een bekken van 145 km lang.

2.4 Toepassing van de resultaten

De belangrijkste resultaten van het geïdealiseerde model gepresenteerd door Schuttelaars en De Swart (2000) hebben betrekking op het morfologische evenwicht afhankelijk van de lengte van het bekken en de relatieve sterkte van de getijasympetrie (amplitude verhouding tussen M4 en M2). In het geval dat het getij alleen de M2 component bevat (M4 afwezig, dus symmetrisch getij) is er een uniek morfologisch evenwicht voor alle bekkenlengtes onder een bepaald maximum (order 0.45 de getijgolflengte). Wanneer M4 aanwezig is zijn er twee typen morfologisch evenwicht te onderscheiden. In relatief korte bekkens (kleiner dan orde 0.25 getijgolflengte) heeft het getij binnen het bekken het karakter van een staande golf karakter, en het bekken is relatief diep. In relatief lange bekkens heeft het getij een lopende golf karakter en is het bekken ondiep. In de meeste gevallen is er nog steeds een uniek morfologische evenwicht. Maar onder bepaalde voorwaarden kan een bekken meerdere morfologische evenwichtstoestanden hebben, een dieper (stabiel), een ondieper (stabiel) en één daar tussenin (instabiel). In de discussie rondom het effect van bodemdaling in de Waddenzee wordt aan dit verschijnsel gerefereerd met de term niet-lineair gedrag.

Volgens Schuttelaars en De Swart (2000) zijn er twee voorwaarden voor het bestaan van meerdere morfologische evenwichtstoestanden:

1. De M4 component moet sterk genoeg zijn. De verhouding (β) tussen de amplitudes van M4 en M2 moet groter zijn dan de verhouding (ϵ) tussen de amplitude van M2 en de niet gestoorde waterdiepte (ook opgelegd bij de monding als randvoorwaarde).
2. De lengte van het bekken valt binnen een klein interval (tussen de maximale lengte voor het bestaan van het eerste type evenwicht en de minimale lengte voor het bestaan van

het tweede type evenwicht, dat alleen bestaat als aan voorwaarde 1 is voldaan) rondom een kwart van de golflengte van het getij.

De Waddenzeebekkens voldoen niet aan deze voorwaarden. De verhouding ϵ is ongeveer 0.1 en de verhouding β is ongeveer 0.08 (Schuttelaars en De Swart, 2000). Aan voorwaarde 2 wordt zeker niet voldaan door de Nederlandse Waddenbekkens, omdat de lengtes van de bekkens niet langer dan orde 20 km zijn terwijl de golflengte van het getij in de orde van honderden kilometers is. Voor deze zeer korte bekkens is er volgens het geïdealiseerde model altijd maar één uniek morfologisch evenwicht met een bijna lineair afnemende waterdiepte van de monding naar de landzijde. Het enige bekken waarvan de lengte in de buurt van het vereiste interval zou kunnen komen is de Eems-Dollard. Maar ook dit bekken voldoet nog steeds niet aan de twee voorwaarden en bovendien is het model eigenlijk niet meer van toepassing voor dit bekken omdat de rivierafvoer, die niet in het model is meegenomen, hier een rol speelt.

Interessante vraag is verder of alsnog aan deze voorwaarden zou kunnen worden voldaan door zeespiegelrijzing en bodemdaling. Als gevolg van relatieve zeespiegelrijzing zal de waterdiepte toenemen. Daardoor kan de verhouding ϵ afnemen. Bij gelijkblijvende verhouding β is het theoretisch mogelijk dat op bepaald moment aan voorwaarde 1 wordt voldaan. De lengtes van de bekkens zullen nauwelijks veranderen en de golflengte van het getij zal toenemen als gevolg van de toegenomen waterdiepte. Dit betekent dat er verder van de tweede voorwaarde worden afgeweken. Het is dus vrijwel uitgesloten dat relatieve zeespiegelrijzing als gevolg kan hebben dat in de toekomst aan de vereiste voorwaarden voor het bestaan van meerdere morfologische evenwichtstoestanden voldaan wordt als er nu niet aan wordt voldaan.

Opgemerkt zij dat Schuttelaars en De Swart (2002) het triviale en stabiele morfologische evenwicht van een volledige opgevuld bekken niet hebben genoemd. Dit triviale evenwicht is van essentieel belang bij de stabiliteitsanalyse van zeegaten door Escoffier (1940). In gevallen waarin een uniek morfologisch evenwicht is gevonden ontstaat er dan een schijnbare tegenstrijdigheid. Tussen dit stabiele evenwicht en het triviale evenwicht dat eveneens stabiel is moet nog minstens één instabiel evenwicht bestaan. Er kan dus geen uniek 'open' evenwicht zijn. De verklaring van deze paradox ligt waarschijnlijk in het feit dat het model een vaste waterdiepte bij de monding hanteert. Om dezelfde reden vindt het model niet het andere triviale evenwicht, namelijk dat het bekken zo diep wordt dat het sediment niet meer in beweging is. Volgens de gebruikte modelformulering moet het dan oneindig diep zijn omdat de kritische stroomsnelheid voor begin van beweging op nul is gesteld. Als wij deze diepte bij de monding, die ook is gebruikt als referentiediepte, laten variëren, kunnen wij volgens het model voor een gegeven bekkenlengte twee typen evenwicht, één met grotere diepte bij de monding (1ste type) en één met een kleinere diepte bij de monding (2de type). Ook de korte Waddenbekkens worden relatief lang als de golflengte van het getij klein genoeg wordt bij voldoende kleine diepte. De modelresultaten zouden met de stabiliteitsanalyse van Escoffier overeenkomen als wij het diepere evenwicht als het stabiele evenwicht beschouwen en het ondiepere als het instabiele. Het oneindige diepe evenwicht moet theoretisch instabiel zijn omdat het evenwicht ernaast een stabiele is. Ook vanuit praktische overwegingen kan zo een triviaal evenwicht niet stabiel zijn. Het modelgebied grenst altijd aan gebieden waar beweging van sediment mogelijk is. Volgens deze interpretatie is de huidige toestand van de Waddenzeebekkens al het diepere evenwicht.

Dan is volgens de theorie uitgesloten dat de Waddenzee naar een nog dieper evenwicht overgaat.

Schuttelaars (1997) heeft ook 2D beschouwingen gedaan op basis van een uitbreiding van het 1D geïdealiseerde model. De beschouwing is bedoeld om een verklaring van de geulen- en platenstructuren aanwezig in de Waddenzeebekkens te geven. De resultaten van deze 2D analyse is niet tegenstrijdig met de resultaten van het 1D model.

2.5 Conclusie

Het geïdealiseerde 1-D model van Schuttelaars en De Swart (2000), ondanks de onderliggende sterke vereenvoudigende schematisaties, is van toepassing op de Waddenzee en kan dus ook in principe worden gebruikt voor een voorspelling van het effect van bodemdaling en zeespiegelrijzing. Volgens dit model bestaat er voor de Waddenzeebekkens geen dieper type evenwicht dan wat er nu aanwezig is. Door relatieve zeespiegelrijzing zal dit niet veranderen.

3 Beschouwing op basis van waarnemingen

Voor het gevreesde omklappen van de morfologische toestand van getijdebekkens zoals die in de Waddenzee is er, naast het bestaan van meerdere stabiele morfologische evenwichtstoestanden, nog een andere voorwaarde nodig. Het huidige evenwicht moet namelijk voldoende worden verstoord om te zorgen dat het systeem in het attractiegebied van het nieuwe evenwicht terechtkomt. Theoretisch vormt het instabiele evenwicht tussen de twee stabiele evenwichtstoestanden de scheiding tussen de attractiegebieden van de twee stabiele evenwichtstoestanden. In de praktijk is deze scheiding moeilijk aan te geven, zoals Joordens en De Swart ook in hun brief beweren. Een indicatie of bodemdaling door gaswinning de vereiste verstoring kan veroorzaken (afgezien van de vraag of er überhaupt een ander stabiel evenwicht bestaat) kan men verkrijgen door de bodemdaling te vergelijken met de in de natuur aanwezige of door de mens in het verleden veroorzaakte verstoringen. Vast staat dat het gevreesde omklappen, waarbij een Waddenzeebekken leegloopt en veel dieper wordt, nog niet is voorgekomen. Als er in het recente verleden veel grotere verstoringen zijn voorgekomen dan die welke ten gevolge van de gaswinning te verwachten zijn, is het onwaarschijnlijk dat de bodemdaling door gaswinning het systeem zal doen omklappen.

In de Waddenzee zijn er zowel natuurlijke als menselijke verstoringen voorgekomen. Als voorbeeld van natuurlijke verstoringen kan de 18.6 jaar cyclus van het getij worden genoemd. Deze cyclus veroorzaakt een variatie van het getijverschil met een periode van 18.6 jaar en een amplitude van ongeveer 4%. Zowel morfologische modellen als veldwaarnemingen geven aan dat de morfologie van een getijdebekken reageert op deze variatie (Jeuken et al., 2003). De getijprisma dat volgens de breed geaccepteerde empirische evenwichtsrelaties het morfologische evenwicht bepaalt is bij benadering evenredig met het getijverschil en vertoont dus ook een cyclische variatie van 4% met een periode van 18.6

jaar Dit betekent dat het evenwichtsvolume van de geulen in een bekken varieert met orde 5% van het volume van de geulen. Het totale geulvolume in een bekken als het Friesche Zeegat is ongeveer 200 miljoen m³. De amplitude van deze verstoring met een periode van 18.6 jaar is dus orde 10 miljoen m³. Dit is in dezelfde orde van grootte van het totale volume van een kuil van bodemdaling t.g.v. gaswinning.

Als voorbeelden van menselijke ingrepen in het verleden kunnen de Afsluitdijk en de afsluiting van de Lauwerszee worden genoemd. Beide ingrepen hebben een grote zandhonger (tientallen miljoenen m³) veroorzaakt (voor meer gedetailleerdere informatie van deze ingrepen zie bijv. het IBW rapport). De bodemdaling die is veroorzaakt door de al gerealiseerde gaswinning in de Waddenzee (zoals op Ameland) is kleiner dan deze verstoringen en heeft ook geen waarneembaar effect op de morfologische ontwikkeling gehad, zoals uit veldwaarnemingen is gebleken.

De tot nu toe waargenomen respons van de Waddenzee op de genoemde verstoringen bevestigt de hypothese dat het systeem de neiging heeft de oorspronkelijke evenwichtstoestand (beschreven door de empirische relaties) na verstoring weer te herstellen. Deze hypothese is ook het uitgangspunt van de verschillende morfologische modellen zoals in het IBW studie zijn gebruikt.

Samenvattend geven waarnemingen uit het recente verleden geen indicatie dat de Waddenzee zou kunnen omklappen naar een veel diepere toestand. Soortgelijke waarnemingen in het buitenland leiden tot dezelfde conclusie (zie bijv. Nichols, 1989).

4 Conclusies en aanbevelingen

Samengevat zijn de volgende conclusies getrokken:

- Het geïdealiseerde model van Schuttelaars en De Swart (2000) bevat sterke schematisaties van zowel de geometrie van en de fysische processen in de Waddenzee. Maar ondanks deze vereenvoudigingen bevat het model de essentiële elementen die de morfodynamica van een Waddenzeebekken bepalen.
- Het model is geverifieerd met waarnemingen in het veld. Het bijna lineaire verloop van de breedte-gemiddelde bodemligging van de Waddenzeebekkens wordt door het model gereproduceerd. Volgens het model is dit het unieke morfologische evenwicht van dergelijk korte bekkens. Dit komt overeen met het feit dat er nog geen voorbeeld bekend is dat een Waddenzeebekken omklapt naar een ander type morfologisch evenwicht. In die zin is dit ook een verificatie van het model.
- Verstoringen die qua omvang minstens zo groot zijn als de bodemdaling t.g.v. gaswinning komen ook in de natuur voor. Menselijke ingrepen in het verleden hebben veel grotere verstoringen veroorzaakt. In alle bekende gevallen bleek de morfologie van de Waddenzee de neiging heeft naar hetzelfde type evenwicht te herstellen. Dit geldt ook voor het Deense / Duitse bekken Lister Tief.
- Waarnemingen elders in de wereld geven dezelfde beeld. De empirische relatie tussen het getijvolume en de oppervlakte van het dwarsprofiel van de geul wordt breed ondersteund.
- Met behulp van het model van Schuttelaars en De Swart kan men ook het effect van bodemdaling op de morfologie van de Waddenzee voorspellen. Met het model kan men

nagaan of bodemdaling tot ander type morfologisch evenwicht kan leiden (en de antwoord is nee).

Terugkomend op de gestelde vraag (zie hoofdstuk 1), leidt de voorgaande beschouwing tot de conclusie dat voor wat betreft de beoogde gaswinning het genoemde risico van omklappen van de toestand van het morfologische systeem naar een ander evenwicht, in de zin van een sterk verdiepte Waddenzee zonder intergetijdegebied, niet wetenschappelijke is aangetoond. Toepassing van de resultaten van het geïdealiseerde model gepresenteerd door Schuttelaars en De Swart (2000) laat zien dat de Waddenzeebekkens niet voldoen aan de voorwaarden voor het optreden van dit verschijnsel. Relatieve zeespiegelrijzing kan er niet toe leiden dat in de toekomst wel aan deze voorwaarden wordt voldaan. Alle bekende veldwaarnemingen bevestigen deze modeluitkomsten. De zorgen zoals geuit in de brief van Joordens en De Swart worden strikt genomen dus niet ondersteund door het onderzoek van Schuttelaars en De Swart (2000).

Opgemerkt moet echter worden dat het model van Schuttelaars en De Swart (2000) een vereenvoudiging van de werkelijkheid is, zoals elk ander model. De werkelijkheid is complexer en het liefst zou men over de respons van die werkelijkheid volledige zekerheid willen hebben. Nu blijft de discussie immers hangen op indicaties van de al dan niet aanwezige mogelijkheid van een ongewenste respons, op basis van vereenvoudigde modellen en indirecte bewijsvoering. Om hierin verder te komen, is echter verder onderzoek nodig.

Het valt aan te bevelen dit onderzoek zodanig in te richten, dat veldonderzoek, monitoring, geïdealiseerde modellen en numerieke modellen elkaar optimaal versterken.

5 Referenties

- Escoffier, F.F., 1940, The stability of tidal inlets, *Shore and Beach* 8 (4), 114-115.
- Hibma, A., Schuttelaars, H.M., Wang, Z.B., 2003, Comparison of longitudinal equilibrium profiles of estuaries in idealized and process-based models, *Ocean Dynamics* 53 (3), 252-269.
- Jeuken, M.C.J.L. Wang, Z.B., Keiller D., Townend, I., Liek, G.J., 2003, Morphological response of estuaries to nodal tide variation, *International Conference of Estuaries and Coasts*, November 9-11, 2003, Hangzhou, China.
- Nichols, M.J., 1989, Sediment accumulation rates and relative sea-level rise in Lagoons, *Mar. Geol.*, 88: 201-220.
- Nortier, N.J., 2004, Morphodynamics of the Lister Tief tidal basin, Report Z2839, WL | Delft Hydraulics.
- 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., 1997, Evolution and stability analysis of bottom patterns in tidal embayments, Doctoral thesis, Utrecht University.
- 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.
- Wang, Z.B. and Van der Weck, A., 2002, Sea-level rise and morphological development in the Wadden Sea, Report Z3441, WL | Delft Hydraulics.