

Opdrachtgever:

RWS - DWW

Zandhonger Oosterschelde

Maatregelen ter vergroting van
doorstroomcapaciteit en zanddoorvoer
stormvloedkering Oosterschelde

Rapport bureaustudie

November 2007

Opdrachtgever:

RWS - DWW

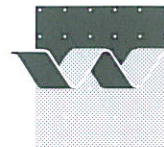
Zandhonger Oosterschelde

Maatregelen ter vergroting van
doorstroomcapaciteit en zanddoorvoer
stormvloedkering Oosterschelde

Ir. T.H.G. Jongeling

Rapport bureaustudie

November 200



OPDRACHTGEVER:	Rijkswaterstaat – Dienst Weg- en Waterbouwkunde				
TITEL:	Zandhonger Oosterschelde - Maatregelen ter vergroting van doorstroomcapaciteit en zanddoorvoer stormvloedkering Oosterschelde				
SAMENVATTING:	<p>De platen in de Oosterschelde gaan achteruit. Dit lijkt te maken te hebben met een te geringe zandaanvoer naar de Oosterschelde door de stormvloedkering heen en met een te geringe getijbeweging op de Oosterschelde.</p> <p>In dit rapport is onderzocht of en in welke mate zandaanvoer en getijstroomsnelheid kunnen worden vergroot door het treffen van maatregelen, die met de vormgeving van de stormvloedkering en zijn omgeving te maken hebben, dan wel die een verandering van het operationeel gebruik van de kering ten doel hebben.</p> <p>In concreto gaat het hierbij om: (i) maatregelen die een netto zandtransport vanuit de voordelta richting Oosterschelde bevorderen (opvullen en afdekken ontgrondingskuilen aan zeezijde), (ii) maatregelen die leiden tot een vergroting van de doorstroomcapaciteit van de kering (stroomlijning van pijlers en/of drempel met dorpels; openen stenen dam aanzetten), en (iii) beheermaatregelen waarbij door manipulatie met groepen schuiven van de kering invloed uitgeoefend wordt op stromings- en zandtransportpatronen.</p> <p>Het potentiële effect van de maatregelen is door middel van een quick scan onderzocht en er is een plan van aanpak opgesteld voor nader onderzoek (door middel van bureaustudies, veldmetingen, experimenteel onderzoek in schaalmodellen, numerieke simulaties) naar de onderliggende processen en verschijnselen. Ook zijn de kosten van uitvoering van de maatregelen globaal afgeschat.</p>				
REFERENTIES:	Offertebrief WL Delft Hydraulics, 12 september 2006, kenmerk ZWS20654/Q4264/sh Opdrachtbrief RWS-DWW, 19 oktober 2006, overeenkomst nr DWW-2914, 'Waterbouwkundige studies 2006'				
VER	AUTEUR	DATUM	OPMERK.	REVIEW	GOEDKEURING
01	T.H.G. Jongeling	27 november 2006		R.J. de Jong	C.A. Bons
02	T.H.G. Jongeling	13 november 2007		L.C. van Rijn	C.A. Bons
				R.J. de Jong	
PROJECTNUMMER:	Q4264				
TREFWOORDEN:	Oosterschelde, stormvloedkering, zandtransport, afvoercoëfficiënt, zandplaten				
AANTAL BLADZIJDEN:	57				
VERTROUWELIJK:	<input type="checkbox"/> JA		<input checked="" type="checkbox"/> NEE		
STATUS:	<input type="checkbox"/> VOORLOPIG		<input type="checkbox"/> CONCEPT		<input checked="" type="checkbox"/> DEFINITIEF

Inhoud

1	Inleiding	1-1
2	Probleemschets	2-1
	2.1 Korte historie	2-1
	2.2 Stormvloedkering.....	2-1
	2.3 Morfologische veranderingen na afsluiting.....	2-9
3	Te onderzoeken maatregelen	3-1
	3.1 Geselecteerde maatregelen	3-2
	3.2 Onderzoek naar effecten geselecteerde maatregelen.....	3-3
	3.3 Schatting van kosten van uitvoering van maatregelen	3-4
4	Basisvragen	4-1
	4.1 Basisvraag 1.....	4-1
	4.1.1 Analyse	4-1
	4.1.2 Plan van aanpak voor nader onderzoek	4-9
	4.1.3 Kosten van uitvoering van de maatregel.....	4-12
	4.2 Basisvraag 2.....	4-13
	4.2.1 Analyse	4-13
	4.2.2 Plan van aanpak voor verder onderzoek	4-21
	4.2.3 Kosten van uitvoering van de maatregel.....	4-24
	4.3 Basisvraag 3.....	4-25
	4.3.1 Analyse	4-25
	4.3.2 Plan van aanpak voor verder onderzoek	4-28
5	Samenvatting, conclusies en aanbevelingen.....	5-1
	5.1 Het zandhongerprobleem.....	5-1
	5.2 Beoordeling maatregelen.....	5-2
	5.3 Alternatieven	5-5
6	Referenties / literatuur	6-1

I Inleiding

Sinds de vastlegging van het Oosterscheldebekken in zijn huidige vorm door middel van Zandkreekdam, Philipsdam en Oesterdam en vervolgens de gedeeltelijke afsluiting door middel van de stormvloedkering is de in- en uitgaande getijvolumestroom verminderd, en daarmee is ook het zandtransport in het bekken gewijzigd. De Oosterschelde is op zoek naar een nieuw dynamisch evenwicht. De grote zandplaten kalven af en worden ook vlakker en lager; het zand verdwijnt onder water. Het intergetijdengebied dat reeds door de compartimentering en de kleinere getijslag was verkleind, neemt door de erosie van de plaatranden en de afvlakking en verlaging van de hogere plaatdelen (met als gevolg kortere droogvalduur) verder af. Dit gaat ten koste van het beschikbare droog-nat oppervlak voor foeragerende vogels en reduceert het leefgebied voor sommige bodemorganismen (die als voedselbron dienen voor vogels), ontwikkelingen die als ongewenst worden beschouwd.

Het proces van het ontstaan en afkalven van platen is van veel factoren afhankelijk, o.a. de aanvoer en het transport van zand (dit vraagt om beschikbaarheid van zand in de voordelta en in het Oosterscheldebekken en een voldoende hoge stroomsnelheid), de topografie van de bodem en de eigenschappen van het bodem- en plaatmateriaal (inclusief cohesie tussen zandkorrels en effecten van begroeiing en bodemorganismen), de optredende stromings- en circulatiepatronen, de getijslag, de wind (richting, duur en sterkte), en de golfwerking (als functie van getijslag en wind). Ook scheepvaart kan een rol spelen.

Het afkalvingsproces in de Oosterschelde lijkt tevens met een te geringe aanvoer van zand door de stormvloedkering heen te maken te hebben. Daarnaast wordt gedacht dat de stroomsnelheid in de Oosterschelde te laag is voor zandtransport naar de platen. Voorts speelt mee dat het waterpeil van de Oosterschelde bij sluiting van de kering gedurende langere tijd weinig verandert, waardoor de door de storm opgewekte golven sterker op plaatdelen kunnen inwerken.

De opdrachtgever, Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouwkunde (RWS-DWW), heeft WL | Delft Hydraulics gevraagd om te onderzoeken of en in welke mate zandaanvoer en stroomsnelheid in positieve zin kunnen worden beïnvloed door het treffen van maatregelen, die met de vormgeving van de stormvloedkering en zijn omgeving te maken hebben, dan wel die een verandering van het operationeel gebruik van de kering ten doel hebben. De maatregelen dienen het volgende resultaat te hebben:

- Vergroting van de getijstroomsnelheid in de Oosterschelde;
- Vergroting van de zandaanvoer naar de Oosterschelde.

Hoewel de vraag naar het proces van afkalving van de zandplaten in de Oosterschelde de achterliggende vraag vormt, maakt het onderzoek naar dit proces geen deel uit van de vraagstelling. Op het hoe en waarom van het afkalven van de platen wordt daarom in de voorliggende studie niet ingegaan.

Het onderzoek werd door middel van offertebrief ZWS-20654/Q4264/sh, d.d. 12 september 2006, als deelproject 3 van 'Waterbouwkundige studies 2006' aan RWS-DWW aangeboden.

De opdracht tot uitvoering van de studie werd verleend door middel van brief AW/062961, d.d. 19 oktober 2006 (overeenkomst nr. DWW-2914: 'Waterbouwkundige studies 2006'). Het onderzoek is uitgevoerd in de periode eind oktober – eind november 2006. Dit rapport is geschreven door ir. T.H.G. Jongeling na consultatie van prof. dr. ir. L.C. van Rijn (kustmorfoloog), dr. ir. E. Mosselman (riviermorfoloog), dr. ir. C.J. Sloff (riviermorfoloog, specialist numerieke simulaties), drs. A.W. van der Weck (manager van de afdeling waar studies voor de Westerschelde zijn uitgevoerd), en ing. B.W.G. Blok (veldmeetspecialist), en bevat een bijdrage van ir. M. van Ormondt (numerieke modellering Oosterscheldebekken). Alle genoemde personen zijn verbonden aan WL | Delft Hydraulics.

Het onderzoek werd begeleid door ir. M. van der Wal, ir. K. Saathof en ir. U. Forster van RWS-DWW, alsmede door ir. E. van Zanten van RWS-RIKZ.

In september 2007 is een beschouwing over de kosten van maatregelen toegevoegd. Deze kosten zijn in overleg met de begeleiders en met ing. D. de Wilde van RWS-Bouwdienst afgeschat (prijspeil 2007, exclusief btw).

2 Probleemschets

2.1 Korte historie

De topografie van de Oosterschelde en de andere zeegaten in het Deltagebied, zoals die bestond vóór aanvang van de Deltawerken, was grotendeels het resultaat van tamelijk geleidelijk verlopende natuurlijke processen (afgezien van enkele plotselinge veranderingen die plaats vonden tijdens stormvloeden). Maar ook menselijke ingrepen, zoals de aanleg van dijken en dammen en het uitvoeren van baggerwerkzaamheden, zijn in toenemende mate van invloed geweest op de topografie van geulen en platen. De bodem van de Oosterschelde bestaat grotendeels uit fijn zand ($150\ \mu\text{m} - 200\ \mu\text{m}$), dat destijds, bij de toenmalige stroomsnelheden in de geulen oplopend tot $1\ \text{m/s} - 2\ \text{m/s}$ (gemiddeld getij), gemakkelijk kon worden verplaatst. In Figuur 2-1 wordt ter illustratie van het geleidelijke verloop van de morfologische veranderingen een beeld gegeven van de ontwikkeling van platen en geulen in de periode 1827-1953.

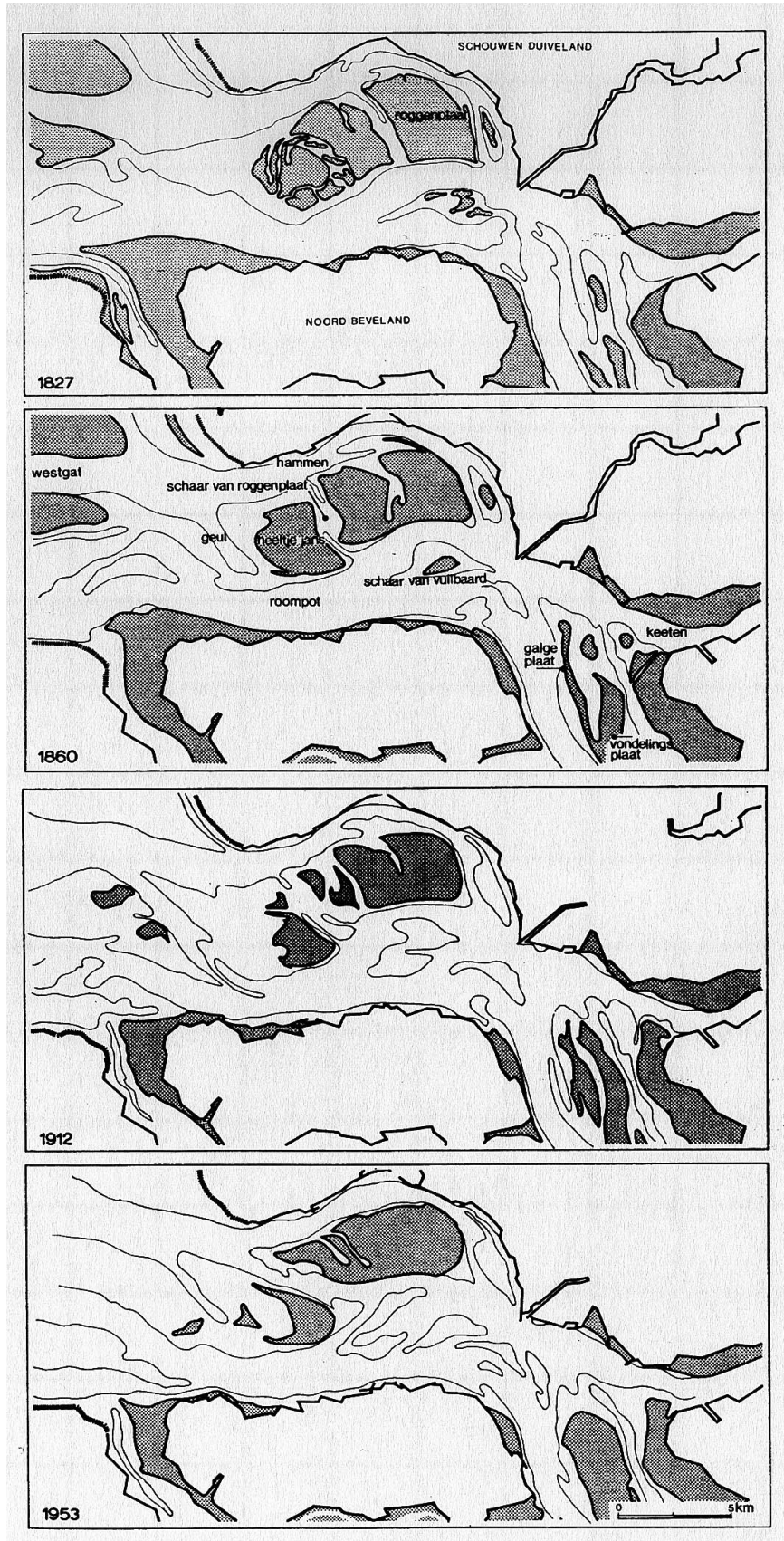
In het kader van het Deltaplan werden de Grevelingendam (1964) en de Volkerakdam (1969) aangelegd, waarmee de getijvolumestroom via de monding van de Oosterschelde flink toenam. Als gevolg hiervan namen ook de stroomsnelheden in het Oosterscheldebekken toe. De hogere stroomsnelheden waren er vervolgens de oorzaak van dat de stroomgeulen zich verdiepten en zich ook enigszins verlegden.

Na de compartimentering (Zandkreekdam (1960), Veerse-Gatdam (1961), Philipsdam (1987) en Oosterdam (1986)) en de bouw van de Oosterscheldekering (1986, zie Figuur 2-2) reduceerde de getijvolumestroom weer. Daarmee nam ook de stroomsnelheid in het bekken af. Stroomsnelheidsmaxima in de geulen variëren nu tussen $0,5\ \text{m/s}$ tot $1,5\ \text{m/s}$ bij gemiddeld getij in het westelijk deel van het Oosterscheldebekken [Oosterlaan & Zagers, 1996].

2.2 Stormvloedkering

De stormvloedkering is ontworpen met een bruto doorstroomopening van ca. $17.900\ \text{m}^2$ beneden de NAP-lijn; het oorspronkelijk doorstroomprofiel bedroeg ca. $80.000\ \text{m}^2$. De getijslag bij Yerseke reduceerde door de aanleg van de kering. Zonder kering bedroeg het gemiddelde getijverschil $3,53\ \text{m}$, mét kering werd ten tijde van ontwerp en bouw op basis van numerieke berekeningen een gemiddeld getijverschil verwacht van $3,04\ \text{m}$ (met standaard-afwijking $\sigma = 0,39\ \text{m}$). In [WL / RWS, 1989] wordt vermeld dat de gerealiseerde gemiddelde getijslag $3,3\ \text{m}$ bedraagt; deze waarde is berekend op basis van metingen in de jaren kort na het in gebruik nemen van de kering.

In [Oosterlaan & Zagers, 1996] zijn meer gedetailleerde gegevens te vinden van de getijslag op het Oosterscheldebekken. Bij Yerseke bedroeg de gemiddelde getijslag $3,26\ \text{m}$ in de periode 1987 – 1990 en $3,31\ \text{m}$ in de periode 1991- 1995.



Figuur 2-1 Oosterschelde: ontwikkeling van platen en geulen in de periode 1827-1953 (bron: [RWS-1])



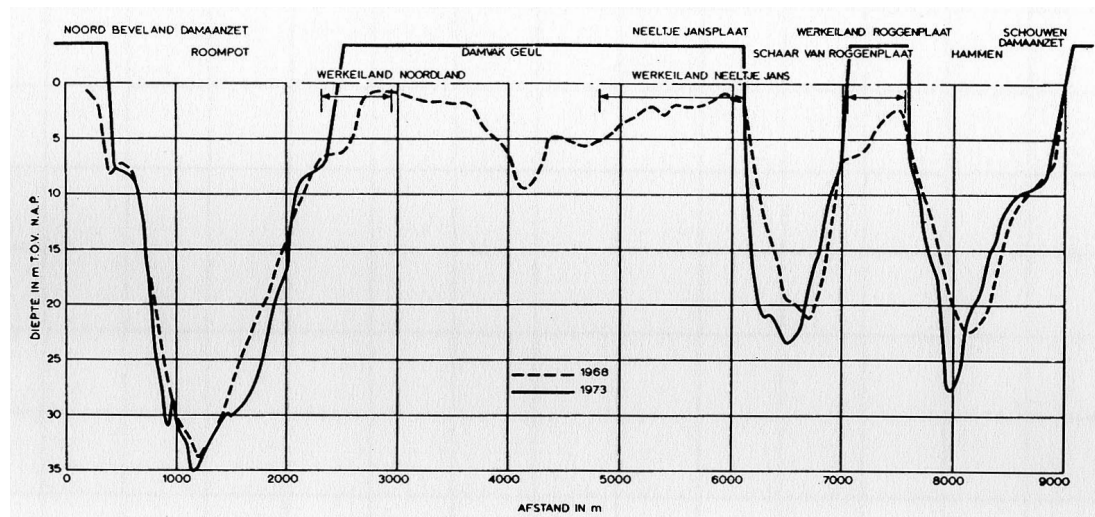
Figuur 2-2 Stormvloedkering Oosterschelde, zicht naar het noorden, vloedsituatie

Numerieke berekeningen werden destijds, in de studiefase van de stormvloedkering, uitgevoerd met de rekenmodellen IMPLIC (1D-model van gehele Oosterscheldebekken) en WAQUA (2DH modellen van deelgebieden en een grover model van het gehele bekken).

De afvoercoëfficiënt van de kering (alle schuiven open) werd op basis van metingen in schaalmodellen en numerieke berekeningen ingeschat op 0,92 (dit is de gemiddelde waarde voor eb en vloed, voor alle drie sluitgaten samen) met een standaardafwijking $\sigma = 0,05$ [RWS-1]. Deze coëfficiënt is gerelateerd aan het bruto doorstroomoppervlak van ca. 17.900 m^2 beneden de NAP-lijn.

Bij een stijgende zeespiegel zal ook de gemiddelde waterstand in de Oosterschelde toenemen. Door de gemiddeld hogere waterstand zal tevens meer water door de kering kunnen stromen (de doorstroomopening wordt aan de bovenzijde echter wel begrensd door de betonnen bovenbalk met onderzijde op NAP +1,0 m). De zeespiegelrijzing bedroeg in de periode 1900 – 1980 ca. 0,25 m (waarde gebaseerd op getijgegevens bij Hoek van Holland en Vlissingen), terwijl de getijamplitude in deze periode toenam met 3% à 4%.

Het afsluitbare deel van de stormvloedkering is gebouwd in de drie stroomgeulen Hammen, Schaar van Roggenplaat en Roompot. Het vaste deel van de kering op Roggenplaat en Middelplaat bestaat uit een gesloten dam. Ook is een schutsluis in de kering opgenomen. In onderstaande Figuur 2-3 is het bodemprofiel in het tracé van de kering weergegeven; de figuur laat de veranderingen zien zoals die optraden in de periode 1968-1973, kort vóórdat met de werkzaamheden in de Oosterscheldemond voor – toen nog – de volledige afsluiting werd begonnen. De geul in de Roompot had ter plaatse een diepte van NAP -35 m.



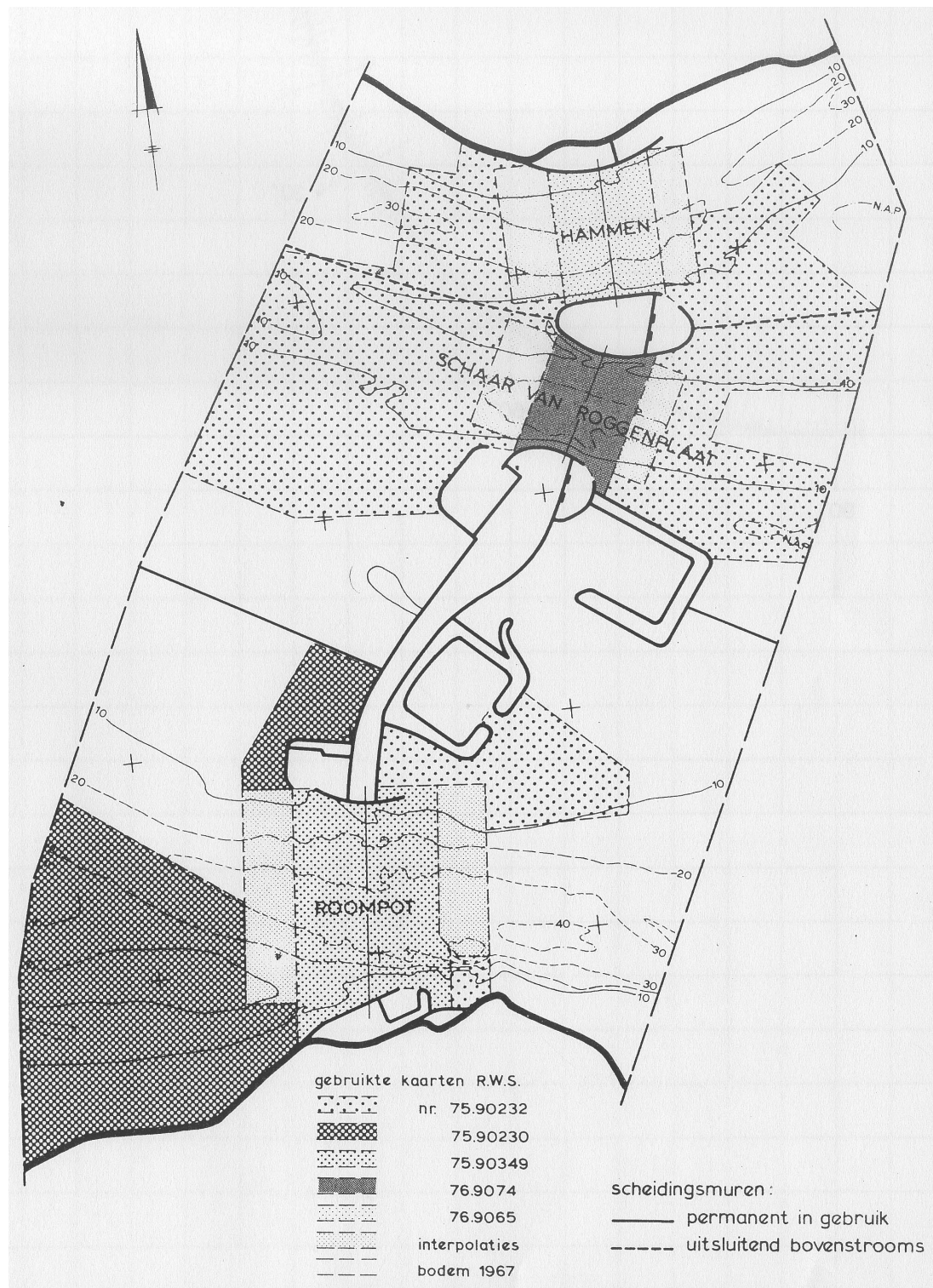
Figuur 2-3 Bodemprofiel in het tracé van de stormvloedkering, 1968 en 1973 (bron: [RWS-1])

In Figuur 2-4 wordt de bodemligging in de monding van de Oosterschelde getoond, zoals die in het schaalmodel M1001 van WL | Delft Hydraulics werd ingebouwd. Deze bodemligging was gebaseerd op metingen die in de periode 1975 en 1976 waren uitgevoerd. De figuur laat zien dat de bodem in de Roompot-geul destijds over een groot oppervlak lager lag dan NAP -30 m (aan de binnenzijde van de toekomstige kering bevond zich zelfs een put dieper dan NAP -40 m). In de Hammen lag een groot deel van de bodem lager dan NAP -20 m, met lokale verdiepingen lager dan NAP -30 m. De Schaar van Roggenplaat was het minst diep.

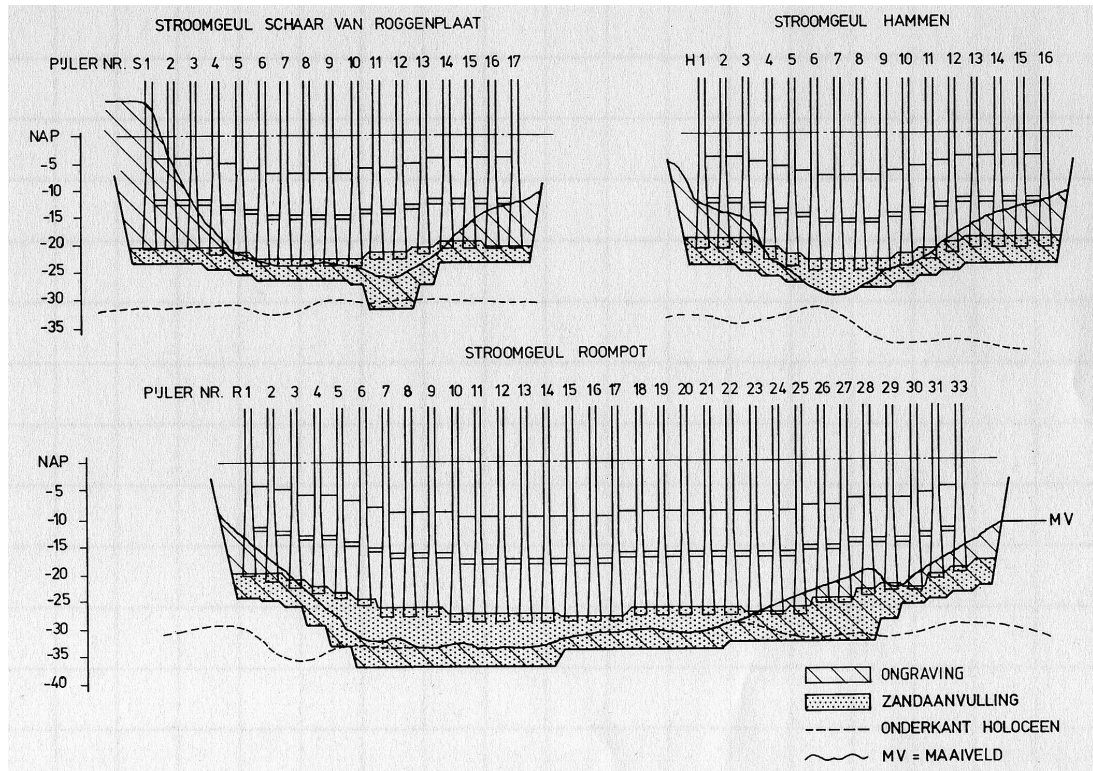
In het tracé van de kering is grondverbetering toegepast. De slechte grond werd weggegraven en de bodem werd lokaal met zand opgehoogd tot aan het funderingsniveau van de pijlervoeten en verdicht. Op de grondverbetering werd vervolgens de uit betonnen elementen bestaande pijlerkering met stalen hefschuiven en de drempelconstructie opgebouwd. De drempelconstructie bestaat uit verschillende lagen stortsteen en betonblokken. De diepe stroomgeulen in het tracé van de kering werden door aanleg van de kering deels opgevuld; op enige afstand van de kering bleven de diepe geulen in stand. In Figuur 2-5 wordt een beeld gegeven van de ontgravingen en zandaanvullingen in het tracé van de kering.

In de Schaar werd de bodem ter weerszijden van de kering verdedigd tot een afstand van 550 m uit de as van de kering; in Hammen en Roompot bedroeg deze maat 650 m. De bodemverdediging bestaat uit steenasfaltmatten en blokkenmatten, verzaagd met ballast, en volgt de lokale bodemlijn.

Tussen de drempel en de bodemverdediging is een overgangs-constructie gemaakt, die bestaat uit verschillende lagen stortsteen. In Figuur 2-6 wordt een overzicht getoond van de bodemverdediging.



Figuur 2-4 Bodemligging Oosterscheldemond zoals toegepast in schaalmodel M1001 en gebaseerd op metingen in 1975 en 1976 (bron: [M1001-1, 1986])

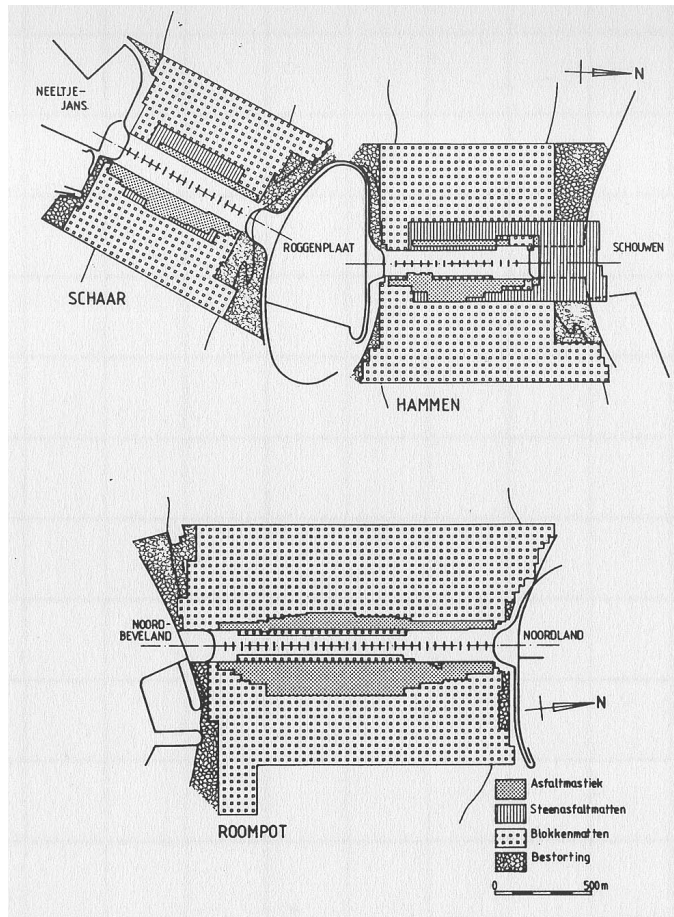


Figuur 2-5 Grondverbetering in het tracé van de kering (bron: [RWS-1])

In navolgende tabel, afkomstig uit [RWS-RIKZ, 2003] worden enkele hydrodynamische karakteristieken van het Oosterscheldebekken vóór en na afsluiting getoond. Uit de tabel blijkt dat het gemiddelde getijvolume na de afsluiting daalde van $1230 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ naar $880 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, een reductie met een factor 0,7. Globaal gezien zijn de stroomsnelheden in de geulen ook met deze factor gereduceerd.

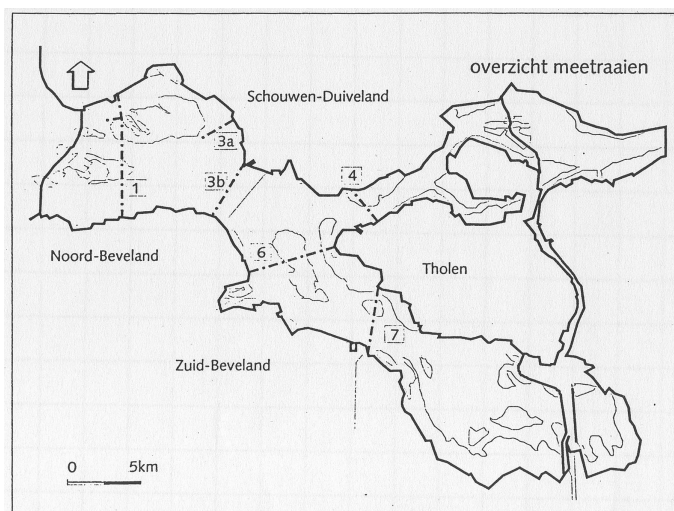
	Pre-Oosterscheldewerken	Post-Oosterscheldewerken
Totaal oppervlak, km ²	452	351
Water oppervlak, km ²	362	304
Intergetijdengebied, km ²	183	118
Doorstroom Stormvloedkering in open stand, m ²	80.000	17.900
Gemiddelde getijslag, Yerseke, m	3,70	3,25
Maximale stroomsnelheid, m s ⁻¹	1,5	1,0
Verblijftijd, dagen	5-50	10-150
Gemiddeld getijvolume, m ³ x 10 ⁶	1.230	880
Totaal watervolume, m ³ x 10 ⁶	3.050	2.750

Tabel 2-1 Dynamische karakteristieken Oosterscheldebekken, vóór en na aanleg van de werken in de Oosterschelde (bron: [RWS-RIKZ, 2003])



Figuur 2-6 Overzicht bodemverdediging stormvloedkering (bron: [RWS-1])

De stroomsnelheden in de Oosterschelde zijn diverse malen gemeten in de periode 1987 – 1995, na afsluiting van de Oosterschelde [Oosterlaan & Zagers, 1996]. In Figuur 2-7 zijn de meetraaien aangegeven waar de stroomsnelheidsmetingen zijn uitgevoerd.



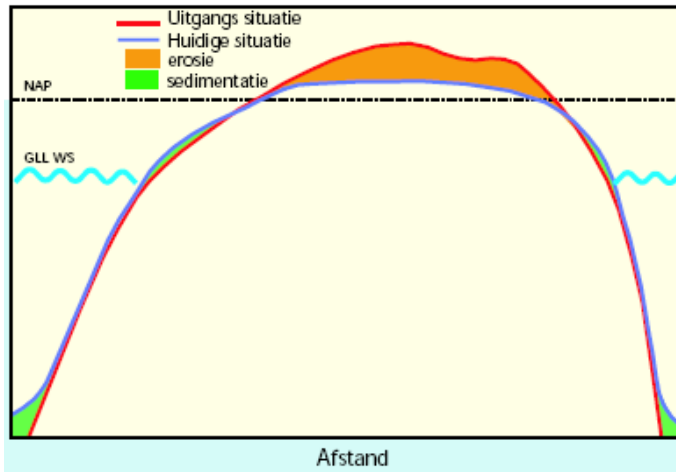
Figuur 2-7 Meetraaien stroomsnelheidsmetingen Oosterscheldebekken (bron: [Oosterlaan & Zagers, 1996])

Tabel 2-2 geeft enkele resultaten van de stroomsnelheidsmetingen. De stroomsnelheid betreft de maximale, over de verticaal gemiddelde stroomsnelheid bij eb- en vloedcondities en geldt voor een gemiddeld getij. Uit de tabel blijkt dat de stroomsnelheden in het westelijk deel van het Oosterscheldebekken (raaien 1 en 3b), tijdens delen van de getijcyclus, ruim hoger zijn dan 0,4 m/s à 0,6 m/s, de snelheid waarbij zand door de stroming wordt opgepakt en getransporteerd. In het oostelijke deel (raaien 4, 6 en 7) zijn de stroomsnelheden minder hoog, zodat het zandtransport daar geringer zal zijn.

locatie	datum	max. eb snelheid cm/s	max. vloed snelheid cm/s	doorstroom oppervlak m ²
raai 1 Oliegeul	27/10/87	60	56	2740
Schaar	18/02/88	78		17120
Schaar	14/04/88		78	17985
Schaar	08/09/95	147	189	16900
Hammen	17/02/88	67		21500
Hammen	24/04/90	57		19415
Hammen	07/09/95	93	178	20320
Roompot	23/02/88	100		39480
Roompot	24/08/95	117	175	37580
Raai 3a	21/06/90	28	37	17760
Raai 3b	21/02/89	67	80	69725
Raai 3b	15/09/95	96	105	67660
Raai 4	08/12/87	30	38	19980
Raai 4	21/06/90	36	40	18600
Raai 6 Eng.vw	05/06/89	60	66	35243
Brab.vw	05/06/89	45	60	11365
Raai 7	10/11/88	45	59	37448
Raai 7	16/11/88	45	54	37448
Raai 7	16/05/90	46	57	38720

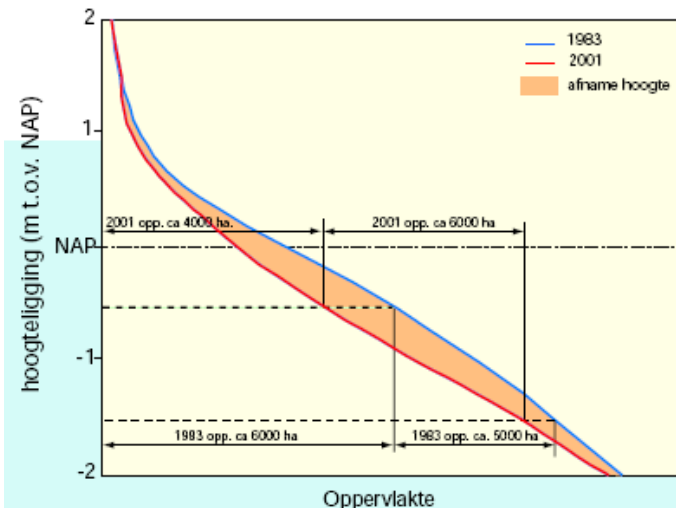
Tabel 2-2 Maximale stroomsnelheden en doorstroomoppervlakken in raaien Oosterschelde (bron: [Oosterlaan & Zagers, 1996])

Geconstateerd is [RWS-RIKZ, 2004] dat onder de gewijzigde stromings-condities en bij de kleinere resulterende getijslag na de voltooiing van de Deltawerken de platen aan het afkalven zijn en lager worden; het geërodeerde materiaal wordt in de ondiep-watergebieden bij de platen afgezet en komt mogelijk uiteindelijk ook in de diepe geulen terecht. Figuur 2-9 uit [RWS-RIKZ, 2004] geeft een schematische voorstelling van het afkalvingsproces van de platen.



Figuur 2-9 Afkalvingsproces, schematisch, van platen Oosterschelde (bron: [RWS-RIKZ, 2004])

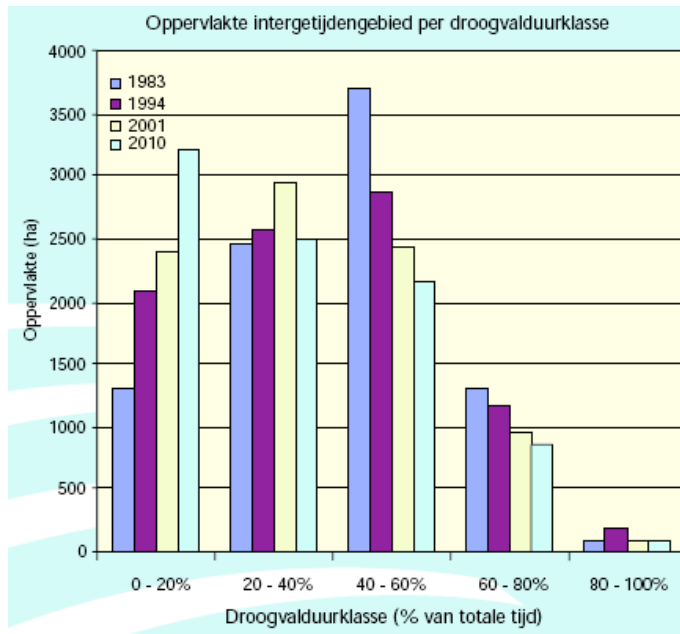
Als gevolg van het gereduceerde getij en door de erosie van de platen neemt het intergetijdengebied (droog-nat gebied) in het Oosterscheldebekken af. In Figuur 2-10 uit [RWS-RIKZ, 2004] wordt de afname van de plaathoogte getoond zoals die tussen 1983 en 2001 is opgetreden.



Figuur 2-10 Afname hoogteligging platen Oosterschelde tussen 1983 en 2001 (bron: : [RWS-RIKZ, 2004])

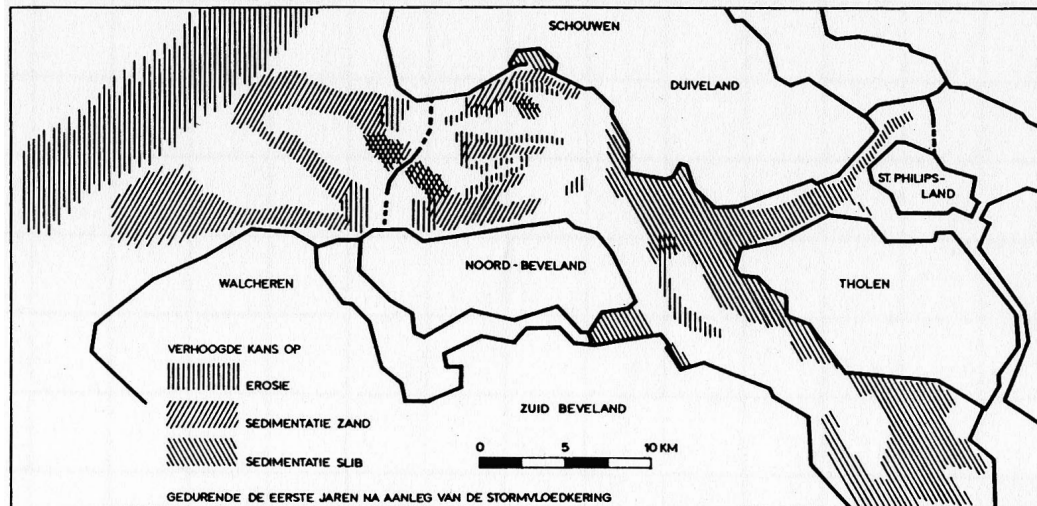
Figuur 2-11 toont de verandering van de droogvalduur van plaatdelen in het intergetijdengebied in deze periode (aangevuld met een prognose voor 2010).

Met name de afname van de droogvalduur is van belang voor de ecologische waarden van het platengebied. Vogels die hun voedsel op de droogvallende delen van de platen zoeken hebben daardoor minder tijd om te foerageren. Maar ook is de geringere droogvalduur ongunstig voor sommige bodemorganismen, zoals kokkels, waarmee een belangrijke bron van voedsel voor verschillende vogelsoorten minder wordt.



Figuur 2-11 Verandering droogvalduur platen Oosterschelde in periode 1983-2001 en prognose voor 2010 (bron: : [RWS-RIKZ, 2004])

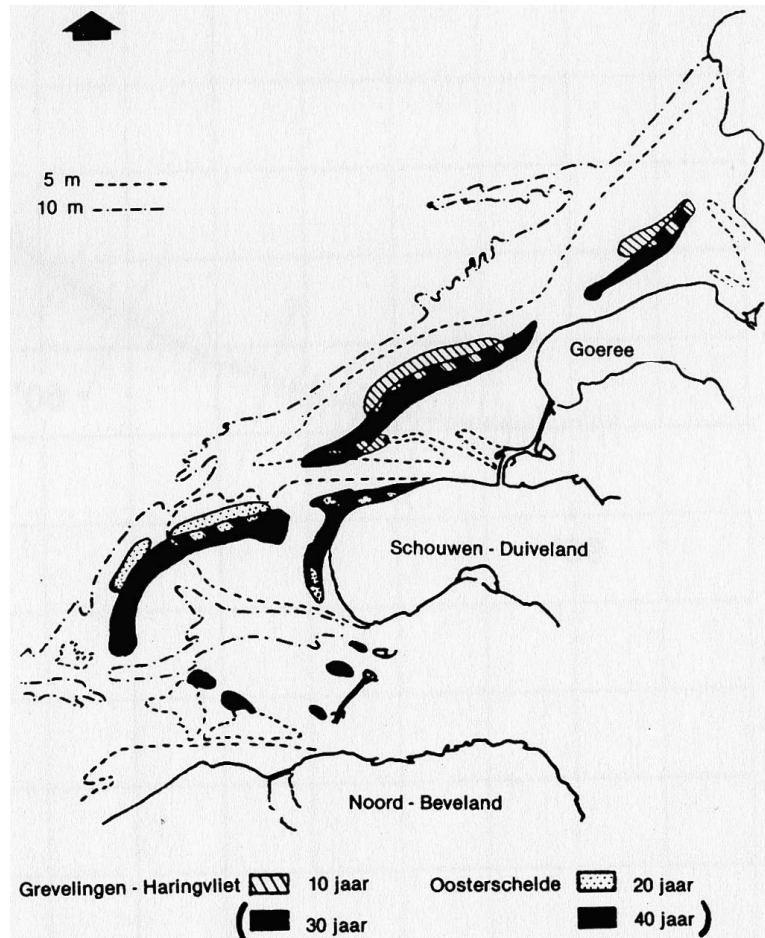
Ten tijde van de afsluiting van de Oosterschelde werd reeds voorzien dat er morfologische veranderingen zouden optreden in de voordelta en in het Oosterscheldebekken [RWS-1]. Onderstaande Figuur 2-12 geeft een beeld van de veranderingen die destijds werden voorspeld. Verwacht werd dat de getijstroom zand en slib vanuit de voordelta naar het Oosterscheldebekken zou voeren, en dat er per saldo minder sediment naar buiten zou worden getransporteerd (netto zand- en slibtransport naar binnen). Het zand zou vooral neerslaan in het westelijke deel van het bekken, het slib zou pas op grotere afstand van de kering bezinken. Het werd ook voor mogelijk gehouden dat als gevolg van faseverschillen in de getijvoortplanting in het Oosterscheldebekken stroomgeulen zouden verplaatsen of nieuwe stroomgeulen zouden worden gevormd. Aan de hand van bodemtopografiemetingen kan nu evenwel worden geconstateerd dat de import van zand vanuit de voordelta tot op heden zeer gering tot verwaarloosbaar is geweest [Oosterlaan & Zagers, 1996].



Figuur 2-12 Prognose van morfologische effecten na realisatie van de stormvloedkering (bron: [RWS-1])

Voorzien werd verder [RWS-1] dat door de afname van het horizontale getij (de horizontale waterbeweging) minder zandtransport zou plaats vinden binnen het gebied, met als consequentie minder zandaanvoer tot boven de platen (dus minder plaatopbouw). Tevens werd verwacht dat door de reductie van het verticale getij (de getijslag) de golfaanval zich sterker zou concentreren op een kleiner oppervlak aan de randen van de platen, met als mogelijk gevolg een afkalven van de platen en een verkleining van het areaal aan platen, slikken en schorren. Deze verschijnselen blijken zich dus, zoals hiervoor is aangegeven, inderdaad voor te doen.

Ook in de voordelta werden morfologische veranderingen voorzien als gevolg van de afsluiting van de zeegaten. Gedacht werd [RWS-1], dat onder invloed van de gewijzigde getijbeweging (met minder stroming loodrecht op de kust) kust-parallele zandbanken zouden kunnen ontstaan. Deze banken zouden zich ontwikkelen op de buitenranden van de voormalige buitendelta's, op een afstand van 3 – 8 km tot de kust [Stolk, 1989]. Onderstaande Figuur 2-13 geeft een impressie van de denkbeelden die ten aanzien van de morfologische veranderingen in de voordelta bestonden.



Figuur 2-13 Denkbeeld voor wat betreft morfologische ontwikkelingen in de voordelta (bron: [RWS-1])

In de periode 1959 – 1976 voorafgaande aan de afsluiting van de Oosterschelde waren de morfologische veranderingen in de voordelta overigens betrekkelijk gering. Aan de hand van een zandbalans, die werd opgesteld op basis van verschillen tussen achtereenvolgende lodingen, werd in [R1367, 1980] geconstateerd dat er sprake was van een algemene verondieping van de voordelta van ordegrootte 1 – 3 cm per jaar.

Een zandbalans-studie van recenter datum [RWS-RIKZ, 2000-1], uitgevoerd voor het gehele Nederlandse kuststelsel, laat evenwel zien dat in het gebied van zeereep tot waterdiepte NAP -20 m, in de periode 1965-1995, een zandverlies optrad van gemiddeld $6,5 \cdot 10^6$ m³/jaar. Voor het Deltagebied wordt in deze studie ingeschat dat de Westerschelde – de enige zandimporterende zeearm in het gebied – een hoeveelheid zand van $2,2 \cdot 10^6$ m³ per jaar onttrok aan het kuststelsel.

Ook voor de toekomst wordt in deze studie een netto zandverlies voorzien in het Nederlandse kuststelsel.

In [RWS-RIKZ, 2000-2] wordt meer gedetailleerd op de veranderingen in de voordelta ingegaan. Gesteld wordt dat de zandplaten voor de kust na realisatie van de Deltawerken zijn toegenomen en na verloop van enige jaren zijn gestabiliseerd (er wordt de laatste jaren ook weer wat teruggang geconstateerd). De mondingen van oude zeearmen en gebieden tussen banken en het land zijn ondieper geworden. Vóór de Veerse Dam is de zandplaat Onrust ontstaan. In het algemeen is de kusterosie afgenomen.

De effecten van afsluiting van de zearmen op de bodem in de voordelta zijn volgens de studie gestabiliseerd. Het intergetijdegebied in de voordelta is toegenomen, maar dit weegt niet op tegen de afname in het binnendeltagebied.

3 Te onderzoeken maatregelen

Het probleem van lager wordende en afkalvende platen in de Oosterschelde is al een aantal jaren onderwerp van discussie. De gedachte bestaat dat een verbetering kan worden gerealiseerd wanneer meer zand naar de Oosterschelde wordt gebracht (al dan niet langs natuurlijke weg) en wanneer tevens de stroomsnelheid in het Oosterscheldebekken wordt verhoogd. De afgelopen jaren is in discussies en workshops een groot aantal suggesties naar voren gebracht voor het treffen van maatregelen, waarmee de gestelde doelen zouden kunnen worden bereikt [RWS-RIKZ, 2005].

Door de opdrachtgever Rijkswaterstaat is uit de voorstellen een viertal maatregelen geselecteerd, waarvoor wordt gevraagd om het potentiële effect door middel van een ‘quick scan’ na te gaan. De geselecteerde maatregelen hebben betrekking op de vormgeving van de kering en zijn directe omgeving, en op het beheer van de kering.

Maatregelen gericht op een vergroting van de doorstroomopening van de kering, waarvan op voorhand vast stond dat de kosten hoog zouden zijn, zoals het verlagen van de dorpelbalken (met als consequentie dat ook de stenen drempel moet worden verlaagd en de schuiven, inclusief dure aandrijfsystemen, moeten worden verhoogd) of het maken van een vierde doorstroomopening door Neeltje Jans plaat, zijn niet geselecteerd.

Maatregelen zoals het kunstmatig aanvoeren van zand naar de Oosterschelde of het suppleren van zand in de voordelta worden hier eveneens niet beschouwd. Wel wordt het kunstmatig aanvoeren van zand naar de Oosterschelde als referentiemaatregel gehanteerd in de afschatting van kosten van maatregelen, zie ook Paragraaf 3.3.

De achterliggende vraag, namelijk of een verhoogd netto zandtransport naar de Oosterschelde, al dan niet in combinatie met een grotere getijslag op het Oosterscheldebekken en hogere stroomsnelheden, inderdaad ten goede komt aan de platenopbouw wordt hier niet beantwoord. Het is evenwel mogelijk dat het zand, dat de kering passeert, voornamelijk in de stroomgeulen wordt afgezet en vervolgens nauwelijks naar de platen wordt getransporteerd. Transport naar de platen zou dan pas kunnen plaats vinden wanneer de Oosterschelde – morfologisch gezien – in evenwicht is gekomen. In het transport zijn met name de optredende stroomsnelheden, de grootte van de getijslag en golfwerking van belang.

De vraag of er in de voordelta voldoende zand beschikbaar is (het gaat om een benodigde hoeveelheid zand van $400 \cdot 10^6 - 600 \cdot 10^6 \text{ m}^3$) wordt hier eveneens niet behandeld.

Rijkswaterstaat werkt aan uitvoering van lokale maatregelen ter bescherming van de platen in de Oosterschelde. In [RWS-RIZA, 2006] wordt inzicht geboden in het beleid gericht op ecologisch herstel van de grote wateren in Nederland, waaronder de Oosterschelde.

3.1 Geselecteerde maatregelen

De door Rijkswaterstaat geselecteerde maatregelen zijn:

A Vullen en afdekken van de ontgrondingskuil aan zeezijde van de kering

In de loop der tijd zijn naast de bodemverdediging ter weerszijden van de kering ontgrondingskuilen ontstaan. De gedachte is dat de kuilen werken als een zandvang voor zand dat naar de kering wordt getransporteerd. Draait de stroming om van richting dan erodeert het zand weer en komt de kuil weer op diepte. Het resultaat is dat er nauwelijks zand door de kering gaat.

Dit denkbeeld wordt overigens niet gestaafd met metingen. Er zijn wel metingen naar de bodemligging uitgevoerd bij de rand van de stortstenen bodemverdediging, maar deze zijn uitgevoerd met een groot tijdsinterval en waren bedoeld om het moment van bijstorten van stenen te kunnen bepalen, indien nodig. Incidentele metingen van het stoftransport door de kering heen lijken er op te wijzen dat het zandtransport door de kering gering is. Vraag daarbij is: vormt de kering, met name de relatief hoge drempel, een blokkade voor zandtransport? En ook: bestaat er een voorkeursrichting voor het zandtransport, d.w.z. vindt er een netto transport van zand plaats richting Oosterschelde of juist richting zee?

Een mogelijke maatregel is: Vul de ontgrondingskuil aan *zeezijde* van de kering geheel of gedeeltelijk op, dek af en modelleer de afgedekte bodem zodanig dat vanaf de kering een geleidelijke vergroting van de waterdiepte ontstaat.

Verwacht effect: Benedenstrooms van de afgedekte kuil (aan zeezijde) treedt geen of slechts een beperkte erosie op. Het zandvangeffect verdwijnt en zand kan tot aan en door de kering worden getransporteerd. Ook neemt de hydraulische weerstand van de kering mogelijk iets af.

B Openen van de breukstenen dam aanzetten

De dam aanzetten tot aan de randpijlers in de drie sluitgaten zijn opgebouwd uit breuksteen. Wanneer de in totaal zes dam aanzetten worden 'geopend' neemt de doorstroomopening toe en daarmee ook de getijvolumestroom. De aanname is dat dit gunstig zou kunnen uitpakken voor wat betreft de zandaanvoer naar en de stroomsnelheid in de Oosterschelde.

C Glad maken van pijlers en dorpelbalken

Pijlers, maar met name de dorpelbalken met aansluitende drempel zijn niet erg gestroomlijnd. Sponningen en uitkragingen zouden kunnen worden aangevuld en koppen van pijlers afgerond. De stortstenen drempel zou kunnen worden opgehoogd tot net onder het niveau van de bovenzijde van de dorpelbalk. Dit alles met als doel om de hydraulische weerstand van de kering te verlagen. Met een lagere weerstand zou de getijvolumestroom kunnen toenemen, met opnieuw een mogelijk gunstige uitwerking op zandaanvoer naar en stroomsnelheid in de Oosterschelde.

D Verandering van het operationele gebruik van de kering

Geopperd is dat door het afsluiten of openen van delen van de kering gedurende bepaalde fasen van de getijcyclus een ander stromingspatroon kan worden gerealiseerd in de Oosterschelde, met als gevolg een ander zandtransportgedrag.

Te denken valt aan het dichtzetten van groepen van naast elkaar gelegen schuiven (bijv. randschuiven open, centrale schuiven tijdelijk dicht gedurende een periode met gunstige condities voor zandtransport, zoals flinke golven aan de kust), of aan het sluiten van delen van de kering bij vloed en sluiten van andere delen bij eb, met als gevolg kortsluitstromen, enz.

Al deze maatregelen hebben gemeen dat de doorstroomopening verkleint, en daarmee ook de getijvolumestroom en de getijslag op de Oosterschelde. De aanname is evenwel dat het verhoogde zandtransport gunstig is met het oog op de gewenste opvulling van de geulen, en dat op termijn de platen, met name in de monding van de Oosterschelde, hiervan zouden kunnen profiteren. In de tussentijd zouden de platen zo goed mogelijk kunnen worden beschermd.

3.2 Onderzoek naar effecten geselecteerde maatregelen

In deze studie worden de potentiële effecten van bovengenoemde maatregelen A t/m D op stroomsnelheid en zandtransport door de kering door middel van een quick scan nagegaan.

Basisvragen zijn:

1. Vormt de stormvloedkering, met name de hoge drempel met dorpelbalk, een blokkade voor zandtransport naar de Oosterschelde? Werken ontgrondingskuilen ter weerszijden van de kering als zandvang, die bij omdraaien van het getij weer geledigd worden? Is er niettemin een netto transport naar één richting mogelijk gedurende een lange reeks van jaren? Is door geheel of gedeeltelijk opvullen, afdekken en modelleren van de ontgrondingskuil aan *zeezijde* een substantieel netto zandtransport naar en ook door de kering heen te realiseren richting Oosterschelde?
2. In welke mate neemt de hydraulische weerstand van de kering af wanneer pijlers en drempels met dorrels beter worden gestroomlijnd? Kunnen de breukstenen dam-aanzetten worden 'geopend' ter verkrijging van een grotere doorstroomopening?
3. Leidt een vergroting van de effectieve doorstroomopening en / of een verlaging van de hydraulische weerstand van de kering tot een relevante vergroting van de getijvolumestroom in / uit de Oosterschelde, tot de gewenste hogere stroomsnelheid in de Oosterschelde, en tot een substantieel netto zandtransport naar de Oosterschelde? Kan door manipulatie met schuiven van de kering in de drie hoofdgeulen een verandering van stroombeelden en circulaties worden verkregen die leidt tot een netto zandtransport naar de Oosterschelde en op termijn gunstig is voor de plaatvorming in met name het westelijke deel van de Oosterschelde?

De quick scan beantwoordt bovenstaande vragen, voor zover mogelijk, met gebruikmaking van de kennis die bij WL | Delft Hydraulics beschikbaar is en / of met gebruikmaking van gegevens in RWS-rapporten en andere literatuur.

Voor vragen of delen van vragen die niet door middel van de quick scan kunnen worden beantwoord, wordt een plan van aanpak voor nader onderzoek naar het effect van de maatregel gepresenteerd.

Het plan van aanpak richt zich met name op de vragen: (i) hoe het potentiële effect van de maatregel kan worden onderzocht (door middel van veldmetingen, monitoring van veranderingen na proefuitvoering van een maatregel, numerieke simulaties, schaalmodelonderzoek, en / of nadere bureaustudies), (ii) wat daarvoor nodig is (in termen van onderzoeksfaciliteiten, meetvoorzieningen, numerieke modellen), (iii) hoe de uitvoering van het onderzoek kan plaats vinden en (iv) wat globaal de kosten van het onderzoek zijn.

3.3 Schatting van kosten van uitvoering van maatregelen

In overleg met vertegenwoordigers van RWS (zie Hoofdstuk 1) zijn de kosten van uitvoering van de maatregelen afgeschat (prijspeil 2007, exclusief btw). De kosten worden bij de behandeling van de verschillende maatregelen in Hoofdstuk 4 aangegeven. Ter vergelijking worden hier de kosten van suppletie zand genoemd. Het gaat daarbij om de hoeveelheid zand, die nodig is om de zandhonger van de Oosterschelde te stillen. De kosten van aanvoer van zand uit de voordelta via persleidingen naar de Oosterschelde worden geraamd op 3 à 6 euro per m³. Bij een totale benodigde aanvoer van 400.10⁶ à 600.10⁶ m³ zand bedragen de kosten van zandsuppletie dus € 1,2.10⁹ à € 3,6.10⁹.

4 Basisvragen

In dit hoofdstuk worden de basisvragen, zoals geformuleerd in Paragraaf 3.2, nader geanalyseerd en wordt een plan van aanpak voor verdere uitwerking voorgesteld.

4.1 Basisvraag I

Basisvraag 1 bestaat uit de volgende componenten:

1. *Vormt de stormvloedkering, met name de hoge drempel met dorpelbalk, een blokkade voor zandtransport naar de Oosterschelde?*
2. *Werken ontgrondingskuilen ter weerszijden van de kering als zandvang, die bij omdraaien van het getij weer geledigd worden? Is er niettemin een netto transport naar één richting mogelijk gedurende een lange reeks van jaren?*
3. *Is door geheel of gedeeltelijk opvullen, afdekken en modelleren van de ontgrondingskuil aan zeezijde een substantieel netto zandtransport naar en ook door de kering heen te realiseren richting Oosterschelde?*

4.1.1 Analyse

Vraag I:

Vormt de stormvloedkering, met name de hoge drempel met dorpelbalk, een blokkade voor zandtransport naar de Oosterschelde?

De vraag zou betrekkelijk eenvoudig te beantwoorden zijn als er met enige regelmaat en op verschillende locaties gemeten zou worden aan het zandtransport door de kering heen. Dit is echter niet het geval.

Wel zijn er in het verleden, in de periode oktober 1988 – maart 1990, nu en dan metingen uitgevoerd met het zogenaamde HISMIL meetstation [Ten Brinke, 1990]. Dit meetstation was ingericht in de doorstroomopening Roompot 22 (R22; dorpelbalkligging NAP -9,5 m). Metingen zijn zowel bij rustig weer als bij storm uitgevoerd. Bij de metingen werd op vier verschillende hoogtes boven de dorpelbalk water afgezogen; naderhand werd van de genomen watermonsters de hoeveelheid droge stof vastgesteld en werden de slib- en zandfracties bepaald.

In de periode februari – juli 1988 is bovendien bij rustig weer (wat betreft golven) vanaf schepen met AZTM het zandtransport gemeten op verschillende hoogtes boven de bodem; de metingen vonden plaats in raaien parallel aan en op ca. 500 m afstand van de kering (dit is bij de rand van de bodemverdediging).

Enkele conclusies uit [Ten Brinke, 1990]:

Dieptegemiddelde zandconcentraties op afstand van de kering waren in de meetperiode februari – juli 1988 bij rustig weer tamelijk laag (tot 25 mg/l bij vloed, zeezijde, en tot 10 mg/l bij eb, Oosterscheldezijde). Hogere concentraties bij vloed deden zich, aan zeezijde, voor in het zuidelijke deel van de Roompot en bij de randen van de geulen Hammen en Schaar. Bij eb was de ruimtelijke variatie van de zandconcentratie, aan Oosterscheldezijde, gering. Hogere waarden werden bij eb aan de randen van de Hammen gemeten. Lokale stroomsnelheden worden in [Ten Brinke, 1990] niet gerapporteerd (waarschijnlijk zijn ze niet gemeten). Algemene conclusie was voorts dat de zandconcentraties lager waren dan vóór de afsluiting van de Oosterschelde (in [Ten Brinke, 1990] wordt vergeleken met een meting die in 1981 werd uitgevoerd in het tracé van de kering in Hammen en Schaar van Roggenplaat).

Uit de metingen met HISMIL bleek dat de zandconcentraties in R22 bij vloed lager waren dan de geulgemiddelde zandconcentraties; bij eb was het verschil gering. De HISMIL metingen lieten voorts zien dat de zandconcentraties in R22 bij springtij en storm aanzienlijk hoger waren dan bij gemiddelde omstandigheden. Bij de HISMIL metingen werd ook de slibfractie ($d < 50 \mu\text{m}$) vastgesteld. Steeds was de slibconcentratie aanzienlijk hoger dan de zandconcentratie. De stroomsnelheden in R22 varieerden bij de HISMIL metingen globaal tussen 2,5 m/s en 4,5 m/s.

Op basis van de metingen kon niet worden vastgesteld of er voor het Oosterscheldebekken sprake was van zandimport of zandexport. In het rapport wordt aangegeven dat er bij *storm* waarschijnlijk sprake was van zandimport (maar zeker was dat niet).

De metingen lijken er op te wijzen dat de morfologische activiteit in de betreffende periode, bij rustig weer, niet erg groot was. De locatie van HISMIL in R22 lijkt achteraf ook niet de meest gelukkige keuze te zijn geweest, omdat de zandconcentratie in de toestroming naar R22 (vloed) lager was dan de geulgemiddelde zandconcentratie. Langs de randen van de geulen waren de zandconcentraties als regel hoger. Het totale zandtransport door de kering heen zal bij vloed daarom hoger kunnen zijn dan wordt berekend uit een lineaire extrapolatie van de HISMIL metingen. In [Ten Brinke, 1990] wordt ook als verwachting uitgesproken dat het zandtransport door de kering de komende decennia (vanaf 1990) zal veranderen onder invloed van morfologische veranderingen die zich in de voordelta en in de Oosterschelde zullen voltrekken, zij het niet erg snel gezien de tijdschaal waarop morfologische veranderingen plaats vinden.

De metingen tonen *niet* aan dat de kering een blokkade vormt voor zandtransport. Dit is in lijn met de ervaringen bij water intakes aan morfologisch actieve rivieren. Zelfs wanneer de intake wordt voorzien van een hoge drempel, wordt er veel zand over de drempel meegenomen, hetgeen tot grote verzandingsproblemen in het aftakkende kanaal kan leiden. Met name doet het probleem van een ongewenste zandinname zich voor bij intakes die bovenstrooms van een stuw zijn gesitueerd. De afvoer via de stuw is beperkt en een flink deel van de stroming is dominant naar de intake gericht. De praktijk laat zien dat een versnellende, opwaartse stroming naar een intake zeer goed in staat is om zand mee te voeren.

In schaalmodellen is onderzoek verricht naar de mogelijkheden om het water bij de bodem, met hoogste zandconcentratie, van de intake af te buigen. Het water dicht bij het wateroppervlak, met lagere zandconcentratie, mag daarbij vrij naar de intake stromen.

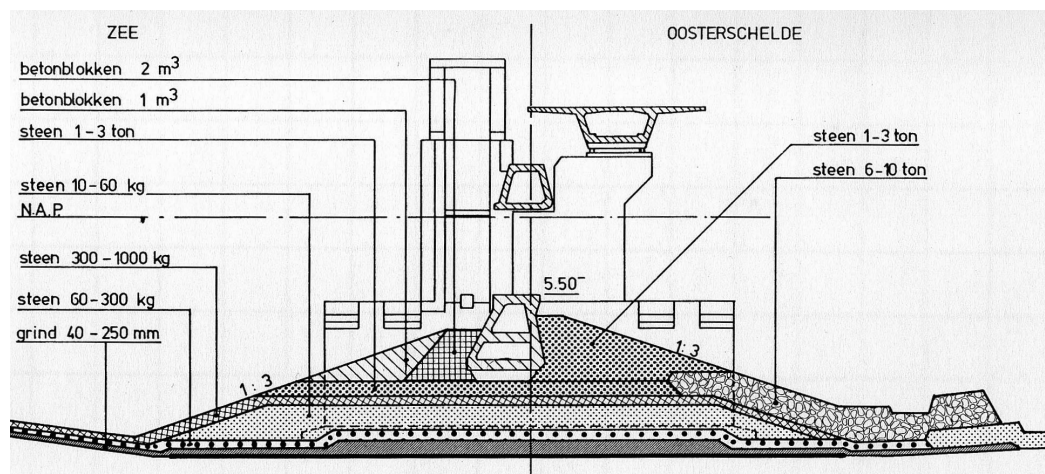
Dit afbuigen van sedimentrijk water wordt met meer of minder succes gerealiseerd door middel van bijvoorbeeld geleideschermen op de bodem of, bij stuwen, door middel van tunnelexcluders. Dergelijke constructies worden in de praktijk ook toegepast.

Specifiek onderzoek gericht op transport van zand over een drempel of een overlaat is overigens slechts weinig uitgevoerd. Recent is door Lauchlan bij de TUD een experimenteel onderzoek verricht naar het transport van zand over een tweetal onderwaterconstructies, die dwars op de stroming waren geplaatst [Lauchlan, 2001]. Het betrof hier een lage verticale wand en een onderwaterdrempel (met taluds 1:4 en smalle kruin). De experimenten werden uitgevoerd in een stroomgoot, die was voorzien van een 0,1 m dik zandbed; tijdens de proeven werd continu zand toegevoegd aan het instromende water.

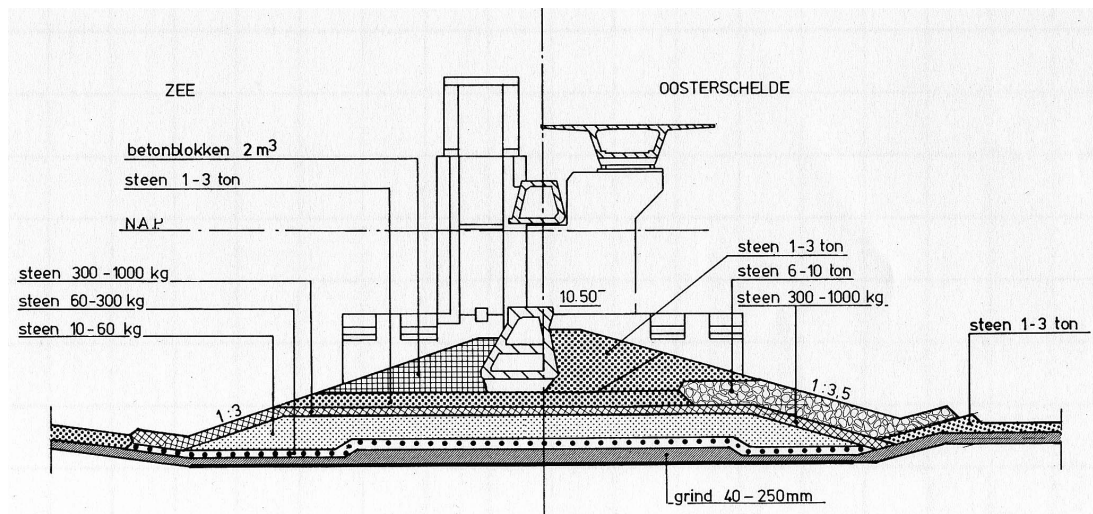
De verticale wand stak initieel 0,1 m boven het zandpakket uit; de waterdiepte bovenstrooms werd gevarieerd tussen 0,26 m en 0,41 m en de stroomsnelheid tussen 0,43 m/s en 0,57 m/s. Bij de verticale wand ontstond direct voor de wand een erosiekuil; direct achter de wand werd zand afgezet. De wand bleek geen belemmering te zijn voor transport van zand over de wand heen (bodemtransport en gesuspendeerd transport).

De kruin van de drempel stak initieel 0,1 m boven het zandpakket uit; de waterdiepte bovenstrooms werd op ca. 0,35 m gehouden, terwijl de stroomsnelheid werd gevarieerd tussen 0,22 m/s en 0,47 m/s. Bij de proeven met de drempel (taluds 1:4) verplaatsten ribbels zich tot op het bovenstroomse talud, maar daar werd het zand door de versnellende stroming snel opgenomen en tot over de kruin van de drempel gevoerd. Naarmate de stroomsnelheid werd gereduceerd konden de ribbels hoger het talud oplopen. Op het benedenstroomse talud werd zand afgezet. De drempel bleek geen enkele belemmering te vormen voor het transport van zand over de drempel heen (bodemtransport en gesuspendeerd transport).

De drempel van de stormvloedkering Oosterschelde heeft een geometrische gelijkenis met de drempel in het onderzoek van [Lauchlan, 2001]. De taluds zijn evenwel wat steiler (1:3 à 1:3,5) en de waterdiepte-drempelhoogte verhouding is kleiner, zie onderstaande Figuur 4-1 met karakteristieke doorsnede over de drempel van Schaar 4, in ontgraving, en Figuur 4-2 met karakteristieke doorsnede over de drempel van Roompot 12, in ophoging (n.b.: voor een overzicht van ontgraving en ophoging zie Figuur 2-5). De stortstenen drempel is niet waterdicht; onder de dorpelbalken bevindt zich een holle ruimte. Een belangrijk verschil met het onderzoek van Lauchlan is overigens dat de stroming door de kering bij eb en vloed van richting omdraait.



Figuur 4-1 Drempel ter plaatse van Schaar 4 (bron: [RWS-1])



Figuur 4-2 Drempel ter plaatse van Roompot 12 (bron: [RWS-1])

Het is niet aannemelijk dat de relatief hoge drempel met dorpelbalk een blokkade vormt voor het zandtransport. Zand dat tot aan de voet van de drempel kan doordringen wordt naar verwachting door de versnellende stroming opgenomen en in suspensie door de kering heen getransporteerd, dit gelet ook op de resultaten van het onderzoek van [Lauchlan, 2001] en de ervaringen met intakes. Dit proces wordt nog versterkt door de productie van turbulentie op de ruwe drempel en onderdelen van de kering. Het slib en zand dat al in suspensie naar de kering wordt vervoerd, zal geen belemmering van de kering ondervinden.

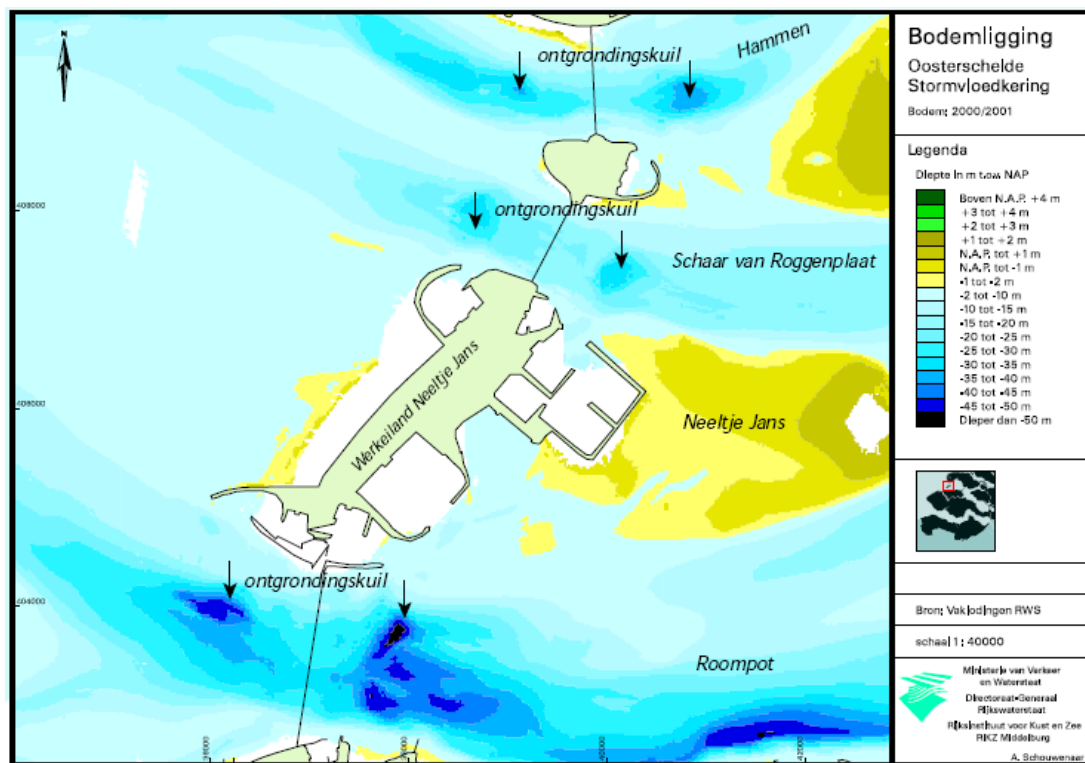
De vraag is nu vooral of zand, dat zich over of dicht boven de bodem verplaatst, in een flinke hoeveelheid voorbij de ontgrondingskuilen tot aan de kering kan doordringen bij de wisselende getijstromingen. En, als dit zo is, of er vanaf de zeezijde meer zand naar en vervolgens door de kering heen wordt getransporteerd dan terug vanaf de Oosterscheldezijde (ofwel: is er een voorkeursrichting voor het zandtransport?). Op deze vragen wordt hieronder ingegaan. Als uitgangspunt wordt gehanteerd dat er zowel in de voordelta als in het Oosterscheldebekken voldoende zand beschikbaar is voor transport.

Vraag 2:

Werken ontgrondingskuilen ter weerszijden van de kering als zandvang, die bij omdraaien van het getij weer geleidigd worden? Is er niettemin een netto transport naar één richting mogelijk gedurende een lange reeks van jaren?

Kijken we allereerst naar het bestaan van ontgrondingskuilen. Onderstaande Figuur 4-3 afkomstig uit [RWS-RIKZ, 2004] toont de bodemligging van de Oosterschelde in de directe omgeving van de stormvloedkering. Uit de figuur blijkt dat er ter weerszijden van de kering, naast de bodembescherming, diepe delen te vinden zijn in de drie hoofdstroomgeulen Hammen, Schaar van Roggenplaat en Roompot. Met name in de Roompot, en dan vooral aan de Oosterscheldezijde van de kering, zijn diepe putten te zien. Op een enkele plaats bedraagt de diepte ten opzichte van de NAP-lijn ca. 50 m.

Vergelijken we deze bodem-ligging met de bodemligging vóór de bouw van de kering (zie Figuur 2-4), dan lijkt het er inderdaad op dat de bodem zich heeft verdiept, met name aan de Oosterscheldezijde van de kering.



Figuur 4-3 Dieptekaart Oosterschelde 2001 nabij stormvloedkering (bron: [RWS-RIKZ, 2004])

De benodigde lengte van de bodemverdediging is destijds door middel van schaalmodelonderzoek bepaald. Uitgangspunt was dat de ontgrondingskuil niet dieper dan 25 m (t.o.v. de bodem) mocht worden na een periode van 10 jaar, dit om te voorkomen dat afschuiven van grond tot aan de kering zou kunnen plaats vinden. Deze diepte lijkt, kijkend naar Figuur 4-3, nu nog niet te zijn gehaald. In de onderzoeksfase was de verwachting dat de ontgrondingskuilen een diepte groter dan ca. 15 m niet zouden overschrijden.

De ontgrondingskuil benedenstrooms van de bodemverdediging ontstaat doordat turbulentiëniveau en stroomsnelheid na passage van de kering nog hoog zijn. Na verloop van tijd ontstaat een situatie waarbij de kuil niet veel dieper meer wordt. Er is een evenwicht bereikt tussen erosie (die afneemt bij het dieper worden van de kuil) en sedimentatie (de zandvangwerking neemt toe bij het dieper worden).

Beschouwen we nu meer in detail een ontgrondingskuil. De vraag is: waar gaat het zand dat wordt geërodeerd naar toe en waar komt het ingevangen zand vandaan? Het meest waarschijnlijk is dat het grootste deel van het geërodeerde zand met de stroming mee van de kering wordt afgevoerd en dat slechts een klein deel bij tegengestelde stroming door de kering heen wordt getransporteerd. Iets soortgelijks geldt voor aanzanding: waarschijnlijk wordt slechts een klein deel van het aangezande materiaal door de kering heen naar de kuil aangevoerd en wordt het grootste deel bij tegengestelde stroming vanuit de stroomgeul richting kering getransporteerd en in de kuil achtergelaten.

Sedimentatie treedt in het laatste geval op doordat de stroomsnelheid in de geleidelijk dieper wordende kuil afneemt, terwijl het turbulentioniveau relatief laag blijft; daarmee neemt ook de transportcapaciteit van de stroming af. Bij dit proces schuift er aan beide kanten van de kering dus steeds een hoeveelheid zand de kuil in, die er bij tegengestelde stroming weer uit gaat. De hoeveelheid zand die door de kering gaat is gering. Voorwaarde voor aan- en afvoer van zand is dat de stroomsnelheid in de stroomgeulen groter is dan ca. 0,4 m/s (voor bodemtransport) à 0,6 m/s (voor suspensietransport). Aan deze voorwaarde wordt tijdens grote delen van de getijcyclus voldaan.

Het denkbeeld dat de ontgrondingskuil als zandvang werkt lijkt dan ook op te kunnen gaan. De stromingscondities in lengterichting van de kering gezien zijn evenwel niet overal hetzelfde en ook is de ontgrondingskuil niet overal even diep (bij de randen van de stroomgeulen is de ontgrondingskuil ondieper). Het is daarom aannemelijk dat de condities voor zandtransport door de kering heen locatie-afhankelijk zijn.

Bij het bovenbeschreven proces zou bij zuiver spiegel-symmetrische getijstromingscondities een netto transport door de kering heen gelijk aan nul kunnen ontstaan. Geometrisch gezien bestaat er evenwel geen spiegel-symmetrie: het geulen en platenpatroon ter weerszijden van de kering is niet gelijk en ook de detailgeometrie van drempel, schuif, balken en pijlers is asymmetrisch. Voorts vertonen de vloed- en ebstromingen in de voordelta grote verschillen wat betreft richting en fase, reden ook waarom de maxima van de vloeddebieten door de kering heen als regel wat hoger zijn dan de maxima van de ebdebieten (dit kan er de oorzaak van zijn dat de ontgrondingskuil aan Oosterscheldezijde dieper is). Het grotere maximum van het vloeddebiet zou tot gevolg kunnen hebben dat er per saldo meer zand naar binnen gaat dan naar buiten, maar gezien [Ten Brinke, 1990] is dit vooralsnog zeer speculatief. Van invloed is voorts dat de golfcondities aan zeezijde van de kering in geval van storm zwaarder zijn; bij storm wordt meer zand opgewerveld en dit zou kunnen resulteren in een deels opvullen van de ontgrondingskuilen aan zeezijde en een tijdelijk netto zandtransport naar de Oosterschelde.

Van groot belang is voorts dat het stroombeeld aan zeezijde bij toestroming naar de kering sterk verschilt van het stroombeeld bij afstroming bij omgekeerd getij, met name nabij de kusten. Dit zou er de oorzaak van kunnen zijn dat er langs de randen van de geulen een netto hoeveelheid zand door de kering de Oosterschelde in wordt gevoerd. Ter verduidelijking beschouwen we onderstaande overzichtsfoto van de kering (Figuur 4-4 vloedcondities). We zien dat zich langs de zee-kusten van Schouwen en Noord Beveland stranden ontwikkeld hebben die tot aan de damaanzetten doorlopen (vergelijk ook met de eerdere overzichtsfoto, Figuur 2-2). De toestroming naar de kering volgt de onderwatertaluds van de stranden en het is waarschijnlijk dat hierbij zand wordt meegevoerd, door de kering heen. Mogelijk zet dit zand zich langs de oevers benedenstrooms van de kering af. Het feit dat aanzanding optreedt vanaf de Jacobahaven (naast de damaanzet) in oostwaartse richting langs de Noord-Bevelandse oever van de Oosterschelde (zie Figuur 4-4) is inderdaad een aanwijzing dat zand langs de zuidelijke rand van de Roompot de Oosterschelde wordt ingevoerd. In de zomer van 2006 werd geconstateerd dat het strandje naast de Jacobahaven aangroeide, maar in december van dat jaar was een flink deel van het zand weer verdwenen. Mogelijk is het zand door golfwerking afgeslagen en verder de Oosterschelde in getransporteerd (naar een strandje verder oostwaarts of naar diepere delen van de Oosterschelde).

Bij eb is de afstroming (aan zeezijde) niet langs de oevers gericht, maar blijft op afstand en concentreert zich in de stroomgeul (zie Figuur 4-6), vergelijkbaar met de afstroming aan Oosterscheldezijde bij vloed (Figuur 4-4). Langs de stranden en achter Roggenplaat en Neeltje Jans plaat ontstaan hierbij grootschalige neren en hier wordt mogelijk zand ingevangen. De ontwikkeling van het strand bij de damaanzet Noord-Beveland, vergelijk de situatie in 1993 met de situatie in 2005, Figuur 4-5, wijst hier op. Niet duidelijk is echter of de stranduitbreiding mede het resultaat is van kunstmatige zandsuppleties.



Figuur 4-4 Stormvloedkering gezien vanuit de lucht; vloedcondities (bron: Google Earth, 2006)



Figuur 4-5 Damaanzet Noord-Beveland; links situatie in 1993, rechts situatie in 2005 (bron: RWS-RIKZ)

Er bestaat dus een duidelijke asymmetrie tussen toestroming en afstroming, die waarschijnlijk significante effecten heeft op het zandtransport door de kering heen, met name langs de randen van de geulen. Dat wil overigens nog niet zeggen dat er een netto zandtransport naar de Oosterschelde plaats vindt, omdat het stroombeeld-gekoppelde transportmechanisme langs de geulranden zowel richting Oosterschelde als richting zee kan optreden (het laatste mits toestroomsnelheden naar de kering aan Oosterscheldezijde, langs de randen van de geulen, voldoende hoog zijn).

Een alternatieve manier om vast te stellen of zand naar de Oosterschelde wordt getransporteerd is het opstellen van een zandbalans. Wanneer voldoende gedetailleerde topografische gegevens met tussenpozen van meerdere jaren beschikbaar zijn van het Oosterscheldebekken, kan aan de hand van verschillen in topografie worden vastgesteld of er zand uit het bekken verloren gaat of juist wordt toegevoerd. Dit is de methode die in [Oosterlaan & Zagers, 1996] gevolgd is. De auteurs hebben topografische gegevens van het Oosterscheldebekken bestudeerd, die door middel van bodemlodingen in de periode 1989 – 1995 waren verkregen. Uit hun analyse volgt een import van $0,7 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{jaar}$ voor de beschouwde periode, hetgeen overeen komt met een algehele bodemverandering van minder dan 2 mm/jaar. Deze hoeveelheid is zo gering dat ze valt binnen de nauwkeurigheidsmarges van de toegepaste meet- en analysemethode.



Figuur 4-6 Stormvloedkering gezien vanuit de lucht; ebcondities 8 nov. 2005 (bron: RWS-RIKZ)

Alles overziend lijkt het aannemelijk dat een netto zandtransport door de kering gelijk aan nul zich niet voordoet, en dat er per saldo zand, waarschijnlijk in geringe hoeveelheid, naar de Oosterschelde wordt getransporteerd, mogelijk voornamelijk langs de randen van de stroomgeulen.

Zonder het werkelijk optredende proces precies te kennen, zoals bijvoorbeeld het effect van de ontgrondingskuilen op het zandtransport, kan evenwel geen betrouwbare uitspraak worden gedaan over de grootte en de richting van het zandtransport door de kering heen. Metingen in situ ter plaatse van de kering zijn daarom nodig om hier duidelijkheid over te verkrijgen.

Vraag 3:

Is door geheel of gedeeltelijk opvullen, afdekken en modelleren van de ontgrondingskuil aan zeezijde een substantieel netto zandtransport naar en ook door de kering heen te realiseren richting Oosterschelde?

Vooralsnog is niet duidelijk of er zandtransport plaats vindt door de kering heen, in welke hoeveelheid en naar welke richting. Het denkbeeld dat de ontgrondingskuilen ter weerszijden van de kering werken als zandvang lijkt wel op te kunnen gaan. Om netto zandtransport naar de Oosterschelde te bevorderen zouden (delen van) de kuilen aan *zeezijde* daarom kunnen worden opgevuld en afgedekt. Bij volledig opvullen gaat het om een omvangrijk gebied, zie Figuur 4-3, met een oppervlak van dezelfde grootteorde als het oppervlak van de huidige bodemverdediging (die over een breedte van 550 m à 650 m vanaf het hart van de kering langs de gehele kering is aangelegd).

De maatregel zou gefaseerd kunnen worden uitgevoerd, te beginnen met een proeflocatie in de Roompot, en dan met name gericht op de zuidzijde van de ontgrondingskuil, omdat langs de zuidelijke geulrand mogelijk op dit moment al zand naar de Oosterschelde wordt getransporteerd. Het effect dient bij uitvoering continu door middel van metingen te worden gevolgd.

Vanwege de hoge kosten van deze maatregel (zie kostenraming onder Paragraaf 4.1.3) bevelen we aan om eerst inzicht te krijgen in de werkelijk optredende processen. Door uitvoering van een gericht onderzoeksprogramma, zoals hieronder aangegeven, kan ook een beter onderbouwde keuze worden gemaakt voor een te realiseren proeflocatie.

4.1.2 Plan van aanpak voor nader onderzoek

Uit het voorgaande blijkt het volgende:

- Stroomsnelheden in de geulen van en naar de kering zijn gedurende delen van de getijcyclus voldoende hoog om zand in beweging te brengen.
- De kering zelf vormt hoogst waarschijnlijk geen belemmering voor transport van zand door de kering heen.
- Het denkbeeld dat ontgrondingskuilen naast de bodemverdediging ter weerszijden van de kering werken als zandvang lijkt realistisch.
- Onduidelijk is of er in de huidige situatie in substantiële mate zand door de kering heen wordt getransporteerd. Het lijkt aannemelijk dat er per saldo zand naar de Oosterschelde wordt gevoerd, waarschijnlijk alleen in kleine hoeveelheid, en mogelijk voornamelijk langs de randen van de stroomgeulen.

- Vooropgesteld dat het denkbeeld van de zandvangwerking van ontgrondingskuilen correct is, kan het opvullen en afdekken van (delen van) de ontgrondingskuil aan zeezijde een realistische maatregel zijn om het zandtransport richting Oosterschelde te bevorderen. Echter, zonder het werkelijk optredende zandtransportproces ter plaatse van de kering te kennen lijkt het vooralsnog te vroeg om grootschalige uitvoering aan deze maatregel te geven.

Allereerst is dus nodig dat inzicht wordt verkregen in de huidige situatie voor wat betreft het zandtransport door de kering heen; dit inzicht ontbreekt op dit moment. We stellen daarom het volgende voor:

1. Analyseer alle reeds beschikbare gegevens:
 - a) metingen van de stroomsnelheid in de geulen
 - b) metingen van het verval over de kering en de getijslag op de Oosterschelde
 - c) metingen aan het zandtransport in de omgeving van de kering als functie van stroom- en golfcondities
 - d) metingen naar (veranderingen in) de topografie van het Oosterscheldebekken en de voordelta
 - e) reeds bestaande analyses en rapportages aangaande deze problematiek
2. Voer aanvullende in-situ metingen naar het zandtransport uit, maak ondersteunende numerieke simulaties en stel de huidige zandtransportsituatie voor de kering vast.
3. Beoordeel of het opvullen en afdekken van (een deel van) de erosiekuil aan zeezijde er toe kan leiden dat een netto zandtransport naar de Oosterschelde ontstaat van significante grootte. Zo ja, stel een proeflocatie vast voor het uitvoeren van deze maatregel en beoordeel aan de hand van metingen of de maatregel voldoende effectief is.

Ad 1

De analyse van de beschikbare gegevens en rapporten kan, mits deze gegevens toegankelijk zijn, zonder verdere voorbereidende stappen worden uitgevoerd. Aan de hand van de meest recente topografische gegevens kan reeds een nadere analyse van de morfologische veranderingen in voordelta en Oosterscheldebekken worden gemaakt voor een reeks aan jaren. Wanneer de topografische gegevens voldoende nauwkeurig zijn, kan wellicht ook een betere en meer recente inschatting worden gemaakt van verlies of winst aan zand in de Oosterschelde.

De kosten van deze analyse zijn afhankelijk van de hoeveelheid gegevens, en zullen ruwweg tussen € 30.000,- en € 60.000,- (exclusief btw) liggen.

Ad 2

Voorgesteld wordt om in-situ metingen uit te voeren nabij de kering naar bodemligging, stroomsnelheid en zandtransport bij verschillende getij- en golfcondities. Tevens om zandtransportmetingen op verschillende locaties in de kering zelf uit te voeren.

Voor het uitvoeren van de in-situ metingen worden de volgende werkzaamheden voorzien:

- Opstellen van een plan voor meting van relevante fysische verschijnselen, rekening houdend ook met de resultaten van de analyse van de reeds beschikbare gegevens en rapporten. Als ondersteuning bij de voorbereiding van het plan zullen globale numerieke simulaties kunnen worden gemaakt van getijstromingen en zandtransport in het gebied.

- Opstellen van een meetplan waarin aangegeven wordt welke grootheden waar, en in welke volgorde gemeten dienen te worden, welke meetinstrumenten daar voor nodig zijn, en bij welke hydraulische condities de metingen dienen te worden uitgevoerd.
- Voorbereiden en uitvoeren van de metingen en analyseren van de meetresultaten.

Voor de in-situ metingen denken we aan een gefaseerde opzet. De metingen moeten zorgvuldig worden opgezet en voorbereid en er moet zoveel mogelijk ook geleerd worden van voorafgaande metingen. Bij voorkeur zal daarom begonnen moeten worden met verkennende metingen, waarbij op een klein aantal representatieve locaties in een ontgrondingskuil aan zeezijde, zowel in het midden als langs de geulranden, gedurende een langere periode de verandering van de bodemligging wordt gemonitord (vanaf een vaste opstelling op de bodem). Wanneer uit deze metingen blijkt dat er een correlatie is tussen bodemligging en getijbeweging, is het aannemelijk dat de ontgrondingskuil inderdaad werkt als zandvang. De verkennende metingen kunnen ook al vrij snel antwoord geven op de vraag of er in de huidige situatie vooral zand langs de randen van de geulen wordt getransporteerd.

Vervolgens kan worden besloten om op meer uitgebreide schaal gedetailleerde metingen uit te voeren in raaien loodrecht op de kering, zowel in het midden als bij de randen van de geulen, om inzicht te krijgen in de omvang en richting van de zandverplaatsingen. Deze metingen kunnen bijvoorbeeld worden verricht vanaf een verplaatsbaar platform op de bodem van de geul, dat achtereenvolgens gedurende enige dagen op nader te kiezen locaties wordt neergezet, en dat voorzien wordt van instrumenten om simultaan zandtransport (AZTM), stroomsnelheid (EMF) en bodemligging (echolood) te meten. RWS heeft een dergelijk platform (het wordt door WL | Delft Hydraulics onderhouden). Wanneer één stroomgeul (van de drie geulen Roompot, Schaar en Hammen) op deze wijze is doorgemeten en de meetgegevens zijn geanalyseerd, kan worden besloten om ook de twee andere stroomgeulen door te meten. Speciale aandacht vereisen stormsituaties, omdat het zandtransport bij storm aanzienlijk hoger kan zijn.

Als afzonderlijke actie dient het zandtransport door de kering te worden gemeten bij verschillende getijcondities en ook bij stormomstandigheden. Hierbij kan gewerkt worden met een afzuigstelsel (als bij HISMIL) of met een AZTM die vanaf de bovenbalk of de verkeersweg wordt neergelaten. Omdat op verschillende locaties in de kering moet worden gemeten, en bij voorkeur ook op verschillende plaatsen in de verticaal, dient het meetstelsel verplaatsbaar te zijn.

De in-situ metingen kunnen bijvoorbeeld samen door RWS en WL | Delft Hydraulics worden uitgevoerd. De kosten van het uitvoeren van de metingen hangen sterk samen met de uitgebreidheid en duur van de metingen. Er van uitgaande dat RWS logistieke ondersteuning geeft in de vorm van bijvoorbeeld schepen met bemanning e.d. worden de overige kosten voor voorbereiding van meetsystemen, uitvoering van de metingen en analyse van de meetresultaten globaal geraamd op een bedrag tussen € 50.000,- en € 250.000,- (exclusief btw).

Ad 3

Wanneer de bij de kering optredende fysische verschijnselen in detail zijn vastgesteld en de huidige zandtransportsituatie in kaart is gebracht, kan een beoordeling worden gemaakt van het effect van opvullen en afdekken van (een deel van) de ontgrondingskuil aan zeezijde. Deze maatregel kan zonodig ook worden aangevuld met flankerende, ondersteunende maatregelen (bijvoorbeeld in de sfeer van stroomlijning van de kering, zie hierna).

Om het potentiële effect van opvullen en afdekken vooraf te kunnen inschatten is principe-onderzoek door middel van numerieke simulaties (met ondersteuning van metingen in een eenvoudig schaalmodel) gewenst. Beproeving van de maatregel op een nader te selecteren testlocatie bij de kering is een alternatief, maar dit is uiteraard kostbaar, en lijkt voorshands niet als eerste stap in aanmerking te komen.

Principe-onderzoek door middel van numerieke simulaties dient zich ondermeer te richten op de vragen:

- tot welke afstand uit de kering moet de ontgrondingskuil worden afgedekt;
- tot hoe ver moet de kuil worden opgevuld om het gewenste effect te realiseren;
- hoe sterk spelen drie-dimensionale stromingseffecten een rol;
- kan de maatregel beperkt blijven tot de randen van de geulen?

Omdat de berekening van lokale morfologische veranderingen, dit wil zeggen de berekening van stroming, turbulentie, sedimentatie en erosie in ontgrondingskuilen, in de huidige numerieke modellen nog beperkingen kent, is het waarschijnlijk nodig om de rekenresultaten met behulp van metingen in een eenvoudig schaalmodel (opstelling in een brede stroomgoot; model met beweegbare bodem) te controleren. De rekenmethodiek kan dan zonodig worden bijgesteld alvorens voor andere configuraties en / of stromingssituaties numerieke berekeningen worden gemaakt.

Mogelijk kan bij dit detail-morfologische onderzoek gebruik worden gemaakt van de resultaten van vroegere schaalmodelonderzoeken, bijvoorbeeld [M1001-1, 1986]. De kosten van een dergelijk principe-onderzoek bedragen afhankelijk ook van de uitgebreidheid van ondersteunend schaalmodelonderzoek € 150.000,- à € 300.000,- (exclusief btw).

Wanneer vervolgens een proeflocatie bij de kering wordt ingericht dient het effect van het opvullen en afdekken van de ontgrondingskuil systematisch te worden gemonitord en geanalyseerd, alvorens tot verdere toepassing kan worden besloten. Te zijner tijd dient daartoe een adequaat monitoring-programma te worden opgesteld. Met name dient aandacht te worden besteed aan het effect van golven op het zandtransport door de kering.

Wanneer de proeflocatie bij de rand van de geul wordt ingericht (dit is vooralsnog het meest voor de hand liggend) zou bij zware golfcondities ook het effect van sluiten van de centrale schuiven van de kering en het open laten van de randschuiven op het zandtransport door de kering kunnen worden nagegaan (zie ook Paragraaf 4.3.1).

4.1.3 Kosten van uitvoering van de maatregel

De kosten van (gedeeltelijk) opvullen en afdekken van de ontgrondingskuil aan zeezijde van de kering zijn afhankelijk van de methode die wordt toegepast. Wanneer gewerkt wordt met geocontainers (grote kunststof zakken gevuld met zand) bedragen de kosten ca. 15 à 25 euro per m³. Bescherming met bijvoorbeeld stortsteen is dan niet meer nodig.

Wanneer de kuil wordt gevuld met zand dat via persleidingen wordt aangevoerd, dan bedragen de kosten 3 à 6 euro per m³. Het zand dient dan nog afgedekt te worden, bijvoorbeeld met een laag stortsteen met een laagdikte van 0,5 m (0,5 m³ steen per m² = 1 ton / m²). De kosten van stortsteen inclusief aanbrengen bedragen ca. 30 euro / ton.

Wanneer – als bovengrens voor de kostenschatting – het gehele gebied met ontgrondingskuilen zou worden opgevuld (we gaan uit van een strook van 500 m breedte langs de gehele zeezijde van de kering met lengte ca. 2800 m, gemiddelde opvuldtepte 3 m, vulvolume ca. 4.10⁶ m³) dan vinden we de volgende kosten:

Geocontainers: (€ 15,- à € 25,-) / m³ x 4.10⁶ m³ = € 60.10⁶ à € 100.10⁶.

Zand met stortsteen afdeklaag:

zand (€ 3,- à € 6,-) / m³ x 4.10⁶ m³ = € 12.10⁶ à € 24.10⁶
stortsteen: 2800 m x 500 m x 1 ton / m² x € 30,- / ton = € 42.10⁶ euro
totaal: € 54.10⁶ à € 66.10⁶.

Het tweede alternatief is het goedkoopst.

Wanneer slechts een deel van de ontgrondingskuil wordt opgevuld en afgedekt zijn de kosten uiteraard naar rato van het verdedigde oppervlak kleiner. Voor een proefvak langs de rand van een ontgrondingskuil, bijvoorbeeld in de Roompot langs de zuidelijke rand van de stroomgeul, met lengte van 500 m, breedte van 300 m en opvuldtepte van gemiddeld 2 m, bedragen de kosten van vullen met zand en afdekken met stortsteen:

zand (€ 3,- à € 6,-) / m³ x 3.10⁵ m³ = € 0,9.10⁶ à € 1,8.10⁶
stortsteen: 300 m x 500 m x 1 ton / m² x € 30,- / ton = € 4,5.10⁶ euro
totaal: € 5,4.10⁶ à € 6,3.10⁶.

Alle bedragen zijn exclusief btw.

4.2 Basisvraag 2

Basisvraag 2 bestaat uit de volgende componenten:

1. *In welke mate neemt de hydraulische weerstand van de kering af wanneer pijlers en drempels met dorpels beter worden gestroomlijnd?*
2. *Kunnen de breukstenen damaanzetten worden geopend ter verkrijging van een grotere doorstroomopening?*

4.2.1 Analyse

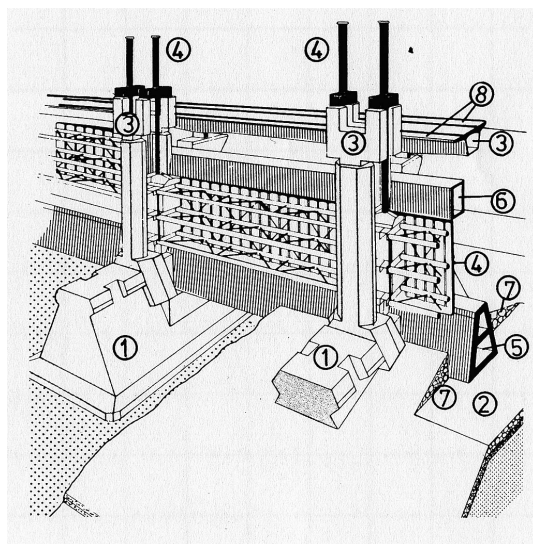
Vraag 1:

In welke mate neemt de hydraulische weerstand van de kering af wanneer pijlers en drempels met dorpels beter worden gestroomlijnd?

In Figuur 4-1 en Figuur 4-2 worden doorsnedes getoond over de kering (ondiepe sectie, Schaar 4, en diepe sectie Roompot 12); Figuur 4-7 toont een driedimensionale tekening van de kering, waarop de verschillende onderdelen van de kering zijn aangegeven.

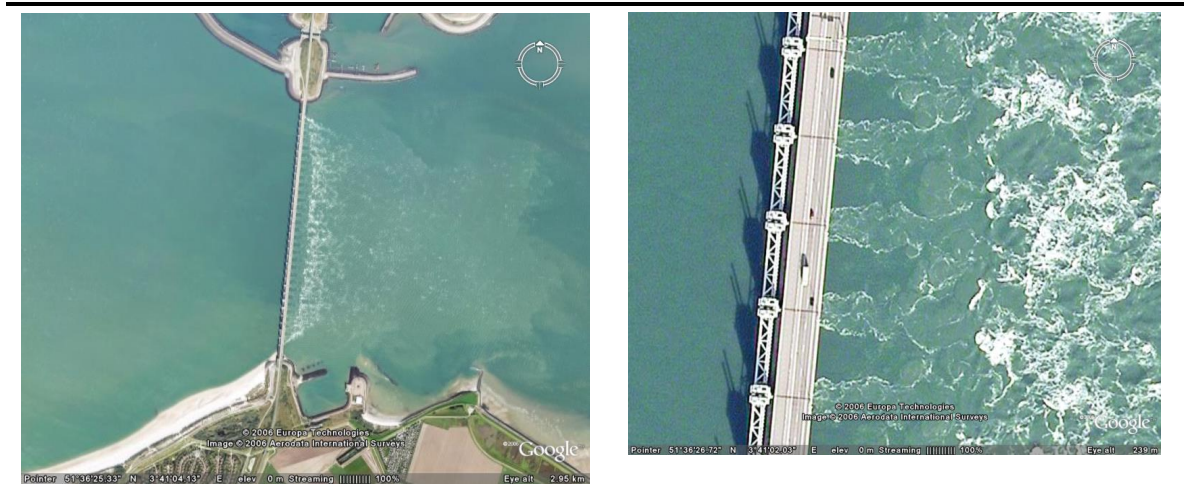
In het verticale vlak gezien (zie doorsnedes) vormt de drempel met het boven de drempel uitstekende deel van de dorpelbalk een flinke blokkade voor de stroming; dit geldt voor beide stroomrichtingen. Bij hogere waterstanden ($> \text{NAP} + 1,0 \text{ m}$) zijn ook de schuif en de bovenbalk van invloed op de doorstroming. In het horizontale vlak zijn het de pijlervoeten met hijsnokken (die deels boven de drempel uitsteken) en de pijleropbouw die de doorstroomopening beperken.

In de ontwerpfase is veel aandacht besteed aan de afvoer door de kering als functie van vormgeving van pijlers, dorpelbalken, aanstortingen tegen de dorpelbalken en drempel (zie o.a. [M1447-1, 1979], [M1447-2, 1979] en [M1566, 1980]). De uiteindelijke vormgeving is tot stand gekomen als resultaat van vooral constructie-technische en uitvoeringstechnische eisen en financiële randvoorwaarden.



Figuur 4-7 Driedimensionale tekening van de kering (bron: [RWS-1])

Een ideale vorm voor wat betreft de doorstroomcapaciteit is die, waarbij de stroming naar de opening toe geleidelijk contraheert en na passage van de opening ook weer zeer geleidelijk verwijdt. Constructie-elementen die sterke lokale stroomcontracties veroorzaken moeten daarbij worden vermeden. De vraag is nu of hier bij de gerealiseerde kering aan wordt voldaan. We beschouwen daartoe allereerst de stroombeelden die bij (waarschijnlijk flinke) eb- en vloedstroming van uit de lucht zichtbaar waren (zie onderstaande foto's).

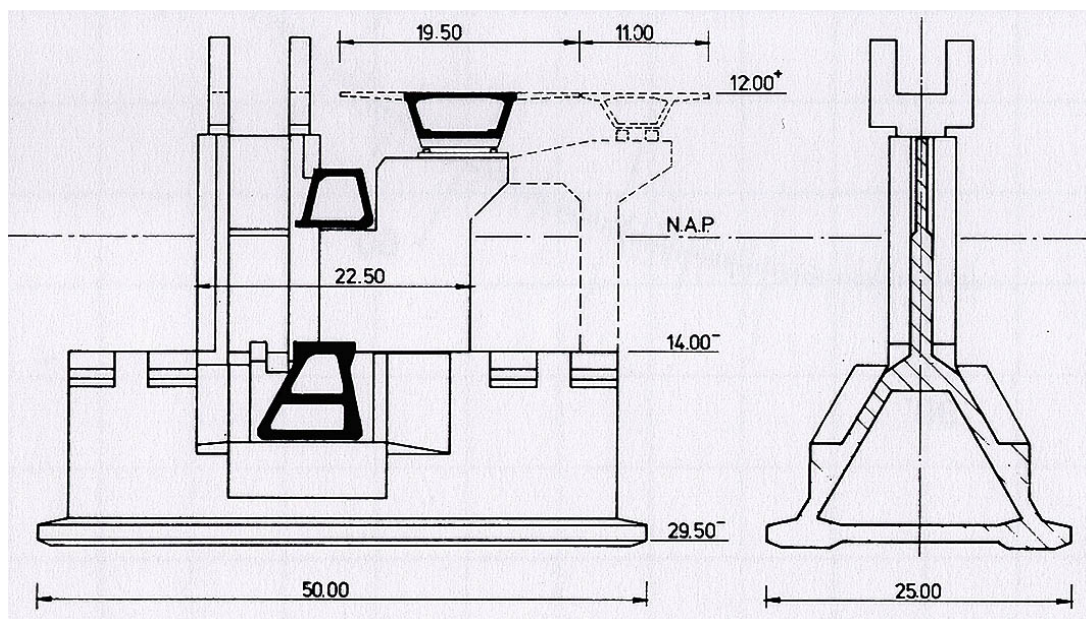


Figuur 4-8 Vloedstroming door de kering, Roompot (bron: Google Earth, 2006)



Figuur 4-9 Ebstroming door de kering, Schaar van Roggenplaat

Wat opvalt is dat achter de pijlers een breed zog ontstaat, zowel bij eb- als bij vloedstroming. Meer in detail kijkend blijkt dat de stroming direct langs het pijlerlichaam al erg turbulent is. Dit wijst er op dat het water niet ongestoord langs het pijlerlichaam afstroomt. De verstoring wordt veroorzaakt door de zeer sterke verbreding van de pijlerwand ter plaatse van de schuifspanning, zie Figuur 4-10.



Figuur 4-10 Vormgeving pijler (bron: [RWS-1])

Een ander opvallend verschijnsel is dat zich op enige afstand achter en parallel aan de kering een gebied bevindt waar veel turbulentie wordt gegenereerd. Dit wijst er op dat hier verwijding van de stroming plaats vindt, hetgeen gepaard gaat met veel energieverlies. Het beeld is dat de stroming eerst sterk contraheert ter plaatse van de opening gevormd door dorpelbalk, pijlers en bovenbalk/schuif en vervolgens verwijdt. De aanvankelijk platte straal wordt eerst wat ronder (verwijding in het verticale vlak en versmalling in het horizontale vlak, zichtbaar ook op de foto's als een verwijding van het zog achter de pijlers) en neemt dan in doorsnede toe. De verschillende stralen vinden op enige afstand van de kering aansluiting bij elkaar en wisselen onderling energie uit, met als gevolg een afvlakking van stroomsnelheidsverschillen en een doorgaande verwijding van de stroming in het verticale en horizontale vlak. De afzonderlijke stralen trekken hierbij naar elkaar toe. Dit is goed te zien nabij de randen van de stroomgeulen (Figuur 4-8 en Figuur 4-9): de stralen uit de randopeningen buigen hier sterk naar binnen toe af. De topografie van de stroomgeul met, in dwarsrichting, een oplopende bodem nabij de randen (met daaraan ook gerelateerd de debietverdeling over de kering) speelt eveneens een rol in het algehele stroombeeld achter de kering.

Wanneer een groep naast elkaar gelegen schuiven wordt dichtgezet ontstaan er twee duidelijk van elkaar gescheiden afstroomgebieden. Het gevolg kan zijn dat het deel van de afstroming bij de rand van de geul contact blijft houden met de oever, en niet naar het centrum van de geul afbuigt.

De afvoercoëfficiënt van de kering bedraagt in de huidige situatie 0,92 [RWS-1]; dit is een relatief hoge waarde. De afvoercoëfficiënt heeft betrekking op het totale doorstroomoppervlak A van de kering beneden de NAP-lijn, en is een gemiddelde voor eb- en vloedsituaties. De vorm van de drempel is zodanig dat de stroomlijnen ter plaatse van de dorpelbalk naar boven gekromd zijn, waardoor hier een extra drukverlaging ontstaat. Dit draagt bij aan de afvoercapaciteit van de kering, en verklaart mogelijk de relatief hoge waarde van de afvoercoëfficiënt. De afvoercoëfficiënt zou nog kunnen worden verhoogd wanneer de energieverliezen die optreden in het verwijdingsproces, worden teruggedrongen.

In de huidige situatie, met drempelhelling 1:3 à 1:3,5, laat de stroming vanaf de bovenstroomse rand van de dorpelbalk los en zal pas weer contact maken met drempel of bodem wanneer een flinke verwijding in het verticale vlak heeft plaats gevonden. Een verbetering van het verwijdingsproces (met minder energieverliezen) zou kunnen worden bereikt, wanneer de breukstenen drempel vanaf de bovenkant van de dorpelbalk licht gekromd en dan geleidelijk overgaand in een flauwe helling van ca. 1:10 à 1:15 zou worden aangelegd. Bij de flauwe drempelhelling zal de stroming contact blijven houden met de drempel en geleidelijker verwijden. De voor de afvoercoëfficiënt gunstige kromming van de stroomlijnen boven de dorpelbalk mag daarbij niet (teveel) afnemen; bezien moet daarom worden of een taludhelling van 1:15 acceptabel is. De benodigde taludhelling dient bij voorkeur in een schaalmodel te worden vastgesteld. Hier gaan we er voorshands van uit dat een helling van 1:10 zal voldoen.

Ingeschat wordt dat het verwijdingsverlies na het verflauwen van de taludhelling, een groot-schalige ingreep, met een waarde tot maximaal 15% kan afnemen. Deze schatting is gebaseerd op experimentele gegevens betreffende stroming over drempelconstructies [Q4052, 2005] en gegevens betreffende uitstroming door middel van venturi's [zie o.a. WL, 1976]. De afvoercoëfficiënt kan daardoor tot 10% toenemen.

Om het energieverlies op de randen van de stroming te beperken (naar binnen afbuigen van de stroming, aandrijving van grootschalige randneren), zou het ook nodig kunnen zijn om langswanden te plaatsen in het verlengde van de randpijlers tot op flinke afstand van de kering.

Wanneer alleen de drempel aan Oosterscheldezijde wordt verflauwd ontstaat er een asymmetrie in de doorstroming bij eb- en vloedcondities: de doorstroomcapaciteit is bij eb lager dan bij vloed. Omdat per getijcyclus gemiddeld evenveel water naar binnen als naar buiten stroomt, zal de lagere doorstroomcapaciteit bij eb er toe leiden dat het verval over de kering bij eb wat groter wordt. Gemiddeld zal daardoor het peil van het Oosterscheldebekken wat stijgen, waardoor uiteindelijk de toename in getijvolume en getijslag, en belangrijker, de droogvalduur van de platen beperkt zal blijken te zijn. Tevens geldt dat een hogere waterstand op het Oosterscheldebekken ongunstig is voor wat betreft de droogvalduur van de platen. Om de asymmetrie te voorkomen dient het verflauwen van de drempel dus aan beide zijden van de kering plaats te vinden. Het zal duidelijk zijn dat hier grote kosten mee zijn gemoeid (zie kostenraming in Paragraaf 4.2.2), nog afgezien van de kosten van eventuele langswanden.

Kleinschaliger, en goedkopere aanpassingen zouden gezocht kunnen worden in een betere stroomlijning van drempel met dorpel en pijlers.

De dorpel steekt op dit moment ruim boven de drempel uit (meer aan de zeezijde dan aan de Oosterscheldezijde, zie Figuur 4-1 en Figuur 4-2). Hiervoor is destijds gekozen in verband met de beperkte nauwkeurigheid waarmee grote betonblokken en steenblokken onder water geplaatst konden worden. Voorkomen moest worden dat te hoog liggende blokken het neerlaten van de schuiven onmogelijk zou maken, en tevens dat de boven de dorpel uitstekende blokken te zwaar door de stroming zouden worden belast en zouden gaan verplaatsen.

Voor een betere stroomlijning zou de drempel tot even onder de bovenkant van de dorpelbalk kunnen worden aangevuld. Dit is praktisch gezien echter geen eenvoudige opgave, ook al omdat de blokken grote afmetingen hebben (vanwege de dimensionering op de belasting die optreedt bij een weigerende schuif). De winst die met het opvullen geboekt wordt is overigens niet erg groot.

De bovenstroomse rand van de dorpelbalk blijft een loslaatpunt voor de stroming, met als consequentie een opbuigen van de stroming en vervolgens weer terugbuigen. Mogelijk is de locale contractie nu wat geringer, en hier zou dan winst geboekt kunnen worden, maar het verwijden van de straal in het verticale en horizontale vlak blijft vervolgens toch grotendeels plaats vinden op de manier zoals hiervoor is geschetst.

De pijlers, althans het deel van de pijleropbouw boven het niveau van de pijlervoet, kunnen gemakkelijker worden gestroomlijnd. Vanaf de verbreding ter plaatse van de schuifspinning tot aan de kopzijde aan Oosterscheldezijde kan de pijlerwand worden opgevuld, en wel zodanig dat een geleidelijke afname van de pijlerdikte ontstaat. De rechthoekige kopzijde kan aan beide zijden worden opgevuld tot een halfronde vorm. De vraag is evenwel of deze stroomlijning veel effect zal hebben. De platte straal uit de opening moet immers zowel in horizontale als in verticale richting verwijden en het resultaat van de pijlerstroomlijning kan zijn dat de straal wat langer plat blijft en daarna alsnog ronder wordt om vervolgens te verwijden. Het energieverlies is daarbij niet persé minder dan in de huidige situatie. De afstroming, met name aan Oosterscheldezijde, vindt mogelijk ook meer nabij het wateroppervlak plaats.

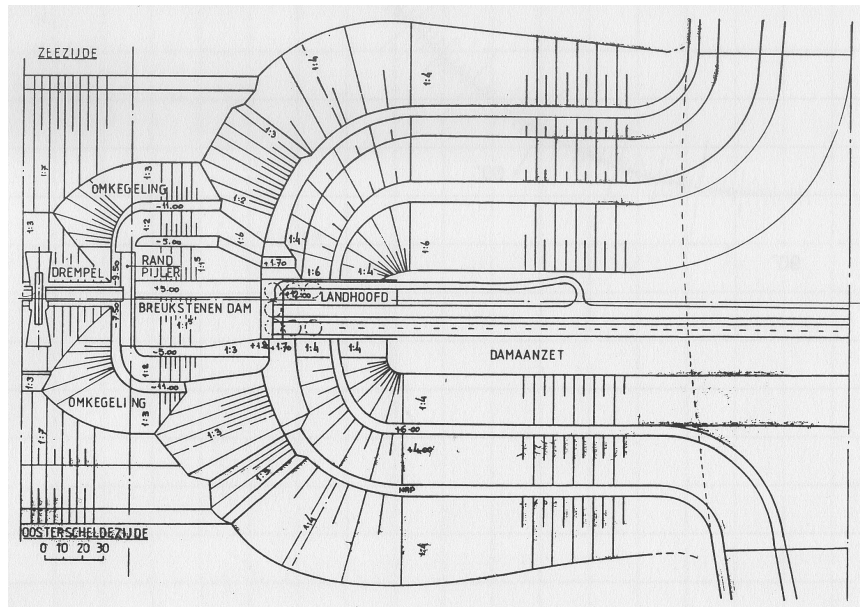
Veel effect van het stroomlijnen van drempel met dorpel en pijlers wordt daarom niet verwacht. De toename van de doorstroomcapaciteit zal, als bovengrensschatting, 5% kunnen bedragen voor beide stroomrichtingen, maar hoogst waarschijnlijk is het effect minder. Het werkelijke effect van stroomlijnen dient in een schaalmodel te worden onderzocht. Er kan dan niet worden volstaan met onderzoek aan een enkel 'poortje' omdat stralen uit naastliggende openingen grote invloed hebben op het proces van verwijden. Het zal daarbij ook nodig zijn om de stabiliteit van de drempel en de bodemverdediging te controleren.

Vraag 2:

Kunnen de breukstenen damaanzetten worden geopend ter verkrijging van een grotere doorstroomopening?

Bij het ontwerpen van de kering is het uitgangspunt geweest om de afsluitbare keringdelen zo optimaal mogelijk ten opzichte van de diepste delen van de stroomgeulen te plaatsen. De damaanzetten zijn daarom niet allemaal even ver in het oorspronkelijke sluitgat uitgebouwd. Ook speelden de grondmechanische condities van de ondergrond een rol in de bepaling van de lengte van de damaanzetten.

De overgang van de vaste dam naar het beweegbare deel van de kering bestaat uit een betonnen landhoofd, dat is gefundeerd op een basis bestaande uit verschillende breukstenen filterlagen en zand, een betonnen verkeerskoker die de ruimte tussen landhoofd en randpijler overspant, en daaronder een breukstenen dam. De breukstenen dam vormt het kerende element, maar is wel ontworpen als een waterdoorlatende constructie. De aansluiting van de breukstenen dam op enerzijds de drempel en anderzijds de taluds van de damaanzet is gerealiseerd door middel van een zogenaamde 'omkegeling', zie Figuur 4-11. De omkegeling strekt zich zowel aan zeezijde als aan Oosterscheldezijde uit tot voor de eerste doorstroomopening. De aanstroming van het eerste 'poortje' wordt hierdoor beïnvloed.

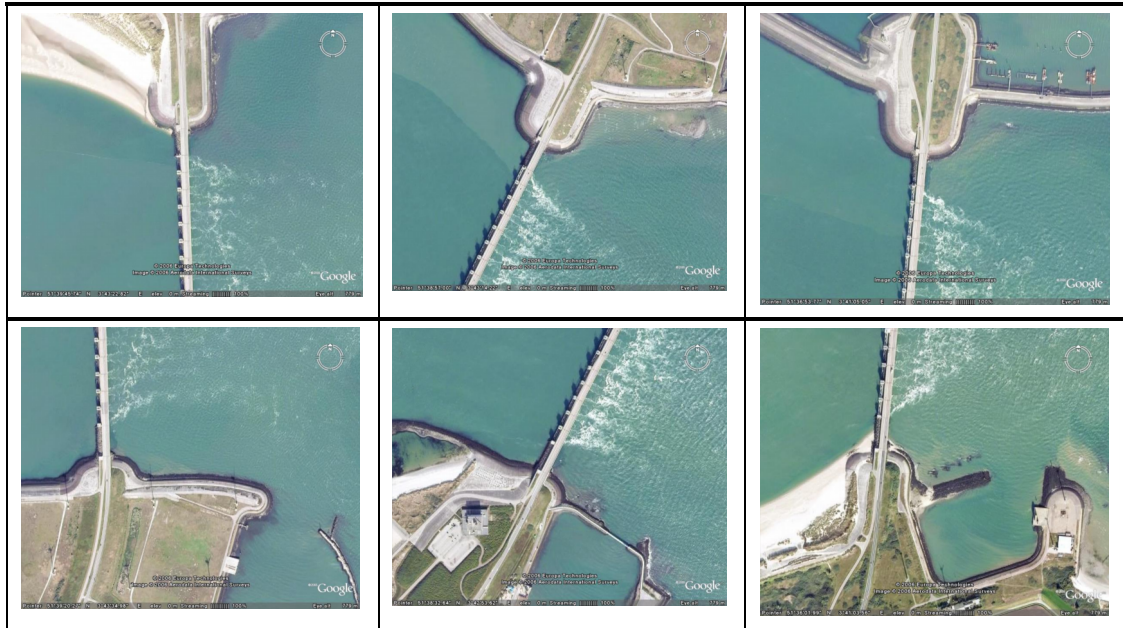


Figuur 4-11 Damaanzet en breukstenen dam, bovenaanzicht (bron: [RWS-2])

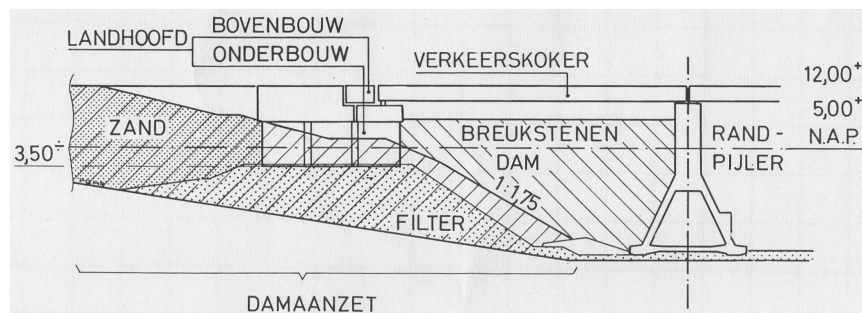
De damaanzetten dragen er toe bij dat de stroming aan benedenstroomse zijde op afstand blijft van de oevers. Dit geldt voor beide stroomrichtingen. Er ontstaan grootschalige neren tussen de oevers en het stromende water in de geulen. In deze gebieden kan sediment neerslaan, maar bij omkering van de stroming wordt dit mogelijk weer (deels) weggevoerd. Voor de toestroming naar de kering werken de damaanzetten als een blokkering. Dit geldt eveneens voor beide stroomrichtingen. De stroming moet zich voegen naar de kleinere doorstroomopening. Lokaal kunnen aan bovenstroomse zijde van de damaanzetten kleine neren ontstaan; hier kan zand worden ingevangen.

Op de luchtfoto's van Figuur 4-12 (vloedcondities) is te zien dat de stranden van Schouwen en Noord Beveland (aan zeezijde) zich tot aan de damaanzetten hebben uitgebreid. De haven bij de damaanzet Roompot-Zuid lijkt gevoelig te zijn voor aanzanding: oostelijk van de haveningang heeft zich reeds sediment afgezet (zie ook Paragraaf 4.1.1). Mogelijk geldt deze gevoeligheid ook voor de haven bij de damaanzet Hammen-Zuid.

In Figuur 4-13 is de opbouw van een damaanzet in langsdoorsnede weergegeven. Wanneer gedacht wordt aan het openen van de breukstenen dam ter verkrijging van een grotere doorstroomopening, ligt het in de rede om een soortgelijke constructie te maken als in de naastliggende doorstroomopeningen met dorpelbalk, bovenbalk en schuif. Het landhoofd dient dan tot grotere diepte te worden uitgebouwd. Grondmechanisch onderzoek dient uit te wijzen of een dergelijke aanpassing acceptabel is. Vanzelfsprekend dient ook uitvoerig te worden onderzocht op welke wijze de stroming verandert en welke impact dat heeft op de lokale bodem- en oevermorfologie, en op de verdedigingen.



Figuur 4-12 Damaanzetten gezien vanuit de lucht, vloedstroming; links: Hammen, midden: Schaar van Roggenplaat, rechts: Roompot (bron: Google Earth, 2006)

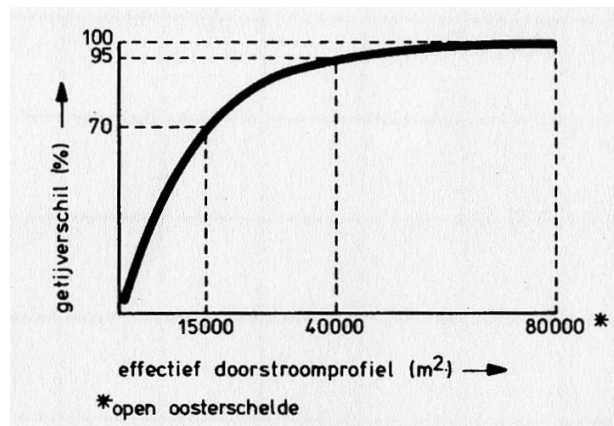


Figuur 4-13 Damaanzet en randpijler, langsdoorsnede (bron: [RWS-3])

De bovenkant van de dorpelbalk zal op een zelfde niveau kunnen worden gekozen als de naastliggende dorpelbalk (NAP -4,5 m). Wordt ook als dagmaat van de doorstroomopening een breedte van 40,0 m aangehouden, dan neemt de totale bruto doorstroomopening beneden de NAP-lijn met $6 \times 4,5 \text{ m} \times 40,0 \text{ m} = 1080 \text{ m}^2$ toe; de huidige bruto opening van ca. 17.900 m^2 wordt dan ca. 19.000 m^2 groot, een vergroting met ca. 6%. Met een algehele afvoercoëfficiënt van 0,92 (zie Paragraaf 2.2) wordt de netto effectieve doorstroomopening 17.500 m^2 . In onderstaande indicatieve Figuur 4-14 valt af te lezen dat het verticale getij bij Yerseke daarmee enkele procenten groter zal zijn dan in de huidige situatie.

Een alternatief zou kunnen zijn dat de breukstenen dammen worden gehandhaafd, maar dat de doorlatendheid van de dammen wordt vergroot door toepassing van holle blokken in de kern. Bij open kering zal de grotere doorlatendheid van de dammen waarschijnlijk slechts een beperkt effect hebben op de stroming door de kering (de weerstand van de open dammen is nog steeds relatief groot), maar mogelijk wordt er wel wat meer zand langs de randen getransporteerd.

Bij gesloten kering lekken de open dammen en neemt de totale lek door de kering flink toe. Nagegaan zou moeten worden of er op termijn kans bestaat op dichtslibben van de meer open breukstenen dammen.



Figuur 4-14 Reductie verticaal getij als functie van de effectieve doorstroomopening (bron: [RWS-1])

Door middel van numerieke stromingsberekeningen kan het effect van een grotere netto doorstroomopening op de getijslag bij Yerseke, het getijvolume, en de stroomsnelheden in de geulen worden vastgesteld.

4.2.2 Plan van aanpak voor verder onderzoek

Uit het voorgaande blijkt het volgende:

- Bij vloed- en ebstroming door de kering zijn de stralen uit de afzonderlijke openingen in eerste instantie plat van vorm. De platte stralen moeten zich vooral in verticale zin verwijden; de platte stralen worden eerst wat ronder (en contraheren daarbij in het horizontale vlak) en verwijden zich vervolgens in verticale en horizontale richting. De stralen zuigen naar elkaar toe, hetgeen er ook toe leidt dat de stroming bij de randen van de kering naar binnen afbuigt, naar de as van de stroomgeul. Het proces van afstromen is een grootschalig gebeuren.
- Een significante verlaging van de weerstand van de kering kan worden bereikt wanneer de breukstenen drempel vanaf de bovenkant van de dorpelbalk licht gekromd en dan geleidelijk overgaand in een flauwe helling van ca. 1:10 zou worden aangelegd (aan beide zijden van de kering). Ingeschat wordt dat de verwijdingsverliezen tot maximaal 15% zouden kunnen afnemen na een dergelijke grootschalige ingreep, waardoor de doorstroomcapaciteit van de kering tot 10% zou kunnen toenemen.
- Kleinschaliger aanpassingen zouden kunnen bestaan uit het beter stroomlijnen van drempel en pijlers. Ingeschat wordt dat de doorstroomcapaciteit hierdoor met maximaal 5% kan toenemen, maar waarschijnlijk is de toename geringer.

- De breukstenen damaanzetten lijken te kunnen worden geopend, mits grondmechanische overwegingen zich daar niet tegen verzetten, en stromingsveranderingen lokaal bij de oevers acceptabel zijn. De bruto doorstroomopening beneden de NAP-lijn neemt daardoor met ca. 1100 m² toe tot ca. 19.000 m². Mogelijk kan als alternatief voor het openen van de dammen de porositeit van de dammen worden vergroot.

Zowel het grootschalig aanpassen van de drempel als het openen van de breukstenen damaanzetten kunnen grote gevolgen hebben voor de stroming en vergen daarnaast aanzienlijk investeringen. Minder investeringen zijn vereist voor het stroomlijnen van de pijlers en het lokaal aanpassen van de drempel. Om gefundeerde beslissingen te kunnen nemen dienen alle gevolgen van genoemde ingrepen goed in beeld te worden gebracht. We stellen de volgende aanpak voor:

1. Bestudeer de resultaten van eerdere numerieke stromingsberekeningen voor het Oosterscheldebekken uit de tijd dat het ontwerp van de stormvloedkering werd gemaakt en de te kiezen netto doorstroomopening μA nog onderwerp van studie was. Ga na of op basis van deze resultaten en op basis van resultaten van vroegere metingen in schaalmodellen een eerste inschatting van de potentiële vergroting van de doorstroomcapaciteit kan worden gemaakt, en schat vervolgens het effect in van een gerealiseerde capaciteitsvergroting op getijvolume, getijslag, en stroomsnelheid.
2. Maak aanvullende numerieke stromingsberekeningen voor het Oosterscheldebekken met een verkennend karakter en varieer daarbij de afvoercoëfficiënt van de kering binnen zekere grenzen (bijvoorbeeld: afvoer als in huidige situatie, +5%, +10%, +15%). Analyseer de effecten van de grotere doorstroomcapaciteit (wat betreft getijvolume, getijslag, en stroomsnelheid) en onderzoek in algemene zin of dit kan bijdragen aan de oplossing van het zandhongerprobleem.
3. Wanneer een vergroting van de doorstroomcapaciteit volgens de verkennende numerieke berekeningen beantwoordt aan het gestelde doel (namelijk dat de vergroting van de getijstroming in het Oosterscheldebekken bijdraagt aan het oplossen van het zandhongerprobleem), ga dan door middel van schaalmodelonderzoek na binnen welke range de afvoercoëfficiënt zal liggen na uitvoeren van de bovengenoemde doorstroombevorderende maatregelen.
4. Maak aanvullende, meer specifieke, numerieke stromingsberekeningen, waarin zo mogelijk ook het sedimenttransport door de kering wordt meegenomen. Controleer of de gevolgen van een grotere doorstroomcapaciteit van de kering acceptabel zijn; het gaat dan met name om een controle van de sterkte en uitgebreidheid van de bodem- en oeververdedigingen, de veranderingen in stromingspatronen (met name bij de oevers) en de aan de gewijzigde stromingspatronen gerelateerde veranderingen in het zandtransport en de lokale erosie- en sedimentatieprocessen. Tevens gaat het om de effecten in meer algemene zin op het eco-systeem Oosterschelde.

Ad 1

Ten tijde van het ontwerp van de stormvloedkering is uitvoerig onderzocht hoe groot de doorstroomopening van de kering zou moeten zijn om een gewenste getijslag op het Oosterscheldebekken in stand te kunnen houden (zie bijvoorbeeld Figuur 4-14 en [RWS-1]). Daarbij is gebruik gemaakt van het model IMPLIC (een 1D-model) en verschillende WAQUA modellen (2D-modellen). De WAQUA modellering omvatte gedetailleerde modellen voor deelgebieden en een grover model voor het gehele bekken.

De in deze modellen gebruikte afvoercoëfficiënten waren afgeleid van metingen in de schaalmodellen M1000 en M1001 van WL | Delft Hydraulics. Bij de IMPLIC berekeningen werd voor de verdeling van het geuldebiet over de verschillende ‘poortjes’ van de kering de zogenaamde R1495 rekenmethode toegepast. In [WL / RWS, 1989] worden de gebruikte modellen (numerieke modellen en schaalmodellen) besproken en wordt de studieopzet geëvalueerd.

De IMPLIC-berekeningen zijn destijds door RWS opgezet; de WAQUA berekeningen zijn in een gezamenlijke inspanning van WL en RWS uitgevoerd. Vermoedelijk zijn rekenresultaten nog wel via rapporten beschikbaar. De verschillende onderzoeken in schaalmodellen zijn in WL-rapporten gerapporteerd en nog geheel beschikbaar. Op basis van deze rapporten en andere gegevens die wellicht nog in archieven zijn bewaard, kan mogelijk een eerste inschatting worden gemaakt van het effect van vergroten van de doorstroomcapaciteit (stroomlijnen van de kering en / of het openen van de dam aanzetten).

De kosten van een dergelijke analyse hangen sterk af van de hoeveelheid nog ter beschikking staande gegevens en van de bruikbaarheid van deze gegevens; de kosten voor uitvoering van de analyse zullen ruwweg € 30.000,- (exclusief btw) bedragen.

Ad 2

Het opzetten, calibreren, valideren en uitvoeren van numerieke stromingsberekeningen wordt in Paragraaf 4.3 besproken. Verkennende berekeningen kunnen worden gemaakt voor verschillende afvoercoëfficiënten van de kering, zodat vrij gemakkelijk inzicht kan worden verkregen in de veranderingen in de stromingen die optreden bij vergroting van de doorstroomcapaciteit van de kering.

Ad 3

Het effect van stroomlijnen van drempel en pijlers (beperkte ingreep) en het effect van het verflauwen van de drempelaluds (grootschalige ingreep) kunnen worden onderzocht in een schaalmodel. Het model dient zo groot te zijn dat driedimensionale stromingseffecten, met name in breedterichting van de kering, zo goed mogelijk worden gereproduceerd; het model dient daarom minimaal meerdere ‘poortjes’ te omvatten, inclusief een randopening. Ook moeten de effecten van de diepteligging van de geul en de lokale topografie worden meegenomen. Het model zal daarom een groot oppervlak beslaan. WL | Delft Hydraulics kan beschikken over een 5 m brede stroomgoot en in de nabije toekomst over een 9 m brede stroom-golfgoot met groot debiet. Bezien moet worden of de afmetingen van deze faciliteiten toereikend zijn.

Er van uit gaande dat bestaande stroomfaciliteiten kunnen worden gebruikt, kunnen de kosten van een dergelijk schaalmodelonderzoek op een bedrag tussen ruwweg € 200.000,- en € 400.000,- (exclusief btw) worden geschat, afhankelijk ook van de uitgebreidheid van het onderzoek en het aantal te variëren grootheden.

Ad 4

Het uitvoeren van aanvullende, meer specifieke stromingsberekeningen wordt besproken in Paragraaf 4.3. Tevens wordt daar ingegaan op de mogelijkheid van morphodynamische berekeningen.

Een controle van de effecten van een grotere doorstroomcapaciteit kan deels in het onder *ad 3* besproken schaalmodel worden verricht. Het gaat dan om de stabiliteit van de bodemverdediging bij het grotere debiet en de diepte van de ontgrondingskuil. Mogelijk kunnen hierbij door middel van numerieke stromingsberekeningen (volledig 3D-model) vertalingen naar andere situaties worden gemaakt, zodat het aantal experimenten beperkt kan blijven. Eventueel kan in het schaalmodel ook onderzoek worden verricht naar het effect van opvullen en afdekken van de ontgrondingskuil op het zandtransport naar en door de kering (als ondersteuning bij het principe-onderzoek zoals genoemd onder Paragraaf 4.1.2).

De kosten van het onderzoek in het schaalmodel en eventuele 3D-stromings-berekeningen zullen ruwweg tussen € 100.000,- en € 250.000,- (exclusief btw) liggen (er van uit gaande dat het schaalmodel als genoemd onder *ad 3* al beschikbaar is).

Omdat bij een significante vergroting van de getijstrooming in het Oosterscheldebekken een verandering in het eco-systeem zal optreden, zal naar verwachting een milieu-effect rapportage moeten worden opgesteld.

4.2.3 Kosten van uitvoering van de maatregel

De kosten van het uitvoeren van de verschillende doorstroombevorderende maatregelen worden als volgt afgeschat.

Stroomlijnen van de bovenbouw van de pijlers (opvulstukken aanbrengen, pijlerkoppen afronden): deze werkzaamheden dienen waarschijnlijk binnen een bouwkuip te worden uitgevoerd. Om deze reden zijn de kosten hoog. Op dit moment bedragen de kosten van onderhoud aan de kering € $30 \cdot 10^6$ per jaar. Vergeleken daarmee zullen de kosten van het uitvoeren van de stroomlijningswerkzaamheden aan alle pijlers hoger zijn. Minimaal zullen de kosten € $100 \cdot 10^6$ bedragen.

Op beperkte schaal stroomlijnen van de drempel (aanvullen van de drempel tot net onder dorpelbalkniveau): in dit geval moet de toplaag van de drempel worden aangevuld met stortsteen 1 – 3 ton. De kosten hiervan bedragen ca. € 60,- per ton. Bij eenzijdig aanvullen met een laag steen van gemiddeld 2 m dikte over een breedte van 25 m en een totale lengte van 2,8 km bedraagt het steenvolume 140.000 m^3 , hetgeen overeenkomt met een totaal steengewicht van 230.000 ton (40% porositeit, $\rho_{\text{steen}} = 2,75 \text{ ton/m}^3$). Bij tweezijdig aanvullen is de benodigde steenhoeveelheid tweemaal zo groot en bedragen de totale kosten, inclusief aanbrengen, ca. € $30 \cdot 10^6$.

Wanneer met geocontainers gewerkt zou kunnen worden zijn de kosten lager. De kosten van aanbrengen van de geocontainers bedragen ca. 15 à 25 euro per m^3 , zodat de kosten dan $2 \times 140.000 \text{ m}^3 \times (\text{€ } 15 \text{ à } \text{€ } 25)/\text{m}^3 = \text{€ } 4 \cdot 10^6 \text{ à } \text{€ } 7 \cdot 10^6$ bedragen.

De kosten van stroomlijnen van pijlers én drempel bedragen dus minimaal ca. € $105 \cdot 10^6$, terwijl het effect op de doorstroomcapaciteit naar verwachting beperkt is.

Grootschalige ingreep waarbij de drempelaluds aan beide zijden van de kering tot een helling van 1:10 worden verflauwd: er wordt vanuit gegaan dat de aanvulling geheel kan worden uitgevoerd door middel van geocontainers en dat extra bescherming door middel van stortsteen niet nodig is.

Benodigd volume aan geocontainers: $2 \times 100 \text{ m} \times 10/2 \text{ m} \times 2,8 \text{ km} = 2,8 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. De kosten van aanbrengen van de geocontainers bedragen ca. 15 à 25 euro per m^3 .

De totale kosten van deze maatregel bedragen aldus € 40.10⁶ à € 70.10⁶. Het effect van deze maatregel op de doorstroomcapaciteit is naar verwachting significant.

Openen van de breukstenen damaanzetten: deze maatregel vereist – naast het weghalen van de breukstenen dammen – een volledige herstructurering van de landhoofden, het aanbrengen van dorpelbalken en bovenbalken, het aanbrengen van een drempel, en het plaatsen van hefschuiven met bewegingsinrichting. De kosten hiervan zijn hoog en worden minimaal op € 100.10⁶ geschat.

4.3 Basisvraag 3

Basisvraag 3 bestaat uit de volgende componenten:

1. *Leidt een vergroting van de effectieve doorstroomopening en / of een verlaging van de hydraulische weerstand van de kering tot een relevante vergroting van de getijvolumestroom in / uit de Oosterschelde, tot de gewenste hogere stroomsnelheid in de Oosterschelde, en tot een substantieel netto zandtransport naar de Oosterschelde?*
2. *Kan door manipulatie met schuiven van de kering in de drie hoofdgeulen een verandering van stroombeelden en circulaties worden verkregen die leidt tot een netto zandtransport naar de Oosterschelde en op termijn gunstig is voor de plaatvorming in met name het westelijke deel van de Oosterschelde?*

4.3.1 Analyse

Vraag 1:

Leidt een vergroting van de effectieve doorstroomopening en / of een verlaging van de hydraulische weerstand van de kering tot een relevante vergroting van de getijvolumestroom in / uit de Oosterschelde, tot de gewenste hogere stroomsnelheid in de Oosterschelde, en tot een substantieel netto zandtransport naar de Oosterschelde?

Het eerste deel van de vraag kan het beste door middel van numerieke stromingsberekeningen worden beantwoord. Het ligt uiteraard voor de hand dat een vergroting van de doorstroomopening of een stroomlijning van de kering tot een hoger getijvolume leidt, zie bijvoorbeeld Figuur 4-14, maar veranderingen in stroomsnelheidsverdelingen, in de getijslag op verschillende plaatsen in het Oosterscheldebekken, en in faseverschillen gedurende de getijbeweging, kunnen alleen door middel van een goede stromingssimulatie met voldoende nauwkeurigheid worden vastgesteld. Minimaal is daar een 2DH (diepte-gemiddeld) stromingsmodel voor nodig. Genoemde getijdestromingsgrootheden zijn alle relevant bij het beoordelen van de effecten van de grotere doorstroomcapaciteit van de kering (op o.a. de droogvalduur van de platen).

Bij de beantwoording van het tweede deel van de vraag dienen zandtransportberekeningen te worden gemaakt.

De bij WL | Delft Hydraulics beschikbare modellen (op basis van Delft3D) voor het zuidelijke deel van de Noordzee (inclusief Oosterschelde) zijn op dit moment nog niet geschikt om stromingsberekeningen met de gewenste nauwkeurigheid te maken.

De roosterresolutie, met name rondom de stormvloedkering, zou hiertoe eerst sterk verhoogd moeten worden. Wellicht zijn deze modellen wel bruikbaar als randvoorwaarden-generators (zeerland). Het is vermoedelijk een betere optie om het bestaande model van Rijkswaterstaat voor het Oosterscheldebekken en de voordelta te gebruiken (op basis van WAQUA), dat wel een zeer hoge resolutie heeft over het gehele rekengebied. Eventueel zou het rooster nog grover gemaakt kunnen worden in het oostelijk deel van de Oosterschelde.

Wat betreft de randvoorwaarden: er zal waarschijnlijk gekozen moeten worden voor een representatief (morfodynamisch) getij aan zeezijde van de kering. In eerste instantie kan waarschijnlijk gekozen worden voor het morfodynamisch getij dat in de Westerschelde modellen van WL | Delft Hydraulics wordt toegepast.

De vraag of en in welke mate de getijvolumestroom in/uit de Oosterschelde zal toenemen bij vergroting van de doorstroomopening van de kering is relatief eenvoudig te beantwoorden met een stromingsmodel op basis van Delft3D (of WAQUA). Dit model dient eerst op basis van meetgegevens (huidige situatie) voor zekere getijcondities te worden gekalibreerd en vervolgens te worden gevalideerd door voorspellende berekeningen uit te voeren voor andere getijcondities.

In verkennende berekeningen voor de nieuwe situatie kan vervolgens eerst grofstoffelijk het effect van stroomlijning van de kering en / of een grotere doorstroomopening worden berekend. Later, wanneer is vastgesteld dat de grotere doorstroomcapaciteit bijdraagt aan het oplossen van het zandhongerprobleem en de opbouw van platen ten goede komt, kunnen aanvullende, meer specifieke stromingsberekeningen worden gemaakt. In deze berekeningen worden de afvoercoëfficiënten gebruikt die inmiddels door middel van experimenteel onderzoek voor de aangepaste kering zijn vastgesteld. In het algemeen zal het stromingsmodel goed in staat zijn om een eventuele toename van de getijstroomsnelheden (in 2DH: dieptegemiddeld) in de Oosterschelde vast te stellen.

Bij de schematisatie van de kering in Delft3D zal gebruik moeten worden gemaakt van de zogeheten *structures-optie*; de hydraulische weerstand van de open of gesloten 'poortjes' van de kering dient hierbij door de modelleur te worden opgegeven. Dit vereist wel een goed inzicht in het vertalen van afvoercoëfficiënt naar weerstand (als functie van waterstanden, invloed van naastgelegen 'poortjes' etc.).

Voor het gedetailleerd berekenen van zandtransport is een 3D-model nodig. Om de effecten van een vergroting van het getijvolume op import/export van zand te bepalen hoeft waarschijnlijk niet morphodynamisch gerekend te worden (morphodynamisch rekenen houdt in dat de bodemligging gedurende de berekening wordt aangepast). Met een analyse van de resttransporten kan dan worden volstaan. Het is echter denkbaar dat een toename van de getijstroom door de kering ook zal leiden tot verhoogde erosie langs de kust. Om dit effect te onderzoeken zal wel degelijk morphodynamisch gerekend moeten worden.

In het verleden is gebleken dat het nauwkeurig berekenen van import/export volumes met Delft3D (3D-model) problematisch kan zijn. Dit vereist onder andere een zeer goed gekalibreerd hydrodynamisch model. Ook de berekening van het transport van sediment door de kering heen is vooralsnog geen routinematige zaak. De nadruk bij het doorrekenen van de voorgestelde maatregelen zou daarom vooral moeten liggen op de relatieve effecten van deze maatregelen ten opzichte van de huidige situatie.

Zoals eerder gezegd is het op dit moment niet duidelijk of in de huidige situatie netto zandtransport naar de Oosterschelde plaats vindt. Wanneer de Oosterschelde in de huidige situatie bijvoorbeeld zand exporteert, zou een toename van de getijvolumestroom kunnen leiden tot een toename van de export van zand uit de Oosterschelde.

Het is dan ook van belang om op voorhand een goed idee te krijgen van de huidige import/export volumes, zoals besproken in Paragraaf 4.1. Dit inzicht kan verkregen worden door de historische verandering in zandvolumes na aanleg van de stormvloedkering in kaart te brengen, aangevuld met metingen van sedimenttransport door de stormvloedkering.

Vraag 2:

Kan door manipulatie met schuiven van de kering in de drie hoofdgeulen een verandering van stroombeelden en circulaties worden verkregen die leidt tot een netto zandtransport naar de Oosterschelde en op termijn gunstig is voor de plaatvorming in met name het westelijke deel van de Oosterschelde?

Onder manipulatie met de schuiven van de kering wordt verstaan het op weloverwogen wijze gesloten houden van groepen schuiven gedurende delen van de getijcyclus, met als oogmerk stromingspatronen en zandtransport te beïnvloeden. Gedacht kan worden aan het sluiten van delen van de kering bij vloed en sluiten van andere delen bij eb (ter verkrijging van andere circulatie- en zandtransportpatronen), of het sluiten van centrale delen van de kering bij vloed (ter bevordering van zandtransport langs de randen van de geulen naar binnen toe).

De effecten van manipulatie met de schuiven kunnen door middel van numerieke stromingsberekeningen worden vastgesteld. Eén ongunstig effect is op voorhand duidelijk: door de reductie van de doorstroomopening zal het getijvolume afnemen. Bij de berekeningen moet minimaal een 2DH-model worden toegepast. Bij gebruik van Delft3D geldt dat de module die het bewegen van schuiven tijdens de simulatie regelt, nog niet veel is gebruikt. Mogelijk dient hier eerst nog een verdere ontwikkeling en afregeling plaats te vinden.

Om de effecten van manipulatie van de schuiven op import/export van zand te bepalen hoeft waarschijnlijk niet morphodynamisch gerekend te worden. Ook hier zal met een analyse van de resttransporten kunnen worden volstaan.

De import van zand kan mogelijk ook worden beïnvloed door het openen en sluiten van groepen schuiven af te laten hangen van het golfklimaat. Bij golven uit het noordwesten zullen sedimentconcentraties in zee waarschijnlijk het hoogst zijn langs het zuidelijke deel van de kering. Door bij deze condities de vloedstroming door het zuidelijke deel van de kering te laten lopen zal mogelijk de import van zand toenemen (er wordt hierbij van uit gegaan dat het verval over de kering bij een kleinere doorstroomopening toeneemt met als gevolg een wat groter debiet door de zuidelijke 'poortjes' en hogere toestroomsnelheden). Omgekeerd geldt dat bij golven uit het zuidwesten, mogelijk meer import van zand kan worden gekregen door de vloedstroming door het noordelijk deel van de kering te laten gaan. Om dit effect te onderzoeken zouden ook golven in de berekening moeten worden betrokken. Hiertoe zou dan een golfmodel, zoals SWAN, opgezet moeten worden dat aan het stromingsmodel wordt gekoppeld. In eerste instantie zou met twee representatieve golfcondities (uit zuidwestelijke en noordwestelijke richting) gerekend kunnen worden. Er geldt overigens dat het aantal dagen per jaar met flinke golfwerking niet erg groot is.

Aangetekend wordt tenslotte, dat een rekenprogramma zoals Delft3D nog niet erg goed in staat is om de uitwisseling van sediment tussen platen en geulen te berekenen (met een 2DH-model kan dit niet, met een volledig 3D-model kan het mogelijk wel wanneer met meerdere zandfracties wordt gerekend). Het valt daarom niet te verwachten dat het effect van de voorgestelde maatregelen op het proces van opbouw en afkalving van platen door middel van numerieke simulaties goed kan worden voorspeld.

4.3.2 Plan van aanpak voor verder onderzoek

Uit het voorgaande blijkt het volgende:

- Door middel van numerieke stromingsberekeningen (met minimaal een 2DH-model) kan nagegaan worden in welke mate getijvolume, getijslag, getijverloop en dieptegemiddelde stroomsnelheden in het Oosterscheldebekken veranderen wanneer de doorstroomopening van de kering wordt vergroot en/of de afvoercoëfficiënt wordt verhoogd. Daarvoor kan het beste het bestaande model van RWS (op basis van WAQUA) worden gebruikt.
- De afvoercoëfficiënt van de aangepaste kering dient als functie van waterstanden, plaats in de kering etc. bekend te zijn (want is een invoergrootheid voor de berekening).
- Voor het gedetailleerd berekenen van zandtransport is een 3D-model nodig. Voor het berekenen van import/export van zand is waarschijnlijk geen morphodynamische berekening vereist. Met een analyse van de resttransporten kan dan worden volstaan. Het nauwkeurig berekenen van import/export volumes met een 3D-model kan overigens problematisch zijn.
- De effecten van manipulatie met de schuiven van de kering op de getijstromingscondities in het Oosterscheldebekken kunnen eveneens met een stromingsmodel worden berekend (minimaal is een 2DH-model nodig). Het manipuleren met de schuiven zou mogelijk ook afhankelijk kunnen worden gemaakt van wind- en golfcondities in de voordelta (de aanname is dat als gevolg van golfwerking aan zeezijde meer zand in suspensie raakt en door manipulatie met de schuiven met de vloedstroom de Oosterschelde in kan worden gevoerd).
- Een rekenprogramma zoals Delft3D is nog niet erg goed in staat om de uitwisseling van sediment tussen platen en geulen te berekenen (met een 2DH-model kan dit niet, met een volledig 3D-model kan het mogelijk wel wanneer met meerdere zandfracties wordt gerekend).

De kosten van het opzetten, kalibreren, en valideren van het stromingsmodel en het uitvoeren van berekeningen liggen tussen € 80.000,- en € 150.000,- (exclusief btw), afhankelijk ook van de uitgebreidheid van de analyses. Wanneer morphodynamische berekeningen nodig zijn liggen de kosten tot een factor 2 hoger.

5 Samenvatting, conclusies en aanbevelingen

5.1 Het zandhongerprobleem

Sinds de vastlegging van het Oosterscheldebekken in zijn huidige vorm is de in- en uitgaande getijvolumestroom verminderd, en is als gevolg daarvan ook het zandtransport in het bekken gewijzigd. De Oosterschelde is op zoek naar een nieuw dynamisch evenwicht. Op grond van een eenvoudige, empirische relatie tussen getijvolumestroom en het doorstroomoppervlak van geulen in een open zeearm wordt door RWS ingeschat dat het oppervlak van de stroomvoerende geulen in het Oosterscheldebekken in de evenwichtssituatie ca. 25% kleiner zou kunnen zijn dan in de huidige situatie. Dit correspondeert met een zandvolume van $400 \cdot 10^6$ à $600 \cdot 10^6$ m³.

Uit observaties blijkt dat de grote zandplaten in de Oosterschelde afkalven en tevens vlakker en lager worden. Het geërodeerde materiaal wordt in de ondiep-water gebieden nabij de platen afgezet, en komt mogelijk uiteindelijk ook in de diepe geulen terecht. Het intergetijdengebied dat reeds door de compartimentering en de kleinere getijslag was verkleind, neemt door erosie van de plaatranden en afvlakking en verlaging van de hogere plaatdelen (met als gevolg een kortere droogvalduur) verder af. Dit gaat ten koste van het beschikbare droog-nat oppervlak voor foeragerende vogels en reduceert het leefgebied voor sommige bodemorganismen (die als voedselbron dienen voor vogels), ontwikkelingen die als ongewenst worden beschouwd.

Het achteruit gaan van de platen lijkt o.a. met een te geringe aanvoer van zand door de stormvloedkering heen te maken te hebben; ook wordt gedacht dat de stroomsnelheid in de Oosterschelde te laag is voor zandtransport naar de platen. In dit rapport is door middel van een quick scan nagegaan of en in welke mate zandaanvoer en stroomsnelheid kunnen worden vergroot door het treffen van maatregelen, die met de vormgeving van de stormvloedkering en zijn omgeving te maken hebben, dan wel die een verandering van het operationeel gebruik van de kering ten doel hebben. In concreto gaat het hierbij om: (i) maatregelen die een netto zandtransport vanuit de voordelta richting Oosterschelde bevorderen (opvullen en afdekken ontgrondingskuilen aan zeezijde), (ii) maatregelen die leiden tot een vergroting van de doorstroomcapaciteit van de kering (stroomlijning van pijlers en/of drempel met dorpels; openen stenen dam-aanzetten), en (iii) beheermaatregelen waarbij door manipulatie met groepen schuiven van de kering invloed uitgeoefend wordt op stromings- en zandtransportpatronen.

De achterliggende vraag, namelijk hoe het proces van het achteruit gaan van de platen precies verloopt en wat daarbij de belangrijkste invloedsfactoren zijn, wordt niet in dit rapport behandeld. In feite is het proces van opbouw en afbraak van platen ook niet in detail bekend; er is en er wordt overigens wel onderzoek naar gedaan. Mogelijk is de reductie van het verticale getij op de Oosterschelde (inclusief het afsluiten voor stormvloeden) de dominante invloedsfactor voor de geconstateerde platenachteruitgang: de getijreductie kan oorzaak zijn van een geringere zandaanvoer tot aan en boven de platen (minder opbouw) en van een meer geconcentreerde golfaanval op de plaatranden (meer afbraak).

Het vergroten van de doorstroomcapaciteit van de kering (grotere getijslag) zou dan een adequate maatregel kunnen zijn om het afbraakproces enigszins te temperen.

Een belangrijke vraag is ook of de stroomsnelheden in het Oosterscheldebekken in de huidige situatie groot genoeg zijn om zand te kunnen transporteren. Uit metingen blijkt dat dit in het westelijke deel van het Oosterscheldebekken tijdens delen van de getijdencyclus inderdaad het geval is (verticaalgemiddelde snelheid U ruim hoger dan 0,4 à 0,6 m/s). In het oostelijke deel van het Oosterscheldebekken zijn de stroomsnelheden minder hoog, zodat het zandtransport daar geringer zal zijn.

Er zijn daarnaast metingen en studies uitgevoerd die ten doel hadden om vast te stellen of er bij het Oosterscheldebekken in de huidige situatie sprake is van netto zandimport dan wel zandexport. De uitkomst van de analyses was evenwel niet erg éénduidig. Het lijkt niettemin aannemelijk dat er per saldo zand van de voordelta naar de Oosterschelde wordt getransporteerd, waarschijnlijk in geringe hoeveelheid en mogelijk voornamelijk langs de randen van de stroomgeulen.

5.2 Beoordeling maatregelen

Door middel van een quick scan is nagegaan of de door RWS geselecteerde maatregelen ter vergroting van het zandtransport door de kering naar de Oosterschelde en / of ter vergroting van het getij en de getijdestroomsnelheid op de Oosterschelde effectief zijn. De vervolgvraag, namelijk of het effect van deze maatregelen de platenopbouw ten goede komen, wordt in deze quick scan niet beantwoord.

In overleg met vertegenwoordigers van RWS zijn de kosten van uitvoering van de maatregelen afgeschat (prijspeil 2007, exclusief btw). Ter vergelijking worden hier de kosten van zandsuppletie genoemd. Het gaat daarbij om de hoeveelheid zand die nodig is om de zandhonger van de Oosterschelde te stillen. De kosten van aanvoer van zand uit de voordelta via persleidingen naar de Oosterschelde worden geraamd op 3 à 6 euro per m^3 . Bij een totale benodigde aanvoer van $400 \cdot 10^6$ à $600 \cdot 10^6 m^3$ zand bedragen de kosten van zandsuppletie dus € $1,2 \cdot 10^9$ à € $3,6 \cdot 10^9$. Dit bedrag is aanzienlijk hoger dan de bedragen die hieronder bij de verschillende maatregelen worden genoemd.

Opvullen en afdekken ontgrondingskuilen aan zeezijde

Aan weerszijden van de kering zijn naast de bodemverdediging ontgrondingskuilen ontstaan. Het denkbeeld dat deze ontgrondingskuilen werken als zandvang, als gevolg waarvan transport van zand door de kering heen in belangrijke mate wordt tegengegaan, lijkt realistisch. De kering met zijn relatief hoge drempel en dorpels vormt zelf hoogstwaarschijnlijk geen belemmering voor transport van zand door de kering. Wanneer het zandvangdenkbeeld klopt is het (gedeeltelijk) opvullen en afdekken van de ontgrondingskuilen *aanzijde* van de kering naar verwachting een goede maatregel om het zandtransport naar de Oosterschelde te bevorderen.

De kosten van (gedeeltelijk) opvullen en afdekken van de ontgrondingskuil aan zeezijde van de kering zijn afhankelijk van de methode die wordt toegepast.

Wanneer gewerkt wordt met geocontainers (grote kunststof zakken gevuld met zand) bedragen de kosten ca. 15 à 25 euro per m^3 . Bescherming met bijvoorbeeld stortsteen is dan niet meer nodig.

Wanneer de kuil wordt gevuld met zand dat via persleidingen wordt aangevoerd, dan bedragen de kosten 3 à 6 euro per m³. Het zand dient dan nog afgedekt te worden, bijvoorbeeld met een laag stortsteen met een laagdikte van 0,5 m (0,5 m³ steen per m² = 1 ton / m²). De kosten van stortsteen bedragen ca. 30 euro / ton, inclusief aanbrengen.

Wanneer – als bovengrens voor de kostenschatting – het gehele gebied met ontgrondingskuilen zou worden opgevuld dan bedragen de kosten:

Geocontainers: € 60.10⁶ à € 100.10⁶.

Zand met stortsteen afdeklaag: € 54.10⁶ à € 66.10⁶.

Wanneer slechts een deel van de ontgrondingskuil wordt opgevuld en afgedekt zijn de kosten uiteraard naar rato van het verdedigde oppervlak kleiner. Voor een proefvak langs de rand van een ontgrondingskuil, bijvoorbeeld in de Roompot langs de zuidelijke rand van de stroomgeul, met lengte van 500 m, breedte van 300 m en opvuldiepte van gemiddeld 2 m, bedragen de kosten van vullen met zand en afdekken met stortsteen: € 5,4.10⁶ à € 6,3.10⁶.

De maatregel zou gefaseerd kunnen worden uitgevoerd, te beginnen met een proeflocatie in de Roompot, en dan met name gericht op de zuidzijde van de ontgrondingskuil, omdat langs de zuidelijke geulrand mogelijk op dit moment al zand naar de Oosterschelde wordt getransporteerd. Het effect dient bij uitvoering continu door middel van metingen te worden gevolgd. In de proeffase zou bij zware golfcondities ook het effect van sluiten van de centrale schuiven van de kering en het open laten van de randschuiven op het zandtransport door de kering kunnen worden nagegaan (zie ook hierna onder ‘manipulatie met de schuiven van de kering’).

Gezien de hoge kosten van de maatregel en de onzekerheid ten aanzien van de werking en de schaal waarop de maatregel dient te worden toegepast, wordt geadviseerd om eerst onderzoek te doen. Dit onderzoek zou uit de volgende stappen kunnen bestaan:

- Analyseer alle thans beschikbare gegevens (metingen, rapporten etc.) om een beter inzicht te verkrijgen in de huidige situatie voor wat betreft zandtransport en zandimport / zandexport van de Oosterschelde.
- Voer aanvullende in-situ metingen uit en stel de huidige zandtransportsituatie voor de kering vast.
- Beoordeel het effect van opvullen en afdekken van (delen van) de ontgrondingskuil aan zeezijde van de kering, en stel vast hoe groot het te behandelen gebied moet zijn. Hiertoe is principe-onderzoek door middel van numerieke simulaties (met ondersteuning door middel van metingen in een eenvoudig schaalmodel) gewenst.

In Paragraaf 4.1.2 wordt een plan van aanpak voor het onderzoek gepresenteerd.

Vergroting van de doorstroomcapaciteit van de kering

Nagegaan is of de stormvloedkering zodanig kan worden gestroomlijnd dat een significant grotere doorstroomcapaciteit wordt verkregen.

De doorstroomopeningen in de kering zijn rechthoekig van vorm (bijna spleetvormig vanwege de grote breedte/hogte verhouding) en zijn hoog in de kering gelegen. Bij

afstroming zullen de platte stralen uit de openingen verwijderen (vooral in verticale zin); hierbij ontstaat veel energieverlies, hetgeen nadelig is voor de doorstroomcapaciteit van de kering. Het energieverlies kan worden verminderd door de stralen minder abrupt dan in de huidige situatie te laten verwijderen. Daartoe kunnen de drempelaluds aan beide zijden van de kering worden verflauwd tot een helling van ca. 1:10. Naar verwachting reduceert dit de verwijdingsverliezen tot maximaal 15%, hetgeen correspondeert met een tot 10% grotere doorstroomcapaciteit.

In de kostenraming voor deze grootschalige maatregel wordt er van uitgegaan dat de verflauwing van de taluds kan worden gerealiseerd door middel van geocontainers. Extra bescherming door middel van stortsteen is daarbij waarschijnlijk niet nodig. De kosten van aanbrengen van de geocontainers bedragen ca. 15 à 25 euro per m³. De totale kosten van deze maatregel bedragen aldus € 40.10⁶ à € 70.10⁶.

Kleinschaliger aanpassingen zouden kunnen bestaan uit het beter stroomlijnen van de drempel met dorpels en de pijlers. Ingeschat wordt dat de doorstroomcapaciteit hierdoor met maximaal 5% toeneemt, maar waarschijnlijk is de toename geringer. De kosten van stroomlijnen van de drempel (aanvullen drempel met stortsteen 1 – 3 ton tot net onder dorpelbalkniveau, beide zijden van de kering) bedragen naar schatting ca. € 30.10⁶. Wanneer met geocontainers gewerkt zou kunnen worden zijn de kosten lager, namelijk € 4.10⁶ à € 7.10⁶. De kosten van stroomlijnen van de pijlers (opvulstukken aanbrengen, pijlerkoppen afronden) worden geraamd op minimaal € 100.10⁶.

Nagegaan is ook of de breukstenen dam aanzetten kunnen worden geopend. Dit lijkt inderdaad het geval te zijn, mits grondmechanische overwegingen zich daar niet tegen verzetten, en stromingsveranderingen lokaal bij de oevers acceptabel zijn. De bruto doorstroomopening van de kering beneden de NAP-lijn neemt daardoor met ca. 1100 m² toe tot ca. 19.000 m². Het verticale getij bij Yerseke neemt als gevolg van de 6% grotere opening met enkele procenten toe.

Het openen van de breukstenen dam aanzetten vereist – naast het weghalen van de breukstenen dammen zelf – een volledige herstructurering van de landhoofden, het aanbrengen van dorpelbalken en bovenbalken, het aanbrengen van een drempel, en het plaatsen van hefschuiven met bewegingsinrichting. De kosten hiervan zijn hoog en worden minimaal op € 100.10⁶ geschat.

Als alternatief zou de doorlatendheid van de breukstenen dammen kunnen worden vergroot door toepassing van holle blokken in de kern van de dammen. De grotere doorlatendheid zal bij open kering waarschijnlijk slechts een beperkt effect hebben op de stroming door de kering (de weerstand van de open dammen is nog steeds relatief groot), maar mogelijk wordt er wel wat meer zand langs de randen getransporteerd. Bij gesloten kering lekken de dammen en neemt de totale lek door de kering flink toe. Onduidelijk is evenwel of de breukstenen dammen na verloop van tijd dichtslibben.

Gezien de hoge kosten van de doorstroom-bevorderende maatregelen en de onzekerheden in de gevolgen van de ingreep, wordt geadviseerd om eerst onderzoek uit te voeren.

Dit onderzoek dient zicht te richten op de directe effecten van vergroting van de doorstroomcapaciteit (getijbeweging op de Oosterschelde), op de vergroting van de afvoercoëfficiënt van de kering in geval van realisatie van de maatregelen, op sterkte van bodem- en oeververdedigingen, en op veranderingen in (lokale) stromingspatronen en de daarmee samenhangende veranderingen in het zandtransport en de lokale erosie- en

sedimentatieprocessen. Tevens gaat het om de effecten in meer algemene zin op het ecosysteem Oosterschelde.

In Paragraaf 4.2.2 wordt een plan van aanpak voor dit onderzoek gepresenteerd.

Manipulatie met schuiven van de kering

Onder manipulatie met de schuiven van de kering wordt verstaan het op weloverwogen wijze gesloten houden van groepen schuiven gedurende delen van de getijcyclus, met als oogmerk stromingspatronen en zandtransport te beïnvloeden. Gedacht kan worden aan het sluiten van delen van de kering bij vloed en sluiten van andere delen bij eb (ter verkrijging van andere circulatie- en zandtransportpatronen), of het sluiten van centrale delen van de kering bij vloed (ter bevordering van zandtransport langs de randen van de geulen naar binnen toe).

De effecten van manipulatie met de schuiven kunnen door middel van numerieke 2DH-stromingsberekeningen worden vastgesteld. Eén ongunstig effect is op voorhand duidelijk: door de reductie van de doorstroomopening zal het getijvolume afnemen.

De afvoercoëfficiënt van de (eventueel aangepaste) kering dient als functie van waterstanden, plaats in de kering etc. bekend te zijn (want dit is een invoergrootheid voor de berekening).

In Paragraaf 4.3.2 wordt een plan van aanpak voor het uitvoeren van numerieke stromingsberekeningen en zandtransportberekeningen gepresenteerd.

5.3 Alternatieven

De achterliggende gedachte bij boven uitgewerkte maatregelen is dat een vergroting van de getijbeweging op het Oosterscheldebekken en een vergroting van de zandaanvoer naar de Oosterschelde leidt tot een gunstiger situatie voor de platen: de opbouw van de platen wordt versterkt en de afbraak wordt getemperd. Of deze effecten inderdaad in voldoende mate zullen optreden is evenwel nog de vraag, want dit is tot op heden niet aangetoond. Het is niet ondenkbaar dat het aangevoerde zand alleen in de geulen terecht komt (waardoor de geulbodem omhoog komt), waarna – als gevolg van de dan hogere stromingsweerstand van de geulen – de getijbeweging op het Oosterscheldebekken weer reduceert. Het nuttige effect van de maatregelen voor de platen zal dan per saldo gering zijn. Het wordt daarom sterk aanbevolen om eerst de complexe relatie tussen zandaanvoer, getijbeweging en platenopbouw/afbraak (verder) te onderzoeken. Ook zal aandacht nodig zijn voor de vraag wat een verandering in getijbeweging en morfologie betekent voor het ecosysteem onder water.

Alternatieve maatregelen in de sfeer van bescherming van de bestaande platen (door middel van stenen dammen aan de golfzijde, lokale zandsuppletie, mossel- en oesterbanken, vegetatie) of ondersteuning bij de vorming van nieuwe platen (in bijvoorbeeld de voordelta) zijn mogelijk te prefereren en vergen wellicht ook minder grote investeringen.

Op dit moment wordt ook nagedacht over het doorspoelen van het Volkerak-Zoommeer met zout water vanuit de Oosterschelde (het water wordt daarbij naar de Westerschelde afgelaten). Deze maatregel wordt overwogen om de sterke algengroei in de zomer op het Volkerak-Zoommeer tegen te gaan. Wanneer de maatregel in uitvoering wordt genomen zal er meer water door de kering het Oosterscheldebekken instromen, hetgeen mogelijk gunstig zou kunnen uitwerken voor de platenproblematiek. Dit zou door middel van numerieke stromingssituaties kunnen worden nagegaan.

6 Referenties / literatuur

Brinke, W.B.M. ten, 1990

‘Zandtransport door de stormvloedkering bij storm’

Rijksuniversiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie, rapport GEOPRO 1990.05, juni 1990

Lauchlan, C.S., 2001

‘Sediment transport over steep slopes’

Delft University of Technology, report experimental investigation, August 2001

M1001-1, 1986

‘Stormvloedkering Oosterschelde; eindsituatie pijlerdam; $\mu A = 11.500 \text{ m}^2$ en $\mu A = 20.000 \text{ m}^2$; stroombeeld en ontgrondingsonderzoek’

WL | Delft Hydraulics, verslag schaalmodelonderzoek, maart 1986

M1001-18, 1986

‘Stormvloedkering Oosterschelde; eindsituatie pijlerdam; $\mu A = 17.500 \text{ m}^2$; stroombeeld-onderzoek’

WL | Delft Hydraulics, verslag schaalmodelonderzoek, juli 1986

M1447-1, 1979

‘Stormvloedkering Oosterschelde; de invloed van dorpelbalken, stromingsbalk en kopvorm van de pijlers op de afvoercoëfficiënt’

WL | Delft Hydraulics, verslag schaalmodelonderzoek, april 1979

M1447-2, 1979

‘Stormvloedkering Oosterschelde; bepaling afvoercoëfficiënt monolietpijlers’

WL | Delft Hydraulics, verslag schaalmodelonderzoek, februari 1979

M1566, 1980

‘Stormvloedkering Oosterschelde; aanvullend onderzoek afvoercoëfficiënten en maat-regelen ter verbetering van de afvoer’

WL | Delft Hydraulics, verslag schaalmodelonderzoek, mei 1980

Oosterlaan, W.M.A., Zagers, L.M., 1996

‘Veranderingen in de hydrodynamiek en morfologie van het Oosterscheldebekken in de periode 1990-1995’

Universiteit Utrecht, Inst. voor Marien en Atmosferisch Onderzoek, rapport R96-22, november 1996

Q635, 1988

‘Stormvloedkering Oosterschelde; een overzicht van methodieken voor voorspelling en bewaking van ontgroningen langs de rand van de bodembescherming’

WL | Delft Hydraulics, verslag onderzoek, januari 1988

Q4052, 2005

‘Stroming over een kribsectie’

WL | Delft Hydraulics, verslag onderzoek, november 2005

R1367, 1980

‘Morfologie voordelta Oosterscheldemonnd’

WL | Delft Hydraulics, verslag onderzoek, augustus 1980

RWS-1

‘Ontwerpnota stormvloedkering Oosterschelde. Boek 1: Totaalontwerp’
Min. van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat (niet gedateerd)

RWS-2

‘Ontwerpnota stormvloedkering Oosterschelde. Boek 2: De waterbouwkundige werken’
Min. van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat (niet gedateerd)

RWS-3

‘Ontwerpnota stormvloedkering Oosterschelde. Boek 3: De betonwerken’
Min. van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat (niet gedateerd)

RWS-RIKZ, 2000-1

‘Zandverliezen in het Nederlandse kuststelsel. Advies voor dynamisch handhaven in de 21^e eeuw’
Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee / RIKZ, rapport RIKZ/2000.36, juni 2000

RWS-RIKZ, 2000-2

‘Delta 2000. Inventarisatie huidige situatie Deltawateren’
Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee / RIKZ, rapport RIKZ/2000.047, oktober 2000

RWS-RIKZ, 2001

‘Bodemdieptegegevens van het Nederlandse kuststelsel. Beschikbare digitale data en een overzicht van aanvullende analoge data.’
Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee / RIKZ, rapport RIKZ/2001.041, oktober 2001

RWS-RIKZ, 2003-1

‘Veranderende draagkracht van de Oosterschelde voor kokkels’
Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee / RIKZ, rapport RIKZ 2003.043, november 2003

RWS-RIKZ, 2003-2

‘Verkenning draagkracht Oosterschelde’
Rijksinstituut voor Kust en Zee / RIKZ, rapport RIKZ 2003.049, november 2003

RWS-RIKZ en RIVO, 2003

‘Veranderende draagkracht van de Oosterschelde voor kokkels’
Rijksinstituut voor Kust en Zee / RIKZ, rapport RIKZ 2003.043, november 2003

RWS-RIKZ, 2004

‘Verlopend getij. Oosterschelde, een veranderend natuurmonument’
Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee / RIKZ, rapport RIKZ 2004.028, december 2004

RWS-RIKZ, 2005

‘Zandhonger Oosterschelde, een verkenning naar mogelijke maatregelen’
Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee / RIKZ, werkdocument RIKZ/ZDA/ 2005.802w, maart 2005

RWS-RIZA, 2006

‘Meerkoeten, zeeduivels en rivierkreeften. Rijkswaterstaat werkt aan het herstel van de grote wateren’
Rijkswaterstaat - RIZA, rapport RIZA 2006.010, mei 2006

Stolk, A., 1989

‘Zandsysteem kust, een morfologische karakterisering’
Rijksuniversiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie, rapport GEOPRO 1989.02, 1989

Tank, F.T.G., 1995

‘Bodemligging Galgeplaat, veranderingen in de morfologie tussen 1987 en 1994’

Rijksuniversiteit Utrecht, Vakgroep Fysische Geografie, rapport IMAU R95-2, januari 1995

WL, 1976

‘Discharge measurement structures’

WL | Delft Hydraulics, publication no 161, may 1976

WL, 1986

‘GEOMOR, evaluatie vergelijking metingen en berekeningen Galgeplaat’

WL | Delft Hydraulics, verslag onderzoek H253/R1914, oktober 1986

WL / RWS, 1989

‘Storm Surge Barrier Eastern Scheldt: Evaluation of water movement studies for design and construction of the barrier’

WL | Delft Hydraulics and Rijkswaterstaat, WL-report Z88 and RWS-report PEGESS-N-89011, July 1989