

**Stormvloedkering
Oosterschelde: ontwikkeling
ontgrondingskuilen en stabiliteit
bodembescherming,
Hoofdrapport**



**Stormvloedkering Oosterschelde:
ontwikkeling ontgrondingskuilen en
stabiliteit bodembescherming,**

Hoofdrapport

Vertrouwelijk tot en met 31 december 2012

Theo Stoutjesdijk
Marco de Kleine
John de Ronde
Tim Raaijmakers

1206907-005

Titel

Stormvloedkering Oosterschelde: ontwikkeling ontgrondingskuilen en stabiliteit bodembescherming, Hoofdrapport

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat Waterdienst	1206907-005	1206907-005-GEO-0004	35

Trefwoorden

Stormvloedkering Oosterschelde, databeheer, morfologie, ontgrondingskuilen, hellinginstabiliteit

Samenvatting




Naast de bodembescherming van de Stormvloedkering in de Oosterschelde zijn inmiddels aanzienlijke ontgrondingen ontstaan. Rond deze ontgrondingskuilen zijn zettingsvloeiingen opgetreden, waarbij delen van de bodembescherming zijn beschadigd. De ontgrondingen in de Oosterschelde zorgen mogelijk ook voor problemen met de nabij gelegen waterkeringen. Aan Deltares is opdracht verleend om op korte termijn antwoord te geven op de volgende vragen:

- Voldoet de huidige beheerstrategie, mits goed opgevolgd, voor de korte termijn of zijn er aanpassingen noodzakelijk?
- Welke aanbevelingen worden gedaan om voor de middellange en lange termijn te komen tot een optimale beheerstrategie?

In vier deelprojecten, te weten Databeheer, Grootschalige morfologie, Ontgrondingskuilen en Hellinginstabiliteit, zijn onderzoeken uitgevoerd. Op basis daarvan is dit hoofdrapport samengesteld. Eerst wordt de context neergezet. Hierna worden de conclusies en aanbevelingen uit de deelonderzoeken gepresenteerd. Ten slotte worden uit het totaalbeeld dat hieruit ontstaat de voornaamste conclusies en aanbevelingen gedestilleerd. De conclusie is dat met de noodmaatregelen en nog uit te voeren bestortingen voor de korte termijn voldoende aan beheersbaarheid wordt teruggewonnen; tevens worden enkele adviezen gegeven. Voor de langere termijn is het beeld dat de ontgrondingskuilen nog niet de maximale diepte bereikt hebben. Daarom is de aanbeveling om naast het bestorten van te steile taluds ook andere mogelijkheden te onderzoeken om een keuze te kunnen maken voor een lange termijn beheerstrategie.

Referenties

Opdrachtbrief RWSWD-2012/1937

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
01	nov. 2012	ir. T.P. Stoutjesdijk		Ir. H.J. Verheij		ir. L. Voogt	
		Drs. M.P.E. de Kleine					
		Ir. J.G. de Ronde					
		Ir. T.C. Raaijmakers					

Status

definitief

Vertrouwelijk tot en met 31 december 2012

Inhoud

1	Introductie	1
1.1	Probleembeschrijving	1
1.2	Aanpak	1
1.3	Definities en gebiedsbeschrijving	2
1.4	Bevindingen deelstudies op hoofdlijnen	3
2	Conclusies en aanbevelingen databeheer	7
2.1	Algemeen	7
2.2	Conclusies	7
2.3	Aanbevelingen techniek	8
2.3.1	Bestoringen	8
2.3.2	Geologie	8
2.3.3	Randbalk	9
2.4	Aanbevelingen databeheer en monitoring	9
2.4.1	Databeheer en tools	9
2.4.2	Monitoring en metingen	9
3	Conclusies en aanbevelingen grootschalige morfologie	11
3.1	Algemeen	11
3.2	Conclusies ten aanzien van de huidige situatie	11
3.3	Conclusies ten aanzien van toekomstige situatie	12
3.4	Aanbevelingen morfologie	12
3.5	Aanbeveling ten aanzien van de monitoring en beheerstrategie	13
4	Conclusies en aanbevelingen ontgrondingskuilen	15
4.1	Algemeen	15
4.2	Conclusies	15
4.2.1	Roompot-West	15
4.2.2	Roompot-Oost	16
4.2.3	Schaar-West	17
4.2.4	Schaar-Oost	17
4.2.5	Hammen-West	17
4.2.6	Hammen-Oost	17
4.2.7	Ontgrondingsontwikkeling in het algemeen	18
4.2.8	Beheers- en onderhoudsstrategie	19
4.2.9	Beschermingsmethoden	20
4.3	Aanbevelingen ontgroningen	20
4.3.1	Verbeteren van ontgrondingsvoorspellingen	20
4.4	Aanbevelingen beheerstrategie	21
4.4.1	Beheers- en onderhoudsstrategie	21
4.4.2	Alternatieve oplossingen	21
5	Conclusies en aanbevelingen criteria hellinginstabiliteit	23
5.1	Algemeen	23
5.2	Conclusies	23
5.2.1	Conclusies bathymetrische informatie	23
5.2.2	Conclusies verwekings- en bresvloeiing	23

5.2.3	Conclusies veiligheidsfilosofie ontwerp en beheer	24
5.2.4	Randen bodembescherming	25
5.2.5	Conclusies Noord-Bevelandse oever	26
5.2.6	Conclusies zijhellingen	26
5.2.7	Conclusies bestorting	27
5.3	Aanbevelingen korte termijn	27
5.3.1	Bathymetrische informatie	27
5.3.2	Verwekings- en bresvloeiing	28
5.3.3	Veiligheidsfilosofie ontwerp en beheer	28
5.3.4	Randen bodembescherming	28
5.3.5	Noord-Bevelandse oever	29
5.3.6	Plaatranden	29
5.3.7	Bestorting	29
5.4	Aanbevelingen langere termijn	29
6	Advies korte en langere termijn	31
6.1	Inleiding	31
6.2	Advies voor de korte termijn	31
6.3	Advies voor de langere termijn	32
7	Literatuur	35
Bijlage(n)		
A	Technisch inhoudelijke vragen van RWS bij waterbouw en ontwerp	A-1

1 Introductie

1.1 Probleembeschrijving

Bij de aanleg van de Stormvloedkering Oosterschelde is aan weerszijden van de kering bodembescherming aangebracht over een breedte van 550 meter (Schaar) en 650 meter (Hammen en Roompot). Voorzien werd destijds dat aan de randen van de bodembescherming ontgrondingskuilen zouden ontstaan. De beheerfilosofie was dat de aanzethellingen van de ontgrondingskuilen in de richting loodrecht op de as van de kering bestort zouden worden als de kuil te steil zou worden over een te grote hoogte. Op deze manier werd de kans op zettingsvloeiingen van deze aanzethellingen beheersbaar geacht.

In 2012 werd een aantal constatering gedaan:

- Op een aantal plaatsen is de rand van de bodembescherming verzakt, beschadigd of zelfs verdwenen.
- De beheerfilosofie van bewaken en bestorten van de aanzethellingen van de ontgrondingskuilen is de laatste jaren niet meer consequent doorgevoerd.
- De ontgrondingskuil langs de Noord-Bevelandse oever is inmiddels dusdanig diep dat aan de Oosterscheldekant van de stormvloedkering een mogelijk bedreigende situatie voor de waterkering zou kunnen ontstaan in geval van een grootschalige instabiliteit.

Deze constatering zijn voor Rijkswaterstaat aanleiding geweest in mei/juni 2012 noodbestortingen uit te voeren in de Roompot Oostzijde. Ook in de rest van 2012 en in 2013 zijn bestortingen voorzien om de beheersbaarheid van de situatie te garanderen.

Daarnaast is aan Deltares is opdracht verleend om op korte termijn antwoord te geven op de volgende vragen:

- Voldoet de huidige beheerstrategie voor de korte termijn of zijn er aanpassingen noodzakelijk?
- Welke aanbevelingen worden gedaan om voor de middellange en lange termijn te komen tot een optimale beheerstrategie?

1.2 Aanpak

Om antwoord te kunnen geven op de gestelde vragen is inzicht nodig in de morfologische, hydraulische en geotechnische processen die er spelen. Uitdagend is dat dit geïntegreerde vraagstukken zijn, aangezien grootschalige morfologische processen invloed kunnen hebben op de hydraulische belasting (stroomsnelheden) rondom de kering, waarmee de lokale ontwikkeling van de ontgrondingen kan worden beïnvloed. Omgekeerd kan de vraag gesteld worden tot welke afstand de ontwikkeling van ontgrondingen invloed heeft op de grootschalige morfologie. Daarnaast is er veel interactie tussen de ontwikkeling van de ontgrondingskuilen en de hellingstabiliteit. De zettingsvloeiingen worden veelal getriggerd door erosie- en aanzandingsprocessen. Omgekeerd geldt dat als er een zettingsvloeiing optreedt dit weer invloed heeft op het bodemniveau van de ontgrondingskuil die zonder de wetenschap dat die vloeiing is opgetreden wellicht moeilijk verklaarbaar zijn. Zonder een geïntegreerd beeld is het geheel lastig te begrijpen.

Verder is het zo dat met name de grootschalige morfologie en de studie naar de ontgrondingskuilen zicht bieden op toekomstige ontwikkelingen. Zonder een beeld van de te

verwachten toekomstige ontwikkelingen is het doen van aanbevelingen voor de beheerstrategie vrijwel ondoenlijk.

Gegeven de korte doorlooptijd moest de studie zich hoofdzakelijk baseren op bestaande gegevens. In beperkte mate zijn aanvullende metingen gedaan. Dit betekende dat er een apart accent lag op intensieve 'data-mining' (verzamelen beschikbare gegevens) en deze data om te zetten in voor de deelstudies direct bruikbare invoergegevens. Verder is besloten de deelstudies naar grootschalige morfologie, ontwikkeling van ontgrondingskuilen en geotechnische hellinginstabiliteit in beginsel apart uit te voeren (uiteraard met uitwisseling van gegevens en bevindingen) en hier als laatste activiteit een integratieslag over te doen (dit hoofdrapport). De vier deelstudies zijn apart gerapporteerd:

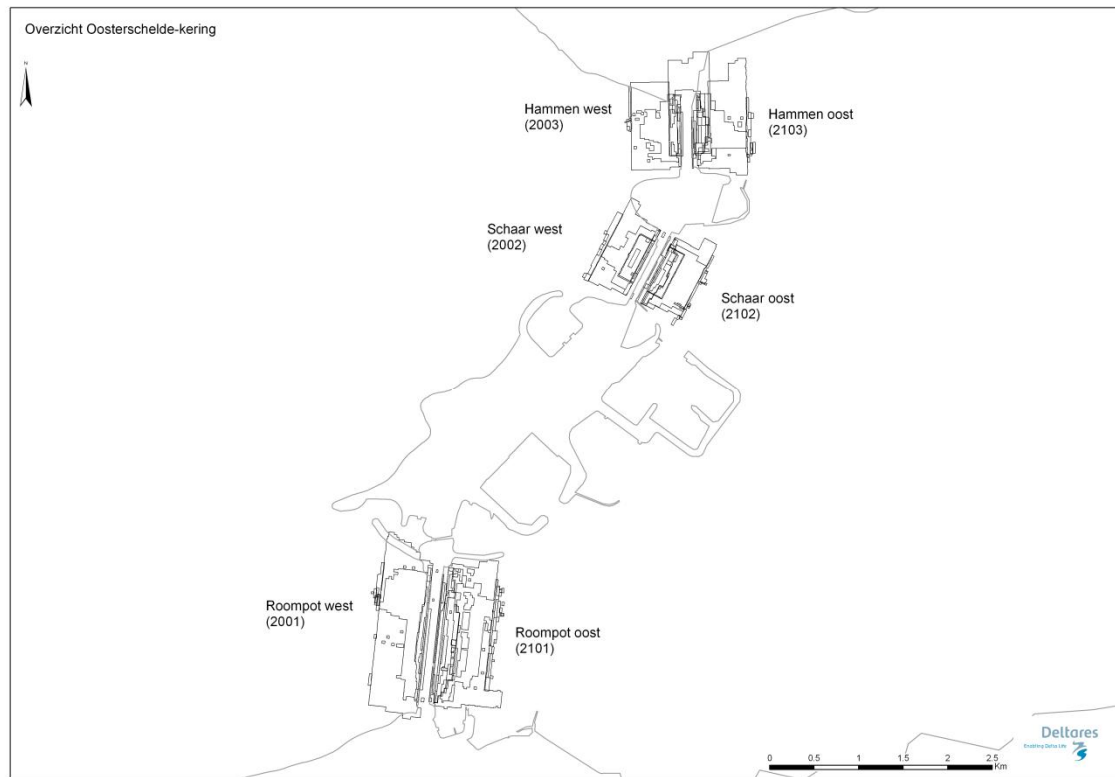
- Stormvloedkering Oosterschelde: ontwikkeling ontgrondingskuilen en stabiliteit bodembescherming, deelrapportage Databeheer en Monitoring.
- Stormvloedkering Oosterschelde: ontwikkeling ontgrondingskuilen en stabiliteit bodembescherming, deelrapportage Morfologie.
- Stormvloedkering Oosterschelde: ontwikkeling ontgrondingskuilen en stabiliteit bodembescherming, deelrapportage Ontgrondingen.
- Stormvloedkering Oosterschelde: ontwikkeling ontgrondingskuilen en stabiliteit bodembescherming, deelrapportage Hellinginstabiliteit.

De conclusies en aanbevelingen van de deelonderzoeken zijn opgenomen in hoofdstukken 2 tot en met 5 van dit rapport. Deze hoofdstukken geven veel detailinformatie. In hoofdstuk 6 worden, het geheel overziende, antwoorden geformuleerd op de gestelde onderzoeksvragen en worden de voornaamste conclusies en aanbevelingen op een rij gezet. De lezer die vooral geïnteresseerd is in de bevindingen op hoofdlijnen kan overwegen na dit inleidende hoofdstuk direct door te gaan naar hoofdstuk 6.

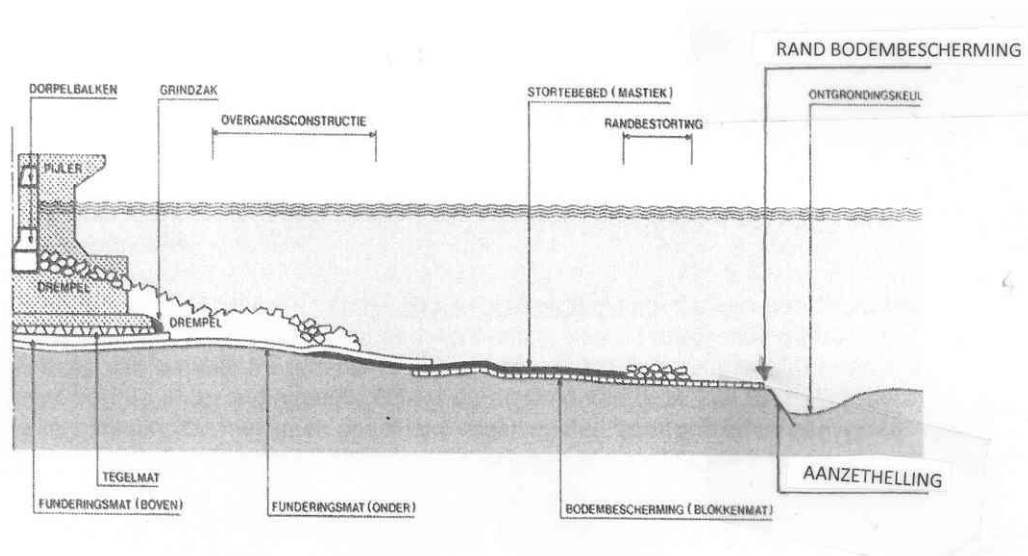
1.3 Definities en gebiedsbeschrijving

In dit rapport wordt veelvuldig gerefereerd aan bepaalde locaties waar een gebeurtenis heeft plaatsgevonden, bijvoorbeeld 'Roompot Oost Noordzijde' of 'rand bodembescherming'. Voor de leesbaarheid is het dienstig hierbij een beeld voor ogen te hebben waar deze locaties zich bevinden. In figuren 1.1 en 1.2 zijn de locaties en begrenzingen c.q. begrippen aangegeven.

Een onderscheid wordt gemaakt in 'aanzethellingen' en 'zijhellingen'. Met aanzethelling wordt de helling langs de rand bodembescherming bedoeld in de richting loodrecht op de as van de stormvloedkering. De zijhellingen zijn de hellingen aan weerszijden van de ontgrondingskuil. Deze zijhellingen hebben een oriëntatie evenwijdig aan de as van de stormvloedkering. Verder worden 'Oosterscheldekering' en 'Rand bodembescherming' vaak afgekort tot OSK en RABO.



Figuur 1.1 Bovenaanzicht van het gebied



Figuur 1.2 Doorsnede met begrippen

1.4 Bevindingen deelstudies op hoofdlijnen

In hoofdstuk 2 tot en met 5 worden de conclusies en aanbevelingen gegeven die voortkomen uit de deelstudies. Om deze te kunnen 'plaatsen' is een overzicht nuttig van wat er op hoofdlijnen uit de deelstudies is gekomen.

De uitgevoerde data-mining heeft veel waardevol materiaal ontsloten, met name ten aanzien van de bathymetrie. Er is echter nog veel meer materiaal (ook veel analogo materiaal) beschikbaar. Ook zijn gerichte aanbevelingen gedaan om aanvullend nuttige gegevens te gaan verzamelen, bijvoorbeeld over de aanwezigheid en staat van reeds uitgevoerde bestortingen.

Uit de studie naar de grootschalige morfologie blijkt dat de binnendelta en de buitendelta weliswaar morfologisch allerm minst in evenwicht zijn, maar dat dit de afgelopen decennia niet heeft geleid tot significante verschillen in de stroomsnelheidsverdeling rondom de stroomgaten bij de Oosterscheldekering. Dit is ook voor de studie naar de ontgrondingskuilen een belangrijke uitkomst geweest. Er zijn wel aanwijzingen dat er morfologische ontwikkelingen gaande zijn met name bij de Hammen en de Roompot, waarbij het geulenpatroon geleidelijk verandert. Als die ontwikkelingen doorzetten kan er wel een situatie ontstaan waarbij de stroming door en achterlangs de kering anders wordt. Om hier tijdig op in te spelen dienen de grootschalige ontwikkelingen om de paar jaar opnieuw bekeken te worden.

De studie naar de ontwikkeling van de ontgrondingskuilen laat als verwachting voor 2050 zien dat de diepte van de ontgrondingskuilen zich door kan zetten tot aanzienlijk grotere dieptes (30 tot 40 meter toename van diepte in Hammen en Roompot ten opzichte van de huidige (2012) situatie). In deze voorspelling veroorzaken de dikte, diepteligging en erosiebestendigheid van aanwezige kleilagen grote onzekerheid (de voorspellingen variëren tussen slechts enkele meters verdieping in het gunstigste geval tot maximaal 55 meter verdieping in het ongunstigste geval). Naast de ontwikkeling in de diepte geeft de ontwikkeling van de zijhellingen (versteiling van het onderste deel van de helling en aanzanding aan de bovenzijde) voldoende verklaring voor opgetreden zettingsvloeiingen.

Het deelproject waarin gekeken is naar de opgetreden hellinginstabiliteiten en de daarvoor gestelde criteria leidt tot de conclusie dat de instabiliteiten vooral samenhangen met het ontstaan van steilere taludgedeelten, die vervolgens niet (tijdig) zijn gestabiliseerd met een bestorting. Dit kan gepaard zijn gegaan met het doorbreken en ondermijnd raken van kleilagen. Een criterium waarin geëist wordt dat hellingen niet steiler mogen worden dan 1 : 5 over 5 meter hoogte is ook bij de huidige taludhoogtes nog afdoende. Aanbevolen wordt te onderzoeken of criteria waarin rekening wordt gehouden met de totale taludhoogte nieuwe inzichten geven over de meest kritieke locaties langs de rand van de bodembescherming. Verder dient onderzocht te worden of de huidige beheersstrategie blijvend de meest optimale is gezien de voorspelde doorgaande ontwikkeling van de ontgrondingen. Bij de stabiliteit van de zijhellingen van de ontgrondingskuilen (hier gelden geen bestortingscriteria) is een afweging te maken of en tegen welke kosten maatregelen gerechtvaardigd zijn om instabiliteiten te voorkomen.

De veiligheid en standzekerheid van de stormvloedkering is niet in gevaar en is ook niet in gevaar geweest.

Voor de Noord-Bevelandse oever was eerder dit jaar het oordeel van deskundigen dat de veiligheid hier wel in het geding was. Hierop is een noodbestorting aangebracht. Het voornemen is nu om de noodbestorting verder uit te breiden tot aan de bodem van de ontgrondingskuil en (een deel van) de aangezande steile taludhelling te verwijderen. Hiermee is de veiligheid voor de korte termijn op een niveau gebracht dat overal elders in Zeeland en in Nederland voldoende veilig wordt geacht (volledig bestort talud). Het bijzondere is dat in de nabijheid van de stormvloedkering in de veiligheidsfilosofie in relatie tot de stormvloedkering veel strengere eisen worden gesteld aan de toelaatbare kans op een zettingsvloeiing richting de Noord-Bevelandse oever. Of wordt voldaan aan die strengere eis en of die eis terecht is

valt zonder nadere studie niet te zeggen. Vandaar dat is aanbevolen voor de langere termijn voor de Noord-Bevelandse oever een meer gedetailleerde studie naar restrisico en mogelijke maatregelen/beheerstrategie uit te voeren.

2 Conclusies en aanbevelingen databeheer

2.1 Algemeen

Het deelproject databeheer heeft betrekking op dataverzameling, databeheer en monitoring. De deelrapportage bestaat uit een beschrijving van de geïnventariseerde databestanden en de uitgevoerde dataverwerking en een korte beschrijving van de (geologische) opbouw van de ondergrond in het projectgebied. Daarnaast worden aanbevelingen gedaan op het vlak van databeheer, data analyse en monitoring.

Het grootste deel van de geanalyseerde data is afkomstig van Rijkswaterstaat Dienst Zeeland (DZL). De Singlebeam en Multibeam opnames van het OSK gebied zijn de zogenaamde detailmetingen. Deze metingen zijn uitgevoerd in de drie sluitgaten van de Oosterschelde (Roompot, Schaar, Hammen) in de directe omgeving van de kering zelf. Het oppervlak dat door deze metingen bedekt wordt varieert per jaar maar beslaat minimaal de 600 meter zone waarbinnen de matten liggen en een zone van 200 tot 500 meter daarbuiten. Deze opnames zijn twee tot vier keer per jaar uitgevoerd. Voor deze studie is gekozen om de eerste vlakdekkende set van ieder jaar verder te verwerken en te analyseren.

Het doel van de verwerking van de verschillende datasets was het creëren van een GIS systeem waarmee voor de overige deelprojecten de benodigde producten op een eenduidige en reproduceerbare manier geleverd kunnen worden, waarbij het belangrijk is dat de metagegevens en de kwaliteit van alle gebruikte datasets inzichtelijk zijn.

2.2 Conclusies

- Er is een grote bathymetrische (jaarlijkse) dataset verwerkt en beschikbaar voor diverse analyses. Er zijn nog meer data die niet verwerkt zijn en daarmee nog niet beschikbaar. Dit betreft historische data en diverse bathymetrische datasets die binnen een jaar zijn ingewonnen. Deze data zijn beschikbaar bij DZL maar nog niet verwerkt.
- Er is bij DZL veel relevante kennis beschikbaar, maar de beschikbare data en informatie zijn alleen toegankelijk voor een beperkt aantal experts van DZL.
- Niet alle partijen (o.a. DZL en Waterschap Scheldestromen) beschikken over dezelfde data, dit leidt tot onduidelijkheden en mogelijk misverstanden en miscommunicatie bij het ontstaan van calamiteiten en de daaraan gerelateerde discussies.
- De positie (in x, y en z) en de staat van de bestortingen is onvoldoende bekend, deze informatie is erg belangrijk bij het interpreteren en analyseren van de data. Daarbij is deze informatie ook belangrijk voor het vaststellen van de effectiviteit van de bestortingen.
- De interactie tussen zettingsvloeiingen en bestortingen is onduidelijk, op dit onderwerp is een aantal kennisvragen te formuleren. Waarneming is dat er sprake is van erosie van aangebrachte bestortingen en dat deze lokaal (ook in de vooroevers) verdwenen zijn.
- De ontgrondingsprocessen correleren sterk met de opbouw van de ondergrond. Het voorkomen van kleilagen, los gepakt zand en variaties in de samenstelling van de ondergrond zijn relevante factoren die momenteel onvoldoende in detail zijn meegenomen omdat de beschikbare ondergrond informatie niet toereikend is. Aanvullende informatie uit (analoge) archief gegevens en aanvullende metingen kunnen gebruikt worden om deze lacune te vullen.

- De huidige monitoringsstrategie lijkt voor het voorspellen van de stabiliteit van het Oosterscheldekering (OSK) gebied voldoende. Om meer inzicht in de waargenomen processen te krijgen zijn aanvullende metingen noodzakelijk. Het gebied dat momenteel bemeten wordt is voor dit doel te klein, het invloedsgebied van de ontgrondingskuilen en de vloeingen zou tot voorbij het diepste punt van de ontgrondingskuilen ingemeten moeten worden.
- De processen die plaatsvinden hebben een duidelijk 3D karakter, deze zijn in principe niet goed te begrijpen met een 2D benadering. Bij aanpassing van de bestaande criteria voor de monitoring zal rekening gehouden moeten worden met het 3D karakter van de processen. Analyse van profielen (parallel of loodrecht) op de kust en of de OSK zijn niet afdoende.
- Er lijken verschillen te zitten tussen de oevermetingen van het Waterschap en de detailmetingen van DZL. Deze zijn waarschijnlijk het gevolg van verschillen in de uitvoering van de opnames.
- Er zitten verschillen tussen de theoretische profielen en de waarden uit de bathymetrische opname van 1980. Het is niet duidelijk welke datasets de meest betrouwbare ligging van de aangebrachte bodembescherming weergeven. De verschillen kunnen deels het gevolg zijn van meeton nauwkeurigheden, maar het is ook mogelijk dat de randbalk zich op verschillende plekken door turbulentie en erosie 'ingegraven' heeft.

2.3 Aanbevelingen techniek

2.3.1 Bestortingen

De ligging en staat van de aangebrachte bestortingen is niet in voldoende mate bekend, verdere analyse van bestaande gegevens (ook beschikbare side scan sonar opnames) aangevuld met metingen dient te worden uitgevoerd om deze informatie in te winnen. Onderzocht zal moeten worden of naast de reeds toegepaste meettechniek er aanvullende technieken beschikbaar zijn die deze informatie kunnen leveren. Een korte veldtest met de inzet van verschillende technieken kan veel informatie opleveren. Waarschijnlijk levert een combinatie van technieken de beste resultaten. Variatie-analyse van multibeam metingen alleen blijkt onvoldoende uitsluitsel te geven. Deze gecombineerde methodiek zou vervolgens moeten worden toegepast om een compleet beeld te verwerven van de ligging en staat van de bestortingen. Deze informatie dient te worden opgenomen in het op te stellen beheerssysteem

De interactie tussen bestortingen en zettingsvloeingen lijkt ambivalent, op dit vlak is aanvullend onderzoek noodzakelijk. Hierbij zouden ook alternatieve methodes voor bodembescherming onderzocht moeten worden (zie ook paragraaf 4.2.9).

Bij nog uit te voeren bestortingen zouden frequent peilingen moeten worden uitgevoerd in een gebied dat niet alleen het te bestorten vak beslaat maar ook de directe omgeving en het nog te bestorten gebied. Deze metingen zouden moeten worden aangevuld met side scan sonar metingen. Deze additionele informatie geeft meer inzicht over de laterale verbreiding van bestorting, eventuele sortering en de continuïteit van de aangebrachte laag.

2.3.2 Geologie

De beschikbare geologische informatie is onvoldoende meegenomen in de voorliggende analyse. Het strekt tot aanbeveling om alle bestaande data (digitaal en analoog) te integreren tot een ondergrondmodel dat kan worden opgenomen in een beheerssysteem. Het (deels) digitaliseren van het RWS ondergrond archief valt binnen deze activiteit. Deze informatie kan

gebruikt worden bij het vergroten van het begrip in de processen die plaatsvinden en bij de voorwaartse modellering van de te verwachten ontwikkeling van de ontgrondingskuilen.

2.3.3 Randbalk

Om de veranderingen in de ligging van de randbalk in meer detail te kunnen analyseren zouden verschil profielen rond de randbalk opgesteld moeten worden. Deze kunnen tevens gebruikt worden om erosiesnelheden af te leiden. Op de locaties waar zakkingen geconstateerd zijn is het aan te bevelen inspecties uit te voeren gebruikmakend van een echoscope, side scan sonar, eventueel aangevuld met subbottom metingen.

2.4 Aanbevelingen databeheer en monitoring

2.4.1 Databeheer en tools

De bathymetrische data zijn zo bewerkt dat deze bruikbaar zijn voor verschillende toepassingen. Vanwege de beperkte tijd is bij het verwerken van de data een aantal pragmatische keuzes gemaakt. Daarom zou de kwaliteit van de verwerkte data nog verbeterd kunnen worden door meer aandacht aan de vergridding te besteden. Dit vergroot de betrouwbaarheid.

Het opzetten van een (GIS gebaseerd) beheersysteem dat inzichtelijk en bruikbaar is voor alle belanghebbenden en waarin alle beschikbare basis data beschikbaar zijn is aan te bevelen. Binnen dit systeem zou een aantal (flexibele) analyse tools moeten worden opgenomen, zodat ook verwerken en analyseren van nieuwe data direct mogelijk is.

Niet alle beschikbare bathymetrische data is geanalyseerd en verwerkt. De nog niet verwerkte data zou op vergelijkbare manier verwerkt en geïnterpreteerd moeten worden. Deze uitgebreide set zal meer (detail) informatie leveren over de ontwikkelingen die plaatsvonden en de snelheid van ontwikkeling. Ook kan met extra data een aantal van de hypothesen en aannames uit de andere deelprojecten getoetst worden.

2.4.2 Monitoring en metingen

De monitoring dient te worden uitgebreid zodat de ontgrondingskuilen en het invloedsgebied van de vloeiingen volledig in het meetgebied vallen. Om meer informatie in te winnen over de processen zijn frequentere metingen of het inrichten van een monitoring dan wel waarschuwingssysteem aan te bevelen. Tijdens de uitvoering van een survey zouden de gegevens van voorgaande jaren beschikbaar moeten zijn zodat er ter plaatse bekeken kan worden of er grote verschillen zijn opgetreden zodat daar de survey strategie op kan worden aangepast of ter verificatie herhalingsmetingen gedaan kunnen worden.

Bij de huidige monitoring wordt alleen bathymetrische data ingewonnen. Onderzocht zou moeten worden of het mogelijk is simultaan aanvullende informatie in te winnen (bijvoorbeeld side scan sonar en subbottom data) met als doel het voorhanden hebben van een dataset welke verwerkt en geïnterpreteerd kan worden op het moment dat deze data nodig is.

Door RWS zijn vragen gesteld ten aanzien van de positie van de randbalk. De randbalk kan geïnspecteerd worden met een echoscope aangevuld met hoge resolutie side scan sonar en subbottom metingen (detectie van ondergraving van de randbalk). Dit laatste type metingen dient ook op de matten uitgevoerd te worden om de huidige staat te inspecteren.

De geconstateerde periodieke aanzandingen op de zijhellingen spelen mogelijk een rol bij het ontstaan van vloeiingen. Het is onduidelijk hoe dit proces precies verloopt en waar het zand

vandaan komt. Het inrichten van een proefgebied waar een meetnet wordt ingericht waarmee continue sedimentatie/erosie in beeld wordt gebracht kan waardevolle kennis over dit project genereren. Deltares heeft recent een glasvezel methodiek voor dit type metingen ontwikkeld.

De overgang tussen losgepakt en vastgepakt zand/sediment is belangrijk voor het bepalen van de kans op het voorkomen van een vloeijing. Deltares is een nieuwe techniek aan het ontwikkelen waarmee deze overgang in kaart kan worden gebracht. Het zou interessant zijn om een testmeting in het OSK gebied uit te voeren. Met deze metingen zou ook de verdichte zone onder de kering in kaart kunnen worden gebracht.

In het kader van het KPP programma "meten en monitoring" voert Deltares een onderzoek uit naar innovatieve meettechnieken voor debiet metingen. Momenteel richt dit onderzoek zich op het meten van afvoeren tijdens hoogwater in het rivieren gebied, maar een ander thema binnen het programma is het getijde gebied. Wellicht kan het OSK dienen als proefgebied voor dit thema. Meer informatie over stroomsnelheden en de verdeling van het water is belangrijke informatie voor de hydrodynamische modellering van het OSK gebied.

3 Conclusies en aanbevelingen grootschalige morfologie

3.1 Algemeen

Om de veranderingen in de waterbeweging na het gereedkomen van de Oosterscheldekering na te gaan zijn in dit deelproject de resultaten van een aantal modelberekeningen beschouwd aan de hand van de bodemligging van de jaren 1990 en 2010. Tevens is geanalyseerd welke grootschalige morfologische veranderingen zich hebben voorgedaan na het gereedkomen van de kering.

Uitgangspunt was een beperkte studie. Daarom is gebruik gemaakt van een bestaand 2D model van de Oosterschelde (de Bruijn, 2012). Door berekeningen met het waterbewegingsmodel uit te voeren voor de situatie na gereedkomen van de kering (1990) en voor de meest recente situatie (2010) kan door middel van een vergelijking van deze resultaten een indruk verkregen worden van deze veranderingen.

In het deelrapport wordt ook een overzicht gegeven van de morfologische ontwikkeling van de Oosterschelde. Zoals altijd wordt voor een beter begrip op verschillende tijd- en ruimteschalen gekeken. Op de grootste schaal (de Holocene ontwikkeling) is een kort overzicht gegeven van de ontwikkeling van het gebied. Daarna volgt in iets meer detail de ontwikkeling 1827-1978 aan de hand van kaarten. Ten slotte is vooral gekeken naar de ontwikkeling vanaf 1978 tot en met 2010, waarbij aandacht is gegeven aan de individuele geulen rond de kering.

3.2 Conclusies ten aanzien van de huidige situatie

- Over de periode 1990 – 2010 is de debietverdeling over de drie stroomgaten gelijk gebleven.
- Grote systematische snelheidsveranderingen zijn (nog) niet aanwezig. Veranderingen zijn gekoppeld aan de veranderende morfologie met name aan de zuidelijke kant van de buitendelta en aan de verdieping van de erosiekuilen.
- Het stroombeeld op de zuidelijke buitendelta tijdens vloed richting kering is zeer complex met relatief lage snelheden in de hoofdgeul Oude Roompot en zeer hoge snelheden over de ondiepte tussen de beide stroomgeulen (Onrust, Hompels).
- In de Roompot nabij de kering is bij uitstroming het stroombeeld aan het einde van de blokkenmatten (nabij de randen van de erosiekuilen) sterk asymmetrisch met een piek aan de noordelijke zijde (zowel aan de westzijde bij eb als aan de oostzijde bij vloed). De oorzaak moet hoogstwaarschijnlijk gezocht worden in de hoogteverhouding tussen drempelhoogte en hoogte blokkenmat ter plekke van de optredende piek. Bij toestroming doet dit fenomeen zich niet voor. Bij de Hammen en de Schaar is geen sprake van een asymmetrie.
- De asymmetrische vorm van de erosiekuilen (zeezijde en landzijde) bij de Roompot, met de diepste delen aan de Noordzijde, wordt hoogstwaarschijnlijk door de asymmetrie in de stroming veroorzaakt. De stroomverdeling over de breedte van de stroomgaten (parallel aan de kering) ter plekke van de drempel is weinig veranderd in de afgelopen 20 jaar. De asymmetrische vorm bij de Roompot lijkt enigszins toe te nemen.
- De grote verschillen in eb en vloodsnelheden op en nabij de blokkenmatten op de noord- en zuidranden van de doorlaten zorgen voor zandtransport naar die plekken.

Dit geldt met name voor Roompot-zuid-zeezijde en in mindere mate voor Roompot-zuid-landzijde, Hammen-zuid-landzijde, Hammen-noord-landzijde, Hammen-noord-zeezijde, Schaar-noord-landzijde en Schaar-noord-zeezijde. In de overige gevallen ligt er nauwelijks tot geen zand op de blokkenmatten.

- Door ten Brinke (2009) is het zandtransport door de kering geschat op een hoeveelheid tussen +1 en -1 Miljoen m³ per jaar. Dit vindt vooral plaats aan de randen van de stroomgaten. In het midden zijn de zandconcentraties en zandtransporten gering. Volgens modelonderzoek zijn de zandtransporten door de kering gering, de richting ervan is moeilijk aan te geven.

3.3 Conclusies ten aanzien van toekomstige situatie

- Menselijke ingrepen beïnvloeden de hydrologie en morfologie in de Oosterschelde en de bijbehorende voordelta. Dit beïnvloedt de morfologische ontwikkelingen nog steeds, die op hun beurt weer invloed uitoefenen op de OSK en de dijken. Dit zal ook de komende decennia nog van belang blijven. Van belang voor de OSK is vooral de ontwikkeling van de geulen in de nabijheid ervan (tot ca. 10 km uit de kering).
- De belangrijkste morfologische ontwikkelingen ten aanzien van de kering zijn:
 - Roompot-doorlaat zeezijde. De ondiepte vlak bij de kering tussen Oude Roompot en Zuiderlijke Roompot breidt zich in noordelijke richting uit, waardoor de Oude Roompot nabij de kering meer naar het noorden gaat krommen. Dit alles zorgt voor een toename van de hoek waaronder de toe en afstroming naar de Roompot-doorlaat geschiedt. Op langere termijn zal de Zuiderlijke Roompot waarschijnlijk in belang toenemen ten koste van de Oude Roompot.
 - Hammen-doorlaat landzijde. Op dit moment wordt de Hammen geul ten zuiden van Schouwen Duivenland ondieper. Verwacht wordt dat deze verondieping verder zal doorzetten in deze eeuw. Tegelijk is tussen 1984 – 1988 een nieuwe zuidelijke vloedschaar van de Hammen ontstaan bij de doorlaat. Mocht deze contact krijgen met de Schaar van Roggenplaat, dan zal dit leiden tot een stroming achterlangs de Oosterscheldekering.
- Verdere toename van de asymmetrie in de stroomverdeling in de Roompot is ongewenst. Nagegaan dient te worden hoe verdere toename te voorkomen is.

Op één locatie van het onderzoeksgebied (tussen kering en Oosterscheldebrug) is een situatie aangetroffen waarbij een oeverdeel erodeert en er mogelijk sprake is van een zich ontwikkelende instabiliteit. Dit betreft de dijk langs de schaar van Colijnsplaat nabij Colijnsplaat. Aanbevolen wordt om met de gegevens van het waterschap (ZEEKOE-data) dit verder te onderzoeken.

3.4 Aanbevelingen morfologie

- De waterbeweging nabij en rondom de kering is zeer complex, om deze goed te kunnen duiden is een meer gedetailleerd model nodig met voldoende resolutie rondom de kering. Onderzocht moet worden of dit een verbeterd 2D of een 3D model moet zijn. Dit is mede afhankelijk van de vragen. Voor vragen ten aanzien van de erosiekuilen is zonder meer 3D modellering nodig.
- De asymmetrische stroomverdeling in de Roompot is van invloed op de ontwikkeling van de erosiekuilen. Onderzoek waardoor deze precies veroorzaakt wordt en hoe deze te verminderen is, is van belang.
- Om meer inzicht te verkrijgen in de zandtransporten rondom de kering moet gedacht worden aan analyse van de bestaande metingen, verdere metingen - met name aan de randen - en gedetailleerd modelonderzoek.
- Verdere morfologische veranderingen zijn voor het keringbeheer en voor kustlijn zorg van belang. Continuering van de MWTL (Monitoring Waterstaatkundige Toestand des

Lands, Meetplan Waterdienst) monitoring en verdere analyses (bv. om de 10 jaar) zijn hiervoor nodig.

Een beperkte meetinspanning, met bijv. (half-) uurlijkse luchtfoto's van de ontwikkeling van het stroombeeld/zog gedurende een volledige getijcyclus, een verankerde ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) op een cruciale plaats, eventueel ondersteund door meetresultaten van enkele ADCP (debiet) raaien, kan al zeer veel informatie opleveren.

3.5 Aanbeveling ten aanzien van de monitoring en beheerstrategie

- Grootschalige morfologische veranderingen (Hammen oostzijde en Roompot westzijde) kunnen op de lange termijn grote veranderingen in het stroombeeld veroorzaken. Dit dient periodiek (bv. Om de 10 jaar) beschouwd te worden.
- Voor de toekomst is het aan te bevelen om een goed gevalideerd gedetailleerd beheermodel van de stroming rondom de kering gereed te hebben om in geval van belangrijke gebeurtenissen snel in te kunnen zetten (een soort Kerings-dashboard).

4 Conclusies en aanbevelingen ontgrondingskuilen

4.1 Algemeen

In dit deelproject is eerst een samenvatting van de ontwerpfilosofie van de Oosterscheldekering en de bodembescherming gegeven, evenals de beheers- en onderhoudstrategie. Hierna is in een kwalitatieve analyse de ontwikkeling van de ontgrondingskuilen en hellingen en mogelijke vervormingen/beschadigingen van de bodembescherming onderzocht aan de hand van beschikbare bodempeilingen.

Vervolgens is de lokale hydrodynamica rond de OSK onder de loep genomen, wat weer belangrijke invoer vormt voor de kwantitatieve analyse: de lokale stroomsnelheden en (in mindere mate) waterstanden zijn immers de belangrijkste parameters verantwoordelijk voor het ontgrondingsproces achter de rand bodembescherming (RABO).

Hierna volgt de kwantitatieve analyse. Een Ontgrondings-Model dat speciaal voor de OSK is geprogrammeerd wordt beschreven. Dit model is grotendeels gebaseerd op al bekende formules, maar tevens wat meer geavanceerd doordat verschillende bodemlagen en zettingsvloeiingen meegenomen kunnen worden en de volledige tijdreeks doorgerekend kan worden. Dit model is eerst toegepast in "hindcast mode" om de ontwikkeling in de periode 1987-2012 te verklaren. Daarna zijn met het model in "forecast mode" voorspellingen gedaan voor de periode tot 2050. Ten slotte zijn met behulp van het model enige maatregelen onderzocht.

4.2 Conclusies

In de deelstudie "ontgroning" worden conclusies getrokken na een kwalitatieve analyse van de geleverde data en een kwantitatieve analyse van het ontgrondingsproces tot nu toe en in de toekomst. Eerst worden hierna in de paragrafen 4.2.1 tot en met 4.2.6 de gedetailleerde conclusies per ontgrondingskuil gepresenteerd. Vervolgens worden de algemene conclusies getrokken, onderverdeeld in conclusies ten aanzien van de ontwikkeling van de ontgrondingen (sectie 4.2.7), de beheer- en onderhoudsstrategie (sectie 4.2.8) en bodembescherming en alternatieve mitigerende maatregelen (sectie 4.2.9).

4.2.1 Roompot-West

- De maximale ontgrondingskuildiepte bedraagt in 2012 NAP-60 m met een maximale ontgrondingsdiepte (gemeten ten opzichte van de RABO) van 33 m. De diepte neemt sinds 1996 zeer geleidelijk toe met ongeveer 1m per 8 jaar, omdat de bodem van de ontgrondingskuil op een kleilaag is aangekomen. De uitbreiding van de ontgrondingskuil is vooral in zijdelingse richting.
- De maximale aanzethellingen (haaks op de as van de kering) hebben jarenlang over 5 m hoogte 1:1 gestaan. In 2012 is dat 1:1.6. De gemiddelde aanzethelling (van RABO tot diepste punt in de ontgrondingskuil) beweegt zich tussen 1:3 en 1:4.
- Er hebben zich vlak na elkaar 2 zettingsvloeiingen voorgedaan (2006-2007 en 2007-2008) aan de noordelijke zijhelling. De eerste instabiliteit heeft de ontgrondingskuil met ongeveer 10m opgevuld. Dit sediment was binnen 2 jaar weer verdwenen als gevolg van erosie.
- De ontgrondingskuil bevindt zich in de noordelijke helft van de Roompot. Dit hangt samen met de asymmetrische, ongunstige stroomverdeling in de Roompot, waar de pieksnelheden in het noorden optreden (in plaats van in het hart van de stroomgeul).

- De noordelijke zijhellingen zijn het steilste met hellingen over 5 m hoogte tegen 1:1 tussen 1998 en 2000 en rond de 1:2 – 1:2.5 sinds die jaren. Over 20 m hoogte kwamen voor de geotechnische instabiliteiten hellingen steiler dan 1:5 voor.
- De zuidelijke zijhellingen zijn flauwer met waarden rond 1:2.5 (over 5 m) en 1:5 over 10 m.
- Van dwarsraai 1820-2080 (dus over 260 m) is de RABO aanzienlijk verzakt tijdens bovengenoemde instabiliteiten tot wel 13 m (in verticale richting).
- Alleen de aanzethellingen in het noordelijke deel zijn bestort, wat tot scherpe overgangen in de steilheid van de helling leidt (bijv. tussen dwarsraaien 1560 en 1570). Vanaf deze dwarsraaien is de RABO mogelijk ook tot maximaal 2 m verzakt (tussen dwarsraaien 1250-1580). Precies op deze overgang is ook een stevige toename van de ontgrondingsdiepte zichtbaar, nu de kleilaag lijkt doorbroken in deze middensectie.
- Berekeningen met het speciaal voor dit doel geconstrueerde OntgrondingsModel voor de Oosterscheldekering (OSK-OM) lieten zien dat de ontgroning tot 2050 nog aanzienlijk in diepte kan toenemen, als de Oosterhout-kleilaag wordt doorbroken. De laag eronder is zandig. Afhankelijk van de aannames zou de ontgrondingsdiepte tot maximaal 2 m/jaar kunnen toenemen, wat echter goed te bewaken valt met de huidige peilfrequentie.

4.2.2 Roompot-Oost

- De maximale waterdiepte bedraagt in 2012 NAP-59 m en treedt op in zowel de zuidelijke als de noordelijke ontgrondingskuil. De ontgrondingsdiepte is wel veel groter in de noordelijke kuil (34 m, gemeten vanaf de RABO) dan in de zuidelijke. In beide kuilen geldt dat de ontgrondingsdiepte in deze fase sinds 1996 geleidelijk toeneemt met ca. 1 m per jaar. De uitbreiding is hier ook vooral in zijdelingse richting, totdat de kleilaag wordt doorbroken.
- De locatie van de grootste ontgroning hangt wederom samen met het ongunstige stroombeeld in de Roompot. De drempelhoogte in het noordelijke deel komt niet goed overeen met de waterdiepte op de achterliggende bodembescherming, waardoor er door dit noordelijke deel van de kering teveel debiet stroomt, wat tot hoge stroomsnelheden ter plaatse van de RABO leidt.
- De maximale aanzethellingen zijn over 5m al jaren tussen 1:1 en 1:1.5. Deze hellingen zijn niet altijd bestort. De maximale aanzethelling van RABO tot diepste punt in de kuil is rond 2003 steiler dan 1:3 geweest, totdat vloeïngen optraden. De laatste jaren is deze helling tussen 1:4 en 1:5.
- In Roompot-Oost zijn zowel de noordelijke als zuidelijke zijhelling hoog en steil. De zuidelijke zijhelling stond het steilste over 5m, maar ook over 20m staat het vrijwel constant 1:2.5. In dit gebied hebben zich sinds 2002 dan ook 5 zettingsvloeïngen voorgedaan. Aan de noordelijke zijhelling is het niet anders: hellingen steiler dan 1:1 over 5 m hoogte. Hier zijn ook 5 zettingsvloeïngen geconstateerd. Deze zijhelling heeft ook een grote hoogte en in 2003 (voor de serie vloeïngen) stond de noordelijke zijhelling over 40 m steiler dan 1:5.
- De RABO is op diverse plaatsen ondermijnd en verzakt tijdens zettingsvloeïngen. De grootste zakking is zichtbaar tussen dwarsraaien 1490 en 1620 (maximaal ca. 10 m zakking) en tussen dwarsraaien 1970 en 2200 (maximaal ca. 7 m zakking).
- Vergelijkbaar met Roompot-West kan ook hier een aanzienlijke toename van de ontgroning optreden, als de Oosterhout-kleilaag wordt doorbroken. De meest pessimistische schatting gaat uit van maximaal 2 m/jaar.

4.2.3 Schaar-West

- De maximale waterdiepte bedraagt in 2012 NAP-44 m en de ontgrondingsdiepte is 23 m (gemeten vanaf de RABO). De ontgrondingsdiepte ontwikkelt zich sinds de bouw met ongeveer 0.4 m/jaar, maar heeft zich recentelijk wat versneld nu een kleilaag is doorgebroken. Het diepste punt bevindt zich nu nog noordelijke van het hart van de geul, maar zal zich komende jaren naar het midden begeven, aangezien daar de stroomsnelheden het grootst zijn.
- De aanzethellingen over 5 m hoogte zijn al jaren rond de 1:2; de helling tussen RABO en diepste punt wordt langzaam steiler en is sinds 2011 steiler dan 1:5.
- De zuidelijke zijhellingen over 5 m hoogte zijn maximaal 1:4; over grotere hoogte (≥ 10 m) altijd flauwer dan 1:5. De noordelijke zijhellingen zijn wat steiler: rond 1:3 over 10 m hoogte.
- Bij Schaar-West zijn geen problemen met de RABO geconstateerd.

4.2.4 Schaar-Oost

- De maximale waterdiepte bedraagt in 2012 NAP-53 m en de ontgrondingsdiepte is 33 m (gemeten vanaf de RABO). De ontgrondingsdiepte ontwikkelt zich sinds de bouw met ongeveer 0,8 m/jaar, maar heeft zich recentelijk wat versneld nu een kleilaag is doorgebroken. Het diepste punt bevindt zich nu nog noordelijk van het hart van de geul, maar zal zich komende jaren naar het midden verplaatsen, aangezien daar de stroomsnelheden het grootst zijn.
- De maximale aanzethelling over 5 m hoogte bedraagt 1:1 en de maximale helling van RABO tot diepste punt in de ontgrondingskuil is vrij constant 1:5.
- De zuidelijke zijhelling is maximaal 1:2.5 over 5 m hoogte, 1:4 over 10 m; 1:8 over 20 m en al vele jaren stabiel. De steilste noordelijke zijhellingen zijn tijdens het erosieproces soms steiler, wanneer een kleilaag wordt geërodeerd (1:1.3 over 5 m). De noordelijke zijhelling is tot wel 40 m hoog (1:6.6).
- Bij Schaar-Oost zijn geen problemen met de RABO geconstateerd.

4.2.5 Hammen-West

- De maximale waterdiepte bedraagt in 2012 NAP-46 m en de ontgrondingsdiepte is 20 m (gemeten vanaf de RABO). De ontgroning neemt met ongeveer 0,35 m/jaar toe. Er zijn aanwijzingen dat de kleilaag lokaal is doorbroken. Wellicht leidt dit later tot een verdere toename van de ontgroning.
- De maximale aanzethelling van RABO tot diepste punt in de kuil is al sinds 1995 stabiel op 1:5. De maximale helling over 5 m was 1:2 en wordt langzaam iets flauwer.
- De zuidelijke zijhelling is al jaren stabiel, maar sinds 2005 is de helling over 20 m iets steiler aan het worden tot ongeveer 1:6 nu. De maximale noordelijke helling wordt langzaam steiler en wordt steeds hoger.
- Er hebben zich geen zettingsvloeiingen voorgedaan en op dit moment zijn er geen indicaties, dat de ontwikkeling van de ontgroning dit risico vergroot.

4.2.6 Hammen-Oost

- De maximale waterdiepte bedroeg NAP-55 m en de ontgrondingsdiepte is 30 m (gemeten vanaf de RABO), maar de huidige diepte is kleiner, omdat het zand dat bij de zettingsvloeiing van 2010 in de kuil is afgezet nog niet geheel is verdwenen als gevolg van erosie. De ontgroning neemt met ongeveer 0,75 m/jaar toe sinds 1985.
- De ontgrondingskuil is het diepst in het zuidelijke deel, maar schuift sinds 2005 met ca. 15 m/jaar op richting de as van de geul. Omdat de snelheden hier het grootst zijn zal de ontgrondingsdiepte hier verder toenemen.

- Er hebben zich 4 zettingsvloeiingen voorgedaan aan de zuidkant van Hammen-Oost. Deze vloeiingen hebben een cyclustijd van 8 à 9 jaar en de hoeveelheid gemobiliseerd sediment neemt steeds toe.
- De maximale aanzehelling vanaf de RABO tot het diepste punt in de kuil varieert sinds 1995 constant tussen 1:3 en 1:5. De maximale aanzehelling over 5 m hoogte varieert tussen 1:1 en 1:2.
- De zuidelijke zijhelling over 5 m hoogte beweegt zich tussen 1:1 en 1:2 en heeft een sterke relatie met de optredende zettingsvloeiingen. Sinds 2008 was de zuidelijke helling even 40 m hoog (1:7.5), totdat in 2010 een zettingsvloeiing optrad.

4.2.7 Ontgrondingsontwikkeling in het algemeen

- Alle zes ontgrondingskuilen ontwikkelen zich nog, zij het met wisselende snelheid voornamelijk veroorzaakt door de aanwezigheid van kleilagen.
- Er is geen versnelling zichtbaar in het grootschalige ontgrondingsproces, maar lokaal (wanneer een bepaalde raai wordt bestudeerd) lijkt hier in sommige gevallen sprake van, doordat door erosie een kleilaag doorbroken wordt en de ontgroning sneller verloopt in de onderliggende zandlaag. In veel gevallen zie je dit proces naderen vanuit naastgelegen dwarsraaien of van benedenstrooms van de kering.
- De ontgrondingsdiepte is weliswaar groter dan 25 m bij 4 van de 6 ontgrondingskuilen, maar dit was voorzien: de huidige diepten zijn vergelijkbaar met ondergrens-schattingen in 1986 voor 1996 (2^e RABO-nota). Uiteindelijk was de filosofie destijds gebaseerd op een voldoende trage ontwikkeling van de ontgroning om hem goed te kunnen meten en beheersen. Dat de ontgroning zich langzamer ontwikkelt dan van tevoren voorzien, komt voornamelijk door de hogere kritieke snelheden van de diverse bodemlagen (kleilagen, verkit zand of zand met silt en kleilensjes).
- Er zijn geen aanwijzingen gevonden dat de ontgrondingsontwikkeling zich in de tijd heeft verplaatst door het verplaatsen van de stroomgeulen (grootschalige morfologie). Ook de debietverdeling over de drie sluitgaten is niet noemenswaardig veranderd in de periode 1987-2012. Ruimtelijke variaties in ontgrondingspatroon worden dan ook volledig toegerekend aan de verdeling van de stroomsnelheid over de RABO en de aanwezige bodemlagen.
- De meeste kuilen laten een grote zijdelingse uitbreiding zien, waarbij de zijhellingen steeds steiler worden. Dit wordt meestal veroorzaakt door het eerst doorslijten van de kleilaag op een locatie waar de stroming sterk genoeg is (of de kleilaag erg dun) en vervolgens wordt de kleilaag zijdelings ondermijnd en afgebroken. Een tweede effect is dat boven op het talud aanzanding plaatsvindt.
- De uiteindelijke diepte kan nog vele meters dieper worden en de ontgroning zou zich best tot na 2050 nog kunnen ontwikkelen. Een pessimistische schatting voor de maximale toename in verticale ontgrondingsdiepte is 2 m/jaar, wat goed te bewaken valt met een peilfrequentie van 2x per jaar. De voorspellingen zijn echter erg gevoelig voor de aangenomen kleilaagdikte en de kritieke snelheden van zowel kleilagen als pleistocene zandlagen.
- De zettingsvloeiingen waren vrijwel allemaal goed te verklaren uit een toename in ontgrondingsdiepte en een versteiling van de hellingen tot meer dan de bewakingscriteria. Daarbij zorgt aanzanding in de neren aan de zijkant van de stroomgeul voor een dik pakket losgepakt zand, dat gevoelig is voor zettingsvloeiingen.
- Op diverse plaatsen is geconstateerd dat de taludbestorting compleet is verdwenen. Ondermijning van de RABO met zakkingen tot 13 m in verticale richting zijn geconstateerd. Of de blokkenmat nog intact is en of de matten nog een zanddichte aansluiting hebben, kon uit deze bodempeilingen niet worden afgeleid, maar met een overlap van 3 m is dat zeer de vraag. Hiervoor zijn side scan sonar of echoscope

metingen mogelijk aangevuld met subbottom profiler metingen aanbevolen. Pas dan kan vastgesteld worden hoe een eventuele reparatie moet worden uitgevoerd.

- De bodembescherming na een vloeiing is in het geval van een losse taludbestorting vaak deels of geheel beschadigd; de blokkenmatten zullen gezien de steile, wel tijdelijke stabiele hellingen na een vloeiing langs de helling naar beneden hangen.
- Het effect van het doorslijten van de kleilaag in Schaar-Oost is niet veel anders dan in Schaar-West. De laag is doorbroken vanuit de hoofdas van de stroomgeul en de snel dieper geworden ontgrondingskuil heeft naast een verdere verdieping een zijdelingse uitbreiding ingezet naar beide kanten. De verwachting is dat de diepste locatie van de ontgrondingskuilen in Schaar zal opschuiven naar het hart van de stroomgeul, waar de stroomsnelheden het grootst zijn.
- Het meer dan een paar meter verzakken van de randbalk lijkt in alle gevallen veroorzaakt door zettingsvloeiingen. Deze worden ingeleid door morfologische processen, zoals het steiler worden van de aanzethelling onder een aangebrachte taludbestorting of het zijdelings uitbreiden van een ontgrondingskuil, wat leidt tot steilere zijhellingen.
- De debietverdeling in de Roompot is niet optimaal. Het ontwerp was erop gebaseerd om middels variatie in de drempelhoogte een geleidelijke afname van de stroomsnelheid vanuit het hart van de geul naar beide zijkanten te realiseren, maar er was ook de wens om de stroming zoveel mogelijk uit de Noord-Bevelandse oever te dwingen. De drempelhoogtes in het noordelijke deel van de Roompot-kering passen echter niet bij de hoogte van de achterliggende bodembescherming, wat hier voor te hoge stroomsnelheden zorgt, met diepe ontgroning en steile zijhellingen tot gevolg.

4.2.8 Beheers- en onderhoudsstrategie

- Over het algemeen geldt dat de ontgrondingsprocessen in de ontwerpfase goed in kaart waren gebracht en dat de beheers- en onderhoudsstrategie goed doordacht was en voldoende veiligheid biedt om het ontgrondingsproces te bewaken. Er zijn wel enige verschillen geconstateerd tussen ontwerp en daadwerkelijk optredende processen:
 - a. Cyclisch proces van aanzanding in de neren, resulterend in zettingsvloeiingen, was niet voorzien;
 - b. Het stroombeeld in de Roompot wijkt af van het beoogde stroombeeld van het ontwerp;
 - c. De voorspelling van ontgroning was meer gericht op het tempo van ontgroning dan op de evenwichtsdiepte;
 - d. Het effect van getijstroming op de vorm van de ontgrondingskuil kon niet voldoende worden voorzien;
 - e. Taludbestorting was alleen gekoppeld aan geotechnische criteria en hield geen rekening met ondermijning door omkerende getijstroming.
- De frequentie van peilen (2x/jaar) is voldoende om de ontgroning te bewaken, aangezien de ontgroningstoename zelden meer dan 1m per half jaar zal bedragen en dus goed gemonitord kan worden.
- De opgetreden ontgrondingsdieptes en hellingen overschrijden vaak de RWS criteria, zoals ook opgenomen in de MOKUS-software (analyse software die de criteria voor steilte van taludhellingen toetst).
- Als alternatief voor taludbestortingen zouden de ontgrondingskuilen met zand gevuld kunnen worden. Dit is onderzocht met het OSK-OM model door de noordelijke ontgrondingskuil in Roompot-Oost op te vullen met 5 miljoen m³ zand tot NAP-35m. Deze aanzanding wordt in het model ongeveer in 7 à 8 jaar weggeërodeerd.

4.2.9 Beschermingsmethoden

- De informatie over de aangebrachte taludbestorting in de periode 1985-2012 is onvoldoende om de kwaliteit van de bescherming in te schatten. Er zijn alleen contouren van de bestortingsplannen beschikbaar, maar in- en uitmetingen (noodzakelijk om nauwkeurig de aanwezige laagdikte te bepalen) en informatie over de bestorting zelf (zoals steensorteringen) zijn niet, of slechts in beperkte mate, aanwezig. In deze studie is er dan ook van uitgegaan dat de geplande bestortingen over een minimale dikte van 50cm aanwezig zijn. In een aantal gevallen is duidelijk geconstateerd dat de aanwezige bestorting minder ver is gestort dan op de tekeningen aangegeven.
- Het afstorten van de aanzehellingen is effectief en er zijn geen aanwijzingen gevonden, dat de filterwerking niet voldoende was of de stenen zelf niet stabiel zouden zijn. Instabiliteit van taludbestorting kwam altijd door externe factoren, zoals zettingsvloeiingen of morfologische ondermijning.
- Er zijn diverse aanwijzingen gevonden, dat de taludbestorting te lokaal is uitgevoerd (postzegelbestorting) of dat aansluitende bestortingen (bijv. een paar jaar later) nooit zijn uitgevoerd. Bestortingen hebben altijd "edge scour" tot gevolg, wat nieuwe aansluitende bestortingen uitlokt.
- Het plaatsen van kribben, waar wel over wordt gesproken, kan een sturend effect hebben op de stroomgeulen, doch creëert ook zones van sedimentatie en zones met hogere stroomsnelheden voor de koppen, waardoor de gradiënten groter en de zijhellingen steiler worden. Vooral in de Roompot zou een verlegging van de stroming naar het hart van het sluitgat wenselijk zijn om de gradiënten in stroming en bodemhelling te verkleinen. Door bovengenoemde effecten op de gradiënten zijn kribben ter plaatse van de ontgrondingskuilen niet aanbevolen, aangezien deze harde constructies niet in staat worden geacht de stroomgeul effectief te verplaatsen. Het doorstroomprofiel wordt wel kleiner met een toename van stroomsnelheden tot gevolg.
- Een mogelijk effectievere maatregel is het vastleggen van de diepere delen van de ontgrondingskuilen in het noorden van Roompot-West en Roompot-Oost en in het zuiden van Roompot-Oost, bijvoorbeeld door het storten met grind (dat op de bodem van de kuilen stabiel zal zijn).

4.3 Aanbevelingen ontgrondingen

4.3.1 Verbeteren van ontgrondingsvoorspellingen

Om de nauwkeurigheid van de ontgrondingsvoorspellingen te vergroten zouden de volgende stappen moeten worden uitgevoerd:

- Het construeren van een 3D-model van de bodemopbouw, waaruit de precieze dikte en locatie van klei- en zandlagen kan worden afgelezen. Hiervoor kunnen de analoge databestanden van grondonderzoek, beschikbaar in diverse archieven, gedigitaliseerd worden. Dit model dient wel ten minste tot de originele bodem van 1985 te reiken, zodat het 3D-grondmodel ook gebruikt kan worden voor verdere calibratie van OSK-OM.
- Het bepalen van de erosie-karakteristieken van pleistocene zand- en kleilagen, bij voorkeur door rechtstreeks de kritieke snelheid te meten op ongestoorde grondmonsters.
- Het verbeteren van de modellering van de detail-hydrodynamica door de kering, over de bodembescherming en in de ontgrondingskuil, bijvoorbeeld:
 - niet-hydrostatisch Delft-3D-model met verhoogde resolutie en uitgerust met een verbeterde barriërfomulering;

➤ openFOAM voor turbulentie-details.

Deze modelverbeteringen zouden zoveel mogelijk moeten worden ingekaderd in lopende/geplande verbeteringen van het modelinstrumentarium.

- Het verbeteren van een formule voor de evenwichtsdiepte. Het ontgrondingsonderzoek heeft zich in de ontwerpfase van de OSK voornamelijk toegespitst op het inschatten van de snelheid van ontgroning. Voor voorspellingen is het belangrijk om voor verschillende typen sediment met verschillende erosie-karakteristieken ook de evenwichtsdiepte nauwkeurig te weten.

Hoewel de peilfrequentie voor het bewaken van de ontgrondingsontwikkeling in principe voldoende is, zou vaker (of zelfs continu) meten van de erosie/onderminning van een kleilaag nuttige inzichten kunnen opleveren.

4.4 Aanbevelingen beheerstrategie

4.4.1 Beheers- en onderhoudsstrategie

- De lodingen door Rijkswaterstaat en door de waterschappen zouden gekoppeld moeten worden in één database, tenminste voor het gebied 1500m, maar liever 2000m uit de as van de kering. In deze database zouden zowel oude als toekomstige metingen moeten worden opgenomen. Metingen uit het verleden dienen nog samengevoegd te worden in één data-systeem. Hierbij wordt aanbevolen minstens 2 keer per jaar een volledige 3D-bathymetrische survey uit te voeren. Voor het beheersen van het ontgrondingsproces is de huidige frequentie van twee maal per jaar voldoende, mits de data goed geanalyseerd wordt. Voor het verbeteren van het begrip van erosie door kleilagen is vaker meten aanbevolen. Vaker meten heeft ook het voordeel dat voor analyse van grootschalige vloeiingen de tijdspanne tussen twee metingen kleiner is: ontgroning en zettingsvloeiingen zijn zo beter van elkaar te scheiden.
- Het wordt aanbevolen om de MOKUS-software uit te breiden met betere alarmbellen, aangezien alle zettingsvloeiingen lijken samen te hangen met hellingen die over te grote hoogte steiler waren dan de bewakingscriteria. Hiertoe zouden de hellingen over bijv. 5, 10, 20 en 40 m hoogte berekend kunnen worden in ten minste dwars- en langsrichting. Hierbij kan onderscheid gemaakt worden tussen bestorte en niet-bestorte gebieden.
- De huidige status van de bestortingen op zowel aanzethellingen als zijhellingen van ontgrondingskuil zou beter in kaart moeten worden gebracht. Dit geldt voor zowel de laagdikte als de gradering en dichtheid van het gestorte materiaal.
- De randeffecten van een bestorting moeten goed worden gemonitord en indien noodzakelijk moeten aansluitende bestortingen op tijd worden uitgevoerd. Hierbij zouden niet alleen de geotechnische stabiliteitscriteria leidend moeten zijn, maar ook morfologische criteria als randerosie en onderminning van bestorting door de omkerende getijstrooming worden aangevallen.
- Het verdient aanbeveling om jaarlijks de peilingen te laten controleren door een specialist, die bekend is met de fysische processen in een ontgrondingskuil.

4.4.2 Alternatieve oplossingen

- Om met name de ontgrondingsproblemen in de Roompot te verminderen zou de aanstroming op de RABO verbeterd kunnen worden door enerzijds het doorstroomprofiel van het noordelijke deel van de kering te verminderen (bijv. door verhoging van de drempelhoogte of manipulatie met de schuiven) of door de waterdiepte op de bodembescherming te vergroten. Beide oplossingen verlagen de ontgrondingscapaciteit.
- Aangezien beide oplossingen erg ingrijpend zijn, lijkt het kansrijker om in plaats van de belasting te verminderen, de sterkte te vergroten. Naast het bestorten met traditionele

materialen, zouden alternatieve bodembeschermingsmethoden, als kunstmatig wier of geohooks, nader onderzocht kunnen worden.

- De ontgroning in de Roompot zou gefixeerd kunnen worden door het bestorten van de bodem van de noordelijke en zuidelijke ontgrondingskuilen met grind. Hierdoor wordt de verdere ontgrondingsontwikkeling weggeleid van de zijhellingen.
- Het periodiek volstorten van de ontgrondingskuilen kan overwogen worden.

5 Conclusies en aanbevelingen criteria hellinginstabiliteit

5.1 Algemeen

In dit deelproject is eerst de bathymetrische data geanalyseerd. Hierbij zijn 16 zettingsvloeiingen geconstateerd. Deze zijn geometrisch beschreven (gemiddelde en steilste helling voor de vloeijing, taludhoogte) en de dwarsprofielen zijn gekoppeld aan een globale opbouw van de ondergrond. Vervolgens zijn enkele van de instabiliteiten nader geanalyseerd met rekenmodellen voor verwekingsvloeiing en bresvloeiing.

In het deelrapport wordt ook een resumé gegeven van de toenmalige ontwerpfilosofie en de wijze waarop eisen zijn afgeleid voor de toelaatbare kansen op een zettingsvloeiing op de diverse locaties rondom de ontgrondingskuilen. Dit is gebruikt als toetsingskader voor een nadere analyse op basis van praktijkwaarnemingen en theorie om de criteria ten aanzien van hellinginstabiliteit te beoordelen.

5.2 Conclusies

5.2.1 Conclusies bathymetrische informatie

Er zijn datasets beschikbaar met hoogwaardige gegevens over de bathymetrie. Deze zijn in de huidige studie voor één loding per jaar uitgewerkt. Het verdient aanbeveling om de tussenliggende lodingen ook toe te voegen om het beeld nog nauwkeuriger te maken. Verder verdient het aanbeveling om de peilingen richting oevers en werkeilanden zoveel mogelijk uit te breiden. De plaatsen waar de meeste activiteit verwacht wordt zouden vaker gepeild kunnen worden. Op dit moment is dat vooral de Roompot Oost.

Uit de metingen zijn 16 zettingsvloeiingen geconstateerd. Uit de geometrische kenmerken valt op dat de gemiddelde taludhelling vóór de vloeijing vaak flauw is geweest (flauwer dan 1 : 7), maar dat er over het algemeen wel een steil taludgedeelte over 5 meter taludhoogte aanwezig is geweest (1 : 1,3 tot 1 : 3,8, gemiddeld 1 : 2,6).

Wat betreft de frequentie waarmee zettingsvloeiingen opgetreden zijn is opvallend dat vóór het jaar 2000 slechts twee vloeiingen zijn opgetreden, maar na 2000 veertien. De frequentie neemt mogelijk toe met het dieper worden van de ontgrondingskuilen. De te onderzoeken hypothese is of een criterium voor hellingstabiliteit waarin ook de taludhoogte in rekening worden gebracht niet beter aansluit bij de werkelijkheid dan een criterium gebaseerd op alleen de taludhelling.

De twee zettingsvloeiingen vóór het jaar 2000 vonden plaats in zijhellingen. Tot dat moment was het bestorten van te steile aanzehellingen dus effectief.

5.2.2 Conclusies verwekings- en bresvloeiing

Voor de verschillende locaties (Noord-Bevelandse oever, plaatranden en rand bodembescherming) zijn verschillende hypothesen opgesteld over de wijze waarop de opgetreden zettingsvloeiingen kunnen worden verklaard. Met de modellen voor verwekingsvloeiing en bresvloeiing is nagegaan welke hypothesen het meest waarschijnlijk zijn. De berekeningen moeten wel beoordeeld worden als indicatief, omdat er gewerkt is met aannames ten aanzien van bodemopbouw en te hanteren parameters.

Voor de zettingsvloeiingen langs de Noord-Bevelandse oever is het beeld dat de meest waarschijnlijke gebeurtenissen verweking in het aangezande deel of een bres aan de onderkant van het aangezande deel zijn geweest. Verweking onder de aanwezige bestorting of bressen onderaan het talud (als de taludbestorting inderdaad tot op de door het waterschap aangegeven dieptes aanwezig was en intact was) of verweking in het pleistocene zand worden daarmee minder waarschijnlijk geacht.

Bij de plaatranden lijkt een onderscheid tussen de eerste maal instabiliteit (initiële vloeiing) en meerdere malen vloeiing op ongeveer dezelfde plek zinvol. In de hypothesen voor een initiële vloeiing speelt het ondermijnen en afschuiven van een kleilaag een belangrijke rol. Dit kan zijn veroorzaakt door erosie waarna een bres in het pleistocene zand is ontstaan. Dit kan inleiding zijn geweest tot vervolgvloeiingen zoals het ontstaan van verweking in het holocene zand of bressen in het gedeelte boven de kleilaag en, onder invloed van afstromend zand, bressen in het talud lager dan de kleilaag.

Op de plaatsen waar een initiële instabiliteit heeft plaatsgevonden zal de kleilaag deels zijn verdwenen. Wat wel het geval lijkt te zijn is dat de plaats waar ontgronding heeft plaatsgehad telkens snel opgevuld is geraakt met zand. Dit zand was losgepakt en kan de plaats van de inleiding zijn geweest van een volgende vloeiing.

Langs de randen van de bodembescherming is het holocene zand in ieder geval voor een deel afgedekt met een bestorting. De vloeiingen die daar hebben plaatsgevonden zijn zeer waarschijnlijk begonnen in het onbestorte deel van het talud. Dat begin bestond wellicht uit het bressen van een te steil taludgedeelte eventueel na ondermijning van een kleilaag. De vloeiing zal dus begonnen zijn als een bresvloeiing. Vermoedelijk is dit wel aanleiding geweest voor een verwekingsvloeiing in het holocene materiaal onder de bestorting, gezien de ontstane schades aan de bestorting en blokkenmat.

Gezien het belang van de juiste gegevens over bodemopbouw en te hanteren rekenparameters om tot betere inzichten te komen verdient het aanbeveling in eerste instantie op basis van bestaande (veelal analoge) gegevens over bodemopbouw en grondeigenschappen de analyses aan te scherpen. Om vervolgens verdere verscherping mogelijk te maken kan het ook lonend zijn om de peilfrequentie te verhogen in gebieden waar regelmatig vloeiingen optreden, om het peilgebied iets uit te breiden en om op specifieke plaatsen (de Noord-Bevelandse oever bijvoorbeeld) extra gegevens in te winnen door aanvullend grondonderzoek.

5.2.3 Conclusies veiligheidsfilosofie ontwerp en beheer

Er is een beschrijving gegeven van de wijze waarop bij de aanleg van de bodembescherming gekeken is naar ontwerp en beheermaatregelen. Dit vormt een belangrijk beoordelingskader om aanbevelingen te doen voor beheercriteria voor de korte en langere termijn.

Belangrijk is dat in het ontwerp ten aanzien van de hellingen van de ontgrondingskuilen het uitgangspunt niet was 'geen instabiliteiten', maar dat er een probabilistische aanpak gevolgd is waarin sprake was van een 'toelaatbare kans op een zettingsvloeiing'. Het feit dat er zettingsvloeiingen langs de taludhellingen zijn opgetreden op verschillende locaties betekent dus niet automatisch dat de stabiliteit van deze hellingen niet aan de ontwerpeisen voldoet. De kans dat een zettingsvloeiing optreedt moet worden getoetst aan de toelaatbare kans op een vloeiing om te zien of deze te groot is of voldoet.

Het probabilistisch raamwerk met alle gedachtes en aannames daarin is in deze korte termijn studie niet ter discussie gesteld. Gezien het feit dat er inmiddels ruim 30 jaar ervaring is en de

kennis is toegenomen kan het zinvol zijn de destijds gevolgde aanpak kritisch door te lopen en te bezien of een verbeterde invulling inmiddels mogelijk is. Zo is een beschouwing over de te verwachten inscharingslengte mogelijk, gezien het feit dat er sprake kan zijn van een beperkte berging van weggevoerd zand in de ontgrondingskuilen.

5.2.4 Randen bodembescherming

De huidige beheercriteria spitsen zich toe op de randen van de bodembescherming. De in het verleden gehanteerde doorgetrokken lijn onder 1 : 5 is niet correct, er moet wel degelijk gekeken en getoetst worden op de steilste taludhelling over 5 meter hoogte. Dit is inmiddels ook door Rijkswaterstaat geconstateerd en hersteld.

Op twee plaatsen langs de rand van de bodembescherming zijn zettingsvloeiingen opgetreden die een dusdanige omvang hadden dat hierdoor ook de bodembescherming en de bestorting op de aanzethelling is aangetast. Beide keren was dit in de Roompot Oost.

De zettingsvloeiingen hebben niet geleid tot voor de veiligheid bedreigende situaties. De keten van gebeurtenissen die in [RABO 1982] werd verondersteld en die uiteindelijk tot falen van de pijlerfundering van de stormvloedkering zou kunnen leiden (namelijk een eerste vloeïng die niet zou worden opgemerkt, vervolgerosie die tot een tweede vloeïng zou leiden, en opnieuw erosie met een derde vloeïng tot gevolg) lijkt niet op te treden. De aanzethelling die aanwezig is na een instabiliteit is zo steil dat deze niet verder lijkt te eroderen. Het is uiteraard wel aangewezen hier nog meer in detail naar te kijken.

De oorspronkelijke criteria voor het bestorten van de aanzethellingen van de ontgrondingskuilen lijken nog steeds relevant. In het criterium wordt geen rekening gehouden met de totale taludhoogte. Dit is volgens de huidige inzichten voor zowel de kans op optreden van een vloeïng als de schade na een vloeïng wel van belang. Voor de kans op een instabiliteit zijn vermoedelijk de parameters steilste helling over 5 meter hoogte, de totale hoogte van het onbestorte deel en de totale taludhoogte belangrijk. In een nadere analyse kan worden bekeken of met deze parameters bepaalde strekkingen langs de rand bodembescherming duidelijk gevoeliger zijn dan andere. Zo is de gedachte dat de situatie richting de oevers en richting de werkeilanden (de zijkanten van de stroomgeulen) minder gevoelig is, omdat daar de taludhoogte kleiner is dan in het midden bij de grootste diepte van de ontgrondingen. Een andere onderscheidende factor kan het plaatselijk doorbreken van kleilagen zijn, waarna versneld erosie van het onderliggende zand plaatsvindt. Een dergelijke beschouwing kan mede bepalen met welke prioriteit bestortingen plaats moeten vinden. Bij de beheercriteria zou een extra aandachtspunt moeten zijn of er tekenen zijn dat er plaatselijk een kleilaag doorbroken wordt door erosie. Dit is te zien aan een versnelde erosie in het zand hieronder. Onderzocht zou moeten worden of het effectief is om op deze plekken direct over te gaan tot bestorting van deze plaatsen.

Ten aanzien van de positie van de randbalk (einde van de oorspronkelijke bodembescherming) is op aanzienlijke delen langs de rand van de bodembescherming beweging te constateren. Ten opzichte van de ligging in 1980 – 1985 is deze beweging aanzienlijk. Als gekeken wordt naar de verschillen tussen 2005, 2010 en 2012 dan lijken de verschillen binnen redelijke marges te liggen en lijkt de beweging deels tot rust gekomen. Aanbevolen wordt wel deze gegevens nauwkeuriger te bestuderen om te zien of er delen zijn waar de laatste jaren nog wel neerwaartse beweging is. Hier vindt mogelijk erosie plaats. Deze plekken dienen te worden bijgestort.

Een beschouwing of er op dit moment aanzehellingen zijn langs de rand van de bodembescherming die op basis van de geometrie als kritiek moeten worden aangemerkt valt buiten de scope van dit project. Deze analyse is door Rijkswaterstaat wel uitgevoerd en door Deltares van een onafhankelijke review voorzien.

5.2.5 Conclusies Noord-Bevelandse oever

De situatie langs de Noord-Bevelandse oever aan de Oosterscheldekant van de stormvloedkering is complex. Het lijkt er op dat op de bestorting een repeterend patroon optreedt van aanzanding met losgepakt materiaal tot een bepaalde dikte en taludsteilheid waarna een zettingsvloeiing optreedt en het patroon zich herhaalt. Geruststellend lijkt dat de vloeiingen tot nu toe beperkt lijken te zijn gebleven tot vloeiingen in het aangezande materiaal en dus op voldoende afstand van de waterkering. Een tweede geruststellend feit lijkt dat in 2012 een maatregel is genomen om het onderste onbestorte deel van het talud te beschermen. Volgens plan zal dit nog verder worden uitgebreid.

Een minder gelukkige omstandigheid is dat het lijkt alsof delen van de oorspronkelijke bestorting en bodembescherming zijn aangetast als gevolg van de zettingsvloeiingen. In zoverre er sprake van is dat de omvang van een vloeiing geremd wordt door de aanwezigheid van een bestorting, dan is de te onderzoeken vraag of hier ook in de toekomst blijvend op vertrouwd mag worden.

Met de in 2012 uitgevoerde maatregel lijkt de situatie voor het moment voldoende gezekerd. Aanbevolen wordt een geavanceerde analyse uit te voeren met het doel antwoord te geven op de vraag of met deze ingreep het restrisico (de kans op een grootschaliger gebeurtenis waardoor ook de waterkering in gevaar kan komen) blijvend voldoende klein is of dat aanvullend maatregelen nodig zijn. Hierbij moet ook worden gekeken of er naast de aangebrachte bestorting geen ongewenste randeffecten mogelijk zijn, en moet worden aangegeven wat er met de mogelijk aangetaste taludbestortingen moet gebeuren.

De analyse heeft zich nu vooral gericht op de situatie ter plaatse van de verlengde blokkenmatten onder de Noord-Bevelandse oever, onder de aanname dat dit het meest bedreigde deel van de oever is. De geavanceerde analyse moet zich echter verder uitstrekken dan dat: ten oosten van de matten tot aan de nol liggen oude rijshouten zinkstukken en bestortingen waarvan de conditie ook niet goed bekend is, en ook de ontgrondingskuil breidt zich steeds verder naar het oosten uit. Dit gedeelte moet dus worden meegenomen in de beschouwingen.

5.2.6 Conclusies zijhellingen

Langs de plaatranden (de zijhellingen van de ontgrondingskuilen) zijn 10 instabiliteiten opgetreden. Voor de veiligheid is dit geen probleem (kans op een zettingsvloeiing is kleiner dan de toelaatbare kans op een zettingsvloeiing langs de plaatranden uit de RABO (1982)).

Er treedt echter wel een effect op dat niet in de RABO (1982) werd voorzien en dat is dat enkele zettingsvloeiingen dusdanige afmetingen had (ook in de breedte) dat de bodembescherming hierdoor op drie plaatsen (Hammen Oost, Roompot West en Roompot Oost) ernstig is aangetast. Een tweede ongunstige ontwikkeling is dat de frequentie waarmee zettingsvloeiingen optreden is toegenomen, wellicht als gevolg van de toegenomen diepte van de ontgrondingskuil.

Dit maakt een keuze nodig tussen:

- Accepteren dat er een kans op schade is en deze schade herstellen als deze is opgetreden.
- Maatregelen nemen ter voorkoming van schade.

Dit kan worden opgevat als een economisch optimum tussen beide keuzes. Er kunnen echter ook andere overwegingen zijn om schade niet wenselijk te achten.

Oplossingsrichtingen kunnen zijn het verondiepen van de ontgroning of vastleggen van de bodem van de ontgroning met zo licht mogelijk (maar stabiel) materiaal eventueel na verondieping, of het afgraven van een deel van de plaatranden. Op grote schaal bestorten van de zijhellingen is waarschijnlijk economisch niet effectief, terwijl het verondiepen met zand periodiek herhaald moet worden omdat dit zand snel erodeert.

5.2.7 Conclusies bestorting

Een bestorting of blokkenmat kan op verschillende manieren werkzaam zijn in *het voorkomen* van een zettingsvloeiing. Belangrijk is in ieder geval dat een kennelijk op dat moment stabiele geometrie wordt vastgelegd, en mits de geometrie daarna niet meer in ongunstige zin veranderd is dat een afdoende maatregel. De overige beschreven mechanismen (eigen gewicht, filterwerking) zijn meer hypothetisch. Er is heel weinig onderzoek gedaan naar de werking van bestortingen anders dan het voorkomen van erosie.

Een bestorting of blokkenmat kan ook effectief zijn in het beperken van de *gevolgen* van een instabiliteit. Bij bresvloeiingen die gevoed moeten worden door zand dat van het talud af erodeert lijkt een bestorting effectief om dit proces af te remmen en zelfs te stoppen. Bij een verwekingsvloeiing die zich nog aan het ontwikkelen is (het oppervlak komt in beweging) kan een bestorting ook remmend werken. Gegeven echter het feit dat er zettingsvloeiingen zijn opgetreden die de bestortingen en blokkenmat van de rand bodembescherming hebben aangetast is een bestorting of blokkenmat maar beperkt effectief bij een vloeiing die zich heeft ontwikkeld tot een grootschalige gebeurtenis en die voortschrijdt tot (ver) onder de bestorting.

Er is weinig onderzoek gedaan naar de werking en effectiviteit van bestortingen op het initiëren en beperken van de gevolgen van zettingsvloeiingen. Aanbeveling is om hier meer aandacht aan te besteden.

5.3 Aanbevelingen korte termijn

5.3.1 Bathymetrische informatie

Voeg de nog ontbrekende datasets van uitgevoerde lodingen toe aan de datasets die tot nog toe zijn verwerkt om het beeld nauwkeuriger te maken.

Breng data-beheer en opvolgende acties op orde (ook richting Noord-Bevelandse oever). Verhoog de peilfrequentie op die plaatsen waar geregeld vloeiingen optreden, opdat de bodemligging en de mate van erosie en aanzanding vlak voor een instabiliteit beter bekend worden. Breidt het gebied waar gepeild wordt uit aan de zuidzijde van Schaar West richting de havendam en eveneens aan de zuidzijde van de Hammen Oost.

Voeg aan de bathymetrische data zoveel mogelijk de gegevens over de bodemopbouw toe. Dit maakt toekomstige analyses kwalitatief en kwantitatief veel makkelijker.

5.3.2 Verwekings- en bresvloeiing

In de korte termijn studie was het zeer beperkt mogelijk rekening te houden met de bodemgesteldheid. In een vervolgstudie is het de moeite waard dit veel beter in de beschouwingen te betrekken. Met name waar nu zettingsvloeiingen zijn opgetreden is dit waardevol materiaal waar veel van te leren is. Verfijning van de analyse van de belangrijkste vloeiingen zal meer inzicht geven in de relevantie van de verschillende hypothesen. Ook is een verfijning mogelijk van de statistische analyse met effecten van aanzanding en erosie. Beide verfijningen maken het mogelijk scherpere criteria te ontwikkelen voor het nemen van maatregelen en de rol van bestortingen.

Eén van de hypothesen is dat langs de plaatranden de kleilaag ter plaatse deels verdwenen is. Deze hypothese kan worden getoetst door te onderzoeken of deze kleilaag nog aanwezig is of niet. Dat geeft de nodige duidelijkheid over wat er werkelijk gebeurd is.

5.3.3 Veiligheidsfilosofie ontwerp en beheer

Voor de korte termijn zijn er geen aanbevelingen. Herijking van het destijds opgestelde probabilistische raamwerk maakt ons inziens deel uit van de onderzoeken om te komen tot een lange termijn beheer- en onderhoudsstrategie.

5.3.4 Randen bodembescherming

Bekijk met de verschillende voorgestelde criteria (inclusief invloed van totale taludhoogte en steilste deel talud) welke gedeelten langs de rand bodembescherming volgens die criteria meer gevoelig zijn voor zettingsvloeiing dan andere. Dit kan meer inzicht geven in de meest kritieke locaties.

Bekijk of het bestorten van plaatsen waar door erosie een kleilaag doorbroken wordt effectief is. Dit lijkt een goede maatregel om ondermijning van kleilagen te voorkomen, maar het is de vraag hoe dit erosie rondom deze plek in de hand werkt.

Bekijk de gegevens van de positie van de randbalk van de laatste jaren nauwkeuriger om te zien of er nog plaatsen zijn die neerwaartse beweging laten zien. Deze plaatsen dienen dan te worden gerepareerd.

Bij de Hammen Oost is zeer recent een zettingsvloeiing opgetreden in de rand van de bodembescherming. Indien mogelijk zou hier de toestand van de blokkenmat en bestorting bekeken moeten worden vóórdat dit wordt afgestort. Dit geeft mogelijk antwoord op een deel van de vragen omtrent het gedrag van blokkenmat en bestorting na een instabiliteit.

De huidige bewakingscriteria spreken van een talud dat niet steiler mag zijn dan 1 : 5 in zettingsvloeiingsgevoelig (holocene) zand over 5 meter taludhoogte. Voor niet vloeiingsgevoelig (pleistoceen) zand en klei mogen volgens de voorgestelde criteria steilere taluds worden toegestaan. Deze criteria gelden ongeacht de diepte en taludhoogte van de ontgroning. Dit druist om meerdere redenen tegen de huidige inzichten in:

- De aanname dat in vastgepakt (pleistoceen) zand geen zettingsvloeiing kan ontstaan is achterhaald. Een verwekingsvloeiing is minder waarschijnlijk, maar er kan wel een bresvloeiing optreden.
- De vaster gepakte zandlagen bevinden zich op grotere diepte en komen dus ook bij grotere taludhoogte bloot te liggen. Volgens de huidige inzichten neemt de kans op een instabiliteit toe naarmate de taludhoogte groter wordt. De combinatie van een minder strenge eis met een toenemende taludhoogte is dan strijdig met de logica.

- De geanalyseerde zettingsvloeiingen geven ten minste voor een deel niet het beeld dat steile hellingen in klei geen probleem zijn. Deze steile hellingen ontstaan namelijk op het moment dat de kleilaag doorbroken wordt en het onderliggende zand wordt geërodeerd. Een gat in de kleilaag breidt zich relatief snel in alle richtingen uit, dus ook in de richting van de taluds. Ondernijning of afschuiving van de kleilaag kan de inleiding zijn voor een grootschaliger instabiliteit.

Voor de korte termijn is een praktische aanbeveling alleen het 1 : 5 criterium te hanteren als signaallijn en deze voor andere grondlagen niet te versoepelen. Omdat de kuildieptes inmiddels aanzienlijk zijn, zullen eventuele schades dat ook zijn, en naar de huidige inzichten kan in niet-verwekingsgevoeligs zand wel degelijk een bresvloeiing optreden. Hiermee wordt waarschijnlijk ook het doorbreken van kleilagen gedetecteerd, aangezien dit gepaard gaat met steile aanzethellingen. Er zijn dan mogelijk meer locaties waar zou moeten worden bestort, maar hier is wel een prioritering in aan te geven.

5.3.5 Noord-Bevelandse oever

Naar de situatie langs de Noord-Bevelandse oever dient een geavanceerde studie plaats te vinden om het restrisico te bepalen (kans op een grootschalige gebeurtenis die ook de waterkering kan bedreigen). Betrek hierbij in eerste instantie wat er al beschikbaar is aan gegevens over bodemopbouw en grondparameters (bijvoorbeeld bij het archief van de voormalige Studiedienst Vlissingen), maar voer zo nodig ook aanvullend grondonderzoek uit. Maak een gedetailleerd beeld van de bathymetrie.

5.3.6 Plaatranden

Kijk voor de plaatranden naar een economisch optimum tussen kans op schade aan de bodembescherming inclusief kosten van herstel en oplossingsrichtingen om deze schade te voorkomen.

Oplossingsrichtingen om te komen tot een meer structurele aanpak maken ons inziens onderdeel uit van de onderzoeken om te komen tot een lange termijn beheer- en onderhoudsstrategie.

5.3.7 Bestorting

Er is weinig onderzoek gedaan naar de werking en effectiviteit van bestortingen op het initiëren en beperken van de gevolgen van zettingsvloeiingen. Aanbeveling is om hier meer aandacht aan te besteden.

5.4 Aanbevelingen langere termijn

Binnen afzienbare termijn moet het mogelijk zijn te komen tot een beheersysteem waarin geometrie en bodemgesteldheid worden gecombineerd in een toegespitst (tailor-made) systeem met criteria en modellen waarmee de kans op ongewenste gebeurtenissen kan worden voorspeld. In SBW Faalmechanismen losgepakt zand wordt gewerkt aan modellen waarmee snel voor veel gevallen berekeningen worden gemaakt van deze kansen.

Met de op de korte termijn door Rijkswaterstaat genomen, en nog uit te voeren, maatregelen wordt voldoende veiligheid geboden en wordt tijd gewonnen om de langere termijn beheerfilosofie uit te werken. Er zijn diverse varianten denkbaar, zoals verondiepen van de ontgrondingskuilen, afgraven van plaatranden, vastleggen bodem van de ontgrondingskuil en combinaties daarvan tot het handhaven van de huidige beheercriteria. Deze dienen nader te worden uitgewerkt op aspecten als toegenomen veiligheid (beheersbaarheid), effectiviteit en kosten opdat hier gefundeerde keuzes in kunnen worden gemaakt.

In overleg met de TUD is er gesproken over de mogelijkheden om op kortere termijn resultaten te boeken in de karakterisering van zettingsvloeiingsgevoelige ondergrond. Kortere termijn onderzoek gaat vooral om het vertalen van conusweerstand in vloeiingsgevoeligheid (state parameter). Aan de hand van een business case zou uitgewerkt moeten worden of dit perspectief biedt om hier in te investeren (wat kost het onderzoek en wat kan het opleveren?).

De situatie rond de Noord-Bevelandse oever in de nabijheid van de stormvloedkering is tamelijk specifiek. Het verdient nadrukkelijk aanbeveling om de consequenties van dit bijzondere geval voor de toetsingsregels in het algemeen te onderzoeken en met name daar waar bestortingen en matten aanwezig zijn. Het gedrag van bestorte oevers ten aanzien van de initiatie van zettingsvloeiingen en invloed op de fysische processen tijdens bezwijken verdient meer aandacht dan het tot nu toe heeft gekregen.

Een laatste opmerking betreft plannen om een grootschalige zettingsvloeiingsproef uit te voeren. Ideeën omtrent uitvoering van zo'n proef, geschikte locaties en mogelijke participanten zijn zeer welkom. Een grootschalige proef waar het mogelijke kan worden gemeten is ons inziens van onschatbare waarde.

6 Advies korte en langere termijn

6.1 Inleiding

Op basis van de uitgevoerde studies worden een aantal conclusies worden getrokken en aanbevelingen gedaan. De aanbevelingen/adviezen komen in de paragrafen 6.2 en 6.3 aan de orde. Voor deelconclusies wordt verwezen naar de hoofdstukken 2 t/m 5. Er is voor gekozen de conclusies niet te herhalen, maar om in plaats daarvan het geheel overziende de conclusies en aanbevelingen direct samen te vatten in een advies voor de korte termijn en een advies voor de langere termijn.

6.2 Advies voor de korte termijn

Bij het begin van dit project is concreet de vraag gesteld:

- Voldoet de huidige beheerstrategie voor de korte termijn of zijn er aanpassingen noodzakelijk?

Hierop kan als antwoord geformuleerd worden:

- Een constatering is dat de 'huidige beheerstrategie' vooral gericht is op het bewaken en indien nodig bestorten van de aanzehellingen langs de randen van de bodembescherming in de richting loodrecht op de as van de kering. Voor de zijhellingen langs de plaatranden en oevers is geen actieve strategie gehanteerd. Voor de aanzehellingen voldoet het criterium 'niet steiler dan 1 : 5 over 5 meter taludhoogte' nog steeds. Hierbij gelden de volgende kanttekeningen:
 - De steilste helling wordt echter niet per definitie loodrecht op de as van de kering gevonden, dus zou geïmplementeerd moeten worden dat er in meerdere richtingen gekeken wordt. Dit is eenvoudig in een GIS-applicatie te realiseren.
 - De hypothese die onderzocht moet worden is of een criterium waarin de taludhoogte van de ontgroning ook in rekening wordt gebracht beter aansluit op de werkelijkheid.
 - Een extra aandachtspunt is het feit dat kleilagen doorbroken worden door erosie. Aanbeveling voor de korte termijn is om op basis van bestaande (analoge) gegevens de aanwezigheid, ligging en dikte van kleilagen in het gebied waar ontgroningen optreden zo goed mogelijk te karteren. De mogelijkheid om met akoestische laagfrequente meettechnieken de kleilaag in kaart te brengen moet worden onderzocht.
- Voor de Noord-Bevelandse oever moet op basis van nadere studie een definitieve beheerstrategie worden opgesteld. Hierin moet worden onderzocht hoe moet worden omgegaan met de mogelijk aangetaste bodembescherming en het probleem van de cyclus van aanzanding en zettingsvloeiing. Zo lang de bestorting ver genoeg is aangebracht richting de bodem van de ontgrondingskuil en niet ondermijnd wordt door verdere erosie is hier geen haast mee, maar er moet uiteindelijk wel een keuze in gemaakt worden.
- Voor de zijhellingen is de constatering dat zettingsvloeiingen in de zijhellingen ook tot schade van de bodembescherming kunnen leiden. Dit inzicht moet leiden tot een beheerstrategie. Om tot deze beheerstrategie te komen moet een afweging worden

gemaakt tussen preventieve maatregelen om zettingsvloeiing te voorkomen of accepteren dat vloeiingen op kunnen treden met eventueel herstel van schade.

- Een andere vraag die speelt rondom het huidige beheer is de integriteit van de taludbescherming, blokkenmatten en randbalk. Bij de Noord-Bevelandse oever zijn aanwijzingen dat de in het verleden aangebrachte taludbeschermingen loodrecht op de waterkering door de diverse zettingsvloeiingen in de zijhellingen van de ontgrondingskuil zijn aangetast. Door opgetreden zettingsvloeiingen in de overige zijhellingen en de aanzehellingen is de bodembescherming op diverse plaatsen 'verdwenen' (meters gezakt en de toestand waarin de blokkenmatten zich bevinden is onbekend). Op plaatsen waar geen zettingsvloeiingen zijn geweest is de randbalk ten opzichte van de aanleg vaak aanzienlijk gezakt. De vraag is dus gerechtvaardigd of de integriteit van taludbescherming, blokkenmatten en randbalk in de huidige conditie nog voldoende is. Een belangrijke constatering is dat uit lodingen van de laatste jaren weinig verschil in dwarsprofielen wordt waargenomen. Er lijkt geen sprake van doorgaande erosieprocessen ter plaatste van bestortingen of plaatsen waar instabiliteiten zijn geweest. Dit is echter nog niet systematisch en in detail onderzocht. De aanbeveling is dit wel op korte termijn te doen op basis van de beschikbare gegevens. Op de locaties waar zakkingen geconstateerd zijn is het aan te bevelen inspecties uit te voeren gebruikmakend van een echoscope, side scan sonar, eventueel aangevuld met subbottom profiler metingen. Daarnaast is het van belang de ligging en staat van alle bestortingen in kaart te brengen. Hiertoe worden metingen met side scan sonar aanbevolen en dient te worden onderzocht welke andere meettechnieken hier mogelijk dienstbaar kunnen zijn. Ten slotte moet worden nagegaan of er technieken zijn die holtes onder blokkenmat of randbalk kunnen detecteren. Met sub bottom profiler metingen zou dit moeten kunnen.
- De inspanning om de benodigde gegevens voor deze studie in een geschikte vorm voor verdere analyses beschikbaar te krijgen is aanzienlijk geweest. Het is aan te bevelen deze data te completeren en aan te vullen met beschikbare of nog te verzamelen gegevens over ondergrond, aanwezigheid en staat bestortingen, stroomsnelheden, et cetera. Er moet worden nagedacht over een (gezamenlijk Rijkswaterstaat en waterschap) datainformatie- en databeheersysteem dat voldoet aan de informatiebehoefte, dat toegankelijk is en dat direct bruikbaar is voor uit te voeren analyses en studies.
- Voor het monitoren van de ontwikkeling van de ontgrondingskuilen is een frequentie van twee maal per jaar de bodem peilen voldoende. Voor een beter inzicht in de processen van erosie, aanzanding en geotechnische instabiliteit is een aanbeveling om voor de korte termijn (in ieder geval tijdelijk) de meetfrequentie te verhogen en het meetgebied (permanent) te vergroten en tevens om na te gaan of dit gecombineerd kan worden met andere typen metingen (multi monitoring strategie). De multibeam metingen moeten de Noord-Bevelandse oever meenemen, zoveel mogelijk ook de platen en tot op grotere afstand van de kering worden doorgezet. Dit vergroot het inzicht in de processen die er spelen.

6.3 Advies voor de langere termijn

Vraagstelling was:

- Welke aanbevelingen worden gedaan om voor de middellange en lange termijn te komen tot een optimale beheerstrategie?

Hierop wordt als antwoord gegeven:

- Op langere termijn is het perspectief dat de ontwikkeling van de ontgrondingskuilen nog decennia lang door kan gaan en tot wel 30 of 40 meter dieper kunnen worden dan ze nu zijn. Het is niet zonder meer de beste strategie om dit allemaal te gaan bestorten. Bovendien neemt de te verwachten schade na een instabiliteit min of meer lineair toe met de diepte. Schades bij hellinginstabiliteit zullen bij ongewijzigd beleid naar verwachting groter worden. In de deelonderzoeken zijn veel aanbevelingen gedaan voor verbetering. De aanbevelingen zijn verschillend in mate van detail c.q. abstractieniveau en in relevantie. Deze zouden in een kader geplaatst moeten worden in een meerjarig plan van aanpak. In dat plan moet terugkomen welke alternatieven er denkbaar zijn voor een beheerstrategie. Zo is het ons inziens de moeite waard te onderzoeken of het mogelijk is om aan te geven of in alle stroomgaten kleilagen op of nabij de bodem van de huidige ontgrondingskuilen aanwezig zijn. Het kan een plausibele strategie zijn om het beheer er op in te richten dat deze kleilagen niet doorbroken mogen worden opdat de verdere doorgroei naar 30 of 40 meter diepere ontgrondingskuilen niet plaats kan vinden. Andere strategieën kunnen bijvoorbeeld zijn de ontgrondingskuilen periodiek met zand te verondiepen, deels af te storten met grind, zandplaten langs de zijhellingen af te graven en vast nog andere varianten en combinaties van maatregelen. In het meerjarig plan van aanpak kan vervolgens nagegaan worden waar de gedane aanbevelingen passen en met welke prioriteit daar aandacht voor nodig is. Bijzondere prioriteit is onderzoek naar het restrisico langs de Noord-Bevelandse oever en eventuele vervolmaatregelen op deze locatie.
- Ten behoeve van onderzoek naar de effecten van verschillende oplossingsrichtingen/strategieën zullen de modellen ten behoeve van morfologie en ontgrondingen aangescherpt moeten worden om de betrouwbaarheid van voorspellingen te vergroten. Voor de locale situatie is het aan te bevelen om een gedetailleerd beheersmodel van de stroming gereed te hebben om in geval van belangrijke gebeurtenissen snel in te kunnen zetten. Grootschalige morfologische processen kunnen op de lange termijn grote veranderingen in het stroombeeld veroorzaken. Dit dient periodiek (om de 6 jaar) beschouwd te worden.

7 Literatuur

Bruijn de, R.A., (2012), The future of the Oosterschelde with a new inlet channel, aug 2012, Msc Thesis, TuDelft, Rijkswaterstaat.

Ten Brinke, W.B.M., (1990), Zandtransport door de stormvloedkering bij storm: Rapport GEOPRO 1990.05 Instituut voor Ruimtelijk Onderzoek, Universiteit Utrecht.

Rijkswaterstaat Deltadienst, (1982), 2^e stand van zaken nota Randbodembescherming (22RABO-M-82009)

Deltares (2012a) Stormvloedkering Oosterschelde: ontwikkeling ontgrondingskuilen en stabiliteit bodembescherming, deelrapportage Databeheer en Monitoring, De Kleine, M., L. Vonhögen-Peeters, V. Marges,. 1206907-002, november 2012

Deltares (2012b) Stormvloedkering Oosterschelde: ontwikkeling ontgrondingskuilen en stabiliteit bodembescherming, deelrapportage Morfologie. De Ronde, J. G., A. P. Oost, J. de Lima Rego, A. C. Bijlsma. 1206907-004, november 2012

Deltares (2012c) Stormvloedkering Oosterschelde: ontwikkeling ontgrondingskuilen en stabiliteit bodembescherming, deelrapportage Ontgrondingen. Raaijmakers, T., G. van Velzen, G. Hoffmans, A. Bijlsma, W. Verbruggen, J. Stark. 1206907-003, november 2012

Stormvloedkering Oosterschelde: ontwikkeling ontgrondingskuilen en stabiliteit bodembescherming, deelrapportage Hellinginstabiliteit. Stoutjesdijk, T., D. Mastbergen, M. B. de Groot. 1206907-001, november 2012

A Technisch inhoudelijke vragen van RWS bij waterbouw en ontwerp

De technisch inhoudelijke vragen zijn gebruikt om de opdracht aan Deltares vorm te geven. Daarbij is onderscheid gemaakt tussen het onderzoek dat door Deltares wordt verricht en wat door Rijkswaterstaat zelf gedaan is. Tevens is bepaald wat voor eind 2012 resultaat moet opleveren en wat op langere termijn opgepakt moet worden. Het langere termijn onderzoek is uitgewerkt tot concrete in 2013 te onderzoeken punten.

In het plan van aanpak Technisch management zijn 12 onderwerpen geïdentificeerd. Deze onderwerpen zijn hieronder overgenomen zoals destijds (eind juli 2012) geformuleerd. Tijdens het onderzoek zijn de vragen verder uitgekristalliseerd en werd duidelijk in welke mate ze te beantwoorden waren op de kortere en langere termijn. De formulering hieronder is niet meer aangepast op dit inzicht. Deltares heeft deze vragen in haar onderzoek niet systematisch behandeld, maar heeft wel een deel ervan beantwoord. De resultaten daarvan zijn verwerkt in deze rapportage. Aan het eind van het rapport, bij het bepalen van de aanbevelingen tot nader onderzoek worden de vragen nagelopen en eventueel noodzakelijk vervolgonderzoek benoemd.

1 Criteria voor instabiliteit

De criteria die nu worden gehanteerd in het beheer en onderhoud van de bodembescherming dateren nog van de ontwerpperiode en zijn gebaseerd op uitgangspunten die mogelijk deels achterhaald zijn (veel grotere kuildieptes, verdichting bodem tot beperkte diepte). De criteria dienen nader bepaald te worden voor zowel de aanzehelling achter de blokkenmatten als voor de zijhellingen op basis van de huidige inzichten en te anticiperen op toekomstige ontwikkelingen.

2 Stabiliteit en levensduur beschadigde blokkenmatten

Op een aantal plaatsen is de blokkenmat verzakt en ligt deze door het volgen van de aanzehelling enigszins geknikt op de bodem. Het is niet duidelijk of de bestorting met fijne staalslak tussen de blokken, danwel de zwaardere bestorting op de blokkenmat dan nog aanwezig is. Bovendien wordt het geotextiel in dat gebied op trek belast en is dan meer gevoelig voor scheurvorming. Het risico van dit schade beeld dient nader onderzocht te worden.

Nieuw fenomeen kan zijn openstaande naden tussen de matten door grote vervorming RaBo.

3 Ecologie van bestortingen

De nu toegepaste bestorting bestaat vaak uit staalslakken. Vanuit ecologisch opzicht zijn die minder gewenst door de geringe aanheftingscapaciteit voor zeeleven. Alternatieve materialen dienen te worden onderzocht.

4 Oplossingen tegen versteilen aanzehelling

Wanneer een ontgrondingskuil gedeeltelijk wordt bestort gaat de ontgroning stroomafwaarts van de bestorting gewoon door met het risico op opnieuw een te steile aanzehelling. Wanneer de overgang naar het niet bestorten gedeelte vloeiender zou verlopen zou dit voorkomen kunnen worden. Alternatieve bestortingswijzen zouden hiertoe nader onderzocht en uitgeprobeerd moeten worden (bijv. falling apron).

5 Gedrag bestorting bij vloeïing

De huidige bestortingsfilosofie gaat er vanuit dat na het bestorten de aanzethelling stabiel is. Met name bij de zijhellingen komt het nogal eens voor dat er zand op de bestorting sedimenteert. Door de groei van de kuil achter de blokkenmat kunnen de zijhellingen versteilen waarna er risico op vloeïing of afschuiving is. In enkele gevallen is dat ook gebeurd (Roompot Oost en Hammen Oost). De vraag is of de aanwezige bestorting deel gaat uitmaken van de instabiliteit of dat die zich beperkt tot het gesedimenteerde deel.

1 Prognose ontwikkeling ontgrondingskuilen (inclusief zijhellingen)

In 1996 is een prognose opgesteld voor de ontwikkeling van de kuildiepte met horizon 2050 (Stroeve, 1996). Als maximale kuildiepte in 2050 werd verwacht 43 meter ten opzichte van de diepte rand bodembescherming. Deze prognose moet geactualiseerd worden met de huidige ervaringen van de kuilontwikkeling en de huidige kennis over ontgrondingen. Daarbij dient ook eventuele verplaatsing van de geulen te worden betrokken. De actualisatie houdt nauw verband met de onder 1. genoemde criteria voor instabiliteit.

2 Stabiliseren doorgebroken kleilaag

Op enkele plaatsen heeft de ontgrondingskuil de kleilaag in de bodem doorbroken. Dit leidt tot relatief snelle erosie van de onderliggende zandlaag en verdere afbrokkeling van de kleilaag. Dit mechanisme moet nader onderzocht worden, met name hoe dit snelle erosieproces effectief gestopt kan worden en of dit mechanisme voldoende in rekening is gebracht in de veiligheidsfilosofie rond de bodembescherming.

3 Detectiemethoden aanwezigheid bestorting

Langs de rand bodembescherming is op vele plaatsen bestorting aangebracht. De vastgelegde locatie daarvan strookt in veel gevallen niet met het waargenomen gedrag van de bodem. Voor toekomstige analyses van de stabiliteit van de ontgrondingskuilen is het van belang nauwkeurig te weten waar wel of geen bestorting ligt. Tot nu toe ontbreekt daartoe een betrouwbare methode.

4 Ruimtelijk gedrag van zettingsvloeïingen

Het blijkt dat een zettingsvloeïing, ontstaan door instabiliteit van de zijhelling, zich uit kan breiden tot onder de blokkenmat. Wat is een veilige afstand van de blokkenmat die moet worden aangehouden opdat de vloeïing de blokkenmat niet meer kan bereiken?

5 Effect kuilontwikkeling op morfologie op grotere schaal

Er is mogelijk een interactie van de kuilontwikkeling met de ontwikkeling van de geulen. De diepe kuilen kunnen mogelijk de stroom richten en van daaruit weer de richting van de kuilontwikkeling beïnvloeden. De debietverdeling over de gehele geul verandert daarbij. Te onderzoeken met hydraulisch model. Daarmee kunnen hypothesen worden doorgerekend en getoetst op realiteit. Dit heeft invloed op de te verwerking lodingen; het zoekgebied kan groter worden.

6 Effect op faalkansanalyse en onderhoudsplannen

In 2010 is de faalkansanalyse van de civiele delen van de kering herberekend. De blokkenmatten en de rand bodembescherming moeten opnieuw worden herberekend met de nieuwe inzichten. In het rapport van 2010 is de ervaring van de eerst 10 jaar die verzameld is door BNW (Begeleidingsgroep Natte Werken) niet volledig meegenomen. De rapporten van BNW zijn opgespoord in het archief.

7 Metingen / monitoring

De resultaten van de vorige punten zullen effect hebben op de behoefte aan metingen en monitoring. Daarbij spelen twee hoofdvragen:

- Welke informatie moet verkregen worden uit de metingen en wat is het doel van monitoring, wat is de frequentie van de metingen en hoe groot is het te bewaken gebied?

Wat is de behoefte aan inzet en ontwikkeling van nieuwe technieken voor metingen en monitoring?