



Rijkswaterstaat



Richtlijnen Onderwatersuppleties

RIKZ rapport 2007.012



Rijkswaterstaat

Richtlijnen Onderwatersuppleties

A.J.F. van der Spek

A.C. de Kruif

R. Spanhoff

Colofon

Dit is een uitgave van Rijkswaterstaat

Juli 2007

Opdrachtgever: Rijkswaterstaat

Uitgevoerd door: A.J.F. van der Spek
A.C. de Kruif
R. Spanhoff

Druk: Thieme Deventer

Document: RIKZ rapport 2007.012
ISBN 978 90 369 5764 9

Inhoudsopgave

1. Inleiding 7
 2. De dynamiek van het morfologisch systeem “kust” 11
 3. Wat te doen bij zandtekort? 15
 4. Waarmee rekening houden bij ontwerp? 29
 5. Waaraan moet het ontwerp voldoen? 33
 6. Monitoring en evaluatie van een onderwatersuppletie 37
 7. Conclusies m.b.t. ontwerp, uitvoering, monitoring en evaluatie onderwatersuppleties 39
 8. Aanbevelingen voor verder onderzoek gericht op concrete verbetering richtlijnen 43
- Appendix: Overzicht rapporten en publicaties onderwatersuppleties 45

Richtlijnen suppletieontwerp

Hieronder volgen richtlijnen voor het ontwerpen van onderwater- en strandsuppleties. Het uitgangspunt voor deze richtlijnen is een optimaal onderhoud van het kustprofiel. Indien andere doelstellingen voorop staan resulteert dit in andere richtlijnen.

Deze richtlijnen zijn gebaseerd op de huidige inzichten in het functioneren van suppleties. Deze inzichten zijn hypothesen welke afgeleid zijn uit de beschikbare waarnemingen. Op dit moment kunnen nog veel vragen over het functioneren van suppleties niet beantwoord worden. De meest relevante vragen zullen in de komende tijd nader onderzocht worden.

- **Suppleer onder water.** Het kustprofiel reageert snel op het aanbrengen van een suppletie rond de –5m NAP. Indien een suppletie van dezelfde ordegrootte als de aanwezige banken aangelegd wordt op of vlakbij de locatie waar de meest zeewaartse bank verdwijnt, zullen in het eerste jaar na uitvoering banken en troggen landwaarts schuiven, met als netto resultaat een toename van het zandvolume in de ondiepe brandingszone en in de strand- en duinzone.
- Een vergelijkbare ontwikkeling is waargenomen in een gebied waar geen banken aanwezig zijn. De suppletie vervormt tot een bank en induceert een trog. Doordat het profiel zich instelt op deze nieuwe vorm treedt er een netto zandverplaatsing op richting landzijde.
- Alleen indien er sprake is van zeer snelle erosie waarbij de BasisKustLijn (BKL) flink wordt overschreden, wordt geadviseerd een strandsuppletie aan te brengen. Locale morfologie zoals een geul vlak onder het strand maakt het suppleren onderwater soms onmogelijk of inefficiënt.
- Het volume van de aan te brengen suppletie dient aan te sluiten bij het volume van de banken die van nature aanwezig zijn in het profiel.
- Houd er bij het ontwerp rekening mee dat de positieve invloed van een suppletie met een lengte van ordegrootte 3 km zich uitstrekt tot (maximaal) ongeveer 2 km ter weerszijden van de locatie. Afwijkend is het Waddengebied, zie hieronder bij Specifieke situaties.
- **Waddengebied** – Door de oost-west oriëntatie van de Waddenkust zorgen (sterke) westelijke winden voor kustlangse effecten. De invloed van een suppletie is daardoor sterk oostwaarts gericht. De aanleg van een suppletie dient daarom westwaarts uitgevoerd te worden t.o.v. de zone waar netto zandwinst gewenst is.

-
- Zeeland - Hier liggen vaak geulen dicht onder de kust. Onderwatersuppleties op een geulwand zijn nu een aantal malen aangebracht, met als doel de geul uit de kust te houden en eventueel strandsuppleties te voorzien van een ondersteunend zandlichaam. Richtlijnen voor geulwandsuppleties zijn er door de korte evaluatieperiode nog niet.

1. Inleiding

Sinds 1990 houdt Rijkswaterstaat de Nederlandse kustlijn met zandsuppleties op zijn plaats en vanaf 2001 wordt ook het zandverlies op dieper water gecompenseerd. Het beheer van de Nederlandse kust wordt sinds 2004 uitgevoerd middels de Service Level Agreement (SLA) Kustlijnzorg. Hierin is afgesproken dat er jaarlijks 12 miljoen m³ zand wordt gesuppleerd. Belangrijk is dat dit suppletiezand jaarlijks zo efficiënt mogelijk wordt ingezet op de daarvoor aangewezen locaties in het suppletieschema. Dit document is een richtlijn die door de suppletieontwerpers wordt gebruikt bij het jaarlijks opstellen van de ontwerpen voor het suppletieschema. De Regionale Directies van RWS en het RIKZ stellen een conceptsuppletieschema op voor de vier kustregio's. Op basis van de jaarlijkse kustmetingen wordt bekeken waar zandtekorten ontstaan en voor die locaties worden zandsuppleties ontworpen. De hoeveelheid zand, de exacte locatie kustlangs en kustdwars en de vorm van de suppletie worden op basis van gebiedskennis in de regio en ervaringen uit het verleden in onderling overleg tussen de Regionale Directies en RIKZ bepaald.

Nu we werken in een landelijk programma en optimaal willen profiteren van de beschikbare kennis en ervaring binnen RWS is er voor gekozen om te komen tot een landelijke richtlijn voor het ontwerp van suppleties. Het effect van suppleties op kustontwikkeling en kustlijnzorg is een aantal jaren onderzocht. Hier zijn de nodige lessen uit te trekken maar de inzichten zijn nog niet voldoende onderbouwd om te komen tot harde richtlijnen. De huidige richtlijnen zijn dan ook veelal gebaseerd op hypothesen die verder aangevuld en getoetst dienen te worden. De voorliggende richtlijnen zijn een neerslag van het huidige kennisniveau en daarmee voor dit moment een goed uitgangspunt voor het ontwerpen van suppleties.

Vanaf 1990 is de kustlijnzorg voornamelijk met strandsuppleties uitgevoerd. Het zand wordt direct in dat deel van het kustprofiel neergelegd waar dit volume direct bijdraagt aan het op zijn plaats houden van de kustlijn. De geleerde lessen zijn eerder vastgelegd in het rapport 'Water en Zand in Balans'¹. De laatste jaren is meer en meer op de vooroever, dus onder water gesuppleerd. De praktijkervaringen hiermee, opgedaan bij onderzoek en beheer, zijn in dit document opgenomen.

Dit rapport geeft voornamelijk richtlijnen voor suppleties die onder water uitgevoerd worden. Voor onderwatersuppleties geldt dat de

.....

¹ Roelse, 2002; rapport RIKZ/2002.003

effectiviteit van het aangebrachte zand op de kustlijnontwikkeling lastiger te kwantificeren is. Er wordt vanuit gegaan dat gemiddeld de helft van het gesuppleerde zand in de BasisKustLijn-zone terecht komt, het deel van de kustzone op basis waarvan de kustlijnpositie wordt berekend. Het natuurlijke profiel past zich vrij snel aan door herverdeling van het zand en aanpassing van het bankenpatroon. In 1993 is een proef met een grootschalige onderwatersuppletie uitgevoerd en vanaf 1997 worden regelmatig onderwatersuppleties uitgevoerd. Ook in 1997 is het eerste richtlijnen werkdocument 'Suppleren onder water'² opgesteld. In 2001 verscheen de opvolger 'Voorlopige richtlijnen monitoring en ontwerp onderwatersuppleties'³. Nu we ongeveer tien jaar onderwatersuppleties aanleggen en monitoren langs de Nederlandse kust is het beter mogelijk om de uitgevoerde suppleties in detail te evalueren en onderling te vergelijken om te komen tot ontwerpregels voor een efficiënte kustlijnverzorging.

Dit richtlijnen document is onder andere gebaseerd op de twee hierboven genoemde documenten met voorlopige richtlijnen. Verder zijn er verschillende studies door RIKZ en marktpartijen⁴ uitgevoerd, gericht op een beter begrip van de ontwikkeling, werking en effectiviteit van onderwatersuppleties. Met name de detailstudie van drie suppleties langs de Zuid-Hollandse kust, welke relatief ongestoord konden ontwikkelen, heeft veel informatie opgeleverd betreffende de werking van onderwatersuppleties⁵. Deze detailstudie is (nog) niet uitgebreid naar de rest van de Nederlandse kust. WL | Delft Hydraulics heeft in het kader van het Voortschrijdend Onderzoeks Programma richtlijnen voor het ontwerpen van onderwatersuppleties opgesteld, op basis van de bestaande kennis van het fysische gedrag van kustsystemen⁶. Experts van de Universiteit Utrecht, de Universiteit Twente en de Technische Universiteit Delft zijn betrokken bij de kwaliteitsborging van de verschillende studies.

Het doel van dit richtlijnen document is te komen tot een morfologisch zo efficiënt mogelijke verdeling van het jaarlijks beschikbare volume suppletiezand van 12 miljoen m³ op basis van de op dit moment beschikbare kennis. Er bestaan echter nog steeds kritische kennisleemtes betreffende de werking van onderwatersuppleties en, in mindere mate, van strandsuppleties. Bij het suppleren voor de Nederlandse kust dient de kustlijnverzorging voorop te staan maar dienen we alle beschikbare leerruimte bij het ontwerpen te benutten. De gesignaleerde kennisleemtes inclusief oplossingsrichtingen in dit document dienen daarbij als een leidraad. In de komende jaren zullen de kennisleemtes zoveel mogelijk ingevuld worden; de richtlijnen zullen op basis hiervan regelmatig aangevuld worden.

.....

² Spanhoff, 1997; werkdocument RIKZ/OS-97.150x

³ Spanhoff, 2001; werkdocument RIKZ/OS/2001.114x

⁴ Steijn, 2005; Witteveen+Bos, 2006a, 2006b; Cohen, 2006; Walstra et al., 2006

⁵ Witteveen+Bos, 2006b.

⁶ Walstra et al., 2006

Leeswijzer

Dit rapport begint met een korte opsomming van de richtlijnen voor suppleren onder water. Deze richtlijnen worden in het rapport zelf onderbouwd. Het rapport bestaat uit twee delen. Het eerste deel geeft algemene informatie over het natuurlijke systeem van de Nederlandse kust (Hoofdstuk 2) en een aantal aspecten van kusterosie, suppleties en kustlijn­zorg (Hoofdstuk 3). Dit deel is bedoeld als achtergrondinformatie bij het tweede deel van het rapport dat meer specifiek gericht is op suppleties. Het tweede deel van het rapport behandelt de randvoorwaarden bij het ontwerpen van suppleties (Hoofdstuk 4), de aan het ontwerp te stellen eisen (Hoofdstuk 5) en monitoring en evaluatie van onderwatersuppleties (Hoofdstuk 6). Deze specifieke informatie wordt kort en bondig op een rij gezet in Hoofdstuk 7. De geconstateerde kennislacunes en de daaruit voortvloeiende aanbevelingen voor nader onderzoek zijn vastgelegd in Hoofdstuk 8. De appendix geeft niet alleen de volledige referenties van de in de voetnoten genoemde rapporten en publicaties, maar ook referenties van niet genoemde, relevante publicaties.

2. De dynamiek van het morfologisch systeem “kust”

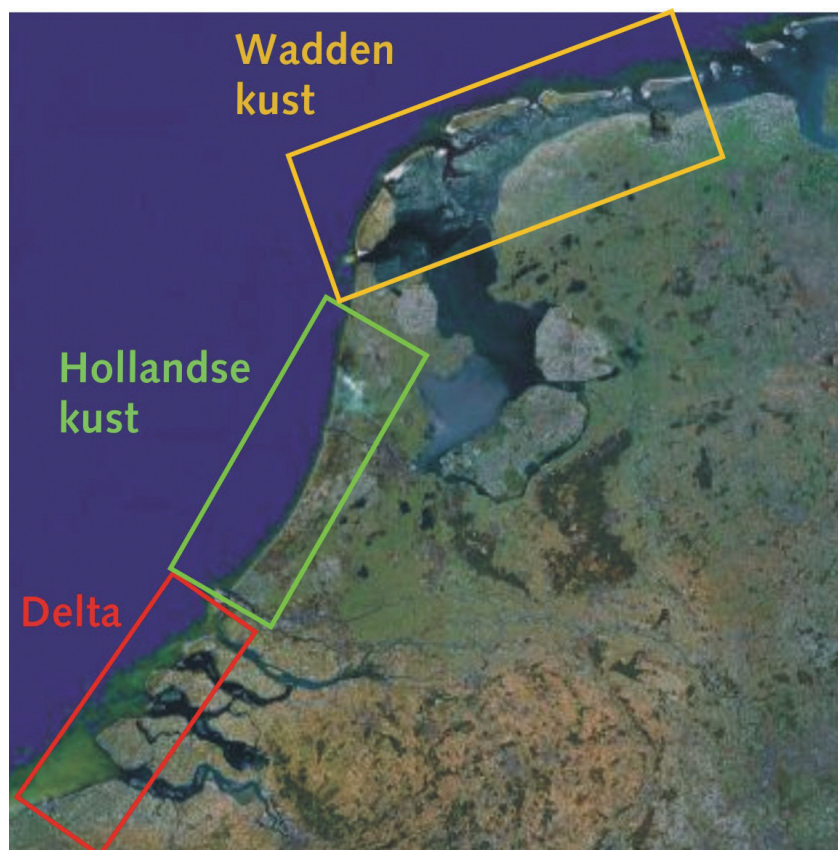
De Nederlandse kust

De Nederlandse kust is een overwegend zandig systeem. Dit systeem wordt gekenmerkt door een hoge mate van flexibiliteit: het past zich relatief snel en makkelijk aan aan veranderende randvoorwaarden door herverdeling van zand. Een belangrijke voorwaarde hiervoor is de beschikbaarheid van voldoende zand. Zo kon de Nederlandse kust zich in het geologische verleden opbouwen en handhaven dankzij een grote natuurlijke aanvoer van zand, ondanks sterk veranderende omstandigheden zoals een aanzienlijke stijging van het gemiddeld zeeniveau. In de huidige situatie is er geen natuurlijke netto aanvoer van zand meer. Hierdoor kan herverdeling van zand leiden tot lokale zandtekorten. Dit wordt bijvoorbeeld geïllustreerd door de grote netto zandtransporten naar de Waddenzee, de zogenoemde “zandhonger”, waardoor de kust van noordelijk Noord-Holland vrijwel continu zand verliest. Deze structurele erosie wordt bestreden door middel van zandsuppletie in het kader van de kustlijnzorg.

De Nederlandse kust wordt onderverdeeld in drie regio's: Wadden, Holland en Delta (Fig. 1).

Figuur 1

De Nederlandse kust, onderverdeeld in drie regio's.



1. Waddenkust

De kust van het Waddengebied bestaat uit eilanden welke van elkaar gescheiden worden door zeegaten. Landwaarts van de eilanden ligt een uitgestrekt inter-getijdegebied dat twee maal per dag gevuld en geleegd wordt via de zeegaten. Ter hoogte van de zeegaten strekken zich buitendelta's uit in zeewaartse richting. Buitendelta's zijn relatief ondiepe gebieden welke doorsneden worden door getijgeulen. Het zijn dynamische gebieden die de morfologische ontwikkelingen van de kustlijn van de aangrenzende eilanden sterk beïnvloeden. Het periodiek verplaatsen van zandbanken van de buitendelta naar de eilandkusten, gevolgd door het verhelten van de banken hiermee, leidt tot periodieke vooruitgang van de eilandkusten. Het aangelande zand verplaatst zich langs het eiland, waardoor deze vooruitgang op termijn gevolgd wordt door achteruitgang. Daarbij komt dat door de aanwezigheid van de buitendelta's relatief diepe getijgeulen vlak onder de kust van de koppen van de eilanden voorkomen. De invloed van de geulen van het Zeegat van Texel strekt zich uit langs de Hollandse kust tot aan Petten. De centrale delen van de eilandkusten worden niet direct beïnvloed door de buitendelta's. Zeewaarts hiervan komen brandingbanken voor.

2. Hollandse kust

De kust van Noord- en Zuid-Holland bestaat uit aaneengesloten stranden en duinen, welke onderbroken worden door havenmonden met havendammen (Ijmuiden, Scheveningen en Hoek van Holland), spuisluizen (Katwijk aan Zee) en een zeedijk (Hondsbosche en Pettemer Zeewering). Langs dit kusttraject komen bij de meeste badplaatsen boulevards voor. De dynamiek van de Hollandse kust wordt gedomineerd door golfwerking. Langs een groot deel van de Hollandse kust komen cyclisch zeewaarts bewegende brandingbanken voor. De herhalingstijd van het bankenpatroon varieert van zo'n vier jaar in het gebied tussen Ijmuiden en Scheveningen tot ongeveer 15 jaar in het gebied tussen Petten en Ijmuiden⁷.

3. Deltakust

De Deltakust bestaat uit eilanden die gescheiden worden door zeearmen en estuaria. De eilanden strekken zich loodrecht op de zuidwest-noordoost lopende kustlijn uit (dit in tegenstelling tot de Waddeneilanden, zie Fig. 1). De meeste zeearmen zijn afgesloten met al dan niet doorlaatbare constructies. Zeewaarts van de estuaria en zeearmen liggen uitgestrekte buitendelta's welke aaneengegroeid zijn tot een uitgestrekt bankengebied dat doorsneden wordt door getijgeulen: de Voordelta. Langs vrijwel de gehele Deltakust liggen relatief diepe geulen vlak onder kust, waardoor lokaal zeer steile onderwateroevers voorkomen.

.....
⁷ Wijnberg, 2002

Kustprofiel

Het kustprofiel bestaat uit een 'nat' deel, de voor- of onderwateroever, en een overwegend droog deel, het strand en de zeereep van de duinen. De ondergrens van het kustprofiel ligt op ca. 20 m waterdiepte, daar waar de kusthelling overgaat in de relatief vlakke zeebodem. Voor het centrale deel van de Hollandse kust ligt deze overgang ondieper. De onderwateroever is onder te verdelen in de door golfwerking gedomineerde brandingzone en een dieper deel dat voor de Hollandse kust relatief rustig is maar in de buurt van zeegaten gedomineerd wordt door getijgeulen. In de brandingzone bewegen banken volgens een cyclisch patroon in zeewaartse richting (zie hieronder). Het intergetijdje en het droge deel van het kustprofiel bestaan uit strand en duinen. Het strand bestaat uit het natte strand, tussen gemiddeld laagwater en gemiddeld hoogwater, en het droge strand, tussen gemiddeld hoogwater en de duinvoet. Het strandprofiel varieert met de seizoenen. Tijdens storm wordt het strand afgevlakt, waarbij zand van het hoge strand en soms van de duinvoet lager in het profiel wordt afgezet. Tijdens rustig weer worden strandbanken gevormd die landwaarts migreren en uiteindelijk verhelen met het droge strand. Hierdoor wordt het oorspronkelijke profiel weer min of meer hersteld. NB dit geldt niet voor kusttrajecten waar getijgeulen dicht bij de onderwateroever voorkomen. Daar is het beeld gecompliceerder. Als gevolg van aanlandige wind zal een deel van het zand op het droge strand verstuiven in landwaartse richting. Dit zand wordt ingevangen in de zeereep. Om verstuiving van strandzand naar de zeereep volledig op gang te laten komen is een bepaalde minimum strijklengte nodig. Deze kritische strijklengte wordt in eerste instantie bepaald door de breedte van het strand. De richting van de wind kan deze strijklengte aanzienlijk vergroten: hoe schever de wind invalt, hoe langer de strijklengte wordt. Bij windrichtingen parallel aan de kust is de strijklengte in principe oneindig, zie Fig. 2.

.....

Figuur 2

Argus videobeeld van het strand bij Egmond aan Zee, 25 november 2006. Op het strand zijn windribbels te zien, die zich evenwijdig aan de kust over het vochtige strandzand bewegen, een duidelijke aanwijzing voor zandtransport door de wind.

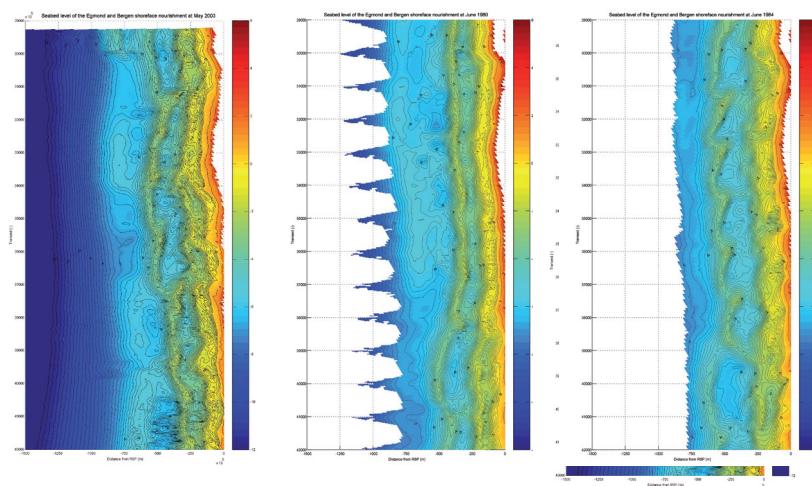


Dynamiek brandingbanken

Breker- of brandingbanken zijn min of meer kustparallele zandruggen van maximaal enkele kilometers lengte. Ze komen op de meeste plaatsen langs de Nederlandse voor. Het aantal banken varieert en ligt tussen de één en drie. Deze banken bewegen in een cyclisch patroon; nieuwe banken ontstaan bij de kust, verplaatsen zich gemiddeld over de jaren in zeewaartse richting en verdwijnen uiteindelijk op een bepaalde afstand uit de kust. De herhalingsperiode van het bankenpatroon bedraagt 4 tot 15 jaar. De zeewaartse verplaatsing is vermoedelijk een gevolg van zeewaartse retourstroming dicht bij de bodem van water dat tijdens hoogenergetische gebeurtenissen door golven bij de kust wordt opgestuwd. Het maximum aantal banken, de afstand waarover de banken verplaatsen voordat ze verdwijnen en de herhalingsperiode van het bankenpatroon zijn afhankelijk van de locatie. Het aantal duidelijk herkenbare banken op een bepaalde locatie hangt af van de fase waarin de cyclus op dat moment verkeert. Naast de cyclische zeewaartse verplaatsing laten de banken op kortere tijdschalen een complex driedimensionaal gedrag zien. Zo vervormen de overwegend rechte banken tot bananen of boemerangs en weer terug, onder invloed van stormen⁸, zie Fig. 3.

Figuur 3

Bathymetrische opnamen van de onderwateroever bij Egmond aan Zee. Deze opnamen illustreren de variatie in vorm van de brandingbanken. De oranje/rode kleur aan de rechterkant van de figuren is de duinvoet die over gaat in het gele strand. De geel/groene stroken zijn de onderwater gelegen banken. Van links naar rechts is een sterke 3D structuur, een vrijwel rechte structuur en een boemerang structuur te zien.



Er is geen duidelijke relatie tussen het zeewaarts verplaatsen van banken en eventuele erosie of sedimentatie van de kust. De verplaatsing van banken en troggen betekent niet automatisch dat er netto transport van zand in kustdwarse richting is.

Bij het afsterven van de buitenste bank begint een verder landwaarts gelegen bank vaak zeewaarts op te schuiven waarbij het bankvolume toeneemt: men zou kunnen zeggen dat de buitenste bank sturend werkt op het banksysteem. Ook is er een koppeling tussen de hoogte en de positie van de banken en de dynamiek van het strand.

⁸ Zie bijvoorbeeld De Keijzer, 2004, werkdocument RIKZ/OS/2004/123w

3. Wat te doen bij zandtekort?

Kustlijnhandhaving

De vorm van de kust (in langs en dwarsrichting) is over een lange voorafgaande periode (eeuwen, decennia) tot stand gekomen, onder invloed van golven, getij, stroming en zandaanvoer. De ontwikkeling van de kust ijlt mogelijk wat na op klimaatveranderingen en (vooral) op menselijke ingrepen, zoals bijv. de afsluiting van zeearmen en de aanleg van havens. Hierdoor kan de kust op zoek gaan naar een nieuwe evenwichtssituatie waarbij erosie op kan treden. Het doel van het beleid van *Dynamisch Handhaven*, ingesteld in het begin van de 90-er jaren, is de bestrijding van structurele kustachteruitgang. Om dit beleid uitvoerbaar te maken is als instrumentarium de BasisKustLijn-methodiek ontwikkeld en ingevoerd. Een BasisKustLijn (BKL) is vastgesteld en ieder jaar wordt op basis van de Jaarlijkse Kustlodingen (JARKUS) getoetst of deze overschreden dreigt te worden. Mocht dat het geval blijken te zijn *en* is er sprake van structurele erosie, dan wordt een suppletie overwogen en waarschijnlijk uitgevoerd. De BKL-methodiek staat o.a. beschreven in het rapport "De Basiskustlijn"⁹. Hier herhalen we enkele belangrijke punten, zonder recht te doen aan de uitzonderingen die in de praktijk voorkomen¹⁰. We beperken ons in dit richtlijnendocument uitdrukkelijk tot kustlijnhandhaving. Voor suppleties met andere doelstellingen, zoals duinverzwaringen voor de veiligheid, gelden andere spelregels.

De Basiskustlijn

De (gemiddeld) laagwaterlijn (GLW) geldt vaak als **de** kustlijn, de grens tussen land en water. De positie van deze lijn fluctueert sterk in de tijd en is afhankelijk van toevallige profielvormen in de hoogdynamische strandzone. Om tot een hanteerbare norm te komen is daarom als stabielere maat een definitie op basis van een zand*volume* gekozen, die zoveel mogelijk hetzelfde rekenresultaat oplevert als de GLW. Het gaat om het volume in een rekenschijf welke symmetrisch is gekozen rond het niveau van GLW, namelijk van dit niveau tot het duinvoetniveau plus eenzelfde dikte eronder. Uit de gemeten zandinhoud in deze schijf (t.o.v. een vaste verticale landwaartse grens, meestal ter hoogte van de RijksStrandPalen-lijn) wordt de positie van de Momentane KustLijn- (MKL) berekend. De MKL zal ongeveer samenvallen met de GLW positie. Voor een bepaalde raai wordt uit de MKL's van 10 voorafgaande jaren met een lineaire regressie de geëxtrapoleerde positie op 1 januari van het komende jaar berekend, de zogenaamde TKL: te Toetsen KustLijn. Deze wordt vergeleken met de BKL die in principe op dezelfde manier is vastgesteld voor

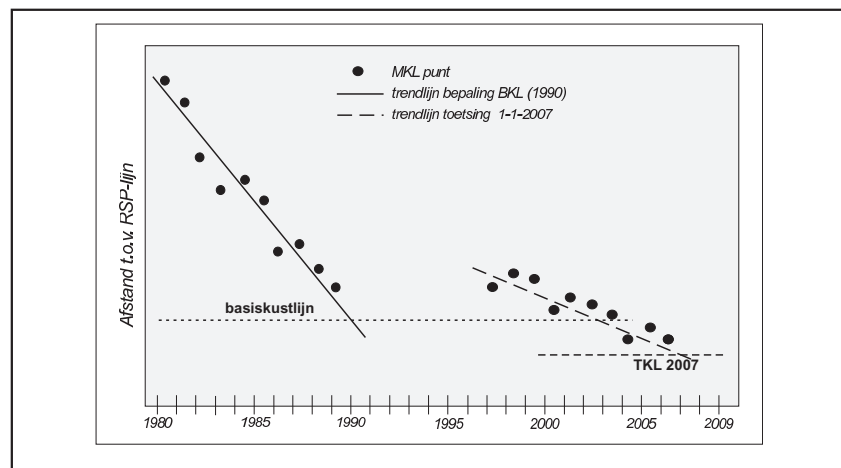
.....
⁹ Hillen et al., 1991; nota GWWS-91.006

¹⁰ zie rapport De Basiskustlijn; Hillen et al., 1991

1 januari 1990 (uit de MKL's over de jaren 1980-1989), zie Fig. 4. Voor een deel van de JARKUS raaien jaren is voor de BKL bewust een aangepaste positie gekozen of is geen BKL vastgesteld. Het laatste is o.a. gebeurd op koppen van eilanden waar grote (nauwelijks voorspelbare) veranderingen op kunnen treden op tijdschalen groter dan 25 jaar (de lengte van de JARKUS reeks in 1990). Op plaatsen waar de kustlijn periodiek (cycli tot zo'n 25 jaar) voor en achteruit gaat (met zgn. horizontale zandgolven) is rekening gehouden met de landwaarts omhullende kustlijnpositie uit de afgelopen 25 jaar en is de BKL zonodig verder landwaarts gekozen dan uit het voorschrift zou volgen. Op die manier zijn "onzinnige" suppleties in de toekomst voorkomen, immers de kustlijn blijft na een periode van teruggang vanzelf zeewaarts van die BKL. Ook om andere redenen is hier en daar een enigszins afwijkende BKL-positie gekozen¹¹. De BKL-methodiek schrijft voor dat de BKL-posities aangepast kunnen worden (in overleg in de POK's) als op basis van nieuwe inzichten of trendveranderingen in de kustlijnontwikkelingen blijkt dat de kustlijn efficiënter in stand kan worden gehouden. De ontwikkeling van de MKL wordt jaarlijks vergeleken met de BasisKustLijn.

Figuur 4

Illustratie van berekening TKL uit MKL's en vergelijking met BKL. Voor nadere uitleg, zie de tekst.



Erosie

Erosie betekent een geconstateerde achteruitgang in zandvolume t.o.v. een eerdere meting, dat wil zeggen dat het volume van de MKL richting dat van de BKL gaat. Een dwarsprofiel van kust en vooroever verliest zand als er netto meer uitgaat dan inkomt, door een gradiënt in langstransport. Het gradiëntverschil kan overall in het profiel optreden. De natuur zal trachten de oorspronkelijke profielvorm te handhaven door zand elders uit het profiel naar de verliesplek te brengen, wat uiteindelijk ook tot duinafslag kan leiden. We onderscheiden *structurele* erosie, waarbij de kustlijn over langere tijd gezien systematisch terugwijkt en erosie op kortere tijdschalen, waarbij de kust tijdelijk terugwijkt door extreme weersomstandigheden of na de passage van een zandgolf. In de laatste gevallen zal de kust zich vanzelf (grotendeels) weer herstellen. Ingrijpen is dan niet nodig. Dat hoeft pas bij structurele erosie, als de TKL de positie van de BKL

¹¹ zie rapport De Basiskustlijn; Hillen et al., 1991

nadert. Deze structurele erosie wordt pas bestreden als de zandinhoud in het gehele actieve deel van het profiel op den duur op peil wordt gehouden. Een beslissing om al of niet te suppleren, en hoeveel dan, vooronderstelt een analyse van het **hele** probleem, zowel kustdwars als kustlangs. Zo dient ook gekeken te worden of naburige raaien eveneens eroderen.

De praktijk van de BKL-toetsing en handhaving heeft zich zo ontwikkeld dat vooral naar de ontwikkeling van een deel van het kustprofiel, de TKL, gekeken wordt. Daarbij zijn regionale verschillen ontstaan, voor zover ze niet van meet af aan hebben bestaan, in hoe om te gaan met incidentele overschrijdingen van een enkele raai, wanneer (niet) te suppleren en hoeveel zand dan aan te brengen. Daarbij kijkt de ene RWS-dienst wel naar het hele profiel en een andere enkel naar de BKL-zone. Deze verschillen worden momenteel in een ander kader in kaart gebracht. Ze zijn deels terug te voeren op positieve ervaringen met eerdere suppleties en het idee dat een volgende suppletie zich net zo zal gedragen als een vroegere, zodat een gedeeltelijke analyse, namelijk het vaststellen van de MKL, volstaat.

Suppleties

Suppleties voor kustlijnhandhaving dienen het zandvolume in het profiel op peil te houden. Zand kan in principe op iedere plek in het actieve deel van het profiel worden aangebracht en verwacht mag worden dat de natuur het herverdeelt (ook naar de verliesplek) en zo structurele erosie teniet doet. Om praktische redenen gebeurt dit bij strandsuppleties eens in de pakweg vijf jaar. Er moet dan voor vijf jaar zandverlies, idealiter uit het hele profiel en niet alleen uit de BKL-schijf, worden gecompenseerd. Gedurende die periode is de MKL zeewaarts van de BKL, aan het eind ligt hij weer in de buurt. Per saldo is er dan niets veranderd. Zand moet worden toegevoegd zolang de erosie, die meestal op grotere ruimteschalen dan een paar profielen en een suppletie ontstaat, blijft bestaan. Zolang een suppletie relatief klein van omvang is mag verwacht worden dat de structurele erosie uit het profiel voor en na de suppletie nauwelijks zal verschillen. Pas na (lang) herhaald suppleren, ook in naburige kustvakken, zullen de randvoorwaarden veranderen.

Suppletiemaatregelen

Oorspronkelijk werden suppleties voor kustlijnhandhaving op het strand gelegd, nu meer en meer onder water. Eigenlijk is volgens het bovenstaande in beide gevallen evenveel zand nodig. Toch wordt onder water meer zand aangebracht, namelijk een factor twee meer dan bij een strandsuppletie met als argument dat de helft van het onderwater gesuppleerde volume in de BKL-zone zal komen. Dit lijkt strijdig met het bovenstaande, want het gaat in beide gevallen eigenlijk niet om de BKL-zone maar om het hele profiel. Mogelijk speelt een rol dat sommige diensten de BKL-methodiek zo uitvoeren dat ze enkel het volumeverlies in de BKL-zone compenseren en strandsuppleties dienovereenkomstig ontwerpen, met de in principe onjuiste impliciete aanname dat

daarmee het hele profiel op peil blijft. Gaan we ervan uit dat de erosie in het hele profiel inderdaad ongeveer het dubbele bedraagt van het zandverlies in de BKL-schijf, dan zou een onderwatersuppletie inderdaad ongeveer twee keer zoveel zand moeten bevatten als de BKL-zone naar verwachting zou verliezen gedurende de gehoopte levensduur van de ingreep. Voorwaarde is dat de herverdeling over het profiel naar de plek waar het zand nodig mocht zijn en/of waar het zichtbaar wordt (MKL) veel sneller gaat dan het zand kustlangs verloren wordt. Evaluaties van onderwatersuppleties geven hierin inzicht. De op te stellen ontwerprichtlijnen leunen zwaar op dit inzicht.

Met de introductie van het begrip *kustfundament* is nog eens benadrukt dat de kustlijn­zorg zich moet richten op het **gehele** kustprofiel, van de duinen tot de 20 m-dieptelijn. Voor het deel van het profiel dat dieper ligt dan ca. 6 m – NAP is op dit moment geen systematiek beschikbaar om te beoordelen of de profieltoestand al dan niet noopt tot suppleren. Op dit moment wordt een aanzienlijk deel van het jaarlijks beschikbare suppletievolume aangebracht in de buurt van het Zeegat van Texel, waar de structurele zandvraag van de achterliggende Waddenzee leidt tot sterke zandverliezen langs de kusten van noordelijk Noord-Holland en Texel. De aanvulling van deze verliezen draagt tevens bij aan het stillen van de “zandhonger” van de Waddenzee¹².

De volgende suppletie­methoden staan ter beschikking

- a. *Strandsuppletie*: het zand wordt direct daar waar het nodig is neergelegd. Het effect is meteen na voltooiing van de suppletie 100% aanwezig, maar neemt af met de tijd. De levensduur van een geslaagde strandsuppletie bedraagt ongeveer vijf jaar.
- b. *Onderwatersuppletie*: het zand wordt aangebracht in het natte deel van het kustprofiel, waar het aangebrachte volume leidt tot veranderingen in het profiel, met een positieve invloed in de gewenste dieptezone. Natuurlijke processen drijven deze profiel­veranderingen. Het effect laat langer op zich wachten dan een strandsuppletie, maar binnen een jaar neemt het volume van de strandzone toe. De volumetoename in het gehele profiel blijft ca. 5 jaar in stand, daarna neemt het volume weer geleidelijk af.
- c. *Geulwandsuppletie*: bij deze vorm van suppleren wordt het zand onder water aangebracht op de plaats waar het nodig is. Dit is meestal een gevolg van het feit dat er geen ruimte voor extra zand is in de BKL-zone. Het effect is maximaal na voltooiing van de suppletie maar neemt af met de tijd.
- d. *Combinaties van bovenstaande suppletievormen*: b.v. een onderwatersuppletie aanleggen om een strandsuppletie te beschermen. Het uitgangspunt hierbij is voeding van het gehele

.....

¹² Deze overweging is gebaseerd op het grootschalig criterium dat de zandinhoud van de deelsystemen Delta, Hollandse kust en Wadden op peil gebracht c.q. gehouden moet worden. Dit criterium maakt onderdeel uit van het Uitvoeringskader Kustlijn­zorg.

profiel en bescherming van de strandsuppletie door afname van de golfenergie die het strand bereikt. Met deze methode is tot nu toe weinig ervaring opgebouwd.

Bij de dreiging van een acute overschrijding van de BKL is een strandsuppletie op de bedreigde locatie de beste oplossing. Indien er geen acute overschrijding dreigt, maar er wel reden tot ingrijpen is, is een onderwatersuppletie een betere oplossing omdat het hogere deel van het kustprofiel, zoals de BKL-zone, langer profijt heeft van het aangebrachte zand. Een combinatie van beiden is natuurlijk ook mogelijk.

Ontwikkeling van een strandsuppletie na aanleg

Strandsuppleties zijn een effectief middel om structurele erosie te bestrijden¹³.

Het suppleren van het strand betekent dat het strand hoger en breder wordt. Hierdoor wordt de natuurlijke situatie verstoord, waardoor er een reactie opgeroepen wordt: een deel van het aangebrachte volume wordt weer afgevoerd. Een deel van het zand op het droge strand verstuift naar de zeereep van de duinen. Een ander deel van het zand op het strand wordt afgevoerd naar het natte deel van het kustprofiel. Bovendien wordt een deel van het materiaal kustlangs verplaatst. Na enkele jaren is het grootste deel van het gesuppleerde volume verdwenen. De eerste jaren ná een suppletie wordt de duinvoet niet aangetast.

De gemiddelde korrelgrootte van het te suppleren materiaal is niet van groot belang voor de levensduur van een strandsuppletie: onderzoek op de Duitse Waddeneilanden¹⁴ liet zien dat alleen het soortelijk gewicht van het te suppleren materiaal ertoe doet.

Wellicht is de levensduur van een strandsuppletie te verlengen door deze te beschermen met een onderwatersuppletie. Er zijn inmiddels een aantal van dit soort combinaties uitgevoerd, maar de verstreken tijd is nog te kort om conclusies over de effectiviteit te kunnen trekken.

Verstuiving van zand naar de duinen¹⁵

Zandsuppletie heeft een positief effect op duinvorming doordat (1) het extra zand op het strand een buffer vormt tegen golven, waardoor duinvoeterosie tijdens hoge waterstanden voorkomen wordt, en (2) de verstuiving van zand naar de zeereep tijdelijk toeneemt.

.....

¹³ Zie de evaluatiestudies hieromtrent: Roelse, 2002; rapport RIKZ/2002.003, Roelse, 1996; rapport RIKZ-96.028

¹⁴ Eitner, 1996

¹⁵ Deze paragraaf is gebaseerd op de publicaties van Van der Wal (1998a,b; 1999; 2000a,b en 2004)

Zandsuppletie op het strand leidt tot een grotere verstuiwing van zand van het droge strand naar de zeereep. Metingen bij Huisduinen en op Ameland laten zien dat dit transport toeneemt van gem. 9 m³/m/jr naar gem. 14 m³/m/jr, zij het met een grote variatie in ruimte en tijd (Van der Wal, 2004).

Om verstuiwing van het strand naar de zeereep volledig op gang te laten komen is een bepaalde minimum strijklengte nodig. Deze kritische strijklengte wordt in eerste instantie bepaald door de breedte van het strand. Echter, de hoek van inval van de wind ten opzichte van de kustlijn kan de kritische strijklengte aanzienlijk vergroten. Na suppletie van het strand zal de afstand waterlijn-duinvoet toenemen, waardoor de strijklengte toeneemt en de zandflux naar de zeereep groter wordt. Hierdoor treedt erosie van het strand op, waardoor dit effect afneemt in de tijd.

Op het strand gesuppleerd zand is niet gesorteerd door natuurlijke processen en wijkt af van het van nature aanwezige zand. Gesuppleerd zand is over het algemeen grover, slechter gesorteerd (het bevat meer grove en meer fijne deeltjes) en bevat meer schelpen en schelpfragmenten. Vooral de slechte sortering en het hoge percentage schelpmateriaal zorgen voor een lagere verstuiwinggevoeligheid van suppletiezand ten opzichte van het oorspronkelijke strandzand. De gemiddelde korrelgrootte is minder van belang. Bij verstuiwing van het suppletiezand blijven de grove fracties en vooral de schelpen achter, waardoor de fijnere, verstuiwinggevoelige fracties in toenemende mate afgedekt worden en het transport door de wind afneemt. De desondanks geconstateerde toename van het zandtransport na suppletie van het strand is een gevolg van het extra volume zand en de toename van de strandbreedte.

Door de aanzienlijke volumes gesuppleerd zand is het duinareaal in de periode 1990-1998 aanzienlijk toegenomen: 57 ha per jaar, waarvan bijna de helft langs de Hollandse kust¹⁶.

Ontwikkeling van een onderwatersuppletie na aanleg

De werking van onderwatersuppleties, hypothese

De globale vorm van de kust (in langs en dwarsrichting) zal op een tijdschaal van jaren in evenwicht zijn met de lokale condities. Wel zijn er fluctuaties door verschillen in stormintensiteit (zowel frequentie als sterkte) tussen de seizoenen en opeenvolgende jaren. Brengen we een verstoring aan in de vorm van een suppletie dan mag men verwachten dat de natuur de oorspronkelijke globale vorm zal trachten te herstellen. Kijken we enkel in dwarsrichting, wat zou mogen bij een lange kustlangs homogene kust en dito onderwatersuppletie, dan betekent dit in eerste instantie dat het extra volume zodanig wordt herverdeeld over het oorspronkelijke profiel dat dit als

.....
¹⁶ Roelse, 2002, rapport RIKZ/2002.003, p.77 e.v.

geheel zeewaarts verschuift, en wel in het actieve (lees: in de tijd veranderende) deel van het profiel dat afhankelijk van de plaats ligt tussen zo'n 8 m - NAP en de waterlijn (bijv. de GHWL: gemiddeld hoogwaterlijn) of zelfs de duinvoet. De snelheid waarmee dat zal gebeuren hangt af van de plaatselijke (morfodynamische) processen en men mag verwachten (mede op grond van modelberekeningen) dat de bijbehorende tijdschaal er een van jaren (dus niet van weken/maanden of decaden) is. Bij deze herverdeling zal ongeveer de helft van het extra volume in de BKL schijf komen zodat ook kustlijnhandhaving op basis van de BKL methodiek mogelijk is, mits de voeding vanuit het extra volume sterker (sneller) is dan de erosie uit de schijf. Op een gegeven moment zal de natuurlijke kustlijnachteruitgang het gaan winnen van deze voeding en raakt de suppletie uitgewerkt. Na zekere tijd (de levensduur) moet de cyclus dan herhaald worden.

Praktijk

Bij de uitgevoerde onderwatersuppleties bleek het bovengeschetste beeld van een als een geheel zeewaarts verschuivend profiel niet op te gaan. Wel kan men concluderen dat de natuur ernaar streeft het oorspronkelijke karakter van het profiel te herstellen, als men in beschouwing neemt dat brekerbanken daar een essentieel onderdeel van uit maken en dat het toegevoegde volume van dezelfde orde is als het volume in een brekerbank.

Interactie met aanwezige brekerbanken

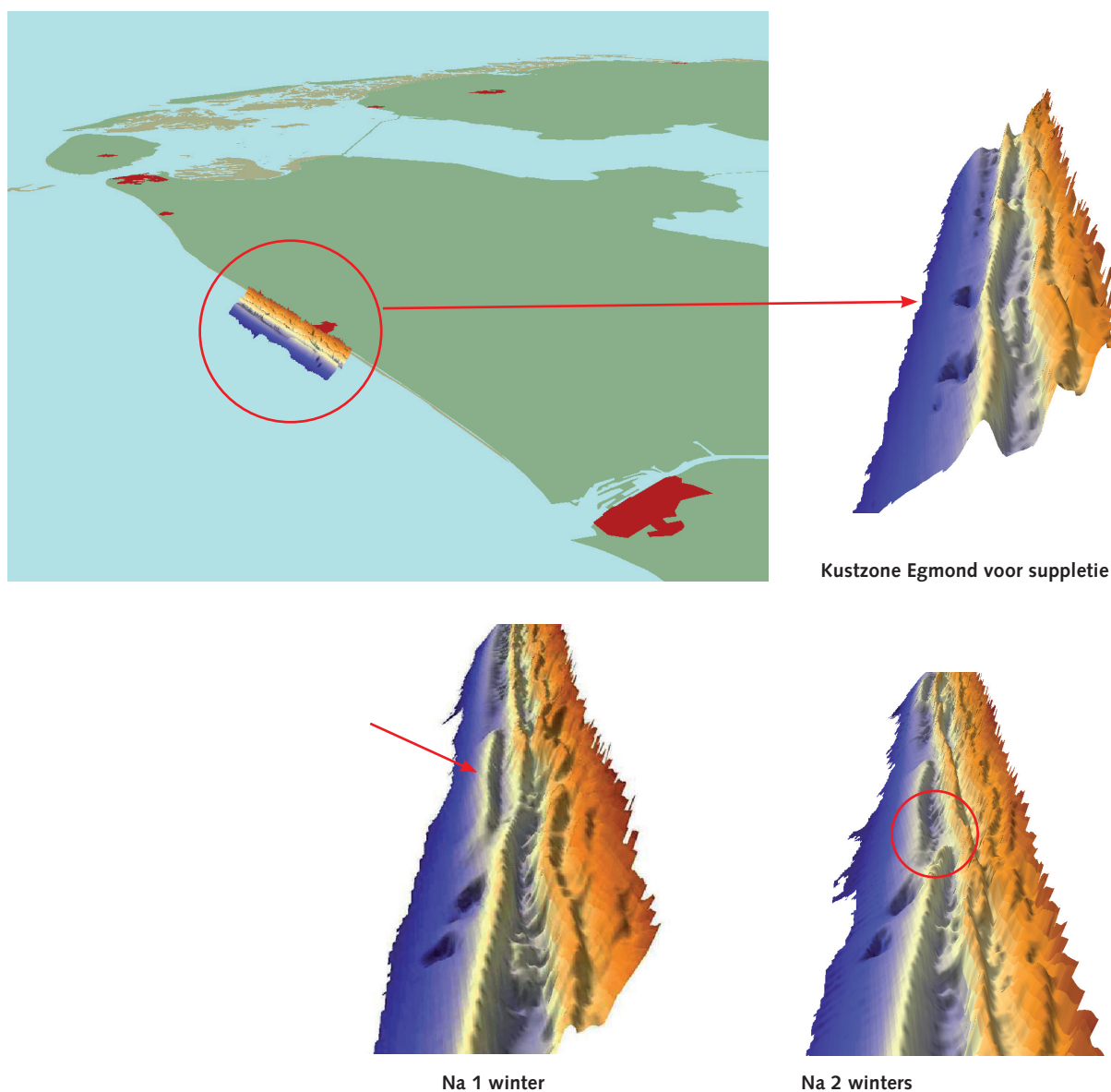
In bijna alle gevallen is de onderwatersuppletie zeewaarts van de buitenste brekerbank gelegd. Dit gebeurde vooral vanwege de lage kosten per kubieke meter. In al deze gevallen neemt het suppletielichaam relatief snel (orde minder dan een jaar) de vorm van een (nieuwe) brekerbank aan. Afhankelijk van diens afstand tot de bestaande buitenste brekerbank wordt de laatste landwaarts gedrukt (vooral als de suppletie ertegen is aangelegd) of zet deze (bij een grote afstand) zijn natuurlijke zeewaartse verschuiving voort (Fig. 5). Deze verschuiving kan ook vertraagd worden of tot staan gebracht. Vertragen, tot staan brengen en doen omkeren van de verschuivingsrichting duiden alle op hetzelfde fenomeen, enkel de mate waarin dat optreedt verschilt.

Met verloop van tijd (jaren) schuift de nieuwe bank (landwaarts of desnoods zeewaarts, afhankelijk van de aanlegpositie) op naar de "begraafplaats", dat is kustdwars de meest zeewaartse locatie die brekerbanken van nature bereiken en waar ze "oplossen". De rest van het bankensysteem reageert op deze verschuiving. Per saldo probeert het systeem het oorspronkelijke bankensysteem (qua aantal en onderlinge afstanden) te herstellen.

Kustlangs gezien valt op dat de nieuwe bank aansluiting zoekt bij bestaande brekerbanken, met name buiten het suppletievak met de bestaande buitenste brekerbank die daar zijn zeewaartse verschuiving heeft kunnen voortzetten. Bij het zoeken naar aansluiting wordt het gedrag van oorspronkelijke bank beïnvloed, zodat men mag concluderen dat de invloed van een onderwatersuppletie zich ook orde kilometer(s) buiten het suppletievak uit kan strekken.

Een onderwatersuppletie van de tot nu toe gehanteerde omvang,

dat wil zeggen in zandinhoud per strekkende meter vergelijkbaar met de van nature voorkomende banken, zal het systeem dus vooral via de brekerbanken beïnvloeden. Dit kan op voorhand niet met 100% zekerheid worden gezegd. Immers, het natuurlijke zeewaarts verschuiven van de brekerbanken hoeft niet gepaard te gaan met



.....
Figuur 5

Scheve aanblik van het de morfologie van de kuststrook bij Egmond aan Zee, kijkend in noordelijke richting. De opeenvolgende situaties laten de ontwikkeling van de banken zien na aanleg van een onderwatersuppletie. Het blauw aan de linkerkant van het figuur is de zeezijde (dieper dan zo'n -6m NAP). Het oranje/bruin aan de rechterzijde is de duinvoet die overgaat in het strand. Zeewaarts daarvan liggen de banken. De bovenste figuur laat de situatie vóór suppletie zien, waarbij er een binnenste en een buitenste bank te onderscheiden zijn. De situatie na één winter laat zien dat de banken ter hoogte van het suppletielichaam (rode pijl) landwaarts zijn verplaatst. Na de tweede winter heeft de binnenste bank ten zuiden van suppletie contact gemaakt met de van oorsprong buitenste bank ter hoogte van de suppletie (rode cirkel). De bankenserie ter hoogte van de suppletie is hiermee netto landwaarts opgeschoven. Door beïnvloeding van het patroon van de aangrenzende banken, strekt de werking van de onderwatersuppletie zich buiten het gesuppleerde kustvak uit.

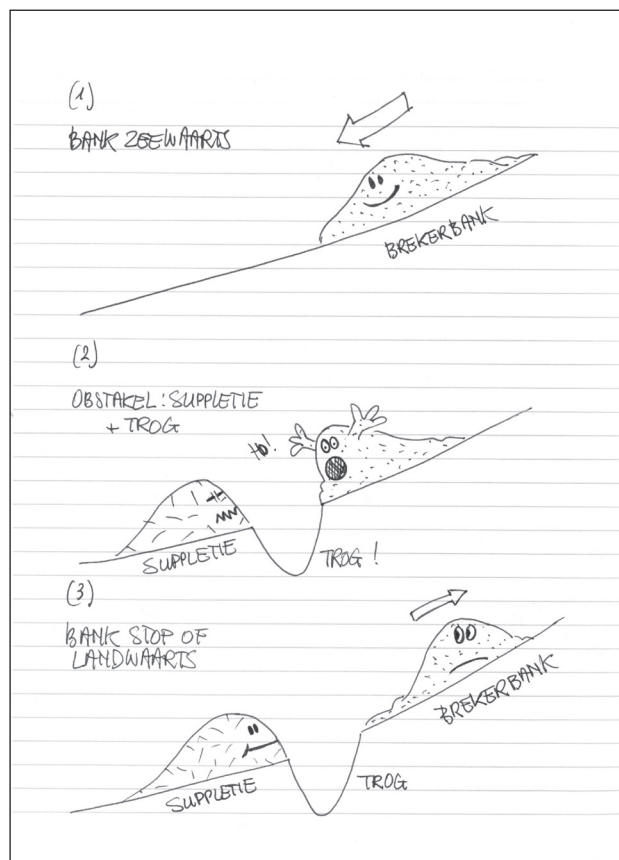
zeewaarts zandtransport (erosie is meestal te danken aan gradiënten in het langstransport). Net zo min hoeft een landwaarts verschuiven te duiden op zandtransport in die richting. Deze overwegingen gelden voor een natuurlijke situatie waarin landwaarts en zeewaarts zandtransport ongeveer in evenwicht zijn, wat na een suppletie beslist niet meer het geval is.

Een realistisch beeld van de werking is dan ook als volgt: de suppletie vervormt tot een bank die landwaarts verschuift. Zeewaartse verliezen blijken verwaarloosbaar. De nieuwe bank verschuift landwaarts en voert zand mee. De bestaande buitenste bank verschuift landwaarts of komt tot stilstand. Hierbij krijgt het hogere deel van het profiel wat extra volume, mede uit de trog die landwaarts van de nieuwe bank meestal ontstaat. Figuur 6 illustreert dit principe. Dit is de gewenste aangroei van de rekenschijf door de aanpassing van het dwarsprofiel, het zogeheten voedingseffect van de onderwatersuppletie (wat overigens niet inhoudt dat fysiek zand uit de onderwatersuppletie zelf boven in het profiel terecht moet komen). Het aanbrengen van het suppletielichaam beïnvloedt de hydrodynamische processen in de gehele brandingzone, waardoor lokaal herverdeling van zand en daarmee verandering van de morfologie optreedt. Werkelijk transport van zandkorrels treedt waarschijnlijk slechts op in beperkte gebieden. Het zijn deze morfologische effecten, en niet de verplaatsing van de gesuppleerde zandkorrels, die de uitwerking van de onderwatersuppletie bepalen.

Deze ontwikkeling correspondeert met de oorspronkelijke verwachting (zie boven), zij het dat het beeld gecompliceerder is. Met name lijkt

.....
Figuur 6

cartoon principe bankwerking



het erop dat het effect van een onderwatersuppletie sneller optreedt dan verwacht, omdat o.a. via het bankensysteem de herverdeling in het hele dwarsprofiel nu tegelijk optreedt. Opgemerkt zij dat de trog hierbij dus een positief effect op de rekenschijf kan hebben. De trog dempt overigens in de loop van jaren uit, waarbij de landwaartse zandwinst hopelijk behouden blijft.

Naast het voedingseffect kan er ook een schaduweffect optreden, waarbij hoger in het profiel zand uit het kustlangse transport per saldo wordt ingevangen omdat het golfgedreven transport landwaarts van de onderwatersuppletie dankzij de extra breking op het suppletielichaam kleiner is dan buiten het suppletievak. Dit kan gedeeltelijk mede verklaren waarom er hoger in het profiel vaak snel zand aangroeit. Bruto is er immers altijd veel zand in (golfgedreven) transport, waarvan snel een deel kan blijven liggen als de schaduwwerking inzet. Deze werking (t.g.v. extra golfdissipatie) wordt bevorderd door het aannemen van een bankvorm van de suppletie (de top komt boven de aanlegdiepte) en het evt. teruggedrijven van de buitenste bank waarbij diens top ook hoger komt te liggen (t.o.v. NAP), m.a.w. het effect neemt in de loop van de tijd wat toe.

Kustlangse effecten

Bij de west-oost georiënteerde Waddeneilanden moet rekening gehouden worden met een significante kustlangse verplaatsing van het suppletielichaam als gevolg van de grote langstransporten in de brandingzone.

Men verwacht dat het schaduweffect gepaard moet gaan met lijszijde erosie, vooral stroomafwaarts qua netto kustlangs zandtransport, en men spreekt dan van kopeffecten. Echter, doordat de onderwatersuppletie zelf kustlangs wat kan verschuiven en de brekerbank ter weerszijden beïnvloedt kan dit effect kleiner zijn dan verwacht. Een gestroomlijnd ontwerp van de suppletiekoppen wordt verondersteld de eventuele kopeffecten te verminderen.

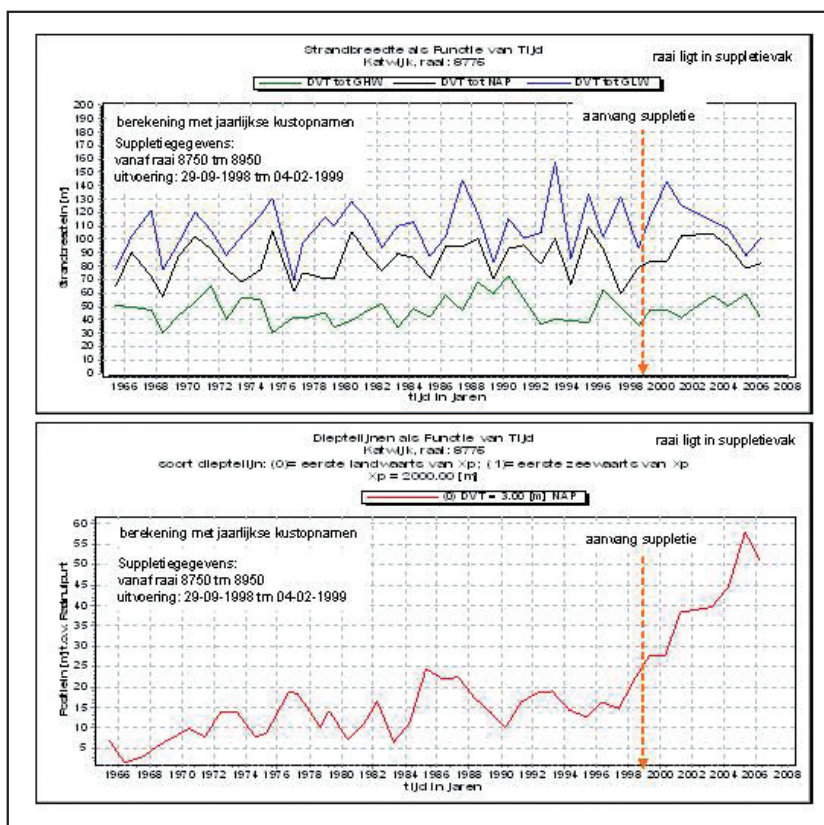
Aangroei van het strand

Of het strand ook door een onderwatersuppletie altijd aangroeit in breedte dan wel in volume, en daarmee ook de duinen door windtransport, staat nog niet vast. De ontwikkeling van de onderwatersuppleties Katwijk, Noordwijk en Ter Heijde in Zuid-Holland¹⁷ lieten een zeewaartse verplaatsing van de duinvoetpositie zien van dezelfde orde grootte als de zeewaartse verplaatsing van de GLW lijn. De veranderingen in strandbreedte zijn daarmee betrekkelijk klein. Het lijkt erop dat de strandbreedte voor een bepaalde locatie over langere tijd een vaste *gemiddelde* waarde heeft, zij het met veel variatie, zie Fig. 7. Dit suggereert dat de strandbreedte niet afhankelijk is van de zandaanvoer. Dit komt omdat extra aanvoer van zand leidt tot een sterkere verstuuving vanaf het strand en aangroei van de zeereep. Een tijdelijke verbreding is wellicht enkel mogelijk als de meest landwaartse bank onder invloed van de teruggedrijving door

.....
¹⁷ Spanhoff et al., 2002; werkdocument RIKZ/OS/2002.109x

Figuur 7

Ontwikkeling van de strandbreedte (bovenste tijdserie) en duinvoetpositie (onderste tijdserie) bij Katwijk aan Zee sinds 1965. De tijdserie van de strandbreedte laat zien dat de gemiddelde strandbreedte over deze periode min of meer constant is, ondanks sterke fluctuaties. Ook de onderwatersuppletie resulteert niet in een breder strand. De duinvoetpositie daarentegen reageert sterk op de onderwatersuppletie: in de jaren na de suppletie groeit de duinvoet zo'n 30m zeewaarts.



een onderwatersuppletie met de kust verheelt. Dit kan gebeuren als de natuur er meer toe neigt het oorspronkelijke aantal banken te herstellen dan een vaste strandbreedte te handhaven. Het is denkbaar dat een voldoende effect op het strand pas op kan treden met *herhaalde* onderwatersuppleties (sterke forcering).

Analyse van de ontwikkeling van onderwatersuppleties langs de Zuid-Hollandse kust¹⁸ laat zien dat het volume van het strand en het meest landwaartse deel van de brandingzone (tot de binnenste brekerbank) en van de zeereep in de eerste vijf jaar na suppletie groeit, zie Fig. 8. Van de onderwatersuppleties Ter Heijde I, Katwijk en Noordwijk werd na vijf jaar 20 tot 25% van het gesuppleerde volume teruggevonden op het strand en in de binnenste brekerzone, en ca. 30% in de zeereep van de duinen.

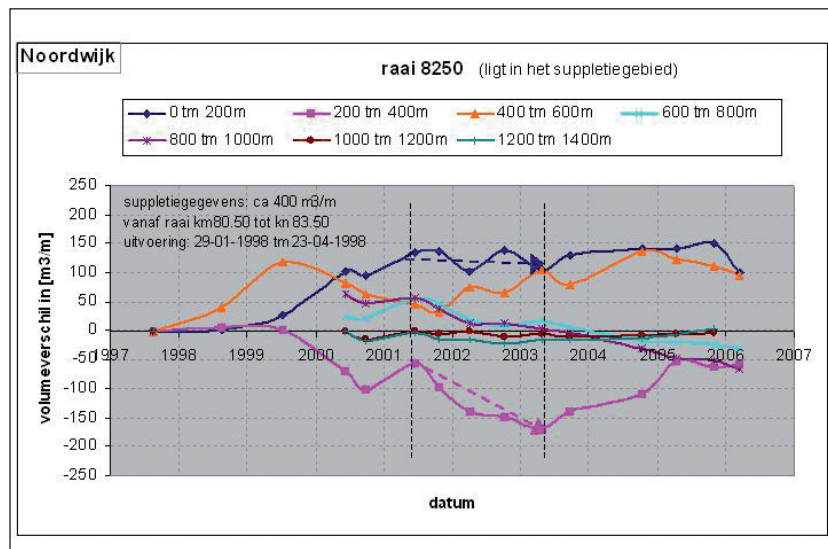
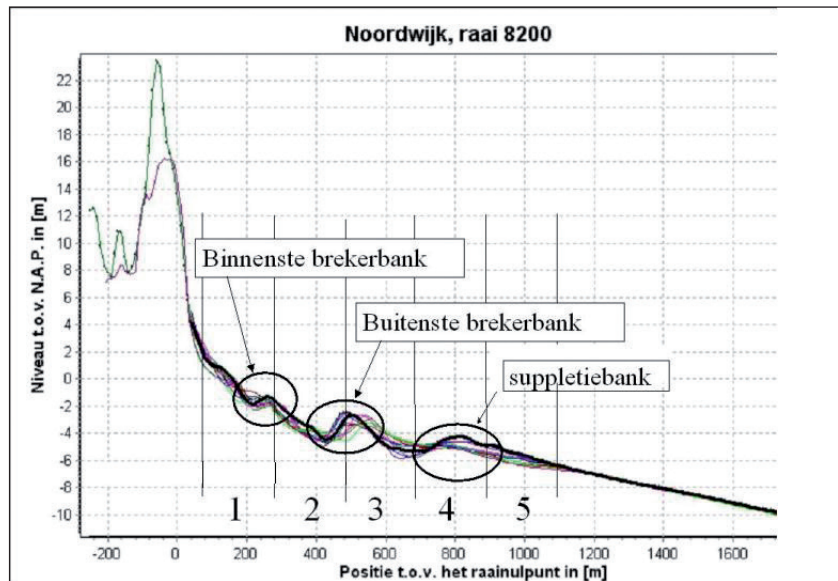
Overigens zij opgemerkt dat men sinds 1990 op vele locaties dankzij herhaalde strandsuppleties gewend is geraakt aan onnatuurlijk brede stranden. Bij onderwatersuppleties zal de natuur streven naar een herstel van een natuurlijk profiel, wat vooral inhoudt de oorspronkelijke (vóór 1990) strandbreedte of -smalte die men meestal vergeten is.

¹⁸ Witteveen+Bos, 2006b

Figuur 8

Volumeveranderingen in een raai dwars op de kust bij Noordwijk ná de onderwatersuppletie in 1998 (uit rapport W+B, 2006b). De zonegrenzen in de onderste figuur zijn gemeten vanaf de duinvoet (NAP + 3 m). NB. de gegeven afstanden corresponderen NIET met die in de bovenste figuur. De zonegrenzen zijn in de bovenste figuur met verticale lijnen aangegeven, waardoor duidelijk wordt welke morfologische elementen er in een zone vallen. Voor de periode 1998-2000 zijn alleen JARKUS-opnamen beschikbaar, waardoor er geen informatie is voor de zones verder dan 600 m uit de duinvoet. Vanaf 2000 zijn er monitoringsopnamen beschikbaar. Deze opnamen worden meerdere keren per jaar uitgevoerd en strekken zich verder zeewaarts uit.

Uit de figuur blijkt dat de volumes van de zone 0-200 m, waarin het strand en de binnenste brekerbank vallen, en de zone 400-600 m, waarin de buitenste brekerbank valt, snel toenemen en tot in 2006 groter blijven dan het volume in 1997. Het volume in de zone 200-400 m, waarin de trog tussen de binnenste en buitenste brekerbank ligt, neemt aanvankelijk sterk af, maar herstelt zich gedeeltelijk vanaf 2003.



Aanvullende opmerkingen

zand in trog

Bij een enkele onderwatersuppletie is het zand aangebracht in de trog tussen de buitenste brekerbanken, met name bij Terschelling (1993). In dit geval herstelt de natuur het oorspronkelijke profiel door het zand uit de trog vooral her te verdelen over de bestaande banken die daardoor in hoogte toenamen. Het oorspronkelijke aantal banken was aldus snel hersteld, de zeewaartse migratie bleef ettelijke jaren opgehouden. Het strand kon groeien (schaduwwerking?) maar een stijgende trend was al voor de aanleg ingezet. Hoogstens is deze versterkt. Niettemin lijkt suppleren in de trog goede perspectieven te bieden. Probleem is dat in

de praktijk zelden ruimte voor voldoende zand aanwezig is en dat de kosten per kubieke meter relatief hoog zijn.

kustlangse verplaatsing

Bijzonderheid bij de Terschelling suppletie was dat het lichaam zich kustlangs snel bleek te verplaatsen, met ca. 400 m/jaar, wat correspondeert met de kustlangse migratie van lokale natuurlijke vormen in het bankensysteem. De hele suppletie was 4 km lang dus na 5 jaar zat het halve vak al zonder suppletie (geplande levensduur 8 jaar, in dit geval). Bij de aanleg van suppleties langs de Waddeneilanden moet men met dit soort migraties rekening houden.

glad uitgangprofiel

De onderwatersuppletie Ter Heijde-I (1997) is aangelegd in een profiel dat, met uitzondering van het noordelijk deel van het suppletievak, geen brekerbanken bevatte. Ook hier ontstonden een brekerbank en trog uit de suppletie. De bank schoof richting de plek waar al voor de suppletie zich een bank aan het vormen was. Ook deze suppletie was dus in lijn met de bovenbeschreven algemene trend na aanleg.

zandhoeveelheid

De uitgevoerde onderwatersuppleties bevatten per strekkende meter een hoeveelheid zand die van dezelfde orde is als een bankinhoud. De hoeveelheid onderwater te suppleren zand volgt uit de locale erosie maal een gewenste levensduur (circa vijf jaar) maal een factor orde twee. In principe is het mogelijk de hoeveelheid te reduceren (bijv. door jaarlijks terug te komen) opdat de verstoring minder zand bevat dan een bankinhoud. De respons van het bankensysteem zal dan anders zijn, en de oorspronkelijke gedachte van een geleidelijke evenredige herverdeling over het hele profiel doet dan mogelijk meer opgeld. Onduidelijk is of dit voordelen biedt.

timing suppletie

Ervan uitgaand dat de beïnvloeding van het kuststelsel via het bankensysteem (het meest) effectief is, kan het suppletieontwerp geoptimaliseerd worden door de aanleg op een geschikt moment in de bankencyclus uit te voeren, bijv. wanneer de vorige buitenste bank net voldoende is opgelost dat de hoppers eroverheen kunnen varen en het zand tegen de dan nog niet verder zeewaarts verschoven nieuwe buitenste bank te lossen. Het zand ligt dan zo dicht mogelijk bij de kust en de bank wordt maximaal beïnvloed. Echter, met de huidige systematiek, waarbij ruim twee jaar vantevoren bepaald wordt waar en hoeveel er gesuppleerd gaat worden, is deze timing lastig toe te passen.

verstuiving van het suppletiezand

Door suppletie onder water zal het strand aangroeien met zand dat, in tegenstelling tot suppleties direct op het strand, wél gesorteerd is door natuurlijke processen. Dit extra zand heeft in principe een hogere verstuivinggevoeligheid. De onmiddellijke toename van de strandbreedte is bij suppletie onder water kleiner dan bij strandsuppletie. Hierdoor is de toename van de strijklengte, en dus

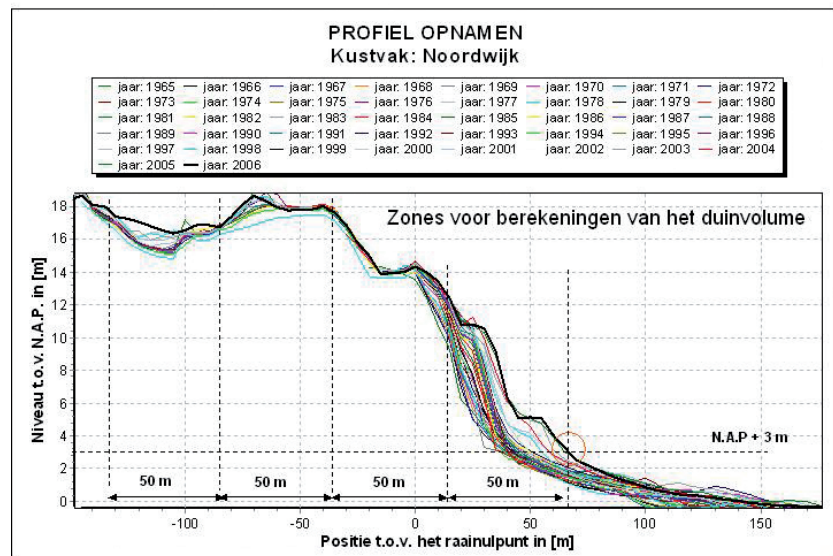
van de capaciteit van het zandtransport door de wind minder groot. Wel neemt binnen een jaar het volume van het strand toe, wat ook tot een toename van de verstuiwing leidt. Het netto resultaat na suppletie onder water blijkt een aanzienlijke aangroei van de zeereep over de jaren (Fig. 9).

strandbreedte

Als, om wat voor reden dan ook, een breder strand verlangd wordt, dient men zich te realiseren dat de natuur direct na een strandsuppletie weer terug wil naar de 'oorspronkelijke' strandbreedte, met een sterke erosie van het strand tot gevolg. Belangrijk is om eerst te bepalen of het volume van het totale kustprofiel op orde is. Als dit het geval is, en ook het BKL-volume op orde is, kan specifiek aandacht aan het strand besteed worden. Als het strandvolume voldoende is, maar de verdeling van dit volume over de strandzone ongunstig is, kan wellicht overwogen worden om dit zand te verplaatsen en zo het strand te verbreden. Indien er werkelijk weinig zand aanwezig is dan wordt er geadviseerd om een strandsuppletie uit te voeren, eventueel in combinatie met een onderwatersuppletie. De verwachting is dat een strandsuppletie door de onderwatersuppletie minder snel zal eroderen doordat de golfenergie die het strand bereikt afneemt en de onderwatersuppletie zorgt door beïnvloeding van de brekerbanken voor extra volumetoename in de strandzone.

Figuur 9

Ontwikkeling van het zeereepprofiel bij Noordwijk aan Zee sinds 1965. Hier is te zien dat de zeereep flink aangroeit, met name na de onderwatersuppletie in 1998. De zwarte dikke lijn is het profiel zoals het er in 2006 uit zag. Na de suppletie ligt het strand hoger dan ooit en het duinfront is tientallen meters verder zeewaarts opgeschoven (uit rapport W+B 2006b).



4. Waarmee rekening houden bij ontwerp?

Bij het ontwerpen van een suppletie moet rekening gehouden worden met de volgende aspecten:

Het natuurlijke systeem op de beoogde locatie

De suppletie moet zoveel mogelijk ingepast worden in het aanwezige natuurlijke systeem. Belangrijke aspecten hierbij zijn bijvoorbeeld:

- Inzicht in de autonome ontwikkeling en het functioneren van het betreffende kustvak

Het ontwerp van een suppletie dient gebaseerd te zijn op een ontwikkeling in zandvolume in het kustprofiel van tenminste de laatste 20 jaar en over voldoende kustlengte (orde 5 á 10 km). Zo mogelijk moet een te suppleren systeem uitgebreider worden geanalyseerd dan enkel op het niveau van raaien. De benodigde suppletiehoeveelheid kan zo beter geschat worden waardoor geld bespaard kan worden.

- Wel of geen banken aanwezig

Banken aanwezig:

- De buitenste bank beschermt de kustlijn tegen hoge golven;
- Een suppletie stabiliseert of blokkeert zeewaartse bankmigratie; dit heeft een effect op de positie van de kustlijn;
- Waar suppleren? Tegen de zeewaartse zijde van de buitenste bank;
- Wanneer suppleren? Voordat de buitenste bank degenereert (een grote suppletie of buitenste bank in stand houden met meerdere kleine suppleties);
- Hoeveel suppleren? Een volume vergelijkbaar met het natuurlijke volume van de banken;
- Vorm suppletie? Op dit moment is er geen ervaring met andere vormen dan een zandplateau.

Geen banken aanwezig:

- De suppletie functioneert als bank en schuift landwaarts met tijd;
- Herhaling van een suppletie binnen 2 jaar leidde bij Callantsoog tot de vorming van twee nieuwe banken; uit de eerste suppletie ontstond een bank die reageerde op de vervolgsuppletie zoals een van oorsprong natuurlijke bank reageert;
- De suppletie voedt het achterliggende kustprofiel en beschermt tegelijk tegen hoge golven;
- De suppletie moet zo hoog mogelijk in het profiel aangebracht worden om zo snel mogelijk effect te hebben (NB. beperkingen bij technische uitvoering).

Aanwezigheid van getijgeulen dicht onder de kust

De effectiviteit van onderwatersuppleties langs kusten met getijgeulen wordt nadelig beïnvloed door sterke zandverliezen in langsrichting. Gewone strandsuppleties zullen hier meestal meer effect hebben; hierbij wordt aangenomen dat er voldoende ruimte is op het strand voor een significante suppletie. Indien dit niet zo is moet "maatwerk" worden geleverd. Bijvoorbeeld kan suppletie van de geulwand overwogen worden. De effecten van geulwandsuppleties zijn op dit moment nog onvoldoende bekend, al blijven de inmiddels aangebrachte suppleties bij Texel en Walcheren langer in stand dan verwacht.

Gevolgen van de suppletie voor de aangrenzende kustvakken

De schaduwwerking van de suppletie (breaker berm) of van de geblokkeerde brandingbanken leidt tot extra aanzanding landwaarts van de suppletie door vermindering van het netto longshore zandtransport. Dit kan (tijdelijk) erosie aan de stroomafwaartse kant veroorzaken. NB. als er géén groot netto transport is, zoals langs de Hollandse kust, kan dit aan beide zijden van de schaduwzone optreden!

Bij de koppen van suppleties kunnen ook negatieve effecten ontstaan, met name op de strandbreedte en de positie van de duinvoet. Het is daarom belangrijk een suppletie niet zo te plannen dat een kop op een cruciale locatie komt te liggen, zoals bijvoorbeeld bij een badplaats. Een gradueel verloop van de dimensies van een suppletie is aan te bevelen om negatieve kopeffecten zoveel mogelijk te beperken.

Korrelgrootteverdeling suppletiezand zoveel mogelijk identiek aan die van locatie

Het gedrag van een suppletie hangt ook af van de materiaalkeuze: een suppletie die als breaker berm bedoeld is zal bij voorkeur uit (wat) grover materiaal moeten bestaan dan in zijn omgeving aangetroffen wordt, waardoor het suppletiezand minder snel verplaatst zal worden. Een suppletie die als feeder berm bedoeld is moet qua korrelgrootteverdeling zoveel mogelijk lijken op zijn omgeving. In de praktijk wordt het suppletiezand meestal van de meest nabije zandwinlocatie gehaald. De korrelgrootteverdeling van het te suppleren zand ligt daarmee al vast.

Ecologische factoren

De ecologische risico's van onderwater suppleren zijn nog onvoldoende in kaart gebracht. De effecten van suppleties op de ecologie van een gebied bestaan in principe uit (1) verstoring tijdens de aanleg van

de suppletie, (2) het buiten bereik geraken van als voedsel dienende bodemdieren door ophoging van de bodem, en (3) verandering van de habitat. De effecten van verstoring zijn te minimaliseren door planning van de aanleg: buiten het broedseizoen van kustvogels dat van april tot en met augustus duurt. Dit geldt met name voor strandsuppleties, onderwatersuppleties leiden niet tot verstoring op het strand. Het afdekken van voedsel speelt zowel bij strandsuppleties als bij onderwatersuppleties een rol. Bij strandsuppleties gaat het vooral om drieteenstrandlopers die in de winter op het strand foerageren. De nadelige effecten kunnen hier beperkt worden door niet in de winter te suppleren (in verband met verstoring) en ervoor te zorgen dat het gesuppleerde strand voldoende hersteltijd krijgt voor herkolonisatie door een nieuwe generatie bodemdieren. Onderwatersuppleties worden aangelegd in het diepte-interval waarin schelpenbanken van de soorten *Spisula* en *Ensis* (beiden een belangrijke voedselbron voor zee-eenden) voorkomen. Op dit moment zijn er geen mitigerende maatregelen anders dan het kiezen van een alternatieve suppletielocatie bekend. Effecten van een suppletie op de samenstelling en morfologie van het substraat kunnen geminimaliseerd worden door zand met een vergelijkbare korrelgrootteverdeling en samenstelling als in het doelgebied te gebruiken. De toevoeging van een volume zand zal tot een vergroting van de morfodynamiek van het gesuppleerde gebied leiden. Dit heeft in de meeste gevallen een positieve invloed op de verscheidenheid aan submilieus in een gebied.

In het kader van de nationale en internationale natuurwetgeving dienen de mogelijke negatieve effecten van de aanleg van een suppletie (verstoring van kustbroedvogels, verstoring en voedseldeprivatie van drieteenstrandlopers, afdekking van *Spisula* banken) zoveel mogelijk voorkomen te worden.

Financiële aspecten

Onderwatersuppleties zijn in potentie goedkoper dan strandsuppleties, bij eenzelfde effect op hogere delen van het kustprofiel. De mogelijke winst hangt af van het effect van de suppletie op het kustprofiel in relatie tot het ontwerp. De winst kan (deels) teniet gedaan worden indien compenserende strandsuppleties nodig zijn ter bestrijding van erosie rond de koppen van de suppletie (in de praktijk is dit tot nu toe weinig voorgekomen). Een (mogelijke) beperking is of het zand met het beschikbare materieel voldoende hoog in het profiel kan worden aangebracht.

De kosten van een suppletie worden vooral bepaald door het in te zetten materieel. Optimalisatie van het baggerproces zou daarom in alle fasen van een suppletie meegenomen moeten worden. Bij het ontwerp van de suppletie kan hier al rekening mee worden gehouden. De belangrijkste kostenreductie wordt bereikt door minimalisering van de tijdsduur van het lossen van het suppletiezand. Deze tijdsduur bepaalt in grote mate de onderlinge verschillen in de kosten van de ontwerpen. Strandsuppleties dienen aan wal te worden gepompt,

onderwatersuppleties kunnen worden "geklapt", wat vier keer zo snel gaat. Beperk dus de tijd voor het aanbrengen van het zand, door zoveel mogelijk onderwatersuppleties toe te passen.

Verder kan tijd, en dus geld, bespaard worden door:

- goed bereikbare locaties te kiezen, waarbij rekening gehouden wordt met bijvoorbeeld de waterdiepte van het omliggende gebied, en eventuele obstakels (banken!) in aan- en afvoerroutes;
- het ontwerp af te stemmen op de uitvoeringsmethodiek (aanbrengen van grote hoeveelheden in een kort tijdsbestek gaat niet samen met een hoge nauwkeurigheid van aanbrengen);
- suppleties niet te klein te dimensioneren; bijvoorbeeld voor strandsuppletie niet minder dan 100 m³ per m voorschrijven;
- het bovenvlak van het ontwerp zo diep als mogelijk is te kiezen, waardoor meer typen schepen inzetbaar worden;
- geen aanvullende eisen m.b.t. de zandkwaliteit te stellen anders dan die gedaan zijn bij de aanvraag van de wingebieden; het wisselen van wingebied is bijna onmogelijk of kost heel veel tijd.

5. Waaraan moet het ontwerp voldoen?

Vastleggen van de ingreep; startpunt voor evaluatie

Voorafgaand aan een onderwatersuppletie dienen toetsbare ontwerpdoelstellingen en parameters gedefinieerd te worden ten behoeve van een latere evaluatie. Dit houdt in dat een te kiezen parameter, zoals volume van MKL-zone, actieve zone of strand, strandbreedte of positie duinvoet e.d., een bepaalde waarde niet zal overschrijden gedurende een vooraf vastgesteld aantal jaren na de suppletie.

a. Vaststellen van *doel* suppletie, bijvoorbeeld;

- voorkomen van overschrijding van de BKL;
- instandhouding kustfundament;
- veiligheid;
- leerdoelstelling;
- NB. secundaire functies als recreatie (strandbreedte), natuur, scheepvaart mogen meeliften.

b. Vaststellen *toetsingscriteria*: wanneer wel of niet geslaagd?

- Hoeveel toename van een bepaalde parameter wil je bereiken in een bepaalde tijd? NB Het tijdspad lijkt enigszins onzeker t.g.v. afhankelijkheid van de optredende hydro-meteocondities na aanleg (in de praktijk blijkt dit geen grote rol te spelen);
- Hoe ga je toetsen?
- Wanneer ga je toetsen?
- Wat ga je eventueel doen als maatregel niet voldoet?
- Monitoring hierop aanpassen (bijv. uitgebreid monitoren bij onderzoeksdoelstellingen, sober bij een eenvoudige doelstelling)
- Voldoet de huidige invulling van het BKL-concept of behoeft die nuancering?

NB. Zonder een duidelijke doelstelling valt ook niet vast te stellen of een suppletie geslaagd is of niet! Dit lijkt triviaal, maar het ontbreken van een duidelijke doelstelling blijkt bij het evalueren van het functioneren van onderwatersuppleties een struikelblok.

Sinds 2006 worden doel en motivatie van een suppletieontwerp vastgelegd in een motivatieformulier.

Technisch bestek

Bij het ontwerp van het suppletieprogramma gebruiken de regionale directies meer parameters dan de parameters in het Kustlijnkaartenboek. Niet alle rekenparameters staan daarin, (m.n. de erosievolumes). Bij het ontwerpen van zandsuppleties spelen lokale

en regionale verschillen (o.a. kusttype en belangen in de kustzone) een rol. Het ontwerpproces is maatwerk. Het suppletievolume wordt bepaald op basis van de tekorten t.o.v. de BKL, de verwachte erosie en de herhalingsstijd van een suppletie. De Leidraad Zandige Kust¹⁹ geeft een algemene formule voor het volume V van een (strand)suppletie: het te verwachten volume erosie gedurende de geplande levensduur van de suppletie, verminderd met de reeds aanwezige zandreserve ten opzichte van het door de BKL bepaalde minimum. De aldus berekende totale te compenseren erosie (uitgedrukt als E) wordt meestal vermenigvuldigd met een bepaalde factor om de onzekerheid in de erosievoorspelling te compenseren. In formulevorm is dit:

$$V = f (e * t - R)$$

Hierin is:

e = de erosie in m³/j

t = de levensduur in jaren

R = de zandreserve in m³

f = factor voor onzekerheid in de erosievoorspelling.

• **Suppletiebehoefte**

De grootte van een suppletie wordt meestal bepaald door het tekort in volume ten opzichte van de BKL en de verwachte erosie. Echter, de erosie moet worden bepaald over het gehele profiel, in principe van de 20 m-dieptelijn tot en met de zeereep van de duinen en niet alleen in de BKL-rekenshijf. RWS Noord-Holland gaat hierbij uit van de kustzone van de buitenste brekerbank tot en met de eerste duinenrij (zeereep) en RWS Zeeland van de geulbodem tot de top van de zeereep.

• **Herhalingsstijd**

De grootte van een suppletie wordt mede bepaald door de verwachte levensduur van de suppletie, zie boven. Zuid-Holland en Noord-Nederland hanteren vijf jaar als herhalingsstijd, Zeeland en Noord-Holland vier jaar. Argumenten hiervoor zijn de gebiedsspecifieke morfologie, efficiëntie en praktische aspecten zoals interne bedrijfsvoering.

• **Onzekerheidsfactor / afronding / verliesfactor**

De regionale diensten hanteren verschillende factoren voor onzekerheid, afronding en verliezen. RWS Noord-Nederland rondt de volumina af op een veelvoud van 100.000 m³ en hanteert een verliesfactor van 20% om de in-situ kuubs om te rekenen naar

.....
¹⁹ TAW, 2002;

beunkuubs bij onderwatersuppleties. RWS Noord-Holland hanteert geen verliesfactor, en rondt de volumina af op 10.000 m³. Voor Zuid-Holland rondt het RWS-RIKZ het volume (naar boven) af op een geheel getal (deze afronding bedraagt maximaal 10%). Bij het bepalen van de hoeveelheden hanteert RWS Zeeland een onzekerheidsmarge van 25%, in verband met onzekerheden in de meetgegevens en stormen e.d.

NB. Het gebruik van verliesfactoren bij het ontwerp van een suppletie is niet nodig. Directie Noordzee, verantwoordelijk voor de inkoop, is met de Werkgroep SLA Kustlijnzorg overeen gekomen dat in het inkoopproces wordt gerekend met een aanlegverlies van 15%. In de praktijk betekent dit dat de aangevraagde hoeveelheden worden omgezet naar een inkoopbehoefte die 15% hoger ligt.

• Volume onderwatersuppletie

Het volume van een onderwatersuppletie wordt berekend met behulp van de vuistregel:

onderwater is 2 à 3 keer het volume dat nodig zou zijn voor een strandsuppletie.

Er loopt momenteel onderzoek naar de onderbouwing van de factor 2 à 3. Zie ook de discussie over vermenigvuldigingsfactoren in Hoofdstuk 4. Noord-Nederland hanteert een factor 2. De regionale diensten gaan ervan uit dat een overdimensionering van een onderwatersuppletie niet zo erg is, het zand komt in ieder geval ten goede aan het kustfundament. Het is op dit moment niet duidelijk of overdimensionering zorgt voor een toename van de erosie.

• Ruimtelijke resolutie

Voor Noord-Nederland, Zuid-Holland en Zeeland wordt het suppletieschema op raainiveau opgesteld. RWS Noord-Holland hanteert voor het regionaal schema grotere eenheden. De suppletievakken worden met opzet vrij breed aangewezen, zodat in het latere definitieve ontwerpstadium nog enige vrijheid is om de locatie te specificeren op basis van recentere metingen.

• Overige ontwerpaspecten

Inpassing in kustprofiel

RWS Noord-Nederland en Zeeland proberen bij een strandsuppletie het natuurlijke profiel zoveel mogelijk te volgen. Daarbij wordt een strandsuppletie bij voorkeur niet te hoog aangebracht in verband met steile afslagranden (van belang voor recreatie).

RWS Noord-Nederland brengt een onderwatersuppletie zo hoog mogelijk aan, rekening houdend met de diepgang van het suppletiematerieel.

In de praktijk betekent dit dat de bodem wordt opgehoogd tot NAP-5 m.

Grootschalige morfologie

RWS Noord-Holland houdt bij het ontwerp van het regionaal programma rekening met de grootschalige morfologie voor de kust (m.n. geulen bij Den Helder en Texel).

Kustlangse inpassing

In Zeeland en Noord-Holland wordt het ontwerp in de lengterichting langs de kust afgestemd op de aangrenzende, niet te suppleren gebieden, ter voorkoming van grote overgangen in hoeveelheden en de uiteindelijke ligging van het strand.

Andere functies en belangen in kustvak

RIKZ houdt bij het ontwerpen van suppleties voor RWS Zuid-Holland rekening met het recreatiebelang. Strandrecreatie heeft (alleen tegen geringe meerkosten) invloed op de vorm van het profiel, het tijdstip van suppleren (buiten het strandseizoen) en zorgt soms voor extra suppleren bij grote maatschappelijke druk. Dir. Zeeland houdt bij de vormgeving van de suppletie (exacte hoogte, taluds) rekening met de overige functies in het kustvak (veiligheid, natuur, recreatie en scheepvaart), de kosten, strandhoofden en een natuurlijke helling van de suppletie (orde 1:30). Hierbij speelt overleg met belanghebbenden een rol (zie voorbeeld hieronder). De functie natuur zorgt er op sommige plaatsen voor dat een suppletie niet te hoog aangebracht wordt, bijvoorbeeld om zoveel mogelijk te voorkomen dat de monding naar de Verdrongen-Zwartepolder zal verzanden. Er wordt bij het ontwerp rekening gehouden met mogelijke overlast (bijvoorbeeld vermindering van uitzicht door een hoge strandsuppletie), en hoge afslagranden (gevaar voor recreanten) worden voorkomen. Een enkele keer wordt ook de hoeveelheid door het recreatiebelang beïnvloed. In Zeeland gebruikt men de zandwinning voor de suppleties, als dat mogelijk en gewenst is, om de functie scheepvaart mee te laten liften.

6. Monitoring en evaluatie van een onderwatersuppletie

Sinds er onderwatersuppleties worden uitgevoerd, worden deze ook gemonitord. Deze monitoring diende in eerste instantie om de verwachte effectiviteit van de onderwatersuppleties voor de kustlijn zorg te toetsen. Daarnaast geeft monitoring inzicht in de ontwikkeling van onderwatersuppleties.

De wijze van monitoring is in de loop der jaren meerdere malen veranderd, zowel wat betreft de gebruikte meetinstrumenten als ook de opnamefrequentie, de omvang van het meetgebied en de raaidichtheid. Daarnaast zijn er ook regionale verschillen in het gebruik van meetinstrumenten, de grootte van het meetgebied en de dichtheid van de op te nemen raaien. Dit zorgt ervoor dat de ontwikkeling van één suppletie soms niet consequent gevolgd kan worden. Hierdoor is het evalueren van sommige aspecten van een suppletie niet mogelijk. Het onderling vergelijken van suppleties wordt door de verschillen in meetinstrumenten en wijze van opnemen bemoeilijkt.

Naast de reguliere Jarkus opname worden de meeste suppleties per jaar éénmaal extra opgenomen.

De standaard die vanaf 2007 wordt aangehouden is de volgende:

Langs de vaste kust (NH):

Jaar van uitvoering: Twee opnames per jaar, ten eerste de reguliere Jarkusopnamen, te verdichten met tussenraaien (raaien welke min of meer midden tussen de Jarkusraaien liggen); en een tweede opname van dezelfde raaien. De twee opnames dienen –zoveel mogelijk gecombineerd te worden met de in- en uitpeiling van de suppletie.

1e en 2e jaar na uitvoering: hetzelfde programma als in jaar van uitvoering

3e - 5e jaar na uitvoering: Één opname per jaar, van zowel de Jarkus-raaien als de tussenraaien

- Raaien dienen minstens van NAP +3m tot NAP -8m / -10m (grens actieve zone) te worden gemeten.
- Lodingen (boot) en waterpassingen/laser altimetrie opnamen dienen zoveel mogelijk gelijktijdig te worden uitgevoerd.
- De vereiste opnamefrequentie hangt af van de dynamiek van de betreffende kustzone.
- Gaten in opname gebied moeten worden voorkomen.
- Kustlangs tot 2 km ten noorden en 2 km ten zuiden van de aangebrachte suppletie.

Naast de reguliere Jarkus-lodingen neemt RWS Zuid-Holland tot nu toe het hele beheersgebied twee maal per jaar op, op een equidistant raaiensysteem met een onderlinge afstand van 200 m dat niet aan de Jarkusraaien gekoppeld is.

Voor kustvakken waar getijgeulen aanwezig zijn kunnen andere overwegingen van toepassing zijn.

Strandsuppleties

Het monitoren van strandsuppleties is belangrijk om de levensduur van de suppleties te kennen. Daarnaast is ook inzicht gewenst in de bijdrage van de strandsuppletie aan de verschillende functies. Hoeveel zand komt er bijvoorbeeld ten goede aan de functie veiligheid in de vorm van extra duinvolume.

Gericht leren: evaluatie van onderwatersuppleties

Nu we een aantal suppleties langere tijd hebben gemonitord zijn een aantal vragen betreffende de werking van de suppleties beantwoord. Om de richtlijnen voor het ontwerp van suppleties aan te scherpen en uit te breiden is het echter noodzakelijk om te focussen op de nog niet beantwoorde vragen die relevant zijn voor het ontwerpen van suppleties. Zodra deze vragen helder in beeld zijn kan het monitoren van suppleties veel gerichtere gebeurtenissen opleveren. Dit betekent dat de ontwikkeling van sommige suppleties, afgezien van de standaard Jarkusopnamen, niet verder gevolgd hoeft te worden. Suppleties waar we wel veel van kunnen leren worden veel gerichtere en zonniger intensiever opgenomen. Het gaat dan om suppleties die aangelegd worden in relatief ongestoorde gebieden en waarvan te verwachten valt dat ze tijdens hun levensloop niet of weinig verstoord zullen worden door nieuwe suppleties.

Ter onderbouwing van deze richtlijnen zijn een drietal onderwatersuppleties uitvoerig geanalyseerd, te weten de suppleties Ter Heijde I (1997), Katwijk (1998-1999) en Noordwijk (1998). Bij alle drie de suppleties liet de zeereep van de duinen een duidelijke zeewaartse ontwikkeling zien (zie Fig. 9 voor een voorbeeld). Om deze effecten goed te kunnen analyseren is het nodig dat tijdens monitoring ook de zeereep van de duinen in de raaien nauwkeurig en zoveel mogelijk synchroon met de lodingen wordt opgenomen. De breedte van het op te nemen deel van de duinen is afhankelijk van de lokale dynamiek van de duinen.

Zie Hoofdstuk 8 voor de relevante kennisvragen.

7. Conclusies m.b.t. ontwerp, uitvoering, monitoring en evaluatie onderwatersuppleties

Algemeen

Suppleer onder water. Het kustprofiel reageert snel op het aanbrengen van een suppletie rond de -5m NAP. Indien een suppletie van dezelfde grootteorde als de aanwezige banken aangelegd wordt op of vlakbij de locatie waar de meest zeewaartse bank verdwijnt, zullen in het eerste jaar na uitvoering banken en troggen landwaarts schuiven, met als netto resultaat een toename van het zandvolume in de ondiepe brandingzone en in de strand- en duinzone. Verlies van zand naar de zeezijde wordt niet of nauwelijks geconstateerd.

Een vergelijkbare ontwikkeling is waargenomen in een gebied waar geen banken aanwezig zijn. De suppletie vervormt tot een bank en induceert een trog. Doordat het profiel zich instelt op deze nieuwe vorm treedt er een netto zandverplaatsing op richting landzijde.

Alleen indien er sprake is van zeer snelle erosie waarbij de BasisKustLijn (BKL) flink wordt overschreden, wordt geadviseerd een strandsuppletie aan te brengen. Locale morfologie zoals een geul vlak onder het strand maakt het suppleren onderwater soms onmogelijk of inefficiënt.

Het profiel komt zand tekort

Indien de Momentane KustLijn (MKL) in de buurt van de BKL ligt en een suppletie wordt overwogen, is het bij een kuststelsel met banken belangrijk de 'staat' van het systeem te bepalen. Banken lopen van land naar zee om daar vervolgens uit te doven. De herhalingsperiode van dit patroon varieert van 4-18 jaar langs de Nederlandse kust. De staat van het bankensysteem op het moment van aanbrengen van de suppletie is van invloed op het effect dat de suppletie heeft. De twee uitgangstoestanden zijn: (1) er is een goed ontwikkelde buitenste bank aanwezig of (2) deze is net aan het uitdoven.

Situatie (1): Door zand tegen de buitenste bank aan te leggen wordt de netto zeewaartse migratie van het patroon van banken en troggen gestopt of zelfs omgekeerd: de banken en troggen schuiven in landwaartse richting. Hierdoor raakt het systeem uit evenwicht en wint netto zand in voornamelijk het hogere deel van de MKL-zone. Mogelijk negatieve effecten kunnen optreden door het verschuiven van banken en troggen: indien een trog richting strand opschuift, leidt dit tot een (tijdelijk) smaller strand. Indien een strand met hoofden beschermd is kan dit tot een ongewenste situatie leiden.

Situatie (2): Door met een suppletie een uitdovende buitenste bank aan te vullen zou het systeem als het ware bevroren kunnen worden, waarmee zand vastgehouden kan worden boven in het kustprofiel. Hiermee is tot nu toe geen ervaring opgedaan.

Indien de MKL-zone een landwaartse trend vertoont en binnen enkele jaren de BKL gaat overschrijden is het bevriezen van het systeem met een relatief klein volume zand wellicht voldoende om zand te behouden. De staat van het bankensysteem is dus een belangrijk criterium bij het ontwerpen van maatregelen. Indien de MKL al overschreden is, is het forceren van een landwaartse verschuiving van het patroon van banken en troggen noodzakelijk om zand aan het systeem toe te voegen.

Volume:

Het volume van de aan te brengen suppletie dient aan te sluiten bij het volume van de banken die van nature aanwezig zijn in het profiel.

Invloedszone suppletie:

Houd er bij het ontwerp rekening mee dat de invloed van een suppletie met een kustlangse lengte van orde grootte 3 km zich uitstrekt tot (maximaal) zo'n 2 km ter weerszijden van de locatie. Afwijkend is het Waddengebied, zie hieronder bij Specifieke situaties. Een gradueel verloop van de dimensies van een suppletie is aan te bevelen om negatieve kopeffecten zoveel mogelijk te beperken.

Specifieke situaties:

Van nature geen bankensysteem aanwezig – In kustvakken waar van nature geen brandingbanken voorkomen zal het suppletielichaam zich tot een bank ontwikkelen, welke vervolgens landwaarts migreert. Het effect in de ondiepe brandingzone is ook in dit specifieke geval significant.

Strekdammen, hoofden etc. in het kustvak – Indien een groot suppletievolume dicht onder de kust wordt aangebracht, kan de trog direct landwaarts ervan zich sterk verdiepen en landwaarts verschuiven. Deze trog kan aanwezige strekdammen en andere harde zeeeringen ondergraven. Zorg dat de aangebrachte hoeveelheid zand kleiner is dan de natuurlijke bank in het profiel en dat de suppletie niet te dicht bij de strekdammen wordt uitgevoerd.

Waddengebied – Door de oost-west oriëntatie van de Waddenkust zorgen sterke westelijke winden voor kustlangse effecten. De invloed van een suppletie is daardoor sterk oostwaarts gericht. De aanleg van een suppletie dient daarom westwaarts uitgevoerd te worden t.o.v. de zone waar netto zandwinst gewenst is. Bij de koppen van de Waddeneilanden is de situatie gecompliceerder door het voorkomen van diepe getijgeulen.

Zeeland - Hier liggen vaak geulen dicht onder de kust. Onderwatersuppleties op een geulwand zijn nu een aantal malen aangebracht, met als doel de geul uit de kust te houden en eventueel strandsuppleties te voorzien van een ondersteunend zandlichaam. Richtlijnen voor geulwandsuppleties zijn er door de korte evaluatieperiode nog niet.

Monitoring:

De effecten van een onderwatersuppletie treden veel sneller op dan aanvankelijk gedacht (vaak al binnen de periode van aanleg). Hierdoor is noodzakelijk de in- en uitpeiling van de suppletie ter beschikking te hebben voor latere evaluatie en de eerste monitoringslodingen relatief kort na aanleg al uit te voeren.

**Bij de monitoring mogen de duinen niet buiten beschouwing blijven!
Monitoringsopnamen moeten daarom minimaal tot aan de duinvoet doorgezet worden.**

8. Aanbevelingen voor verder onderzoek gericht op concrete verbetering richtlijnen

Bij het samenstellen van dit richtlijnendocument zijn een aantal kritische kennisleemten geïdentificeerd, zowel voor het onderzoek als voor de ontwerppraktijk. Hieronder volgt een opsomming hiervan (NB de volgorde geeft geen prioriteiten weer). De invulling van deze kennisleemten zal worden opgepakt in het kader van het koploperproject Kustlijnzorg, dat door Deltares, het Delta Instituut in oprichting, in overleg met RWS uitgevoerd zal gaan worden.

- Kustlijnzorg richt zich op overschrijdingen van de BKL. Hierdoor is er geen goed overzicht van de ontwikkeling van de kustvakken die niet aan structurele erosie onderhevig zijn, en daarmee ook niet van de huidige toestand van de Nederlandse kust als geheel.
- Op dit moment worden bij de studie van de ontwikkeling van suppleties en het trekken van lessen hieruit de beschikbare veldgegevens, de aanwezige proceskennis en modellen niet voldoende gecombineerd.
- Wat is het effect van de variatie in positie en hoogte van de brandingbanken op de ontwikkeling van het strandvolume en de strandbreedte? Dit betreft dus een natuurlijke variatie van het strand. Hiervoor is integratie van zowel JARKUS- als ARGUS-data nodig.
- Om het effect van een onderwatersuppletie op het bankgedrag goed te kunnen begrijpen, zowel kwalitatief als kwantitatief, is het van het grootste belang dat er volstrekte helderheid bestaat over de (mogelijke variaties in) zandinhoud van een dwarsprofiel gedurende de bankencyclus. Varieert de zandinhoud van een dwarsprofiel met de positie van de banken?
- Verlengt een vooroeversuppletie ook werkelijk de levensduur van een strandsuppletie?
- Wat zijn de effecten van 'onregelmatig' aangelegde suppleties (bollen; onregelmatige top)? Beïnvloedt een eventueel reliëf van het suppletielichaam het gedrag, en zo ja, hoe dan? Zijn dit soort suppleties technisch uitvoerbaar?
- De gebiedsspecifieke aspecten van onderwatersuppleties langs de Wadden- en Deltakust moeten nader geëvalueerd worden.
- Het effect van onderwater suppleren op de zeereep moet voor de gehele kust uitgezocht worden. Ten eerste moet de ontwikkeling van de zeereep van de duinen over de laatste 25 jaar uitgezocht worden om de effecten van het suppletiebeleid vast te kunnen stellen. Voorts is met name de vraag of er een koppeling is tussen

de ontwikkeling van de brandingbanken, het strand en de zeereep van belang.

- Is het zo dat de duinen benedenwinds van een suppletie, en dus buiten het gesuppleerde vak, ook meer aangroeien door verstuuving van het suppletiezand? Speelt de oriëntatie van een kustvak ten opzichte van de overheersende windrichting hierbij een rol?
- Is de levensduur van een suppletie te sturen met de diepte van plaatsing, uitgaand van een vergelijkbaar effect op het kustprofiel?
- Wat is het effect van het suppleren van een uitdovende buitenste bank?
- Kan de positie van de onderwatersuppleties naar dieper water worden verschoven, waardoor grotere baggerschepen ingezet kunnen worden?
- Hoe gedragen suppleties met andere volumina per strekkende meter dan ca. de natuurlijke bankinhoud zich? Zijn ze efficiënter, minder efficiënt of maakt dat niet uit? Neemt het herhalingsinterval hierbij toe of af?
- Wat is het effect van de korrelgrootteverdeling van gesuppleerd zand op het gedrag van een suppletie? Hoe groot kan de afwijking van de korrelgrootteverdeling van het al aanwezige zand zijn voordat er significante effecten optreden. Dit geldt zowel voor strand- als onderwatersuppleties.
- Het verdient aanbeveling om 'ergens' langs de Nederlandse kust een onderwatersuppletie aan te leggen waarvan er bijna op voorhand kan worden uitgegaan dat die geruime tijd zonder verstoring kan blijven liggen. Dit zou voor evaluatiedoeleinden zeer nuttig zijn.
- Hoe kan de uitvoeringspraktijk van zandsuppleties worden aangepast om negatieve effecten op de ecologie zoveel mogelijk te voorkomen?
- Het optreden van zogenaamde 'koeffecten' moet bestudeerd worden om vast te kunnen stellen waar en wanneer ze optreden, hoe sterk ze zijn en hoe ze zoveel mogelijk voorkomen kunnen worden.

Appendix: Overzicht rapporten en publicaties onderwatersuppleties

Tijdschriftpublicaties

1. Specifiek Nederland

Duin, M.J.P. van, N.R. Wiersma, D.J.R. Walstra, L.C. van Rijn & M.J.F. Stive, 2004. Nourishing the shoreface: observations and hindcasting of the Egmond case, The Netherlands. *Coastal Engineering*, 51: 813-837.

Enckevort, I.M.J. van, & B.G. Ruessink, 2003. Video observations of nearshore bar behaviour. Part 1: alongshore uniform variability. *Continental Shelf Research*, 23: 501-512.

Locatie Noordwijk; video observaties; bankgedrag: migratie kustdwars; verschillende tijdschalen;

Enckevort, I.M.J. van, & B.G. Ruessink, 2003. Video observations of nearshore bar behaviour. Part 2: alongshore non-uniform variability. *Continental Shelf Research*, 23: 513-532.

Locatie Noordwijk; video observaties; bankgedrag: vrije vormveranderingen; verschillende tijdschalen;

Grunnet, N.M., & B.G. Ruessink, 2005. Morphodynamic response of nearshore bars to a shoreface nourishment. *Coastal Engineering*, 52: 119-137.

Locatie Terschelling; NOURTEC; bankgedrag: stabilisatie; berekening kustdwars sedimenttransport;

Grunnet, N.M., B.G. Ruessink & D.J.R. Walstra, 2005. The influence of tides, wind and waves on the redistribution of nourished sediment at Terschelling, The Netherlands. *Coastal Engineering*, 52: 617-631.

Locatie Terschelling; NOURTEC; berekening sedimenttransporten; herverdeling suppletie zand;

Grunnet, N.M., D.J.R. Walstra & B.G. Ruessink, 2004. Process-based modelling of a shoreface nourishment. *Coastal Engineering*, 51: 581-607.

Locatie Terschelling; NOURTEC; berekening morfologische ontwikkeling; bankgedrag

Guillén, J., M.J.F. Stive & M. Capobianco, 1999. Shoreline evolution of the Holland coast on a decadal scale. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24: 517-536.

Locatie Hollandse kust; positie duinvoet; JARKUS data 1964-1992; relatie met bankencyclus en stormgolven

Nederbragt, G., & R.L. Koomans, 2006. Nourishment of the slope of a tidal channel. From experiment to practice. *Proceedings Coastal Dynamics 2005*; CD-ROM, American Soc. Civil Engineering.

Locatie Oostgat; proef met geulwandsuppletie; monitoring, MEDUSA

Rijn, L.C. van, 1997. Sediment transport and budget of the central coastal zone of Holland. *Coastal Engineering*, 342: 61-90.
Locatie Hollandse kust; sediment balans 1964-1992; JARKUS raaien + 2DV-model hydrodynamica en sediment transport

Ruessink, B.G., & M.C.J.L. Jeuken, 2002. Dunefoot dynamics along the Dutch coast. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27: 1043-1056.
Locatie Hollandse kust; positie duinvoet; meetreeks sinds 1850; rol stormen en horizontale zandgolven

Ruessink, B.G., K.M. Wijnberg, R.A. Holman, Y. Kuriyama & I.M.J. van Enkevort, 2003. Intersite comparison of interannual nearshore bar behaviour. *Journal of Geophysical Research*, 108 (C8): 3249, doi: 10.1029/2002JC001505.

Short, A.D., 1992. Beach systems of the central Netherlands coast: Processes, morphology and structural impacts in a storm driven multi-bar system. *Marine Geology*, 107: 103-137.

Spanhoff, R., E.J. Biegel, M. Burger & D.W. Dunsbergen, 2003. Shoreface nourishments in The Netherlands. *Proceedings Coastal Sediments 2003*, Clearwater, FL.; mei 2003; CD-ROM.

Spanhoff, R., & J. van de Graaff, 2007. Towards a better understanding and design of shoreface nourishments. *Proceedings Coastal Engineering 2006*, San Diego, CA, in press, 13 p.

Spanhoff, R., A. Kroon & S. de Keizer, 2006. Shoreface nourishments as a natural laboratory with emphasis on the Egmond case. *Proceedings Coastal Dynamics 2005*; CD-ROM, American Soc. Civil Engineering.

Wijnberg, K.M., 2002. Environmental controls on decadal morphologic behaviour of the Holland coast. *Marine Geology*, 189: 227-247.
Locatie Hollandse kust; tijdschaal decades; morfologische ontwikkeling; sturende factoren

Wijnberg, K.M., & A. Kroon, 2002. Barred beaches. *Geomorphology*, 48: 103-120.
Locatie Hollandse kust; tijdschaal decades; morfologische ontwikkeling; sturende factoren

2. Eolisch transport

Wal, D. van der, 1998. The impact of the grain-size distribution of nourishment sand on aeolian sand transport. *Journal of Coastal Research*, 14 (2): 620-631.

Wal, D. van der, 1998. Effects of fetch and surface texture on aeolian sand transport on two nourished beaches. *Journal of Arid Environments*, 39 (3): 533-547.

Wal, D. van der, 1999. Aeolian transport of nourishment sand in beach-dune environments. Proefschrift, Universiteit van Amsterdam.

Wal, D. van der, 2000. Grain-size-selective aeolian sand transport on a nourished beach. *Journal of Coastal Research*, 16 (3): 896-908.

Wal, D. van der, 2000. Modelling aeolian sand transport and morphological development in two beach nourishment areas. *Earth Surface Processes & Landforms*, 25 (1): 77-92.

Wal, D. van der, 2004. Beach-dune interactions in nourishment areas along the Dutch coast. *Journal of Coastal Research*, 20 (1): 317-325.

3. Algemeen

Capobianco, M., H. Hanson, M. Larson, H. Steetzel, M.J.F. Stive, Y. Chatelus, S. Aarninkhof & T. Karambas, 2002. Nourishment design and evaluation: applicability of model concepts. *Coastal Engineering*, 42: 113-135.

Eitner, V, 1996. The effect of sedimentary texture on beach fill longevity. *Journal of Coastal Research*, 12 (2): 447-461.

Hamm, L., M. Capobianco, H.H. Dette, A. Lechuga, R. Spanhoff & M.J.F. Stive, 2002. A summary of European experience with shore nourishment. *Coastal Engineering*, 47: 237-264.

Hanson, H., A. Brampton, M. Capobianco, H.H. Dette, L. Hamm, C. Lastrup, A. Lechuga & R. Spanhoff, 2002. Beach nourishment projects, practices and objectives – a European overview. *Coastal Engineering*, 47: 81-111.

Stive, M.J.F., S.G.J. Aarninkhof, L. Hamm, H. Hanson, M. Larson, K.M. Wijnberg, R.J. Nicholls & M. Capobianco, 2002. Variability of shore and shoreline evolution. *Coastal Engineering*, 47: 211-235.

Rapporten

1. RIKZ

Hillen, R., J.H.M. de Ruig, P. Roelse & F. Hallie, 1991. De Basiskustlijn; een technisch/morfologische uitwerking. Nota GWWS-91.006.

Keijzer, S. de, 2004. De invloed van stormcondities op het bankengedrag bij Egmond en Bergen vóór en na een onderwatersuppletie. Werkdocument RIKZ/OS/2004/123 W.

Roelse, P., 1996. Evaluatie van zandsuppleties aan de Nederlandse kust 1975-1994. Een morfologische beschouwing. Rapport RIKZ-96.028.

Roelse, P., 2002. Water en zand in balans. Evaluatie zandsuppleties na 1990; een morfologische beschouwing. Rapport RIKZ/2002.003.

Roelse, P., & R. Hillen, 1993. Evaluatie van zandsuppleties. Een morfologische beschouwing. Interim rapportage. Rapport DGW-93.054.

Spanhoff, R., 1997. Suppleren onder water. Werkdocument RIKZ/OS-97.150X.

Spanhoff, R., 2001. Voorlopige richtlijnen monitoring en ontwerp onderwatersuppleties. Werkdocument RIKZ/OS/2001.114X.

Spanhoff, R., E.J. Biegel & A.M. Walburg, 2002. Evaluatie Zuid-Hollandse onderwatersuppleties; Interimrapportage 2002. Werkdocument RIKZ/OS/2002.109x.

Spanhoff, R., S. de Keijzer, A.M. Walburg & E.J. Biegel, 2004. Evaluatie onderwatersuppleties Egmond en Bergen; Januari 2004. Werkdocument RIKZ/OS/2004/112 w.

Walhout, T., & P. Roelse, 2004. Invloed (onderwater)suppleties op het waterkerend vermogen van de duinen van Delfland. Werkdocument RIKZ/AB/2004.819w.

2. VOP – WL

Cohen, A.B., 2006. VOP II-1.1 Knowing the nearshore bathymetry. A data assimilation technique using Argus video and Delft3D. Rapport WL I Delft Hydraulics Z 4098.00 (VOP II – Kustlijnzorg; deelproject II-1.1 Modelling the behaviour of breaker bars and shoreface nourishments), (oktober 2006)

Walstra, D.J., A. Cohen, S. Aarninkhof, & M. van Koningsveld, 2006. Onderwatersuppleties Ontwerprichtlijnen. Rapport WL I Delft Hydraulics Z 4099. (VOP II – Kustlijnzorg; deelproject II-1.1 Korte termijn kustonderhoud), (november 2006).

3. Overig

Koster Engineering, 2006. Duinaangroei na 1990 voor de kust van Noord- en Zuid-Holland. Koster Engineering, Heemstede (november 2006).

Quartel, S., & B.T. Grasmeijer, 2006. Dynamiek van het intergetijdestrand bij Noordwijk en Egmond op de tijdschaal van seizoenen. Rapport CR-2006-01, Universiteit Utrecht, Fac. Geosciences (september 2006).

Steijn, R., 2005. Effectiviteit van vooroeversuppleties langs de Waddenkust. Aanzet tot ontwerprichtlijnen voor het ontwerp van vooroeversuppleties. Rapport A1539R1r2, Alkyon Hydraulic Consultancy & Research, Marknesse (november 2005).

Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, 2002. Leidraad Zandige Kust. Publicatie DWW-2003-046. 224 p.

Witteveen+Bos, 2006a. Evaluatie onderwatersuppleties Noord- en Zuid-Holland; Eindrapport. Rapport Rw1472-2, Witteveen+Bos, Deventer (mei 2006).

Witteveen+Bos, 2006b. De ontwikkeling van de onderwatersuppleties Ter Heijde, Noordwijk en Katwijk. Rapport Rw1472-3, Witteveen+Bos, Deventer (november 2006).

Afstudeerscripties (CiTG TU Delft, Afd. Waterbouwkunde)

Burger, M., 2003. Morphological evaluation of the Scheveningen, Katwijk and Noordwijk shoreface nourishments using UNIBEST-TC.

Caljouw, M., 2000. Video-based monitoring of the Egmond beach- and shoreface nourishments. Rapport Z2773, WL / Delft Hydraulics.

Duin, M.J.P. van, & N.R. Wiersma, 2002. Evaluation of the Egmond shoreface nourishment. Part 1: Data analysis. Rapport Z3054/Z3148, WL / Delft Hydraulics.

Duin, M.J.P. van, 2002. Evaluation of the Egmond shoreface nourishment. Part 3: Validation morphological modelling DELFT3D-MOR. Rapport Z3054/Z3148, WL / Delft Hydraulics.

Nipius, L., 2002. Evaluation of nourishments at Egmond.

Wiersma, N.R., 2002. Evaluation of the Egmond shoreface nourishment. Part 2: Validation of the morphological UNIBEST-TC model. Rapport Z3148, WL / Delft Hydraulics.

Rijkswaterstaat is de uitvoeringsorganisatie van het ministerie van Verkeer en Waterstaat die zorgt dat verkeer en water op de nationale netwerken kunnen stromen en die werkt aan droge voeten en voldoende en schoon water. www.rijkswaterstaat.nl

