

BKL: van BasisKustLijn naar Brede KustLijn

Een stochastisch optimalisatie-model voor
de handhaving van een basiskustzone
langs de Hollandse kust



Universiteit Twente

Hoofdrapport

Ministerie van Verkeer en Waterstaat

Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat



Dienst Weg- en Waterbouwkunde



BKL: van BasisKustLijn naar Brede KustLijn

Hoofdrapport

Een stochastisch optimalisatie-model voor de handhaving van een basiskustzone langs de Hollandse kust

BKL: van BasisKustLijn naar Brede KustLijn

Hoofdrapport

Een stochastisch optimalisatie-model voor de handhaving van een basiskustzone langs de Hollandse kust

Afstudeerrapport van Saskia van Vuren

Begeleiders:

Prof. dr.ir. H.J. de Vriend

Dr. ir. M. Kok

Dr. ir. C.M. Dohmen-Janssen

Ir. R.E. Jorissen

Delft augustus 2000

Universiteit Twente

Faculteit Technologie & Management

Opleiding Civiele Technologie & management

Vakgroep Modelleren van Integrale Civieltechnische Systemen

Voorwoord

Eind oktober 1999 besloot ik na een gesprek met Richard Jorissen om bij Dienst Weg- en Waterbouwkunde in Delft te gaan afstuderen. De actualiteit van de kustproblematiek in eigen land en de diversiteit van de voorgenomen afstudeeropdracht waren redenen genoeg om me gedurende een half jaar enthousiast te storten op die schone Hollandse kust.

In december 1999 ben ik van start gegaan en nu in zomer 2000 na een boeiende tijd ben ik aan het schrijven van het voorwoord van mijn afstudeerrapport toe. Het rapport dat voor u ligt is geschreven in het kader van mijn afstudeeronderzoek ter afronding van mijn studie Civiele Technologie & Management met als specialisatie het Modelleren van Integrale Civieltechnische Systemen aan Universiteit Twente.

In het rapport staat de ontwikkeling van een stochastisch optimalisatiemodel centraal. Het model kan als hulpmiddel dienen bij de bepaling van de economische, ecologische en morfologische consequenties van ruimtelijke beslissingen langs de Hollandse kustzone die onder verschillende beheersvormen kunnen worden genomen. De eerste beheersoptie betreft de huidige basiskustlijn benadering waarbij de bewegingsruimte voor de kust is beperkt tot de basiskustlijn die niet mag worden overschreden. Voor de tweede beheersoptie is een variant op deze kustlijnbenadering ontwikkeld. Bij deze beheersvorm wordt genuanceerder omgegaan met de basiskustlijn. Er wordt een zone aangewezen waarbinnen de kustlijn mag bewegen. Met dit model kunnen de jaarlijkse kosten voor kustonderhoud en de schade aan maatschappelijke activiteiten voor de twee beheersopties worden geoptimaliseerd. Uit de optimalisatie volgt een 'optimale' suppletiefrequentie die de breedte van bewegingszone voor de kustlijn bepaalt. Deze bewegingszone geeft aan welke ruimte er in de kustzone langs de Hollandse kust moet worden gereserveerd.

Bij de totstandkoming van het uiteindelijke resultaat wil ik graag een aantal personen en instanties bedanken voor hun geweldige medewerking:

Ik bedank mijn afstudeerbegeleiders Huib de Vriend, Matthijs Kok en Marjolein Dohmen-Janssen van Universiteit Twente en Richard Jorissen van Dienst Weg- en Waterbouwkunde (DWW) voor de fijne en enthousiaste begeleiding. Voor de gegevens over de kosten van zandsuppleties wil ik graag Harald Versteeg van Directie Noordzee bedanken. Mijn speciale dank gaat uit naar Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ) en in het bijzonder naar Lia Walburg, Jean-Mary Stam en Tjark van Heuvel. Ik heb waardering voor de samenwerking en ben blij met de gegevens en de informatie die ik voor de ontwikkeling van het morfologische deelmodel van hen heb gekregen.

Ook wil ik de medewerkers van de DWW bedanken voor de gezellige omgeving waarin ik mijn afstudeeronderzoek heb mogen uitvoeren. Alex Roos bedankt voor je hulp bij de modelberekeningen. Bart Thonus bedankt voor de leuke tijd in kamer 9.09 (en voor het delen van je computer voor de @RISK-berekeningen!). En natuurlijk Rob van der Laag bedankt voor het druk- en inscanwerk.

Hanno van Vuren en Dirk-Jan de Bruyn bedankt voor jullie geweldige kop-werk bij de fietstour langs de Hollandse kust. Het was misschien een beetje ver voor één dag, maar zo hebben we wel de hele kustzone in langsricting onder de loep genomen.

Tenslotte wil ik natuurlijk mijn 'doegroep'-studievrienden bedanken voor de te gekke studententijd. Het thuisfront in Noordeloos (pa, ma, Annemiek, Rianne) en ome Bas de Bruyn bedankt. De keuze die ik in 1995 na het VWO maakte was lang zo gek nog niet.

Augustus 2000
Saskia van Vuren

Korte samenvatting

In dit afstudeeronderzoek is een stochastisch model voor de Hollandse kust ontwikkeld. In het model zijn de hydraulische en morfologische processen van het natuurlijke kustsysteem gekoppeld aan de maatschappelijke activiteiten (economische functies) en de ecologische functies in de kustzone. Met dit model worden de jaarlijkse kosten voor kustonderhoud en de schade aan maatschappelijke activiteiten voor twee beheersopties geoptimaliseerd. De eerste beheersoptie betreft de huidige basiskustlijnbenadering waarbij de bewegingsruimte voor de kust is beperkt tot de basiskustlijn die niet mag worden overschreden. Voor de tweede beheersoptie is een variant op deze kustlijnbenadering ontwikkeld. Bij deze beheersvorm wordt het wettelijk vastgestelde handhavingsprincipe van de basiskustlijn losgelaten en wordt genuanceerder omgegaan met de basiskustlijn. Er wordt een zone aangewezen waarbinnen de kustlijn mag bewegen. Deze zone kan zowel landwaarts als zeewaarts worden gezocht. Uit de optimalisatie volgt een 'optimale' suppletiefrequentie die de breedte van bewegingszone voor de kustlijn bepaalt. Deze bewegingszone geeft aan welke ruimte er in de kustzone langs de Hollandse kust moet worden gereserveerd.

Voor zowel bebouwde kustgebieden als kustgebieden waar het accent ligt op natuur en landschap volgt uit optimalisaties dat het aantrekkelijk is om af te wijken van de traditionele kustlijnbenadering. De bewegingsruimte voor kustgebieden waaraan een hoge economische waarde is gegeven moet via een zeewaartse buffer worden gecreëerd. Voor kustgebieden met een lage economische waarde is het aantrekkelijk landwaartse terugschrijding van de kust toe te staan. De economische schade die optreedt is in deze gebieden laag ten opzichte van de hoge onderhoudskosten die nodig zijn om de kust te handhaven. Naast een economische afweging zal in de praktijk de maatschappelijke acceptatie een belangrijke rol spelen en moet onderzocht worden of de veranderingen aan de natuur acceptabel zijn.

Samenvatting

Inleiding

De totale Nederlandse kust heeft een lengte van 432km, waarvan de Hollandse kust 118km bestrijkt. De Hollandse kust bestaat uit duingebieden, die variëren in breedte van minder dan honderd meter tot enkele kilometers. De duinen zorgen samen met het strand en de kustlijn voor een natuurlijke, zandige kustverdediging. De duinenkust heeft een flexibel karakter en is onder invloed van natuurlijke krachten voortdurend in beweging. Zo kan de kust zich terugtrekken en voortschrijden. Door het dynamisch kustgedrag en het beleid ten aanzien van kustverdediging kunnen maatschappelijke activiteiten en belangen in de kustzone in het gedrang komen. Het kustgedrag is belangrijk voor de mate waarin aan de functies wordt voldaan. Voor een verantwoord beheer en beleid is daarom inzicht in het kustgedrag en de consequentie van ruimtelijke beslissingen erg belangrijk.

Huidig Nederlands kustbeleid

Het huidige kustbeheer is gericht op dynamisch kustbeheer, integraal kustbeheer en een gebiedsgerichte aanpak. Dynamisch kustbeheer is gericht op het ruimte geven aan natuurlijke processen en het bestrijden van doorgaande structurele erosie. De aanhoudende structurele achteruitgang van de kust stuitte steeds meer op maatschappelijke bezwaren. Daarom is in 1990 wettelijk besloten de kustlijn dynamisch te 'handhaven'. Indien de kustlijn de basiskustlijn, een vaste aangewezen referentielijn, overschrijdt dan moeten corrigerende maatregelen worden genomen. Door het uitvoeren van zandsuppleties wordt dynamisch 'handhaven' in praktijk gebracht. Het lijkt tegenstrijdig dat het huidige beleid is gericht op het dynamisch handhaven van de kust, maar wordt toegepast op een statisch begrip als basiskustlijn.

Integraal kustbeheer streeft naar het handhaven van de veiligheid tegen overstroming en het behoud van andere waarden in de duinen. Bij de gebiedsgerichte aanpak worden langs de Hollandse kust zones aangewezen waar het accent komt te liggen op rust, dynamiek en natuur en waar het accent komt te liggen op een stedelijke kenmerken.

Ontwikkelingen in de kustzone en ruimtelijke beslissingen

De Nederlandse kust is voortdurend aan veranderingen onderhevig. Ontwikkelingen vanuit zeewaartse kant (zeespiegelstijging en zwaardere stormen) en landwaartse kant (economische ontwikkelingen, toenemende aandacht voor natuur en bodemdaling) leggen allemaal een claim op de ruimte in de kustzone. Als gevolg van deze ontwikkelingen neemt het ruimtebeslag toe en wordt de druk op de beperkte ruimte in de kustzone groter. De druk vanuit land mag niet leiden tot onomkeerbare ontwikkelingen, die de veiligheid van het achterland op lange termijn in gevaar kunnen brengen. Om conflicten tussen verschillende belangen te voorkomen en de ontwikkelingen op een verantwoorde manier te sturen is een zorgvuldige ruimtelijke afweging langs de Hollandse kust nodig. De vraag rijst of het onder het huidige wettelijk vastgestelde basiskustlijnbeleid in de toekomst mogelijk blijft kustverdediging aan de ene kant en de toename van ruimtelijke claims door belangen als waterwinning, recreatie, industrie en woongebieden aan de andere kant met elkaar te verenigen. Of dat vanuit economisch oogpunt een nieuw beleid moet worden ingevoerd waarbij het overschrijden van de basiskustlijn is toegestaan en waarbij een zone wordt aangewezen waarbinnen de kustlijn heen en weer mag bewegen.

Onzekerheden

Het is duidelijk dat de ruimtelijke afweging, het toedelen van de beperkte ruimte aan maatschappelijke activiteiten en aan natuur of het reserveren van ruimte om veiligheid in de toekomst te kunnen blijven garanderen, in feite een afweging is onder onzekere omstandigheden. Onzekerheden bestaan in de voorspelling van de hydraulische condities en morfologische processen. Erosie is een stochastische grootheid. De mate van erosie varieert

volgens een bepaald verdelingstype rond een gemiddelde waarde. Door kustachteruitgang lopen maatschappelijke activiteiten in de kustzone een kans op schade. De kans op schade wordt bovendien beïnvloed door het uitvoeren van kustverdedigingmaatregelen. Om de verschillende onzekerheden, variaties en kansen in een ruimtelijke afweging mee te nemen is een stochastisch model ontwikkeld. Dit model moet inzicht in de relatie tussen de fysische processen, maatschappelijke activiteiten en kustverdedigingmaatregelen creëren, zodat de maatschappelijke consequenties van ruimtelijke beslissingen onder verschillende beleidsopties in de kustzone duidelijk worden.

Naast deze onzekerheden zijn maatschappelijke ontwikkelingen ook onzeker. Deze vorm van onzekerheid houdt verband met de onzekerheid omtrent de mate waarin in de toekomst een bepaalde kans op voorkomen van een zekere gebeurtenis maatschappelijk wordt geaccepteerd. Door veranderingen in zienswijzen, meningen en ideeën kunnen afwegingen voortdurend worden beïnvloed en kan in de loop der tijd tot andere keuzen en acceptatie van kansen op bepaalde gebeurtenissen leiden.

Ontwikkeling van een stochastisch model voor de Hollandse kust

Dit stochastische model is in dit afstudeeronderzoek ontwikkeld. Met het model zijn de jaarlijkse kosten voor kustonderhoud en de schade aan maatschappelijke activiteiten voor verschillende situaties bij de toepassing van de twee beheersopties geoptimaliseerd. De eerste beheersoptie betreft de huidige basiskustlijn benadering waarbij de bewegingsruimte voor de kust is beperkt tot de basiskustlijn die niet mag worden overschreden. Voor de tweede beheersoptie is een variant op deze lijnbenadering ontwikkeld. Bij deze beheersvorm wordt genuanceerder omgegaan met de basiskustlijn. Er wordt een zone aangewezen waarbinnen de kustlijn mag bewegen. De ruimte voor deze zone kan zowel landwaarts (door verdere terugschrijding van de kust te tolereren) als zeewaarts (door een buffer te creëren (landaanwinning)) worden gezocht. Uit de optimalisatie volgt een 'optimale' suppletiefrequentie die de breedte van de bewegingszone voor de kustlijn bepaalt. Deze bewegingszone geeft aan welke ruimte er in de kustzone langs de Hollandse kust moet worden gereserveerd.

Optimalisatie-model

Voor de ontwikkeling van het stochastische model is een framework voor het model opgesteld dat vervolgens is toegepast op de Hollandse kust. Het stochastische optimalisatie-model geeft antwoord op vragen als:

- Is het vanuit economisch oogpunt aantrekkelijk genuanceerder om te gaan met de basiskustlijn en overschrijding van de basiskustlijn toe te staan door een zone aan te wijzen waarbinnen de kustlijn heen en weer mag bewegen?
- Indien een kustzonebenadering aantrekkelijker zou zijn kan de ruimte voor deze bewegingszone dan het beste landwaarts of zeewaarts worden gezocht?
- Welke verschillen zijn ten aanzien van de bovenstaande vragen te verwachten tussen de huidige en toekomstige situatie?
- Op dit moment is een bouwstop afgekondigd in de kustzone. Wat is het effect van de handhaving van deze bouwstop in de toekomst en het juist toestaan van economische ontwikkelingen (volbouwen van de kustzone)?
- Welke verschillen bestaan er tussen de toegestane ruimte voor dynamiek in een economisch ontwikkeld en bebouwd kustgebied en een kustgebied waar het accent op rust, natuur en extensieve recreatie ligt?
- Wat zijn de gevolgen van de toegestane dynamiek in de kustgebieden met de functie rust en natuur op de verschillende typen natuur in de kustzone?

Het framework van het model bestaat uit een invoerdeel, vier deelmodellen en het uiteindelijke optimalisatie-model. De resultaten uit de optimalisatie vormen de uitvoer van het model.

- *Invoer:*

Het invoerdeel bestaat uit de randvoorwaarden en de uitgangspunten van het model. Als randvoorwaarde is de veiligheid van het achterland opgelegd. Het aantal functies in het model is beperkt tot de functies veiligheid, natuur, recreatie, bebouwing en waterwinning. Het kustgebied waarin de optimalisatie wordt uitgevoerd beperkt zich tot het buitendijkse gebied in de kustzone van de Hollandse kust. De kustverdedigingsmaatregelen zijn beperkt tot zandsuppleties die in de kustnota van 1995 zijn erkend als structurele maatregel tegen doorgaande erosie.

In het invoerdeel staan de beheersopties beschreven waarvoor de optimalisatie is uitgevoerd. Twee situaties zijn bekeken: de huidige situatie (2000) en de toekomstige situatie (2100).

Langs de Hollandse kust vertonen de kustgebieden veel variatie in morfologisch kustgedrag en economische en ruimtelijke ontwikkeling. Daarom is de kust ingedeeld in specifieke kustgebieden. Deze gebiedsindeling is in de verschillende deelmodellen gebruikt.

- *Deelmodel 1: Hydraulisch-morfologisch model*

De morfologische ontwikkeling van de kust vertoont vaak een grillig beeld. De trend van het kustgedrag is een superpositie van kustontwikkelingen ten gevolge van verschillende processen en menselijke ingrepen. Om het kustgedrag te beschrijven is in dit onderzoek rekening gehouden met twee soorten kustontwikkeling: structurele- en incidentele erosie. Beide processen zijn op stochastische wijze bepaald. De structurele erosie is met behulp van jaarlijkse kustmetingen bepaald. Uit kubingsberekeningen, die zijn uitgevoerd door RIKZ, is met een trendanalyse de jaarlijkse trend en de afwijking op deze trend bepaald.

Voor de incidentele erosie is uitgegaan van dynamisch evenwicht. Dit houdt in dat is aangenomen dat de duinafslag in een zeker jaar in hetzelfde jaar nog op natuurlijke wijze wordt hersteld. De incidentele erosie is berekend voor drie verschillende stormklimaten langs de Hollandse kust: Den Helder, IJmuiden en Hoek van Holland. Met het duinafslagprogramma Super-Dune zijn afslagberekeningen uitgevoerd voor verschillende stormvloedwaterstanden met bijbehorende significante golfhoogten. Het verband tussen de afslagberekeningen en de waterstanden is bepaald met het fit-programma *Curve Expert 3.1*. Met dit verband en het verdelingstype van de waterstand is met een Monte-Carlo simulatie het verdelingstype van de duinafslag bepaald. Met een Kolmogorov-Smirnov-test is getest of het gekozen verdelingstype goed aansluit bij de waarnemingen.

Naast het bepalen van de structurele- en incidentele erosie in de huidige situatie zijn voorspellingen gedaan voor de toekomstige situatie. Door klimaatsveranderingen is het mogelijk dat er een (versnelde) zeespiegelstijging en intensivering van stormen optreedt. Dit beïnvloedt de morfologische processen. Hoewel extrapoleren naar de toekomst gevaarlijk is, is toch een schatting gemaakt om uitspraak te kunnen doen over hoe de kust zich mogelijk in de toekomst gedraagt en inzicht te krijgen in welk beheer in de toekomst wenselijk is.

- *Deelmodel 2: Kustverdedigingsmaatregelen*

Om kustachteruitgang tegen te gaan of te herstellen worden kustverdedigingsmaatregelen uitgevoerd. De kustverdedigingsmaatregelen zijn beperkt tot het uitvoeren van strandsuppleties. De kosten van strandsuppletie maatregelen zijn uitgedrukt in constante kosten en variabele kosten per meter kustvooruitgang.

- *Deelmodel 3: Kwantificeren van de veiligheidsrandvoorwaarde*

De veiligheid van het achterland is opgenomen als randvoorwaarde van het model. Om aan de 10^{-5} -veiligheidsgrens te voldoen moet minimaal een wettelijk vastgesteld grensprofiel en de 10^{-5} -afslagzone in het duingebied aanwezig zijn. Deze randvoorwaarde beperkt de ruimte voor dynamiek. Om te voldoen aan deze

randvoorwaarde is de afstand per kustgebied berekend waarover de kust zich vanuit veiligheidsoogpunt maximaal mag terugtrekken.

- *Deelmodel 4: Economisch model*

In het economisch model zijn waardeverdelingsfuncties over het dwarsprofiel voor verschillende kustgebieden in de huidige- en toekomstige situatie bepaald. Aan de hand van een inventarisatie langs de Hollandse kust is onderscheid gemaakt tussen drie typen bebouwde delen: badplaatsen met kleinschalige recreatieve voorzieningen, badplaatsen met grootschalige recreatieve voorzieningen en plaatsen met grootschalige recreatieve voorzieningen, havens en industrie. Aangezien de breedte van kustprofielen varieert zijn de waardeverdelingsfuncties voor de verschillende bebouwde delen met verschillende breedte bepaald. Voor de natuurgebieden is uitgegaan van een kusttype waarin natuur samengaat met extensieve recreatie en waterwinning. Voor dit kusttype zijn voor een variërende profielbreedte waardeverdelingsfuncties opgesteld. Hierin is voor de natuur zelf geen waarde meegenomen, maar is slechts een waarde voor extensieve recreatie en waterwinning in rekening gebracht. De effecten van de toegestane dynamiek met behulp van deze waarderingsfunctie op de soorten natuur worden achteraf bepaald.

Voor de waardeverdelingsfunctie in de toekomst zijn twee uitgangspunten aangehouden: een situatie waarin ten opzichte van de huidige situatie geen economische ontwikkeling heeft plaatsgevonden, maar wel een waardevermeerdering van het kapitaal en een situatie waarin de economie zich wel verder heeft ontwikkeld en bovendien het kapitaal meer waard is geworden.

- *Optimalisatiemodel*

De verschillende deelmodellen zijn hier gekoppeld. Indien geen maatregelen worden uitgevoerd zal dit op den duur financiële consequenties hebben voor de maatschappelijke activiteiten in de kustzone. Bovendien zijn kosten verbonden aan het uitvoeren van suppletiewerkzaamheden. De ruimtelijke afweging is een kwestie van suppletiekosten enerzijds en maatschappelijke baten anderzijds. Met behulp van de netto contante waarde methode zijn de suppletiekosten en de schade die op verschillende tijdstippen in een bepaalde planperiode zijn berekend verdisconteerd. Op deze manier zijn vergelijkbare bedragen verkregen. De minimale totale kosten aan schade en suppletieactiviteiten zijn bepaald door de herhalingstijd systematisch te variëren. Uit de optimale herhalingstijd volgt de zone waarbinnen de kust vanuit economisch oogpunt heen en weer mag bewegen.

Optimalisatie

Langs de Hollandse kust is veel variatie aanwezig. Er zijn een aantal representatieve situaties met het model geoptimaliseerd. Optimalisatieberekeningen zijn uitgevoerd voor eroderende kusten met een smal en een breed bebouwd kustprofiel en een breed onbebouwd kustprofiel met de functies natuur en extensieve recreatie.

Conclusies en aanbevelingen

Met het ontwikkelde economische optimalisatie-model en de uitgevoerde optimalisatieanalyse is inzicht gecreëerd in de economische en ecologische consequenties van het dynamisch handhaven van de basiskustlijn.

Bebouwde kustgebieden

Zowel in de huidige als toekomstige situatie is het voor bebouwde kustgebieden met veel economische waarde vanuit economisch oogpunt verstandig om genuanceerder om te gaan met de basiskustlijn. Bij het overgaan op de kustzonebenadering moet de ruimte voor de bewegingszone zeewaarts gezocht worden via de aanleg van een zeewaartse buffer. De berekende zeewaartse buffer in de toekomstige situatie is groter dan de buffer die voor de huidige situatie is berekend.

Een kustzonebenadering met een landwaartse terugschrijding van de kust moet in bebouwde kustgebieden absoluut voorkomen worden.

Voor smalle kustgebieden is de kans dat de toegestane bewegingszone door de veiligheidsafstand wordt beperkt het grootst.

Met het ontwikkelde model kan door het ontbreken van een inkomstenmodel, waarin de meeropbrengsten als gevolg van het verder economisch ontwikkelen van de kustzone zijn opgenomen, geen uitspraak worden gedaan over de vraag of het handhaven van de bouwstop in de kustzone dan wel het economisch ontwikkelen van de kustzone vanuit economisch perspectief de voorkeur geniet.

Kustgebieden met accent op natuur en landschap, rust en extensieve recreatie:

De economische waarde die aan deze kustgebieden is toegekend is relatief laag. Als gevolg hiervan is het vanuit economisch oogpunt aantrekkelijk om grote landwaartse terugschrijding van de kust toe te staan. De economische schade die ten gevolge van kustachteruitgang ontstaat is relatief laag. De suppletiekosten om het gebied te handhaven zijn hoog ten opzichte van de toegekende economische waarde. De kustzonebenadering met de landwaartse strategie is voor deze kustgebieden de goedkoopste beheersoptie.

De toegestane landwaartse bewegingszone is door de relatief lage economische waarde van het gebied zeer groot (50-110m). Dit heeft invloed op het type natuur in het gebied. Voor grote landwaartse kustachteruitgang gaat natuur met een lange ontstaansgeschiedenis verloren en ten koste daarvan ontstaat meer 'dynamische' natuur. Naast de economische afweging zal in de praktijk een afweging volgen of het maatschappelijk acceptabel is dat het ene type natuur ontstaat ten koste van een ander type natuur. Het economische optimalisatie-model kan niet onbeperkt worden toegepast in kustgebieden waar natuur en landschap domineert.

Verskil tussen bebouwde kustgebieden en kustgebieden met accent op natuur en landschap

De optimale beheersoptie is voor beide kusttypen de kustzonebenadering. Echter voor de bebouwde kustgebieden moet de zone zeewaarts worden gezocht en voor kustgebieden met natuur en landschap kan landwaartse terugschrijding worden getolereerd.

Doordat langs de kust bebouwde kustgebieden en natuurgebieden elkaar afwisselen en de bewegingsruimte voor het eerste type kustgebied zeewaarts en voor het andere type landwaarts wordt gezocht zal de optimale situatie in langsrichting van de kust een verspringend beeld vertonen. De discontinuïteiten in het grillige verloop van de kustlijn kunnen leiden tot grote zandverliezen in langsrichting voor de kustgebieden die op kunstmatige wijze worden onderhouden. Hierdoor ontstaan problemen met het handhaven van de optimale situatie langs de Hollandse kust. In praktijk zullen grotere overgangsgebieden worden aangegeven waardoor minder extreme overgangen ontstaan.

Bij de toepassing van een dergelijk optimalisatie-model moet rekening worden gehouden met de maatschappelijke acceptatie van uitkomsten. In de praktijk worden beslissingen niet alleen genomen op grond van een kosten-baten analyse. Bovendien kunnen maatschappelijke zienswijzen en denkbeelden in de tijd veranderen en leiden tot andere keuzen.

Het model moet als indicatief en richtinggevend worden gezien. Voor de toepassing op specifieke probleemgebieden moet het model eerst verbeterd worden.

Aanbevelingen om het model te verbeteren zijn:

- het ontwikkelde model is een sequentieel model, ontwikkelen in de tijd vanaf het begintijdstip in de huidige en toekomstige situatie worden niet meegenomen. Op dit punt zou het model verbeterd kunnen worden;
- het model kan worden uitgebreid met een inkomstenmodel zodat uitspraak kan worden gedaan over de economische consequenties van ontwikkelingsmogelijkheden langs de kust;
- verbeteringen in de deelmodellen kunnen leiden tot reductie van onzekerheden in uitkomsten van optimalisatieberekeningen.

Summary

Introduction

The Dutch coast has a length of 432km of which the straight coast from Hook of Holland till Den Helder covers 118km. The main part of the Dutch North Sea coast is made up of dunes, which vary in width from less than a hundred metres up to a few kilometres. Together with the beach and the coastline, the dunes protect the western part of the Netherlands against flooding. The dune-coast has a flexible character. The forces of nature cause constant moving of this barrier. Societal functions and interests in the coastal zone can experience problems due to the policy of dynamic preservation and the coastal defence policy. The dynamics of the coast determine whether these functions can be fulfilled. In order to have a responsible policy and coastal management, insight into the dynamics of the coast and the consequences of spatial decisions is of great importance.

Current Dutch policy

The present Dutch policy can be subdivided into dynamic preservation, integrated coastal zone management and local area oriented management.

Dynamic preservation and natural processes have an important role in the current Dutch policy. However, if the entire coast was left to natural processes the safety of the polders behind the dunes would be endangered by erosion. Therefore the policy was adopted to preserve the coastline at its position of 1990, in order to stop ongoing structural coastal recession. This reference line is known as basal coastline. In case the coastline recedes across the basal coastline corrective measures have to be taken. The main instrument of the manager in this dynamic preservation policy is shore nourishment. Dynamic preservation is put into practice.

Besides a lasting protection against flooding, integrated coastal zone management is aimed at sustainable preservation of functions in the dunes area. Along the Dutch coast local areas are designated as nature reserves, where nature, rest and dynamics are emphasised, whereas other areas have an urban accent.

Developments along the coast

The Dutch coast is subject to physical and societal changes. On the seaside sea level rise and storm- and erosion intensification enlarge the pressure upon the coast. The development of the socio-economic and ecological sub-systems in the coastal zone claims additional space in this area. As a consequence of these developments, the pressure upon the coast and the spatial claims increase, whereas space in the coastal zone is limited. The landward pressure can create irreversible impacts, which can endanger future safety. To avoid conflicts between these interests and to guide the developments in a responsible manner, spatial decisions along the Dutch coast have to be taken cautiously. The question arises whether under the present basal coastline policy it is still possible in the future (2100) to reconcile coastal defence, on the one hand and the increasing spatial claims of other interests and values (drinking water supply, recreation, residential and industrial functions) on the other. Or whether from an economic point of view a new policy (coastal zone policy) has to be introduced, under which the coastline is allowed to move within a designated zone.

Uncertainties

The allocation of limited space in the coastal zone to socio-economic activities, nature and landscape, on the one hand, and safety, on the other hand, is a decision under uncertain conditions. Uncertainties exist among others in modelling of (extreme) hydraulic conditions and morphological processes, which cause coastal recession. Erosion is a stochastic quantity. The extent of erosion varies around an average value according to a certain distribution function. Coastal recession causes damage to societal activities in the coastal zone. This damage will be larger as coastal recession increases or economic development takes place.

However, the damage to societal activities is influenced by corrective measures like sand nourishment as well. To embed variations and probabilities a stochastic model is developed, which can help us to understand the uncertainties. This stochastic model will create insight into the relation between physical processes, societal activities and sand nourishment to predict the societal and economic consequences of spatial decisions under a certain policy in the coastal zone.

Besides, societal developments are uncertain. This type of uncertainties is linked with the uncertainty whether a certain possibility related to the occurrence of a societal event is accepted now and in future as well. Changes in ideas, views and opinions can influence constantly, which can lead to different choices and acceptance of certain possibilities in future.

Development of a stochastic model applied to the Dutch coast

The purpose of the research is to develop and apply a stochastic model. The model combines the stochastic hydraulic and morphological processes in the natural sub-system with the socio-economic and ecological sub-systems in order to optimise the annual costs of maintenance (sand nourishment) and damage in the coastal zone. The stochastic model is applied to the Dutch coast to investigate economic and ecological consequences of two policy options. The first option is the basal coastline policy. This policy defines a setback line for the coastline, which is not allowed to recede beyond this basal coastline. The second option concerns the coastal zone policy. This policy relaxes the rather rigid definition of the basal coastline. The coastline is allowed to move with a designated zone. The space for this zone can be found both landward (to allow the coastline to recede across the basal coastline) and seaward (to create a sand buffer (land reclamation)). Using this model, the optimal maintenance frequency for sand can be calculated. This maintenance frequency determines the size of the dynamic zone that has to be preserved along the Dutch coast.

Optimisation model

To develop this stochastic model a tentative model is set up. The stochastic model has to give answers to the following questions:

- Is it attractive from an economic point of view to relax the basal coastline policy and permit the coastline to move within a designated zone?
- If this new policy is more attractive, should the space for the dynamic variation be found seaward or landward from the basal coastline?
- Will there be a difference in the answers to the above questions between the present and future situations?
- At this moment no further economic development in the coastal zone is allowed. Is it attractive from an economic point of view to change this policy into a policy in which further economic development in the coastal zone is allowed?
- Which differences exist between the width of the dynamic zone for an urban coastal area and a coastal area in which nature, rest and extensive recreation are emphasised?
- What are the consequences of allowing a dynamic zone in coastal areas where the accent lays upon nature (rest, extensive recreation and drinking water supply) for the different types of nature?

This model consists of an input file, four model parts and an optimisation module combining these model parts. The results of the optimisation form the output of the model.

- *Input:*

The input file consists of boundary conditions, limitations and assumptions. The main boundary condition is the safety condition to guarantee safety of the polders lying landward of the dunes. A limited number of functions is considered. The functions included in the model are safety, nature, recreation, residence and drinking water supply, respectively. The area is restricted to the coast between Hook of Holland and Den Helder. As a coastal defence measure only beach nourishment is taken into account.

In the input file the policy options are described. The optimisation is performed at two points in time. These points concern the present (in 2000) and the future (in the year 2100).

Along the Dutch coast there is a substantial variation in morphology and economic development. Therefore, the coast is divided into five specific coastal areas. This division is used in the model parts described below.

- *Model part 1: Hydraulic morphological model*

The morphological development of the coast is rather irregular, as it is a superposition of the effects of different processes and human interferences. In this study two types of coastal development are considered: incidental and structural erosion. Both processes are described in a stochastic manner. The structural erosion is determined using annual coastline data. The annual trend is determined by a linear trend analysis, based upon sand volume calculations performed by RIKZ.

To calculate the extent of incidental erosion, dynamic equilibrium is assumed at the annual scale. This means that the dune retreat in a certain year is assumed to be restored the same year in a natural manner. The incidental erosion is calculated for three storm climates along the Dutch coast: Den Helder, IJmuiden and Hook of Holland. Retreat calculations are executed by the dune- retreat programme Super Dune. The calculations are repeated for different storm surge levels and corresponding significant wave heights. The relation between the retreat calculations and the storm surge levels is determined with the help of a fit-programme called Curve Expert 3.1. Using this relation and the probability distribution of the storm surge level, the probability distribution of dune retreat is calculated with a Monte Carlo simulation. The Kolmogorov-Smirnov test is carried out to test whether the chosen distribution function matches the observations.

The structural and incidental erosion are also predicted for the future (2100). Due to climate changes, (accelerated) sea level rise and intensification of storms may occur. This will influence the morphological processes. Despite the fact that extrapolating too far into the future is risky, a prediction of the future coastal dynamics is made. In this way it is possible to have a long-term perspective and to outline a recommendable long-term policy in future.

- *Model part 2: Coastal defence measures*

Coastal protection measures are taken to compensate for or to resist against coastal recession. The coastal protection measures are limited. Only sand nourishments are taken into account. The costs of beach nourishment are divided into constant costs and variable costs.

- *Model part 3: Safety conditions*

The safety of the polders landward of the dunes is included in the model as a constraint. According to this safety constraint the probability of failure equals 10^{-5} . That means that once in 100,000 years failure is expected. To fulfil this safety condition, the law imposes a limiting cross section in addition to the 10^{-5} -dune retreat zone to be present in the coastal zone at all times. This constraint limits the space for dynamics. To meet this constraint, the distance over which the coastline is allowed to recede is calculated.

- *Model part 4: Economic model*

In the economic model, value distribution functions over the cross sections are determined. Based upon an inventory along the Dutch coast a distinction is made between three types of urban areas: coastal resorts with small-scale recreation, coastal resorts with large-scale recreation and areas with large-scale recreation, harbours and industry. Due to the variation in the width of the cross sections the value distribution functions are determined for the different types of urban areas with different widths. For areas with nature reserves it is assumed that nature coincides with extensive recreation and drinking water supply. For these areas, a value distribution function is also determined for different widths of cross sections. For the function nature itself no separate value is included, but a value for extensive recreation and drinking water supply is taken into account. After the optimal situation has been determined, the effects on the different types of nature are considered.

For the future value distribution functions, two possibilities are investigated. The first considers a situation in which the increase of capital value is taken into account and in which no economic development takes place compared to the present situation. The second considers a case in which both inflation and economic developments is taken into account.

- *Optimisation module*

The various model parts are linked in the optimisation module. If no coastal defence measures are taken, this will have financial impacts for the societal functions in the coastal zone. Taking coastal defence measures, however, also involves costs. The optimal choice is a matter of nourishment costs and societal benefits. Nourishment costs and damage may occur at different points in time. By discounting, their values are made comparable. By systematically changing the maintenance frequency, the total costs of nourishment and damage in the coastal zone are minimised. The optimal nourishment frequency determines the width of the zone in which the coastline is allowed to move.

Optimisation

The Dutch coast shows much variety. Some representative situations are optimised.

Calculations are carried out for erosive coasts:

- a narrow and a broad urban coastal area;
- a broad coastal area with nature reserves.

Conclusions and recommendations

The economic optimisation model and the optimisation calculation created insight into the economic and ecological consequences for dynamic preservation of the basal coastline.

Urban coastal area

Both in the present and in the future it is recommendable to relax the basal coastline policy and permit the coastline to move within a designated zone. This designated zone has to be created by a seaward sand buffer. Compared to the present, the size of this buffer is larger for future circumstances. Allowance of the coastline to recede across the basal coastline in landward direction has to be avoided.

The greatest possibility for the size of the designated zone to be limited by the safety constraint exists for narrow coastal areas.

An income model, in which the additional profits due to the economic developments in future are included, is absent in the optimisation model. That is why based on this model the questions about whether it is attractive from an economic point of view to allow further economic development in the coastal zone or to maintain the policy that economic development is not allowed, cannot be answered.

Coastal area with nature reserves

The economic value given to these areas is low. As a consequence it is attractive to permit the coastline to move within a designated zone landward. This zone is quite broad. The economic damage due to coastal recession is relatively low. The nourishment costs to maintain the coast at his position are compared to the damage high. The coastal zone policy with the landward strategy is the cheapest maintenance option.

Due to the low economic value, the zone over which the coast is permitted to move landward is broad (50-110 metres). This influences the type of nature in the coastal area. Due to the great coastal recession nature with genesis for hundreds of years will disappear. Another type of nature will rise instead. Besides this economic consideration, in practice another research has to make clear whether the society accepts the fact that a certain type of nature rises at the expense of the other type of nature, which disappears. The economic optimisation model cannot be applied unlimitedly in coastal areas dominated by nature reserves and landscape.

Distinction between an urban coastal area and a coastal area with nature reserves

As well for an urban coastal area whereas for a coastal area with nature reserves the optimal coastal policy is the coastal zone policy. The designated zone has to be found seaward in case of urban coastal areas. The coast is allowed to recede landward, across the basal coastline, in case of the coastal areas with nature reserve. The optimal situation along the Dutch coast gives a varying view due to the fact that urban coastal areas and coastal areas with nature reserves alternate along the Dutch coast. The discontinuity in the 'optimal' coastline causes sand losses in longshore direction for the coastal areas which have to be maintained at their position along the coast. Maintenance problems will occur in maintaining the optimal situation along the Dutch Coast. In practice larger areas will be appointed and this will result in less extreme transitional areas.

If this optimisation model will be applied, societal acceptance of the results have to be taken into account. In practice decisions are not only based upon cost-benefit analysis. Besides societal views, opinions and ideas can change in time which can result in different choices.

This model is an indicative model. The model has to be improved before the model is used for specific problem areas.

Recommendations to improve the model:

- the optimisation model is a sequential model. Developments in time from the starting-point onwards in the present and in the future are not included. The model has to be improved at this point;
- the model has to be expanded with an income model. With this expansion the development alternatives (economic development in the coastal zone and maintenance of the present policy to stop further economic development) can be evaluated;
- improvements in model parts can lead to reduction of uncertainties in optimisation calculations.

Inhoudsopgave

Voorwoord	5
Korte samenvatting	7
Samenvatting	9
Summary	15
Inhoudsopgave	21
1 Inleiding	23
2 Randvoorwaarden en uitgangspunten	31
3 Framework voor stochastisch optimalisatie-model	41
4 Morfologie van de Hollandse kust	47
5 Hydraulisch-morfologisch model	59
6 Kustverdedigingsmaatregelen: Zandsuppleties	89
7 Randvoorwaarde: Veiligheidsafstand in kustprofiel	99
8 Economisch model: ruimtebeslag en waardering in dwarsprofielen	105
9 Onzekerheden en gevoeligheden	125
10 Optimalisatie-model	139
11 Optimalisatie voor representatieve situaties	151
12 Conclusies en aanbevelingen	169
Foto's langs de kust van Hoek van Holland naar Den Helder	179
Gebruikte programma's	191
Afkortingen en begrippen	193
Literatuur	197

Hoofdstuk 1 Inleiding

Inhoudsopgave

1.1 Nederlands kustbeheer: geschiedenis, heden, toekomst	25
1.1.1 Historie	25
1.1.2 Dynamisch kustbeheer	25
1.1.3 Integraal kustbeheer	26
1.1.4 Gebiedsgerichte benadering	26
1.1.5 Toekomstig beheer en beleid	26
1.1.6 Taakverdeling en samenwerking tussen overheden in het kustbeheer	27
1.2 Probleemanalyse	27
1.2.1 Inleiding	27
1.2.2 Probleemstelling	28
1.3 Opzet van het rapport	30

1 Inleiding



Figuur 1-1: Stormvloedramp 1953.



Figuur 1-2: Indien geen waterverdedigingskunstwerken aanwezig zouden zijn zou twee derde van Nederland in zee liggen: Amersfoort bij zee.

1.1 Nederlands kustbeheer: geschiedenis, heden, toekomst

1.1.1 Historie

Stormvloedramp 1953: vele delen van Nederland zijn zwaar getroffen door het opdringende zeewater. Nederland wordt wakker geschud, dit mag nooit meer gebeuren. Na gebeurtenissen als deze realiseren we weer 'extra' dat ons land kwetsbaar is voor die grote soms onstuimige zee. Waterkerend Nederland wordt in beweging gezet om maatregelen te nemen het land veilig te maken.

Zo is in de afgelopen eeuw het kustbeheer en -beleid aan menige ontwikkeling onderhevig geweest. Waar men in de jaren vijftig met harde constructies het gevaar van de oprukkende zee wilde keren, zegt men nu (anno 2000) een 'dynamischer' beleid te voeren dat gericht is op natuurlijke processen en de zelfregulerende werking van de kust, waarbij de kustveiligheid voorop blijft staan. Ook wordt gestreefd naar een integrale benadering, waarbij niet alleen oog is voor de veiligheidsfunctie die de Nederlandse kust vervult, maar waar ook andere gebruiksfuncties voldoende tot hun recht komen.

Deze huidige benadering komt tot uitdrukking in het dynamisch kustbeheer en het integrale kustbeheer. Deze begrippen worden eerst toegelicht.

1.1.2 Dynamisch kustbeheer

(Löffler et al, 1999a) Dynamisch kustbeheer streeft naar het behoud van het karakteristieke uiterlijk van de kust en naar bevordering van herstel en ontwikkeling van natuurlijke processen, zoals verstuuving en sluftervorming. Door het stimuleren van de werking van wind, zee en vegetatie kan er een natuurlijker kuststelsel ontstaan dat meer één geheel vormt met het achterliggende gebied. De rol van de beheerders krijgt hierdoor een andere wending. Het duinbeheer was tot voor kort intensief gericht op het in stand houden en waar mogelijk vergroten van het zeereep¹ volume en op een optimale vegetatie om verstuuving tegen te gaan. Met de nieuwe zienswijze is het beheer extensiever geworden, waardoor van fixatie minder sprake is en er meer ruimte voor natuurlijke dynamiek ontstaat.

(RIKZ, 1996) De speelruimte van deze natuurlijke processen is echter niet onbeperkt. De aanhoudende structurele achteruitgang van de kust stuitte steeds meer op maatschappelijke bezwaren. Daarom hebben regering en parlement in 1990 voor 'dynamisch' handhaven van de kustlijn gekozen. Deze kustlijn, de basis van het huidige kustbeleid, staat bekend als de basiskustlijn, verder te noemen BKL. Op dit begrip wordt in sectie 4.5.3 verder ingegaan. Voor het beleid wordt als uitgangspunt genomen dat bij overschrijding van de BKL door de actuele kustlijn er corrigerende maatregelen worden genomen. Met name maatregelen in de vorm van zandsuppleties hebben de noodzaak tot actief beheer van de zeewering verminderd. Door het toepassen van zandsuppleties is de ruimte voor dynamiek in de zeereep aanzienlijk toegenomen.

De vorm van dynamisch kustbeheer en de effecten ervan kunnen per kustdeel verschillen. Ieder gebied biedt eigen potenties of beperkingen voor het toelaten van dynamische processen. Kansen liggen er vooral in brede waterkeringszones. In smalle

¹ Zeereep = het gebied tussen de landwaartse grens van de primaire waterkering en de (gemiddelde) laagwaterlijn.

duingebieden moet verstuing van zand uit de zeereep actief bestreden worden om de waterkering voldoende op sterkte te houden.

1.1.3 Integraal kustbeheer

(NW4, 1997) 'Vroeger' werd bij de bescherming tegen hoogwater in grote mate aandacht besteed aan het aspect veiligheid. Hoewel er nooit 1-dimensionaal (dat wil zeggen slechts op veiligheid gericht) is gekeken naar veiligheid tegen overstroming, is het besef van de aanwezigheid en waardering van andere functies in de kustzone toegenomen. Om de veiligheid en de leefbaarheid van Nederland ook voor toekomstige generaties te kunnen waarborgen blijft een duurzame en meerdimensionale visie op bescherming tegen hoogwater nodig. Het anticiperen op de toekomstige ontwikkelingen is daarbij belangrijk. Er moet voldoende speelruimte overblijven om ook onzekere en onvoorziene ontwikkelingen, zoals een versnelde zeespiegelstijging, op te kunnen vangen.

Kustverdediging kan niet los worden gezien van andere maatschappelijke functies in de kustzone. Om de verschillende functies van duin en strand in hun onderlinge samenhang goed tot hun recht te laten komen is een geïntegreerd kustbeheer essentieel. Naast de veiligheidsfunctie herbergt de kust veel andere functies, zoals natuur en landschap, cultuur, recreatie, waterwinning, bebouwing, verkeer. Zonder afbreuk te doen aan de waterkeringsfunctie, is het beheer er op gericht zoveel mogelijk recht te doen aan de andere belangen.

Kortom, het beleid is gericht op zowel het handhaven van de veiligheid tegen overstroming als het behoud van waarden en functies in de duinen. Goede samenwerking tussen de verschillende autoriteiten en organisaties is daarbij essentieel. Een geïntegreerd kustbeheer kan gestalte krijgen via een gebiedsgerichte aanpak met speciale aandacht voor raakvlakken tussen kustverdediging, natuurontwikkeling, recreatie en ruimtelijke ordening.

1.1.4 Gebiedsgerichte benadering

(WBK, 1999) De kracht van de Nederlandse kust zit in de afwisseling en natuurlijkheid. Vooral de combinatie van verschillende functies (natuur-recreatie) maken het tot een aantrekkelijk gebied. Strikte scheiding tussen functies in een bepaald duingebied is daarom ongewenst. Het doel is om een zo groot mogelijke integratie tussen kustverdediging, natuurontwikkeling, recreatie en fysieke planning te bewerkstelligen. Er moet voorkomen worden dat de duinen verknijpt worden in zones met afzonderlijke functies. Echter zo eenvoudig is dat niet overal. Momenteel vindt er overleg plaats tussen Rijk, provincies, waterschappen en gemeenten over zonering in de kustzone waarbij bebouwde gebieden worden onderscheiden van gebieden waarbij natuur voorop staat. Voor de kustzones van de Hollandse kust zal worden aangegeven waar het accent komt te liggen op rust, dynamiek en veerkracht en waar een stedelijk accent (toeristische kwaliteit, bereikbaarheid en voorzieningen) wordt opgelegd. Hieruit blijkt een gebiedsgerichte aanpak per zone.

Onder andere in gebiedsvisies, waterhuishoudingsplannen en kustbeleidsplannen wordt het rijksbeleid op lokaal niveau uitgewerkt. Op dit moment wordt er door de provincies Noord-Holland en Zuid-Holland gewerkt aan een kustvisie 2050. Op deze manier is maatwerk op grond van lokale kwaliteiten mogelijk en krijgt het bestaande rijksbeleid gestalte in de vorm van lokale praktische toepassingen.

1.1.5 Toekomstig beheer en beleid

Eind 2000 zal de Derde Kustnota uitkomen waarin met name het beleid van het handhaven van de kustlijn ter voorkoming van sluipend landverlies ter sprake zal komen. Het vormt een opstap naar een integrale kustnota, waarbij meerdere rijkspartners betrokken zijn.

richting gegeven aan de gewenste ontwikkelingen van de kust rekening houdend met milieu, natuur en ruimtelijke, economische en veiligheidsbelangen. Het is de bedoeling dat deze visie wordt uitgewerkt tot een Nationale Visie op de Kust, die:

- gebruik zal maken van het vigerende beleid en bestaande gebiedsgerichte uitwerkingen;
- houvast biedt voor toekomstige ruimtelijke ontwikkelingen;
- recht doet aan de specifieke eisen en kwaliteiten van de kust en de Noordzee;
- nadruk legt op de samenhang van de waarden van de kust en zee (ruimte, veiligheid, natuur, economie);
- beleidsmatige consequenties geeft voor een integrale Kustnota.

Het uiteindelijke streven is een kust met allure: 'In de eerste plaats is het streven naar een veilige kust waar geen structurele erosie optreedt. Daarnaast beoogt men een dynamische en veerkrachtige kust met hoge natuurlijke waarde. De kust moet ruimte bieden aan verdere (economische) ontwikkelingen, mits aan de voorwaarden van aangetoond nut, noodzaak en meerwaarde wordt voldaan.'

1.1.6 Taakverdeling en samenwerking tussen overheden in het kustbeheer (*TAW, 1995b*) In Nederland is in de wet vastgelegd dat de primaire waterkeringen gedecentraliseerd beheerd zullen worden. De Waterschappen hebben als beheerders de dagelijkse verantwoordelijkheid voor aanleg en onderhoud van de waterkeringen. Het Rijk beheert de werken die geen achterland hebben of waarvan het achterland onvoldoende draagkracht heeft (bijvoorbeeld de Waddenzee). Daarnaast heeft het Rijk verantwoordelijkheid voor de handhaving van de kustlijn en de bestrijding van de structurele erosie. Het Rijk zet beleidskaders uit en heeft het oppertoezicht. De Provincies zorgen voor de algehele coördinatie en de relaties met andere beleidsterreinen, zoals ruimtelijke ordening.

Naast (overheids)instellingen hebben nog een aantal 'overige' belanghebbenden direct of indirect met de gevolgen van het kustbeheer te maken. Gedacht kan worden aan kustgemeenten, recreanten, waterleidingbedrijven etc.

Zoals in sectie 1.1.3 is opgemerkt is een goede samenwerking tussen diverse partijen en belanghebbenden essentieel voor het bereiken van de doelstellingen van het kustbeleid. Deze samenwerking heeft onder andere gestalte gekregen in zogenaamde POK's, Provinciaal Overlegorganen voor de Kust (zie bijlage 1.1). In het POK komen in principe alle aspecten aan de orde die betrekking hebben op kustverdediging. De POK's adviseren de minister van Verkeer en Waterstaat. Deze adviezen kunnen variëren van advies ten aanzien van de ligging van de basiskustlijn tot de ontwikkeling van natuurontwikkelingsprojecten. De Provincie is voorzitter van de Provinciale Overlegorganen voor de kust.

1.2 Probleemanalyse

1.2.1 Inleiding

Het bovengenoemde beheer en beleid van de Nederlandse kust kan worden samengevat tot:

- Dynamisch kustbeheer is gericht op het meer ruimte geven aan natuurlijke processen en het stoppen van doorgaande structurele erosie. Dit krijgt vorm in enerzijds minder intensief beheer door de beheerder en anderzijds de introductie van het dynamisch handhaven van de statisch vastgestelde basiskustlijn.
- Integraal kustbeheer streeft naar het handhaven van de veiligheid tegen overstroming en het behoud van waarden en functies in de duinen. Zonder afbreuk te doen aan de waterkeringsfunctie, wordt zoveel mogelijk recht gedaan aan de verschillende belangen en functies in de kustzone.

- Een geïntegreerd kustbeheer kan gestalte krijgen via een gebiedsgerichte aanpak met speciale aandacht voor raakvlakken tussen kustverdediging, natuurontwikkeling, recreatie en ruimtelijke ordening. In de gebiedsgerichte aanpak wordt het rijksbeleid op lokaal niveau uitgewerkt.

Het lijkt tegenstrijdig dat het huidige beleid is gericht op het dynamisch handhaven van de kust, maar dat dit wordt toegepast op een statisch begrip als de basiskustlijn. Oorzaak is dat een operationeel instrument voor monitoring van veiligheid in de kustzone ontbreekt, zodat een economische afweging tussen veiligheid en andere belangen niet gemaakt kan worden. Uitbreiding van het begrip basiskustlijn met meer dynamische elementen of overstappen op een begrip dat de dynamiek beter kan beschrijven is daarom gewenst. Dit heeft geleid tot de introductie van het begrip veerkracht in het beleid.

Ondanks de 'mooie' definities die voor veerkracht zijn bedacht, blijkt het begrip in praktijk nog erg lastig toepasbaar. (*Baan et al, 1999*) WL I Delft Hydraulics heeft geprobeerd de veerkracht te operationaliseren door de ontwikkeling van de zogenaamde veerkrachtmeter. Echter ook deze operationalisering geeft nog steeds geen eenduidig en duidelijk beeld over wat het begrip veerkracht precies inhoudt en hoe in praktijk met veerkracht moet worden omgegaan.

1.2.2 Probleemstelling

(*WWK, 1999*) De huidige veiligheidsnormen zijn gebaseerd op overwegingen uit de jaren '50. Sindsdien is, als gevolg van de groeiende bevolking en welvaart, het aantal te beschermen mensen en investeringen in Nederland fors toegenomen. Het is begrijpelijk dat de veiligheidsnormen verouderen en op lange termijn een hoger veiligheidsniveau wenselijk is. Bovendien neemt de druk vanuit zee en vanuit land toe. Ontwikkelingen vanuit zeewaartse kant (zeespiegelstijging en zwaardere stormen) en landwaartse kant (economische ontwikkeling, bodemdaling) maken gebruik van en hebben elk hun invloed op kust en zee. Door deze ontwikkelingen wordt de druk op de 'beperkte' ruimte in de kustzone steeds groter en neemt het ruimtebeslag toe. De druk vanuit land mag niet leiden tot onomkeerbare ontwikkelingen, die de veiligheid op lange termijn in gevaar brengen. De ontwikkelingen kunnen met elkaar op gespannen voet komen te staan. Om deze ontwikkelingen op een verantwoorde wijze te sturen, is een zorgvuldige ruimtelijke afweging aan de Nederlandse kust nodig.

Het is duidelijk dat deze ruimtelijke afweging, het toedelen van ruimte aan maatschappelijke activiteiten en aan natuur en landschap, of het juist reserveren van ruimte in de kustzone om dynamisch kustbeheer in de toekomst genoeg ruimte te bieden, in feite een afweging is tussen 'onzekere' maatschappelijke en ecologische kosten en baten. Om tot een zorgvuldige ruimtelijke afweging te komen is daarom inzicht nodig in de relatie tussen de morfologische processen in een dynamisch kustsysteem én:

- de aanwezige maatschappelijke activiteiten met bijkomende economische kosten en baten in dat kustsysteem;
- de aanwezige en potentiële, te ontwikkelen natuurwaarden in dat kustsysteem.

Ten gevolge van structurele erosie en duinafslag kunnen activiteiten en natuurwaarden worden aangetast en kan schade optreden. De mate van structurele erosie is geen constante, maar varieert rond een gemiddelde. Het verdelingstype van de structurele erosie geeft aan op welke wijze de erosie varieert rond het gemiddelde. Hetzelfde geldt voor incidenteel kustgedrag, ook dit is een stochastische grootheid. De kans op een zekere schade is afhankelijk van de kustachteruitgang. Daarnaast wordt de kans op schade beïnvloed door het al dan niet nemen van corrigerende maatregelen tegen doorgaande erosie. Door het uitvoeren van kustverdedigingsmaatregelen in de vorm van zandsuppleties neemt de kans op schade af, maar ontstaan verdedigingskosten. Door het uitstellen van maatregelen

neemt de kans op schade toe, maar zijn de gekapitaliseerde kosten voor kustverdediging lager.

In deze afstudeeropdracht wordt een systematiek ontwikkeld, die economische en ecologische consequenties van een ruimtelijke afweging in de kustzone en de relatie tussen maatschappelijke activiteiten en ecologische waarden en de morfologie voor twee beheersopties en voor de huidige en toekomstige situatie inzichtelijker maakt. De eerste beheersoptie is de huidige basis kustlijnbenadering. Voor de tweede beheersoptie is een variant op deze lijnbenadering ontwikkeld. Bij deze beheersvorm wordt genuanceerd omgegaan met de basiskustlijn en wordt een zone aangewezen waarbinnen de kustlijn mag bewegen. De huidige situatie is de situatie anno 2000. Voor de toekomstige situatie is het jaar 2100 genomen.

De te ontwikkelen systematiek moet uiteindelijk behulpzaam kunnen zijn bij de besluitvorming en beantwoording van vragen in het toekomstige kustbeheer, zoals: Hoe stringent moet de kustlijn gehandhaafd blijven in de toekomst? Welke dynamiek wordt daarbij toegelaten? Hoe passen maatschappelijke activiteiten en ecologie in de kustzone en welke mogelijkheden worden deze geboden? Hoe moet met bebouwing worden omgegaan in de ruimte achter de waterkering? Welke invloed heeft kustachteruitgang op de waterwinning?

De tijd is gekomen, dat waterkerend Nederland belangrijke beslissingen moet maken voor de verdere ontwikkelingen van de Nederlandse kustzone, waarbij belangen van veiligheid, ecologie en economie op evenwichtige wijze worden afgewogen.

In de afgelopen jaren is steeds meer aandacht besteed aan integrale visies voor de kust. Verschillende studies over veerkracht zijn verricht en er is een begin gemaakt met de ontwikkeling van conceptuele modellen om kustproblemen integraal aan te pakken (Peerbolte et al, 1992). De provincies Noord-Holland en Zuid-Holland werken aan een integrale kustvisie 'Kustvisie 2050'. In deze afstudeeropdracht wordt het volgende doel nagestreefd:

Ontwikkel een systematiek waarbij een randvoorwaarde wordt opgelegd voor veiligheid (wettelijke norm voor veiligheid van het achterland), waarmee inzicht kan worden gekregen in:

- **de relatie tussen morfologische processen in een dynamisch kustsysteem, kustverdedigingsmaatregelen én de aanwezige maatschappelijke activiteiten met bijkomende economische kosten en baten in dat kustsysteem** (*N.B. ten gevolge van structurele erosie en duinafslag, zonder corrigerende maatregelen, kunnen activiteiten en functies tijdelijk of blijvend worden aangetast, waarbij schade en/of opbrengstderving kan optreden*);
- **de relatie tussen morfologische processen in een dynamisch kustsysteem, kustverdedigingsmaatregelen én de aanwezige natuurwaarden in dat kustsysteem;**
- **de economische en ecologische consequenties van de ruimtelijke afweging in de kustzone, zodat bij het toedelen van ruimte in de kustzone aan economische activiteiten of reserveren van ruimte in de kustzone voor dynamisch kustbeheer, de gevolgen economisch gezien duidelijk zijn;**

voor heden en toekomst voor twee beheersopties, de kustlijn- en kustzonebenadering, opdat de economische en ecologische consequenties van bepaalde keuzen en beslissingen voor verdere ontwikkeling van de Nederlandse kustzone beter kunnen worden overzien.

Met de systematiek moet voor de verschillende beheersopties de planperiode voor kustonderhoud worden geoptimaliseerd. De kosten en baten van de verschillende functies in het duingebied, allen gerelateerd aan een bepaald ruimtebeslag op de kustzone, én de kosten voor kustonderhoud moeten tegen elkaar worden afgewogen, gegeven een aantal randvoorwaarden aangaande de veiligheid binnendijs.

De te ontwikkelen systematiek krijgt vorm in een stochastisch 'morfologisch-economisch' model. Dit model kan als hulpmiddel worden gebruikt bij de analyse van economische, ecologische en morfologische consequenties van ruimtelijke beslissingen die onder de twee verschillende beheersopties kunnen worden genomen. In het stochastische model worden de hydraulische en morfologische processen van het natuurlijke kustsysteem gekoppeld aan de maatschappelijke activiteiten (economische en ecologische functies) in de kustzone. Met dit model worden de jaarlijkse kosten voor kustonderhoud en de schade aan maatschappelijke activiteiten voor de twee beheersopties geoptimaliseerd. Uit de optimalisatie volgt een 'optimale' suppletiefrequentie die de breedte van de bewegingszone voor de kustlijn bepaald. Deze bewegingszone geeft aan welke ruimte er in de kustzone langs de Hollandse kust zou moeten worden gereserveerd.

1.3 Opzet van het rapport

Het stochastische model moet antwoord geven op de vragen uit de probleemstelling. In het volgende hoofdstuk worden de randvoorwaarden en de afbakening van het model besproken. Vervolgens wordt in hoofdstuk 3 het conceptuele model voor de verdere ontwikkeling van het stochastisch optimalisatie-model gegeven. In hoofdstuk 4 wordt ingegaan op de morfologie van de Hollandse kust. De ontwikkeling van de deelmodellen die als invoergegevens voor het uiteindelijke optimalisatie-model dienen, worden gegeven in hoofdstuk 5 tot en met hoofdstuk 8. Hoofdstuk 5 geeft het hydraulisch-morfologisch deelmodel. De kustverdedigingsmaatregelen worden in hoofdstuk 6 besproken. In hoofdstuk 7 wordt de randvoorwaarde aan het model voor de veiligheid van het achterland uitgewerkt. In hoofdstuk 8 wordt het economische deelmodel met het ruimtebeslag en de waardering in het dwarsprofiel loodrecht op de kust besproken. In hoofdstuk 9 worden de onzekerheden van de verschillende deelmodellen gekwalificeerd. De koppeling van de verschillende deelmodellen om tot het optimalisatie-model te komen komt in hoofdstuk 10 aan de orde. In hoofdstuk 11 staan de uitkomsten van de optimalisatie van verschillende representatieve situaties. De conclusies en aanbevelingen volgen in het laatste hoofdstuk.

Voor de afkortingen en begrippen die in het rapport worden gebruikt wordt verwezen naar de lijst met begrippen en afkortingen achter in het rapport.

Hoofdstuk 2 Randvoorwaarden en uitgangspunten

Inhoudsopgave

2.1 Randvoorwaarden	33
2.1.1 Veiligheid	33
2.1.2 Natuur en landschap	34
2.2 Ruimtelijke afweging	35
2.2.1 Ruimtelijke afweging tegenover veerkracht	35
2.2.2 Ruimtelijke afweging in maatschappelijke context	35
2.3 Beheersopties	36
2.3.1 Kustlijnbenadering	36
2.3.2 Kustzonebenadering	36
2.4 Beheersopties, dynamiek, ruimtelijke afweging en kosten	36
2.4.1 Beheersopties en dynamiek	36
2.4.2 Beheersopties en ruimtelijke afweging	37
2.4.3 Beheersopties en kosten	37
2.5 Overige uitgangspunten	38
2.5.1 Functies	38
2.5.2 Beperking tot buitendijkse gebied in de kustzone	38
2.5.3 Hollandse kust	39
2.5.4 Zandsuppleties	39
2.5.5 Bestaande kust en kustuitbreidingsplannen	40

2 Randvoorwaarden en uitgangspunten

2.1 Randvoorwaarden

2.1.1 Veiligheid

(TAW, 1995b) De beveiliging van het achterland tegen overstroming is de primaire functie van de waterkering. Ten aanzien van veiligheid nemen twee elementen een belangrijke rol in. Ten eerste is dit de wettelijke norm, die ten aanzien van de veiligheid van het achterland aan de waterkering wordt gesteld. Ten tweede wordt in het huidige kusthandhavingsbeleid verdergaande structurele erosie bestreden. Daartoe is een norm ingevoerd, de zogenaamde BKL, waaraan de kustlijn moet voldoen. Deze norm is meer een uitgangspunt dan een norm en zal verderop in dit rapport worden besproken.

(TAW, 1995b) De 'roots' van de huidige wettelijke veiligheidsnormen liggen in de Deltawet, die na de stormvloedramp in 1953 in het leven is geroepen. Aan de waterkeringswerken, die na aanleiding van deze wet zijn uitgevoerd, zijn de eerste normen ten aanzien van veiligheid gesteld. Deze veiligheidsnormen zijn gebaseerd op maatschappelijke aanvaardbaarheid en worden uitgedrukt in een overschrijdingsfrequentie van de waterstand.

Pas in de Wet op Waterkering is de veiligheidsnormering voor het eerst wettelijk geregeld. In deze wet worden dijkkringgebieden gedefinieerd. Per dijkkringgebied is een te handhaven veiligheidsniveau met een veiligheidsnorm gerelateerd aan ontwerpstormvloedpeil, de maatgevende hoogwaterstand, MHW, vastgesteld. De Hollandse kust is onderverdeeld in twee dijkkringgebieden: Noord-Holland, 13 en Zuid-Holland, 14. Beide dijkkringgebieden hebben een toegestane gemiddelde jaarlijkse overschrijdingskans van MHW van 1:10000. De waterkering in deze gebieden moet op deze overschrijdingskans berekend zijn.

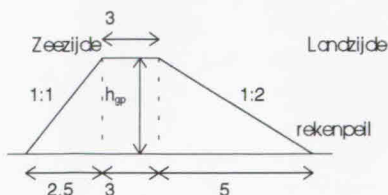
Deze gemiddelde overschrijdingskans vertaalt zich in een toelaatbare bezwijkkans die een dwarsprofiel mag bezitten. Deze toelaatbare bezwijkkans is voor duinen gelijkgesteld aan een factor 10^{-1} maal de gemiddelde jaarlijkse overschrijdingskans van het ontwerppeil. Daarmee komt de toelaatbare bezwijkkans voor de Hollandse kust overeen met 10^{-5} per jaar. Voor de veiligheidsbeoordeling van een dwarsprofiel is het belangrijk dat de mate van duinafslag onder ontwerpstormvloedcondities wordt gekwantificeerd. De gemiddelde jaarlijkse overschrijdingskans van de ontwerpduinafslag is gelijk aan de toelaatbare bezwijkkans.

Ten behoeve van de veiligheid van het achterland is vastgesteld dat te allen tijde na de ontwerp-afslag een bepaald stabiel grensprofiel aanwezig moet zijn. In de Leidraad Duinafslag van de TAW worden de afmetingen van een minimaal grensprofiel gegeven. De minimale hoogte van het standaard grensprofiel boven het rekenpeil (stormvloedpeil vermeerderd met $2/3$ van de decimeringshoogte) is 2,5m. Het hiermee overeenkomende minimum grensprofiel-volume is $16,875\text{m}^3/\text{m}$ (zie Figuur 2-2).

In deze studie wordt naast het grensprofiel een kritiek grensprofiel gedefinieerd. In de praktijk stelt de beheerder van een gebied de positionering van het kritieke grensprofiel vast (vaak willekeurig dwars door het duingebied). In deze studie wordt voor het kritieke grensprofiel het grensprofiel aangehouden dat nog net zover mogelijk aan de landwaartse kant van het duingebied kan worden gedefinieerd. Dit is een bewuste keuze, omdat op deze manier meer ruimte wordt gegeven voor de bepaling van de toegestane bewegingszone voor dynamiek met het morfologisch-



Figuur 2-1: Primaire waterkering (zie bijlage 2.1).



Figuur 2-2: Minimale grensprofiel dat boven het rekenpeil aanwezig moet zijn.

economisch model. Vanuit economisch oogpunt kan worden bepaald hoeveel dynamiek is toegestaan en waar de grens van de bewegingszone het beste kan worden gelegd. Deze grens zou kunnen worden vergeleken met de willekeurige veiligheidsgrenzen van het kritieke grensprofiel die de beheerders in hun beheersgebied vastgesteld hebben.

Ieder dwarsprofiel dient minimaal zo veilig te zijn dat tijdens een ontwerpstormvloed de duinen nog juist niet bezwijken. Om te bepalen of het benodigde duinvolume voor minimale veiligheid aanwezig is, kan de ontwerpduinafslag met behulp van een duinafslagmodel worden berekend. In de praktijk wordt dit getoetst door per dwarsprofiel voor een tijdreeks van profielmetingen ontwerpafslagberekeningen uit te voeren. Op deze manier wordt een tijdreeks van de positie van ontwerpafslagpunten verkregen. De positie van zo'n afslagpunt heeft een overschrijdingskans die gelijk is aan de maximaal toelaatbare doorbreekkans (10^{-5}). Met een lineaire regressieanalyse kan de trend van de ligging van het afslagpunt als functie van de tijd worden benaderd. Onzekerheden van profielligging en het zandverlies als gevolg van langstransportgradiënten kunnen in rekening worden gebracht door de regressielijn over een bepaalde afstand landwaarts te verschuiven, op deze manier wordt de zogenaamde ontwerpafslaglijn berekend. Landwaarts van deze ontwerpafslaglijn dient op elk tijdstip het grensprofiel aanwezig te zijn.

Uit deze uiteenzetting volgt de randvoorwaarde die ten aanzien van veiligheid in het morfologisch-economisch model moet worden ingevoerd. De veiligheidseis bepaalt de afstand waarover de kust zich vanaf de positie op het begintijdstip maximaal mag terugtrekken. Hiertoe moet eerst de afstand waarover de kust zich tijdens een 10^{-5} -afslag terugtrekt worden berekend. De veiligheidsafstand X_{veilig} is dan de afstand zeewaarts van het duingebied dat gereserveerd is voor het kritieke grensprofiel en de 10^{-5} -afslag tot aan het duinfront op het begintijdstip, zie bijlage 2.2. Voor deze berekening wordt naar hoofdstuk 7 verwezen.

2.1.2 Natuur en landschap

(TAW, 1995b) De Nederlandse duinenkust vormt een uniek natuurlandschap, dat door eeuwenlang samenspel tussen zand, zee en wind is ontstaan. Door tal van ingrepen heeft tweederde deel van het duingebied zijn oorspronkelijke karakter geheel of gedeeltelijk verloren. Het Nederlandse duingebied is echter nog steeds het meest gawe uitgestrekte duingebied van Noordwest-Europa. De natuurwetenschappelijke waarde van de duinen is groot door de grote variatie in abiotische factoren. In het duingebied komen veel en ook relatief zeldzame plantensoorten voor. Bovendien is het een belangrijke 'woonplaats' voor diverse vogelsoorten. Het landschapstype is van grote nationale en internationale betekenis. In het Natuurbeleidsplan 1990 is het gehele duingebied aangewezen als onderdeel van de Ecologische Hoofdstructuur, waar het beleid zich richt op behoud en verdere ontwikkeling van aanwezige natuurwaarden.

De 'veiligste' manier om in ieder geval behoud van de bestaande natuurwaarden te garanderen is wellicht een randvoorwaarde op te leggen zodanig dat onder geen beding bestaande natuurwaarden verloren gaan. De toegestane mate van dynamiek wordt dan tot een minimum beperkt, terwijl in dit onderzoek juist het effect van verschillende mate van dynamiek in de kustzone op verschillende functies wordt onderzocht. Er is daarom besloten om in de kustlijnbenadering de BKL-norm als uitgangspunt voor toegestane dynamiek op te leggen en in de kustzonebenadering onbeperkt dynamiek in de kustzone toe te staan. Achteraf wordt dan op grond van de resultaten de invloed van verschillende mate van dynamiek op de functie natuur en landschap geanalyseerd en kan op basis van deze analyse besloten worden of de veranderingen acceptabel zijn.

2.2 Ruimtelijke afweging

2.2.1 Ruimtelijke afweging tegenover veerkracht

Tot nu toe is in de onderzoekswereld veel aandacht besteed aan morfologie en ecologie en wordt het zelfregulerend vermogen van de kust om actuele en potentiële functies onder verschillende omstandigheden te behouden als uitgangspunt van studies gezien. Vanuit dit uitgangspunt is het begrip veerkracht gedefinieerd.

In een definitiestudie 'veerkracht van de kust' uitgevoerd door WL I Delft Hydraulics en het RIKZ (Aarninkhof et al, 1997) wordt het begrip veerkracht als volgt gedefinieerd:

'De veerkracht van de kust is het zelfregulerend vermogen om actuele en potentiële functies van de kust te behouden onder invloed van (veranderende) hydraulische en morfologische condities. Dit vermogen is gebaseerd op de (potentiële) dynamiek van morfologische en ecologische processen in relatie tot de eisen die de te behouden functies aan de kust stellen.'

(Aarninkhof et al, 1997) Dynamiek wordt gezien als middel om veerkracht te bereiken, waarbij veerkracht wordt uitgedrukt in de aanwezigheid van vrij mobiel zand en waarbij de verschillende functies die de kust herbergt worden meegenomen door die functies uit te drukken in een afname van de hoeveelheid beschikbaar vrij mobiel zand. Een veerkrachtmeter is ontwikkeld om het begrip veerkracht operationeel te maken, zie bijlage 2.3.

In dit onderzoek is de studie naar mogelijkheden voor dynamiek verruimd met een economische component. In dat opzicht wijkt het af van de eerder uitgevoerde studies naar veerkracht. De economie in relatie tot ruimtebeslag wordt als maat gezien, waarmee verschillende functies in de kustzone tegen elkaar kunnen worden afgewogen. In dit onderzoek is niet het zelfregulerend vermogen van de kust om functies te behouden bepalend voor een veerkrachtig kuststelsel, maar zijn de economische consequenties van het verlies of het behoud van functies door de morfologische ontwikkeling van de kust in relatie tot de kosten van kustonderhoud van belang.

Om verwarring te voorkomen wordt in het vervolg in plaats van over veerkracht over de maatschappelijke consequenties (economische en ecologische) van kustonderhoudsstrategieën en ruimtelijke afweging in de kustzone gesproken.

2.2.2 Ruimtelijke afweging in maatschappelijke context

(de Ruig et al, 1998) Uit sectie 1.1.5 komt naar voren dat er veel aandacht wordt besteed aan een visie om de kust verder te ontwikkelen. De druk op de kust en de kustzone neemt toe. Aan de zeewaartse kant wordt steeds meer druk uitgeoefend door onder andere versnelde zeespiegelstijging, dat kan leiden tot meer duinafslag en structurele erosie, aantasting kwelders en intergetijgebied, grotere kans op schade aan activiteiten in de kustzone en verzilting. Aan de landwaartse kant neemt de druk toe door ontwikkelingen, zoals bodemdaling, vergroting van voorzieningen voor recreatie en toerisme, landaanwinning voor industrie, infrastructuur en wonen. Door deze ontwikkelingen aan zee- en landwaartse kant wordt het ruimtebeslag op de kustzone groter. Bij beperkt beschikbare ruimte is ruimtelijke afweging tussen diverse functies belangrijk. Enerzijds moet de kust het hoofd kunnen bieden aan de toekomstige veranderingen zoals zeespiegelstijging, terwijl men anderzijds maximaal wil profiteren van de economische mogelijkheden die kust en zee bieden. Als de kust nu wordt vastgelegd en de ruimte wordt toegekend aan bijvoorbeeld bebouwing, dan kan deze ruimte in de toekomst niet worden benut om de primaire waterkering landwaarts te verleggen of te verbreden. Dit kan vanuit veiligheidsoverwegingen nodig of wenselijk zijn.

Het morfologisch kustgedrag is in hoge mate bepalend voor de vervulling van de maatschappelijke functies die ieder hun claim leggen op een stukje ruimte in de

kustzone. Iedere functie stelt andere eisen aan het morfologische gedrag van de kust. Indien een grote mate van dynamiek in de kustzone is toegestaan, kan bij vergaande teruggang van de kust schade ontstaan aan maatschappelijke belangen. Deze schade betreft de schade aan maatschappelijke functies (investeringen) in de kustzone en verlies aan maatschappelijke potenties, productie en omzet. Het morfologisch-economisch model moet meer inzicht geven in de relatie tussen de morfologische processen en de maatschappelijke activiteiten in de kustzone.

2.3 Beheersopties

2.3.1 Kustlijnbenadering

(TAW, 1995b) Op dit moment hanteert men het handhavingsprincipe, waarbij de kustlijn op de BKL-positie moet worden gehandhaafd. Dit betekent dat zodra de trend van de kustlijn deze norm nadert er tegenmaatregelen in de vorm van zandsuppleties worden uitgevoerd (zie sectie 4.5.4). In Figuur 2-3 is dit handhavingsprincipe grafisch weergegeven. De kustlijnbenadering richt zich op het statisch handhaven van de BKL.

2.3.2 Kustzonebenadering

In de kustnota is ook het begrip 'marge in de ligging van de BKL' gedefinieerd. In sommige gevallen bij geringe overschrijding van de BKL wordt het niet nodig geacht terstond tot maatregelen over te gaan. Dit betreft met name stabiele kustvakken waar de positie van de TKL sterk fluctuerend vertoont. Echter bij kustvakken met een sterke erosieve tendens lijkt voor het begrip marge geen rol te zijn weggelegd. Tot op heden is het niet gelukt het begrip marge kwantitatief in te vullen en heeft men vooralsnog afgezien om marges te definiëren.

Echter het rigide toepassen van de kustlijnbenadering wordt niet in alle gevallen aanbevolen. De kustlijn fixeren op de plaats van 1990 (BKL als norm) biedt weinig flexibiliteit. Soms kan daar waar fluctuaties in kustgedrag op basis van de kustlijnbenadering aanleiding zijn voor suppleties beter worden besloten plaatselijk de BKL de los te laten. Dit kan het geval zijn in gebieden waar zandsuppleties een remmende werking hebben op de natuurontwikkeling (kerven). Als dan zandsuppleties noch de kustveiligheid, noch de natuurwaarden, noch andere functies dienen, kan landwaartse verplaatsing van de BKL worden toegestaan. Vaak betreft dit redelijk brede gebieden, die voldoende ruimte bieden voor deze landwaartse verplaatsing. Indien de kustlijn op dergelijke plaatsen een grillig verloop krijgt moet wel rekening worden gehouden met grotere verliezen in langsrichting voor de gebieden die kunstmatig worden onderhouden.

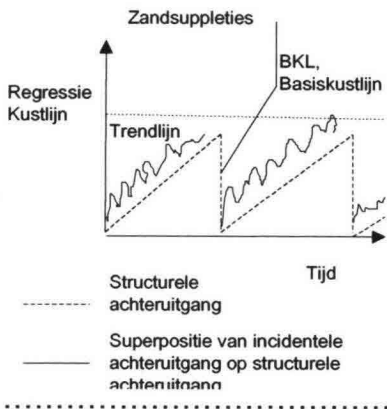
Momenteel wordt in veel 'waterkringen' nagedacht over een zogenaamde kustzonebenadering. In deze benadering moet meer ruimte worden gegeven om af te wijken van de statische BKL en wordt een zone aangewezen waarbinnen de kustlijn mag variëren, terwijl wel aan de veiligheidsnorm wordt voldaan.

Voor de kust geldt wellicht dat op lange termijn een kustzonebenadering toch voorkeur heeft boven de huidige kustlijnbenadering. Het principe van kustzonebenadering is grafisch weergegeven in Figuur 2-4 en Figuur 2-5.

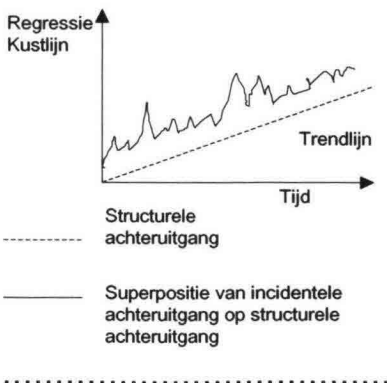
2.4 Beheersopties, dynamiek, ruimtelijke afweging en kosten

2.4.1 Beheersopties en dynamiek

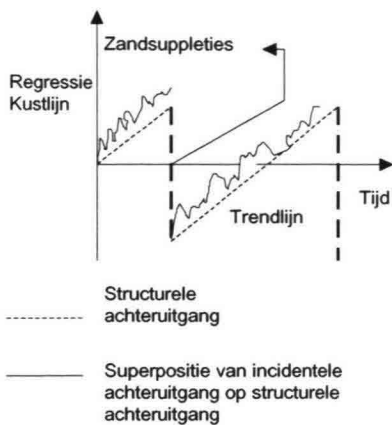
(Aarninkhof et al., 1997) De menselijke inspanning die nodig is om de kustlijn te handhaven is afhankelijk van de toegestane variatie in de kustlijnpositie. Bij de kustlijnbenadering wordt de dynamiek beperkt door de instelling van het BKL-uitgangspunt. Indien er meer variatie wordt toegestaan in de positie van de kustlijn en de kust over een zone heen en weer mag bewegen, is er minder menselijke



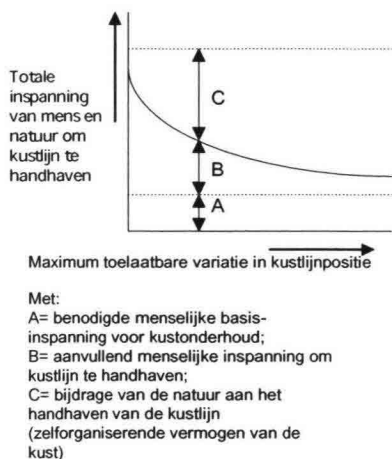
Figuur 2-3: Kustachteruitgang.



Figuur 2-4: Kustachteruitgang zonder suppletiemaatregelen



Figuur 2-5: Kustachteruitgang met suppletiemaatregelen (ook zeewaarts van de kustlijn op $t=0$).



Figuur 2-6: Benodigde inspanningen om de kustlijn te handhaven

inspanning nodig. Dan neemt het zelfregulerend vermogen van de kust en daarmee de dynamiek in de kustzone toe. Er is wel altijd een minimale basisinspanning van de mens nodig. In Figuur 2-6 is deze relatie tussen menselijke inspanning en het zelfregulerend vermogen van de kust weergegeven.

2.4.2 Beheersopties en ruimtelijke afweging

(Löffler et al, 1999a) Bij de ruimtelijke afweging kan het beheersprincipe van statisch handhaven van de BKL een belangrijke invloed hebben. Het statisch handhaven van de BKL kan gevaar opleveren, omdat er een kans bestaat dat de functies in de kustzone, zoals bebouwing, oprukken tot deze 'lijn'. Het risico bestaat dat hierdoor geen ruimte overblijft om in de toekomst de primaire waterkering landwaarts te verbreden of te verplaatsen ten behoeve van hogere eisen die mogelijk aan veiligheid zouden kunnen worden gesteld. Deze hogere eisen kunnen ontstaan door veranderde hydraulische omstandigheden door klimaatsveranderingen of doordat de economische en demografische ontwikkelingen in het achterland steeds hogere eisen stellen aan veiligheid. Er moet dus voorzichtig worden omgegaan met het tolereren van ruimtebezetting direct achter de waterkering, want een eenmaal vastgelegde kust laat geen dynamisch beheer toe.

In de kustzonebenadering wordt van het handhavingsprincipe afgeweken. Er wordt een zone aangewezen waarbinnen de kustlijn mag variëren. De ruimte voor deze zone kan zowel zee- als landwaarts worden verkregen. In zeewaartse richting kan ruimte worden gevonden door het creëren van een zandbuffer (landaanwinning) aan de kust. Landwaarts kan ruimte worden verkregen door verdere terugtrekking van de kustlijn te tolereren. In dat geval worden meer zee-invloeden toegelaten in de kustzone en krijgt de natuur landinwaarts meer vrij spel.

De landwaartse en zeewaartse strategie om ruimte te creëren voor dynamiek kan worden geanalyseerd met behulp van Figuur 2-6 (Aarninkhof et al, 1997).

Voor de landwaartse strategie geldt dat de toelaatbare variatie in de kustlijnpositie wordt vergroot. De verticale lijn met de verdeling van de inspanningen verschuift naar rechts. Er wordt meer dynamiek toegestaan waardoor lijnstuk C in Figuur 2-6 groter wordt.

Bij de zeewaartse strategie wordt op kunstmatige wijze een aanvullende zandbuffer gecreëerd. Indien de toelaatbare variatie in de kustlijnpositie gelijk blijft neemt toch de zelfregulerende werking van de kust toe, doordat er door de aangelegde zandbuffer meer materiaal aanwezig. De curve in Figuur 2-6 verschuift in zijn geheel naar beneden, waardoor lijnstuk C groter wordt.

Een groot verschil tussen de zee- en landwaartse strategie is dat bij het landwaarts creëren van ruimte de maatschappelijke consequenties veel groter zijn. De toch al aanwezige ruimtedruk in de kustzone neemt bij deze strategie verder toe.

2.4.3 Beheersopties en kosten

Bij de kustlijnbenadering worden zandsuppleties uitgevoerd zodra de trend van de kustlijn de BKL nadert. Het gevolg kan zijn dat er relatief veel kleine suppleties worden uitgevoerd. Aangezien suppleties hoge aanvangskosten met zich meebrengen zullen de gemiddelde kosten van deze 'kleine' suppleties relatief groot zijn.

In sommige gevallen is het echter vanuit veiligheidsoogpunt niet direct noodzakelijk te suppleren indien er een (dreigende) overschrijding van BKL wordt gesignaleerd. Tijdelijke terugtrekking van de kustlijn verder dan de BKL kan dan worden overwogen tot een vast te stellen zonegrens wordt bereikt. Vanaf deze zonegrens moet dan in één keer een grote hoeveelheid zand worden gesuppleerd. Als verdere landwaartse terugtrekking van de kustlijn verder dan de BKL vanuit veiligheidsoverwegingen niet is toegestaan of extreem grote risico's met zich meebrengt, wordt ook wel een zeewaartse verlegging van de kustlijn overwogen

door grotere suppleties uit te voeren. In beide gevallen wordt het suppletievolume vergroot en de frequentie verkleind. De vaste aanvangskosten worden gespreid en de gemiddelde suppletiekosten per m³ worden gereduceerd.

Wordt landwaarts een grotere dynamiek toegestaan, dan is als de ruimte in de landwaartse zone wordt benut door maatschappelijke activiteiten de kans aanwezig dat ten gevolge van structurele erosie of duinafslag schade optreedt en opbrengstderving ontstaat. Als er in die zone geen maatschappelijke functies (en dus geen economische waarden) aanwezig zijn, loopt men indirect opbrengsten mis. In dat geval zal zeker geen economische schade en opbrengstderving optreden.

Overstappen van een kustlijnbenadering op een kustzonebenadering heeft dus vanzelfsprekend gevolgen in economische zin.

2.5 Overige uitgangspunten

2.5.1 Functies

(Aarninkhof et al, 1997) De waterkerende functie (veiligheid) is de belangrijkste functie van de duinenkust. Naast de zorg dat een waterkering zijn hoofdfunctie kan vervullen is de verwevenheid met andere functies een belangrijk aandachtspunt. De waterkerende functie werkt sterk sturend op de mogelijkheden voor de andere functies in een gebied, die zowel beperkt als gestimuleerd kunnen worden. Aangezien functies en hun claim op ruimte een belangrijke rol spelen in deze studie is het van belang de verschillende functies nader te specificeren. Om het overzicht en de duidelijkheid te bewaren wordt het aantal beperkt tot de belangrijkste functies in de kustzone:

- Veiligheid;
- Natuur en landschap;
- Recreatie en toerisme;
- Bebouwing;
- Waterwinning.

De eerste twee functies zijn al besproken in dit hoofdstuk. De eerste functie wordt meegenomen in de vorm van een randvoorwaarde: aan de wettelijke norm moet te allen tijde worden voldaan. De tweede functie wordt meegenomen door de resultaten van de beheersopties met verschillende onderhoudsfrequenties achteraf te analyseren. De laatste drie functies betreffen maatschappelijke activiteiten in de kustzone en brengen economische kosten en baten met zich mee.

Naast deze functies zijn er ook andere functies in de kustzone aanwezig, zoals cultuur en verkeer. Daarnaast kunnen functies op zee worden beïnvloed door veranderingen aan de kust. Te denken valt dan aan scheepvaart, visserij en zandwinning. Deze functies worden niet meegenomen en de effecten hiervan worden niet bekeken.

2.5.2 Beperking tot buitendijks gebied in de kustzone

De studie richt zich op het buitendijks gebied van de kustzone. (WWK, 1999) De grenzen van de primaire waterkering in de duinen zijn niet uniform vastgesteld. Langs de Hollandse kust ligt de dijkringgrens vaak willekeurig dwars door het duin en is niet specifiek vastgesteld. Dit leidt vaak tot verwarring bij bijvoorbeeld het ontwikkelen van activiteiten, aangezien niet precies kan worden aangegeven of deze binnen- of buitendijks liggen.

In dit onderzoek wordt het gebied zeewaarts van het meest landwaarts (oostelijk) gelegen duinvolume, dat ten behoeve van de wettelijke veiligheidsnorm aanwezig moet zijn (het kritieke grensprofiel vermeerderd met de marge voor duinafslag tijdens een 10⁻⁵-storm), buitendijks gebied genoemd. Het gebied ten oosten van dit duinvolume behoort tot het binnendijks gebied. Er wordt aangenomen dat het duinvolume om aan de wettelijke norm te voldoen altijd aanwezig is, zodat geen schade optreedt in het achterland. Het achterland en haar ruimtelijke en economische

ontwikkelingen worden in deze studie en in het te ontwikkelen model niet meegenomen.

Het kan zijn dat objecten of bestemmingen zijn toegekend aan het buitendijkse duingebied. Deze objecten en bestemmingen liggen formeel buitendijks en de beheerder van de waterkering is niet verantwoordelijk of aansprakelijk voor eventuele schade die daar tijdens perioden van hoogwater of storm kan ontstaan. Voor de beveiliging van deze buitendijks gelegen functies gelden geen wettelijke veiligheidsnormen. Echter het is wel van belang om een veiligheidsbeoordeling uit te voeren, zodat een duidelijk beeld ontstaat van de mate veiligheid van de buitendijkse functies. De kans op schade aan de buitendijkse functies door kustachteruitgang wordt in deze opdracht gespecificeerd.

Voor de zeewaartse begrenzing wordt het dieptebereik van de metingen in het JARKUS-bestand genomen. Het dieptebereik varieert langs de kust tussen NAP -5m en NAP -7m.

2.5.3 Hollandse kust

(TAW, 1995b) Het Nederlandse kustgebied is in drie regio's te onderscheiden waartussen grote morfologische verschillen bestaan:

- A. de Deltakust, gekenmerkt door schiereilanden die door estuaria en zeegaten van elkaar gescheiden zijn;
- B. de Hollandse kust¹, gekenmerkt door een vrijwel aaneengesloten duingebied zonder de aanwezigheid van zeegaten, zeearmen of eilanden;
- C. de Waddenkust, gekenmerkt door een reeks barrière-eilanden die door zeegaten van elkaar zijn gescheiden en uitgestrekte wadden die tussen deze eilanden en het vasteland liggen.

Sterk dominerend getij zorgt voor een complexe morfologie van de Deltakust en de Waddenkust. De morfologie van de Hollandse kust is minder complex. Door het ontbreken van zeearmen en zeegaten speelt het getij een minder belangrijke rol. Naast natuurlijke processen, zoals golven, stromingen, wind en getij, wordt de morfologie voor grote mate beïnvloed door grootschalig menselijke ingrepen. Met name de aanleg van de Europoort en de havendammen bij IJmuiden hebben veel invloed op de morfologie van de Hollandse kust.

Deze studie is gericht op de Hollandse kust. Enerzijds omdat deze kust minder complex is dan de Deltakust en de Waddenkust, anderzijds omdat daar grote stappen voorwaarts te verwachten zijn van een dynamisch en veerkrachtig kustbeheer.

2.5.4 Zandsuppleties

(TAW, 1995b) Om het land tegen de zee te beschermen zijn verschillende verdedigingsmaatregelen mogelijk. Deze kunnen worden onderscheiden in harde maatregelen, zoals strandhoofden, paalrijen, duinvoetverdediging, strandmuren en strandkades voor boulevards en zachte maatregelen, zoals zandsuppleties. In 1990 is gekozen voor dynamisch handhaven van de kust. Daarbij is gekozen voor zandsuppletie als belangrijkste methode voor kustverdediging. Zandsuppletie heeft een aantal voordelen boven andere vormen van kustverdediging, namelijk:

- zandsuppleties zijn economisch gezien aantrekkelijk ten opzichte van alternatieve verdedigingswerken. Dit komt onder andere omdat zand een relatief goedkope bouwstof is. Ondanks het feit dat zandsuppletie een tijdelijke oplossing is, blijft het bij regelmatig herhalen een goedkope oplossing;
- zandsuppleties passen als verdedigingsmaatregel goed in het natuurlijk karakter van de kust;

¹ Kust van Hoek van Holland tot Den Helder

-
- zandsuppletie is een flexibele methode om kustachteruitgang te bestrijden en kan overal worden toegepast.

In de kustnota van 1995 is zandsuppletie als structurele maatregel erkend. Deze studie beperkt zich tot zandsuppleties als enige maatregel tegen kustachteruitgang. De invloed van de aanwezige andere vormen van kustverdediging worden niet verder meegenomen. Zo wordt ook de invloed van boulevards met een eventuele strandmuur niet in de berekeningen meegenomen. In bijlage 2.3 zijn suppletiehoeveelheden per kustvak in de periode 1991-1995 weergegeven.

2.5.5 Bestaande kust en kustuitbreidingsplannen

Bij het ontwerpen van het economische model wordt rekening gehouden met de huidige situatie langs de Hollandse kust. Met toekomstige plannen rondom een Tweede Maasvlakte en een eventuele uitbreiding van Schiphol in een kustlocatie wordt in deze opdracht geen rekening gehouden.

Hoofdstuk 3 Framework voor stochastisch optimalisatie-model

Inhoudsopgave

3.1 Optimalisatie-model	43
3.1.1 Framework	43
3.1.2 Functie	44
3.1.3 Reikwijdte	44
3.2 Stochastisch optimalisatie-model	45
3.2.1 Stochastisch model	45
3.2.2 Kansen en onzekerheden	45
3.2.3 Berekeningen met onzekerheden	46

3 Framework voor stochastisch optimalisatie-model

3.1 Optimalisatie-model

3.1.1 Framework

Om de probleemstelling aan te pakken en de doelstellingen te bereiken is een model framework ontwikkeld. Hierbij is gebruik gemaakt van het artikel van Peerbolte en Wind (1992). Het framework (zie bijlage 3.1) is een eerste stap naar de wiskundige uitwerking en ontwikkeling van het morfologisch-economisch model voor de situatie langs de Hollandse kust. Het model is opgesplitst in vier delen, namelijk:

A. Input:

1. Randvoorwaarde die aan het model worden gesteld (H2, H7)
2. Kustgebiedsindeling en dwarsprofielen (H4)
3. Situaties: heden en toekomst
4. Beheersopties (H2)

B. Morfologisch-economische model lay-out:

1. Hydraulische en morfologische deelmodel (H5):
 - a) huidige situatie
 - b) toekomstige situatie waarbij rekening is gehouden met mogelijke gevolgen van klimaatsveranderingen
2. Kustverdedigingsmaatregelen (H6):
 - a) maatregelen bij een kustlijnbenadering
 - b) maatregelen bij een kustzonebenadering:
 - landwaartse strategie
 - zeewaartse strategie
3. Economische deelmodel (H8):
 - a) huidige situatie: waardering en ruimtebeslag van functies in de kustzone
 - b) uitgangspunten toekomstige situatie:
 - waardering en ruimtebeslag van functies in de kustzone gelijk aan die van de huidige situatie
 - grote ontwikkelingen in het ruimtebeslag van functies in de kustzone
4. Koppeling tussen het economische deelmodel, het hydraulische en morfologische deelmodel en het deelmodel met kustverdedigingsmaatregelen (H10): som schade maatschappelijke activiteiten ten gevolge van structurele erosie of duinafslag en kosten kustverdedigingsmaatregelen
5. Terugkoppeling en eventuele aanpassingen in kustverdedigingsmaatregelen
6. Model output: optimale situatie waarin de totale som van schade aan maatschappelijke functies ten gevolge van kustachteruitgang en kosten voor kustverdedigingsmaatregelen is geminimaliseerd (H10)

C. Terugkoppeling naar beleid, de Hollandse kust en kwaliteit van resultaten:

1. Toepassing 'optimale situatie' in langsrichting op de Hollandse kust (H11)
2. Consequenties beleid (H11 en H12)
3. Onzekerheidsanalyse en kwaliteit model (H9)

D. Resultaten

1. Conclusies (H12)
2. Aanbevelingen (H12)

Langs de Hollandse kust vertonen de kustgebieden veel variatie in morfologische kustgedrag en economische- en ruimtelijke ontwikkelingen. Het is moeilijk een model te ontwikkelen met één stel randvoorwaarden en invoergegevens dat geschikt is voor de gehele Hollandse kust. Voor de verschillende deelmodellen wordt daarom gekeken naar overeenkomstig gedrag en karakteristieken langs de Hollandse kust. In het geval van het hydraulische-morfologische deelmodel wordt de mate van structurele erosie voor deelgebieden langs de Hollandse kust bepaald. Op basis van de verschillende uitkomsten worden de gebieden ingedeeld erosie-, stabiele- en aanzandingsklassen. De gemiddelde waarden uit deze klassen worden meegenomen in de optimalisatieberekeningen. Hetzelfde principe wordt toegepast voor incidentele erosie. Voor de economische- en ruimtelijke variatie langs de Hollandse kust worden een aantal standaardprofielen gedefinieerd met een bepaalde breedte en economische- en ecologische ruimtebeslag en waardering.

Voor de combinaties van de gemiddelde waarden uit de verschillende deelklassen worden de totale kosten geoptimaliseerd en wordt een optimale onderhoudsfrequentie bepaald.

De verschillen tussen de twee beheersopties komen tot uiting in modeldeel B3 bij het nemen van kustverdedigingsmaatregelen. Aan het model voor de kustlijnbenadering is een extra uitgangspunt toegevoegd, namelijk de BKL-norm, terwijl bij de kustzonebenadering alleen de wettelijke randvoorwaarde ten aanzien van veiligheid in het model wordt opgenomen. Op grond van de modelresultaten wordt in het geval van de kustzonebenadering de grootte van de zone bepaald waarover de kust mag voortbewegen.

De huidige situatie betreft de situatie anno 2000. Voor de toekomstige situatie is de situatie in 2100 genomen. Ten aanzien van de huidige en toekomstige situaties worden verschillen verwacht in de hydraulische randvoorwaarden en als het gevolg daarvan in het morfologische gedrag. Bovendien zullen veranderingen ontstaan in het ruimtebeslag en de waardering van de maatschappelijke functies in de kustzone.

3.1.2 Functie

De primaire functie van het te ontwikkelen model is het inzichtelijker maken van de relatie tussen hydraulisch-morfologische processen en de aanwezige of potentiële maatschappelijke activiteiten in de kustzone van de Hollandse kust. Door het koppelen van kustgedrag en het ruimtebeslag van activiteiten in de kustzone wordt gestreefd naar een duidelijke uiteenzetting van het risico op schade aan maatschappelijke functies. De relatie tussen deze schade en de kosten voor kustonderhoud moet leiden tot een optimalisatie of te wel een minimalisatie van de totale kosten aan maatschappelijke schade en kustonderhoud.

Met de resultaten van het optimaliseringsvraagstuk moet inzicht worden verworven in de feitelijke betekenis van de twee beheersopties, kustlijn- en kustzonebenadering. Het model beoogt meer duidelijkheid te verschaffen over de mate van flexibiliteit ten aanzien van toekomstige ontwikkelingen in de kustzone en de economische consequenties van bepaalde keuzen en beslissingen.

3.1.3 Reikwijdte

Er wordt een systematiek voor de Hollandse kust ontwikkeld om voor twee verschillende beheersopties onder verschillende omstandigheden de relatie tussen morfologie enerzijds en economie en ecologie anderzijds te analyseren.

Het is interessant na te gaan of dezelfde systematiek ook kan worden toegepast op andere kusten: de Deltakust, de Waddenkust of kusten buiten Nederland, zoals de Duitse, Belgische of Deense kust. In hoeverre is het modelconcept voor die kusten bruikbaar en welk extra onderzoek zou nodig zijn om het model geschikt te maken.

Ook zou kunnen worden gekeken naar de toepasbaarheid van de systematiek op kustvlakten met kustuitbreidingsplannen, zoals een tweede Maasvlakte of een eilandlocatie in de Noordzee. Dit valt echter buiten de scope van dit onderzoek.

3.2 Stochastisch optimalisatie-model

3.2.1 Stochastisch model

Het te ontwikkelen model bestaat onder andere uit een economisch- en een hydraulisch-morfologisch deelmodel. Het verwachte morfologische gedrag in de kustzone wordt bepaald door de hydraulische randvoorwaarden, die in het model worden ingevoerd. Vervolgens is het verwachte morfologisch gedrag bepalend voor de verwachte schade aan de maatschappelijke functies.

(Augustinus, 1999) Morfologische veranderingen vinden plaats op verschillende schaalniveaus. Op deze niveaus speelt de ruimtelijke component een belangrijke rol. Op het kleinste schaalniveau speelt de procesdynamiek. Er ontstaan echter vaak problemen wanneer uitspraken moeten worden gedaan voor grotere gebieden. In veel gevallen blijkt het moeilijk om de inzichten op procesniveau naar grotere gebieden te extrapoleren.

Het model richt zich op het kustgedrag op meso-macro niveau. Door gebrek aan inzicht in de toepassing van kennis op procesniveau op hoger schaalniveau is gekozen voor de ontwikkeling van een morfologisch-economisch model, waarin het morfologische deelmodel gebaseerd is op statistisch kustgedrag volgend uit meetgegevens en berekeningen. Met behulp van jaarlijkse kustmeetgegevens en het duinafslagprogramma Super-Dune is het mogelijk een indruk te krijgen van het gedrag van aangroei en afslagpatronen langs de Hollandse kust.

Kortom, het model betreft een stochastisch model, waarin de kans op schade aan maatschappelijke functies ten gevolge van morfologisch kustgedrag op stochastische wijze wordt bepaald.

3.2.2 Kansen en onzekerheden

(Vrouwenvelder, 2000) Ondanks alle verzamelde kennis over het kuststelsel zal er altijd sprake blijven van onzekerheden. Door gebrek aan kennis over de belastingen en de eigenschappen van de kering is nooit met zekerheid te zeggen wanneer en hoe falen van een bepaald waterkeringssysteem zal optreden. Vanwege deze onzekerheden kunnen alleen zinvolle uitspraken worden gedaan in termen van kansen.

Om de kans op falen en de nauwkeurigheid en eenduidigheid van een dergelijke kans te berekenen is het handig om de soorten onzekerheid, waarmee men bij het ontwerpen en beoordelen van een systeem te maken heeft, te analyseren. Er kan onderscheid worden gemaakt in drie vormen van onzekerheid:

- *Intrinsieke onzekerheid of natuuronzekerheid:* deze onzekerheid komt voort uit de onvoorspelbare fluctuaties die men in de natuur kan waarnemen. Er kan onderscheid worden gemaakt in fluctuaties in de tijd en in de ruimte. Fluctuaties in waterstanden, sedimenttransport, variatie in dwarsprofielen langs de kust zijn hier voorbeelden van. Deze onzekerheid geldt ook voor klimaatveranderingen en de mogelijke gevolgen hiervan voor de hydrodynamica en de morfologie van de kust.
- *Modelonzekerheid door schematisering in de fysische modellen:* in faalkansberekeningen wordt vaak gebruik gemaakt van rekenmodellen die aangeven wanneer en onder welke condities falen zal optreden. Deze modellen zijn een benadering van de werkelijkheid en geven deze vaak vereenvoudigd weer. Het is immers vrijwel onmogelijk om een complex natuurkundig verschijnsel als het falen van een waterkering exact met mathematische modellen te

beschrijven. Een vergelijking tussen de voorspellingen van een model en de werkelijkheid geeft een idee van de grootte van de fout in statistische zin.

- *Statistische onzekerheid als gevolg van een gering aantal waarnemingen:* de statistische modellen voor de variabelen die natuur- of modelonzekerheden beschrijven, vormen een belangrijke component in de faalkansberekeningen. Bij de beschrijving van variabelen wordt gebruik gemaakt van een gering aantal waarnemingen. Om ook uitspraken te doen over het voorkomen van een bepaalde waarde, waar geen meetgegevens over beschikbaar zijn, is vaak een grote mate van extrapolatie nodig.

Naast het doorwerken van onzekerheden in de berekening van een bepaalde kans is er nog een andere vorm van onzekerheid. Deze vorm van onzekerheid houdt verband met onzekerheid omtrent de mate waarin in de toekomst een bepaalde kans op voorkomen van een zekere gebeurtenis maatschappelijk wordt geaccepteerd. Dit betreft onzekerheid ten opzichte van de volgende vragen: 'Hoe wordt de komende eeuw gedacht over veiligheid, hoe belangrijk wordt natuur ten opzichte van economische belangen, hoe wordt straks het kustlandschap gewaardeerd? En hoe ontwikkelen zich de claims die gebruikers de kust opleggen: waterwinning, recreatie, bebouwing, natuur en landschap. Dit zal de weging van belangen voortdurend beïnvloeden en kan in de loop der tijd tot andere keuzen en acceptatie van kansen op bepaalde gebeurtenissen leiden.

Elk van deze ontwikkelingen en onzekerheden zou een studie apart kunnen zijn. Dit onderzoek beperkt zich tot het aangeven van de onzekerheden die in de verschillende deelmodellen een rol spelen en de wijze waarop deze in de deelmodellen zijn verwerkt.

3.2.3 Berekeningen met onzekerheden

In de deelmodellen wordt gerekend met parameters die een bepaalde onzekerheid hebben. De onzekerheden in parameters werken door op de uiteindelijke uitkomsten van het deelmodel. Op verschillende wijzen kan bij verdere berekeningen rekening worden gehouden met de onzekerheden in deze parameters:

- Niveau I berekeningsmethode: deze methode betreft berekeningen die worden uitgevoerd op een conventionele berekeningswijze, waarbij een zekere veiligheid in rekening wordt gebracht door het toevoegen van veiligheidsfactoren.
- Niveau II berekening: dit is een lineaire benaderingsmethode, hierbij wordt de grenstoestandsfunctie¹ gelineariseerd en worden alle niet-normale verdelingen benaderd door normale verdelingen. De linearisering vindt plaats rond het ontwerppunt, waar de kans op bezwijken maximaal is.
- Niveau III berekening: bij deze berekeningsmethode worden de kansverdelingen van alle parameters meegenomen. De kans bepaald wordt door integratie (convolutie-integraal) of door simulatie (Monte Carlo methode).

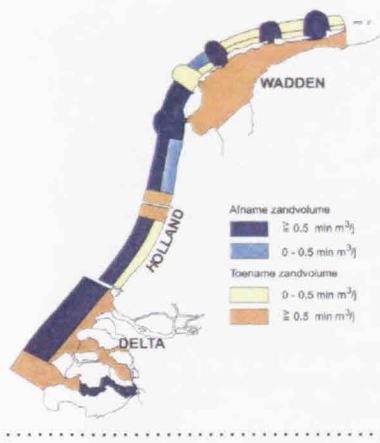
¹ Grenstoestandsfunctie Z= sterkte-belasting

Hoofdstuk 4 Morfologie van de Hollandse kust

Inhoudsopgave

4.1 Inleiding	49
4.2 Morfologie	49
4.2.1 Morfologische processen	49
4.2.2 Duinafslag en structurele erosie	50
4.2.3 Menselijke invloeden op morfologisch kustgedrag	50
4.2.4 Invloed Holocene geschiedenis op morfologisch gedrag	51
4.2.5 Kustgedrag langs Hollandse kust: vijf representatieve kustgebieden	52
4.3 Beschrijving vijf representatieve kustgebieden	53
4.3.1 Kustgebied I	53
4.3.2 Kustgebied II	53
4.3.3 Kustgebied III	53
4.3.4 Kustgebied IV	54
4.3.5 Kustgebied V	54
4.4 Kustdwarsprofiel	54
4.4.1 Duinbreedte	55
4.4.2 Duinhoogte	55
4.4.3 Helling vooroever	55
4.5 Kustlijnen	55
4.5.1 Kustlijnen	55
4.5.2 Duinvoet-positie	56
4.5.3 Basiskustlijn	56
4.5.4 Momentane kustlijn en te toetsen kustlijn	57
4.6 Kustgedrag	57
4.6.1 Kustmetingen	57
4.6.2 Kustmodellen	58

4 Morfologie van de Hollandse kust



Figuur 4-1: Zandbalans van de Nederlandse kust tussen 1965-1992.

4.1 Inleiding

(TAW, 1995b) De Nederlandse kust maakt deel uit van een grotere kustvlakte, die zich uitstrekt van Noord-Frankrijk tot Denemarken. De kustvlakte wordt aan de zeezijde begrensd door een zandige barrière, waarop zich duinen hebben ontwikkeld. De totale Nederlandse kust heeft een lengte van 432 km, waarvan de Hollandse kust 118 km bestrijkt. De Hollandse kust bestaat met name uit duingebieden, die variëren van breedte van minder dan honderd meter tot enkele kilometers. De duinen zorgen samen met het strand en de kustlijn voor een natuurlijke, zandige kustverdediging.

De duinenkust heeft een flexibel karakter. Onder invloed van natuurlijke krachten is deze verdedigingsbarrière voortdurend in beweging. Zo kan de kust zich terugtrekken en voortschrijden. Door dynamisch gedrag van het kuststelsel en kustverdedigingsmaatregelen kunnen bepaalde functies en belangen op het strand en in het duingebied in het gedrang komen. Ze zijn bepalend voor de mate waarin aan de functies, die toegekend zijn aan de duinen, wordt voldaan. Voor een verantwoord beheer en beleid is daarom inzicht in ruimtelijk kustgedrag erg belangrijk.

4.2 Morfologie

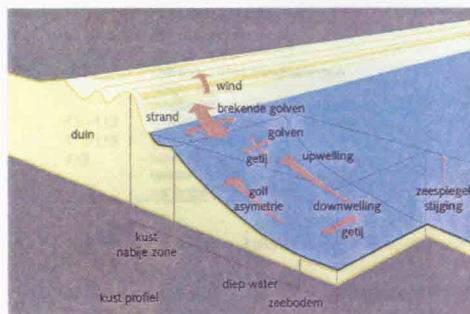
4.2.1 Morfologische processen

(TAW, 1995b) De Hollandse kust wordt gekenmerkt door een vrijwel aaneengesloten duingebied zonder de aanwezigheid van zeegaten, zeearmen of eilanden. Plaatselijk groeit de kust aan en plaatselijk verdwijnt land. Een overzicht van de zandbalans van de Nederlandse kust tussen 1965-1992 is gegeven in Figuur 4-1. Deze morfologische veranderingen zijn het gevolg van hydrodynamische processen langs de kust. Door gradiënten in het zandtransport als gevolg van de gezamenlijke werking van golven, stromingen en wind is de kust in beweging. Figuur 4-2 geeft een overzicht van hydrodynamische processen die een rol spelen bij sedimenttransport langs de kust.

Er kan onderscheid worden gemaakt tussen dwarstransport en langstransport, respectievelijk loodrecht op en evenwijdig aan de kust. Beide transportcomponenten worden door verschillende processen aangestuurd. In bijlage 4.1 worden deze processen beschreven.

Golven zijn in staat relatief veel sediment in suspensie te brengen (opwoelen), terwijl het transport vaak gerealiseerd wordt door stromingen (golf-, getij- en windgedreven stromingen). Dwarstransport wordt opgewekt door de asymmetrie van golven. De invloed van het getij wordt sterker naar de kust toe, maar de effecten van de golven groeien sterker. De relatieve invloed van het getij op de morfologische veranderingen is daarom het grootst op diep water en neemt landwaarts af. Terwijl de relatieve invloed van golven juist in tegengestelde richting toeneemt, namelijk op ondiep water hebben de golven de meeste invloed. Veranderingen in de morfologie leiden tot veranderingen in de hydraulische omstandigheden, die weer doorwerken in zandtransporten. Er is sprake van een complexe onderlinge wisselwerking.

Naast de hydraulische omstandigheden heeft ook menselijk ingrijpen invloed op het kustgedrag. Bovendien speelt de ontstaansgeschiedenis een rol bij aanzandings- en erosiepatronen.



Figuur 4-2: Hydrodynamische processen die sedimenttransport veroorzaken (naar Stive en de Vriend, 1995)

4.2.2 Duinafslag en structurele erosie

(TAW, 1995b) Er bestaan twee soorten van kustachteruitgang: structurele kusterosie en incidentele duinafslag. Het is belangrijk om deze processen niet met elkaar te verwarren.

Structurele erosie is het geleidelijke zandverlies uit het kustprofiel door de werking van golven en stromingen. Aanwezige gradiënten in het langstransport wordt als hoofdoorzaak van structurele erosie gezien. Over het algemeen zijn de effecten van structurele erosie op het veiligheidsniveau goed te voorspellen. Er kunnen tijdig maatregelen worden genomen om de veiligheid te garanderen. Ten gevolge van klimaatsveranderingen stijgt de zeespiegel. Dit zal de mate van structurele erosie beïnvloeden. Hoe de structurele erosie wordt beïnvloed blijft echter onzeker. In het volgende hoofdstuk wordt daar meer aandacht aan besteed.

Voor incidentele duinafslag ligt het allemaal iets anders, dit treedt op tijdens een zware storm (vloed) en is een snel verlopend dwarstransportproces. In een kort tijdsbestek treedt een significant zandverlies op uit het bovenste deel van het kustprofiel. De duinen slaan af en het afgeslagen zand zet zich af op het strand of op de vooroever. Voor de opvang van deze tijdelijke teruggang is een bepaald duinvolume nodig. Er kan dus beter gesproken worden over herverdeling van zand dan over zandverlies. Het afgeslagen duinzand kan op natuurlijke wijze worden teruggevoerd naar de duinen (natuurlijk herstel) of gaat gedeeltelijk verloren door zeewaarts of zijdelings verlies door golven en stromingen.

Het blijvende verlies van duinvolume is een gevolg van structurele erosie en niet van duinafslag. Daarom richt het kustbeheer zich primair op het bestrijden van deze structurele erosie. Deze structurele schade aan stranden en duinen kan worden opgevangen door kunstmatige zandsuppleties.

4.2.3 Menselijke invloeden op morfologisch kustgedrag

(Stam, 1999) De mens drukt een duidelijke stempel op de Nederlandse kust.

Menselijk ingrijpen aan de Hollandse kust bestaat onder andere uit het uitvoeren van zandsuppleties, het aanbrengen van strekdammen, de bouw van de Hondsbossche Zeewering, de constructie van strandhoofden in het noordelijk en zuidelijk deel, de aanleg van havendammen bij IJmuiden, Scheveningen en Hoek van Holland en het spuien van water uit de Oude Rijn op de Noordzee bij Katwijk. Een overzicht van de belangrijkste menselijke ingrepen aan de Hollandse kust is in Figuur 4-3 gegeven.

De aanleg van de afsluitdijk heeft nog steeds grote invloed op de morfologie van de Hollandse kust. Door het Marsdiep, de belangrijkste geul van de Waddenzee, gaat ongeveer de helft van het water en het sediment naar de Waddenzee. De afsluiting van de Zuiderzee in 1932 heeft het gedrag van het Marsdiep en de buitendelta's van het zeegat van Texel aanzienlijk beïnvloed, zie bijlage 4.2. Door de aanleg van de Afsluitdijk is het getijprisma verkleind. In de nieuwe situatie is de relatie tussen het getijprisma en het volume van de buitendelta's van het zeegat én het volume van het Marsdiep onder het gemiddelde zeeniveau verstoord. Het systeem zal zich op natuurlijke wijze gaan aanpassen aan de verstoring. Omdat het volume van de buitendelta's niet toereikend is om het Marsdiep met het gewenste volume te verkleinen ontstaat de zogenaamde zandhonger van de Waddenzee. Deze zandhonger wordt 'gestild' met zand van de aanliggende kusten. Dit is een aannemelijke verklaring van de sterke mate van erosie van de Noord-Hollandse kust.

De verlengde havenhoofden van IJmuiden en de IJ-geul hebben ook grote invloed op de morfologie langs de Hollandse kust. Beide vormen een effectieve blokkade voor het zandtransport tussen de noordelijke en zuidelijke helft van de Hollandse kust. De door golven opgewekte driftstroom voert normaliter zand langs de kust naar het noorden en houdt zo het strand in tact. Na de aanleg van Europoort is dit aanzienlijk verminderd. Bij IJmuiden wordt de driftstroom door de pieren naar buiten gedrukt, verbreedt zich en verliest aan kracht. Daardoor wordt de driftstroom onderbroken,

Sectie (km vanaf Den Helder)	Ingroep	Aanwezig vanaf
0-0.4	zeewering Den Helder	1721
0.4-1.1	zeewering Den Helder	1956
0.4-31	strandhoofden	1840-1935
ca 10-14	afsluiting zanddijk Callantssoog Huisduinen (zeegat Heersdiep)	1610
ca 16-20	afsluiting zanddijk Patten Callantssoog (zeegat Zijpe)	1552-1596
20.3-21.2	zeewering Petten	1969
21.2-25.6	Hondsbossche zeewering restauratie	ca 1550 1872
25.8-26.2	Hondsbossche zeewering	1954
55	Noordelijke havendam IJmuiden lengte 1500 m	1865-1879
57	Zuidelijke havendam IJmuiden lengte 1500 m	1962-1967 1877
99-102	verlenging tot 2800 m	1962-1967
97-98	zeewering boulevard Scheveningen	1896-1909
98-113	strandhoofden	1930
102	strandhoofden	1791-1930
	Havenhoofden Scheveningen lengte 250 m	1901-1964
110-112	lengte 650m zuid, 500m noord	1969-1970
113-115	duinvoetbescherming Ter Heide strandhoofden	1920 1776-1863
116	Noorderdam Hoek van Holland lengte 1800 m	1864-1874
	verlenging tot 4200 m	1968-1972

Figuur 4-3: Overzicht van de belangrijkste menselijke ingrepen aan de Hollandse kust.

waardoor de zandtoevoer ten noorden van de IJmuidense pieren aanzienlijk wordt verkleind. Ten zuiden van IJmuiden zandt de kust aan. Naast een door golven opgewekte driftstroom bestaat er langs de Hollandse kust een getijstroom. De pieren van IJmuiden drukken de ebstroom (die naar het zuiden gericht is) en de vloedstroom (die naar het noorden gericht is) naar buiten. Het abrupte eind van de pier zorgt er voor dat de stroom 'doelloos' verder gaat, zich verbreedt en zijn snelheid verliest. Het meegevoerde zand sedimenteert en komt niet vergenoeg landwaarts terug. De aanzanding ten noorden van de havendammen wordt deels veroorzaakt door de netto ebstroom naar het zuiden. De aanzanding ten zuiden van de havendammen is deels het resultaat van de onderbroken vloedstroom die naar het noorden is gericht.

In bijlage 4.3 is een globale analyse uitgevoerd naar de morfologische invloed van waterbouwkundige werken en menselijk ingrijpen langs de Hollandse kust.

4.2.4 Invloed Holocene geschiedenis op morfologisch gedrag

Naast de invloeden door de mens heeft de ontstaansgeschiedenis in het holocene tijdperk bijgedragen tot de huidige vorm en plaats van de Nederlandse kust. De Nederlandse kust lijkt op het eerste gezicht statisch, maar gedurende duizenden jaren vonden grote veranderingen plaats.

(*Bosch et al, 1995*) Tijdens de laatste ijstijd 10.000 tot 5000 jaar geleden was veel water vastgelegd in ijskappen en stond de zeespiegel meer dan 100 meter lager dan nu. Na de ijstijd begonnen de ijskappen te smelten en migreerde de kustlijn oostwaarts. In de periode tot 5000 jaar geleden steeg de zeespiegel zo snel dat er geen tijd was voor de vorming van duinen en bedroeg de terugdringing van de kustlijn zelfs meer dan 100 meter per jaar. Rond die tijd bereikte de kustlijn zijn meest landwaartse ligging en werden onder meer de strandwallen tussen Alkmaar, Haarlem en Den Haag gevormd. De ontstane strandwallen werden onderbroken door zeegaten ten noorden van Alkmaar en ten zuiden van Den Haag.

Daarna nam de relatieve zeespiegelstijging af en was er voldoende tijd om zand vanuit zee naar de kust te verplaatsen. Nieuwe strandwallen ontstonden zeewaarts van de oude. Ook de uitgeslepen laagvlakten ten noorden van Alkmaar en ten zuiden van Den Haag zijn in de deze periode dicht gesedimenteerd. De kust veranderde zich van een 'open kust' met veel zeegaten naar een gesloten kustlijn zoals we die nu kennen. Hoewel de zeespiegel in de afgelopen 5000 jaar nog met 5 meter is gestegen heeft de kustlijn zich onder werking van golven en stromingen door kustuitbouw juist zeewaarts verplaatst.

Deze kustuitbouw kreeg 1000 jaar geleden een ommekeer. De kust breidde zich niet langer westwaarts uit, maar begon te eroderen, de vooroever werd steiler en hoge duinen ontwikkelden zich. Tijdens deze laatste 1000 jaar is het Waddengebied en de Zeeuwse Delta kust ontstaan.

De holocene geschiedenis van de Hollandse kust wordt gekenmerkt door een stijgende relatieve zeespiegel, die transgressie en regressie van de kustlijn heeft veroorzaakt. In bijlage 4.4 is een overzicht van de zeespiegelstijging gedurende de laatste millennia weergegeven.

De invloed van deze ontstaansgeschiedenis op het huidige kuststelsel is nog steeds merkbaar als gekeken wordt naar het morfologisch kustgedrag. Het huidige kustgedrag wordt sterk bepaald door de geologische karakteristieken, die in de eeuwen na de ijstijd in het gebied gevormd zijn. Het centrale gedeelte tussen Alkmaar en Den Haag bestaat uit de strandwallen die minder erosiegevoelig zijn dan de meest noordelijke en zuidelijke gebieden van de Hollandse kust, die voorheen de uitgeslepen laagvlakten vormden tussen de strandwallen in en nu bestaan uit jonge duinen (Zie de figuur met jonge en oude duinen in bijlage 4.5). De combinatie van zand en fijn materiaal kunnen hier een verklaring voor zijn. De uiteinden van de Hollandse kust bieden minder weerstand tegen erosie. Dit is een mogelijke verklaring

voor het feit dat deze gebieden onder minder stabiele of zelfs eroderende kusten vallen.

4.2.5 Kustgedrag langs Hollandse kust: vijf representatieve kustgebieden

(*Terwindt, 1999*) Door variatie in de geomorfologische en hydro-dynamische karakteristieken, de ontstaansgeschiedenis en het menselijke ingrijpen in gebieden langs de Hollandse kust zijn verschillen waarneembaar in het morfologisch gedrag. Er zijn delen waar de kust aanwast, afslaat en delen die stabiel zijn. Bovendien zijn er verschillen in profielvormen en profielhellingen. Verder is er een verschil in de aanwezigheid en het aantal van de brandingsbanken. De situatie langs de Hollandse kust is zeker niet overal gelijk. In bijlage 4.6 zijn verschillende karakteristieken van kustgedrag langs de Hollandse kust weergegeven.

(*Augustinus, 1999*) Uit kustonderzoek door de faculteit Ruimtelijke Wetenschappen van Universiteit Utrecht blijkt dat er op laag schaalniveau, zowel op het strand als op de onderwateroever, vormen aanwezig zijn die een periodiek gedrag vertonen. Op het strand is de vorm met periodiek gedrag het vóórkomen van een strandbank. Deze vormt zich onder rustige condities en dient als natuurlijke buffer voor erosie tijdens het stormseizoen. Op de onderwateroever is een situatie te zien met periodiek bewegende brandingsbanken. Er is een vermoeden dat het morfologisch gedrag van strand en onderwateroever aan elkaar zijn gekoppeld. Kortom, op mesoschaal lijkt het gedrag van de kleinste functioneel morfologische eenheid, het strand en de onderwateroever samen, bepaald te worden door het gedrag van de buitenste brandingsbank. Het is onduidelijk hoe zich dat vertaalt in kustaangroei of kustafslag.

(*Wijnberg, 1995*) Met behulp van de jaarlijkse kustprofielmetingen is de Hollandse kust geanalyseerd. Het is mogelijk gebleken om indruk te krijgen van het morfologische gedrag van de Hollandse kust. Langs de Hollandse kust zijn vijf gebieden te onderscheiden die binnen bepaalde marges overeenkomstig kustgedrag vertonen. Deze gebieden verschillen op grond van het aantal brandingsbanken, de omvang van de brandingsbanken, de steilheid van de onderwateroever en de snelheid waarmee het periodiek gedrag van de banken verloopt. De kustgebieden zijn in bijlage 4.7 weergegeven.

- Kustgebied I: het gebied tussen Den Helder en de grens van de buitendelta van het Marsdiep; dit komt neer op raai 1,5 tot raai 8,10;
- Kustgebied II: het gebied tussen de grens van de buitendelta van het Marsdiep en het begin van de Hondsbossche Zeewering; dit komt neer op raai 8,10 tot raai 16,25;
- Kustgebied III: het gebied tussen het begin van de Hondsbossche Zeewering en de havenhoofden van IJmuiden; dit komt neer op raai 16,25 tot raai 56,30;
- Kustgebied IV: het gebied tussen de havenhoofden van IJmuiden en het begin van de Delflandse Hoofden; dit komt neer op raai 56,30 tot raai 97,00;
- Kustgebied V: het gebied tussen het begin van de Delflandse Hoofden en Hoek van Holland; dit komt neer op raai 97,00 tot raai 118,50.

Opvallend is dat de meeste grenzen van deze gebieden een relatie lijken te hebben met waterbouwkundige werken. Dit doet vermoeden dat de waterbouwkundige constructies een niet geringe betekenis hebben op het lange-termijn grootschalig kustgedrag.

Een belangrijke hypothese die Augustinus stelt is dat er een mogelijke relatie bestaat tussen het gedrag van de buitenste brandingsbanken en het cyclisch incidentele kustgedrag. Als aangenomen wordt dat de hypothese waar is dan kunnen de vijf kustgebieden, die op grond van gelijk gedrag van brandingsbanken zijn onderscheiden, ook fungeren als vijf representatieve gebieden met eenzelfde incidenteel kustgedrag. In dit onderzoek wordt verder gebruik gemaakt van deze kustgebiedsindeling.

4.3 Beschrijving vijf representatieve kustgebieden

4.3.1 Kustgebied I

(Bunt, 1990) Dit kustgebied wordt gekenmerkt door vrij hoge smalle duinen, die landwaarts steeds hoger en smaller wordt.

(Groenendijk, 1997) De morfologie van kustgebied I wordt sterk beïnvloed door het Schulpengat en de 'zandhonger' van de Waddenzee. De gebiedsgrens valt ongeveer samen met de rand van de buitendelta. Het gehele kustgebied is verdedigd met strandhoofden. Het gebied is aan erosie onderhevig. De noordelijkste sectie van Noord-Holland verliest circa 300.000m³ per jaar.

Na de invoering van het handhavingsbeleid in 1990 zijn er in dit kustgebied vier strandsuppleties uitgevoerd, respectievelijk in 1992, 1993, 1996 en 1998.

4.3.2 Kustgebied II

(Bunt, 1990) In dit kustgebied zijn ook vrij hoge en smalle duinen te zien, die landwaarts steeds hoger en smaller worden. Het strand is verdedigd met strandhoofden. Deze kustsectie wordt gekenmerkt door brandingsruggen.

(Groenendijk, 1997) Dit kustgebied vertoont een soortgelijk kustgedrag als gebied I, maar dan is het zandverlies minder extreem, hier erodeert 'nog' maar circa 70.000m³ zand per jaar.

Vanaf 1976 zijn in dit kustgebied suppletiewerkzaamheden uitgevoerd. Deze suppleties zijn met name uitgevoerd uit veiligheidsoverwegingen, ter bescherming van Callantsoog. De suppleties betreffen duinverzwaring en strandsuppleties.

4.3.3 Kustgebied III

In kustgebied III varieert de breedte van het duin sterk. Ten zuiden van de Pettemer- en Hondsbossche zeewering zijn de duinen breder dan de duinen ten noorden van de zeewering. Over het gehele gebied zijn de duinen vrij hoog.

(Groenendijk, 1997) De fluctuaties in het kustgedrag zijn groot. Dit heeft onder andere te maken met het feit dat een deel van het profiel vast ligt. De Hondsbossche zeewering stamt al uit 1500 en is het oudste kustverdedigingswerk langs de Hollandse kust. De Pettemer zeewering uit 1969 sluit direct aan op deze oude dijk. Het kustgebied vanaf raai 16,25 tot en met de zeewering erodeert. Daarom is tot aan Schoorl de kust verdedigd met strandhoofden (voor de Pettemer- en Hondsbossche zeewering bevinden zich ook strandhoofden). Verder naar het zuiden neemt deze erosie af. Ten zuiden van Bergen is geen noemenswaardige achteruitgang meer waar te nemen. Bij Egmond aan Zee bouwt de kust zelfs licht uit. De rand van het gebied wordt gevormd door het Noordzeekanaal. Het Noorderhoofd van de haven van IJmuiden vormt een belangrijke morfologische grens. De effecten van de havenhoofden van IJmuiden zijn terug te vinden in de erosieve kustsectie bij Wijk aan Zee en de sedimenterende kustsectie net ten noorden van de havendammen. Daar zandt de kust met circa 150.000 m³ per jaar aan.

In het verleden zijn verschillende suppletiemaatregelen uitgevoerd. De eerste suppletie is in de periode tussen 1962 en 1967 uitgevoerd toen ten gevolge van de verlenging van de havenhoofden bij IJmuiden erosie ontstond. In 1990 zijn suppleties bij Bergen aan Zee en Egmond uitgevoerd ten behoeve van de veiligheid. De suppleties na 1990 zijn uitgevoerd na de invoering van het handhavingsbeleid. De maatregelen betreffen uitsluitend suppleties in de vorm van strandsuppleties en hadden als doel de kustlijn te handhaven. Deze suppleties zijn uitgevoerd bij de kustplaatsen Bergen aan Zee, Egmond en Wijk aan Zee en ter plaatse van de zeewering bij Petten en Camperduin.

4.3.4 Kustgebied IV

Kustgebied IV wordt ook wel aangeduid als Rijnland. In het gebied bevinden zich drie grote woonkernen: Zandvoort, Noordwijk en Katwijk. De duinen in dit gebied kunnen variëren sterk in breedte. Boven Zandvoort kan de breedte zelfs enkele kilometers aannemen. Het duingebied voor Noordwijk en Katwijk aan zee zijn smaller en bedragen slechts enkele honderden meters.

(Groenendijk, 1997) Ten zuiden van IJmuiden is de invloed merkbaar van het Noorderhavenhoofd en het Zuiderhavenhoofd. Tijdens de aanleg en de verlenging is er sprake geweest van kustachteruitgang. Over het geheel genomen bouwt de kust van Rijnland licht uit. De ontwikkeling van de kustsectie ten zuiden van de havenhoofden valt uit de toon. Per jaar sedimenteert er 300.000 m³ zand. Deels wordt hierdoor de erosie in de naastgelegen kustsectie bij Zandvoort veroorzaakt. Verder naar het zuiden zandt de kust aan.

De verlenging van het Noorderhavenhoofd in 1962 was de aanleiding voor een strandsuppletie bij Bloemendaal. In de jaren 1990 tot 1998 zijn acht suppleties uitgevoerd. Bij de laatste twee suppleties in 1998 is geëxperimenteerd met onderwatersuppleties.

4.3.5 Kustgebied V

(Groenendijk, 1997) Dit kustgebied staat bekend onder de naam Delfland. De Delflandse duinen zijn smal. Delfland is een redelijk stabiel gebied. Het gehele kustgebied is voorzien van strekdammen. Deze dammen zorgen ervoor dat de getijstroom uit de kust wordt gehouden.

De Scheveningse pier, de havenhoofden van Scheveningen en de Noorderdam hebben veel invloed op het morfologische kustgedrag. Ten gevolge van de bouw van de pier van Scheveningen in 1962 bouwt de kust ter plaatse van raai 102 zich lokaal met een snelheid van 5m per jaar uit. De verlenging van de Scheveningse havenhoofden in 1968-1970 veroorzaakte veel erosie. De kust bij Scheveningen wordt nog steeds gekenmerkt door erosie. Dat is mede te verklaren uit het feit dat Scheveningen een boulevard heeft en daarmee geen zandbuffer heeft om dynamisch te reageren op stormschade. Ten behoeve van recreatie zijn in het verleden suppleties uitgevoerd bij Scheveningen. Bij Ter Heijde is een duinvoetversteving aangebracht. Het gebied ten noorden van de Nieuwe Waterweg vertoont een licht erosief karakter. In 1973 is daar bij Hoek van Holland begonnen met de uitvoering van het zogenaamde strandplan. De hoek tussen de Nieuwe Waterweg en de kust is daarbij opgevuld met 20 miljoen m³ zand.

Vanaf 1953 tot heden zijn suppleties uitgevoerd aan de Delflandse kust. Deze suppleties dienden onder andere doelen als veiligheid, recreatie en kustlijnhandhaving.

4.4 Kustdwarsprofiel

(TAW, 1995b) In het kustprofiel zijn vier morfologische zones te onderscheiden: zeebodem, vooroever, strand en duinen. Het strand is de zone tussen de vooroever en het duin met als zeewaartse begrenzing de gemiddelde laagwaterlijn en als landwaartse begrenzing de duinvoet. In bijlage 4.8 is een schets van een willekeurig dwarsprofiel met verschillende termen weergegeven.

Langs de Hollandse kust vertonen de kustprofielen grote variatie in geometrie. De dwarsprofielen variëren onder andere in hoogte en in breedte. Bovendien varieert de helling van de vooroever, het strand en het duinfront. Om deze variatie te analyseren kunnen de jaarlijkse kustmetingen in beschouwing worden genomen. Hierbij is gebruik gemaakt van de database met de jaarlijkse kustmeetgegevens. Deze profielen kunnen in het duinafslag programma Super-Dune (zie beschrijving Super-Dune sectie 5.4.3) worden bekeken. De database-bestanden zijn met een Pascal

programma geconverteerd naar voor Super-Dune bruikbare ASCII-bestanden. Voor deze conversie wordt verwezen naar bijlage 4.9 en bijlage 4.10. Na de conversie naar ASCII-bestanden kunnen de dwarsprofielen van de raaie langs de kust over verschillende jaren worden bekeken. Op de variatie in duinhoogte, duinbreedte en de helling van de vooroevers is in de volgende secties met behulp van de jaarlijkse kustmetingen verder ingegaan.

4.4.1 Duinbreedte

De duingebieden langs de Hollandse kust variëren sterk in breedte. Aangezien de smalle en brede profielen elk hun eigen potenties hebben is een inventarisatie van de breedte van profielen nodig.

De smalste duinen bevinden zich tussen Den Helder en Callantsoog (250m-400m) en tussen Scheveningen en Hoek van Holland (150m). In kustgebied I varieert de breedte van de dwarsprofielen tussen de 300m en 600m. De breedte van de dwarsprofielen in kustgebied II varieert in de eerste drie kilometer tussen de 500m en de 800m. Vervolgens zijn de duinen bij Callantsoog erg smal (250m). In het laatste gedeelte van kustgebied II variëren de duinen rond de 600m. Kustgebied V wordt ook gekenmerkt door smalle profielen. In het eerste gedeelte bevinden zich voornamelijk kustprofielen met een breedte tussen de 200m en 500m. Vanaf Ter Heijde zijn de kustprofielen smaller dan 200m. De bredere duinen bevinden zich in het centrale deel van de Hollandse kust. Daar nemen sommige dwarsprofielen een breedte van enkele kilometers aan.

4.4.2 Duinhoogte

De jaarlijks gemeten kustprofielen zijn in beschouwing genomen om de ruimtelijke variatie en variatie in tijd te bekijken. In bijlage 4.9 staan de duinhoogten voor de kustgebieden per gemeten profiel van de jaarlijkse kustmetingen weergegeven. Kustgebied I wordt gekenmerkt door relatief hoge smalle duinen die steeds landinwaarts steeds hoger worden. In kustgebied II zijn ook vrij hoge en smalle duinen te zien. In kustgebieden III en IV bevinden zich de hoogste en breedste duinen. De laagste duinen zijn in kustgebied V te vinden. In Tabel 4-1 staan de gemiddelde duinhoogten van de vijf kustgebieden.

4.4.3 Helling vooroevers

(Augustinus, 1999) In Figuur 4-4 en is te zien dat de hellingen van de vooroevers langs de Hollandse kust variëren. In het centrale gedeelte van de kust bevinden steilere vooroevers.

Kustgebieden:	Helling vooroevers
Kustgebied I	1:400
Kustgebied II	1:400
Kustgebied III	variërend van 1:400 tot 1:140; gemiddeld 1:180
Kustgebied IV	variërend van 1:500 tot 1:180; gemiddeld 1:210
Kustgebied V	1:400

Tabel 4-2: Hellingen vooroevers voor de vijf kustgebieden.

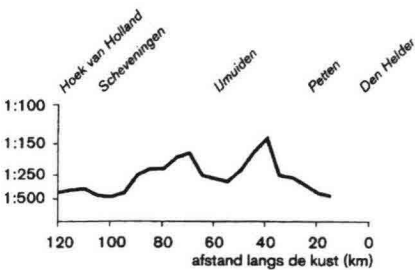
4.5 Kustlijnen

4.5.1 Kustlijnen

(TAW, 1995) Met de kustlijn wordt de overgang van zee naar land aangeduid, of te wel de grens tussen de natte en de droge waterkering. De verandering van de ligging van deze lijn wordt als indicator gebruikt voor de kustontwikkeling. Dat er gewerkt wordt met een kustlijn in plaats van het totale profiel heeft te maken met het feit dat

Kustgebieden	Gemiddelde duinhoogte [m]	Afwijking duinhoogte [m]
Kustgebied I	13,2	1,9
Kustgebied II	14,6	4,8
Kustgebied III	16,6	4,7
Kustgebied IV	17,7	3,3
Kustgebied V	12,3	3,6

Tabel 4-1: Duinhoogten langs de Hollandse kust.



Figuur 4-4: Hellingen van de vooroevers langs de Hollandse kust.

een kustlijn kan worden aangegeven op een kaart. Indien een goede definitie van de kustlijn wordt gegeven kunnen kustontwikkelingen aan de hand van de verplaatsingen van deze lijn worden geanalyseerd. De RSP-lijn kan hierbij als referentielijn dienen.

Er zijn verschillende lijnen mogelijk die als indicator voor kustontwikkelingen kunnen worden gebruikt. Er kan gedacht worden aan zichtbare lijnen, zoals de duinvoetlijn, de GWL-lijn, de GHW-lijn of denkbeeldige lijnen die volgen uit een berekening, zoals de MKL (momentane kustlijn). In dit onderzoek wordt de overgangsknik van het duinfront met de overige duinen als indicator voor kustontwikkeling gebruikt.

4.5.2 Duinvoet-positie

Onder duinvoet wordt in (TAW, 1995b) het volgende verstaan:

'de benedenrand van het duin; overgang van het duinbeloop naar het strand.'

(TAW, 1995b) In veel gevallen is de ligging van de duinvoet moeilijk te bepalen. Dit komt omdat de overgang tussen strand en duin niet abrupt is maar geleidelijk. De duinvoet wordt daarom weleens aangegeven als het snijpunt van het gemiddelde duinbeloop en de gemiddelde ligging van het strand. In andere gevallen wordt ook wel het snijpunt tussen het buitenste duinbeloop en een vaste waarde ten opzichte van NAP aangeduid als duinvoet. In dit onderzoek wordt onder duinvoet het snijpunt van het buitenste duinbeloop met de NAP +3m-lijn verstaan.

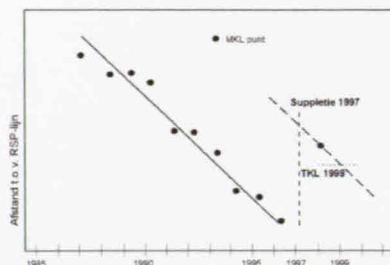
4.5.3 Basiskustlijn

Voor 1990 werd nog niet expliciet via een bepaald beleid rekening gehouden met de optredende structurele erosie langs de Nederlandse kust. Aangezien doorgaande achteruitgang van de kust op den duur de veiligheid kan aantasten werd daarom onderzoek gedaan naar drie vormen van potentieel beleid:

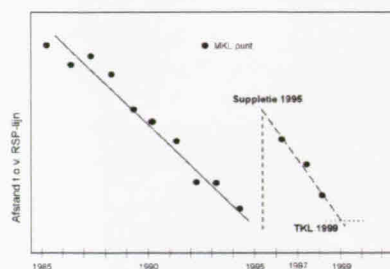
- terugtrekking van de kustlijn, dat wil zeggen structurele erosie haar gang laten gaan;
- handhaven van de kustlijn;
- aanvallen, dat wil zeggen zeewaartse verplaatsing van de kustlijn door middel van zandsuppleties, of te wel landaanwinning.

In 1990 is gekozen om de tweede vorm in te voeren. Handhaving van de kustlijn moet verdere structurele erosie tegengaan. Om dit voornemen meer gestalte te geven is een grens getrokken door de ligging van de kustlijn op 1 januari 1990 plus eventueel een kleine afwijking vast te leggen in de zogenaamde basiskustlijn. (R/KZ, 1999a) De berekende ligging van de kustlijn op 1 januari 1990 is afgeleid uit de kustmetingen over de periode 1980 tot en met 1989. De afwijking tussen de berekende BKL en de vastgestelde BKL is een strategische keuze geweest ten einde in te spelen op de natuurlijke fluctuaties in de kustlijnligging en om te voorkomen dat op minder gewenste locaties moet worden gesuppleerd. De BKL wordt uitgedrukt in meters ten opzichte van de RSP-lijn. In de huidige praktijk wordt deze destijds vastgestelde grens verder statisch gehandhaafd, zodat verdere structurele erosie ten opzichte van de BKL voorkomen wordt. Overschrijdt de kustlijn deze grenslijn, dan worden tegenmaatregelen genomen. Dat gebeurt meestal op initiatief van het Rijk, maar via het POK zijn ook de andere partijen in het kustbeheer bij de planvorming betrokken.

4.5.4 Momentane kustlijn en te toetsen kustlijn



Figuur 4-5: Voorbeeld bepaling TKL en trend; 1 jaar na suppleren.



Figuur 4-6: Voorbeeld bepaling TKL en trend; 2-4 jaar na suppleren.

(RIKZ, 1999a) Voor het huidige beleid (de kustlijnbenadering) is de verandering van de momentane kustlijn (MKL) een belangrijke parameter voor kustontwikkeling en de basis waarop beslist wordt tot het nemen van suppletiemaatregelen. Jaarlijks wordt de trend van de kustachteruitgang bepaald door middel van een volumetrische beschouwing: met behulp van de jaarlijkse kustmetingen wordt uit de ligging van het strand en het bovenste gedeelte van de onderwateroever voor elke raai de positie van de MKL berekend. De berekeningswijze is weergegeven in bijlage 4.12.

Op basis van een analyse van de ontwikkeling van de MKL kan besloten worden tot het nemen of opheffen van maatregelen om structurele kustachteruitgang te stoppen of tegen te gaan. Voor de ontwikkeling van de MKL wordt een lineaire trend bepaald door de MKL-posities over een periode van tien voorgaande jaren. Uit deze trend wordt de ligging van de TKL, de te toetsen kustlijn bepaald. Indien de TKL de BKL-norm dicht nadert of overschrijdt wordt besloten tot het nemen van tegenmaatregelen. Op grond van de positie van de TKL wordt besloten op welk moment men maatregelen moet nemen.

Voor de periode direct na het jaar dat er gesuppleerd is kan geen trend worden berekend. Indien bij het suppletie-ontwerp geen extra verliezen zijn voorzien wordt in praktijk aangenomen dat de trend dezelfde zal zijn als de trend uit de jaren voorafgaande aan de suppletie. De TKL wordt dan bepaald uit de MKL van het jaar na de suppletie en de trend uit de jaren voorafgaande aan de suppletie, zie Figuur 4-5. Is de suppletie twee tot vier jaar geleden uitgevoerd, dan wordt de trend berekend uit de metingen na de suppletie en de trend van voor de suppletie, zie Figuur 4-6. De TKL wordt berekend op basis van de trend na suppleren waarbij niet altijd van een lineaire trend wordt uitgegaan.

4.6 Kustgedrag

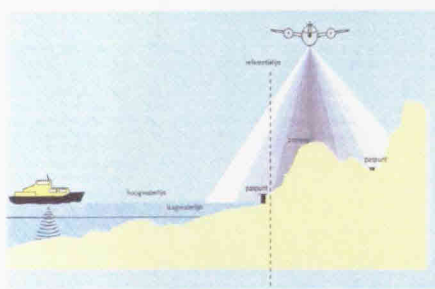
4.6.1 Kustmetingen

(RIKZ, 1999a) Om inzicht in het kustgedrag te vergroten worden eenmaal per jaar na het stormseizoen langs de gehele Nederlandse kustmetingen uitgevoerd. Deze metingen worden uitgevoerd langs lijnen die loodrecht op de kust staan (raaien). Elke raai is gemarkeerd door een strandpaal die met onderlinge afstand van ongeveer 250m langs de gehele Noordzeekust op het strand staan. Sinds 1963 wordt jaarlijks langs iedere raai het kustprofiel opgemeten¹, namelijk de hoogte-diepteligging wordt bepaald tot circa 800m zeewaarts van de strandpalen en tot circa 200m landwaarts van de eerste duinrij. De resultaten van deze jaarlijkse kustmetingen worden opgeslagen in het Digitale opslagsysteem voor de natte Rijkswaterstaat, DONAR.

Deze profielmetingen kunnen vervolgens worden gebruikt om:

- Duinafslagberekeningen voor dwarsprofielen uit te voeren met behulp van het model Super-Dune. Om duinafslag te berekenen dient naast de hydraulische randvoorwaarden, zoals stormvloedpeil, significante golfhoogte en korrel diameter, het beginprofiel bekend te zijn.
- Ontwikkelingen van de kustlijnligging te berekenen om de mate van doorgaande structurele erosie te bepalen. Dit is van belang in het kader van huidige beleid ten aanzien van structurele erosiebestrijding ten opzichte van de BKL.

(RIKZ, 1996) Met de meetresultaten uit DONAR is het mogelijk de fluctuaties van de kustlijn (i.e. zandverlies van kustsystemen, steilheid van het strandprofiel en breedte



Figuur 4-7: Hoogte- en dieptemetingen langs de Nederlandse kust.

¹ De jaarlijkse kustmetingen bestaan uit metingen op het natte en droge deel van het profiel. Het 'natte' deel wordt door de meetdiensten van RWS of door waterschappen uitgevoerd met behulp van een automatisch lodingsysteem in combinatie met een geautomatiseerd plaatsbepalingssysteem. De metingen van het 'droge' deel wordt door RWS verricht door middel van stereofotogrammetrie of Laser altimetrie.

van de duinen) over grotere tijdsperioden te analyseren en krijgt men inzicht in de ontwikkeling van de kust. Effecten van natuurlijke processen en menselijk ingrijpen op veiligheid en ontwikkelingen van de kustlijn worden daardoor inzichtelijker en beter voorspelbaar. Op basis van deze informatie kan men doelgerichter maatregelen nemen om de veiligheid te handhaven en kustachteruitgang tegen te gaan. Vervolgens kunnen deze maatregelen weer geëvalueerd worden met behulp van kustmetingen.

4.6.2 Kustmodellen

Ook kustmodellen kunnen bijdragen tot het vergroten van de inzicht in het kustgedrag. De meetgegevens dragen bij aan de verfijning van zulke modellen en kunnen tevens als ijkmateriaal dienen.

Om de ontwikkelingen van de kustlijn langs de kust te modelleren is een kustlijnmodel, zoals UNIBEST, geschikt. De ontwikkelingen in langsrichting van de kust met aanzandings- en erosiepatronen kunnen worden gesimuleerd.

(TAW, 1995b) Om duinafslag in een dwarsprofiel loodrecht op de kust te analyseren kan gebruik worden gemaakt van modellen, zoals Super-Dune of DUROSTA. Met Super-Dune kunnen afslagprofielen worden berekend voor onverdedigde duinprofielen onder het maximale stormvloedpeil en bijbehorende significante golfhoogte. Daarnaast is het mogelijk om zandverliezen te berekenen die het gevolg zijn van een langstransportgradiënt ten gevolge van een getijgradiënt of kustkromming. DUROSTA is een tijdsafhankelijk dwarstransportmodel voor stormvloedcondities. Met dit model kunnen profielontwikkelingen en afslaghoeveelheden worden berekend voor zowel vaste als variërende hydraulische omstandigheden. Het voordeel van dit laatste model boven Super-Dune is dat de modellering beter aansluit bij de werkelijk optredende processen.

De veiligheidsbeoordeling wordt uitgevoerd volgens de TAW-leidraad 'Duinafslag'. De toetsingsmethode in deze leidraad komt overeen met de berekeningswijze die Super-Dune hanteert. In dit onderzoek wordt voor de berekening van duinafslag daarom gebruik gemaakt van Super-Dune.

Hoofdstuk 5 Hydraulisch-morfologisch model

Inhoudsopgave

5.1 Inleiding	61
5.1.1 Trends in kustgedrag	61
5.1.2 Klimaatsveranderingen: Zeespiegelstijging, intensivering van stormen	61
5.2 Kustgedrag: Structurele erosie	63
5.2.1 Structurele erosie	63
5.2.2 Lineaire regressieanalyse	63
5.2.3 Zandvolume berekeningsmethoden	65
5.2.4 Kanttekeningen bij 'lineair verloop' kustgedrag	66
5.2.5 Van volumeveranderingen naar oppervlakteveranderingen per strekkende meter	67
5.3 Berekeningen structurele erosie	68
5.3.1 Huidige structurele erosie	68
5.3.2 Structurele erosie in de toekomst: Invloed klimaatsveranderingen	69
5.3.3 Conclusie berekeningen structurele erosie	71
5.4 Kustgedrag: Incidentele erosie	72
5.4.1 Duinafslag en karakteristieke maat teruggang duinfront	72
5.4.2 Leidraad Duinafslag	73
5.4.3 Super-Dune	74
5.4.4 Rekencombinaties voor afslagberekeningen	75
5.4.5 Uitgangspunt bij afslagberekening: dynamisch evenwicht	76
5.5 Invoergegevens voor Super-Dune berekeningen	76
5.5.1 Standaardprofiel	76
5.5.2 Stormvloedpeil en significante golfhoogte	77
5.5.3 Korreldiameter duinzand	79
5.6 Berekeningen incidentele erosie	79
5.6.1 Verband waterstand en incidentele erosie in de huidige situatie	79
5.6.2 Kansdichtheidsverdeling teruggang duinfront in de huidige situatie	80
5.6.3 Incidentele erosie in de toekomst: Invloed klimaatsveranderingen	84
5.6.4 Monte Carlo simulatie: Kansdichtheidsverdeling teruggang duinfront in de toekomst	86
5.6.5 Conclusie berekeningen incidentele erosie	87

5 Hydraulisch-morfologisch model

5.1 Inleiding

5.1.1 Trends in kustgedrag

(TAW, 1995b) Morfologische ontwikkelingen aan de kust vertonen vaak een grillig karakter. De ontwikkelingen kunnen het gevolg zijn van zowel natuurlijke processen als menselijke ingrepen. Er kan onderscheid worden gemaakt naar verschillende tijds- en ruimteschalen waarin natuurlijke processen optreden of menselijke ingrepen plaatsvinden. De volgende tijdschalen zijn belangrijk:

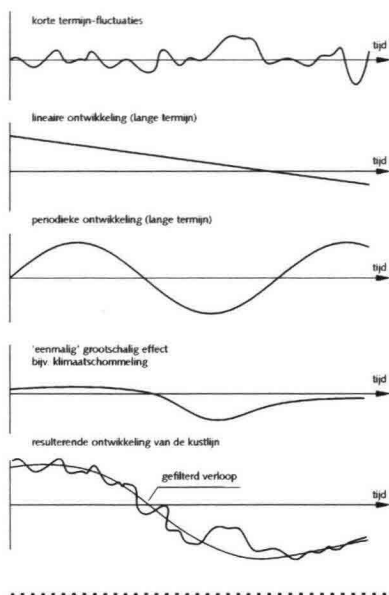
- Lange termijn (eeuwen): Voor kustontwikkelingen op lange termijn zijn met name de volgende veranderingen van belang: veranderingen van het gemiddelde zeeniveau, veranderingen in de getijamplitude, klimaatsveranderingen en beschikbaarheid van sediment.
- Middellange termijn (10-100 jaar): Voor ontwikkelingen op middellange termijn zijn van belang: kleine, soms tijdelijke klimaatsveranderingen, morfologische veranderingen van buitendelta's of van getijdebekken, vorming of afbraak van banken en platen, zandgolven, aanleg van havendammen, migratie van geulen, banken en platen, harde kustmaatregelen.
- Korte termijn (10 jaar): verplaatsing van brandingsruggen en banken, dynamische evenwichten, zandsuppletie, kleine hydraulische en meteorologische veranderingen.

Het analyseren van de ontwikkeling van de kustlijn kan inzicht geven in de effecten van deze processen en ingrepen. Om dat inzicht te verkrijgen dient het effect van de verschillende processen en ingrepen op de ontwikkeling van de kustlijn afzonderlijk te worden onderscheiden. Het is echter onmogelijk om dit onderscheid uit de beschikbare gegevens af te leiden. De ontwikkeling van de kustlijn over een zekere periode kan worden gezien als een superpositie van de gevolgen van (deels onafhankelijke) ontwikkelingen, zie Figuur 5-1. Kortom, het kustgedrag wordt beïnvloed door verschillende periodieke en niet-periodieke bewegingen, die een natuurlijke oorzaak hebben of het gevolg zijn van menselijke ingrepen in het kustgebied.

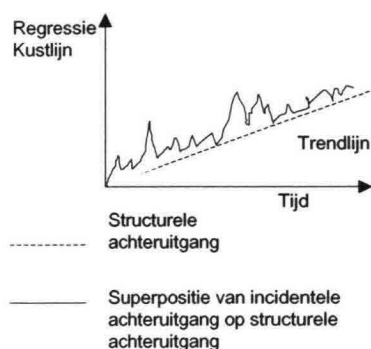
In dit onderzoek wordt rekening gehouden met twee soorten kustontwikkeling: de trend van kustgedrag door structurele erosie en de jaarlijkse incidentele duinafslag. Voor beide wordt in dit hoofdstuk een verdeling met bijbehorende verwachte trend of verwachtingswaarde en standaardafwijking bepaald. Superpositie van structurele en incidentele erosie geeft een maat voor de kustontwikkeling in de tijd, zie Figuur 5-2. Structurele aanzanding vormt in dit onderzoek geen probleem.

5.1.2 Klimaatsveranderingen: Zeespiegelstijging, intensivering van stormen

Naast het analyseren van het huidige kustgedrag worden voorspellingen gedaan over het toekomstige kustgedrag. Om uitspraak te kunnen doen over hoe de kust zich in de toekomst gedraagt en om te beoordelen of de twee beheersopties relevante en geschikte opties zijn voor het toekomstige kustbeheer is een indicatie van het toekomstige kustgedrag wenselijk. De klemtoon ligt dus niet zozeer op het correct voorspellen van het kustgedrag in de toekomst, maar ligt op het geven van een schatting om vervolgens een zinnige uitspraak te doen over de beheersopties.



Figuur 5-1: Trends in kustgedrag.



Figuur 5-2: Superpositie structurele en incidentele erosie.

Om een indicatie te geven over toekomstig kustgedrag moeten eventuele klimaatsveranderingen in acht worden genomen. Deze kunnen van invloed zijn op de structurele- en incidentele erosie.

(WWK, 1999) Mogelijke klimaatsveranderingen door het broeikaseffect kunnen een bedreiging vormen voor het laaggelegen Nederland. Als gevolg van klimaatsveranderingen is het mogelijk dat de zeespiegel in de nabije toekomst sneller stijgt dan voorheen. De exacte omvang van de stijging is echter onzeker. Door de zeespiegelstijging kunnen ook de dagelijkse vloedwaterstanden steeds hoger worden. Tevens wordt verwacht dat het aantal stormen en de kracht van de stormen toeneemt.

(de Ronde, 1999) In Genève is het Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, in het leven geroepen om onderzoek uit te voeren naar de oorzaken en gevolgen van de klimaatsveranderingen. Door klimaatsveranderingen is het mogelijk dat er een versnelde zeespiegelstijging optreedt. Er kan onderscheid worden gemaakt in absolute zeespiegelstijging en relatieve zeespiegelstijging. Absolute zeespiegelstijging is de stijging die de zee zelf ondervindt. Gedeeltelijk kan de absolute zeespiegelstijging van de afgelopen eeuw worden verklaard door thermische expansie van oceaanwater en veranderingen in de massa's landijs. Een groot deel van de stijging blijft nog onverklaarbaar. Problemen worden met name verwacht doordat de relatieve zeespiegel stijgt. Met een relatieve zeespiegelstijging wordt de stijging ten opzichte van de hoogte van het land bedoeld. Hierbij wordt rekening gehouden met de verandering in hoogte van het land ten gevolge van onder andere isostatische rebound (terugveren van het land na de ijstijd) en compactie (inklinken onder invloed van natuurlijke processen of ten gevolge van menselijke ingrepen, zoals gaswinning).

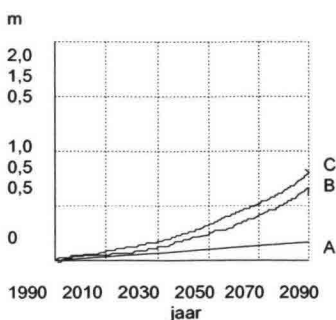
(de Ronde, 1999) De relatieve zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust bedroeg over de laatste honderd jaar zo'n 20cm. In het recente verleden is nog geen significante versnelling van de relatieve zeespiegelstijging geconstateerd. Ook in extreme wind- en golfgegevens langs de Nederlandse kust zijn geen veranderingen waargenomen. Wel wordt voor de komende eeuwen een versnelde relatieve zeespiegelstijging verwacht.

(de Ronde, 1999) Om de relatieve zeespiegelstijging in de toekomst te voorspellen is de historische trend geëxtrapoleerd naar een trend in de toekomst. Bij deze extrapolatie is rekening gehouden met het onverklaarbare deel van de historische trend. De beste schatting komt neer op een stijging van 45cm voor 2100. Er moet ook rekening worden gehouden met lokale veranderingen in de zeespiegel die door dynamische effecten op de oceaanscirculaties sterk kunnen verschillen van het mondiaal gemiddelde. Gezien de grote onzekerheden rond de regionale zeespiegelvariatie handhaaft Rijkswaterstaat 60cm als verwachte relatieve zeespiegelstijging in de komende eeuw.

(TAW, 1995b) De drie belangrijkste scenario's die op dit moment gelden voor relatieve zeespiegelstijging zijn:

- Scenario A: het beleidsscenario dat op basis van de extrapolatie van historische waterstanden is ontwikkeld. Dit scenario betreft de continuering van de huidige trend, een zeespiegelstijging van 20cm over de komende 100 jaar.
- Scenario B: het anticiperend scenario dat gebaseerd is op de best mogelijke schatting van dit moment, een zeespiegelstijging van 60cm over de komende 100 jaar:
- Scenario C: het ongunstig scenario met 85cm zeespiegelstijging; 10% toename van stormen en 10% toename van piekafvoeren van de rivieren. Bij dit scenario is de verwachtingswaarde van de zeespiegelstijging van het anticiperend scenario vermeerderd met eenmaal de standaardafwijking.

De morfologische gevolgen van klimaatsveranderingen zijn onder te verdelen in primaire en secundaire effecten. Het primaire effect betreft de directe effecten ten gevolge van een zeespiegelstijging volgens één van de scenario's hier. Een



Figuur 5-3: Zeespiegelstijging scenario's

(versnelde) zeespiegelstijging heeft bovendien invloed op de hydrodynamica. Dit betreft onder andere vergroting van de getijslag en hogere golven. Deze veranderingen kunnen vervolgens het morfologisch gedrag weer beïnvloeden. Dit wordt het secundaire effect genoemd. Het secundaire effect is kleiner dan het primaire effect. Beide effecten zijn structurele effecten.

Naast structurele effecten zal ook de incidentele erosie veranderen als gevolg van de intensivering van stormen (stormfrequentie en stormconditie). (*de Ronde, 1999*) Op grond van historische gegevens kan op dit moment weinig worden gezegd over het gedrag van stormen, golven en stormvloedwaterstanden. Dat het stormklimaat door veranderingen in het klimaat zal veranderen, staat vast, maar op welke wijze is op dit moment nog niet aan te geven. In TAW (1995b) staan voor de verschillende scenario's van zeespiegelstijging richtwaarden voor de veranderingen in het ontwerppeil, de significante golfhoogte en de golfperiode gegeven.

(*de Ronde, 1999*) De TAW adviseert om ter bepaling van de te reserveren ruimte voor de zandige kust uit te gaan van een pessimistische situatie. Voor de berekening van structurele- en incidentele erosie in de toekomst wordt in dit model daarom ook uitgegaan van het ongunstige scenario C.

5.2 Kustgedrag: Structurele erosie

5.2.1 Structurele erosie

Onder structurele erosie wordt een geleidelijke achteruitgang van de kust verstaan. Door het uitvoeren van een trendanalyse kan met behulp van de jaarlijkse kustmetingen de mate van structurele erosie over een bepaalde periode per kustgebied worden berekend.

Voor een voorspelling van de kustontwikkeling gebaseerd op de jaarlijkse kustmetingen wordt een eenvoudige extrapolatie-techniek toegepast. Daarbij wordt ervan uitgegaan dat dezelfde structuur in de tijdreeks ook in de toekomst aanwezig zal zijn. Deze structuur wordt van te voren opgelegd. Het eenvoudigste extrapolatiemodel is een lineair trendmodel. Deze is toegepast voor de bepaling van de structurele erosie langs de Hollandse kust.

De periode waarover de trend van structurele erosie wordt berekend is grotendeels afhankelijk van het doel van de trendberekeningen. In het huidige beleid wordt zoals beschreven in sectie 4.5.4 de TKL getoetst aan de BKL-norm door elk jaar de 10-jarige lineaire trend van de MKL te berekenen en de positie van de TKL te berekenen. Op grond van de 10-jarige trend en de positie van de TKL wordt besloten of in het betreffende jaar maatregelen in de vorm van zandsuppletie moeten worden genomen.

De vraag is of deze 10-jarige lineaire trend mag worden gebruikt en representatief is voor het structurele kustgedrag dat in het hydraulisch-morfologisch deelmodel moet worden beschreven. De 10-jarige trend wordt gebruikt om een indicatie te krijgen hoe de kust zich op korte termijn ontwikkelt. Het doel van dit onderzoek is te komen tot een optimale onderhoudsfrequentie. Daarvoor moet het kustgedrag op middellange termijn worden bekeken. Er is daarom gekozen het kustgedrag met een lineaire trendlijn over een grotere periode, namelijk een periode van 30 jaar waarover jaarlijkse meetgegevens beschikbaar zijn, te beschrijven. In bijlage 5.1 zijn de verschillen tussen een 10-jarige en 30-jarige trend uitgewerkt.

5.2.2 Lineaire regressieanalyse

Stam (1999) heeft berekeningen uitgevoerd om de lineaire trend en de afwijking op deze trend van zandvolumeveranderingen over een periode van 30 jaar in de kustnabije zone van de Hollandse kust te bepalen. De resultaten van Stam (1999) zijn als basis gebruikt voor de beschrijving van structurele erosie in het hydraulisch-morfologische deelmodel.

Voor deze trendberekeningen heeft Stam (1999) de Hollandse kust ingedeeld in 16 morfologische kusteenheden. Deze morfologische kusteenheden, variërend in lengte van 3 tot 16 km, vertonen hetzelfde morfologische gedrag. De figuren in bijlage 5.2 laten zien hoe deze kusteenheden samenvallen met de kustgebiedsindeling die in sectie 4.2.5 is gekozen.

(Bolle et al, 1983) De trendberekeningen kunnen met een lineair regressiemodel worden beschreven. Bij verschillende waarden van een niet-stochastische grootheid t zijn waarnemingen gedaan aan een grootheid y die stochastisch is. In dit geval is t het tijdstip t waarop een bepaald zandvolume y in een aan te geven kusteenheid is waargenomen. Stam (1999) heeft een enkelvoudige lineaire regressie uitgevoerd om de trend van zandvolumeveranderingen te bepalen. Met behulp van de verticale kuberingsmethode (zie Figuur 5-5) zijn uit de jaarlijkse kustmetingen voor 30 jaar zandvolumes bepaald voor de morfologische kusteenheden langs de Hollandse kust. Op grond van deze $n = 30$ jaarlijkse metingen per kusteenheid is de regressieanalyse uitgevoerd.

Voor de wijze waarop de regressie is uitgevoerd, wordt verwezen naar bijlage 5.3. Stam (1999) beschrijft de volumeveranderingen per kusteenheid in de tijd als volgt:

$$y(t_i) = a + b \cdot t_i \quad : 5-1$$

met:

- $y(t_i)$: stochastische variabele van het zandvolume dat in jaar t in de kusteenheid aanwezig is [m^3];
 a : stochastische variabele van het zandvolume dat op het begintijdstip t_0 in de kusteenheid aanwezig is [m^3];
 b : stochastische variabele van de lineaire trend van de ontwikkeling van het zandvolume [$m^3/m^1/jr$];
 t_i : tijdstip van waarneming i met $i=1$ tot n [jr];

De spreiding rond de lineaire regressielijn geeft de afwijking van het lineaire gedrag weer (zie Figuur 5-4). Deze afwijking is in de stochastische variabelen b en a opgenomen.

(Stam, 1999) De trend is de helling van de rechte lijn (b) die de beste 'fit' is van de zandvolumes in de tijd. De nauwkeurigheid van de trend kan bepaald worden door een foutschatting, de afwijking. Deze wordt verkregen uit de standaarddeviatie van de helling, die bepaald wordt door de fout in de berekende zandvolumes.

De stochastische variabelen a en b zijn normaal verdeeld:

$$b \equiv N\left\{\beta, \frac{\sigma^2}{KS_t}\right\} \quad : 5-2 \quad a \equiv N\left\{\alpha, \left(\frac{1}{n} + \frac{\bar{t}^2}{KS_t}\right) \sigma^2\right\} \quad : 5-3$$

$$\text{met } KS_t = \sum (t_i - \bar{t})^2 = \sum t_i^2 - \frac{1}{n} \cdot (\sum t_i)^2 \quad : 5-4$$

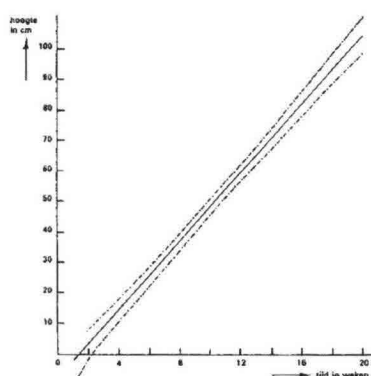
Voor de schatter van variantie σ^2 wordt

$$s^2 = \frac{1}{n-2} \cdot \sum (y_i - a - b \cdot t_i)^2 \quad : 5-5$$

genomen. Dit is een zuivere schatter.

De aannamen die ten grondslag liggen aan dit regressiemodel zijn de volgende :

- er wordt aangenomen dat het zandvolume in het kustprofiel een lineaire trend vertoont in de tijd.
- er wordt aangenomen dat de tijdstippen waarop diepte- en hoogtemetingen van de jaarlijkse kustmetingen zijn uitgevoerd aan elkaar gelijk zijn en dat het tijdsinterval tussen twee opeenvolgende meetjaren uniform is en gelijk aan één jaar.



Figuur 5-4: De verdeling van $y(t_i)$ bij gegeven waarden t_i .

De significantie van de trend kan door middel van statistische toetsen getest worden en is onder andere afhankelijk van de nauwkeurigheid van de gegevens en het aantal meetgegevens. Een significante trend geeft een goede benadering van het volumeverloop in de tijd. Als een trend uit te weinig punten wordt bepaald of de nauwkeurigheid van deze punten is te klein dan is de trend statistisch niet significant. Van een kusteenheid die geen significante trend heeft, kan niet met zekerheid worden gezegd of er erosie dan wel aanzanding optreedt. Om te bepalen of de berekende trend significant is wordt een statistische toets uitgevoerd. Voor deze toets wordt verwezen naar bijlage 5.3.

5.2.3 Zandvolume berekeningsmethoden

Veranderingen aan de kust worden veroorzaakt door gradiënten in het zandtransport langs de kust. Deze komen tot uitdrukking in volumeveranderingen. In het lineaire trendmodel is het kustgedrag daarom geparametriseerd door het zandvolume. De volumeberekeningen zijn uitgevoerd alvorens de trendberekeningen te maken.

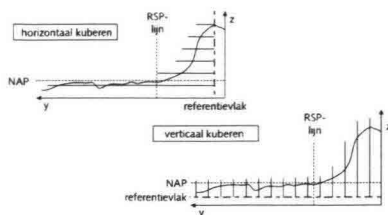
Om het zandvolume per kusteenheid te bepalen moet een begrenzing aan het profiel worden opgelegd. Dit kan zowel een horizontale begrenzing als een verticale begrenzing zijn.

Bij horizontaal kubereren wordt het zandvolume tussen twee horizontale grenzen berekend. Deze kuberingsmethode wordt in het huidige beleid toegepast bij de bepaling van de MKL, zie sectie 4.5.3. Aan de landzijde wordt daarbij een hoogtelijn, de duinvoetlijn als grens aangenomen. De zeewaartse begrenzing wordt gevormd door een dieptelijn, de gemiddelde laagwaterlijn. Het zandvolume wordt vervolgens bepaald door tussen de betreffende diepte- en hoogtelijn horizontaal te kubereren. Door het zandvolume van de individuele raaien te sommeren kan vervolgens het zandvolume in verschillende kustgebieden worden berekend.

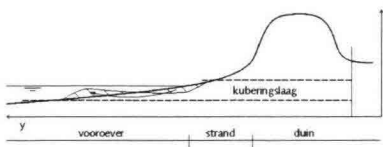
(TAW, 1995b) Door horizontaal kubereren kan de ontwikkeling van bepaalde lagen in de tijd worden onderzocht. Een nadeel van horizontaal kubereren is dat het zwaartepunt van het volume zand in een laag direct ten opzichte van de RSP niet bekend is. Zo kan het zand direct aan het strand zitten of verderop in bijvoorbeeld een bank. Er kan niet worden nagegaan of het zand zich in een laag verplaatst, zie Figuur 5-6. Bij verticaal kubereren kan gemakkelijk inzicht worden verkregen in de ontwikkeling in de tijd van verschillende lagen. Voor de trendberekeningen in dit onderzoek is gebruik gemaakt van een verticale kuberingsmethode.

(Stam, 1999) In het geval van verticaal kubereren wordt een verticale kuberingsstrook langs de kust vastgesteld (zie Figuur 5-7). Voor deze strook wordt in elke raai gezocht naar een zo breed mogelijke strook waarbinnen het profiel in zoveel mogelijk jaren gemeten is. De verticale grenzen van de kuberingsstrook en het referentieniveau liggen vast in de tijd. De breedte van de strook en het dieptebereik kunnen per kustlocatie variëren. Bij verticaal kubereren wordt de inhoud van afzonderlijke kolommen gesommeerd. De toegepaste verticale kuberingsmethode staat beschreven in bijlage 5.4.

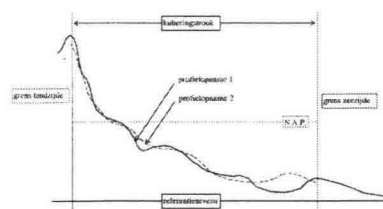
Met behulp van de lineaire trendanalyse kan met de volumeberekeningen over een bepaalde periode de volumeverandering over die periode per morfologische kusteenheid worden vastgesteld. Voordat de trendanalyse wordt uitgevoerd moet een correctie worden toegepast voor de zandsuppleties die in de periode waarover de trend berekend wordt zijn uitgevoerd. In deze analyse gaat de interesse uit naar de autonome ontwikkeling van de kust. Om die reden moet de invloed van suppleties uit de trendberekeningen worden gefilterd. De hoeveelheid zand in het kustgebied dat in een bepaald jaar is gesuppleerd moet van de volumeberekeningen in de navolgende jaren worden afgetrokken¹. Na de correctie voor zandsuppleties kan de



Figuur 5-5: Horizontale en verticale kuberingsmethode.



Figuur 5-6: Verplaatsen van zand binnen een horizontale laag worden bij het horizontaal kubereren niet opgemerkt.



Figuur 5-7: Kuberingstrook van een raai tussen de verticale grenzen.

¹ Uitgangspunt hierbij is dat het gesuppleerde zand binnen grenzen van de kubering blijft en er geen uitwisseling van suppletiezand met de naastliggende kustgebieden optreedt². Hoe kleiner de gebieden hoe minder dit uitgangspunt opgaat.

ontwikkelingstrend van het zandvolume worden bepaald. Een positieve trend resulteert in zandwinst en een negatieve trend wijst op zandverlies.

5.2.4 Kanttekeningen bij 'lineair verloop' kustgedrag

Naast een lineair verloop van het kustgedrag in de tijd is er sprake van niet-lineaire invloeden, als gevolg van zandgolven, zich verplaatsende brandingsruggen en menselijke ingrepen, zoals de aanleg van havenhoofden, zandsuppleties en dergelijke. Dit vermindert de betrouwbaarheid van de lineaire trends. Dit is met name het geval bij periodieke invloeden met een periode langer dan tweemaal de lengte van de berekende tijdreeks, zie sectie 5.1.1 en Figuur 5-1.

(Bouwmeester, 1995) Beperkingen of tekortkomingen van de jaarlijkse kustmetingen kunnen ook verstoringen in het lineaire gedrag veroorzaken. Deze beperkingen zijn:

- De representativiteit van de jaarlijkse kustmetingen. Sommige delen van de Hollandse kust worden gekenmerkt door een relatief grote dynamiek. Door sterke variatie in de profielen kan bij een statistische analyse van kustprofielen worden afgevraagd hoe representatief de eenmalige jaarlijkse kustmetingen zijn voor een jaargemiddelde toestand van het profiel. Voor kustdelen met een hoog dynamisch karakter kan een jaarlijkse momentopname een vertekend beeld geven voor het representatieve kustgedrag.
- De variatie van het tijdsinterval tussen twee meetmomenten. Het tijdsinterval van kustmetingen tussen twee opeenvolgende jaren kan theoretisch variëren van een half tot anderhalf jaar. In werkelijkheid varieert het tijdsinterval sterk, zie bijlage 5.5. In de regressieberekeningen is echter uitgegaan van een uniform tijdsinterval van één jaar. Aangezien de data waarop de kustmetingen zijn uitgevoerd eenduidig zijn vastgelegd in het JARKUS-bestand had in principe gecorrigeerd kunnen worden voor de niet uniforme tijdsintervallen. Deze vereenvoudiging had niet hoeven worden gemaakt.
- De lengte van de meetreeks voor de kustprofielen bedraagt maximaal 30 jaar.
- Een van de beperkingen van de jaarlijkse kustmetingen voor de gegevensanalyse is dat de bereikte diepte per gemeten kustprofiel verschilt. Dit komt doordat de metingen zijn uitgevoerd tussen twee verticale grenzen die op een vaste afstand uit de RSP-lijn liggen. De ene keer is het dieptebereik bij de zeewaartse grens dieper dan de andere keer. Voor een systematische analyse van de kustprofielen is het van belang dat de profielen dezelfde informatie bevatten. In Bouwmeester (1995) is nagegaan welk percentage van de gemeten profielen het niveau van respectievelijk NAP -4m, NAP -5m, NAP -6m en NAP -7m bereiken. Dit is uitgezet in Tabel 5-1:

Kustgebiedsindeling	NAP-4m	NAP-5m	NAP-6m	NAP -7m
N-Holland: Kustgebied I; Kustgebied II, Kustgebied III	100%	100%	97%	83%
Rijnland: Kustgebied IV	87%	77%	21 %	9%
Delfland: Kustgebied V	99%	99%	97%	77%
Totale kust	91 %	84 %	69%	54%

Tabel 5-1: Het percentage van de gemeten profielen dat het niveau van respectievelijk NAP -4m, NAP -5m, NAP -6m en NAP -7m bereikt.

² Het suppletiegebied komt in het algemeen niet overeen met de gebiedsindeling van de Nederlandse kust. In een suppletiegebied kunnen meerdere kustdelen vallen. Vanuit de suppletiegegevens is nagegaan in welke kustdelen een zandsuppletie is uitgevoerd. De zandhoeveelheid is dan evenredig verdeeld over de lengte van het suppletiegebied en vervolgens is de hoeveelheid zandsuppletie per kusteenheid berekend.

5.2.5 Van volumeveranderingen naar oppervlakteveranderingen per strekkende meter

In dit onderzoek wordt niet de volumeverandering als representatieve maat genomen voor het kustgedrag, maar is de kustachteruitgang in meters per strekkende meter kust de beslissparameter. De keuze van kustachteruitgang in meters komt voort uit het feit dat de waardeverdelingsfunctie van maatschappelijke activiteiten voor de dwarsprofielen ook in meters per strekkende meter zijn weergegeven. Het is nodig de berekende volumeveranderingen van Stam (1999) om te rekenen naar oppervlakteveranderingen per strekkende meter kust.

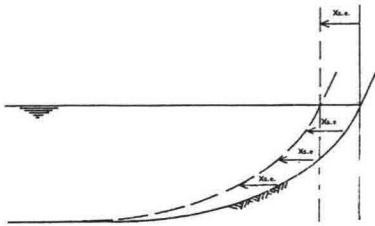
Deze omrekening bestaat uit twee stappen. Aangezien de samengestelde kusteenheden langs de kust niet even groot zijn, kunnen de berekende volumetrends nog niet met elkaar worden vergeleken. De eerste omrekeningsstap bestaat uit het delen van de berekende trends door de vaklengte van de betreffende kusteenheden. Op deze manier kunnen voor de verschillende kustgebieden vergelijkbare uitkomsten worden verkregen.

De tweede stap betreft de omrekening van volumeveranderingen per strekkende meter naar oppervlakteveranderingen per strekkende meter. Voor deze omrekenstap wordt de single-line theorie toegepast. Bij deze theorie wordt de kustlijn als één lijn gezien en wordt er vanuit gegaan dat bij morfologische veranderingen ten gevolge van structurele aanzanding of erosie de bodem van het kustprofiel zich over zijn gehele hoogte horizontaal over afstand x_s naar achteren of naar voren verplaatst (zie Figuur 5-8 en Figuur 5-9). Er wordt aangenomen dat dwarstransport voor een 'oneindig' snelle herverdeling van het zand over het dwarsprofiel zorgt, zodat de vorm van het kustprofiel niet verandert. De erosie en aanzanding vindt plaats tussen het punt waar de morfologische activiteit ophoudt of waar de bodem horizontaal gaat lopen en de bovenzijde van het profiel. Volgens de single-line theorie is de verplaatsing van elke diepte- en hoogtelijn gelijk, waardoor de verplaatste hoeveelheid zand gelijkmatig over de hoogte is verdeeld. De totale verplaatste hoeveelheid zand wordt dan gelijk gesteld aan de horizontale verplaatsing x_s maal de profielhoogte h . De gezochte conversiefactor tussen de volumeveranderingen per strekkende meter en de oppervlakteverandering per strekkende meter is dan gelijk aan de profielhoogte.

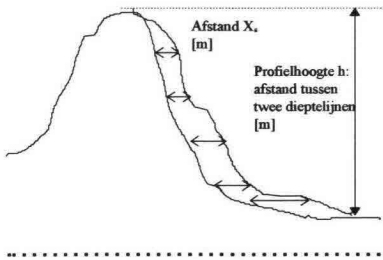
In de praktijk blijkt dit niet meer dan een grove schematisering te zijn. De verplaatste hoeveelheid zand is vaak niet constant over de diepte, profielen veranderen van vorm of worden pas op diep water horizontaal. De structurele erosie zal zich concentreren in een bepaald deel van het dwarsprofiel en zal daar groter zijn dan in andere delen. Daarom wordt verwacht dat de werkelijke conversiefactor kleiner zal zijn dan de profielhoogte. Uit onderzoek van van den Bunt (1990) blijkt dat de werkelijke conversiefactor inderdaad afwijkt van de profielhoogte. Uit de figuur in bijlage 5.6 is af te lezen dat deze tussen 0,1 en 0,9 maal de profielhoogte ligt. De gemiddelde conversiefactor is 0,4 maal de profielhoogte. Op grond van de resultaten van van den Bunt (1990) kan geen uitspraak worden gedaan over een geldige conversiefactor voor de Nederlandse kust. Wel kan worden vastgesteld dat deze conversiefactor kleiner is dan de profielhoogte. In dit onderzoek wordt gerekend met een constante conversiefactor die gelijk is aan de gemiddelde conversiefactor uit van den Bunt (1990):

$$\text{conversiefactor} = 0,4 \cdot \text{profielhoogte} \quad : 5-6$$

De single-line theorie is geschikt voor de omrekening van zandvolumeveranderingen waarbij de volumeberekeningen zijn uitgevoerd met de horizontale kuberingsmethode. In dat geval kan voor de profielhoogte de afstand tussen de twee horizontale begrenzingen worden aangehouden. In het onderzoek van Stam (1999) is echter de verticale kuberingsmethode toegepast. Als wordt aangenomen dat voor beide methoden de berekeningen zijn uitgevoerd in het actieve gedeelte van het kustprofiel en dat de resultaten van de volumeberekeningen niet significant



Figuur 5-8: Single-line theorie.



Figuur 5-9: Omrekening naar vooruitgang van de kustlijn in meters.

verschillen, dan kan de principebenadering ook worden toegepast op berekeningen op basis van de verticale kuberingsmethode. Voor verticaal kubereren is het echter wel moeilijker een representatieve profielhoogte aan te geven. Doordat er tussen verticale grenzen wordt gekubeerd varieert de profielhoogte per raai. De diepten die per kustgebied tijdens de metingen worden bereikt, komen overeen met de percentages in Tabel 5-1. Voor de duinhoogte wordt de gemiddelde duinhoogte per kustgebied uit Tabel 4.1 genomen. De profielhoogte komt dan overeen met het verschil tussen de gemiddelde duinhoogte en de gemiddeld bereikte dieptelijn, zie Tabel 5-2.

De berekening van kustachteruitgang in meters lijkt op deze manier via een omweg plaats te vinden. Het zou logischer zijn wanneer de kustverandering direct uit de jaarlijkse meetgegevens in meter zou worden berekend. Echter met de jaarlijkse meetgegevens kan alleen een achteruitgang in meters per raai worden gegeven terwijl we in de achteruitgang in een bepaalde morfologische eenheid geïnteresseerd zijn. Bovendien heeft Stam (1999) de volumeberekeningen, de correctie hierop voor zandsuppleties en een statistische analyse reeds uitgevoerd. De eenvoudige omrekening krijgt daarom in dit onderzoek de voorkeur.

Kustgebiedsindeling	Grensdiepte [m]	Duinhoogte [m]	Profielhoogte [m]
Kustgebied I	NAP -7m	NAP +13,2m	20,2m
Kustgebied II	NAP -7m	NAP +14,6m	21,6m
Kustgebied III	NAP -7m	NAP +16,6	23,6m
Kustgebied IV	NAP -5m	NAP +17,7m	22,7m
Kustgebied V	NAP -7m	NAP +12,3m	19,3m

Tabel 5-2: Grensdiepten, duinhoogten en profielhoogten.

5.3 Berekeningen structurele erosie

5.3.1 Huidige structurele erosie

In Tabel 5-3 zijn de resultaten van de trendberekeningen van Stam (1999), de stochastische variabele b met een gemiddelde lineaire trend β en een standaardafwijking σ_b , per kusteenheid weergegeven. Door middel van een regressietoets is in Stam (1999) aangetoond dat de berekende trends voor alle kusteenheden significant zijn.

De trends van Stam (1999) zijn om vergelijkbare waarden te krijgen eerst naar trends in $m^3/m'/jr$ omgerekend. Vervolgens is de structurele kustachteruitgang in $m^2/m/jr$ ($\sim m/jr$) berekend door de trends in $m^3/m'/jr$ te delen door de profielhoogten uit Tabel 5-2.

Kustgebieds- indeling	Morfologische kusteenheid	Lengte kusteenheid [m]	Profiel- hoogte [m]	Trend [m ³ /jr]	σ _s [m ³ /jr]	Trend σ _s [m/jr]	σ _s [m/jr]	Afwijking ¹ [%]
Kustgebied I	Den Helder	7.200	20,2	-3,0 · 10 ⁵	1,9 · 10 ⁴	-5,1	0,32	6
Kustgebied II	Callantsoog	8.150	21,6	-3,1 · 10 ⁴	2,9 · 10 ⁴	-0,4	0,40	92
Kustgebied III	Petten	11.750	23,6	-1,5 · 10 ⁵	2,8 · 10 ⁴	-1,4	0,25	18
Kustgebied III	Bergen a. Zee	11.000	23,6	-1,4 · 10 ⁵	3,2 · 10 ⁴	-1,4	0,31	23
Kustgebied III	Egmond a. Zee	8.000	23,6	6,8 · 10 ⁴	3,0 · 10 ⁴	0,9	0,40	44
Kustgebied III	Wijk aan Zee	3.000	23,6	-2,4 · 10 ⁴	1,7 · 10 ⁴	-0,8	0,58	69
Kustgebied III	IJmuiden N.	6.300	23,6	1,7 · 10 ⁵	1,6 · 10 ⁴	2,8	0,27	10
Kustgebied IV	IJmuiden Z.	3.700	22,7	2,5 · 10 ⁵	1,1 · 10 ⁴	7,4	0,34	5
Kustgebied IV	Zandvoort	8.000	22,7	-8,3 · 10 ⁴	2,3 · 10 ⁴	-1,1	0,32	28
Kustgebied IV	Zandvoort Z.	9.000	22,7	5,5 · 10 ⁴	2,5 · 10 ⁴	0,7	0,30	45
Kustgebied IV	Noordwijk	8.000	22,7	3,8 · 10 ⁴	1,7 · 10 ⁴	0,5	0,23	44
Kustgebied IV	Katwijk	7.000	22,7	2,2 · 10 ⁴	1,7 · 10 ⁴	0,3	0,26	77
Kustgebied IV	Schev. N.	5.000	22,7	-3,2 · 10 ⁴	9,7 · 10 ³	-0,7	0,21	31
Kustgebied V	Scheveningen	11.000	19,3	1,4 · 10 ⁴	2,9 · 10 ⁴	0,2	0,34	205
Kustgebied V	Ter Heijde	4.000	19,3	-1,7 · 10 ⁴	1,6 · 10 ⁴	-0,5	0,53	97
Kustgebied V	Hoek van Holland ²	6.500	19,3					

Tabel 5-3: Trends en afwijkingen van structurele erosie per jaar langs de Hollandse kust.

5.3.2 Structurele erosie in de toekomst: Invloed klimaatsveranderingen

(Mulder, 1999) De trends over de afgelopen decennia hoeven niet noodzakelijkerwijs overeen te stemmen met te verwachten trends in de toekomst. De toekomstige kustontwikkeling wordt sterk beïnvloed door de relatieve zeespiegelstijging. Uitgaande van verschillende modelbenaderingen (Steetzel, 1995; van Rijn, 1995; TR-5, 1990) is door Mulder (1999) een afschatting gemaakt van de mogelijke range in de effecten van zeespiegelstijging op de zandhuishouding van de kust (zie Tabel 5-4). De schattingen van maximale en minimale effecten zijn respectievelijk als uitgangspunten in de eerste en tweede kustnota gebruikt. Bij de maximale effecten is zowel het primaire als secundaire effect zoals in sectie 5.1.2 beschreven inbegrepen. Bij de minimale effecten is enkel met de secundaire effecten rekening gehouden. Om de invloed van klimaatsverandering op structurele erosie te bepalen is gebruik gemaakt van de maximale percentages.

Voordat de trends uit Tabel 5-3 worden vermenigvuldigd met 3,0 (+200%) moet worden opgemerkt dat de percentages indicaties zijn voor wat in de toekomst kan gebeuren. Door de vermenigvuldiging met factor 3 wordt de erosieve trend versterkt. Of de aanzandende trend in de toekomst met dezelfde factor wordt versterkt en de mate van aanzanding door zeespiegelstijging zal toenemen kan op grond van de percentages uit Tabel 5-4 niet worden gezegd en lijkt ook onwaarschijnlijk. Het is mogelijk dat de aanzandende trend omslaat in een erosieve trend of dat het

Zeespiegel- stijging scenario	60 cm/eeuw		85 cm/eeuw	
	min ¹⁾	max ²⁾	min ¹⁾	max ²⁾
range van effecten %	+18	+68	+42	+200

Tabel 5-4: Schattingen over het effect op de zandhuishouding in m³ van verschillende scenario's voor zeespiegelstijging uitgedrukt als percentage van het effect bij 20 cm/eeuw [naar (1) van Steetzel, 1995; van Rijn, 1995 en (2) TR-5, 1990].

¹ De procentuele afwijking is berekend uit de deling: $\frac{\sigma_{b,vol}}{trend_{vol}} = \frac{\sigma_{b,lengte}}{trend_{lengte}}$. Indien de gegevens uit Tabel 5-3

bij de delingen worden gebruikt wijken de berekende procentuele afwijkingen iets van elkaar af ten gevolge van afrondingsfout.

² Voor deze morfologische kusteenheid is geen analyse uitgevoerd. Door de uitvoering van het strandplan is het bewust buiten beschouwing gehouden vanwege discontinuïteiten die het in de tijdreeks zou veroorzaken. De strandlijnen geven aan dat dit deel redelijk stabiel is.

kustgebied een stabiel karakter krijgt. Er wordt aangenomen dat de kustgebieden die in de huidige situatie een aanzandend of stabiel karakter hebben in de toekomstige situatie tenminste stabiele kustgebieden blijven.

Bovendien is het twijfelachtig of de extrapolatie van de huidige 30-jarige trend voor een bepaalde kusteenheid met behulp van de percentages uit Tabel 5-4 naar een trend voor de toekomstige situatie een betrouwbaar resultaat oplevert. De effecten van zeespiegelstijging op de morfologie in percentages kunnen wel worden toegepast op relatief grote geografische schaal, maar zijn in mindere mate geschikt voor voorspellingen op kleinere schaal, zoals de morfologische kusteenheden van Stam (1999). Daarom zijn de trends in de huidige situatie eerst omgerekend naar trends voor de grotere kustgebieden, namelijk de kustgebieden van de kustgebiedsindeling uit hoofdstuk 4. Daarbij wordt de aanname gemaakt dat de kusteenheden onafhankelijk van elkaar zijn. De afwijking in de nieuwe trend wordt nu gegeven door de wortel te nemen uit de som van de kwadraten van de standaardafwijkingen σ_i van de morfologische eenheden:

$$\sigma_n = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_i^2} \qquad \qquad \qquad : 5-7$$

In Tabel 5-5 staat de structurele erosie per kustgebied voor de toekomstige situatie. Op basis van deze gegevens uit Tabel 5-4 kan weinig worden gezegd over de standaardafwijking van de trends, daarom wordt aangenomen dat deze gelijk blijven aan de standaardafwijkingen in de huidige situatie. Deze aanname introduceert een extra modelonzekerheid.

Kustgebieds- indeling	Lengte kusteenheid [m]	Profiel- hoogte	Trend [m]	Trend [m3/jr]	Trend [m/jr]	Trend [m/jr] 100+	σ_b [m³/jr]	σ_b [m/jr]	Afwijking [%]
Kustgebied I	7.200	20,2	-3,0·10 ⁵	-5,1	-15,2	1,9·10 ⁴	0,32	6	
Kustgebied II	8.150	21,6	-3,1·10 ⁴	-0,4	-1,3	2,9·10 ⁴	0,40	92	
Kustgebied III	40.050	23,6	-8,1·10 ⁴	-0,2	-0,6	5,7·10 ⁴	0,15	70	
Kustgebied IV	40.700	22,7	2,5·10 ⁵	0,7	2,0	4,6·10 ⁴	0,12	18	
Kustgebied V	15.000	19,3	-2,9·10 ³	0,0	-0,1	3,3·10 ⁴	0,29	1140	

Tabel 5-5: Trends en afwijkingen van structurele erosie in de toekomst langs de Hollandse kust.

Het toepassen van de effectpercentages op grote schaal lijkt correct. Echter de extreme effecten worden door het samenvoegen van de morfologische eenheden uitgemiddeld. De erosiepatronen voor de toekomstige situatie op grote ruimteschaal vertonen een minder extreem beeld dan op lokale schaal in de huidige situatie het geval is. De extreme effecten zijn voor de uit te voeren suppletiemaatregelen juist van belang. Door de uitmiddeling wordt het probleem verlegd en wordt de lokale erosie mogelijk onderschat. Om deze reden zijn de percentages uit Tabel 5-4 ook toepast op de kleinschalige kusteenheden. De resultaten staan in Tabel 5-6. Door de toepassing op kleine schaal kunnen de erosie en sedimentatie patronen overschat worden. In dit onderzoek wordt verder gewerkt met de tweede wijze waarop de effecten van klimaatsveranderingen zijn toegepast op de kleinschalige morfologische kusteenheden.

Kustgebieds-indeling	Trend [m/jr]	Trend [m/jr] 100+	Kustgebieds-indeling	Trend [m/jr]	Trend [m/jr] 100+
Den Helder	-5,1	-15,2	Zandvoort	-1,1	-3,4
Callantsoog	-0,4	-1,3	Zandvoort Z.	0,7	2,0 ¹
Petten	-1,4	-4,1	Noordwijk	0,5	1,6 ¹
Bergen a. Zee	-1,4	-4,1	Katwijk	0,3	1,0 ¹
Egmond a. Zee	0,9	2,7 ¹	Scheveningen. N.	-0,7	-2,1
Wijk aan Zee	-0,8	-2,5	Scheveningen	0,2	0,5 ¹
IJmuiden N.	2,8	8,4 ¹	Ter Heijde	-0,5	-1,6
IJmuiden Z.	7,4	22,3 ¹			

Tabel 5-6: Trends van structurele erosie in de huidige en toekomstige situatie langs de Hollandse kust.

5.3.3 Conclusie berekeningen structurele erosie

Op basis van de trends van de kustachteruitgang in m/jr en de afwijking op deze trends (zie Tabel 5-3 en Tabel 5-6) is de Hollandse kust ingedeeld in klassen van zeer erosief tot stabiel, zie Tabel 5-7. Met deze klassen worden de vervolgberekeningen uitgevoerd. Op deze manier wordt het aantal optimalisaties in het uiteindelijke model gereduceerd.

Aanzanding-erosie klassen:	Kustverandering [m/jr]	Klasse-gemiddelde [m/jr]	σ_b [m/jr]	Kusteenheden huidige situatie	Kusteenheden toekomstige situatie
Klasse 1: zeer erosieve kusteenheden	<-2,5	-5,0	1,0	Den Helder	Den Helder, Petten, Bergen a. Zee, Zandvoort
Klasse 2: erosieve kusteenheden	-1,0 → 2,5	-1,75	0,75	Petten, Bergen a. Zee, Zandvoort	Wijk aan Zee, Scheveningen N., Callantsoog, Ter Heijde
Klasse 3: matig erosieve kusteenheden	-0,5 → 1,0	-0,75	0,25	Wijk aan Zee, Scheveningen N.	
Klasse 4: licht erosieve kusteenheden	-0,1 → 0,5	-0,3	0,2	Callantsoog, Ter Heijde	
Klasse 5: stabiele kusteenheden	0,1 → 0,1	stabiel			overige kusteenheden
Klasse 6: aanzandende kusteenheden	>0,1	aanzandend		overige kusteenheden	overige kusteenheden

Tabel 5-7: Hollandse kust ingedeeld naar erosieve, stabiele en aanzandende kusteenheden.

In het optimalisatie-model worden vervolgens met de normaal verdeelde stochastische variabelen uit de lineaire trendanalyse berekeningen uitgevoerd. De stochastische variabele van de structurele erosie wordt weergegeven door:

$$x_s(t) = \underline{b} \cdot t \quad : 5-8$$

met parameter $\underline{b}$ normaal verdeeld met een gemiddelde trend μ [m/jr] en een afwijking σ_b [m/jr] (zie Tabel 5-7) en t de variabele tijd [jr].

¹ Op grond van Tabel 5-4 kan niet worden gezegd hoe de aanzandende kusteenheden zich in de toekomst gedragen. De toekomstige trends zijn verkregen uit de vermenigvuldiging van de huidige trends met een factor 3. In de klasse-indeling van Tabel 5-7 worden de betreffende kusteenheden ingedeeld onder stabiele en aanzandende kusteenheden.

5.4 Kustgedrag: Incidentele erosie



Figuur 5-10: Duinafslag.

5.4.1 Duinafslag en karakteristieke maat teruggang duinfront

(TAW, 1998) Aan de kust is de bedreiging doorgaans kort en heftig. Golfwerking speelt een belangrijke rol. Hoge golven vormen naast de hoge waterstanden bij stormvloed een belangrijke bedreiging voor de waterkering. Langs de zandige kust kunnen dan dungebieden afslaan.

(TAW, 1995b) Duinafslag is een relatief snel verlopend dwarstransportproces dat optreedt bij zware golfaanval in combinatie met hoge waterstanden. In een tijdsbestek van enkele uren worden grote hoeveelheden zand van duinen weggeslagen en meestal op dieper water weer afgezet. Duinafslag kan in uiterste vorm tot verlies van de waterkerende functie leiden. Naast duinafslag kunnen erosie van de vooroever en afschuiving van het binnentalud voor falen van de waterkering zorgen. Deze laatste twee zijn ten opzichte van duinafslag van ondergeschikt belang. De mate van duinafslag tijdens een willekeurige stormvloed is met name afhankelijk van de volgende grootheden:

- maximale waterstand;
- significante golfhoogte op diep water;
- stormvloedduur;
- buistoten en bui-oscillaties;
- ligging van het beginprofiel;
- korreldiameter van het duinzand.

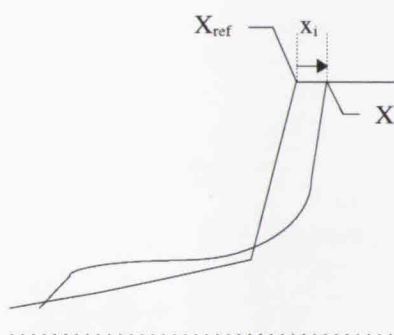
Onder invloed van verschillende combinaties van de afslagbepalende grootheden zal het dwarsprofiel tijdens een storm veranderen. Met het oog op de nagestreefde veiligheid en de economische optimalisatie is met name de uiteindelijke vorm van het meest landwaartse deel van het eindprofiel van belang. Om de maatgevende eindsituatie per stormconditie te 'vangen' in één karakteristieke maat moet naast de duinafslag boven stormvloedpeil een karakteristieke teruggang van het duinfront als eenduidige maat voor de kwantificering van de effecten van een storm worden gedefinieerd. Voor deze maat is niet zozeer de positie van een bepaald afslagpunt van belang, maar meer de relatieve teruggang in termen van een verplaatsing van zo'n punt ten opzichte van een van te voren aangegeven referentiepunt.

Voor dit referentiepunt, X_{ref} , wordt de positie van de overgangsknik tussen het duinfront en de overige duinen genomen. De positie van dit referentiepunt moet worden vergeleken met een afslagpunt. Hiervoor wordt het afslagpunt X_o genomen dat gerelateerd is aan het dwarsprofiel. X_o is het snijpunt tussen het afslagprofiel en de duinhoogte. Dit afslagpunt is in die zin onafhankelijk van een bepaalde waterstand. De reden voor het ontstaan van een bepaalde mate van duinafslag en daarmee een specifieke positie van afslagpunt X_o kan immers zowel gelegen zijn in:

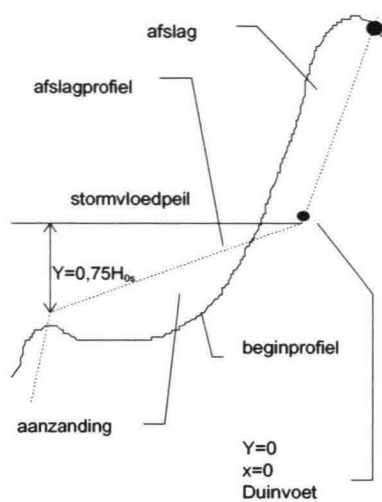
- een storm met een lage maximale waterstand en zware golfaanval;
- een storm met een hoge maximale waterstand en minder zware golfaanval.

De mate van duinafslag is eenduidig te bepalen door als maat voor de teruggang als gevolg van incidentele erosie, x_i , het verschil tussen X_{ref} en X_o te nemen, zie Figuur 5-11.

In dit onderzoek wordt de berekeningsmethode uit de Leidraad Duinafslag gevolgd. Voor de kwantificering van duinafslag onder verschillende stormcondities worden modelberekeningen met het duinafslagprogramma Super-Dune gemaakt. Het principe van deze afslagberekeningen komt overeen met de berekeningsmethode van de leidraad.



Figuur 5-11: het referentiepunt X_{ref} : overgangsknik tussen het strand en het duinfront.



Duinvoet: punt waar steil front overgaat in 'flauw' strand.

Na afslag is dit punt gelijk aan raakpunt profiel en stormvloedpeil.

Vanaf duinvoet (0,0) zeewaarts loodrecht op de kust verloopt het profiel parabolisch. Volgens:

$$7,6/H_{0s} \cdot y = 0,4714 \cdot [(7,6/H_{0s})^{1,28} \cdot (w/0,0268)^{0,56} \cdot x + 18]^{0,5} - 2,00 \quad (1)$$

tot het punt waarvoor geldt:

$$x = 250 \cdot (H_{0s}/7,6)^{1,28} \cdot (0,0268/w)^{0,56} \quad (2)$$

$$y = 5,717 \cdot (H_{0s}/7,6) \quad (3)$$

Zeewaarts van dit punt gaat het profiel over in een rechte lijn met een bepaalde helling.

$$\text{Valsnelheid: } {}^{10}\log(1/w) = 0,476 \cdot ({}^{10}\log D)^2 + 2,180 \cdot {}^{10}\log D + 3,226 \quad (4)$$

(met $D=D_{50}$ in [m] en w =valsnelheid in [m/s])

De positie van het afslagprofiel wordt verticaal bepaald door H_{0s} en horizontaal door een sluitende zandbalans.

Rekenpeil = ontwerppeil + $2/3 \cdot$ decimeringshoogte.

Figuur 5-12: Principe van het rekenmodel voor duinafslag.

5.4.2 Leidraad Duinafslag

(TAW, 1995b) De leidraad is in principe opgesteld ter beoordeling van de veiligheid van duinen als primaire waterkering bij ontwerpomstandigheden, maar kan ook worden toegepast voor condities met een grotere kans van voorkomen. De leidraad bestaat uit drie hoofdelementen: een rekenmodel voor de verwachting van duinafslag tijdens stormvloed en een methode voor het toetsen van een duinkust aan de vastgestelde veiligheidseisen voor duinen als primaire waterkering en aan lagere veiligheidsnormen.

Met het rekenmodel kan de mate van duinafslag ten gevolge van een willekeurige stormvloed worden berekend. De invoerparameters van het rekenmodel zijn: het kustprofiel dat vlak voor de stormvloed aanwezig is, het stormvloedpeil, de significante golfhoogte, de korrelgrootte van het duinzand (D_{50}) en de golfperiode. De andere afslagbepalende parameters worden door extra toeslagen op de berekende duinafslag in rekening gebracht. Het rekenmodel kan worden toegepast op alle situaties (met normale of extreme stormvloedcondities) en profielvormen langs de Nederlandse kust.

De mate van duinafslag wordt beïnvloed door de significante golfhoogte tijdens het hoogtepunt van de stormvloed. De golfhoogte net buiten de brekerzone is bepalend voor de vorm van en de lengte waarover het afslagprofiel zich zal ontwikkelen (zie vergelijking 1 tot en met 4 uit Figuur 5-12). Bovendien wordt de vorm van het afslagprofiel bepaald door de korreldiameter. De invloed van de golfhoogte en de korreldiameter op het afslagprofiel is weergegeven in Figuur 5-14 en Figuur 5-13.

Eén van de belangrijkste uitgangspunten van het rekenmodel is dat de totale afgeslagen oppervlakte van het afslagprofiel gelijk wordt gesteld aan de oppervlakte van het afgezette zand. Er is aangenomen dat er geen netto verlies van zand in zijwaartse richting optreedt.

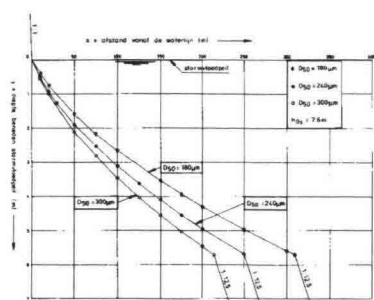
De berekende- en de werkelijk optredende duinafslag verschillen van elkaar. Deze onnauwkeurigheden zijn geïntroduceerd door:

- de vereenvoudigde schematisatie van het kustprofiel;
- de onzekerheid in de invoerparameters (h , H_{sig} , D_{50} , profiel voor afslag);
- de effecten van buistoten, oscillaties en stormduur;
- de vereenvoudiging dat er bij herverdeling wordt uitgegaan van het feit dat er geen netto zandverlies in de kustnabije zone optreedt. Echter de aanwezigheid van een verschil in het zandvolume tussen twee kusteenheden leidt tot een transport in langsricting. Bovendien zorgt de kromming van de kust voor langstransport.

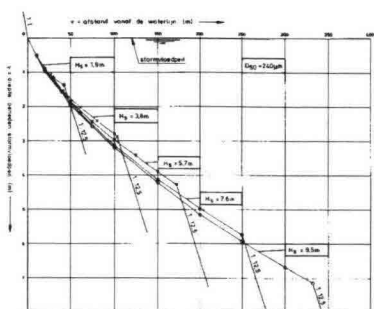
(van Beurden, 1988) In de stormvloedwaterstand zijn de getijamplitude en de windopzet opgenomen. Naast deze factoren spelen ook factoren als de stormvloedduur en het optreden van buistoten en bui-oscillaties een rol. Deze factoren kunnen een belangrijke invloed uitoefenen op duinafslag. Buistoten en -oscillaties, zoals een solitaire zeespiegelstijging, dan wel periodieke schommelingen van de waterstand met periodes variërend van enkele tot tientallen minuten, kunnen worden opgewekt door meteorologische invloeden. Ze komen voor in elke getijfase en in elk seizoen. Aangezien van regelmaat geen sprake is, zijn ze niet verdisconteerd in de hoogwateroverschrijdingslijn. Ze kunnen gesuperponeerd worden op de stormvloedstand of ze kunnen door een extra toeslag op de berekende duinafslag worden meegenomen. In Super-Dune worden bui-oscillaties en buistoten via een extra toeslag meegenomen.

Voor de stormvloeditduur is met name de tijd gedurende welke de waterstand rondom het maximum verblijft belangrijk. Deze tijd is namelijk het meest bepalend voor de hoeveelheid duinafslag.

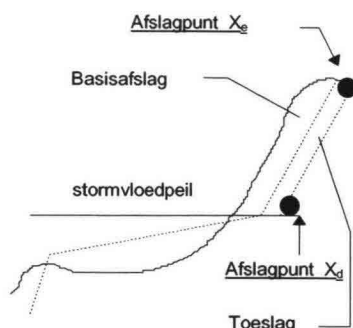
(TAW, 1995b) Om deze onnauwkeurigheden in de totale duinafslag mee te nemen wordt op de berekende basisafslag een toeslag van 0,25 maal de basisafslag plus



Figuur 5-13: De invloed van de korrel diameter op het afslagprofiel (voor willekeurige $H_{0s}=7,6\text{m}$).



Figuur 5-14: De invloed van de golfhoogte op het afslagprofiel.



Basisafslag A: berekende hoeveelheid afslag boven rekenpeil

Toeslag op basisafslag voor effecten van:

Stormvloeddur: $0,10A \text{ m}^3/\text{m}$
 Buistoten en bui-oscillaties: $0,05A \text{ m}^3/\text{m}$
 Onnauwkeurigheid model: $0,10A + 20\text{m}^3/\text{m}$

Totale toeslag: $0,25A + 20 \text{ m}^3/\text{m}$

Figuur 5-15: Totale afslag.

$20\text{m}^3/\text{m}^1$ gesuperponeerd, zie Figuur 5-15. Deze toeslag is gebaseerd op de probabilistische veiligheidsbeschouwing die is uitgevoerd voor de opstelling van in de Leidraad Zandige Kust. Uit de totale afslag kan de ligging van het afslagpunt X_e in een dwarsprofiel onder verschillende stormcondities worden bepaald.

5.4.3 Super-Dune

(Koster, 1997a) In een kustsectie moet ieder dwarsprofiel minimaal zo veilig zijn dat tijdens een ontwerpstormvloed nog juist geen doorbraak zal optreden. Om te beoordelen of een duin veilig is zijn duinafslagmodellen ontwikkeld. In de leidraad is voor de beoordeling van de veiligheid van duinen als waterkering een conceptueel rekenmodel ontwikkeld. Dit rekenmodel is geïmplementeerd in Super-Dune. Met Super-Dune kan onder andere voor een bepaalde raai langs de kust een afslagprofiel voor onverdedigde duinprofielen onder het ontwerpstormvloedpeil en bijbehorende significante golfhoogte worden berekend. Bovendien kan het model gebruikt worden voor het bepalen van de duinafslag en erosieprofielen bij andere omstandigheden dan de ontwerp-stormvloed, de effecten van zeespiegelstijging en veranderende randvoorwaarden, de erosieve of aanzandingstrend van een kustgedeelte als functie van de tijd en/of plaats middels zandvolumeberekeningen, etcetera.

De afslagbepalende parameters hebben een stochastisch karakter. Voor de veiligheidsbeoordeling worden in Super-Dune veiligheidswaarden ingevoerd waarbij de waarden van de parameters zijn vergroot met veiligheidscoëfficiënten gebaseerd op eerder gemaakte probabilistische berekeningen. Het programma zelf is niet probabilistisch, maar door de invoer van partiële veiligheidswaarden benadert Super-Dune de uitkomsten van een probabilistische duinafslagberekening goed. De veiligheidsbeoordeling wordt beschreven in hoofdstuk 7.

In dit hoofdstuk wordt de mate van incidentele erosie onder verschillende hydraulische condities gekwantificeerd. Bij deze berekeningen worden geen veiligheidsrekenwaarden ingevoerd om rekening te houden met een extra veiligheidsmarge. Wel wordt de toeslag bovenop de berekende duinafslag meegenomen.

Super-Dune bestaat uit een aantal sub-programma's en extra tools welke ieder een bepaalde taak uitvoeren. De onderlinge samenhang wordt verzorgd door een schil: het hoofdprogramma.

Enkele relevante sub-programma's worden vervolgens kort toegelicht:

- **Edit Jark:** In Edit Jark worden files van het JARKUS-bestand geconverteerd naar binaire (voor Super-Dune bruikbare) bestanden. Na de conversie kunnen de gegevens worden bewerkt. Zo kunnen de gegevens worden veranderd, verwijderd of geselecteerd.
- **Input:** In dit sub-programma wordt een invoerfile uit *Edit Jark* geselecteerd. Vervolgens kunnen de randvoorwaarden voor de duinafslagberekening worden ingevoerd:
 - stormvloedpeil, h ;
 - significante golfhoogte H_{sg0} ;
 - korrel diameter, D_{50} ;
 - golfperiode T_p ;
 - referentiewaarde voor het langtransport G_0 .

Naast deze randvoorwaarden speelt een aantal overige parameters een rol. Er zijn drie manieren waarop de randvoorwaarden kunnen worden opgegeven. In de eerste methode worden de randvoorwaarden per raai opgegeven. Deze waarden gelden vervolgens voor alle door te rekenen jaren. Randvoorwaarden per profiel (per raai en per jaar) kunnen worden opgegeven in de tweede methode. Tenslotte kan in de derde methode één set randvoorwaarden voor alle profielen (alle raaien en jaren) worden opgegeven.

De invoergegevens kunnen worden verzameld uit de informatie in de Leidraad Duinafslag en het Hydraulische Randvoorwaardenboek.

In Super-Dune kunnen ook de effecten van een zeespiegelstijging in de toekomst worden berekend. Hiertoe kunnen nieuwe randvoorwaarden worden ingevoerd voor variabelen (ontwerppeil, golfhoogte, golfperiode) die naar verwachting worden beïnvloed door de zeespiegelstijging. Deze gegevens worden verkregen uit onderzoeken naar de gevolgen van klimaatsveranderingen.

- Bereken: Het sub-programma *Input* levert de invoergegevens voor het duinafslag rekenprogramma. De rekenresultaten zijn te vinden in verschillende uitvoerbestanden. Zo bevat het bestand *.OUT de resultaten van de duinafslagberekeningen voor elke raai en voor elk jaar en laat het bestand *.Zee de rekenresultaten voor de berekening met de randvoorwaarden horend bij zeespiegelstijging zien.
- Teken: In het sub-programma *Teken* kunnen de resultaten van de afslagberekeningen, zoals afslag per jaar, afslag na regressie, afslag na zeespiegelstijging, regressie afslag, regressie duinvoet en profielen grafisch worden weergegeven.
- List: In dit sub-programma kunnen in- en uitvoergegevens worden bekeken.

5.4.4 Rekencombinaties voor afslagberekeningen

Het is onmogelijk om voor elk dwarsprofiel en de verschillende invoergegevens een afslagberekening in Super-Dune uit te voeren. Om die reden zijn een aantal vereenvoudigingen toegepast, waardoor het aantal berekeningen wordt gereduceerd.

Voor de parameters korreldiameter, golfperiode, referentiewaarde voor langstransport en het beginprofiel worden constante waarden ingevoerd in Super-Dune:

- voor de korreldiameter wordt de gemiddelde waarde meegenomen, zie sectie 5.5.3.
- een constante waarde van $T_p=12$ seconde wordt voor de golfperiode ingevoerd.
- de referentiewaarde voor het langstransport wordt gelijk gesteld aan nul, want in het economisch-morfologische model wordt langstransport meegenomen in de maat voor structurele erosie.
- voor de 5 kustgebieden wordt voor de afslagberekeningen steeds uitgegaan van een standaardprofiel, zie sectie 5.5.1.

Achteraf wordt in sectie 9.3 bekeken of enige statistische variatie in de basiswaarde effect heeft op de mate van afslag en teruggang van het duinfront.

De waterstand en significante golfhoogte worden wel als stochastische variabelen meegenomen. Voor een groot aantal combinaties van waterstand en significante golfhoogte worden afslagberekeningen uitgevoerd. De Hollandse kust is daartoe in zones met een redelijk uniform stormklimaat ingedeeld. Voor de locaties Den Helder, IJmuiden en Hoek van Holland zijn respectievelijk de overschrijdingsfrequentielijn en de kansdichtheidsfunctie van de waterstand en de relatie tussen de waterstand en de significante golfhoogte berekend. De kustgebieden I en II vallen onder het stormklimaat van Den Helder, de kustgebieden III en IV hebben het klimaat dat door de functies op de locatie IJmuiden wordt beschreven en kustgebied V heeft het stormklimaat dat overeenkomt met de locatie Hoek van Holland.

Kortom, de duinafslag wordt berekend voor drie stormklimaten. Tijdens alle berekeningen worden voor de overige invoergegevens constante parameters ingevoerd. De berekeningen worden systematisch herhaald voor een groot aantal combinaties van waterstand en significante golfhoogte.

Voor de drie stormklimaten worden de afslagberekeningen in een grafiek uitgezet tegen de waterstand en de significante golfhoogte. Door middel van een regressieanalyse wordt de relatie tussen de duinafslag en de waterstand en de

significante golfhoogte bepaald. Vervolgens kan met behulp van een Monte Carlo simulatie een grafische weergave van de kansdichtheidsverdeling van de duinafslag en bijbehorende verwachtingswaarde en standaardafwijking worden bepaald.

5.4.5 Uitgangspunt bij afslagberekening: dynamisch evenwicht

(TAW, 1995a) Een kustprofiel zal zich voortdurend trachten om te vormen tot een profiel dat behoort bij de momentane hydraulische omstandigheden. Wanneer de vormveranderingen zonder resulterend zandverlies of zandwinst plaatsvinden, is sprake van dynamische evenwicht. Een constant profiel wordt echter nooit bereikt, omdat de hydraulische omstandigheden telkens veranderen. Zo zijn hoge waterstanden en hoge golven met een resulterend zeewaarts gericht dwarstransport karakteristiek voor het winterseizoen. De hoger gelegen delen van het kustprofiel treden daarbij als sedimentbron op. Een verflauwing van het kustprofiel is het gevolg. Tijdens het zomerseizoen zijn er lagere golven en heerst er een landwaarts gericht dwarstransport. Het zand dat tijdens het winterseizoen zeewaarts wordt verplaatst wordt bij dynamisch evenwicht geheel teruggetransporteerd.

Bij de berekening van incidentele erosie langs de Hollandse kust wordt aangenomen dat duinafslag in hetzelfde jaar nog op natuurlijke wijze wordt hersteld.

5.5 Invoergegevens voor Super-Dune berekeningen

5.5.1 Standaardprofiel

In sectie 4.4 is de variatie in geometrie van de kustprofielen langs de Hollandse kust geanalyseerd. Op basis van deze resultaten is een standaardprofiel opgesteld. Aangezien de breedte van de kustprofielen sterk variëren zijn de kustgebieden eerst ingedeeld in een aantal breedte-klassen.

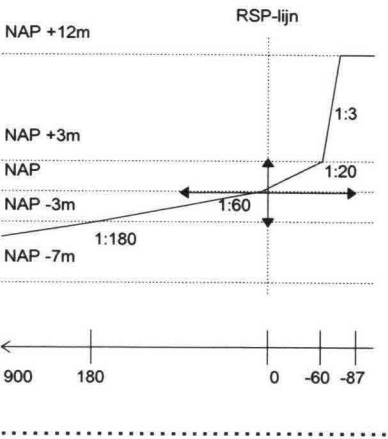
Breedte-klassen:	Breedte [m]	Gemiddelde breedte-klasse [m]	Kustgebieden
Breedte-klasse 1: breed	>2000	3000	Kustgebied III, Kustgebied IV
Breedte-klasse 2: gemiddeld	500-2000	1250	Kustgebied II, Kustgebied III, Kustgebied IV
Breedte-klasse 3: smal	≤ 500	250	Kustgebied I, Kustgebied II, Kustgebied III, Kustgebied IV, Kustgebied V

Tabel 5-8: Indeling van kustgebieden naar profielbreedte.

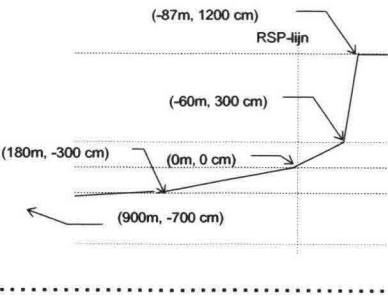
Voor de gemiddelde breedte van de drie breedte-klassen is respectievelijk een breedte van 250m, 1250m, 3000m aangenomen.

Vervolgens is het standaardprofiel gedefinieerd, waarin voor de duinhoogte, duinvoet, diepte van de vooroever en profielhellingen constante waarden zijn aangenomen en waarin de duinbreedte varieert. De constante waarden van dit standaardprofiel zijn gebaseerd op een dwarsprofiel dat in Alkyon (1999) is gebruikt. Het standaardprofiel, zie Figuur 5-16 bestaat uit een vooroever met een helling van 1:180 vanaf diep water tot NAP -3m en gaat over in een helling van 1:60 tot NAP. Daarboven begint het strand onder een helling van 1:20 tot op het NAP +3m gelegen duinvoetniveau. Boven dit niveau is een helling van 1:3 aangehouden voor het duinfront. Tot het duinniveau Z_0 van NAP +12m. De breedte wordt gedefinieerd als de afstand van de RSP-lijn tot het landwaartse uiteinde van het dwarsprofiel. Het profiel heeft aan de landwaartse kant een talud van 1:2. In bijlage 5.7 staan de drie profielen variërend in breedte grafisch weergegeven.

Voor het standaardprofiel is een ASCII-bestand opgesteld zodat in Super-Dune met het profiel berekeningen kunnen worden uitgevoerd. Voor de RSP-lijn wordt het snijpunt tussen de vooroever en het strand genomen. X is de afstand ten opzichte



Figuur 5-16: Standaardprofiel.



Figuur 5-17: Coördinaten van het standaardprofiel.

van de RSP-lijn met landwaarts negatieve- en zeewaarts positieve waarden. Y is de hoogte respectievelijk diepte ten opzichte van de NAP-lijn.

X-coördinaat	Y-coördinaat
-250	00
-244	12000
-87	12000
-60	3000
0	00
180	-3000
900	-7000

Tabel 5-9: ASCII-invoergegevens van het standaardprofiel in Super-Dune.

5.5.2 Stormvloedpeil en significante golfhoogte

(TAW, 1998) Tijdens een stormsituatie wordt het water omhoog gestuwd, waardoor langs de kust hoge waterstanden ontstaan. Er is een aantoonbaar verband tussen de optredende waterstanden en de golfhoogten. Vaak gaan hoge waterstanden op zee gepaard met hoge golven. Dit komt doordat de wind de oorzaak is van het hoge water en de hoge golven. Wind en water zijn in hoge mate gecorreleerd.

(TAW, 1998) De waterstand langs de kust is een van de best bestudeerde basisvariabelen in de waterbouw. Op basis van meetreeksen zijn voor verschillende locaties langs de Hollandse kust overschrijdingsfrequentielijnen bepaald, waarin de waterstand is uitgezet tegen de jaarlijkse kans op het overschrijden van een bepaalde waterstand.

(Deltacommissie, 1960) De verdelingsfunctie van N onderling onafhankelijke waarnemingen van een stochastische variabele kan onder bepaalde voorwaarden goed met een dubbel-exponentiële Gumbel-verdelingsfunctie worden benaderd. Om tot een verdelingsfunctie van de stormvloedstanden bij Den Helder, IJmuiden en Hoek van Holland te komen, is gebruik gemaakt van de Gumbel-methode, zoals deze beschreven staat in Deltacommissie (1960).

$$F(h > h) = 1 - e^{-e^{-\frac{h-A}{B}}} \quad : 5-9$$

met:

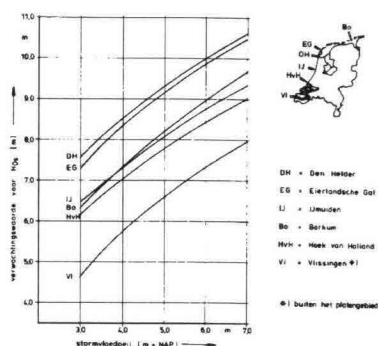
h: stormvloedpeil, waterstand [m]

A,B: coëfficiënten Gumbel-verdeling

De coëfficiënten A en B voor de drie kustlocaties staan in onderstaande tabel.

Locatie	A	B
Den Helder	2,28	0,308
IJmuiden	2,15	0,326
Hoek van Holland	2,03	0,335

Tabel 5-10: Coëfficiënten van de Gumbel-kansverdelingsfunctie voor locaties langs de Hollandse kust.



Figuur 5-18: Verwachtingswaarde van de significante golfhoogte als functie van het stormvloedpeil op enkele locaties voor de Nederlandse kust.

Doordat de overschrijdingsfrequentielijnen uit een beperkt aantal waarnemingen zijn geconstrueerd is er altijd sprake van onzekerheid. Dit geldt met name voor extreme omstandigheden. Het is moeilijk deze 'staarten' van de verdelingen betrouwbaar weer te geven. Het ligt daarom voor de hand een extrapolatieterm te gebruiken. Deze term is toegevoegd om de statistische onzekerheid in het model mee te nemen. (van Beurden, 1988) Voor de extrapolatieterm neemt de TAW een normale verdeling met een gemiddelde μ van 0 en een spreiding σ van $0,11 \cdot (h - 2.25)$ aan. De spreiding in deze term is groter indien de waterstand hoger is. In verband met de hanteerbaarheid in het model (de spreiding is afhankelijk van de waterstand) wordt de kansverdelingsfunctie van de waterstand niet verhoogd met de normaal verdeelde extrapolatieterm, maar wordt de verdelingsfunctie vermenigvuldigd met een factor ξ . Deze extrapolatiefactor ξ is normaal verdeeld:

$$\xi \equiv N\{1; 0.06\} \quad : 5-10$$

Voor stormvloedstanden rond NAP +5m komt de spreiding overeen met de voorgenoemde spreiding. Voor lagere waterstanden is de spreiding aan de hoge kant.

Om vervolgens van de kansverdelingsfunctie (6.9) tot een kansdichtheidsfunctie te komen, is de $F(h \leq h) = 1 - F(h > h)$ naar h gedifferentieerd.

$$P(h) = \frac{1}{B} \cdot e^{-\frac{h-A}{B}} \cdot e^{-e^{-\frac{h-A}{B}}} \quad : 5-11$$

Voor de resulterende kansdichtheids- en kansverdelingsfuncties wordt verwezen naar bijlage 5.8 tot en met 5.11.

In van Aalst (1983) is voor verschillende locaties langs de Hollandse kust de relaties tussen de waterstand en de significante golfhoogte berekend. De resultaten hiervan zijn weergegeven in Figuur 5-18.

Het verband tussen de waterstand en de significante golfhoogte is in het verleden meerdere malen onderzocht. In Koster (1997a) wordt de verwachtingswaarde van de significante golfhoogte als functie van de waterstand door een geometrische regressievergelijking weergegeven:

$$H_s = a \cdot h^b + \varepsilon \quad : 5-12$$

met:

H_s : significante golfhoogte [m]

h : stormvloedpeil [m]

a, b : twee coëfficiënten van de geometrische functie

ε : stochastische variabele voor de afwijking op het geometrische verband, $N(0, \sigma^2)$ -verdeeld

De twee coëfficiënten a en b kunnen volgens de kleinste kwadraten methode worden bepaald. De coëfficiënten a en b zijn deterministische waarden.

Het verband tussen H_s en h is niet eenduidig, dat blijkt uit de doottij/springtij variatie en een aantal andere factoren, waaronder de tijdsduur van de storm en de variatie in windrichting. De significantie golfhoogte is rond het gemiddelde geometrische verband normaal verdeeld. Voor de afwijking is de term ε toegevoegd. ε is normaal verdeeld met een verwachtingswaarde nul en een variantie σ^2 . Deze term corrigeert de intrinsieke onzekerheid die voort komt uit onvoorspelbare fluctuaties in de natuur. De resultaten van de regressieberekening voor de locaties Den Helder, IJmuiden en Hoek van Holland staan in Tabel 5-11.

Locatie:	a	b	σ_i
Den Helder	4,987	$3,81 \cdot 10^{-1}$	$3,654 \cdot 10^{-2}$
IJmuiden	3,985	$4,41 \cdot 10^{-1}$	$2,845 \cdot 10^{-2}$
Hoek van Holland	3,684	$4,59 \cdot 10^{-1}$	-----

Tabel 5-11: Resultaten regressieanalyse voor de relatie tussen stormvloedpeil, h - significante golfhoogte, H_s .

5.5.3 Korreldiameter duinzand

In de Leidraad Duinafslag staan de gemiddelde (μ_{D50}) en standaardafwijking (σ_{D50}) van de normaal verdeelde korreldiameter van duinzand langs de Nederlandse kust gegeven. In Tabel 5-12 zijn de gemiddelde en de standaardafwijking van de korreldiameter per kustgebied en de totale kust gegeven. Omdat de variatie in korreldiameter niet groot is worden de afslagberekeningen uitgevoerd met de gemiddelde korreldiameter van 226 μm voor de hele Hollandse kust.

Kustgebieden	Gemiddelde korreldiameter [μm]	Standaarddeviatie korreldiameter [μm]
Kustgebied I	234	10
Kustgebied II	253	24
Kustgebied III	233	19
Kustgebied IV	218	16
Kustgebied V	217	21
Hollandse kust	226	20

Tabel 5-12: Gemiddelde korrelgrootte en standaardafwijking in 5 kustgebieden.

5.6 Berekeningen incidentele erosie

5.6.1 Verband waterstand en incidentele erosie in de huidige situatie

In Super-Dune zijn voor de drie stormklimaten duinafslagberekeningen uitgevoerd, zoals beschreven in sectie 5.4.4.

Uit de figuur 'afslag per jaar' in Super-Dune zijn de X_e -coördinaaten afgelezen. Deze coördinaat geeft het momentane afslagpunt inclusief de toeslag zoals beschreven in Figuur 5-15, maar zonder rekening te houden met een regressieberekening en extra verschuiving als gevolg van het effect van profielfluctuaties weer. Het afslagpunt X_e is belangrijk voor de berekening van teruggang van het duinfront. Het referentiepunt X_{ref} ligt op coördinaat -87m. De teruggang van het duinfront ten gevolge van een willekeurige storm is gelijk aan $x_i = X_{ref} - X_e$. Indien de berekende teruggang van het duinfront negatief is, dan wil dit zeggen dat het afslagpunt zeewaarts van het referentiepunt ligt. Er slaat dan wel zand van het strand en het duinfront weg, maar er gaat geen zand uit het duinareaal verloren.

Voor de drie stormklimaten zijn het afslagpunt X_e en de berekende incidentele kustachtergang x_i weergegeven in tabellen in bijlage 5.12. De berekende teruggang van het duinfront x_i is een functie van de waterstand h en de significante golfhoogte H_s .

$$\Delta X = f(h, H_s) \quad ; 5-13$$

Met een meervoudige regressieanalyse kan het verband tussen de afhankelijke variabele x_i en de onafhankelijke variabelen h en H_s worden gezocht. Voor een meervoudige regressie geldt echter dat de onafhankelijke variabelen onderling niet te sterk mogen correleren, anders is er sprake van multicollineariteit. In dat geval meten

de onafhankelijke variabelen ongeveer hetzelfde en is het niet mogelijk om het effect van iedere variabele afzonderlijk te bepalen. De validiteit van het model komt dan in gevaar. De significante golfhoogte is een geometrische functie van de waterstand. De twee onafhankelijke variabelen zijn sterk gecorreleerd (zie bijlage 5.12). Er is daarom gekozen de significante golfhoogte als variabele buiten het verband te laten en een verband te zoeken tussen de teruggang van het duinfront en de waterstand.

Met het curve-fit-programma *Curve Expert 3.1* is dit verband onderzocht. Met dit programma kan eenvoudig de range van berekeningsresultaten (h , x) op verschillende verbanden, zoals lineaire, exponentiële, machts-, groei-, sinus-, polynoom- en zelf aan te geven verbanden worden onderzocht.

De berekende waarden voor duinafslag zijn afhankelijk van de gekozen invoergegevens in sectie 5.4.4. Deze invoergegevens zijn gekozen op basis van metingen en verworven kennis en inzichten. Enige toevalligheid in de keuze van de invoergegevens leidt ertoe dat bij een tweede bepaling de invoergegevens wellicht iets anders zouden kunnen worden gekozen. De duinafslag zou daardoor voor de tweede bepaling kunnen verschillen met de berekende resultaten van de gekozen invoergegevens. Hoewel in *Curve Expert 3.1* hoge graads polynomen (met veel parameters) als beste fit uit de bus komen is het gezien de hierboven beschreven afhankelijkheid en de waarde die aan de afslagberekeningen mag worden gegeven niet zinvol om het verband te beschrijven met een hoge graads polynoom. In dat opzicht is het beter de relatie met een beperkt aantal parameters te beschrijven. De standaardafwijking is in dat geval wel groter, maar de duinafslag is wel beter voorspelbaar (in hoofdstuk 9 wordt hier verder op ingegaan).

Het verband tussen x_i en h wordt beschreven met een kwadratische functie. De standaardfout is klein en de correlatiecoëfficiënt nadert 1 (zie bijlage 5.13). De kwaliteit van de regressie neemt toe indien de standaardfout kleiner wordt. De standaardfout geeft de wortel van de som van de gekwadrateerde afwijkingen van de waarnemingen ten opzichte van de regressiecurve weer¹. De correlatiecoëfficiënt geeft de sterkte en de richting van het verband weer. De waarde van deze coëfficiënt ligt tussen -1 en +1. Hoe hoger de waarde van de correlatiecoëfficiënt des te dichter de punten bij de regressielijn liggen en des te sterker het verband.

Voor de drie stormcondities is het verband als volgt weer te geven:

$$x_i = a_0 + a_1 \cdot h + a_2 \cdot h^2 \quad : 5-14$$

met:

x_i : duinafslag [m]

h : waterstand, stormvloedpeil [m]

a_0 , a_1 , a_2 : coëfficiënten kwadratische functie

De coëfficiënten a_0 tot en met a_2 van de kwadratische functie en de standaardfouten en correlatiecoëfficiënten zijn weergegeven in bijlage 5.13.

5.6.2 Kansdichtheidsverdeling teruggang duinfront in de huidige situatie

Met de relatie tussen de waterstand en de teruggang van het duinfront én de onderschrijdingsfunctie van de waterstand maal de extrapolatiefactor (zie sectie 5.5.2) kan met behulp van de Monte Carlo methode de kansdichtheidsverdeling van duinafslag grafisch worden weergegeven.

¹ De standaardfout mag niet verward worden met de standaardafwijking. De standaardafwijking geeft de wortel uit de som van de gekwadrateerde afwijkingen van de waarnemingen ten opzichte van een gemiddelde weer. De standaardafwijking en het gemiddelde worden niet in *Curve Expert 3.1* gegeven. *Curve Expert 3.1* is uitsluitend een fit-programma en geeft aan hoe goed een fit is. Omdat het verband tussen duinafslag en de waterstand met een eenvoudig kwadratisch verband wordt beschreven en de standaardfout relatief klein is wordt geen extra onzekerheidsband om de fit in rekening genomen. De onzekerheid in de berekende duinafslag wordt via de waterstand en de extrapolatiefactor door middel van de Monte Carlo simulatie (zie sectie 5.6.2) in de duinafslag opgenomen.

Monte Carlo methode

De Monte Carlo methode maakt gebruik van het uitgangspunt dat de onderschrijdingskans van een willekeurige stochastische variabele uniform verdeeld is tussen nul en één, ongeacht de verdeling van deze variabele. In formulevorm:

$$F_X(X) = X_u \quad : 5-15$$

hierin is X_u een uniform verdeelde variabele tussen nul en één en $F_X(X)$ de onderschrijdingskans $P(X < X)$.

Voor de willekeurig gekozen stochastisch variabele X geldt nu:

$$X = F_X^{-1}(X_u) \quad : 5-16$$

hierin is $F_X^{-1}(X_u)$ de inverse van de kansverdelingsfunctie van X .

Met behulp van vergelijking 6-16 kan door het trekken van een getal X_u uit de uniforme verdeling tussen nul en één, een random getal X gegenereerd worden uit een willekeurige verdeling $F_X(X)$. Deze wijze van trekken van randomgetallen is algemeen toepasbaar.

Op dezelfde manier kunnen de basisvariabelen van een stochastische vector worden getrokken uit een bekende gezamenlijke kansverdelingsfunctie. Als de basisvariabelen stochastisch onafhankelijk zijn dan geldt dat met behulp van:

$$X_i = F_{X_i}^{-1}(X_{u_i}) \quad : 5-17$$

random getallen kunnen worden gegenereerd uit een verdeling van de stochastische vector. De teruggang van het duinfront is een stochastische vector van twee onafhankelijke basisvariabelen: de waterstand en de extrapolatiefactor. Voor de verkregen tweedimensionale stochastische vector van de teruggang van het duinfront kan door een groot aantal trekkingen een histogram van de kansdichtheidsfunctie worden gegenereerd.

Aantal iteraties Monte Carlo methode

Het aantal trekkingen is afhankelijk van de faalkans die voor een zekere teruggang van het duinfront onder een gegeven betrouwbaarheid van een zekere relatieve fout wordt gedefinieerd:

$$n > \frac{k^2}{E^2} \cdot \left(\frac{1}{P_f} - 1 \right) \quad : 5-18$$

met:

- n: aantal iteraties
- k: $\Phi(k)$ de betrouwbaarheid
- E: maximale relatieve fout
- P_f : faalkans

Het aantal iteraties is afhankelijk van de faalkans. Bij zeer kleine faalkansen is het aantal benodigde iteraties zeer hoog. Daarnaast neemt het aantal iteraties toe als de gewenste relatieve fout die met de iteraties gemaakt wordt kleiner wordt gekozen. Bovendien kan het aantal iteraties toenemen als de betrouwbaarheid, de kans dat de relatieve fout kleiner is dan een gegeven waarde E , groter wordt gekozen. In bijlage 5.14 is weergegeven hoe het aantal iteraties is berekend.

Des te groter het aantal iteraties des te beter uitkomsten convergeren naar een stabiel resultaat. De vraag is echter wanneer de uitkomsten voldoende zijn geconvergeerd. Bij een kansdichtheidsfunctie voor de waterstand is de kans op een waterstand dichtbij het gemiddelde eerder geconvergeerd naar een stabiele kans dan de kans op een waterstand die voorkomt in de staart. Convergentie hangt af van het punt waarin de convergentie wordt onderzocht. Hoe extremer de situatie des te meer random-gedrag optreedt en des te meer de kans afhangt van toevalligheden. Indien

het aantal iteraties groter wordt gekozen zullen ook voor de kansen van extremere waarden stabielere uitkomsten worden verkregen.

Om te zorgen dat er voldoende getallen voor de duinteruggang uit de staart worden gegenereerd wordt de faalkans gelijk gesteld aan de toelaatbare bezwijkkans die een duinprofiel vanuit veiligheidsoogpunt mag bezitten: 10^{-5} . Voor de maximale relatieve fout wordt 50% genomen. De betrouwbaarheid $\Phi(k)$ wordt op 95% gesteld. Dit wil zeggen dat met een betrouwbaarheid van 95% de berekende faalkans maximaal 50% afwijkt van de 'gekozen' faalkans. De berekende faalkans zal in dat geval tussen de $0,5 \cdot 10^{-5}$ en $1,5 \cdot 10^{-5}$ liggen. Dit bereik betreft de staart van de kansdichtheidsverdeling van de teruggang van het duinfront.

Kortom, het aantal iteraties voor de Monte Carlo simulaties voor de drie stormcondities wordt :

$$n > \frac{(1,96)^2}{(0,5)^2} \cdot \left(\frac{1}{10^{-5}} - 1 \right) = 154 \cdot 10^6 \quad : 5-19$$

Om bovendien de invloed van het aantal iteraties op de stabiliteit te analyseren zijn voor Hoek van Holland tien extra Monte Carlo simulaties uitgevoerd met 154.000 iteraties. Door de tien simulaties onderling te vergelijken is nagegaan of de uitkomsten naar een stabiel resultaat convergeren. Vervolgens is het gemiddelde resultaat van deze tien simulaties vergeleken met het resultaat van de simulatie met 1,54 miljoen iteraties. Zie bijlage 5.15.

Voor de met de Monte Carlo getrokken 'waterstanden' en 'extrapolatiefactor' wordt via de waterstand-duinafslag relatie de teruggang van het duinfront gesimuleerd:

$$x_i = a_0 + a_1 \cdot \zeta \cdot h + a_2 \cdot \zeta^2 \cdot h^2 = \vartheta_0 + \vartheta_1 \cdot h + \vartheta_2 \cdot h^2 \quad : 5-20$$

met: $\zeta \equiv N(1;0,06)$ en $h \equiv \text{Gumbel}(A;B)$.

De DWW heeft verschillende computermodellen tot haar beschikking om een Monte Carlo simulatie uit te voeren. Uiteindelijk moet de kansdichtheidsfunctie van de teruggang van het duinfront worden berekend. De uitvoerfile moet niet alleen een grafische weergave van de duinafslag in een histogram bevatten, maar moet ook bestaan uit een cijfermatige uitvoer, waarin de kans op een willekeurige teruggang Δx wordt weergegeven. De Monte Carlo simulatie is uitgevoerd in @RISK. Het nadeel is dat in @RISK de Gumbel-verdelingen van de waterstand niet kan worden ingevoerd.

Om dit nadeel te omzeilen is de Gumbel-verdeling $F(h)$ gelijk gesteld aan u die uniforme verdeeld is tussen nul en één. De inverse van deze functie $h = F^{-1}(u)$ levert de realisaties uit de Gumbel-verdeling. Kortom, door nu random getallen te trekken uit de uniforme verdeling kan een reeks getallen h_i worden berekend die de Gumbel-verdeling genereren. In dit geval gaat deze omrekening als volgt:

$$F(h) = e^{-e^{-\frac{h-A}{B}}} = u \quad : 5-21$$

$$h = F^{-1}(u) = A - B \cdot \ln(-\ln F) \quad : 5-22$$

Vervolgens is formule 6.22 gebruikt om de Monte Carlo simulatie voor de teruggang van het duinfront uit te voeren. De resultaten van de Monte Carlo simulatie staan gegeven in bijlage 5.16.

Schatten van het kansverdelingstype

Voor de vervolgberekeningen worden de gesimuleerde kansdichtheidsfuncties benaderd met een bekende kansdichtheidsfunctie. De gezochte stochastische variabele is een functie van een variabele die Gumbel verdeeld is en een variabele die normaal verdeeld is. Op basis van de bekende statistische kennis van de stochastische variabele kan een subjectieve schatting worden gemaakt over het verdelingstype van de stochast. Bovendien helpt de grafische weergave van de stochast bij de bepaling van het verdelingstype.

De grafische weergave van de gesimuleerde teruggang van het duinfront laat zien dat de functie net als de Gumbelverdeling wordt gekenmerkt door een kort steil front en een lange flauwe staart. De functie is scheef naar rechts. Om die reden wordt verwacht dat de duinafslag Gumbel verdeeld is. Uit de Monte Carlo simulatie is het gemiddelde en de standaardafwijking van de verdeling bekend. Met deze statistische gegevens zijn de parameters van de Gumbel-verdeling bepaald:

$$A = \mu - \gamma \cdot B \quad : 5-23$$

$$B = \sqrt{6} \cdot \frac{\sigma}{\pi} \quad : 5-24$$

met:

A, B: coëfficiënten Gumbel-verdeling

μ : gemiddelde gesimuleerde duinafslag

σ : standaardafwijking gesimuleerde duinafslag

γ : constante: 0,577

De Kolmogorov-Smirnov test vergelijkt de geschatte verdelingsfunctie met het statistische materiaal. De test geeft een indicatie van de aansluiting van het gekozen verdelingstype bij waarnemingen. De maximale afwijking tussen de waargenomen cumulatieve kans en de cumulatieve kans die met het geschatte verdelingstype wordt berekend is de toetsingsgrootheid D:

$$D = \max_{i=1}^N |S_N(x) - F_x(x)| \quad : 5-25$$

met:

$S_N(x)$: waargenomen cumulatieve kans bij duinafslag x_i

$F_x(x)$: berekende cumulatieve kans met het geschatte verdelingstype

Aangezien de parameters van de geschatte verdeling uit hetzelfde statistische materiaal als waarmee de verdeling vergeleken wordt zijn geschat is er een aangepast verwerpcriterium toegepast (namelijk in de noemer van de breuk wordt N-r, in plaats van N). De aangenomen verdelingsfunctie wordt verworpen als:

$$D > \frac{\alpha}{\sqrt{N-r}} \quad : 5-26$$

met:

D: toetsingsgrootheid

N: aantal waarnemingen

r: aantal geschatte parameters uit de statistische gegevens van de Monte Carlo simulatie

α : coëfficiënt die afhankelijk is van de betrouwbaarheidsdrempel, te weten:

P	α
0,10	1,23
0,05	1,36
0,01	1,63

Voor alle drie stormsituaties wordt de toets niet verworpen. De relatieve teruggang van het duinfront kan daarom benaderd worden met een Gumbel-verdeling. Met de volgende coëfficiënten:

Locatie	A	B
Den Helder	-15,2	6,5
IJmuiden	-17,7	6,2
Hoek van Holland	-19,9	6,1

Tabel 5-13: Coëfficiënten van de Gumbel-kansverdelingsfunctie voor locaties langs de Hollandse kust.

De negatieve waarden voor de relatieve teruggang wil zeggen dat de teruggang van het duinfront de afstand van het referentiepunt (de knik tussen het duinfront en de overige duinen) ten opzichte van de RSP-lijn niet heeft overschreden.

5.6.3 Incidentele erosie in de toekomst: Invloed klimaatsveranderingen

Een zeespiegelstijging in de toekomstige situatie heeft effect op andere hydraulische randvoorwaarden. Er kan geen definitieve uitspraak worden gedaan over de wijze waarop deze bij een bepaalde zeespiegelstijging veranderen. In het Super-Dune is een toekomstig scenario opgenomen, waarin invoergegevens behorende bij het ongunstige scenario kunnen worden opgegeven. Voor deze gegevens worden de waarden uit TAW (1995b) aangehouden.

(Bruun, 1983) Naast een effect op de hydraulische randvoorwaarden heeft een versnelde zeespiegelstijging invloed op het kustprofiel. Volgens de regel van Bruun zal het kustprofiel ten gevolge een (versnelde) zeespiegelstijging geleidelijk veranderen en zich aanpassen aan de nieuwe condities. Het profiel convergeert volgens de regel van Bruun naar een evenwichtprofiel. Er wordt aangenomen dat ten gevolge van een versnelde zeespiegelstijging het profiel zich zodanig zal aanpassen dat het zijn evenwichtsvorm behoudt en meestijgt met de zeespiegel. Om te voldoen aan de gesloten sedimentbalans moet het profiel in zijn geheel ook nog eens landwaarts verschuiven. In Figuur 5-19 is dit op grafische wijze weergegeven. Het profiel verschuift bij een zeespiegelstijging a over een afstand a omhoog en verschuift om aan de sedimentbalans te voldoen over een afstand s landinwaarts. De landwaartse verplaatsing wordt bepaald door:

$$s = \frac{l \cdot a}{h} \quad : 5-27$$

met:

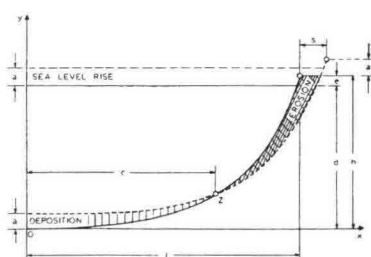
- l : lengte waarover het profiel omhoog beweegt.
- a : hoogte waarover het profiel omhoog stijgt. Deze is gelijk aan de zeespiegelstijging
- h : hoogteafstand tussen de landwaartse- en zeewaartse grens van het profielgedeelte dat omhoog beweegt

De regel van Bruun staat uitgebreid beschreven in bijlage 5.17.

Aangezien de zeespiegelstijging een geleidelijke stijging is, is een aanpassingstijdschaal niet direct uit metingen af te lezen. De tijdschaal waarop het kustprofiel zich aanpast aan de versnelde zeespiegelstijging is afhankelijk van het golf- en stormklimaat die uiteindelijk de aanpassing van de zeebodem moeten realiseren. De nieuwe evenwichtssituatie stelt zich dus niet momentaan in.

Het beginprofiel in de toekomstige situatie kan gelijk worden veronderstelt aan:

- Kustprofiel 1: het evenwichtprofiel in de toekomstige situatie.
Hier wordt aangenomen dat het evenwicht zich momentaan instelt. Het profiel verschuift met de zeespiegelstijging omhoog en wordt in zijn geheel landinwaarts verschoven. Door de landinwaartse verplaatsing bevinden de economische activiteiten zich ook verder landinwaarts. Ten opzichte van de huidige situatie zal de waardeverdelingsfunctie van het dwarsprofiel ook verder landinwaarts worden



Figuur 5-19: De regel van Bruun: een versnelde zeespiegelstijging heeft een verandering van het bodemprofiel tot gevolg: een stijging van de zeebodem en een landwaartse verplaatsing van het gehele profiel.

gedefinieerd. De totale duinbreedte wordt smaller. Het nieuwe evenwichtsprofiel is in bijlage 5.17 weergegeven.

Een nadeel is dat dit nieuwe evenwichtsprofiel niet gelijk is aan het profiel dat voor de huidige situatie is gebruikt. Daardoor is het lastig de twee profielen en de resultaten uit de optimalisatie met elkaar te vergelijken. Bovendien is niet zeker of het profiel zich al zodanig aan de geleidelijke zeespiegelstijging heeft aangepast dat het naar de evenwichtssituatie is geconvergeerd.

Echter een dergelijke profielverandering die met behulp van de regel van Bruun is voorspeld wordt op dit moment als een redelijk goede voorspelling gezien. Naast de regel van Bruun bestaan er weinig andere theorieën over profielontwikkelingen ten gevolge van zeespiegelstijging.

- Kustprofiel 2: Het beginprofiel in de huidige situatie.

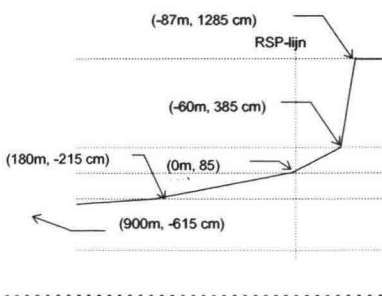
Er wordt dan aangenomen dat de geleidelijke veranderingen van het profiel en met name de landwaartse verplaatsing van het profiel door de beheerder door de tijd zijn gecorrigeerd door het toepassen van zandsuppleties. Aangezien voor de optimalisering van kosten en risico's in de toekomstige situatie pas vanaf het tijdstip $t=100$ gerekend wordt, worden deze onderhoudskosten in het model buiten beschouwing gelaten.

Een voordeel van dit beginprofiel is dat het gelijk is aan het profiel in de huidige situatie. De verschillen tussen de uitkomsten van de optimalisering in de huidige en de toekomstige situatie kunnen eenvoudig worden vergeleken. Bovendien is het realistisch te veronderstellen dat de beheerder ingrijpt om de landwaartse verplaatsing van de duinvoet tegen te gaan. Het is echter minder realistisch te veronderstellen dat ook de stijging van de zeebodem wordt tegengegaan zodat dit profielgedeelte ook gelijk blijft aan het beginprofiel in de huidige situatie.

- Kustprofiel 3: Een aangepast profiel waarbij wordt uitgegaan dat de landwaartse verplaatsing bij toepassing van de regel van Bruun wordt tegengegaan door het uitvoeren van zandsuppleties.

De regel van Bruun voorspelt dat de zeebodem de versnelde zeespiegelstijging volgt en omhoog verschuift. Het profiel behoudt zijn vorm en moet om een kloppende sedimentbalans te krijgen in zijn geheel landwaarts verplaatsen. Hier wordt aangenomen dat deze landwaartse verschuiving door de waterkeringsbeheerder door het uitvoeren van suppletiemaatregelen tegen wordt gegaan. Het actieve deel van het kustprofiel komt wel hoger te liggen maar verschuift niet landwaarts omdat de sluitende sedimentbalans door het uitvoeren van suppleties wordt gerealiseerd. De kosten die nodig zijn om de landwaartse verplaatsing tegen te gaan worden in verdere berekeningen niet meegenomen. Een voordeel van dit kustprofiel is dat de duinbreedte in het toekomstige kustprofiel gelijk blijft aan de duinbreedte van het kustprofiel in de huidige situatie. De resultaten van beide situaties blijven daardoor vergelijkbaar.

Gezien de onzekerheden in de voorspellingen ten aanzien van de aanpassingstijd van het profiel en het menselijk ingrijpen bij profielveranderingen blijkt het lastig een uitspraak te doen over het beginprofiel in de toekomstige situatie. Tijdens een overleg met de stuurgroep 'Visie Hollandse kust 2050' gaven de beheerders aan dat zijzelf op dit moment ervan uitgaan dat een landwaartse verplaatsing wordt tegen gegaan. In het vervolg wordt voor het toekomstige kustprofiel uitgegaan van kustprofiel 3, zie Figuur 5-20. De nieuwe coördinaten zijn:



Figuur 5-20: Coördinaten van het standaardprofiel.

X-coördinaat	Y-coördinaat
-250	00
-244	12850
-87	12850
-60	3850
0	850
180	-2150
900	-6150

Tabel 5-14: ASCII-invoergegevens van het standaardprofiel voor de toekomstige situatie in Super-Dune.

De effecten van een versnelde zeespiegelstijging op de hydraulische randvoorwaarden worden wel meegenomen. (TAW, 1995b) Voor de incidentele erosie in de toekomst wordt met de volgende effecten rekening gehouden:

- stijging van de waterstand met 0,85m per eeuw;
- toename golfhoogte met 10% per eeuw¹;
- geen toename golfperiode.

Ten gevolge van deze effecten verandert het geometrisch verband tussen de waterstand en de significante golfhoogte van formule 6.12. Uitgaande van een gelijkblijvend geometrisch verband zal bij een waterstandsverhoging van de 0,85m de significante golfhoogte voor respectievelijk Hoek van Holland, IJmuiden en Den Helder met ongeveer 35%, 34% en 29% toenemen. Dit komt niet overeen met de verwachte toename van 10% die in TAW (1995b) worden voorspeld.

De duinafslag voor de toekomstige situatie zijn voor de drie stormcondities met het toekomstige scenario ($\Delta h=0,85\text{m}$; $\Delta H=+10\%$; $\Delta T=0\text{s}$) van Super-Dune berekend. De resultaten zijn in Super-Dune gegeven in de figuur 'afslag na zeespiegelstijging'. De aanname dat het gehele profiel met de zeespiegelstijging omhoog beweegt beïnvloedt de afslagberekeningen. Er wordt minder afslag berekend en het afslagprofiel komt minder landinwaarts te liggen dan wanneer wordt aangenomen dat de bodem op zijn plaats blijft. In bijlage 5.19 zijn deze verschillen weergegeven.

Vervolgens is op vergelijkbare wijze als in de huidige situatie de relatie tussen de teruggang in het duinfront en de waterstand berekend. Vooraf is naar de correlatie tussen de nieuwe waterstand h_n en nieuwe significante golfhoogte H_n gekeken. Deze onafhankelijke variabelen zijn ook in de toekomstige situatie sterk gecorreleerd, zie bijlage 5.16. Het verband tussen de nieuwe waterstand h_n en de teruggang van het duinfront x_i is met *Curve Expert 3.1* onderzocht en kan goed worden beschreven met een kwadratische functie, zie vergelijking 6.13. De resultaten staan in bijlage 5.18.

5.6.4 Monte Carlo simulatie: Kansdichtheidsverdeling teruggang duinfront in de toekomst

Door de zeespiegelstijging neemt de waterstand met 0,85m toe. De kans op de nieuwe waterstand is gelijk aan de kans op de oude waterstand zonder de zeespiegelstijging. De nieuwe kansverdelingsfunctie van de waterstand is gelijk aan:

$$F(h_n > h_n) = 1 - e^{-\frac{(h_n - 0,85) - A}{B}} = 1 - e^{-\frac{h_n - A}{B}} \quad ; 5-28$$

Met A' gelijk aan A+0,85m, de coëfficiënten van de kansverdelingsfunctie zijn dan:

¹ In (TAW, 1995b) staat dat onder gemiddelde omstandigheden de significante golfhoogte met 10% toeneemt en de golfperiode ongewijzigd blijft.

Locatie	A	B
Den Helder	3,13	0,308
IJmuiden	3,0	0,326
Hoek van Holland	2,88	0,335

Tabel 5-15: Coëfficiënten van de Gumbel-kansverdelingsfunctie voor locaties langs de Hollandse kust.

Op dezelfde wijze als in sectie 5.6.2 is met een Monte Carlo simulatie de kansdichtheidsfunctie van de teruggang van het duinfront bepaald. De resultaten staan in bijlage 5.20. Ook voor deze kansdichtheidsfuncties is de verdelingsfunctie met bijbehorende parameters geschat. De geschatte Gumbel-verdeling is getoetst met de Kolmogorov Smirnov test. De geschatte verdelingstype met bijbehorende parameters wordt op grond van deze test voor alle drie de stormcondities in de toekomstige situatie niet verworpen. De coëfficiënten Gumbel-verdeling zijn:

Locatie	A	B
Den Helder	-15,21	7,03
IJmuiden	-17,74	6,71
Hoek van Holland	-19,82	6,55

Tabel 5-16: Coëfficiënten van de Gumbel-kansverdelingsfunctie voor locaties langs de Hollandse kust.

5.6.5 Conclusie berekeningen incidentele erosie

In het optimalisatie-model wordt verder gerekend met de stochastische variabele x_i . Deze variabele is Gumbel verdeeld. Met name de staart van de verdeling is belangrijk. De incidentele erosie die bij een gemiddelde storm optreedt hoeft niet noemenswaardige schade aan maatschappelijke activiteiten in de kustzone op te leveren. Bij strengere stormen neemt de mate van duinafslag toe en zal gezien de grotere teruggang van het duinfront het schadebedrag groter zijn. Strengere stormen met een grotere mate van afslag en grotere bijbehorende schadebedragen zijn daarom belangrijk in de optimalisering.

Voor de drie verschillende stormcondities zijn voor de huidige- en toekomstige situatie de verdelingstypen met bijbehorende parameters bepaald. De stochastische variabele voor de incidentele erosie geldt:

$$x_i = \underline{a} \quad : 5-29$$

met $\underline{a}$ een Gumbel-verdeelde parameter met een gemiddelde van μ_{x_i} [m] en een afwijking σ_{x_i} [m].

Hoofdstuk 6 Kustverdedigingsmaatregelen: Zandsuppleties

Inhoudsopgave

6.1 Zandsuppleties	91
6.1.1 Zandsuppleties aan de Nederlandse kust	91
6.1.2 Typen zandsuppleties	91
6.2 Kustverdedigingsmaatregelen	92
6.2.1 Optimale herhalingsijd strandsuppleties	92
6.2.2 Van aangevuld volume door zandsuppletie naar vooruitgang van de kust in meters	94
6.2.3 Kosten zandsuppletie	94
6.2.4 Kosten zandsuppletie in de toekomstige situatie	97

6 Kustverdedigingsmaatregelen: Zandsuppleties

6.1 Zandsuppleties

6.1.1 Zandsuppleties aan de Nederlandse kust

Jaarlijks wordt er ongeveer 7 miljoen m³ zand aangebracht om de erosie van de Nederlandse kust te bestrijden. Ieder jaar wordt in april/mei - direct na het stormseizoen - een kustmeting verricht om vast te stellen op welke plaatsen de kust zodanig is aangetast dat er zand moet worden opgespoten. Onder het huidige suppletiebeleid mag de TKL de BKL niet overschrijden, indien dit wel het geval is wordt overgegaan tot suppleren. Uitgangspunt daarbij is dat op die plaatsen zoveel zand wordt aangebracht dat Rijkswaterstaat vijf jaar geen omkijken heeft naar het betreffende kustvak.

In de periode voor 1990 was het suppletiebeleid met name een calamiteitenbeleid. Daar waar de stormen het ergst toesloegen werd ingegrepen. De afgelopen tien jaar richt het beleid zich op de bestrijding en voorkoming van structurele erosie en wordt incidentele afslag niet gecorrigeerd omdat het zelfherstellende vermogen van de kust doorgaans groot genoeg is om een natuurlijk herstel te realiseren. In bijlage 6.1 is een overzicht gegeven van de uitgevoerde zandsuppleties langs de Hollandse kust.

Naast de compensatie van het zandverlies als gevolg van structurele erosie in instabiele kustvakken kunnen suppleties in stabiele kustvakken dienen voor behoud of versterking van de aanwezige kustfuncties. Na de ingreep zal voor deze kustvakken de kust stabiel blijven. In een eroderend kustvak moeten zandsuppleties na verloop van tijd herhaald worden.

6.1.2 Typen zandsuppleties

(TAW, 1995b) Met een zandsuppletie wordt de zandhoeveelheid in een kustvak op kunstmatige wijze aangevuld. Er bestaan verschillende typen suppleties die gerelateerd zijn aan de plaats waar de suppletie wordt aangebracht:

- duinsuppletie: hier wordt de zandhoeveelheid van een kustvak aangevuld door een directe vergroting van het duinvolume;
- strandsuppletie: het volume van een kustvak wordt hier aangevuld door een directe vergroting van het volume van het strand;
- vooroeversuppletie: hier wordt een suppletie uitgevoerd aan de vooroever.

De laatste twee typen suppletie zijn dagelijks onderhevig aan de werking van golven en getij. Door de hierdoor optredende zandtransporten zullen de suppleties in de loop der tijd vervormen.

Het uitgangspunt bij de toepassing van een duinsuppletie is dat het zand dáár wordt aangebracht waar tijdens stormvloed-condities duinafslag plaatsvindt, zonder dat het wordt blootgesteld aan de dagelijkse werking van golven en getij. Zoals in de vorige sectie is opgemerkt wordt onder het huidige beleid incidentele erosie niet direct gecorrigeerd mits de veiligheid van het achterland tegen overstromingen niet te veel is aangetast. Bovendien wordt het in sommige gevallen bij extreme afslag nog steeds toegepast om de belangen in het duingebied te beschermen en het onderhoud te reduceren.

De klassieke opspuitmethode zorgt voor een directe vergroting van het volume van het strand. Dit is de meest toegepaste vorm van suppleren. Bij de strandsuppletie wordt het zand via leidingen op het strand gespoten. (Mulder, 1999) Het meeste



Figuur 6-1: Uitvoeren strandsuppletie.

zand verspreidt zich over een groter gebied in langsrichting, maar blijft wel in de ondiepe kustzone aanwezig. De kosten van opspuiten bedragen zo'n f10,- per m³.

De toepassing van vooroeversuppletie is als vorm van zandsuppletie sterk in opkomst. Rijkswaterstaat brengt steeds meer zand aan onder water, vlak voor de kust.

Onderzoek heeft aangetoond dat er een preventieve werking van uitgaat: stranden eroderen minder snel wanneer er op de 'vooroever' van tijd tot tijd zand wordt gestort. De nieuwe methode is met een kostprijs van f5,- per m³ goedkoper dan de klassieke opspuitmethode. Naast een aantrekkelijk alternatief is onderwatersuppletie noodzakelijk in verband met de afkalving van het strand als gevolg van zandverlies vlak voor de kust. Door met het uitvoeren van vooroeversuppleties het zandverlies op de vooroever tegen te gaan wordt het 'fundament' van het strand onderhouden en wordt voor een groot deel afkalving van het strand voorkomen.

(Mulder, 1999) Onderwatersuppleties zijn op dit moment al in beperkte mate toegepast en in alle gevallen in de ondiepe kustzone. Er zijn daarbij geen significante verliezen opgetreden naar dieper water. Het gesuppleerde zand wordt relatief snel opgenomen in het banksysteem. Er geldt echter wel dat hoe dieper er gesuppleerd wordt hoe trager het transport in landwaartse richting zal verlopen. Andere voordelen van onderwatersuppleties zijn dat het minder overlast oplevert voor andere functies, dat het voor compensatie van kustlijn-achteruitgang een efficiënte methode is en dat het toepasbaar is op grote delen van de gehele Nederlandse kust, met uitzondering van kustvakken met getijgeulen.

De aanbevelingen die voor de meest efficiënte uitvoeringswijze worden gedaan zijn:

- breng het zand zo dicht mogelijk waar het nodig is vanuit oogpunt van veiligheid of daar waar het vanuit de beheersoptie wenselijk is;
- suppleer waar het moet op het strand, waar het kan onder water;
- suppleer onder water in de ondiepe kustzone (niet dieper dan NAP -8m) en laat natuurlijke processen het zand herverdelen binnen het kustsysteem;

Kortom de typen zandsuppleties verschillen van elkaar: de plaats waar het zand wordt opgebracht verschilt, de kosten per m³ variëren en de effectiviteit verschilt.

Onderwatersuppleties lijken de toekomst te hebben. In dit onderzoek wordt gebruik gemaakt van het suppletiebestand van RIKZ, de gegevens over de kosten van deze suppleties en het onderzoek dat door het RIKZ is uitgevoerd om de herhalingsstijden van zandsuppleties te optimaliseren. Aangezien er weinig gegevens beschikbaar zijn over uitgevoerde vooroeversuppleties zijn in het vervolg alleen strandsuppleties beschouwd.

6.2 Kustverdedigingsmaatregelen

6.2.1 Optimale herhalingsstijd strandsuppleties

(RIKZ, 1999b) Nadat de regering in 1990 heeft besloten de kusterosie te bestrijden met zandsuppleties is door Rijkswaterstaat een meerjarenschema opgesteld om de investeringen in de tijd te spreiden. Om diverse redenen is daarbij uitgegaan van een gemiddelde herhalingsstijd van 5 jaar. De werkelijke gemiddelde herhalingsstijden wijken hiervan af. In bijlage 6.1 staan gegevens over de gemiddelde herhalingsstijd van suppleties voor verschillende kustdelen die op basis van uitgevoerde suppleties zijn berekend. De gemiddelde herhalingsstijd van deze gemiddelde herhalingsstijden per kustdeel is:

$$\bar{t} = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{t}_i}{n} = 3,4 \text{ jaar} \quad : 6-1$$

met:

t_i: gemiddelde herhalingsstijd kustvak i

n: aantal kustvakken waarover de gemiddelde herhalingsstijd bekend is

n: aantal kustvakken waarover de gemiddelde herhalingstijd bekend is
De standaardafwijking bedraagt:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (\bar{t} - t_i)^2}{n - 1}} = 1,0 \text{ jaar} \quad : 6-2$$

De optimale herhalingstijd van een suppletie is afhankelijk van diverse factoren. In dit onderzoek is de optimale herhalingstijd de herhalingstijd waarbij de totale kosten aan schade aan maatschappelijke functies en aan kustonderhoudsinvesteringen minimaal zijn. Het is logisch te veronderstellen dat de optimale herhalingstijd voor de verschillende kustgebieden verschilt.

De suppletiehoeveelheid wordt bepaald door de autonome erosie, de effectiviteit, de vakgrootte en de herhalingstijd:

- *Autonome erosie:* In RIKZ (1999b) wordt de autonome erosie die door het uitvoeren van zandsuppletie wordt bestreden gelijk gesteld aan de suppletie-intensiteit. Dit is de gemiddelde suppletiehoeveelheid per jaar per strekkende meter. Er wordt dus aangenomen dat de jaarlijks gesuppleerde hoeveelheid zand door de jaarlijkse structurele erosie uit de kustzone verdwijnt. Als verondersteld wordt dat deze hoeveelheden goed zijn geschat dan is de effectiviteit van de suppletie hierbij inbegrepen.
- *Effectiviteit:* Structurele erosie kan niet worden weergegeven door een deterministische waarde. Voor de verdeling van de structurele erosie is in sectie 9.2.1 een normale verdeling aangenomen met een gemiddelde μ en een standaardafwijking σ . Aangezien de variatie rond het gemiddelde van de structurele erosie bekend is kan in principe voor deze variatie in de strandsuppletie gecorrigeerd worden. De effectiviteit van de suppletie wordt hierdoor groter.

(RIKZ, 1999b) Bovendien varieert de effectiviteit bij een grotere of kleinere kustuitbouw. De verandering van effectiviteit door vergroting of verkleining van de herhalingstijd is afhankelijk van de kustvorm en de aanwezige verdedigingsconstructies. De grootste veranderingen vinden plaats bij strandhoofden met diepe getijgeulen en steile vooroevers, zie Tabel 6-1.

De effectiviteit bij een 'normaal' kustprofiel wordt op nul gesteld. Er wordt aangenomen dat de verhouding tussen de breedte en de kustlengte waarover gesuppleerd wordt klein is, waardoor na zijdelings herverdelen van het zand het zand nog steeds in het betreffende kustvak ligt. Dit impliceert een 100% effectieve suppletie.

Effectiviteit van boven naar beneden steeds minder effectieve suppleties	Kustgebieden
Normaal kustprofiel zonder getijgeul en zonder strandhoofden	Kustgebied IV
Kustprofiel met strandhoofden doch geringe getijstroom	Kustgebied III, Kustgebied V
Kustprofiel met strandhoofden en getijstroom	Kustgebied I, Kustgebied II
Kustprofiel met strandhoofden en een diepe getijgeul met steile vooroever en bij lokale erosie door muiwerking	Kustgebied III

Tabel 6-1: Effectiviteit van suppleties bij verschillende kustgebieden.

- *Vakgrootte:* Dit betreft de lengte van het kustvak in langsrichting van de kust waarin gesuppleerd wordt.
- *Herhalingstijd:* (RIKZ, 1999b) Een kleine herhalingstijd kan enerzijds gunstig zijn vanuit het oogpunt van voorinvestering. Er wordt pas geïnvesteerd op het moment dat het echt noodzakelijk is. Het effect van voorinvesteren is afhankelijk

van de rentevoet¹. Anderzijds is een grote herhalingstijd aantrekkelijk doordat de vaste kosten gespreid worden over een groter suppletievolume. Een grotere herhalingstijd leidt echter bij sommige kustgebieden tot een lagere effectiviteit en is daarom minder gunstig.

De herhalingstijd heeft ook invloed op verschillende functies in de kustzone. Voor strandrecreatie is enerzijds een grote herhalingstijd gunstig. Naast minder frequente hinder levert een grote herhalingstijd tevens een gemiddeld breder strand op. Anderzijds levert een grote herhalingstijd ook een grote fluctuatie van de strandbreedte op en ontstaat er veel stuifoverlast vanwege het aanvankelijke brede droge stand. Voor de ecologie is een lange herhalingstijd overwegend gunstig, omdat flora en fauna een langere herstelperiode krijgen, er is meer zandverstuiving en de natuurlijke dynamiek in de kustzone neemt toe.

6.2.2 Van aangevuld volume door zandsuppletie naar vooruitgang van de kust in meters

Het effect van zandsuppleties is dat de kust zeewaarts wordt verschoven doordat op kunstmatige wijze de hoeveelheid zand wordt aangevuld. De strandsuppleties zijn uitgedrukt in volumes. Om te bepalen over welke afstand de kust zeewaarts wordt verplaatst is een omrekening van suppletievolume naar kustuitbouw in meters nodig.

Door het zandvolume eerst te delen door de lengte van het kustdeel waarin de suppletie wordt uitgevoerd wordt de volumeverandering per strekkende meter kust in het dwarsprofiel berekend. Met het uitvoeren van suppleties wordt de structurele erosie bestreden. In sectie 5.2.5 is een omrekenformule aangenomen om de berekende structurele erosie in m³ per strekkende meter per jaar om te rekenen naar kustachteruitgang in meters per jaar. Aangezien het volume zand dat door structurele erosie verloren gaat wordt aangevuld door de suppleties wordt dezelfde omrekenformule gebruikt. De kustuitbouw in meters kan worden berekend door de volumeverandering per strekkende meter te delen door de

conversiefactor = $Q \cdot 4 \cdot \text{profielhoogte}$.

De suppletie komt op 0,4^{de} deel van het profiel terecht. Deze aanname wijkt iets af van de aanvankelijke beperking tot strandsuppleties, waar de suppletie uitsluitend op het strand wordt uitgevoerd.

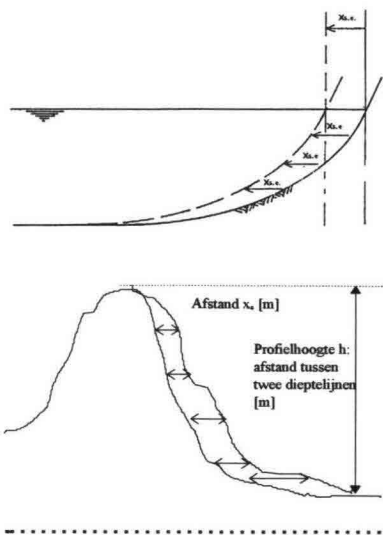
Kustgebiedsindeling	Grensdiepte [m]	Duinhoogte [m]	Profielhoogte [m]	Conversiefactor [m]
Kustgebied I	NAP -7m	NAP +13,2m	20,2m	8,1m
Kustgebied II	NAP -7m	NAP +14,6m	21,6m	8,6m
Kustgebied III	NAP -7m	NAP +16,6 m	23,6m	9,4m
Kustgebied IV	NAP -5m	NAP +17,7m	22,7m	9,1m
Kustgebied V	NAP -7m	NAP +12,3m	19,3m	7,7m

Tabel 6-2: Grensdiepten, duinhoogten, profielhoogten en conversiefactor.

6.2.3 Kosten zandsuppletie

Met de gegevens uit RIKZ (1999b) en een werkvoorstel voor suppleties in 2000, (RIKZ, 1999c), zijn de kosten voor strandsuppleties geanalyseerd. De totale kosten per strekkende meter kust zijn op te splitsen in vaste aanvangskosten en variabele kosten per meter kustuitbouw. Hoe groter de herhalingstijd, hoe groter de hoeveelheid zand per suppletie hoe lager de gemiddelde kosten per meter. Dit komt doordat de relatief hoge aanvangskosten over een groter volume gespreid worden.

¹ Bij een hoge rentevoet is voorinvesteren minder gunstig. Indien vooraf wordt geïnvesteerd kan het bedrag niet als rentedragend vermogen op een rendementsrekening worden gezet. Korte herhalingstijd is bij een hoge rentevoet aantrekkelijk.



Figuur 6-2: Omrekening naar vooruitgang van de kustlijn in meters.

In RIKZ (1999b) en het werkvoorstel zijn de totale kosten van suppleties gerelateerd aan de suppletievolumes voor verschillende uitgevoerde suppleties. Bovendien zijn in RIKZ (1999b) de totale kosten gesplitst in constante kosten en variabele kosten, waardoor inzicht in de grootte van de aanvangskosten per suppletie ontstaat.

(*Staatscourant*, 2000) De gemiddelde kosten van een strandsuppletie per kubieke meter liggen rond de 10-11 gulden. Deze kosten bestaan uit de uitbestedingskosten. Soms wordt een extra toeslag in rekening gebracht voor directe uitvoeringskosten. De gemiddelde kosten berekend uit de gegevens van RIKZ (1999b) komen goed overeen met dit bedrag van 10-11 gulden (zie grafiek bijlage 6.2) De gemiddelde kosten berekend met de gegevens uit het suppletievoorstel 2000 (RIKZ, 1999c) wijken hiervan af. Dit gemiddelde ligt rond 14 gulden per kubieke meter (zie grafiek bijlage 6.3). Het is enigszins vreemd dat in het voorstel de gemiddelde kosten zoveel hoger liggen dan de vuistregel van 10-11 gulden per kuub. De kosten per suppletie verschillen echter per kustvak. Het kan zijn dat de geplande suppleties in 2000 op minder bereikbare plaatsen moeten worden uitgevoerd, waardoor de verwachte gemiddelde kosten hoger uitvallen.

Om de reden dat de kosten in RIKZ (1999b) zijn gesplitst in constante kosten en variabele kosten en het feit dat de gemiddelde kosten beter overeenkomen met datgene dat op grond van de vuistregel verwacht mag worden is in het vervolg verder gerekend met de gegevens uit RIKZ (1999b).

Er wordt aangenomen dat het verband tussen de kosten per strekkende meter kust en de kustuitbouw een lineair verband is:

$$\underline{K_T} = \underline{K_C} + \underline{K_V} \cdot \underline{x_{suppletie}} \quad : 6-3$$

met:

$\underline{K_T}$: stochastische variabele voor de totale kosten suppletie [Fl/m]

$\underline{K_C}$: stochastische variabele voor de constante kosten per strekkende meter kust [Fl/m]

$\underline{K_V}$: stochastische variabele voor de variabele kosten per strekkende meter kust per meter kustuitbouw [Fl/m/m]

$\underline{x_{suppletie}}$: afstand waarover gesuppleerd wordt [m]

De afstand $\underline{x_{suppletie}}$ waarover gesuppleerd wordt is afhankelijk van de snelheid waarmee structurele erosie optreedt. De afstand $\underline{x_{suppletie}}$ wordt met behulp van de stochastische variabele van structurele erosie bepaald:

$$\underline{x_{suppletie}} = \underline{b} \cdot T_h \quad : 6-4$$

$\underline{b}$: verwachte structurele erosie [m/jr], zie $\underline{b}$ in formule 5.8 van sectie 5.3.3

T_h : herhalingstijd zandsuppletie [jr]

Voor 7 locaties langs de Hollandse kust zijn de suppletiekosten in RIKZ (1999b) uitgesplitst naar constante- en variabele kosten. De constante kosten zijn gedeeld door de kustlengte van het kustdeel waarover gesuppleerd is. Voordat de variabele kosten per strekkende meter kust per meter kustuitbouw zijn berekend is per suppletie de kustuitbouw in meters via de omrekenformule uit sectie 6.2.2 bepaald. Vervolgens zijn de variabele kosten gedeeld door de kustlengte van het kustdeel waarover gesuppleerd en de kustuitbouw in meters, zie bijlage 6.2.

Uit de constante kosten per strekkende meter kust is het gemiddelde en de standaardafwijking bepaald:

gemiddelde $K_c = 280$ Fl/m

standaardafwijking $K_c = 154$ Fl/m

Ook voor de variabele kosten per strekkende meter kust per meter kustuitbouw is het gemiddelde en de standaardafwijking bepaald:

gemiddelde $K_v = 75 \text{ Fl/m/m}$

standaardafwijking $K_v = 7 \text{ Fl/m/m}$

Om de mate van onzekerheid mee te nemen is op grond van het beperkt aantal waarnemingen gekozen de constante- en variabele kosten met een driehoeksverdeling te benaderen. De drie parameters van deze verdeling zijn de meest optimistische (A), de meest reële (B) en de meest pessimistische schatting van de kosten (C). De discontinue kansdichtheidsverdeling past bij de suppletieactiviteit. Indien extra inspanning nodig is doordat op een minder makkelijke bereikbare plaats moet worden gesuppleerd zijn de kosten hoger.

Voor de meest reële schatting van de kosten wordt het gemiddelde van de constante kosten en het gemiddelde van de variabele kosten genomen. Er is aangenomen dat de driehoeksverdeling symmetrisch is, waarbij het gemiddelde $\pm$ de grootste waargenomen afwijking ten opzichte van het gemiddelde de overige twee parameters voor de driehoeksverdeling opleveren, zie de gegevens in bijlage 6.2.

Het gemiddelde en de variantie van de driehoeksverdeling zijn te berekenen met:

$$\mu_K(K) = \frac{A + B + C}{3} \quad : 6-5$$

$$\sigma_K^2(K) = \frac{1}{18} \cdot (A^2 + B^2 + C^2 - A \cdot B - A \cdot C - B \cdot C) \quad : 6-6$$

De parameters voor de driehoeksverdelingen en het gemiddelde en de standaardafwijking zijn in de onderstaande Tabel gegeven.

Huidige situatie	Parameter A – meest optimistische schatting van de kosten	Parameter B – meest reële schatting van de kosten	Parameter C – meest pessimistische schatting van de kosten	Gemiddeld e μ_K	Standaardafwij- king σ
Constante kosten	55	280	505	280	92
Variabele kosten	66	75	84	75	4

Tabel 6-3: Parameters van de driehoeksverdeling voor de constante- en variabele kosten in de huidige situatie.

De kansdichtheidsverdeling ziet er als volgt uit:

Voor $K \leq A$: 0

Voor $A \leq K \leq B$: $\frac{(K - A)^2}{(A - B) \cdot A - C}$

Voor $B \leq K \leq C$: $\frac{B - A}{C - A} + \frac{-K(K - 2C) + B(B - 2C)}{(A - C) \cdot (B - C)}$

Voor $K > C$: 0

Hoewel de driehoeksverdeling een begrensde verdeling is, is er altijd een kans aanwezig dat de kosten in de toekomst een keer boven de opgelegde grenzen uitkomen.

Kortom het verband tussen de kosten de kustuitbouw is beschreven met:

$$K_T = K_C + K_v \cdot X_{\text{suppletie}} \quad : 6-7$$

met K_C en K_v volgens een driehoeksverdeling met de parameters uit Tabel 6-3 verdeeld.

6.2.4 Kosten zandsuppletie in de toekomstige situatie

Niet alleen de economische waarde van functies in de kustzone zullen in de toekomst hoger zijn, ook de kosten voor de verdedigingsmaatregelen zullen stijgen. De kosten op $t=0$ worden door K_0 beschreven. De toename van de kosten in de tijd wordt uitgedrukt in een groeivoet, de rentevoet vermindert met de reële rentevoet:

$$\frac{dK}{dt} = (\gamma - r) \cdot K \quad : 6-8$$

$$K = K_0 \cdot e^{(\gamma-r) \cdot t} \quad : 6-9$$

met:

K : kosten op $t=100$, toekomstige situatie

K_0 : kosten op $t=0$

γ : rentevoet, 8%

r : reële rentevoet = rentevoet-inflatiepercentage = 8% - 3% = 5%

$\gamma-r$: groeivoet kapitaal

Dit geeft: $K=20,1 \cdot K_0$: 6-10

Dat wil zeggen dat in 100 jaar de kosten met een factor 20 toenemen.

Voor de toekomstige situatie wordt het verband tussen de kosten per strekkende meter kust en de kustuitbouw in meters gegeven door:

$$K_T = K_C + K_V \cdot x_{\text{suppletie}} \quad : 6-11$$

met K_C en K_V volgens de driehoeksverdeling verdeeld. De parameters voor deze verdeling staan in Tabel 6-4.

Toekomstige situatie	Parameter A – meest optimistische schatting van de kosten	Parameter B – meest reële schatting van de kosten	Parameter C – meest pessimistische schatting van de kosten	Gemiddeld μ_K	Standaardafwijking σ
Constante kosten	1106	5628	10150	5628	1846
Variabele kosten	1327	1508	1688	1508	74

Tabel 6-4: Parameters van de driehoeksverdeling voor de constante- en variabele kosten in de toekomstige situatie.

Hoofdstuk 7 Randvoorwaarde: Veiligheidsafstand in kustprofiel

Inhoudsopgave

7.1 Berekening randvoorwaarde veiligheidsafstand	101
7.2 Invoergegevens voor Super-Dune berekeningen	101
7.2.1 Super-Dune invoergegevens	101
7.2.2 Rekenpeil en significante golfhoogte	102
7.2.3 Korreldiameter duinzand	102
7.3 Randvoorwaarde model: Veiligheidsafstand in kustprofiel	102
7.3.1 Randvoorwaarde veiligheidsafstand huidige situatie	102
7.3.2 Randvoorwaarde veiligheidsafstand toekomstige situatie	104

7 Randvoorwaarde: Veiligheidsafstand in kustprofiel

7.1 Berekening randvoorwaarde veiligheidsafstand

Voor veiligheidsbeoordeling van een dwarsprofiel is het belangrijk dat de mate van duinafslag onder ontwerpcondities wordt gekwantificeerd. In sectie 2.1.1 is de veiligheidsafstand X_{veilig} aan de orde gekomen. Dit is de afstand waarover de kust zich vanuit veiligheidsoogpunt maximaal mag terugtrekken. Deze afstand is berekend op basis van incidenteel kustgedrag. Om deze afstand te berekenen zijn afslagberekeningen onder ontwerpcondities in Super-Dune uitgevoerd. Per kustvakgebied zijn hiervoor hiertoe de invoergegevens onder ontwerpomstandigheden bepaald. Vervolgens is met behulp van de afmetingen van het kritieke grensprofiel en de berekende ontwerpafslag de veiligheidsafstand berekend.

7.2 Invoergegevens voor Super-Dune berekeningen

7.2.1 Super-Dune invoergegevens

Voor de berekening van de ontwerp-afslag wordt hetzelfde afslagmodel Super-Dune gebruikt als bij de berekening van incidentele erosie (zie sectie 5.4 en 5.5). (*Koster, 1997a*) In Super-Dune worden voor de berekening van de ontwerpafslag rekenwaarden ingevoerd met 'ingebakken veiligheidscoëfficiënten'. Deze veiligheidscoëfficiënten staan gedefinieerd in de leidraad Duinafslag. In plaats van het ontwerppeil behorende bij een overschrijdingskans van 10^{-5} wordt een hogere waterstand, het rekenpeil ingevoerd, voor de korreldiameter wordt met een rekendiameter gewerkt en voor onzekerheden in overige parameters wordt een toeslag boven op de berekende basisafslag in rekening gebracht. De toegepaste rekenwaarden zijn gebaseerd op probabilistische sommen die in het verleden zijn gemaakt.

Kortom de berekening is versimpeld door op grond van probabilistische Niveau II-berekeningen¹ veiligheidsfactoren te kiezen die zijn gekozen om de verdere berekeningen eenvoudig op Niveau I te maken. (*Koster, 1997a*) Het resultaat van Super-Dune benadert het resultaat van een probabilistische som redelijk goed. Een dergelijke parametrisatie is geldig binnen een bepaald bereik. De rekenwaarden die in de leidraad zijn vastgesteld gelden voor de hele duinenkust van Nederland. De rekenwaarden die destijds zijn bepaald worden ook in de huidige en toekomstige situatie aangehouden. De veranderingen die sinds die tijd zijn opgetreden betreffen onder andere de toename van het ontwerppeil door zeespiegelstijging. Door de toename van het ontwerppeil is de bijbehorende significante golfhoogte ook toegenomen.

In de ontwerpafslagberekeningen zijn de volgende invoergegevens aangehouden:

- voor het beginprofiel is het standaardprofiel aangehouden, zie sectie 5.5.1.
- voor de golfperiode is $T_p = 12s$ genomen.
- voor de overige parameters zijn afwijkende rekenwaarden ingevoerd, namelijk:
 - het rekenpeil voor het stormvloedpeil bij een 10^{-5} -storm en de daarbij behorende significante golfhoogte
 - een rekenwaarde voor de korreldiameter

¹ Niveau-berekeningen zie sectie 4.2.3.

7.2.2 Rekenpeil en significante golfhoogte

Voor het stormvloedpeil wordt een rekenpeil aangehouden. Het rekenpeil 2000 is gedefinieerd als zijnde het Toetspeil 2000 +2/3 maal de decimeringshoogte. Voor het Toetspeil 2000 is het ontwerp-peil uit 1985 als basis genomen. De hoogwaterstijging in de periode 1985-2000 is daarin vervolgens verdisconteerd. Onder decimeringshoogte wordt het hoogteverschil tussen de waterstand behorende bij een 10-maal zo kleine overschrijdingsfrequentie als die van het ontwerppeil én het ontwerppeil.

De waarden voor de ontwerp-peilen uit 1985 en de significante golfhoogten overgenomen uit het hydraulisch randvoorwaardenboek (*DWW, 1996*). Het rekenpeil en de significante golfhoogte staan per kustgebied in de onderstaande tabel:

Kustgebieden	Toetspeil 2000 [m] boven NAP	Decimeringshoogte [m]	Rekenpeil 2000 [m] boven NAP	H _{0.5} [m]
Kustgebied I	4,55	0,47	4,85	9,55
Kustgebied II	4,60	0,54	4,95	9,40
Kustgebied III	5,00	0,71	5,45	8,80
Kustgebied IV	5,20	0,85	5,75	8,55
Kustgebied V	5,15	0,80	5,70	8,5

Tabel 7-1: Invoergegevens voor berekening veiligheidsafstand.

7.2.3 Korreldiameter duinzand

Voor de berekening van de veiligheidsafstand wordt met de rekenwaarde voor de korreldiameter gerekend. In deze rekenwaarde is een veiligheidsfactor opgenomen. Met behulp van de volgende formule is de rekenwaarde berekend:

$$D_{\text{reken}} = \mu_{D_{50}} - 5 \cdot \frac{(\sigma_{D_{50}})^2}{\mu_{D_{50}}} \quad : 7-1$$

In Tabel 7-2 zijn de gemiddelde en de standaardafwijking van de korreldiameter en rekenwaarde per kustgebied en de totale kust gegeven.

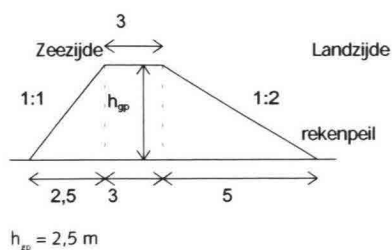
Kustgebieden	Gemiddelde rekendiameter [μm]	Standaarddeviatie rekendiameter [μm]
Kustgebied I	246	38
Kustgebied II	247	26
Kustgebied III	227	23
Kustgebied IV	210	19
Kustgebied V	209	21
Hollandse kust	220	26

Tabel 7-2: Gemiddelde rekendiameter en standaardafwijking in 5 kustgebieden.

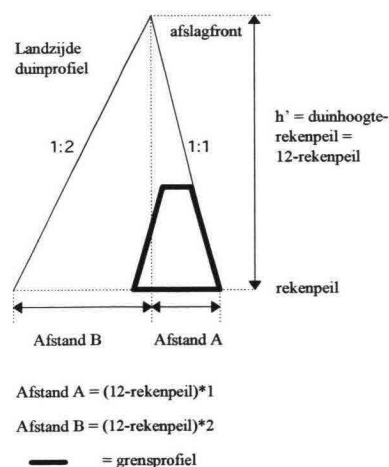
7.3 Randvoorwaarde model: Veiligheidsafstand in kustprofiel

7.3.1 Randvoorwaarde veiligheidsafstand huidige situatie

(*Velden, 1995*) Onder ontwerpomstandigheden kan in Nederland een teruggang van het duinfront in de orde van grootte van 80 tot 100 meter worden verwacht. De teruggang vindt in een relatief kort tijdsbestek (enkele uren) plaats. In die tijd wordt ongeveer 400m³ zand per strekkende meter duinlengte van de duinen naar dieper water getransporteerd.



Figuur 7-1: Minimale grensprofiel dat boven het rekenpeil aanwezig moet zijn.



Figuur 7-2: Minimale grensprofiel in landwaartse gedeelte van het dwarsprofiel.

Voor de vijf representatieve kustgebieden staan de resultaten van de duinafslagberekeningen onder toetscondities gegeven in Tabel 7-3. De ontwerpafslag is veel groter dan de afslag die ooit heeft plaats gevonden. Tijdens de stormvloedramp in 1953 trokken de duinen zich 20 meter terug en ongeveer 100m³/m zand sloeg van de duinen af naar de dieper gelegen vooroever.

De ontwerpafslagberekeningen zijn samen met het standaardprofiel en de drie breedte-klassen (zie sectie 5.5.1) gebruikt om de veiligheidsafstand te bepalen. De veiligheidsafstand is berekend op duinhoogte. De breedte van dit duingebied is op duinhoogte-niveau, $X_{\text{breedte_duinhoogte}}$ bedraagt:

$$X_{\text{breedte_duinhoogte}} = X_{\text{breedte}} - (X_{\text{strand}} + X_{\text{duinfront}} + X_{\text{landzijdefront}}) \quad : 7-1$$

met:

X_{breedte} : drie breedte-klassen van het standaardprofiel, respectievelijk 250m, 1250m, 3000m

X_{strand} : breedte die door het strand (60m) wordt ingenomen

$X_{\text{duinfront}}$: breedte die door het duinfront (27m) wordt ingenomen

$X_{\text{landzijdefront}}$: breedte die door het landzijdefront (18m) wordt ingenomen.

Onder de veiligheidsafstand wordt de afstand zeewaarts van het duingebied dat gereserveerd is voor het kritieke grensprofiel en de 10⁻⁵-afslag tot aan de overgangsknik van het duinfront met de overige duinen verstaan. Zie de figuur in bijlage 7.1. Deze afstand wordt berekend door de teruggang van het duinfront, x_i bij een 10⁻⁵-storm van de hierboven berekende de $X_{\text{breedte_duinhoogte}}$ af te trekken.

$$X_{\text{veilig}} = X_{\text{breedte_duinhoogte}} - X_i \quad : 7-2$$

De veiligheidsafstanden vanaf het referentiepunt (de overgangsknik tussen het duinfront en de overige duinen) tot aan het gereserveerde profielgedeelte voor de vijf kustgebieden zijn gegeven in onderstaande tabel.

Kustgebieden	Rekenpeil 2000 [m] boven NAP	H _{os} [m]	D-reken [μm]	Teruggang duinfront, ΔX [m]	X _{veilig 1}	X _{veilig 2}	X _{veilig 3}
Kustgebied I	4,85	9,55	246	41,6	103	1103	2858
Kustgebied II	4,95	9,4	247	43,9	101	1101	2856
Kustgebied III	5,45	8,8	227	62,4	83	1083	2838
Kustgebied IV	5,75	8,55	210	76,7	68	1068	2823
Kustgebied V	5,6	8,5	209	72,6	72	1072	2827

Tabel 7-3: Veiligheidsafstand en teruggang duinfront bij duinafslag onder ontwerpomstandigheden.

Er is geverifieerd of in het duinprofiel landwaarts van het gereserveerde deel voor de 10⁻⁵-afslag voldoende ruimte aanwezig is voor het minimale grensprofiel-volume van 16,9m³/m (zie Figuur 7-1). Daarvoor worden de afmetingen en de grootte van het profiel landwaarts van de 10⁻⁵-afslaglijn berekend, zie Figuur 7-2 en bijlage 7.1. De berekeningen in Tabel 7-4 laten zien dat in de huidige situatie aan de veiligheidsvoorwaarde wordt voldaan. Het profiel is ruim genoeg om het grensprofiel te bergen.

Kustgebieden	Afstand A [m]	Afstand B [m]	Afstand _{tot} [m]	h', hoogte boven rekenpeil [m]	Profielvolumen [m ³ /m]
Kustgebied I	7,15	14,3	21,5	7,2	76,7
Kustgebied II	7,05	14,1	21,2	7,1	74,6
Kustgebied III	6,55	13,1	19,7	6,6	64,4
Kustgebied IV	6,25	12,5	18,8	6,3	58,6
Kustgebied V	6,4	12,8	19,2	6,4	61,4

Tabel 7-4: Afmetingen profiel landwaarts van het 10⁻⁵-afslagfront.

7.3.2 Randvoorwaarde veiligheidsafstand toekomstige situatie

Om de veiligheidsafstand in de toekomst te berekenen moeten veranderingen in de hydraulische randvoorwaarden worden doorgevoerd. In sectie 5.6.3 zijn daarvoor waarden aangehouden volgens de richtlijnen in de leidraad van TAW (1995b). In deze leidraad zijn de uitgangsparameters voor de ontwerpcondities gegeven, deze zijn als volgt:

- stijging van het rekenpeil met 1,5m per eeuw;
- toename golfhoogte met 8% per eeuw;
- toename golfperiode met 1 seconde per eeuw.

In sectie 5.6.3 is aangegeven dat het profiel in de toekomstige situatie zal veranderen. Er is aangenomen dat de zeebodem de zeespiegelstijging zal volgen. Het nieuwe profiel uit Figuur 5.20 wordt voor de berekening van de veiligheidsafstand in de toekomstige situatie meegenomen.

In de volgende tabel staan de randvoorwaarden voor de toekomstige situatie.

Kustgebieden	Rekenpeil 2000 [m] boven NAP	H ₀₅ [m]	D-reken [μm]	Teruggang duinfront, ΔX _e [m]	X _{veilig 1} [m]	X _{veilig 2} [m]	X _{veilig 3} [m]
Kustgebied I	6,35	10,3	246	61,1	84	1084	2839
Kustgebied II	6,45	10,2	247	63,8	81	1081	2836
Kustgebied III	6,95	9,5	227	84,5	61	1061	2816
Kustgebied IV	7,25	9,2	210	100,5	45	1045	2800
Kustgebied V	7,1	9,2	209	96,4	49	1049	2804

Tabel 7-5: Teruggang duinfront bij duinafslag onder ontwerpomstandigheden in de toekomstige situatie.

De ruimte voor toegestane dynamiek die vanuit veiligheidsoogpunt is toegestaan wordt in de toekomstige situatie onder strengere condities kleiner.

Voor de toekomstige situatie is bovendien gekeken of het vereiste profiel nog aan de landzijde van het 10⁻⁵-afslagfront aanwezig is. Dat blijkt inderdaad het geval te zijn. Zie Tabel 7-6.

Kustgebieden	Afstand A [m]	Afstand B [m]	Afstand _{tot} [m]	h', hoogte boven rekenpeil [m]	Profielvolumen [m ³ /m]
Kustgebied I	6,5	13	19,5	6,5	63,4
Kustgebied II	6,4	12,8	19,2	6,4	61,4
Kustgebied III	5,9	11,8	17,7	5,9	52,2
Kustgebied IV	5,6	11,2	16,8	5,6	47,0
Kustgebied V	5,8	11,5	17,3	5,8	49,6

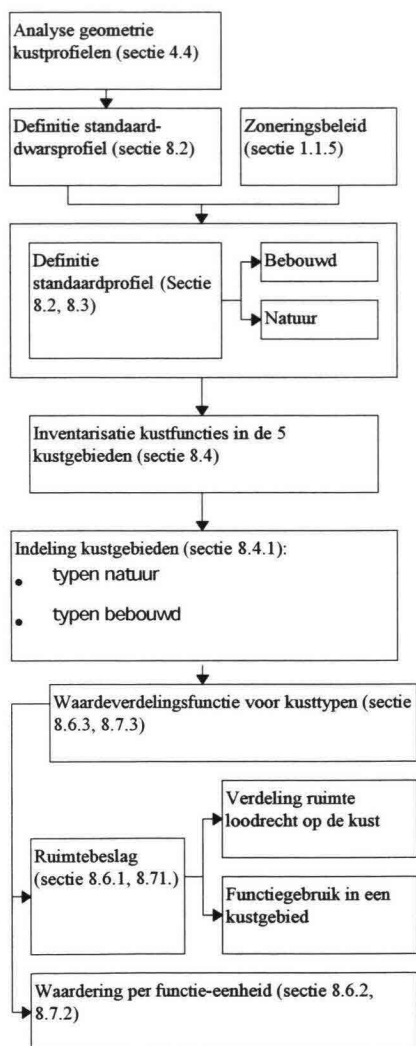
Tabel 7-6: Afmetingen profiel landwaarts van het 10⁻⁵-afslagfront in de toekomstige situatie.

Hoofdstuk 8 Economisch model: ruimtebeslag en waardering in dwarsprofielen

Inhoudsopgave

8.1 Ruimtebeslag en waardering: een statische momentopname of een ontwikkeling in de tijd?	107
8.2 Standaarddwarsprofielen	108
8.3 Dwarsprofielen 'bebouwd' en 'met natuur'	108
8.3.1 Bebouwd	109
8.3.2 Natuur	110
8.4 Inventarisatie ruimtebeslag langs de Hollandse kust	112
8.4.1 Bebouwing en natuur en landschap in kustgebied I	112
8.4.2 Bebouwing en natuur en landschap in kustgebied II	112
8.4.3 Bebouwing en natuur en landschap in kustgebied III	112
8.4.4 Bebouwing en natuur en landschap in kustgebied IV	113
8.4.5 Bebouwing en natuur en landschap in kustgebied V	114
8.4.6 Conclusies en verwachte toekomstige ontwikkelingen	115
8.5 Ruimtebeslag en waardering	116
8.5.1 Ruimtebeslag	116
8.5.2 Waardering	116
8.6 Dwarsprofielen: bebouwd	117
8.6.1 Verdeling van maatschappelijke activiteiten over het dwarsprofiel	117
8.6.2 Waardering van maatschappelijke activiteiten over het dwarsprofiel	118
8.6.3 Waardeverdelingsfunctie van maatschappelijke activiteiten over het dwarsprofiel	119
8.6.4 Ruimteverdeling en waardering van maatschappelijke activiteiten over het dwarsprofiel in de toekomstige situatie	120
8.7 Dwarsprofielen: natuur, extensieve recreatie en waterwinning	121
8.7.1 Verdeling van natuur over het dwarsprofiel	121
8.7.2 Waardering van natuur over het dwarsprofiel	121
8.7.3 Waardeverdelingsfunctie van natuur over het dwarsprofiel	122
8.7.4 Ruimteverdeling en waardering van natuur over het dwarsprofiel in de toekomstige situatie	123

8 Economisch model: ruimtebeslag en waardering in dwarsprofielen



Figuur 8-1: Stappenschema ter bepaling waarderingsfunctie.

8.1 Ruimtebeslag en waardering: een statische momentopname of een ontwikkeling in de tijd?

Om de risicoverwachtingen te berekenen moeten de gevolgen van kustachteruitgang door duinafslag en structurele erosie worden bepaald. Deze gevolgen zijn afhankelijk van het ruimtebeslag en de waardering van de gebruiksfuncties in het kustgebied. Met behulp van een inventarisatie van de huidige situatie kan inzicht worden verkregen in zowel het ruimtebeslag als de waardering. In dit hoofdstuk wordt het stappenschema uit Figuur 8-1 doorlopen om tot de bepaling van waardeverdelingsfuncties langs de Hollandse kust te komen.

Niet alleen de huidige situatie is van belang. Het buitendijkse gebied is echter aan veranderingen onderhevig. Het medegebruik (wonen, recreatie, industrie) in de waterkering neemt toe. Dit is het resultaat van groei van welvaart, vrije tijd en bevolking in combinatie met de zekerheid die de kustlijnbenadering geeft omtrent het niet verder achteruitgaan van de kustlijn dan de basiskustlijn. In het kader van de realisatie van de ecologische hoofdstructuur worden bijvoorbeeld op verschillende plaatsen natuurontwikkelingsprojecten uitgevoerd. Ook kan door het zoneringsbeleid, waarbij specifieke 'bebouwde' en 'natuur' kustzones worden aangewezen, de ruimteverdeling in de kustzone veranderen. (WBK, 1999) Vanaf 1997 wordt nieuwe permanente bebouwing op het strand en in de waterkering geweerd. Een interimbeleid is geformuleerd waarbij een bouwstop in de kustzone is afgekondigd. Het is echter mogelijk dat deze bouwstop onder economische en/of politieke druk niet kan worden gehandhaafd. Dat kan een autonome ontwikkeling van bebouwing in de kustzone tot gevolg hebben.

Kortom het is duidelijk dat er in de loop der tijd veranderingen zullen optreden in het ruimtebeslag en de waardering van de gebruiksfuncties in de kustzone. In dat opzicht is een analyse van de huidige situatie in zekere mate een momentopname en zal de ruimteverdeling in de toekomstige situatie waarschijnlijk niet gelijk zijn aan de ruimteverdeling in de huidige situatie. Ook met betrekking tot de waardering van maatschappelijke functies zullen verschillen ontstaan. Hoe in de toekomstige situatie over 100 jaar de ruimtelijke verdeling in de kustzone eruit zal zien is echter moeilijk voorspelbaar en hangt voor een groot deel van het toekomstige beleid af.

Deze optimalisatie is bedoeld om richting te geven aan het toekomstige beleid en daarom worden twee uitgangspunten met betrekking tot ruimtelijke ordening gehanteerd. De gevolgen van het enerzijds toedelen van ruimte in de kustzone aan economische activiteiten en het anderzijds reserveren van ruimte voor dynamiek moeten in economische zin inzichtelijk worden gemaakt. Het ene uitgangspunt voor het toekomstige beleid gaat uit van de handhaving van het interimbeleid, het andere laat deze handhaving los en bekijkt of het volbouwen van de kustzone vanuit economisch oogpunt niet wenselijker is. De twee uitgangspunten voor het toekomstig beleid zijn:

A. Uitgangspunt 1: Ruimtebeslag huidige situatie is gelijk aan ruimtebeslag toekomstige situatie

Uitgaande van het handhaven van het interimbeleid wordt ervan uitgegaan dat in de toekomstige situatie ten opzichte van de huidige situatie geen veranderingen zijn opgetreden in de ruimteverdeling van de functies in de kustzone. De

waterkeringsbeheerder behoudt onder dit uitgangspunt zijn gewenste flexibiliteit. De ruimte wordt gereserveerd voor dynamiek en indirect voor veiligheid. Verdere economische ontwikkeling in de kustzone wordt niet getolereerd. Het gevolg is dat het risico niet toeneemt door een toename van economische activiteiten in het gebied, maar impliceert wel direct dat er zeker geen extra economische productie en opbrengsten uit het benutten van de vrije ruimte in de kustzone worden gegenereerd.

- B. Uitgangspunt 2: Ontwikkeling van ruimtebeslag van maatschappelijke functies in de kustzones

Hierbij wordt ervan uitgegaan dat in de toekomstige situatie een ontwikkeling in ruimtebeslag heeft plaatsgevonden. Wellicht blijkt vanuit het optimalisatie-oogpunt dat een dergelijke ontwikkeling zonder bouwstop vanuit economisch wenselijk is. De waterkeringsbeheerder verliest bij dit uitgangspunt wel een deel van zijn flexibiliteit. Door het verder ontwikkelen van economische activiteiten in de kustzone neemt het risico toe.

8.2 Standaarddwarsprofielen

Langs de Hollandse kust wordt een inventarisatie uitgevoerd om de maatschappelijke activiteiten en het ruimtebeslag in de kustzone te analyseren. Het is niet mogelijk elk dwarsprofiel langs de kust afzonderlijk in het optimalisatie-model in te voeren. Daarom is een standaarddwarsprofiel met variërende breedte ontwikkeld, zie sectie 5.5.1 en Figuur 8-2. Op basis van de functie-inventarisatie kan een standaardverdeling van het ruimtebeslag over dit standaarddwarsprofiel worden opgesteld.

Vooraf aan de functie-inventarisatie kan worden gezegd dat langs de kust overwegend gebieden met veel natuur en bebouwde gebieden voorkomen. Uitgaande van het huidige beleid (zie sectie 1.1.4) zal een gebiedsgerichte benadering met de zonering van de kustzone steeds meer benadrukt worden. Zo kan het accent in kustzones komen te liggen op rust, dynamiek en veerkracht (natuur en landschap) of de nadruk komen te liggen op een stedelijk accent (wonen, toeristische kwaliteit, bereikbaarheid en voorzieningen). Daarom is op basis van het zoneringsbeleid gekozen om op grond van de kustinventarisatie een aantal representatieve dwarsprofielen 'bebouwd' en 'met natuur' te definiëren.

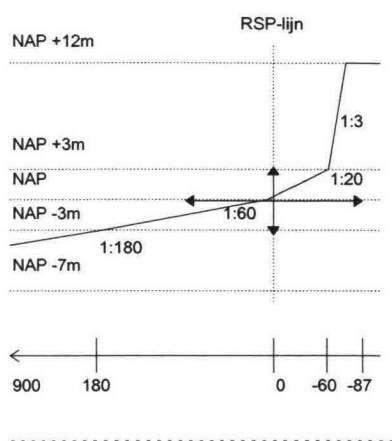
Op grond van het zoneringsbeleid en de variatie in duinbreedte zullen uiteindelijk een aantal standaarddwarsprofielen met standaardverdelingen van het ruimtebeslag worden gedefinieerd:

- A. Breed bebouwd profiel
- B. Bebouwd profiel met gemiddelde breedte
- C. Smal bebouwd profiel
- D. Breed profiel met natuur
- E. Profiel met natuur en gemiddelde breedte
- F. Smal profiel met natuur

8.3 Dwarsprofielen 'bebouwd' en 'met natuur'

Met luchtfoto's, topografische kaarten, eerder uitgevoerde inventarisaties en een veldbezoek ter plaatse worden de kustgebieden geanalyseerd op maatschappelijke en ecologische functies. Hierbij wordt gelet op de onderverdeling van dwarsprofielen 'bebouwd' en 'met natuur'.

Het Hoogheemraadschap voor Uitwaterende Sluizen in Hollands Noorderkwartier beheert het kustgebied van Den Helder tot IJmuiden. De kustgebieden I tot en met III



Figuur 8-2: Standaardprofiel.

	Bebouwd	Onbebouwd
Breed profiel	A	D
Gemiddeld profiel	B	E
Smal profiel	C	F

Tabel 8-1: Dwarsprofielen.

behoren tot hun beheersdomein. Kustgebied IV wordt beheerd door hoogheemraadschap Rijnland. Hoogheemraadschap Delfland beheert kustgebied V. Tijdens de inventarisatie wordt bij de bebouwde dwarsprofielen onderscheid gemaakt in de volgende maatschappelijke functies:

- Recreatie en toerisme
- Waterwinning
- Bebouwing:
 - Woongebieden;
 - Industrie, bedrijventerreinen;
 - Infrastructuur: Autowegen, Rijkswegen en overige wegen

Natuur heeft zich in de afgelopen jaren ontwikkeld tot een steeds krachtiger functie. (Baan *et al*, 1999) Er wordt onderscheid gemaakt in:

- Dynamische natuur, die zich ontwikkeld als gevolg van dynamiek in het kuststelsel
- Natuur met een lange ontstaansgeschiedenis
- Natuur die behouden moet blijven, maar die kwetsbaar is voor verzilting.

De maatschappelijke- en natuur en landschapsfuncties worden eerst toegelicht. Vervolgens is in sectie 8.4 voor elk van de vijf kustgebieden een aparte inventarisatie gemaakt.

8.3.1 Bebouwd

Recreatie en toerisme:

Door de grote mate van verscheidenheid, de aanwezigheid van zee, bos en duinen en de aanwezigheid van een gevarieerd aanbod aan recreatievoorzieningen is de kust een geliefde omgeving. De belangrijkste trekken van het kustlandschap zijn enerzijds natuur- en landschapsschoon en anderzijds de specifieke badplaatscultuur met de daaraan verbonden voorzieningen.

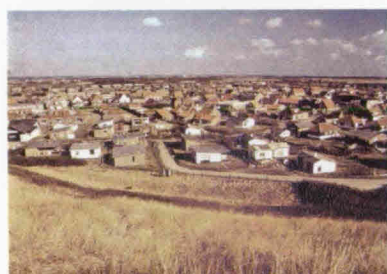
Eind negentiende eeuw ontwikkelden Scheveningen en Zandvoort zich tot de eerste badplaatsen langs de Hollandse kust. Langs de boulevards verrezen grote villa's en hotels. De toename van de bevolking en de toename aan vrije tijd en mobiliteit heeft langs de kust in de twintigste eeuw voor een sterke groei van recreatie en toerisme gezorgd. In eerste instantie betrof het met name een kleinschalige, individuele ontwikkeling, maar geleidelijk is het accent verschoven naar een meer grootschalige en projectmatige ontwikkeling van recreatiecomplexen.

Recreatie kan worden onderverdeeld in intensieve en extensieve recreatie. Bos, duin, sportterreinen, parken en plantsoenen behoren tot extensieve recreatie. Zee, strand en duinen zijn aantrekkelijk voor fietsen, zwemmen, zeilen, paardrijden, vliegeren, joggen, golf en surfen. Veiligheid, natuur en natuurrecreatie gaan goed samen.

Intensievere vormen van recreatie kunnen juist weer afbreuk geven aan dynamisch kustbeheer. Te denken valt aan verblijfsrecreatie en dagrecreatie, waar (semi-) permanente voorzieningen voor aanwezig moeten zijn in de vorm van hotels, bungalowparken, campings, cafés en restaurants.

Waterwinning:

(Bosch *et al*, 1995) In de duinen wordt vanaf de tweede helft van de 19^e eeuw door de waterleidingbedrijven water gewonnen uit een zoetwaterbel in de duinen. Ter compensatie van de verdroging en om te voorkomen dat zout water vanuit diepere lagen omhoog komt wordt oppervlaktewater in het duingebied geïnfiltreerd. Dit water wordt opgevangen in kunstmatige duinmeren, zoals in de duinen van Wassenaar en Bergen het geval is óf in langgerekte infiltratiekanalen bij Wijk aan Zee. De infiltratie van gebiedsvreemd water heeft tot aantasting van het natuurlijk milieu geleid. Het natuurlijk substraat wordt erdoor verrijkt, waardoor binnen de duinen voedselrijke situaties zijn ontstaan. Plaatselijk heeft dit tot verrijking van de flora geleid. Bovendien zijn door de verrijking soorten die karakteristiek zijn voor de



Figuur 8-3: Verblijfsrecreatie direct achter de duinen.



Figuur 8-4: Medegebruik van het strand: een strandpaviljoen.

voedselarme vochtige duinvallei verloren gegaan. Naast de verrijking van het natuurlijke substraat is een constante waterhoeveelheid geïntroduceerd, waardoor de met het seizoen wisselende waterstand en daarbij horende karakteristieke natuurwaarden verloren gaan. Door diepte-infiltratie en dieptewinning zijn aanzienlijke verbeteringen te verwachten.

Bebouwing:

- Industrie: langs de Hollandse kust bevinden zich belangrijke zeehavens: de marinebasis Den Helder, IJmuiden, Scheveningen en Hoek van Holland. Bij IJmuiden zijn grootschalige industrieterreinen ontstaan, onder andere het Hoogovencomplex heeft zich ontwikkeld. De Scheveningse haven wil uitbreiden om zijn positie als zeehaven te versterken. Daarnaast leidt de toename van de recreatievaart tot de uitbreiding van een aantal jachthavens aan de kust.
- Woongebieden: De kustzone is vanouds een geliefd woongebied. Verschillende zeedorpen en steden zijn gevestigd op hogere gronden aan de voet van de duinen.
- Infrastructuur: Door het gehele duingebied heen zijn binnenwegen, fiets- en wandelpaden aangelegd.

8.3.2 Natuur

(Bosch et al, 1995) Het duingebied kan worden onderscheiden in de oude duinen en jonge duinen. De oude duinen, die enkele duizenden jaren geleden op de strandwallen zijn gevormd, zijn vergeleken met de huidige duinen vrij breed en laag. Kort na het begin van de jaartelling begint een klimatologische cyclus met een afwisseling van warme en koude, rustige en stormachtige perioden. In deze periode worden op het strand door een overheersende westenwind nieuwe duinen opgestoven, de jonge duinen. Deze duinen zijn gedeeltelijk over de oude duinen heen gevormd.

Door erosie, overstuiving en afgraving zijn de oude duinen vrijwel uit het landschap van de kustzone verdwenen. Dit is het geval ten noorden van Bergen en ten zuiden van Kijkduin, waar door afslag de strandwallen en de oude duinen zijn verdwenen en nieuwe duinen zijn gevormd. In het centrale deel van de kust zijn de strandwallen en oude duinen grotendeels behouden en overstoven door het jonge duinlandschap. Door het voortdurend verstuiwen van zand breidt het jonge duin zich landinwaarts uit. De strandwallen en oude duinen bij Wassenaar zijn nog bewaard gebleven.

Tegenwoordig vindt nog steeds duinvorming plaats. Op gebieden waar de kust aanzandt worden primaire duinen gevormd. De vooroever en het strand zijn daarbij belangrijke zandleveranciers. De duinvorming wordt gestimuleerd door eenjarige planten.

Een minder natuurlijke ontwikkeling is de aanleg van stuifdijken. Toen aan het eind van de vijftiende eeuw in Noord-Holland jaarlijkse door stormvloed en veel duin in de zee verdween zijn stuifdijken (zanddijken) aangelegd. Onder invloed van de wind hebben de stuifdijken in de loop der jaren een natuurlijke ontwikkeling doorlopen. Het duingebied het Zwanenwater bij Callantsoog is hier een voorbeeld van.

Naast het onderscheid in leeftijd is er in de duinen onder andere variatie in zoet en zout, vochtgehalte, kalkgehalte en organisch stofgehalte. Een kalkrijk duingebied ontstaat wanneer zand vermengd raakt met schelpengruis. Door kalkuitspoeling neemt het kalkgehalte in de loop der tijd af. Landinwaarts bevinden zich oudere kalkarmere duinen. Het uitspoelingsproces is daar verder gevorderd. Bovendien wordt door de zeewind in de eerste duinen kalk afgezet. De duinen ten Noorden van Bergen zijn kalkarm. Deze duinen blijken niet ouder dan de kalkrijke duinen, maar in de opbouwfase heeft nauwelijks vermenging met schelpengruis plaatsgehad. Het organisch stofgehalte neemt landinwaarts toe.



Figuur 8-5: Gekerfde zeereep.



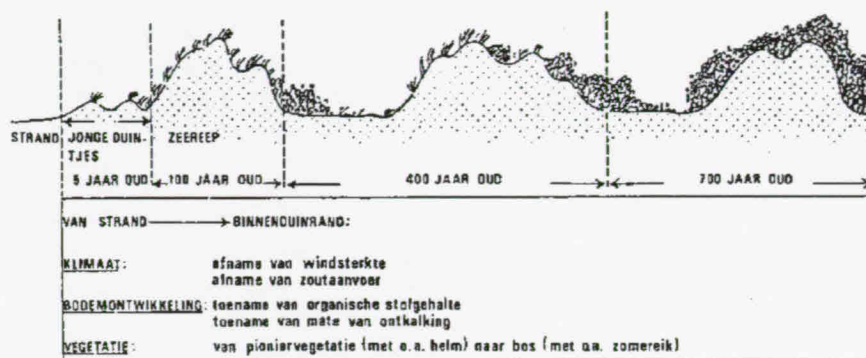
Figuur 8-6: Stuifschermen (rijen met taken) die stuivend zand vasthouden. Dit zorgt ervoor dat de zeereep (de duinenrij die je vanaf het strand ziet) stevig en breed blijft.



Figuur 8-7: In het verleden heeft de zee meerdere malen een gat geslagen in de eerste duinrij tussen Schoorl en Bergen. Deze gaten zijn telkens gedicht, omdat men van mening was dat de veiligheid daarmee in het geding zou raken. In de jaren 90 is besloten dat deze natuurlijke doorbraken niet hersteld zouden moeten worden, omdat deze juist bijdragen aan een natuurlijker uiterlijk van de kust. Op 7 november 1997 is de eerst herstelde doorbraak weer op kunstmatige wijze ongedaan gemaakt, door een kerf te graven in de zeereep. Hierdoor ontstond de Kerf tussen Schoorl en Bergen aan Zee. Hierdoor kan de zee enkele malen per jaar de achter de zeereep liggende valleien binnendringen. In de loop der tijd zal er een gevarieerder duingebied ontstaan. De hoge duinenrij die landwaarts van de valleien ligt, staat garant voor bescherming van het achterland. De kerf is een goed voorbeeld van het samengaan van veiligheid, natuurlijke ontwikkeling en recreatie.

Tenslotte is onderscheid te maken in de vegetatiesoorten die in de duingebieden voorkomen. Door het verschil in dynamiek worden zones onderscheiden met eigen karakteristieke vegetatiesoorten. In het dynamischer zeewaarts gelegen duingebied ontwikkelen zich ecosystemen die passen bij de dynamiek. Door de sterke dynamiek maakt vegetatiesuccessie geen kans. Verder landinwaarts is de dynamiek lager en ontwikkelen zich soortenrijke natuurgebieden en duinbossen.

Kortom de kustduinen en de verwante ecosystemen worden gekenmerkt door een enorme veranderlijkheid. De dwarsdoorsnede van een duingebied is weergegeven in Figuur 8-8 en geeft een beeld van de zonering en een indicatie van de ouderdom van duingebieden.



Figuur 8-8: Dwarsdoorsnede van een duingebied: van jonge meer veerkrachtige ecosystemen in de zeereep naar oude, veel minder veerkrachtige maar meer weerstand biedende, ecosystemen aan de binnenduinen.

Gekozen is om de functie natuur en landschap in de volgende deelfuncties op te splitsen:

Dynamische natuur:

(Aarninkhof et al, 1997) Dynamische natuur in het buitendijkse gebied, zoals de jonge duinen, is vaak ontstaan onder invloed van regelmatig terugkerende overstromingen en ontleent daaraan haar specifieke waarde. Periodieke overstromingen zijn voor die natuurwaarden vaak essentieel. Aan de kust geldt dus een sterke relatie tussen ecologie en morfologie. In een actieve kustzone waar het zand beweeglijk is ontwikkelen zich ecosystemen die passen bij deze dynamiek. Deze ecosystemen kunnen zich snel aanpassen aan de snel veranderende en vaak extreme milieu-omstandigheden. In jonge duinen vindt van nature verstuiving plaats, waardoor lokaal grote verschillen in reliëf optreden en een mozaïek van verschillende habitats ontstaat. Er zou waardevolle vegetatie kunnen ontstaan, maar door de sterke dynamiek krijgt vegetatiesuccessie vaak geen kans. De ecosystemen worden meer gestuurd door externe processen dan door interne processen. Gebieden met een sterke morfologische dynamiek bestaan uit veerkrachtige ecosystemen. Veerkrachtig in de zin van indien het ecosysteem eenmaal verloren gaat er gemakkelijk en op korte termijn eenzelfde soort ecosysteem ontstaat. Veerkracht is hier sterk gerelateerd aan vervangbaarheid en herstelbaarheid. Door de natuurlijke processen is het duingebied voortdurend in beweging en zullen diverse stadia van duinvorming altijd ergens in het gebied aanwezig zijn.

Natuur met een lange ontstaansgeschiedenis:

In meer landinwaarts gelegen duinen bevinden zich oudere ecosystemen die minder dynamisch zijn en reeds een lange ontwikkeling in de tijd achter de rug hebben. Deze oude systemen hebben vaak wel een hogere weerstand, maar zijn weinig veerkrachtig. Door relatief stabiele milieu-omstandigheden kan een soortenrijk natuurgebied ontstaan. De kans dat gebieden met oude systemen na verdwijnen ten gevolge van dynamisch kustgedrag weer terug komen is vaak klein. Ze zijn moeilijk vervangbaar en daarom kan behoud van deze gebieden worden nagestreefd.

Natuur die om haar specifieke waarde en eigenschappen behouden moet blijven

Onder deze gebieden vallen bijvoorbeeld de Kerf bij Schoorl en het Zwanenmeer bij Callantsoog. Deze gebieden bevatten unieke natuurwaarden.

8.4 Inventarisatie ruimtebeslag langs de Hollandse kust

8.4.1 Bebouwing en natuur en landschap in kustgebied I

(Bosch et al, 1995) De kustzone is smal en lange stuifdijken scheiden het duingebied van het achterland. Voor de stuifduinen vindt primaire duinvorming plaats. Achter de stuifdijken ontwikkelen zich strakke bosstroken parallel aan de stuifdijken.

(Stam et al, 1997) De stad Den Helder valt net buiten het kustgebied. In dit kustgebied is de bebouwing bij Huisduinen de enige bebouwing die zich in het kustgebied bevindt. In bijlage 8.1 staat de bebouwing in de waterkering weergegeven. Huisduinen ligt deels in en deels achter de duinzone.

8.4.2 Bebouwing en natuur en landschap in kustgebied II

In dit kustgebied bevindt zich de woonkern Callantsoog. Bij Callantsoog heeft een ingesnoerde strandvlakte voor de stuifdijk zich ontwikkeld tot Europa's grootste zoete duinmeer: het Zwanenmeer. In dit gebied ontwikkelen zich vochtige duinvalleien en bevindt zich unieke vegetatie, zoals zeldzame orchideesoorten. Het gebied staat onder beheer van Natuurmonumenten. Aan de landwaartse zijde van het smalle duingebied ligt een camping. De plaats Callantsoog zelf ligt achter de smalle duinen.

8.4.3 Bebouwing en natuur en landschap in kustgebied III

(Stam et al, 1997) Een deel van de Noord-Hollandse duinenkust in kustgebied III maakt deel uit van het Noord-Hollands duinreservaat. In het beschermde natuurgebied is gedurende de afgelopen decennia (1950 tot nu, anno 2000) geen nieuwe bebouwing toegestaan. Dit geldt ook voor het duingebied dat deel uitmaakt van de drinkwaterwingebieden. Alleen op de boulevards van de wat grotere badplaatsen is veel bebouwing aanwezig. Daarbuiten komt bebouwing in het duingebied incidenteel voor.

In de brede duinen ten zuiden van de Hondsbossche zeewering liggen grote duinbossen. Bij Schoorl is in 1997 een kerf aangelegd. In de Schoorlse duinen ontwikkelen zich door grote verstuingen vochtige duinvalleien. Het gebied tussen Egmond en Wijk aan Zee behoort tot het Noord-Hollands duinreservaat. Er worden grote verstuingen toegestaan waardoor stuifkuilen en vochtige duinvalleien ontstaan. In deze duinen wordt ook drinkwater gewonnen. Op de aangroeiende kust net ten noorden van IJmuiden is primaire duinvorming te zien.

Van boven naar beneden bevinden de volgende badplaatsen zich in het buitendijkse gebied:

- **Camperduin:** In dit kustgebied bevindt zich de Hondsbossche en Pettemer zeewering. Op en tegen de dijk die als primaire waterkering functioneert, is enige bebouwing neergezet. Bij Camperduin staat een restaurant op het duin. Camperduin-Groet ligt achter de zeewering.
- **Schoorl aan Zee:** Schoorl aan Zee is een klein zeedorp dat bekend is van de Kerf.
- **Bergen aan Zee:** Bergen aan Zee is een klein dorp waarin de afgelopen jaren, in tegenstelling tot het meer landwaarts gelegen dorp Bergen, relatief weinig ontwikkelingen hebben plaatsgevonden. Er heeft zich geen grootschalige ontwikkeling van toeristenindustrie voorgedaan, zoals in de andere badplaatsen. Het dorp ligt deels in en deels achter de eerste duinrij. In bijlage 8.2 staat een korte uiteenzetting van de functies in de duinzone bij Bergen aan Zee.

Het hoogheemraadschap heeft aangegeven dat het de veiligheid van het dorp niet langer onvoorwaardelijk wil garanderen omdat de zeespiegel blijft stijgen. Het

Het rijk moet volgens het waterschap maatregelen nemen. Volgens het hoogheemraadschap zijn er meerdere opties om de kans te reduceren dat het dorp letterlijk in het water valt. Het duin zou vervangen kunnen worden door een dijk, maar in dat geval gaat het strand verloren met negatieve gevolgen voor het toerisme. De provincie is het niet met het hoogheemraadschap eens en heeft tegen het besluit van het hoogheemraadschap bezwaar ingediend. De rechter zal uitspraak doen. In bijlage 8.2 zijn twee krantenknipsels opgenomen waarin de problematiek rond Bergen en de economische afweging van het beschermen van Bergen in Zee kort staat beschreven.

- Egmond: Egmond is de grootste badplaats ten noorden van het Noordzee kanaal. Op zomerse dagen is er een enorme toeloop van dagrecreanten uit de regio. Bovendien neemt de verblijfsrecreatie aan de kust bij Egmond ook toe. In de duinen bevindt zich veel bebouwing. Het gaat hier om woningen, appartementencomplexen, flats, hotels, een parkeerterrein en een school. In bijlage 8.3 wordt de bebouwing bij Egmond aan Zee grafisch weergegeven.
- Castricum: Castricum aan Zee is na 1950 ontstaan. Achter de eerste duinregel is enige bebouwing aanwezig, een boerderij en twee restaurants. Bovendien staat er enkele strandpaviljoens op het strand. Zie verder bijlage 8.4.
- Wijk aan Zee: Wijk aan Zee is een klein zeedorp
- IJmuiden: In IJmuiden bevinden de havens, de sluizen en een deel van de bebouwing en de industrie zich in het buitendijks gebied, zie plattegrond bijlage 8.5. Onder dit gebied valt ook een deel van een woonwijk. In de afgelopen 50 jaar heeft een enorme uitbreiding van de haven en de directe omgeving plaatsgevonden. De economische waarde in dit gebied is sterk toegenomen.

8.4.4 Bebouwing en natuur en landschap in kustgebied IV

(Stam *et al*, 1997) Brede duinen in dit kustgebied behoren tot waterwingebieden of zijn uitgeroepen tot natuurreservaat. Direct ten zuiden van IJmuiden ligt in het nationaal park de Kennemerduinen het waterleidingsbedrijf Noord-Holland. Het kustgebied tussen Zandvoort en Noordwijk wordt beheerd door het Amsterdamse Drinkwaterleidingsbedrijf. In de brede natuurlijke duinzone liggen grote strandvlakten en duinbosgebieden. In het gehele gebied tussen IJmuiden en Noordwijk ontwikkelen zich zowel stuifkuilen als vochtige duinvalleien.

Tussen Noordwijk en Katwijk bevindt zich het natuurgebied Noordduinen. In dit gebied worden grootschalige verstuivingen in de buitenduinen nagestreefd. In het zuidelijkste deel van kustgebied IV tussen Katwijk en Den Haag worden verstuivingen getolereerd in Meyendel. Dit natuurgebied wordt beheerd door duinwaterbedrijf Zuid-Holland. De bebouwing is in de natuurgebieden en waterwingebieden de afgelopen 50 jaar nauwelijks toegenomen.

Bebouwing is met name aanwezig op de boulevards van de grotere badplaatsen en plaatselijk in de eerste duinregel. Op de boulevards hebben veel ontwikkelingen plaatsgevonden. Door nieuwbouw, renovatie en herbouw is de economische waarde in de afgelopen 50 jaar toegenomen. De badplaatsen in het gebied zijn:

- IJmuiden-Bloemendaal: In de afgelopen 50 jaar is pas na 1975 enige ontwikkeling in gang gezet bij Bloemendaal aan Zee. Er bevinden zich nu enkele gebouwen, cafés, restaurants, snackbars, direct in de eerste duinrij. Het restaurant Parnassia is in het verleden al meerdere malen in zee verdwenen en herbouwd.

Net ten zuiden van IJmuiden is het Kennemerstrandplan ontwikkeld. Het op een natuurlijke wijze aangegroeid strand wordt gebruikt voor de aanleg van een recreantenhaven, een camping en vakantiewoningen. Het betreft dus een recreatieplan.

In de figuren in bijlage 8.6 staat de bebouwing op een plattegrond en op luchtfoto's weergegeven.

- Bloemdaal-Zandvoort: In dit kustdeel bevindt zich onder andere het circuit van Zandvoort. Aan de zeewaartse zijde van de eerste duinrij staan twee restaurants. De bebouwing dateert van na 1950. Zie verder bijlage 8.7.
- Zandvoort: Zandvoort is een grote badplaats. Op de boulevard van Zandvoort staat veel bebouwing. Op de eerste duinrij zijn appartementencomplexen en woningen gebouwd. Uit luchtopnames en oude topografische kaarten blijkt dat er sinds 1950 weinig ontwikkelingen hebben plaatsgevonden en dat het bebouwde oppervlakte niet is veranderd. Er zijn geen gegevens bekend over herbouw en renovatie. In bijlage 8.8 is een plattegrond van Zandvoort gegeven.
- Zandvoort-Noordwijk: Dit kustvak is een uitgestrekt duingebied. Het Amsterdamse waterleidingsbedrijf is de beheerder. De eerste duinrij wordt door het hoogheemraadschap Rijnland beheerd. Daarin bevinden zich onder andere een paar vakantiewoningen, het radiostation Nora en een golfterrein, zie bijlage 8.9. Alleen het radiostation was in 1950 al aanwezig. De overige bebouwing is na 1950 gerealiseerd. Achter de eerste duinrij bij Noordwijkerhout ligt een camping.
- Noordwijk: In Noordwijk is de eerste duinenrij helemaal volgebouwd. Enkele grote appartementencomplexen en hotels en vele woningen en laagbouw zijn daar gebouwd. Deze bebouwing staat buitendijks. De plattegrond en luchtfoto's in bijlage 8.10 geven een redelijke indruk van de hoge economische waarde van de bebouwing in Noordwijk.
- Katwijk: Het duingebied tussen Katwijk en Noordwijk is niet bebouwd. Het oude centrum van Katwijk ligt buitendijks. In tegenstelling tot andere badplaatsen hebben in Katwijk weinig ontwikkelingen plaatsgevonden. De boulevard is niet volgebouwd met grote appartementencomplexen, maar daar bevinden zich 'normale' woningen. De luchtfoto van de boulevard in bijlage 8.11 geeft dit duidelijk weer. Sinds 1950 is aan de zuidzijde de bebouwde oppervlakte iets toegenomen. Direct naast het centrum ligt in de duinen een camping.
- Wassenaar: De Wassenaaarse Slag is het strand van de gemeente Wassenaar. Er hebben zich weinig ontwikkelingen voorgedaan. Aan het strand staat een groot restaurant. Het gebied tussen Wassenaar en Scheveningen is een drinkwaterwingebied. Er is geen bebouwing aanwezig, slechts de bebouwing die voor de waterwinning noodzakelijk is.

8.4.5 Bebouwing en natuur en landschap in kustgebied V

Dit kustgebied bestaat uit smalle duinzones. Kleine natuurgebieden bevinden zich rond de Den Haag: Zonneveld en Westduinpark. Ten noorden van de Noorderdam is in 1970 de Dixhoorn aangelegd. (*Stam et al, 1997*) De duinen in dit kustgebied zijn redelijk smal. In het gebied bevinden zich zoals in de andere kustgebieden een aantal grote kernen:

- Scheveningen: Ten noorden van de haven bevindt zich een boulevard met een strandmuur als bescherming. De strandmuur vormt een essentieel onderdeel van de zeewering. Volgens recente berekeningen zal het voor de waterkering belangrijke deel van de strandmuur onder maatgevende omstandigheden juist niet bezwijken. Nader onderzoek moet hier meer duidelijkheid over geven. Voor het geval de strandmuur wel zal bezwijken is met een duinafslagmodel aangetoond dat er juist geen doorbraak optreedt. Op de plattegrond in bijlage 8.12 is te zien dat er veel bebouwing buitendijks staat.
- Kijkduin: Kijkduin is een kustplaats met een boulevard waarlangs verschillende cafés, restaurants, winkels, appartementen en hotels zijn gebouwd. Direct achter de eerste duinrij bevindt zich Kijkduin-park, een camping- en bungalowpark. In bijlage 8.13 is een overzicht van deze bebouwing gegeven.
- Ter Heijde: Een groot gedeelte van Ter Heijde, het gebied tussen de eerste duinrij en de slaperdijk ligt buitendijks. Er is een duinvoetverdediging aangebracht aan de buitenste duinrij, waardoor het gedeelte van het dorp achter dit duin en het

achterland in voldoende mate beschermd is en aan de randvoorwaarde veiligheid wordt voldaan.

- Hoek van Holland: De Dixhoorn driehoek (strandplan Hoek van Holland) ligt buitendijks. Daarnaast bevindt de bebouwing zich zowel op als net achter de eerste duinrij. Deze bebouwing is deels semi-permanent en deels permanent. Een park met vakantiewoningen en een camping grenst aan de eerste duinrij.

8.4.6 Conclusies en verwachte toekomstige ontwikkelingen

Op grond van de voorgaande inventarisatie kan worden opgemerkt dat langs de Hollandse kust diverse kenmerkende gebieden kunnen worden aangewezen. Voor de toekomst zullen onder het zoneringsplan, waarbij de kustzone wordt ingedeeld in drukke en rustige duingebieden, de karakteristieke van de kustgebieden verder worden versterkt.

Voor de functie natuur zijn de geschetste natuurgebieden uit sectie 8.3.2 terug te vinden:

- Dynamische natuur, komt voor in de zeewaarts gelegen delen van de duingebieden. Door extreme en veranderlijke omstandigheden vinden primaire duinvorming en grote verstuingen plaats, waardoor ecosystemen ontstaan die karakteristiek zijn voor dit dynamische gedrag.
- Natuur met een lange ontstaansgeschiedenis: In de bredere duingebieden bevindt zich verder landinwaarts de natuur die zich in een lange tijdsperiode heeft kunnen ontwikkelen. Dichtbegroeide duinbossen, heide en een rijkdom aan vegetatiesoorten bevinden zich in de brede gebieden in kustgebied III en IV.
- Natuur die om haar specifieke waarde en eigenschappen behouden moet blijven: Het Zwanenmeer, de Schoorlse duinen met de Kerf en de ontwikkeling van soortenrijke vochtige duinvalleien zijn hier voorbeelden van.

Gezien de voorspelde toename van de vraag naar extensieve recreatie wordt verwacht dat in de toekomst natuur een steeds belangrijkere rol gaat spelen. Om op deze vraag in te spelen en bovendien natuurontwikkeling te stimuleren zijn reeds op verschillende plaatsen langs de kust kunstmatige natuurontwikkelingsprojecten opgestart.

Uit de inventarisatie van de bebouwde delen blijkt dat er grofweg onderscheid kan worden gemaakt in:

- Badplaatsen met kleinschalige recreatieve voorzieningen, waarin de afgelopen decennia weinig ontwikkeling heeft plaatsgevonden: Huisduinen, Schoorl aan Zee, Bergen aan Zee, Castricum aan Zee, Wijk aan Zee, Bloemendaal, Katwijk, Wassenaar en Ter Heijde.
- Badplaatsen waarin de afgelopen decennia grote ontwikkelingen hebben plaatsgevonden, zoals de ontwikkeling van grote appartementencomplexen, hotels, flats, restaurants: Egmond aan Zee, Zandvoort, Noordwijk, Kijkduin en Hoek van Holland.
- Plaats en met havens en industrieterreinen: IJmuiden en Scheveningen.

Rond deze badplaatsen liggen achter de boulevards of in of achter het eerste duin vaak bungalowparken en campings.

Drinkwaterwingebieden met installaties komen voor in de breedste kustgebieden: in Noord-Hollands duinreservaat en Kennermerduinen van het waterleidingsbedrijf van Noord-Holland, gebied Zandvoort-Noordwijk van het Amsterdamse Drinkwaterleidingsbedrijf en gebied Katwijk-Den Haag van duinwaterbedrijf Zuid-Holland.

De verwachting is dat de recreatieve druk op de kust de komende jaren verder toe zal nemen. Deze toename komt deels voor rekening van watergebonden activiteiten. Bovendien wordt verwacht dat de verblijfs- en dagrecreatie zal toenemen.

Badplaatsen zullen zich uitbouwen, waarbij met de verdere ontwikkeling wordt aangesloten op de eigen kenmerkende identiteit van de badplaats. Verder wordt een verschuiving in de vraagkant van recreatie voorzien. De verandering in de bevolkingsopbouw is hiervan een belangrijke oorzaak. Nederland 'vergroent' en vergrijs't'. Actievere en individuelere recreatiemogelijkheden waarbij de omgevingskwaliteit met natuur en landschap, milieu, rust en ruimte bepalende voorwaarden zijn.

Waterwinning zal ook in de toekomst worden voortgezet, alleen zal meer gebruik worden gemaakt van dieptewinning en diepte-infiltratie.

Er wordt een toename in industrie en uitbreiding van de havens verwacht. Bovendien wordt een groei in het aantal woningen voorspeld. Het accent ligt daarbij op het deel dat tot de centrale stedenring behoort.

8.5 Ruimtebeslag en waardering

8.5.1 Ruimtebeslag

De verdeling van het ruimtebeslag over het dwarsprofiel per strekkende meter kust wordt op basis van de functie-inventarisatie langs de Hollandse kust opgesteld. In en voor de waterkering wordt gerecreëerd, gewoond en gewerkt. Deze activiteiten vinden plaats in de schadegzone, waarbij schade frequenter kan optreden al naar gelang de activiteiten dicht bij zee plaatsvinden. Kortom, de grootste kans op schade wordt gelopen op het strand. Mede daarom worden jaarlijks de strandtenten afgebroken en in het zomerseizoen weer opgebouwd en bevinden zich meer activiteiten in de eerste duinrij en in het overig duingebied dan op het strand zelf. Er wordt daarom aangenomen dat er geen schade optreedt op het strand. De ruimteverdelingsfunctie zal daarom vanaf de top van het duin op het begintijdstip tot aan de buitenrand van het duingebied worden gedefinieerd. Voor de drie dwarsprofielen komt de $X_{\text{breedte_duinhoogte}}$ neer op 145m, 1145m en 2900m, zie sectie 7.3.1.

8.5.2 Waardering

Bij de waardering van maatschappelijke activiteiten wordt onderscheid gemaakt tussen monetaire en niet-monetaire aspecten.

De monetaire waardering van aspecten wordt opgesplitst in:

- de investeringswaarde of vervangingswaarde, waar bij schade sprake kan zijn van directe schade;
- de opbrengst door productie of dienstverlening. Bij schade wordt gesproken over gederfde inkomsten.

Bij de economische waardering speelt de rentevoet en het inflatiepercentage een rol. Voor de rentevoet en het inflatiepercentage is respectievelijk een percentage van 8% en 3% aangehouden.

Niet-monetaire waardeerbare schade wordt niet in geld uitgedrukt, maar in andere eenheden. Door de manier waarop subjectief wordt omgegaan met niet-monetaire waardering roept deze waarderingswijze nog al eens discussie op. Echter afwegen van ongelijksoortige waarden is altijd een subjectieve aangelegenheid.

In Tabel 8-2 zijn verschillende schadeposten in en buiten overstromingsgebieden en de wijze van waarden weergegeven.

Schade	Monetair waardeerbaar	Niet-monetair waardeerbaar
Primaire schade direct (in overstromingsgebied)	• kapitaalgoederen • onroerend goed • roerend goed	• slachtoffers • ecosystemen • verontreiniging water • (cultuur)historie
Primaire schade indirect (in overstromingsgebied)	• productieverlies • inkomstenderving • schoonmaakkosten	• welzijn • sociale ontwrichting • schade hot spot
Secundaire schade (buiten gebied)	• verstoring productieproces buiten overstromingsgebied	• schade overheid
Geïnduceerde schade	• noodhulp	• ontwrichting door evacuatie

Tabel 8-2: Schade in en buiten stromingsgebieden en wijze van waarden.

8.6 Dwarsprofielen: bebouwd

8.6.1 Verdeling van maatschappelijke activiteiten over het dwarsprofiel

Op basis van de functie-inventarisatie langs de Hollandse kust kan een representatieve verdeling van de ruimte over de 'bebouwde' dwarsprofielen worden bepaald. Uit de inventarisatie blijkt dat er een duidelijk verschil tussen bebouwde delen langs de kust bestaat. In sectie 8.4.6 is daarom onderscheid gemaakt in drie verschillende bebouwde delen voor de Hollandse kust. Om tot de ruimteverdeling per strekkende meter kust te komen is:

- op basis van de inventarisatie gekeken in welk deel van het dwarsprofiel de verschillende typen functies voorkomen.
- op basis van de inventarisatie kwantitatief aangegeven wat zich 'normaal' gesproken in bebouwde delen met een zekere kustlengte bevindt.

(A) geeft inzicht in de verdeling van functies loodrecht op de kust voor het standaardprofiel met drie verschillende breedten (zie Figuur 8-9). In (B) worden aannamen gedaan voor het aantal eenheden van verschillende functies in een bebouwd kustdeel met een bepaalde kustlengte evenwijdig aan de kust en een bepaalde breedte loodrecht op de kust duininwaarts (Figuur 8-10).

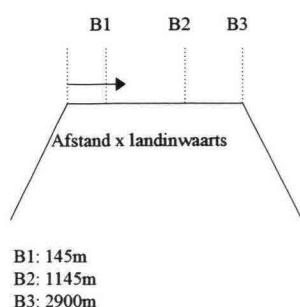
A. Verdeling functies over het dwarsprofiel

Recreatie en Toerisme:

De voorzieningen voor recreatie, zoals de campings, bungalowparken en vakantiehuisjes liggen vaak direct achter de eerste duinrij. Hotels bevinden zich meestal dicht bij de kust dan campings en bungalowparken. Een hotel dicht bij de kust wordt vaak hoger gewaardeerd dan een hotel verder van de kust af. Deze differentiatie in waardering wordt niet meegenomen. Verder landwaarts wordt van het duingebied gebruikt gemaakt door overige recreatie.

Waterwinning:

Onder de infrastructuur voor de waterwinning behoren de winputten en gebouwen. Daarnaast is het vanggebied van belang. (Baan *et al*, 1999) De ligging van de duinvoet is van belang voor de stabiliteit en de omvang van de zoetwaterbel. Wanneer de duinvoet het waterwingebied te dicht nadert komt de waterwinning in gevaar. De grondwaterstand daalt en er dreigt verzilting in de winputten. Ook kunnen zoutproblemen ontstaan bij de infiltratiekanalen. Hierbij is kortstondige duinafslag niet zo relevant, maar brengt met name langdurige verplaatsing van het duinfront negatieve gevolgen met zich mee. Om de waterwinning niet in gevaar te



Figuur 8-9: Verdeling functies over het dwarsprofiel.

brengen door zoutindringing worden bufferafstanden ingesteld tussen de duinvoet en het dichtstbijzijnde infiltratiekanaal. De minimale bufferafstand bedraagt ongeveer 500m (informatie van dhr. Speets van IWACO).

Voor waterwinning geldt dat hoe breder het gebied is des te groter de zoetwaterbel is. Aan de Hollandse kust wordt alleen in hele brede kustgebieden (breedte klasse 3) water gewonnen. Hoewel in de eerste 500m geen water wordt gewonnen en geen installaties aanwezig zijn is het gebied wel voor de waterwinning van belang. Het fungeert namelijk als buffer om de stabiliteit van de zoetwaterbel te behouden.

Bebouwing:

- **Industrie:** In de kustzone bevindt de aanwezige industrie zich in de omgeving van grote havens. Er wordt aangenomen dat in de kustgebieden waar industrie aanwezig is de industrie zich uitstrekt over de gehele breedte van het dwarsprofiel.
- **Woongebieden:** De woongebieden met woningbouw, restaurants, cafés, snackbars, winkels liggen veelal direct aan de kust op boulevard of in en net achter de eerste duinrij. Het gedeelte aan de zeewaartse zijde is dicht bebouwd. Dan komt er een gedeelte waar vooral de functies natuur en extensieve recreatie dominant aanwezig zijn. Vervolgens neemt verder landinwaarts het ruimtebeslag door de functie wonen weer toe.
- **Infrastructuur:** Door het gehele duingebied heen zijn binnenwegen, fiets- en wandelpaden en routes aangelegd.

In bijlage 8.15 is de ruimteverdeling van de maatschappelijke functies over het dwarsprofiel weergegeven.

B. Aanname aantal eenheden van functies in een bepaald bebouwd kustdeel

Badplaatsen met kleinschalige recreatieve voorzieningen:

Er is aangenomen dat relatief kleine badplaatsen in de lengterichting van de kust een afstand van 600m bestrijken. In dit kustdeel bevinden zich een aantal activiteiten. Hiervoor zijn aannames gedaan. Deze staan in Tabel 1 van bijlage 8.16

Badplaatsen met grootschalige recreatieve voorzieningen:

De relatief grotere badplaatsen bestrijken een grotere afstand in de lengterichting van de kust. Voor deze afstand wordt 1200m aangenomen. Voor het aantal activiteiten zijn aannames gedaan, zie Tabel 2 bijlage 8.16.

Badplaatsen met grootschalige recreatieve voorzieningen, havens en industrieterreinen:

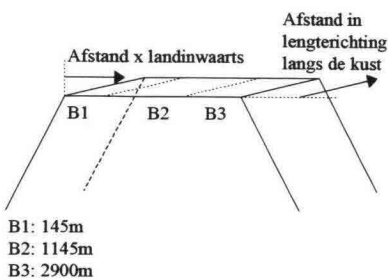
Er is aangenomen dat deze relatief plaats en en havensteden in de lengterichting van de kust een afstand van 2000m bestrijken. De activiteiten in deze kustgebieden staan in Tabel 3 van bijlage 8.16.

8.6.2 Waardering van maatschappelijke activiteiten over het dwarsprofiel

Voor schade aan functies langs de kust geldt dat de schade die optreedt ten gevolge van erosie niet afhankelijk is van overstromingsdiepten, golven of stroomsnelheden, maar dat dit een vast maximaal bedrag per eenheid betreft.

Deze schade bestaat uit:

- een schadebedrag per oppervlakte-eenheid grondgebruik.
- een schadebedrag voor de investering in de functie. Dit bedrag is gebaseerd op de vervangingswaarde of op de nieuwwaarde per eenheid. De vervangingswaarde is het bedrag dat nodig is om een object te vervangen voor een vergelijkbaar object. De nieuwwaarde is het bedrag waarvoor goederen van enkele jaren oud worden vervangen door nieuwe goederen (m.a.w. aankoopwaarde van een object).



Figuur 8-10: Verdeling functies over het dwarsprofiel.

- een schadebedrag voor de indirecte schade. Dit bedrag is gebaseerd op de gedeelde inkomsten. Er wordt aangenomen dat bij schade 2 jaar opbrengstderving plaatsvindt.

In Vrisou van Eck et al (1999) zijn schadebedragen ontwikkeld om een idee te krijgen over de schadepost indien in één keer een heel dijkgebied onder water komt te staan. In dit model gaat het uitsluitend om schade in de kustzone ten gevolge van erosie. Aan de hand van de gegeven schadebedragen in Vrisou van Eck et al (1999) zijn voor de functies langs de kust schadebedragen per functie-eenheid (oppervlakte-eenheid, object, arbeidsplaats e.d.) opgesteld.

8.6.3 Waardeverdelingsfunctie van maatschappelijke activiteiten over het dwarsprofiel

De waarde van een bepaalde functie i in een kustdeel wordt berekend door het aantal eenheden van deze functie i te vermenigvuldigen met het maximale schadebedrag per eenheid behorende bij deze functie i . De totale waarde in een bepaald kustdeel wordt verkregen door de waarden van de afzonderlijke functies te sommeren:

$$\sum_{i=1}^n n_i \cdot S_i \quad : 8-1$$

met:

n_i : het aantal eenheden van functie i

S_i : het maximale schadebedrag per eenheid behorende bij functie i

Door de drie verschillende bebouwde kustdelen (A) en (B) uit sectie 8.6.1 te combineren, te vermenigvuldigen met het schade per functie-eenheid bedragen en vervolgens te delen door de lengte van het bebouwde kustdeel wordt de waardeverdelingsfunctie verkregen. Voor de drie verschillende typen bebouwde kustdelen is op deze wijze een waardeverdelingsfunctie opgesteld. In bijlagen 8.17-8.19 zijn de berekeningen van de waardeverdelingsfunctie gegeven. De waardeverdelingsfuncties voor de drie typen bebouwde kustdelen zijn:

x, afstand in dwarsrichting ($X_{\text{breedte, duinhoogte}}$)	Functie [Fl/m] voor badplaats met kleinschalige recreatieve voorzieningen	Functie [Fl/m] voor badplaats met grootschalige recreatieve voorzieningen	Functie [Fl/m] voor plaats met grootschalige recreatieve voorzieningen, havens en industrie
<i>Breedte-klasse 1</i>			
$0 \leq x \leq 50$	$1600 \cdot x$	$1930 \cdot x$	$2660 \cdot x$
$50 \leq x \leq 145$	$3390 \cdot x$	$3320 \cdot x$	$3440 \cdot x$
<i>Breedte-klasse 2</i>			
$0 \leq x \leq 50$	$1600 \cdot x$	$1930 \cdot x$	$2660 \cdot x$
$50 \leq x \leq 150$	$3220 \cdot x$	$3160 \cdot x$	$3270 \cdot x$
$150 \leq x \leq 500$	$270 \cdot x$	$570 \cdot x$	$600 \cdot x$
$500 \leq x \leq 1145$	$20 \cdot x$	$20 \cdot x$	$20 \cdot x$
<i>Breedte-klasse 3</i>			
$0 \leq x \leq 50$	$1620 \cdot x$	$1940 \cdot x$	$2670 \cdot x$
$50 \leq x \leq 150$	$3230 \cdot x$	$3160 \cdot x$	$3280 \cdot x$
$150 \leq x \leq 500$	$280 \cdot x$	$580 \cdot x$	$610 \cdot x$
$500 \leq x \leq 1500$	$130 \cdot x$	$130 \cdot x$	$130 \cdot x$
$1500 \leq x \leq 2900$	$570 \cdot x$	$630 \cdot x$	$700 \cdot x$

Tabel 8-3: Waardeverdelingsfuncties voor dwarsprofiel met maatschappelijke activiteiten.

8.6.4 Ruimteverdeling en waardering van maatschappelijke activiteiten over het dwarsprofiel in de toekomstige situatie

Voor de situatie in de toekomst zijn twee uitgangspunten gedefinieerd. Bij het ene uitgangspunt is het ruimtebeslag in de toekomstige situatie gelijk aan de situatie in de toekomst.

Voor de waardering van maatschappelijke functies kan een waardevermeerdering van het kapitaal in rekening worden genomen. Op t=0, de huidige situatie wordt de waarde gegeven door W_0 . De toename van de waarde in de tijd wordt uitgedrukt in een groeivoet, de rentevoet vermindert met de reële rentevoet:

$$\frac{dW}{dt} = (\gamma - r) \cdot W \qquad : 8-2$$

$$W = W_0 \cdot e^{(\gamma - r) \cdot t} \qquad : 8-3$$

met:

W: opbrengst op t=t

W_0 : opbrengst op t=0

γ : rentevoet, 8% per jaar

r: reële rentevoet = rentevoet-inflatiepercentage = 8% - 3% = 5% per jaar

$\gamma - r$: groeivoet kapitaal per jaar

In de toekomstige situatie neemt de waarde over 100 jaar met een factor 20 toe.

Het tweede uitgangspunt gaat uit van grote ontwikkelingen in de kustzone. Het ruimtebeslag in de kustzone verandert. Aangezien niet te voorspellen is hoe deze verandering eruit zal zien is voor deze ontwikkeling een aanname gedaan. Er is aangenomen dat het ruimtebeslag in de kustzones met 50% toeneemt, zie bijlage 8.20. Bovendien geldt ook in dit geval dat de waardering van de functies toeneemt.

Voor de waardeverdelingsfunctie bij uitgangspunt 1 worden de waarden uit Tabel 8-3 met factor 20,1 vermenigvuldigd:

Afstand in dwarsrichting	Functie [Fl/m] voor badplaats met kleinschalige recreatieve voorzieningen	Functie [Fl/m] voor badplaats met grootschalige recreatieve voorzieningen	Functie [Fl/m] voor plaats met grootschalige recreatieve voorzieningen, havens en industrie
<i>Breedte-klasse 1</i>			
$0 \leq x \leq 50$	32160·x	38790·x	53470·x
$50 \leq x \leq 145$	68140·x	66730·x	69140·x
<i>Breedte-klasse 2</i>			
$0 \leq x \leq 50$	32160·x	38790·x	53470·x
$50 \leq x \leq 150$	64720·x	63520·x	65730·x
$150 \leq x \leq 500$	5430·x	11460·x	12060·x
$500 \leq x \leq 1145$	400·x	400·x	400·x
<i>Breedte-klasse 3</i>			
$0 \leq x \leq 50$	32560·x	38990·x	53670·x
$50 \leq x \leq 150$	64920·x	63520·x	65930·x
$150 \leq x \leq 500$	5630·x	11660·x	12260·x
$500 \leq x \leq 1500$	2610·x	2610·x	2610·x
$1500 \leq x \leq 2900$	11460·x	12660·x	14070·x

Tabel 8-4: Waardeverdelingsfuncties in de toekomstige situatie volgens uitgangspunt 1.

Voor uitgangspunt 2 gelden na een toename van het ruimtebeslag met 50% en een waardevermeerdering met factor 20,1 de volgende waardeverdelingfuncties:

Afstand in dwarsrichting	Functie [Fl/m] voor badplaats met kleinschalige recreatieve voorzieningen	Functie [Fl/m] voor badplaats met grootschalige recreatieve voorzieningen	Functie [Fl/m] voor plaats met grootschalige recreatieve voorzieningen, havens en industrie
<i>Breedte-klasse 1</i>			
$0 \leq x \leq 50$	47240·x	57820·x	79930·x
$50 \leq x \leq 145$	106240·x	100310·x	142120·x
<i>Breedte-klasse 2</i>			
$0 \leq x \leq 50$	47240·x	57820·x	79930·x
$50 \leq x \leq 150$	91360·x	95310·x	135100·x
$150 \leq x \leq 500$	7650·x	17400·x	31660·x
$500 \leq x \leq 1145$	430·x	440·x	420·x
<i>Breedte-klasse 3</i>			
$0 \leq x \leq 50$	47430·x	58010·x	80110·x
$50 \leq x \leq 150$	101140·x	95500·x	135280·x
$150 \leq x \leq 500$	7760·x	17590·x	31850·x
$500 \leq x \leq 1500$	2630·x	2630·x	2610·x
$1500 \leq x \leq 2900$	16210·x	17990·x	17930·x

Tabel 8-5: Waardeverdelingsfuncties in de toekomstige situatie volgens uitgangspunt 2.

Zie voor de waardeverdelingsfunctie in de toekomst bij het tweede uitgangspunt ook bijlage 8.21.

8.7 Dwarsprofielen: natuur, extensieve recreatie en waterwinning

8.7.1 Verdeling van natuur over het dwarsprofiel

In het dwarsprofiel 'natuur' ligt het accent op rust, natuur en landschap. Tussen natuur en extensieve recreatie en toerisme bestaat een onlosmakelijke relatie. Extensieve recreatieve en toeristische activiteiten vloeien vaak voort uit natuur en landschapsbeleving. In dit opzicht vormen recreatie en toerisme mede een draagvlak voor het natuur en landschapsbeleid. Bovendien worden de natuurgebieden en reservaten in de breedste duingebieden complementair gebruikt voor waterwinning. De gebieden worden beheerd door waterleidingsbedrijven.

Kortom in het dwarsprofiel met de hoofdfunctie natuur gaat natuur vaak samen met extensieve recreatie en waterwinning.

Voor de verdeling van natuur over het dwarsprofiel wordt verwezen naar sectie 8.4.6, waar op basis van de inventarisatie in sectie 8.3.2 een onderverdeling in typen natuurgebieden is gemaakt, zie ook Figuur 8-8. Voor de complementaire functies extensieve recreatie en waterwinning is ter bepaling van de ruimteverdeling de werkwijze van sectie 8.6 aangehouden. Ook hier wordt aangenomen dat waterwinning alleen in het breedste dwarsprofiel plaats vindt. In bijlage 8.22 is de ruimteverdeling over het dwarsprofiel gegeven. In bijlage 8.23 zijn aannamen gedaan voor het aantal oppervlakte-eenheden van natuur, waterwinning en extensieve recreatie in een dwarsprofiel 'natuur' met een bepaalde kustlengte evenwijdig langs de kust en een bepaalde breedte loodrecht op de kust, duininwaarts.

8.7.2 Waardering van natuur over het dwarsprofiel

De waardering van natuur is niet eenvoudig, dit komt met name door de gradatie van duinen in bepaalde 'leeftijdscategorieën' of met een zekere bestaansgeschiedenis en de daarbij behorende karakteristieke natuurwaarden. De waardering van natuur is persoonlijk en daarmee erg subjectief. Er is meerdere malen geprobeerd om een maatstaf voor de waardering van natuur te ontwikkelen. Een echte objectieve

waardering is echter niet mogelijk, omdat de subjectiviteit nooit helemaal uit de waardering kan worden gefilterd.

Vergeleken met de overige maatschappelijke functies vindt de waardering van natuur vaak plaats in een andere dimensie. Momenteel zijn veel discussies gaande om objectieve maatstaven te ontwikkelen voor natuurwaardering. De opzet voor zo'n ontwikkeling richt zich vaak op de inventarisatie van bepaalde eigenschappen van natuurgebieden, zoals diversiteit, natuurlijkheid, duurzaamheid, ontstaansduur (vervangbaarheid), kansrijkdom, soortenrijkdom, zeldzaamheid. De uiteindelijke waardering zelf blijft echter van subjectieve aard.

(Ruijgrok, 2000) Ruijgrok heeft haar promotieonderzoek gewijd aan de waardering van natuur aan de kust. In haar onderzoek speelt de co-evolutie visie een rol: het realiseren van zowel economische ontwikkeling als ecologische ontwikkeling door sociaal-economisch en ecologische waarden van natuur te verinnerlijken in economische transacties. De economische waarde van natuur wordt daar bepaald door het welvaartsgenererend vermogen van natuur. Door het gebruik van natuur en ook door het niet-gebruik van natuur (uit de wetenschap dat natuur bestaat) wordt welvaart gecreëerd. De belevingswaarde van en preferentie voor verschillende natuurtypen geven inzicht in de mate waarin die verschillende typen afzonderlijk worden gewaardeerd. Enquêtes en de opinie van de bevolking spelen bij de waardering een grote rol.

Toch kan nog niet gesproken worden over een algemeen geaccepteerde waarderingsmethode voor natuur. In dit onderzoek is gekozen voor een andere wijze van waarderen. De waarde van natuur zelf wordt niet in de waarderingsfunctie meegenomen. Wel worden de waarden van andere functies die naast natuur in natuurgebieden voorkomen (extensieve recreatie en waterwinning) in rekening gebracht. Deze waarden zijn aan de hand van de gegevens in Vrisou van Eck bepaald, zie ook sectie 8.6.2.

Kortom, in de waardeverdelingsfunctie wordt de waarde van natuur niet meegenomen, maar wordt het effect op natuur achteraf bepaald. Met de berekende onderhoudsfrequentie van zandsuppleties volgend uit de optimalisatie kan de breedtezone worden aangegeven waarover de kustlijn heen en weer mag bewegen. Indirect heeft dat invloed op het type natuur in het duingebied. Is de herhalingstijd groot, dan is deze breedtezone breed en is met name dynamische natuur dominant. Achteraf kan beoordeeld worden of de natuureffecten acceptabel zijn.

8.7.3 Waardeverdelingsfunctie van natuur over het dwarsprofiel

Op overeenkomstige wijze als in sectie 8.6.3 wordt de waardeverdelingsfunctie verkregen. In bijlage 8.24 is de berekening van de waardeverdelingsfunctie gegeven. De waardeverdelingsfunctie voor het dwarsprofiel natuur, extensieve recreatie en waterwinning is:

Afstand in dwarsrichting	Functie [Fl/m] voor dwarsprofiel met natuur, extensieve recreatie en waterwinning
<i>Breedte-klasse 1</i>	
$0 \leq x \leq 50$	$3,1 \cdot x$
$50 \leq x \leq 145$	$4,7 \cdot x$
<i>Breedte-klasse 2</i>	
$0 \leq x \leq 50$	$3,1 \cdot x$
$50 \leq x \leq 150$	$4,7 \cdot x$
$150 \leq x \leq 500$	$3,1 \cdot x$
$500 \leq x \leq 1145$	$2,0 \cdot x$
<i>Breedte-klasse 3</i>	
$0 \leq x \leq 50$	$12,4 \cdot x$
$50 \leq x \leq 150$	$13,8 \cdot x$
$150 \leq x \leq 500$	$12,8 \cdot x$
$500 \leq x \leq 1500$	$111,2 \cdot x$
$1500 \leq x \leq 2900$	$76,2 \cdot x$

Tabel 8-6: Waardeverdelingsfuncties voor dwarsprofiel natuur, extensieve recreatie en waterwinning.

8.7.4 Ruimteverdeling en waardering van natuur over het dwarsprofiel in de toekomstige situatie

De waardeverdelingsfunctie in de huidige situatie is gebaseerd op grondgebruik voor extensieve recreatie en waterwinning. In de toekomstige situatie zal net als in de huidige situatie het gehele oppervlakte in het betreffende gebied worden ingenomen door de functie extensieve recreatie en in het geval van het breedste dwarsprofiel ook door waterwinning. Kortom er geldt eigenlijk één uitgangspunt voor de toekomstige situatie en dat betreft een gelijkblijvend grondgebruik. Bovendien neemt de waarde per oppervlakte eenheid grondgebruik volgens formules 8.2-8.3 toe. In bijlage 8.25 is de waardeverdelingsfunctie gegeven. De waardeverdelingsfunctie komt neer op:

Afstand in dwarsrichting	Functie [Fl/m] voor dwarsprofiel met natuur, extensieve recreatie en waterwinning
<i>Breedte-klasse 1</i>	
$0 \leq x \leq 50$	$60 \cdot x$
$50 \leq x \leq 145$	$95 \cdot x$
<i>Breedte-klasse 2</i>	
$0 \leq x \leq 50$	$60 \cdot x$
$50 \leq x \leq 150$	$90 \cdot x$
$150 \leq x \leq 500$	$70 \cdot x$
$500 \leq x \leq 1145$	$40 \cdot x$
<i>Breedte-klasse 3</i>	
$0 \leq x \leq 50$	$250 \cdot x$
$50 \leq x \leq 150$	$280 \cdot x$
$150 \leq x \leq 500$	$260 \cdot x$
$500 \leq x \leq 1500$	$2240 \cdot x$
$1500 \leq x \leq 2900$	$1530 \cdot x$

Tabel 8-7: Waardeverdelingsfuncties in de toekomstige situatie.

Hoofdstuk 9 Onzekerheden en gevoeligheden

Inhoudsopgave

9.1 Onzekerheden	127
9.2 Onzekerheden in het hydraulisch morfologisch model	128
9.2.1 Structurele erosie	128
9.2.2 Incidentele erosie	129
9.3 Gevoeligheidsanalyse voor incidentele erosie	132
9.3.1 Uitgevoerd gevoeligheidsonderzoek	132
9.3.2 Basisvorm standaardprofiel: duinhoogte en helling vooroever	132
9.3.3 Korreldiameter	133
9.3.4 Conclusies	134
9.4 Onzekerheden in het model met kustverdedigingsmaatregelen	134
9.5 Onzekerheden in het model van de veiligheidsrandvoorwaarde	136
9.6 Onzekerheden in het economisch model	136

9 Onzekerheden en gevoeligheden

9.1 Onzekerheden

In sectie 3.2.2 is onderscheid gemaakt tussen drie vormen van onzekerheid: intrinsieke-, model- en statistische onzekerheid:

- Intrinsieke onzekerheid: onzekerheid die voortkomt uit onvoorspelbare fluctuaties die in de natuur kunnen worden waargenomen.
- Model onzekerheid: onzekerheid die door schematisatie van de werkelijkheid ontstaat.
- Statistische onzekerheid: onzekerheid die als gevolg van een beperkt aantal waarnemingen wordt geïntroduceerd.

Vier deelmodellen vormen de invoergegevens voor het uiteindelijke optimalisatie model. Deze deelmodellen, het hydraulisch-morfologisch model, het model met de kustverdedigingsmaatregelen, het model met de randvoorwaarden die aan het optimalisatie model ten aanzien van veiligheid worden gesteld en het economisch model zijn in de voorgaande hoofdstukken besproken. De drie vormen van onzekerheid zijn terug te vinden in de deelmodellen. De onzekerheden leiden niet alleen tot onzekere uitkomsten van de deelmodellen, maar veroorzaken ook onzekerheden in de uiteindelijke optimalisatie. Tijdens de ontwikkeling en toepassing van deze deelmodellen op de Hollandse kust zijn vereenvoudigingen toegepast en aannamen gedaan. Hierdoor zullen bepaalde onzekerheden in de deelmodellen zijn vergroot.

In dit hoofdstuk zijn de ontwikkelingstrajecten van de deelmodellen nogmaals bekeken en is een overzicht gemaakt van de gemaakte aannamen en vereenvoudigingen. Er is aangegeven welke onzekerheden van toepassing zijn en op welke wijze met deze onzekerheden is omgegaan. Daarnaast is een analyse naar gevoeligheden uitgevoerd, waarbij de effecten van de onzekerheden op de uitkomsten van het deelmodel zijn geanalyseerd. Er zijn aanbevelingen gedaan voor de wijze waarop de onzekerheden kunnen worden gereduceerd, zodat de kwaliteit van het deelmodel wordt verbeterd. Aansluitend op de ontwikkeling en de toepassing van het optimalisatie-model is in hoofdstuk 12 aangegeven welke aanbevelingen het meest relevant zijn.

Model- en statistische onzekerheden zijn beïnvloedbare onzekerheden. De individuele ontwerper kan of door extra onderzoek de onzekerheden reduceren of voor een onzekerheidsmarge kiezen. Door extra onderzoek kan de werkelijkheid beter worden beschreven, maar in alle gevallen blijft een model een schematisatie van de werkelijkheid. Het is vrijwel onmogelijk de complexe werkelijkheid met mathematische modellen te beschrijven en daardoor zal de model-onzekerheid nooit helemaal tot nul kunnen worden gereduceerd. De statistische onzekerheid is het gevolg van een beperkt aantal waarnemingen. Door het aantal waarnemingen en metingen te vergroten kan deze onzekerheid worden verkleind. Aangezien zeer extreme omstandigheden met een zeer lage frequentie voorkomen is het soms niet mogelijk in dit waarnemingsbereik metingen uit te voeren. Kortom, de statistische onzekerheid is tot op zekere hoogte te beïnvloeden, maar zal altijd blijven bestaan. De intrinsieke onzekerheid is niet te beïnvloeden.

9.2 Onzekerheden in het hydraulisch morfologisch model

9.2.1 Structurele erosie

Tijdens het berekeningstraject van structurele erosie zijn een aantal onzekerheden van toepassing. In bijlage 9.1 staan deze weergegeven.

Onzekerheden structurele erosie

De belangrijkste onzekerheden bestaan uit:

- op basis van jaarlijkse kustmetingen zandvolumeberekeningen uit te voeren (model onzekerheid).
- vervolgens met deze jaarlijkse zandvolumeberekeningen over een periode van 30 jaar een lineaire trend voor het structurele kustgedrag te bepalen (statistische onzekerheid).
- de trend van volumeveranderingen per strekkende meter kust via een conversiefactor (0,4 maal de profielhoogte (= duinhoogte-dieptebereik) om te rekenen naar oppervlakteveranderingen per strekkende meter kust (model onzekerheid).
- de trend van structurele erosie in de toekomst te berekenen door de erosieve trend die berekend is voor de huidige situatie met een factor drie te vermenigvuldigen (intrinsieke onzekerheid).

Omgang met onzekerheden

De eerste en laatste onzekerheden die hierboven staan beschreven zijn niet meegenomen in het model. Bij de tweede onzekerheid is aangenomen dat het structurele kustgedrag een lineaire trend vertoont. De lineaire trend is bepaald door een lineaire regressieanalyse uit te voeren. De onzekerheid in de trend is meegenomen door de trend met behulp van een stochastische variabele te beschrijven. Voor deze stochastische grootheid is een normale verdeling aangehouden met een bepaald gemiddelde en standaardafwijking.

Er is aangenomen dat het kustprofiel zich ten gevolge van structurele erosie of aanzanding over de gehele profielhoogte horizontaal landwaarts of zeewaarts verplaatst. Om tot de oppervlakteverandering per strekkende meter te komen zijn de volumeveranderingen per strekkende meter kust gedeeld door de conversiefactor. Door Van den Bunt (1990) is onderzoek gedaan naar deze conversiefactor. Uit dat onderzoek komt naar voren dat geen uitspraak kan worden gedaan over een geldige conversiefactor. De conversiefactor varieert tussen 0,1 en 0,9 maal de profielhoogte. In dit onderzoek is gerekend met de gemiddelde conversiefactor van 0,4 maal de profielhoogte. Het is echter een grove schematisatie dat de verplaatste hoeveelheid zand zich concentreert in 40% van het profiel en dat in dat deel de horizontale verplaatsing constant is. De spreiding rond dit gemiddelde is niet meegenomen.

Effect van onzekerheden

Door de zandvolumes per raai per jaar op basis van 'onzekere' jaarlijkse kustmetingen te berekenen wordt voorbijgegaan aan de mate van representativiteit van de profielgegevens. De eenmalige jaarlijkse kustmetingen zijn momentopnamen die een vertekend beeld kunnen geven van de jaargemiddelde toestand van het profiel. Deze onzekerheid werkt door in de zandvolumeberekeningen.

Er zijn over een beperkt aantal jaren kustprofielmetingen uitgevoerd (vanaf 1964). Daardoor is de lineaire ontwikkeling van de kust slechts over een periode van ruim 30 jaar bepaald. Het gevolg is dat extrapoleren van deze berekende trend naar de toekomst over een beperkte periode is toegestaan. Het kustgedrag in de toekomst is op basis van de berekende trend slechts over een korte periode in de toekomst te voorspellen.

Er is aangenomen dat de kust in 40% van het profiel over een afstand x ten gevolge van structureel kustgedrag voor- of achteruitgaat. Voor de conversiefactor is de

gemiddelde factor uit het onderzoek van Van den Bunt (1990) genomen. Als voor de conversiefactor de profielhoogte zou zijn aangehouden zouden de berekende jaarlijkse trends kleiner zijn. Zowel de aanzandende als de erosieve trends zouden minder extreem zijn.

Er is een indicatie gegeven over het kustgedrag in de toekomstige situatie over 100 jaar. Voor de erosieve kusten wordt de structurele jaarlijkse trend vermenigvuldigd met een factor 3. Doordat deze factor op de kleine schaal van morfologische kusteenheden is toegepast zijn de berekende trends overschat. Het is twijfelachtig of de extrapolatie van de huidige 30-jarige trend naar een trend voor de toekomstige situatie een betrouwbare trend oplevert. Voor de aanzandende en stabiele kusten wordt aangenomen dat ze in de toekomst ten minste stabiel blijven. Hoe deze kusten zich in werkelijkheid zullen ontwikkelen is moeilijk te voorspellen.

Maatregelen om onzekerheden te reduceren

Door jaarlijks meerdere metingen uit te voeren kan de representativiteit van de jaargemiddelde toestand van het kustprofiel worden vergroot. Met name in gebieden die gekenmerkt worden door een grote dynamiek kan een eenmalige jaarlijkse momentopname een vertekend beeld geven. Indien het aantal kustmetingen per raai per jaar wordt vergroot wordt de onzekerheid gereduceerd doordat niet langer met één momentopname wordt gerekend. Echter het is niet mogelijk om van de afgelopen jaren achteraf meerdere metingen uit te voeren. Bovendien is het uitvoeren van kustmetingen een kostbare aangelegenheid. Het is niet mogelijk de onzekerheid ten aanzien van kustmetingen geheel weg te nemen.

Sinds 1964 zijn jaarlijks hoogte- en dieptemetingen uitgevoerd langs de Nederlandse kust. Sinds 1850 zijn jaarlijks de posities van strandlijnen (duinvoetlijnen en de hoog- en laagwaterlijnen) gemeten. Voor de zandvolumeberekeningen is gebruik gemaakt van de profielmetingen. De onzekerheid ten gevolge van de korte periode waarover de metingen zijn uitgevoerd kan niet worden gereduceerd. Wellicht kan wel het verband tussen de posities van strandlijnen en de zandinhoud van profielen uit onderzoek worden bepaald, waardoor het mogelijk wordt vanaf 1850 gegevens over de zandinhoud van kustprofielen te reproduceren. In dat geval kan het kustgedrag over een langere periode worden geanalyseerd.

Aanvullend onderzoek moet uitwijzen in welke delen van het kustprofiel de grootste veranderingen ten gevolge van structureel kustgedrag optreden en of de toegepaste conversiefactor realistisch is. Daarvoor zou de kust in zones kunnen worden ingedeeld. Door in de verschillende zones per profielmeting de zandvolumes te bepalen wordt duidelijker in welke delen de grootste zandvolumes en volumeveranderingen plaatsvinden.

Door verdergaand onderzoek uit te voeren naar de oorzaak van klimaatsveranderingen en de invloed daarvan op de hydraulische condities en indirect op het structurele kustgedrag zouden betere voorspellingen voor de toekomstige situatie kunnen worden gedaan. Met name over de wijze waarop stabiele en aanzandende kusten zich in de toekomst mogelijkserwijs zullen ontwikkelen bestaat weinig informatie.

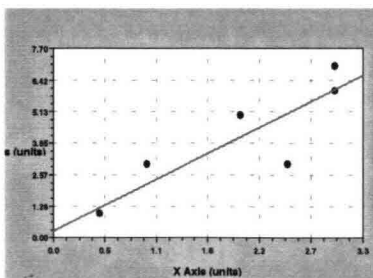
9.2.2 Incidentele erosie

De onzekerheden die bij de bepaling van het incidentele kustgedrag van toepassing zijn, zijn weergegeven in bijlage 9.1.

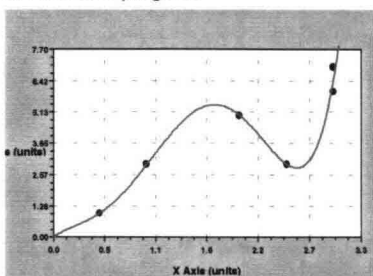
Onzekerheden incidentele erosie

De belangrijkste onzekerheden zijn geïntroduceerd door :

- de kustprofielen te schematiseren tot een vereenvoudigd standaardprofiel (model onzekerheid, intrinsieke onzekerheid)
- uit te gaan van dynamisch evenwicht op jaarlijkse schaal (model onzekerheid)



lineaire verband met klein aantal parameters
standaardafwijking: 1,2



vijfde graads polynoom met groot aantal parameters
standaardafwijking: 0,7

Figuur 9-1: Verschil tussen fit met groot en klein aantal parameters.

- te veronderstellen dat het verband tussen de waterstand en de met Super-Dune berekende duinafslag een kwadratisch verband is (model onzekerheid)
- door het niet meenemen van de kans dat er jaarlijks meerdere stormen optreden en de superpositie van de individuele stormen tot een grotere kustachteruitgang kan leiden (model onzekerheid)
- door de bepaalde Gumbel-verdeling voor incidentele erosie van de verschillende stormcondities voor de beginsituatie toe te passen op alle verschillende tussensituaties tijdens de planperiode (model onzekerheid)

Omgang met onzekerheden

Voor de huidige en toekomstige situatie is een beginprofiel vastgesteld. De onzekerheid in dit profiel is niet meegenomen. Het kustprofiel voor de toekomstige situatie wordt niet alleen beïnvloed door onzekerheden die voortvloeien uit onvoorspelbare fluctuaties in de natuur, maar wordt ook beïnvloed door onvoorspelbaar menselijk ingrijpen in de komende eeuw.

De onzekerheid in de aanname dat er sprake is van dynamisch evenwicht is niet meegenomen.

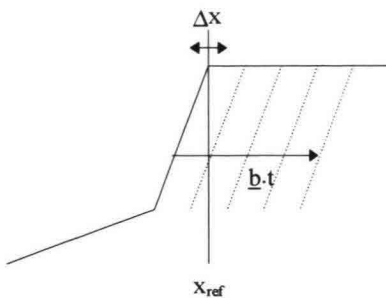
Ook de afwijking op het berekende kwadratische verband tussen de waterstand en de duinafslag is niet in rekening gebracht. De berekende waarde voor de duinafslag is afhankelijk van de gekozen invoergegevens. Daardoor is in de duinafslag een bepaalde mate van onzekerheid geïntroduceerd. Met Curve Expert 3.1 is het verband tussen de waterstand en de duinafslag bepaald. Gegeven de onzekerheid in de berekende duinafslag is er voor gekozen het verband tussen de waterstand en de duinafslag met een klein aantal parameters te beschrijven. In Figuur 9-1 is te zien dat bij een fit volgens een lineair verband de standaardafwijking van de waarnemingen ten opzichte van de fit groot is, maar dat de tussenliggende waarden tussen de waarnemingen goed te voorspellen zijn. Bovendien wordt verwacht dat de extrapolatie naar waarden buiten het waarnemingsbereik redelijk is. Een fit volgens een hoge graad polynoom lijkt het verband tussen de punten beter weer te geven, de standaardafwijking is bij deze fit kleiner. Echter de kwaliteit van de interpolatie naar tussenliggende waarden binnen het waarnemingsbereik en de extrapolatie naar waarden buiten het waarnemingsbereik is slecht. Met dit model kunnen tussenliggende waarden of waarden buiten het waarnemingsbereik moeilijk worden voorspeld. De mate van onzekerheid wordt door een fit met een klein aantal parameters niet verder vergroot ten opzichte van een fit met veel parameters (hoge graad polynoom). De mate van voorspelbaarheid is bij een fit met een klein aantal parameters wel groter.

De laatste twee onzekerheden zijn niet meegenomen.

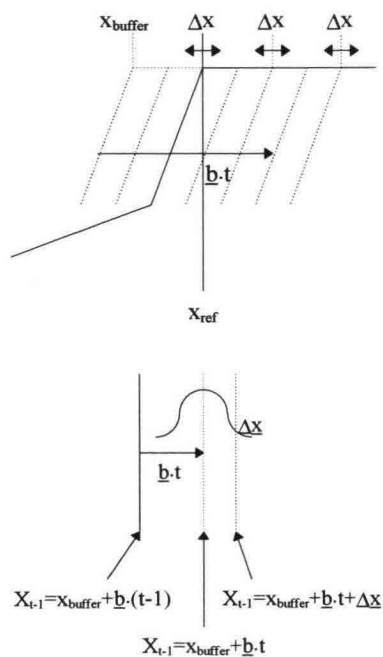
Effect van onzekerheden

De werkelijke profielen langs de Hollandse kust wijken af van het gekozen standaardprofiel. Variatie in profielen ten opzichte van het standaardprofiel leiden tot andere afwijkende afslagberekeningen. In sectie 9.3 is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd naar de invloed van variatie van profieleigenschappen op de berekende afslag.

Voor het profiel in de toekomstige situatie is aangenomen dat ten gevolge van zeespiegelstijging het kustprofiel volgens de regel van Bruun met de zeespiegelstijging omhoog beweegt. Volgens de regel van Bruun zou om een sluitende sedimentbalans te krijgen het profiel zich in zijn geheel ook landwaarts moeten verplaatsen. Tijdens overleg met de stuurgroep 'kustvisie 2050' gaven de beheerders aan dat er in praktijk van wordt uitgegaan dat deze landwaartse verplaatsing door tegenmaatregelen in de vorm van suppleties teniet wordt gedaan. Door uit te gaan van een verhoogd kustprofiel worden de afslagberekeningen beïnvloed. Er wordt minder afslag berekend en het afslagprofiel komt minder ver landinwaarts te liggen dan wanneer wordt aangenomen dat de bodem op zijn plaats blijft.



Figuur 9-2: Beginpositie van het profiel waarvoor incidentele- en structurele erosie is berekend.



Figuur 9-3: Verdelingstype voor Δx op elke positie van het dwarsprofiel toepasbaar.

landinwaarts te liggen dan wanneer wordt aangenomen dat de bodem op zijn plaats blijft.

Er wordt op jaarlijkse schaal uitgegaan van dynamisch evenwicht. Als een zeer zware storm heeft plaatsgevonden heeft de kust misschien langer de tijd nodig om op natuurlijke wijze te herstellen. In dat geval wordt door uit te gaan van een natuurlijk herstel binnen hetzelfde jaar waarin de afslag heeft plaatsgevonden misschien wel een optimistischer beeld gegeven.

De berekende waarde van duinafslag is afhankelijk van de gekozen invoerparameters. Enige toevalligheid in de keuze van invoergegevens kan leiden tot afwijkende afslagberekeningen waardoor het verband tussen de waterstand en de duinafslag voor de gegeven stormcondities net iets kan verschillen.

De kustachteruitgang zou bij superpositie van individuele stormen groter kunnen zijn, waardoor de kans op schade groter wordt.

Door het aanleggen van een zandbuffer op het begintijdstip of door kustachteruitgang verandert het kustprofiel. In het eerste geval wordt het profiel eerst breder gemaakt en zal het daarna als gevolg van kustachteruitgang steeds smaller worden. In het tweede geval wordt het profiel uitsluitend smaller. Als gevolg van een profielverbreding of -versmalling zal in werkelijkheid het incidentele kustgedrag veranderen. Bij een verbreding zal het afslagprofiel minder ver landinwaarts komen te liggen, in het geval van versmalling komt het afslagprofiel verder landinwaarts te liggen. Door aan te nemen dat het verdelingstype en de bijbehorende parameters van de incidentele erosie, die zijn bepaald voor het beginprofiel, toepasbaar zijn voor de verschillende tussenposities van de planperiode, wordt de incidentele erosie voor het kustprofiel dat meer zeewaarts ligt (zeewaartse buffer) overschat en voor het kustprofiel dat verder landwaarts ligt onderschat (zie bijlage 5.7).

Maatregelen om onzekerheden te reduceren

In hoofdstuk 8 is op basis van een gevoeligheidsonderzoek van Alkyon gekozen voor een standaarddwarsprofiel. Er zou nader kunnen worden onderzocht of de gekozen waarden voor hoogte en diepteliggingen en profielhellingen aannemelijke waarden zijn. De strandhelling langs de Hollandse kust is doorgaans iets minder steil. Voor het strand wordt ook wel een zone tussen de laagwaterlijn en de duinvoet genomen. De laagwaterlijn ligt ongeveer op NAP -2m. Dat betekent dat het duin 2 meter breder wordt 'ten koste van' de breedte van de vooroever. Als grensdieptelijn kan beter de NAP -8m lijn worden gekozen. Deze diepte bevindt zich voor alle dwarsprofielen buiten het brandingsgebied. In sectie 5.6.3 zijn drie veronderstellingen voor kustprofielen in de toekomstige situatie beschreven. De invloed van de keuze van het kustprofiel op de afslag in de toekomstige situatie zou kunnen worden onderzocht door voor de drie verschillende profielen afslagberekeningen uit te voeren en het verband tussen de waterstand en de berekende duinafslag en het nieuwe verdelingstype met bijbehorende parameters te bepalen.

Onderzoek naar de mate waarin de kust zich op natuurlijke wijze herstelt na de opgetreden duinafslag ten gevolge van een storm zou meer inzicht kunnen geven in de vraag of het uitgangspunt van dynamisch evenwicht op jaarlijkse schaal realistisch is.

De mate van duinafslag is afhankelijk van de invoergegevens. Door onderzoek uit te voeren naar realistische invoergegevens zou de toeval van het komen tot een bepaald verband tussen de waterstand en de duinafslag kunnen worden verkleind.

De invloed van superpositie van individuele stormen binnen een jaar zou kunnen worden onderzocht. Is het zo dat twee grote stormen samen een grotere kustachteruitgang genereren of herstelt de kust zich al gedeeltelijk op natuurlijke wijze in de periode tussen twee opeenvolgende stormen in?

Als de invloed van de keuze van een bepaald kustprofiel in de toekomstige situatie op de mate van duinafslag wordt onderzocht, kan wellicht een betere uitspraak worden gedaan over de effecten van de aanname dat de verdeling voor de incidentele erosie ook van toepassing is op de tussenposities van het kustprofiel op verschillende tijdstippen in de planperiode.

9.3 Gevoeligheidsanalyse voor incidentele erosie

9.3.1 Uitgevoerd gevoeligheidsonderzoek

De Super-Dune berekeningen zijn uitgevoerd voor het standaardprofiel met een constante korreldiameter, golfperiode en respectievelijk drie verschillende stormcondities met steeds variërende stormvloedpeil-waterstandscombinaties.

In principe hebben de invoerparameters een stochastisch karakter. De waarden die voor de korreldiameter en het standaardprofiel zijn ingevoerd zijn echter constanten. In deze sectie wordt achteraf bekeken of enige statistische variatie in de basiswaarde effect heeft op de mate van afslag en teruggang van het duinfront. Door de waarden van de ingevoerde parameters te variëren kan de gevoeligheid op de afslag en teruggang worden nagegaan en wordt bekeken in welke mate het deterministisch meenemen van de betreffende parameters effect heeft op de berekende afslag.

In Van de Graaff (1984) is de afslag als functie van de variatie in parametergrootte aangegeven om inzicht te krijgen in het relatieve belang van de afslagbepalende grootheden (Zie bijlage 9.2). In meer recent onderzoek (Alkyon, 1999) is met behulp van DUROSTA, het tijdafhankelijke model van Super-Dune, een parameterinventarisatie en gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. De uitkomsten uit dit onderzoek zijn gebruikt om de invloed van variaties in parametergrootte langs de Hollandse kust na te gaan.

9.3.2 Basisvorm standaardprofiel: duinhoogte en helling vooroever

De basisvorm van het standaardprofiel is een belangrijke parameter voor de berekening van duinafslag. Het is belangrijk te weten hoe groot de afwijkingen van de werkelijke dwarsprofielen langs de Hollandse kust zijn ten opzichte van het standaardprofiel. Door afwijkingen in de hoogte van het eventueel meertoppige duin, de helling en de breedte van het strand, de geulen en banken direct onder de kust en de helling van de vooroever kan de duinafslag in de werkelijke situatie verschillen met de berekende afslag voor het standaardprofiel. Deze afwijkingen van het standaardprofiel met de werkelijkheid zijn met behulp van de analyse in sectie 4.4 bekeken. In die sectie zijn de variaties in duinhoogte en de helling van de vooroever geanalyseerd. In sectie 5.5.3 staat de variatie in korrelgrootten.

Voor de kustgebieden zijn de volgende afwijkingen ten opzichte van het standaardprofiel waargenomen.

Kustgebieden:	Helling vooroever	Duinhoogte [m]
Kustgebied I	1:400	13,2
Kustgebied II	1:400	14,6
Kustgebied III	variërend van 1:400 tot 1:140; gemiddeld 1:180	16,6
Kustgebied IV	variërend van 1:500 tot 1:180; gemiddeld 1:210	17,7
Kustgebied V	1:400	12,3

Tabel 9-1: Verschillen in dwarsprofielen langs de Hollandse kust ten opzichte van standaardprofiel.

In het standaardprofiel is de helling van de vooroever beneden de NAP -3m dieptelijn 1:180. Om het effect van de grootte van deze helling te bepalen zijn afslagberekeningen uitgevoerd voor een helling met een factor 2 steiler (1:90) en een factor 2 flauwer (1:360). De resultaten in bijlage 9.3 laten zien dat de helling van de

vooroever een relatief beperkt effect heeft op de ligging van het berekende afslagpunt. Een factor 2 (+100%) steilere helling zorgt voor intensievere breking van de golven en heeft enige landwaartse verplaatsing van het afslagpunt X_e (maximaal orde 2m, zijnde 5% van ΔX) tot gevolg. Een factor 2 flauwere helling (-50%) heeft een beperkter tegengesteld effect. Dit laatste effect zal sterker aanwezig zijn bij minder extreme condities met lagere stormen. Voor zwaardere stormen blijken de effecten van de helling van de vooroever relatief beperkt. Kustgebieden I, II en V hebben een significant afwijkende helling van 1:400 (-55%). De teruggang van het duinfront is in werkelijkheid kleiner dan de berekende afslag, de mate van duinafslag wordt in deze gebieden overschat. De helling van kustgebied III is gemiddeld genomen ongeveer gelijk aan de helling van het standaardprofiel. Kustgebied IV laat een kleine afwijking zien. Bij een helling van 1:210 is nauwelijks een verandering in de teruggang van het duinfront waargenomen.

In bijlage 9.4 zijn de afslagresultaten voor een reeks van duinhoogten variërend van Z_d is NAP +6m tot NAP +20m gegeven. Naast de teruggang van het duinfront is ook de relatie tussen het afslagvolume en de duinhoogte weergegeven. De resultaten laten zien dat bij zowel hogere als lagere duinen de teruggang van het duinfront toeneemt. De mate van deze teruggang verschilt wel. Een variatie in duinhoogte met orde 2m (+16,7%) leidt voor hogere duinen tot extra verschuiving van 2 tot 5m (5-10%). Voor lagere duinen is dit effect groter, een variatie van 2m (-16,7%) in de duinhoogte levert bijvoorbeeld voor duinhoogtes onder de 10m een extreem grote teruggang tot 25%. Voor de basishoogte van het standaardprofiel is de teruggang minimaal. Voor duinen met een hoogte van hoger dan 14m neemt het afslagvolume niet meer toe, omdat het duinfront al genoeg materiaal voor afslag levert. Voor zwaardere stormcondities is er een relatief grotere teruggang. In de analyse van de jaarlijkse kustmetingen zijn de duinhoogten per raai voor de vijf kustgebieden bekeken. De resultaten staan in bijlage 4.11. De gemiddelde duinhoogten per kustgebied zijn hoger dan de aangenomen standaardhoogte van 12m. De duinhoogten in kustgebied I en V verschillen met minder dan 2m (<+10%). In deze kustgebieden is de verandering in teruggang van het duinfront relatief gering en in het geval van kustgebied V zelf verwaarloosbaar klein. De duinhoogte van kustgebied II is ruim 2,6m (22%) hoger en brengt een extra verplaatsing van ongeveer 5% van het duinfront met zich mee. De verplaatsingen van het duinfront in kustgebieden III en IV zijn groter dan de verplaatsing van het standaardprofiel. De gemiddelde duinhoogten zijn in die gebieden respectievelijk 4,6m (39%) en 5,7m (47,5%) hoger. De teruggang van het duinfront is voor de kustgebieden II en IV 8% en 10% groter.

9.3.3 Korreldiameter

In Tabel 5-12 staan de gemiddelde korrelgrootten en afwijkingen voor de vijf kustgebieden weergegeven. Het verschil tussen de gemiddelde korrelgrootte per kustgebied ten opzichte van de gemiddelde korrelgrootte voor de totale kust (226 μ m) bedraagt maximaal 27 μ m (12%).

De korreldiameter van het duinmateriaal heeft een relatief grote invloed op de vorm van het afslagprofiel en daarmee op de mate van duinafslag. In vergelijking (1) uit Figuur 5-12 komt de invloed via de valsnelheid van het duinzand tot uiting. In het algemeen leidt een fijner materiaal tot een flauwer en langer afslagprofiel, waardoor de duinafslag navenant groter zal zijn.

Het effect van variatie in de korreldiameter is onderzocht door voor een reeks D_{50} waarden duinafslagberekeningen uit te voeren, zie bijlage 9.5. Het effect van een wijziging van 10% in de diameter leidt tot een verschuiving van 10%. Naarmate het zand fijner wordt is dit effect iets groter.

Om te beoordelen of deze resultaten ook van toepassing zijn voor andere stormsituaties, is het effect van variatie in korreldiameter op het afslagpunt X_e voor twee stormcondities, een basisstorm en een zwaardere storm, bepaalt. Hieruit blijkt

dat de effecten van een relatieve wijziging in de grootte van de korreldiameter van 10% voor beide stormcondities niet tot significante verschillen leidt.

Kustgebied I en III hebben een korreldiameter die ongeveer 4% grover is dan de korreldiameter van het standaardprofiel. De afslag in de kustgebieden is ongeveer 4% minder groot dan de berekende afslag voor het standaardprofiel. Het materiaal in kustgebieden IV en V is fijner (4%) en daardoor zal de afslag in werkelijkheid ongeveer 4% groter zijn. De grootste afwijkende korreldiameter heeft kustgebied II. De diameter is daar 12% grover, de afslag wordt daar overschat. In werkelijkheid zal de teruggang van het duinfront 12% minder groot zijn.

9.3.4 Conclusies

In Tabel 9-2 is weergegeven hoe kwantitatief en procentueel de parameters duinhoogte, helling van de vooroever en korreldiameter in de vijf kustgebieden verschillen ten opzichte van de standaardwaarden die voor de afslagberekeningen zijn gebruikt. De procentuele effecten van de verschillen tussen de standaard ingevoerde waarden en de werkelijke waarden staan in de kolommen 'Effect'. Indien de invoer in een kustgebied X% afwijkt van de standaardwaarde dan is aangegeven met welk percentage Y% de uitkomst, de teruggang van het duinfront kan veranderen. De effecten geven een indicatie in welke mate waarin het incidenteel kustgedrag lokaal zal verschillen ten opzichte van het berekende gedrag met de ingevoerde standaardwaarden.

Kustgebieden	Duin- hoogte	Δ Duin- hoogte	Effect	Helling voor- oever	Δ Helling voor- oever	Effect	Korrel- diameter	Δ Korrel- diameter	Effect
Kustgebied I	+1,2m	+ 10%	+2%	1:400	-55%	-5%	+8μm	+3,5%	-4%
Kustgebied II	+2,6m	+ 22%	+5%	1:400	-55%	-5%	+27μm	+11,9%	-12%
Kustgebied III	+4,6m	+ 38%	+8%	geen signifi- cant verschil		0%	+7μm	+3,0%	-4%
Kustgebied IV	+5,7m	+ 48 %	+10%	1:210	-14%	-0%	-8μm	-3,5%	+4%
Kustgebied V	+0,3m	+ 3%	0%	1:400	-55%	-5%	-9μm	-4,0%	+4%

Tabel 9-2: Effecten op de teruggang van het duinfront ten gevolge van variatie in parameters ten opzichte van het standaardprofiel.

Kortom doordat er met standaardwaarden is gerekend verschilt de werkelijke afslag lokaal met de berekende afslag.

9.4 Onzekerheden in het model met kustverdedigingsmaatregelen

De onzekerheden ten aanzien van het model met de kustverdedigingmaatregelen zijn in bijlage 9.6 weergegeven.

Onzekerheden kustverdedigingsmaatregelen

De belangrijkste onzekerheden worden kort weergegeven:

- de vormen van kustverdedigingsmaatregelen worden beperkt tot het uitvoeren van zandsuppleties (model onzekerheid)
- de suppletiemaatregelen zijn beperkt tot strandsuppleties (model onzekerheid)
- de gegevens over de kosten van zandsuppleties zijn afkomstig van twee bronnen. Er is uiteindelijk verder gerekend met de gegevens uit RIKZ (1999b) (model onzekerheid)
- de kosten in RIKZ (1999b) zijn gegeven per volume zandeenheid. Voor de omrekening naar kosten per meter kustuitbouw is het volume gedeeld door de

lengte van het kustvak waarover gesuppleerd is en de conversiefactor (model onzekerheid)

Omgang met onzekerheden

De invloed van boulevards, duinvoetversteving, strandmuren op de kustverdediging is niet meegenomen. In werkelijkheid wordt de kustzone bij Scheveningen en Zandvoort aanvullend verdedigd door een de strandmuur. Bij Katwijk, Noordwijk en Egmond zijn de badplaatsen met de bebouwing in de duinen te vinden. Voor de badplaatsen Ter Heijde, Wassenaar, Bloemendaal, Wijk aan Zee, Castricum, Schoorl, Bergen, Petten en Callantsoog bevindt zich veel bebouwing achter de eerste duinrij. Met de liggingpositie van de bebouwde gebieden in het duingebied is geen rekening gehouden. Er is ook geen rekening gehouden met andere typen zandsuppleties, zoals duinsuppletie, vooroeversuppletie.

De onzekerheid in de gegevens over de kosten is weergegeven door de variabele en constante kosten stochastisch weer te geven met een driehoeksverdeling.

Voor de invloed van de onzekerheid in de conversiefactor wordt verwezen naar het derde punt van de onzekerheden ten aanzien van structurele erosie zoals in sectie 9.2.1 staat beschreven. Aangezien suppleties als doel hebben erosie tegen te gaan, is er aangenomen dat het zand dat ten gevolge van erosie uit het kustgebied verdwijnt door zandsuppleties wordt aangevuld.

Effect van onzekerheden

De effecten van andere vormen van kustverdediging zijn besproken in bijlage 4.3. Voor sommige vormen, zoals de strekdammen langs de kust, is de invloed al meegenomen in de berekende structurele erosie. De strekdammen beïnvloeden de langsstroom evenwijdig aan de kust en daardoor indirect ook het zandtransport langs de kust.

Steeds vaker worden suppleties uitgevoerd in de vorm van vooroeversuppleties. In die zin is het niet realistisch te veronderstellen dat alle suppleties als strandsuppletie worden uitgevoerd. Duinsuppleties werden met name in het verleden, in de periode voordat het handhavingsbeleid is ingevoerd, in het geval van calamiteiten gebruikt.

De kosten afkomstig uit de gekozen bron (*RIKZ, 1999b*) zijn reeds opgesplitst in variabele en constante kosten. Bovendien komen de gemiddelde kosten beter overeen met de volgens een vuistregel te verwachten gemiddelde kosten van 10 gulden per m³. Voor de gegevens over de kosten die afkomstig zijn van de andere bron geldt dat ze relatief hoog zijn ten opzichte van de gemiddelde kosten die op grond van de vuistregel te verwachten zijn. Bovendien is bij deze gegevens geen opsplitsing gemaakt in variabele en constante kosten. Indien met de gegevens over de kosten van de andere bron was verder gewerkt zou het kosten verband hoger liggen.

De conversiefactor komt overeen met een factor 0,4 maal de profielhoogte. Dat betekent dat de erosie in 40% van het profiel plaatsvindt. Er is aangenomen dat deze erosie wordt gecompenseerd door zandsuppleties.

Maatregelen om onzekerheden te reduceren

De invloed van andere vormen van kustverdediging op de faalkansen van maatschappelijke functies in de duinen zou kunnen worden bepaald. De faalkansen in een kustgebied zijn dan nauwkeuriger te bepalen.

Eén van de belangrijkste redenen voor het feit dat alleen strandsuppleties worden meegenomen is dat er nog weinig gegevens over vooroeversuppleties bekend zijn. Indien meer gegevens bekend zijn over vooroeversuppleties kan deze vorm van zandsuppletie in het model worden toegepast.

Op grond van beperkte informatie over de kosten is een verband tussen de kosten en de kustuitbouw opgesteld. Onderzoek naar de werkelijke kosten suppleties kan de

onzekerheid in dit verband reduceren. Bovendien kunnen de stochasten voor de variabele en constante kosten beter worden uitgedrukt.

Er moet onderzoek worden uitgevoerd naar de positie waar het gesuppleerde zand in het kustprofiel terechtkomt.

9.5 Onzekerheden in het model van de veiligheidsrandvoorwaarde

De onzekerheden voor de berekening van de veiligheidsafstand zijn grotendeels gelijk aan de onzekerheden die voor incidentele erosie zijn gekwantificeerd. Met hetzelfde duinafslagmodel zijn afslagberekeningen uitgevoerd om de ontwerpafslag te berekenen. Toch zijn er verschillen aanwezig in de wijze waarop de afslag ten behoeve van de berekening van de veiligheidsafstand¹ berekend is.

Voor de berekening van de ontwerpafslag worden rekenwaarden ingevoerd met ingebakken veiligheidscoëfficiënten. Voor de berekening van incidentele erosie zijn de onzekerheden in de invoergegevens van de korreldiameter en de golfperiode niet meegenomen. Voor de stormvloedwaterstand is een Gumbel-verdeling ingevoerd. Voor een constant kustprofiel, constante waarden voor de korreldiameter en golfperiode en een verschillend aantal stormvloedwaterstanden en bijbehorende golfhoogte (berekend via een geometrisch verband) zijn afslagberekeningen uitgevoerd. Voor de berekening van de ontwerpafslag wordt gerekend met rekenwaarden die op basis van eerder uitgevoerde probabilistische berekeningen zijn gebaseerd. Op grond van probabilistische Niveau-II berekeningen is een vereenvoudiging toegepast en is verder gerekend met invoergegevens die met veiligheidsfactoren zijn opgehoogd (Niveau I-berekening). De onzekerheden in de invoergegevens zijn in deze veiligheidsfactoren opgenomen.

Voor een gedetailleerd overzicht van de onzekerheden wordt verwezen naar bijlage 9.3.

9.6 Onzekerheden in het economisch model

Het optimalisatie model wordt gebruikt om inzicht te geven in de maatschappelijke effecten van ruimtelijke afwegingen onder verschillende beheersopties langs de Hollandse kust. Het economisch model bestaat uit de inventarisatie van het ruimtebeslag en de waardering van functies gerelateerd aan dit ruimtebeslag. In dit model zijn aannamen gedaan en vereenvoudigingen toegepast. Hieronder wordt ingegaan op de invloed van de belangrijkste onzekerheden op de vervolgberekeningen.

Onzekerheden economisch model:

In het verleden zijn veel functie-inventarisaties langs de kust uitgevoerd. Daarbij is aangegeven in welke kustdelen bepaalde functies voorkomen. Er is weinig rekening gehouden met de wijze waarop functies over het dwarsprofiel verdeeld zijn (positie van functies in het dwarsprofiel) en bovendien zijn er geen economische waarden gegeven aan deze functies. Op basis van het inzicht in de verdeling van functies langs de Hollandse kust dat op basis van de inventarisatiestudie is ontstaan zijn in Hoofdstuk 8 voor een aantal standaardprofielen waardeverdelingsfuncties opgesteld.

Kortom onzekerheden bestaan ten aanzien van:

- schematisatie van de werkelijke situaties langs de Hollandse kust in een aantal standaardsituaties
- het bepalen van waardeverdelingsfuncties voor de standaardsituaties op basis van aannamen ten aanzien van ruimtebeslag en de economische waarden die aan het ruimtebeslag zijn gekoppeld.

Omgang met onzekerheden:

¹ Veiligheidsafstand = de afstand waarover de kust zich vanuit veiligheidsoogpunt maximaal mag terugtrekken.

De werkelijke situatie is vereenvoudigd door het bepalen van een aantal standaardsituaties, de typen bebouwde kustdelen en het kustgebied met de functie natuur en extensieve recreatie. Bij het bepalen van standaardsituaties gebaseerd op de situaties langs de Hollandse kust is geprobeerd de werkelijkheid zo goed mogelijk te beschrijven. De onzekerheid in de standaardsituaties is niet meegenomen.

Ook de onzekerheid in de economische waarden is niet meegenomen.

Effect van onzekerheden:

Niet alle situaties die in werkelijkheid voorkomen zijn goed meegenomen. Zo blijkt bijvoorbeeld uit de functie-inventarisatie van hoofdstuk 8 dat er kustgebieden zijn die met name de functies natuur, rust en extensieve recreatie herbergen, maar dat ten behoeve van deze functies er ook een aantal restaurantjes en een enkel hotel dicht aan de kust aanwezig zijn. De gekozen situaties langs de kust dekken dus niet geheel de werkelijkheid.

Het aangenomen ruimtebeslag en de daaraan gerelateerde economische waarde bepalen de economische waarde van een kustgebied. De grootte van de economische waarde zal sterk doorwerken in de uiteindelijke optimalisatie. Voor sommige bebouwde profielen is de economische waarde relatief groot en ten opzichte van de werkelijkheid overschat. De economische waarde die voor kustgebieden met natuur en extensieve recreatie zijn meegenomen zijn relatief laag, doordat de waarde voor de functie natuur niet is meegenomen. De invloed van een lage economische waarde zal te merken zijn in de optimalisatieberekeningen. De economische waarden die aan kustgebieden wordt toegekend speelt een belangrijke rol in de optimalisatie.

Maatregelen om onzekerheden te reduceren:

Voor de situaties die afwijken van de gekozen standaardsituaties kunnen aanvullende standaardsituaties aan het economische model worden toegevoegd.

Door gedetailleerder onderzoek uit te voeren naar de aanwezig functies in het duingebied en de positie van deze functies in het duingebied kunnen de waardeverdelingsfuncties worden verbeterd.

Hoofdstuk 10 Optimalisatie-model

Inhoudsopgave

10.1 Schadezone en optimale bewegingszone	141
10.2 Randvoorwaarden en uitgangspunten	141
10.2.1 Schade	141
10.2.2 Stormen	141
10.2.3 Planperiode	142
10.2.4 Frequentie zandsuppleties	142
10.2.5 Economische schaal	142
10.2.6 Netto Contante Waarde	142
10.2.7 Sequentieel model	143
10.3 Optimalisatie-model	143
10.3.1 Kosten en baten	143
10.3.2 Kustachteruitgang	144
10.3.3 Schade als gevolg van kustachteruitgang	144
10.3.4 Netto Contante Waarde van de schade over de planperiode zonder suppletiemaatregelen	144
10.3.5 Netto Contante Waarde van de schade over de planperiode met suppletiemaatregelen	145
10.3.6 Netto Contante Waarde van de totale kosten in een situatie met suppletiemaatregelen	146
10.3.7 Optimalisatie totale kosten: schade en kustverdedigingskosten	147
10.4 @RISK-optimalisatie-model en Monte Carlo simulatie	147
10.4.1 Test optimalisatie-model: deterministische som	147
10.4.2 Aantal iteraties en stabiliteit bij Monte Carlo simulatie	148
10.4.3 Trekkingen uit verdelingen van stochastische variabelen	149

10 Optimalisatie-model

10.1 Schadezone en optimale bewegingszone

(WWK, 1999) Diverse kustplaatsen doorsnijden de kustzone. Er bestaat van nature een wens deze bebouwing te beschermen. In brede bebouwde duingebieden wordt de zandbuffer vaak niet benut voor fluctuaties van de kustlijn en natuurlijke processen, zoals verstuiving en duinvorming, maar wordt een buffer aangehouden (waar nodig met zandsuppleties aangevuld) om het gebied tegen kustachteruitgang te beschermen. Bij een stijgende zeespiegel zal steeds meer (bestaande) bebouwing langs de kust in de schadezone vallen. Het zal steeds meer inspanning vergen om de bebouwde gebieden de gewenste bescherming te bieden. De kosten om de kustlijn op haar plaats te handhaven zullen dan toenemen. Het zou kunnen zijn dat de kosten van de maatregelen tegen kusterosie de economische waarde van de maatschappelijke functie overtreffen. In dat geval hoeft het niet rendabel te zijn de kustonderhoudsmaatregelen te blijven uitvoeren. Vanuit economisch oogpunt kan het advies zijn de zee haar gang te laten gaan mits de wettelijke veiligheidsrandvoorwaarde voor het gebied dat binnendijs ligt niet wordt overschreden. Een dergelijke afweging is zeer actueel bij Bergen aan Zee. Het hoogheemraadschap heeft aangegeven dat het de veiligheid van het dorp niet langer onvoorwaardelijk kan garanderen (zie bijlage 5.3).

De maatschappelijke functies zelf worden op deze manier niet als beperkende factor voor dynamisch kustgedrag gezien, maar juist de economische waarde van deze functies gerelateerd aan de kosten voor kustonderhoud én de wettelijke veiligheidsnormen voor het achterland zijn bepalend voor de toegestane dynamiek. Bij de optimale situatie met een minimale som van risico's en kosten voor onderhoudswerkzaamheden behoort een optimale herhalingsstijd voor zandsuppletie (uitgaande van het wettelijke beschermingsniveau van het achterland). Met behulp van deze optimale herhalingsstijd kan een optimale zone worden aangewezen waarin dynamisch kustgedrag vanuit economisch oogpunt wordt toegestaan. Met behulp van de resultaten van de deelmodellen uit de voorgaande hoofdstukken wordt in dit hoofdstuk de theoretische uiteenzetting van de optimalisatie gegeven.

10.2 Randvoorwaarden en uitgangspunten

10.2.1 Schade

Er wordt een economisch optimum uitgerekend met de aanname dat indien schade optreedt er herbouwd wordt op een locatie die niet schadegevoelig is. Op deze manier wordt schade maar eenmalig in rekening gebracht. De schadepost die ontstaat bestaat niet alleen uit een vast bedrag voor de investeringswaarde, maar tevens uit opbrengstderving doordat inkomsten worden misgelopen. Voor deze opbrengstderving wordt een periode van twee jaar in rekening gebracht.

Door deze aanname wordt de ondergrens van de schade berekend. De schade die wordt berekend indien wordt aangenomen dat na het optreden van schade herbouwd wordt op dezelfde plaats is hoger.

10.2.2 Stormen

De kans dat er in één jaar meerdere stormen plaatsvinden wordt niet meegenomen. De totale duinafslag kan in werkelijkheid door de som van de duinafslag ten gevolge van verschillende individuele stormen groter zijn dan de berekende teruggang in dit

model. Bovendien kan het zo zijn dat door het optreden van meerdere grote stormen binnen één jaar de kust zich niet helemaal binnen hetzelfde stormseizoen heeft aangepast aan het dynamisch evenwicht.

Doordat het voorkomen van meerdere stormen in één stormseizoen niet wordt meegenomen wordt wellicht een positiever beeld geschetst van de kustachteruitgang dan in werkelijkheid misschien het geval is. Als gevolg hiervan wordt evenals in sectie 10.2.1 de ondergrens van schade berekend. De schade als gevolg van een grotere kustachteruitgang bij superpositie van duinafslag ten gevolge van meerdere stormen binnen één jaar is groter.

10.2.3 Planperiode

Voor civiele werken wordt in praktijk vaak een planperiode van 50 jaar in beschouwing genomen. Bij duurzame kunstwerken wordt vaak een grotere periode aangenomen. Bij flexibele civiele werken wordt een minder grote periode aangehouden. In dit model gaat het over zandige kusten en duinen die als kustverdedigingswerken fungeren. Voor de beschouwde planperiode is daarom een planperiode van 30 jaar genomen.

10.2.4 Frequentie zandsuppleties

Bij de optimalisatie wordt van twee beheersopties uitgegaan. Onder de kustlijnbenadering worden theoretisch suppleties uitgevoerd indien de TKL de BKL-norm nadert of overschrijdt (zie sectie 4.5.4). Om de kusterosie te bestrijden heeft Rijkswaterstaat een meerjarenschema opgesteld om de investeringen in de tijd te spreiden. In werkelijkheid bedraagt de gemiddelde herhalingsperiode van zandsuppleties 3,4 jaar. De positie van de BKL ten opzichte van de RSP-lijn fluctueert langs de Hollandse kust. In deze studie is aangenomen dat de positie van de BKL in het standaardprofiel gelijk is aan het referentiepunt: de overgangsknik van het duinfront met de overige duinen. De kustlijnbenadering beoogt structurele kustachteruitgang tegen te gaan en geen verdergaande achteruitgang waarbij schade optreedt te tolereren. In dat opzicht voldoet dit fictieve BKL-punt aan het doel dat de kustlijnbenadering beoogt. De eerste suppletie wordt op het begintijdstip uitgevoerd.

Voor de kustzonebenadering wordt de optimale frequentie voor zowel de landwaartse als de zeewaartse strategie gezocht met een niet-geautomatiseerde zoekmethode. Eerst wordt voor de landwaartse strategie het verloop van de totale kosten bekeken indien geen verdedigingsmaatregelen worden uitgevoerd. Vervolgens wordt door het systematisch variëren van de suppletiefrequentie voor beide strategieën gezocht naar een frequentie waarbij de som van suppletiekosten en risico zo klein mogelijk is.

10.2.5 Economische schaal

De schade die ontstaat ten gevolge van de terugtrekking van de kust kan economisch gezien op verschillende schalen worden geïnterpreteerd. Lokaal gezien treft de schade in een kustzone de ondernemer ter plaatse. Deze lijdt schade aan de vaste activa en heeft gedurende een bepaalde periode geen productie en opbrengsten.

Macro-economisch gezien hoeft de schade niet van grote betekenis te zijn. Vakantieparken buiten de zone waar schade is geleden vangen de vraag naar recreatie op, het winkelend publiek gaat elders haar kleren kopen, supermarkten in de omgeving draaien tijdelijk een grotere omzet en cafés en restaurants in de naburige gemeenten trekken gedurende de periode tot herstel meer klanten.

In de optimalisatie worden de kosten van suppleties en het risico lokaal bekeken.

10.2.6 Netto Contante Waarde

Het risico op een bepaald tijdstip en de kosten van suppletiewerkzaamheden op een ander tijdstip moeten worden teruggerekend naar een Netto Contante Waarde

(NCW). Met behulp van een NCW kunnen kosten die op verschillende tijdstippen zijn ontstaan met elkaar worden vergeleken. Een NCW wordt als volgt berekend:

$$NCW = \sum_{i=0}^T \left[\frac{K_i}{(1+r)^i} \right] \quad : 10-1$$

met:

NCW: Netto Contante Waarde

K_i : kosten of schade op $t=i$

T : totaal beschouwde planperiode

r : reële rentevoet, gemiddelde rentevoet tijdens de gehele planperiode van de suppletieketen verminderd met het inflatiepercentage.

10.2.7 Sequentieel model

Het optimalisatie-model is een sequentieel model, waarin veranderingen van invoergegevens in de tijd niet zijn meegenomen. In tijdstappen van 1 jaar worden de suppletiekosten en de bijbehorende schade berekend. De suppletiefrequentie wordt daarbij gevarieerd van eens per 1-30 jaar. De herhalingstijd T_h voor de kustlijnbenadering is gemiddeld 3,4 jaar (zie sectie 6.2.1). Het model is ontwikkeld voor gehele positieve waarden van herhalingstijden. Dat betekent dat voor de kustlijnbenadering een keuze moet worden gemaakt tussen een herhalingstijd van 3 of 4 jaar. Er is gerekend met een herhalingstijd $T_h=3$ jaar. Het uitgangspunt van de kustlijnbenadering is het handhaven van de kustlijn. Bij een herhalingstijd van $T_h=3$ jaar wordt de grootste veiligheid geboden aan functies in de kustzone.

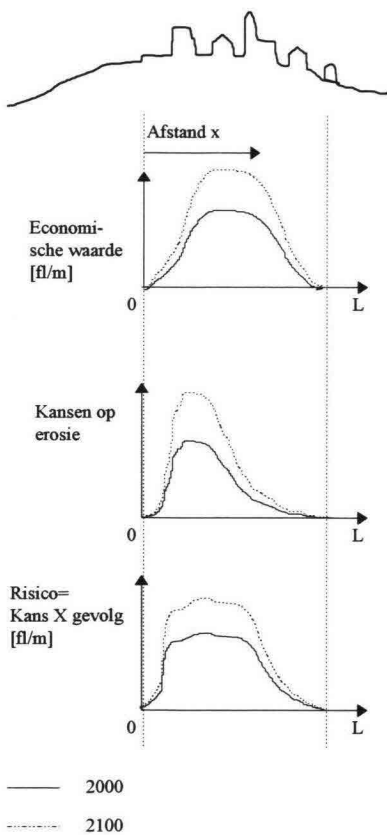
Veranderingen, zoals de verandering van het duinprofiel ten gevolge van de kustachteruitgang, veranderingen van hydraulische condities in de tijd en de economische ontwikkeling door de tijd zijn niet meegenomen. Vanaf het begintijdstip in de huidige situatie respectievelijk toekomstige situatie tot aan het einde van de planperiode wordt uitgegaan van constante condities. De terugkoppeling tussen veranderende hydraulische condities en de invloed daarvan op morfologische processen en andersom is niet in het model opgenomen.

10.3 Optimalisatie-model

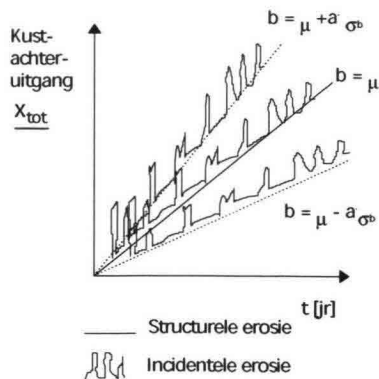
10.3.1 Kosten en baten

Het is duidelijk dat indien geen maatregelen worden genomen tegen doorgaande erosie dit op den duur financiële consequenties kan hebben voor diegene die er wonen, werken of anderszins belangen hebben. Bovendien geldt dat er kosten zijn verbonden aan het uitvoeren van zandsuppleties om kustachteruitgang tegen te gaan of te herstellen. Door frequenter en grotere zandsuppleties uit te voeren nemen de kosten voor kustverdediging toe, maar zal door de investering de kans op schade worden verkleind. De afweging is in zekere een afweging tussen kosten voor de suppletie enerzijds en economische baten anderzijds. Door het minimaliseren van de som van de kans op schade en kosten voor kustonderhoud wordt een optimale herhalingstijd voor zandsuppleties bepaald.

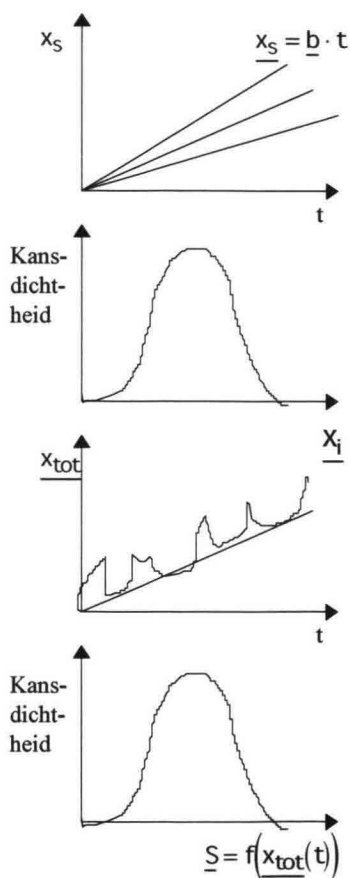
Voor de kans op schade wordt het hydraulisch-morfologische deelmodel uit hoofdstuk 5 aan het economische deelmodel uit hoofdstuk 8 gekoppeld. Als de kust ten gevolge van structurele- en incidentele erosie zover achteruitgaat dat de afstand tussen de positie van de maatschappelijke functies en het referentiepunt (overgangsknik tussen het duinfront en de overige duinen) wordt overschreden, treedt er schade op. De kans op deze schade wordt bepaald door de kans op een dergelijke kustachteruitgang.



Figuur 10-1: Risico analyse voor de bepaling van de schade aan activiteiten in de kustzone ten gevolge van erosie.



Figuur 10-2: Superpositie structurele en incidentele erosie.



Figuur 10-3: Berekening kansdichtheidsfunctie van de schade op een bepaald tijdstip t_i .

10.3.2 Kustachteruitgang

Kustachteruitgang is het gevolg van structurele- en incidentele erosie.

De structurele erosie over een bepaalde periode t wordt weergegeven door:

$$\underline{x}_s(t) = \underline{b} \cdot t \quad : 10-2$$

met:

$\underline{x}_s$: stochastische variabele voor structurele erosie over periode t [m]

$\underline{b}$: stochastische variabele voor jaarlijkse structurele erosie [m/jr]

t : tijd [jr]

Bij het dynamisch evenwichtsprincipe, zie sectie 5.4.5 wordt ervan uitgegaan dat het zand dat tijdens het stormseizoen is afgeslagen in het zomerseizoen op natuurlijke wijze terug wordt getransporteerd. De kustachteruitgang ten gevolge van incidentele erosie over een willekeurig aantal jaren t is gelijk aan de jaarlijkse bijdrage van incidentele erosie aan kustachteruitgang. De incidentele erosie is onafhankelijk van de tijd en wordt beschreven met:

$$\underline{x}_i = \underline{a} \quad : 10-3$$

met:

$\underline{x}_i$: stochastische variabele voor incidentele erosie [m]

$\underline{a}$: stochastische variabele: Gumbel-verdeelde parameter met een gemiddelde van $\mu_{\Delta x}$ [m] en een afwijking $\sigma_{\Delta x}$ [m]

De totale kustachteruitgang op tijdstip t , $\underline{x}_{tot}(t)$ (zie Figuur 10-2) wordt beschreven met:

$$\underline{x}_{tot}(t) = \underline{x}_s \cdot t + \underline{x}_i = \underline{b} \cdot t + \underline{a} \quad : 10-4$$

Indien er op het begintijdstip wordt gesuppleerd en in zeewaartse richting een buffer wordt aangelegd verandert de formule voor kustachteruitgang ten opzichte van het referentiepunt. Formule 10-4 wordt:

$$\underline{x}_{tot}(t) = -x_{buffer} + \underline{x}_s \cdot t + \underline{x}_i = -x_{buffer} + \underline{b} \cdot t + \underline{a} \quad : 10-5$$

10.3.3 Schade als gevolg van kustachteruitgang

Indien de afstand tussen het referentiepunt en de locatie van de maatschappelijke functies in de kustzone wordt overschreden ontstaat schade. Deze schade is uit te drukken in:

- vervangingswaarde van de maatschappelijke activiteit;
- inkomstenderving.

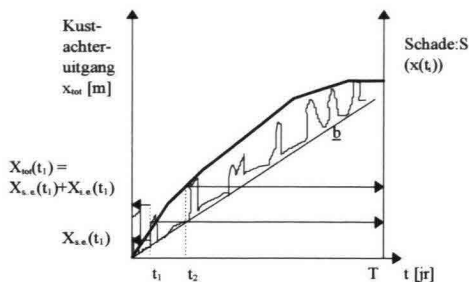
In hoofdstuk 8 zijn waardeverdelingsfuncties afhankelijk van de afstand duininwaarts opgesteld voor verschillende 'bebouwde' dwarsprofielen en dwarsprofielen met 'natuur'.

De schade die optreedt is afhankelijk van de kustachteruitgang. Deze kustachteruitgang is afhankelijk van de tijd. De totale schade is de integraal over de schade vanaf de positie van het duin op het begintijdstip en de positie na de erosie op het tijdstip t :

$$\underline{S} = f(\underline{x}_{tot}(t)) = \sum_{t=0}^{t_i} f(\underline{x}_{tot}(t)) = \sum_{t=0}^t f(\underline{b} \cdot t + \underline{a}) \quad : 10-6$$

10.3.4 Netto Contante Waarde van de schade over de planperiode zonder suppletie maatregelen

Voor de berekening van de kans op schade aan maatschappelijke activiteiten in de kustzone worden de resultaten uit sectie 10.3.2 en 10.3.3 aan elkaar gekoppeld.



Figuur 10-4: Berekening kansdichtheidsfunctie van de schade op een bepaald tijdstip t_i .

Voor elk tijdstip t_i kan met behulp van de stochastische variabelen voor structurele- en incidentele erosie de kansdichtheidsfunctie voor de schade behorende bij de kustachteruitgang op dat tijdstip worden bepaald, zie Figuur 10-3.

De kans op schade over de gehele planperiode kan berekend worden uit de som van deze kansdichtheidsfuncties op de verschillende tijdstippen t_i , zie Figuur 10-4.

De stochastische variabele voor de NCW van de schade over de planperiode indien geen suppletiemaatregelen worden genomen komt overeen met:

$$\underline{NCW}_S = g(S) = g(f(x_{\text{tot}}(t))) = \sum_{t_i=1}^T \left[\frac{\{f(x_{\text{tot}}(t)) - f(x_{\text{tot}}(t-1))\}}{(1+r)^t} \right] \quad : 10-7$$

met:

- T : totaal beschouwde planperiode, 30 jaar
 $\underline{NCW}_S$: stochastische variabele voor de Netto Contante Waarde van de schade over de planperiode
 $g(S)$: NCW-functie: $\underline{NCW}$ is een functie van de schade S
 $f(x_{\text{tot}}(t))$: schade-functie: S is een functie van de totale kustachteruitgang x_{tot}
 $x_{\text{tot}}(t)$: stochastische variabele voor de totale kustachteruitgang x_{tot}
 r : gemiddelde reële rentevoet per jaar tijdens de gehele planperiode

10.3.5 Netto Contante Waarde van de schade over de planperiode met suppletiemaatregelen

De terugkoppeling gebeurt door het nemen van kustverdedigingsmaatregelen in de vorm van zandsuppleties. Als de maatregelen tegen erosie worden uitgesteld (de herhalings tijd van de suppleties wordt groter) neemt de kans op schade toe en wordt het risico van de maatschappelijke activiteiten in de kustzone groter.

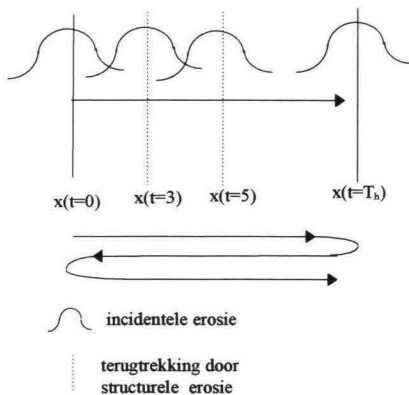
Aangezien in sectie 10.2.1 is aangenomen dat schade ten gevolge van kustachteruitgang eenmalig in rekening wordt gebracht, wordt de kans op schade die de functies lopen in de periode tussen twee suppleties slechts eenmalig over de gehele planperiode meegenomen. Ook de schade ten gevolge van incidentele erosie wordt eenmalig meegenomen, zie Figuur 10-5. Er blijft echter in de jaren na het eerste suppletie-interval altijd een kans bestaan dat er een zware storm optreedt die veel schade veroorzaakt. Die kans is eenmalig meegenomen doordat op $x(t=T_h)$ de incidentele erosie op de structurele erosie over de periode $t=T_h$ wordt gesuperponeerd.

De stochastische variabele voor de NCW van de schade over de gehele planperiode is afhankelijk van de herhalings tijd van de zandsuppletie waarover de schade slechts eenmalig wordt meegenomen:

$$\underline{NCW}_S = g(S) = g(f(x_{\text{tot}}(t))) = \sum_{t_i=1}^{T_h} \left[\frac{\{f(x_{\text{tot}}(t)) - f(x_{\text{tot}}(t-1))\}}{(1+r)^t} \right] \quad : 10-8$$

met:

- $\underline{NCW}_S$: stochastische variabele voor de Netto Contante Waarde van de schade over de gehele planperiode waarover slechts in de periode tussen twee suppleties de schade is meegenomen.
 T_h : herhalings tijd van de suppleties. In de gestelde planperiode zullen in het algemeen meerdere suppleties plaatsvinden. In dit model wordt aangenomen dat dit identieke suppleties zijn met gelijke levensduur.



Figuur 10-5: Zone waarin de kustlijn tussen twee suppleties heen en weer beweegt.

Hierdoor kan de herhalingsjijd van de suppleties binnen de planperiode gelijk worden gesteld aan de levensduur van een individuele suppletie.

$g(\underline{S})$: NCW-functie: NCW is een functie van de schade S

$f(\underline{x}_{\text{tot}}(t))$: schade-functie: S is een functie van de totale kustachteruitgang

$\underline{x}_{\text{tot}}(t)$: stochastische variabele voor de totale kustachteruitgang x_{tot}

r : gemiddelde reële rentevoet per jaar tijdens de gehele planperiode

10.3.6 Netto Contante Waarde van de totale kosten in een situatie met suppletiemaatregelen

De NCW van de totale kosten TK_{R+K_S} is gelijk aan de som van de NCW van de kosten voor suppletiemaatregelen over de gehele planperiode en de NCW van de schade aan maatschappelijke functies over de gehele planperiode (waarbij de schade, door de aanname dat slechts eenmalig schade optreedt en elders buiten de schadezone herbouwd wordt, slechts over de periode tussen twee opeenvolgende suppleties in rekening wordt gebracht).

De suppleties vinden over de planperiode op verschillende tijdstippen plaats. Het tijdstip waarop de eerste suppletie wordt uitgevoerd is afhankelijk van de keuze of er in zeewaartse richting een zandbuffer wordt gecreëerd (landaanwinning) of dat in landwaartse richting terugtrekking van de kustlijn wordt getolereerd.

In het geval dat er een zandbuffer wordt gecreëerd, wordt op het tijdstip $t=0$ van de planperiode direct aan het begin van het eerste jaar de eerste suppletie uitgevoerd. Bij deze zeewaartse strategie worden op het begintijdstip kosten gemaakt. Er wordt een buffer aangelegd waardoor de kans op schade in de eerste T_h jaren wordt gereduceerd. Bij een herhalingsjijd T_h wordt op $t=0$, op $t=T_h$, op $t=2 \cdot T_h$, op $t=3 \cdot T_h$ tot $t=n_s \cdot T_h$ gesuppleerd. Daarbij wordt er van uitgegaan dat de suppleties aan het einde van het suppletiejaar worden uitgevoerd, zodat de schade die ten gevolge van de kustachteruitgang in het suppletiejaar ontstaat wel wordt meegenomen.

De NCW van de totale kosten is dan:

$$\text{NCW}_{TK=S+K_T} = g(\underline{S}) + h(\underline{K}_T) = g(f(\underline{x}_{\text{tot}}(t))) + h(\underline{K}_T(T_h)) = \sum_{t=0}^{T_h} \left[\frac{f(\underline{x}_{\text{tot}}(t)) - f(\underline{x}_{\text{tot}}(t-1))}{(1+r)^t} \right] + \sum_{j=0}^{n_s-1} \left[\frac{\underline{K}_T(T_h)}{(1+r)^{j \cdot T_h}} \right] \quad : 10-9$$

met:

NCW_{S+K_T} stochastische variabele voor de Netto Contante Waarde

$g(\underline{S})$: NCW-functie: NCW is een functie van de schade S

S: stochastische variabele voor de schade

$f(\underline{x}_{\text{tot}}(t))$: schade-functie: S is een functie van de totale kustachteruitgang

$\underline{x}_{\text{tot}}(t)$: stochastische variabele voor de totale kustachteruitgang x_{tot}

$h(\underline{K}_T)$: suppletielkosten-functie: K_T is een functie van de herhalingsjijd T_h

T : planperiode

T_h : herhalingsjijd van de suppleties

n_s : aantal suppleties in planperiode T : $n_s = \frac{T}{T_h}$: 10-10

K_T: stochastische variabele voor de suppletielkosten:

$$\underline{K}_T = \underline{K}_0 + \underline{K}_v \cdot \underline{x}_{\text{suppletie}} = \underline{K}_0 + \underline{K}_v \cdot \underline{b} \cdot T_h \quad : 10-11$$

K_c : stochastische variabele voor de constante kosten

K_v : stochastische variabele voor de variabele kosten

j : suppletie j met $j=0$ tot n_s-1

r : gemiddelde reële rentevoet per jaar tijdens de gehele planperiode

t : tijd

In het geval landwaartse terugtrekking van de kust wordt getolereerd, wordt de eerste suppletie na de eerste herhalingsstijd uitgevoerd (aan het einde van $t=n \cdot T_h$). De totale kosten zien er in dat geval als volgt uit:

$$\begin{aligned} \text{NCW}_{TK=S+K_T} &= g(S) + h(K_T) = g(f(x_{\text{tot}}(t))) + h(K_T(T_h)) = \\ &= \sum_{t=1}^{T_h} \left[\frac{f(x_{\text{tot}}(t)) - f(x_{\text{tot}}(t-1))}{(1+r)^t} \right] + \sum_{j=1}^{n_s} \left[\frac{K_T(T_h)}{(1+r)^{j \cdot T_h}} \right] \end{aligned} \quad : 10-12$$

zie voor de verklaring van de parameters vergelijking 10.9.

De grootte van de NCW van de suppletiekosten over de gehele planperiode is afhankelijk van de herhalingsstijd T_h en van de landwaartse of zeewaartse suppletiestrategie. Bij een herhalingsstijd van $T_h=7$ jaar worden bij de zeewaartse suppletiestrategie vijf suppleties uitgevoerd (op $t=0, t=7, t=14, t=21, t=28$ jaar). Bij de landwaartse suppletiestrategie worden slechts vier suppleties uitgevoerd ($t=7, t=14, t=21, t=28$ jaar). In het geval van een herhalingsstijd van $T_h=16$ jaar worden in het eerste geval twee suppleties uitgevoerd in het tweede geval slechts één. Dat betekent dat bij de zeewaartse suppletiestrategie in het geval de deling van de planperiode door de herhalingsstijd geen geheel getal oplevert er ten opzichte van de landwaartse strategie vaker gesuppleerd wordt. Bovendien geldt dat hoe later de suppletiekosten in de planperiode worden gemaakt des te lager de bijdrage van de verdisconteerde kosten op het begintijdstip $t=0$ is.

10.3.7 Optimalisatie totale kosten: schade en kustverdedigingskosten

Voor verschillende herhalingsstijden kan de NCW van de totale kosten worden berekend. Uit deze NCW behorende bij verschillende herhalingsstijden kan de herhalingsstijd waarbij de NCW van de totale kosten (voor de eerste suppletie na de herhalingsstijd) minimaal is worden bepaald:

$$\begin{aligned} \text{MIN}_{T_h} \{ \text{NCW}_{TK=S+K_T} \} &= \\ \text{MIN}_{T_h} \left\{ \sum_{t=1}^{T_h} \left[\frac{f(x_{\text{tot}}(t_i)) - f(x_{\text{tot}}(t-1))}{(1+r)^t} \right] + \sum_{j=1}^{n_s} \left[\frac{K_T(T_h)}{(1+r)^{j \cdot T_h}} \right] \right\} \end{aligned} \quad : 10-13$$

Uit de herhalingsstijd voor de laagste NCW volgt de optimale bewegingszone voor de kustlijn die landwaarts of zeewaarts voor het kustgedrag moet worden gereserveerd.

Het optimalisatiemodel is in @RISK gemaakt. In bijlage 10.1 is de lay-out van het model gegeven. In bijlage 10.2 zijn de belangrijkste formules die in het optimalisatiemodel zijn ingevoerd opgenomen.

10.4 @RISK-optimalisatie-model en Monte Carlo simulatie

10.4.1 Test optimalisatie-model: deterministische som

Het optimalisatie-model in @RISK wordt eerst voor een situatie met deterministische waarden voor de invoergegevens getest. De test-situatie ziet er als volgt uit:

- de huidige situatie

- een smal bebouwd profiel: Zandvoort, een badplaats met grootschalige recreatieve voorzieningen
- Zandvoort ligt in een brede kustzone: profielbreedte 3
- De discontinue waardeverdelingsfunctie is:

$$0 \leq x \leq 50: \quad S(x) = 1940 \cdot x$$

$$50 \leq x \leq 150: \quad S(x) = 97020 + 3160 \cdot (x - 50)$$

$$150 \leq x \leq 500: \quad S(x) = 413420 + 580 \cdot (x - 150)$$

$$500 \leq x \leq 1500: \quad S(x) = 617460 + 130 \cdot (x - 500)$$

$$1500 \leq x \leq 2900: \quad S(x) = 748160 + 630 \cdot (x - 1500)$$
- de kust bij Zandvoort is een eroderende kust: structurele erosie-klasse 2
- het stormklimaat van IJmuiden is van toepassing op de kust bij Zandvoort
- Zandvoort valt in Kustgebied IV. Voor de veiligheidsafstand wordt de afstand genomen die bij profielbreedte 3 in Kustgebied IV hoort
- voor de herhalingsstijd van suppleren wordt 5 jaar genomen
- het model wordt getest voor de situatie waar op het begintijdstip de eerste suppletie wordt uitgevoerd en zeewaarts buffer is gecreëerd en de situatie waar na de eerste herhalingsstijd voor het eerst wordt gesuppleerd

De invoergegevens staan in bijlage 10.3.

Voor de testsituatie is handmatig berekend wat de NCW van de schade en de NCW van de kosten voor suppletiemaatregelen zijn. Daarnaast is met behulp van het optimalisatie-model in @RISK een deterministische som gemaakt om de NCW's te berekenen. De resultaten van berekeningen met het @RISK optimalisatie-model komen overeen met de resultaten die volgen uit de handberekening. Zie bijlage 10.3.

Vervolgens is gekeken of het model ook het gewenste resultaat geeft bij een situatie waarin de veiligheidsafstand wordt overschreden of wanneer de getrokken waarden voor structurele erosie en incidentele erosie negatief zijn. Voor afwijkende situaties komen voor de deterministische som de handberekeningen en de berekeningen met het @RISK optimalisatie-model overeen.

10.4.2 Aantal iteraties en stabiliteit bij Monte Carlo simulatie

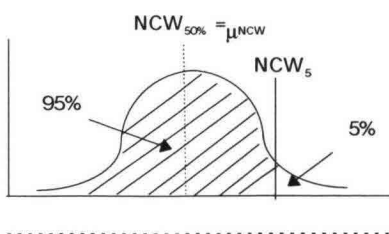
Met behulp van een Monte Carlo simulatie wordt de kansverdeling van de NCW van de totale kosten voor verschillende herhalingsstijden gesimuleerd. Uit de gesimuleerde kansverdelingen wordt de gemiddelde NCW_{gem} en de $NCW_{5\%}$ (de NCW waarbij de kans dat deze NCW wordt overschreden 5% is, zie Figuur 10-6) bepaald. De herhalingsstijd die bij deze minimale NCW's hoort wordt de optimale herhalingsstijd genoemd.

Om er voor te zorgen dat er met de Monte Carlo simulatie voldoende trekkingen worden gedaan om de $NCW_{5\%}$ te bepalen wordt de faalkans gelijk gesteld aan 5%. Met formule 5.18 wordt het aantal trekkingen afhankelijk van de faalkans bepaald:

$$n > \frac{k^2}{E^2} \cdot \left(\frac{1}{P_f} - 1 \right) \quad : 10-14$$

De faalkans $P_f = 5\%$. Voor de betrouwbaarheid $\phi(k)$ wordt 95% ($\phi(1,96) = 95\%$) aangehouden. De maximale relatieve fout wordt gesteld op 50%. Dat wil zeggen dat met een betrouwbaarheid van 95% de berekende faalkans maximaal 50% afwijkt van de gekozen faalkans. De berekende faalkans ligt dan tussen 2,5% en 7,5%. Het aantal iteraties komt neer op 300.

In bijlage 10.4 is het aantal iteraties en de stabiliteit bij een Monte Carlo simulatie onderzocht. NCW_{gem} en $NCW_{5\%}$. Bij 300 iteraties worden voldoende trekkingen gedaan om de NCW_{gem} en de $NCW_{5\%}$ te bepalen.



Figuur 10-6: Kansdichtheidsfunctie van de NCW van de totale kosten

10.4.3 Trekkingen uit verdelingen van stochastische variabelen

Tijdens de Monte Carlo simulatie worden getallen getrokken uit een uniforme verdeling tussen 0 en 1 waarmee vervolgens random getallen X worden gegenereerd van een willekeurige verdeling $F_x(X)$. In geval van het optimalisatie-model worden voor verschillende stochastische invoergegevens deze random getallen van de bekende verdelingen gegenereerd. Deze random getallen vormen de invoergegevens om vervolgens de kustachteruitgang, de schade, de suppletiekosten en de NCW's over de jaren uit de planperiode van 30 jaar te simuleren.

De getallen uit de uniforme verdeling waarmee de random getallen X van een willekeurige verdeling $F_x(X)$ worden gegenereerd kunnen op verschillende wijze worden getrokken, namelijk:

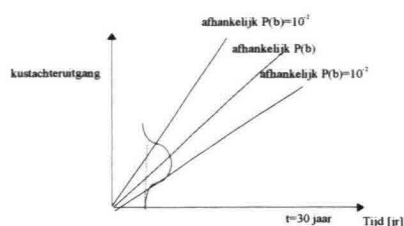
- voor de verschillende invoergegevens kan één trekking worden uitgevoerd voor alle dertig jaren uit de planperiode. In dit geval zijn de waarden van de invoerparameters van de opeenvolgende jaren uit de planperiode afhankelijk van één en dezelfde trekking. Door meerdere trekkingen over 30-jarige periode te nemen wordt de betrouwbaarheid vergroot.
- voor de verschillende invoergegevens kan voor elk jaar uit de planperiode afzonderlijk een onafhankelijke trekking worden uitgevoerd.

De verschillen tussen beide trekkingsmethoden wordt uitgelegd aan de hand van een voorbeeld voor structureel kustgedrag (zie Figuur 10-7 en Figuur 10-8).

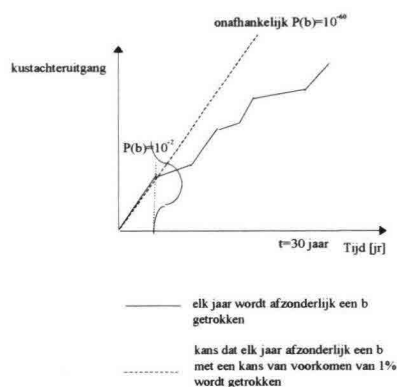
Het gevolg van de toepassing van de eerste methode is dat als toevallig een extreem hoge waarde behorende bij een kans van 1% wordt getrokken, deze waarde voor alle jaren in de planperiode geldt en met deze waarde de uitvoergegevens (kustachteruitgang, schade, suppletie-kosten en NCW's) worden gesimuleerd. Door meerdere trekkingen uit te voeren over 30-jarige periode wordt de betrouwbaarheid vergroot.

Bij de random walk methode wordt voor elk jaar uit de planperiode voor de parameter b van structurele erosie een onafhankelijke trekking uitgevoerd. De kans dat 30 jaar achtereen de waarde met een kans van voorkomen van 1% wordt getrokken is zeer klein.

In deze studie wordt bij de Monte Carlo simulatie de eerste trekkingsmethode toegepast. Voor de opeenvolgende jaren uit de planperiode wordt één trekking genomen. De opeenvolgende jaren zijn afhankelijk van dezelfde trekking. Door meerdere trekkingen (300) uit te voeren wordt de betrouwbaarheid van de uitkomsten van de optimalisatie vergroot.



Figuur 10-7: Invloed van afhankelijke trekkingen in de tijd.



Figuur 10-8: Random walk methode.

Hoofdstuk 11 Optimalisatie voor representatieve situaties

Inhoudsopgave

11.1 Rekencombinaties en rekensituaties	153
11.1.1 Rekencombinaties	153
11.1.2 Rekensituaties	153
11.1.3 Representatieve situaties	154
11.2 Optimalisatie: Smalst verwachte bewegingszone	155
11.2.1 Invoergegevens: rekencombinatie	155
11.2.2 Resultaten optimalisatie: Situatie bij Zandvoort	155
11.2.3 Resultaten optimalisatie: Situatie bij Huisduinen	158
11.3 Optimalisatie: Breedst verwachte bewegingszone	161
11.3.1 Invoergegevens: rekencombinatie	161
11.3.2 Resultaten optimalisatie: Situatie tussen Groet-Camperduin en Schoorl	161
11.4 Terugkoppeling naar overige situaties langs de Hollandse kust en conclusies	164
11.4.1 Overige bebouwde gebieden langs de Hollandse kust	164
11.4.2 Overige gebieden met natuur, extensieve recreatie en waterwinning	166
11.4.3 Bebouwde kustgebieden vergeleken met kustgebieden met natuur, extensieve recreatie en waterwinning	167

11 Optimalisatie voor representatieve situaties

11.1 Rekencombinaties en rekensituaties

11.1.1 Rekencombinaties

Uit de voorgaande hoofdstukken blijkt dat er langs de kust zowel variatie in morfologische processen als in economische ontwikkeling aanwezig is. Om het aantal berekeningen te reduceren zijn de verschillende situaties langs de kust ingedeeld in klassen of standaardprofielen.

Voor wat betreft morfologie is onderscheid gemaakt in:

- structurele erosie: op basis van trendberekeningen van de kustachteruitgang in meters per jaar is de kust ingedeeld in zes erosie-klassen (zie Tabel 6-7).
- incidentele erosie: voor drie stormklimaten langs de Hollandse kust (Den Helder, IJmuiden en Hoek van Holland) zijn de kansdichtheidsfuncties voor de teruggang van het duinfront ten gevolge van stormen bepaald (zie Tabel 6-12 en 6-14).

Voor de economische ontwikkeling zijn vier kusttypen ontwikkeld (zie sectie 5.4.6):

- een kustgebied met natuur, extensieve recreatie en waterwinning
- een bebouwd kustgebied:
 - badplaats met kleinschalige recreatie
 - badplaats met grootschalige recreatie
 - plaats met grootschalige recreatie, havens en industrie

Bovendien is een standaardprofiel aangenomen met drie verschillende breedten.

Voor dit standaardprofiel met variatie in breedte en de vier kusttypen zijn waardeverdelingsfuncties opgesteld (zie sectie 5.6.3 en 5.7.3).

Aan de hand van deze indelingen is in bijlage 11.1 op grafische wijze het aantal mogelijke combinaties voor de huidige situatie langs de kust weergegeven. In bijlage 11.2 staan de combinaties voor de toekomstige situatie beschreven.

11.1.2 Rekensituaties

Naast de verschillende combinaties uit sectie 11.1.1 zijn de beheersopties waaronder en de situatie waarop de optimalisatie plaatsvindt van invloed. Onder de twee beheersopties worden op verschillende wijze maatregelen tegen doorgaande structurele erosie genomen.

- kustlijnbenadering: zandsuppleties worden met een frequentie van 3 jaar uitgevoerd.
- kustzonebenadering:
 - zeewaartse strategie: op het begintijdstip $t=0$ wordt de eerste suppletie uitgevoerd waardoor een buffer wordt gecreëerd voor de kust.
 - landwaartse strategie: na de eerste herhalingstijd wordt de eerste suppletie uitgevoerd.

De optimalisatie wordt uitgevoerd voor twee verschillende tijdstippen: de huidige situatie anno 2000 en de toekomstige situatie in 2100.

- huidige situatie
- toekomstige situatie
 - morfologie: ten gevolge van zeespiegelstijging en intensievere stormcondities veranderen de hydraulische randvoorwaarden. Door de

Tijdstip	2000	2100	2100
Beheers- optie		W*20,1	W*20,1 ruimte- beslag +50%
Kustlijn- benadering	1	2	3
Kustzone- benadering:z eeawaarts	4	5	6
Kustzone- benadering: landwaarts	7	8	9

Tabel 11-1: Rekensituaties.

veranderingen in de randvoorwaarden wordt zowel de mate van structurele erosie als de mate van incidentele erosie beïnvloed.

- maatschappelijke activiteiten: voor de waardering en het ruimtebeslag van maatschappelijke activiteiten geldt dat deze in een periode van 100 jaar een ontwikkeling doormaken.
 - voor de waardevermeerdering wordt een factor 20,1 aangehouden (zie sectie 5.6.4);
 - uitgangssituaties ruimteverdeling:
 - het ruimtebeslag blijft gelijk aan de huidige situatie;
 - het ruimtebeslag neemt met 50% toe.

Dat wil zeggen dat door rekening te houden met de verschillende rekensituaties het totaal aantal mogelijke optimalisaties met de rekencombinaties uit sectie 11.1.1 negen maal zo groot wordt.

11.1.3 Representatieve situaties

Er wordt slechts een beperkt aantal rekencombinaties voor de verschillende rekensituaties doorgerekend. Bij de keuze voor deze rekencombinaties is rekening gehouden met de vragen die aan dit onderzoek ten grondslag liggen:

- Is het vanuit economisch oogpunt aantrekkelijk genuanceerder om te gaan met de basiskustlijn en overschrijding van de basiskustlijn toe te staan door een zone aan te wijzen waarbinnen de kustlijn heen en weer mag bewegen?
- Indien een kustzonebenadering aantrekkelijker zou zijn kan de ruimte voor deze bewegingszone dan het beste landwaarts of zeewaarts worden gezocht?
- Welke verschillen zijn ten aanzien van de bovenstaande vragen te verwachten tussen de huidige en toekomstige situatie?
- Op dit moment is een bouwstop afgekondigd in de kustzone. Wat is het effect van de handhaving van deze bouwstop in de toekomst en het juist toestaan van economische ontwikkelingen (volbouwen van de kustzone)?
- Welke verschillen bestaan er tussen de toegestane ruimte voor dynamiek in een economisch ontwikkeld en bebouwd kustgebied en een kustgebied waar het accent op rust, natuur en extensieve recreatie ligt?
- Wat zijn de gevolgen van de toegestane dynamiek in de kustgebieden met de functie rust en natuur op de verschillende typen natuur in de kustzone?

Er is gekozen om voor de beantwoording van deze vragen uit te gaan van de meest extreme situaties die onder de kustzonebenadering te verwachten zijn:

- de verwachte smalste kustzone
- de verwachte breedste kustzone

De smalste bewegingszone wordt verwacht in een smal bebouwd profiel van een badplaats met grootschalige recreatieve voorzieningen, havens en industrie met veel structurele erosie. De breedste bewegingszone wordt verwacht in een breed onbebouwd profiel met natuur, extensieve recreatie en waterwinning aan een eveneens eroderende kust.

Door uit te gaan van deze meest extreme situaties is de range van uitkomsten voor de optimale bewegingszone te bepalen.

De kosten over de planperiode behorende bij de optimale situatie kunnen vervolgens worden vergeleken met de uitkomsten die worden verkregen indien de kustlijnbenadering wordt toegepast.

11.2 Optimalisatie: Smalst verwachte bewegingszone

11.2.1 Invoergegevens: rekencombinatie

Theoretisch gezien wordt de smalste bewegingszone verwacht in:

- een smal bebouwd profiel;
- aan een eroderende kust;
- aan een kust met een extreem stormklimaat;
- de kust waar vanuit de randvoorwaarde voor veiligheid de grootste beperking aan de bewegingsvrijheid wordt opgelegd.

Langs de Hollandse kust bevinden zich twee grote bebouwde kernen, IJmuiden en Scheveningen met veel economische waarde en met grootschalige recreatieve voorzieningen, havens en industrie. In de loop der jaren zijn er maatregelen genomen om de veiligheid van deze grote kustplaatsen te vergroten. De kusten bij zowel IJmuiden als Scheveningen zanden aan. Er spelen daar geen problemen ten aanzien van structurele erosie. Van de grote badplaatsen zonder grote havens en industrie liggen ook Noordwijk en Egmond aan Zee aan een aanzandende kust. Over Hoek van Holland kan geen uitspraak worden gedaan, omdat door de aanleg van het strandplan Dixhoorn op grond van de discontinuïteiten in de trend van het kustgedrag geen analyse is uitgevoerd naar de mate van erosie of aanzanding.

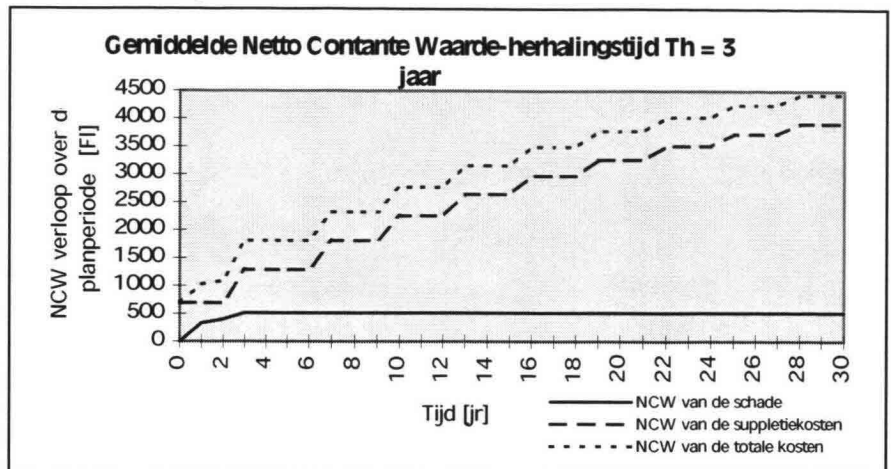
Zandvoort ligt als enige badplaats met grootschalige recreatieve voorzieningen aan een erosieve kust. Zandvoort ligt in een brede kustzone. Bovendien ligt Huisduinen als kleinere kustplaats aan de meest erosieve smalle kust van Noord-Holland. In beide situaties wordt een zeer smalle bewegingszone verwacht. Zowel voor de situatie bij Zandvoort als de situatie bij Huisduinen is een optimalisatie uitgevoerd.

Langs de Hollandse kust wordt het stormklimaat van Hoek van Holland naar Den Helder extremer. De incidentele erosie is berekend voor drie stormklimaten. Voor de optimalisatie bij Zandvoort wordt gerekend met het stormklimaat van IJmuiden. Het stormklimaat van Den Helder is het meest extreem en is van toepassing bij de optimalisatie voor Huisduinen.

Aangezien het duingebied achter Zandvoort zeer breed is, is de beperking die vanuit de veiligheidsrandvoorwaarde aan de bewegingszone is opgelegd niet zo groot. Huisduinen ligt in een smal duingebied. De veiligheidsrandvoorwaarde legt daar een grote beperking op aan de bewegingsruimte. In bijlage 11.3 staan de invoergegevens van de optimalisaties gegeven.

11.2.2 Resultaten optimalisatie: Situatie bij Zandvoort

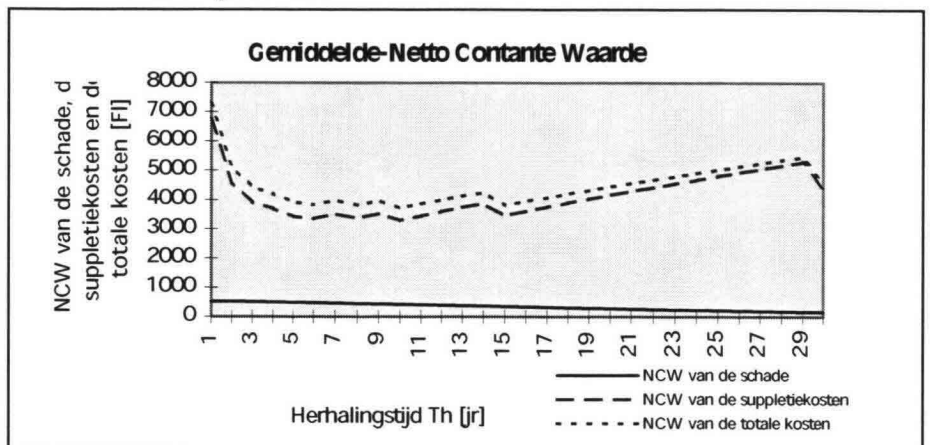
Uit de berekeningen voor de situatie bij Zandvoort volgen een aantal karakteristieke curven die in Figuur 11-1 tot en met Figuur 11-3 zijn weergegeven.



Figuur 11-1: Kustlijnbenadering: Verloop van de NCW van de totale kosten over de planperiode.

Figuur 11-1 laat het verloop van de NCW's zien bij een kustlijnbenadering met een herhalingsstijd van $T_h = 3$ jaar. De curve van de NCW van de suppletiekosten laat een verspringend beeld zien. Om de drie jaar wordt er gesuppleerd en vertoont de curve een sprong. De schade ten gevolge van kustachteruitgang wordt slechts eenmaal over het eerste suppletieinterval meegenomen. Dit verklaart de constante waarde van de curve van de NCW van de schade na $t = 3$ jaar. De NCW van de totale kosten is de superpositie van de NCW van de schade en de NCW van de suppletiekosten.

Kustzonebenadering-zeewaarts



Figuur 11-2: Kustzonebenadering-zeewaarts: NCW van de schade, de suppletiekosten en de totale kosten.

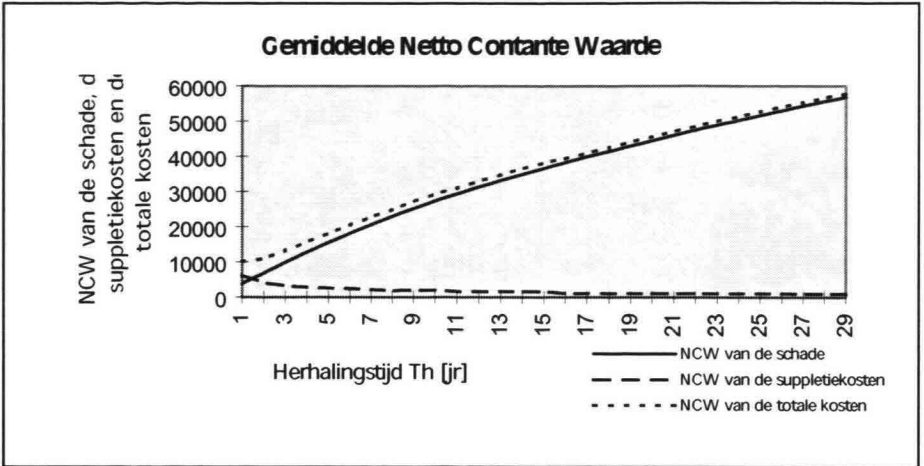
In Figuur 11-2 zijn de NCW's uitgezet tegen de verschillende herhalingsstijden voor de zeewaartse kustzonebenadering. De curve van de NCW van de suppletiekosten vertoont een aantal knikken. De knikken zijn te verklaren uit het feit dat het totaal aantal zandsuppleties tijdens de planperiode voor de verschillende herhalingsstijden op die punten afneemt. Bij $T_h = 15$ jaar is een duidelijke knik te zien. Vanaf daar wordt slechts tweemaal op het begintijdstip en op $t = T_h$ gesuppleerd. De NCW neemt tot $T_h = 29$ jaar toe. Daar is weer een knik te zien. Bij een herhalingsstijd van $T_h = 30$ jaar wordt in de gehele planperiode maar eenmaal gesuppleerd, te weten op het begintijdstip. De curve van de NCW van de schade neemt bij een steeds groter wordende herhalingsstijd af. Dat is begrijpelijk omdat bij een groter wordende

herhalingstijd de buffer die op het begintijdstip wordt aangelegd steeds groter wordt. Door de aanwezigheid van de buffer neemt de kans op schade af.

Kustzonebenadering-landwaarts

	Minimale Gemiddelde Netto Contante Waarde		Minimale Netto Contante Waarde-5%	
	Min	T_h	Min	T_h
	NCW [Fl]	[jr]	NCW [Fl]	[jr]
<i>Kustlijnbenadering</i>				
Heden	4430	3	5810	3
Toekomst W *20,1	1705250	3	209400	3
Toekomst W*20,1 ruimtebeslag +50%	181100	3	374100	3
<i>Kustzonebenadering-zeewaartse buffer</i>				
Heden	3720	11	5170	7
Toekomst W *20,1	163200	7	205200	6
Toekomst W*20,1 ruimtebeslag +50%	172700	7	324900	16
<i>Kustzonebenadering-landwaartse terugschrijding</i>				
Heden	10080	1	15050	1
Toekomst W *20,1	393900	1	562400	1
Toekomst W*20,1 ruimtebeslag +50%	509200	1	704800	1

Tabel 11-2: Uitkomsten optimalisatie voor de situatie bij Zandvoort.



Figuur 11-3: Kustzonebenadering-landwaarts: NCW van de schade, de suppletiekosten en de totale kosten.

Bij de landwaartse strategie van de kustzonebenadering is het schadeverloop enorm, zie Figuur 11-3. Bij een vergroting van de herhalingstijd stijgt de curve van de NCW van de schade sterk. Door vergroting van de herhalingstijd wordt verdere landwaartse terugtrekking van de kustlijn getolereerd. Daardoor neemt de kans op schade steeds meer toe. Door de vergroting van de herhalingstijd neemt de NCW van de suppletiekosten af. Bij een toename van de herhalingstijd neemt het aantal suppleties in de planperiode af en worden de kosten voor zandsuppleties op een later tijdstip binnen de planperiode uitgevoerd, waardoor de verdisconteerde kosten teruggerekend naar het begintijdstip kleiner worden. De optimale NCW van de totale kosten bevindt zich op het begintijdstip.

Overzicht resultaten onder verschillende beheersopties en uitgangspunten

De resultaten van de optimalisatie voor de situatie bij Zandvoort staan in bijlage 11.3. In Tabel 11-2 staan de resultaten van de optimale situaties onder verschillende beheersopties en uitgangspunten gegroepeerd. Deze tabel laat zien dat zowel voor de huidige als toekomstige situatie(s) onder de kustzonebenadering met de zeewaartse strategie de NCW van de totale kosten het laagst zijn.

De herhalingstijd behorende bij de minimale NCW van de totale kosten onder de kustzonebenadering met de zeewaartse strategie is groter dan de herhalingstijd die hoort bij de kustlijnbenadering. Voor de huidige situatie betreft dit een herhalingstijd van 11 jaar. Dat betekent dat op het begintijdstip voor de kust een buffer van ruim 19 meter moet worden aangelegd ($11 \cdot \bar{b} = 11 \cdot 1,75 = 19,1\text{m}$). Voor de toekomstige situatie is de herhalingstijd die hoort bij de minimale NCW van de totale kosten $T_h = 7$ jaar. De aan te leggen buffer op het begintijdstip ligt 35m zeewaarts van het beginprofiel ($7 \cdot \bar{b} = 7 \cdot 5 = 35\text{m}$).

De kustzonebenadering waarbij een landwaartse terugschrijding van de kust wordt toegestaan is de duurste beheersoptie. De NCW van de totale kosten is reeds groot bij een kleine herhalingstijd en wordt steeds groter naar mate de herhalingstijd groter wordt. Een landwaartse terugschrijding van de kustlijn is voor een bebouwd profiel zoals Zandvoort geen aantrekkelijke optie. De economische waarde in het gebied is hoog. Door de vergaande overschrijding van de basiskustlijn ontstaan

¹ $\bar{b}$ staat voor de gemiddelde structurele erosie

hoge schadeposten. Er kan worden geconcludeerd dat in een kustgebied met een hoge economische waarde de kustzonebenadering alleen aantrekkelijk is indien de ruimte voor de bewegingszone zeewaarts wordt gezocht.

Voor de toekomstige situatie zijn twee uitgangssituaties geformuleerd:

- een situatie waarin de economische waarde ten opzichte van de huidige situatie door de waardevermeerdering van het kapitaal toeneemt en waarin de bouwstop blijft gehandhaafd;
- een situatie waarin de economische waarde ten opzichte van de huidige situatie door de waardevermeerdering van het kapitaal en economische ontwikkelingen in de kustzone toeneemt.

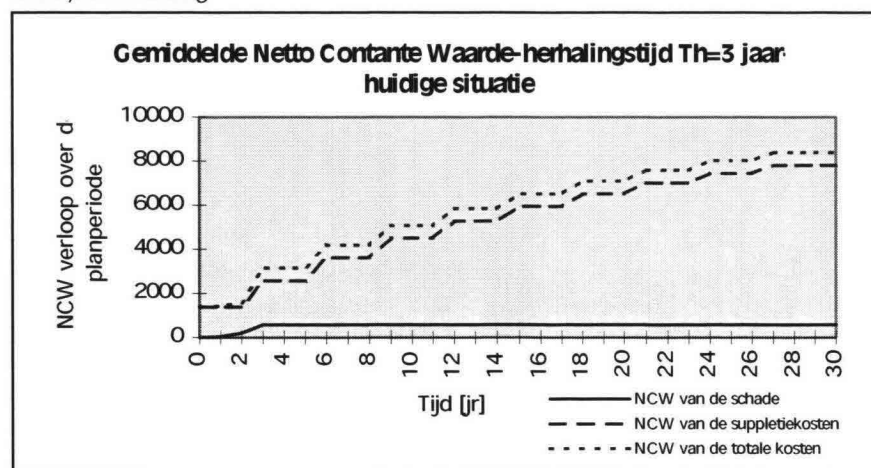
Voor beide uitgangspunten nemen de NCW's van de schade, de suppletiekosten en de totale kosten ten opzichte van de huidige situatie toe. De buffer die in de optimale situatie onder de kustzonebenadering met de zeewaartse strategie wordt berekend is voor de toekomstige situatie groter dan de buffer die uit de berekeningen voor de huidige situatie volgt. Dat is logisch omdat het risico bij een gelijke kans op schade voor de toekomstige situatie groter is. Door een grotere buffer aan te leggen wordt de kans op schade verkleind.

Op grond van de grootte van de NCW's kan geen antwoord worden gegeven op de vraag of de handhaving van de bouwstop of juist het toestaan van verdere economische ontwikkelingen aantrekkelijk is. De NCW van de totale kosten is voor de situatie met een bouwstop kleiner, maar deze NCW van de totale kosten zegt op zichzelf niet zoveel. Naast de schadefunctie als functie van kustachteruitgang zou ook een functie waarin de kans op meeropbrengsten en extra productie ten gevolge van de economische ontwikkeling als functie van de breedte die niet is achteruitgegaan moeten worden meegenomen. De activiteiten in de kustzone lopen bij doorgaande economische ontwikkeling wel een groter risico, maar in het geval er geen schade optreedt zijn de inkomsten ook hoger.

11.2.3 Resultaten optimalisatie: Situatie bij Huisduinen

Uit de resultaten voor de situatie bij Huisduinen komen drie karakteristieke curven naar voren, zie Figuur 11-4 tot en met Figuur 11-6

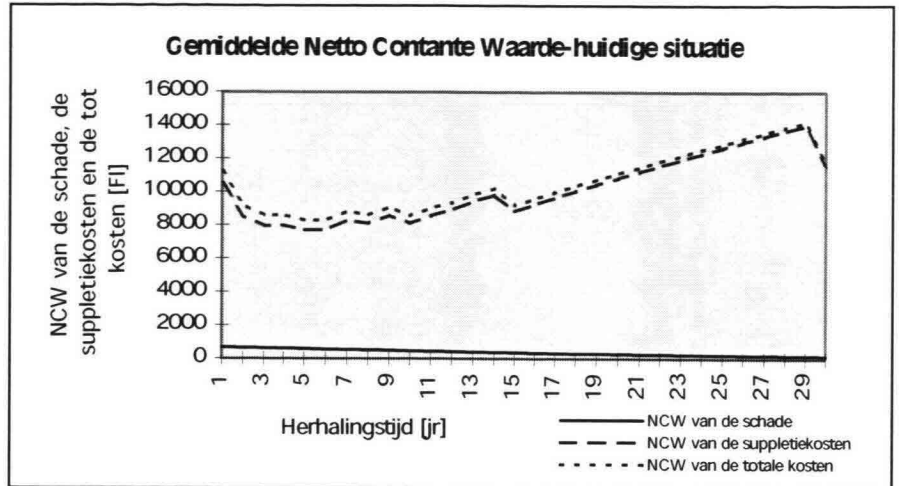
Kustlijnbenadering



Figuur 11-4: Kustlijnbenadering: Verloop van de NCW van de totale kosten over de planperiode.

Deze Figuur laat hetzelfde verloop van de NCW van de schade, de suppletiekosten en de totale kosten zien als Figuur 11-1. De curve van de NCW van de schade ligt iets lager omdat de economische waarde van het gebied iets lager is.

Kustzonebenadering-zeewaarts

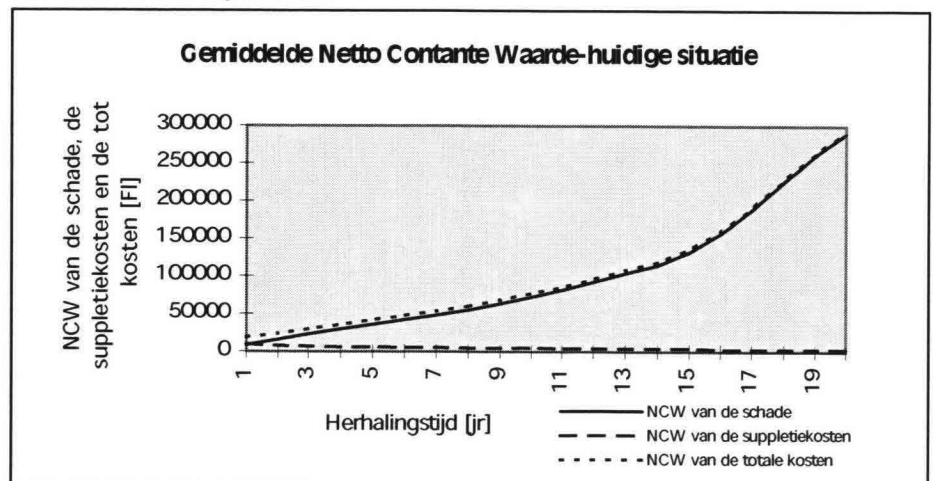


Figuur 11-5: Kustzonebenadering-zeewaarts: NCW van de schade, de suppletiekosten en de totale kosten.

Bij deze zeewaartse kustzonebenadering wordt op het begintijdstip een buffer aangelegd. De grootte van deze buffer wordt bepaald door de herhalingstijd. Figuur 11-5 geeft de NCW van de schade, de suppletiekosten en de totale kosten aan het einde van de planperiode voor herhalingstijden variërend van 1 tot 30 jaar weer. Bij een toename van de herhalingstijd neemt geleidelijk het totaal aantal suppleties in de gehele planperiode af (zie 11.2.2). Dit verklaart de knikken die in de curve van de NCW van de suppletiekosten aanwezig zijn.

Hoewel het kustgebied smal is en de veiligheidsafstand een belangrijke beperkende factor is, is door de aanleg van de buffer van deze randvoorwaarde nog niets in de optimalisatie merkbaar. Door de buffer ligt de curve van de NCW van de schade laag. Bij een toename in herhalingstijd wordt de buffer op het begintijdstip groter en neemt de kans op schade af. Dit verklaart de neergaande trend in het verloop van de curve van de NCW van de schade.

Kustzonebenadering-landwaarts



Figuur 11-6: Kustzonebenadering-landwaarts: NCW van de schade, de suppletiekosten en de totale kosten.

Voor de landwaartse strategie van de kustzonebenadering zijn de resultaten in Figuur 11-6 weergegeven. De minimale NCW van de totale kosten bevindt zich bij de kortste herhalingstijd. Het schadeverloop is groot. Bij een toename van de herhalingstijd wordt een verdere landwaartse terugschrijding toegestaan. Aangezien

de economische waarde in het gebied hoog is neemt de schade bij een grotere landwaartse terugschrijding toe.

De invloed van de veiligheidsafstand is in een smal kustgebied als het kustgebied van Huisduinen bij de kustzonebenadering waarbij landwaartse terugschrijding wordt getolereerd sterk merkbaar. Het model is indien de veiligheidsafstand wordt overschreden niet meer van toepassing. De randvoorwaarde die aan het optimalisatie-model is gesteld wordt dan bereikt. Op dat punt vertoont de curve van de NCW van de schade een enorme knik. Aan de veiligheidsrandvoorwaarde die ten behoeve van het achterland wordt gesteld wordt niet meer voldaan. Deze situatie moet voorkomen worden.

De veiligheidsafstand ligt voor de huidige respectievelijk toekomstige situatie rond de 100 en 80m. De gemiddelde structurele erosie voor deze situaties bedraagt 5m per jaar. Dat betekent dat als geen suppletie maatregelen worden genomen de veiligheidsafstand in ongeveer 20 respectievelijk 16 jaar wordt overschreden. De kans dat de veiligheidsafstand wordt overschreden wordt richting $t=20$ jaar respectievelijk $t=16$ jaar steeds groter. Voor een herhalingsstijd groter dan $T_h = 20$ respectievelijk $T_h = 16$ jaar geldt dat de veiligheidsafstand voordat er voor het eerst wordt gesuppleerd wordt overschreden. Vanuit veiligheidsoogpunt is een grotere herhalingsstijd dan $T_h = 20$ jaar respectievelijk $T_h = 16$ jaar niet toegestaan. Het model kan worden toegepast voor een situatie met een herhalingsstijd van 20 jaar respectievelijk 16 jaar of lager. In Figuur 11-6 zijn de NCW's voor de huidige situatie tot $T_h=20$ berekend. Er is sprake van een randoptimum.

Overzicht resultaten onder verschillende beheersopties en uitgangspunten

In bijlage 11.3 staan de resultaten van de optimalisatie voor de situatie bij Huisduinen. In Tabel 11-3 staan de resultaten van de optimale situaties onder de verschillende beheersopties en uitgangspunten gegroepeerd. De resultaten laten zien dat zowel voor de huidige als toekomstige situatie(s) de NCW van de totale kosten onder de kustzonebenadering met de zeewaartse strategie het laagst zijn.

De herhalingsstijd behorende bij de laagste NCW van de totale kosten onder de kustzonebenadering met de zeewaartse buffer is groter dan de herhalingsstijd die onder de kustlijnbenadering wordt toegepast. Voor de huidige situatie is de herhalingsstijd voor de optimale situatie gelijk aan 6 jaar. Op het begintijdstip moet voor de kust een buffer van 30 m worden aangelegd ($6 \cdot \bar{b} = 6 \cdot 5 = 30$ m). Voor de toekomstige situatie is de herhalingsstijd voor het ene uitgangspunt 2 jaar en voor het andere uitgangspunt 6 jaar. De buffer die respectievelijk bij een herhalingsstijd van 2 en 6 jaar op het begintijdstip moet worden aangelegd bedraagt 10 en 30m ($2 \cdot \bar{b} = 2 \cdot 5 = 10$ m en $6 \cdot \bar{b} = 6 \cdot 5 = 30$ m). Uit de figuur in bijlage 11.3 is te zien dat de situatie voor de toekomstige situatie waarbij alleen van een waardevermeerdering wordt uitgegaan de situatie voor herhalingsstijden tussen 2 jaar en 7 jaar ongeveer een optimaal resultaat geven.

De kustzonebenadering waarbij landwaartse terugschrijding wordt toegestaan komt als duurste beheersoptie uit de analyse. De economische waarde in het gebied is hoog waardoor ten gevolge van landwaartse terugschrijding de schade ook groot is. De landwaartse terugschrijding van de kust wordt voor de situatie bij Huisduinen beperkt door de veiligheidsafstand. Voor de huidige situatie wordt de veiligheidsafstand van 100m bij een gemiddelde structurele erosie van 5m per jaar in ongeveer 20 jaar overschreden. Voor de toekomstige situatie wordt de kleinere veiligheidsafstand van 80m bij een gemiddelde erosie van 5m per jaar in ongeveer 60 jaar overschreden. Het optimalisatie-model is in de huidige, respectievelijk toekomstige situatie voor herhalingsstijden groter dan 20 jaar en 16 jaar niet meer van toepassing. De toegestane dynamiek in het kustgebied wordt dan beperkt door de veiligheidsrandvoorwaarde.

De NCW's van de schade, de suppletiekosten en de totale kosten zijn in de toekomstige situatie groter dan de NCW's die voor de huidige situatie zijn berekend.

	Minimale Gemiddelde Netto Contante Waarde		Minimale Netto Contante Waarde-5%	
	Min NCW [Fl]	T_h [jr]	Min NCW [Fl]	T_h [jr]
<i>Kustlijnbenadering</i>				
Heden	8400	3	13800	3
Toekomst W*20,1	187600	3	423485	3
Toekomst W*20,1 ruimtebeslag +50%	423500	3	196000	3
<i>Kustzonebenadering-zeewaartse buffer</i>				
Heden	8280	6	12500	6
Toekomst W*20,1	167400	2	289100	10
Toekomst W*20,1 ruimtebeslag +50%	190800	6	394600	30
<i>Kustzonebenadering-landwaartse terugschrijding</i>				
Heden	18600	1	24500	1
Toekomst W*20,1	375000	1	576200	1
Toekomst W*20,1 ruimtebeslag +50%	456800	1	753700	1

Tabel 11-3: Uitkomsten optimalisatie voor de situatie bij Huisduinen.

Om dezelfde reden als in sectie 11.2.2 is gegeven kan met behulp van het ontwikkelde model geen uitspraak worden gedaan over of de handhaving van een bouwstop of juist verdere economische ontwikkeling in het kustgebied vanuit economisch oogpunt het aantrekkelijkst is.

Vergeleken met de optimalisatie voor de situatie bij Zandvoort zijn voor Huisduinen geen afwijkende resultaten voor de optimale situatie waargenomen. Voor Huisduinen geldt alleen dat bij de kustzonebenadering waarbij landwaartse terugschrijding wordt getolereerd de veiligheidsrandvoorwaarde van invloed is. Het duingebied bij Zandvoort is zo breed dat daar de veiligheidsafstand zelfs indien gedurende de planperiode geen suppletiemaatregelen worden genomen niet wordt overschreden.

11.3 Optimalisatie: Breedst verwachte bewegingszone

11.3.1 Invoergegevens: rekencombinatie

De breedste bewegingszone wordt verwacht in:

- een breed onbebouwd kustprofiel met de functie rust en natuur;
- aan een eroderende kust;
- aan een kust met een extreem stormklimaat;
- aan de kust waar vanuit de randvoorwaarde voor veiligheid de kleinste beperking wordt opgelegd.

Voor een breed onbebouwd profiel kan aan het breedste profiel en aan het iets minder brede profiel worden gedacht. De economische waarde van het breedste profiel is groter doordat die gebieden ook voor waterwinning worden gebruikt (zie aanname sectie 8.4.6, alleen in de breedste duingebieden wordt water gewonnen). Door de hogere economische waarde van het gebied kan de optimale bewegingszone kleiner zijn. Daarom is de optimalisatie uitgevoerd voor een onbebouwd profiel met een profielbreedte van 1145m waarin de functies natuur, rust en extensieve recreatie dominant zijn.

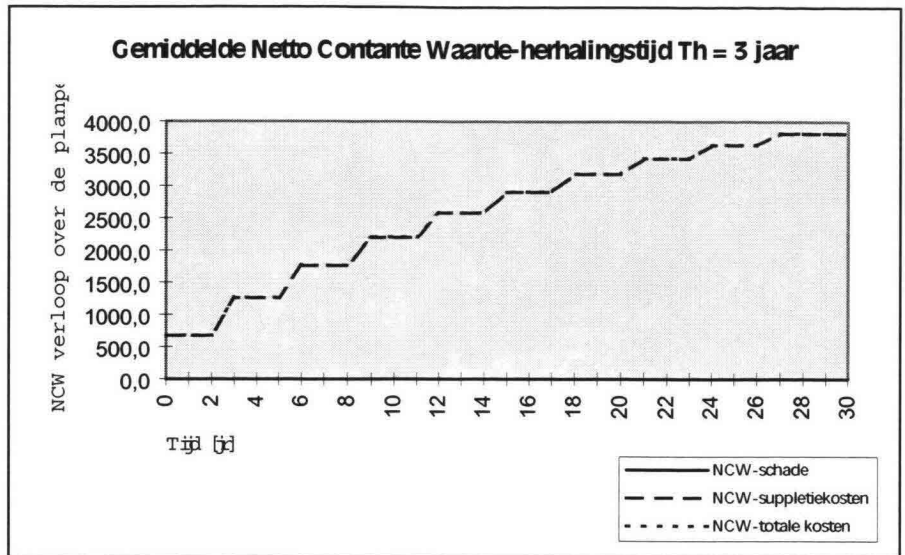
Onder andere het eroderende kustgebied tussen Groet-Camperduin en Schoorl aan Zee bestaat uit onbebouwde profielen met een middelbreed duinprofiel. In dit kustgebied, kustgebied III is de bewegingsruimte het minst beperkt door de randvoorwaarde van de veiligheid.

Voor het stormklimaat in het kustgebied tussen Groet-Camperduin en Schoorl is met het stormklimaat van IJmuiden gerekend.

De invoergegevens voor deze optimalisatie staan in bijlage 11.4.

11.3.2 Resultaten optimalisatie: Situatie tussen Groet-Camperduin en Schoorl

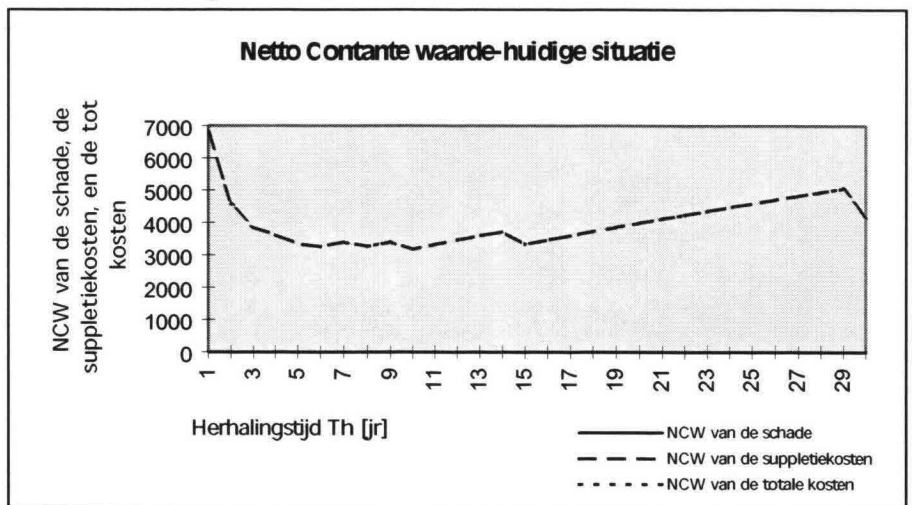
Uit de resultaten voor de situatie tussen Groet-Camperduin en Schoorl worden drie karakteristieke curven waargenomen, zie Figuur 11-7 tot en met Figuur 11-9.



Figuur 11-7: Kustlijnbenadering: Verloop van de NCW van de totale kosten over de planperiode.

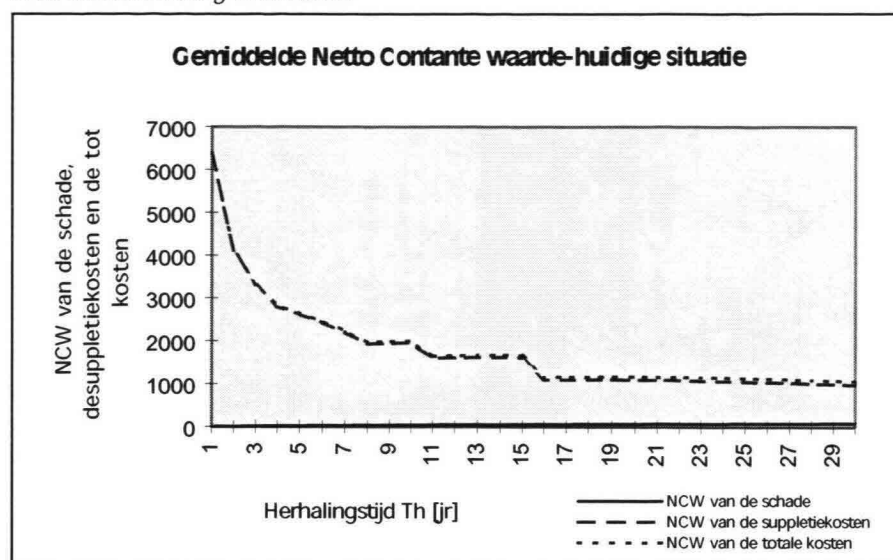
Figuur 11-7 laat het verloop van de NCW van de schade, de suppletiekosten en de totale kosten zien. In de gehele planperiode van 30 jaar worden onder de kustlijnbenadering 10 suppleties uitgevoerd. De NCW van de schade is verwaarloosbaar klein ten opzichte van de NCW van de suppletiekosten. Daardoor loopt in de grafiek de lijn voor de NCW van de suppletiekosten en de NCW van de totale kosten door elkaar heen.

Kustzonebenadering-zeewaarts



Figuur 11-8: Kustzonebenadering-zeewaarts: NCW van de schade, de suppletiekosten en de totale kosten.

Bij de zeewaartse strategie van de kustzonebenadering wordt een buffer aangelegd. De NCW van de schade is verwaarloosbaar klein ten opzichte van de NCW van de suppletiekosten. Daardoor is de curve van de NCW van de schade bijna niet zichtbaar in de grafiek. De curve van de NCW van de suppletiekosten valt samen met de curve van de NCW van de totale kosten. De knikken in deze curve zijn te verklaren uit het feit dat het totaal aantal zandsuppleties in de planperiode op die plaatsen afneemt (zie verklaring sectie 11.2.2).



Figuur 11-9: Kustzonebenadering-landwaarts: NCW van de schade, de suppletiekosten en de totale kosten.

Landwaartse terugschrijding van de kustlijn wordt bij deze beheersoptie toegestaan. Doordat de gegeven economische waarde in het kustprofiel dat de functies natuur, rust en extensieve recreatie herbergt laag is, is de schade die optreedt niet groot. Het gevolg is dat de curve van de NCW van de schade laag is.

De knikken in de curve voor NCW van de suppletiekosten en de totale kosten zijn te verklaren uit het feit dat het aantal suppleties in de planperiode afneemt. De curve van de NCW van de suppletiekosten laat een daling zien. Bijvoorbeeld vanaf een herhalingstijd van $T_h=15$ jaar wordt slechts eenmaal gedurende de planperiode van 30 jaar gesuppleerd. Vanaf $T_h=16$ jaar tot en met $T_h=30$ jaar nemen de NCW's van de suppletiekosten en de totale kosten zeer geleidelijk af. De optimale NCW van de totale kosten bevindt zich bij een herhalingstijd van $T_h=30$ jaar.

Overzicht resultaten onder verschillende beheersopties en uitgangspunten

In bijlage 11.4 staan de resultaten van de optimalisatie voor de situatie tussen Groet-Camperduin en Schoorl. In Tabel 11-4 staan de resultaten van de optimale situaties onder de verschillende beheersopties en uitgangspunten vermeld. Uit de resultaten blijkt dat zowel voor de huidige als de toekomstige situatie de kustzonebenadering waarbij landwaartse achteruitgang van de kust wordt toegestaan de laagste NCW van de totale kosten geven.

De herhalingstijd waarvoor de NCW van de totale kosten voor de kustzonebenadering met de landwaartse strategie minimaal is gelijk aan de gehele planperiode, $T_h = 30$ jaar. In sectie 8.7.2 is er voor gekozen de natuur niet mee te nemen in de waardeverdelingsfunctie, omdat deze functie niet in een economische waarde is uit te drukken. Het effect op de functie natuur wordt achteraf bepaald. De resulterende herhalingstijd is zeer groot. Voor de huidige situatie mag de kust zich onder de optimale situatie $30 \cdot \bar{b} = 30 \cdot 1,75 = 53\text{m}$ terugtrekken. Voor de toekomstige situatie mag de kust zich onder de optimale situatie $30 \cdot \bar{b} = 30 \cdot 5 = 150\text{m}$ terugtrekken.

Het is opmerkelijk dat de laagste NCW optreedt bij de grootste herhalingstijd die onder de gekozen planperiode mogelijk is (namelijk een herhalingstijd even groot als de planperiode). De lengte van de gekozen planperiode blijkt de grootte van de toegestane dynamiek te beïnvloeden. Bij een herhalingstijd die gelijk is aan een nog grotere planperiode neemt de NCW van de suppletiekosten verder af. De economische waarde, die aan de kustgebieden met natuur en landschap is

	Minimale Gemiddelde Netto Contante Waarde	Minimale Netto Contante Waarde- 5%		
	Min NCW [Fl]	T_h [jr]	Min NCW [Fl]	T_h [jr]
<i>Kustlijnbenadering</i>				
Heden	3820	3	5600	3
Toekomst W*20,1	158340	3	202730	3
<i>Kustzonebenadering-zeewaartse buffer</i>				
Heden	3180	10	5020	7
Toekomst W*20,1	152600	6	202200	6
<i>Kustzonebenadering-landwaartse terugschrijding</i>				
Heden	980	30	1750	30
Toekomst W*20,1	59100	30	78600	30

Tabel 11-4: Uitkomsten optimalisatie voor de situatie tussen Groet-Camperduin en Schoorl.

toegekend, is laag. Daardoor zal de extra schade ten gevolge van een nog verdere landwaartse terugschrijding niet opwegen tegen de relatief nog steeds hogere suppletiekosten. Dat betekent dat de grootte van de planperiode voor deze situaties bepalend is voor de grootte van de optimale bewegingszone.

Met name de ver toegestane terugtrekking voor de toekomstige situatie beïnvloedt het type natuur in het duingebied. Er wordt aangenomen dat de gegeven zones uit Figuur 8.7 respectievelijk de zone met jonge duinen, de zeereep, de zone met het duingebied dat ongeveer 400 jaar oud is en de zone met het duingebied dat ongeveer 700 jaar oud is een breedte beslaan van 20m, 50m, 500m en 2400m. De aangegeven breedteafstanden zijn slechts grove aannamen. In de literatuur is geen informatie over deze breedteafstanden te vinden en vermoedelijk variëren de breedtes van de zones in werkelijkheid van kustgebied tot kustgebied. Als van de aangenomen breedteafstanden uit wordt gegaan, gaat bij de getolereerde terugschrijding in de huidige situatie geen natuur met een lange ontstaansgeschiedenis verloren. Voor de toekomstige situatie betekent het dat er wel duinareaal verloren gaat waarvan de natuur zich lang geleden heeft ontwikkeld. Er komt in dat geval 'dynamische' natuur (zie sectie 8.3.2) voor in de plaats.

De economische waarde van natuurgebieden is niet meegenomen in het optimalisatie-model. Door grote dynamiek toe te staan in het kustgebied kan natuur met een lange ontstaansgeschiedenis verloren gaan en ontstaat ten koste daarvan meer 'dynamische' natuur. Volgend op de resultaten van de optimalisatie zal in de praktijk een tweede afweging plaatsvinden, waarin de maatschappelijke acceptatie van het ontstaan van 'dynamische' natuur ten koste van een natuur met een lange ontstaansgeschiedenis ter discussie wordt gesteld. De beoordeling van verschillende typen natuur is bewust buiten het model gehouden door geen waarde voor natuur in het model op te nemen. Aan de toepasbaarheid van het economisch optimalisatie-model moet ten aanzien van de functie natuur grenzen worden gesteld. Het economische model is niet onbeperkt toepasbaar en op grond van alleen een kosten-baten analyse kunnen voor natuurgebieden geen ruimtelijke beslissingen worden genomen.

De kustlijnbenadering is de duurste beheersoptie. De herhalingstijd is vrij laag, waardoor de suppletiekosten over een kortere periode worden gespreid. Voor de kustzonebenadering waarbij een zeewaartse buffer wordt aangelegd zijn de herhalingstijden behorende bij de optimale situatie groter dan de herhalingstijd van $T_h=3$ jaar van de kustlijnbenadering.

Voor de toekomstige situatie is alleen de situatie waarin de economische waarde wordt vergroot geanalyseerd. De waarde van extensieve recreatie is niet gekoppeld aan vaste objecten maar aan een aantal hectare. Als het grondgebied in het kustgebied met de functie natuur en extensieve recreatie reeds helemaal is toebedeeld aan de functie natuur en extensieve recreatie kan het ruimtebeslag niet vergroot worden. Hoewel de economische waarde van het natuurgebied in de toekomst wel toeneemt blijft de waarde laag ten aanzien van de suppletiekosten. Ook voor de toekomstige situatie geldt dat de kustzonebenadering met landwaartse overschrijding van de basiskustlijn over een afstand die gelijk is aan de herhalingstijd (die gelijk is aan de planperiode) maal de gemiddelde structurele erosie per jaar het aantrekkelijkst is.

11.4 Terugkoppeling naar overige situaties langs de Hollandse kust en conclusies

11.4.1 Overige bebouwde gebieden langs de Hollandse kust

Langs de kust bevinden zich een aantal bebouwde kernen. In sectie 11.2.1 wordt aangegeven dat er in de loop der eeuwen maatregelen zijn uitgevoerd om de bebouwde kernen te beschermen. Een groot aantal van de bebouwde kernen langs

de Hollandse kust ligt aan een aanzandende of stabiele kust, zie ook bijlage 11.1 en 11.2. Er spelen voor die bebouwde kernen daar geen problemen ten aanzien van doorgaande zandverliezen als gevolg van structurele erosie.

De bebouwde kustgebieden die in de huidige situatie wel problemen ondervinden door structurele erosie zijn:

- Huisduinen (kleine badplaats aan een zeer erosieve en smalle kust)
- Schoorl (kleine badplaats aan een erosieve en brede kust)
- Bergen aan Zee (kleine badplaats aan een erosieve en brede kust)
- Wijk aan Zee (kleine badplaats aan een matig erosieve en brede kust)
- Bloemendaal (kleine badplaats aan een erosieve en brede kust)
- Zandvoort (grote badplaats aan een erosieve en brede kust)
- Wassenaar (kleine badplaats aan een matig erosieve kust met middelbreed profiel)
- Kijkduin (kleine badplaats aan een licht erosieve en smalle kust)
- Ter Heijde (kleine badplaats aan een licht erosieve en smalle kust)

In sectie 11.2 is voor twee gevallen de optimale situatie berekend. Op grond van deze berekeningen worden de volgende conclusies getrokken:

Beheersopties: kustlijnbenadering óf kustzonebenadering?

Uit de berekeningen volgt dat het vanuit economisch oogpunt in een bebouwd kustprofiel met hoge economische waarde aantrekkelijk is om flexibeler om te gaan met de basiskustlijn. Deze flexibele omgang moet vorm krijgen in een kustzonebenadering waarbij op het begintijdstip zeewaarts van het kustprofiel een buffer wordt aangelegd.

Het is in economische zin niet aantrekkelijk om verdere landwaartse terugschrijding toe te staan. Door de hoge economische waarde van bebouwde kustgebieden is de schade die aan de kust door landwaartse terugschrijding ontstaat enorm groot. De NCW van de schade aan het einde van de planperiode voor een willekeurige herhalingsperiode voor zandsuppletie is voor deze beheersoptie relatief hoog ten opzichte van de NCW van de suppletiekosten. Het huidige beleid met de kustlijnbenadering is een aantrekkelijker beheersoptie dan de kustzonebenadering met de landwaartse strategie, maar is een duurdere beheersoptie vergeleken met de kustzonebenadering met de zeewaartse strategie.

De optimalisatie is uitgevoerd voor de situatie bij Zandvoort en Huisduinen. De resultaten komen voor de badplaats met grootschalige recreatieve voorzieningen gelegen in een brede erosieve kustzone redelijk overeen met de resultaten die voor de badplaats met kleinschalige recreatieve activiteiten in een smal zeer erosief kustprofiel berekend zijn. In de optimale situatie wordt voor Zandvoort respectievelijk Huisduinen op het begintijdstip van de huidige situatie een zeewaartse buffer van 20m en 30m aangelegd.

Voor een smal kustprofiel wordt bij de landwaartse strategie van de kustzonebenadering de bewegingsruimte naast de beperking door de economische afweging sterk beperkt door de veiligheidsafstand. Als geen suppletiemaatregelen worden genomen wordt de veiligheidsafstand bij Huisduinen in ongeveer 20 jaar overschreden. Het optimalisatie-model is als de veiligheidsafstand wordt overschreden niet meer van toepassing. In een breed kustprofiel wordt deze veiligheidsafstand niet bereikt en is deze beperking niet merkbaar.

De kust van Huisduinen staat onder invloed van grotere structurele erosie dan de kust bij Zandvoort. De verschillen tussen de economische waarde voor een grote badplaats en een kleine badplaats in het gedeelte van het kustgebied dat zich het meest zeewaarts bevindt zijn niet groot. Voor een erosievere kust is de NCW van de schade en van de totale kosten bij een zeewaartse kustzonebenadering groter.

Huidige situatie versus toekomstige situatie

Er is voor de toekomstige situatie aangenomen dat stabiele en aanzijdende kusten in de toekomst ten minste stabiel zullen blijven. Daarom blijven de kustgebieden die in de toekomstige situatie hinder ondervinden van structurele erosie beperkt tot de kustgebieden die voor de huidige situatie zijn aangewezen als probleemgebieden. Over de bebouwde kernen die in de huidige situatie aan stabiele of aanzijdende kusten liggen kan om die reden weinig gezegd worden.

Ten opzichte van de huidige situatie zijn de NCW's van de schade, de suppletiekosten en de totale kosten toegenomen. Evenals in de huidige situatie wordt in de toekomst de voorkeur gegeven aan de zeevaarthe strategie van de kustzonebenadering. De buffer die voor de toekomstige situatie zeevaarthe moet worden aangelegd is bij Zandvoort respectievelijk Huisduinen 35m en 10-35m. Deze buffer is voor Zandvoort groter dan de buffer die voor de huidige situatie is berekend. Het risico is bij een gelijke kans op schade voor de toekomstige situatie met hogere economische waarden groter. Door een grotere buffer aan te leggen wordt de kans op schade en het risico verkleind. In de toekomstige situatie geldt eveneens dat de kustzonebenadering met de landvaarthe strategie de duurste beheersoptie is.

Voor de toekomstige situatie geldt een strengere veiligheidsrandvoorwaarde. De veiligheidsafstand is kleiner en wordt bij Huisduinen in ongeveer 16 jaar overschreden. Het model is niet meer van toepassing bij een hogere herhalingstijd dan $T_h=16$ jaar.

Handhaving van het interimbeleid met de bouwstop óf ontwikkelen kustzone?

Een inkomstenmodel waarin de meeropbrengsten als gevolg van het verder ontwikkelen van de kustzone zijn opgenomen ontbreekt in het ontwikkelde model. Daardoor kan op basis van dit model niet worden vastgesteld of de handhaving van het interimbeleid met de bouwstop of het volbouwen en economisch ontwikkelen van de kustzone vanuit economisch perspectief aantrekkelijk is.

11.4.2 Overige gebieden met natuur, extensieve recreatie en waterwinning

In sectie 11.3 is een optimalisatie uitgevoerd voor een erosief kustprofiel met profielbreedte 2 dat de functie natuur en extensieve recreatie herbergt. Langs de Hollandse kust zijn veel duingebieden te vinden waar het accent op natuur en rust ligt. Het ene duingebied is breder en wordt tevens gebruikt voor waterwinning. Het andere duingebied is smaller. Voor de smalle duingebieden wordt de bewegingsruimte beperkt door de veiligheidsafstand die ten behoeve van de veiligheid van het achterland is vastgesteld.

Op basis van de optimalisatie zijn een aantal conclusies getrokken.

Beheersopties: kustlijnbenadering óf kustzonebenadering?

Uit de optimalisatie volgt dat zowel voor de huidige als voor de toekomstige situatie de kustzonebenadering met de landvaarthe terugschrijving de laagste NCW van de totale kosten met zich meebrengt. Doordat er voor het kustgebied met de functie natuur en extensieve recreatie een lage economische waarde is meegenomen is het vanuit economisch perspectief aantrekkelijk de kust verder achteruit te laten gaan. In tegenstelling tot een bebouwd kustprofiel zijn de suppletiekosten relatief hoog ten opzichte van de schade die ten gevolge van kustachteruitgang ontstaat.

De grootte van deze landvaarthe bewegingszone wordt bepaald door de herhalingstijd die bij de laagste NCW van de totale kosten hoort. Deze herhalingstijd is gelijk aan de grootst mogelijke herhalingstijd in de planperiode, namelijk de planperiode zelf. De lengte van de planperiode bepaalt de grootte van de bewegingszone. De extra economische schade die ten gevolge van een nog grotere

kustachteruitgang (bij een herhalingstijd die gelijk is aan een nog grotere planperiode) ontstaat is laag en weegt niet op tegen de hoge suppletiekosten. De kustlijnbenadering is de duurste beheersoptie. Ook voor de kustzonebenadering met de zeewaartse strategie is de NCW van de kosten hoog.

Invloed toegestane dynamiek op typen natuur in de kustzone

De herhalingstijd die bij de minimale NCW van de totale kosten van de kustzonebenadering met de landwaartse strategie hoort is voor zowel de huidige situatie als toekomstige situatie gelijk aan de planperiode $T_h=30$ jaar. Voor respectievelijk de huidige en toekomstige situatie heeft dit een toegestane terugschrijding van 53m en 150m tot gevolg. Deze grootte vanuit de economie toegestane bewegingszone heeft gevolgen voor de typen natuur in het kustgebied. Met name in de toekomstige situatie zal natuur met een lange ontstaans-geschiedenis plaats maken voor natuur die hoort bij een dynamischere omgeving. Voor de functie natuur is geen economische waarde in rekening gebracht. De uitkomsten uit de optimalisatie hebben invloed op de typen natuur in het kustgebied. In aansluiting op de resultaten uit de optimalisatie zal in praktijk een tweede afweging volgen waaruit moet blijken of het ontstaan van dynamische natuur ten koste van natuur met een lange ontstaansgeschiedenis maatschappelijk geaccepteerd is. Het economische optimalisatie-model kan niet geheel onbeperkt worden toegepast.

Overige gebieden met natuur, extensieve recreatie en waterwinning

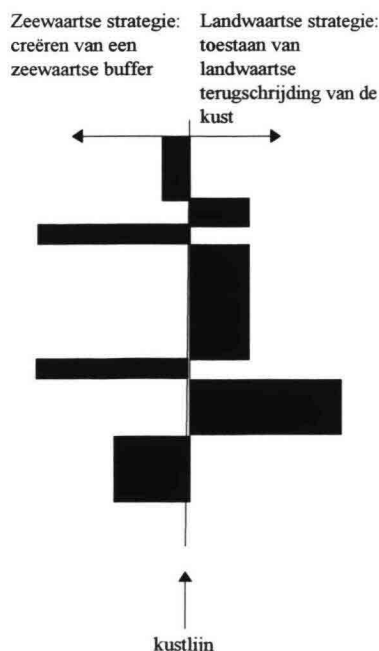
Voor de volgende afwijkende kustgebieden kan ten aanzien van de uitgevoerde optimalisatie een conclusie worden getrokken:

- Breder kustgebieden met de functie waterwinning: de economische waarde in het kustgebied neemt enorm toe. De toegestane landwaartse terugschrijding zal door de verhoogde economische waarde kleiner worden. Wellicht dat door de stijging van de economische waarde van het gebied de zeewaartse strategie van de kustzonebenadering een aantrekkelijkere beheersoptie is.
- Smallere kustgebieden: de bewegingsruimte wordt beperkt door de veiligheidsafstand. Des te kleiner de veiligheidsafstand des te groter deze beperking is.
- Minder erosieve kustgebieden: bij de optimale herhalingstijd die gelijk is aan de constant veronderstelde planperiode van 30 jaar is de landwaartse bewegingszone kleiner, mits de veiligheidsafstand niet wordt overschreden.
- Erosievere kustgebieden: bij de optimale herhalingstijd die gelijk is aan de constant veronderstelde planperiode van 30 jaar is de landwaartse bewegingszone groter, mits de veiligheidsafstand niet wordt overschreden.

In sectie 8.3.2 zijn natuurgebieden langs de Hollandse kust aangegeven die vanwege specifieke natuurwaarden en eigenschappen vanuit ecologisch oogpunt waardevol zijn. De toegestane dynamiek in deze gebieden (het kustgebied met de Kerf bij Schoorl en het Zwanenmeer bij Callantsoog) moet beperkt worden.

11.4.3 Bebouwde kustgebieden vergeleken met kustgebieden met natuur, extensieve recreatie en waterwinning

Uit de voorgaande twee secties blijkt dat er een groot verschil bestaat tussen de optimale situatie voor een bebouwd kustgebied en een kustgebied waar de functies natuur, rust en extensieve recreatie belangrijk zijn. Het grote verschil valt toe te schrijven aan de grootte van de economische waarden die aan de kustgebieden zijn toegekend. In de kustgebieden met natuur en extensieve recreatie, waarvan de economische waarde laag is, is het aantrekkelijk de kust achteruit te laten gaan. De suppletiekosten die gepaard gaan met het handhaven van de kust zijn relatief groot ten opzichte van de schade die de kust door kustachteruitgang ondervindt. Het is dan ook niet verwonderlijk dat voor deze kustgebieden de kustzonebenadering met de



Figuur 11-10: Verknipte optimale bewegingszones langs de Hollandse kust.

landwaartse strategie uit de optimalisatie volgt. Voor een bebouwd kustgebied geldt precies het tegenovergestelde. De economische waarde in die kustgebieden is hoog en de kosten voor suppleties wegen goed op tegen de schade die de kust ten gevolge van kustachteruitgang ondervindt. Een kustzonebenadering waar een zeewaartse buffer wordt gecreëerd is voor deze kustgebieden de aantrekkelijkste beheersoptie.

Langs de Hollandse kust wisselen kustgebieden waar het accent op natuur, landschap en rust ligt kustgebieden met de nadruk op een stedelijk accent af. Aangezien voor beide typen kustgebieden een afwijkende beheersoptie het aantrekkelijkst is zal de optimale situatie in langsrichting langs de Hollandse kust een verknipte en grillige kust tonen, zie Figuur 11-10.

De optimale landwaartse bewegingszone voor de natuurgebieden is afhankelijk van de grootte van de gekozen planperiode. Bij een grotere planperiode zal de optimale herhalingstijd ook groter zijn, waardoor de landwaartse bewegingszone wordt vergroot. Het grillige beeld van de optimale bewegingszones langs de Hollandse kust wordt hierdoor versterkt.

Hoofdstuk 12 Conclusies en aanbevelingen

Inhoudsopgave

12.1 Conclusies	171
12.1.1 Beheersopties, situaties en uitgangspunten	171
12.1.2 Kwaliteit van het ontwikkelde optimalisatie-model	173
12.1.3 Maatschappelijke acceptatie van landwaartse terugschrijding van de kust	173
12.1.4 Maatschappelijke onzekerheden	173
12.1.5 Toepassing bij besluitvorming in de praktijk	174
12.2 Aanbevelingen voor verbeteringen van het model	174
12.2.1 Sequentieel model	174
12.2.2 Uitbreiding model met inkomstenmodel ter beoordeling van de uitgangspunten voor de ontwikkeling van de kustzone in de toekomst	175
12.2.3 Deelmodellen	175
12.2.4 Toepasbaarheid van het optimalisatie-model	176
12.2.5 Overige aanbevelingen voor verbeteringen	177

12 Conclusies en aanbevelingen

12.1 Conclusies

12.1.1 Beheersopties, situaties en uitgangspunten

Een optimalisatie-model is ontwikkeld met als doel inzicht te geven in de relatie tussen morfologische processen in een dynamisch kuststelsel, kustverdedigingsmaatregelen en de aanwezige maatschappelijke activiteiten met bijbehorende economische en ecologische waarden. Met het ontwikkelde economische optimalisatie-model is inzicht gecreëerd in de economische consequenties van het dynamisch handhaven van de basiskustlijn.

Naar aanleiding van deze studie worden de conclusies ten aanzien van de beheersopties als volgt samengevat:

Bebouwde kustgebieden:

Zowel in de huidige als toekomstige situatie is het voor bebouwde kustgebieden met veel economische waarde het vanuit economisch oogpunt verstandig om genuanceerder om te gaan met de basiskustlijn. Bij het overgaan op de kustzonebenadering moet de ruimte voor de bewegingszone zeewaarts gezocht worden via de aanleg van een zeewaartse buffer. De zeewaartse buffers horen bij de optimale herhalingstijden voor de huidige situaties bij Zandvoort en Huisduinen zijn 20m ($T_h=11$ jaar) respectievelijk 30m ($T_h=6$ jaar). Voor optimale situatie in de toekomst zijn de berekende buffers gelijk aan 35m ($T_h=7$ jaar) respectievelijk 10-30m ($T_h=2-7$ jaar). De buffer in de toekomstige situatie is voor Zandvoort groter dan de buffer die voor de huidige situatie is berekend. Het risico is bij een gelijke kans op schade voor de toekomstige situatie met hogere economische waarden groter. Door een grotere buffer aan te leggen wordt de kans op schade en het risico verkleind.

Met het ontwikkelde model kan wel uitspraak worden gedaan over de economische consequenties van ontwikkelingsuitgangspunten in de toekomst ten opzichte van de huidige situatie. Ten aanzien van de toekomstige situatie zijn twee ontwikkelingsuitgangspunten geformuleerd: het handhaven van het interimbeleid met een bouwstop en het economisch ontwikkelen van de kustzone. Echter door het ontbreken van een inkomstenmodel, waarin de meeropbrengsten als gevolg van het verder economisch ontwikkelen van de kustzone zijn opgenomen, kunnen geen conclusies worden getrokken ten aanzien van welke ontwikkelingsuitgangspunt economisch het aantrekkelijkst is.

Het tolereren van een landwaartse terugschrijding van de kustlijn voorbij de basiskustlijn is de voor bebouwde kustgebieden de duurste beheersoptie. Landwaartse terugschrijding moet worden vermeden. De economische waarde is in die gebieden erg hoog. De Netto Contante Waarde (NCW) van de schade ten gevolge van kustachteruitgang is relatief hoog ten opzichte van de NCW van de suppletiekosten.

Voor smalle kustgebieden is de kans dat de toegestane bewegingszone door de veiligheidsafstand wordt beperkt het grootst. Voor de toegestane dynamiek geldt dat naast de beperking van de bewegingsruimte volgend uit de economische afweging de bewegingsruimte vanuit veiligheidsrandvoorwaarde wordt beperkt.

Kustgebieden met het accent op natuur en landschap, rust en extensieve recreatie:

De economische waarde die aan deze kustgebieden is toegekend is relatief laag. Als gevolg hiervan is het vanuit economisch oogpunt aantrekkelijk om grote landwaartse terugschrijding van de kust toe te staan. De economische schade die ten gevolge van kustachteruitgang ontstaat is relatief laag. De suppletiekosten om het gebied te handhaven zijn hoog ten opzichte van de toegekende economische waarde. De kustzonebenadering met de landwaartse strategie is voor deze kustgebieden de goedkoopste beheersoptie.

De herhalingstijd die hoort bij de optimale situatie is gelijk aan de gekozen planperiode ($T_h=30$ jaar). Voor de huidige respectievelijk toekomstige situatie is de bijbehorende optimale landwaartse bewegingszone gelijk aan 55m en 105m. In dit geval is de lengte van de planperiode bepalend voor de grootte van de bewegingszone. De extra economische schade die ontstaat door een nog grotere kustachteruitgang (behorende bij een grotere herhalingstijd dan de gekozen planperiode) is laag ten opzichte van de relatief hoge suppletiekosten. Een grotere kustachteruitgang bij een grotere planperiode zou nog aantrekkelijker zijn.

Er is voor gekozen aan de functie natuur geen economische waarde toe te kennen en het effect van de optimale situatie volgend uit de optimalisatie achteraf te bekijken. Deze functie is op zichzelf dus niet meegenomen in de economische afweging. Het type natuur varieert in het kustgebied als functie van de afstand van het duingebied uit de kust. Natuur die karakteristiek is voor een dynamisch kustgebied bevindt zich aan het zeewaartse gedeelte van het kustgebied; natuur met een lange ontstaansgeschiedenis bevindt zich verder landwaarts in het kustgebied. Door grote dynamiek toe te staan in het kustgebied kan natuur met een lange ontstaansgeschiedenis verloren gaan en ontstaat ten koste daarvan meer 'dynamische' natuur. Naast de economische afweging zal in de praktijk een afweging volgen of het maatschappelijk acceptabel is dat het ene type natuur ontstaat ten koste van een ander type natuur. De beoordeling van verschillende typen natuur is bewust buiten het model gehouden door geen waarde voor natuur in het model op te nemen. Het economische optimalisatie-model kan niet onbeperkt worden toegepast in kustgebieden waar natuur en landschap domineert.

Verschil bebouwde kustgebieden en kustgebieden met accent op natuur en landschap

Zowel voor bebouwde kustgebieden als kustgebieden waar het accent op natuur en landschap ligt, volgt uit de optimalisatie dat het aantrekkelijk is om af te wijken van de huidige kustlijnbenadering. De wijze waarop de ruimte voor de bewegingszone bij een kustzonebenadering wordt gecreëerd wijkt af. Voor bebouwde kustgebieden moet zeewaarts een buffer worden aangelegd om de ruimte voor dynamiek te creëren. Voor kustgebieden waar het accent op natuur en landschap ligt moet de ruimte landwaarts worden gezocht. De economische waarden die aan de gebieden zijn toegekend spelen hierbij een belangrijke rol. In een kustgebied met een relatief lage economische waarde is het aantrekkelijk om de kust achteruit te laten gaan. De schade die optreedt is laag ten opzichte van de kosten die geïnvesteerd zouden moeten worden voor de handhaving van de kust. Voor kustgebieden met een hoge waarde geldt het omgekeerde.

Doordat langs de kust bebouwde kustgebieden en natuurgebieden elkaar afwisselen en de bewegingsruimte voor het eerste type kustgebied zeewaarts en voor het andere type landwaarts wordt gezocht zal de optimale situatie in langsrichting van de kust een verspringend beeld vertonen.

De optimale landwaartse bewegingszone voor de natuurgebieden is afhankelijk van de grootte van de gekozen planperiode. Bij een grotere planperiode zal de optimale herhalingstijd ook groter zijn, waardoor de landwaartse bewegingszone wordt vergroot. Het grillige beeld van de optimale bewegingszones langs de Hollandse kust wordt hierdoor versterkt.

12.1.2 Kwaliteit van het ontwikkelde optimalisatie-model

Het model is ontwikkeld om inzicht te geven in de beheersopties en de maatschappelijke consequenties van ruimtelijke afwegingen die onder deze beheersopties genomen kunnen worden. Het model moet dan ook als een indicatief en richtinggevend model worden gezien.

In de voorgaande sectie is aangegeven dat het optimalisatie-model in kustgebieden met de functie natuur en landschap niet onbeperkt kan worden toegepast. Bovendien ontbreekt een inkomstenmodel in het optimalisatie-model. De meeropbrengsten als gevolg van het verder economisch ontwikkelen van de kustzone worden daardoor niet meegenomen. Er kan geen uitspraak worden gedaan over welk ontwikkelingsuitgangspunt voor de toekomstige situatie het aantrekkelijkste is.

Bij de toepassing van het model op specifieke probleemgebieden, zoals bijvoorbeeld bij Bergen aan Zee, moet worden opgepast. Als gevolg van de aannamen en vereenvoudigingen die in het model zijn gemaakt is het twijfelachtig of het model op detailniveau betrouwbare resultaten oplevert. Voor een meer zorgvuldige afweging bij specifieke probleemgebieden moet het model verbeterd worden. Aanbevelingen voor deze verbetering staan in sectie 12.2.

12.1.3 Maatschappelijke acceptatie van landwaartse terugschrijding van de kust

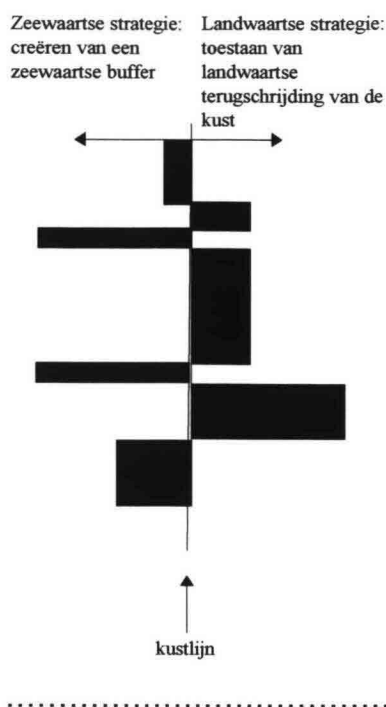
Tijdens een sterke storm kunnen de functies die in de schadegedone van het kustgebied vallen schade ondervinden. Vanuit economisch oogpunt is gekeken naar een optimale situatie waarbij de NCW van de totale kosten (schade en suppletiekosten) is geminimaliseerd. Indien in deze optimale situatie gebruiksfuncties schade ondervinden is deze schade vanuit de economisch oogpunt acceptabel, de totale kosten zijn immers minimaal. Echter in de praktijk wordt niet alleen op grond van een kosten-baten analyse een dergelijke afweging gemaakt.

De acceptatie van het optreden van schade in de kustzone door de maatschappij is bepalend voor de werkelijke realisatie van een beheersoptie waarbij verdere landwaartse terugschrijding van de kust wordt getolereerd. Behoud van de huidige vorm en belevingswaarde van de kust is niet altijd gegarandeerd. Vanuit maatschappelijk oogpunt moet een bewuste keuze worden gemaakt voor behoud of verandering van de kust. De bevolking reageerde terughoudend toen in de jaren 90 werd voorgesteld het gedichte duingebied bij Schoorl waar eens op natuurlijke wijze een kerf is ontstaan op kunstmatige wijze weer open te breken. De publieke acceptatie van een kerf bij Schoorl speelde een belangrijke rol. Het toestaan van een grotere dynamiek in een aantal kustgebieden langs de Hollandse kust kan veel maatschappelijk onbegrip met zich meebrengen.

12.1.4 Maatschappelijke onzekerheden

De maatschappelijke onzekerheden zijn minstens zo belangrijk als de maatschappelijke acceptatie. Deze onzekerheden houden verband met het feit dat in de toekomst maatschappelijke zienswijzen en ideeën kunnen veranderen. Op dit moment wordt voorkeur gegeven aan een dynamisch kustbeheer waarbij veel aandacht wordt besteed aan natuurlijke processen in het kustgebied en het natuurlijk uiterlijk van de kust. Voorheen werden veel kustproblemen aangepakt door het uitvoeren van harde waterkerende constructies.

Ook bestaan onzekerheden omtrent de mate waarin in de toekomst een bepaalde kans op voorkomen van een zekere gebeurtenis maatschappelijk wordt geaccepteerd. Dit betreft onzekerheid ten opzichte van de volgende vragen: 'Hoe wordt de komende eeuw gedacht over veiligheid, hoe belangrijk wordt natuur ten opzichte van economische belangen, hoe wordt straks het kustlandschap gewaardeerd? En hoe ontwikkelen zich de claims die gebruikers de kust opleggen: waterwinning, recreatie, bebouwing, natuur en landschap. Dit zal de weging van belangen



Figuur 12-1: Verknippte optimale bewegingszones langs de Hollandse kust.

voortdurend beïnvloeden en kan in de loop der tijd tot andere keuzen en acceptatie van kansen op bepaalde gebeurtenissen leiden.

12.1.5 Toepassing bij besluitvorming in de praktijk

Aansluitend op de opmerkingen uit sectie 12.1.3 en 12.1.4. kan worden opgemerkt dat het ontwikkelde optimalisatie-model een rationeel model is, waarbij beslissingen ten grondslag liggen aan economische afwegingen. Gedreven door deze economische afweging wordt de optimale suppletiefrequentie bepaald. In de praktijk komt het er echter vaak op neer dat van een dergelijke economische afweging weinig terecht komt. Als in jaar t een budget beschikbaar is dan wijst de praktijk uit dat dit budget in datzelfde jaar wordt uitgegeven om zandsuppleties langs de kust uit te voeren, ongeacht of een model uitwijst of het vanuit economisch oogpunt wel het optimale moment is.

Aan het einde van sectie 12.1.1 is opgemerkt dat de optimale situatie voor afwisselend bebouwde kustgebieden en natuurgebieden langs de Hollandse kust met verknippte optimale bewegingszones een verspringend grillig beeld in langsrichting geeft, zie Figuur 12-1. Het grillige verloop van de kustlijn wordt vergroot als de planperiode wordt vergroot (dan wordt de landwaartse bewegingszone voor de natuurgebieden groter).

De discontinuïteiten in het grillige verloop van de kustlijn leiden tot grote zandverliezen in langsrichting voor de kustgebieden die op kunstmatige wijze worden onderhouden. Hierdoor ontstaan problemen met het handhaven van de optimale situatie langs de Hollandse kust. Er moeten grotere overgangsgebieden worden aangegeven, waardoor minder extreme overgangen ontstaan. Op basis van de resultaten van verschillende kustgebieden kan worden bekeken wat een optimale situatie voor het gebied als geheel is. Ook kan direct voor een groter gebied een optimalisatie met het ontwikkelde model worden uitgevoerd.

12.2 Aanbevelingen voor verbeteringen van het model

In sectie 10.2 staan de aannamen en randvoorwaarden die ten grondslag liggen aan het optimalisatie-model vermeld. Een aantal van de aannamen beïnvloeden de kwaliteit en de mogelijkheden van het model. Bovendien is in hoofdstuk 9 een analyse naar onzekerheden en gevoeligheden verricht voor de deelmodellen. Deze onzekerheden en gevoeligheden in de deelmodellen werken door in het uiteindelijke optimalisatie-model. Tenslotte zijn tijdens de optimalisatie-berekeningen een aantal punten gesignaleerd waarin het model tekort schiet.

In dit afsluitende hoofdstuk worden aanbevelingen gedaan ten aanzien van de punten waarop het model verbeterd zou kunnen worden.

12.2.1 Sequentieel model

In het ontwikkelde model zijn twee tijdstippen geanalyseerd: de huidige en de toekomstige situatie. Vanaf het begintijdstip in de huidige en in de toekomstige situatie zijn de invoergegevens uit de deelmodellen voor het optimalisatie-model constant gehouden. Gedurende de planperiode, vanaf het begintijdstip tot aan het einde van de planperiode zullen in werkelijkheid veranderingen optreden. Het kustprofiel verandert ten gevolge van structureel en incidenteel kustgedrag. De hydraulische condities veranderen ten gevolge van zeespiegelstijging. Bovendien zullen economische ontwikkelingen optreden in de kustzone. Ook de terugkoppeling tussen veranderende hydraulische condities en de invloed daarvan op de morfologie en vice versa is niet meegenomen. Het ontwikkelde model is een sequentieel model, waarin veranderingen van invoergegevens in de tijd niet zijn meegenomen. Bij vervolgonderzoek zou de ontwikkeling van de invoergegevens in de tijd en de inpasping daarvan in het optimalisatie-model verder kunnen worden onderzocht.

12.2.2 Uitbreiding model met inkomstenmodel ter beoordeling van de uitgangsposities voor de ontwikkeling van de kustzone in de toekomst

Door het toevoegen van een inkomstenfunctie aan het optimalisatie-model zou de afweging tussen de handhaving van de bouwstop en het reserveren van ruimte voor dynamiek en het toestaan economische ontwikkeling kunnen worden uitgevoerd.

Uit sectie 11.4.1 komt naar voren dat het niet mogelijk is met het ontwikkelde model antwoord te geven op de vraag of juist het toedelen van ruimte in de kustzone aan economische activiteiten (verdergaande economische ontwikkelingen) of juist het reserveren van de ruimte voor dynamiek (handhaven van de bouwstop) economisch aantrekkelijk is. Door de kustzone te ontwikkelen wordt het risico in de kustzone vergroot, maar wordt tevens een meeropbrengst geïntroduceerd indien er geen schade optreedt. De meeropbrengstenfunctie ontbreekt in het ontwikkelde model.

De opgestelde waarderingsfuncties uit hoofdstuk 8 bestaan uit directe en indirecte economische waarden voor de verschillende deelfuncties. In de waarderingsfuncties voor de verschillende typen bebouwde delen en de natuurgebieden is het aandeel van de verschillende functies afzonderlijk samengenomen in een totale waarderingsfunctie voor het gebied als functie van de afstand landinwaarts (loodrecht op de kust). Met behulp van de gegevens over de individuele functies zouden (extra) inkomstenfuncties kunnen worden opgesteld, waardoor in het optimalisatie-model de inkomstenfunctie kan worden toegevoegd. Uit de optimalisatie volgt dan niet het minimum van de som van de NCW van de schade en de suppletie kosten, maar wordt het minimum van de NCW van de totale kosten verminderd met de NCW van de totale meeropbrengsten.

Voor de wijze waarop het model zou kunnen worden aangepast is een voorstel gedaan. Daarvoor wordt verwezen naar bijlage 12.1.

Met het aangepaste model moet het mogelijk zijn de gewenste afweging te maken. Om een afweging te maken tussen welke functies het meest rendabel zijn voor de economische ontwikkeling van de kustzone, zouden voor de deelfuncties afzonderlijk schade- en opbrengstenfuncties kunnen worden opgesteld.

12.2.3 Deelmodellen

In de analyse naar onzekerheden en gevoeligheden van hoofdstuk 9 is voor de verschillende deelmodellen aangegeven door welk aanvullend onderzoek de onzekerheden in de modellen mogelijk kunnen worden gereduceerd. De onzekerheden in de deelmodellen kunnen doorwerken in het optimalisatie-model. De meest relevante onzekerheden worden hieronder besproken.

Hydraulisch-morfologisch model

Om de kwaliteit in het uiteindelijke deelmodel te vergroten is aanvullend onderzoek naar de volgende punten van belang:

- Onderzoek naar vormen van periodiek en niet periodiek kustgedrag
In het ontwikkelde optimalisatie-model zijn twee vormen van kustgedrag meegenomen: incidentele erosie en structurele erosie. In Figuur 5.1 is te zien dat de ontwikkeling van de kustlijn over een zekere periode kan worden gezien als een superpositie van de gevolgen van (deels onafhankelijke) ontwikkelingen. Door incidentele en structurele erosie in het model op te nemen wordt slechts een deel van het kustgedrag beschreven. Onderzoek naar vormen van periodiek en niet-periodiek gedrag, die een natuurlijke oorzaak hebben of het gevolg zijn van menselijke ingrepen in het kustgebied, moet uitwijzen of het in het vervolg zinvol zou zijn andere vormen van kustgedrag in het ontwikkelde model op te nemen.
- Structurele erosie
 - onderzoek naar een geschikte conversiefactor om volumeveranderingen om te zetten naar kustachteruitgang en kustuitbouw per meter;

- onderzoek naar de invloed van klimaatsveranderingen op structureel kustgedrag. In de huidige situatie vormen aanzandende en stabiele kustgebieden geen probleem. Dat hoeft niet zo te zijn voor de toekomstige situatie. Er is met name gebrek aan inzicht over hoe stabiele en aanzandende kusten zich in de toekomst zullen gedragen.
- Incidentele erosie
 - Onderzoek naar de invloed van het niet meenemen van de kans dat er jaarlijks meerdere stormen voorkomen en dat deze individuele stormen samen een grotere kustachteruitgang genereren dan een individuele storm veroorzaakt.
 - Onderzoek naar de invloed van het standaardprofiel op de berekening van duinafslag. Met name de keuze van een kustprofiel voor de toekomstige situatie blijkt grote invloed op de mate van incidentele erosie te hebben.
 - Voor de incidentele erosie is de verdelingsfunctie berekend voor het beginprofiel van de huidige en toekomstige situatie. Vervolgens verandert het profiel in de tijd. Er is aangenomen dat de verdelingsfuncties toepasbaar blijven op de posities die de kust gedurende de planperiode inneemt. Er zou onderzoek kunnen worden uitgevoerd naar de wijze waarop de verdelingen voor incidentele erosie voor de verschillende kustposities eventueel veranderen.

Model van de kustverdedigingsmaatregelen

Er moet onderzoek worden verricht naar:

- de invloed van andere kustverdedigingsmaatregelen;
- andere typen zandsuppleties, in het bijzonder naar vooroeversuppleties.

Economisch model

In het economische deelmodel zijn slechts voor een beperkt aantal standaard-situaties waardeverdelingsfuncties opgesteld. In werkelijkheid doen zich veel verschillende situaties voor langs de kust. Voor sommige bebouwde profielen is de economische waarde relatief groot en wordt deze waarde ten opzichte van de werkelijkheid overschat. Het economisch model kan worden verbeterd door:

- het toevoegen van waarderingsfuncties voor de situatie langs de Hollandse kust die afwijken van de standaardsituaties die in het economische model zijn opgenomen;
- het verbeteren van de standaardsituaties, zodat deze beter aansluiten op de werkelijke situaties langs de Hollandse kust;
- het toevoegen van een component waarin de waardering van natuur is meegenomen. Het ontwikkelde model kan niet onbeperkt worden toegepast op kustgebieden waar het accent op natuur en landschap ligt. Er kan onderzoek worden uitgevoerd naar een methode waarmee natuur kan worden afgewogen tegen economische waarden in het kustgebied. De waardering van natuur zal echter altijd subjectief blijven.

12.2.4 Toepasbaarheid van het optimalisatie-model

In deze studie is een eerste aanzet gegeven voor de ontwikkeling van een model waarin ruimtelijke afwegingen in de kustzone in economisch perspectief zijn geplaatst. De systematiek is ontwikkeld voor de Hollandse kust.

Er kan een vervolgonderzoek worden uitgevoerd naar een bredere toepasbaarheid van het model (op andere situaties, zoals Deltakust, Waddenkust, Deense kust, Duitse kust, en kustuitbreidingsplannen, zoals de aanleg van een Tweede Maasvlakte). Inzicht in de toepasbaarheid van het modelconcept en in het extra

onderzoek dat moet worden uitgevoerd om het model geschikt te maken is daarbij belangrijk.

Voor het hydraulisch-morfologische model kan met het dimensieloos maken van vergelijkingen die morfologische processen beschrijven (zie bijlage 12.2) een eerste stap richting een algemenere toepasbaarheid van het morfologische deelmodel worden gezet. Er is tijdens de studie naar een model voor de Hollandse kust gebleken dat het lastig is de complexe werkelijkheid in een model te schematiseren. Indien de vergelijkingen in het economisch afwegingsmodel dimensieloos worden gemaakt, gaan fysiek begrijpbare termen in de vergelijkingen verloren.

12.2.5 Overige aanbevelingen voor verbeteringen

In hoofdstuk 10 zijn een aantal aannamen gedaan. Onderzoek naar de correctheid van deze aannamen zou tot verbeteringen in het optimalisatiemodel kunnen leiden. Er wordt aan onderzoek gedacht ten aanzien van de volgende aanname:

Schade (sectie 10.2.1)

Er wordt aangenomen dat indien er schade optreedt er herbouwd wordt op een locatie die niet schadegevoelig is. De schade die kan ontstaan in de periode tussen twee suppleties wordt slechts eenmalig over de planperiode meegenomen. In de periode volgend op de periode van de eerste herhalingsstij is er altijd een kans aanwezig dat er schade optreedt ten gevolge van incidentele erosie. Dit wordt op dit moment niet meegenomen in het model. De schade ten gevolge van incidentele erosie wordt ook eenmalig meegenomen in het model.

Er kan onderzoek worden uitgevoerd naar de invloed van deze aanname op de NCW van de schade. Het zou best een reële aanname zijn dat indien er de schade als gevolg van incidentele duinafslag optreedt, er toch herbouwd wordt op een locatie die schadegevoelig is. Dit beïnvloedt de verwachtingswaarde van de schade.

Foto's fietstour 'Hollandse kust' 10 juni 2000

Zaterdag 10 juni 2000. Daar gaan we dan: broer Hanno van Vuren, neef Dirk Jan de Bruijn en ik zelf richting Hoek van Holland met de fietsen in de bus. Om vervolgens die hele kust van Hoek van Holland tot aan Den Helder (Huisduinen) eens onder de loep te nemen. Wat volgens Prof. Huib de Vriend een afstand van ongeveer 125km zou zijn, blijkt in werkelijkheid door de duinen een stukje verder: 161,5km!

Vertrek Hoek van Holland 9.15uur:



Foto 1: Havenhoofden van de Noorderdam.



Foto 2: Boulevard van Kijkduin met appartementen en hotels en complex met winkels restaurants en cafés .



Foto 3: Boulevard en pier bij Scheveningen.

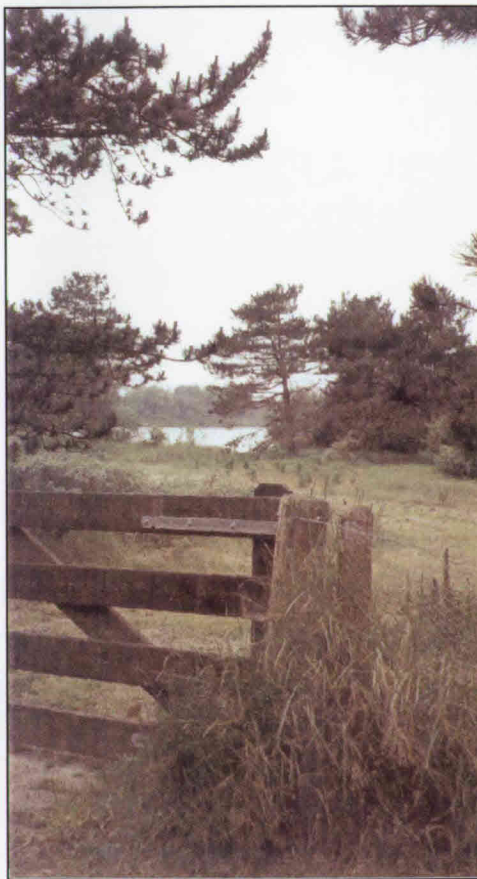


Foto 4: Duinmeren met naaldbomen in natuurgebied Meyendel.



Foto 5: Oude centrum van Katwijk aan zee.



Foto 6: Jong geplat helmgras in de eerste duinrij in het natuurgebied Noordduinen tussen Katwijk en Noordwijk.



Foto 7: Duingebied tussen Noordwijk en Zandvoort.



Foto 8: Zandvoort ligt in het verschiet.



Foto 9: Restaurant Parnassia bij Bloemendaal aan Zee.



Foto 10: De Kennemerduinen.



Foto 11: De Kennemer duinen.



Foto 12: Industrie bij IJmuiden.



Foto 13: Noord-Hollands duinreservaat.

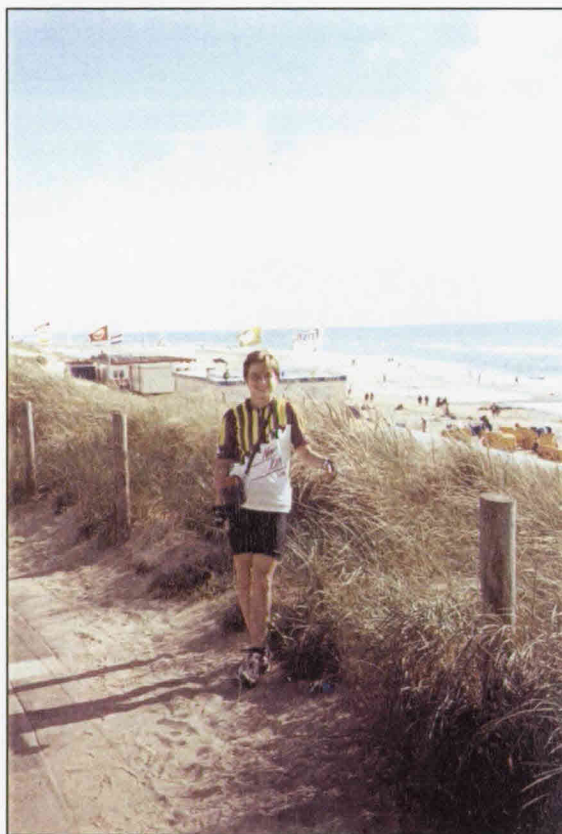


Foto 14: Strandtoerisme bij Bergen aan Zee.



Foto 15: Duinvegetatie in de duinen van het Noord-Hollands duinreservaat.



Foto 16: Uitzicht vanaf de Hondsbossche en Pettemer zeewering (landinwaarts).



Foto 17: Uitzicht vanaf de Hondsbossche en Pettemer zeewering richting de zee.

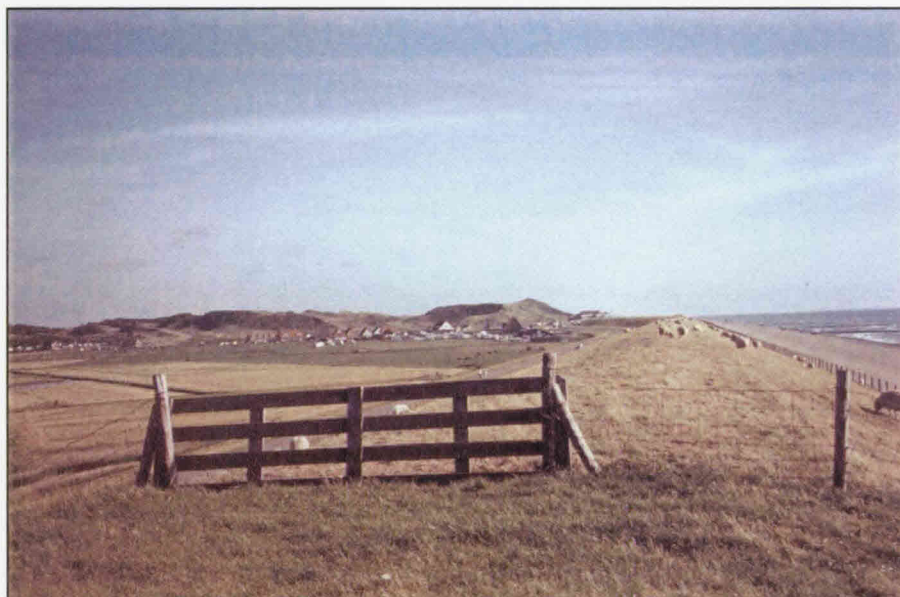


Foto 18: Overgang van duinen naar de Hondsbossche en Pettemer zeewering.



Foto 19: Het Zwanenmeer bij Callantssoog.



Foto 20: Einde in zicht: Huisduinen.



Foto 21: Eind goed al goed, een prachtige kust.

Wel een beetje moe: aankomst in strandpaviljoen 'Nogalwiedes' bij Huisduinen om kwart voor 8.

Overige foto's:



Foto: Palenrijen langs de kust.



Foto: Palenrij langs de kust.

Gebruikte programma's

Super-Dune

Super-Dune is een rekenmodel voor de beoordeling van de veiligheid van duinen. Voor een bepaalde raai langs de kust kan met het model een afslagprofiel voor onverdedigde duinprofielen onder het ontwerpstormvloedpeil en bijbehorende significante golfhoogte worden berekend.

Bovendien kan het model gebruikt worden voor het bepalen van de duinafslag en erosieprofielen bij andere omstandigheden dan de ontwerpstormvloed, de effecten van zeespiegelstijging en veranderende randvoorwaarden en de erosieve- of aanzandingstrend van een kustgedeelte als functie van de tijd en/of plaats middels zandvolumeberekeningen.

Het model gaat uit van het evenwichtsprincipe dat de totale afgeslagen oppervlakte van het afslagprofiel gelijk wordt verondersteld aan de oppervlakte van het afgezette zand. Er wordt aangenomen dat er geen netto verlies van zand in zijdelingse richting optreedt.

Curve Expert 3.1

Curve expert 3.1 is een fit-programma, waarmee het verband tussen twee variabelen kan worden onderzocht. Het programma onderzoekt verschillende verbanden, zoals lineaire, exponentiële, machts-, groei-, sinus-, polynoom- en zelf aan te geven verbanden. Het fit-programma bepaalt naast de parameters van de verschillende verbanden ook de standaardfout en de correlatiecoëfficiënt. De standaardfout wordt berekend door de wortel van de som van de gekwadrateerde afwijkingen van de waarnemingen ten opzichte van de regressiecurve te nemen. De correlatiecoëfficiënt geeft de sterkte en richting van het verband weer. Tenslotte geeft het fit-programma de rangorde van beste fit tot slechtste fit van de verschillende onderzochte verbanden weer.

@RISK

@RISK is een software programma voor het uitvoeren van risicoanalyses en simulaties. Het programma draait onder Excel. In @RISK kunnen bij simulaties de onzekerheden van de invoergegevens worden meegenomen door de verdelingstypen en bijbehorende parameters van de invoergegevens in te voeren. De verdelingsfuncties kunnen in elke cel en elke functie binnen Excel worden ingevoegd. @RISK heeft mogelijkheden om simulaties uit te voeren in Excel. Daarbij kan zowel de Monte Carlo als de Latin Hypercube-techniek worden gebruikt. Het aantal iteraties per simulatie en het aantal simulaties kunnen daarbij worden aangegeven. Er is een randomgetallen generator, die willekeurig trekkingen doet uit de invoerverdelingen om getallen voor de uitvoerverdeling te genereren. De uitvoer bestaat uit relatieve frequentie verdelingen, cumulatieve kansdichtheidscurves en uitvoerfiles met statistische resultaten van gegenereerde verdelingen. @RISK is ontworpen voor snelle simulaties doordat er gebruik wordt gemaakt van standaard ingevoerde tools en een reeds geassembleerde taal.

PASCAL

Programmeertaal PASCAL.

Afkortingen en begrippen

@RISK	@RISK is een software programma voor het uitvoeren van risicoanalyses en simulaties.
absolute zeespiegelstijging	zeespiegelstijging die de zee zelf ondervindt ten gevolge van thermische expansie van oceaanwater en veranderingen in de massa's landijs.
BKL	Basiskustlijn.
compactie	het inklinken van land als gevolg van natuurlijke processen (of ten gevolge van menselijk ingrepen, zoals gaswinning).
conversiefactor	een factor waarmee zandvolumeveranderingen per strekkende meter kunnen worden omgerekend naar oppervlakteveranderingen per strekkende meter kust. In dit onderzoek is deze conversiefactor gelijk aan 0,4 maal de profielhoogte.
Curve Expert 3.1	een fit-programma, waarmee het verband tussen twee variabelen kan worden onderzocht.
decimeringshoogte	het hoogteverschil tussen de waterstand behorende bij een 10-maal zo kleine overschrijdingsfrequentie als die van het ontwerppeil én het ontwerppeil.
dijkringgebied	een gebied dat, door een stelsel van waterkeringen of hoge gronden, aaneengesloten beveiligd is tegen overstrooming door het buitenwater.
directe schade	de schade die gelijk is aan de vervangingswaarde of de nieuwwaarde.
DONAR	Digitale opslagsysteem voor de natte Rijkswaterstaat
duinsuppletie	de zandhoeveelheid van een kustvak wordt aangevuld door een directe vergroting van het duinvolume.
duinvoet	de benedenrand van het duin, de overgang van het duinbeloop naar het strand.
DUROSTA	een tijdsafhankelijk duinafslagmodel.
DWW	Dienst Weg- en Waterbouwkunde, Rijkswaterstaat
dynamisch evenwicht	voortdurende profielveranderingen als gevolg van de voortdurende veranderende hydraulische omstandigheden zonder resulterend zandverlies.
dynamisch kustbeheer	het kustbeheer dat zich richt op natuurlijke processen en het tegengaan van doorgaande structurele erosie.
effectiviteit	onder de effectiviteit van suppleties wordt het percentage van de totale hoeveelheid suppletiezand verstaan dat niet effectief gebruikt wordt, maar verloren gaat.
extensieve recreatie	extensieve vormen van recreatie zijn die vormen die gebruik maken van zee, strand en duinen, zoals fietsen, zwemmen, zeilen, paardrijden, vliegeren, joggen, surfen en golfen.
frequentie zandsuppletie	de frequentie, eens per x jaar, waarmee zand gesuppleerd wordt.
GHW	Gemiddelde Hoogwaterlijn.
GLW	Gemiddelde Laagwaterlijn.

golfperiode	de tijdsduur tussen twee opeenvolgende neergaande passages van de middenstand van een golf.
grensprofiel	het profiel dat na duinafslag nog minimaal als waterkering aanwezig dient te zijn.
groeivoet	de rentevoet per jaar- reële rentevoet per jaar.
herhalingstijd	de tijd tussen twee opeenvolgende suppleties.
Hollandse kust	de kust van Hoek van Holland tot Den Helder.
incidentele erosie	het verlies van duinareaal tijdens een stormvloed.
indirecte schade	de schade die ontstaat door opbrengstderving doordat er geen productie of dienstverlening is.
integraal kustbeheer	deze wijze van beheren beoogt de watersystemen met de daarmee samenhangende bodems en oevers, het grondwater met alle erin voorkomende stoffen en levensgemeenschappen, maar ook de erbij betrokken belangen en functies geïntegreerd te benaderen en zoveel mogelijk als één geheel te beheren.
intensieve recreatie	intensieve recreatievormen zijn bijvoorbeeld verblijfsrecreatie en dagrecreatie, waar (semi-)permanente voorzieningen voor aanwezig zijn in de vorm van hotels, bungalowparken, campings, cafés en restaurants.
intrinsieke onzekerheid	de onzekerheid die voortkomt uit de onvoorspelbare fluctuaties die men in de natuur kan waarnemen.
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change.
isostatic rebound	het terugveren van het land na de ijstijd.
IVK	Interdepartementale visie op de kustontwikkeling.
JARKUS	Jaarlijkse kustmetingen; landelijk databestand van jaarlijks opgenomen diepte- en hoogtemetingen van de zandige kust.
jonge duinen	de duinen die kort na het begin van de jaartelling (wanneer een klimatologische cyclus begint met afwisselende warme en koude, rustige en stormachtige perioden) onder een overheersende westenwind zijn ontstaan (vaak over de oude duinen heen).
kritiek grensprofiel	de meest landwaartse positie waar een grensprofiel in past. Bij geringe toename van de duinafslag wordt het duin geacht door te breken.
kuberen	het bepalen van de zandhoeveelheid in een raai, een strook of in een balansgebied.
Leidraad Zandige Kust	de leidraad voor beheer- en onderhoudsaspecten én ontwerp- en veiligheidsaspecten voor de zandige kust.
Leidraad Duinafslag	de leidraad voor de beoordeling van de veiligheid van duinen als waterkering.
MHW	Maatgevend HoogWater
MKL	Momentane KustLijn; de momentane ligging van de kustlijn, die wordt berekend uit de zandinhoud van een speciaal gedefinieerde rekenschijf.
modelonzekerheid	de onzekerheid die ontstaat als de werkelijkheid door schematisering vereenvoudigd wordt.
momentaan	Momenteel, huidig, op een bepaald tijdstip.
NAP	het referentie-vlak voor de hoogteligging van objecten, Normaal Amsterdams Peil.

Netto Contante Waarde	om kostenbedragen die op verschillende tijdstippen zijn ontstaan met elkaar te vergelijken kunnen met de NCW-methode de kosten naar een begintijdstip worden teruggerekend.
nieuwwaarde	het bedrag waarvoor goederen van enkele jaren oud worden vervangen door nieuwe goederen (m.a.w. de aankoopwaarde van een object).
niveau I-berekening	berekeningen die op conventionele wijze worden uitgevoerd door het toepassen van veiligheidsfactoren.
niveau II-berekening	bij deze berekening wordt de grenstoestand (toestand waarbij de sterkte even groot is als de belasting) gelineariseerd en worden alle niet-normale verdelingen door normale verdelingen benaderd. De linearisering vindt plaats op het ontwerppunt waar de kans op bezwijken maximaal is.
niveau III-berekening	berekening waarbij de kansverdelingen van alle parameters worden meegenomen. De kans wordt door integratie (convolutie-integraal) of simulatie (Monte Carlo) bepaald.
ontwerppeil	de waterstand die hoort bij een overschrijdingsfrequentie van 10^{-5} .
oude duinen	de duinen die enkele duizenden jaren geleden op strandwallen zijn ontstaan.
planperiode	de periode waarover de totale kosten worden geminimaliseerd.
POK	Provinciaal Overlegorgaan voor de Kust, samenwerkingsverband tussen de Provincie, het waterschap en het Rijk met als doel behoud en inrichting van de zandige kust.
primaire duinvorming	jonge duinvorming.
profielhoogte	de afstand tussen twee dieptelijnen. In dit onderzoek wordt onder profielhoogte de afstand tussen de gemiddelde duinhoogte en de gemiddelde bereikte dieptelij verstaan.
raai	een denkbeeldig geprojecteerde meetlijn ten behoeve van kustmetingen met de RSP-lijn als basis.
reële rentevoet	in dit onderzoek 5% per jaar.
rekenpeil	het stormvloedpeil: ontwerppeil + $2/3 \cdot$ decimeringshoogte.
relatieve zeespiegelstijging	de lange-termijn stijging van de gemiddelde zeestand ten opzichte van het polderland.
gemiddelde rentevoet	in dit onderzoek 8% per jaar.
RIKZ	Rijksinstituut voor Kust en Zee, Rijkswaterstaat.
RSP-lijn	Rijksstrandpalenlijn; de langs de gehele zandige kust gelegen referentielijn voor meetraaien. Elke meetraai is gemarkeerd door een strandpaal, die op onderlinge afstand van ongeveer 250 meter langs de gehele Nederlandse kust op het strand staan.
RWS	Rijkswaterstaat.
significante golfhoogte	de gemiddelde golfhoogte van het hoogte $1/3$ deel van de golven.
Single-line theorie	de theorie die de kust als 1 kustlijn ziet, waarvan de bodem zich ten gevolge van sedimentatie of erosie over zijn gehele hoogte landwaarts- of zeewaarts horizontaal verplaatst. Er wordt uitgegaan dat dwarstransport zorgt voor een oneindig snelle herverdeling van zand over het dwarsprofiel en dat de kust haar vorm behoudt.
statistische onzekerheid	de onzekerheid als gevolg van een gering aantal waarnemingen.

strandsuppletie	het zandvolume van een kustvak wordt aangevuld door een directe vergroting van het zandvolume op het strand.
structurele erosie	geleidelijk, maar voortdurend verlies van zand uit een kustprofiel of balansgebied.
stuifdijken	duinregel gevormd door (al dan niet) kunstmatig vastgelegd stuifzand.
Super-Dune	een rekenmodel voor de beoordeling van de veiligheid van duinen. Bovendien kan het model gebruikt worden voor het bepalen van de duinafslag en erosieprofielen bij andere omstandigheden dan de ontwerp-stormvloed, de effecten van zeespiegelstijging en veranderende randvoorwaarden en de erosieve- of aanzandingstrend van een kustgedeelte als functie van de tijd en/of plaats middels zandvolumeberekeningen.
TAW	Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen.
TKL	Te toetsen kustlijnligging; bepaald uit de lineaire extrapolatie van 10 MKL punten.
UNIBEST	een kustlijnmodel waarmee ontwikkelingen van de kustlijn in langsrichting met aanzanding- en sedimentatiepatronen kunnen worden gesimuleerd.
veiligheidsafstand	de afstand tussen het duinfront op het begintijdstip en het duingebied dat gereserveerd is voor het kritieke grensprofiel en de 10^{-5} -afslag.
vervangingswaarde	het bedrag dat nodig is om een object te vervangen voor een vergelijkbaar 'identiek' object.
vooroeversuppletie	een suppletie uitgevoerd op de vooroever.
WWK	Werkgroep WaterKeringen.
x_i :	de karakteristieke maat voor de teruggang van het duinfront, $X_{ref} - X_e$.
X_e :	het afslagpunt ten gevolge van duinafslag ten opzichte van de RSP-lijn.
X_{ref} :	de positie van de overgangsknik tussen het duinfront en de overige duinen.
zeegat	de toegang tot de open zee, plaats waar een rivier of binnenzee in een open zee uitmondt.
zeereep	het gebied tussen de landwaartse grens van de primaire waterkering en de (gemiddelde) laagwaterlijn.

Literatuur

- Aalst, W., van; 1983; '*Golfhoogte-waterstandsrelaties t.p.v. de NAP-20m lijn langs de Nederlandse kust*'; Rijkswaterstaat; notitie WWKZ-83G.218.
- Aarninkhof, S.G.J.; Baan, P.J.A.; Marchand, M.; 1997; '*Definitiestudie veerkracht van de kust*'; rapport Z 2290; Waterloopkundig Laboratorium/WL in opdracht van Rijkswaterstaat RIKZ; Delft.
- Alkyon; 1999; '*Parameterinventarisatie en gevoeligheidsonderzoek DUROSTA, aanzet tot een nieuwe leidraad voor de veiligheidsbeoordeling van de Nederlandse duinenkust, Concept eindrapportage*'; rapport A116; (opdrachtgever Dienst Weg- en Waterbouwkunde in opdracht van TAW-C).
- Angremont, K., d'; Somers, C.M.G.; 1998; '*Coastal Engineering Volume I*'; Vakgroep Waterbouwkunde; Technische Universiteit Delft; Faculteit der Civiele Techniek; Delft.
- Augustinus, P.G.E.F.; 1999; '*Ruimte in het kustonderzoek*'; inauguratie rede; Faculteit Ruimtelijke Wetenschappen; Universiteit Utrecht; Amersfoort.
- Baan, P.J.A.; Baptist, M.J.; Klomp, W.H.G.; 1999; '*Meervoudig ruimtegebruik in de kustzone. Deelrapport 7: Ontwikkeling en toepassing van een veerkrachtmeter*'; Land Water Milieu Informatietechnologie; deelnemende partijen: Consortium Estuaria en Kusten (EDS, DHV, IWACO, RA, WL), IVM-VU, Grontmij en RIKZ; Gouda.
- Baan, P.J.A.; Hulsbergen; C.H.; Marchand, M.; 1997; '*Veerkracht van de kust, Ontwikkeling en operationalisering van een 'veerkrachtmeter'*'; rapport Z2136; Waterloopkundig Laboratorium/WL; (opdrachtgever Rijkswaterstaat RIKZ); Delft.
- Balkema, A.A.; 1998; '*Grondslagen voor waterkeren*'; TAW, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen; ISBN 90369 375 5 3; Rotterdam.
- Beurden, I.J.C.A., van; 1988; '*Probabilistische berekening overslag veiligheid van zeekeringen & de invloed van de onzekerheid in de relatieve zeespiegelstijging hierop*'; afstudeerrapport; Vakgroep Waterbouwkunde; Technische Universiteit Delft; Faculteit der Civiele Techniek; Delft.
- Bolle, E.A.W., Lenoir, J.M.H., Loon, J.N.M. van; 1983; '*Wiskundige statistiek*'; tweede gewijzigde druk; ISBN 9060014103; uitgeverij Van Loghum Slaterus; Deventer; pp 169-179.
- Bosch, J.W.; Slabbers, S.; Ulijn, J.M.F.; Verhoeff, P.; 1995; '*Studiereeks Bouwen aan een levend landschap nr. 3: 'Toekomstverkenning, het landschap van de kustzone*'; Informatie- en kenniscentrum Natuurbeheer; ISSN 0929-7014; Wageningen.
- Bouwmeester, E.C.; Kalf, R.B.; Walburg, A.M.; 1995; '*Statistische analyse van de Nederlandse morfologische kustontwikkeling, rapport RIKZ/94-045*'; Ministerie van Verkeer en Waterstaat; Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat; Rijksinstituut voor Kust en Zee; Den Haag.
- Brown, J.; Colling, A. Park, D.; Phillips, J.; Rothery, D.; Wright, J.; 1997; '*Wave, Tides and shallow water processes*'; prepared by the open university; ISBN 0 7506 2827 8; Walton Hall, Milton Keynes Engeland.
- Bruun, P.; 1988; '*The Bruun Rule of Erosion by Sea-level Rise: A discussion on large-scale Two- and Three-Dimensional Usages*'; Journal of Coastal Research Vol. 4 No. 4: pp 627-648.
- Bruun, P.; 1983; '*Review of conditions for uses of the Bruun Rule of erosion*'; Coastal Engineering 7: pp 77-89.
- Bunt, B.P. van den; 1990; '*Verband tussen zandinhoud van kustprofielen en posities van hoog- en laagwaterlijnen*'; afstudeerrapport; Technische Universiteit Delft; faculteit der Civiele Techniek; Vakgroep Waterbouwkunde; Delft.
- CUR, Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving; 1997; '*Kansen in de civiele techniek, Deel 1: Probabilistisch ontwerpen in theorie*'; Ministerie van Verkeer en Waterstaat; Dienst Weg en Waterbouwkunde en Bouwdienst; Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat; ISBN 90376 01022.

-
- Molen, J. van der; Dijck, B. van; Cleveringa, J.; Boer, P. de; 1999; *'De Nederlandse kust in het Holocene'*; Aarde & Mens, 3, 4, ISSN 1388 0071: page 33-37.
- Deltacommissie; 1960; *'Deel 3: Bijdragen van het Mathematisch Centrum, Beschouwingen over stormvloed en getijbewegingen-Bijdragen II'*; Rapport Deltacommissie Staatsdrukkerij- en uitgeverijbedrijf; 's-Gravenhage.
- Doorewaard, H.; Verschuren, P.; 1998; *'Het ontwerpen van een onderzoek'*; ISBN 9051897073; LEMMA BV; tweede druk; Utrecht.
- DWW, Dienst Weg- en Waterbouwkunde; 1996; *'Hydraulische randvoorwaarden voor Primaire Waterkeringen'*; Ministerie Verkeer en waterstaat; Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat; DWW; RIKZ; RIZA; ISBN 90 3693 718 3; Delft.
- DWW, Dienst Weg- en Waterbouwkunde; 1999; *'Overstromingsrisico's buitendijkse gebieden'*; Ministerie van Verkeer en Waterstaat; Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat; Dienst Weg- en Waterbouwkunde.
- Ebbing, H.; Heuvel, T. van; Kruik, H. de; 1996; *'Coastline management, from coastal monitoring to sand nourishment'*; Ministry of Transport; Public Works and Water Management; Directorate-General of Public Works and Water Management; National Institute for Coastal and Marine Management/RIKZ; second edition; the Hague; The Netherlands.
- Graaff, J. van der; 1984; *'Probabilistische methoden bij het duinontwerp, achtergronden van de TAW-Leidraad 'Duinafslag''*; T.H. Delft; Afdeling Civiele Techniek; Vakgroep Kustwaterbouwkunde; Delft.
- Groenendijk, F.C.; 1997; *'Zand voor Nederland, Een analyse vanaf 1964 en een extrapolatie tot 2010 van het zandvolume in de JARKUS-zone'*; rapport RIKZ-95.003; Ministerie Verkeer en Waterstaat; Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat; Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ; Den Haag.
- Haring, R.M.K.; Löffler, M.A.M.; Veer, M.A.C.; 1999; *'Bewogen duinen, mogelijkheden voor dynamisch kustbeheer op Schouwen'*; Ministerie van Verkeer en Waterstaat; Dienst Weg- en Waterbouwkunde; Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat.
- Havinga, F.J.; Havinga, H.; Visser, P.J.; Vriend, H.J. de; Wang; Z.B.; Kuiper, W.; 1998; *'Rivierwaterbouwkunde'*; collegedictaat CT wa3340; Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen; sectie waterbouwkunde; Technische Universiteit Delft; Delft.
- Koster, M.J.; 1999; *'Kustversterking Delfland bij het optreden van zeespiegelstijging'*; Koster Engineering, Ingenieurs onderzoeks- en adviesbureau; Heemstede; (opdrachtgever het Hoogheemraadschap van Delfland).
- Koster, M.J.; 1997 (a); *'Handleiding Super Dune 1.7; Deel 1: Operationele beschrijving'*; Koster Engineering, Ingenieurs onderzoeks- en adviesbureau; Heemstede.
- Koster, M.J.; 1997 (b); *'Handleiding Super Dune 1.7; Deel 2: Appendices en Bijlagen'*; Koster Engineering, Ingenieurs onderzoeks- en adviesbureau; Heemstede.
- Löffler, M.A.M.; Veer, M.A.C.; 1999 (b); *'Grasduinen in de waterkering?, Evaluatie van dynamisch kustbeheer'*; Ministerie van Verkeer en Waterstaat; Dienst Weg- en Waterbouwkunde; Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat; Delft.
- Löffler, M.A.M.; Veer, M.A.C.; 1999 (b); *'Mogelijkheden voor de ontwikkeling van nieuwe duinen bij een Maasvlakte 2'*; Ministerie van Verkeer en Waterstaat; Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat; Directie Zuid-Holland; Rotterdam.
- Minneart, W.; 1995; *'MATLAB, Informatica voor Econometrie module INF-D'*; dictaatnummer 320.95.694; Vakgroep BIKa; Katholieke Universiteit Brabant; Tilburg.
- Moors, J.J.A.; 1991; *'Statistiek in de economie twee: steekproeftheorie en analyserende statistieken'*; Tilburg University Press; Tilburg.
- Moors, J.J.A.; Nieuwenhuis, G.; Janssens, M.J.B.T.; 1994; *'Statistiek in de Economie, Deel III: Voortgezette statistische methoden'*; Tilburg University Press; Tilburg.
- Mulder, J.P.M.; 1999; *'Zandverliezen in het Nederlandse kustsysteem, Consequenties voor de handhaving van de kustlijn en van een positief saldo in de zandbalans'*; Concept-rapport; Ministerie Verkeer en waterstaat; Rijksinstituut voor Kust en Zee/ RIKZ; Den Haag.
- Noortwijk, Jan. M., van; 1996; *'Optimal Maintenance Decisions for Hydraulic Structures under Isotropic Deterioration'*; Proefschrift Technische Universiteit Delft; ISBN 90 9009528 4; Delft.

- Natuurbeleidsplan; 1990; *'Natuurbeleidsplan, Regeringsbeslissing'*; Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij.
- Nederlandse Staatscourant; 2000; *'Rijkswaterstaat steekt meer geld in onderwatersuppletie'*; Nederlandse Staatscourant; Officiële Publicaties; Nr. 63; 29 maart 2000; Den Haag.
- Peerbolte, E.B.; Wind, H.G.; 1992; *'Coastal zone management: tools for initial design'*; Proc. Int. Coastal Congress; Kiel: pp 332-341.
- Projectgroep Vierde Nota Waterhuishouding; 1997; *'Vierde Nota Waterhuishouding, Beschermen tegen hoogwater'*; Ministerie van Verkeer en Waterstaat; Den Haag.
- RIKZ, Rijksinstituut voor Kust en Zee; 1999 (a); *'Kustlijinkaarten 1999, Rapport RIKZ-99.004'*; Ministerie van Verkeer en Waterstaat; Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ; Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat; Den Haag.
- RIKZ, Rijksinstituut voor Kust en Zee; 1999 (c); *'Voorstel suppletieschema 2000 + doorkijk t/m/ 2004 aan voorzitter en leden Provinciaal Overlegorganen voor de Kust'*; Ministerie van Verkeer en Waterstaat; Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat; Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ; Den Haag.
- RIKZ, Rijksinstituut voor Kust en Zee; 1999 (b); *'Optimalisatie herhalingstijden zandsuppleties'*; Ministerie van Verkeer en Waterstaat; Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat; Rijksinstituut voor kust en Zee/RIKZ; Middelburg.
- Ronde, J.G. de; 1999; *'De keerzijde van ons klimaat'*; Ministerie van Verkeer en waterstaat; Rijksinstituut voor Kust en Zee/ RIKZ; Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling/ RIZA; IMAU, Instituut voor Marien en Atmosferisch Onderzoek (Universiteit Utrecht); Den Haag.
- Ronde, J.G. de; 1990; *'Wassend water, gevolgen van het broeikaseffect voor de waterstaat'*; nota gwao 90.015; Rijkswaterstaat; Dienst Getijdewateren; 's-Gravenhage.
- Ruig, J. de; Roelse, P.; 1998; *'Visie op kustbeleid: Zand, water en visie voor een kust met allure. Zeeuwse kustbeheer nu en straks'*; Rijksinstituut voor Kust en Zee.
- Ruijgrok, E.C.M.; 2000; *'Valuation of nature in coastal zone'*; Proefschrift Vrije Universiteit; ISBN 90-9013388-7; Amsterdam.
- Smit, M.J.; Snijders, G.; 1997; *'Bebouwing in de zeereep, Een inventarisatie langs de Nederlandse Noordzeekust'*; rapport RIKZ-97.007; Ministerie van Verkeer en Waterstaat; Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat; Rijksinstituut voor Kust en Zee/ RIKZ; Den Haag.
- Stam, J.M.T.; 1999; *'Zandverlies op diep water aan de Hollandse kust'*; rapport RIKZ-99.006; Ministerie Verkeer en Waterstaat; Rijksinstituut voor Kust en Zee; Den Haag.
- TAW, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen; 1984; *'Leidraad voor de beoordeling van de veiligheid van de duinen als waterkering'*; ISBN 90 12 04746 3; Den Haag.
- TAW, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen; 1995; *'Basisrapport Zandige Kust, Bijbehorende bij de Leidraad Zandige Kust'*; ISBN 90 3693 7043; Delft.
- Terwindt, J.H.J.; 1998; *'Te kust en te keur'*; Afscheidscollege Faculteit Ruimtelijke Wetenschappen; Universiteit Utrecht; 18 december 1998; Amersfoort.
- Velden, E.T.J.M. van der; 1995; *'Coastal engineering'*; lecture notes F7; Faculty of Civil Engineering; Delft University of Technology; Delft.
- Vriend, H.J. de; Drinkers, J. Stive, M.J.F.; Dongeren, A.; Wang, J.H.; 1995; *'Coastal inlets and Tidal bassins'*; lecture notes CTwa5303, part one and two; Faculty of Civil Engineering; Delft University of Technology; Delft.
- Visou van Eck, N.; Kok, M.; Vrouwenvelder, A.C.W.M.; 1999 (a); *'Standaardmethode Schade en Slachtoffers als gevolg van overstromingen, deel 2: Achtergronden'*; IN WATER HKV LUN; TNO; (opdrachtgever Dienst Weg- en Waterbouwkunde).
- Visou van Eck, N.; Kok, M.; Vrouwenvelder, A.C.W.M.; 1999 (b); *'Standaardmethode Schade en Slachtoffers als gevolg van overstromingen, deel 1: Standaardmethode'*; LUN IN WATER HKV LUN; TNO; (opdrachtgever Dienst Weg- en Waterbouwkunde).
- Vrouwenvelder, A.; 2000; *'Memorandum, 2000-CON-DYN/M2020, Kansen, onzekerheden en de presentatie daarvan'*; Sprintproject; TAW-V-vergadering; TNO; Delft.
- WBK, Werkgroep Bouwen Kust ; 1999; *'Hoofddlijnen nieuw beleid kustbebouwing, een discussienotitie'*; RKB99.23; 22 maart 1999.

Wijnberg, K.M.; 1995; *'Morphological behaviour of a barred coast over a periode of decades'*; proefschrift, Netherlands Geographical Studies no. 195; Utrecht: pp 245.

WWK, Werkgroep Waterkeringen; 1999; *'Veiligheid, veerkracht en vooruitzien, 3^e Kustnota, concept 24 december 1999'*.

Internet-sites:

[Http:\\www.venwnet.mvwn.nl/rws/rikz/kikpass/frames.html](http://www.venwnet.mvwn.nl/rws/rikz/kikpass/frames.html)



De Dienst Weg- en Waterbouwkunde is de adviesdienst van Rijkswaterstaat voor techniek en milieu voor de weg- en waterbouw, die adviseert, onderzoekt en kennis overdraagt in de constructieve weg- en waterbouw, de natuur- en milieutechniek van fysieke infrastructuur, waterkeringen en watersystemen, en de grondstoffenvoorziening voor de bouw, inclusief de milieuaspecten.

Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde
Van der Burghweg 1
Postbus 5044
2600 CA Delft
telefoon: (015) 251 83 08
telefax: (015) 251 85 55
E-mail: postmaster@dww.rws.minvenw.nl

Publicatienummer: W-DWW-2000-056