

In opdracht van:

Provincie Noord-Holland

Planstudie Veiligheid

Fase 3: Impact analyse morfologische ingrepen

Thijs van Kessel, Stefan Aaminkhof en Mark van Koningsveld

Rapport

14 december 2004



OPDRACHTGEVER:	Provincie Noord-Holland Postbus 3007 2001 DA Haarlem				
TITEL:	Planstudie Veiligheid voor de Provincie Noord-Holland. Fase 3: Impact Analyse Morfologische Ingrepen.				
SAMENVATTING:	<p>In het kader van de Planstudie Veiligheid voor de Provincie Noord-Holland, zijn voor de Noord-Hollandse zwakke schakels enkele alternatieve oplossingen uitgewerkt en vergeleken.</p> <p>Voor de kust van Noord-Holland zijn de volgende zwakke schakel locaties aan de orde gekomen:</p> <ul style="list-style-type: none">- de Helderse zeewering,- de Kop van Noord-Holland, met daarbij in het bijzonder aandacht voor:<ul style="list-style-type: none">- het Botgat, en- de smalle duinenrij tussen Groote Keeten en Callantsoog- en de Hondsbossche en Pettemer zeewering. <p>De Helderse zeewering werd na een quick scan niet langer als zwakke schakel beschouwd. Voor de overige zwakke schakels zijn alternatieve oplossingen uitgewerkt.</p> <p>Van drie van die oplossingsvarianten wordt een effect op de kustmorfologie verwacht. Het gaat dan om de varianten 'zand ervoor' bij de Hondsbossche en Pettemer zeewering en de Kop van Noord-Holland en de 'duinen van Leihoek' variant bij de Hondsbossche en Pettemer zeewering. In relatie tot die varianten komt een vijftal hoofdvragen aan de orde:</p> <ul style="list-style-type: none">• Wat zijn de verliesfactoren van het voor de kustverdediging aangebrachte zand?• Hoe kan op onderhoud geoptimaliseerd worden met een kustdwarse dam bij petten?• Hoe kan op onderhoud geoptimaliseerd worden met een kustdwarse dam bij Callantsoog?• Welke rol kan een kustdwarse dam bij Huisduinen spelen in de kustveiligheid?• Wat is het effect van de variant Duinen van Leihoek?				
REFERENTIES:	Oprichtingsnummer Provincie Noord-Holland: 4500009970				
VER	AUTEUR	DATUM	OPMERK.	REVIEW	GOEDKEURING
v35	Van Koningsveld <i>ML</i>	14-12-2004		Roelvink <i>ML</i>	Schilperoort <i>ML</i>
PROJECTNUMMER:	Z3725.30				
TREFWOORDEN:	Planstudie Veiligheid, Zwakke Schakels, Morfologie rapport				
AANTAL BLADZIJDEN:	64				
VERTROUWELIJK:	<input type="checkbox"/> JA, tot (datum)		<input checked="" type="checkbox"/> NEE		
STATUS:	<input type="checkbox"/> VOORLOPIG	<input type="checkbox"/> CONCEPT	<input checked="" type="checkbox"/> DEFINITIEF		

Inhoud

1	Beschrijving basisvarianten	1—1
1.1	Inleiding	1—1
1.2	Beschrijving van de basisvarianten	1—2
1.2.1	Zand ervoor	1—2
1.2.2	Duinen van Leihoek	1—5
1.3	De overwegingen in perspectief	1—5
2	Morfologie van de Hollandse kust	2—1
2.1	De natuurlijke dynamiek van de Hollandse kust	2—1
2.2	De effectiviteit van het huidige suppletiebeleid	2—4
3	Kustlijnmodellering Hollandse kust	3—1
3.1	Waarom een kustlijnmodel van de Hollandse kust?	3—1
3.2	Model opzet en schematisatie randvoorwaarden	3—2
3.3	Validatie kustlijnmodel 1990-2003	3—5
4	Conceptuele werking van ingrepen in de kustzone	4—1
4.1	Structureel suppleren	4—1
4.2	Enkele strekdam met aanleg kustbogen en zand by-pass	4—2
4.3	Serie strekdammen inclusief aanleg kustbogen en zand by-pass	4—6
4.4	Zeespiegelstijging en zwaardere golfrandvoorwaarden	4—6
5	Vraag 1: De effectiviteit van zandige maatregelen	5—1
6	Vraag 2 – 4: Verkenning oplossingsvarianten Noord-Holland	6—1
6.1	Huisduinen	6—1
6.2	Callantsoog	6—2

6.2.1	Oplossingsvariant met alleen zand	6—2
6.2.2	Optimalisatie met één strekdam.....	6—2
6.2.3	Optimalisatie met een serie strekdammen	6—4
6.2.4	Vergelijking varianten.....	6—4
6.3	Hondsbosche en Pettemer zeewering.....	6—5
6.3.1	Oplossingsvariant met alleen zand	6—5
6.3.2	Optimalisatie met één strekdam.....	6—6
6.3.3	Optimalisatie met een serie strekdammen	6—8
6.3.4	Vergelijking varianten.....	6—8
7	Vraag 5: Duinen van Leihoek	7—1
8	Discussie.....	8—1
8.1	Onderlinge beïnvloeding tussen kustvakken	8—1
8.2	Beperkingen in de aannames	8—1
8.3	Integrale afweging van maatregelen.....	8—2
8.4	Conclusies.....	8—3
9	Referenties	9—1
A	Overzicht zandsuppleties 1990-2003	A—1
B	Schematisatie golfklimaat	B—1
B.1	Golfklimaat meetstation IJmuiden munitiestortplaats	B—1
B.2	Afgeleid golfklimaat meetstation Eierlandse Gat.....	B—3
B.3	Afgeleid golfklimaat meetstation Lichteiland Goeree.....	B—5

I Beschrijving basisvarianten

I.1 Inleiding

In de planform design fase van de Planstudies Veiligheid voor de Provincie Noord-Holland zijn verschillende basisvarianten besproken voor het oplossen van de veiligheidsproblemen bij de zwakke schakels in de kop van Noord-Holland en bij de Hondsbossche en Pettemer zeewering (Van Koningsveld en Van Nieuwenhuijzen, 2004).

Het betreft voor het gebied bij Callantsoog de basis varianten:

- zand ervoor
- landwaartse duinversterking
- Callantsoog aangepaste normering.

Het betreft voor het gebied bij de Hondsbossche en Pettemer zeewering de basisvarianten:

- zand ervoor
- landwaartse dijkversterking
- een slaperdijk variant
- duinen van Leihoek

In dit rapport wordt een analyse gemaakt van de kustmorfologische effecten van deze maatregelen. Van drie van de boven beschreven basisvarianten wordt een effect op de kustmorfologie verwacht. Het gaat dan om de varianten zand ervoor bij beide lokaties en de duinen van Leihoek variant bij de Hondsbosse en Pettemer zeewering.

In overleg met de opdrachtgever is in relatie tot die varianten een vijftal hoofdvragen gedefinieerd:

- Wat zijn de verliesfactoren van het voor de kustverdediging aangebrachte zand?
- Hoe kan op onderhoud geoptimaliseerd worden met een kustdwarse dam bij petten?
- Hoe kan op onderhoud geoptimaliseerd worden met een kustdwarse dam bij Callantsoog?
- Welke rol kan een kustdwarse dam bij Huisduinen spelen in de kustveiligheid?
- Wat is het effect van de variant Duinen van Leihoek?

Om de antwoorden op deze vragen in de juiste context te plaatsen zal eerst achtergrond informatie worden gegeven over de morfologie van de Hollandse kust (zie Hoofdstuk 2). Om de effecten van ingrepen te kunnen analyseren wordt naast data analyse en gangbare coastal engineering regels, onder andere gebruik gemaakt van een kustlijnmodel. De achtergronden van het model zullen kort worden toegelicht (zie Hoofdstuk 3). Vervolgens zal beknopt de conceptuele werking van de hier relevante ingrepen in de kust zone worden beschreven (zie Hoofdstuk 4).

Met deze achtergrond informatie zullen achtereenvolgens de inhoudelijke vragen worden beantwoord. In Hoofdstukken 5, 6 en 7 worden respectievelijk hoofdvragen 1, 2-4 en 5

behandeld. Na de beschrijving van deze lokale effecten zal in een discussie onder meer worden ingegaan op mogelijke regionale effecten bij een samenstel van maatregelen (Hoofdstuk 8). In dit hoofdstuk zal de voor deze kustmorfologische studie relevante achtergrondinformatie over de basisvarianten worden geschetst.

1.2 Beschrijving van de basisvarianten

In deze beschrijving van de basisvarianten zal alleen de voor deze kustmorfologische studie benodigde achtergrond informatie worden besproken. Voor een meer gedetailleerde beschrijving van de lokale problematiek en de oplossingsvarianten wordt verwezen naar de Planform Design rapportage (Van Koningsveld en Van Nieuwenhuijzen, 2004) en eerder rapportages uit de Kustvisie (Provincies Noord- en Zuid-Holland, Arcadis, Nieuwe Gracht, Alkyon, 2002).

1.2.1 Zand ervoor

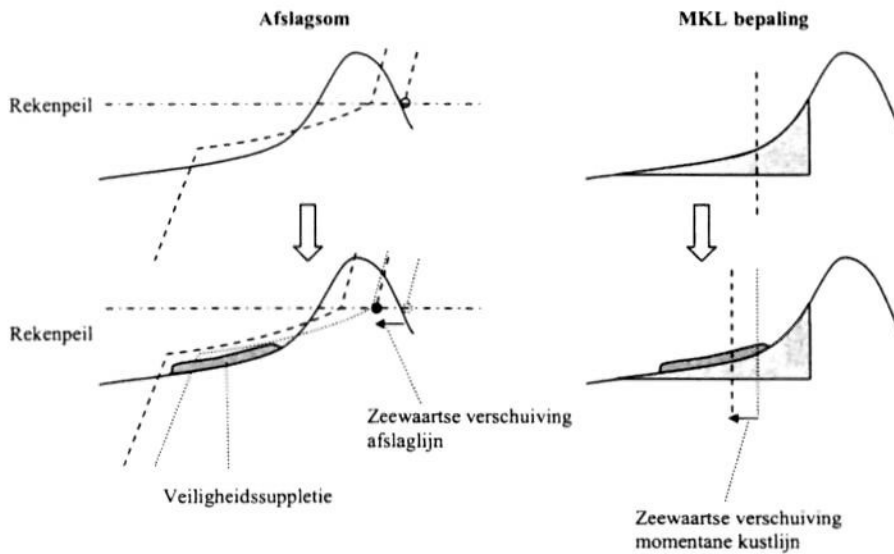
Bij de variant 'zand ervoor' is getracht per lokatie het veiligheidsprobleem op te lossen met alleen zand. Per zwakke schakel volgt nu een nadere bespreking van de aanpak.

Zand ervoor – Callantsoog

Het duingebied voor Callantsoog is smal en in het beheerdersoordeel van 2003 is een aantal raaien in dit gebied als onvoldoende getoetst. Om deze raaien veilig te krijgen wordt zand aangebracht. Bij Callantsoog is de "zand ervoor" oplossing gericht op een zodanige versterking van het duinprofiel dat het grensprofiel nog juist in het duin past. In de optie met zand ervoor is hiervoor gekeken naar twee typen van suppleren: op het strand en tegen het duin enerzijds en op de vooroever anderzijds. In de planform designs werd ingeschat dat een groot deel van de kosten van deze variant zouden gaan zitten in het voortdurend onderhouden van de benodigde zandhoeveelheid. In deze kustmorfologische studie is het enerzijds de bedoeling om een betere inschatting te maken van de mogelijke verliezen en anderzijds om vast te stellen wat het aanbrengen één of meerdere strekdammen aan onderhoudsbesparingen zou kunnen opleveren. Positie, lengte en aantallen strekdammen spelen hierbij een belangrijke rol.

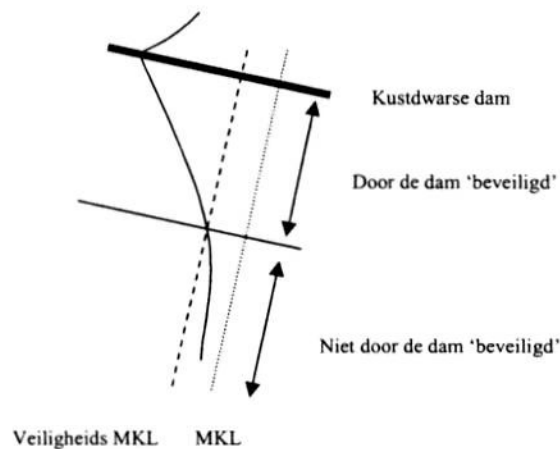
We zullen in de analyse van de kustmorfologische effecten een grofstoffelijke benadering hanteren. Allereerst worden de verliezen van het voor de veiligheid aangebrachte zand ingeschat aan de hand van de in Hoofdstuk 2 bepaalde verliesfactoren.

Vervolgens wordt de effectiviteit van één of meerdere strekdammen bepaald in het reduceren van het in de vorige stap bepaalde zandverlies. De gedachte hierbij is dat de bij dergelijke strekdammen aangroeiende kustbogen op een gegeven moment ver genoeg zeewaarts zijn verplaatst om het direct achterliggende duingebied te 'beveiligen'. De vraag hoever zeewaarts die uitbouw moet rijken om een dergelijke beveiliging te bewerkstelligen wordt als volgt beantwoord. Het zand dat aan de zee kant wordt aangebracht om het afslagprofiel in de gewenste mate zeewaarts te trekken, heeft, wanneer het wordt aangebracht op het strand of in de depositiezone, tegelijkertijd een effect op de positie van de momentane kustlijn (MKL) (zie Figuur 1.1).



Figuur 1.1. Het gebruik van de MKL als veiligheidsindicator (kustdwars):
 Links: Veiligheidssuppletie heeft een zeewaartse verschuiving van het afslagpunt tot gevolg.
 Rechts: Dezelfde veiligheidssuppletie heeft ook een zeewaartse verschuiving van de MKL tot gevolg.

Op basis van de met aflagsommen, per raai bepaalde, op de vooroever aan te brengen zandhoeveelheden, wordt de behorende gemiddelde zeewaartse verplaatsing van de MKL bepaald. De lijn van deze door veiligheidssuppleties zeewaarts verschoven MKL punten kan vervolgens als referentielijn worden gehanteerd. Hiervoor zal overigens een gemiddelde waarde worden afgeleid, die voor het gehele gebied van toepassing wordt verklaard. Vervolgens wordt met een kustmorfologische benadering bepaald wat het verwachte effect van dammen is op de kustlijn positie: de aangroeiende kustbogen. In de huidige modelopzet is de berekende kustlijnpositie gelijk aan de nieuwe MKL positie. Daar waar de aangroeiende kustboog zeewaarts ligt van de bovengenoemde referentielijn, wordt aangenomen dat het achterliggende duin als veilig kan worden aangemerkt (zie Figuur 1.2).



Figuur 1.2. Het gebruik van de MKL als veiligheidsindicator (kustlangs)

De focus op de MKL verschuiving door de vooroeversuppleties is gestoeld op het uitgangspunt dat de verliesfactoren voor dit type suppletie groter zijn dan de strandsuppletie/duinversterking. Wat werkt voor vooroever suppleties wordt geacht ook te werken voor de strandsuppletie/duinversterking.

De dam, of een stelsel van dammen, zal zo worden ontworpen en gepositioneerd dat een zo groot mogelijk aantal van de nu als onveilig aangemerkte raaien aan dit criterium voldoen. Waar dan nog niet aan de veiligheid is voldaan zijn aanvullende maatregelen nodig. Vervolgens wordt aan de hand van een efficiëntie beschouwing bekeken hoeveel besparing met de dam wordt gerealiseerd.

Zand ervoor – Hondsbossche en Pettemer

In het beheerdersoordeel van 2003 is vastgesteld dat voor de Hondsbossche en Pettemer Zeewering het overslagdebiet bij verzwaarde ontwerpcondities (1/10.000) hoger is dan de maximaal toelaatbare 1 l/m/s. Daarmee zijn beide keringen, overigens inclusief de aansluitingen, als onvoldoende getoetst. Om de keringen op korte en langere termijn voldoende veilig te maken is het nodig om het overslagdebiet te reduceren dan wel de keringen overslagbestendig te maken, en voor de aansluitingen de duinafslag te reduceren. In de planform designs zijn hiervoor enkele alternatieve maatregelen uitgewerkt. Bij de aansluitingen is gekeken naar de hoeveelheid zand die nodig is om het grensprofiel onder de verzwaarde randvoorwaarden op dezelfde plek te houden als onder de randvoorwaarden uit het randvoorwaarden boek 2001. Voor het reduceren van de overslag over de keringen zelf was één van de opties bij de maatregel “zand ervoor” om uit te zoeken hoeveel zand waar moest worden neergelegd zodat er genoeg golfreductie optreedt om de overslag over de dijk onder de norm te brengen.

Voor de Hondsbossche en Pettemer zeewering is door Alkyon een indicatieve berekening *gemaakt van de hoeveelheid zand die nodig is om de H-P zeewering voor nu veilig te maken* (Alkyon, 2004). In overleg met de opdrachtgever is besloten om deze aanbeveling als uitgangspunt te nemen voor de benodigde hoeveelheid zand voor golfreductie.

Kort samengevat wordt door Alkyon voor de Hondsbossche zeewering ingeschat dat 1600 m³/m nodig is, zodanig aangebracht dat op 2 m+NAP een berm ontstaat met een breedte van 120 meter waarna in een talud van 1/25 wordt aangesloten op het aanwezige profiel. Voor de Pettemer zeewering wordt het aanbrengen van 1000 m³/m nodig geacht, zodanig aangebracht dat op 2 m+NAP een berm ontstaat met een breedte van 80 meter waarna in een talud van 1/25 wordt aangesloten op het aanwezige profiel. Voor deze maatregel is bovendien als eerste schot voor de boeg een jaarlijks verlies van 30% ingeschat.

We zullen voor de analyse hier een vergelijkbaar grofstoffelijke benadering hanteren als bij Callantsoog. De verliezen van zand zullen worden ingeschat aan de hand van de in Hoofdstuk 2 bepaalde verliesfactoren. Voorts wordt ingeschat hoeveel de aan te brengen zandhoeveelheid de MKL in zeewaartse richting zal verplaatsen. Vervolgens wordt met een kustmorfologische benadering bepaald wat het verwachte effect van dammen is op de positie van de kustlijn. In de huidige opzet van het model mag de berekende kustlijn positie gelijk worden gesteld aan de nieuwe MKL positie. Daar waar de dam de MKL meer

zeewaarts verplaatst dan als gevolg van de zandige versterking het geval was, wordt aangenomen dat eenzelfde effect op de kustveiligheid mag worden verwacht en dus de achterliggende dijk als veilig kan worden aangemerkt. De dam zal vervolgens zo worden gepositioneerd dat een zo groot mogelijk deel van de Hondsbossche en Pettemer Zeewering aan dit criterium voldoet, waaronder minimaal de aansluiting bij Petten. Hierbij wordt ook gekeken naar de mogelijkheid van het inzetten van twee of meerdere dammen. Ook voor deze variant wordt aan de hand van een efficiëntie beschouwing bekeken hoeveel onderhoudsbesparing met dammen kan worden gerealiseerd.

1.2.2 Duinen van Leihoek

Bij de Duinen van Leihoek variant is de achterliggende gedachte om het veiligheidsprobleem op een structurele manier op te lossen door het bastion dat door de Hondsbossche en Pettemer zeewering wordt gevormd in zijn geheel te verwijderen en daarvoor een rechttere, meer natuurlijke, kust in de plaats te brengen. De nieuwe waterkering zou dan worden gevormd door een duingebied dat de duinen bij Camperduin verbindt met het Korfwater in Petten.

Uitgangspunt voor de nieuw aan te leggen duinwaterkering is dat het grensprofiel van de duinen bij Camperduin verbonden wordt met het grensprofiel in het Korfwater. Voorlopig is daartoe een recht tracé gekozen. Belangrijk bij deze variant is natuurlijk het in kaart brengen van de naar verwachting gunstige effecten van het verwijderen van het Hondsbossche en Pettemer bastion. In dit rapport zal daartoe een grofstoffelijke morfologische beschouwing worden gegeven op de mogelijk grotere effectiviteit van het zand in dit gebied na verwijdering van de bastion vorm. Aan de hand hiervan kan een schatting worden gegeven van de mogelijk te realiseren onderhoudsbesparingen. Een, overigens niet in deze kustmorfologische analyse te beantwoorden, vraag is of en wanneer een dergelijke onderhoudsbesparing kan opwegen tegen de zeer grote aanlegkosten van dit alternatief.

1.3 De overwegingen in perspectief

Het is belangrijk om te realiseren dat in de kustmorfologische analyse zoals die hier is uitgevoerd een *grofstoffelijke* beschouwing is gehanteerd. Zo is het bijvoorbeeld de vraag hoe accuraat de aanname van de MKL als grens voor de veiligheid is bij het bepalen van de optimale damposities. Gezien de overige onzekerheden is dit naar onze mening voor nu toch een werkbaar concept; zeker gezien de hoofdvraag die zich richt op de efficiëntie winst die met een dam kan worden bereikt. Voor een definitief ontwerp is het te zijner tijd nadrukkelijk nog wel nodig om een uitgebreidere studie te wijden aan de optimalisatie en het veiligheidsvraagstuk in relatie tot ontwikkelingen in de vooroever. Dit geldt voor dijken. De spreiding in de antwoorden in een recente veiligheidsstudie naar de Hondsbossche en Pettemer zeewering laat zien dat het geven van een eenduidig antwoord verre van triviaal is gezien de onzekerheden in het analyse instrumentarium dat ons voor dergelijke studies ter beschikking staat. Maar dit geldt zeker ook voor duinen. Met name het langdurig aanbrengen van tamelijk grote zandhoeveelheden kan op een gegeven moment lokale processen gaan beïnvloeden waardoor nu gehanteerde aannames niet langer zo maar kunnen worden toegepast. Bij de aanpak zoals die in dit rapport steeds is toegepast, is de geldigheid van aannames wel zoveel mogelijk in overweging genomen. Voor latere definitieve ontwerpen is nader specifiek morfologisch onderzoek zeker noodzakelijk.

2 Morfologie van de Hollandse kust

Dit hoofdstuk bespreekt de natuurlijke dynamiek van de Hollandse kust en de morfologische processen die daarbij een rol spelen. Deze kennis is nodig voor een effectieve inpassing van veiligheidsmaatregelen in het natuurlijke systeem en voor de validatie van het kustlijnmodel dat daarbij wordt toegepast (zie Hoofdstuk 3 en 4). Daarnaast wordt een analyse gemaakt van de effectiviteit van strand- en vooroeversuppleties over de periode 1990-2003. De resultaten daarvan dragen in belangrijke mate bij aan het ontwerp van zandige ingrepen in de kustzone.

2.1 De natuurlijke dynamiek van de Hollandse kust

Het Nederlandse kuststelsel wordt traditioneel opgedeeld in (i) de Deltakust ten zuiden van Hoek van Holland, (ii) de gesloten Hollandse kust van Hoek van Holland tot Den Helder en (iii) de Waddenkust van Den Helder tot aan de Duitse grens. Gelet op de scope van deze studie beperkt deze paragraaf zich tot een beschrijving van de gesloten Hollandse kust en de dominante morfodynamische processen die daarlangs optreden.

De gesloten Hollandse kust is 118,5 km lang en bestaat uit een zandige kustboog, slechts onderbroken door de havendammen van Scheveningen en IJmuiden en de Hondsbosche en Pettemer Zeewering. In de afgelopen twee eeuwen is de kust langs de Kop van Noord-Holland (van RSP¹ km 2 tot km 31) en Delfland (van RSP km 98 tot km 118) versterkt door strandhoofden met een lengte van ca. 80-100 m. Daarnaast is al sinds de 15^e eeuw sprake van een zeewering tussen Camperduin en Petten (RSP km 20 to 26). Door voortgaande erosie ten noorden en zuiden van de zeewering is er thans sprake van een aanzienlijke bolwerkvorming ter plaatse van de zeewering. Van groot belang tenslotte vanuit kustmorfologisch oogpunt zijn de havendammen van IJmuiden (aangelegd in de periode 1865-1879, verlengd tussen 1962 en 1967) en Hoek van Holland (aanleg 1864-1874, verlengd 1968-1972). Deze vormen een grote barrière voor het doorgaande transport van sediment en zijn om die reden in belangrijke mate sturend voor de ontwikkeling van de kustlijn ter plaatse.

Reeds sinds 1963 wordt het profiel van de Nederlandse kust elke 250 m in kaart gebracht in het kader van de zogenaamde Jaarlijkse Kustmetingen (JARKUS metingen). Op basis van deze metingen deelt Wijnberg (1995) de Hollandse kust op in een vijftal secties die onderling verschillend morfodynamisch gedrag vertonen:

Sectie	Eigenschappen
Sectie 1, RSP km 3-8	Kustlijn achteruitgang, versteiling van het kustprofiel, kleine zandbanken. Directe beïnvloeding door buitendelta Marsdiep. Morfologische veranderingen in gebied getij-gedomineerd en gestuurd door kustwaartse migratie van Nieuwe Schulpengat.

¹ Langs de gesloten Hollandse kust representeert de zogenaamde Rijks-StrandPaal (RSP) positie de afstand in kilometers tot Den Helder. Rijksstrandpalen staan elke 250 m opgesteld langs het strand.

Sectie 2, RSP km 8-23	Kustlijn achteruitgang. Lokaal vooruitgang a.g.v. grootschalige zandsuppleties. Indirecte beïnvloeding door buitendelta Marsdiep. Overgang van getij- naar golfgedomineerd. Tendens naar profielversteiling t.g.v. verandering bodemligging buiten brandingszone. Variatie in morfologie van vooroever (met als gevolg variabele golfaanval op kustbescherming)
Sectie 3, RSP km 23-55	Kustlijn achteruitgang resp. stabiele kustlijn positie. Morfologische veranderingen golf-gedomineerd. Variaties in steilheid van kustprofiel. Periodiek gedrag van meervoudig bankensysteem (tijdschaal 15 jaar)
Sectie 4, RSP km 56-98	Stabiele kustlijnpositie & profiel steilheid, met kleine fluctuaties van jaar tot jaar. Periodiek gedrag van meervoudig bankensysteem (tijdschaal 4-5 jaar)
Sectie 5, RSP km 98-118	Kleine kustlijnfluctuaties (kust vastgelegd met strandhoofden), met uitzondering van aanzanding rond havendammen Scheveningen / Hoek van Holland en a.g.v. zandsuppleties. Variaties in profiel steilheid a.g.v. menselijke ingrepen in het systeem. Geen permanente aanwezigheid van zandbanken.

Tabel 2.1: Karakteristieke morfodynamiek in vijf secties langs de Hollandse kust (volgens Wijnberg, 1995).

Van de Rest (2004) geeft een overzicht van de uitgevoerde studies met betrekking de historische kustlijnontwikkeling van de Hollandse kust. De meeste studies laten ten noorden van Egmond en ten zuiden van Scheveningen een kustachteruitgang zien, en een kustvooruitgang in het gebied daartussen. Volgens Van Vessem (1990) bedraagt de gemiddelde kustachteruitgang ten zuiden van Scheveningen over de periode 1850-1990 ca. 0.35 m/jaar. Ten noorden van Egmond is dit 0.9 m/jaar (versterkte erosie ten gevolge van de invloed van het Marsdiep) en in de tussenliggende zone bedraagt de aanzanding ca. 0.25 m/jaar, met plaatselijk hogere waarden rond de havendammen van IJmuiden. Een meer gedetailleerde analyse is uitgevoerd door Bouwmeester e.a. (1994), zie Tabel 2.2. Op basis van de analyse van JARKUS metingen over de periode 1963-1992 presenteren Bouwmeester e.a. (1994) de natuurlijke, trendmatige ontwikkeling van deelgebieden langs de Nederlandse kust, waarbij onderscheid is gemaakt naar de onderwateroever (NAP -6m tot NAP -1 m), het strand (NAP -1m tot NAP +3m) en de eerste duinregel (boven NAP +3m). Hierbij is gecorrigeerd voor het effect van suppleties. De ontwikkeling van de Hollandse kust wordt gekenmerkt door korte erosiegebieden, afgewisseld met korte sedimentatiegebieden. Dit fluctuerende patroon is waarschijnlijk gerelateerd aan de migratie van zandbanken. Verder blijkt de ontwikkeling de onderwateroever, het strand en de eerste duinregel sterk gekoppeld.

Sectie	RSP-lijn	trend
Onderwateroever (zone tussen NAP -6m en NAP -1m):		
Den Helder- de Kaap	0.90-7.89	significante erosieve trend, laatste 10 jaar versterkt
de Kaap- Pettemer zeewering	7.89-17.00	overwegend geringe aanzanding
Pettemer- en Hondsb. zeewering	20.27-26.15	erosieve trend
Hondsb. zeewering- Castricum	27.00-47.00	fluctuerende kustlijn (brandingsruggen)
Castricum- even voor IJmuiden	47.00-49.25	loefzijde erosie
direct ten noorden van IJmuiden	49.25-50.25	aanzienlijke aanzanding
direct ten zuiden van IJmuiden	56.25-59.50	aanzienlijke aanzanding

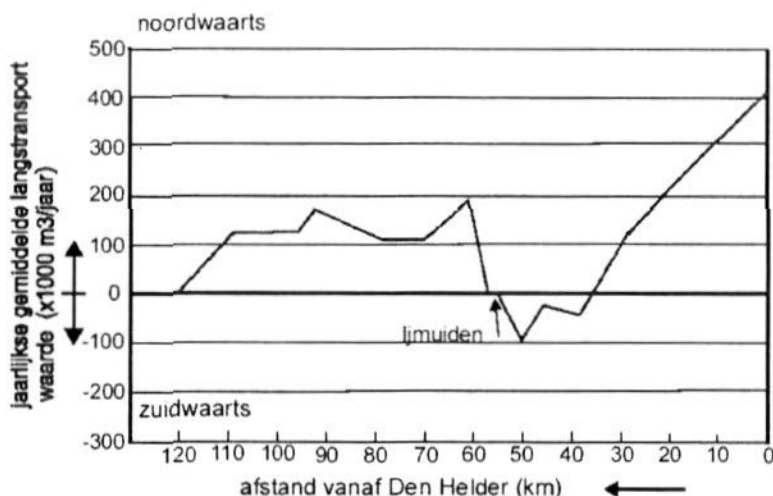
Bloemendaal-Zandvoort	60.50-68.00	significante erosie
Zandvoort-Noordwijk	68.00-92.00	van positieve naar negatieve trend
Duinoord-Wassenaar-zuid	92.00-97.00	significante erosie
Scheveningen-km 113	102-113	statisch maar niet significante aanzanding
direct ten noorden van HvH	113-117 117-118	significante aanzanding erosie
Strand (zone tussen NAP-1m en NAP +3m):		
Den Helder-Egmond aan zee	0-39.00	vrijwel overal achteruit, behalve km 9
Egmond-Castricum	39.00-47.50	afwisselend erosie en sedimentatie
Castricum- even voor IJmuiden	47.50-49.25	erosie
direct ten noorden van IJmuiden	49.25-50.25	aanzienlijke aanzanding
Rijnland	56.25-101.4	gelijke trend met onderwateroever, maar wel significant
Delfland	102-117	significante aanzanding
direct ten noorden van HvH	117-118	erosie
Duinen (zone boven NAP +3m):		
Den Helder-Castricum	0-47.50	grillig verloop, afwisselend erosie/ sedimentatie
Castricum- even voor IJmuiden	47.50-49.25	erosie
direct ten noorden van IJmuiden	49.25-50.25	sterke aanzanding
Rijnland	56.25-101.4	gelijke trend met onderwateroever en strand, overheersende aanzanding slaat echter pas bij km 94 om in erosie
Delfland	102-117.5	significante aanzanding
direct ten noorden van HvH	117.5-118	erosie

Tabel 2.2: Trends van erosie en sedimentatie, gecorrigeerd voor suppleties (volgens Bouwmeester et al., 1994).

Op basis van de analyse van verschillende sediment budget studies komt Van de Rest (2004) tot de volgende conclusie voor wat betreft de kustontwikkeling (exclusief suppleties) in de zone NAP+3/-8m:

- Vanaf Hoek van Holland tot Den Helder is er sprake van een erosieve trend van ongeveer 150.000-300.000 m³/jaar;
- Vanaf Egmond (RSP km 40) tot Den Helder is er een structurele erosieve trend, met lokaal kleine aanzandingsgebieden;
- Tussen RSP km 40 en 47 is de kust relatief stabiel (met lichte neiging tot aanzanding)
- In de secties RSP km 47-50 en 60-68 is er sprake van erosie als gevolg van (de verlenging van) de havendammen van IJmuiden.
- Aan weerszijden van de havendammen van IJmuiden (RSP km 50-60) is er sprake van een structurele aanzanding.
- De sectie van RSP km 68-92 vertoont een kleine trend van aanzanding
- Van RSP km 92 tot 98 is er sprake van structurele erosie, die samenhangt met de overgang van de met strandhoofden beschermde kust naar de schone kust
- Tussen RSP km 98 en 105 is de kust relatief stabiel; ten zuiden van km 105 is er sprake van structurele erosie ten gevolge van de havendammen van Hoek van Holland.

Naast een overzicht van de natuurlijke patronen van erosie en sedimentatie is het voor de evaluatie van ingrepen in de kustzone van belang om inzicht te hebben in de grootte orde van het kustlangse transport van sediment. Op basis van de vergelijking van verschillende bestaande transport studies (incl. een aanpassing voor recente metingen) komt Van de Pol (2004) tot het transportbeeld als geschetst in Figuur 2.1:



Figuur 2.1: Jaargemiddeld, kustlangs transport van sediment in de zone NAP +3/-8m (volgens Van de Pol, 2004).

De combinatie van dominante golven uit richtingen variërend van ZW tot NNW, relatief sterke, noordgaande getijstromingen tijdens vloed en een kustlijnoriëntatie NNO zorgt voor een netto noordgaand transport van sediment langs de Hollandse kust. Vanaf de havendammen van Hoek van Holland neemt het transport geleidelijk toe richting het noorden ten gevolge van de afname van de afschermdende werking van de Noorderdam. Langs de kust van Delfland houden strandhoofden het transport relatief constant. Ten noorden van RSP km 98, in de zone zonder strandhoofden, neemt het transport iets toe om vervolgens weer geleidelijk af te nemen ten gevolge van de heroriëntatie van de kust. Juist ten zuiden van IJmuiden neemt het transport in noordwaartse toe vanwege de afscherming van golven uit het noorden. Omgekeerd is het transport ten noorden van IJmuiden zuidwaarts gericht ten gevolge van afscherming van golven uit het zuiden. Nabij Egmond wordt het transport weer noordgaand, om vervolgens geleidelijk toe te nemen tot een waarde van ca. 400.000 m³/jaar nabij Den Helder. Opgemerkt wordt dat er met name in de Kop van Noord-Holland grote onzekerheden bestaan omtrent de grootte van de netto transporten, vanwege de complexe interactie met de buitendelta van het Marsdiep en de Waddenzee.

2.2 De effectiviteit van het huidige suppletiebeleid

Sinds 1990 richt het Nederlandse kustbeleid op het 'Dynamisch Handhaven' van de kustlijn, het bestrijden van kusterosie met behoud van enige dynamiek. De kustlijnpositie van 1990 is daarbij de norm en wordt de Basis Kustlijn genoemd. Zodra deze overschreden dreigt te worden wordt ingegrepen, waarbij zandsuppleties als belangrijkste middel zijn gekozen om erosie te bestrijden. Het 'Dynamisch Handhaven' beleid is succesvol volgens een evaluatie door Roelse (2002). De kustachteruitgang in erosieve gebieden is tot staan gebracht en langs de Hollandse kust bedroeg de kustlijnvoortgang over de periode 1990-1998 gemiddeld 1.9 m/jaar. Wel bestaat er enige zorg over de duurzaamheid van de methode bij zeer steile onderwateroevers. Als gevolg van het vigerende beleid domineren zandsuppleties de huidige ontwikkeling van de Hollandse kustlijn. Een overzicht van de suppleties aangebracht tussen 1990 en 2003 is opgenomen in Appendix A.

Bij het gebruik van zandige maatregelen ter bestrijding van kusterosie, ter bescherming van zwakke plekken of voor de uitbouw van de kust is het van belang om inzicht te hebben in de effectiviteit van zandsuppleties. In het kader van deze studie wordt de effectiviteit gedefinieerd als de bijdrage van een suppletie aan het zandvolume in de MKL zone. De effectiviteit verschilt aldus voor strandsuppleties en onderwatersuppleties, en is tevens afhankelijk van beschouwde tijdsperiode.

Zandsuppleties worden aangebracht op het droge strand, veelal tegen de duinvoet (NAP+3m contour). Omdat het zand vrijwel volledig terecht komt in de MKL zone is de initiële effectiviteit van strandsuppleties (direct na aanleg) vrijwel 100%. Ten gevolge kustafslag tijdens stormen treedt echter al snel (vaak binnen enkele maanden tot een jaar) een herverdeling van het gesuppleerde zand op, waarbij het merendeel terecht komt in de brandingszone, maar een deel ook de MKL-zone verlaat. Hierdoor is er sprake van een afname van de effectiviteit van strandsuppleties in de tijd.

Onderwatersuppleties worden veelal aangebracht tegen de zeewaartse rand van de brandingszone, op waterdieptes van zo'n 5 tot 7m. Hierdoor ligt direct na aanleg slechts een gering deel van het gesuppleerde zand (orde 25%) in de MKL-zone, waarmee de initiële effectiviteit gering is. Na verloop tijd beweegt een deel van het gesuppleerde zand zich in kustwaartse richting en komt terecht in de MKL zone. Daarnaast fungeert de onderwatersuppletie tijdens stormen als een soort van golfbreker, waardoor zand wordt ingevangen in het luwtegebied tussen de suppletie en de kustlijn. Ook dit zand draagt in positieve zin bij aan de lokatie van de MKL. Door deze processen neemt de effectiviteit van onderwatersuppleties langzaam toe in de tijd.

Getalsmatig is de effectiviteit van strand- en onderwatersuppleties vooralsnog grotendeels onbekend. Alkyon (2002) schat op basis van de analyse van *strandsuppleties* in het kustvak Bergen – Egmond een onderhoudsbehoefte van 20% per jaar van het volume van een aangebrachte kustuitbouw. Roelse (2002) suggereert voor het ontwerp van strandsuppleties een veiligheidstoeslag van doorgaans 10 tot 25% op het berekende suppletievolume. Voor onderwatersuppleties zijn de onzekerheden groter en bedraagt de toeslag veelal meer dan 100% van het berekende volume. Opgemerkt wordt dat de toeslag bij onderwatersuppleties doorgaans wordt vastgesteld vanuit gegeven financiële randvoorwaarden ('hoeveel zand kan ik aanbrengen gegeven mijn budget en de goedkope wijze van aanbrengen') en niet vanuit morfologische overwegingen.

Binnen de Planstudies-Veiligheid spelen zandige ingrepen ter vergroting van de kustveiligheid een belangrijke rol. Om de doelmatigheid en gerelateerde onderhoudskosten van dit soort ingrepen te kunnen vaststellen is gedegen inzicht nodig in de effectiviteit van strand- en onderwatersuppleties, voor verschillende deelgebieden langs de Hollandse kust. Dit soort gegevens is niet eenduidig voorhanden uit de literatuur. Daarom is in het kader van deze studie een data analyse uitgevoerd, waarbij gebruik is gemaakt van de bekende jaarlijkse kustmetingen in 1990 en 2003, het netto kustlangs transport van sediment langs de Hollandse kust volgens Van de Rest (2004) en de aangebrachte zandsuppleties over de periode 1990-2002. Vanwege het tijdsafhankelijke effect in de morfologische ontwikkeling van suppleties is – analoog aan Roelse (2002) – de analyse van de kustlijnveranderingen over de periode 1990-2003 gebaseerd op de suppletiedata tot en met 2002.

Om de effectiviteit van strand- en onderwatersuppleties vast te stellen is voor zowel de gehele Hollandse kust als voor specifieke deelgebieden een sedimentbalans voor de MKL zone opgesteld. Deze stelt dat zandsuppleties effectief worden ingezet voor zover ze bijdragen aan (i) de compensatie van zandverliezen in de MKL zone als gevolg van verschillen in de grootte van het kustlangse transport en (ii) de gemeten uitbouw van de Hollandse kust. In formulevorm:

$$\Delta V_{UITBOUW} + \Delta V_{KUSTLANGS} = \varepsilon_S \cdot V_{STRAND} + \varepsilon_{OW} \cdot V_{OW} \quad (2.1)$$

In vergelijking (2.1) is $\Delta V_{UITBOUW}$ de uitbouw van de kust zoals afgeleid uit de jaarlijkse kustmetingen, $\Delta V_{KUSTLANGS}$ het zandverlies in de MKL zone door variaties in het kustlangse transport van sediment, V_{STRAND} het volume aan strandsuppleties over de periode 1990-2002 en V_{OW} het volume aan onderwatersuppleties over dezelfde periode. De factoren ε_S en ε_{OW} geven de effectiviteit van respectievelijk strand- en vooroeversuppleties. Idealiter worden ε_S en ε_{OW} onafhankelijk van elkaar bepaald. Dit kan bijvoorbeeld door op zoek te gaan naar jaren met uitsluitend strandsuppleties, op basis daarvan ε_S te bepalen om tenslotte ε_{OW} te bepalen uit de gehele dataset. Voor deze eerste, globale analyse is een eenvoudige benadering bekozen, waarbij is aangenomen dat er een vaste verhouding bestaat in de effectiviteit van strand- en vooroeversuppleties. Gegeven de eerder gepresenteerde kentallen is aangenomen dat strandsuppleties een factor 2.5 effectiever zijn dan onderwatersuppleties. Hiermee reduceert vergelijking (2.1) tot:

$$\Delta V_{UITBOUW} + \Delta V_{KUSTLANGS} = \varepsilon_S (V_{STRAND} + 0.4 \cdot V_{OW}) \quad (2.2)$$

waaruit de effectiviteit ε_S van strandsuppleties rechtstreeks kan worden bepaald.

Deze analysemethodiek is toegepast voor zowel de gehele Hollandse kust als voor specifieke deelgebieden. Uit de jaarlijkse kustmetingen is afgeleid dat er tussen 1990 en 2003 sprake is geweest van een kustuitbouw van 1.56 mln m³/jaar. Nabij Hoek van Holland is het kustlangse zandtransport in de MKL zone nihil, bij Den Helder bedraagt dit ca. 400.000 m³/jaar (zie Van der Rest, 2004 en de modelberekeningen in deze studie). Hiermee komt het zandverlies $\Delta V_{KUSTLANGS}$ voor de gehele Hollandse kust uit op 400.000 m³/jaar. De jaarlijkse volumina aan strand- (1.79 mln m³/jaar) en onderwatersuppleties (1.47 mln m³/jaar) zijn bepaald uit de suppletiedata, zie Appendix A. Toepassing van vgl. (2.2) levert een effectiviteit ε_S van strandsuppleties van ca. 82%. Gegeven onze aanname zijn onderwatersuppleties zijn een factor 2.5 minder effectief, wat neer komt op $\varepsilon_{OW} = 33\%$. De analyse resultaten voor de gehele Hollandse kust zijn samengevat in Tabel 2.3.

Kustvak	RSP- Noord	RSP- Zuid	$\Delta V_{KUSTLANGS}$ (m ³ /jr)	$\Delta V_{UITBOUW}$ (m ³ /jr)	V_{strand} (m ³ /jr)	ε_S (%)	V_{OW} (m ³ /jr)	ε_{OW} (%)
Hollandse kust	0	118500	400.000	1.56 mln	1.79 mln	82.4%	1.47 mln	33.0%

Tabel 2.3: Effectiviteit van strand- en onderwatersuppleties gehele Hollandse kust.

Voor de evaluatie van zandige ingrepen op verschillende lokaties langs de kust is het nodig om een gedetailleerder beeld te verkrijgen van de effectiviteit van strand- en onderwatersuppleties. Om deze reden is dezelfde analyse toegepast voor drie deelgebieden

langs de Hollandse kust (Tabel 2.4). Duidelijk is dat de effectiviteit van suppleren in Zuid-Holland in hoge mate vergelijkbaar is met die voor de gehele Hollandse kust. Het kustvak Bergen-Egmond laat een geringe afname zien in de effectiviteit van strand- en onderwatersuppleties (70 resp. 28%). Dit is verklaarbaar vanuit de zeewaartse verschuiving van de BKL ter plaatse, waardoor er sprake is van bolwerkvorming en navenant grotere zandverliezen. Vanwege de ligging nabij de geul Nieuwe Schulpengat, de steile kustprofielen in de uiterste Kop van Noord-Holland en het aantrekken van het noordgaande zandtransport als gevolg van de toenemende invloed van getijstromingen zijn strand- en onderwatersuppleties het minst effectief in de Kop van Noord-Holland (51 resp. 20%). Vanwege het ontbreken van suppleties in het kustvak direct boven IJmuiden (km 40 tot en met km 56) is dit gebied niet nader in de analyse opgenomen.

Kustvak	RSP-Noord	RSP-Zuid	$\Delta V_{\text{KUSTLANGS}}$ (m ³ /jr)	$\Delta V_{\text{UITBOUW}}$ (m ³ /jr)	V_{strand} (m ³ /jr)	ϵ_s (%)	V_{ow} (m ³ /jr)	ϵ_{ow} (%)
Kop van Noord-Holland	0	20000	100.000	0.162 mln	0.468 mln	51.1%	0.111 mln	20.4%
Bergen-Egmond	32000	40000	125.000	0.140 mln	0.324 mln	69.8%	0.138 mln	27.9%
Zuid-Holland	56.000	118.500	0	0.977 mln	0.788 mln	80.3%	1.07 mln	32.1%

Tabel 2.4: Effectiviteit van strand- en onderwatersuppleties per deelgebied langs de Hollandse kust.

Vanwege het belang van de Kop van Noord-Holland binnen de huidige studie en de variëteit aan processen die in dat gebied een rol speelt is het kustvak van Den Helder tot de Pettemer Zeewering in meer detail geanalyseerd. Hiertoe is het kustvak opgedeeld in drie gelijke segmenten van 7 km elk (Tabel 2.5). De effectiviteit van zandsuppleties is minimaal (45%) in het meest noordelijke segment rond Den Helder. Dit segment wordt gekenmerkt door steile kustprofielen en zandverliezen in het Nieuwe Schulpengat. Verder naar het zuiden, in het reeds eeuwenlang erosieve segment rond Callantsoog, neemt de invloed van de getijgeul af waardoor de effectiviteit van strandsuppleties toeneemt tot zo'n 64%. Nog verder zuidwaarts, in het segment Petten, begint de bolwerkvorming van de Pettemer Zeewering een belangrijke rol te spelen, waardoor de effectiviteit wederom afneemt tot ongeveer 48%.

Kustvak	RSP-Noord	RSP-Zuid	$\Delta V_{\text{KUSTLANGS}}$ (m ³ /jr)	$\Delta V_{\text{UITBOUW}}$ (m ³ /jr)	V_{strand} (m ³ /jr)	ϵ_s (%)	V_{ow} (m ³ /jr)	ϵ_{ow} (%)
Den-Helder	0	7.000	33.000	63.600	214.000	45.2%	0	18.1%
Callantsoog	7.000	14.000	33.000	77.000	127.000	64.1%	111.000	25.6%
Petten	14.000	21.000	33.000	39.200	149.000	48.4%	0	19.4%

Tabel 2.5: Effectiviteit van strand- en onderwatersuppleties in de Kop van Noord-Holland.

De percentages gepresenteerd in de Tabellen 2.3 t/m 2.5 worden in het vervolg van deze studie gebruikt bij het ontwerp van zandige maatregelen in de kustzone (Hoofdstuk 5, 6 en 7).

3 Kustlijnmodellering Hollandse kust

3.1 Waarom een kustlijnmodel van de Hollandse kust?

Ter ondersteuning van de evaluatie van de verschillende basisvarianten zoals besproken in Hoofdstuk 1 is in het kader van deze studie een kustlijnmodel van de Hollandse kust opgezet. Op basis van gegeven golf- en getijcondities, het bodemprofiel langs een aantal karakteristieke dwarsraaien en de lokale kustoriëntatie berekent zo'n model het verloop van het zandtransport langs de kust. Uit de verandering van de grootte en richting van het langtransport wordt vervolgens de ontwikkeling van de kustlijn berekend: In gebieden waar het langtransport toeneemt (waardoor meer zand een balansgebied verlaat dan er in komt) treedt een netto verlies van zand op, met als gevolg kustlijnerosie. Omgekeerd treedt sedimentatie op in gebieden waar de grootte van het sedimenttransport afneemt. Een dergelijk kustlijnmodel is – veelal in combinatie met een gedetailleerd golfmodel – bij uitstek geschikt voor de analyse van de natuurlijke morfodynamiek van golfgedomineerde kustsystemen en het effect van grootschalige menselijke ingrepen in de kustzone. Vanwege hun relatieve eenvoud worden kustlijnmodellen veelvuldig toegepast voor impact en ontwerpstudies in de kustzone.

In het kader van deze studie wordt het kustlijnmodel gebruikt voor de volgende doeleinden:

1. Verkrijgen van kwantitatief inzicht in heersende patronen van erosie en aanzanding langs de kust. Dit inzicht is nodig voor een optimale morfologische inpassing van waterbouwkundige constructies zoals een strekdam.
2. Genereren van randvoorwaarden voor het globale ontwerp van ingrepen in de kustzone. Dit betreft met name de schatting van de grootte van het lokale langtransport ter plaatse van de ingreep.
3. Bepalen van het by-pass transport langs een kleinschalige ingreep in de kustzone, zoals een enkele of een serie korte strekdammen. Dit gebeurt aan de hand van de berekende kustdwarse verdeling van het kustlangse transport.

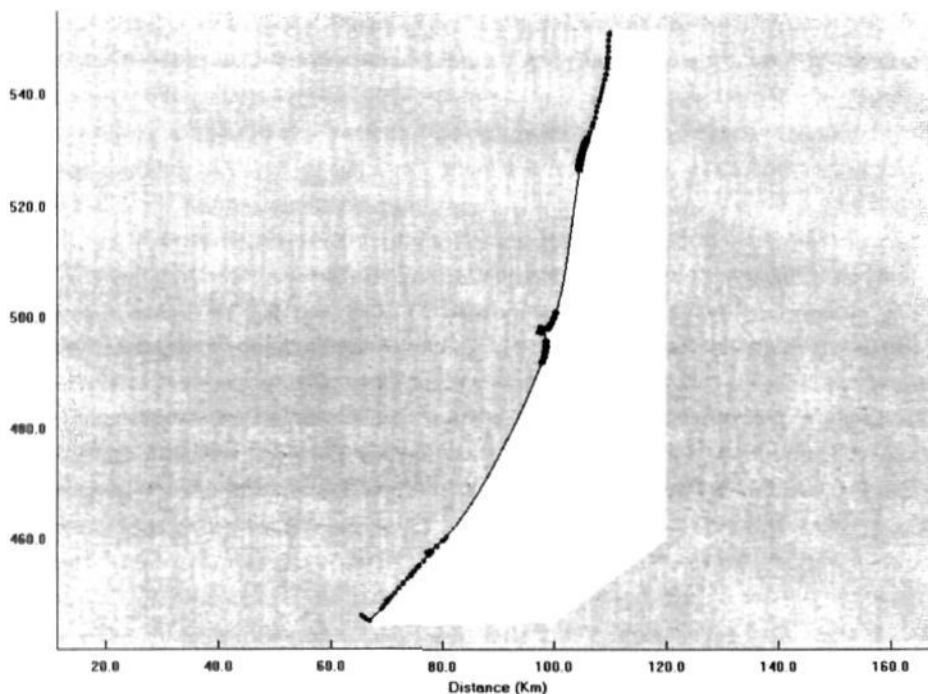
Belangrijk voordeel van het gebruik van een kustlijnmodel is de eenvoudige interpreteerbaarheid van de resultaten. Een één-lijn kustlijn model rekent met het bulk transport van zand in de brandingszone, zonder in principe rekening te houden met de verdeling ervan langs het profiel. Volumeveranderingen in dit transport worden via de aanname van een actieve profielhoogte vertaald naar een kustlijnverandering. Op vergelijkbare wijze wordt binnen het Nederlandse kustbeheer de positie van de Momentane Kustlijn (MKL) bepaald uit het zandvolume tussen de duinvoet en een karakteristieke dieptecontour op ongeveer NAP -5m. Veranderingen in de positie van de MKL zijn representatief voor veranderingen in dit zandvolume. In deze zin zijn de resultaten van een kustlijnmodel dus rechtstreeks af te beelden op de praktijk van de kustbeheerder.

De huidige analyses hebben zich beperkt tot een globale analyse en evaluatie van het effect van ingrepen in de kustzone. In een vervolgfase van dit project kan een aantal ingrepen nader gedetailleerd worden aan de hand van detailberekeningen met behulp van een

morfologisch gebiedsmodel. Met een dergelijk, meer geavanceerd model is het beter mogelijk om rekening te houden met afschermingseffecten van golven door constructies (bv. het golfuwtegebied achter een kustparallele golfbreker of aan weerszijden van een havendam) en met mogelijke traagheidseffecten die een rol spelen (bv. bij het oppikken van sediment in de waterkolom). In het kader van deze studie wordt voor de kustlijnmodellering gebruik gemaakt van het door WL | Delft Hydraulics ontwikkelde software pakket Unibest-CL+.

3.2 Model opzet en schematisatie randvoorwaarden

Gelet op de beschikbaarheid van hoge kwaliteit bodem- en golfgegevens is besloten om een relatief gedetailleerd kustlijnmodel op te zetten. Het model beslaat de volledige Hollandse kust van Hoek van Holland tot Den Helder (Figuur 3.1). In gebieden die worden gekenmerkt door geleidelijke variaties in het golfklimaat en/of de kustoriëntatie is elke 5 à 10 km een transportberekening uitgevoerd. In gebieden van sterke variaties, zoals rond de havendammen van IJmuiden, is elke 500 tot 1000 m een transportsom gemaakt. Het feitelijke rekgid van het kustlijnmodel is veel fijner en kent een gemiddelde gridafstand van ca. 100 m.



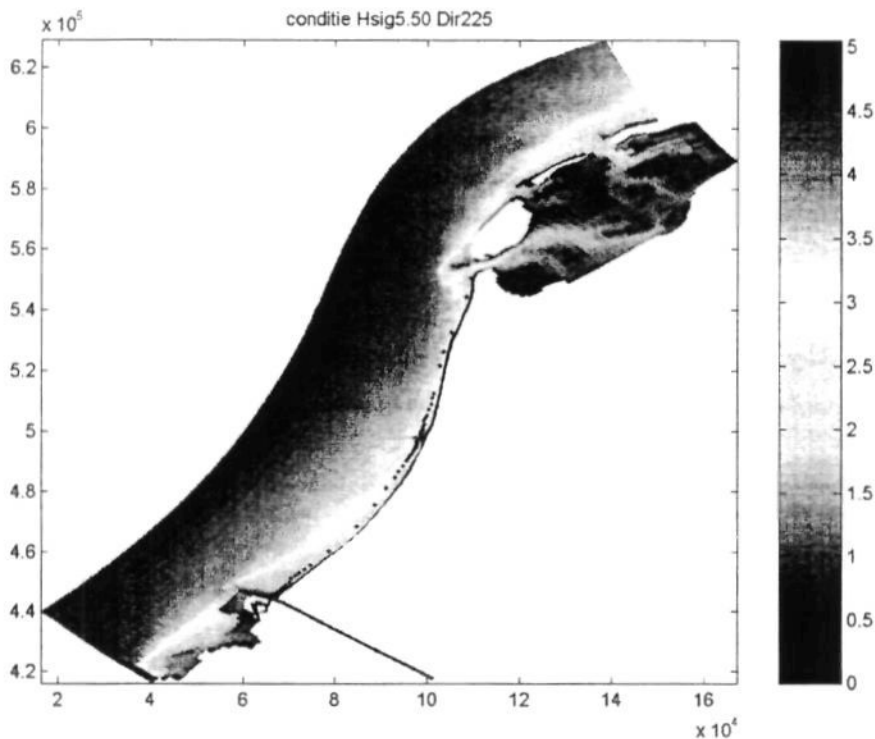
Figuur 3.1: Kustlijnmodel van de gesloten Hollandse kust in Unibest-CL. Hierin zijn de havendammen bij Hoek van Holland en IJmuiden goed herkenbaar, evenals de korte strekdammen bij Delfland en in de kop van Noord-Holland. De bruine stippen zijn bron- en put-termen voor de bypass van zand langs de dammen bij Scheveningen en IJmuiden.

Voor het uitvoeren van de lokale transportberekeningen heeft het model voor iedere lokatie een realistisch bodemprofiel nodig. Deze profielen zijn afgeleid uit de bekende JARKUS dataset van jaarlijkse kustmetingen. Waar nodig zijn deze profielen aan de zeewaartse zijde verlengd met data van de diepere doorlodingen, om een profiel te verkrijgen dat reikt tot de NAP -10m contour. Op basis van dezelfde JARKUS metingen is voor iedere raai de ligging

van de Momentane Kustlijn (MKL positie) bepaald; deze lijn fungeert als vertrekpunt voor de berekeningen met het kustlijnmodel. Met andere woorden, de berekende kustlijnonwikkeling representeert de evolutie van de MKL lijn. De karakteristieken van het sediment zijn constant verondersteld langs de kust ($D_{50} = 200 \mu\text{m}$, $D_{90} = 300 \mu\text{m}$)

Cruciaal voor het verkrijgen van realistische uitkomsten uit een kustlijnmodel is de schematisatie van golfklimaat. In het kader van deze studie is dit gebeurd op basis van de 23-jaar tijdseries van gemeten golfhoogte, periode en richting in de vaste golfstations Eierlandse Gat, IJmuiden Munitiestortplaats en Lichteiland Goeree (data afkomstig van www.golfklimaat.nl). Er is gekozen voor een innovatieve benadering die voorziet in een realistische variatie van het golfklimaat op dieper water. Op die manier wordt bijvoorbeeld netjes in rekening gebracht dat naar het noorden toe de gemiddelde golfhoogte toeneemt en golven uit noordelijke richtingen aan belang winnen. Vertrekpunt voor de golfschematisatie is de gemeten tijdserie in IJmuiden. Deze is ingedeeld in golfhoogteklassen van 1 m en golfrichtingsklassen van 30° , met elk een karakteristieke golfperiode (berekend uit de metingen) en kans van voorkomen (zie Appendix B). Voor de naburige stations Eierlandse Gat en Lichteiland Goeree is per klimaatklasse op basis van de simultaan aan IJmuiden gemeten condities de lokale golfhoogte, periode en richting bepaald. Dit levert voor die twee stations het corresponderende golfklimaat, bestaande uit een identiek aantal condities met dezelfde kans van voorkomen maar een andere, lokaal bepaalde golfhoogte, periode en richting (zie Appendix B). Merk op dat voor station Lichteiland Goeree geen golfrichting metingen beschikbaar zijn. Deze zijn in de berekeningen vervangen door de metingen van IJmuiden.

De aldus verkregen golfschematisatie bestaat uit 47 condities voor golfhoogte, periode en richting op diep water (rond de NAP-18m contour lijn). Deze moeten ieder afzonderlijk getransformeerd worden naar ondieper water, waar ze rond de NAP-10m lijn als randvoorwaarde zullen fungeren voor de zandtransport berekeningen. Daartoe is iedere conditie afzonderlijk doorgerekend met het spectrale golfmodel SWAN. Een voorbeeld van een dergelijke berekening (golfhoogteklasse 5.5 m uit richting 225°N) is gegeven in Figuur 3.2. Duidelijk zichtbaar is het afschermingseffect dat uitgaat van de havendammen bij Hoek van Holland en IJmuiden, en de variabele golfrandvoorwaarde die gebruikt is op de zeewaartse rand van het model. De zwarte stipjes nabij de kust geven het meest zeewaartse punt van de kustdwarse Unibest rekenraaien; de golfcondities in deze punten zijn uitgevoerd om als randvoorwaarde te dienen voor de zandtransportberekeningen in het kustlijnmodel. Verder is te zien dat rond IJmuiden en ten noorden van Hoek van Holland gerekend is met een hogere raaidichtheid.



Figuur 3.2: Golftransformatie van diep water naar de kust. Voorbeeldberekening voor de golfhoogteklasse 5.5 m uit richting 225°N

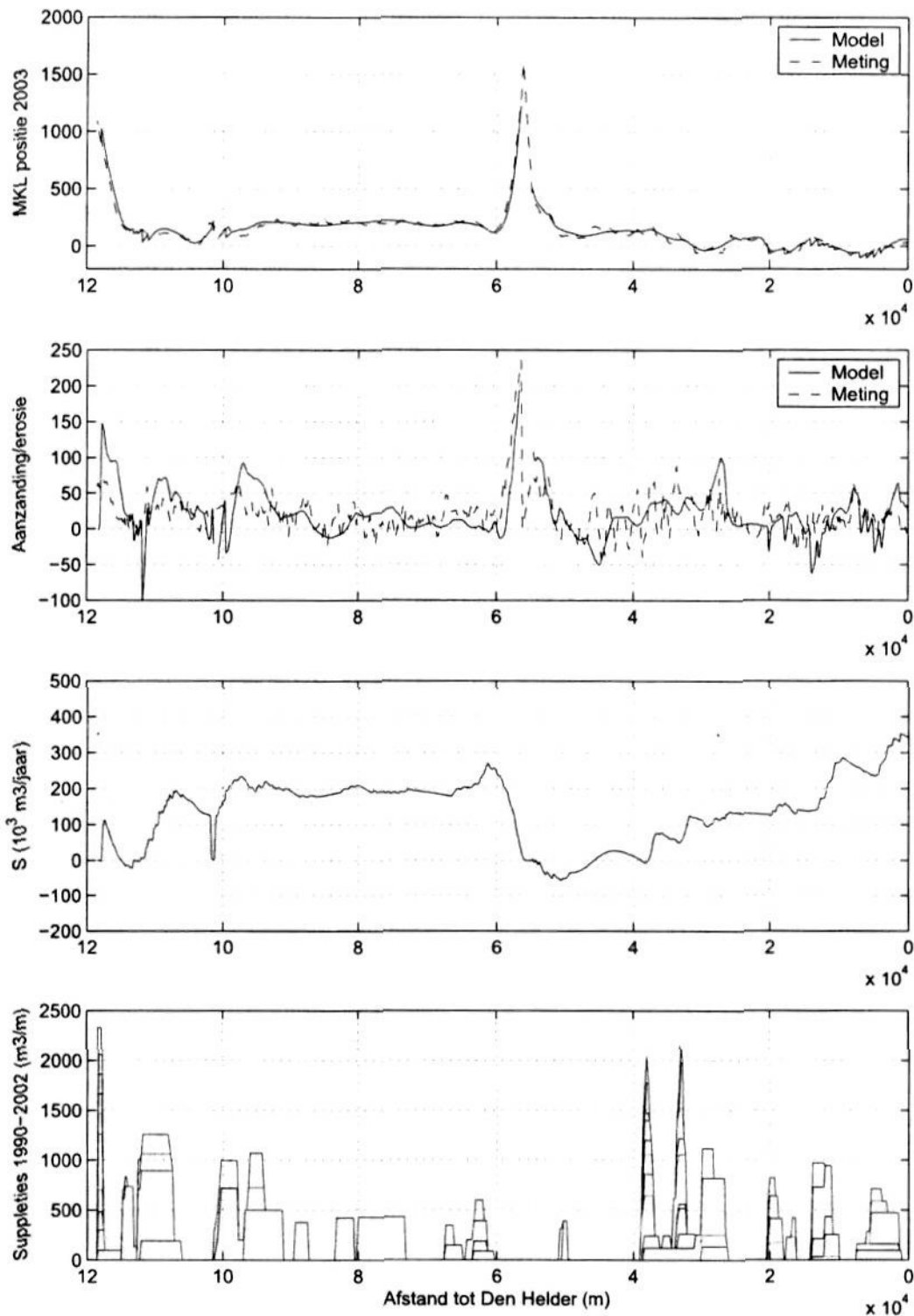
Het getij speelt een secundaire rol voor wat betreft het netto zandtransport in de brandingszone. In de huidige studie is het effect van getijstromingen meegenomen in de calibratie van het Unibest-model. Hiertoe is met een numeriek stromingsmodel van de Zuidelijke Noordzee (het ZUNO-model in Delft3D) het waterstandsverloop bepaald over een periode van een half jaar (11 november 1988 tot 10 mei 1989) voor de zogenaamde 'klimaatpunten' van Unibest. In deze punten wordt in Unibest het golf- en getijklimaat opgelegd als aandrijvende kracht voor sedimenttransport. Getij voegt een netto noordwaarts gerichte component toe aan het langstransport, maar uit de berekeningen bleek dat deze component langs het grootste deel van de Hollandse kust erg klein is ten opzichte van het golfgedreven transport. Om deze reden is langs de gesloten kustvakken het effect van de getijstroming niet verder meegenomen. Op plaatsen waar de getijstroming wel van invloed is (zoals in de directe omgeving van de IJmuiden havendammen en in de Kop van Noord-Holland) is het effect verwerkt in de calibratie van het kustlijnmodel (zie Paragraaf 3.3).

Het aldus verkregen model is gebruikt om de kustlijnontwikkeling over de periode 1990-2003 te simuleren. De initiële kustlijnligging correspondeert met de MKL ligging zoals afgeleid uit de JARKUS metingen van 1990. Voor een goede vergelijkbaarheid van de berekeningen met de MKL ontwikkeling is gerekend met een actieve profielhoogte van 8 meter. Dit is overigens een gangbare maat die meestal wordt toegepast voor dit type modellering. Alle suppleties over de periode 1990-2002 (Appendix A) zijn in het model opgenomen als een tijdgemiddelde input van zand ($\text{m}^3/\text{m}/\text{jaar}$), na correctie voor hun effectiviteit volgens Tabel 2.4. De resultaten van de modeltoepassing voor de periode 1990-2002 worden besproken in de paragraaf hieronder.

3.3 Validatie kustlijnmodel 1990-2003

Ter validatie van het opgezette modelinstrumentarium is het kustlijnmodel toegepast voor de periode 1990-2003. Ter afregeling van het model is rond IJmuiden een zand by-pass van 100.000 m³/jaar aangebracht, om het zandtekort in het kustvak direct ten noorden van de havendammen aan te vullen. Zandbalansstudies (bv. Van Rijn, 1995) wijzen uit dat een dergelijke natuurlijke by-pass in werkelijkheid optreedt, als gevolg van contractie van de getijstrooming rond de havendammen. Dit effect veroorzaakt een netto noordgaand transport van zand. Omdat deze stroomcontractie niet wordt meegenomen in de Unibest modelformuleringen is het effect van de by-pass kunstmatig toegevoegd middels een put-bron combinatie. Verder wordt de complexe delta-kust interactie in de Kop van Noord-Holland (RSP km 0-20) niet beschreven door het kustlijnmodel. Dit is ondervangen door rekening te houden met een lokaal lagere effectiviteit van suppleties (conform Tabel 2.4) als gevolg van het steile kustprofiel en door het geleidelijk verhogen van de transportcapaciteit richting Den Helder, ter simulatie van de toenemende getij-dominantie richting het noorden. Tenslotte is in de directe omgeving van de havendammen het afschermingseffect nog iets versterkt door een geringe aanpassing van de evenwichtshoeken. Dit laatste beïnvloedt de snelheid van aanzanding rond de dammen en daarmee de vorm van de kustbogen, die wat steiler worden. Op de schaal van het invloedsgebied van de haven is de totale aanzanding aan weerszijden van de dammen echter ongewijzigd. Het toepassen van deze maatregel kan worden onderbouwd vanuit de observatie dat het effect van de getijstrooming rond de haven niet wordt meegenomen in het model. Door contractie van de heengaande strooming zal het sediment verder meegevoerd worden richting de kop van de dam. Het omgekeerde effect treedt niet op, omdat de teruggaande getijstrooming niet direct na passage van de haventoeegang zal aanliggen aan de kust (en mogelijk zelfs een neer kan veroorzaken).

Vergelijking van het berekende sedimenttransportpatroon (Figuur 3.3, derde subplot) en het langtransport volgens Van der Rest (2004, zie Figuur 2.1) wijst uit dat het model de natuurlijke dynamiek van het systeem goed beschrijft. In lijn met de literatuur trekt het transport aan langs de kust van Delfland (RSP km 118-105) met een kleine piek juist ten noorden van Scheveningen (RSP km 97). Langs de kust van Rijnland (RSP km 90-60) is het transport relatief constant, met een lichte neiging tot afname. Juist ten zuiden van IJmuiden trekt het aan met als gevolg de bekende erosie bij Bloemendaal (RSP km 62). Ten noorden van de havendammen van IJmuiden (RSP km 50) is het transport negatief, vanwege de afscherming van golven uit zuidelijke richtingen. Ten zuiden van Egmond (RSP km 40) krijgt het noordgaand transport weer de overhand (vgl. Van de Rest, 2004), en zien we sterke gradiënten in het transport bij de badplaatsen Egmond en Bergen. Na een relatief constante by-pass langs de Hondsbossche- en Pettemer zeewering (RSP km 26-20) met sterke transport variaties op de kopse kanten van de zeewering zien we tenslotte een sterke toename van het langtransport in de Kop van Noord-Holland, slechts onderbroken door enige afname rond RSP km 10 als gevolg van heroriëntatie van de lokale kustlijn. Uit vergelijking van het transportpatroon (3^e plot) en de suppletievolumina (4^e plot) blijkt dat de lokaties waar het meest frequent gesuppleerd wordt samenvallen met de plaatsen waar lokaal een sterke transportgradiënt (dus erosie) berekend wordt. Deze waarneming draagt bij aan het vertrouwen in de modelberekeningen.



Figuur 3.3: Validatie van het kustlijnmodel over de periode 1990-2003. Presentatie van berekende (getrokken lijn) en gemeten (onderbroken lijn) kustlijnveranderingen (1^e plot), aanzanding/erosie volumes (2^e plot) en het resulterend sediment transport patroon (3^e plot). Ter referentie zijn in de 4^e plot de suppletievolumina voor de periode 1990-2002 weergegeven.

Het berekende patroon van aanzanding en erosie (2^e plot in Figuur 3.3) wordt gestuurd door de combinatie van transportgradiënten en zandsuppleties. Het globale beeld is in goede overeenstemming met de gemeten data. Lokaal kunnen afwijkingen optreden, zoals de onrealistische aanzandingen ten noorden van de havendammen van Scheveningen en IJmuiden als gevolg van het onttrekken van zand tussen de havenhoofden. Verder vertoont een enkel vak lokaal een extreme erosie tussen twee strandhoofden (met name in Delfland rond RSP km 112 en in de Kop van Noord-Holland rond RSP km 5 en 15). Dit wordt veroorzaakt door de aanwezigheid van een sterke erosieve gradiënt, in combinatie met onvoldoende golfafscherming tussen de strandhoofden. Ter compensatie overschat het model de aanzanding direct benedenstreams van het betrokken vak. In afwijking met de metingen voorspelt het model een erosieve zone in de buurt van Castricum (rond RSP km 45). In het model wordt deze veroorzaakt door het aantrekken van het noordgaand transport ten noorden van IJmuiden. Ook de trendanalyse volgens Bouwmeester e.a. (1994) maakt melding van loefzijde erosie tussen RSP km 47 en 49 (zie Tabel 2.2). Een mogelijke verklaring voor de afwijking tussen meting en model is een onderschatting van de voeding van de MKL zone door de by-pass van sediment rond de havenhoofden, dan wel het ontbreken van een incidentele suppletie in de overzichtstabel in Appendix A.

Ter afronding van de validatiefase presenteert Tabel 3.1 de zandbalans voor zowel de gehele Hollandse kust, als voor specifieke deelgebieden:

Gebied	Aanzanding data (m3/jaar)	Aanzanding model (m3/jaar)	Vershil
Gehele Hollandse kust	1.56 mln	1.53 mln	-1.9%
Kop van Noord-Holland	162.000	136.000	-16%
Bergen-Egmond	140.000	139.000	-0.7%
Zuid-Holland	977.000	937.000	-4.1%
Den-Helder	64.000	71.000	+11%
Callantsoog	77.000	42.000	-45%
Petten	39.000	20.000	-48%

Tabel 3.1: Zandbalans voor de Hollandse kust uit metingen en berekeningen

Uit Tabel 3.1 blijkt dat de grootschalige zandbalans van het kustlijnmodel in goede overeenstemming is met de gemeten realiteit. In de Kop van Noord-Holland (RSP km 0-20) wordt de totale aanzanding met 16% onderschat. Dit is een indicatie dat het berekende transport nabij Den Helder aan de hoge kant is. Binnen de drie deelsegmenten Den Helder, Callantsoog en Petten vinden we op balansniveau onderling grotere verschillen. Dit wordt veroorzaakt door genoemde lokale verstoringen tussen twee opeenvolgende strandhoofden, die het model niet realistisch weergeeft.

Resumerend wordt gesteld dat het model – gezien de nauwkeurigheid van het berekende sediment transport, de patronen van erosie en aanzanding en de grootschalige zandbalans – in de context van deze studie gebruikt kan worden voor de doeleinden gespecificeerd in Paragraaf 3.1.

4 Conceptuele werking van ingrepen in de kustzone

In Hoofdstuk 1 zijn verschillende varianten besproken ter waarborging van de kustveiligheid langs de zogenaamde zwakke schakels in de kustzone. Deze varianten zijn gebaseerd op zandige dan wel harde ingrepen in het morfologische systeem. In dit hoofdstuk wordt de conceptuele werking van verschillende typen ingrepen besproken, waarbij waar nodig gebruik wordt gemaakt van de modeluitkomsten uit Hoofdstuk 3. De uiteindelijke toepassing voor specifieke zwakke schakels langs de Hollandse kust volgt in de Hoofdstukken 5-7.

4.1 Structureel suppleren

Vanuit oogpunt van de natuurlijkheid van het kustsysteem is het aantrekkelijk om de veiligheid van zwakke schakels te garanderen middels uitsluitend zachte maatregelen. Dit betekent dat er extra zand in het systeem gebracht wordt. De hoeveelheid aan te brengen zand bestaat uit twee componenten:

1. Het initiële volume dat nodig is om *per direct* de veiligheid te garanderen. Dit volume wordt bepaald door de benodigde zeewaartse verschuiving van de afslaglijn ter plaatse. Aanleg van dit initiële zandvolume resulteert in een lokale uitbouw van de kust (bolwerkvorming).
2. Het onderhoudsvolume dat nodig om de veiligheid *gedurende de ontwerpperiode* van de uitbouw te garanderen. De beheerspraktijk van het 'Dynamisch Handhaven' van de kustlijn heeft geleerd dat aangebrachte zandsuppleties maar ten dele effectief bijdragen aan het zandvolume in de MKL zone (zie Paragraaf 2.2). Dit betekent dat een aangelegde kustuitbouw stelselmatig zand verliest. Het is zaak hierop te anticiperen door aanleg van een extra onderhoudsvolume, waardoor het voor de veiligheid benodigde initiële volume gedurende de ontwerpperiode van de uitbouw niet wordt onderschreden. De omvang van het benodigde onderhoudsvolume hangt af van de duur van de ontwerpperiode en de effectiviteit van strand- en vooroeversuppleties ter plaatse van de ingreep.

In de context van deze studie wordt het initiële volume voor de uitbouw bepaald met behulp van duinafslagberekeningen waarbij rekening wordt gehouden met verschillende klimaatscenario's en het effect van zwaardere golfrandvoorwaarden. Het benodigde jaarlijkse onderhoudsvolume wordt bepaald op basis van de effectiviteitsfactoren voor strand- en vooroeversuppleties zoals geschat uit de analyse van de kustlijnontwikkeling in relatie tot de aangebrachte suppleties over de periode 1990-2003. In beginsel wordt voor een lokale uitbouw gebruik gemaakt van de percentages voor het kustvak Bergen-Egmond, omdat daar reeds sprake is van een zeewaartse verplaatsing van de BKL. Wanneer de lokale situatie daar om vraagt wordt gebruik gemaakt van conservatievere percentages (bijvoorbeeld in geval van interactie met een buitendelta of een geul nabij de kust). Vooralsnog beperkt deze studie zich tot de bepaling van tijdgemiddelde onderhoudsvolumina, waarbij wordt verondersteld dat onderhoudssuppleties jaarlijks

worden aangebracht. Dit is in lijn met de tijdgemiddelde benadering voor de vaststelling van effectiviteitsfactoren in Paragraaf 2.2. De vaststelling van effectiviteitsfactoren voor megasuppleties (waarbij een grote initiële zandbuffer wordt aangelegd ter voorkoming van regulier onderhoud gedurende enkele jaren) vereist een nadere analyse van het gedrag van een grootschalige kustuitbouw.

Belangrijke voordelen van het gebruik van zandige maatregelen zijn de lage initiële aanlegkosten, het behoud van natuurlijkheid door afwezigheid van harde elementen en de hoge mate van flexibiliteit tijdens de uitvoering van het beleid. Nadelen zijn dat het aanbrengen van 'onnatuurlijk' grote hoeveelheden aanleiding kan geven tot onverwachte (en veelal ongewenste) dynamiek van het kuststelsel waardoor lokaal grote erosie kan optreden, de relatief hoge verliespercentages in geval van een grote zandige uitbouw van de kust (bolwerkvorming) en de verplichting tot het structureel aanbrengen van aanzienlijke onderhoudsvolumina zand in de kustzone.

4.2 Enkele strekdam met aanleg kustbogen en zand by-pass

Naast zandige ingrepen is het mogelijk om de veiligheid rond zwakke schakels te waarborgen door de aanleg van een enkele strekdam. Een kustdwarse strekdam onderbreekt het kustlangse transport van sediment, waardoor zand wordt ingevangen en de bekende kustbogen worden opgebouwd. Dit zorgt lokaal voor stabilisatie van de kustlijn. De aanleg van een strekdam gaat echter altijd gepaard met een negatief effect benedenstrooms. Door het onderbreken van het langsgaande transport treedt daar een tekort aan sediment op, waardoor erosie optreedt. Bij het ontwerp van een strekdam hanteren wij een tweeledige filosofie:

1. Aanleg kustbogen. De aanleg van een strekdam dient altijd gepaard te gaan met het kunstmatig opspuiten van kustbogen aan weerszijden van de dam. De reden hiervoor is tweevoudig. Op de eerste plaats is dit nodig om vanaf het moment van aanleg van de dam de veiligheid in het te beschermen kustvak ook daadwerkelijk te kunnen garanderen; opbouw van de kustbogen langs natuurlijke weg kan tientallen jaren in beslag nemen (zie hieronder). Op de tweede plaats kan door een uitgekiend ontwerp van de dam plus bijbehorende kustbogen gezorgd worden voor een natuurlijke by-pass van sediment rond de dam, waardoor de negatieve effecten benedenstrooms afnemen.
2. By-pass van sediment. Onderbreking van het langstransport door aanleg van een strekdam zorgt per definitie voor erosieproblemen benedenstrooms. Een kustdwarse dam verandert immers niets aan het grootschaliger sediment transportpatroon, dat dientengevolge benedenstrooms van de dam weer zal aantrekken en zal zorgen voor erosie. Dit aspect moet bij het ontwerp van de dam integraal worden meegenomen. In principe zijn er twee oplossingsrichtingen. De eerste gaat uit van een optimale morfologische inpassing van de dam in het natuurlijke systeem, waardoor de erosieve zone terecht komt in een gebied dat van nature aanzandend is, of waar erosie acceptabel is omdat het de veiligheid niet bedreigt (bijvoorbeeld in een brede duinenzone). De tweede voorziet in een oplossing door het creëren van voldoende by-pass van sediment. Dit kan zowel op natuurlijke wijze (door aanleg van een korte dam), via de aanleg van een kunstmatige by-pass installatie of door de dam halfdoorlatend uit te voeren zodat lokale sedimentatie wordt gestimuleerd zonder dat het totale transport wordt

geblokkeerd. Een bijkomend voordeel van permeabele constructies is deze veel minder dan dichte constructies het ontstaan van muistromingen bevorderen.

Ten opzichte van de variant 'structureel suppleren' onderscheidt de dam zich door een relatief grote initiële inspanning vanwege de aanleg van een dam plus kustbogen en indien nodig een kunstmatige sediment by-pass. Omgekeerd zullen de benodigde onderhoudsvolumes afnemen. Het onderhoudszand wordt geleidelijk aangebracht, waardoor de impact op het natuurlijke systeem sterk afneemt. Dit heeft een positief effect op de optredende zandverliezen. Een strekdam variant maakt onderhoudssuppleties dus niet overbodig, maar zal naar verwachting wel leiden tot een beter gecontroleerde onderhoudsinspanning wat betreft locatie en frequentie van de suppleties.

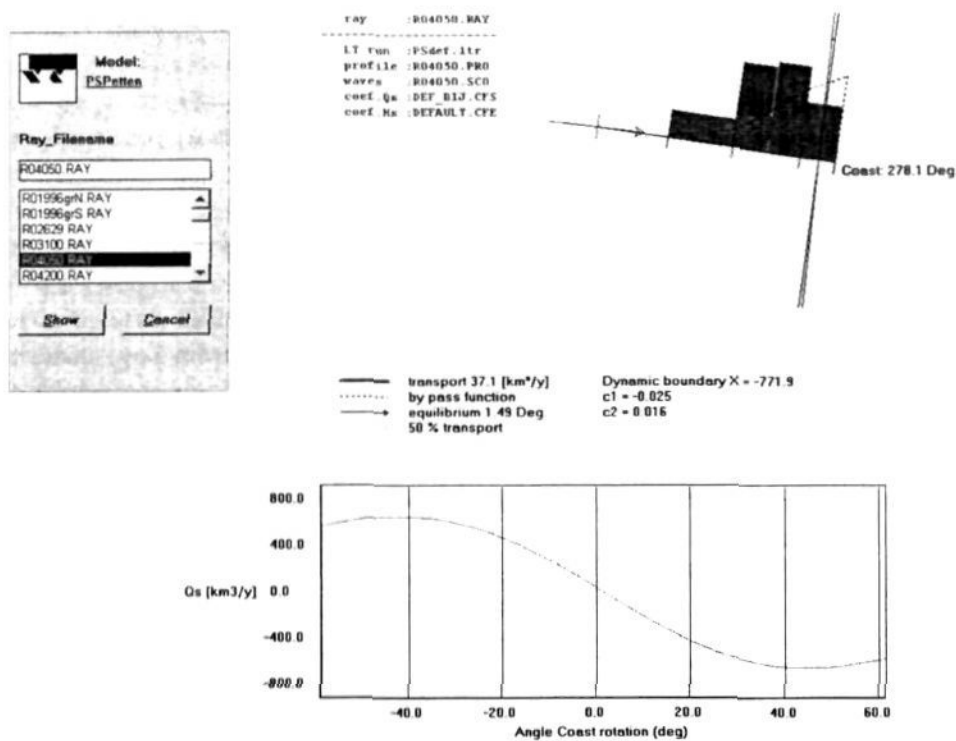
Het ontwerp van de dam (lengte en lokatie) wordt bepaald door (i) volume en kustlangse lengte van de voor de veiligheid benodigde kustuitbouw; deze wordt bepaald aan de hand van duinafslagberekningen, (ii) gewenste by-pass van sediment langs de kop van de dam en (iii) planologische inpassing in het natuurlijke kustsysteem; daartoe worden zones van erosie en aanzanding bepaald uit de berekeningen met het kustlijnmodel. Het is derhalve van belang om inzicht in de verwachte by-pass langs een dam (als functie van de damlengte ten opzichte van de breedte van de brandingszone) en in de vorm van de kustbogen (als functie van de tijd). Deze aspecten worden hieronder besproken.

Natuurlijke by-pass rond een dam

Een belangrijke aspect bij het ontwerp van de lengte van een strekdam is de hoeveelheid zand die moet worden geblokkeerd resp. doorgelaten. Aangezien het kustlangs transport van sediment zich hoofdzakelijk afspeelt in de brandingszone is de lengte van de dam ten opzichte van de breedte van de brandingszone maatgevend. Met behulp van de transportmodule van het Unibest kustlijnmodel is een inschatting gemaakt van het verloop van het transport over het kustdwarse profiel (Figuur 4.1). De resultaten voor verschillende locaties langs de kust van Noord-Holland zijn samengevat in Tabel 4.1. Vanwege het steile kustprofiel vindt bij Den Helder het langstransport plaats in een nauwe zone van ca. 100 tot 200 m uit de kustlijn. Verder naar het zuiden toe verbreedt de transportzone zich tot ca. 400 tot 600 m nabij Egmond.

RSP-km	100%	80%	50%	20%	2%
1.7	183	148	121	89	0
7.9	502.1	252	157	92	0
20.0	457	319	243	108	0
26.3	460	287	191	105	0
31.0	620	435	310	152	0
40.5	582	359	239	125	0

Tabel 4.1: Verdeling van het langstransport over de brandingszone. Percentage van het totale langstransport als functie van de afstand uit de kustlijn, voor verschillende locaties langs de kust van Noord-Holland



Figuur 4.1. Transportraai uit Unibest-LT voor KP 40.5. Het netto transport is laag (37.100 m³/jaar omdat de kustoriëntatie bijna gelijk is aan de evenwichtsoriëntatie (verschilhoek = 1.49 deg). De onderste curve geeft het verband tussen het kustlangse transport en de kustoriëntatie. Voorbeeld: indien de kust over een hoek van 20 graden met de klok mee wordt gedraaid, bedraagt het langstransport circa 500.000 m³/jaar.

Bij deze analyse moet opgemerkt worden dat deze slechts een indicatie bieden van de te verwachten blokkering, en dat de by-passing in werkelijkheid waarschijnlijk groter is. Immers, de onderliggende berekeningen zijn uitgevoerd zonder dam, waardoor het effect van de dam op het lokale stroombeeld niet is meegenomen. In werkelijkheid zullen de transporten in kustdwars richting toenemen en zal zandverlies naar dieper water optreden. Daarnaast kan aan de benedenstroomse zijde van de dam aanzanding rond de kop optreden (vgl. de Eierlandse Gat dam), met als mogelijk gevolg erosie van de kustlijn benedenstrooms. Een dergelijke effect is ook waargenomen op de zuidpunt van Ameland ten tijde van de aanzanding van een grote, krulvormige zandplaat medio jaren 90.

Voor langere strekdammen, die zich tot (ver) buiten de brandingszone uitstrekken, herstelt het langstransport zich pas nadat de kustlijn zover is uitgebouwd, dat de kop van de dam weer in de brandingszone is gelegen. Hiervoor is een zeer groot zandvolume nodig, dat met een natuurlijke aanvoer pas na tientallen jaren of meer is afgezet. Als alternatief voor een eenmalige zeer grootschalige zandsuppletie kan een kunstmatige continue bypass voor zand worden aangelegd. Lange strekdammen hebben het risico dat sediment dat passeert langs de damhoofden niet langer bijdraagt aan het sedimenttransport in de brandingszone stroomafwaarts, maar door dwarstransport verloren gaat naar de diepere vooroever. Streckdammen tot buiten de brandingszone kunnen functioneel zijn indien er andere belangen een rol spelen dan een stabilisatie van de kustlijn alleen (o.a. landaanwinning, toegang tot een haven). De baten hiervan moeten dan worden betrokken bij het afwegingskader.

De vorm van de kustbogen

Een tweede belangrijke ontwerpparameter is de te verwachten vorm van de kustbogen rond de havendammen. Deze bepalen immers langs welke afstand kustlangs de kustveiligheid gegarandeerd kan worden. De opbouw van een kustboog kan worden gesimuleerd met het Unibest-CL kustlijnmodel. Daarnaast bestaan er eenvoudige ontwerpregels die beogen een inschatting te geven van de opbouw van een kustboog. Deze regels zijn gebaseerd op een zeer sterke schematisatie van de complexe werkelijkheid, en daarom maar ten dele geldig. Desalniettemin bieden ze voor de huidige fase van de planstudies een bruikbare eerste orde schatting van de te verwachten ontwikkeling.

Volgens de single line theorie van Pelnard-Considère (zie bv. Van der Velde, 1990) wordt de uitbouw van de kustlijn L ter hoogte van een strekdam als functie van de tijd t gegeven door:

$$L(t) = 2\sqrt{\frac{\phi' S t}{\pi d}} \quad (4.1)$$

In deze formulering is S het langstransport, d de actieve hoogte van het kustprofiel en ϕ' de (kleine) hoek tussen de initiële kustlijn en de evenwichtshoek, d.w.z. de hoek van de kustlijn waarbij het zandtransport nul is. Met deze hoek ϕ' zal de kustlijn bij de kop gaan aanliggen aan de strekdam, waar het zandtransport reduceert tot nul.

De tijd waarna het langstransport weer op gang zal komen doordat de teen van het strandprofiel de kop van de dam bereikt kan worden geschat uit:

$$t = \frac{\pi L^2 d}{4 S \phi'} \quad (4.2)$$

De invloedslengte van de strekdam strekt zich uit over een afstand

$$y = 2.5\sqrt{\pi} \frac{L}{\phi'} \quad (4.3)$$

Voor $\phi' = 0.4$ rad geldt $y \sim 11L$.

Toepassing van deze vuistregels leidt tot het resultaat getoond in Tabel 4.2. De tijd benodigd voor het bereiken van een nieuwe evenwichtskustlijn neemt kwadratisch toe met de lengte van de strekdam. Dit geldt ook voor het benodigde suppletievolume indien deze evenwichtskustlijn reeds bij de aanleg van de strekdam wordt aangebracht.

L (m)	y (km)	t (jaar)	Vol. (Mm ³)
50	0.55	0.098	0.0294
100	1.11	0.39	0.118
200	2.21	1.57	0.471
500	5.54	9.81	2.945
1000	11.1	39.2	11.78
2000	22.1	157.0	47.12

Tabel 4.2: Tijd- en ruimteschalen van de ontwikkeling van de kustboog voor toenemende lengte van de strekdam ($S = 300.000 \text{ m}^3/\text{jaar}$; $d = 6 \text{ m}$; $\phi' = 0.4$).

Belangrijke voordelen van het gebruik van een enkele strekdam zijn de geringe onderhoudsinspanning op langere termijn, de realisatie van een aanzienlijke kustuitbouw die ruimte kan bieden aan de ontwikkeling van nieuwe functies en een optimale controle over het gedrag van het kuststelsel. Nadelen zijn de hogere initiële kosten gerelateerd aan de realisatie van de dam plus kustbogen, het feit dat een erg lange dam nodig is voor het genereren van kustuitbouw langs een langer stuk kust en de afname van de flexibiliteit in de uitvoering van kustbeleid door de aanleg van harde elementen.

4.3 Serie strekdammen inclusief aanleg kustbogen en zand by-pass

Bij wijze van variant op de enkele strekdam is het ook mogelijk een lokale kustuitbouw te realiseren door de aanleg van een serie, meestal wat kortere strekdammen. De werking van een serie strekdammen is in hoge mate analoog aan die van een enkele strekdam. De beschouwingen voor wat betreft belangrijke ontwerpoverwegingen, de blokkade van het langstransport en de opbouw van een kustboog zijn onverkort van kracht. Dit betekent dat ook voor de variant met een serie strekdammen een by-pass van sediment gerealiseerd moet worden, hetzij langs natuurlijke weg of via een kunstmatige installatie.

Het belangrijkste voordeel van de toepassing van een serie strekdammen boven een enkele strekdam is dat een serie de mogelijkheid biedt om de kust te segmenteren. Zo kan ter plaatse van een badplaats de kustlijn met een aantal korte strekdammen over een langere afstand naar voren worden gebracht, terwijl de aangrenzende kustvakken met efficiënte, geleidelijke onderhoudssuppleties op hun plaats worden gehouden. Het realiseren van een dergelijke lange uitbouw middels één enkele strekdam en één enkele strandboog zou de constructie van een zeer lange dam met zich meebrengen.

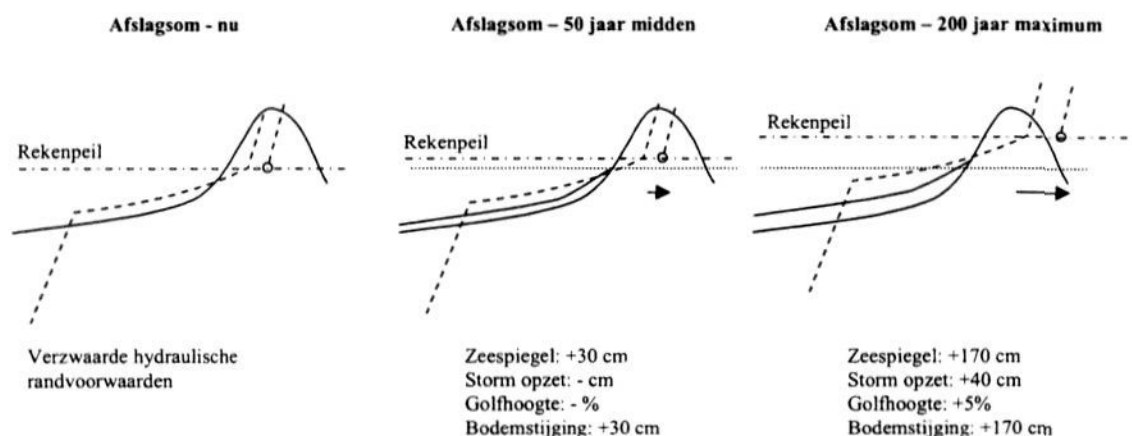
De lengte van de korte dammen wordt bepaald uit de breedte van de brandingszone in relatie tot het gewenste by-pass transport, plus een toeslag voor de breedte de kustuitbouw. Een bekende vuistregel bij het ontwerp van een serie strekdammen is een onderlinge afstand van circa drie keer de damlengte (bv. CERC, 2003, Van Rijn 1998).

4.4 Zeespiegelstijging en zwaardere golfrandvoorwaarden

Veranderende randvoorwaarden als gevolg van klimaatverandering en zeespiegelstijging spelen een belangrijke rol in de discussies omtrent zwakke schakels. Zo ook het effect van de zwaardere hydraulische golfrandvoorwaarden (H_0 s en T_p). De hier genoemde veranderende randvoorwaarden spelen vooral een rol in het ontwerp van de veiligheidsmaatregelen en minder bij het inschatten van kustmorfologische effecten. Het is belangrijk om te realiseren hoe deze elementen een rol spelen in de kustmorfologische analyse.

De kustveiligheid moet gegarandeerd worden onder extreme omstandigheden; in het geval van de Hollandse kust een superstorm met een kans van voorkomen van 10^{-4} . In de beheerdersoordelen is hierbij uitgegaan van verzwaarde golfrandvoorwaarden, gerekend ten opzichte van de randvoorwaarden gegeven in het Hydraulisch Randvoorwaarden boek (Min VenW, 2001). Deze randvoorwaarden zijn gebruikt voor het toetsen van de waterkeringen langs de kust nu.

In de nieuwe Leidraad Zandige Kust (TAW, 2003) zijn klimaatscenario's gegeven die kunnen worden gebruikt om tot randvoorwaarden te komen voor andere ontwerp levensduren. In de planstudies wordt voor het ontwerp van een veilige waterkering gebruik gemaakt van het 50 jaar midden scenario (30 cm zeespiegelstijging en 30 cm bodemophoging). Voor de ruimtereservering wordt gebruik gemaakt van het 200 jaar maximum scenario (170 cm zeespiegelstijging, 40 cm extra stormopzet, 5% toename van de golfhoogte en 170 cm bodemophoging). Wat ondermeer opvalt in deze scenario's is dat de stijging van de zeespiegel wordt gevolgd door de bodem ophoging. Hieraan ten grondslag ligt de veronderstelling dat het beleid van kustlijnhandhaving in de toekomst zal worden doorgezet.



Figuur 4.2. Het effect van zeespiegelstijging op afslagberekningen

Een belangrijk punt in de discussie over klimaatverandering en zeespiegelstijging is dat er in de toekomst steeds meer zand nodig is om de veiligheid te garanderen. Dit is met de bovenbeschreven klimaatscenario's als volgt te begrijpen. Als gevolg van de klimaatscenario's zal de afslag bij maatgevende omstandigheden steeds verder in het duin grijpen. Voor 50 jaar midden is de verschuiving klein. Voor 200 jaar maximum scenario is de verschuiving (potentieel) groot. Dit komt enerzijds door de extra stormopzet waardoor de waterdiepte toeneemt en de toename in de significante golfhoogte. Maar een zeer belangrijke reden voor de toename is ook dat door de tamelijk grote verhoging van het rekenpeil, het afslagvolume hoger in het duin moet worden gezocht. Hoe hoger in het duin, echter, hoe minder zand daar beschikbaar is (zie ook Figuur 4.3). Dit is eenvoudig in te zien als het duin als een driehoek wordt beschouwd. Hoe hoger in de driehoek, hoe minder oppervlak beschikbaar is. Het is deze toename in de klimaatscenario's die ervoor zorgt dat er steeds meer zand voor het garanderen van de veiligheid nodig is.

Voor het vaststellen van het kustgedrag op de langere termijn wordt, in tegenstelling tot de afslagsommen voor de veiligheid, niet gekeken naar de extreme omstandigheden, maar veel meer naar de gemiddelde heersende omstandigheden die representatief zijn voor het gedrag op grote tijd en ruimte schalen. Verzwaarde golfrandvoorwaarden bij zeer incidenteel voorkomende extreme omstandigheden spelen naar verwachting een ondergeschikte rol.

Wanneer bovendien wordt aangenomen dat dankzij het suppletiebeleid de bodem de zeespiegelstijging volgt kan eenvoudig worden ingezien dat het effect van een stijgende zeespiegel door het gemiddelde kustgedrag minder wordt gevoeld. Zeespiegelstijging *kan* echter wél een effect hebben op het kustgedrag. Om een stijgende zeespiegel te kunnen volgen zal bijvoorbeeld de waddenzee naar verwachting meer sediment gaan vragen. Dit sediment zou in ieder geval deels van de Noord Hollandse kust afkomstig kunnen zijn. Het bepalen van een dergelijk effect valt echter ruim buiten de scope van deze studie.

Voor de kustmorfologische beschouwingen in dit rapport, wordt het effect van klimaatscenario's dus vooral gevoeld in het ontwerp van de maatregelen. In de modellering heeft het geen zin om zeespiegelstijging en een gelijke bodemophoging in het model te verwerken. Bij de interpretatie van de resultaten zou het belangrijk kunnen zijn om de onzekerheden in de klimaatveranderingen te bespreken. Wanneer door klimaatveranderingen bijvoorbeeld het nu heersende windklimaat (overwegend wind vanuit het zuidwesten) drastisch wijzigt, kan het kustgedrag wel degelijk sterk worden beïnvloed. Omdat dit nu koffiedik kijken is wordt in deze studie op dat aspect niet ingegaan.

5 Vraag 1: De effectiviteit van zandige maatregelen

Zoals gesteld in Paragraaf 4.1 is het mogelijk om met uitsluitend zandige maatregelen de veiligheid langs een zwakke schakel te garanderen. Voordeel van deze aanpak is het behoud van natuurlijkheid van het kuststelsel en een hoge mate van flexibiliteit bij de uitvoering van het kustbeleid. Daarnaast zijn de initiële aanlegkosten laag en is er sprake van uitgestelde onderhoudskosten, wat zou kunnen leiden tot een gunstig financieel plaatje op de lange termijn.

Bij het ontwerp van het zandige ingreep spelen twee aspecten een rol, nl. (i) de omvang van het initiële zandvolume dat nodig is om direct na aanleg de veiligheid te garanderen en (ii) het onderhoudsvolume dat nodig is om gedurende de ontwerperperiode van de uitbouw de veiligheid te garanderen.

Ter bepaling van het initieel benodigde zandvolume voor de versteking van duinen worden duinafslagsommen gemaakt. Er is voor de benodigde duinversterkingen hier gerekend met het 50 jaar midden scenario uit de Leidraad Zandige Kust (TAW, 2003). Om de effecten van zwaardere golfbrandvoorwaarden te kunnen meenemen is de methode zoals gebruikt in de beheerdersoordelen 2003 gehanteerd. De verwachte extra afslag door de grotere piekperiode van de golven wordt in de berekeningen verwerkt door de korrel diameter aan te passen zodanig dat een bepaalde hoeveelheid extra afslag wordt verkregen, in dit geval 50%.

Voor wat betreft de benodigde zandhoeveelheid voor golfreductie voor de Hondsbossche en Pettemer Zeewering is in overleg met de opdrachtgever de zandhoeveelheid aangehouden zoals die door Alkyon (2004) is afgeschat. Het is belangrijk om te realiseren dat het hier gaat om de zandhoeveelheid die nodig is om de dijken nu veilig te maken, en dus niet voor over 50 jaar.

Ter bepaling van het reguliere onderhoudsvolume wordt gebruik gemaakt van de effectiviteitsfactoren zoals afgeleid uit ontwikkeling van de MKL over de periode 1990-2003 en de zandsuppleties over deze periode (Paragraaf 2.2). De factoren zijn dus gedefinieerd als percentage van het suppletievolume dat effectief bijdraagt aan het zandvolume in de MKL zone. Binnen de huidige studie spelen afslagberekeningen voor verschillende klimaatscenario's een belangrijke rol. Deze berekeningen zijn gebaseerd op het zandvolume in het duin en in de brandingszone, waarbij over het algemeen de diepe begrenzing van de MKL zone niet wordt onderschreden. Met andere woorden, de gebruikte definitie voor de effectiviteitsfactoren is goed toepasbaar in de context van de afslagberekeningen en handhaving van de basiskustlijn, welke beide een belangrijke rol spelen in deze studie. Desalniettemin zijn er beperkingen:

- De factoren zijn afgeleid op basis van een jaargemiddelde analyse van reguliere suppleties. Ze zullen dan ook worden gebruikt voor de schatting van het jaarlijkse onderhoudsvolume in geval van een zandige uitbouw voor de kust. Het is nog onvoldoende bekend of de aanname van een vast verliespercentage van het

uitbouwvolume ook opgaat voor een mega-suppletie van de kust. Een dergelijke suppletie zou voorzien in de zandbuffer die nodig om de veiligheid te garanderen voor de ontwerperperiode van de uitbouw in geval van een meerjaren onderhoudsstrategie. Zo'n strategie houdt in dat één keer per vier of vijf jaar een onderhoudsvolume zand in het systeem wordt gebracht. Het is om deze reden dat de huidige set factoren nog niet is toegepast voor het ontwerp van een meerjaren onderhoudsstrategie.

- In geval van een alternatieve beleidsdoelstelling is het mogelijk dat de gepresenteerde factoren niet rechtstreeks toepasbaar zijn voor het ontwerp van een zandige ingreep. Zo zal in geval van het versterken van het fundament van de Pettemer Zeewering de geul voor de constructie worden opgevuld. Dit zand komt terecht buiten de MKL zone en is de volgens de gekozen definitie niet effectief. Gegeven de suppletie doelstelling ter plaatse is het dat natuurlijk wel. Aangezien het zand dat door dwarsprocessen verloren gaat uit de MKL zone alsnog terecht komt in de gewenste zone en de heersende morfodynamiek in deze diepe zone bovendien geringer is dan in de MKL zone wordt voor deze specifieke situatie gesuggereerd om gebruik te maken van de effectiviteitsfactoren zoals afgeleid voor strandsuppleties (conservatieve benadering).

Voor zandige ingrepen gericht op de handhaving van de kustlijn of de afslaglijn wordt in het vervolg van deze studie in beginsel gebruik gemaakt van de verliespercentages zoals afgeleid voor het kustvak Bergen-Egmond. Binnen dit kustvak is immers in de huidige situatie al sprake van een bolwerkvorming. Wanneer de lokale situatie daarom vraagt (bv. vanwege de aanwezigheid van een geul nabij de kust) wordt gebruik gemaakt van conservatievere, lokale percentages.

6 Vraag 2 – 4: Verkenning oplossingsvarianten Noord-Holland

Dit hoofdstuk behandelt een globale verkenning van een optimalisatieslag over de zand ervoor varianten voor de Kop van Noord-Holland en de Hondsbossche en Pettemer zeekering. Achtereenvolgens komen veiligheidsmaatregelen aan bod voor Huisduinen, Callantsog en voor de Hondsbossche en Pettemer Zeewering.

6.1 Huisduinen

In eerdere fases van de Kustvisie is voor de kop Noord-Holland regelmatig gesproken over een dam bij Huisduinen. In deze paragraaf worden de voors en tegens van een dergelijke maatregel kort besproken.

De lengte van een enkelvoudige strekdam in het uiterste noorden van de Hollandse kust wordt beperkt door de aanwezigheid van een getijgeul (Nieuwe Schulpengat) op circa 200 m onder de kust. Deze situatie is analoog aan de Kop van Walcheren tussen Vlissingen en Westkapelle, waar het Oostgat direct aanligt aan de kust. Ook hier vindt kustverdediging plaats door middel van strekdammen met een beperkte lengte.

Zoals aangegeven is het kustlijnmodel niet geschikt voor een gedetailleerde bestudering van de complexe processen rond de interactie van een getijgeul met de kust. Daarom wordt deze locatie beoordeeld aan de hand van een aantal kustwaterbouwkundige vuistregels (o.a. Van Rijn; 1998, CEM, 2003; Van der Velden, 1990).

Door golfafscherming rond de strekdam neemt het zandtransport in de brandingszone lokaal sterk af. Op deze locatie bedraagt het netto jaartransport circa 350.000 tot 400.000 m³/jaar in noordelijke richting. Het kuststabiliserende effect van de strekdam laat zich derhalve met name in de zuidelijke richting voelen, waar de kust zich geleidelijk zal gaan uitbouwen door de zandblokkade van de strekdam. Als gevolg hiervan zal zonder verdere maatregelen ten noorden van de strekdam erosie optreden. Deze erosie treedt niet op direct ten noorden van de strekdam, waar de kust in de luwte ligt van deze dam, maar enkele damlengtes noordelijker.

Indien een strekdam wordt aangelegd tot in de stroomgeul, zal deze robuust moeten worden uitgevoerd met bodembescherming aan de kop, om uitschuring van zand en daarmee de ondermijning van de fundering te voorkomen. Hierdoor is deze optie kostbaar. Vanuit het oogpunt van kustveiligheid is een zeewaartse uitbouw op deze locatie bovendien niet noodzakelijk. In een recente quickscan wordt de Helderse zeekering niet langer aangemerkt als zwakke schakel. Bovendien zijn er geen acute problemen met de aansluiting aldaar. Wanneer de landwaartse migratie van het Nieuwe Schulpengat als voornaamste veiligheidsrisico wordt aangemerkt verdient handhaving en indien noodzakelijk versterking van de huidige, korte strekdammen de voorkeur.

6.2 Callantsoog

Bij Callantsoog geldt dat de duinenrij achter het strand zo smal is, dat de benodigde afslagzone voor de ontwerpconditie (extreme storm) de duinbreedte voor enkele raaien overschrijdt.

6.2.1 Oplossingsvariant met alleen zand

Eén van de opties ter verhoging van de veiligheid is om het zandvolume in het dwarsprofiel in voldoende mate te laten toenemen om de duinwaterkering wel aan het ontwerp criterium te laten voldoen. Een dergelijke maatregel heeft tegelijk ook een zeewaartse verschuiving van de MKL tot gevolg (zie Hoofdstuk 1). Een ruwe analyse van een aantal onveilige raaien (met een ontwerp levensduur van 50 jaar), laat zien dat met een zeewaartse MKL-verplaatsing van circa 50 m de bekeken onveilige raaien aan het veiligheids criterium voldoen. Hiermee is een gemiddelde hoeveelheid zand gemoeid van 0.67 Mm^3 tussen km 11.2 en 13.6, ofwel 0.28 Mm^3 per strekkende km. Uitgaande van een suppletie-efficiëncy van 64% (zie Hoofdstuk 2, effectiviteit strandsuppletie) bedraagt het benodigde onderhoud in het geval van jaarlijks suppleren zonder aanvullende maatregelen $101 \text{ m}^3/\text{m}/\text{jaar}$ ofwel $0.40 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ over een lengte van 4 km.

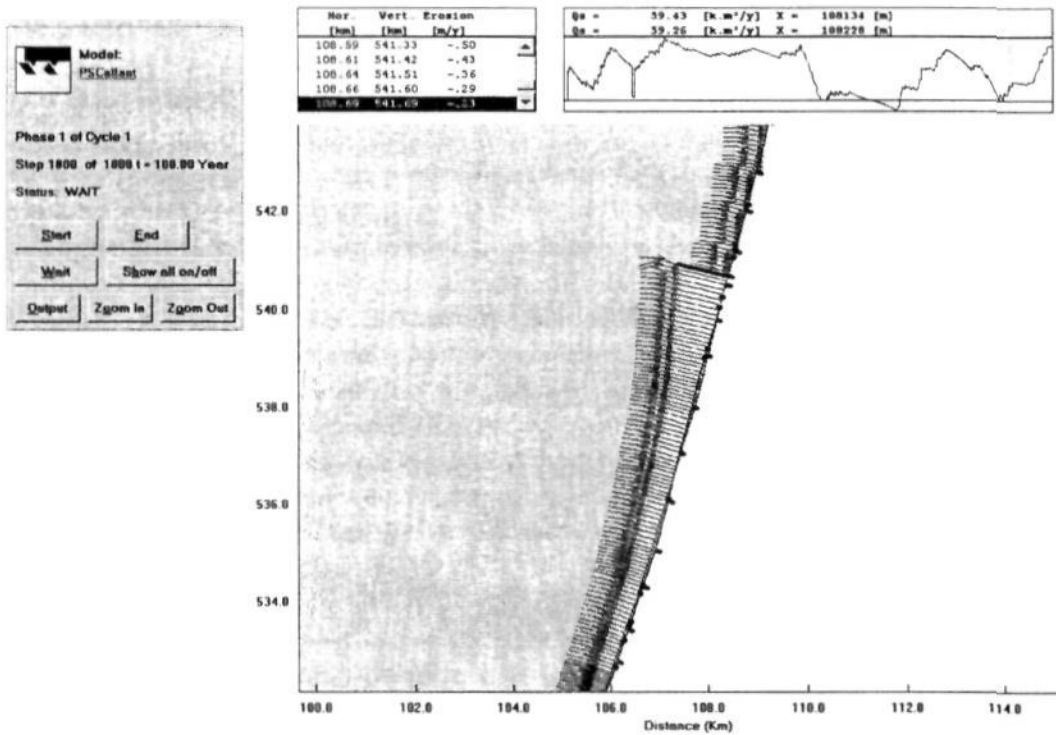
Gegeven het geschatte zandverlies van 36% per jaar is het noodzakelijk om de suppletie jaarlijks uit te voeren. Immers, indien een hoeveelheid zand moet worden aangebracht die voor vijf jaar toereikend is, bedraagt het benodigde zandvolume 6.2 Mm^3 , $6.2 \times 0.64^5 = 0.67 \text{ Mm}^3$. Dit verlies ($(6.2 - 0.67) / 5 = 1.1 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$) is overigens onrealistisch hoog, omdat het zandtransport wordt beperkt door de transportcapaciteit van de stroming. Op basis van alleen de langtransportgradiënt is het geschatte verlies over 4 km maximaal circa $0.1 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$. Een verlies door dwarstransport van $1 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ ($250 \text{ m}^3/\text{m}/\text{jaar}$) wordt als niet erg realistisch beschouwd, tenzij na suppletie het kustdwarse profiel zeer sterk afwijkt van het evenwichtsprofiel.

In de volgende paragrafen wordt het effect van één of meerdere strekdammen op het kustonderhoud in kaart gebracht. Opgemerkt wordt dat de kustlijnontwikkeling rond de strekdam is afgeleid uit verkennende berekeningen met Unibest en enkele vuistregels uit de kustwaterbouwkunde. De lokale kustlijnontwikkeling wordt in sterke mate bepaald door de afscherpende werking van de strekdam op het golfklimaat. Voor een nauwkeurige voorspelling van de kustlijnontwikkeling rond de strekdam is een detailmodel nodig van golfvoortplanting en sedimenttransport. Dergelijke berekeningen zijn in een later stadium noodzakelijk wanneer een nauwkeurig ontwerp gewenst is.

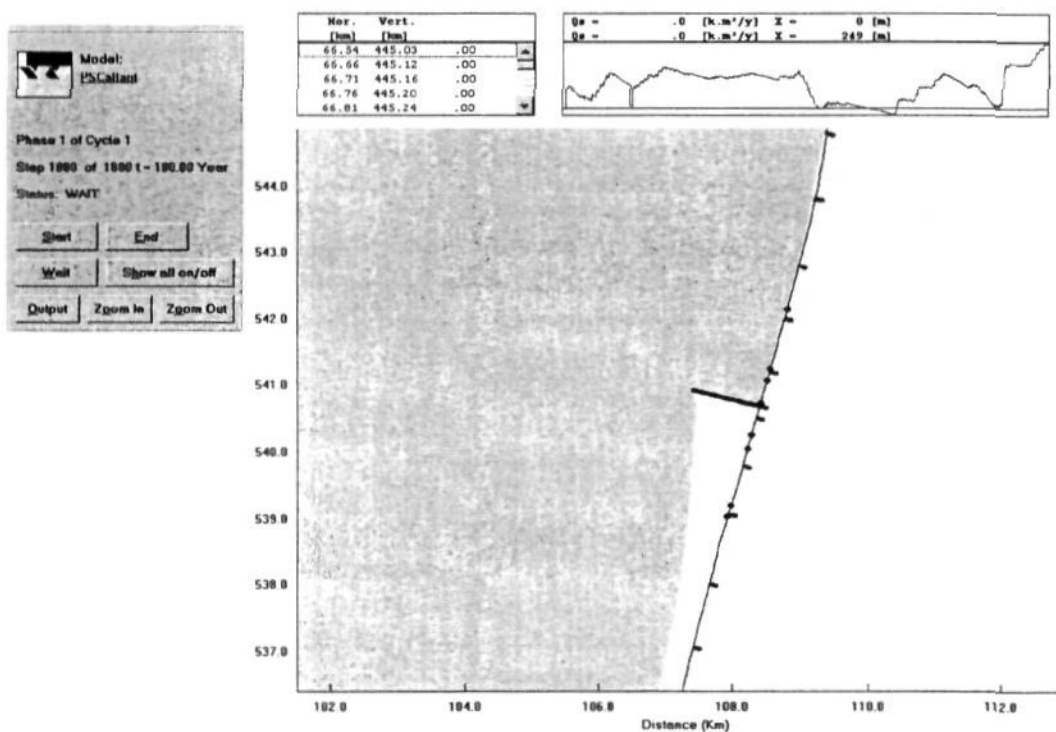
6.2.2 Optimalisatie met één strekdam

Eén strekdam met een lengte van 1000 tot 1500 m is naar verwachting voldoende om de kust over een lengte van 4 km in zeewaartse richting te verplaatsen. Het hierbij benodigde suppletievolume is eenmalig 10 tot 20 Mm^3 . Verder is het noodzakelijk om een installatie voor de bypass van sediment aan te leggen, omdat anders het langtransport te veel onderbroken wordt, zelfs op lange tijdschaal (zie Figuur 6.1). Dit wordt veroorzaakt door de veranderde oriëntatie van de kustlijn ter hoogte van de strekdam. Figuur 6.2 toont dat een suppletie van $0.2 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ juist voldoende is om erosie ten noorden van de strekdam te

voorkomen. Rekening houdend met een effectiviteitspercentage van 90% is dit bijna een factor twee minder dan voor de variant met zandsuppletie alleen. Hier tegenover staan, echter, aanzienlijke investerings- en onderhoudskosten voor de strekdam.



Figuur 6.1: Stredam met 1 km bij Callantsoog (km 11.4). Langtransport onderbroken, bypass noodzakelijk (niet in berekening).



Figuur 6.2: Stredam met 1 km bij Callantsoog (km 11.4). Suppletie langtransport 200.000 m³/jaar.

Merk op dat bovenstaande figuren een eenzijdige uitbouw van de kustboog laten zien. Dit is verklaarbaar vanuit het feit dat voor deze eerste orde benadering het golfklimaat rond de dam nog niet is aangepast voor gedetailleerde afschermingseffecten. In werkelijkheid zal er – evenals rond bestaande havendammen – sprake zijn van de opbouw van een kustboog aan weerszijden van de strekdam.

6.2.3 Optimalisatie met een serie strekdammen

Naast optimalisatie met één lange dam is het ook mogelijk met meerdere, kortere strekdammen te werken. De minimale lengte van de korte dammen kan worden bepaald uit de breedte van de brandingszone plus een toeslag van 50 m voor de voor veiligheid benodigde minimale kustuitbouw. De breedte van de brandingszone wordt niet volledig benut om het langtransport niet volledig te blokkeren. De onderlinge afstand van de strekdammen bedraagt circa 3 damlengtes (ontwerp vuistregel). In verband met de bypassing van sediment worden halfdoorlatende strekdammen aanbevolen. Voor Callantsoog kan volgens deze redenering worden gewerkt met strekdammen met een lengte van circa 150 tot 200 m. De voor een effectieve werking benodigde onderlinge afstand bedraagt circa 450 tot 600 m (ruwweg drie damlengtes). Om een afstand van 4 kilometer te kunnen overbruggen zijn in een dergelijke opzet dus 7 à 9 strekdammen nodig.

De totale lengte van de strekdammen bedraagt zo'n 1400 m; met een benodigde initiële suppletievolumen van $(2/\pi) \times 7 \times 0.5 \text{ Mm}^3 = 2.2 \text{ Mm}^3$. Na deze initiële suppletie is de verwachting dat ter hoogte van Callantsoog weinig onderhoudssuppletie meer nodig is. Ten noorden van Callantsoog zal de suppletiebehoefte toenemen indien kustlijnachteruitgang moet worden gecompenseerd. Deze toename zal aanmerkelijk minder sterk zijn dan voor de lange strekdam omdat het langtransport slechts in beperkte mate wordt geblokkeerd. Op basis van Unibest-berekeningen wordt geschat dat de benodigde suppletiehoeveelheid om het langtransport ten noorden van de strekdammen te herstellen (bypass) circa 90.000 m^3/jaar bedraagt.

Voor een geleidelijke overgang naar het kustvak ten noorden van Callantsoog wordt aanbevolen om de laatste paar strekdammen wat korter uit te voeren met een kleinere onderlinge afstand.

6.2.4 Vergelijking varianten

De bovengenoemde getallen, voor de verschillende varianten kunnen als volgt worden samengevat:

Omschrijving	alleen suppletie	lange dam	korte dammen
Aantal dammen	-	1	7 – 9
Lengte per dam	-	1000 – 1500	150 – 200
Totale damlengte (m)	-	1000 – 1500	1400
Investerings- en onderhoudskosten dammen	-	ja	ja
Initiële suppleties (Mm^3)	1.1	10 – 20	2.2
Onderhoudssuppleties over 50 jaar (Mm^3)	20	11.1	4.5

Tabel 6.1: Afweging van varianten voor Callantsoog.

Afhankelijk van de kosten voor damaanleg en –onderhoud en suppletiekosten komt de variant korte dammen of alleen suppletie als gunstigste uit de bus. De variant lange dam is mogelijk alleen aantrekkelijk indien andere aspecten dan hier beschouwd (bijvoorbeeld landaanwinning met een zekere economische waarde) bij de analyse worden betrokken. Het is overigens ook mogelijk om een tussenoplossing te kiezen. In dat geval wordt de lengte per dam en de afstand tussen de dammen groter. De benodigde initiële suppleties worden ook groter, terwijl de onderhoudsbesparing afneemt. Waar het optimum ligt hangt sterk af van andere belangen.

6.3 Hondsbossche en Pettemer zeewering

Het probleem met de Hondsbossche en Pettemer zeewering is dat de golfaanval bij ontwerpcondities te sterk is in verhouding tot de hoogte en sterkte van de constructie. Een mogelijkheid om dit veiligheidsprobleem te ondervangen is om de vooroever te verondiepen, waardoor meer golfbreking optreedt. De significante golfhoogte aan de voet van de zeewering wordt hierdoor lager.

6.3.1 Oplossingsvariant met alleen zand

Volgens een berekening van Alkyon (2004) is voor golfreductie een suppletie noodzakelijk van $1000 \text{ m}^3/\text{m}$ langs de Pettemer zeewering (lengte 1.5 km) en $1600 \text{ m}^3/\text{m}$ langs de Hondsbossche zeewering (lengte 4.5 km). Dit is equivalent met een zeewaartse verplaatsing van de MKL van 125 – 200 m. Langs de gehele zeewering met een lengte van circa 6 km betekent dat een totaal suppletievolume van 8.7 Mm^3 . Met een effectiviteit van 48% (pessimistische schatting) zou dit leiden tot een onderhoudsbehoefte van $4.5 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ (oftewel $750 \text{ m}^3/\text{m}/\text{jaar}$) voor de variant suppletie. Gegeven (i) de beschikbare transportcapaciteit in kustdwarse en kustlangse richting (totaal orde $25\text{-}50 \text{ m}^3/\text{m}/\text{jaar}$, zie hieronder), (ii) de beschikbare suppletiegegevens in sterk erosieve gebieden (maximaal orde $25\text{-}75 \text{ m}^3/\text{m}/\text{jaar}$ voor onderhoud, zie Hoofdstuk 2) en (iii) de onrealistische vorm en uitbouw van het kustprofiel die verkregen wordt indien *structureel* $750 \text{ m}^3/\text{m}/\text{jaar}$ wordt aangebracht is duidelijk dat een onderhoudsvolume van $750 \text{ m}^3/\text{m}/\text{jaar}$ niet realistisch is. Dit bevestigt onze eerder waarneming dat de effectiviteitsfactoren niet kunnen worden toegepast als percentage van een grootschalige kustuitbouw.

Om een intuïtief realistischer beeld te krijgen van de verliezen bij grootschalige kustuitbouw wordt een extra interpretatieslag uitgevoerd over de kustlijnveranderingen en suppletievolumes in het kustvak Egmond-Bergen over de periode 1990-2003. Vanwege de zeewaartse verschuiving van de MKL lijn staat dit kustvak model voor de situatie met 'kustuitbouw'. In dit 8 km lange kustvak is over genoemde periode een zandvolume van $0.46 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ (oftewel $58 \text{ m}^3/\text{m}/\text{jaar}$) aangebracht (Tabel 2.4). Hiervan is $0.14 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ ($18 \text{ m}^3/\text{m}/\text{jaar}$) ten goede gekomen aan een zeewaartse uitbouw van de kustlijn en is $0.125 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ ($16 \text{ m}^3/\text{m}/\text{jaar}$) gebruikt ter compensatie van zandverliezen in kustlangse richting. Het restant ($24 \text{ m}^3/\text{m}/\text{jaar}$) is verloren gegaan door aeolisch transport in landwaartse richting en zandverliezen naar dieper water.

Deze getallen bieden een bruikbare richtlijn voor de schatting van de verschillende componenten die bijdragen aan het zandverlies van een kustuitbouw voor Petten:

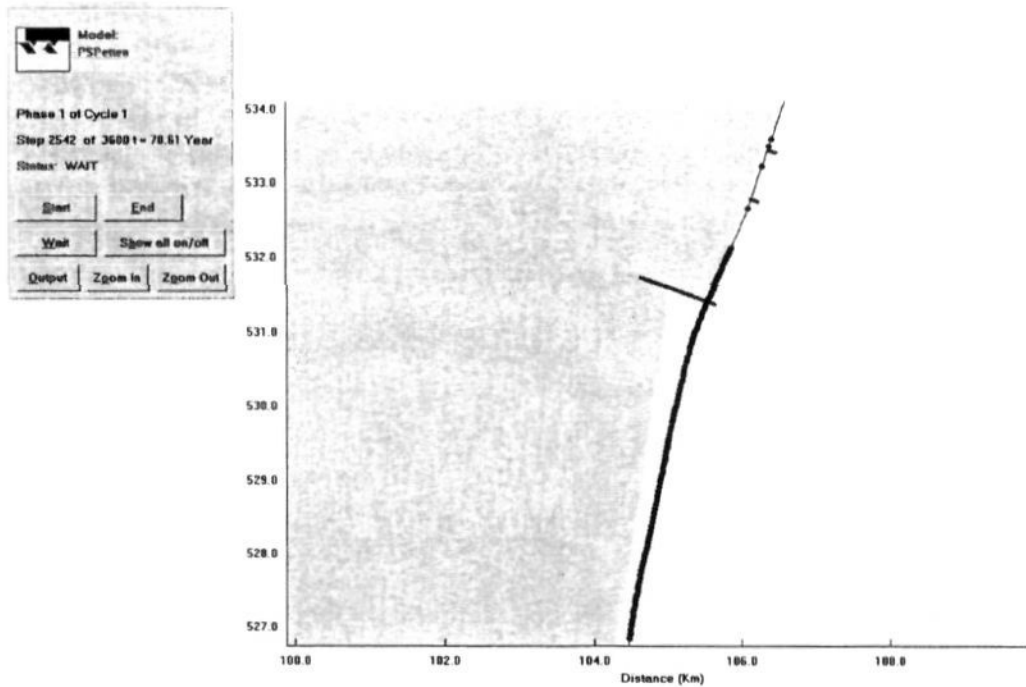
- *Landwaarts gericht aeolisch transport:* 30 m³/m/jaar. Aeolisch transport berekeningen gebaseerd op de Baillard transport formule en met een volledig windklimaat laten een netto landwaarts zien in de orde van 30 m³/m/jaar. Deze berekeningen zijn geldig voor een open zandvlakte, zoals de Vliehors bij Vlieland of de hier beoogde kustuitbouw. Aeolische verliezen over de kruin van de kering zouden overigens kunnen worden beperkt met vegetatie of door bijvoorbeeld voor de kering een duin aan te leggen.
- *Verlies kustlangs:* 10 m³/m/jaar. Tussen RSP km 0 en RSP km 40 bedraagt de toename van het netto kustlangs transport ca. 400.000 m³/jaar. Dit correspondeert met een gemiddeld verlies van 10 m³/m/jaar. Ter plaatse van de Pettemer Zeewering is de gradiënt naar verwachting iets lager dan gemiddeld, anderzijds zal de door de grootschalige uitbouw extra dynamiek worden geïnitieerd met als gevolg grotere verliezen. Derhalve gaan we hier uit van 10 m³/m/jaar.
- *Verlies zeewaarts:* 20 m³/m/jaar. De initiële uitbouw volgens Alkyon (2004) kent een steil aanlegprofiel van 1:25. Als gevolg van stroming en golven zal deze afvlakken in de richting van een evenwichtsprofiel, waardoor zand getransporteerd wordt naar dieper water. De grootte van dit volume is ruwweg geschat uit het totale volume dat nodig is om het kustprofiel van RSP raai 2500 voor het jaar 2003 onder 1:50 op te vullen vanaf de uitbouw tot de zandbank op 500 m uit de kust. Dit volume bedraagt ca. 750 m³/m. Rekening houdend met netto verliezen kustdwars schatten we het totaal benodigde volume op 1000 m³/m over 50 jaar, oftewel 20 m³/m/jaar.

Voor nu wordt op basis van bovenstaande expert judgement een jaarlijks te hanteren verlies van 60 m³/m/jaar aangenomen, oftewel 0.36 Mm³/jaar voor gehele combinatie Hondsbossche en Pettemer zeewering. Gegeven de dynamiek die in het kustgebied heerst, herbergt een veiligheidsoplossing met zand een aantal grote onzekerheden in zich. Naast de optredende verliezen laat met name de morfologie van zowel de onderwateroever als het droge strand zich zeer moeilijk voorspellen. Daarmee is dus ook de effectiviteit van dergelijke maatregelen op de golfoploop en de daarmee de veiligheid hoogst onzeker. Dit geldt overigens ook voor de oplossing met strekdammen (zie volgende paragrafen).

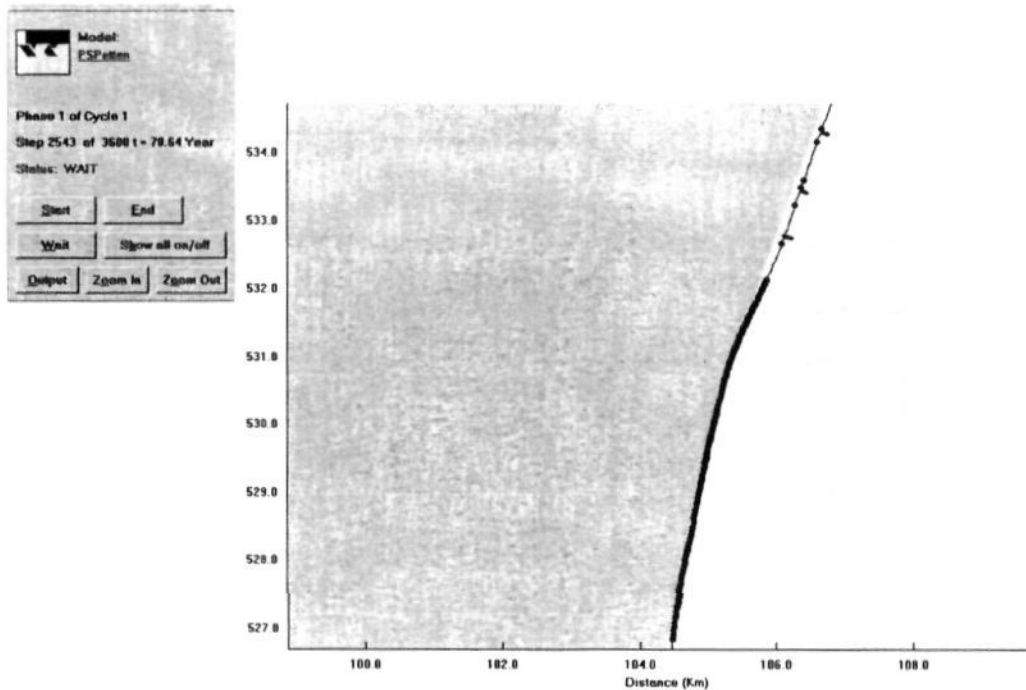
6.3.2 Optimalisatie met één strekdam

Uit verkennende berekeningen met Unibest en aanvullende analyse volgt dat een enkele strekdam met een lengte van 1 km ter hoogte van KP 21.2 voldoende is om een kustlijnvoortgang van tenminste 150 m ten zuiden van de strekdam te handhaven (zie Figuur 6.3). Deze strekdam is voldoende dicht bij de noordelijke overgang tussen Pettemer zeewering en duinenrij gelegen (1 km) om deze zwakke overgang de laten profiteren van de afscherpende werking van de strekdam (niet verwerkt in de Unibest-berekeningen afgezien van afscherming binnen ca. 300 m). Om erosie ten noorden van de Pettemer zeewering te voorkomen is een bypass volume van circa 150.000 m³/jaar nodig.

De effectiviteit van de strekdam wordt mede bepaald door het suppletievolume ten zuiden van de Hondsbossche zeewering. Indien het in de periode 1990 – 2003 toegepaste suppletievolume ook wordt toegepast in de eerstvolgende 50 jaar (in Figuur 6.3 wordt de kustlijn na 70 jaar getoond), blijkt hier een surplus aan zand te accumuleren. Dit zand voedt de kustuitbouw voor de zeewering. In het geval zonder strekdam (zie Figuur 6.4) wordt dit zand verder noordwaarts getransporteerd.



Figuur 6.3: Strekdam van 1 km bij Petten (km 21.2). Suppletie langstransport 150.000 m³/jaar.



Figuur 6.4: Berekening zonder strekdam. Geen suppletie langstransport. Verder identiek aan berekening Figuur 6.3.

Indien het kustvak ten zuiden van de zeewering in de toekomst minder zou worden gesuppleerd, heeft dit negatieve consequenties voor de kustuitbouw voor de zeewering. Een langere dam en meer suppletie ter hoogte van de zeewering zijn dan mogelijk noodzakelijk.

6.3.3 Optimalisatie met een serie strekdammen

Voor een veilige zeewering moet de MKL 125 – 200 m in zeevaartse richting opschuiven. Dit kan worden gerealiseerd met strekdammen van 250 – 300 m, die na kustuitbouw nog zo'n 100 m uitsteken in de brandingszone. De onderlinge afstand bedraagt 750 tot 900 m. Hieruit volgt dat over een afstand van 6 km zo'n 7 à 8 strekdammen nodig zijn.

Het benodigde initiële suppletievolume voor het aanleggen van de kustbogen bedraagt $(2/\pi) \times 7 \times 1.0 \text{ Mm}^3 = 4.7 \text{ Mm}^3$. Dit is minder dan het zandvolume nodig voor kustveiligheid, dus het is noodzakelijk om door te suppleren tot een zandvolume van 8.7 Mm^3 . Na deze initiële suppletie is de verwachting dat ter hoogte van de zeewering weinig onderhoudssuppletie meer nodig is. Doordat het langtransport gedeeltelijk wordt geblokkeerd (maar minder dan voor de variant van de lange strekdam), is ten noorden van de zeewering een extra onderhoud nodig van circa $100.000 \text{ m}^3/\text{jaar}$.

Voor een geleidelijke overgang naar het kustvak ten noorden van Petten wordt aanbevolen om de laatste paar strekdammen wat korter uit te voeren met een kleinere onderlinge afstand.

6.3.4 Vergelijking varianten

De bovengenoemde getallen, voor de verschillende varianten kunnen als volgt worden samengevat:

Omschrijving	alleen suppletie	lange dam	korte dammen
Aantal dammen	-	1	7 – 8
Lengte per dam	-	1000 – 1500	250 – 300
Totale damlengte (m)	-	1000 – 1500	2000
Investerings- en onderhoudskosten dammen	-	ja	ja
Initiële suppleties (Mm^3)	10.4	20	8.1
Onderhoudssuppleties over 50 jaar (Mm^3)	18	8.3	5.6

Tabel 6.2: Afweging van varianten voor Petten.

De variant van de korte strekdammen lijkt op de huidige wijze van kustverdediging. Bestaande strandhoofden kunnen blijven gehandhaafd en waar nodig verlengd. Het zandpakket heeft voor de veiligheidsfunctie ook een bepaalde hoogte nodig. Dit zal invloed hebben op de hoogte van de strekdammen en daarmee ook op de kosten. De variant van de lange strekdam maakt de bestaande strandhoofden binnen het invloedsgebied van de strekdam overbodig. Deze kunnen worden verwijderd of aan zichzelf worden overgelaten. Ze zullen dan geleidelijk onder het zand verdwijnen.

Net als de beschouwing bij Callantsoog is ook hier de keuze tussen één lange en meerdere korte strekdammen afhankelijk van een bredere belangenafweging. Het plan voor een marina bij Petten, bijvoorbeeld, heeft in verband met bevaarbaarheid mogelijk belang bij niet al te korte dammen. Bovendien is om voldoende ruimte te creëren voor de bijbehorende ontwikkelingsplannen het creëren van voldoende bebouwbare grond van belang. Het creëren van deze ruimte door langere (en daardoor minder) dammen te gebruiken gaat wel gedeeltelijk ten koste van de onderhoudsbesparing.

7 Vraag 5: Duinen van Leihoek

Allereerst zijn afslagsommen gemaakt op enkele raaien ten noorden en te zuiden van de aansluitingen van de Hondsbossche en Pettemer zeerwering met het duingebied. Vervolgens zijn uit die sommen de meest geschikte grensprofielen gekozen om de Duinen van Leihoek op te laten aansluiten. Voornaamste criterium hierbij is de aanwezigheid van een stevige duinregel. Zowel ten noorden als ten zuiden is namelijk sprake van meerdere duinregels. Met name ten Noorden van Petten is het vinden van een stevige duinregel niet zo eenvoudig. De duinen zijn hier tamelijk laag (10 tot 15 meter). Het meest veelbelovend zijn de raaien 2023 en 2654. Bij het prototype duin dat voor de duinen van Leihoek is ontworpen ligt het afslagpunt (voor nu en voor 50 jaar (1 m verschil)) ongeveer in het midden van het duinmassief. De positie van de Duinen van Leihoek is vervolgens bepaald door tussen de berekende afslagpunten van raai 2023 en 2654 een rechte lijn te trekken en het Duinen van Leihoek massief zodanig te plaatsen dat het midden op die lijn ligt.

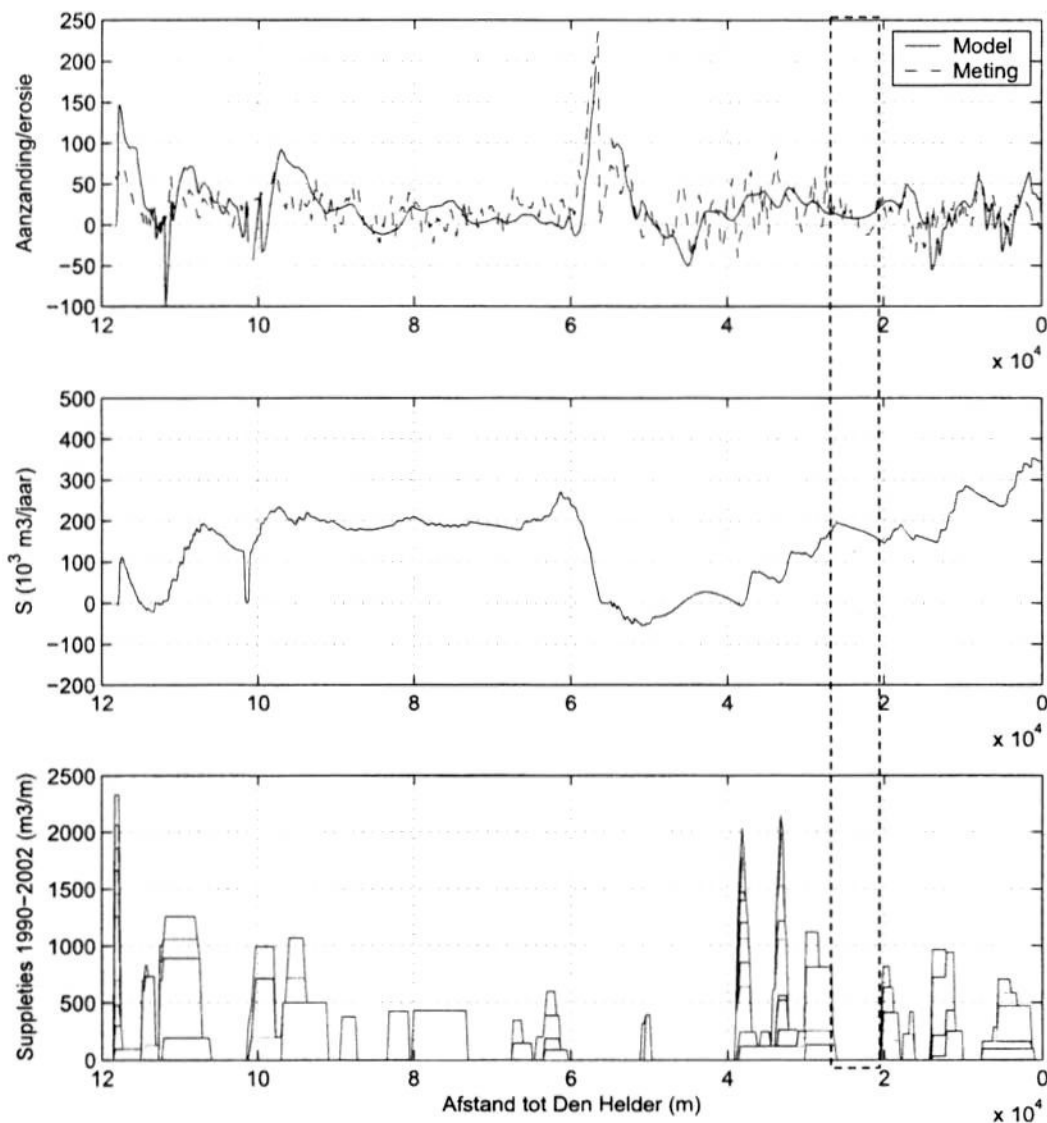
Belangrijke vraag voor deze basisvariant is welke besparingen mogen worden verwacht ten opzichte van de huidige situatie. De vraag is ten opzichte waarvan dit moet worden vergeleken. Ten opzichte van de huidige situatie is eigenlijk niet echt een besparing te verwachten. Er wordt nu namelijk niet gesuppleerd voor de H-P zeewering al hoewel er in de planstudies natuurlijk wel over dergelijke maatregelen wordt nagedacht. Een directe winst is bijvoorbeeld wel dat er minder of geen onderhoud aan de aansluitingen meer nodig is en dat ook de andere voor de veiligheid benodigde maatregelen niet hoeven te worden uitgevoerd. Belangrijkste voordeel is natuurlijk de verwijdering van de onnatuurlijke bastionvorm. Wanneer dit profiel verflauwing tot gevolg heeft kan dit een belangrijke besparing betekenen in de onderhoudskosten ten noorden van de H-P zeewering.

Om te bepalen welke onderhoudsbesparing met de Duinen van Leihoek variant zou kunnen worden gerealiseerd zijn enkele gevoeligheidssommen gemaakt. In deze gevoeligheidssommen is het harde bastion van de Hondsbossche en Pettemer zeewering verwijderd waarna een nieuwe tamelijk gladde kustlijn hiervoor in de plaats is gebracht die de oorspronkelijke bastionvorm enigszins afsnijdt. Om een gevoel te krijgen van de mogelijke onderhoudsbesparing zijn twee verschillende typen sommen gemaakt. Enerzijds is een som gemaakt waarbij het huidige suppletiescenario wordt doorgezet en anderzijds is een som gemaakt waarbij de nu benodigde gemiddelde suppleties bij de aansluitingen aan noordzijde zijn gereduceerd met 110.000 m³/jaar en aan de zuidzijde met 160.000 m³/jaar.

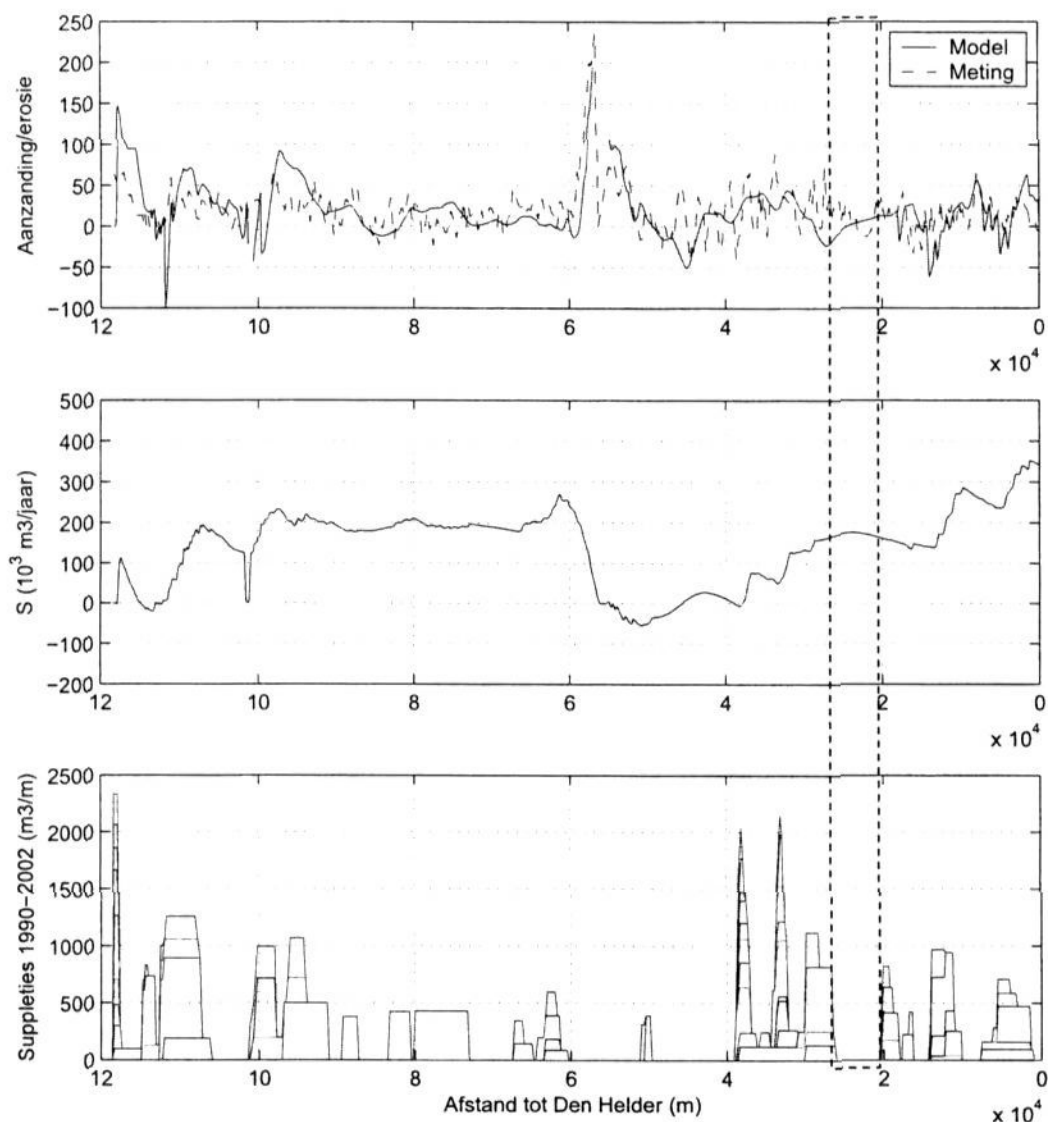
Allereerst laat de som waarin de gemiddeld aangebrachte suppleties worden doorgezet (Figuur 7.1) vanaf Camperduin naar het noorden enige aanzanding zien. Blijkbaar hoeft met de verwijdering van het Hondsbossche Pettemer Bastion in dit kustvak minder gesuppleerd te worden. Om gevoel te krijgen voor de mogelijk te besparen suppletiehoeveelheid wordt vervolgens een som gemaakt met daarin de hierboven genoemde reductie op de suppleties bij de aansluitingen.

De som met de gereduceerde suppleties bij de aansluitingen (Figuur 7.2) laat aan de voormalige zuidzijde van het bastion een geringe kustlijn achteruitgang zien. Het hiermee gemoeide zandvolume kan ruwweg uit de figuur worden geschat. De kustlijnachteruitgang

bedraagt maximaal 25 m over een kustlangse afstand van 4000 m. De kustlijnachteruitgang is ruwweg driehoekig van vorm. Dus met een actieve hoogte van 8 m bedraagt de erosiehoeveelheid over de berekeningsperiode van 12 jaar: $0.5 * 4000 * 25 * 8 = 400.000 \text{ m}^3/12 \text{ jaar}$. Per jaar is dit een erosie van gemiddeld 33.000 m^3 . Wanneer we deze hoeveelheid zouden moeten bij-suppleren met een effectiviteit van 60 % dan is de onderhoudsbesparing dus $270.000 - 33.000/0.6 = 215.000 \text{ m}^3/\text{jaar}$. Mogelijk zou met een nadere optimalisatie van de nieuwe kustlijnligging na verwijdering van het bastion nog enige aanvullende besparing kunnen worden gerealiseerd.



Figuur 7.1. Duinen van Leihoeek met doorzetting van het huidige suppletie beleid.



Figuur 7.2. Duinen van Leihoek zonder suppleties aan de aansluitingen. Het derde paneel laat overigens deze suppleties nog wel zien.

Vanaf raai 3025 naar het zuiden liggen geen strandhoofden meer. Vanaf raai 3025 naar het noorden is de steilheid van het kustprofiel (afgezien van de positie van de zandbanken) sterk vergelijkbaar. Voor de Hondsbossche zeekering verandert de aard van het profiel. Er is hier sprake van een steile vooroever met een vrij grote zandbank zo'n 500 meter uit de kust. Richting de Pettemer verergert deze situatie wat betreft de steilheid van de vooroever. Verder naar het noorden blijft de vooroever direct onder de waterlijn nog enige tijd steil. Na orde grootte 5 kilometer treedt vanaf ruwweg raai 1503 wel weer enige verflauwing op. De versteiling rondom de Hondsbossche en Pettemer zeekering en ook het gebied iets te noorden daarvan heeft naar alle waarschijnlijkheid te maken met de bastionwerking van deze keringen (waaronder enige mate van sediment blocking). Verwijderen van het Bastion kan wellicht op lange termijn leiden tot een algehele verflauwing van het nu steile gedeelte zodat het de flauwere gedeeltes ten zuiden en noorden van de Hondsbossche en Pettemer zeekering op elkaar worden aangesloten.

Het is nu niet mogelijk om vast te stellen hoe realistisch het boven geschetste scenario is en welke aanvullende besparingen die mogelijk zouden kunnen opleveren. Een héél ruwe schatting van een bovengrens kan als volgt worden gemaakt. Vanaf Callantsoog tot en met Camperduin (ca. 17 km) wordt op basis van de suppletie gegevens gemiddeld zo'n 660.000 m³/jaar gesuppleerd met een effectiviteit van 60%. Stel dat de kustlijn zonder Hondsbossche en Pettemer Zeewering buitengewoon gunstig uit zou pakken en dat een besparing van 75% op de jaarlijkse suppletiehoeveelheden zou kunnen worden gerealiseerd. Dan hoeft er dus circa 500.000 m³/jaar minder te worden gesuppleerd. Wanneer voor de suppletiekosten een prijs van € 6,- per m³ zou worden gehanteerd levert dat een theoretische jaarlijkse besparing op van € 3.000.000 per jaar. In de detailontwerpfase zijn de aanlegkosten van de Duinen van Leihoek ruwweg geschat op € 400.000.000 Euro. Zo geredeneerd zou het dus ruim 130 jaar duren voordat de maatregel is terugverdiend. En dan is de hier gehanteerde 75 % besparing nog tamelijk optimistisch geschat.

8 Discussie

8.1 Onderlinge beïnvloeding tussen kustvakken

Eén van de vragen die in planstudie kader regelmatig wordt gesteld is hoe ingrepen in verschillende kustvakken elkaar mogelijk zouden kunnen beïnvloeden. Zou een dam bij Petten een negatieve invloed kunnen hebben op bijvoorbeeld het veiligheidsprobleem bij Callantssoog? In deze kustmorfologische studie is gebleken dat de aard en de omvang van de optimalisatie maatregelen dusdanig is, dat weinig interactie tussen kustvakken te verwachten is. Wanneer bij aanleg van kustdwarse dammen direct al de evenwichtskustbogen worden aangelegd, of toch minimaal de zandstroom ten noorden wordt hersteld, kan een negatieve interactie vrijwel totaal worden vermeden.

Om dit inzichtelijk te maken kan een analogie met IJmuiden worden getrokken, waar de havendammen zo'n drie kilometer in zee steken. Enige natuurlijke bypassing (orde 100.000 m³/jaar) wordt veroorzaakt door de getijstroming. Sinds de aanleg eind 19^e eeuw en verlenging in de zestiger jaren van de 20^e eeuw, zijn de kustbogen zowel ten zuiden als ten noorden sterk uitgebouwd (enkele honderden meters kustdwars). Erosieve effecten zijn nu te merken op een afstand van zo'n 5 kilometer ten zuiden en 6 kilometer ten noorden van de dammen. Deze erosie kan, echter, eenvoudig worden opgevangen binnen het huidige reguliere kustlijn handhavingsbeleid. Wanneer, bij wijze van een eerste orde schatting van de mogelijke onderlinge beïnvloeding, de situatie bij IJmuiden op het meest noordelijke punt van de Pettemer Zeewering wordt geprojecteerd, dan is te zien dat de (overigens goed beheersbare) erosie ten noorden van de dam net niet net wel Callantssoog zou bereiken. De afstand van de Petten tot Callantssoog is zo'n 7 kilometer.

Bij het kijken naar de ondersteunende maatregelen is in deze studie naar veel kleinere ingrepen dan die bij IJmuiden gekeken. De behandelde damlengtes variëren van 200 -1500 meter kustdwars. Met een schatting voor de grootte van het invloedsgebied van zo'n 2 à 3 keer de damlengte voor grote effecten, en 5 à 6 keer de damlengte voor kleinere effecten, is eenvoudig in te zien dat de onderlinge beïnvloeding tussen kustvakken naar alle waarschijnlijkheid mag worden verwaarloosd. Zeker wanneer bij het ontwerp de zandbypass ook nog goed wordt geregeld, waardoor met name de beperktere invloed op grotere afstand wordt gereduceerd. Het wat onderhoudsoptimalisatie betreft gunstige stelsel van korte dammen, waarbij de bypassing van nature al redelijk groot is, heeft naar verwachting dan ook maar een heel beperkte invloedssfeer.

8.2 Beperkingen in de aannames

Bij zandverliezen moet een onderscheid worden gemaakt tussen verliezen in langsrichting en verliezen in dwarsrichting. In geval van een evenwichtsprofiel in kustdwarse richting geldt dat de verliezen inlangsrichting gewoonlijk een orde groter zijn dan de verliezen in dwarsrichting.

Indien ten gevolge van een zandsuppletie het kustdwarse profiel sterk afwijkt van het evenwichtsprofiel, is er in het eerste jaar na suppletie een groot kustdwars transport te verwachten. Indien de suppletie vooral boven in het profiel is aangebracht, zal dit transport zeewaarts zijn gericht en als verlies tellen voor de MKL indien het zand beneden de -5 m terechtkomt. Zodra het evenwichtsprofiel is hersteld, zal het kustdwars transport sterk afnemen.

Afgezien van dit significante initiële kustdwars transport, zullen suppletieverliezen voornamelijk in kustlangse richting plaatsvinden. Naarmate de suppletie over een grotere lengte worden uitgevoerd, zullen netto verliezen per strekkende meter afnemen, omdat zand in toenemende mate wordt afgezet binnen het vak zelf en minder 'weglekt' over de randen van het vak.

Strekdammen zijn vooral effectief in het voorkomen van kustlangse verliezen. Kustdwars verliezen worden veel minder voorkomen; het kan zelf voorkomen dat voor lange strekdammen het offshore verlies toeneemt door sterkemuistroming langs de dammen die sediment meevoert naar de diepere zee. Bij de becijfering van het benodigde suppletievolume in geval van strekdammen is verondersteld dat een dergelijk verlies niet optreedt. Bovendien is verondersteld dat na suppletie het dwarsprofiel niet sterk afwijkt van het evenwichtsprofiel en dat initiële kustdwars verliezen verwaarloosbaar zijn.

Dergelijke verliezen zijn wel meegeteld in de analyse van zandsuppleties zonder de aanwezigheid van strekdammen, omdat op basis van de beschikbare gegevens geen onderscheid kan worden gemaakt tussen suppletieverliezen in kustlangse richting en initiële verliezen in kustdwars richting door het herstel van het evenwichtsprofiel. Bij de afweging tussen de verschillende varianten moet hiermee worden rekening gehouden.

8.3 Integrale afweging van maatregelen

De integrale afweging van maatregelen maakt geen onderdeel uit van deze kustmorfologische analyse. Toch is het voor de beoordeling wel nodig om een integraal perspectief te hanteren.

Puur op basis van aanleg en onderhoudskosten is een oplossing met dammen wellicht een onaantrekkelijk alternatief. Economische waardering van rondom de dam aangewonnen grond kan de kosten-baten analyse echter anders doen uitpakken.

Ook kunnen sommige alternatieven kansen bieden voor de ecologie die in een kosten – baten analyse moeten worden meegenomen. Uit een door de provincie georganiseerde expertmeeting met ecologen kwamen een aantal interessante observaties op dat gebied. Zo werd de verre van natuurlijke ingreep bij IJmuiden toch als positief voor de ecologie beoordeeld. De stabiliteit en omvang van de kustbogen ter plaatse biedt ruimte aan voor de ecologie interessante jonge duinvorming. Bovendien maakt de breedte van het strand ter plaatse dit gebied aantrekkelijk voor vogels, ondanks een vrij hoge recreatiedruk.

Het is bovendien van belang dat de aanwezigheid van andere belangen het ontwerp van veiligheidsmaatregelen zou kunnen beïnvloeden. Zo zou bijvoorbeeld een initiatief als de marina bij Petten, aanvullende eisen kunnen stellen voor wat betreft de optimale damlocatie

en afmetingen. Op basis van ecologische belangen zou ervoor kunnen worden gepleit om zandige versterkingsmaatregelen zodanig aan te brengen dat een breed en langdurig stabiel strand (orde 5 jaar) ontstaat, om zodoende bijvoorbeeld duinvorming te stimuleren. In beide hiervoor genoemde voorbeelden is het voor afweging overigens zaak om de meerkosten ten opzichte van het veiligheidsontwerp helder in kaart te brengen.

8.4 Conclusies

De belangrijkste conclusies uit de kustmorfologische analyse zijn als volgt:

- Hoewel de effectiviteit van gesuppleerd zand erg lastig te bepalen is lijkt het op basis van deze studie gerechtvaardigd om een lagere effectiviteit te hanteren dan oorspronkelijk werd gehanteerd in de planform design fase.
- Een dam bij Huisduinen is voor de veiligheid niet echt nodig. De Helderse geldt niet langer als een zwakke schakel en ook de aansluiting is niet direct in gevaar. De migrerende Schulpengat geul zou op termijn wel een probleem voor de veiligheid kunnen opleveren. In dat geval wordt versterking van de huidige dammen om de geul uit de kust te houden aanbevolen.
- Strekdammen kunnen worden gebruikt om het onderhoud van zandige maatregelen te optimaliseren. Meerdere korte dammen met voldoende natuurlijke bypass leveren een grotere besparing op dan één of enkele langere dammen.
- De variant Duinen van Leihoek levert zoals verwacht een besparing op in de onderhoudskosten voor een relatief groot stuk. Het is sterk de vraag of de zeer hoge aanleg kosten op kunnen wegen tegen de gerealiseerde besparing.
- Het is niet verstandig om de afweging voor varianten alleen te baseren op kustmorfologische overwegingen. Meer inzicht in kustmorfologische effecten en onderhoudskosten draagt wel bij aan een eerlijke afweging tussen het veiligheidsbelang en andere belangen.
- De hier gegeven morfologische beschouwingen zijn ruw van aard. Voor uiteindelijke gedetailleerde ontwerpen wordt nadere studie ten zeerste aanbevolen! De huidige beschouwingen bieden wel een bruikbaar kader waarop eventuele detailleringen kunnen verder bouwen.

9 Referenties

Alkyon (2002). *Manipulatie afslaglijnen Zandvoort*. Alkyon rapport A1033, 28 pp.

Alkyon (2004). *Bijdrage quickscan Hondsbossche en Pettemer Zeewering. Huidige faalkans en effect van suppleties*. Memo aan Arcadis in het kader van de quickscan "Tijdelijke maatregelen Pettemer zeewering".

Bouwmeester, E.C., Kalf, R.B. en Walburg, A.M. (1994). *Statistische analyse van de Nederlandse morfologische ontwikkeling*. RIKZ/94-045.

CERC (2003). *Coastal Engineering Manual. Chapter 5.3: Shore protection projects*. Coastal and Hydraulics Laboratory, Vicksburg, Mississippi

Min V&W (2002). *Hydraulische Randvoorwaarden 2001 voor het toetsen van Primaire Waterkeringen*. Ministerie van Verkeer en Waterstaat.

Provincies Noord- en Zuid-Holland, Arcadis, Nieuwe Gracht, Alkyon, 2002. *Strategische Visie Hollandse Kust 2050*.

Roelse, P. (2002). *Water en zand in balans. Evaluatie zandsuppleties na 1990; een morfologische beschouwing*. Rapport RIKZ/2002.003. ISBN 90-36-369-3426-5

Rest, P. van de (2004). *Morfodynamica en hydrodynamica van de Hollandse kust*. Afstudeerrapport Technische Universiteit Delft, Faculteit der Civiele Techniek

TAW (2003). *Leidraad Zandige Kust*. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen

Vessem, P. van and Stolk, A. (1990). *Sand budget of the Dutch coast*. Proc. of 22nd Int. Conf. on Coastal Eng., Delft, The Netherlands. ASCE, pp. 1895-1908.

Van Koningsveld, M. en L. van Nieuwenhuijzen (2004). *Planstudie Veiligheid. Fase 2: Planform designs zwakke schakels*. Rapport in opdracht van de Provincie Noord-Holland. WL rapport Z3725.20.

Van Rijn, L.C. (1998). *Principles of Coastal Morphology*. Aqua publications, Amsterdam.

Van der Velden, E.T.J.M. (1990). *Coastal Engineering. Lecture Notes Delft University of Technology*.

Wijnberg, K.M. (1995). *Morphologic behaviour of a barred coast over a period of decades*. PhD. thesis, Utrecht University, The Netherlands.

A Overzicht zandsuppleties 1990-2003

Onderstaande tabel geeft een overzicht van de uitgevoerde strand- en onderwatersuppleties over de periode 1990-2003. De gegevens zijn aan toegeleverd door Rijkswaterstaat RIKZ.

locatie	jaar	gebied		type	volume [m ³]
		begin	eind		
Den Helder	1993	1,00	7,50	strandsuppletie	615527
Den Helder	1996	1,50	7,50	strandsuppletie	400000
Den Helder	2001	1,50	5,68	strandsuppletie	1290240
Den Helder-Julianadorp	2003	1,50	5,88	strandsuppletie	1305458
Den Helder	1993	3,28	5,68	strandsuppletie	280000
Julianadorp	1999	3,95	6,28	strandsuppletie	287480
Groote Keeten	2003	9,13	9,43	onderwatersuppletie	12243
Callantsoog	1999	10,00	14,00	strandsuppletie	144000
Callantsoog-Zwanenwater	2003	10,00	16,00	onderwatersuppletie	2572642
Zijpe	1996	10,01	12,13	strandsuppletie	459000
Callantsoog	1991	11,00	14,00	strandsuppletie	538404
Zijpe	2001	11,08	14,01	onderwatersuppletie	1499940
Callantsoog	2003	11,10	13,75	strandsuppletie	438155
Callantsoog	1996	12,20	14,10	strandsuppletie	459000
Zwanenwater	1995	16,24	17,60	strandsuppletie	306840
Zwanenwater	2000	16,26	16,88	strandsuppletie	120000
Petten	1991	18,00	20,18	strandsuppletie	371418
Petten	2002	18,27	20,35	strandsuppletie	500561
Petten	1995	18,80	20,40	strandsuppletie	361740
Zijpe	1998	19,25	20,50	strandsuppletie	228901
Petten	2003	19,83	20,58	strandsuppletie	230577
Camperduin	2003	25,62	26,41	strandsuppletie	357788
Schoorl	1997	26,00	30,05	strandsuppletie	547000
Egmond-Camperduin	1992	26,20	38,50	strandsuppletie	1472640
Camperduin	2002	26,50	30,00	onderwatersuppletie	1972272
Bergen	2001	28,32	30,00	strandsuppletie	511127
Bergen aan Zee	1997	30,05	31,05	anders	132690
Bergen aan Zee	1998	31,05	33,50	strandsuppletie	352000
Bergen aan Zee	1990	32,25	33,75	strandsuppletie	385774
Bergen aan Zee	1990	32,25	33,75	banket	60000
Bergen aan Zee	2000	32,25	34,25	onderwatersuppletie	994000
Bergen aan Zee	1999	32,50	33,75	strandsuppletie	205793
Bergen aan Zee	1995	32,63	33,63	strandsuppletie	306000
Bergen aan Zee	2000	32,75	33,25	strandsuppletie	225000
Bergen aan Zee	1994	32,90	33,50	strandsuppletie	100683
Bergen-Egmond	1997	34,50	35,75	strandsuppletie	158000
Egmond	1997	36,25	38,80	strandsuppletie	314000
Egmond	1999	36,90	39,10	onderwatersuppletie	880100
Egmond	1990	37,00	38,50	strandsuppletie	323318
Egmond	1995	37,25	38,75	strandsuppletie	306000

Egmond	1999	37,25	38,75	strandsuppletie	214515
Egmond	1998	37,50	38,75	strandsuppletie	244442
Egmond	1992	37,65	38,60	strandsuppletie	69225
Egmond	1994	37,85	38,20	strandsuppletie	106343
Egmond	2000	38,00	38,80	strandsuppletie	207445
Heemskerk	1997	49,65	50,43	strandsuppletie	304450
Heemskerk	1996	50,43	51,00	strandsuppletie	180050
Bloemendaal	1994	60,50	63,35	strandsuppletie	255076
Bloemendaal/Z-voort (1)	1998	61,50	63,50	strandsuppletie	193378
Bloemendaal	2001	61,50	64,50	strandsuppletie	603630
Bloemendaal	1990	62,00	63,25	strandsuppletie	261682
Zandvoort	1994	65,00	67,30	strandsuppletie	334147
Bl-daal/Zandvoort (2)	1998	66,00	67,50	strandsuppletie	
Zandvoort	2001	66,25	67,50	strandsuppletie	248093
Noordwijkerhout	2002	73,00	80,00	onderwatersuppletie	3000000
Noordwijk	1998	80,50	83,50	onderwatersuppletie	1266028
Katwijk	1999	87,50	89,50	onderwatersuppletie	753350
Wassenaar	2002	91,00	97,00	onderwatersuppletie	3000000
Wassenaar	1997	94,00	96,50	strandsuppletie	552800
Wassenaar	1994	94,25	96,25	strandsuppletie	700000
Scheveningen	1996	97,00	101,00	strandsuppletie	800000
Scheveningen	1999	97,73	100,50	onderwatersuppletie	1425780
Scheveningen	1991	97,81	101,39	strandsuppletie	1005699
Ter Heijde	1993	106,23	112,21	strandsuppletie	1143000
Kijkduin-Ter Heyde	2001	107,40	112,50	onderwatersuppletie	3581899
Ter Heijde	1997	107,50	112,50	strandsuppletie	834000
Ter Heijde	2003	107,73	113,19	strandsuppletie	1252797
Kijkduin-Ter Heyde	2001	108,00	112,00	strandsuppletie	801178
Ter Heijde	1995	112,21	114,50	strandsuppletie	300000
Ter Heijde	1997	113,15	114,85	onderwatersuppletie	1028950
Hoek van Holland	1993	114,00	118,75	strandsuppletie	463000
Hoek van Holland	2000	117,50	118,50	strandsuppletie	200000
Hoek van Holland	2003	117,50	118,50	strandsuppletie	213606
Hoek van Holland	1990	117,75	118,75	strandsuppletie	183000
Hoek van Holland	1991	117,75	118,75	strandsuppletie	223000
Hoek van Holland	1992	117,75	118,75	strandsuppletie	560000
Hoek van Holland	1994	117,75	118,75	strandsuppletie	200000
Hoek van Holland	1995	117,75	118,75	strandsuppletie	200000
Hoek van Holland	1996	117,75	118,75	strandsuppletie	200000
Hoek van Holland	1997	117,75	118,75	strandsuppletie	200000
Hoek van Holland	1999	117,75	118,50	strandsuppletie	200680

B Schematisatie golfklimaat

B.1 Golfklimaat meetstation IJmuiden munitiestortplaats

Golfhoogteklasse (1 m sectoren)	Golfrichtingsklasse (30° sectoren)											
	15	45	75	105	135	165	195	225	255	285	315	345
0.5	5.484	2.692	1.531	1.083	1.286	1.415	2.582	5.694	4.379	3.796	5.598	9.250
1.5	2.968	1.594	0.995	0.540	0.481	0.695	2.628	8.120	4.184	3.256	4.822	7.413
2.5	0.406	0.241	0.116	0.031	0.022	0.040	0.564	4.194	1.958	1.519	1.707	1.870
3.5	0.040	0.009	0.001	0.001	0.001	0.010	0.058	1.114	0.623	0.583	0.652	0.589
4.5	0.006	0.001	0.000	0.000	0.003	0.000	0.004	0.132	0.201	0.216	0.190	0.190
5.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.010	0.037	0.037	0.037	0.060
6.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.009	0.004	0.003	0.013
7.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.003
8.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
9.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Tabel C.1.1: Frequentie van voorkomen golfhoogte/richting klassen IJmuiden

Golfhoogteklasse (1 m sectoren)	Golfrichtingsklasse (30° sectoren)											
	15	45	75	105	135	165	195	225	255	285	315	345
0.5	0.635	0.635	0.653	0.639	0.638	0.617	0.654	0.676	0.603	0.585	0.597	0.641
1.5	1.354	1.400	1.337	1.297	1.294	1.356	1.418	1.474	1.458	1.459	1.442	1.396
2.5	2.354	2.364	2.273	2.273	2.422	2.360	2.375	2.424	2.431	2.415	2.397	2.392
3.5	3.304	3.403	3.330	3.260	3.280	3.257	3.309	3.367	3.409	3.447	3.427	3.435
4.5	4.235	4.320	-	-	4.205	-	4.270	4.350	4.389	4.388	4.407	4.422
5.5	-	-	-	-	-	-	-	5.384	5.300	5.392	5.420	5.401
6.5	-	-	-	-	-	-	-	6.650	6.232	6.123	6.205	6.358
7.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7.080	7.205
8.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabel C.1.2: Gemeten golfhoogte Hm0 IJmuiden per golfhoogte/richting klasse

Golfhoogteklasse (1 m sectoren)	Golfrichtingsklasse (30° sectoren)											
	15	45	75	105	135	165	195	225	255	285	315	345
0.5	3.984	3.788	3.714	3.598	3.534	3.585	3.680	3.818	3.888	4.052	4.356	4.559
1.5	4.664	4.468	4.274	4.164	4.117	4.262	4.405	4.557	4.620	4.741	5.015	5.181
2.5	5.510	5.342	5.054	5.024	5.253	5.133	5.196	5.355	5.425	5.515	5.681	5.859
3.5	6.407	6.200	6.300	6.500	6.200	5.686	5.908	6.096	6.139	6.236	6.475	6.719
4.5	7.125	6.200	-	-	6.850	-	7.067	6.751	6.844	6.954	7.231	7.398
5.5	-	-	-	-	-	-	-	7.429	7.356	7.600	7.832	8.117
6.5	-	-	-	-	-	-	-	8.200	8.067	7.900	8.250	8.822
7.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9.100	8.900
8.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabel C.1.3: Gemeten golfperiode T_{m02} IJmuiden per golfhoogte/richting klasse

Golfhoogteklasse (1 m sectoren)	Golfrichtingsklasse (30° sectoren)											
	15	45	75	105	135	165	195	225	255	285	315	345
0.5	13.8	43.9	74.6	105.1	136.2	166.2	197.2	226.4	254.5	285.9	316.8	345.4
1.5	13.5	44.2	73.9	104.4	135.0	167.1	199.3	225.4	254.1	285.9	317.0	345.0
2.5	12.7	44.0	71.6	104.7	136.5	169.4	201.3	226.4	253.7	285.4	317.2	342.2
3.5	10.0	41.3	72.0	100.0	147.0	171.5	197.5	228.7	253.8	285.1	317.0	341.7
4.5	9.4	38.0	-	-	140.5	-	199.7	230.4	256.2	286.5	318.5	340.9
5.5	-	-	-	-	-	-	-	236.9	258.5	285.0	319.3	339.6
6.5	-	-	-	-	-	-	-	239.0	254.7	289.7	320.5	339.3
7.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	330.0	340.0
8.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabel C.1.4: Gemeten golfrichting T_{h0} IJmuiden per golfhoogte/richting klasse

B.2 Afgeleid golfklimaat meetstation Eierlandse Gat

Golfhoogteklasse (1 m sectoren)	Golfrichtingsklasse (30° sectoren)												
		15	45	75	105	135	165	195	225	255	285	315	345
	0.5	5.484	2.692	1.531	1.083	1.286	1.415	2.582	5.694	4.379	3.796	5.598	9.250
	1.5	2.968	1.594	0.995	0.540	0.481	0.695	2.628	8.120	4.184	3.256	4.822	7.413
	2.5	0.406	0.241	0.116	0.031	0.022	0.040	0.564	4.194	1.958	1.519	1.707	1.870
	3.5	0.040	0.009	0.001	0.001	0.001	0.010	0.058	1.114	0.623	0.583	0.652	0.589
	4.5	0.006	0.001	0.000	0.000	0.003	0.000	0.004	0.132	0.201	0.216	0.190	0.190
	5.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.010	0.037	0.037	0.037	0.060
	6.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.009	0.004	0.003	0.013
	7.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.003
	8.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	9.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Tabel C.2.1: Frequentie van voorkomen golfhoogte/richting klassen Eierlandse Gat

Golfhoogteklasse (1 m sectoren)	Golfrichtingsklasse (30° sectoren)												
		15	45	75	105	135	165	195	225	255	285	315	345
	0.5	0.719	0.695	0.707	0.695	0.681	0.649	0.671	0.702	0.690	0.703	0.737	0.772
	1.5	1.431	1.492	1.394	1.326	1.316	1.249	1.336	1.426	1.572	1.658	1.655	1.597
	2.5	2.497	2.511	2.273	2.065	2.200	2.061	2.184	2.326	2.617	2.636	2.642	2.604
	3.5	3.274	3.442	3.310	4.820	2.600	3.150	2.889	3.211	3.657	3.691	3.615	3.463
	4.5	3.703	3.830	-	-	4.500	-	3.157	3.933	4.600	4.681	4.491	4.407
	5.5	-	-	-	-	-	-	-	4.839	5.238	5.643	5.476	5.310
	6.5	-	-	-	-	-	-	-	6.250	5.935	6.317	6.080	6.150
	7.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6.600	7.800
	8.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	9.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabel C.2.2: Gemeten golfhoogte Hm0 Eierlandse Gat per golfhoogte/richting klasse

Golfhoogteklasse (1 m sectoren)	Golfrichtingsklasse (30° sectoren)											
	15	45	75	105	135	165	195	225	255	285	315	345
0.5	4.246	4.095	3.973	3.832	3.750	3.799	3.889	3.941	4.085	4.244	4.492	4.690
1.5	4.883	4.745	4.532	4.318	4.194	4.315	4.444	4.572	4.838	5.021	5.237	5.366
2.5	5.696	5.688	5.264	4.833	5.253	5.037	5.157	5.308	5.637	5.748	5.925	6.015
3.5	6.378	6.733	6.100	7.700	6.000	5.886	5.695	5.964	6.385	6.463	6.640	6.683
4.5	6.850	7.300	-	-	6.450	-	6.300	6.467	6.980	7.165	7.260	7.320
5.5	-	-	-	-	-	-	-	6.929	7.420	7.696	7.952	8.030
6.5	-	-	-	-	-	-	-	7.900	7.667	8.133	8.400	8.511
7.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9.100	9.800
8.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabel C.2.3: Gemeten golfperiode Tm02 Eierlandse Gat per golfhoogte/richting klasse

Golfhoogteklasse (1 m sectoren)	Golfrichtingsklasse (30° sectoren)											
	15	45	75	105	135	165	195	225	255	285	315	345
0.5	14.1	33.6	56.5	80.0	115.5	160.4	208.2	239.9	272.7	298.7	321.1	348.2
1.5	14.9	41.8	65.0	88.2	112.8	163.1	204.3	232.0	266.0	292.0	319.1	346.6
2.5	18.8	45.8	66.7	90.6	126.2	163.4	203.8	230.0	261.3	289.5	318.6	343.2
3.5	18.1	49.9	125.0	133.0	143.0	164.1	198.3	228.7	258.8	288.2	316.5	341.4
4.5	18.2	41.0	-	-	140.0	-	203.9	227.5	258.4	289.8	317.8	341.0
5.5	-	-	-	-	-	-	-	232.7	260.1	286.3	318.7	339.2
6.5	-	-	-	-	-	-	-	232.0	254.3	295.0	327.5	339.6
7.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	331.0	335.0
8.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabel C.2.4: Gemeten golfrichting Th0 Eierlandse Gat per golfhoogte/richting klasse

B.3 Afgeleid golfklimaat meetstation Lichteiland Goeree

Golfhoogteklasse (1 m sectoren)	Golfrichtingsklasse (30° sectoren)												
	15	45	75	105	135	165	195	225	255	285	315	345	
0.5	5.484	2.692	1.531	1.083	1.286	1.415	2.582	5.694	4.379	3.796	5.598	9.250	
1.5	2.968	1.594	0.995	0.540	0.481	0.695	2.628	8.120	4.184	3.256	4.822	7.413	
2.5	0.406	0.241	0.116	0.031	0.022	0.040	0.564	4.194	1.958	1.519	1.707	1.870	
3.5	0.040	0.009	0.001	0.001	0.001	0.010	0.058	1.114	0.623	0.583	0.652	0.589	
4.5	0.006	0.001	0.000	0.000	0.003	0.000	0.004	0.132	0.201	0.216	0.190	0.190	
5.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.010	0.037	0.037	0.037	0.060	
6.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.009	0.004	0.003	0.013	
7.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.003	
8.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
9.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	

Tabel C.3.1: Frequentie van voorkomen golfhoogte/richting klassen Lichteiland Goeree

Golfhoogteklasse (1 m sectoren)	Golfrichtingsklasse (30° sectoren)												
	15	45	75	105	135	165	195	225	255	285	315	345	
0.5	0.660	0.609	0.580	0.520	0.488	0.475	0.555	0.638	0.571	0.537	0.534	0.612	
1.5	1.367	1.311	1.136	0.982	0.853	0.979	1.124	1.292	1.312	1.287	1.265	1.281	
2.5	2.341	2.200	1.911	1.791	2.091	2.006	1.860	2.032	2.188	2.206	2.151	2.183	
3.5	3.294	3.365	3.140	2.440	4.810	2.679	2.498	2.753	3.019	3.096	2.976	2.946	
4.5	4.008	4.180	-	-	3.935	-	4.060	3.498	3.726	3.906	3.730	3.669	
5.5	-	-	-	-	-	-	-	4.384	4.407	4.597	4.434	4.348	
6.5	-	-	-	-	-	-	-	6.040	4.638	5.397	5.240	5.033	
7.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6.020	5.585	
8.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
9.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Tabel C.3.2: Gemeten golfhoogte Hm0 Lichteiland Goeree per golfhoogte/richting klasse

		Golfrichtingsklasse (30° sectoren)											
		15	45	75	105	135	165	195	225	255	285	315	345
Golfhoogteklasse (1 m sectoren)	0.5	3.859	3.740	3.643	3.478	3.356	3.376	3.474	3.634	3.650	3.761	3.996	4.159
	1.5	4.533	4.462	4.176	3.866	3.590	3.821	4.019	4.225	4.240	4.321	4.576	4.764
	2.5	5.287	5.213	4.883	4.529	4.880	4.707	4.669	4.861	4.962	5.028	5.152	5.305
	3.5	6.033	6.050	5.900	5.900	6.900	5.214	5.187	5.413	5.574	5.656	5.727	5.869
	4.5	6.400	6.100	-	-	6.400	-	6.433	5.910	6.066	6.208	6.260	6.302
	5.5	-	-	-	-	-	-	-	6.514	6.500	6.604	6.732	6.750
	6.5	-	-	-	-	-	-	-	7.300	6.650	6.967	7.050	6.989
	7.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7.700	7.450
	8.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	9.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabel C.3.3: Gemeten golfperiode T_{m02} Lichteiland Goeree per golfhoogte/richting klasse

		Golfrichtingsklasse (30° sectoren)											
		15	45	75	105	135	165	195	225	255	285	315	345
Golfhoogteklasse (1 m sectoren)	0.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	6.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	7.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	8.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	9.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabel C.3.4: Gemeten golfrichting Th_0 Lichteiland Goeree per golfhoogte/richting klasse