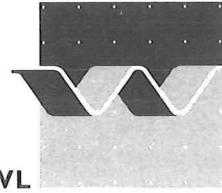


**technisch rapport 14
onderwateroeversuppleties**

**kustverdediging
na 1990**



waterloopkundig laboratorium | WL



onderwateroever supplementies

een alternatieve kustverdedigingsmethode?

Technisch Rapport 14

H 825
april 1989

J.A. Roelvink

kustverdediging na 1990

INHOUD

	blz.
SAMENVATTING.....	7
1. INLEIDING.....	11
1.1 Studiekader en opdracht.....	11
1.2 Doel en aanpak van de studie.....	11
2. MODELBESCHRIJVING.....	13
2.1 Beschrijving systeem.....	13
2.2 Schematisatie.....	14
2.3 Morfologisch profielmodel.....	15
3. TOETSING MODEL.....	19
3.1 Inleiding.....	19
3.2 Autonome ontwikkeling.....	19
4. SIMULATIES ONDERWATEROEVERSUPPLETIES.....	33
4.1 Inleiding.....	33
4.2 Effect plaats.....	33
4.3 Effect grootte.....	38
4.4 Effect gelijktijdige winning.....	39
4.5 Effect zeespiegelstijging.....	41
4.6 Effect locatie.....	42
5. INTERPRETATIE SIMULATIERESULTATEN.....	45
6. SCHATTING LANGSTRANSPORTEFFECTEN.....	49
6.1 Suppleties in de actieve zone.....	49
6.2 Suppleties buiten de actieve zone.....	52
7. LEVENSDUUR SUPPLETIES.....	59
8. NAUWKEURIGHEID.....	63
9. CONCLUSIES.....	65
10. AANBEVELINGEN.....	67

LITERATUUR

LIJST VAN FIGUREN

FIGUREN

APPENDIX: Achtergrond van de verschillende transportmodel-concepten

KADER VAN DIT RAPPORT

Dit rapport is een onderdeel van de studie die rond de discussienota "Kustverdediging na 1990" is uitgevoerd. Deze studie heeft in 1988 en 1989 plaatsgevonden. Hierin wordt een aantal alternatieve mogelijkheden ten aanzien van kustverdedigingsbeleid onderzocht en worden deze mogelijkheden naast elkaar gepresenteerd.

De beleidsanalytische studie vereist kennis over een groot aantal, soms nogal uiteenlopende aspecten van kustverdediging(sbeleid): kustgedrag, veiligheid van de duinenkust, voorspelling van kustgedrag, gebruiksfuncties in het duingebied en hoe deze te beoordelen, welke maatregelen zijn zinvol, etc. Al deze onderwerpen zijn in onderbouwende studies aan de orde gekomen en gerapporteerd in Technische Rapporten.

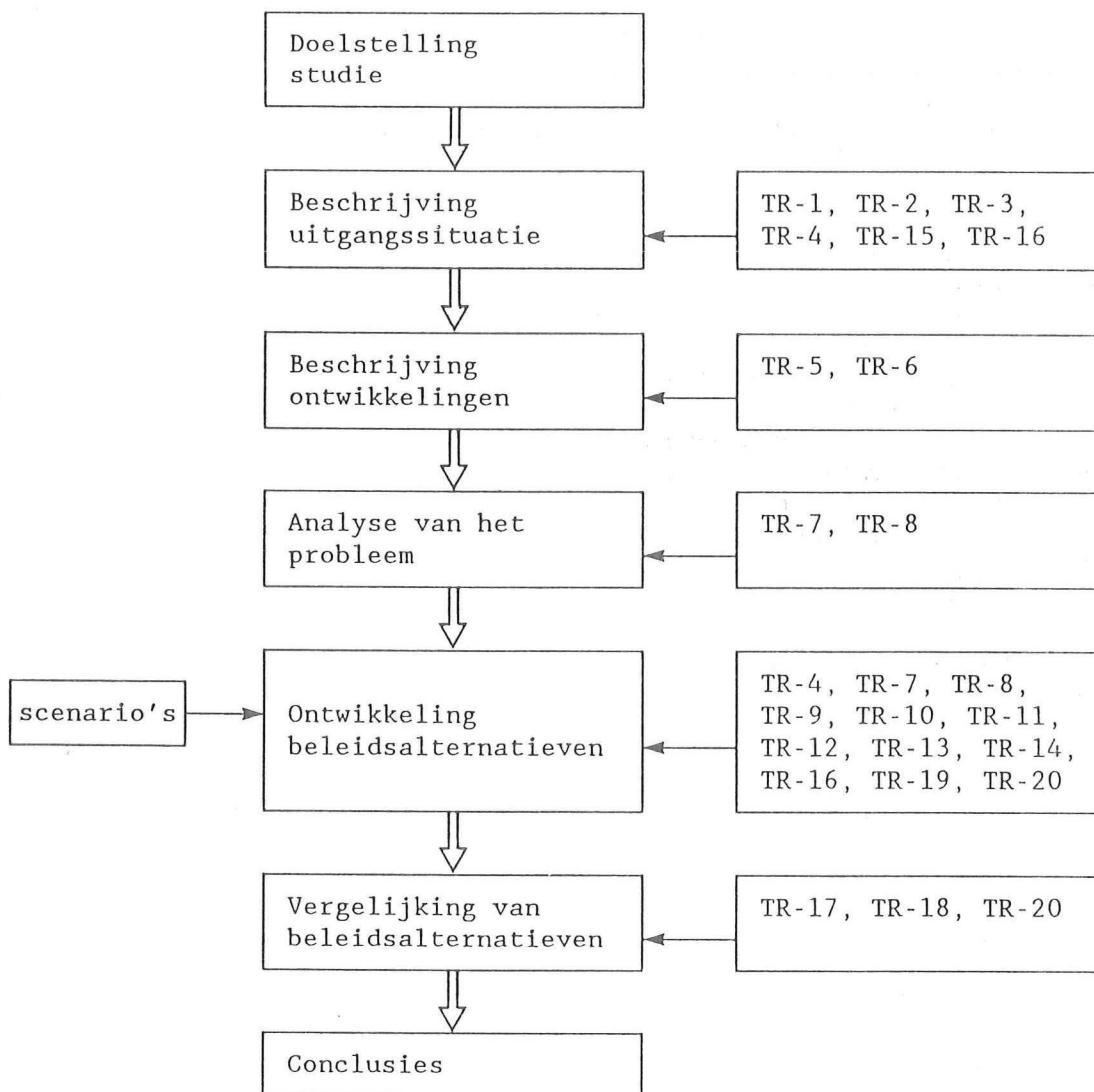
Het onderhavige rapport bevat de technische onderbouwing van een van de aspecten van de beleidsanalytische studie.

In onderstaand overzicht is een opsomming gegeven van alle Technische Rapporten die in dit kader zijn verschenen.

- TR-0 Overzicht technische onderbouwing discussienota Kustverdediging samenvatting en conclusies van de uitgevoerde projecten.
- TR-1 Zandsysteem kust
een morfologische karakterisering.
- TR-2 Toestand kust 1990
kusttypering en kustligging.
- TR-3 Kustonderhoud
kosten van basisonderhoud.
- TR-4 Inventarisatie duinfuncties.
- TR-5 Kustvoorspelling
voorspelling ontwikkeling kustlijn 1990-2090.
- TR-6 Zeespiegelrijzing
hydro-meteo scenario's
- TR-7 Duinen als waterkering
invloed van kustgedrag op veiligheid.
- TR-8 Duinfuncties
invloed van kustgedrag
- TR-9 Inventarisatie functies onderwateroever
interactie met kustverdediging.
- TR-10 Zeezandwinning
invloed op kustgedrag; een verkenning.
- TR-11 Strand- en duinsuppleties
effectiviteit en kosten
- TR-12 Strandhoofden en paalrijen
evaluatie werking.
- TR-13 Grote civiele werken
invloed op kustgedrag.
- TR-14 Onderwateroeversuppleties
een alternatieve kustverdedigingsmethode.
- TR-15 Monitoring kustgedrag
huidige situatie en toekomstbeeld
- TR-16 Harde kustverdediging
zeedijken, havengebieden en strandmuren als waterkering.
- TR-17 Systeemanalytisch model
beschrijving computermodel.

- TR-18 Berekeningsresultaten beleidsalternatieven detailresultaten van computermodel.
- TR-19 Innovatie van kustverdediging inspelen op het kustsysteem.
- TR-20 Zeewaartse kustverdediging een globale uitwerking van enkele mogelijkheden.

De onderbouwende studies bestrijken het brede scala van onderwerpen dat met de beleidsanalytische studie van de kustverdediging samenhangt. De relatie met deze studie komt tot uitdrukking door bij de verschillende stappen aan te geven waar deze door een technisch rapport ondersteund worden. Dit is in onderstaand schema aangegeven.



SAMENVATTING

Inleiding

De laatste decennia heeft in Nederland een belangrijke verschuiving plaatsgevonden in de aanpak van kusterosieproblemen. Waar men vroeger gewend was met harde constructies, zoals strandhoofden, strandmuren, dijken en duinvoetverdedigingen de problemen te bestrijden of althans te vertragen, gaat men tegenwoordig steeds meer over tot 'zachte', flexibele verdedigingsmethoden, zoals strand- en duinsuppleties. Enerzijds is dit te danken aan de ontwikkeling van de baggertechnologie, waardoor deze methoden haalbaar zijn geworden; anderzijds heeft ook een verandering van de onderhoudsfilosofie tot deze ontwikkeling geleid.

De eerstgenoemde methoden zijn passief; ze vertragen of verplaatsen slechts het probleem. Bij de laatste methoden wordt actief ingegrepen in het kuststelsel. Onderkend wordt, dat de oorzaak van de kusterosie ligt in een geleidelijk verlies van zand uit de kustzone; dit verlies wordt gecompenseerd door een kustvak op gezette tijden aan te vullen. Deze methode is flexibel en hoeft niet tot een verlies aan waardevolle functies in het kustgebied te leiden. Door uitvoerings-technische problemen is de prijs per kubieke meter echter nog aan de hoge kant. Meer recentelijk is het begrip gegroeid, dat de onderwateroever een belangrijke rol vervult in het kuststelsel, en dat voortgaande erosie ervan, met enige vertraging, tot kusterosie en verhoogde duinafslag kan leiden. Andersom geldt ook, dat een aangroeiende onderwateroever tot een gunstiger kustgedrag aanleiding geeft. Het is dan ook zinvol, te bezien of kunstmatige voeding van de onderwateroever door onderwatersuppleties een (gedeeltelijk) alternatief voor strandsuppleties kan inhouden.

Het is aannemelijk, dat het rendement van onderwatersuppleties, uitgedrukt in zandhoeveelheden, door grotere verliezen naar dieper water geringer zal zijn dan dat van strandsuppleties. Doordat de uitvoering veel eenvoudiger is, is het echter goed mogelijk dat de totale onderhoudskosten bij toepassing van onderwatersuppleties lager liggen dan bij strandsuppleties.

Om deze afweging te kunnen maken, is in deze studie de effectiviteit van verschillende vormen van onderwatersuppleties onderzocht in termen van zandhoeveelheden; de kostenafweging valt buiten het kader van de opdracht.

In het buitenland zijn in het verleden enige experimenten uitgevoerd met suppleties op de onderwateroever. In het algemeen vonden deze plaats op betrekkelijk diep water. De ervaringen zijn niet erg gunstig; in deze studie is de aandacht dan ook voornamelijk gericht op suppleties in de zogenaamde 'aktieve zone', ruwweg tussen de waterlijn en de 8 m dieptelijn.

Doel van de studie

Het doel van deze studie is, te onderzoeken wat de invloed is van onderwatersuppleties op het kustgedrag. Hierbij zijn de volgende variabelen beschouwd, die gerelateerd zijn aan de wijze van uitvoering, de hydrodynamische condities en de positie langs de kust:

- diepte van aanleg;
- volume van de suppletie;
- gelijktijdige zandwinning lager in hetzelfde profiel;

- zeespiegelstijging;
- profielvorm.

Het onderzoeksgebied beperkt zich tot de Hollandse zandige kust.

Aanpak

Op grond van de kennis van het kuststelsel, ondermeer opgedaan in het de onderbouwende studie kustvoorspelling (TR-6) voor de Nota Kustverdediging, is besloten voornamelijk de effecten op de ontwikkeling van het dwarsprofiel te beschouwen; hiermee wordt verondersteld, dat de beschouwde suppleties zich over tenminste enige kilometers uitstrekken. Voor de analyse wordt gebruik gemaakt van het dwarstransportmodel CROSTRAN, dat in een eerdere studie door het Waterloopkundig Laboratorium is ontwikkeld en geverifieerd met behulp van Deltagootproeven. Uit deze proeven op grote schaal is gebleken, dat een aantal dwars op de kust werkende transportprocessen redelijk kunnen worden gemodelleerd. In eerste instantie is in deze studie onderzocht, in hoeverre dit model een beschrijving kan geven van de belangrijke karakteristieken van de autonome kustontwikkeling. Na deze toetsing is aan de hand van een aantal simulaties met het model het effect van suppleties als functie van de bovengenoemde variabelen onderzocht. De resultaten van deze simulaties zijn in een aantal grafieken samengevat, aan de hand waarvan suppleties ontworpen kunnen worden.

Toetsing model

In de genoemde Deltagootproeven zijn enige belangrijke dwarstransportprocessen afzonderlijk onderzocht om de wiskundige modellering ervan te toetsen. Hiervoor zijn omstandigheden gecreëerd, waarbij telkens één van de processen overheersend was. In werkelijkheid treden deze processen tegelijk op, en heeft in plaats en tijd nu het ene, dan het andere proces de overhand. Hierdoor ontstaat een systeem, dat sterk kan fluctueren, maar dat over langere tijd gemiddeld bijna in evenwicht is. Om nu te bezien, of het ontwikkelde model ook onder deze omstandigheden nog zinnige uitkomsten biedt, is een toetsing aan natuurlijke ontwikkelingen uitgevoerd.

Een gedetailleerde ijking van het model is met de beschikbare prototype-gegevens niet mogelijk; wel kan worden bezien in hoeverre een aantal karakteristieken van de autonome kustontwikkeling kunnen worden weergegeven. Deze karakteristieken zijn onder andere:

- verschillen in de verplaatsingssnelheid van de kustlijn ten gevolge van verschillen in uitgangsprofiel;
- globale profielvorm;
- optreden van een 'dynamisch evenwicht';
- voorkomen van brandingsruggen;
- gedrag van brandingsruggen;

Deze karakteristieken blijken in een aantal gevallen redelijk te kunnen worden gesimuleerd door het model, zoals blijkt uit berekende profielontwikkelingen bij Egmond aan Zee, Delfland en Noordwijk.

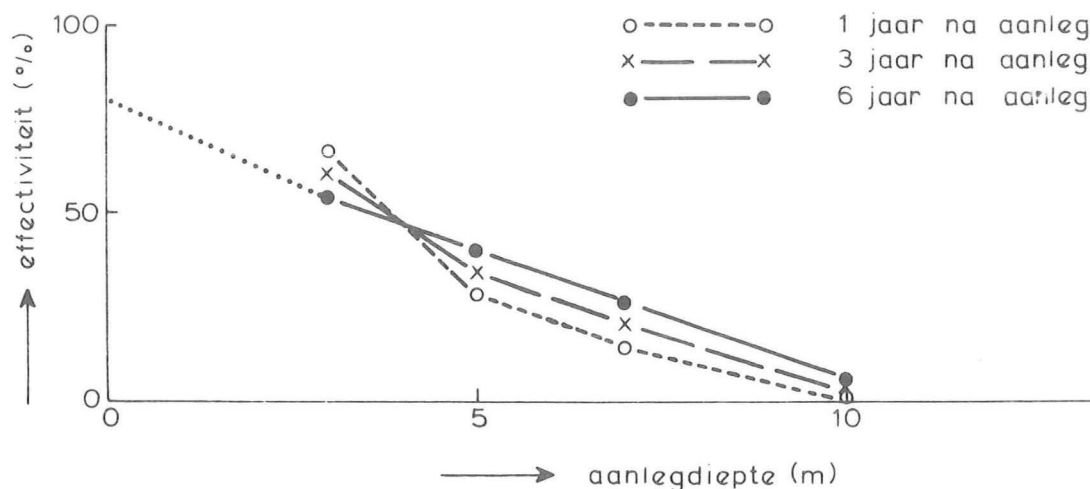
Simulaties onderwateroever-suppleties

De simulaties zijn als volgt uitgevoerd: er is een inspeeltijd van twee jaar gehanteerd om initiële aanpassingen van het profiel, die

altijd optreden door onnauwkeurigheden in model en randvoorwaarden, te laten uitwerken. Hierna is telkens een ingreep gepleegd in het profiel en is tot ca. tien jaar doorgerekend. De verschillen tussen de ontwikkeling met en zonder ingreep bepalen het effect van de ingreep; door te kuberen over bepaalde strookbreedten of door de kortdurende fluctuaties af te filteren worden de significante verschillen duidelijk gemaakt.

De effectiviteit van een suppletie voor een bepaalde strook wordt in deze studie gedefinieerd als de volumetoename per m kustlengte van die strook t.o.v. de autonome ontwikkeling, uitgedrukt als percentage van het aangebrachte volume per m kustlengte.

Deze effectiviteit blijkt voornamelijk te worden bepaald door de aanlegdiepte. In figuur 1 is dit verband weergegeven; langtransporteffecten zijn hierbij buiten beschouwing gelaten. Ook bij strandsuppleties is de effectiviteit niet 100%; dit is in de figuur schematisch aangegeven.



Figuur 1 Effectiviteit van suppleties voor zone tot 200 m uit de NAP-lijn als functie van de aanlegdiepte

Langtransport-effecten

Om het effect van het verwaarlozen van het langtransport te schatten zijn enige principe-berekeningen uitgevoerd met een één-lijn model. Hieruit blijkt, dat door langtransport een herverdeling van zand langs de kust kan optreden; relatief is het effect geringer naarmate de suppletie langer is. Bij suppleties in de actieve zone profiteren aangrenzende kustvakken van verliezen door langtransport in het suppletievak. Bij suppleties buiten de actieve zone kan tombolo-vorming optreden, hetgeen tot aangroei in het suppletievak leidt, doch tot erosie in de aangrenzende vakken.

Conclusies

Uit de simulaties kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- hoe dichter een suppletie bij de kust wordt aangebracht, des te sneller is het effect merkbaar;

- hoe dichters een suppletie bij de kust wordt aangebracht, des te groter is het effect;
- het suppletievolume heeft weinig invloed op de effectiviteit;
- zandwinning op -10 m heeft geen invloed op het suppletiegedrag binnen de beschouwde periode; de invloed op langere termijn valt buiten het kader van deze studie;
- de effectiviteit, zoals die in deze studie is gedefinieerd, is bij versnelde zeespiegelstijging even groot;
- de effectiviteit van suppleties voor de strook tot 200 m uit de kust bedraagt na ca. 5 jaar ongeveer:

Diepte t.o.v. NAP (m)	Effectiviteit (%)
3	55
5	40
7	25
10	< 5

Tabel 1. Effectiviteit van suppleties voor de strook tot 200 m uit de NAP-lijn na ca. 5 jaar, als functie van de aanlegdiepte

Algemeen kan worden geconcludeerd, dat suppleren in de zone tot ca. NAP -7 m het kustgedrag gunstig beïnvloedt.

Bij suppleties in deze zone kunnen verliezen in langsrichting optreden. Relatief wordt dit effect geringer, naarmate de suppleties langer zijn.

De negatieve conclusies t.a.v. suppleties op dieper water worden bevestigd door de literatuur omtrent eerdere ervaringen in het buitenland.

De levensduur van een suppletie wordt bepaald door enerzijds de grootte en de effectiviteit van die suppletie, en anderzijds door de mate van autonome kustachteruitgang. Voor het schatten van de levensduur is een eenvoudige berekeningsmethode afgeleid.

1. INLEIDING

1.1 Studiekader en opdracht

In opdracht van de Dienst Getijdewateren van de Rijkswaterstaat is door het Waterloopkundig Laboratorium een studie uitgevoerd naar de mogelijkheden om de kustontwikkeling met suppleties op de onderwateroever te beïnvloeden. Deze studie dient ter onderbouwing van de Nota Kustverdediging die in 1990 voor de eerste keer definitief moet verschijnen als uitvloeisel van de nieuwe Wet op de Waterkering. Dit rapport is als Nota 14 één van de technisch-wetenschappelijk onderbouwende achtergronddocumenten voor de Nota Kustverdediging.

1.2 Doel en aanpak van de studie

Tegen de achtergrond van de te verwachten zeespiegelstijging en de tendens om onder andere hierdoor optredende kusterosie steeds meer met 'zachte' methoden te bestrijden, streeft DGW naar het optimaliseren van dergelijke methoden. Enkele bezwaren van de veel toegepaste strandsuppleties zijn:

- overlast gedurende de aanleg;
- stuifoverlast voor achterliggende natuur- of woongebieden;
- hoge eisen aan de zandkwaliteit;
- ongunstige belastingen op pijpen door de brandingszone;
- hoge kosten om bovengenoemde bezwaren te reduceren (aanleg in ongunstig seizoen, stuifbepurende maatregelen, duurder zand, hoge eisen aan pijpen en verbindingen);
- initieel vaak een sterke achteruitgang, hetgeen vooral psychologisch ongunstig is.

De bovengenoemde bezwaren worden opgeheven of sterk verminderd bij toepassing van suppleties buiten de brandingszone. De gedachte achter dergelijke suppleties is (zie ook WL-rapport H316-C -overwegingen ten aanzien van de bestrijding van kusterosie) dat de verschijnselen die tot ingrijpen nopen op een dieper niveau, namelijk dat van de vooroevererosie, worden aangepakt. Hierdoor wordt het strand veel geleidelijker aangepast, of zelfs in het ideale geval slechts op zijn plaats gehouden, zodat de natuurlijke begroeiing het tempo van de veranderingen kan bijhouden.

Een voorwaarde voor de toepassing van dergelijke vooroever-suppleties is uiteraard wel dat er een aantoonbaar gunstig effect is van deze ingrepen op de vooroever op de gesignaleerde problemen. Eerdere berekeningen met het CROSTRAN-model (WL-rapporten H518 en H596) lieten reeds zien, dat zanddammen op relatief diep water de strandontwikkeling niet aantoonbaar beïnvloeden. Terras-achtige suppleties op ondieper water lieten echter wel degelijk een gunstige invloed zien.

De aanpak die bij dit onderzoek is gekozen hangt nauw samen met de vraagstelling, om binnen een beperkte tijd tot praktische antwoorden op complexe vragen te komen. Dit vereist een 'ingenieurs'-aanpak waarbij de nadruk meer ligt op het oplossen van vereenvoudigde problemen dan op het wijzen op de onzekerheden die volgen uit de gebruikte schematisaties. Het resultaat is te zien als een 'beste schatting' op grond van de nu aanwezige kennis.

In hoofdstuk 2 wordt een beknopte beschrijving gegeven van het Hollandse kuststelsel en van de toegepaste schematisatie van dit stelsel. In hoofdstuk 3 wordt beschreven hoe met het simulatiemodel CROSTRAN voor een aantal raaien langs de Hollandse kust de autonome ontwikkeling zo goed mogelijk is gesimuleerd. Deze simulaties geven een inzicht in het gedrag en onderscheidend vermogen van het model en dienen tevens als referentie-berekeningen voor de beoordeling van de verschillende varianten.

De feitelijke simulaties van alle suppletievarianten zijn met de meest geslaagde instelling en schematisatie uitgevoerd; dit wordt beschreven in hoofdstuk 4. In hoofdstuk 5 zijn de resultaten sterk gecomprimeerd en in een aantal eenvoudig bruikbare parameters geïntegreerd. In hoofdstuk 6 wordt een schatting gegeven van de effecten van langstransporten aan de hand van enige principeberekeningen met een éénlijn model. In hoofdstuk 7 wordt een eenvoudige methode afgeleid om globaal de levensduur van een onderwateroeversuppletie te schatten. In hoofdstuk 8 wordt de nauwkeurigheid besproken, waarna de belangrijkste conclusies zijn samengevat in hoofdstuk 9. Enige aanbevelingen zijn opgenomen in hoofdstuk 10.

Ten aanzien van het in dit verslag beschreven onderzoek heeft een vrij uitgebreide discussie plaatsgevonden met een aantal personen en instanties; hierbij dienen met name genoemd te worden:

- ir. C.H. Hulsbergen en dr.ir. M.J.F. Stive van het Waterloopkundig Laboratorium;
- prof. dr.ir. E.W. Bijker en dr.ir. J. van de Graaff van de Technische Universiteit Delft;
- de projektgroep Onderbouwing Kustnota van Rijkswaterstaat;
- dr. J. Wiersma van de Dienst Getijdewateren van Rijkswaterstaat;
- prof. dr. J.H.J. Terwindt van de Rijksuniversiteit Utrecht; deze laatste in de positie van externe kwaliteitscontroleur.

Dit verslag moet gezien worden als de weergave van een poging, met de beschikbare kennis en middelen te komen tot een aantal voorlopige ontwerpregels voor het toepassen van onderwateroeversuppleties, voor een beperkt geldigheidsgebied, maar voor zover mogelijk in kwantitatieve zin. Het kan, gegeven de vele beperkingen opgelegd door de onvolledige kennis van het kuststelsel, niet als een definitief handboek gezien worden, maar eerder als een hulpmiddel bij het inrichten van experimenten in het veld. Tevens moet het een indruk geven van enerzijds de vooruitgang die de afgelopen jaren in het kustonderzoek is geboekt, en anderzijds van de nog aanwezige lacunes in de kennis.

2. MODELBESCHRIJVING

2.1 Beschrijving systeem

In het volgende wordt een korte beschrijving gegeven van relevante kuststromende processen. Deze dient slechts om gemaakte keuzen te verduidelijken en is zeker niet bedoeld om een algemeen beeld te geven van de huidige kennis op dit gebied.

We beperken ons in deze studie tot de zandige Hollandse kust, en wel tot dat deel dat buiten de directe invloed valt van getijgeulen en havenhoofden. De tijdhorizon is in de orde van 10 jaar, waarmee het interessegebied in dwarsrichting maximaal enige kilometers beslaat. Globaal beslaat het interessegebied dus ca. 2 km bij 100 km.

Op een lengteschaal van dit gehele gebied en een tijdschaal van jaren geldt ruwweg (zie Nota Kustvoorspelling) dat de langstransportgradienten in de orde van $200.000 \text{ m}^3/\text{jr}$ over ca. 100 km bedragen, oftewel ca. $2 \text{ m}^3/\text{m}'/\text{jr}$. Op deze schaal kan een dynamisch actieve zone worden gedefinieerd waarvan de vorm op een tijdschaal in de orde van een jaar in evenwicht is.

Deze zone strekt zich uit tot ca. 800-1000 m uit de kust. Aan de zee-rand vindt waarschijnlijk een aanvoer van zand plaats, die in het geval van een stabiele kustligging gedeeltelijk wordt gecompenseerd door kustachteruitgang ten gevolge van zeespiegelstijging, en gedeeltelijk door verliezen aan de landzijde door windtransport. Deze transporten lijken te domineren ten opzichte van de netto langstransportgradienten; slechts in het geval van een verstoring van het langstransport spelen de laatste een rol.

Binnen ongeveer een kilometer van de kust wordt de morfologie zowel in langs- als in dwarsrichting voornamelijk bepaald door de golven; getijstrooming is hierin van ondergeschikte betekenis, althans op de beschouwde tijdschaal.

Op een schaal van enige tot tientallen kilometers langs de kust kunnen zogenaamde zandgolven een grote rol spelen, zie bijvoorbeeld Maranus en Verhagen (1987) en Nanninga (1984). Dit zijn golfbewegingen van de zandbodem met zeer lange perioden (orde 100 jaar), golf lengten van orde kilometers, die zich langs de kust bewegen, met de kammen ongeveer loodrecht op de kustlijn. Een passende theorie voor dit verschijnsel is niet voorhanden; een mogelijke verklaring is het optreden van instabiliteiten in het langstransport, analoog aan de bevindingen van De Vriend (1988) m.b.t. shoreface-connected ridges op dieper water. De amplituden van deze zandgolven kunnen aanzienlijk zijn en tot volumetoename of afname in een profiel leiden in de orde van $100 \text{ m}^3/\text{m}'/\text{jr}$.

Het lijkt aannemelijk dat dergelijke zandgolven ook een invloed hebben op de profielvorm en het verplaatsingsgedrag van zandbanken. Nanninga vond echter geen enkele correlatie tussen de fase van een zandgolf en dergelijke profielkarakteristieken. Het lijkt dan ook verantwoord het optreden van zandgolven als onafhankelijk gegeven te beschouwen, dat geheel los staat van de in deze studie beschouwde effecten.

Langs een groot deel van de Hollandse kust komen banken voor; een uitzondering vormt het gebied tussen Hoek van Holland en Kijkduin. Op een

lengteschaal van honderden meters tot ongeveer een kilometer langs de kust komen dichtbij de kust systemen voor van banken en muien, die een sterk drie-dimensionaal karakter hebben. Deze kunnen kwalitatief verklaard worden door het optreden van celcirculatiepatronen: het massatransport door golven, dat in een tweedimensionale situatie wordt gecompenseerd door retourstroom nabij de bodem, kan door verschillen in golfopzet boven een bank of boven een mui zijdelings afstromen door de geul direct achter de meest kustwaartse bank en wordt in een geconcentreerde muistroming zeewaarts gevoerd. Het is onduidelijk of dit mechanisme ook de oorzaak is van de bank- en geulvorming bij de meest kustwaartse zandbank, doch het speelt zeker een grote rol in de instandhouding ervan. De vorming van de eerste bank kan gedeeltelijk zijn veroorzaakt door tweedimensionale dwarstransporteffecten; ook het optreden van zogenaamde 'edge waves' kan volgens Nanninga (1984) een rol spelen voor de Hollandse kust. Vaak is een dergelijk systeem niet stabiel in de plaats, maar migreert het langs de kust, waarbij de bank gemiddeld in zeewaartse richting verplaatst. Hierbij is het niet zeker, of de zeewaartse verplaatsing, doordat de banken niet geheel parallel langs de kust lopen, de oorzaak of het gevolg is van de migratie van het celcirculatiesysteem. Een belangrijk gegeven uit het onderzoek van Nanninga is, dat het volume aanzand in een bepaald profiel niet afhangt van de plaats van dat profiel in het celcirculatie-systeem; dit schept ruimte voor het direct beschrijven van het gemiddelde van deze profielen.

Op veel plaatsen komen meerdere banken voor in een profiel. De meest zeewaartse bank lijkt voornamelijk te worden bepaald door tweedimensionale mechanismen dwars op de kustlijn. Hij bevindt zich waarschijnlijk op de overgang van kustgerichte mechanismen als asymmetrietransport en golfgedreven, kustgerichte nettostroom bij de bodem naar van de kust af gerichte, door golfbreking geïnduceerde retourstroom. Op de flanken spelen hellingseffecten een belangrijke rol. In principe is een situatie denkbaar met een stabiele tweede bankvorm. Bij zwaar weer overheerst echter het retourstroom-mechanisme, waardoor de bank zeewaarts verplaatst wordt, terwijl bij rustig weer een migratie naar de kust toe kan voorkomen. Gemiddeld bewegen de meest zeewaartse banken naar zee, waar ze uiteindelijk uitdempen; dit hoeft echter niet te betekenen, dat ook netto zeewaarts transport optreedt.

In de zone waar de banken voorkomen treden over dezelfde periode beschouwd grote zandverplaatsingen op tussen verschillende punten in het profiel, in de orde van $50 \text{ m}^3/\text{m}/\text{jr}$. Op langere termijn lijkt echter een dynamisch evenwicht op te treden in de gemiddelde profielvorm.

2.2 Schematisatie

Doordat niet alle bovenbeschreven mechanismen voldoende bekend zijn, en ook niet alle bekende mechanismen voor ons probleem relevant zijn, wordt de volgende schematisatie toegepast. Uit de toetsing van het model (hoofdstuk 3) moet blijken, of deze schematisaties verantwoord zijn.

De invloed van getijstrooming wordt verwaarloosd aangezien deze dichtbij de kust slechts een geringe invloed heeft op de morfologie.

Dit geldt niet voor duidelijk vooruitgeschoven delen van de kust, zoals nabij de Hondsbossche Zeewering.

De invloed van langstransportgradiënten wordt verwaarloosd. De grootschalige gradiënten zijn in het algemeen klein ten opzichte van de dwarstransportgradiënten. Bij de uiteinden van een suppletie kunnen langstransportgradiënten wel een rol spelen; als echter de lengte van de suppletie in de orde van enige kilometers of meer bedraagt dan zijn dergelijke effecten van ondergeschikt belang. In hoofdstuk 6 wordt apart op deze effecten ingegaan.

De gemiddelde verplaatsing van een kustprofiel ten gevolge van langstransportgradiënten, zandgolven of dwarstransport vanaf dieper water wordt als gegeven beschouwd; er wordt slechts gekeken naar de afwijkingen van de trend ten gevolge van ingrepen of veranderingen in het waterniveau of het golfklimaat.

Er wordt gemiddeld over enige celcirculatie-systemen in langsricting om het ingewikkelde drie-dimensionale probleem te vereenvoudigen tot een twee-dimensionaal probleem. Hierbij gaat natuurlijk informatie verloren; de schaal waarop gekeken wordt is in de orde van kilometers in langsricting. In 3.2 wordt ingegaan op de problemen die samenhangen met een dergelijke middeling.

Swash-effecten rond de waterlijn en transporten door wind worden verwaarloosd, daar de kennis van deze processen te beperkt is. Deze processen kunnen echter wel degelijk een rol spelen; bij de interpretatie dient hier rekening mee te worden gehouden.

Voor het twee-dimensionale systeem dat overblijft, wordt gebruik gemaakt van het CROSTRAN-model, versie januari 1988. In dit model is uiteraard ook gebruik gemaakt van een aantal schematisaties, waarvan de belangrijkste is de aanname in het transportmodel, dat het zandtransport binnen een golfperiode instantaan reageert op de waterbeweging.

De golfhoogte- en richtingsspectra zijn geschematiseerd tot over één dag gemiddelde H_S - en T_p -waarden uit zeewaartse ricting. Daarnaast is voor het asymmetrie-transport een extra bijdrage door de lange deiningscomponent, gekarakteriseerd door H_{E10} en T_{E10} -waarden, in rekening gebracht.

2.3 Morfologisch profielmodel

Het hier toegepaste 2-dimensionale morfologische model 'CROSTRAN' is een voortzetting van de door Stive en Battjes (1984) en Stive (1986) ontwikkelde modellen. In het kader van het project 'Onderwaterzanddammen' van RWS-DGW

(WL-rapport H596, Roelvink (1988)) is een verificatie van het model uitgevoerd d.m.v. proeven op grote schaal in de Deltagoot (zie ook Roelvink en Stive, 1988a). Aan de hand van deze proeven is het model op een aantal punten verbeterd. De versie die bij deze studie gebruikt is, is beschreven in Roelvink en Stive (1988b).

Vanaf de eerste versie is het basis concept het volgende: de golfhoogte-verdeling over het profiel wordt berekend met een robuust en

weinig reken intensief, één dimensionaal golfmodel, ENDEC (Battjes en Janssen 1978, Battjes en Stive 1985). Vervolgens wordt het door de golven aangedreven stromingsveld geacht lokaal af te hangen van een aantal karakteristieken van het (onregelmatige) golfveld, zoals de golfenergie, de energie dissipatie en de massaflux boven gemiddeld dalniveau. De door het toegepaste transportmodel gebruikte stromingsparameters, zoals de retourstroom en de orbitaalbeweging, worden lokaal uit deze golfparameters berekend, waarna het transportverloop over het profiel kan worden berekend met een te kiezen transportmodel. Door nu de volumebalans op te lossen kunnen profielveranderingen worden berekend; met een geschikte numerieke methode wordt de bodem na een zekere tijdstap berekend, waarna het gehele proces herhaald wordt. In het eerste model 'OSTRAN' van Stive en Battjes (1984) werd een transportformulering gebruikt van de vorm:

$$q = B_1 \int_0^h \bar{u}(z) \bar{c}(z) dz \quad (1)$$

waarbij:

q	= transport	(m ³ /m'/s)
$\bar{u}(z)$	= tijdgemiddelde horizontale snelheid	(m/s)
$\bar{c}(z)$	= tijdgemiddelde concentratie	m ³ /m ³)
z	= hoogte boven bodem	(m)
h	= waterdiepte	(m)
B ₁	= coefficient	(-)

Een dergelijke formulering is een redelijke benadering (zie Appendix) als er één duidelijk overheersende transportrichting is, die wordt bepaald door de tijdgemiddelde stroming. Het is een veel gebruikte schematisatie bij langtransport; ook voor duinafslagomstandigheden blijkt het een redelijk concept; in 'DUROSTA' (Steetzel, 1987) wordt deze schematisatie ook toegepast.

Voor omstandigheden die bepalend zijn voor de lange termijn-morfologie geldt niet, dat één proces of transportrichting overheersend is; op termijn bestaat een 'dynamisch evenwicht' tussen een aantal kust- of zeewaarts gerichte processen. Hierbij is het van belang koppelingen tussen concentraties en snelheden op kleine tijdschalen, die een netto effect teweeg brengen, in de beschouwing te betrekken. Als bij benadering gesteld kan worden dat de snelheid in het gebied waar significante concentraties optreden niet sterk varieert over de hoogte, dan geldt de volgende benadering (zie Appendix):

$$q = B_2 \frac{1}{T} \int_0^T \bar{u}_z(t) L(t) dt \quad (2)$$

waarbij:

$\bar{u}_z(t)$	= diepte gemiddelde snelheid nabij de bodem	(m/s)
L(t)	= totale sediment last	(m ³ /m ²)
T	= periode waarover gemiddeld wordt	(s)
B ₂	= coefficient	

Op het ogenblik is de enige bestaande transportformule die op een dergelijke manier de koppeling tussen snelheid en sedimentlast in rekening brengt, die van Bailard (1981) naar het concept van Bagnold (1966).

Hoewel $L(t)$ op een ingewikkelde en voorlopig niet te beschrijven manier afhangt van $\bar{u}_z(t)$, neemt Bailard aan dat $L(t)$ bij benadering instantaan reageert op $\bar{u}_z(t)$, zodat geschreven kan worden:

$$q = B_2 \frac{1}{T} \int^T f[\bar{u}_z(t)] dt \quad (3)$$

De functie $f[\bar{u}_z(t)]$ is de som van twee eenvoudige machtsfuncties van $\bar{u}_z(t)$.

Naast deze termen bevat de Bailard formule nog twee termen, die het effect van de zwaartekracht op het sedimenttransport op of boven een hellende bodem in rekening brengen. Deze termen hangen behalve van de bodemhelling, af van machten van de absolute grootte van de snelheid. De gehele formulering zoals die in deze studie is toegepast luidt nu:

$$q = \frac{c_f}{\Delta g N} \frac{\epsilon_B}{\tan \phi} [B_{cc} \langle |u|^2 u \rangle - B_{SL} \frac{\tan \beta}{\tan \phi} \langle |u|^3 \rangle] + \frac{c_f}{\Delta g N} \frac{\epsilon_S}{w} [B_{cc} \langle |u|^3 u \rangle - B_{SL} \frac{\epsilon_S}{w} \tan \beta \langle |u|^5 \rangle] \quad (4)$$

Hierin stellen de $\langle \rangle$ middeling over de tijd voor, $\tan \beta$ is de bodemhelling, $\tan \phi$ de hoek van interne wrijving, c_f is een coefficient, Δ is de relatieve dichtheid, g de zwaartekrachtsversnelling, N het percentage vaste stof, ϵ_B en ϵ_S coefficienten en w de valsnelheid; B_{cc} en B_{SL} zijn overall ijkfactoren.

De coefficient c_f wordt gelijk gesteld aan $\frac{1}{2} f_w$ uit:

$$f_w = \exp [-5.977 + 5.213 (a_b/r)^{-1.94}] \quad (5)$$

waarin a_b de rms-amplitude van de orbitaaluitwijking is en r gelijk wordt gesteld aan $2.5 * D_{50}$. Voor de efficiency factoren ϵ_B en ϵ_S wordt respectievelijk 0.10 en 0.02 aangehouden; B_{cc} en B_{SL} hebben een waarde van 1.0 resp. 2.0.

Door Stive (1986) is dit transportmodel gekoppeld aan het golfvoortplantings-model ENDEC. De waterbeweging wordt hier geschematiseerd tot een retourstroom door brekende golven volgens Stive en Wind (1986) met daarop gesuperponeerd een asymmetrische orbitaalsnelheid volgens 2^{de}-orde Stokes'-theorie.

In het kader van het project 'Onderwater zanddammen' (H596) heeft een verificatie van het model plaatsgevonden, door middel van grote-schaal proeven in de Deltagoot. Mede naar aanleiding van deze proeven is een aantal verbeteringen en uitbreidingen aangebracht: het retourstroommodel is vervangen door het meer geavanceerde model volgens Stive en de Vriend (1987), het 2^{de}-orde Stokes' model is vervangen door een hogere orde theorie volgens Rienecker en Fenton (1981) en het numerieke schema is verbeterd. Het transportmodel als zodanig bleek redelijk te voldoen; de beschrijving van de waterbeweging leverde problemen op t.a.v. groepsgebonden lange-golf effecten en de energie dissipatie term, zie Roelvink (1988) en Roelvink & Stive (1988a).

In het kader van het Toegepast Onderzoek Waterstaat, werkgroep Stromingen, is aan de hand van eerder uigevoerde proeven in de Scheldegoet dieper ingegaan op de laatste twee effecten; voor de energie dissipatie

tieterm is een meer bevredigende formulering gevonden, terwijl voor het effect van de groepsgebonden lange golven een voorlopige, gedeeltelijk empirische oplossing is gevonden; de resultaten zijn beschreven in Roelvink en Stive (1988b). In deze publikatie is het gehele model zoals dat hier is toegepast beschreven.

Samenvattend kan gesteld worden, dat het nu toegepaste model een redelijk, kwalitatief beeld geeft van morfologische veranderingen in 2-dimensionale situaties.

De onnauwkeurigheid van bijvoorbeeld voorspelde erosie-sedimentatie hoeveelheden ligt voor de onderzochte (laboratorium-)situaties rond een factor 2.

3. TOETSING MODEL

3.1 Inleiding

Het doel van de uitgevoerde studie is, het effect van verschillende scenario's van onderwateroever-suppleties op voor de kustbeheerder belangrijke parameters te bepalen. Zulke parameters kunnen zijn de ligging van een bepaalde dieptelijn of het volume van een bepaalde strook.

Met een op fysische grondslag berustend wiskundig model kan de profielontwikkeling worden gesimuleerd bij verschillende scenario's, waaronder het 'nul'- scenario, de autonome ontwikkeling. Op eenzelfde manier als in de werkelijkheid op basis van metingen zou geschieden, kunnen uit de gesimuleerde profiel ontwikkelingen de belangrijke parameters worden berekend. Vervolgens wordt de ontwikkeling van deze parameters in de tijd vergeleken met de gesimuleerde autonome ontwikkeling.

De nauwkeurigheid van het berekende effect op de parameters en de bereikbare mate van detail worden bepaald door de kwaliteit van het model. Als de berekende autonome ontwikkeling reeds belangrijk afwijkt van de waargenomen ontwikkeling is het de vraag of de berekende verschillen in de ontwikkeling van parameters te vertrouwen zijn.

Het zou zeer wenselijk zijn, het model te kunnen iken aan een eerder gepleegde en goed gedocumenteerde ingreep op de onderwateroever. Helaas ontbreken dergelijke gegevens in de literatuur. Er zijn slechts enkele gevallen bekend van eerder uitgevoerde suppleties op de onderwateroever; deze gevallen speelden op betrekkelijk diep water en zijn zodanig gedocumenteerd, dat ze slechts een kwalitatieve indicatie kunnen geven.

Behalve de eerder uitgevoerde verificaties in 2-dimensionale gootproeven kan dus slechts het gedrag van het simulatiemodel in vergelijking met de autonome ontwikkelingen langs de Hollandse kust een indicatie geven van de kwaliteit van het model. Hier wordt in sectie 3.2 op ingegaan.

3.2 Autonome ontwikkeling

Zoals reeds gezegd in 3.1, is voorlopig de enige indicatie voor de bruikbaarheid van dit 2-dimensionale model het vermogen ervan om natuurlijke ontwikkelingen te beschrijven. De moeilijkheid hierbij is, dat het niet mogelijk is, een gedetailleerde hindcast voor een aantal raaien uit te voeren. Hiervoor zijn de volgende redenen aan te voeren:

- door zandgolfverschijnselen, zoals besproken in 2.1., en meetonnauwkeurigheden is het bepalen van een gedetailleerde gemiddelde dwarstransportverdeling tussen twee opnames van dezelfde raai in de praktijk niet mogelijk; de fouten die hierbij kunnen optreden zijn dikwijls groter dan de optredende verschillen in dwarstransport en kunnen moeilijk worden afgefilterd;
- door het optreden van celcirculaties treden locale verschillen in profielvorm op; het migreren van deze systemen langs de kust maakt

een analyse op basis van in de tijd opeenvolgende profielmetingen onmogelijk;

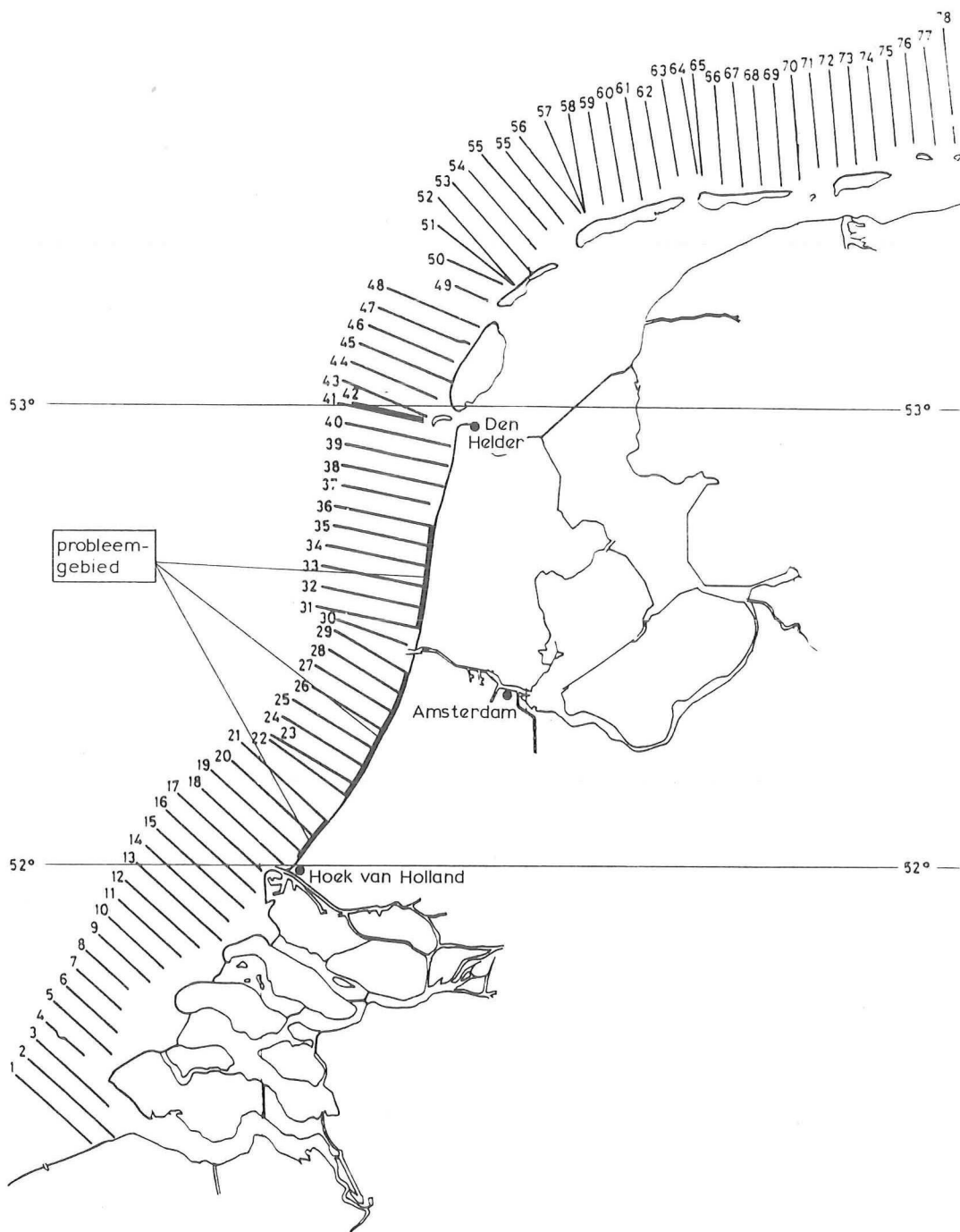
Om deze redenen zal het model aan meer globale karakteristieken van de natuurlijke kustontwikkeling getoetst moeten worden; dit impliceert wel dat bijvoorbeeld binnen de schaal van optredende celcirculaties geen uitspraken gedaan kunnen worden, doch dat gemiddeld wordt over een grotere lengteschaal. Een probleem hierbij is, of middeling in langsrichting over een 3-dimensionaal systeem van banken en muien hetzelfde profiel oplevert als het profiel dat zou optreden in een zuiver 2-dimensionale situatie. Dit is in het algemeen het geval, als de extra bank- en geulvorming door deze circulaties beschouwd mag worden als een lineaire verstoring rond het gemiddeld profiel. In een celcirculatiesysteem worden de banken en geulen extra aangezet, terwijl ter plaatse van de muien het profiel wordt uitgevlakt. Als in een dynamisch evenwicht het zand behouden blijft in het circulatiegebied, is het aannemelijk, dat het '2d'-profiel tussen deze extremen in ligt. Het gemiddeld profiel ligt eveneens tussen de extreme profielen in; behoudens enig vormverschil zal het gemiddeld profiel redelijk kunnen worden beschreven door het '2d'-profiel.

De belangrijkste globale karakteristieken van de profielontwikkelingen langs de Hollandse kust zijn:

- er lijkt een 'dynamisch evenwicht' op te treden in de profielvorm;
- bij de meeste profielen treden banken op; een uitzondering hierop vormen de profielen tussen Hoek van Holland en Kijkduin;
- deze banken bewegen zich over het jaar gemiddeld zeewaarts, hoewel in het centrale deel van de Hollandse kust tijdelijk ook een landwaartse verplaatsing kan optreden.
- de kortdurende en kleinschalige variaties in bijvoorbeeld de ligging van de laagwaterlijn zijn aanzienlijk groter dan de jaarlijkse trends; de eerste liggen in de orde van tientallen meters, terwijl de laatste in de orde van nul tot enige meters bedragen;
- over de afgelopen eeuw gemiddeld geldt ruwweg: de kust erodeert licht tussen Hoek van Holland en Kijkduin (ca. 0.2 m/jaar), groeit tussen Scheveningen en Egmond aan (ca.0.5 m/jaar) en erodeert vrij sterk tussen Egmond en Huisduinen (ca. 1 m/jaar);
- de gemiddelde zandverplaatsingen in het dynamische bankengebied bedragen in de orde van vijftig m/m'/jaar.

Aan de hand van deze karakteristieken kan nu kwalitatief het gedrag van het simulatiemodel beoordeeld worden.

De gemeten kustprofielen waarvan is uitgegaan zijn samengesteld uit JARKUS-metingen en lodingen, verricht in het jaar 1984. Figuur 3.1 geeft een overzicht van het gehanteerde raaienstelsel. In deze studie zijn gebruikt de raaien 20, 25 en 33 voor respectievelijk Delfland, Noordwijk en Egmond.



Figuur 3.1 Gehanteerde raaienstelsel

Voor het afregelen van het model is in eerste instantie een raai bij Egmond gekozen, dus in een gebied waarvan de kustlijn gemiddeld ongeveer stabiel is.

Na een vergelijking tussen op verschillende meetstations gemeten golfklimaten is besloten voor alle raaien uit te gaan van de gegevens van Lichteiland Goeree, omdat de verschillen tussen dit station en andere stations langs de Hollandse kust voor dit doel onbelangrijk leken, en omdat van L.E.G. de beste resultaten beschikbaar waren. Na enige

gevoeligheidsberekeningen is de tijdstap vastgesteld op een dag; de complete tijdreeks van het jaar 1983 in drie- uurlijkse waarnemingen van waterstand, H_S , T_p , H_{E10} en T_{E10} is gecompriemd tot dagelijks gemiddelde waarden. Hierbij is de waterstandsvariatie grotendeels afgefilterd; dit bleek een te verwaarlozen invloed te hebben op de profielontwikkeling. De gemeten H_{E10} -waarden zijn opgevat als deïningscomponent en behandeld zoals aangegeven in 2.2. Bij langjarige berekeningen is telkens dezelfde tijdreeks als invoer herhaald. Het golfklimaat van 1983 komt redelijk overeen met het gemiddelde klimaat; het is dan ook niet te verwachten dat de keuze van een ander jaar tot wezenlijk andere resultaten zou leiden.

De zeewaartse grens van het model is steeds gelegd op 2000 m uit de R.S.P.-lijn. De bodem is na iedere tijdstap van 1 etmaal aangepast.

Voor de modelcoëfficiënten zijn de standaardwaarden gegeven in 2.3 toegepast; voor het bodemmateriaal is overal langs de kust een D50-waarde van 250 mm met een valsnelheid van .025 m/s aangehouden.

Voor de module voor de berekening van de secundaire stroming dient een ruwheidshoogte te worden opgegeven. Deze is in prototype in de orde van centimeters; de parameter is hier gebruikt om het model af te regelen. Bij een waarde van 5 cm bleek de kustlijn zich bij de Egmond-raai op den duur vrijwel periodiek te gedragen. Deze waarde is bij alle verdere berekeningen aangehouden.

Voor de vergelijking van de modelkarakteristieken met de karakteristieken van de natuurlijke ontwikkeling is dezelfde berekening uitgevoerd voor een Delfland-raai en een raai nabij Noordwijk.

In fig. 3.2 t/m 3.4 zijn de profielontwikkelingen in 8 jaar weergegeven. Opgemerkt moet worden dat de uitgangsprofielen willekeurige opnames in ruimte en tijd zijn, waardoor initieel een vrij sterke aanpassing plaatsvindt. Na enige jaren echter stabiliseert de toestand zich en worden de transporten een orde kleiner. Bij alle drie profielen ontstaat in de bovenste ca. 4 meter van het natte profiel een dynamisch stabiele profielvorm, die ook voor alle profielen bij benadering gelijk is.

Verschillen tussen de profielen blijven bestaan in de vorm van het dieper gelegen profiel, en in de verplaatsingssnelheid van het bovenste deel van het profiel.

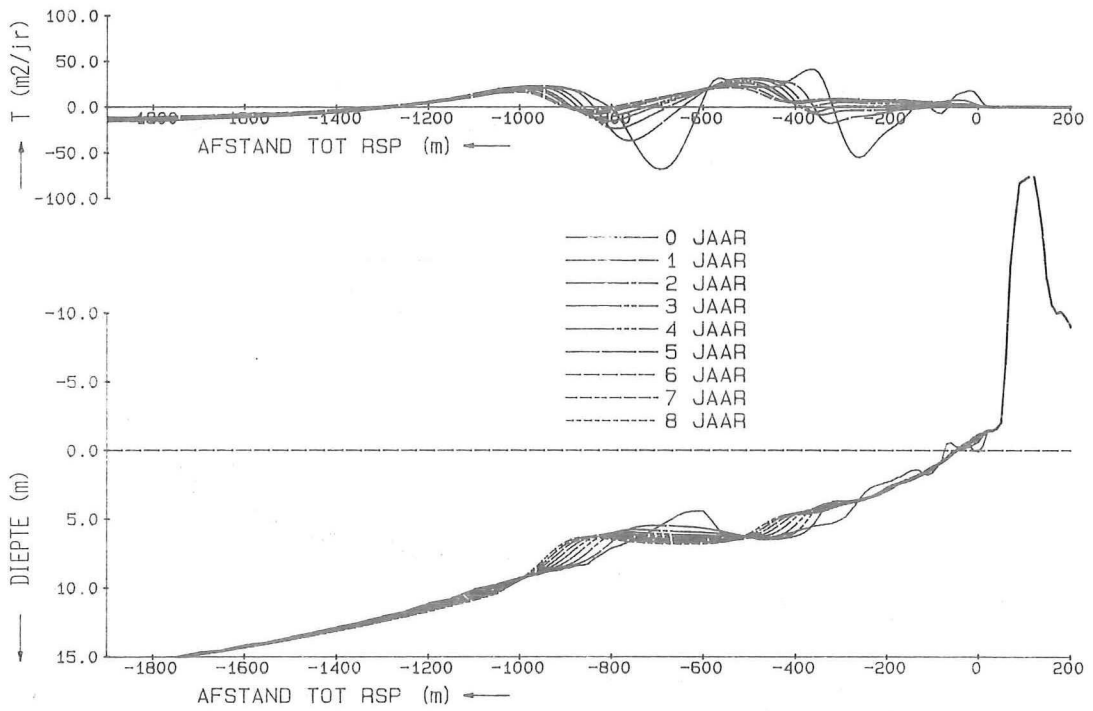


Fig. 3.2 Profielontwikkeling en transporten
Egmond raai 0-8 jaar, $D_r = 0.05$ m

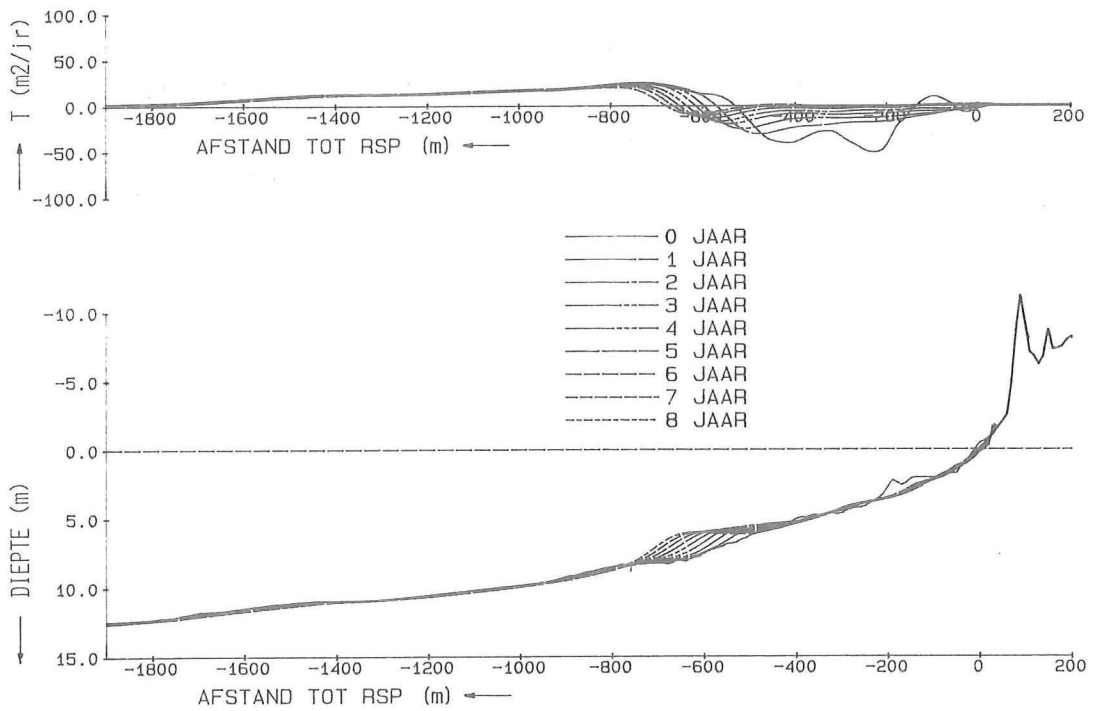


Fig. 3.3 Profielontwikkeling en transporten
Delfland raai 0-8 jaar, $D_r = 0.05$ m

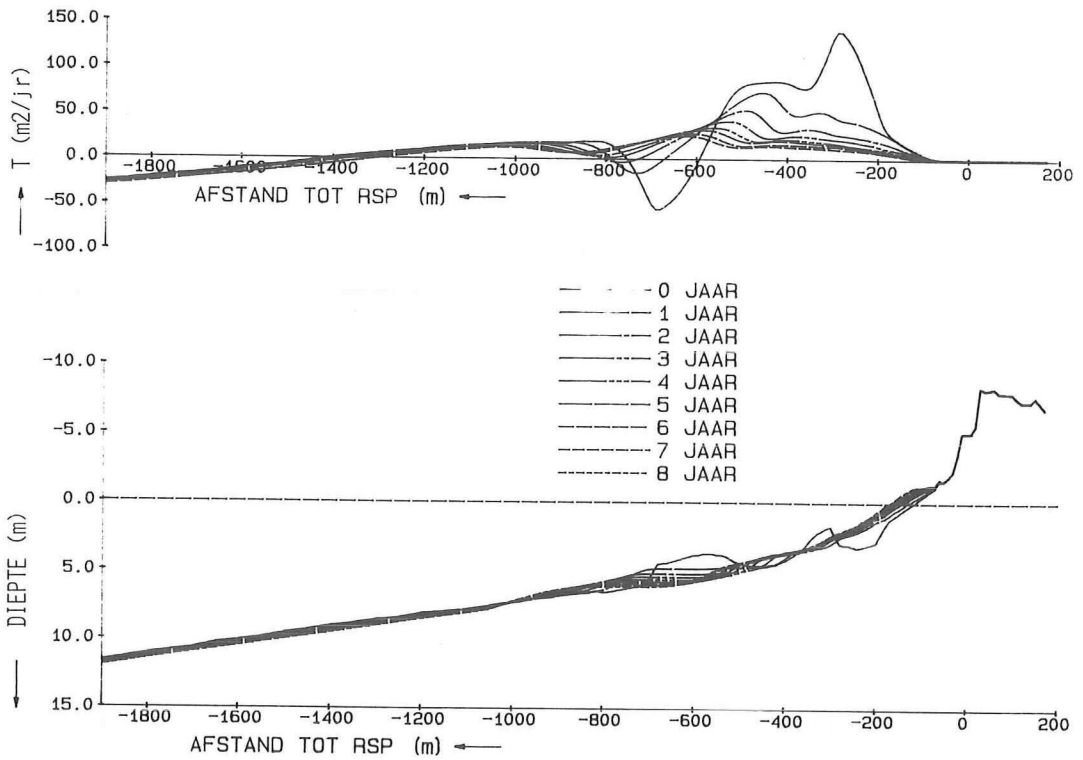


Fig. 3.4 Profielontwikkeling en transporten
Noordwijk raai 0-8 jaar, $D_r = 0.05$ m

Voor het vertrouwen in de modelberekeningen is het belangrijk, vast te stellen dat het profiel dat zich ontwikkelt niet belangrijk afwijkt van de aanwezige profielen. In figuren 3.5 t/m 3.7 worden de berekende profielen na 2 jaar vergeleken met een aantal omliggende profielen. Op de meeste punten liggen de berekende profielen binnen de natuurlijke omhullenden van de profielen.

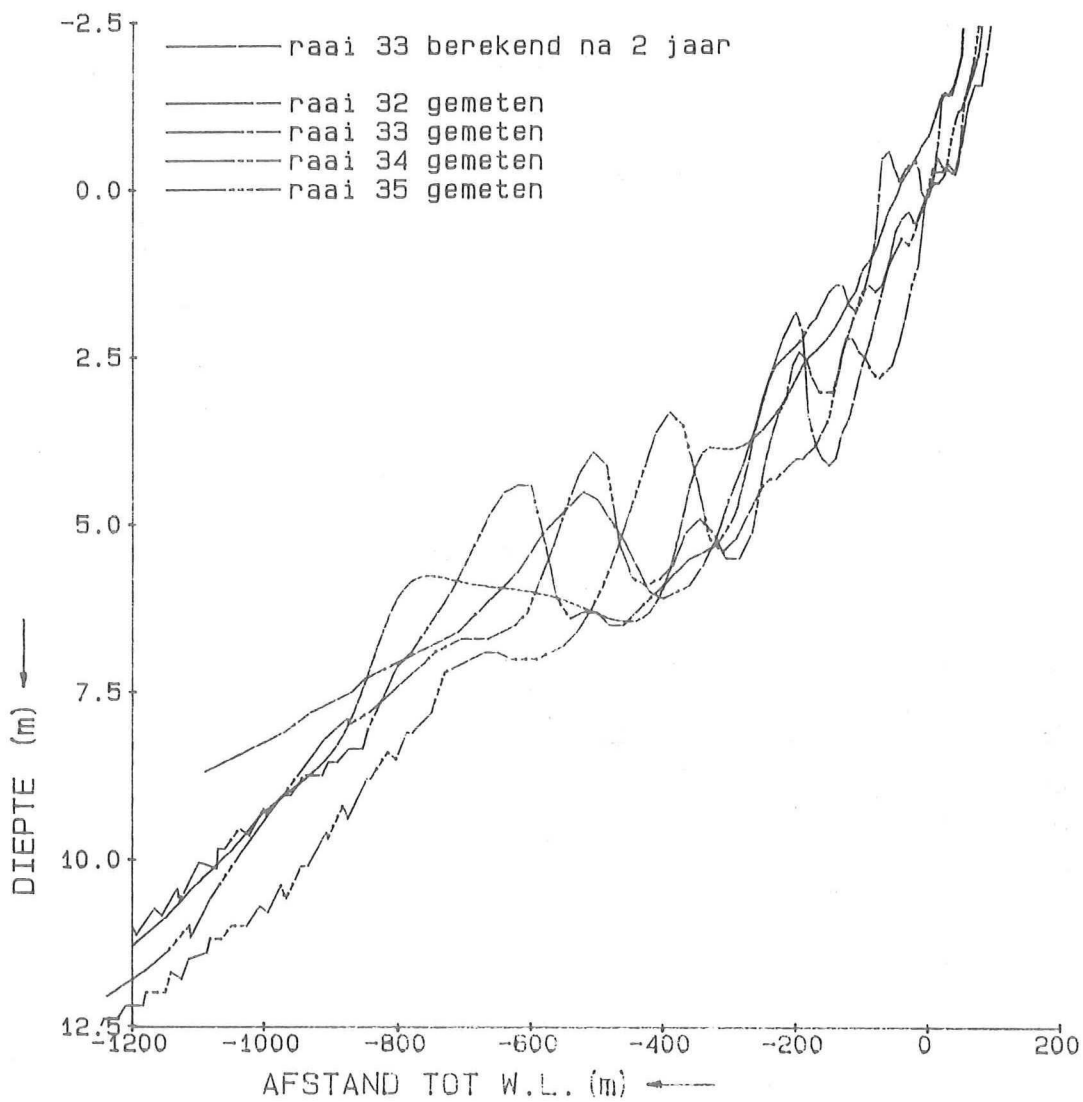


Fig. 3.5 Egmond raai na twee jaar vs. omliggende profielen 32 t/m 35

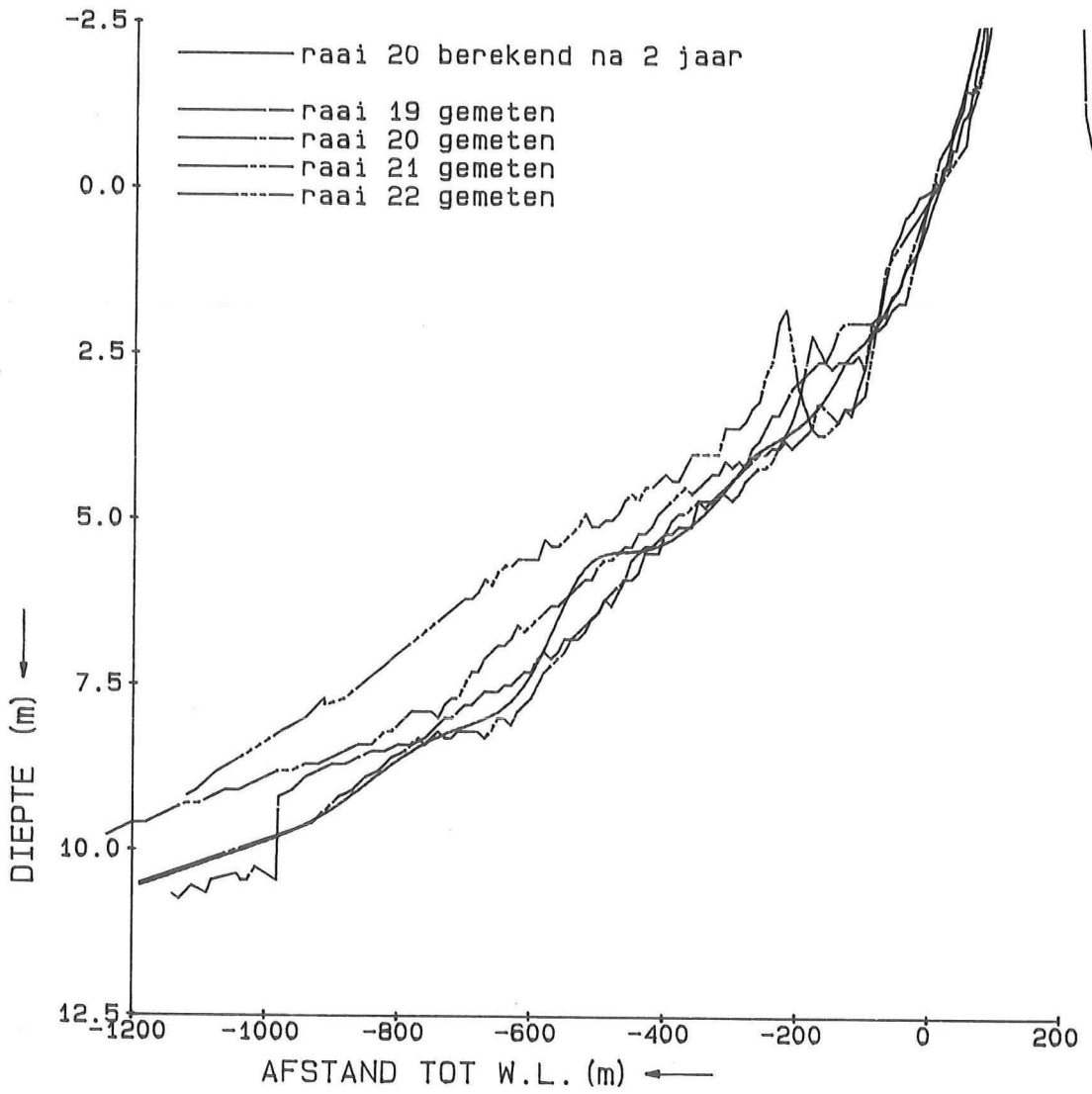


Fig. 3.6 Delfland raai na twee jaar vs. omliggende profielen
19 t/m 22

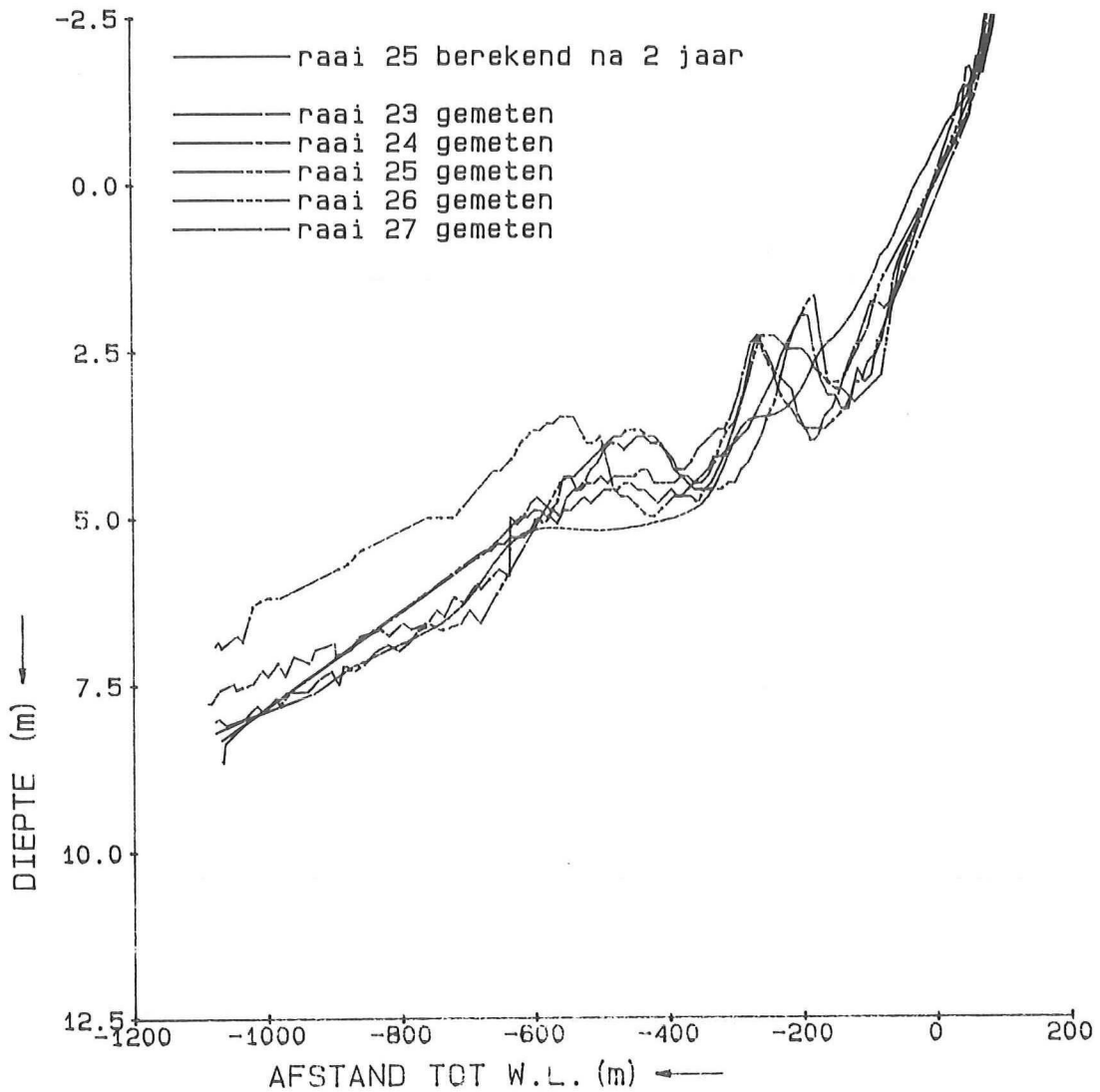


Fig. 3.7 Noordwijk raai na twee jaar vs. omliggende profielen
23 t/m 27

Ter vergelijking is in figuur 3.8 een niet afgeregelde berekening van de ontwikkeling van de Delfland-raai weergegeven met een ruwheids-waarde van 1 cm. Dit toont eens te meer de noodzaak aan, de parameters af te stellen op de langjarige profielontwikkelingen.

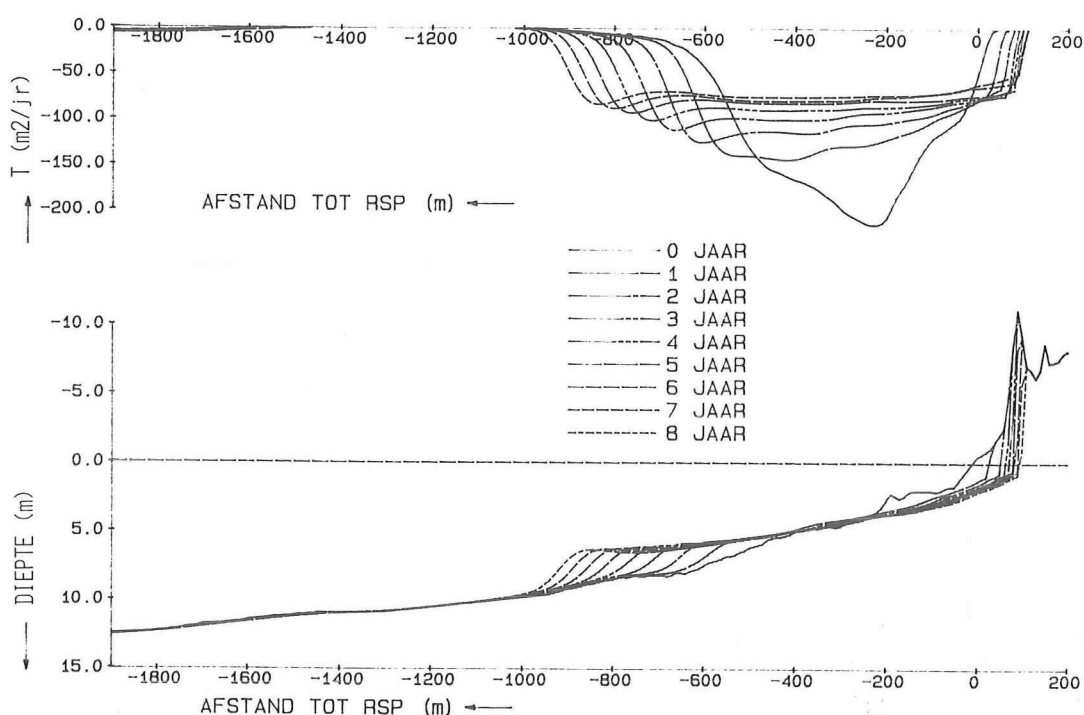


Fig. 3.8 Profielontwikkeling en transporten
Delfland raai 0-8 jaar, $D_r = 0.01$ m

In tegenstelling tot eerdere versies van het model heeft deze versie niet de neiging iedere bankvorming te onderdrukken; met name door het modelleren van een traagheidseffect in het brekingsproces kunnen in principe banken blijven bestaan. Dit is bij de Egmond-raai het sterkst zichtbaar; in mindere mate bij de Noordwijk- en de Delfland-raai.

Over de meest zeevaartse bank kan voor Egmond en Noordwijk worden gesteld, dat hij als vorm te onderscheiden blijft; gemiddeld vindt een migratie in zeevaartse richting plaats, waarbij de amplitude afneemt. Dit gedrag is redelijk in overeenstemming met het beeld zoals bijvoorbeeld geschetst door Nanninga (1984).

De meest kustwaartse bank houdt niet stand; blijkbaar spelen andere processen, zoals genoemd in 2.1, hier een grote rol. De profielvorm over de bovenste 4 m van het natte profiel komt echter redelijk overeen met de tijdgemiddelde profielvorm.

De omvang van het gebied, waar duidelijk een interactie tussen profiel en transportverloop plaatsvindt, de 'dynamische' of 'aktieve' zone, kan worden afgeleid uit de transportverlopen in fig. 3.2 t/m 3.4. Deze zone strekt zich uit tot ca. 800-1000 m uit de kust, tot een diepte van ca. 8 m. Door de zeerand van dit gebied wordt bij alle profielen in de orde van $10 \text{ m}^3/\text{m}'/\text{jaar}$ aangevoerd. Dit zand wordt echter bij de verschillende profielen op andere plaatsen afgezet, zodat het bovenste deel van het profiel in het ene geval aanzandt, en in het andere geval erodeert. Als maat voor het kustgedrag kan worden genomen de verplaatsing van de -1 m lijn in de tijd tussen 2 en 7 jaar na de start van de berekening, zie fig. 3.9 t/m 3.11. Ter vergelijking worden de berekende waarden hiervan voor de drie raaien gegeven:

Delfland : ca. -1.5 m/jaar
Noordwijk: ca. + 4 m/jaar
Egmond : ca. 0 m/jaar

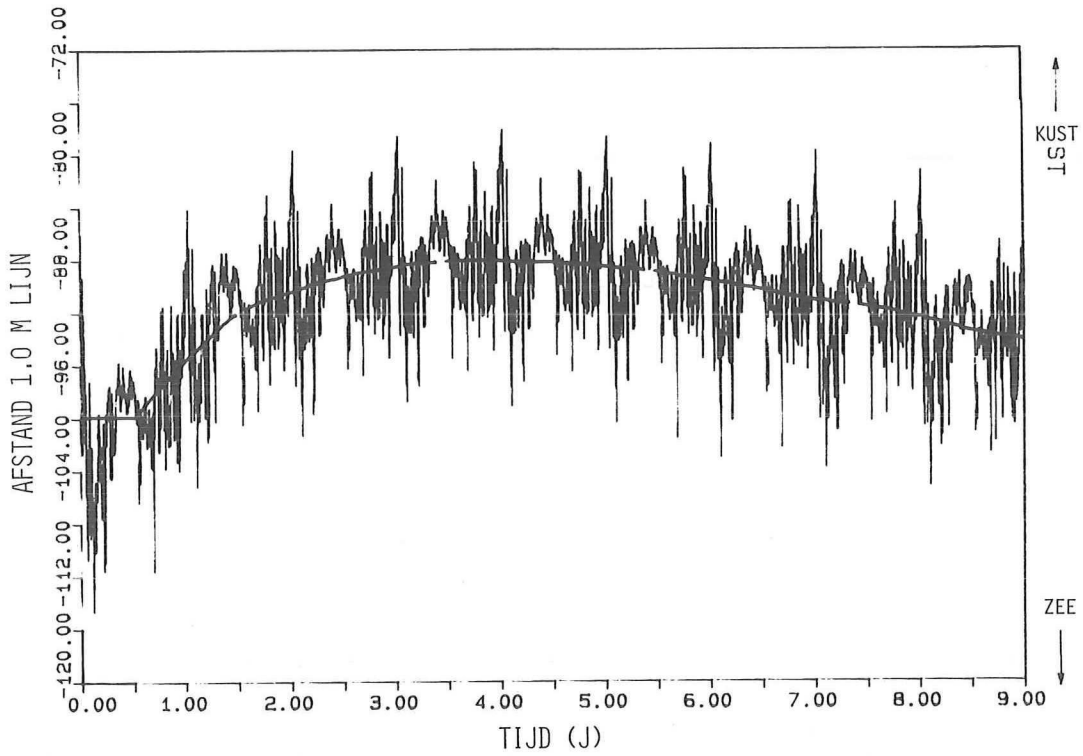


Fig. 3.9 Verloop 1 m dieptelijn in de tijd; Egmond raai

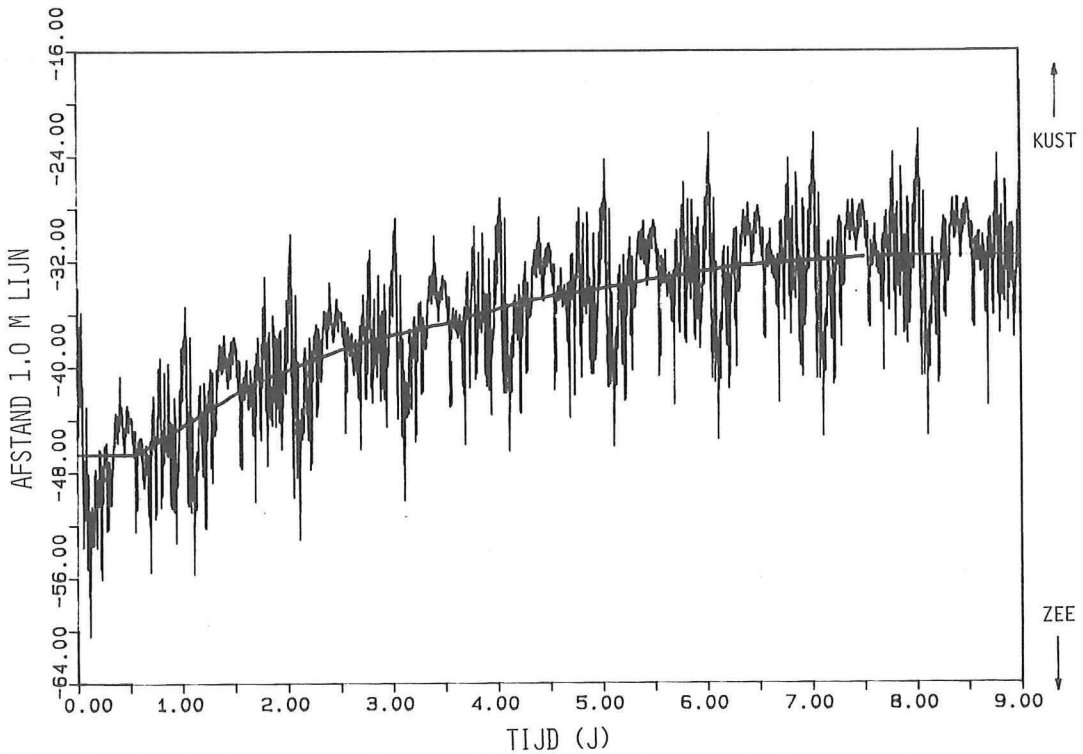


Fig. 3.10 Verloop 1 m dieptelijn in de tijd; Delfland raai

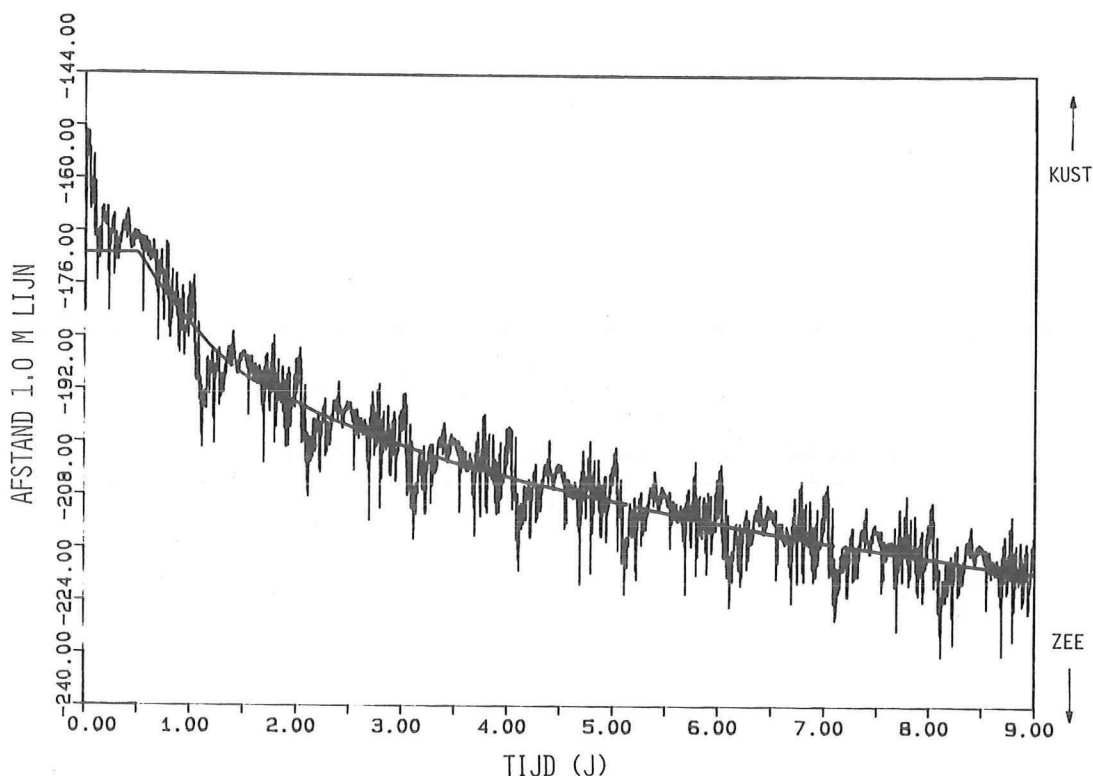


Fig. 3.11 Verloop 1 m dieptelijn in de tijd; Noordwijk raai

Deze getallen zijn uiteraard indicatief; met uitwisseling van zand tussen nat profiel en duinen door windtransport is bijvoorbeeld geen rekening gehouden. Toch kunnen blijkbaar uit globale verschillen in profielvorm langdurige verschillen in kustlijngedrag verklaard worden. Een belangrijke parameter hierbij lijkt de hoeveelheid zand in de actieve zone te zijn; deze is in Noordwijk duidelijk groter dan voor Egmond, dat weer een weinig meer zand bevat dan Delfland. In onderstaande tabel staan de hoeveelheden zand in een rechthoek tussen NAP -8 m en NAP +0 m vermeld.

Delfland : ca. 2350 m³/m'
 Noordwijk: ca. 3700 m³/m'
 Egmond : ca. 2450 m³/m'

Het Noordwijk-profiel heeft duidelijk zeer veel meer zand in de actieve zone; nemen we aan, dat de Egmond-raai ongeveer in evenwicht is, dan zal de waterlijn van de Noordwijk-raai reageren op dit overschot door zeewaarts te verplaatsen; op deze manier wordt het volume van de actieve zone verkleind met ongeveer de verplaatsingssnelheid maal de hoogte van de actieve zone, dus met ongeveer $4 * 8 = 32 \text{ m}^3/\text{m}'/\text{jaar}$. Het is te verwachten dat dit tempo afneemt naarmate het profiel dichter bij een evenwichtssituatie komt, zodat het in de orde van vijftig tot honderd jaar zou duren, voordat het profiel echt in evenwicht is. Doordat de actieve zone intussen gevoed wordt vanuit dieper water en door langs- transportgradienten, zal dit evenwicht waarschijnlijk nooit bereikt worden. De hypothese van Edelman (1967), blz. 18, dat de verschillen in jaarlijkse trends worden veroorzaakt door verschillen in profielvorm, wordt dus door dit model bevestigd.

De kortdurende variaties van de -1 m lijn zijn groot, in de orde van 20 m, ten opzichte van de jaarlijkse trends. Dit is in overeenstemming met het beeld dat uit zogenaamde 'bliksemgrafieken' wordt verkregen.

De transportverschillen over de banken zijn in de orde van tientallen $m^3/m'/\text{jaar}$ en daarmee van de goede orde van grootte. Op grond van het bovenstaande kan worden geconcludeerd, dat de genoemde globale karakteristieken van de profielontwikkelingen langs de Hollandse kust kwalitatief goed worden weergegeven door het model. Een uitzondering hierop wordt gevormd door de meest kustwaartse banken bij de Egmond- en Noordwijk-raaien.

Aan het begin van deze sectie is reeds gesteld, dat een gedetailleerde ijking van het model aan waargenomen profielontwikkelingen niet goed mogelijk is. Toch is ter illustratie van die moeilijkheid een poging hiertoe ondernomen. Bij km-paal 70, 70.5 en 71 zijn in 1983, het jaar waarover gedetailleerde golfgegevens beschikbaar zijn, twee keer de profielen gemeten. Getracht is, het verloop van het gemiddelde van deze profielen 'na te rekenen'. Dezelfde instelling als bij de eerdere berekeningen is gehanteerd, en het betreffende gedeelte van de gemeten tijdreeks van golfrandvoorwaarden is gebruikt. In fig. 3.12 is het resultaat weergegeven. De verschillen tussen gemeten en berekende profielontwikkeling zijn groot. Ten eerste is er een toename in totale inhoud van de gemeten profielen in de orde van $150 m^3/m'$; over de anderhalve kilometer die de profielen beslaan is dit ca. $200.000 m^3$. Dit is van een totaal andere orde dan de globale langstranportgradiënten kunnen veroorzaken, of dan door dwarstransport uit dieper water kan worden aangevoerd. Een gedeelte hiervan kan wellicht verklaard worden door systematische meetfouten; waarschijnlijk spelen ook zandgolven een rol. Ook de profielvorm kan hierdoor waarschijnlijk beïnvloed worden. Voor zover met betrekking tot het modelgedrag enige conclusies kunnen worden getrokken, luiden deze:

de meest kustwaartse bank verplaatst zich in zeewaartse richting, maar vlakt daarbij teveel uit;

de zeewaartse hellingen van de banken blijven goed gehandhaafd;
de berekende transportverschillen over de banken zijn van de goede orde van grootte.

Als conclusie van deze sectie kan gesteld worden, dat met het model geen gedetailleerde weergave van kleinschalige processen kan worden bereikt, doch dat een aantal globale karakteristieken van profielontwikkeling langs de Hollandse kust kunnen worden gesimuleerd. Het gebruik van het model als instrument voor een vergelijkende analyse van het effect van ingrepen in de profielvorm op genoemde karakteristieken lijkt dan ook gerechtvaardigd.

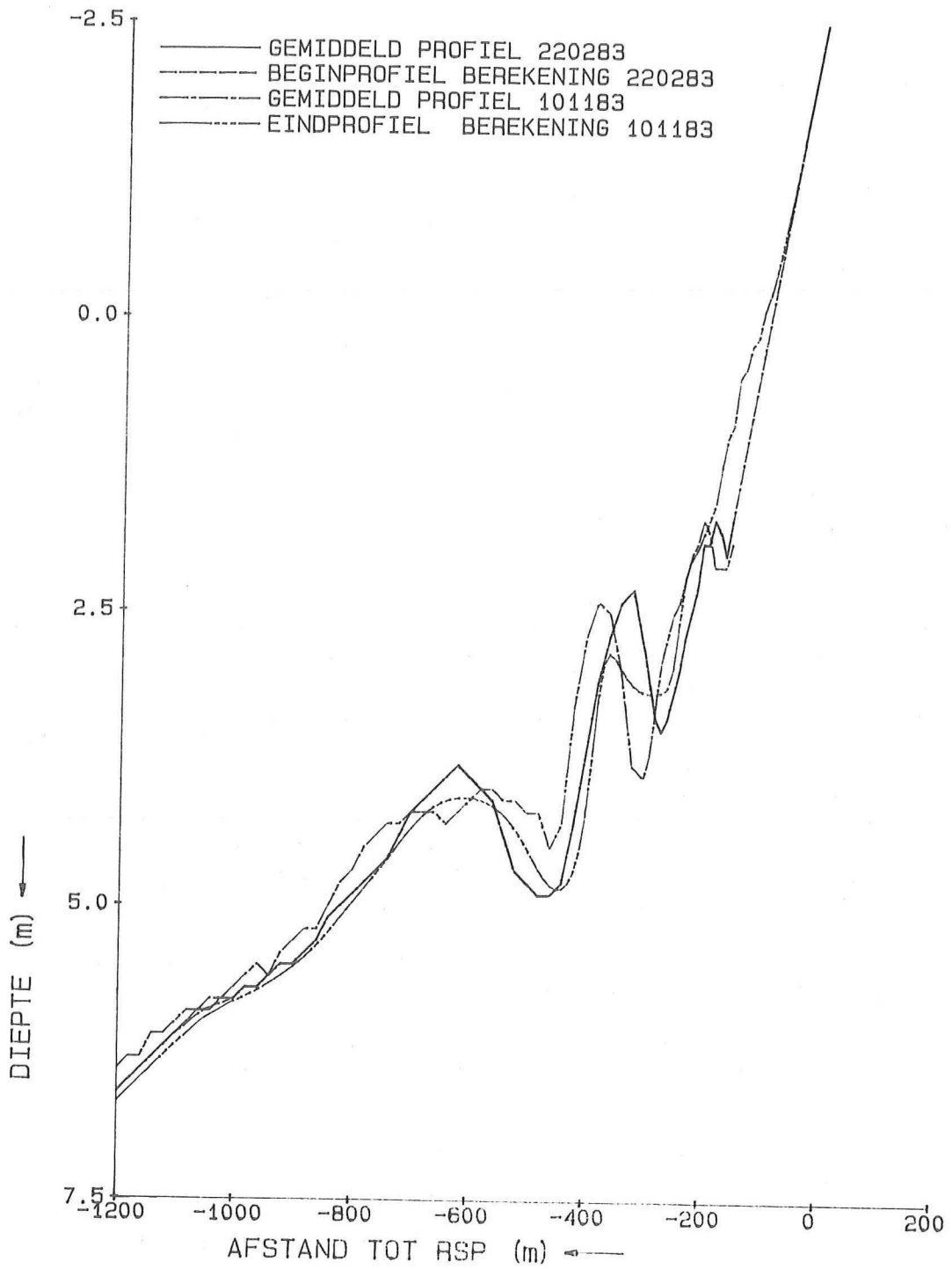


Fig. 3.12 Hindcast gemiddelde van TAW-raaien 70, 70.5 en 71 van 220283 tot 101183

4. SIMULATIES ONDERWATEROEVERSUPPLETIES

4.1 Inleiding

Uit de grilligheid van het verloop van de dieptelijnen (zie fig. 3.9 t/m 3.11) blijkt de moeilijkheid om uit enige waarnemingen per jaar trends te ontdekken; zeer lange bemonsteringstijden zijn nodig. Met dit feit zal ook terdege rekening moeten worden gehouden bij de evaluatie van eventueel uit te voeren onderwateroeversuppleties. Waarschijnlijk zal meer waarde kunnen worden gehecht aan kuberingen over brede stroken, op basis van metingen met een grote ruimtelijke dichtheid. Dan nog kunnen bijvoorbeeld zandgolven de analyse bemoeilijken. Mede met het oog op het mogelijk maken van latere verificatie van de resultaten van deze studie is in de presentatie ervan de nadruk gelegd op de relatieve inhoudsveranderingen van 100 m brede stroken.

Op basis van de in 3.2 gevonden instelling is een aantal simulaties over een periode van 8-10 jaar uitgevoerd, waarbij telkens na twee jaar 'inspelen' een ingreep is gedaan in het profiel. De berekende profielontwikkelingen zijn telkens vanaf dat tijdstip weergegeven; de verschillen tussen deze ontwikkelingen en de autonome ontwikkelingen zijn gekubeerd over stroken van 100 m en in de vorm van histogrammen weergegeven.

De volgende variabelen zijn onderzocht:

- plaats van de suppletie in het profiel,
- grootte van de suppletie,
- verplaatsing vs toevoeging,
- zeespiegelstijging,
- locatie van de suppletie.

De simulaties zijn in principe uitgevoerd voor de Delfland-raai; de invloed van de keuze van de locatie wordt apart behandeld.

4.2 Effect plaats

De invloed van de plaats waar een suppletie wordt aangebracht is onderzocht door een viertal simulaties met diepte van aanleg van resp. NAP -3 m, -5 m, -7 m en -10 m. In alle gevallen is een hoeveelheid van 100 m³/m' aangebracht na 2 jaar inspelen, in een laagdikte van 1 m. Twee aspecten zijn van belang: ten eerste, hoe snel de dichtbij de kust gelegen stroken profiteren van een suppletie, en wat op langere termijn de winst is voor deze stroken.

In fig. 4.1 t/m 4.4 zijn de ontwikkelingen van de profielen met suppleties weergegeven, en de volumeverandering per strook in de tijd, ten opzichte van de berekende autonome ontwikkeling en uitgedrukt als percentage van het aangebrachte volume.

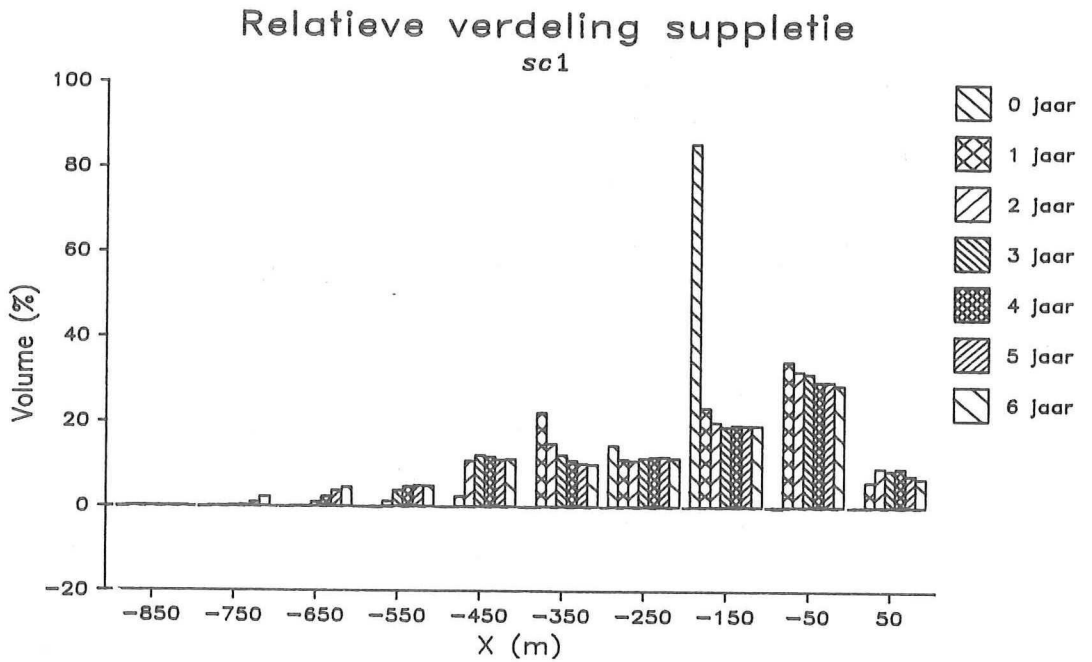
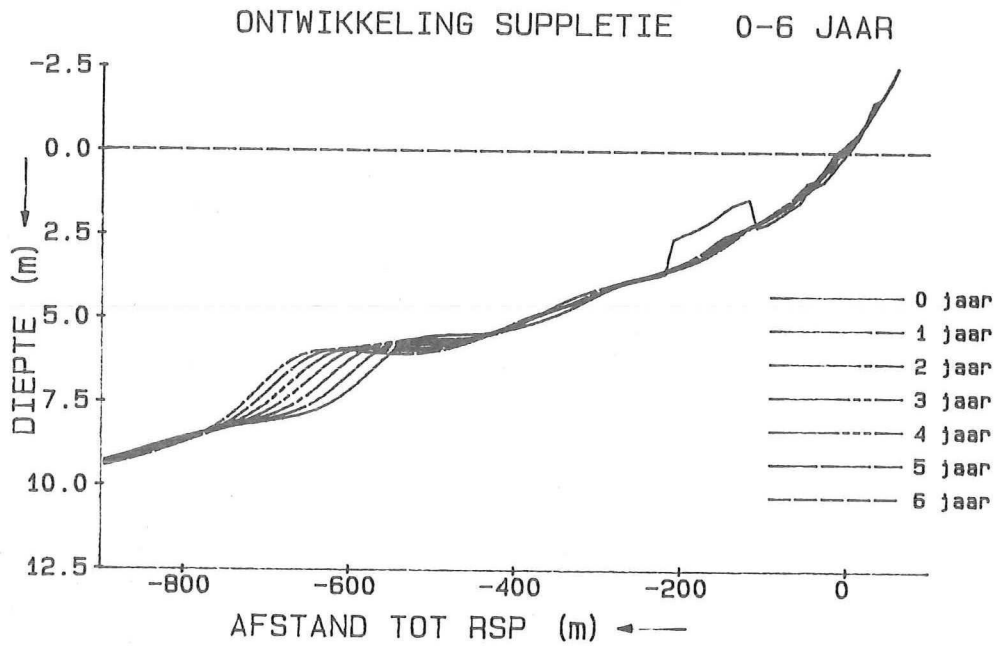


Fig. 4.1 Ontwikkeling en relatieve verspreiding 100 m² suppletie op -3 m, Delfland

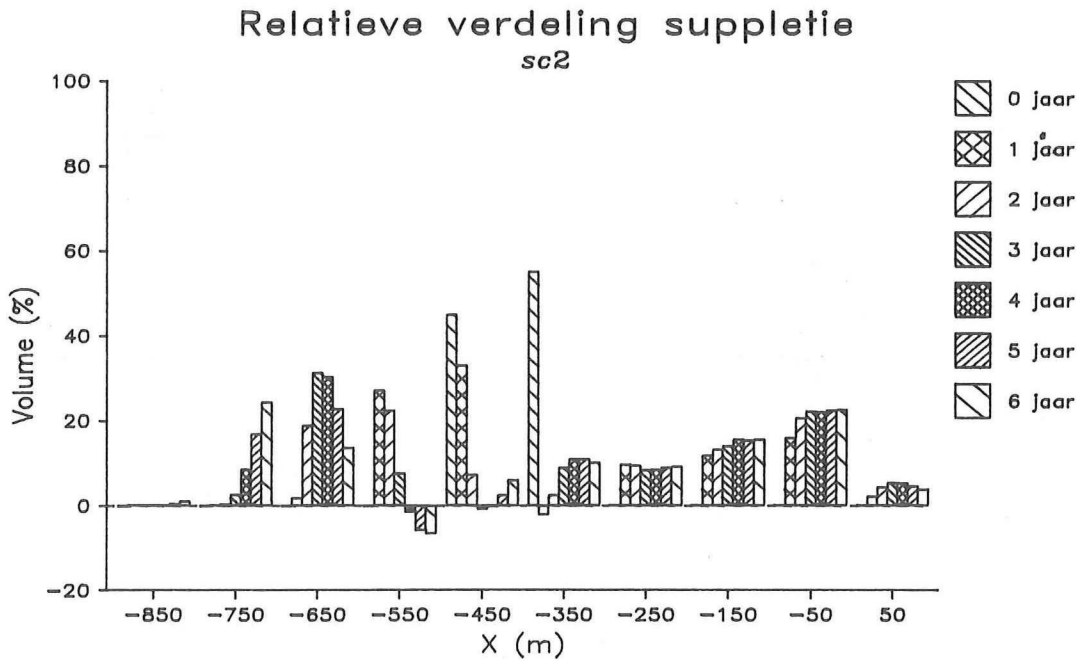
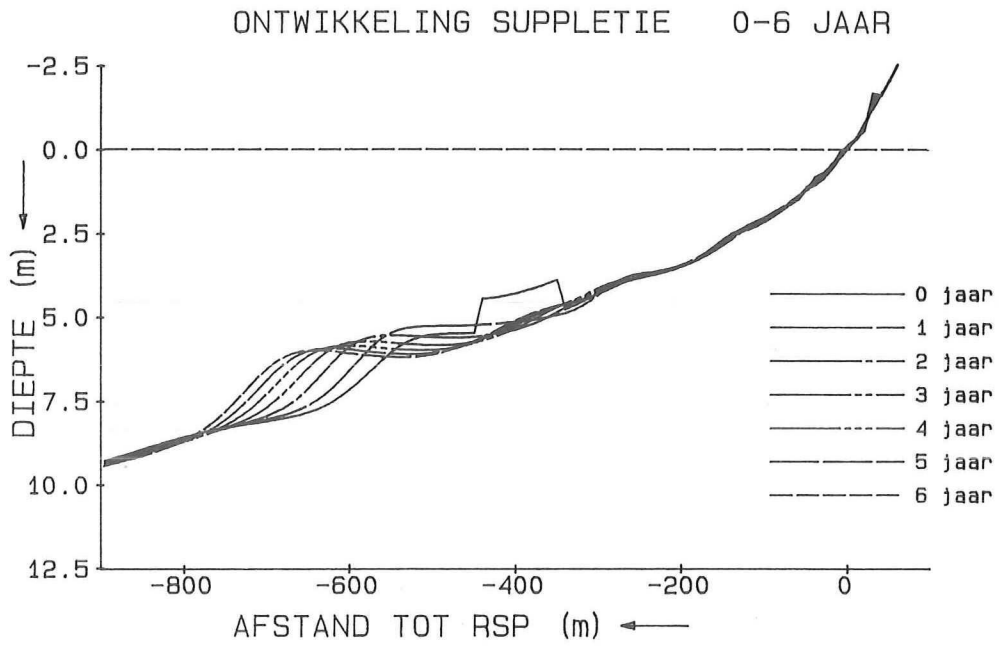


Fig. 4.2 Ontwikkeling en relatieve verspreiding 100 m² suppletie op -5 m, Delfland

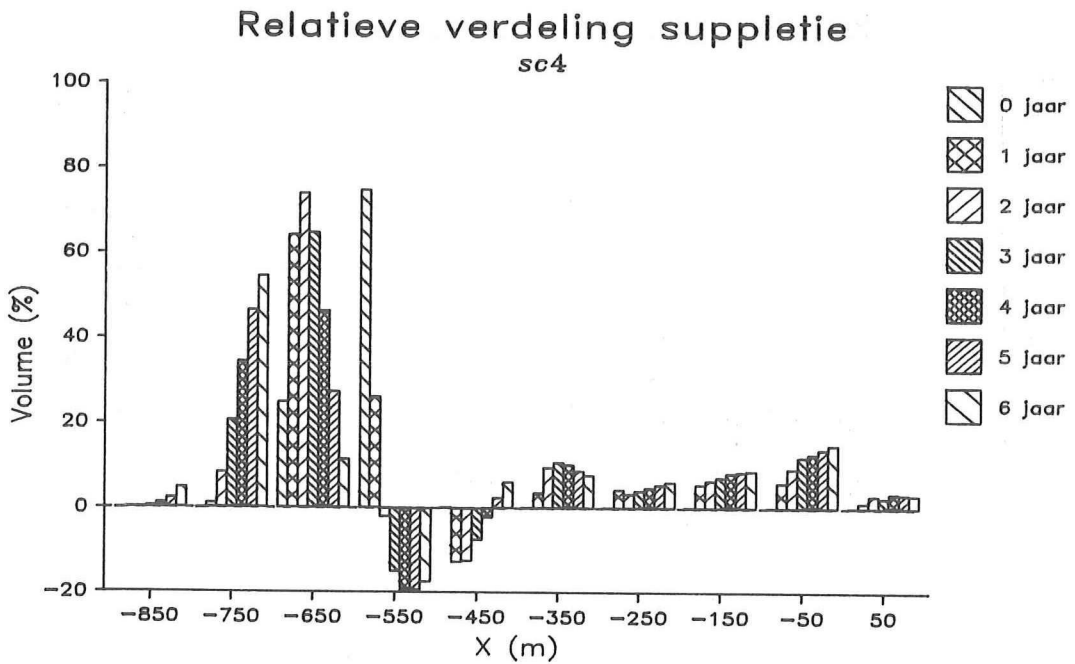
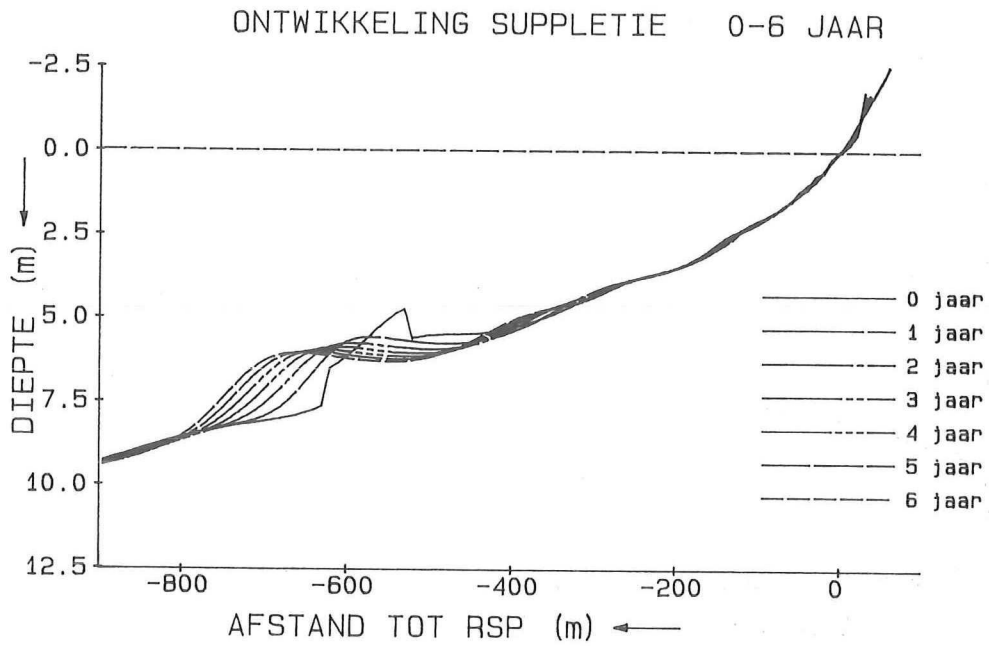


Fig. 4.3 Ontwikkeling en relatieve verspreiding 100 m² suppletie op -7 m, Delfland

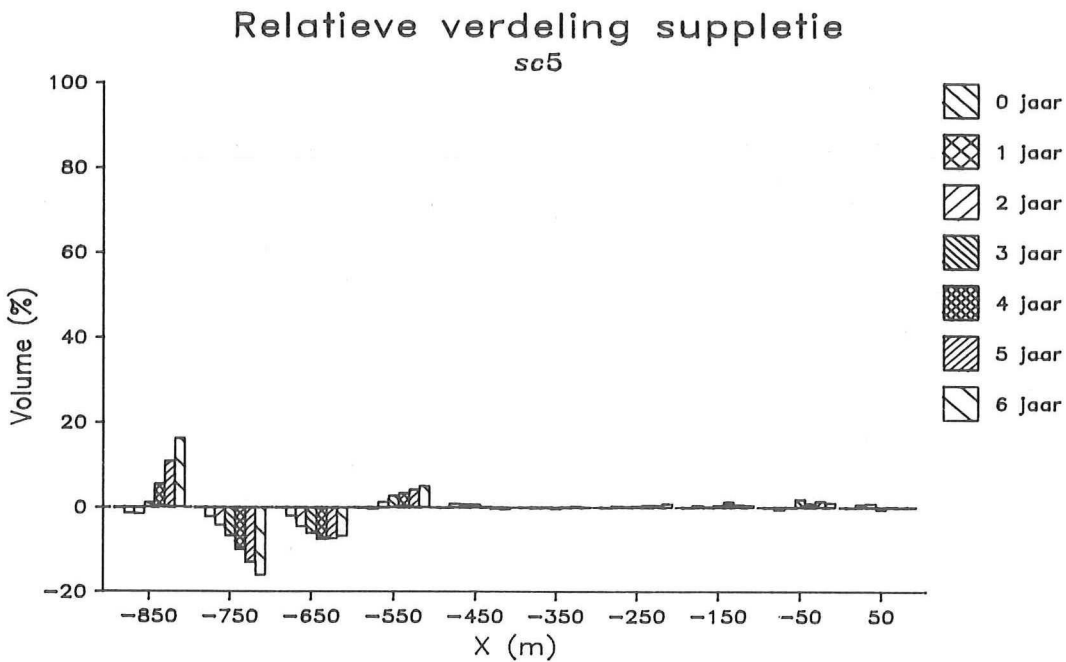
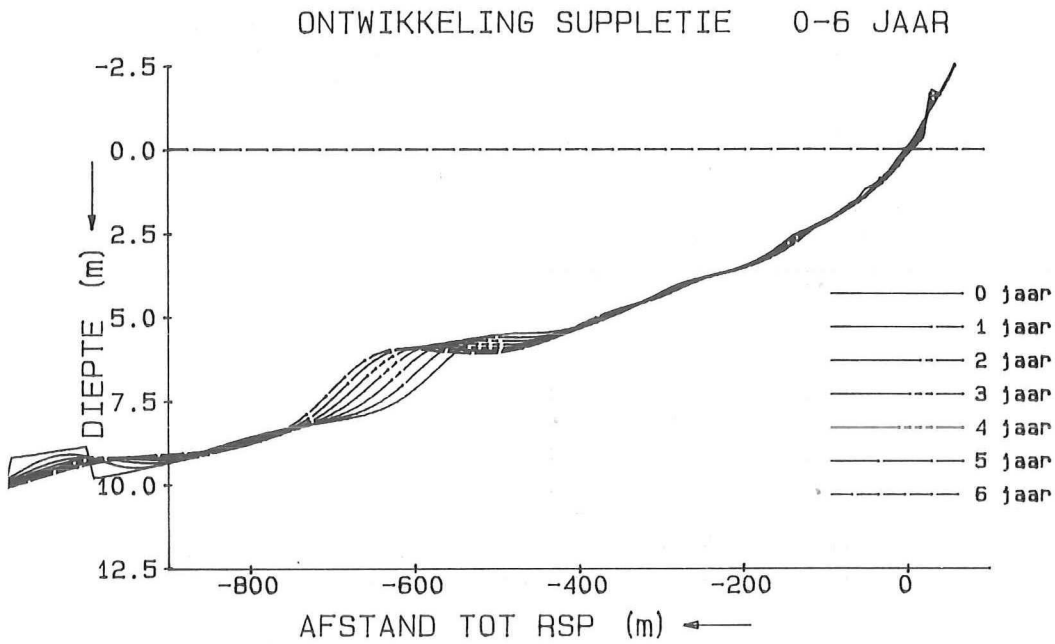


Fig. 4.4 Ontwikkeling en relatieve verspreiding 100 m² suppletie op -10 m, Delfland

Bij de suppletie op -10 m is de vorm van de suppletie na een jaar nog te onderscheiden; bij de overige dieptes is dit niet meer het geval. Uit de relatieve verdelingen blijkt, dat het effect van de suppleties zich na een zekere tijd stabiliseert, en wel des te sneller naarmate de ingreep op ondieper water heeft plaatsgevonden. Ook de uiteindelijke verdeling is afhankelijk van de plaats van de suppletie; hoe

dichter bij de kust, des te schever is de verdeling van het zand in gunstige zin. met andere woorden: de verliezen in zeerichting nemen toe naarmate de suppletie op dieper water wordt aangebracht. Een suppletie op de -10 m lijn heeft geen significante invloed meer op de stroken nabij de kust. Nemen we de strook van 100 m landwaarts tot 200 m zeewaarts van RSP als maatstaf voor het kustgedrag, en definiëren we de effectiviteit van een suppletie als het percentage relatieve volumetoename van deze strook ten opzichte van het aangebrachte volume, dan gelden daarvoor na ca. 5 jaar ongeveer de volgende waarden:

Diepte t.o.v. N.A.P. (m)	Effectiviteit (%)
3	55
5	40
7	25
10	< 5

Tabel 4.1 Effectiviteit van suppleties voor de strook tot 200 m uit de NAP-lijn na ca. 5 jaar, als functie van de aanlegdiepte

Deze effectiviteit neemt duidelijk af bij grotere diepten; in het algemeen nemen de kosten per m³ echter af, zodat de goedkoopste oplossing niet perse dichtbij de kust hoeft te liggen. Een suppletie op 10 m diepte lijkt weggegooid geld.

4.3 Effect grootte

Het ligt voor de hand, dat een grotere suppletie meer effect heeft op een bepaalde strook dan een kleinere. Het is echter niet zeker, dat er een lineair verband is tussen suppletievolume en volumetoename van elke strook. Om dit te onderzoeken is een simulatie uitgevoerd met een suppletie op -5 m en een tweemaal zo groot volume, bij dezelfde hoogte.

In fig. 4.5 is de relatieve verdeling van het zand uitgezet voor een volume van 100 m³/m' (onder) en 200 m³/m' (boven). Uitgedrukt als percentage van het suppletievolume blijken de gevonden verdelingen vrijwel identiek te zijn. Blijkbaar is er bij goede benadering een lineair verband tussen suppletievolume en de volumetoename van een bepaalde strook. Er zal dus verder slechts naar percentages hoeven worden gekeken.

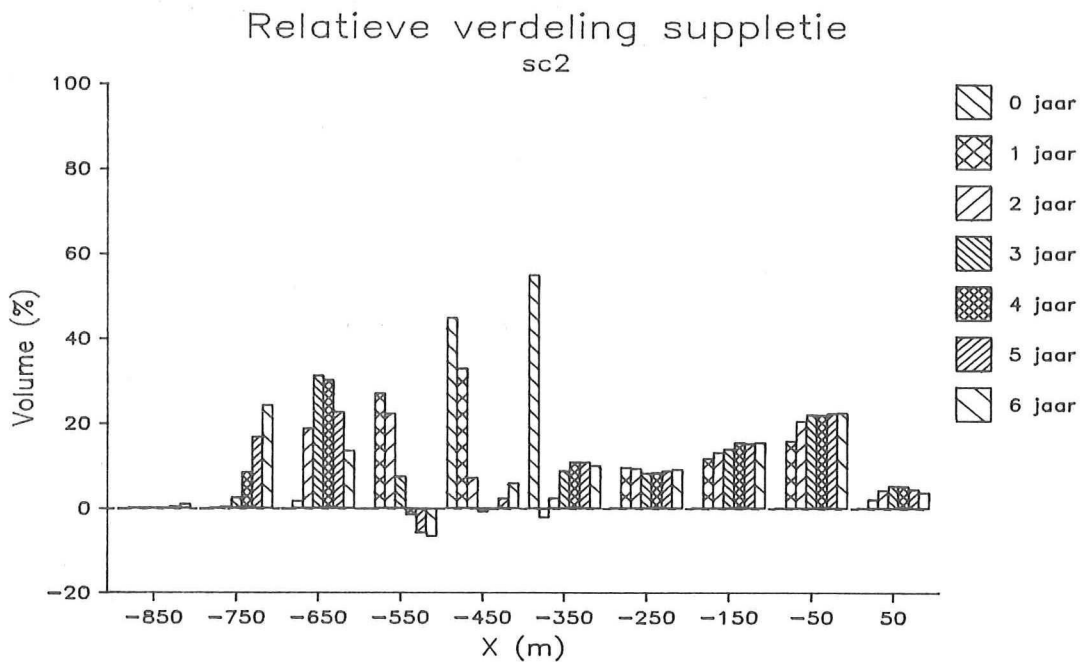
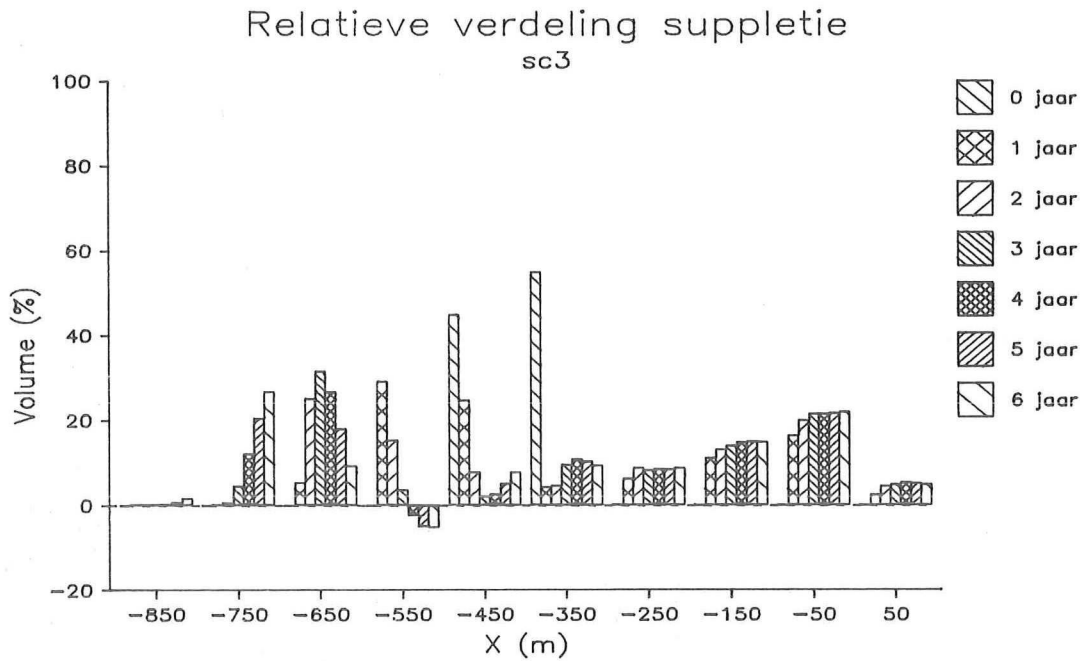


Fig. 4.5 Relatieve verspreiding 100 resp. 200 m² suppletie op -5 m lijn, Delfland raai

4.4 Effect gelijktijdige winning

Uit 4.1 blijkt, dat het effect van een suppletie op -10 m op de kust te verwaarlozen is. Gezien het in 4.3 gevonden lineaire gedrag is het dan ook aannemelijk, dat een kuil op deze diepte eveneens weinig invloed zal hebben over de beschouwde periode. In fig. 4.6 is uitgezet de relatieve verdeling van een suppletie op -5 m, met (boven) en zonder (onder) gelijktijdige winning van hetzelfde volume op -10 m. De

verschillen dicht bij de kust zijn te verwaarlozen. Dit biedt een interessant perspectief: het lijkt erop, dat een verplaatsing van zand van -10 m naar -5 m een langdurig positief effect heeft op de kustontwikkeling.

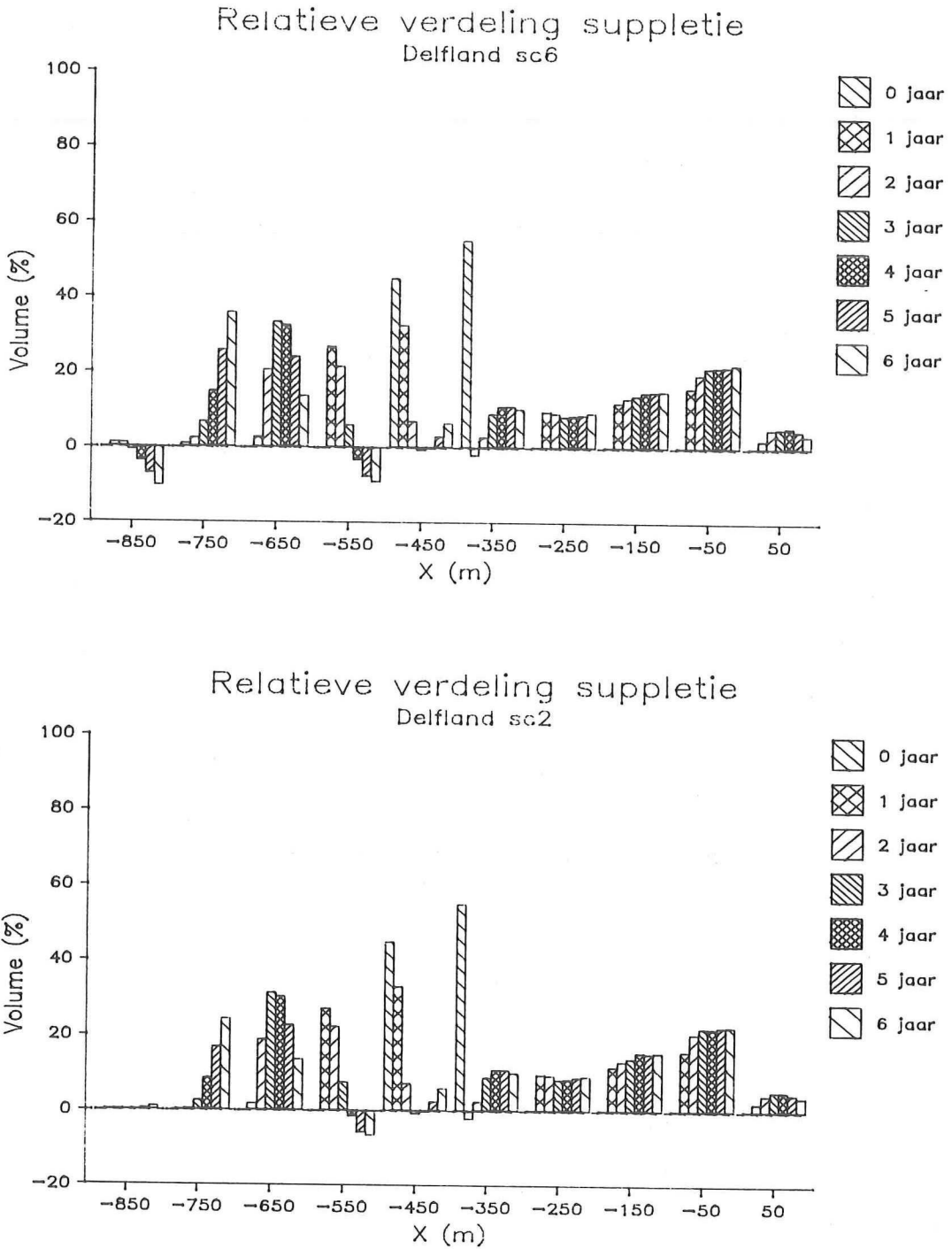


Fig. 4.6 Effect gelijktijdige winning op -10 m op relatieve verspreiding suppletie

4.5 Effect zeespiegelstijging

Hier zijn in feite twee vragen aan de orde:

- hoe reageert het profiel direct op zeespiegelstijging;
- heeft een dergelijke stijging invloed op de effectiviteit van suppleties.

Fig. 4.7 laat de gesimuleerde ontwikkeling in de tijd zijn van de plaats van de 1 m dieptelijn, met en zonder zeespiegelstijging van 1 cm/jaar. De kortdurende fluctuaties worden slechts voor het scenario zonder zeespiegelstijging getoond; uit het gefilterde verloop blijkt dat de kustlijn in 9 jaar ca. 4 meter extra achteruit gaat. We kunnen dit als volgt interpreteren: door 9 cm zeespiegelstijging gaat de kustlijn 4 m extra achteruit, dus 1 cm stijging komt overeen met ca. 45 cm kustachteruitgang. Dit komt goed overeen met de in de Kustvoorspellingsnotitie beredeneerde relatie voor Delfland; voor de andere locaties is het effect groter wegens een flauwere helling van de 'aktieve zone'.

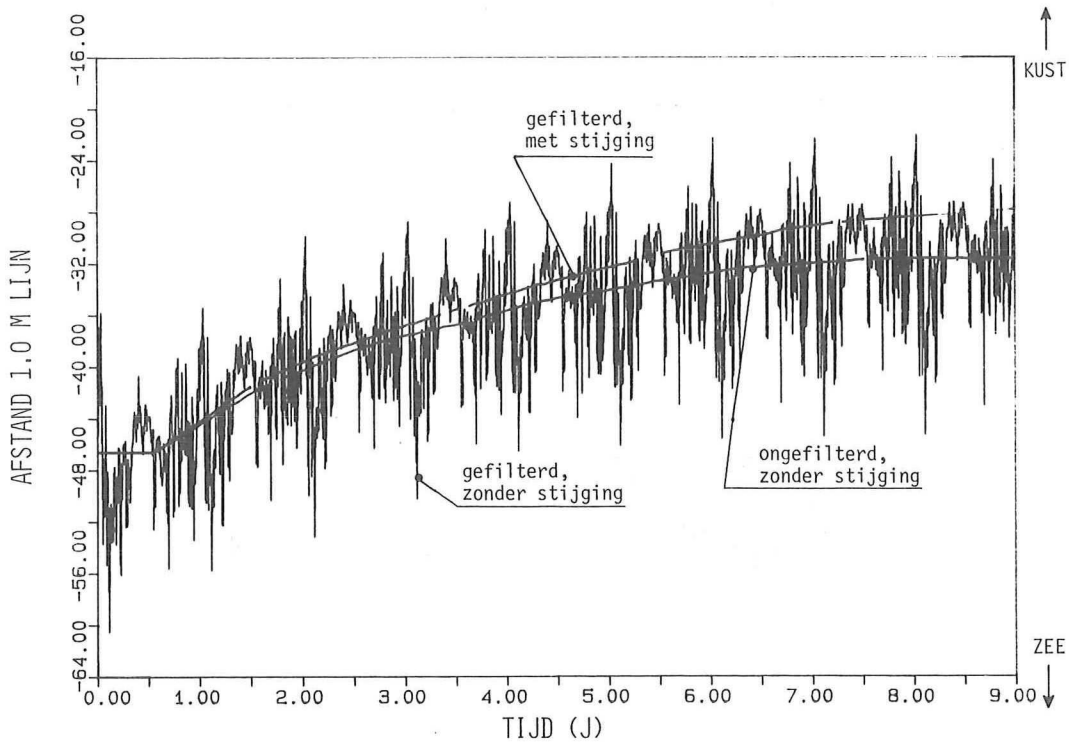


Fig. 4.7 Effect zeespiegelstijging op ontwikkeling dieptelijn, Delfland

Aangezien we de effectiviteit van een suppletie hebben gerelateerd aan wat er zou gebeuren zonder suppletie, is te verwachten, dat deze niet sterk verandert door zeespiegelstijging. Dit wordt bevestigd door Fig. 4.8 waar weer de relatieve verspreiding van de suppleties is weergegeven. Omdat echter de 'nulsituatie' in het geval van zeespiegelstijging met een verhoogde erosie gepaard gaat, zal een dergelijke suppletie wel vaker herhaald moeten worden; zie ook hoofdstuk 7.

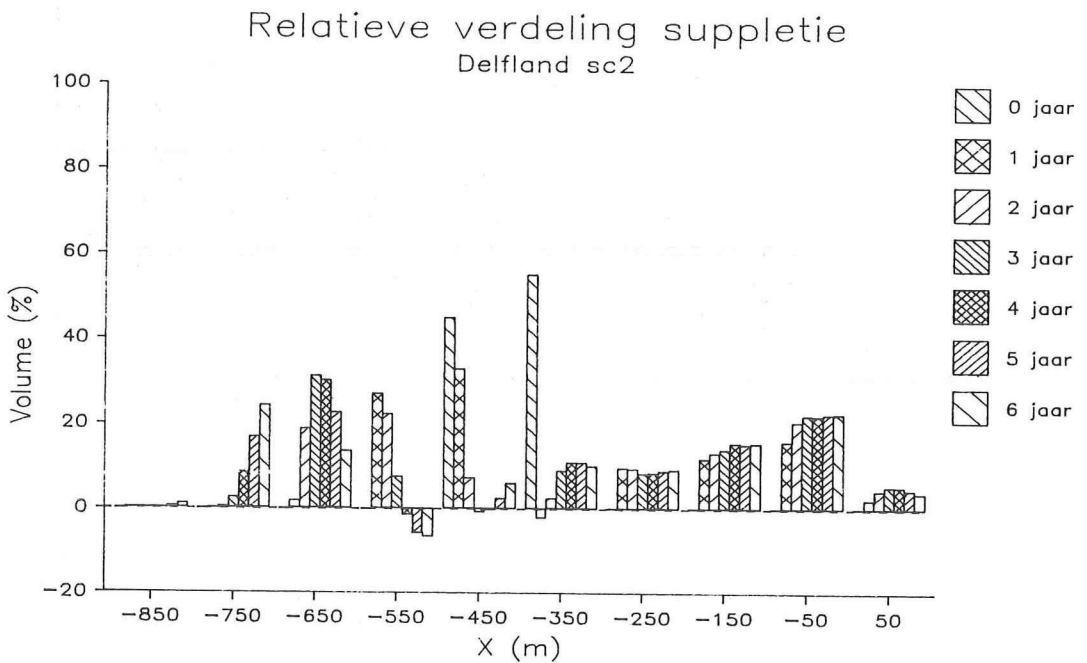
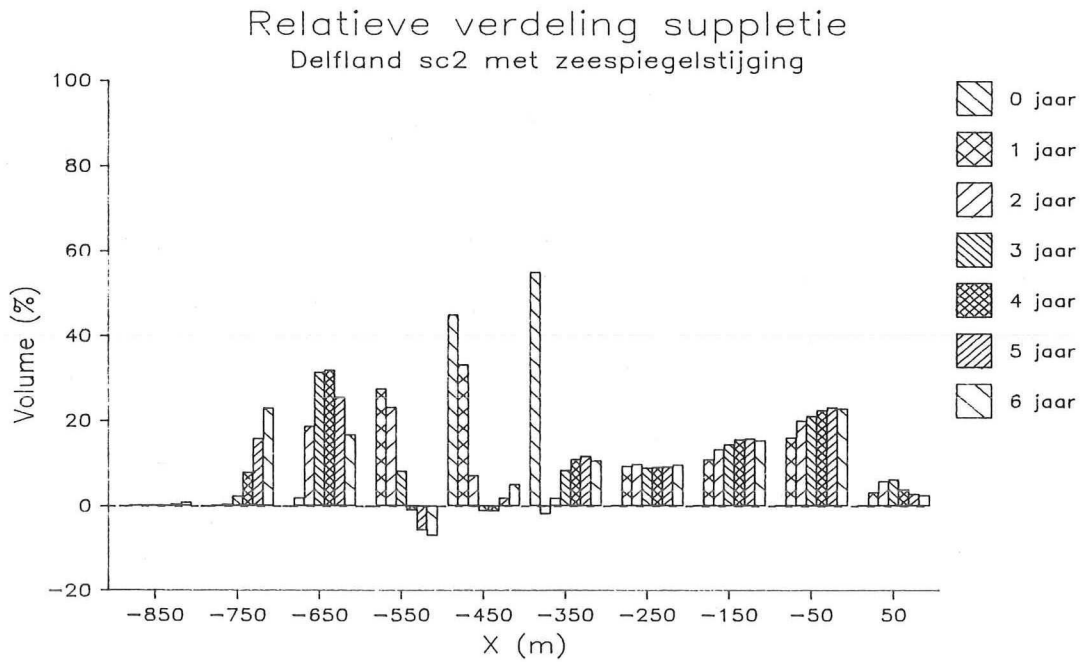


Fig. 4.8 Effect suppletie 100 m² op -5 m bij gegeven zeespiegelstijging

4.6 Effect locatie

Het is van belang, te weten in hoeverre de bovenstaande conclusies afhangen van de keuze van het profiel. De plaats in een profiel waar een suppletie is aangebracht is met opzet geduid door de diepte, in de verwachting dat het effect van suppleren op de onderwateroever voornamelijk hierdoor bepaald wordt. In fig. 4.9 is voor het suppletiescenario van 100 m³/m' op -5 m, de relatieve verdeling uitgezet voor de

profielen van Delfland, Noordwijk en Egmond. De verschillen in effect op de bij de kust gelegen stroken zijn gering, wanneer in aanmerking wordt genomen dat de waterlijn bij de verschillende profielen verschoven is t.o.v. de R.S.P.-lijn. De keuze van de locatie heeft dus t.a.v. de dwarstransporteffecten weinig invloed op de eerder getrokken conclusies.

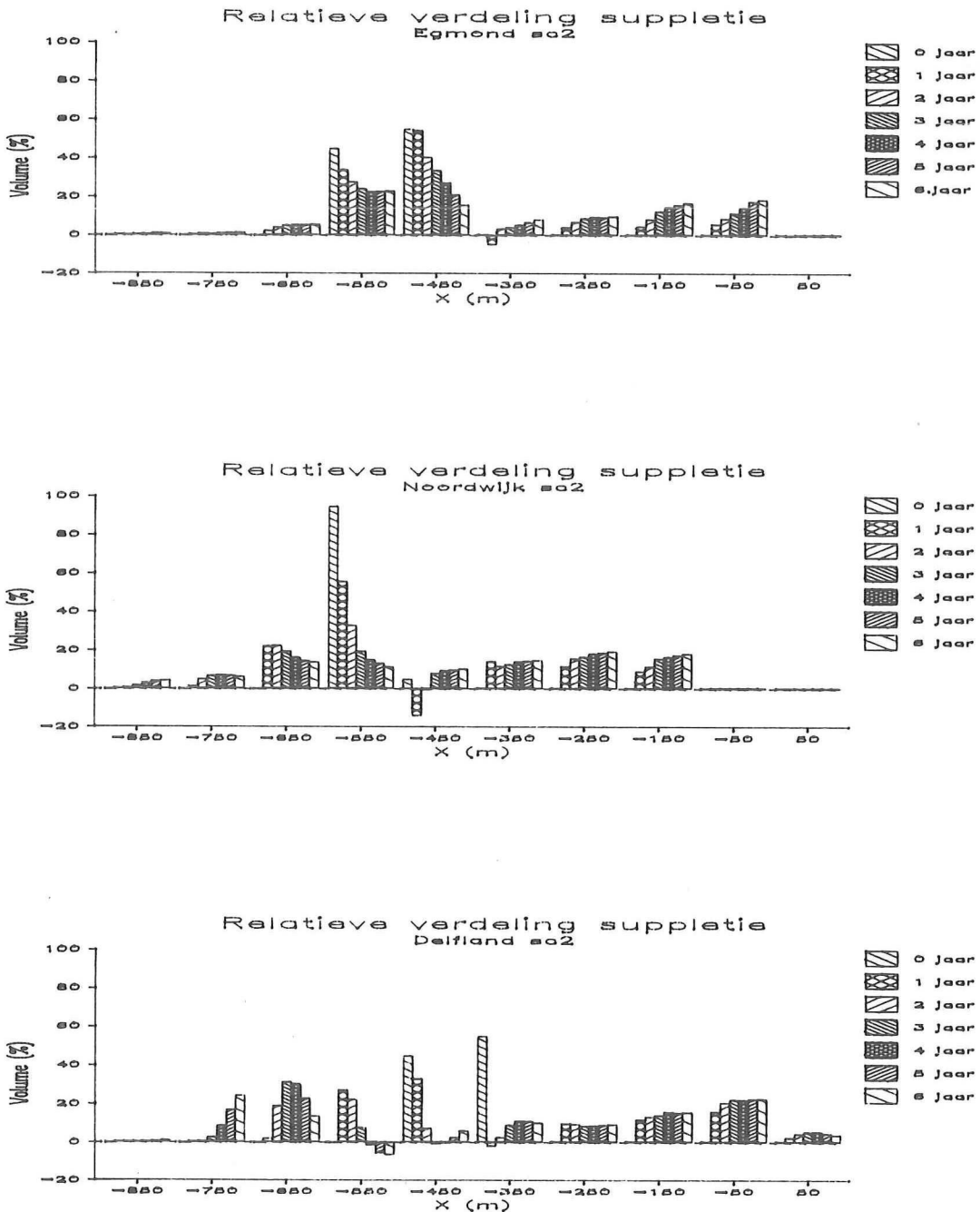


Fig. 4.9 Relatieve verspreiding suppletie -5 m voor resp. Delfland, Noordwijk en Egmond

5. INTERPRETATIE SIMULATIERESULTATEN

De in hoofdstuk 4 gebleken invloed van een onderwateroeversuppletie op de kustlijnontwikkeling kan kwalitatief verklaard worden door de beïnvloeding van het golfklimaat dichtbij de kust. Hierdoor kan een steiler profiel ontstaan, hetgeen gepaard gaat met een vooruitgang van de kustlijn. Dit is een omkeerbaar proces: verdwijnt de beïnvloeding van het golfklimaat, dan keert het profiel tot zijn oorspronkelijke vorm terug.

Bij een suppletie van los zand kunnen twee extreme situaties worden onderscheiden:

1. een suppletie op diep water (meer dan 8 meter),
2. een suppletie op ondiep water (minder dan 5 meter).

In het eerste geval kan een suppletie alleen effect hebben als hij het golfklimaat wezenlijk aantast, dus als hij tot een grote hoogte wordt opgetrokken. In eerste instantie zal dit een gunstige invloed hebben op het dwarsprofiel; doordat een dergelijk hoge dam echter sterk wordt aangevallen zal hij snel afvlakken, waarna de veranderingen aan het profiel worden teruggedraaid.

In het tweede geval vindt eerst een beïnvloeding van het golfklimaat plaats; hierdoor kan het profiel versteilen, maar aangezien het gesuppleerde zand deel uitmaakt van het versteilende gedeelte en zich sterk kan verspreiden, wordt ook de invloed ervan over het profiel verspreid en verschuift het profiel in zeewaartse richting. Het gedeelte van het gesuppleerde zand dat boven de diepte blijft, waar het golfklimaat beïnvloed kan worden, blijft een gunstige werking houden. Er vindt dan een permanente verschuiving van het profiel plaats.

Er is dus een wezenlijk verschil tussen de twee gevallen: in het ene geval verdwijnt het zand naar een diepte, waar geen sprake meer is van beïnvloeding van het golfklimaat; in het andere geval blijft tenminste een deel van het zand deel uitmaken van de actieve zone, en beïnvloedt het zo het golfklimaat. Het is daarbij niet nodig dat de suppletie als vorm herkenbaar blijft.

Naarmate de suppletie hogerop in het profiel plaatsvindt, blijft een groter deel ervan in de actieve zone, en wordt de effectiviteit groter.

Bekijken we de uitgevoerde simulaties langs deze gedachtenlijn, dan blijkt de suppletie op de -10 m lijn het golfklimaat niet direct te beïnvloeden, terwijl ook op termijn weinig of geen zand naar de actieve zone migreert. Te verwachten is, dat een zeer grote suppletie hier nodig zou zijn om een invloed te hebben op de kustlijnontwikkeling; op grond van de boven gegeven redenering zou het effect daarvan toch slechts tijdelijk zijn.

De simulaties met suppleties op ondieper water geven zoals verwacht een gunstiger beeld. In fig. 5.1 zijn alle resultaten voor het Delfland profiel samengevat. Voor een aantal stroken is de volumetoename ten gevolge van een suppletie, als percentage van het gesuppleerde volume, uitgezet tegen de tijd.

- VOLUME 100 M2 DIEPTE 3 M
- VOLUME 100 M2 DIEPTE 5 M
- VOLUME 200 M2 DIEPTE 5 M
- VOLUME 100 M2 DIEPTE 5 M, GEWONNEN OP DIEPTE 10 M
- VOLUME 100 M2 DIEPTE 7 M
- VOLUME 100 M2 DIEPTE 10 M

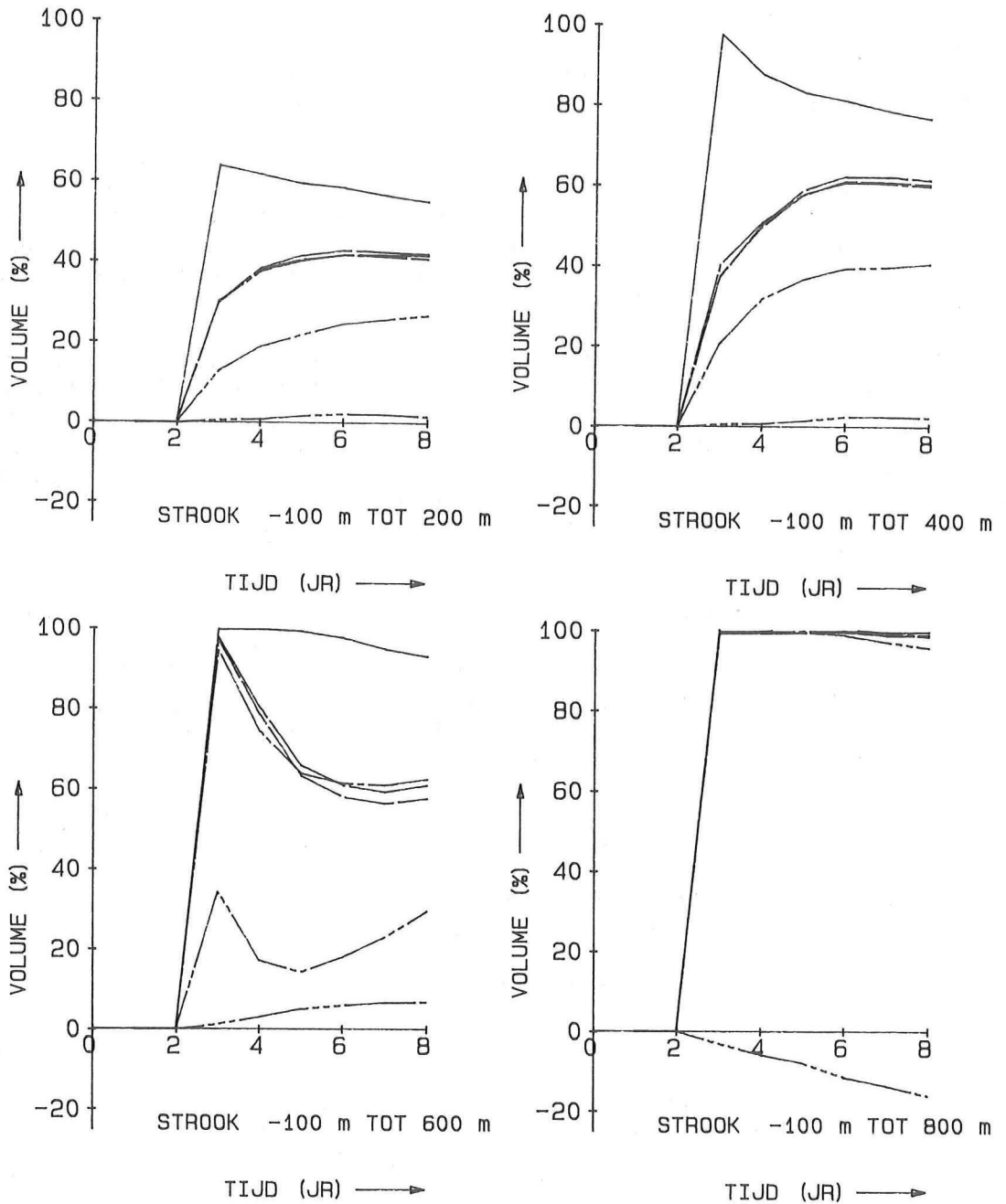


Fig. 5.1 Toename volume in strook in de tijd als percentage van suppletievolumen

De volgende conclusies kunnen worden getrokken:

1. naarmate een suppletie dichter bij de kust aangebracht wordt, is het effect ervan sneller merkbaar;
2. naarmate een suppletie dichter bij de kust aangebracht wordt, is de uiteindelijke effectiviteit ervan groter;
3. binnen de onderzochte range van suppletievolumina is geen invloed merkbaar van het volume op de effectiviteit;
4. het verplaatsen van zand van de -10 m lijn naar de -5 m lijn is even effectief als het suppleren van zand op de -5 m lijn, binnen de beschouwde periode;
5. een eventuele zeespiegelstijging doet niets af aan de effectiviteit van een suppletie, indien de autonome ontwikkeling met zeespiegelstijging als referentie wordt genomen.

Eerdere ervaringen in de literatuur geven een soortgelijk beeld als het boven geschetste.

Edelman (1960) geeft enige voorbeelden, die betrekking hebben op suppleties op betrekkelijk diep water. Zie voor de Amerikaanse voorbeelden ook Beach Erosion Board (1952) en Beach Erosion Board (1954).

In Long Branch, New Jersey is in 1948 ca. 500.000 m³ gedumpt op 12 m diepte in een vrij lage bult. Uit een latere analyse bleek, dat in 4 jaar tijd slechts ca. 6% volume verlies was opgetreden; op de kust was geen gunstig effect merkbaar. De conclusie werd getrokken, dat zand in water ondieper dan ca. 7 m gestort zou moeten worden om een gunstig effect te bereiken.

In Santa Barbara, California is in 1935 ca. 150.000 m³ gestort op 7 m diepte beneden MLW. De ervaringen waren soortgelijk.

In Atlantic City, New Jersey, is tussen 1935 en 1943 in totaal ca. 3.500.000 m³ gestort tussen 6 m en 7 m beneden MLW. Ook hier is geen gunstig effect geconstateerd. Edelman noemt ook een grote zandstort bij de Nederlandse kust bij Monster, op een diepte van ca. 11 m. De kruin lag op ca. 5.5 m diepte; de bult, die tussen 1923 en 1939 is aangelegd, bleek slechts weinig te veranderen. Ook is geen gunstig effect op de kust geconstateerd. Edelman komt dan ook tot de algemene conclusie, dat zand storten op dieper water geen gunstige perspectieven biedt.

Verder kan nog genoemd worden een grote zanddam bij Durban, zie Kinmont (1961); een bult van ca. 10.000.000 m³, 12 m hoog met de kruin op 14 m diepte, blijkt daar vrij stabiel te zijn.

In Australië zijn recent een aantal experimenten uitgevoerd met gecombineerde strand- en onderwateroeversuppleties, zie bijv. Pilarczyk en Van Overeem (1986). Gegevens hierover zijn op het ogenblik echter niet in bruikbare vorm beschikbaar.

Algemeen kan worden geconcludeerd, dat de resultaten van deze studie niet in strijd lijken te zijn met de gegevens uit de literatuur. Goede testgevallen voor geslaagde onderwater oeversuppleties dichter bij de kust ontbreken echter. Veel uitgevoerde experimenten in binnen- en buitenland zijn moeilijk te achterhalen, slecht gedocumenteerd of moeilijk te analyseren door gebrek aan relevante metingen.

6. SCHATTING LANGSTRANSPORTEFFECTEN

6.1 Suppleties in de actieve zone

Met behulp van de één-lijn theorie kunnen we een ruwe schatting maken van de vervorming van een suppletie in langsrichting. Hierbij kijken we weer uitsluitend naar de extra langstransporteffecten die door de suppletie worden veroorzaakt; reeds aanwezige gradienten in de ongestoorde situatie worden buiten beschouwing gelaten. Gezien de resultaten van de dwarstransportberekeningen lijkt het redelijk, te veronderstellen dat op een tijdschaal van enige jaren het kustprofiel over een zekere hoogte gemiddeld vormvast is. Als het langstransport voornamelijk wordt bepaald door schuin invallende golven, dan is de volgende benadering mogelijk:

$$S = s * \phi \quad (6.1)$$

waarin:

$$\begin{aligned} S &= \text{langstransport} && (\text{m}^3/\text{jr}) \\ s &= \text{kustconstante} && (\text{m}^3/\text{rad}/\text{jr}) \\ \phi &= \text{representatieve hoek van inval golven} && (\text{rad}) \end{aligned}$$

Uit de aanname van een vormvast profiel volgt:

$$\frac{\partial S}{\partial x} = -h \frac{\partial y}{\partial t} \quad (6.2)$$

waarin:

$$\begin{aligned} x &= \text{afstand langs de kust} && (\text{m}) \\ h &= \text{hoogte actieve profiel} && (\text{m}) \\ y &= \text{afstand dwars op de kust} && (\text{m}) \\ t &= \text{tijd} && (\text{jr}) \end{aligned}$$

Voor kleine hoek ϕ geldt bij benadering:

$$\phi = \frac{\partial y}{\partial x} \quad (6.3)$$

Combinatie van de bovenstaande vergelijkingen geeft dan:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = -\frac{s}{h} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (6.4)$$

Voor een rechthoekig beginprofiel geldt de volgende oplossing (zie bijvoorbeeld Handboek Zandsuppleties):

$$y = \frac{y_0}{2} \left[\text{erf} \frac{B-x}{\sqrt{4at}} + \text{erf} \frac{B+x}{\sqrt{4at}} \right] \quad (6.5)$$

waarin:

$$\begin{aligned} y_0 &= \text{aanlegbreedte} && (\text{m}) \\ B &= L/2 = \text{halve aanleglengte} && (\text{m}) \\ a &= s/h = \text{kustconstante} && (\text{m}^2/\text{rad}/\text{jr}) \end{aligned}$$

Het resterende volume in het gesuppleerde kustvak op zekere tijd t kan nu geschat worden uit:

$$V(t) = \int_{-B}^B h y dx \quad (6.6)$$

waarin:

$V(t)$ = restant van het gesuppleerde volume (m^3)

Invullen van (6.5) in (6.6) geeft na enig uitwerken:

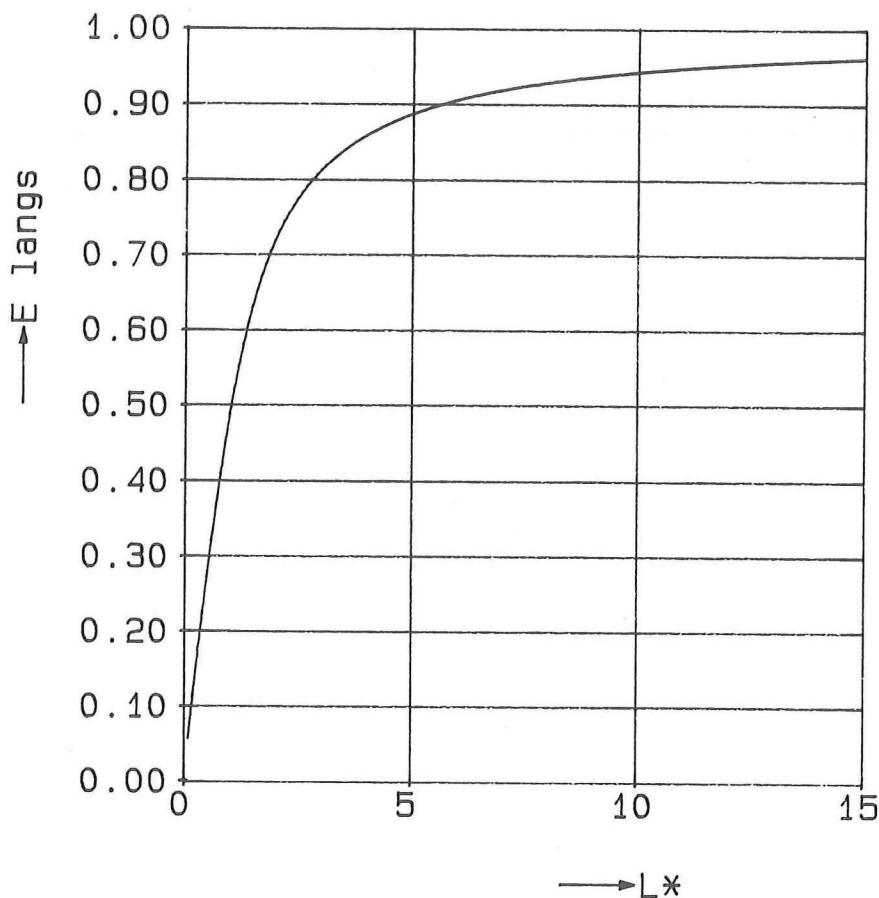
$$V(t) = V(o) \frac{1}{L_*} \int_0^{L_*} \operatorname{erf}(x') dx' \quad (6.7)$$

waarin: $L_* = L/\sqrt{4at}$ = dimensieloze lengte van de suppletie

Op soortgelijke wijze als eerder voor dwarstransport effecten kunnen we nu de effectiviteit t.a.v. langstransporteffecten, E_{langs} , definiëren als de verhouding tussen de relatieve toename in volume van een kustvak (relatief t.o.v. de autonome ontwikkeling) tot het aangebrachte volume. Volgens vergelijking (6.7) geldt dan:

$$E_{\text{langs}} = \frac{1}{L_*} \int_0^{L_*} \operatorname{erf}(x') dx' \quad (6.8)$$

E_{langs} is dus uitsluitend een functie van de dimensieloze aanleglengte L_* ; in fig. 6.1 is E_{langs} uitgezet tegen L_* voor L_* -waarden van 0 tot 15



Figuur 6.1 Effectiviteit t.a.v. langstransporteffecten, E_{langs} , als functie van de dimensieloze aanleglengte L_* .

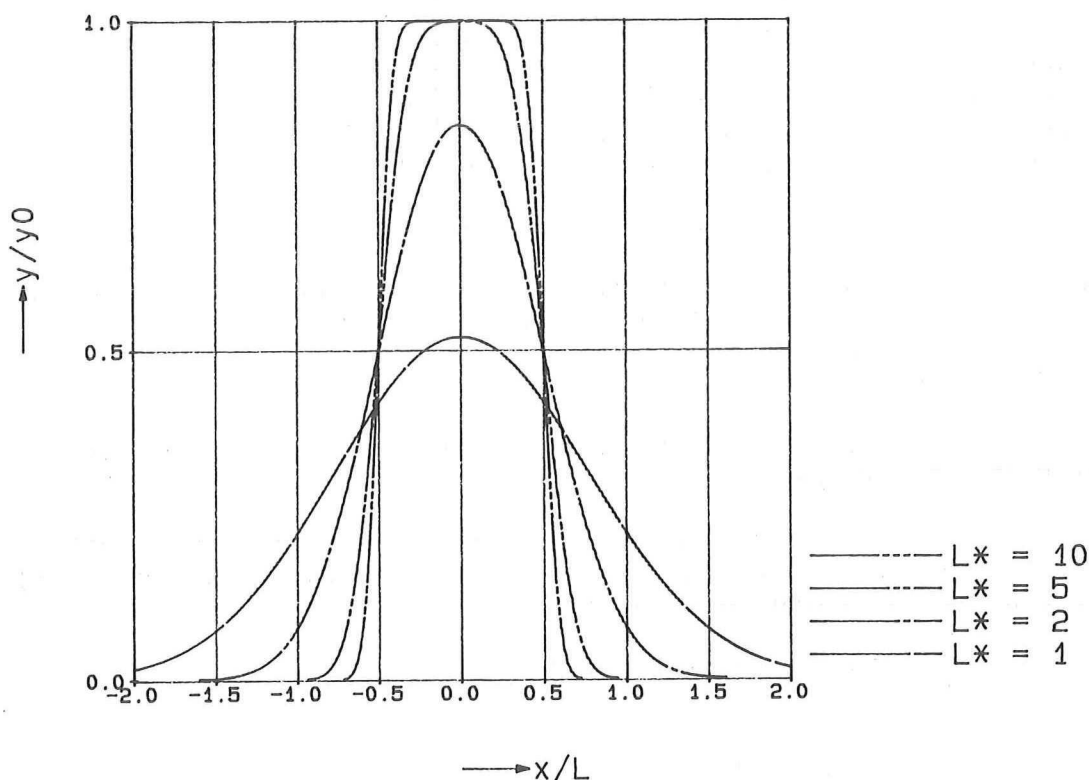
Duidelijk is, dat E_{langs} sterk toeneemt bij L_* -waarden van 0 tot ca. 5. Boven een waarde van 6 is de effectiviteit meer dan 90%.

De zo gedefinieerde effectiviteit E_{langs} geldt voor het gehele gesuppleerde kustvak; de langstransporteffecten treden echter voornamelijk op aan de randen van dit kustvak.

Vergelijking (6.5) kan als volgt dimensieloos worden weergegeven:

$$\frac{y}{y_0} = \frac{1}{2} [\text{erf}[L_*(\frac{1}{2} - \frac{x}{L})] + \text{erf}[L_*(\frac{1}{2} + \frac{x}{L})]] \quad (6.9)$$

In fig. 6.2 is het verloop van y/y_0 als functie van x/L weergegeven, voor waarden van L_* van resp. 1, 2, 5 en 10.



Figuur 6.2 Verloop van y/y_0 als functie van x/L voor verschillende waarden van L_*

Voor deze waarden van L_* blijkt, dat in het midden van het supplementievak nog geen beïnvloeding door langstransporteffecten plaatsvindt. Ook is te zien, dat het verlies uit het gesuppleerde kustvak de aangrenzende kustvakken ten goede komt.

Om nu een idee te krijgen van de lengteschaal $\sqrt{4at}$ van de morfologische beïnvloeding door langstransporteffecten, is deze lengteschaal voor een aantal realistische waarden van s en h berekend; in tabel 6.1 zijn de waarden weergegeven voor $t = 5$ jaar, en in tabel 6.2 voor $t = 10$ jaar.

s (m ³ /rad/jr)	h(m)	10	15	20	25
100.000		447	365	316	283
200.000		632	516	447	400
300.000		775	632	548	490
400.000		894	730	632	566
500.000		1000	816	707	632

Tabel 6.1 Waarden van $\sqrt{4at}$ (m) voor t = 5 jaar

s m ³ /rad/jr	h(m)	10	15	20	25
100.000		632	516	447	400
200.000		894	730	632	566
300.000		1095	894	775	693
400.000		1265	1033	894	800
500.000		1414	1155	1000	894

Tabel 6.2 Waarden van $\sqrt{4at}$ (m) voor t = 10 jaar

In het rapport van het projekt Kustvoorspelling (Stive 1988) worden de volgende waarden gehanteerd voor de Hollandse kust:

$$s = 300.000 \text{ m}^3/\text{rad}/\text{jr}$$

$$h = 15 - 20 \text{ m}$$

Dit leidt tot waarden van $\sqrt{4at}$ van ca. 600 m voor t = 5 jaar en ca. 850 m voor t = 10 jaar.

Hanteren we $L_* = 5$ als de minimale lengte, waarbij het nog zinvol is om voornamelijk dwarstransporteffecten te beschouwen, dan geldt bij een geplande levensduur van 5 jaar:

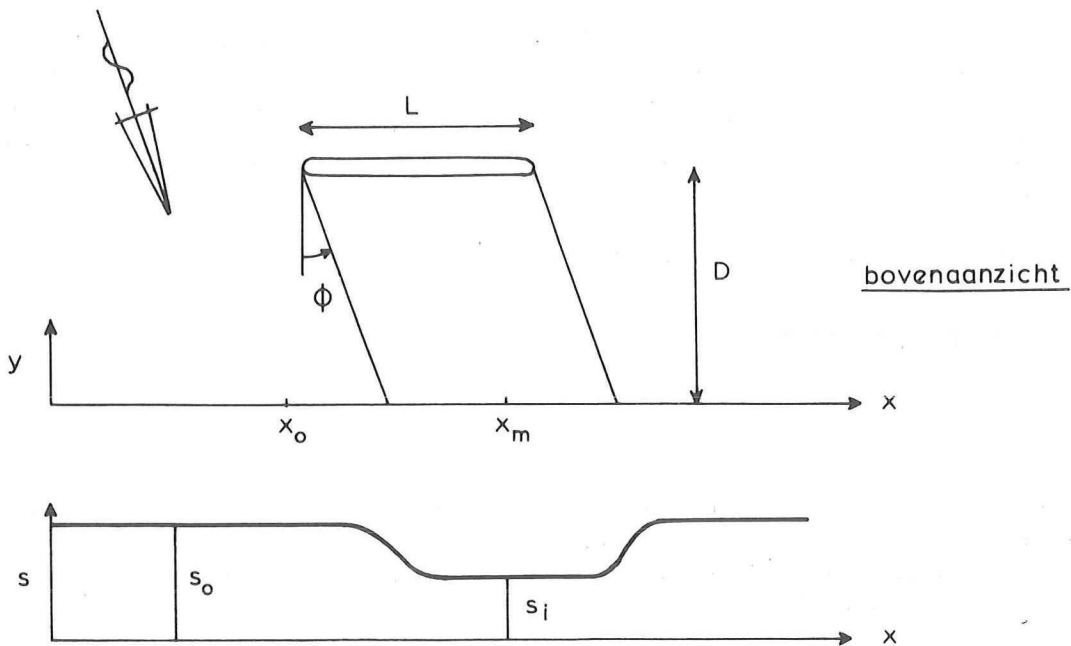
$$L > \text{ca. } 3 \text{ km}$$

en bij een geplande levensduur van 10 jaar:

$$L > \text{ca. } 4.5 \text{ km.}$$

6.2 Suppleties buiten de actieve zone

Zoals in hoofdstuk 5 is besproken, is van suppleties buiten de actieve zone geen duidelijke beïnvloeding van het dwarsprofiel te verwachten. Hier onderzoeken we de vraag, in hoeverre de kustlijn beïnvloed wordt door langstransporteffecten veroorzaakt door een beïnvloeding van het golfklimaat. We doen dit aan de hand van een eenvoudig morfologisch lijnmodel, analoog aan dat van 6.1. De schematisatie is verduidelijkt in Figuur 6.3.



Figuur 6.3 Schematisatie beïnvloeding langtransport door suppletie buiten de actieve zone

We nemen voor het langtransport aan:

$$S = s\psi \quad (6.10)$$

waarin:

$$\psi = \phi - \frac{\partial y}{\partial x} \quad (6.11)$$

De continuïteitsvergelijking luidt weer:

$$\frac{\partial S}{\partial x} = -h \frac{\partial y}{\partial t} \quad (6.2)$$

De gedachte is nu, dat de kustconstante s achter de onderwaterdam wordt gereduceerd tot s_1 . Het centrum van de schaduwzone is x_m (zie figuur 6.3):

$$x_m = x_0 + D \tan\phi + \frac{1}{2} L \quad (6.12)$$

Door diffractie-effecten zal de overgang van s_0 naar s_1 vloeiend verlopen. We kunnen dit effect benaderen door het verloop van s te definiëren analoog aan vergelijking (6.9):

$$s = s_0 + \frac{s_1 - s_0}{2} \left[\operatorname{erf}\left[L_* \left(\frac{1}{2} - \frac{(x-x_m)}{L}\right)\right] + \operatorname{erf}\left[L_* \left(\frac{1}{2} + \frac{(x-x_m)}{L}\right)\right] \right] \quad (6.13)$$

Voor grote L_* leidt dit tot een blokfunctie, voor kleine L_* wordt de overgang geleidelijker (zie figuur 6.2).

Met behulp van vergelijkingen (6.10) t/m (6.13) kunnen we nu het verloop van $S(x)$ bij een gegeven golfvalshoek berekenen. Door vergelijking (6.2) numeriek op te lossen kunnen we dan de veranderingen van de kustlijn ten gevolge van uit verschillende richtingen komende golven berekenen. Als numeriek schema is een Crank-Nicholson schema gekozen.

Onderzocht is het volgende geval:

$h = 20$ m
 $s_0 = 300.000$ m³/rad/jr
 $s_1 = 100.000$ m³/rad/jr
 $L = 1000$ m
 $D = 1500$ m
 $L_* = 5$

Dit komt ruwweg overeen met de situatie onderzocht door Van Vessem en Kevelam (1987) voor onderwaterdammen bij Delfland.

Bekijken we uitsluitend het effect van het jaarlijks gemiddelde langs-transport, dan kan dit ruwweg geschematiseerd worden door:

$\phi = \text{constant} = 20^\circ$

In figuur 6.4 zijn de resultaten weergegeven van een berekening over 5 jaar; de dam ligt tussen 2000 m en 3000 m. Blijkbaar leidt deze situatie tot aangroei van de kust ter hoogte van de dam, en tot (even grote) erosie 'benedenstrooms' terwijl 'bovenstrooms' een geringe, positieve beïnvloeding plaatsvindt.

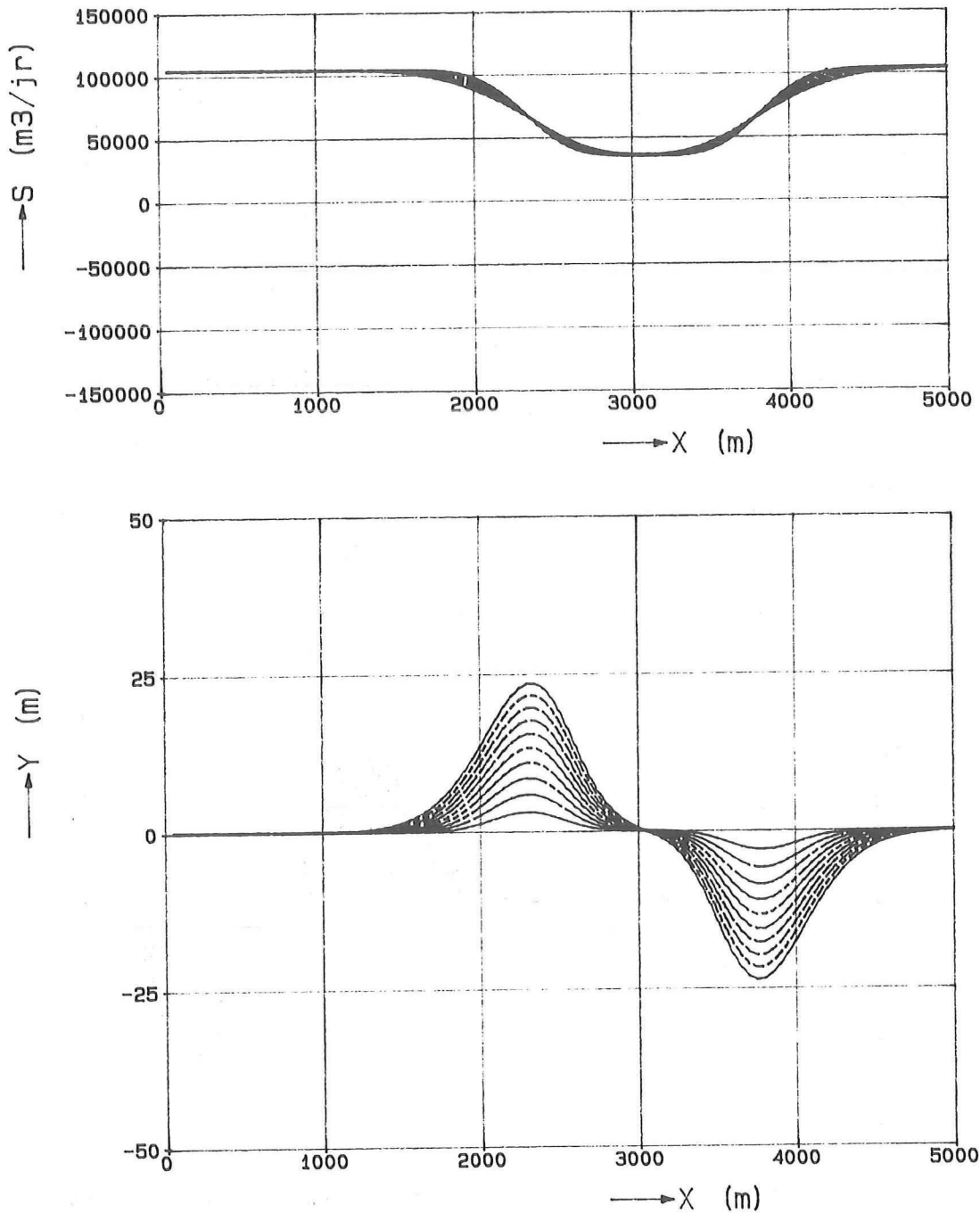


Fig. 6.4 Kustlijnontwikkeling en langtransport achter onderwaterdam bij constante golfinvalshoek $\phi = 20^\circ$ gedurende 5 jaar

Het beeld wordt enigszins anders indien de gemiddelde golfinvalshoek gelijk blijft aan 20° , doch ontstaat door beurtelings voorkomende golfrichtingen van resp. 50° en -10° . In figuur 6.5 is het resultaat weergegeven; de dam ligt tussen 3000 m en 4000 m. De erosie 'benedenstrooms' en de aangroei worden groter, terwijl nu ook 'bovenstrooms' enige erosie optreedt.

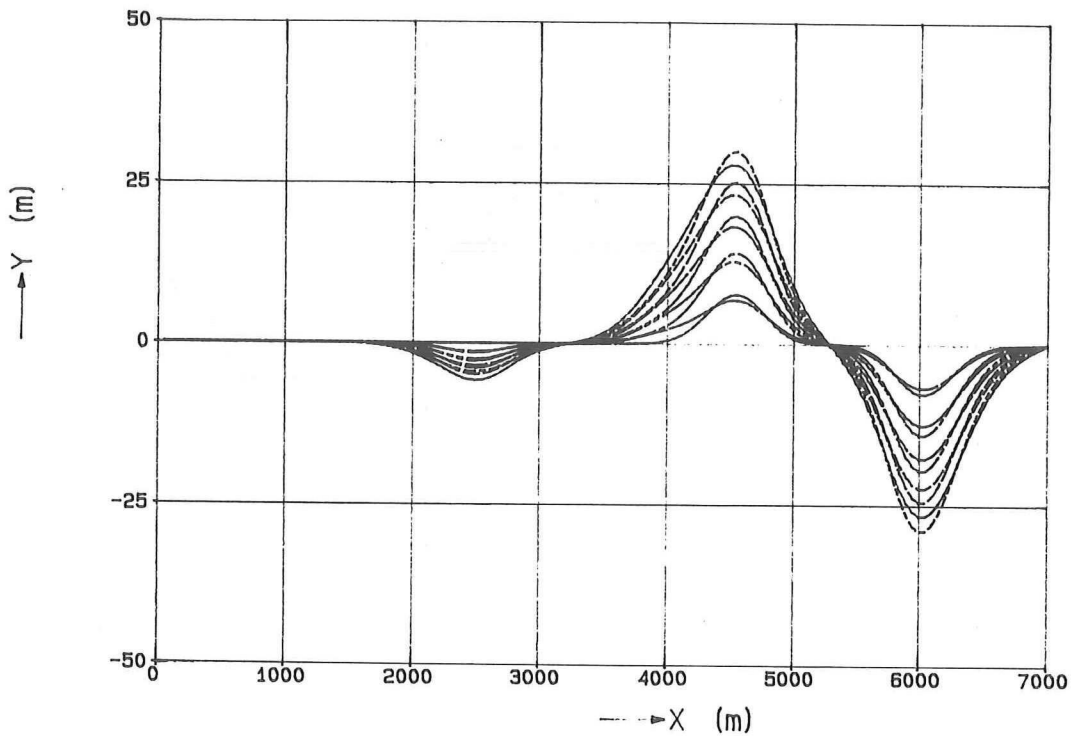
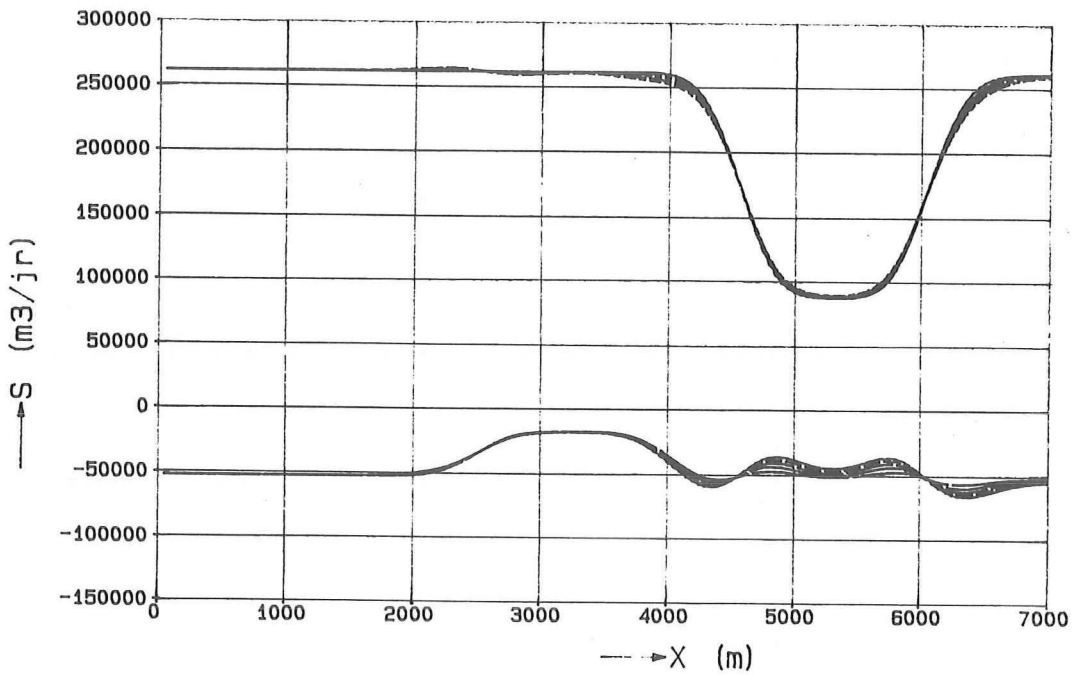


Fig. 6.5 Kustlijnontwikkeling en langstransport achter onderwaterdam bij golfinvalshoek afwisselend 50° en -10° gedurende 5 jaar

Ook bij een nettotransport gelijk aan nul treedt tombolovorming op, zoals blijkt uit figuur 6.6. De golfrichting is hierbij beurtelings $+20^\circ$ en -20° , de dam ligt tussen 2000 m en 3000 m. Achter de dam treedt aangroei op, terwijl aan weerszijden van de dam erosie optreedt.

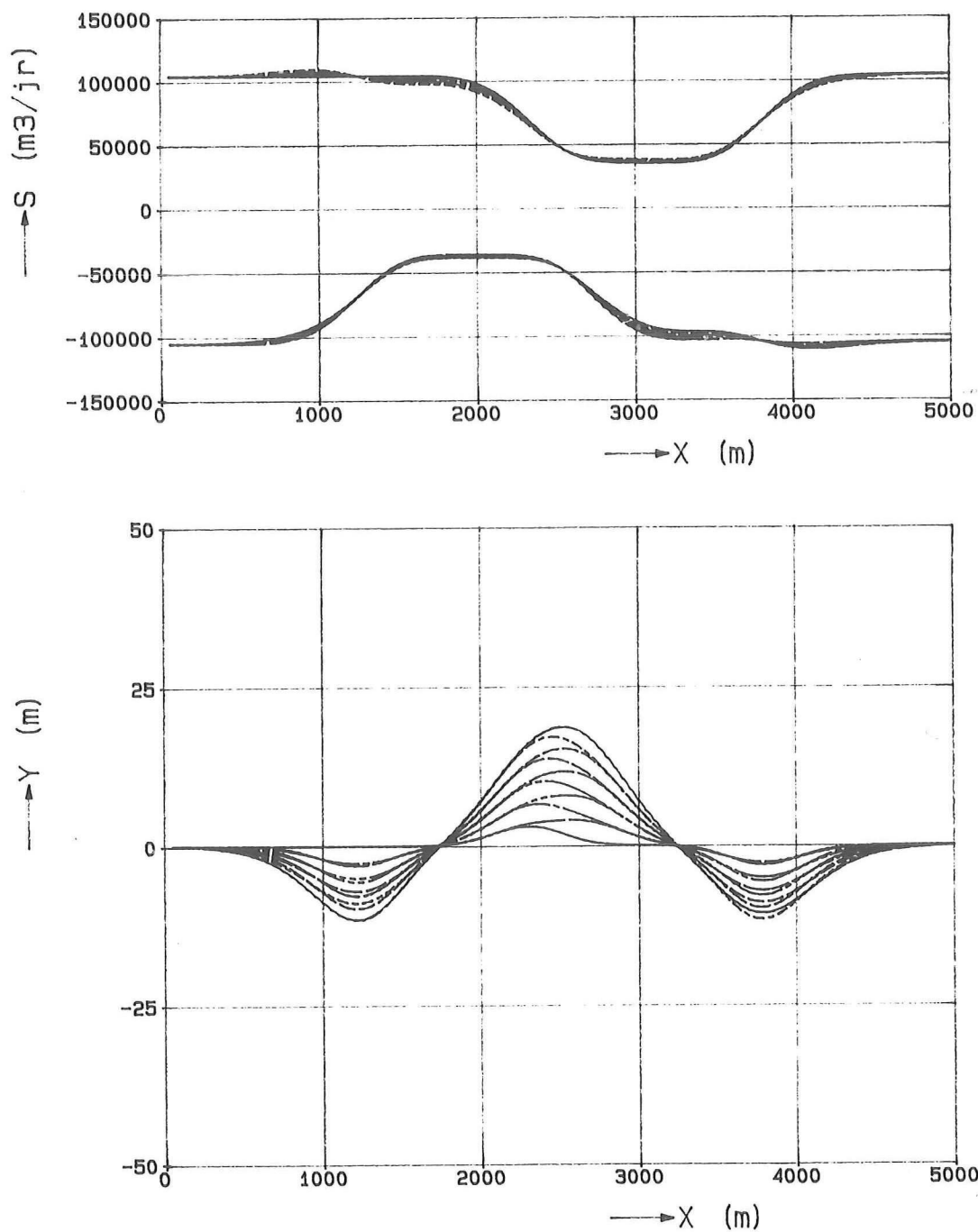


Fig. 6.6 Kustlijnontwikkeling en langstransport achter onderwaterdam bij golfinvalshoek afwisselend 20° en -20° gedurende 5 jaar

Samenvattend kunnen we stellen, dat een onderwaterdam op dieper water, die niet tot een directe voeding van de actieve zone leidt, een herverdeling van zand langs de kust kan veroorzaken. Dit leidt echter niet tot een netto winst; aangroei achter de dam wordt gecompenseerd door verliezen elders.

7. LEVENSDUUR SUPPLETIES

Met de nu beschikbare kennis kunnen we, gegeven een aantal locatie-afhankelijke factoren, de levensduur van een onderwateroever-suppletie schatten. Onder levensduur verstaan we dan de tijd die verstrijkt totdat de kustlijn weer op de plaats van vóór de suppletie is. Koefecten t.g.v. langstransport worden hier buiten beschouwing gelaten.

Stellen we:

K	= verlies uit zone tot 200 m uit W.L. per meter (autonome) kustachteruitgang	(m ³ /m'/jaar)
T	= toekomstige autonome kustachteruitgang	(jm/jaar)
T ₀	= huidige autonome kustachteruitgang	(m/jaar)
ZS	= te verwachten extra zeespiegelstijging	(m/jaar)
R	= aantal meters kustachteruitgang per meter zeespiegelstijging	(m/m)

dan is de toekomstige autonome kustachteruitgang:

$$T = T_0 + ZS * R \quad (7.1)$$

Het volumeverlies per m' per jaar, V_{ℓ} , uit deze zone is dan (zie Fig. 7.1):

$$V_{\ell} = \int_{Z_{200 \text{ m}}}^{Z_{\text{duintop}}} T(z) dz \quad (7.2)$$

Indien het profiel in dit gedeelte ongeveer vormvast is, dan geldt:

$$V_{\ell} = T_{\text{NAP-lijn}} K = (T_0 + ZS * R)_{\text{NAP-lijn}} * K \quad (7.3)$$

In een periode van N jaren verdwijnt dus $V_{\ell} * N$ m³/m' uit de genoemde zone. Dit moet gecompenseerd worden door een éénmalige suppletie met volume V_S per strekkende meter.

Van deze suppletie is na N jaar een gedeelte E(N) aan de genoemde zone ten goede gekomen. De waarde van E(N) kan worden afgelezen uit Fig. 5.1; voor N > 5 jaar kunnen de waarden vermeld in Tabel 4.1 gehanteerd worden.

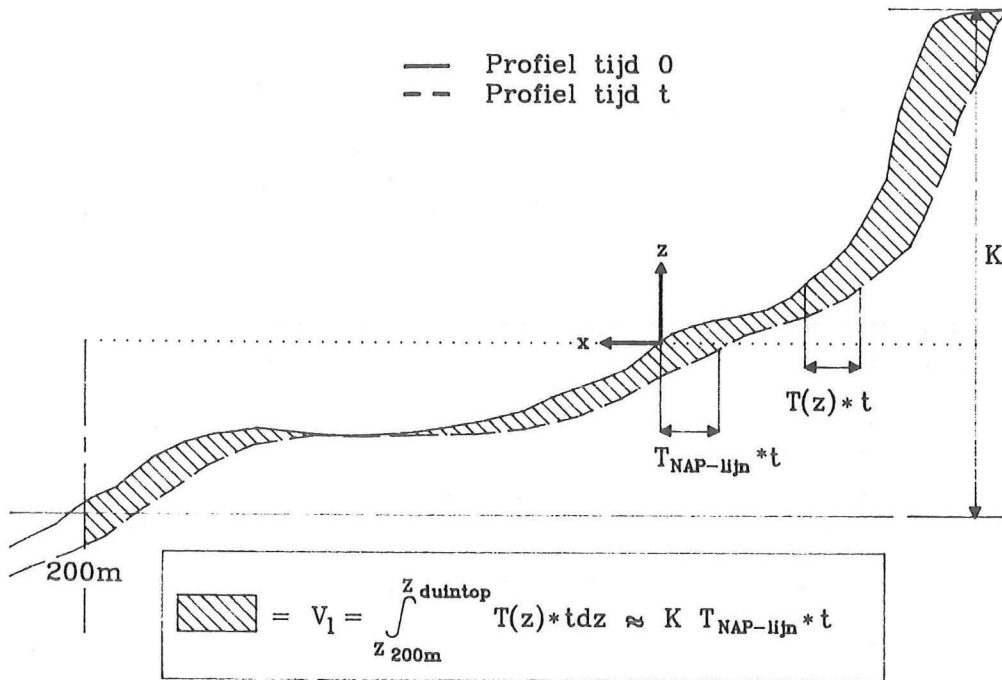


Fig. 7.1 Schema verlies V_l uit zone 200 m uit NAP-lijn bij kust-achteruitgang $T * t$

Indien N de levensduur van de suppletie is, dan geldt dat het in de zone tot 200 m terechtgekomen deel van de suppletie het verlies in N jaar precies compenseert, dus:

$$K * (T_o + ZS * R) * N = V_s * E \quad (7.4)$$

In Fig. 7.2 wordt het principe van deze formulering verduidelijkt.

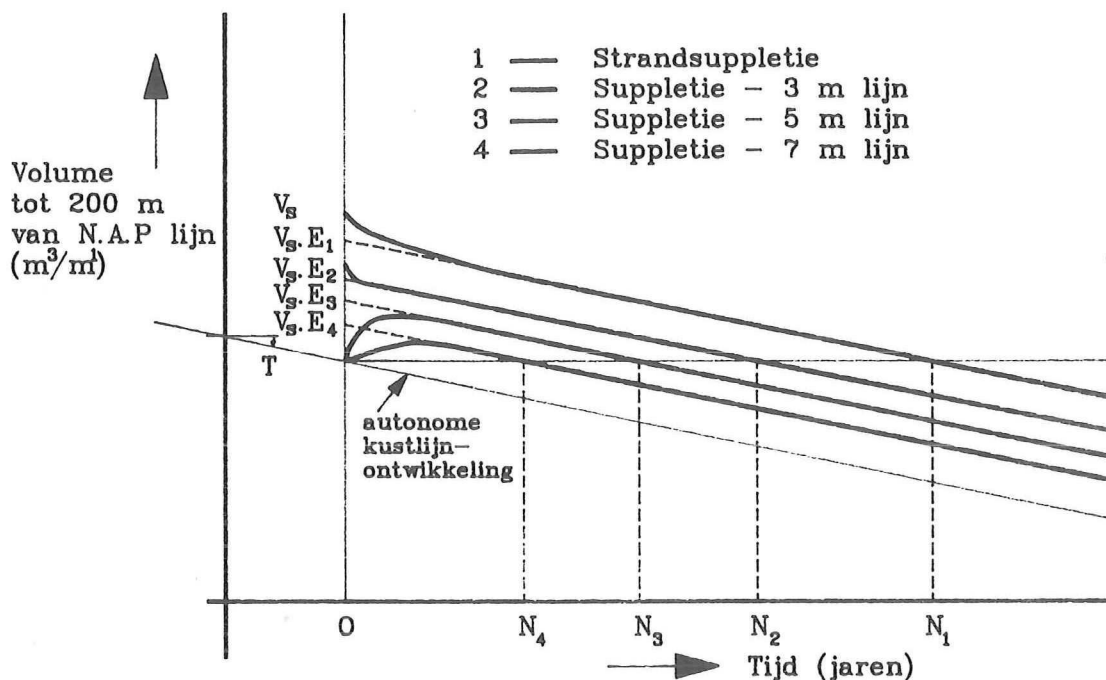


Fig. 7.2 Schematische vergelijking levensduur N van suppleties bij hetzelfde aangebrachte volume V_s maar verschillende waarden van de effectiviteit E

De levensduur N kan dus eenvoudig worden geschat uit:

$$N = \frac{V_s * E}{K * (T_0 + ZS * R)} \quad (7.5)$$

Hierin zijn K, T₀ en R locatie-afhankelijk; E wordt voornamelijk bepaald door de aanlegdiepte.

De waarde van zowel K als E is afhankelijk van de zeevaartse begrenzing; 200 m lijkt een bruikbare maat.

Rekenvoorbeeld:

Nemen we K = 3 + 12 = 15 m³/m¹/m, T₀ = 0.5 m/jaar, V_s = 200 m³/m¹, E = 0.25 en R = 45 m/m.

dan geldt bij de huidige zeespiegelstijging:

$$N = \frac{200 * 0.25}{15 * .5} = 6.7 \text{ jaar}$$

Bij een extra zeespiegelstijging van 0.65 m/eeuw zou dit worden:

$$N = \frac{200 * 0.25}{15 * (.5 + .0065 * 45)} = 4.2 \text{ jaar}$$

8. NAUWKEURIGHEID

In Fig. 5.1 is een zeer beknopte samenvatting gegeven van alle simulatie-resultaten. Uit de figuur kan, gegeven een aanlegdiepte en de tijd na de aanleg de effectiviteit E worden afgelezen voor een bepaalde strook. Hier volgen enige beschouwingen over de nauwkeurigheid van deze relaties.

Algemeen geldt, dat de effectiviteit E, doordat het een relatieve grootheid is, weinig gevoelig is voor modelinstelling of fouten in randvoorwaarden. Daarnaast geldt, dat hoe breder de beschouwde strook is, des te nauwkeuriger de gevonden effectiviteit voor die strook. Uiteraard gaat ook veel informatie verloren naarmate de strookbreedte groter wordt gekozen. De strook tot 200 m uit de waterlijn lijkt een redelijke indicator voor het kustlijngedrag. Voor deze strook moet met een absolute onnauwkeurigheid in de orde van 10% gerekend worden voor de gevonden effectiviteit. Gezien de vele schematisaties en onzekerheden kan dit getal niet erg 'hard' gemaakt worden; daar de gevonden relaties kwalitatief goed verklaarbaar zijn lijkt een grotere onnauwkeurigheid echter niet aannemelijk.

In de praktijk zal het in verband met meetonnauwkeurigheden en onzekerheden in het werkelijke autonome kustgedrag nauwelijks mogelijk zijn, de op deze wijze gedefinieerde effectiviteit nauwkeuriger vast te stellen. Om zelfs met beperkte nauwkeurigheid een suppletie goed te kunnen evalueren, zal deze hetzij een zeer grote omvang moeten hebben, hetzij door een uitstekend meetprogramma begeleid moeten worden.

Tenslotte kan met betrekking tot het tijdsverloop van de beïnvloeding van het profiel gesteld worden, dat reeds na enige jaren het grootste deel van de aanpassing heeft plaatsgevonden, waarna nog slechts geringe veranderingen plaatsvinden.

Aangezien de transportverschillen over het profiel van de goede orde van grootte zijn (zie 3.2), lijkt een onnauwkeurigheid van een factor 2 in de tijdschaal van de aanpassingen een redelijke schatting.

Dit betekent, dat ook in het ongunstigste geval bij een geplande levensduur van ca. 5-10 jaar het grootste deel van de profielaanpassing binnen die periode kan geschieden.

9. CONCLUSIES

Ten aanzien van de toepassing van onderwateroever-suppleties voor de Hollandse kust kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- hoe dichterbij de kust aangebracht, des te sneller is het effect merkbaar;
- hoe dichterbij de kust aangebracht, des te groter is het effect;
- het suppletievolume heeft weinig invloed op de effectiviteit;
- zandwinning op -10 m heeft geen invloed op het suppletiegedrag;
- de effectiviteit is bij zeespiegelstijging even groot;
- de relatieve volumetoename van de strook tot 200 m uit de kust als gevolg van suppleties, uitgedrukt als percentage van het aangebrachte volume, bedraagt ongeveer:

Diepte t.o.v. NAP (m)	Effectiviteit (%)
3	55
5	40
7	25
10	< 5

Algemeen kan worden geconcludeerd, dat suppleren in de zone tot ca. NAP -7 m het kustgedrag gunstig beïnvloedt.

Bij suppleties in deze zone kan enig verlies van zand naar aangrenzende kustvakken optreden; indien de lengte tenminste enige kilometers beslaat, is dit effect relatief onbelangrijk.

Ten gevolge van (zeer hoge) suppleties op diep water kan tombolovorming optreden; dit kan leiden tot een herverdeling van zand langs de kust, ten gunste van het suppletie ook op grote schaal bezien is hiervan echter geen netto gunstig effect te verwachten.

Met behulp van de in hoofdstuk 7 gegeven methode kan globaal de levensduur van een onderwateroever-suppletie geschat worden.

Terecht is opgemerkt, dat sommige conclusies die in dit rapport worden getrokken, nogal voor de hand liggen. Het is evident, dat een suppletie meer en sneller effectief is, naarmate deze dichterbij de kust plaatsvindt. Eveneens is het duidelijk, dat men om de kust te beschermen niet in eerste instantie denkt aan suppleties op diep water. Door de grote economische voordelen van het op zo diep mogelijk water lossen van zand wordt het echter belangrijk, een kwantitatieve afweging te maken van verschillende opties. Tot nu toe ontbrak hiertoe de kennis; in dit verslag wordt een eerste benadering gegeven.

10. AANBEVELINGEN

Aan de hand van de in dit verslag beschreven ontwerperegels voor onderwateroever-suppleties kan een schatting gemaakt worden van benodigde zandhoeveelheden om een specifiek probleem aan te pakken. De economische afweging van verschillende alternatieven dient in een ander kader te worden gemaakt.

Gezien de genoemde onzekerheden die samenhangen met de modelmatige benadering van het probleem, verdient het aanbeveling een proef in de praktijk uit te voeren. Deze dient zorgvuldig te worden voorbereid en te worden begeleid door uitgebreide metingen en analyses.

De toetsing van het morfologische model aan prototype-gegevens is slechts globaal uitgevoerd kunnen worden. Bovendien bevat de toetsing subjectieve elementen. Gericht onderzoek in het veld is onontbeerlijk om op termijn tot een degelijke toetsing te komen.

Binnen het kader van deze studie konden slechts bestaande modellen toegepast worden; deze zijn op zo verantwoord mogelijke wijze toegepast. Van deze modellen zijn in dit verslag een aantal tekortkomingen geconstateerd, die slechts door gerichte inspanningen kunnen worden verbeterd. Naar de mening van de auteur is van verder 'sleutelen' aan de nu gebruikte modellen relatief weinig rendement te verwachten, maar moeten verbeteringen vooral gezocht worden in het beantwoorden van een aantal fundamentele vragen:

- Invloed van lange golven op het dwarstransport, en betere voorspelling van het gedrag ervan;
- Drie-dimensionale stromingspatronen die tot een andere profielontwikkeling aanleiding kunnen geven, met name dichtbij de kust;
- Processen in de golfploopzone;
- Langere-termijn interacties tussen nearshore zone en duingebied door combinatie van windtransport en afslag;
- Korreldiameter-afhankelijkheid van het dwarstransport en het effect van diameter-variatiën over het profiel;
- Nauwkeuriger formulering van het dwarstransport als functie van bekende stroom- en golfparameters.

Naast een verdieping van het inzicht in belangrijke kustvormende processen, kan dergelijk onderzoek leiden tot nauwkeuriger en meer gedetailleerde voorspellingen van het gedrag van suppleties en zandwinkuilen. Tevens kan een gedetailleerd morfologisch model gebruikt worden voor het afregelen van meer grootschalige morfologische modellen die uitgaan van diffusie-achtige verstoringen van een evenwichtssituatie.

LITERATUUR

- BAGNOLD, R.A. (1966)
An approach to the sediment transport problem from general physics
U.S. Geological Survey, Professional Paper 422-I
- BAILARD, J.A. (1981)
An energetics total load sediment transport model for a plane sloping beach
J. Geophysical Research, 86:10938-10954
- BATTJES, J.A. AND JANSSEN, J.P.F.M. (1978)
Energy loss and set-up due to breaking in random waves
Proc. 16th Int. Conf. Coastal Eng., ASCE, pp. 569-587
- BATTJES, J.A. and STIVE, M.J.F. (1985)
Calibration and verification of a dissipation model for random breaking waves
J. Geophysical Research, 90: 9159-9167
- BEACH EROSION BOARD (1952)
Artificially nourished and constructed beaches
Technical Memorandum no. 29, BEB, Corps of Engineers
- BEACH EROSION BOARD (1954)
Restudy of test-shore nourishments by offshore deposition of sand long Branch, New Jersey
Technical Memorandum no. 62, BEB, Corps of Engineers
- EDELMAN, T. (1960)
Kustverdediging door kunstmatige zandvoeding
Studierapport W.W.K. 60-3, RWS, Directie WRS, afdeling Kustonderzoek
- EDELMAN, T. (1967)
Vormveranderingen aan zandige kusten, deel II. Het dwarsprofiel en het materiaaltransport haaks op de kust.
Studierapport W.W.K. 67-3, RWS, W en W, Afd. Kustonderzoek
- KINMONT, A. (1961)
The nearshore movement of sand at Durban
CSIR Symposium no. 52, Pretoria, S.A., March 1961
- MARANUS, J.W. en VERHAGEN, H.J. (1987)
Zandgolven en kustverdediging in Zeeland
Voorspelling van kustgedrag
PT/C 1987 (42)2
- NANNINGA, H.D. (1984)
Het morfologisch gedrag van de brandingszone bij Egmond aan Zee naar aanleiding van natuurmetingen ter plaatse
Afstudeerverslag, TH Delft, februari 1984
- PILARCZYK, K.W. and VAN OVEREEM, J. (ed.)
Background information on artificial beach nourishment
Rijkswaterstaat - Delft Hydraulics, Centre for Civil Engineering, Research, codes and specifications, The Netherlands, Nov. 1986

LITERATUUR (vervolg)

- RIENECKER, M.M. AND FENTON, J.D. (1981)
A fourier approximation method for steady water waves
J. Fluid Mechanics, 104:119-137
- ROELVINK, J.A. (1988)
Large scale cross-shore transport tests
DELFT HYDRAULICS, report on model investigation, H596, 1988
- ROELVINK, J.A. AND STIVE, M.J.F. (1988a)
Large scale tests of cross-shore sediment transport on the upper shoreface
Symp. on Math. of Sed. Transp. in the Coastal Zone, Copenhagen, May 30-June 1
- ROELVINK, J.A. AND STIVE, M.J.F. (1988b)
Bar generating cross-shore flow mechanisms on a beach to appear in
Journal of Geophysical Research
- STEEZEL, H.J. (1987)
A model for beach and dune profile changes near dune revetments
Proc. Conference "Coastal Sediment '87", New Orleans, USA
- STIVE, M.J.F. (1986)
A model for cross-shore sediment transport
Proc. 20th Int. Conf. Coastal Eng., ASCE, pp. 1550-1564
- STIVE, M.J.F. AND BATTJES, J.A. (1984)
A model for offshore sediment transport
Proc. 19th Int. Conf. Coastal Eng., ASCE, pp. 1420-1436
- STIVE, M.J.F. AND DE VRIEND, H.J. (1987)
Quasi-3D nearshore current modelling: wave-induced secondary currents
Coastal Hydrodynamics, Spec. Conf., ASCE, pp. 356-370
- STIVE, M.J.F. AND WIND, H.G. (1986)
Cross-shore mean flow in the surf zone
Coastal Engineering, 10:325-340
- VAN VESSEM, P. en KEVELAM, D.J. (1987)
Onderwaterdammen; beïnvloeding van het langstransport
RWS/DGW notitie GWAO-87.450
- DE VRIEND, H.J., (1988)
Inherent stability of depth-integrated mathematical models of coastal morphology
Proc. IAHR Symposium on Mathematical Modelling of Sediment Transport in the Coastal Zone, Copenhagen, 30 May-1 June, 1988

LIJST VAN FIGUREN

- 3.1 Gehanteerde raaienstelsel
- 3.2 Profielontwikkeling en transporten
Egmond raai 0-8 jaar, $Dr = 0.05$ m
- 3.3 Profielontwikkeling en transporten
Delfland raai 0-8 jaar, $Dr = 0.05$ m
- 3.4 Profielontwikkeling en transporten
Noordwijk raai 0-8 jaar, $Dr = 0.05$ m
- 3.5 Egmond raai na twee jaar vs. omliggende profielen 32 t/m 35
- 3.6 Delfland raai na twee jaar vs. omliggende profielen 19 t/m 22
- 3.7 Noordwijk raai na twee jaar vs. omliggende profielen 23 t/m 27
- 3.8 Profielontwikkeling en transporten
Delfland raai 0-8 jaar, $Dr = 0.01$ m
- 3.9 Verloop 1 m dieptelijn in de tijd, Egmond raai
- 3.10 Verloop 1 m dieptelijn in de tijd, Delfland raai
- 3.11 Verloop 1 m dieptelijn in de tijd, Noordwijk raai
- 3.12 Hindcast gemiddelde van TAW-raaien 70, 70.5 en 71 van 220283 tot 101183
- 4.1 Ontwikkeling en relatieve verspreiding 100 m^2 suppletie op -3 m, Delfland
- 4.2 Ontwikkeling en relatieve verspreiding 100 m^2 suppletie op -5 m, Delfland
- 4.3 Ontwikkeling en relatieve verspreiding 100 m^2 suppletie op -7 m, Delfland
- 4.4 Ontwikkeling en relatieve verspreiding 100 m^2 suppletie op -10 m, Delfland
- 4.5 Relatieve verspreiding 100 resp. 200 m^2 suppletie op -5 m lijn, Delfland raai
- 4.6 Effect gelijktijdige winning op -10 m op relatieve verspreiding suppletie
- 4.7 Effect zeespiegelstijging op ontwikkeling dieptelijn, Delfland
- 4.8 Effect suppletie 100 m^2 op -5 m bij gegeven zeespiegelstijging
- 4.9 Relatieve verspreiding suppletie -5 m voor resp. Delfland, Noordwijk, Egmond
- 5.1 Toename volume in strook in de tijd als percentage van suppletievolumen
- 6.1 Effectiviteit t.a.v. langtransporteffecten, E_{langs} , als functie van de dimensieloze aanleg lengte L_*
- 6.2 Verloop van y/y_0 als functie van h/L voor verschillende waarden van L_*
- 6.3 Schematisatie beïnvloeding langtransport door suppletie buiten actieve zone
- 6.4 Kustlijnontwikkeling en langtransport achter onderwaterdam bij constante golfvalshoek $\phi = 20^\circ$ gedurende 5 jaar
- 6.5 Kustlijnontwikkeling en langtransport achter onderwaterdam bij golfvalshoek afwisselend 50° en -10° gedurende 5 jaar
- 6.6 Kustlijnontwikkeling en langtransport achter onderwaterdam bij golfvalshoek afwisselend 20° en -20° gedurende 5 jaar
- 7.1 Schema verlies V_L uit zone 200 m uit NAP-lijn bij kustachteruitgang $T * t$
- 7.2 Schematische vergelijking levensduur N van suppleties bij hetzelfde aangebrachte volume V_S maar verschillende waarden van de effectiviteit E

APPENDIX

Achtergrond van de verschillende transportmodel-concepten

ACHTERGROND VAN DE VERSCHILLENDE TRANSPORTMODEL-CONCEPTEN

Algemeen geldt boven een horizontale bodem:

$$q = \frac{1}{T} \int_0^h \int_0^T u(z,t)c(z,t) dt dz \quad (A.1)$$

met:

q = transport	(m ³ /m ² /s)
T = periode waarover gemiddeld wordt	(s)
h = waterdiepte	(m)
u = horizontale snelheid	(m/s)
c = concentratie	(m ³ /m ³)
z = hoogte boven de bodem	(m)
t = tijd	(s)

Concept 1 Vgl. (A.1) wordt geschreven als:

$$q = \int_0^h \left[\frac{1}{T} \int_0^T u(z,t)c(z,t) dt \right] dz \quad (A.2)$$

$$\text{Stellen we: } u(z,t) = \bar{u}(z) + u'(z,t) \quad (A.3)$$

$$\text{en: } c(z,t) = \bar{c}(z) + c'(z,t) \quad (A.4)$$

Dan geldt:

$$q = \int_0^h \left[\frac{1}{T} \int_0^T \{ \bar{u}(z)\bar{c}(z) + u'(z,t)\bar{c}(z) + \bar{u}(z)c'(z,t) + u'(z,t)c'(z,t) \} dt \right] dz \quad (A.5)$$

$$= \int_0^h \left[\bar{u}(z)\bar{c}(z) + \frac{1}{T} \int_0^T u'(z,t)c'(z,t) dt \right] dz \quad (A.6)$$

Als nu wordt aangenomen dat:

$$\frac{1}{T} \int_0^T u'(z,t)c'(z,t) dt = \bar{u}(z)\bar{c}(z) * \text{const} \quad (A.7)$$

dan geldt:

$$q \approx B_1 \int_0^h \bar{u}(z)\bar{c}(z) dz \quad (A.8)$$

Concept 2 Vgl. (A.1) kan worden geschreven als:

$$q = \frac{1}{T} \int_0^T \left[\int_0^h u(z,t)c(z,t) dz \right] dt \quad (A.9)$$

Indien geldt:

$$u(z,t) \approx \bar{u}_z(t) \quad (A.10)$$

dan wordt vgl. (A.9):

$$q = B_2 \frac{1}{T} \int_0^T \left[\bar{u}_z(t) \int_0^h c(z,t) dz \right] dt \quad (A.11)$$

$$= B_2 \frac{1}{T} \int_0^T \bar{u}_z(t) L(t) dt \quad (A.12)$$

waarin: $L(t)$ = totale sedimentlast (m^3/m^2).

Als nog wordt aangenomen, dat $L(t)$ behoudens constante coëfficiënten slechts een functie is van $\bar{u}_z(t)$, dan geldt:

$$q = B_2 \frac{1}{T} \int^T f[\bar{u}_z(t)] dt \quad (A.13)$$

waarin f een nog nader te definiëren functie is.

