

BIBLIOTHEEK
Dienst Weg- en Waterbouwkunde
Postbus 5044, 2600 GA DELFT
Tel. 015 - 699111

technisch rapport 19
innovatie
van kustverdediging

kustverdediging
na 1990

g.5 - 123,
XIX

BIBLIOTHEEK
Dienst Weg- en Waterbouwkunde
Postbus 5044, 2600 GA DELFT
Tel. 015-699111



waterloopkundig laboratorium | WL

innovatie van kustverdediging

inspelen op het kuststelsysteem

Technisch Rapport 19

H 825
mei 1989

H.J. de Vriend
J.A. Roelvink

kustverdediging na 1990

INHOUD

	blz.
SAMENVATTING.....	7
1. INLEIDING.....	11
1.1 Probleemstelling.....	11
1.2 Doelstelling.....	11
1.3 Wijze van aanpak.....	11
2. BESCHRIJVING VAN HET KUSTSYSTEEM.....	13
2.1 Algemeen.....	13
2.2 Grootschalige verkaveling.....	13
2.2.1 Aannamen en keuzen.....	13
2.2.2 Hollandse kust.....	14
2.2.3 De Waddenkust.....	15
2.2.4 De Deltakust.....	16
2.3 Systeemrelaties (grootschalig).....	17
2.3.1 Toestandsvariabelen.....	17
2.3.2 Overdrachtsrelaties.....	17
2.3.3 Toestandsvergelijking.....	17
2.3.4 Systeemgedrag.....	18
2.4 Kleinschalige verkaveling.....	18
2.4.1 Aannamen en keuzen.....	18
2.4.2 Verkaveling dwars op de kust.....	19
2.4.3 Verkaveling langs de kust.....	19
2.5 Systeemrelaties (kleinschalig).....	19
2.5.1 Toestandsvariabelen.....	19
2.5.2 Overdrachtsrelaties.....	20
2.5.3 Toestandsvergelijking.....	20
2.5.4 Systeemgedrag.....	20
3. INSPELEN OP HET GROOTSCHALIGE KUSTGEDRAG.....	21
3.1 Algemene tactiek.....	21
3.2 Kansen en bedreigingen.....	21
3.2.1 Kans: sedimentbuffers.....	21
3.2.2 Kans: autonome kustewaartse transporten.....	23
3.2.3 Kans/bedreiging: natuurlijke verplaatsing van geulen.....	24
3.2.4 Kans: energiedissiperende bankenrijen.....	24
3.2.5 Bedreiging: onttrekking van zand aan het kustsysteem.....	25
3.2.6 Zeespiegelrijzing.....	25
3.2.7 Bedreiging(/kans?): verandering van getijamplitude.....	25
3.2.8 Bedreiging: klimaatsverandering.....	26
3.2.9 Bedreiging: verslibbing.....	26
3.3 Maatregelen ter beïnvloeding van het grootschalige kustgedrag.....	27
3.3.1 Algemeen.....	27
3.3.2 Flexibele aanpassing aan het kustgedrag.....	27
3.3.3 Symptoombestrijding.....	27
3.3.4 Wegnemen/vermijden oorzaken ongunstige effecten.....	28
3.3.5 Ongunstige effecten verplaatsen.....	29
3.3.6 Zoeken naar tijdwinst.....	30
3.3.7 Inspelen op gunstige effecten.....	30
3.4 Gevolgen van systematisch beleid.....	31

INHOUD (vervolg)

4.	INSPELEN OP HET KLEINSCHALIGE KUSTGEDRAG.....	blz. 35
4.1	Algemene tactiek.....	35
4.2	Effectiviteitsvergroting.....	35
4.3	Efficiëntieverhoging.....	35
5.	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN.....	37

REFERENTIES

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 onderbouwde studies aan de orde gekomen en gerapporteerd in Technische Rapporten.

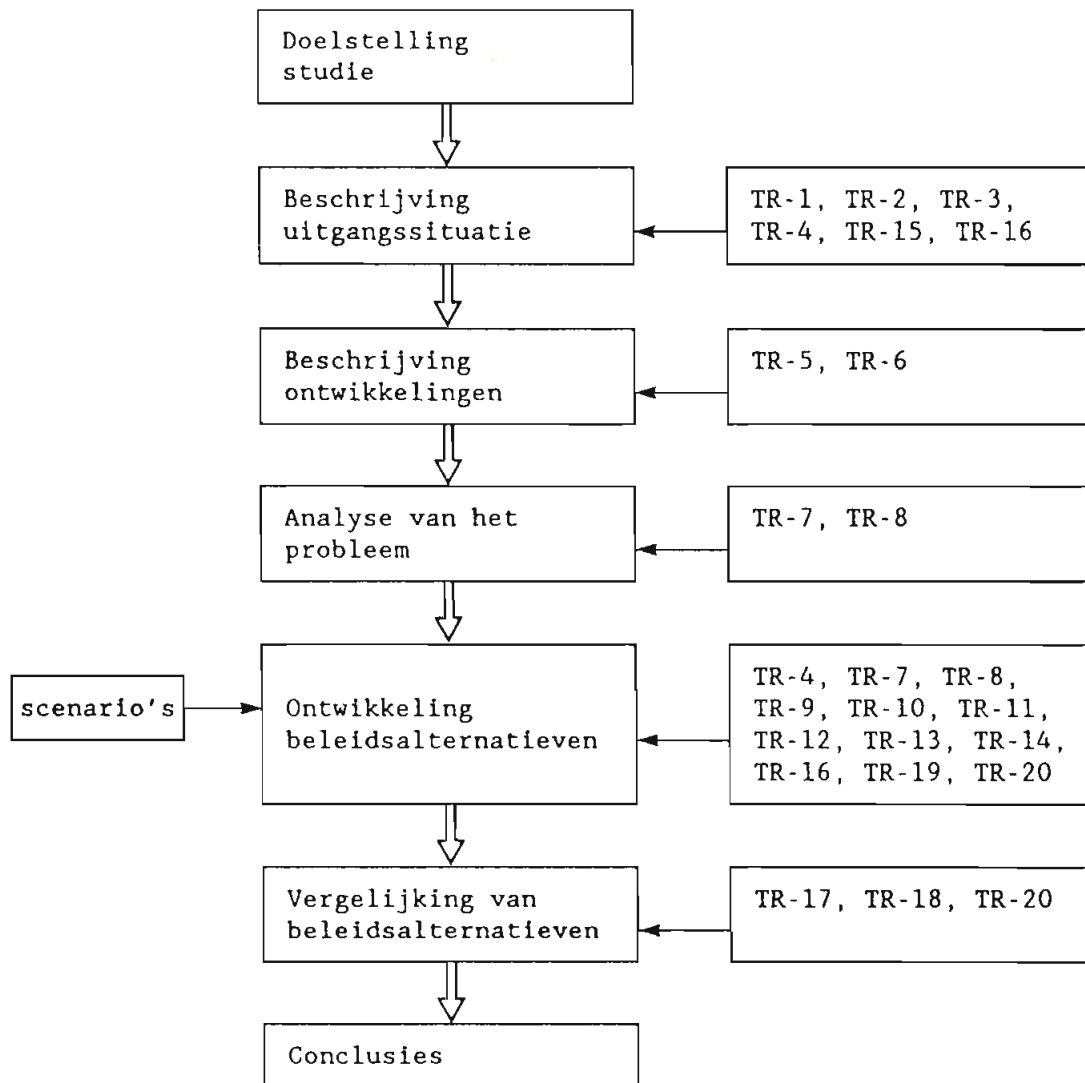
Het onderhavige rapport bevat de technische onderbouwing van één van de aspecten van de beleidsanalytische studie.

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 Gebruiksfuncties in de duinen;
invloed van kustgedrag op duinfuncties
- 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 kuststelsysteem
- TR-20 Zeewaartse kustverdediging
een globale analyse van enkele mogelijkheden

De onderbouwende studies bestrijken het brede scala van onderwerpen die 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

Doel van de studie

Het onderzoek van kustprocessen in het algemeen, alsmede de recente studie van de Nederlandse kust in het kader van de Nota Kustverdediging, hebben tal van nieuwe inzichten opgeleverd in de werking van de zandige Nederlandse kust als morfologisch systeem. In dit rapport worden de verkregen resultaten geïntegreerd tot een samenhangend beeld van de werking van dat systeem en de respons ervan op menselijke ingrepen en veranderende exogene condities. Dit beeld wordt vervolgens gebruikt om te komen tot het doel van de studie, een coherente visie op de te volgen tactiek bij de verdediging van de kust via "zachte" (d.w.z. in zand uitgevoerde) maatregelen en op de gevolgen van een langdurig volgehouden beleid ten aanzien van suppleties en zandwinning.

Methode van aanpak

De studie bestaat uit twee delen, aan te duiden als "integrerend" en "genererend".

In het integrerende deel wordt bestaande kennis bijeengebracht in een systeembeschrijving, d.w.z. in termen van toestandsbeschrijvingen en overdrachtsrelaties voor een stelsel van ruimtelijke elementen dat samen de Nederlandse kust vormt. Naast dit grootschalige stelsel, dat vooral de langere termijn (dus voornamelijk "natuurlijke") ontwikkelingen beschrijft, wordt voor de Hollandse kust een kleinschaliger systeem ontwikkeld, dat in staat is de respons op menselijke ingrepen, zoals zandwinningen of suppleties, weer te geven.

Beide systemen maken gebruik van bestaande kennis en werken daardoor, behalve integrerend, ook inventariserend: ze geven een beeld van wat er "bekend" is van het systeem en waar de kennis nog lacunes vertoont. In het genererende deel van de studie worden de systemen, als denkmodel of zelfs al in een operationele vorm (als computerprogramma), gebruikt om te komen tot een coherente visie op kustverdediging met "zachte" middelen. Dit betreft zowel kustverdedigingstactieken ("hoe kunnen we een bedreigd stuk kust het best verdedigen?") als de gevolgen van langdurig volgehouden beleid t.a.v. actieve (suppleties) en passieve (geen zandwinning) verdediging.

Grootschalige systeembeschrijving

Het grootschalige systeem beslaat in principe de volledige Nederlandse kust. In zijn huidige vorm en in lijn met de accenten in de Nota Kustverdediging, is het echter beperkt tot de Hollandse kust, alsmede het Marsdiep (incl. vloedkom en buitendelta) en het zuidelijke deel van Texel als representanten van de Waddenkust. Verder wordt een indicatie gegeven van hoe het systeem er voor de Deltakust uit zou moeten zien.

Het systeem bestaat uit een aantal geografische elementen. Langs de Hollandse kust vormen zij 3 rijen van 6 vakken, in dwarsrichting begrensd door dieptelijnen (top eerste duinregel, N.A.P. -5 m, N.A.P. -12 m, N.A.P. -18 m), in langsrichting door bijzondere punten (Hoek van Holland, Scheveningen, IJmuiden, Hondsbossche Zeewering, Den Helder) en een tweetal tussenpunten (Noordwijk en Egmond).

In de omgeving van het Marsdiep vormen de buitendelta, de vloedkom, de diepe geulen (Marsdiep, Schulpengat, Molengat) en de actieve kustzône

(Texel, ten zuiden van Huisduinen) voor de hand liggende geografische elementen, terwijl de kust voor het middendeel van Texel weer wordt verkaveld als betref het één sekte van de Hollandse kust.

Het is nog onduidelijk hoe de Deltakust zich op langere termijn zal gaan ontwikkelen, met name in de vroegere mondingen van Haringvliet en Grevelingen. Zolang hier sprake is van een min of meer open kust, zal het systeem er hier uitzien als een gekoppelde serie zeegaten (Haringvliet, Grevelingen, Oosterschelde, Westerschelde), met buitendelta, vloedkom, verbindingsgeulen en actieve kustzônes.

Behalve de geografische verkaveling, omvat het systeem toestandsbeschrijvingen per element en overdrachtsrelaties tussen de elementen. Door de verandering van zandvolume in een element als toestandsgrootheid te kiezen, is de toestandsbeschrijving voor de Hollandse kust de zandbalans, terwijl de overdrachtsrelaties niets anders zijn dan beschrijvingen van het netto sedimenttransport. Dit sluit goed aan bij de bestaande kustmorfologische kennis.

Voor de zeegaten, met hun sterke dynamiek, is een andere benadering nodig. De huidige, vooral empirische kennis suggereert een verband tussen het totale zandvolume in de buitendelta en een aantal integrale eigenschappen van de vloedkom. Daarmee wordt de dynamiek van het systeem vervat in de toestandsbeschrijving en volgen de transportrelaties uit de sedimentbalans.

Bij het invullen van het systeem komt een aantal lacunes in de kennis naar voren. Voor de Hollandse kust is dat vooral de smalle basis van de dwarstransportbeschrijving, wat betreft de rol van 3D-stromingen (Ekmanlagen) zowel als die van langere golven (deining, subharmonische golven). Op langere termijn speelt ook de momenteel nog onbegrepen respons van het getij, en met name van de asymmetrie daarvan (M_4), op grootschalige veranderingen in de bodemligging.

Bij de zeegaten is de kennis over het hele front onvoldoende (hoe werkt een zeegat? → sedimentverplaatsing, dynamica van het morfologische proces, maatgevende condities, rol actieve kustzône, etc.). De morfologische processen in het Voordelta-gebied zijn, althans voor wat betreft de korte en middellange termijn, uitgebreid bestudeerd, maar de daarbij vergaarde kennis is nog nauwelijks vertaald in termen van lange-termijn ontwikkelingen. Ook hier derhalve kennislacunes over een breed front.

Kleinschalige systeembeschrijving

De invulling van het kleinschalige systeem is voornamelijk gebaseerd op de bevindingen van de deelstudies naar onderwateroever-suppleties en zandwinputten (TR-10 en TR-14). De gekozen elementgrootte langs de kust (500 m) hangt hiermee samen: deze biedt voldoende resolutie voor een grove weergave van een suppletie of een winput.

De verkaveling dwars op de kust is, evenals in het grootschalige systeem, opgehangen aan dieptelijnen (zie Tabel 1).

Na middeling over de snelle fluctuaties, lijkt het morfologische systeem te streven naar het uitdempen van verstoringen ten opzichte van de evenwichtsvorm van de kust, waarbij de inherente tijdschalen sterk toenemen met de waterdiepte. In grove benadering laat dit gedrag zich afbeelden op een diffusiemodel met diepte-afhankelijke diffusie-

code	vanaf N.A.P	tot N.A.P.	vakhoogte	afstand h.o.h.
D	+13 m	+ 3 m	10 m	8 m
H	+3 m	- 3 m	6 m	5.5 m
L	-3 m	- 8 m	5 m	4.5 m
U	-8 m	-12 m	4 m	

Tabel 1 Verkaveling dwars op de kust (kleinschalig systeem)

coëfficiënt. Via de randvoorwaarden kan daarbij worden bereikt, dat het bovenste deel van het profiel vrijwel gelijkvormig blijft. Uitgaande van de veronderstelling dat de transportrelaties langs de kust en dwars erop volledig gescheiden kunnen worden (d.w.z. verschillende diffusiecoëfficiënten in langs- en dwarsrichting) kan dit diffusiemodel worden afgeregeld met behulp van de beschikbare mathematisch-fysische modellen (CROSTRAN, LOMOR, kustlijnmodellen). Daarmee verschaft het diffusiemodel dus geen nieuwe informatie, maar slechts een "vertaling" van wat al bekend was.

Dit diffusieconcept, gediscretiseerd naar de bovengenoemde kleinschalige geografische elementen, vormt de basis voor het kleinschalige systeem, dat derhalve aansluit bij de genoemde mathematisch-fysische modellen. Voorzien van de nodige "toeters en bellen" zou dit een goed presentatiemiddel kunnen zijn, alsmede een werktuig (voor deskundig gebruik!) om allerlei suppletie- en winningsscenario's door te rekenen.

Visie op "zachte" kustverdediging

Uitgaande van de in het systeem vervatte kennis, c.q. interpretatie van het kustgedrag, wordt een aantal kustverdedigingstactieken nader bekeken, te weten:

- flexibele aanpassing aan het kustgedrag,
- symptoombestrijding,
- wegnemen/vermijden van oorzaken van ongunstige effecten,
- verplaatsen van ongunstige effecten,
- zoeken naar tijdwinst,
- inspelen op gunstige effecten.

Daarbij worden suggesties gedaan voor gebruikmaking van genoemde kennis bij het verdedigen van de kust met "zachte" maatregelen.

Uitgangspunt daarbij is de huidige toestand van de kust, vervat in een aantal "kansen" en "bedreigingen".

Naast het aanstippen van een aantal nieuwe benaderingen die nadere aandacht lijken te verdienen, wordt gekeken naar de mogelijkheden en de gevolgen van langdurig volgehouden beleid, en ook naar de lange-termijn verplichtingen die dat met zich mee kan brengen.

Conclusies

Dit alles leidt, behalve tot een serie suggesties, tot een aantal globale conclusies ten aanzien van de kustverdediging met "zachte" middelen. In het kort komen die erop neer dat de Nederlandse kust voor een belangrijk deel op deze wijze te verdedigen moet zijn, ook bij een versnelde zeespiegelrijzing, mits we het gedrag van de kust in vol-

doende mate leren doorgronden om de bedreigingen en kansen tijdig te onderkennen en effectief en efficiënt met de ons ter beschikking staande middelen om te gaan.

Bovendien wordt de noodzaak van een voor de hele kust geïntegreerd beleid op basis van een lange-termijn visie nog eens onderstreept.

1. INLEIDING

1.1 Probleemstelling

Ter onderbouwing van de Nota Kustverdediging, die in 1984 in definitieve vorm zal verschijnen, is in opdracht van de Dienst Getijdewateren van de Rijkswaterstaat een aantal studies met betrekking tot de Nederlandse kust uitgevoerd. Een deel van deze studies is samen te vatten onder de noemer "De zandige kust als morfologisch systeem".

De studies in dit kader hebben geleid tot tal van nieuwe inzichten. Integratie daarvan moet leiden tot een samenhangend beeld van de werking van het kuststelsel en de respons daarvan op menselijke ingrepen en veranderende exogene condities. Dit beeld is de sleutel tot een coherente visie op de te volgen tactiek bij de verdediging van de Nederlandse kust.

1.2 Doelstelling

Het Waterloopkundig Laboratorium is door de Dienst Getijdewateren gevraagd bovengenoemde integratie tot stand te brengen en daaruit een visie op de kustverdedigingstactiek af te leiden. Het gaat daarbij niet zozeer om het maken van strategische keuzen ("terugtrekken, tenzij ..."/"terugtrekken, mits ..."/"standhouden"/"aanvallen"), als wel om aan te geven hoe een bepaalde strategie het best kan worden gerealiseerd.

Uitgangspunt daarbij is, dat zo veel mogelijk wordt ingespeeld op het gedrag van het kuststelsel, d.w.z. dat getracht wordt dit gedrag te beheersen en te sturen, in plaats van het af te weren en te onderdrukken.

1.3 Wijze van aanpak

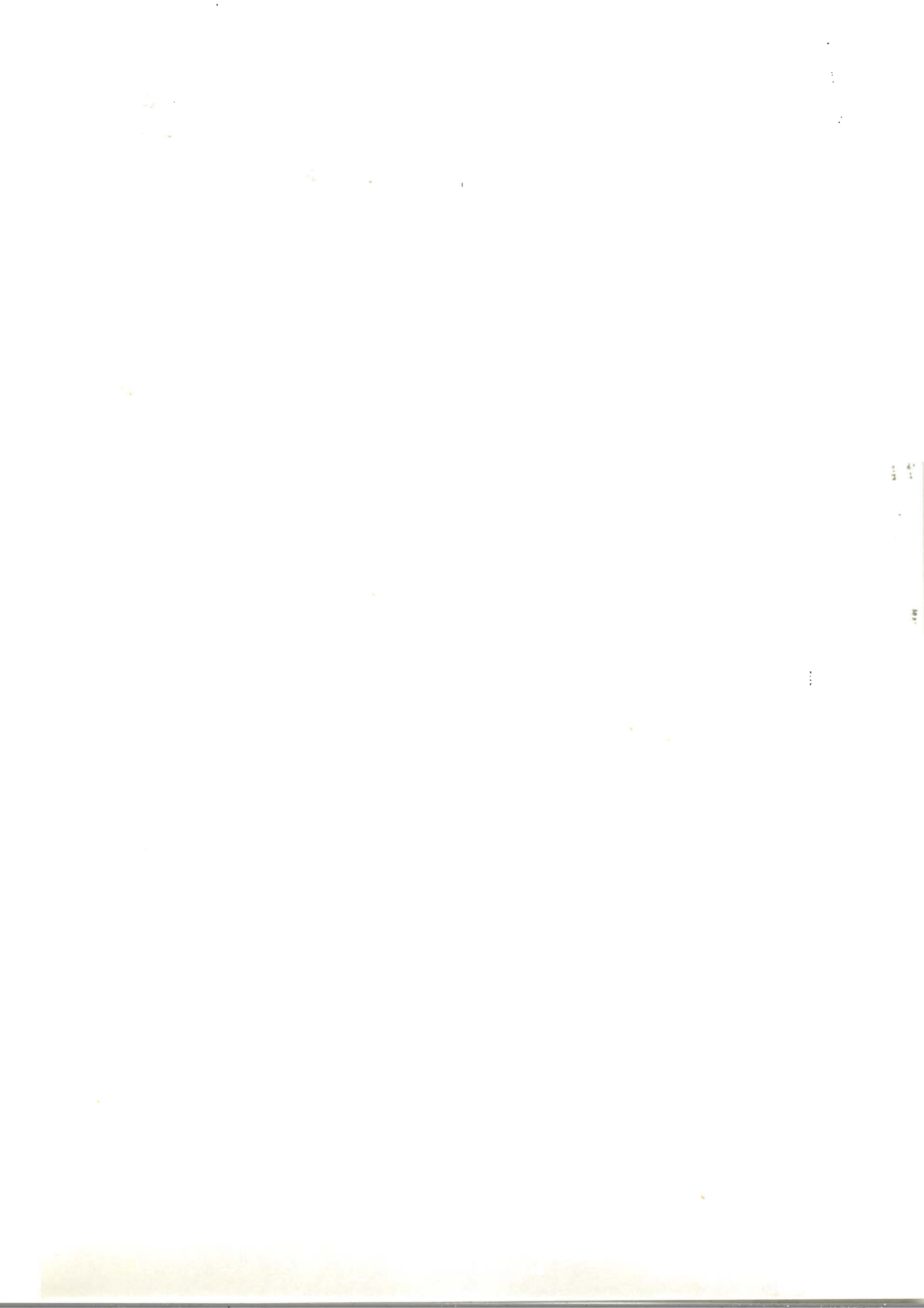
De gevolgde aanpak wordt min of meer weerspiegeld in de indeling van de nota.

Na de opzet van een schematische weergave van het kuststelsel, in de vorm van een aantal onderling gekoppelde geografische elementen (Hoofdstuk 2), volgen invulling van de overdrachtsrelaties tussen de elementen en de toestandsbeschrijving in de elementen, op basis van de momenteel beschikbare proceskennis.

In principe zou dit uitgewerkte systeem gebruikt kunnen worden als operationeel model van de Nederlandse kust, maar vooralsnog fungeert het slechts als drager van de in de diverse studies verkregen kennis, d.w.z. een methode om uit verschillende hoeken afkomstige systeemkennis op een evenwichtige manier te bundelen.

Nadat op deze wijze de stand van de kennis op dit gebied in kaart is gebracht, wordt in Hoofdstuk 3 nagegaan waar op dit moment, gezien vanuit de werking van het systeem, zandvoorraden en -tekorten aanwezig zijn, en worden de kansen en bedreigingen die hiermee samenhangen, besproken.

Deze informatie vormt, samen met de kennis van de werking van het systeem, de basis voor een aantal beschouwingen over een kustverdedigingstactiek die zo veel mogelijk inspeelt op de werking en de toestand van het kuststelsel.



2. BESCHRIJVING VAN HET KUSTSYSTEEM

2.1 Algemeen

De notie, dat de kust zich als een samenhangend systeem gedraagt, kan worden vertaald in de weergave van de kustzône als een verzameling onderling gekoppelde geografische elementen. De fysische processen worden daarbij verdisconteerd in de beschrijving van de toestandsvariabelen in deze elementen (bv. de gemiddelde bodemligging) en van de overdrachtsrelaties ertussen (bv. transportrelaties).

In principe komt deze benadering sterk overeen met een gediscrèteerde weergave van een continuüm-model, zij het dat de elementen van het systeem veelal grover zullen zijn dan de maaswijdte van z'n model. Dit onderscheid is echter gradueel, niet wezenlijk.

Bij de keuze van de geografische elementen moet worden uitgegaan van een fysisch zinvolle verkaveling. Daarbij wordt al gauw duidelijk, dat dan niet met één enkele verkaveling kan worden volstaan. Immers, de natuurlijke ontwikkeling van de kust speelt zich veelal op een grotere schaal af dan de respons op menselijke ingrepen en dat wordt weerspiegeld in de ruimtelijke resolutie van de huidige proceskennis. Het ligt daarom voor de hand om twee verschillende verkavelingen te gebruiken: één voor de natuurlijke ontwikkelingen¹⁾ en één voor de verstoringen daarop door kleinschaliger menselijk ingrijpen.

In het volgende wordt in grote lijnen aangegeven hoe de beide systemen eruit zouden moeten zien, voor wat betreft de ruimtelijke verkaveling, de te gebruiken toestandsvariabelen en de geldende overdrachtsrelaties en balansvergelijkingen.

Een meer gedetailleerde uitwerking van het systeem wordt gegeven in Annex I, waarbij ten behoeve van de afzonderlijke leesbaarheid daarvan enige overlap met dit rapport geaccepteerd is.

2.2 Grootschalige verkaveling

2.2.1 Aannamen en keuzen

In het algemeen moet de verkaveling passen bij de voor de natuurlijke ontwikkeling van de kust relevante fysische processen.

Deze op het eerste gezicht voor de hand liggende stelling bevat een aantal onzekere elementen, die min of meer arbitraire keuzen nodig maken:

- a. in welk soort natuurlijke ontwikkelingen, op welke tijd- en ruimteschalen, zijn we geïnteresseerd?
- b. welke fysische processen worden relevant geacht en op welke gronden?
- c. hoe is het begrip "passen bij" t.a.v. de verkaveling te concretiseren?

¹⁾ inclusief de gevolgen van grootschalige ingrepen, zoals de afsluiting van de Zuiderzee, de Deltawerken, etc.

- ad a. In overeenstemming met de benadering bij de kustvoorspelling (zie TR-5*), wordt ervan uitgegaan dat alleen de grootschalige ontwikkelingen van belang zijn. Voor de gesloten kust komt dit neer op een resolutie van de orde van 10 km langs de kust, bij de zeegaten en de eilanden zal dat iets minder zijn.
- ad b. Bij de huidige stand van de kennis op het gebied van kustmorfologie zal het antwoord op deze vraag nog vrij sterk aan verandering onderhevig zijn. Vaak wordt aangenomen (zie bv. TR-5), dat grootschalige morfologische processen bepaald worden door grootschalige mechanismen in de water- en sedimentbeweging, d.w.z. dat een zwakke koppeling verondersteld wordt van kleinere naar grotere tijd- en ruimteschalen. Dit zou bijvoorbeeld impliceren, dat verschijnselen als brandingsruggen en shoreface-connected ridges niet bepalend zijn voor de grootschalige kustontwikkeling.

Op grond van deze aanname is het, althans in de "laag-dynamische zônes", mogelijk de kustontwikkeling af te leiden uit "initiële" sediment-balansen, zoals dat in de kustvoorspelling gedaan is (zie TR-5). In dat geval is het ook mogelijk de toestandsvariabelen en de overdrachtsrelaties van het beoogde systeem te beschrijven in termen van sedimenttransporten en -balansen op de schaal van de geografische elementen van het systeem.

Deze benadering is niet houdbaar in de "hoog-dynamische zônes", waar de interactie tussen water- en sedimentbeweging enerzijds en morfologische veranderingen anderzijds een wezenlijke rol vervult. In deze gebieden zijn de relevante processen, vooral dwars op de kust (?), van een kleinere schaal dan de gewenste informatie (bv. gedrag banken vs. verschuiving gefilterde profiel). In dat geval moeten de systeemrelaties via één of ander filter uit de water- en sedimentbewegingswetten of uit de morfologische veranderingen worden afgeleid.

- ad c. Het voorgaande kan ook worden omgekeerd: in de "laag-dynamische zônes" kan de vakgrootte worden aangepast aan de schaal van de relevant geachte waterbewegings- en transportverschijnselen, maar in de "hoog-dynamische zônes" is dat niet haalbaar en kan de vakgrootte beter worden aangepast aan de gewenste informatie-dichtheid.

2.2.2 Hollandse kust

Volgens de huidige inzichten (TR-5) wordt het gedrag van de Hollandse kust, wellicht met uitzondering van het meest noordelijke gedeelte, getypeerd door langzame grootschalige veranderingen, deels onder invloed van transport in de brandingszône, deels onder invloed van het getij. Gesuperponeerd daarop is er, sneller en kleinschaliger, een "evenwichts"-dynamiek in de vorm van bewegende banken, muisystemen, etc.

*) Verwijzingen naar andere Technische Rapporten in het kader van de Kustnota worden aangeduid met "TR", gevolgd door het rapportnummer

Wordt deze dynamiek buiten beschouwing gelaten, dan kan voor dit gedeelte van de kust een vrij grove benadering gehanteerd worden, althans in de richting langs de kust. Voor de hand liggende plaatsen voor vakgrenzen zijn Hoek van Holland, IJmuiden en de Hondsbossche Zeewering, alsmede wellicht Scheveningen voor de ondiepere delen van het profiel. Daarnaast suggereert het waargenomen kustgedrag een overgang ergens tussen IJmuiden en de Hondsbossche, bv. bij Egmond. Verder zal de noordgrens van dit kustgedeelte niet in Den Helder liggen, maar iets zuidelijker, in verband met de interactie tussen de kust en het zeegat. Tenslotte wordt, om tot ongeveer gelijksoortige vakken te komen, een grens gelegd bij Noordwijk, waar veel bekend is van de residuele waterbeweging (zie TR-5/3).

De vakindeling dwars op de kust kan uitgaan van wat bekend is van de morfologische processen aan een in langsrichting uniforme kust. In Fase 3 van de kustvoorspelling (TR-5/1) wordt gewerkt met twee limietzônes, nl. het bovenste deel van de onderwateroever (tot aan de top van de zeereep), waar het kustprofiel gelijkvormig blijft, en het benedenste deel van de onderwateroever, waar de bodem globaal op zijn plaats blijft. Omdat hier met een aaneensluitend systeem gewerkt moet worden, ligt het voor de hand daar een overgangszône tussenin te plaatsen.

Tenslotte moet de interactie met de duinen in het systeem worden opgenomen. De resolutie in ruimte en tijd rechtvaardigt de aanname, dat de duinen als een passief zandreservoir zullen werken, zodat slechts het transport tussen het bovenste deel van het "natte" profiel en de duinen behoeft te worden mee genomen.

Op grond van deze overwegingen wordt de verkaveling dwars op de kust als volgt ingevuld:

- de actieve zône, van de top van de zeereep tot NAP -5 m,
- de overgangszône, van NAP -5 m tot NAP -12 m,
- de benedenste onderwateroever, van NAP -12 m tot NAP -18 m.

De resulterende verkaveling voor de Hollandse kust is geografisch weergegeven in Figuur 1 en schematisch in Figuur 2, beide in Annex I.

2.2.3 De Waddenkust

De Waddenkust is een aaneenschakeling van zeegaten en eilanden. De meeste eilanden zijn qua morfologisch gedrag te onderscheiden in een centraal deel, dat zich min of meer gedraagt als een stuk gesloten kust, en twee koppen, waarvan de ontwikkeling nauw samenhangt met het aangrenzende zeegat. Voor het centrale deel van een eiland kan het dwarsprofiel op dezelfde wijze worden ingedeeld als bij de Hollandse kust, maar rond de koppen gaat dat niet meer op. Daar moet de verkaveling worden afgeleid uit de werking van de zeegaten.

Hoewel dit gedrag nog verre van volledig doorgrond wordt (zie Hoofdstuk 3), is er een aantal vrijwel overal voorkomende basiselementen te onderscheiden (zie ook TR-5/1):

- aan de Noordzeekant: een buitendelta en één of meer hoofdgeulen,
- tussen de eilanden: één of meer diepe geulen,
- aan de Waddenzeekant: een vloedkom, met daarin een binnendelta, gevoed door een systeem van geulen,
- aan de koppen van de eilanden: een harde verdediging met een diepe geul erlangs, of een zandige kust, veelal de rand van een uitgestrekte plaat.

In de diepe geulen is de bodem veelal afgepleisterd met grof materiaal, waardoor de morfologische aktiviteit van deze geulen zelf sterk wordt gereduceerd, althans in de vertikaal. (Aannemend, dat de verandering van de sediment-berging in de geulen, onder invloed van horizontale verplaatsingen, gering is, fungeren ze primair als "doorgeefluik" van sediment tussen de zee en het estuarium. In systeem-termen: de werking ervan is weer te geven via een transportrelatie.

De belangrijkste reservoirs van zand rond een zeegat zijn de buiten- en binnen delta's. De momenteel beschikbare empirische relaties voor de morfologie van estuaria beschrijven o.a. de zandinhoud van de buitendelta als functie van de inhoud van de achterliggende vloedkom (zie TR-5). Daarom zijn de buitendelta en de vloedkom voor de hand liggende elementen in het systeem. Voor de zandige eilandkoppen, waar ook brandingstransport zal optreden, moet bovendien de "aktieve zône" in de verkaveling worden meegenomen.

Daarmee worden de zeegaten op een wezenlijk afwijkende manier in het systeem opgenomen: tussen de elementen is er, geografisch gezien, ruimte voor geulen als morfologisch inaktieve, transporterende verbindingen. Bovendien wordt het systeem hier gecompliceerder, omdat de buitendelta met veel meer elementen verbonden is dan een element voor de gesloten kust (zie Annex I, Figuur 3).

2.2.4 De Deltakust

De Deltakust bestaat sinds lang uit een aaneenschakeling van zeegaten, met daartussen repen land, die te smal zijn om de zeegaten volledig van elkaar te scheiden. Er is daar dan ook een min of meer aaneengesloten buitendelta ontstaan, de Voordelta.

De Deltakust wijkt ook anderszins belangrijk af van de rest van de Nederlandse kust: als gevolg van de (op morfologische tijdschaal gezien) recente Deltawerken moet dit deel van de kust als sterk verstoord worden beschouwd. Immers, na het geheel of gedeeltelijk afsluiten van de zeearmen streeft het systeem naar een totaal andere evenwichtstoestand dan daarvoor.

Hoewel belangrijk en grensverleggend onderzoek verricht is aan de spectaculaire herverdeling van zand op de Voordelta, met veel nieuwe inzichten in complexe morfologische processen als resultaat (zie bv. Van der Spek, 1987 en Steijn et al., 1989), wordt het systeem nog onvoldoende doorgrond om de ontwikkeling naar een nieuw evenwicht op langere termijn te kunnen beschrijven. Het lijkt te verwachten, dat de kust zich voor de volledig afgesloten estuaria tot een vloeiende lijn zal strekken, maar de vorm en de plaats van die lijn is niet bekend, evenals de tijdschaal waarop dit proces zich zal voltrekken en de mate waarin de rest van de kust profiteert van het "overtollige" zand.

Als het natuurlijke evenwicht al moeilijk voorspelbaar is, dan geldt dat zeker ook voor de gevolgen van een systematische zandwinning op grote schaal in dit gebied.

Gezien de complexiteit van de morfologische processen in dit gebied en de tekortschietende onderbouwende kennis van de langere-termijn ontwikkelingen, zal het systeem voor de Deltakust vooralsnog niet worden ingevuld.

2.3 Systeemrelaties (grootschalig)

2.3.1 Toestandsvariabelen

De met het systeem te beschrijven toestandsgrootheden betreffen de morfologie op de schaal van de beschouwde vakken. Het ligt dus voor de hand een zandinhoudsmaat per vak als variabele te kiezen.

Omdat het systeem niet eenduidig is in de keuze van de vakgrenzen (deels verticale niveaus, deels vaste randen in het horizontale vak), zal ook de definitie van de toestandsvariabelen niet voor alle vakken gelijk zijn. Langs de gesloten kust, waar het dwarsprofiel geschematiseerd is via vaste niveau-lijnen, is de voor de hand liggende variabele het zandvolume tussen de twee grensniveaus van het vak. Als referentie kan een willekeurig vertikaal vlak dienen, dat bovendien per vak gekozen kan worden, zolang het maar niet varieert in de tijd. Voor het gemak wordt hiervoor per rij van vakken dwars op de kust één vlak gekozen, dat door de top van de zeereep.

Rond de zeegaten en bij de Deltakust is deze definitie niet bruikbaar. De relevante variabelen zijn hier de zandinhoud per horizontaal begrensd gebied, zoals de buitendelta of de vloedkom, met een horizontaal referentievlak voor de vloedkom, en overeenkomstig de bestaande empirische relaties (TR-5/1), het "normale" kustprofiel voor de buitendelta.

2.3.2 Overdrachtsrelaties

De overdrachtsrelaties tussen de diverse geografische elementen van het systeem betreffen sedimentvolumina en kunnen derhalve beschouwd worden als effectieve transportrelaties. Daarmee wordt bedoeld, dat ze op de voor het systeem relevante tijdschaal de netto sedimentoverdracht van het ene vak naar het andere beschrijven. Met name in sterk dynamische gebieden, is deze sedimentoverdracht niet noodzakelijkerwijs gelijk aan het over langere tijd gemiddelde transport bij gefixeerde bodemligging.

Afhankelijk van de situatie, worden deze overdrachtsrelaties afgeleid uit berekende, gemeten of anderszins bepaalde netto transporten (bv. het autonome dwarstransport op dieper water), of uit waargenomen of modelmatig gesimuleerde morfologische veranderingen (bv. uit de empirische relaties tussen getijvolume en globale morfologische eigenschappen van een vloedkom/buitendelta systeem aan een onderbroken kust).

2.3.3 Toestandsvergelijking

Behalve overdrachtsrelaties die de netto transporten beschrijven, is per element ook een toestandsvergelijking nodig, die een verband legt tussen de transportrelaties en de toestandsvariabele in het desbetreffende element. Deze toestandsvergelijking komt overeen met de netto sedimentbalans voor het element, d.w.z. na integratie over tijdschalen die kleiner zijn dan de in het systeem beschouwde. Met name in sterk dynamische gebieden is dit, net als bij het netto transport (zie par. 2.3.3), niet hetzelfde als de over langere tijd geïntegreerde "initiale" sedimentbalans.

De toestandsvergelijking beschrijft in principe altijd de netto sedimentbalans in het element, ook in gevallen (zoals bijvoorbeeld bij de zeegaten) waar relaties tussen toestandsvariabelen in de elementen

gegeven zijn. In dat geval worden deze relaties gebruikt in plaats van transportrelaties (zie bv. Annex I, Bijlage D).

2.3.4 Systeemgedrag

De overdrachtsrelaties en de toestandsvergelijkingen vormen samen een wiskundig stelsel, dat in combinatie met de nodige randvoorwaarden het grootschalige gedrag van de kust geacht wordt te beschrijven. Het in Annex I uitgewerkte systeem is daarbij geheel lineair en bestaat uit een stelsel van algebraïsche vergelijkingen (als regel de transportrelaties) en eerste-orde gewone differentiaalvergelijkingen in de tijd (als regel de toestandsvergelijkingen). Het verschilt daardoor niet wezenlijk van een ruimtelijk gediscrètiseerd stelsel partiële differentiaalvergelijkingen.

Bij nadere beschouwing vertoont het stelsel voor de gesloten kust sterke overeenkomst met een gediscrètiseerde weergave van een niet-uniform, anisotroop diffusieproces. Volgens dit systeem gedraagt de kust zich over langere tijd gezien dus voornamelijk diffusief, althans ten aanzien van verstoringen ten opzichte van een gegeven referentietoestand.

2.4 Kleinschalige verkaveling

2.4.1 Aannamen en keuzen

Naast de langzame, grootschalige ontwikkelingen spelen ook kleinschalige processen een rol bij het kustgedrag. Dit geldt uiteraard voor de natuurlijke dynamiek, als regel opgevangen via een veiligheidsmarge in het kustverdedigingsstelsel. Vaststelling van deze marge zal, zeker bij een systematisch veranderende kust, mede moeten gebeuren op grond van kennis van de morfologische processen.

Het gaat in dit rapport echter niet om de strategie van de kustverdediging, noch om de veiligheidsmarges en de criteria voor ingrijpen, maar om het zo goed mogelijk inspelen op het kuststelsel als er ingegrepen wordt. Dit betekent, dat de gevolgen en de effectiviteit van menselijke ingrepen, zoals suppleties en zandwinning, hier aan de orde zijn. Bovendien zal het accent liggen op "zachte" constructies, waarvan het gedrag kustmorfologisch benaderd kan worden.

Evenals bij de grootschalige verkaveling wordt hier uitgegaan van een zwakke koppeling tussen kleinschalige en grootschalige morfologische verschijnselen, zodanig, dat deze afzonderlijk beschouwd en gesuperponeerd kunnen worden. Dit impliceert voor de kleinschaliger verschijnselen, dat alleen naar verstoringen cq. veranderingen ten opzichte van de natuurlijke ontwikkeling gekeken hoeft te worden.

Het moge duidelijk zijn, dat een dergelijke benadering wellicht toelaatbaar is bij de gesloten kust, waar de natuurlijke processen grootschalig en tamelijk doorzichtig zijn, maar veel minder in de zee-gaten, waar de natuurlijke processen minder grootschalig en veel ingewikkelder zijn. De kleinschalige verkaveling zal dan ook alleen voor de Hollandse kust en, in principe, voor het centrale deel van een Waddeneiland worden uitgewerkt.

Deze delen van de kust, afgezien van wellicht enkele lokale verschijnselen, laten nog een vereenvoudiging toe: het gedrag van de kust in langsrichting kan min of meer los gezien worden van de ontwikkeling van de profielvorm (in wiskundige termen: scheiding van variabelen). Daardoor kan kennis van de profielontwikkeling aan een uniforme kust

hier gebruikt worden, evenals kennis van de kustlijnontwikkeling in geval van een evenwichtsdwarsprofiel.

2.4.2 Verkaveling dwars op de kust

Aangezien het hier om kleinschaliger verschijnselen gaat, is een grotere ruimtelijke resolutie nodig, en dus een fijnere verkaveling. Voor wat betreft het dwarsprofiel lijkt daarbij een fysisch zinvolle indeling:

- de zeereep, vanaf de duinvoet (NAP +3 m) tot voorbij de eerste duinregel; deze moet hier als element in het systeem worden meegenomen, omdat op de beschouwde tijdschaal van ca. 10 jaar de duinvoet, de hoog- en laagwaterlijn niet meer op vaste afstand van elkaar bewegen.
- de hoog-actieve zône, tussen NAP -3 m en NAP +3 m; dit is de brekerzône, waarin ook het merendeel van het bij storm van de duinen afgeslagen zand terecht komt.
- de laag-actieve zône, tussen NAP -8 m en NAP -3 m; dit is de zône met (voornamelijk niet-brekende) golven en getij in een min of meer gelijkwaardige rol.
- de diepere onderwateroever, tussen NAP -16 m en NAP -8 m; hier overheersen gemiddeld de getij-effecten, terwijl de morfologische tijdschaal op NAP -16 m zo groot geworden is (TR-10), dat daar voor de kleinschalige verstoringen op de natuurlijke ontwikkelingen een gesloten rand (geen transport) gelegd mag worden.

De vakken zijn onderling weer verbonden via transportrelaties (zie Annex I, Figuur 5), die later zullen worden gespecificeerd. Hier zij nog opgemerkt, dat er vanaf de zeereep naar het achterliggende duin een (aeolisch) transport wordt meegenomen.

2.4.3 Verkaveling langs de kust

De verkaveling langs de kust wordt vooral ingegeven door de verwachte afmetingen in kustlangsrichting van kustverdedigingswerken in zand, alsmede door de resolutie die nodig is om, op de voor deze werken relevante tijdschaal, de herverdeling van het zand langs de kust weer te geven. Op grond van praktische ervaringscijfers (zie bv. Pilarczyk en Van Overeem, 1987) en met behulp van wat experimenten met een kustlijnmodel, leidt dit tot een vakgrootte van ongeveer 0.5 km.

2.5 Systeemrelaties (kleinschalig)

2.5.1 Toestandvariabelen

Zoals reeds gesteld werd in hoofdstuk 2, worden kleinschalige verstoringen op de grootschalige ontwikkeling ontkoppeld van die ontwikkeling beschouwd.

Omdat alleen de gesloten kust hier wordt meegenomen, is de definitie van de toestandvariabelen dezelfde voor alle elementen van het systeem: de verstoring in de over het element gemiddelde positie van de zeebodem ten opzichte van een vertikaal referentievlak. Daarmee zijn de toestandvariabelen dus gedefiniëerd als horizontale afstanden, min of meer op dezelfde wijze als in een kustlijnmodel.

2.5.2 Overdrachtsrelaties

Omdat het kleinschalige systeem uitsluitend de gesloten kust betreft, wordt er ook maar één type overdrachtsrelatie gebruikt, zij het in twee kwantitatief verschillende vormen (langs de kust en dwars erop). Het komt erop neer, dat het netto transport tussen twee elementen evenredig wordt gesteld aan het verschil in zandoverschot/-tekort tussen de elementen, zodanig dat het zand toevloeit naar het element met het kleinste overschot, c.q. het grootste tekort. Dit komt overeen met waarnemingen en berekeningen, althans voor situaties in bijna-evenwicht.

In tegenstelling tot het grootschalige systeem, dat uitgaat van vormvastheid van het profiel in de actieve zône en daarboven, wordt hier ook de interactie tussen strand en duinen meegenomen. Daarvoor wordt een empirische relatie afgeleid, die in plaats van de transportrelatie tussen actieve zône en duinfront wordt gebruikt.

2.5.3 Toestandsvergelijking

De toestandsvergelijking betreft, evenals in het grootschalige systeem, de netto sedimentbalans per element. Hiervoor geldt eens te meer, dat dit niet hetzelfde is als de over langere tijd geïntegreerde "initiële" sedimentbalans. De dynamiek van de actieve zône, bijvoorbeeld, is hier op een min of meer empirische wijze in verdisconteerd, in dit geval door te kijken naar de resultaten van langdurige simulaties met het kustprofielmodel CROSTRAN (zie TR-14), het in het zandwinningsonderzoek (TR-10) gebruikte model LOMOR en het gedrag van kustlijnmodellen. Bij het waargenomen gedrag van de oplossing is een modeltype gezocht (i.c. een diffusie-achtig model) en dat is gefit aan de kwantitatieve resultaten van de simulaties.

2.5.4 Systeemgedrag

Het inherente gedrag van het kleinschalige systeem is dat van een inhomogeen, anisotroop diffusieproces. Dit is afgeleid uit de bovengenoemde langdurige model-simulaties voor de Hollandse kust, zonodig nadat de resultaten over de kortere tijdschalen waren gemiddeld. Dit diffusiemodel is dus nadrukkelijk niet het resultaat van een formele afleiding uit de basisvergelijkingen voor water- en zandbeweging. Voor een aantal testgevallen (bv. onderwateroeversuppleties) is dit model vergeleken met volledige model-simulaties, met als conclusie dat het diffusiemodel in alle gevallen een goede benadering van de gefilterde simulatieresultaten opleverde.

3. INSPLEN OP HET GROOTSCHALIGE KUSTGEDRAG

3.1 Algemene taktiek

Ervan uitgaande dat de huidige kennis, zoals bijvoorbeeld vervat in Annex I, voldoende inzicht biedt in de werking van het kuststelsel, is de vraag hoe daarop bij de kustverdediging en het zandbeheer het best kan worden ingespeeld. Daarbij is een aantal benaderingen mogelijk, al dan niet in combinatie:

- ongunstige effecten direkt in hun uitingsvorm bestrijden (symptoombestrijding),
- de oorzaak van ongunstige effecten wegnemen/vermijden,
- ongunstige effecten verplaatsen, naar waar ze minder problemen opleveren,
- zoeken naar tijdwinst,
- gunstige effecten in hun uitingsvorm bevorderen (symptoombevordering),
- de oorzaak van gunstige effecten versterken/genereren,
- gunstige effecten verplaatsen naar waar er behoefte aan is,
- noodzakelijke ingrepen (bijv. zandwinning) daar uitvoeren waar ze de minste problemen opleveren.
- in de taktiek van het kustonderhoud en bij de uitvoering van de daarvoor benodigde ingrepen optimaal gebruik maken van de eigenschappen van het kustgedrag.

Behalve inzicht in de werking van het stelsel, is hiervoor een goede analyse van de huidige toestand nodig (waar liggen de "kansen", waar de bedreigingen?).

3.2 Kansen en bedreigingen

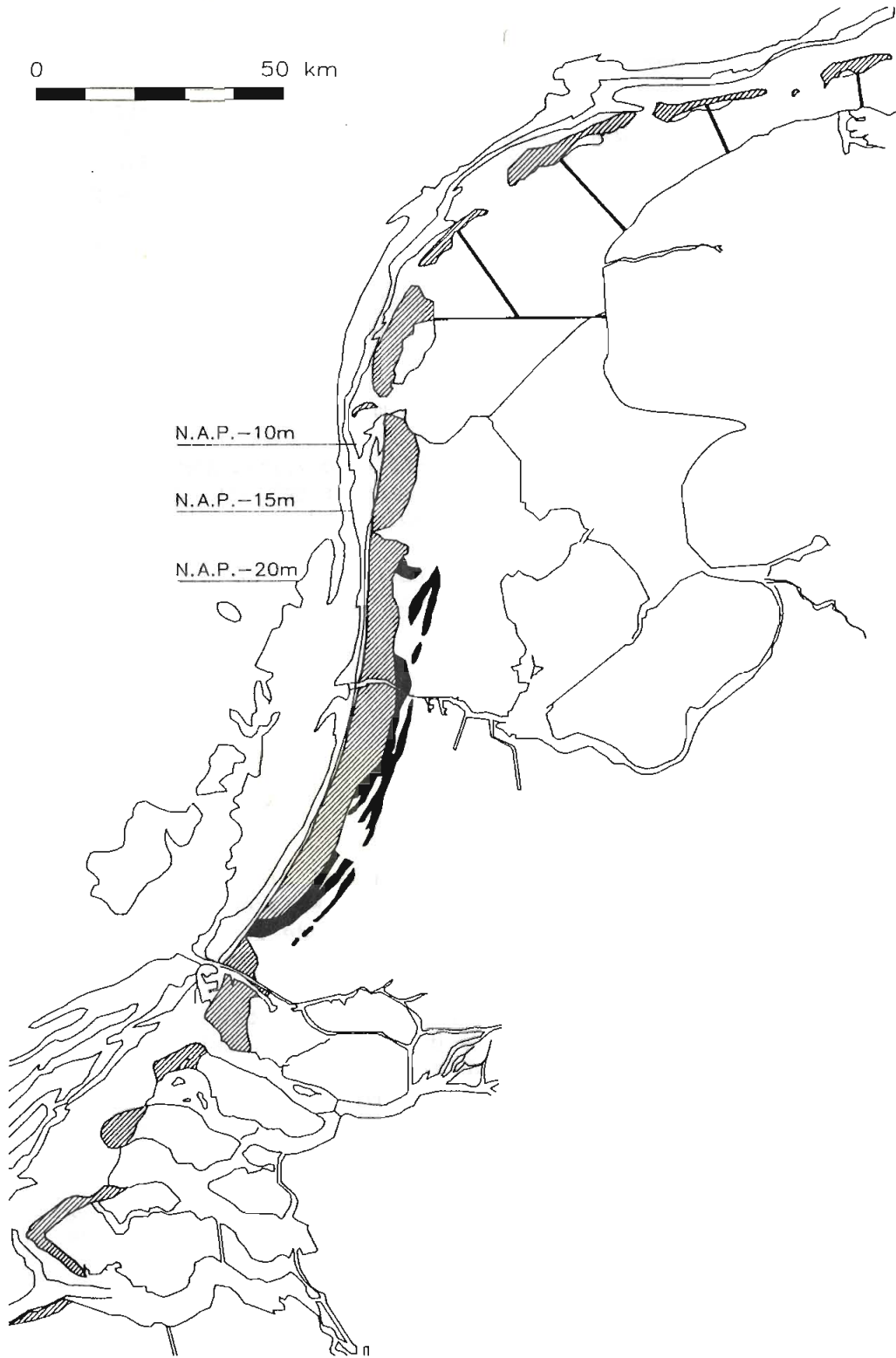
3.2.1 Kans: sedimentbuffers

Op grotere schaal gezien worden de "kansen" in de huidige toestand gevormd door eventuele zandbuffers, d.w.z. gebieden met een overschot aan zand dat geen wezenlijke rol vervult in de instandhouding van de kust.

Het meest in het oog lopende gebied in deze is dat tussen de N.A.P. -10 m en N.A.P. -20 m lijnvoor de Hollandse Kust (zie Figuur 1). Het is niet duidelijk of dit een residu van een vroegere delta (Rijn?) is, die heel langzaam (TR-10) wordt opgeruimd door het getij (in combinatie met golven), of juist een sedimentreservoir dat onder invloed van het getij heel langzaam wordt opgebouwd. De indicaties die het initiële transportmodel (TR-5/4) geeft zijn op dit punt niet erg duidelijk, temeer daar de M4-component van het getij, die in hoge mate bepalend is voor het verloop van het resttransport langs de kust, sterk beïnvloed wordt door het grootschalige diepteverloop. Er zou hier dus wel eens sprake kunnen zijn van een dynamische interactie, zij het op zeer grote tijdschaal.

Een complicerende factor bij de interpretatie van het dieptelijnenverloop in dit gebied is het voorkomen van slecht erodeerbare lagen, door de aanwezigheid een laag slecht erodeerbaar materiaal, of ten gevolge van een kleine hoeveelheid slib in het zand (bijv. voor IJmuiden).

Hoe het ook zij, het gaat hier om een zeer langzaam verlopend proces, met een tijdschaal van vele honderden, zo niet duizenden jaren. Gezien vanuit de praktijk van kustverdediging en kustbeheer kan deze zand-



Figuur 1

massa van naar schatting enkele miljarden m³ dan ook als inert beschouwd worden. Afgezien van een vrij zwakke invloed via de waterdiepte (bijv. wat extra golfdemping door bodemwrijving) zal de rol ervan in de instandhouding van de kust gering zijn. Met andere woorden: dit zand, zeker op wat grotere diepte (TR-10: beneden de 15 m dieptelijn), is in principe winbaar, voor suppletie-doeleinden, maar ook voor andere toepassingen.

Een ander gebied met een vermoedelijk overschot aan zand is de Voordelta. Momenteel is nog niet precies duidelijk hoe de ter plaatse sterk verstoorde kust zich op langere termijn zal ontwikkelen, noch hoe deze ontwikkeling beïnvloed wordt door het verwijderen van substantiële hoeveelheden zand uit het systeem. Niettemin lijkt de aanwezige hoeveelheid zand groter is dan wat nodig is voor het strak trekken van de kust tot een vloeiende lijn langs de koppen van de huidige eilanden, zodat verwacht mag worden dat er een zandoverschot in het gebied is.

Een interessante vraag, uit een oogpunt van vergunningen-beleid is waar het overtollige zand kan worden weggehaald: vanaf de buitenflank van de delta, uit de recent gevormde banken, of wellicht uit het langzaam opzandende, ondiepe gebied achter de banken? Behalve de morfologische respons op deze ingrepen, spelen ook allerlei andere functies van het Voordelta-gebied hierbij een rol (zie TR-9). In het Beleidsplan Voordelta zal dit alles nader worden uitgewerkt.

Of de buitendelta's aan de Waddenzee kust perspectieven bieden voor het definitief aan het systeem onttrekken van zand is niet duidelijk. Uitgaande van het in Annex I (Fig. 3) geschetste werkingsprincipe, vertaalt een tekort aan zand in de buitendelta's zich in eerste instantie in een verarming van de aangrenzende kustvakken, en daarmee op den duur in kusterosie. Met welke tijdsvertraging en demping dat gepaard gaat is nog niet te kwantificeren, maar voorzichtigheid is hier geboden.

Anderzijds is niet duidelijk welk deel van de buitendelta als daadwerkelijk "aktief", en derhalve als morfologisch gevoelig moet worden beschouwd. Als die grens op NAP -10 m ligt, dan suggereert Fig. 1, dat zich met name voor de zeegaten van de oostelijke Waddenzee aanmerkelijke hoeveelheden "inaktief" sediment bevinden. Overigens lijkt voor de westelijke zeegaten deze grens eerder op NAP -20 m te liggen, zie Sha (1988).

3.2.2 Kans: autonome kustwaartse transporten

Behalve in zandbuffers, liggen er ook potentiële kansen in het autonome kustwaartse transport, dat langs de hele Nederlandse kust optreedt, onder invloed van "gelijkrichteffekten" in het getij en van deininggolven. Relevant is hierbij het transport vanaf dieper water, omdat dat bijdraagt aan de totale zandbalans. De toename van het autonome kustwaartse transport op de hogere delen van de onderwateroever (TR-5/4) heeft slechts indirect invloed, via een steiler evenwichtsprofiel, waardoor de kust bv. gevoeliger kan worden voor duinafslag.

Wanneer dit kustwaartse transport op de één of andere manier zou kunnen worden "afgevangen", bv. door ergens op de benedenste ondiepwateroever over grote lengte parallel aan de kust een zandwinkuil ("zandvang") in stand te houden, zou dat op de lange duur (TR-10) leiden tot een flauwer kustprofiel, d.w.z. tot kustachteruitgang (het

omgekeerde van wat geïllustreerd wordt in Annex I, Figuur 7c). Het "rijke" centrale deel van de Hollandse kust, en waarschijnlijk ook de Voordelta-kust, kunnen op deze termijn (vele honderden jaren) echter best wat verarming lijden.

Opmerking: Of de genoemde zandwinningsmogelijkheden ook technisch en economisch haalbaar zijn is hier niet aan de orde en kan ook niet voor eeuwen vooruit worden voorspeld. Bovendien wordt hier niet ingegaan op de kwaliteit van het zand.

3.2.3 Kans/bedreiging: natuurlijke verplaatsing van geulen

Langs bepaalde delen van de kust komen, bijvoorbeeld ten gevolge van migratie van geulen en aanlanding van banken, "zandgolf"-verschijnselen voor. Deze vormen een bedreiging, als getracht wordt de kustlijn op de buitenste omhullende van deze golven vast te houden, of als tot verdedigende maatregelen wordt overgegaan op het moment dat de golfbeweging kustwaarts gericht is.

Op basis van voldoende inzicht in het gedrag van deze zandgolven en de onderliggende mechanismen, moet het echter mogelijk zijn hier handiger mee om te gaan. De eenvoudigste mogelijkheid is uiteraard de binnenste omhullende van de zandgolven aan te houden, maar daarvoor moet dan voldoende ruimte aanwezig zijn.

Een andere optie is, wellicht, wat meer op het verschijnsel in te spelen en tijdens de uitbouwende fase of bij de top van de golf al te anticiperen op de terugschrijdende fase. Dit betekent dus een andere fasering van het onderhoud in dergelijke gebieden dan tot nu toe gebruikelijk. Op basis van de huidige kennis van het verschijnsel is echter nog moeilijk aan te geven hoe dit anticiperende onderhoud zou moeten worden ingericht.

Gezien de tijdschaal van het verschijnsel (tientallen jaren), zal anticiperend onderhoud in zandgolf-gebieden moeilijk voldoende politiek draagvlak vinden, als er niet vanuit een lange-termijn onderhoudsvisie geredeneerd wordt. Men vraagt dan immers om investeringen in kustverdediging op een moment, dat er geen acute bedreiging is.

3.2.4 Kans: energiedissiperende bankenrijen

Voor bepaalde delen van de Hollandse kust komen bankenrijen voor, de zg. brandingsruggen, die een groot deel van de inkomende golfenergie dissiperen en daardoor de kust beschermen. Andere stukken van de kust, waar deze bankenrijen niet voorkomen, lijken veel kwetsbaarder. Hoewel hier ongetwijfeld de vraag van "kip en ei" speelt, lijkt het de moeite waard na te gaan of het, wellicht met enige hulp, mogelijk is een dergelijk bankenscherm voor de meer bedreigde delen van de gesloten kust te krijgen, of, meer in het algemeen, de kust een meer dissipatief karakter te geven.

Om dit te kunnen realiseren, is het nodig te weten welke mechanismen deze bankenstelsels veroorzaken en hun gedrag bepalen. Op dit moment schiet de kennis zelfs nog tekort om de bestaande bankenstelsels te verklaren, laat staan dat zou kunnen worden aangegeven hoe nieuwe gecreëerd en in stand gehouden zouden kunnen worden.

3.2.5 Bedreiging: onttrekking van zand aan het kustsysteem

Niet alle autonome transporten dragen "kansen" in zich: sommige onttrekken systematisch zand aan de kust en vormen daardoor een bedreiging. Het aeolische transport over de eerste duinregel heen naar de achterliggende duinen kan, gezien vanuit de kustverdediging op langere termijn, in principe als een dergelijke bedreiging beschouwd worden. Anderzijds moet het aldus aan het actieve kustsysteem onttrokken zand niet als definitief verloren beschouwd worden: het wordt opgeslagen in een passieve buffer, nl. de duinen. De hoeveelheden zand die hiermee gemoeid zijn (TR-5/1: orde $1 \text{ m}^3/\text{m}/\text{jaar}$) worden echter op dit ogenblik gering geacht.

Een veel belangrijker bedreiging gaat uit van het eveneens als autonoom beschouwde transport door de zeegaten de Waddenzee in. Hier gaat het om grote hoeveelheden zand (TR-5/1), die aan de aangrenzende kustgedeelten worden onttrokken en, afhankelijk van het deficit in de vloedkom, deels in de Waddenzee achterblijven, deels via een omweg (buitendelta, onderwateroever) weer terugkomen. Dit proces vormt een potentiële bedreiging, doordat het het werktuig is voor de overdracht van een zanddeficit in de Waddenzee naar de aangrenzende kustgedeelten. Daardoor wordt het zandbeheer in de Waddenzee een aspect van de kustverdediging.

Behalve door natuurlijke oorzaken, wordt er ook door menselijk ingrijpen zand aan het kustsysteem onttrokken, hetzij direkt via zandwinning op zee of uit de buitendelta's, hetzij indirekt via zandwinning uit de Waddenzee, of bijvoorbeeld via ingrepen in de Waddenzee die de zandbehoefte van dit gebied vergroten (bedijkingen, gaswinning). Al deze vormen van het creëren van een zandbehoefte vormen in principe een potentiële bedreiging voor de kust. Het beleid op dit punt is echter geen onderwerp van dit rapport.

3.2.6 Zeespiegelrijzing

Ook al zijn de gevolgen van zeespiegelrijzing wellicht niet zo ernstig als de Bruun-regel wil doen geloven, toch vormt een versnelde toename van het gemiddelde zeespiegelniveau uiteraard een potentiële bedreiging voor de kustveiligheid, rechtstreeks en via de estuaria. Dit aspect is echter in TR-5/1 al uitgebreid aan de orde geweest en wordt derhalve hier niet opnieuw behandeld.

3.2.7 Bedreiging(/kans?): verandering van getijamplitude

De huidige ontwikkelingen wijzen uit, dat niet alleen de gemiddelde waterstand, maar ook de getijamplitude in de toekomst verder zou kunnen veranderen. Als dat gebeurt, zal het gevolgen hebben voor de Waddenzee en de aangrenzende kust. Immers, het vloedvolume, de belangrijkste invoergrootheid in de empirische modellen van het morfologische gedrag van estuaria, zeegaten en buitendelta's (zie TR-5 en Annex I), zal dan veranderen, en daarmee de inhoud van vloedkom en buitendelta en de doorsnede van het zeegat.

Bij een toename van de getijamplitude, zoals in de Duitse Bocht, zullen al deze grootheden toenemen, de inhoud van de vloedkom relatief het sterkst, de inhoud van de buitendelta iets minder en de doorsnede van het zeegat het minst. Dit zou voor de aangrenzende kustgedeelten

gunstig zijn, omdat er zand vrijkomt uit het estuarium en het zeegat, dat niet allemaal opgeslagen blijft in de buitendelta. Voor de oevers van het zeegat zou het echter een bedreiging zijn, zeker als uitbreiding van het profiel in de diepte belemmerd wordt door slecht erodeerbare lagen (keileem, pleisterlagen).

Behalve voor de estuaria en de aangrenzende kustgedeelten, zal een verandering van getijamplitude ook gevolgen hebben voor de andere kustgedeelten, al ware het maar doordat de getijsnelheden en alles wat daarmee samenhangt zullen veranderen. Bovendien zal het niet-lineaire samenspel van de getijcomponenten (bijv. M2 en M4) veranderen, waardoor het resttransportpatroon voor de Hollandse kust (zie TR-5/4) wel eens heel anders zou kunnen worden.

Tot dusverre is er nog geen afdoende verklaring gevonden voor de amplitudevergroting zodat ook nog niet is aan te geven of er een risico bestaat dat dit verschijnsel zich aan de Nederlandse kust zal voortzetten. Niettemin lijkt dit een aspekt om in de gaten te blijven houden.

3.2.8 Bedreiging: klimaatsverandering

Een van de mogelijke gevolgen van een mondiale klimaatsverandering onder invloed van menselijke activiteiten is een toename, "in tal en last", van extreme omstandigheden. Hoewel dit vanuit het kustonderhoud gezien exogene, niet beïnvloedbare condities betreft, zal bij een daadwerkelijk doorzetten van deze ontwikkeling het juiste antwoord moeten worden gevonden. Dit betreft waarschijnlijk niet alleen het aanleggen van hogere waterkeringen met grotere veiligheidsbuffers, ook het gedrag van de kust op langere termijn zou hierdoor wel eens kunnen worden beïnvloed. Immers, dit gedrag is geenszins lineair in de exogene condities: het transport alleen al is een sterk niet-lineaire functie van de waterbeweging, dus van de exogene condities.

Hoewel de discussie over de te verwachten mondiale klimaatswijzigingen nog in volle gang is, en nog geenszins duidelijk is wat ons nu eigenlijk te wachten staat, is het toch van belang attent te blijven op mogelijke klimaatsveranderingen en hun gevolgen.

3.2.9 Bedreiging: verslibbing

Zoals bekend, bevat het Noordzeewater bij de Nederlandse kust aanmerkelijke hoeveelheden slib. Dit kan in een aantal opzichten een bedreiging vormen voor de zandige kust:

- Via verslibbing van de stranden, waardoor deze hun recreatiefunctie verliezen. Aan de Hollandse kust en aan de zee kant van de Waddeneilanden is van een dergelijke bedreiging vooralsnog geen sprake, omdat de stranden daar van de slibstroom worden gescheiden door een hoogenergetische brandingszône. In andere gebieden zou onder bepaalde omstandigheden verslibbing van stranden kunnen optreden. Wellicht dat zich in het Voordeltagebied, in bepaalde ontwikkelingsstadia of bij menselijk ingrijpen (zie TR-20) dergelijke omstandigheden voordoen.
- Via opname van kleine hoeveelheden slib in zandafzettingen, met gevolgen voor de erodeerbaarheid. Hierdoor kunnen aanzienlijke gebieden met een slecht erodeerbare bovenlaag ontstaan, met alle risico's van dien (bv. vorming van een grote discrepantie tussen de aanwezige transportcapaciteit en het optredende transport, met zeer snelle erosie zodra de slecht erodeerbare laag wordt verbroken).

3.3 Maatregelen ter beïnvloeding van het grootschalige kustgedrag

3.3.1 Algemeen

Het genereren van ideeën ten aanzien van maatregelen die het grootschalige kustgedrag gunstig beïnvloeden is uiteraard geen tot deze nota te beperken proces. Daarom wordt hier tamelijk willekeurig een aantal ideeën genoemd zonder ook maar enige pretentie van volledigheid. Er is slechts getracht zo veel mogelijk van de in par. 3.1 genoemde benaderingen aan de orde te laten komen.

Bij het beoordelen van ideeën zou het in Annex I beschreven systeem, geïmplementeerd en operationeel gemaakt, goede diensten kunnen bewijzen. Daarbij moet echter nogmaals worden benadrukt, dat het systeem na implementatie eerst moet worden gevalideerd en waar nodig bijgesteld of herzien, terwijl het ook daarna geen gereedschap voor ondeskundig gebruik is. De eenvoud ervan is misleidend!

3.3.2 Flexibele aanpassing aan het kustgedrag

Een triviaal lijkende categorie van maatregelen is "niets doen", d.w.z. de natuur zijn gang laten gaan en het gebruik van de kust daaraan aanpassen.

Omdat de infrastructuur van het achterliggende land nu eenmaal slechts langzaam verandert, kan dit alleen bij kustgedeelten waar een voldoende grote buffer aanwezig is om natuurlijke variaties op te vangen of waar de natuurlijke variaties zo langzaam verlopen, dat de infrastructuur zich daaraan kan aanpassen.

Niettemin is dit een optie die voor bepaalde kustgedeelten de moeite van het overwegen waard is, hetgeen ook moge blijken uit de erkenning ervan als beleidsalternatief ("terugtrekken" in de Discussienota). Naarmate men het kustgedrag beter kent en doorgrondt, kan deze optie des te interessanter zijn.

Een voorbeeld is het op hun beloop laten van zandgolven langs de kust, waarbij het nodig is de binnenste omhullende van de zandgolven te kennen om te kunnen vaststellen of er voor een dergelijk beleid voldoende ruimte is.

Een ander, iets grootschaliger voorbeeld is het vrijlaten van de Waddeneilanden. Omdat deze eilanden bewoond worden en vele gebruiksfuncties hebben, is voorzichtigheid hier geboden en kan weinig gedaan worden zonder betrouwbare langere-termijnvoorspellingen van het morfologische gedrag ervan.

3.3.3 Symptoombestrijding

Ondanks de wellicht wat negatieve klank van deze term, vallen de meeste van de traditionele kustverdedigingsmaatregelen in deze categorie, ook vele succesrijke.

In het kader van de "zachte" maatregelen (de andere komen in TR-20 aan de orde, zij het wellicht wat minder expliciet in combinatie met het grootschalige kustgedrag) horen hierbij allerlei vormen van zandsuppleties, gericht op verrijking van de actieve zône.

Een treffend voorbeeld van symptoombestrijding is het uitvoeren van kustverdedigingsmaatregelen, zoals strandhoofden, in de terugschrijdende fase van een zandgolf. Treedt dan na verloop van tijd de uitbouwende fase in, dan is daarmee "aangetoond" dat de genomen maatregelen effectief zijn.

Gezien de verbreiding van de behoefte aan kustverdedigingsmaatregelen langs de Nederlandse kust, lijkt het de moeite waard na te gaan of men niet tot een schaalvergroting van dit soort onderhoud kan komen. Wellicht is het, met nieuwe technieken als onderwateroeversuppleties (TR-14), technisch en economisch haalbaar om, met zand uit de grote buffers, een grootschalige onderwateroeversuppletie uit te voeren met een preventief doel: de kust zodanig verrijken, dat de talrijke lokale problemen, voor zover ze niet voortkomen uit lokale oorzaken (bv. havenhoofden), worden voorkomen.

In de categorie symptoombestrijding valt ook het suppleren van de kustgedeelten grenzend aan de zeegaten. Het is overigens de vraag of een dergelijke maatregel voor de Waddenkust effectief is, gezien de grote transporten het zeegat in. Waarschijnlijk is het slechts een indirecte manier om de zandtekorten in de Waddenzee aan te zuiveren.

3.3.4 Wegnemen/vermijden oorzaken ongunstige effecten

Vanuit tactisch oogpunt lijkt dit een verstandiger benadering dan symptoombestrijding, maar omdat het hier vaak grootschalige oorzaken betreft (bv. zeespiegelrijzing) zijn doeltreffende maatregelen in deze categorie veelal moeilijk te realiseren.

Op wat kleinere schaal bieden beleidsmaatregelen uitkomst. Zo zou, indien dat nog aan de orde is, komverkleining door landaanwinning en/of bedijking in de Waddenzee kunnen worden beperkt, om zo de zandbehoefte (zie TR-5/1) te reduceren. Hetzelfde geldt voor de onttrekking van zand aan de Waddenzee en de tot de bodemdaling leidende gaswinning. Een restrictief concessiebeleid, dat bijvoorbeeld zandwinning beperkt tot morfologisch laag-actieve gebieden (als daar zand voorkomt) of volumecompensatie voor het onttrokken zand eist, zou de zandbehoefte van het estuarium beperken. Het is echter de vraag of dit realistische opties zijn, gezien de economische belangen die hiermee gemoeid zijn.

Een stap verder in de oorzaak/gevolg keten rond de zandbehoefte van de Waddenzee ligt het verzadigen van deze behoefte, via de zeegaten. Wellicht is het mogelijk het zandtransport door de zeegaten via ingrepen zodanig te remmen, dat het tempo van verzadiging van de zandbehoefte wordt gereduceerd. Daarmee krijgt het autonome kustwaartse transport in de aangrenzende kustgebieden meer kans de verarming ten gevolge van het "trekken" van de zeegaten te compenseren.

Of een dergelijk "zandslot" op de zeegaten ook technisch realiseerbaar is, is nog verre van duidelijk. Wellicht dat voor de grovere fracties, die over of dicht langs de bodem getransporteerd worden, iets te bedenken is in de sfeer van een zandvang, maar voor de fijnere fracties, die meestal in suspensie getransporteerd worden, is dat niet goed mogelijk. Bovendien moet deze zandvang dan van tijd tot tijd geleegd worden en moet het daaruit vrijkomende zand naar de aangrenzende kustgedeelten teruggevoerd worden, hetgeen geen goedkope oplossing zal zijn.

Een soortgelijke, evenmin goedkope oplossing zou zijn de doorsnede van het zeegat stelselmatig te groot te houden en het vrijkomende zand te storten op de aangrenzende Noordzeekust. Omdat het getijvolume primair bepaald wordt door de eigenschappen van de vloedkom, mag worden aangenomen, dat dit leidt tot een verlaging van de stroomsnelheden in het zeegat, en daarmee tot een relatief veel sterkere verlaging van de

transportcapaciteit. Of dit ook effectief zal zijn, in de zin dat op deze wijze netto per eenheid van tijd minder zand de Waddenzee in verdwijnt, moet echter worden betwijfeld, gezien het gegeven (TR-5/3) dat slechts een gering deel van het met het getij aangevoerde materiaal in de Waddenzee achterblijft.

3.3.5 Ongunstige effecten verplaatsen

De benadering "het ene gat met het andere stoppen" kan effectief zijn, als het ertoe leidt dat de ongunstige effecten verplaatst worden naar een gebied waar ze geen probleem vormen.

In feite is het overbrengen van zand uit de grote buffers naar bedreigde kustgedeelten een rechttoe-rechtaan uitwerking van deze taktiek.

Rond de Waddenzeekust zijn wellicht wat gecompliceerdere varianten mogelijk. Afgezien van politieke en andere implicaties, is het wellicht technisch mogelijk het getij in het Marsdiep en in het Eijerlandse Gat zodanig te beïnvloeden (via "harde" maatregelen en wellicht baggeren), dat de vloedkom achter het Marsdiep in omvang gaat afnemen ten gunste van die achter het Eijerlandse Gat. Daartoe zou het vloedvolume door het Marsdiep moeten worden gereduceerd, dat door het Eijerlandse gat zal dan groter worden.

Op basis van de in TR-5/1 gegeven empirische relaties is dan te verwachten, dat er een netto zandoverschot zal ontstaan als de beide vloedkommen ongeveer even groot worden, maar ook dat er zeer grote hoeveelheden zand verzet moeten worden om het nieuwe evenwicht te bereiken. Dit zal dus wel een langdurig proces zijn, met mogelijk allerlei ongunstige tussenstadia. Immers, de inhoud van de vloedkom van het Marsdiep zal gaan afnemen en dat zal vast voor een deel met zand van buiten (dus: de kust van Texel en de kop van Noord-Holland) gebeuren. Dit zou dus leiden tot een vergroting van het kusterosieprobleem daar, zij het dan waarschijnlijk tijdelijk.

Anderzijds zal ten gevolge van een getijreductie in het Marsdiep het uitwisselingsproces tussen de kust en de Waddenzee trager verlopen, zodat de aanvoer van zand vanuit dieper water, via het autonome dwars-transport, meer kans krijgt de tekorten aan de kust aan te vullen. Bovendien zal het evenwichtsvolume van de buitendelta kleiner worden. Gezien de ervaringen met de Afsluitdijk, zal dit overschot (en waarschijnlijk meer dan dat) ten goede komen aan de korte-termijn respons van de vloedkom.

Overigens lijkt het erop, dat de kom van het Marsdiep nog steeds verstoord is door de bouw van de Afsluitdijk (zie TR-5). Als dat het geval is, zal ook het verdere aanpassingsproces na deze ingreep leiden tot een verkleining van deze vloedkom. De vraag is, of dit proces niet via een aantal maatregelen versneld zou kunnen worden, zonder dat dit desastreuze gevolgen voor de kust heeft.

Hoewel een discussie hierover zonder verdere studie weinig zin heeft, lijkt een kleinere vloedkom van het Marsdiep en, daarbij horend, een wat kleiner en "rustiger" Marsdiep zeker het nastreven waard (effecten zeespiegelrijzing!), ook al vergt dat een langdurig volgehouden beleid en een nauwkeurige beheersing van het overgangsproces.

Niettemin lijken de politieke en financiële haalbaarheid van een dergelijk lange-termijnbeleid vooralsnog niet erg groot (handhaving vrije toegang tot de haven van Den Helder; gevolgen voor het Eijerlandse gat en de kop van Texel).

3.3.6 Zoeken naar tijdwinst

Op dit punt zou een werkend systeem bij uitstek van nut zijn, omdat nu juist de weergave van de tijdschalen een sleutelement in de invulling ervan is.

Ook hier is het idee: verplaatsen van het probleem, nu naar een gebied waarvan de responstijd veel groter is dan die van het probleemgebied.

Een voorbeeld is zand van de diepere delen van de onderwateroever omhoog brengen naar de actieve zone. Voordat de invloed van de winput de suppletie bereikt heeft, is deze al lang ten goede gekomen aan de actieve zone. Bovendien, ook als dit zand zijdelings wordt afgevoerd en dus uit het profiel verdwijnt, is de aflossing van de "zandhypotheek" bovenin het profiel klein ten opzichte van de winst door de suppletie, omdat het tekort over een veel groter deel van het profiel wordt uitgespreid.

Toepassing van deze taktiek op het kustonderhoud leidt tot "getrapt onderhoud", d.w.z. dat het zand voor relatief frekwente strand- of ondiepwatersuppleties op de onderwateroever wordt gewonnen en dat het daardoor ontstane deficit met een lagere frekwentie wordt aangevuld met zand uit overschotgebieden. Dit laatste vergt uiteraard een grotere investering, maar door de omvang van het werk is het mogelijk dit efficiënt in te richten. Teneinde op het juiste moment de nodige fondsen ter beschikking te hebben zijn reserveringen in het kader van een lange-termijn beleid nodig.

Een andere vorm van tijdwinst kan van belang zijn in het geval van versnelde zeespiegelrijzing. Door op de onderwateroever een zandbuffer neer te leggen kan voor een aantal jaren de terugschrijding van de kust worden voorkomen. Of dit ook op langere duur soelaas kan bieden, moet nader worden bekeken.

Tenslotte moet het ook mogelijk zijn tijdwinst te boeken door gebruik te maken van de bufferwerking van de buitendelta's. Daardoor kan een beperkte zandbehoefte in de bijbehorende vloedkommen tijdelijk worden opgevangen, wellicht lang genoeg om de negatieve gevolgen ervan te kunnen matigen (bijv. via het autonome kustwaartse transport; zie voorgaande paragrafen). Door hier systematisch en beheerst gedurende lange tijd gebruik van te maken, is het wellicht mogelijk de druk van de zandbehoefte van de Waddenzee op de Noordzeekust te beperken (zie ook par. 3.3.5).

3.3.7 Inspelen op gunstige effecten

De vorming van de bankenstelsels in het Voordelta-gebied kan uit een oogpunt van kustverdediging als een gunstige ontwikkeling beschouwd worden. In TR-20 wordt voorgesteld over deze banken stuifdijken of andere constructies te leggen, teneinde een wadachtig gebied te creëren in de luwte van deze dammen. Het is echter de vraag of dit ten aanzien van het kustonderhoud wel zo'n gunstige ontwikkeling is. De huidige oriëntatie van de bankenrijen wordt bepaald door het samenspel van getij-, wind- en golfgedreven stroming over de banken heen, d.w.z. dat deze waarschijnlijk nog niet overeenkomt met de oriëntatie van een uiteindelijk stabiele kust. Kunstmatige dammen met een verkeerde oriëntatie zijn onderhoudsintensief, dus kostbaar. Dat geldt uiteraard speciaal voor constructies uit stortsteen of ander "hard" materiaal, die er ook nog eens toe zullen leiden dat de zeewaartse flank van de banken weer grotendeels verdwijnt.

Bovendien is de vraag of "een klein zetje in de goede richting" hier wel voldoende is. Als het gebied achter de dammen wadachtig wordt, met slibafzettingen, zou het wel eens nodig kunnen zijn de dammen stormvloedvrij te maken, om te voorkomen dat alle afzettingen erachter bij een hoge vloed wegslaan.

De te verwachten natuurlijke ontwikkeling in de voormalige mondingen van Haringvliet en Grevelingen is, dat de bankenstelsels voorlopig vrij stabiel zullen blijven, waarbij individuele banken zich onder invloed van wind en golven wat in de richting van de kop van het noordelijke eiland zullen verplaatsen en nieuwe banken zich aan het zuidwestelijke uiteinde van de rij zullen vormen. Dit zal waarschijnlijk zo doorgaan tot het achterliggende gebied zo ver is opgevuld, dat het getij daar moeilijk meer doordringt. Daarmee valt dan de naar buiten gerichte druk op de banken weg en zullen ze zich verder naar binnen verplaatsen en verder boven water uitkomen.

Als men dat proces wil afremmen, bijvoorbeeld omdat de huidige situatie gunstig is voor de functies van het gebied, dan moet er systematisch zand onttrokken worden aan het gebied achter de banken. Als men het proces wil versnellen, moet het doordringen van het getij in dit gebied afgeremd worden.

Een ander voorbeeld van inspelen op gunstige effecten betreft het autonome kustwaartse transport op dieper water. Omdat delen van de sedimentbuffer voor de Hollandse kust slecht erodeerbaar zijn ten gevolge van het slib in de afzettingen, hebben ook de mechanismen die dit kustwaartse transport veroorzaken weinig greep op deze buffer. Daardoor komt er minder zand naar de kust dan wanneer er uitsluitend los gepakt zand zou liggen.

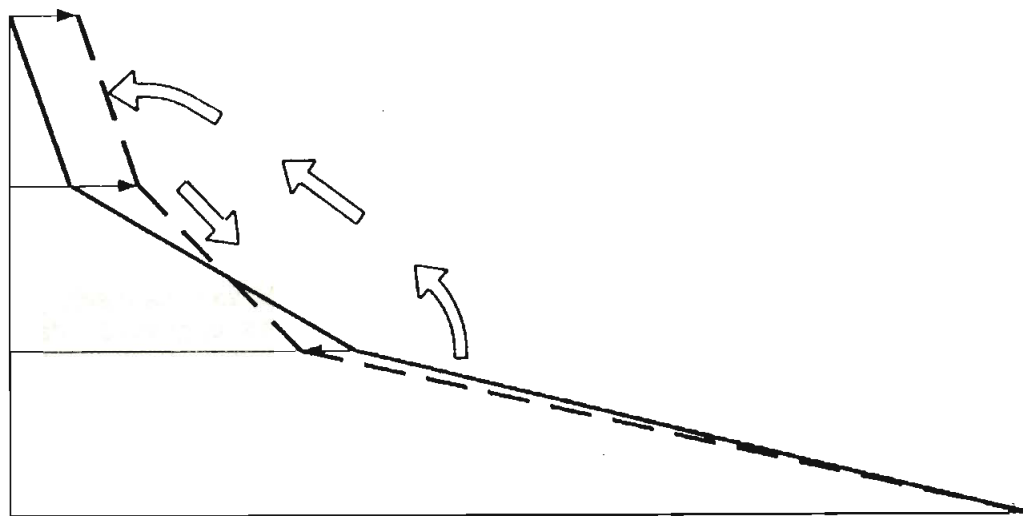
Wellicht is het mogelijk door agitatie ("mollen") het zand losser te maken, zodat het naar de kust kan worden gevoerd door de autonome transportmechanismen, om daar hetzij bij te dragen aan de kustveiligheid, hetzij te worden gewonnen voor andere doeleinden. Of het hier gaat om interessante hoeveelheden en of het allemaal technisch en economisch haalbaar is, is niet duidelijk.

3.4 Gevolgen van systematisch beleid

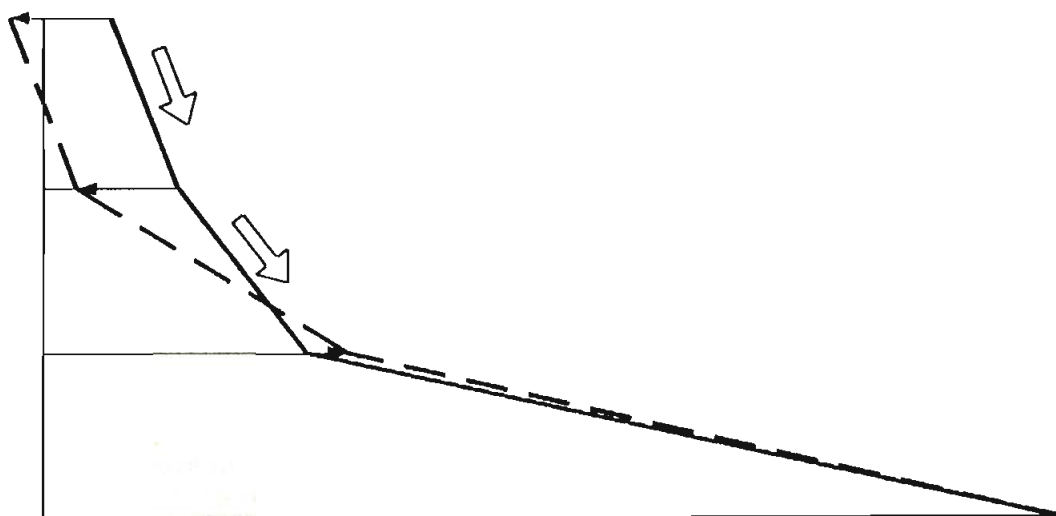
Uit het voorgaande moge blijken, dat een stelselmatig kustonderhoudsbeleid vanuit een langere-termijn (en dus grootschalige!) visie belangrijke voordelen en mogelijkheden biedt. Anderzijds houdt een stelselmatig beleid verplichtingen naar de toekomst in. Wanneer een onderhoudsprogramma eenmaal loopt, is het niet verstandig en soms zelfs gevaarlijk er halverwege mee op te houden. In het volgende zal dit aan de hand van enkele voorbeelden worden geïllustreerd.

Stel dat besloten wordt in een bepaald gebied regelmatig zand van de diepere onderwateroever naar de actieve zône te brengen, bijvoorbeeld om terugschrijving van de kust ten gevolge van een netto kustafwaarts transport tegen te gaan. Op langere termijn gezien betekent dit dus het introduceren van een "zandpomp" in het dwarsprofiel. Zoals geschetst in Fig. 2, leidt dit op den duur tot een versteiling van het profiel: het zal zich zodanig gaan instellen, dat het kustwaarts "gepompte" transport wordt gecompenseerd door een kustafwaarts transport ten gevolge van een extra grote profielhelling.

Wanneer nu, nog steeds op langere termijn gezien, de "zandpomp" wordt stilgezet, zal het oorspronkelijke profiel zich weer gaan instellen.



a) regelmatige suppleties → hypotheekvorming



b) na beëindiging suppleties (incl. verlies)
→ aflossing

Figuur 2 Effect systematische suppleties op het kustprofiel
bij in langsricting uniforme situatie

Dit betekent kusterosie, ten opzichte van de situatie op het moment van stilzetten van de "pomp", maar, als gevolg van zandverliezen bij de suppleties, ook ten opzichte van de uitgangssituatie.

Als de situatie in langsricting niet-uniform is, zoals meestal het geval is bij suppleties, wordt er bovendien nog aanmerkelijk meer zand verpompt dan uiteindelijk aan het profiel ten goede komt (Fig. 3), zodat de zandschuld in het winningsgebied groter wordt dan in de in langsricting uniforme situatie. Het overige wordt, meestal met een wat grotere tijdschaal (langsprocessen verlopen meestal langzamer dan profielvormingen) zijdelings langs de kust afgevoerd.

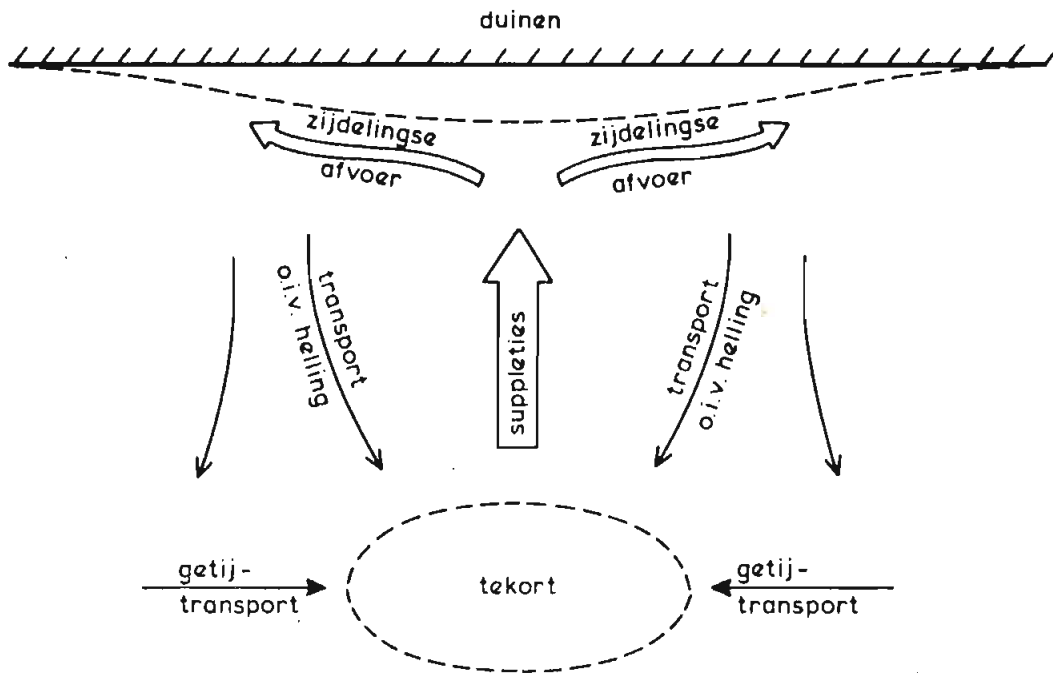
Een deel van dit zijdelings afgevoerde zand moet als "verloren" worden beschouwd, in die zin, dat het bij stilzetten van de "pomp" niet terugkeert om de op dieper water ontstane zandschuld af te lossen. Dit deficit zal worden gecompenseerd door een extra terugschrijding van de kust.

Wellicht nog bedreigender dan dit ongunstigere nieuwe evenwicht is in dit geval de overgangssituatie: het zijdelings afgevoerde zandvolume komt pas terug naar het wingebied nadat de kust zich tot voorbij de nieuwe evenwichtsligging heeft teruggetrokken (zie Fig. 3).

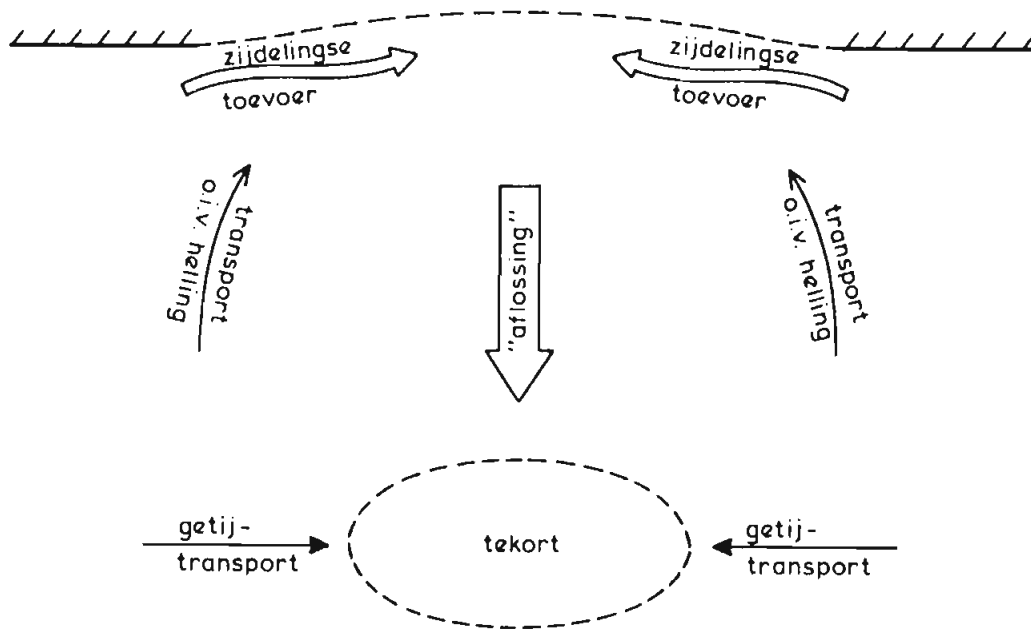
Een ander voorbeeld betreft het onttrekken van zand aan het systeem, zeg vanuit de diepere onderwateroever. Omdat het effect daarvan zich slechts langzaam naar de hoger gelegen delen van het profiel vertaalt, zal het er in eerste instantie naar uitzien, dat het weghalen van het zand weinig effect heeft op de kust. Bij een incidentele ingreep van beperkte omvang zal dat waarschijnlijk ook inderdaad het geval zijn: het effect gaat verloren in de normale systeemruis. Bij een systematisch volgehouden onttrekkingen ligt dat anders: er wordt dan een zodanig grote zandschuld opgebouwd, dat deze lang nadat de onttrekkingen hebben plaatsgevonden nog negatieve gevolgen voor de kust kan hebben.

Een derde, nogal triviaal voorbeeld van systematisch volgehouden "beleid" is het vasthouden van de kust met harde constructies. Hierdoor ontstaat een onnatuurlijke kustligging, meestal gepaard gaande met zandtekorten (waarom zou de constructie anders gebouwd zijn?) en een totaal ander profiel dan bij een zandige kust. Als een dergelijke constructie zou worden verwijderd (bijv. de Hondsbossche Zeewering), dan moet terdege rekening worden gehouden met de restauratie van het natuurlijke profiel en de mogelijke kusterosie die daarmee gepaard gaat.

Samenvattend komt het erop neer, dat men bij systematisch volgehouden beleid bedacht moet zijn op "hypotheekvorming" en er rekening mee moet houden dat deze hypotheek vroeg of laat moet worden afgelost. Om de omvang van deze zandhypotheek en het te verwachten aflossingsproces (en daarmee de risico's voor de kustveiligheid) te kunnen inschatten, is een goede kennis van het kustgedrag en de onderliggende processen onontbeerlijk.



a) situatie bij regelmatig suppleren



b) situatie na beëindiging van de suppleties

Figuur 3 Effect systematische suppleties bij niet-uniforme situatie

4. INSPELEN OP HET KLEINSCHALIGE KUSTGEDRAG

4.1 Algemene tactiek

Evenals bij het grootschalige systeem, moet de tactiek van kleinschalige ingrepen (bijv. individuele suppleties) erop gericht zijn zo handig mogelijk in te spelen op het kustgedrag. Doelen daarbij kunnen zijn:

- vergroten van de effectiviteit van een ingreep; dus: hoe kan deze zodanig worden ingericht, dat het beoogde effect zo goed mogelijk wordt bereikt?
- vergroten van de efficiëntie van de uitvoering, bijvoorbeeld door het aanbrengen van suppleties volgens een bepaald scenario, of door het systeem mee te laten werken aan het bereiken van het beoogde effect.
- het zo veel mogelijk vermijden van ongunstige effecten op lange termijn; dus: zo weinig mogelijk bijdragen aan "hypotheekvorming".

Ook hier is van wezenlijk belang, dat de werking van het systeem voldoende doorgrond wordt. Zo niet, dan is het gevaar van een averechtse uitwerking niet denkbeeldig.

4.2 Effectiviteitsvergroting

Hoewel geen betrekking hebbend op "zachte" maatregelen en derhalve niet thuishorend in dit rapport, is het probleem van de effectiviteit van strandhoofden een voorbeeld van wat hier bedoeld wordt: als de werking van het kuststelsel, en daarmee de oorzaak van erosieproblemen, beter bekend geweest was, zouden strandhoofden in een aantal gevallen waarschijnlijk niet als oplossing gekozen zijn.

Enkele voorbeelden van "zachte" ingrepen zijn in het voorgaande al aan de orde geweest:

- "zandpomp"-scenario's (d.w.z. regelmatig terugkerende suppleties met winning in hetzelfde gebied op dieper water), waarvan de effectiviteit en de hypotheekvormende effecten in hoge mate bepaald worden door de werking van het kleinschalige systeem ter plaatse; kennis daarvan moet antwoord geven op vragen als:
 - + wat is de oorzaak van het probleem dat via de suppleties wordt bestreden?
 - + waar wordt het gesuppleerde zand na verloop van tijd heen getransporteerd?
 - + in hoeverre is het proces omkeerbaar (in verband met de aflossing van de zandschuld in het winningsgebied)?
 - + zijn er aanvullende maatregelen mogelijk, die de effectiviteit van de suppleties zouden vergroten (bijv. opsluiten met behulp van strandhoofden of een "hangend strand"-oplossing)?
- het aanleggen van een stuifdijk over de banken in het Voordelta-gebied, waarvan de effectiviteit slechts kan worden beoordeeld na een analyse van het proces van (ver)vorming van deze banken.
- het inspelen op verschijnselen als zandgolven langs de kust, waarbij het wellicht effectiever is in te grijpen in tijden van zandovervloed dan in tijden van verschraling.

4.3 Efficiëntieverhoging

Verhoging van efficiëntie is te bereiken door het werk goedkoper uit te voeren, of door handiger met het beschikbare geld om te gaan.

Op beide punten is wellicht nog wat te winnen in de "zachte" kustverdediging.

De belangrijkste kostenpost bij een suppletie is uiteraard die van de winning en het transport van het zand. Gezien de ligging van de grote zandbuffers, is te verwachten dat de zandwinning in toenemende mate op open zee zal moeten plaatsvinden. Ten opzichte van de huidige praktijk, waar dikwijls in rustiger en ondieper water gewonnen wordt, zal dat een verhoging van de directe winningskosten met zich meebrengen.

Anderzijds moet het, wellicht via het introduceren van nieuwe technologie (een diepwater-"punaise"? nieuwe transportmethoden, die gebruik maken van de natuurlijke energievallen?), mogelijk zijn de kosten van winning en transport te reduceren.

Speciale aandacht in deze verdienen nieuwe suppletie-methoden, zoals onderwateroever-suppleties (zie TR-14), die waarschijnlijk tegen aanzienlijk lagere transportkosten kunnen worden uitgevoerd dan de traditionele strandsuppleties. Om hiervan maximaal profijt te kunnen trekken, moeten de morfologische processen op de schaal van een individuele suppletie (enkele kilometers, een tiental jaren) voldoende doorgrond worden.

Handiger omgaan met het beschikbare geld komt, voor zover het de technische aspecten betreft, vooral neer op het optimaliseren van de onderhoudstactiek. Een schijnbaar triviale boodschap in deze is: "Geen domme dingen doen!", maar of een maatregel hieraan voldoet is gemakkelijker achteraf vast te stellen dan vooraf te onderkennen. Opnieuw is doorgronden van het kustgedrag hier onontbeerlijk.

Een andere mogelijkheid is het optimaliseren van suppletiescenario's in de tijd, d.w.z. dat gezocht wordt naar een optimale combinatie van omvang en herhalingsfrequentie van een suppletie. In het "Handboek Zandsuppleties" (CUR, 1987) wordt nader op dergelijke optimalisaties ingegaan.

Reeds eerder is gewezen op de mogelijkheid van "getrapt" onderhoud, waarbij wordt ingespeeld op het verschil in responsietijd tussen de actieve zone en de diepere onderwateroever. Hierbij wordt een aantal kleine suppleties op ondiep water, met zand dat in hetzelfde profiel op wat dieper water is gewonnen, afgewisseld met een suppletie van grotere omvang om het deficit in het winningsgebied aan te vullen. Ook hier moet een optimum te vinden zijn in de frequentie van kleine en grote suppleties.

Tenslotte, ook al eerder genoemd, is het wellicht mogelijk de suppletiebehoefte zodanig te faseren in ruimte en tijd, dat de logistieke kosten minimaal zijn. Ten opzichte van de huidige situatie, waarbij suppleties in min of meer willekeurige volgorde worden afgewerkt, vergt dit een overgangsstadium van beheerste manipulatie (net zolang schuiven in de tijd tot er een gunstige volgorde ontstaat). Of dit alles organisatorisch en bestuurlijk haalbaar is, is echter niet duidelijk.

5. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

Dit rapport is niet bedoeld om pasklare oplossingen aan te dragen. De in het voorgaande gedane suggesties zullen hier derhalve niet opnieuw worden opgesomd. Uit het voorgaande komen echter ook enige globale contouren naar voren van een geïntegreerd en innovatief kustverdedigingsbeleid. In willekeurige volgorde:

- De Nederlandse kust ondervindt vele bedreigingen, maar beschikt ook over de nodige overlevingskansen, zelfs bij een versnelde zeespiegelrijzing. Het is uiteraard zaak om bedreigingen tijdig te onderkennen, hun effect op de kust te voorspellen en ze af te weren of op te vangen, maar ook om de geboden kansen te grijpen. Een geïntegreerd kustverdedigingsbeleid besteedt aan beide aspecten aandacht.
- Doorgronden (dus niet alleen uit ervaring kennen) van het kustgedrag is een essentiële voorwaarde voor een innovatief kustverdedigingsbeleid. De gevolgen, op korte zowel als lange termijn, van een nieuw soort maatregel of een beleidswijziging moeten met een redelijke mate van betrouwbaarheid kunnen worden voorspeld.
- Het is noodzakelijk verder te kijken dan het effect van een enkele maatregel. Veeleer is een samenhangend beleid in ruimte en tijd nodig, waarbij de ruimte in principe het hele Nederlandse kustgebied omvat en de tijd de levensduur van een aantal achtereenvolgende maatregelen. Afhankelijk van de situatie kan dit wel een eeuw of meer zijn (denk bijvoorbeeld aan een systematische beïnvloeding van de vloedkomverdeling in de Waddenzee).
- De innovatieve mogelijkheden van "zachte" kustverdedigingssystemen zijn nog lang niet voldoende verkend.
- Deze mogelijkheden nemen toe, naarmate de kennis van het kustgedrag en de onderliggende mechanismen toeneemt.

Hoewel de huidige kosten van het kustonderhoud betrekkelijk laag zijn, zodat we in Nederland relatief weinig premie betalen voor onze verzekering tegen overstromingen, mag niet verwacht worden dat dit tot in lengte van dagen zo zal blijven. Daarom wordt aanbevolen te blijven investeren in de innovatie van de kustverdediging en, als afgeleide daarvan, in het doorgronden van het gedrag van onze kust, op grote zowel als kleinere schaal (tientallen, resp. enkele kilometers in de ruimte, vele tientallen, resp. enkele jaren in de tijd).

Verder wordt aanbevolen een samenhangend beleid (in ruimte en tijd) ten aanzien van de verdediging van de Nederlandse kust te (blijven) voeren. Versnippering ervan zal leiden tot het niet optimaal benutten van de mogelijkheden, inefficiënt werken en energievernietiging. Zeker met de bedreiging van een versnelde zeespiegelrijzing voor de deur kunnen we ons dat niet permitteren.

1000000
1000000
1000000
1000000
1000000

REFERENTIES

PILARCZYK, K.W. en 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

POSTMA, H. (ed.)
Hydrography of the Wadden Sea: movements and properties of water and
particular matter
Balkema, Rotterdam, 1982

RIDDERINKHOF, H.
Tidal and residual flows in the Western Dutch Wadden Sea; I: numerical
model results
Netherlands Journal of Sea Research 22(1): 1-21 (1988)

SHA, L.P.
Sand transport patterns in the ebb-tidal delta off Texel inlet, Wadden
Sea, The Netherlands
Marine Geology, 86 (1989) 137-154, Elsevier Science Publishers,
Amsterdam, 1989

SPEK, A.J.F. VAN DER
Description of the development of the outer deltas of Haringvliet and
Grevelingen
Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren, GWAO-87-015, 1987

STEIJN, R.C., T. LOUTERS, A.J.F. VAN DER SPEK and H.J. DE VRIEND
Numerical model hindcast of the ebb tidal delta evolution in front of
the Deltaworks
Prepared for Int. Conf. Hydraulic and Environmental Modelling of
Coastal, Estuarine and River Waters, Bradford, England, 19-21 Sept.,
1989

VROEG, J.H. DE, E.S.P. SMIT and W.T. BAKKER
Coastal Genesis
Int. Conf. on Coastal Engineering, Malaga, Spain, 1988



ANNEX I

DE KUST ALS SYSTEEM

INHOUD

LIJST VAN TABELLEN

LIJST VAN FIGUREN

	blz.
1. <u>INLEIDING</u>	I.7
2. <u>GROOTSCHALIGE VERKAVELING</u>	I.9
2.1 Aannamen en keuzen.....	I.9
2.2 Hollandse kust.....	I.9
2.3 De Waddenkust.....	I.10
2.4 De Deltakust.....	I.11
3. <u>KLEINSCHALIGE VERKAVELING</u>	I.13
3.1 Aannamen en keuzen.....	I.13
3.2 Verkaveling dwars op de kust.....	I.13
3.3 Verkaveling langs de kust.....	I.14
4. <u>KWANTITATIEVE INVULLING SYSTEEMRELATIES (grootschalig)</u> ...	I.15
4.1 Toestandsvariabelen.....	I.15
4.2 Overdrachtsrelaties dwars op de gesloten kust.....	I.15
4.2.1 Dwarstransport vanaf dieper water.....	I.15
4.2.2 Dwarstransport tussen benedenste onderwateroever en overgangszône.....	I.15
4.2.3 Dwarstransport tussen de overgangszône en de actieve zône	I.17
4.2.4 Aeolisch transport over de eerste duinenrij.....	I.18
4.2.5 Systeemgedrag per profiel.....	I.18
4.2.6 Kwantitatieve invulling.....	I.19
4.3 Overdrachtsrelaties langs de gelosten kust.....	I.20
4.3.1 Langstransport op de benedenste onderwateroever.....	I.20
4.3.2 Langstransport in de actieve zône.....	I.20
4.3.3 Langstransport in de overgangszône.....	I.21
4.3.4 Kwantitatieve invulling.....	I.21
4.4 Overdrachtsrelaties en toestandsbeschrijvingen Waddenkust	I.22
4.4.1 Centrale delen van de eilanden.....	I.22
4.4.2 Eilandkoppen en zeegaten: relatie buitendelta/vloedkom...	I.22
4.4.3 Eilandkoppen en zeegaten: kwalitatief.....	I.24
4.4.4 Kwantificering transportrelaties.....	I.26
4.5 Invloed versnelde zeespiegelrijzing.....	I.26
4.5.1 Gesloten kust.....	I.26
4.5.2 Waddenkust.....	I.28
4.6 Résumé grootschalige systeem.....	I.30
5. <u>KWANTITATIEVE INVULLING SYSTEEMRELATIES (kleinschalig)</u> ...	I.33
5.1 Toestandsvariabelen.....	I.33
5.2 Overdrachtsrelaties.....	I.33
5.2.1 Algemene formulering.....	I.33
5.2.2 Invulling transportrelaties.....	I.33
5.3 Balansvergelijkingen.....	I.34
5.4 Systeemvergelijkingen.....	I.35
5.5 Geldigheid en toepasbaarheid.....	I.37

BIJLAGEN:

A Overgangshellingen

B Systeemvergelijking per dwarsprofiel (grootschalig)

- C Verband tussen langstransportfact G_u en de kustkonstante
- D Uitwerking systeem Zeegat van Texel
- E Invloed zeespiegelrijzing op de gesloten kust
- F Modellerings getij-effect in kleinschalig verstoringsmodel
- G Dwarstransport tussen hoog-actieve zône en duinfront
- H Schatting overdrachtscoëfficiënten G_{34} en G_{23} uit CROSTRAN-simulaties

LIJST VAN TABELLEN

I. Verdeling autonoom dwarstransport langs de zeerand van het systeem.

LIJST VAN FIGUREN

1. Geografische weergave kustsysteem
2. Schematische weergave kustsysteem
3. Weergave systeem zeegaten
- 4. Schematische weergave Deltakust (nog niet opgenomen)
5. Kleinschalige schematisatie
 - a) Geografisch, voor dwarsprofiel
 - b) Schematisch + relatieschema
6. Definitieschets kustprofiel (grootschalige schematisatie)
7. Mogelijke oorzaken van te steile onderwateroever
8. Reststroming in het Zeegat van Texel
 - a) ZEEWAD-model
 - b) HOKU-model
9. Resttransport in het Zeegat van Texel (HOKU-model + transport-formule)
 - a) Bailard-formule
 - b) Van Rijn-formule
10. Resttransport in het Zeegat van Texel (invloed relaxatie-effect suspensieconcentratie)
 - a) Van Rijn-formule
 - b) SUSTRA-2DH
11. Sedimenttransport in het Zeegat van Texel, afgeleid uit beddingvormen, sedimentaire structuren, de geomorfologie en stromingsgegevens (uit: Sha, 1988; met dank aan ..)
12. Definitieschets kustprofiel bij zeespiegelrijzing

1. INLEIDING

De notie, dat de kust zich als een samenhangend systeem gedraagt, kan worden vertaald in de weergave van de kustzône als een verzameling onderling gekoppelde geografische elementen. De fysische processen worden daarbij verdisconteerd in de beschrijving van de toestandsvariabelen in deze elementen (bv. de gemiddelde bodemligging) en van de overdrachtsrelaties ertussen (bv. transportrelaties).

In principe komt deze benadering sterk overeen met een gediscretiseerde weergave van een continuüm-model, zij het dat de elementen van het systeem veelal grover zullen zijn dan de maaswijdte van z'n model. Dit onderscheid is echter gradueel, niet wezenlijk.

Bij de keuze van de geografische elementen moet worden uitgegaan van een fysisch zinvolle verkaveling. Daarbij wordt al gauw duidelijk, dat dan niet met één enkele verkaveling kan worden volstaan. Immers, de natuurlijke ontwikkeling van de kust speelt zich veelal op een grotere schaal af dan de respons op menselijke ingrepen en dat wordt weerspiegeld in de ruimtelijke resolutie van de huidige proceskennis. Het ligt daarom voor de hand om twee verschillende verkavelingen te gebruiken: één voor de natuurlijke ontwikkelingen¹⁾ en één voor de verstoringen daarop door kleinschaliger menselijk ingrijpen.

¹⁾ inclusief de gevolgen van grootschalige ingrepen, zoals de afsluiting van de Zuiderzee, de Deltawerken, etc.

1945
1946
1947
1948
1949
1950
1951
1952
1953
1954
1955
1956
1957
1958
1959
1960
1961
1962
1963
1964
1965
1966
1967
1968
1969
1970
1971
1972
1973
1974
1975
1976
1977
1978
1979
1980
1981
1982
1983
1984
1985
1986
1987
1988
1989
1990
1991
1992
1993
1994
1995
1996
1997
1998
1999
2000
2001
2002
2003
2004
2005
2006
2007
2008
2009
2010
2011
2012
2013
2014
2015
2016
2017
2018
2019
2020
2021
2022
2023
2024
2025

THE UNIVERSITY OF CHICAGO LIBRARY
540 EAST 57TH STREET, CHICAGO, IL 60637
TEL: 773-936-3200 FAX: 773-936-3201
WWW.CHICAGO.LIBRARY.EDU

2. GROOTSCHALIGE VERKAVELING

2.1 Aannamen en keuzen

In het algemeen moet de verkaveling passen bij de voor de natuurlijke ontwikkeling van de kust relevante fysische processen.

Deze op het eerste gezicht voor de hand liggende stelling bevat een aantal onzekere elementen, die min of meer arbitraire keuzen nodig maken:

- a. in welk soort natuurlijke ontwikkelingen, op welke tijd- en ruimteschalen, zijn we geïnteresseerd?
- b. welke fysische processen worden relevant geacht en op welke gronden?
- c. hoe is het begrip "passen bij" t.a.v. de verkaveling te concretiseren?

ad a. In overeenstemming met de benadering bij de kustvoorspelling (zie TR-5*), wordt ervan uitgegaan dat alleen de grootschalige ontwikkelingen van belang zijn. Voor de gesloten kust komt dit neer op een resolutie van de orde van 10 km langs de kust, bij de zeegaten en de eilanden zal dat iets minder zijn.

ad b. Bij de huidige stand van de kennis op het gebied van kustmorfologie zal het antwoord op deze vraag nog vrij sterk aan verandering onderhevig zijn. Op dit moment wordt aangenomen, dat grootschalige morfologische processen bepaald worden door grootschalige mechanismen in de water- en sedimentbeweging, d.w.z. dat een zwakke koppeling verondersteld wordt van kleinere naar grotere tijd- en ruimteschalen. Dit impliceert bijvoorbeeld, dat verschijnselen als strandruggen en shoreface-connected ridges niet bepalend zijn voor de grootschalige kustontwikkeling.

Op grond van deze aanname is het, althans in de "laag-dynamische zônes", mogelijk de kustontwikkeling af te leiden uit "initiële" sedimentbalansen, zoals dat in de kustvoorspelling gedaan is (zie TR-5). In dat geval is het ook mogelijk de toestandsvariabelen en de overdrachtsrelaties van het beoogde systeem te beschrijven in termen van sedimenttransporten en -balansen op de schaal van de geografische elementen van het systeem.

Deze benadering is niet houdbaar in de "hoog-dynamische zônes", waar de interactie tussen water- en sedimentbeweging enerzijds en morfologische veranderingen anderzijds een wezenlijke rol vervult. In deze gebieden zijn de relevante processen, vooral dwars op de kust (?), van een kleinere schaal dan de gewenste informatie (bv. gedrag banken vs. verschuiving gefilterde profiel). In dat geval moeten de systeemrelaties via één of ander filter uit de water- en sedimentbewegingswetten of uit de morfologische veranderingen worden afgeleid.

*) Verwijzingen naar andere Technische Rapporten in het kader van de Kustnota worden aangeduid met "TR", gevolgd door het rapportnummer

ad c. Het voorgaande kan ook worden omgekeerd: in de "laag-dynamische zônes" kan de vakgrootte worden aangepast aan de schaal van de relevante geachte waterbewegings- en transportverschijnselen, maar in de "hoog-dynamische zônes" is dat niet haalbaar en kan de vakgrootte beter worden aangepast aan de gewenste informatie-dichtheid.

2.2 Hollandse kust

Volgens de huidige inzichten (TR-5) wordt het gedrag van de Hollandse kust, wellicht met uitzondering van het meest noordelijke gedeelte, getypeerd door langzame grootschalige veranderingen, deels onder invloed van transport in de brandingszône, deels onder invloed van het getij. Gesuperponeerd daarop is er, sneller en kleinschaliger, een "evenwichts"-dynamiek in de vorm van bewegende banken, muisystemen, etc.

Wordt deze dynamiek buiten beschouwing gelaten, dan kan voor dit gedeelte van de kust een vrij grove benadering gehanteerd worden, althans in de richting langs de kust. Voor de hand liggende plaatsen voor vakgrenzen zijn Hoek van Holland, IJmuiden en de Hondsbossche Zeewering, alsmede wellicht Scheveningen voor de ondiepere delen van het profiel. Daarnaast suggereert het waargenomen kustgedrag een overgang ergens tussen IJmuiden en de Hondsbossche, bv. bij Egmond. Verder zal de noordgrens van dit kustgedeelte niet in Den Helder liggen, maar iets zuidelijker, in verband met de interactie tussen de kust en het zeegat. Tenslotte wordt, om tot ongeveer gelijksoortige vakken te komen, een grens gelegd bij Noordwijk, waar veel bekend is van de residuele waterbeweging (zie TR-5/3).

De vakindeling dwars op de kust kan uitgaan van wat bekend is van de morfologische processen aan een in langsricting uniforme kust. In Fase 3 van de kustvoorspelling (TR-5/1) wordt gewerkt met twee limiet-zônes, nl. het bovenste deel van de onderwateroever (tot aan de top van de zeereep), waar het kustprofiel gelijkvormig blijft, en het benedenste deel van de onderwateroever, waar de bodem globaal op zijn plaats blijft. Omdat hier met een aaneensluitend systeem gewerkt moet worden, ligt het voor de hand daar een overgangszône tussenin te plaatsen.

Tenslotte moet de interactie met de duinen in het systeem worden opgenomen. De resolutie in ruimte en tijd rechtvaardigt de aanname, dat de duinen als een passief zandreservoir zullen werken, zodat slechts het transport tussen het bovenste deel van het "natte" profiel en de duinen behoeft te worden mee-genomen.

Op grond van deze overwegingen wordt de verkaveling dwars op de kust als volgt ingevuld:

- de actieve zône, van de top van de zeereep tot NAP -5 m,
- de overgangszône, van NAP -5 m tot NAP -12 m,
- de benedenste onderwateroever, van NAP -12 m tot NAP -18 m.

De resulterende verkaveling voor de Hollandse kust is geografisch weergegeven in Figuur 1 en schematisch in Figuur 2.

2.3 De Waddenkust

De Waddenkust is een aaneenschakeling van zeegaten en eilanden. De meeste eilanden zijn qua morfologisch gedrag te onderscheiden in een centraal deel, dat zich min of meer gedraagt als een stuk gesloten

kust, een twee koppen, waarvan de ontwikkeling nauw samenhangt met het aangrenzende zeegat. Voor het centrale deel van een eiland kan het dwarsprofiel op dezelfde wijze worden ingedeeld als bij de Hollandse kust, maar rond de koppen gaat dat niet meer op. Daar moet de verkaveling worden afgeleid uit de werking van de zeegaten.

Hoewel dit gedrag nog verre van volledig doorgrond wordt (zie Hoofdstuk 3), is er een aantal vrijwel overal voorkomende basiselementen te onderscheiden (zie ook TR-5/1):

- aan de Noordzeekant: een buitendelta en één of meer hoofdgeulen,
- tussen de eilanden: één of meer diepe geulen,
- aan de Waddenzeekant: een vloedkom, met daarin een binnendelta, gevoed door een systeem van geulen,
- aan de koppen van de eilanden: een harde verdediging met een diepe geul erlangs, of een zandige kust, veelal de rand van een uitgestrekte plaat.

In de diepe geulen is de bodem veelal afgepleisterd met grof materiaal, waardoor de morfologische aktiviteit van deze geulen zelf sterk wordt gereduceerd. Ze fungeren primair als "doorgeefluik" van sediment tussen de zee en het estuarium. In systeem-termen: de werking ervan is weer te geven via een transportrelatie.

De belangrijkste reservoirs van zand rond een zeegat zijn de buiten- en binnen delta's. De momenteel beschikbare empirische relaties voor de morfologie van estuaria beschrijven o.a. de zandinhoud van de buitendelta en inhoud van de achterliggende vloedkom als functie van het vloedvolume (zie TR-5). Daarom zijn de buitendelta en de vloedkom voor de hand liggende elementen in het systeem. Voor de zandige eilandkoppen, waar ook brandingstransport zal optreden, moet bovendien de "aktieve zône" in de verkaveling worden meegenomen.

Daarmee worden de zeegaten op een wezenlijk afwijkende manier in het systeem opgenomen: tussen de elementen is er, geografisch gezien, ruimte voor geulen als morfologisch inaktieve, transporterende verbindingen. Bovendien wordt het systeem hier gecompliceerder, omdat de buitendelta met veel meer elementen verbonden is dan een element voor de gesloten kust (zie Figuur 3).

2.4 De Deltakust

De Deltakust bestaat sinds lang uit een aaneenschakeling van zeegaten, met daartussen repen land, die te smal zijn om de zeegaten volledig van elkaar te scheiden. Er is daar dan ook een min of meer aaneengesloten buitendelta ontstaan, de Voordelta.

De Deltakust wijkt ook anderszins belangrijk af van de rest van de Nederlandse kust: als gevolg van de (op morfologische tijdschaal gezien) recente Deltawerken moet dit deel van de kust als sterk verstoord worden beschouwd. Immers, na het geheel of gedeeltelijk afsluiten van de zeearmen streeft het systeem naar een totaal andere evenwichtstoestand dan daarvoor.

Hoewel belangrijk en grensverleggend onderzoek verricht is aan de spectaculaire herverdeling van zand op de Voordelta, met veel nieuwe inzichten in complexe morfologische processen als resultaat (zie bv. Van der Spek, 1987 en Steijn et al., 1989), wordt het systeem nog onvoldoende doorgrond om de ontwikkeling naar een nieuw evenwicht op langere termijn te kunnen beschrijven. Het lijkt te verwachten, dat de kust zich voor de volledig afgesloten estuaria tot een vloeiende lijn zal strekken, maar de vorm en de plaats van die lijn is niet bekend, evenals de tijdschaal waarop dit proces zich zal voltrekken en de mate

waarin de rest van de kust profiteert van het "overtollige" zand.
Als het natuurlijke evenwicht al moeilijk voorspelbaar is, dan geldt dat zeker ook voor de gevolgen van een systematische zandwinning op grote schaal in dit gebied.
Gezien de complexiteit van de morfologische processen in dit gebied en de tekortschietende onderbouwende kennis van de langere-termijn ontwikkelingen, zal het systeem voor de Deltakust vooralsnog niet worden ingevuld.

3. KLEINSCHALIGE VERKAVELING

3.1 Aannamen en keuzen

Naast de langzame, grootschalige ontwikkelingen spelen ook kleinschalige processen een rol bij de kustverdediging. Dit geldt uiteraard voor de natuurlijke dynamiek, als regel opgevangen via een veiligheidsmarge in het kustverdedigingsstelsel. Vaststelling van deze marge zal, zeker bij een systematisch veranderende kust, mede moeten gebeuren op grond van kennis van de morfologische processen.

Het gaat in dit rapport echter niet om de strategie van de kustverdediging, noch om de veiligheidsmarges en de criteria voor ingrijpen, maar om het zo goed mogelijk inspelen op het kuststelsel als er ingegrepen wordt. Dit betekent, dat de gevolgen en de effectiviteit van menselijke ingrepen, zoals suppleties en zandwinning, hier aan de orde zijn. Bovendien zal het accent liggen op "zachte" constructies, waarvan het gedrag kustmorfologisch benaderd kan worden.

Evenals bij de grootschalige verkaveling wordt hier uitgegaan van een zwakke koppeling tussen kleinschalige en grootschalige morfologische verschijnselen, zodanig, dat deze afzonderlijk beschouwd en gesuperponeerd kunnen worden. Dit impliceert voor de kleinschaliger verschijnselen, dat alleen naar verstoringen ten opzichte van de natuurlijke ontwikkeling gekeken hoeft te worden.

Het moge duidelijk zijn, dat een dergelijke benadering wellicht toelaatbaar is bij de gesloten kust, waar de natuurlijke processen grootschalig en tamelijk doorzichtig zijn, maar veel minder in de zee-gaten, waar de natuurlijke processen kleinschaliger en veel ingewikkelder zijn. De kleinschalige verkaveling zal dan ook alleen voor de Hollandse kust en, in principe, voor het centrale deel van een Waddeneiland worden uitgewerkt.

Deze delen van de kust, afgezien van wellicht enkele lokale verschijnselen, laten nog een vereenvoudiging toe: het gedrag van de kust in langsrichting kan min of meer los gezien worden van de ontwikkeling van de profielvorm (in wiskundige termen: scheiding van variabelen). Daardoor kan kennis van de profielontwikkeling aan een uniforme kust hier gebruikt worden, evenals kennis van de kustlijnontwikkeling in geval van een evenwichtsdwarsprofiel.

3.2 Verkaveling dwars op de kust

Aangezien het hier om kleinschaliger verschijnselen gaat, is een grotere ruimtelijke resolutie nodig, en dus een fijnere verkaveling. Voor wat betreft het dwarsprofiel lijkt daarbij een fysisch zinvolle indeling:

- de zeereep, vanaf de duinvoet (NAP +3 m) tot voorbij de eerste duinregel; deze moet hier als element in het systeem worden meegenomen, omdat op deze tijdschaal de duinvoet, de hoog- en laagwaterlijn niet meer op vaste afstand van elkaar bewegen.
- de hoog-actieve zône, tussen NAP -3 m en NAP +3 m; dit is de brekerzône, waarin ook het merendeel van het bij storm van de duinen afgeslagen zand terechtkomt.
- de laag-actieve zône, tussen NAP -8 m en NAP -3 m; dit is de zône met (voornamelijk niet-brekende) golven en getij in een min of meer gelijkwaardige rol.
- de diepere onderwateroever, tussen NAP -16 m en NAP -8 m; hier overheersen de getij-effekten, terwijl de morfologische tijdschaal

op NAP -16 m zo groot geworden is (TR-10), dat daar voor de kleinschalige verstoringen op de natuurlijke ontwikkelingen een gesloten rand (geen transport) gelegd mag worden.

De vakken zijn onderling weer verbonden via transportrelaties (zie Figuur 5), die later zullen worden gespecificeerd. Hier zij nog opgemerkt, dat er vanaf de zeereep naar het achterliggende duin een (aeolisch) transport wordt meegenomen.

3.3 Verkaveling langs de kust

De verkaveling langs de kust wordt vooral ingegeven door de verwachte afmetingen in kustlangsrichting van kustverdedigingswerken in zand, alsmede door de resolutie die nodig is om, op de voor deze werken relevante tijdschaal, de herverdeling van het zand langs de kust weer te geven. Op grond van praktische ervaringscijfers (zie bv. Pilarczyk en Van Overeem, 1987) en met behulp van wat experimenten met een kustlijnmodel, leidt dit tot een vakgrootte van ongeveer 0.5 km.

4. KWANTITATIEVE INVULLING SYSTEEMRELATIES (grootschalig)

4.1 Toestandsvariabelen

De met het systeem te beschrijven toestandsgrootheden betreffen de morfologie op de schaal van de beschouwde vakken. Het ligt dus voor de hand een zandinhoudsmaat per vak als variabele te kiezen.

Omdat het systeem niet eenduidig is in de keuze van de vakgrenzen (deels verticale niveaus, deels vaste randen in het horizontale vlak), zal ook de definitie van de toestandsvariabelen niet voor alle vakken gelijk zijn. Langs de gesloten kust, waar het dwarsprofiel geschematiseerd is via vaste niveau-lijnen, is de voor de hand liggende variabele het zandvolume tussen de twee grensniveaus van het vak. Als referentie kan een willekeurig vertikaal vlak dienen, dat bovendien per vak gekozen kan worden, zolang het maar niet varieert in de tijd. Voor het gemak wordt hiervoor per rij van vakken dwars op de kust één vlak gekozen, dat door de top van de zeereep.

Rond de zeegaten en bij de Deltakust is deze definitie niet bruikbaar. De relevante variabelen zijn hier de zandinhoud per horizontaal begrensde gebied, zoals de buitendelta of de vloedkom, met een horizontaal referentievlak voor de vloedkom, en overeenkomstig de bestaande empirische relaties (TR-5/1), het "normale" kustprofiel voor de buitendelta.

4.2 Overdrachtsrelaties dwars op de gesloten kust

4.2.1 Dwarstransport vanaf dieper water

Langs de zeevaartse rand van het systeem is het transport dwars op de kust niet gelijk aan nul. Onder invloed van deininggolven en stromingen aangedreven door wind en door horizontale dichtheidsgradiënten (TR-5), heeft het getij-geïnduceerde transport een component naar de kust. Deze wordt weliswaar mede bepaald door de waterdiepte, maar de interactie met eventuele, ter plaatse zeer geringe bodemliggingsveranderingen is zwak. Derhalve kan deze transportcomponent als "autonoom" gegeven in het systeem worden ingevoerd.

Op grond van de bestaande (zeer summiere) kennis op dit gebied, wordt de verdeling van deze transportcomponent langs de kust aangenomen zoals weergegeven in Tabel I. Typerend is de toename in noordwaartse richting, onder invloed van de steeds hogere deining vanuit de oceaan.

4.2.2 Dwarstransport tussen benedenste onderwateroever en overgangszône

Het in de vorige paragraaf genoemde "autonome" kustwaartse transport is op de overgang tussen het benedenste deel van de onderwateroever en de overgangszône, dus op NAP -12 m, niet verdwenen. Integendeel, onder invloed van de toenemende golfwerking zal het zelfs groter zijn dan aan de zeerand van het systeem (TR-5/4). Anderzijds moet hier ook rekening worden gehouden met een morfologisch bepaalde transportcomponent, die in het algemeen zal variëren met de gemiddelde bodemligging ter plaatse.

Vanuit een fenomenologische benadering, d.w.z. zonder in te gaan op de onderliggende fysische processen, kan gesteld worden dat het totale dwarstransport de som is van een hellingsonafhankelijk en een hellingsafhankelijk deel. In lineaire benadering:

$$D = D^A + D^M = D^A + G.S \quad (4.1)$$

waarin:

D = totale dwarstransport,
 D^A = "autonome" (hellingsonafhankelijke) component,
 D^M = morfologisch bepaalde (hellingsafhankelijke) component,
 G = evenredigheidsfactor,
 S = bodemhelling (pos. als bodem oploopt in de rekenrichting).

Het lijkt wellicht voor de hand liggend de evenwichtstoestand als linearisatiepunt voor het systeem te kiezen en alle onbekenden te definiëren als afwijkingen ten opzichte van deze evenwichtstoestand. Dit heeft echter als nadeel, dat evenwicht een fictieve toestand is, die aan de Nederlandse kust niet of nauwelijks zal voorkomen en waarvan dus ook niet erg veel meer bekend is dan uit de definitie van evenwicht ($\partial/\partial t = 0$) is af te leiden.

Omdat het systeem lineair is kan ook elke andere toestand als referentie fungeren, zo ook de huidige. Dit heeft het voordeel dat er veel bekend is (c.q. kan zijn) van die toestand, want hij is overal waarneembaar. Bovendien zullen de afwijkingen ten opzichte van die toestand althans voorlopig klein zijn, zodat linearisatie des te meer gerechtvaardigd is.

In de huidige toestand geldt, volgens (4.1):

$$D_{nu} = D_{nu}^A + GS_{nu} \quad (4.2)$$

Als nu gedefiniëerd worden:

$$\Delta D = D - D_{nu} \quad (4.3)$$

$$\Delta D^A = D^A - D_{nu}^A \quad (4.4)$$

dan is (4.1) te herschrijven als

$$\Delta D = \Delta D^A + G(S - S_{nu}) \quad (4.5)$$

Hiermee wordt dus gesteld, dat het dwarstransport voor wat betreft het morfologisch bepaalde deel bij benadering lineair varieert met de afwijking van de profielhelling ten opzichte van de huidige helling.

Opmerking: Vooralsnog is de afleiding (4.1)-(4.5) niets anders dan een herschikking op basis van nieuwe definities. Pas als ΔD_A , G en S_{nu} zijn ingevuld, krijgt (4.5) zin.

Stel nu (TR-5/1), dat het profiel in de actieve zône vormvast is en zich, onder gelijkblijvende exogene condities, slechts horizontaal kan verplaatsen, terwijl het profiel onderaan de onderwateroever slechts kan kantelen rondom het meest zeewaartse punt, waarvan de verplaatsing onafhankelijk is van de profielontwikkeling (de morfologische tijdschaal is daar immers zeer groot (TR-10)). In dat geval worden de verstoringen ten opzichte van het uitgangsprofiel beschreven in termen van de toestandsvariabelen van het systeem (zie ook Figuur 6):

$$\Delta V_u = B h_u \Delta X_u \quad (4.6)$$

$$\Delta V_T = B h_T \left(\frac{1}{2} \Delta X_U + \Delta X_L \right) \quad (4.7)$$

$$\Delta V_L = B h_L \Delta X_L \quad (4.8)$$

waarin:

V_U, V_L, V_T = bodemvolume (t.o.v. het verticale referentievlak) in resp. de actieve zône (vak U), de benedenste onderwateroever (vak L) en de overgangszône (vak T),

B = afmeting van de vakken in kustlangsrichting,

h_U, h_L, h_T = verticale afmeting per vak,

X_U, X_L, X_T = per vak gemiddelde afstand van de bodem tot de kust ($X \hat{=} \frac{V}{Bh}$).

De gemiddelde bodemhelling op de overgang tussen de vakken L en T is uit te drukken als functie van de uitgangshelling en de verstoringen ΔX_U en ΔX_L (of ΔV_U en ΔV_L). In lineaire benadering naar deze verstoringen leidt dit tot (zie Bijlage A):

$$S_{LT} = S_{LT_{nu}} + \alpha_{LT} \Delta V_U + \beta_{LT} \Delta V_L \quad (4.9)$$

waarin:

S_{LT} = de gemiddelde bodemhelling op de overgang tussen de vakken L en T,

$S_{LT_{nu}}$ = idem, in de huidige toestand,

α_{LT}, β_{LT} = coëfficiënten, af te leiden uit het huidige profiel.

Volgens (4.5) geldt dan:

$$\Delta D_{LT} = \Delta D_{LT}^A + G_{LT} (S_{LT} - S_{LT_{nu}}) = \Delta D_{LT}^A + G_{LT} (\alpha_{LT} \Delta V_U + \beta_{LT} \Delta V_L) \quad (4.10)$$

4.2.3 Dwarstransport tussen de overgangszône en de actieve zône

De grenzen van de actieve zône zijn zodanig gekozen, dat de belangrijkste snelle variaties van het kustprofiel (bv. duinafslag) binnen deze grenzen plaatsvinden. Daardoor zal de uitwisseling tussen de overgangszône en de actieve zône niet wezenlijk anders verlopen dan die tussen de benedenste onderwateroever en de overgangszône. Dus (zie ook Bijlage A):

$$\Delta D_{Tu} = \Delta D_{Tu}^A + G_{Tu} (\alpha_{Tu} \Delta V_U + \beta_{Tu} \Delta V_L) \quad (4.11)$$

In deze uitdrukking, noch in (4.10), komt ΔV_T voor. Dit komt doordat wordt aangenomen, dat de toestand in de overgangszône volledig bepaald wordt door die in de beide aangrenzende zônes (de overgangszône is "passief"). Dit is uiteraard een vereenvoudigde weergave van de werkelijkheid, want natuurlijke ontwikkelingen zouden in principe ook wel in de overgangszône kunnen "aangrijpen". Niettemin lijkt de hier gedane aanname een goede eerste benadering, omdat natuurlijke verstoringen toch meestal zullen uitgaan van de actieve zône (bijv. via langstransportgradiënten) of van de zee kant (bijv. getijgeulen die naar de kust kruipen).

4.2.4 Aeolisch transport over de eerste duinenrij

Het aeolische transport over de eerste duinenrij is wellicht per eenheid van tijd niet zo groot, het kan op den duur toch aanmerkelijke hoeveelheden zand aan het systeem onttrekken (of liever: opslaan in de duinen-buffer), doordat het vrijwel altijd landwaarts gericht is. Behalve van het windklimaat en de sedimenteigenschappen, zal dit transport in belangrijke mate afhangen van de beschikbaarheid van transporteerbaar sediment, dus van de vorm van het strand. In het hier beschreven grootschalige systeem speelt de verandering van die vorm echter geen rol: het profiel in de actieve zône, inclusief het strand, wordt vormvast verondersteld. Daardoor krijgt het aeolische transport hier een autonoom karakter, en de versterking ten opzichte van de huidige waarde wordt dan ook voorlopig op nul gesteld (maar wel formeel meegenomen in de systeemformulering).

Opmerking: Dit laat uiteraard onverlet de rol van het aeolische transport in de opbouw van het strand en de buitenflank van de zeereep. Dit proces valt onder het gedrag van de actieve zône en draagt daar bij tothet behoud van de profielvorm.

4.2.5 Systeemgedrag per profiel

Als eerste toetsing van de houdbaarheid van de hier voorgestelde invulling van het systeem, kan worden nagegaan hoe het profiel van een in langsrichting uniforme kust zich gedraagt onder invloed van verstoringende impulsen, en of dat gedrag overeenkomt met waarnemingen in de natuur.

Daarvoor zijn, behalve overdrachtsrelaties in de vorm van dwarstransport-modellen, ook toestandsbeschrijvingen nodig. In dit geval volgen die direkt uit de sedimentbalans:

$$\frac{d(\Delta V_u)}{dt} = D_{uD} - D_{Tu} + Q_u \quad (4.12)$$

$$\frac{d(\Delta V_T)}{dt} = D_{Tu} - D_{LT} \quad (4.13)$$

$$\frac{d(\Delta V_L)}{dt} = D_{LT} - D_B + Q_L \quad (4.14)$$

waarin:

t = tijd,

D_{uD} = aeolisch transport over de zeereep (pos. zeewaarts),

D_B = dwarstransport aan de zeerand,

Q_u, Q_L = ad-hoc brontermen, ter weergave van continue verstoringen (bv. via "zandpompen").

De pakkingsdichtheid van het sediment in de bodem is hier niet expliciet meegenomen. Deze wordt geacht te zijn verdisconteerd in de transporten.

Gebruik makend van de transportrelaties (4.10) en (4.11) kunnen (4.12) en (4.14) worden herleid tot een tweede-orde systeemvergelijking, bijvoorbeeld in ΔV_u (zie Bijlage B):

$$\frac{d^2(\Delta V_u)}{dt^2} + T_1 \frac{d(\Delta V_u)}{dt} + T_2 \Delta V_u = T_3 \quad (4.15)$$

waarin de coëfficiënten T_1 , T_2 en T_3 zijn af te leiden uit de andere coëfficiënten in het systeem.

De homogene variant van deze vergelijking ($T_3 = 0$) beschrijft het inherente gedrag van het systeem. Een nadere analyse (Bijlage B) maakt duidelijk dat dit gedrag altijd dempend in de tijd is, hetgeen overeenkomt met de van de kust te verwachten respons op een initiële verstoring.

Dit inherent dempende gedrag impliceert tevens, dat de initiële respons op een verstoring indicatief is voor het verdere verloop in de tijd ("steeds minder van hetzelfde"). Daardoor kan ook zonder het stelsel (4.12)-(4.14) daadwerkelijk op te lossen een idee verkregen worden van de ontwikkeling van het profiel onder invloed van allerlei initiële verstoringen. Uit "spelen" met het systeem blijkt bijvoorbeeld al gauw, dat een te steile onderwateroever (ten opzicht van het verwachte evenwichtsprofiel) niet noodzakelijk het gevolg is van aangroei van de kust of omgekeerd (zie Figuur 7), maar dat deze alleen duidt op een vergroot morfologisch bepaald transport in zeewaartse richting.

4.2.6 Kwantitatieve invulling

Tot dusverre zijn de grootheden D_B^A , D_{LT}^A , D_{TU}^A , G_{LT} en G_{TU} , nog onbepaald. Zij moeten gekwantificeerd worden alvorens met het systeem gewerkt kan worden.

Ten aanzien van het autonome dwarstransport kan gesteld worden, dat het uit het initiële transportmodel voor de Hollandse kust (TR-5/4) afgeleide dwarstransport slechts een schatting geeft van deze grootte. Immers, ook de morfologisch bepaalde transportcomponenten zijn hierin verdisconteerd, uitgaande van de huidige ligging van de onderwateroever.

Op grond van de uit het Hollandse-kust-model verkregen (uiterste "dunne") informatie, kan de verdeling van D_B^A , D_{LT}^A en D_{TU}^A geschat. Voor D_B^A gelden de waarden die gegeven zijn in Tabel 1.

Voorlopig wordt aangenomen, dat het autonome dwarstransport onveranderlijk is in de tijd, d.w.z. dat $\Delta D_B^A = \Delta D_{LT}^A = \Delta D_{TU}^A = 0$.

De coëfficiënten G_{LT} en G_{TU} in de transportrelaties tussen de vakken kunnen empirisch worden bepaald op basis van de huidige kennis (TR-5, TR-10, TR-14) van het gedrag van het kustprofiel op de hier beschouwde tijdschaal.

Opmerking: Nogmaals zij benadrukt, dat het hier om een fenomenologische beschrijving van het systeem gaat, waarbij de parameters worden afgeleid uit in de natuur of in modelresultaten waargenomen morfologisch gedrag. Zolang de hier gebruikte systeemrelaties niet formeel zijn afgeleid uit de basisvergelijkingen voor water- en sedimentbeweging langs de kust, heeft het systeem geen fysisch-mathematische grondslag. Dientengevolge kan er ook geen sprake zijn van algemene geldigheid buiten het gebied waarvoor het is afgeleid.

Het uitgangsprofiel speelt op een aantal punten in het systeem een rol, nl. in de coëfficiënten α en β in de transportrelaties (zie Bijlage A), en bij de interpretatie in termen van kustligging

($\Delta V \rightarrow V, X$). Daarom moet een aantal eigenschappen van dit profiel (bijv. $X_{u_{nu}}$, $X_{T_{nu}}$, $X_{L_{nu}}$) als invoer worden gegeven.

4.3 Overdrachtsrelaties langs de gesloten kust

4.3.1 Langstransport op de benedenste onderwateroever

Het langstransport op dieper water wordt gedomineerd door het getij. Langs de gesloten kust, waar de asymmetrie in de transportverdeling over de getijcyclus gering is en er dus gering resttransporten optreden (TR-5/4), geeft dit aanleiding tot grote morfologische tijdschalen (TR-10). Bovendien zal de getijgolf (dus: waterstanden en globale debietverdelingen) slechts op zeer grootschalige (orde totale lengte Hollandse kust) bodemliggingsveranderingen reageren.

Anderzijds is uit het zandwinningsonderzoek (TR-10) gebleken, dat ook op dieper water de kuilen de neiging hebben langzaam uit te vlakken. Gezien het voorgaande ligt het voor de hand te veronderstellen dat de bodem zich op de schaal van de systeemvakken in principe niet veel anders zal gedragen.

De uitvlakkende werking van het getij op de bodem is weer te geven via een diffusie-model, waarin de diffusie-coëfficiënt empirisch wordt bepaald aan de hand van het verwachte uitvlakkingsgedrag van de bodem. In termen van transportrelaties komt dit model neer op:

$$\Delta L_L^{k-1,k} = G_L^{k-1,k} \left(\frac{\Delta V_L^{k-1}}{B_{k-1}} - \frac{\Delta V_L^k}{B_k} \right) \quad (4.17)$$

waarin:

$\Delta L_L^{k-1,k}$ = verstoring op het langstransport over de benedenste onderwateroever van vak k-1 naar vak k,

$G_L^{k-1,k}$ = empirische overdrachtscoëfficiënt voor de overgang tussen de vakken k-1 en k (in principe geleidelijk variabel langs de kust),

ΔV_L^k = zandvolume in vak k (langsindex), L (dwarsindex),

B_k = lengte van het vak langs de kust.

4.3.2 Langstransport in de actieve zône

Uit een oogpunt van langstransport zal de overgangszône een mengvorm zijn van wat er in de actieve zône en op het benedenste deel van de onderwateroever gebeurt. Daarom wordt de actieve zône hier eerst behandeld.

Met betrekking tot de modellering van het integrale gedrag van de actieve zône is inmiddels veel kennis en ervaring opgebouwd via de kustlijnmodellering (zie bv. De Vroeg et al., 1988). Hoewel een goede weergave van het dwarstransport, van en naar dieper water en over de zeereep heen, van belang is in dergelijke modellen, blijkt het concept van de integrale langstransportmodellering goed te voldoen, niet alleen lokaal, maar vooral ook op grotere schaal, zoals bv. in het model voor de Hollandse kust (TR-5).

Het lijkt dan ook alleszins gerechtvaardigd, in het huidige systeem een dergelijke integrale langstransportmodellering voor de actieve zône te gebruiken en voor de kwantificering daarvan af te gaan op de ervaring met de kustlijnmodellen voor de Hollandse kust. Dit betekent:

$$\Delta L_u^{k-1,k} = G_u^{k-1,k} \left(\frac{\Delta V_u^{k-1}}{B_{k-1}} - \frac{\Delta V_u^k}{B_k} \right) \quad (4.18)$$

waarin de symbolen op een overeenkomstige wijze gedefiniëerd zijn als in (4.17). De factor $G_u^{k-1,k}$ zal in eerste benadering konstant zijn langs de kust, met hoogstens een zwakke en langzame variatie. De grootte ervan is direkt gerelateerd aan de zg. "kustkonstante" s' in de kustlijnvergelijking

$$\frac{\partial X}{\partial t} = s' \frac{\partial^2 X}{\partial y^2} \quad (4.19)$$

waarin:

X = afstand van de kustlijn tot de referentielijn,
 y = afstand langs de referentielijn.

Het verband tussen G_u en s' wordt afgeleid in Bijlage C.

4.3.3 Langstransport in de overgangszône

Hoewel de onderliggende mechanismen wezenlijk verschillend zijn, hebben de transportrelaties voor de benedenste onderwateroever (4.17) en voor de actieve zône (4.18) dezelfde vorm. Er is geen reden om aan te nemen, dat deze relatie in de overgangszône een andere vorm zou moeten aannemen. Dus:

$$\Delta L_T^{k-1,k} = G_T^{k-1,k} \left(\frac{\Delta V_T^{k-1}}{B_{k-1}} - \frac{\Delta V_T^k}{B_k} \right) \quad (4.20)$$

waarin de symbolen weer op dezelfde wijze gedefiniëerd zijn als in (4.17) en (4.18).

Evenals in het geval van de benedenste onderwateroever, zal de coëfficiënt G_T in (4.20) empirisch bepaald moeten worden, bijvoorbeeld uit de resultaten van de oriënterende berekeningen in TR-10.

4.3.4 Kwantitatieve invulling

De waarden van de coëfficiënten G_L , G_T en G_u zijn voor de diverse vakovergangen langs de Hollandse kust moeten als invoerparameters worden gegeven. Daarbij zou voor de getijinvloed kunnen worden uitgegaan van de bevindingen in TR-10, voor de golfinvloed van de ervaringen met de toepassing van kustlijnmodellen voor de langjarige ontwikkeling van de gesloten kust (TR-5, deelnota ..).

Op sommige overgangen gelden bijzondere omstandigheden:

- Hoek van Holland: netto golfgedreven transport sterk beïnvloed door de ingang van de Nieuwe Waterweg;
- IJmuiden: langstransport over het grootste deel van de onderwateroever geblokkeerd door de havenhoofden;
- Hondsbossche Zeewering: bovenste deel van het profiel plaatsvast + geen actieve zône zoals hier gedefiniëerd;
- Aansluiting Marsdiep: rol asymmetrie getij, met als gevolg andere morfologische tijdschalen en andere overdrachtsrelaties (zie par. 4.4).

4.4 Overdrachtsrelaties en toestandsbeschrijvingen Waddenkust

4.4.1 Centrale delen van de eilanden

Het centrale deel van een waddeneiland wordt behandeld als een stukje gesloten kust, met speciale aansluitingsrelaties met de eilandkoppen. Dwars op de kust lijkt het systeem op het eerste gezicht vrijwel gelijk aan dat voor de gesloten kust. Wellicht bestaan er echter toch verschillen.

Zo is het denkbaar dat de stroming rond een eiland ten gevolge van getij en/of stormopzet van dien aard is, dat er netto stromingen dwars op de kust optreden (ter "voeding" van naar de eilandkoppen sterker wordende langsstroming), die met een extra bijdrage aan het autonome dwarstransport gepaard zouden gaan. Uit numerieke simulaties van een gemiddeld getij zonder storminvloed (Ridderinkhof, 1988) blijkt echter, dat deze stromingen voor het midden van de westelijke Waddeneilanden (Texel tot en met Ameland) verwaarloosbaar zijn. Er is geen reden om aan te nemen dat voor het netto zandtransport iets anders geldt.

Voor zover bekend zijn soortgelijke numerieke simulaties met stormopzet nog niet uitgevoerd. Extrapolatie van conclusies voor "getij alleen" naar "getij + storm" is riskant, zeker gezien het totaal andere transportklimaat tijdens storm. Niettemin wordt deze extrapolatie, bij gebrek aan beter, hier gemaakt: het autonome dwarstransport heeft, ondanks kwantitatieve verschillen, geen wezenlijk andere oorzaken voor de middens van de westelijke Waddeneilanden dan voor de Hollandse kust.

Daarmee wordt het systeem als zodanig identiek aan dat voor de Hollandse kust en zijn de invoergrootheden soortgelijk, hoewel kwantitatief verschillend.

Langs de kust zijn er echter wel degelijk verschillen, in verband met de aansluiting op de aangrenzende zeegaten. De in par. 4.3 aangegeven langstransportrelaties gaan hier, met uitzondering wellicht van de actieve zône, niet meer op. Welke relaties hier dan wel gelden wordt behandeld in de volgende paragrafen.

4.4.2 Eilandkoppen en zeegaten: relatie buitendelta/vloedkom

Langs de gesloten kust kan het systeem worden beschreven in termen van empirische transportrelaties, waarna de sedimentbalans de toestandbeschrijving levert. Rond de zeegaten ligt dit anders: hier zijn empirische relaties bekend tussen de toestandvariabelen (inhoud buitendelta vs. inhoud vloedkom) en levert de sedimentbalans de onderlinge transportrelatie.

TR-5 (deelnota 1) geeft een overzicht van de bovengenoemde empirische relaties voor het integrale morfologische gedrag van de Waddenzee en zijn buitendelta's in een (quasi-)evenwichtssituatie. Uit deze relaties valt het voor het huidige systeem relevante verband tussen de toestandsgrootheden in de buitendelta en de vloedkom af te leiden:

$$V_{bd} = C_{dv} I_{MSL}^{0.8} \quad (4.21)$$

waarin:

V_{bd} = zandvolume in de buitendelta (buiten het "normale" kustprofiel)
 C_{dv} = evenredigheidsconstante
 I_{MSL} = (water)inhoud vloedkom beneden MSL.

Het systeem is echter geformuleerd in termen van verstoringen ten opzichte van een stationaire toestand. Aangezien (4.21) niet noodzakelijk een stationair evenwicht beschrijft (V_{bd} en I_{MSL} kunnen variëren, zolang het onderlinge verband maar van kracht blijft), zal in het systeem rekening moeten worden gehouden met variaties in V_{bd} en I_{MSL} ten opzichte van een de uitgangstoestand $V_{bd}^{(o)}$, $I_{MSL}^{(o)}$. Uit (4.21) volgt dan in lineaire benadering (dus voor kleine verstoringen, een voor de beschouwde tijdschalen acceptabele veronderstelling):

$$\frac{V_{bd} - V_{bd}^{(o)}}{V_{bd}^{(o)}} = 0.8 \frac{I_{MSL} - I_{MSL}^{(o)}}{I_{MSL}^{(o)}} \quad (4.22)$$

Met name bij ingrepen, d.w.z. snelle veranderingen in de variabelen in (4.21), zal het evenwicht al gauw verstoord worden. Indien in dat geval een exponentieel gedempte aanpassing aan de evenwichtsconditie plaats zou vinden, zou aanpassingsproces en (4.22) samen te vatten zijn in de toestandsvergelijking

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\Delta V_{bd}}{V_{bd}^{(o)}} \right] + \frac{1}{\tau} \frac{\Delta V_{bd}}{V_{bd}^{(o)}} = \frac{0.8}{\tau} \frac{\Delta I_{MSL}}{I_{MSL}^{(o)}} \quad (4.23)$$

waarin:

$\Delta V_{bd} = V_{bd} - V_{bd}^{(o)}$
 $\Delta I_{MSL} = I_{MSL} - I_{MSL}^{(o)}$
 τ = relaxatietijd

Vergelijking (4.23) legt een verband tussen de verandering van het zandvolume in de buitendelta en die van de waterinhoud van de vloedkom. Daarmee is de evenwichtstoestand echter nog niet eenduidig vastgelegd. Immers, elke oplossing die aan (4.22) voldoet is geldig als evenwichtsooplossing.

In principe is er een aantal mogelijkheden om tot eenduidigheid te komen, zoals:

- a. aannemen, dat het quasi-evenwichtsproces als beschreven door (4.22) zo langzaam verloopt, dat het op de beschouwde tijdschaal niet relevant is, zodat de evenwichtstoestand beschreven wordt door: $\Delta V_{bd} = 0$ en $\Delta I_{MSL} = 0$;
- b. het quasi-evenwichtsproces als tijdsproces beschrijven, zodat op elk moment de evenwichtswaarden van V_{bd} en I_{MSL} bekend zijn;
- c. ervan uitgaan, dat één van de grootheden in de empirische relaties uit TR-5/1 altijd bekend is en als "agens" fungeert; daarmee zijn dan ook de meeste andere grootheden bekend.

De laatstgenoemde optie is de eenvoudigste en wordt ook min of meer in TR-5/1 gesuggereerd, met het vloedvolume als "exogene" variabele. Optie a lijkt dubieus, op grond van de in TR-5/1 aangegeven tijdschalen (verlanding Dollard: $\tau \approx 350$ jaar; ontwikkeling oppervlakte Waddenzee: $\tau \approx 2500$ jaar) en optie b lijkt de huidige stand van de kennis niet haalbaar. Vooralnog wordt daarom optie c gekozen.

Opmerking: Hierbij wordt steeds uitgegaan van onveranderlijke exogene condities. De invloed van (versnelde) zeespiegelrijzing wordt pas in paragraaf 4.5 behandeld.

Optie c impliceert, dat de evenwichtswaarden van V_{bd} en I_{MSL} op elk moment bekend zijn als het vloedvolume dat ook is. Gezien (4.22) reduceert (4.23) dan tot

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\delta V_{bd}}{V_{bd}^{(o)}} \right] + \frac{1}{\tau} \frac{\delta V_{bd}}{V_{bd}^{(o)}} = \frac{0.8}{\tau} \frac{\delta I_{MSL}}{I_{MSL}^{(o)}} \quad (4.24)$$

waarin:

$$\begin{aligned} \delta V_{bd} & \hat{=} V_{bd} - V_{bd}^{(e)} \\ \delta I_{MSL} & \hat{=} I_{MSL} - I_{MSL}^{(e)} \\ V_{bd}^{(e)}, I_{MSL}^{(e)} & = \text{momentane evenwichtswaarden.} \end{aligned}$$

Hiermee is het gedrag van de snelle variaties afzonderlijk beschreven. De bijbehorende evenwichtswaarden zijn: $\delta V_{bd} = 0$, $\delta I_{MSL} = 0$.

Ervan uitgaande dat δI_{MSL} bekend is, is de enige overblijvende onbekende in (4.24) de tijdschaal van de snelle variaties, τ . Voordat hiervoor verdere keuzen worden gedaan, zal gepoogd worden aan de hand van het systeem voor een zeegat in zijn geheel na te gaan in hoeverre het eerste-orde relaxatieproces (4.24) een zinnig model is van de aanpassing van V_{bd} en wat de tijdschaal daarbij is.

4.4.3 Eilandkoppen en zeegaten: kwalitatief

Behalve de vloedkom en de buitendelta, vormen ook de actieve zônes langs de eilandkoppen morfologische elementen van betekenis. Daarbij moet onderscheid gemaakt worden tussen de twee oevers van het zeegat: meestal is de ene rijk aan zand en de andere niet. Hoewel banken die deel uitmaken van de buitendelta tamelijk systematisch met de klok meebewegen aan de Nederlandse kust, is het niet altijd zo dat de ontvangende oever zandrijker is dan de leverende. Veel hangt af van het verloop van de hoofdgeul (vergelijk bijv. het Marsdiep en het Seegatt tussen Juist en Norderney). De uitwerking van het systeem ten aanzien van de rol van de actieve kustzône zal dan ook niet voor alle zeegaten gelijk zijn.

Niettemin wordt hier alleen het Marsdiep bekeken, als een eerste poging de werking van een zeegat in een eenvoudig systeem te vangen. Om gevoel te krijgen voor de fysische processen rond het Marsdiep, is een aantal berekeningen gemaakt op basis van het HOKU-model (TR-5/3), met als referentie de door het NIOZ beschikbaar gestelde resultaten van het ZEEWAD-model (Ridderinkhof, 1988). Verder is gebruik gemaakt van ideeën en bevindingen uit diverse publikaties op dit gebied (zie bv. Postma, 1982 en Sha, 1988).

Kijkend naar de berekeningsresultaten (Figuren 8-10) en rekening houdend met resultaten van metingen in dit gebied (Sha, 1988), ontstaat een beeld van de werking van de zeewaartse kant van dit zeegat zoals aangegeven in Figuur 3. Of de modellen waarnaar wordt gekeken kwantitatief korrekte informatie geven of zelfs maar het juiste teken van het netto transport geven, doet hierbij nog even niet ter zake.

Figuur 3 bevat een aantal saillante punten:

- De uitwisseling tussen buitendelta en vloedkom is het resultaat van een aantal min of meer complexe sedimentstromen, zoals T_{yb} (rechtstreeks vanuit de vloedkom naar de buitendelta), maar ook $T_{VL}^H \rightarrow L_L^{HB} \rightarrow L_L^{BT} \rightarrow T_{LV}^T$ (via het aangrenzende vak van de Hollandse kust naar de buitendelta, en via het aangrenzende vak voor Texel weer terug).
- Het Schulpengat is een ebgeul, met transport vanuit het Marsdiep naar het zuiden (T_{VL}^H).
- Het Molengat is waarschijnlijk een vloedgeul, met transport vanuit het noorden naar het Marsdiep toe (T_{LV}^H). Dat het HOKU-model dit niet weergeeft (Figuur 8), is waarschijnlijk te wijten aan een kortsluitstroming tussen de dicht bij elkaar gelegen modelranden achter het Marsdiep en voor Texel.
- De actieve kustzônes dicht bij het zeegat fungeren als "doorgeefluik" naar de vloedkom (L_{uv}^Z en L_{uv}^N) en naar de geulen (D_{uL}^Z , D_{uv}^Z , D_{uv}^N) en veel minder als buffer van sediment. Gezien de zeer steile hellingen, vooral in het zuiden, zal het transport naar de geulen vooral hellingsgeïnduceerd zijn. Het is echter, met name in het zuiden, waar de cyclonale circulatie nog slechts in rudimentaire vorm aanwezig is, onduidelijk welk deel van dit transport het zeegat ingaat (D_{uv}^Z) en welk deel in de ebgeul terechtkomt en zuidwaarts wordt afgevoerd (D_{uL}). Bij Texel doet dat alles wat minder ter zake, omdat daar alle resttransporten naar het Marsdiep toegevoerd zijn.
- De uitwisseling tussen de buitendelta en de aangrenzende kustzône wordt deels bepaald door processen die ernaar streven de kust vlak te trekken (bv. golfgedreven stroming), deels door een noordgaand transport dat samenhangt met de door het corioliseffect veroorzaakte anti-cyclonale circulatie rond de buitendelta en de, waarschijnlijk daarmee en met het getijfaseverloop samenhangende migratie van banken in noordwaardse richting. In het zuiden werken deze transportcomponenten tegen elkaar in, in het noorden met elkaar mee (dus: $L_L^{HB} < L_L^{BT}$).
- Omdat de buitendelta gedefiniëerd is als het zandlichaam dat buiten het omliggende "normale" kustprofiel uitsteekt, moet in L_L^{HB} en L_L^{BT} in principe ook nog rekening gehouden worden met langtransportverschijnselen zoals die zich ook bij een gesloten kust voordoen. Gezien het speciale karakter van de getijbeweging in dit gebied, met grote resttransporten en dus kleine morfologische tijdschalen, is de vraag of de langtransportverschijnselen die een rol spelen voor de gesloten kust, hier niet van ondergeschikt belang zijn.
- Het grootste en meest geprononceerde deel van de buitendelta bevindt zich boven NAP -10 m (zie Figuur 10) en zou dus buiten het dieptebereik liggen van de buitenste elementenrij (de L-vakken) van het systeem voor de gesloten kust. Het zou dan ook logisch zijn dat deze buitenste rij langs de zeegaten zou doorlopen langs de hele kust. Om het systeem enigszins doorzichtelijk en beheersbaar te houden, is gekozen voor de opzet volgens Figuur 3, met in een later stadium wellicht een uitbreiding met een L-rij.
- Om dezelfde reden is de buitendelta verbonden met de aangrenzende L-vakken, hoewel een verbinding met de T-vakken wellicht beter zou aansluiten bij het dieptepatroon. Daarmee zouden de T-vakken echter hun "passieve" karakter verliezen en het systeem veel ingewikkelder maken.

4.4.4 Kwantificering transportrelaties

Bij de kwantificering van de transportrelaties komt het uiteraard aan op een kwantitatief betrouwbaar beeld van de sedimentstromen in het systeem. Op dit punt doen de grenzen van de kennis zich echter gelden: er is nog veel te weinig van de werking van de zeegaten bekend om hier kwantitatief betrouwbare transportrelaties te kunnen formuleren.

Zo zijn de stromings- en transportpatronen in Figuur 8-10 gebaseerd op gemiddeld getij bij rustig weer, uniform zand, geen afpleistering, etc. etc., terwijl niet gekeken is naar de gevoeligheid voor de afregelparemeters (het is niet uitgesloten, dat alleen al daarmee het resttransport kan worden omgekeerd!). Het is dan ook zeer de vraag of de uitgevoerde berekeningen representatief zijn voor het morfologische proces.

Anderzijds is uit de morfologische en sedimentologische eigenschappen van het gebied af te leiden, dat het transportpatroon ongeveer moet zijn zoals aangegeven in Figuur 3 (zie ook Fig. 11). Het lijkt echter geen twijfel, dat kwantificering van de transporten, zeker voor wat betreft jaargemiddelden, alleen op basis van verdere studie kan gebeuren.

Ondanks deze bevinding is in Bijlage D gepoogd om, via een aantal grove aannamen en een aantal bekend veronderstelde gegevens te komen tot een sluitende beschrijving van het systeem, die wellicht kan leiden tot nuttige "speel"-modellen. Daarbij blijkt, dat zelfs bij grove vereenvoudigingen het systeemgedrag al vrij snel te ingewikkeld wordt om, zonder er daadwerkelijk mee te werken, het gedrag te kunnen voorspellen, c.q. te kunnen vaststellen of het een realistische weergave van de werkelijkheid biedt.

In afwachting van verder onderzoek, wordt hier dan ook volstaan met het kwalitatieve beeld dat geschetst is in Figuur 3. Daarnaast wordt, aansluitend bij TR-5/1, de tijdschaal van het snelle relaxatieproces in de vloedkom, τ' , op ca. 15 jaar gesteld voor lokale ingrepen en op ca. 50 jaar voor globaal uitwerkende veranderingen (bv. zeespiegelrijzing; zie p. 4.5.2).

4.5 Invloed versnelde zeespiegelrijzing

4.5.1 Gesloten kust

Aansluitend op het conceptuele model in TR-5/1, wordt aangenomen dat bij zeespiegelrijzing:

- het (vormvaste) profiel in de actieve zône zijn positie ten opzichte van het gemiddelde zeeniveau (MSL) behoudt,
- de respons van de benedenste onderwateroever voornamelijk bepaald wordt via de invloed van de waterdiepte op de waterbeweging → zwakke morfologische koppeling, zeer traag proces,
- de overgangszône zich op dezelfde wijze gedraagt als functie van de morfologie in de actieve zône en de benedenste onderwateroever als in afwezigheid van zeespiegelrijzing,
- de morfologisch bepaalde transportrelaties niet wezenlijk veranderen ten opzichte van de situatie zonder zeespiegelrijzing.

Consistent met deze aanname is de volgende verkaveling dwars op de kust (zie par. 2.2):

- de actieve zône, van de top van de zeereep tot MSL -5 m,
- de overgangszône, van MSL -5 m tot NAP -12 m,
- de benedenste onderwateroever, van NAP -12 m tot NAP -18 m.

Dit betekent, dat de dikte van de overgangslaag toeneemt met het gemiddelde zeeniveau (zie Figuur 12).

Verder wordt aangenomen dat de top van de zeereep, al dan niet geforceerd, gelijke tred houdt met het gemiddelde zeeniveau, zodat de hoogte van de actieve zône konstant is.

Als het profiel in de actieve zône vormvast is en MSL-volgend, dan moet in een raai dwars op een langsrichting uniforme kust gelden (zie Figuur 12 en par. 4.2.5):

$$\frac{dV_U}{dt} = D_{UD} - D_{TU} + Q_U + B h_U c_p \quad (4.25)$$

$$\frac{dV_T}{dt} = D_{TU} - D_{LT} + \frac{1}{2} B h_T c_p + B X_T \frac{dMSL}{dt} \quad (4.26)$$

$$\frac{dV_L}{dt} = D_{LT} - D_B + Q_L \quad (4.27)$$

waarin c_p de horizontale verplaatsingssnelheid van het profiel is.

Als wordt uitgegaan van een evenwichtssituatie, met zeespiegelrijzing als enige bron van verstoring, dan geldt, gezien de gedane aannamen:

$$\frac{dV_L}{dt} = 0; \quad Q_L = 0; \quad D_B = 0 \rightarrow D_{LT} = 0 \quad (4.28)$$

$$\frac{dV_U}{dt} + \frac{dV_T}{dt} = 0; \quad Q_U = 0; \quad D_{UD} = 0 \quad (4.29)$$

zodat:

$$B c_p (h_U + \frac{1}{2} h_T) + B X_T \frac{dMSL}{dt} = 0 \quad (4.30)$$

Hieruit volgt de variant op de Bruun-regel (zie TR-5/1)

$$c_p = \frac{dMSL}{dt} \frac{X_T}{h_U + \frac{1}{2} h_T} \quad (4.31)$$

Dit correspondeert met het in TR-5/1 gevonden resultaat, met dien verstande, dat het verband hier de actieve zône plus de helft van de overgangszône betreft, en niet uitsluitend de actieve zône. Omdat wordt uitgegaan van een evenwichtstoestand, kan (4.25) hiermee en met (4.11) worden uitgewerkt tot

$$\frac{d(\Delta V_U)}{dt} = - G_{TU} \alpha_{TU} \Delta V_U - \frac{B h_U X_T(o)_{ev}}{h_U + \frac{1}{2} h_T(o)_{ev}} \frac{dMSL}{dt} \quad (4.32)$$

waarin ΔV_U staat voor de afwijking ten opzichte van de uitgangstoestand.

Vergelijking (4.32) beschrijft een relaxatieproces, met $(G_{TU} \alpha_{TU})^{-1}$ als inherente tijdschaal en met de MSL-term als externe forcering. Het houdt in, dat de actieve zône niet zonder meer de zeespiegelrijzing volgt, zoals het geval zou zijn als er geen interactie met de overgangszône zou zijn en de Bruun-regel zou gelden

$$\Delta V_U = - \frac{B h_U X_T(o)}{h_U + \frac{1}{2} h_{T(ev)}} \Delta MSL \quad (4.33)$$

Als gevolg van sedimenttoevoer uit de overgangszône wordt dit effect nu afgeremd. Volgens (4.32) ontstaat er bij konstante zeespiegelrijzing zelfs een evenwicht (!):

$$\Delta V_U = - \frac{1}{G_{TU} \alpha_{TU}} \frac{B h_U X_T(o)}{h_U + \frac{1}{2} h_{T(ev)}} \frac{dMSL}{dt} \quad (4.34)$$

maar het is de vraag of tegen die tijd de uitgangspunten, met name t.a.v. de inaktiviteit van de benedenste onderwateroever, nog wel opgaan. Bovendien zal de lineaire benadering, die aan (4.26) ten grondslag ligt, dan wel niet meer geldig zijn.

Toch lijkt (4.32) terecht aan te geven, dat de Bruun-regel, toegepast op de actieve zône, leidt tot een overschatting van de respons van deze zône op zeespiegelrijzing.

Bij inpassing van de invloed van zeespiegelrijzing in het meer algemene grootschalige systeem, is inaktiviteit van de benedenste onderwateroever niet als uitgangspunt te handhaven. Als echter wordt gesteld, dat de invloed van zeespiegelrijzing in deze zône slechts merkbaar is via de sedimentuitwisseling met de overgangszône, blijft conceptueel de overeenkomst met TR-5/1 gehandhaafd en blijft ook (4.31) bruikbaar als uitdrukking voor c_D (zie Bijlage E). Daarin worden dan de waarden van X_T en h_T gebruikt worden, zoals die in de uitgangstoestand gelden: $X_T(o)$ en $h_T(o)$.

In dat geval wordt de invloed van zeespiegelrijzing in het systeem voor de gesloten kust verdisconteerd door de laatste term van (4.25) en de beide laatste van (4.26) toe te voegen aan de toestandsbeschrijvingen voor de vakken U, resp. T.

4.5.2 Waddenkust

Ook bij de Waddenkust en de zeegaten zal de invloed van zeespiegelrijzing primair tot uitdrukking komen in de sedimentbalansvergelijkingen van het systeem. In principe is deze invloed eenvoudig te verdisconteren, zelfs in het systeem voor de zeegaten. Niettemin heeft het uitvoeren ervan weinig zin, omdat de gevolgen in een gecompliceerd systeem als dat voor een zeegat niet te overzien zijn zonder dat systeem daadwerkelijk te bouwen en ermee te experimenteren. Zoals reeds eerder gesteld is (par. 4.4.4), is de stand van de kennis nog zodanig, dat van een dergelijke onderneming nog nauwelijks rendement verwacht mag worden.

In TR-5/1 wordt wel een denkmodel beschreven van de invloed van de zeespiegelrijzing op de integrale eigenschappen van een estuarium. Op grond van enkele van de onderliggende ideeën is het volgende model te formuleren.

Basisgedachte is, dat de netto sedimenttoevoer naar de vloedkom toeneemt met de gemiddelde snelheidsreduktie ten opzichte van de op dat moment geldende evenwichtswaarde:

$$S_{in} - S_{uit} \therefore \bar{u}_{ev}^b - \bar{u}^b \quad (4.35)$$

waarin $b \approx 3$ à 5 en \bar{u} een over de vloedkom gemiddelde snelheidsmaat. Als nu wordt aangenomen, dat de debietverdeling in de vloedkom niet verandert, dan geldt in grove benadering:

$$\bar{u} \therefore \frac{1}{\bar{h}} \quad (4.36)$$

Verder geldt de sedimentbalansvergelijking

$$\frac{dI_{MSL}}{dt} = A_{MSL} \frac{dMSL}{dt} + \frac{I_{MSL}}{A_{MSL}} \frac{dA_{MSL}}{dt} - S_{in} + S_{uit} \quad (4.37)$$

$$\text{ofwel: } \frac{d\bar{h}}{dt} = \frac{dMSL}{dt} - \frac{S_{in} - S_{uit}}{A_{MSL}} \quad (4.38)$$

Met (4.35) en (4.36) levert dit, na linearisatie rond de momentane evenwichts-waarde \bar{h}_{ev}

$$\frac{d\bar{h}}{dt} = \frac{dMSL}{dt} - \frac{a}{A_{MSL_{ev}}} \frac{b}{\bar{h}_{ev}^{b+1}} (\bar{h} - \bar{h}_{ev}) \quad (4.39)$$

waarin a een ijkgrootheid is en de grootheden $A_{MSL_{ev}}$ en \bar{h}_{ev} volgen uit empirische verbanden met het vloedvolume. Vooralsnog wordt dit laatste konstant verondersteld, zodat ook $A_{MSL_{ev}}$ en \bar{h}_{ev} konstant zijn. In dat geval wordt (4.39) weer een eenvoudige relaxatievergelijking met konstante coëfficiënten:

$$\frac{d\bar{h}}{dt} + \frac{\bar{h}}{\tau_h} = \frac{\bar{h}_{ev}}{\tau_h} + \frac{dMSL}{dt} \quad (4.40)$$

$$\text{met: } \tau_h = \frac{A_{MSL_{ev}} \bar{h}_{ev}^{b+1}}{ab} \quad (4.41)$$

Blijkens Figuur 10 in TR-5/1 is 50 à 100 jaar een realistische waarden voor τ_h . Volgens dit model ontstaat dus bij een konstante snelheid van zeespiegel-rijzing op den duur een konstante "achterstand" van \bar{h} op \bar{h}_{ev} .

In TR-5/1 wordt verder vermeld, dat de buitendelta van het Marsdiep in de eerste 50 jaar na de bouw van de Afsluitdijk, d.w.z. in een periode van grote "zandhonger" van de Waddenzee, sterker is geërodeerd dan uit de empirische relatie met het vloedvolume zou volgen. Dit suggereert:

- een responstijd van het systeem van de orde van minstens 50 jaar
- een "overshoot" in de respons van de buitendelta, dus een hogere-orde systeemgedrag.

Het lijkt derhalve niet zinnig om, via de evenwichtsrelatie (4.22) of het eerste-orde relaxatiemodel (4.24), een verband te leggen tussen de

respons van \bar{h} in de vloedkom op zeespiegelrijzing en die van het zand-volume in de buitendelta daarop.

De conclusie dat bij een konstante snelheid van zeespiegelrijzing \bar{h} altijd groter zal zijn dan \bar{h}_e , en dat daardoor voortdurend sedimentimport in het estuarium plaatsvindt, kan op dit moment derhalve slechts vertaald worden in het vermoeden, dat dit dan wel ten koste zal gaan van de buitendelta en de aan het zeegat grenzende kustgedeelte. Hoe en in welke verhoudingen dat dan gebeurt is nu nog niet te zeggen.

4.6 Résumé grootschalige systeem

In formulevorm is het grootschalige systeem voor de gesloten kust als volgt samen te vatten (zie ook Figuren 1 en 2):

$$\frac{d(\Delta V_U^k)}{dt} = B_k h_U c_p^k + D_{UD}^k - D_{TU}^k + \Delta L_U^{k-1,k} - \Delta L_U^{k,k+1} + Q_U^k \quad (4.42)$$

$$\frac{d(\Delta V_T^k)}{dt} = \frac{1}{2} B_k h_{T_{ev}} c_p^k + B_k X_{T_{ev}}^k \frac{dMSL}{dt} + D_{TU}^k - D_{LT}^k + \Delta L_T^{k-1,k} - \Delta L_T^{k,k+1} \quad (4.43)$$

$$\frac{d(\Delta V_L^k)}{dt} = D_{LT}^k - D_B^k + \Delta L_L^{k-1,k} - \Delta L_L^{k,k+1} + Q_L^k \quad (4.44)$$

waarin:

$$c_p^k = - \frac{X_T^{(o)k}}{h_U + \frac{1}{2} h_T^{(o)}} \frac{dMSL}{dt} \quad (4.45)$$

$$D_{TU}^k = \{D_{TU}^{(A)k} + G_{TU}^k (\alpha_{TU}^k \Delta V_U^k + \beta_{TU}^k \Delta V_L^k)\} B_k \quad (4.46)$$

$D_{TU}^{(A)k}$ invoerparameter.

$$D_{LT}^k = \{D_{LT}^{(A)k} + G_{LT}^k (\alpha_{LT}^k \Delta V_U^k + \beta_{LT}^k \Delta V_L^k)\} B_k \quad (4.47)$$

$D_{LT}^{(A)k}$ invoerparameter.

D_B^k volgens Tabel I.

$$\Delta L^{k-1,k} = G^{k-1,k} \left(\frac{\Delta V^{k-1}}{B_{k-1}} - \frac{\Delta V^k}{B_k} \right) \quad (4.48)$$

Q_U^k, Q_L^k = op te geven brontermen.

G_{TU}^k, G_{LT}^k invoerparameters.

$X_{U_{nu}}, X_{T_{nu}}, X_{L_{nu}}$ invoerparameters.

$G_L^{k-1,k}, G_T^{k-1,k}, G_U^{k-1,k}$ invoerparameters.

$h_U = 13$ m; $h_T = 7$ m; $h_L = 6$ m.

De coëfficiënten $\alpha_{TU}^k, \beta_{TU}^k, \alpha_{LT}^k$ en β_{LT}^k zijn uitgewerkt in Bijlage A.

In fysische termen geeft het systeem weer, dat verstoringen ten opzichte van de evenwichtskustligging geleidelijk worden uitgevlakt, met een snelheid die verschilt in langs- en dwarsrichting en met de plaats in het profiel. Het uitvlakkingsproces verloopt als regel sneller in dwarsrichting dan in langs-richting, en ook sneller hoog in het profiel dan op de diepere delen.

Verder is rekening gehouden met het autonome dwarstransport, voor zover dat niet bijdraagt aan het evenwichtsprofiel, met de effecten van zeespiegel-rijzing en met eventuele systematische bronnen en putten (bijv. langjarige zandwinning).

Het systeem voor de centrale gedeelten van de Waddeneilanden is in principe gelijk aan dat voor de gesloten kust, zij het dat de aansluiting op de zeegaten wat andere langstransportformuleringen vereist.

De kwantitatieve invulling van het systeem voor de zeegaten, in de Waddenkust, en des te sterker voor de Deltakust, stuit op een zo groot gebrek aan kennis m.b.t. de fysische processen, dat besloten is dit voorlopig nog niet te doen, anders dan in de vorm van een "speel"-modelletje. Kwalitatief wordt gedacht volgens het in Figuur 3 weergegeven schema.

de voorwaarde is op te lossen.

de voorwaarde is op te lossen.

de voorwaarde is op te lossen.

de voorwaarde is op te lossen.

de voorwaarde is op te lossen.

de voorwaarde is op te lossen.

de voorwaarde is op te lossen.

de voorwaarde is op te lossen.

de voorwaarde is op te lossen.

5. KWANTITATIEVE INVULLING SYSTEEMRELATIES (kleinschalig)

5.1 Toestandsvariabelen

Zoals reeds gesteld werd in hoofdstuk 2, worden kleinschalige verstoringen op de grootschalige ontwikkeling ontkoppeld van die ontwikkeling beschouwd.

Omdat alleen de gesloten kust hier wordt meegenomen, is de definitie van de toestandsvariabelen dezelfde voor alle elementen van het systeem: de verstoring in de over het element gemiddelde positie van de zeebodem ten opzichte van een vertikaal referentievlak. Daarmee zijn de toestandsvariabelen dus gedefiniëerd als horizontale afstanden, min of meer op dezelfde wijze als in een kustlijnmodel.

5.2 Overdrachtsrelaties

5.2.1 Algemene formulering

Het dwarstransport D tussen vak i en vak i+1 wordt nu beschreven door:

$$D_{i,i+1}^k = G_{i,i+1}^k \frac{x_i^k - x_{i+1}^k}{\Delta z_{i,i+1}} \quad (5.1)$$

waarin:

- $D_{i,i+1}^k$ = dwarstransport van vak i naar vak i+1 (m³/jr)
- $G_{i,i+1}^k$ = overdrachtscoëfficiënt tussen vak i en vak i+1 (m³/jr)
- x_i^k = horizontale verstoring vak i (m)
- $z_{i,i+1}$ = afstand middens vak i en vak i+1 (m)
- k = vakindex in langsrichting

Op soortgelijke wijze wordt het langstransport tussen vak k en van k+1 in strook i beschreven door:

$$L_i^k = G_i^k \frac{x_i^k - x_i^{k+1}}{\Delta y} \quad (5.2)$$

waarin:

- L_i^k = langstransport tussen vak k en vak k+1 in strook i (m³/jr)
- G_i^k = overdrachtscoëfficiënt tussen vak k en vak k+1 in strook i (m³/jr)
- Δy = vaklengte (m)

5.2.2 Invulling transportrelaties

In het volgende wordt aangegeven, hoe de overdrachtscoëfficiënten op de verschillende vakgrenzen worden bepaald.

L₁: Het aeolische transport in het duingebied wordt als autonoom beschouwd en dus niet meegenomen

L₂: Het langstransport in de hoog-actieve zone van -3 m tot +3 m is voornamelijk golfgedreven. Aangenomen wordt, dat hier een gedeelte $(1-\alpha)$ van het totale golfgedreven langstransport plaatsvindt. Dit laatste kan worden beschreven op eenzelfde wijze als bij één-lijn modellen, via de kustconstante s . Er volgt dan:

$$G_2^k = (1-\alpha)s^k \quad (5.3)$$

L₃: Het langstransport in de laag-actieve zone van -8 m tot -3 m wordt gedeeltelijk bepaald door het golfgedreven transport, gedeeltelijk door het getijtransport. Op het getij-effekt wordt ingegaan in Bijlage F. We kunnen dan stellen:

$$G_3^k = \alpha s^k + g_3 \quad (5.4)$$

L₄: De langstransport-effecten in de diepste zône worden voornamelijk door het getij bepaald; op deze effecten wordt in Bijlage F ingegaan. Op basis daarvan stellen we hier:

$$G_4^k = g_4 \quad (5.5)$$

D₂₁: Het dwarstransport tussen de hoog-actieve zône en het duinfront wordt beheerst door landwaarts gericht aeolisch transport en zee- waarts gerichte duinafslag. Dit leidt tot een asymmetrische respons: afslag gebeurt wezenlijk sneller dan aangroei. In Bijlage G wordt uit langjarige metingen van strandbreedte en duinaangroei of erosie langs de Hollandse kust een tweetal waarden afgeleid van G_{21}^k : één voor het geval van aangroei, en één voor het geval van afslag.

$$G_{21}^k = G_{w21}^k, \quad x_2^k - x_1^k > 0 \quad (5.6a)$$

$$G_{A21}^k, \quad x_2^k - x_1^k < 0 \quad (5.6b)$$

D₃₂: Het dwarstransport tussen de laag-actieve en de hoog-actieve zône wordt door golven gedomineerd. In Bijlage H wordt beschreven, hoe uit de analyse van CROSTRAN simulaties aan onderwateroever-suppleties een schatting gemaakt kan worden van de overdrachtscoëfficiënt G_{32}^k .

D₄₃: Hetzelfde geldt voor G_{43}^k , deze is aanzienlijk kleiner dan G_{32}^k (ongeveer een factor 5).

5.3 Balansvergelijkingen

Per vak kan nu een balansvergelijking worden opgesteld:

$$\text{zône 1: } \Delta y \Delta z_1 \frac{\partial x_1^k}{\partial t} = D_{21}^k \quad (5.7)$$

$$\text{zône 2: } \Delta y \Delta z_2 \frac{\partial x_2^k}{\partial t} = D_{32}^k - D_{21}^k + L_2^{k-1} - L_2^k \quad (5.8)$$

$$\text{z\^one 3: } \Delta y \Delta z_3 \frac{\partial x_3^k}{\partial t} = D_{43}^k - D_{32}^k + L_3^{k-1} - L_3^k \quad (5.9)$$

$$\text{z\^one 4: } \Delta y \Delta z_4 \frac{\partial x_4^k}{\partial t} = -D_{43}^k + L_4^{k-1} - L_4^k \quad (5.10)$$

5.4 Systeemvergelijkingen

Combinatie van de overdrachtsvergelijkingen uit par. 5.2.2 met de balansvergelijkingen uit par. 5.3, en discretisatie in de tijd levert nu de volgende systeemvergelijkingen:

$$\text{z\^one 1: } \Delta y \Delta z_1 \frac{\partial x_1^k}{\partial t} = G_{21}^k \frac{x_2^k - x_1^k}{\Delta z_{12}} \quad (5.11)$$

$$-A_{12}^k = \frac{G_{21}}{\Delta y \Delta z_1 \Delta z_{12}} \quad (5.12)$$

$$\text{MS: } x_1^{k,j+1} = x_1^{k,j} [1 - A_{12}^k \Delta t] + x_2^{k,i} [A_{12}^k \Delta t] \quad (5.13)$$

z\^one 2:

$$\Delta y \Delta z_2 \frac{\partial x_2^k}{\partial t} = G_{32}^k \frac{x_3^k - x_2^k}{\Delta z_{23}} - G_{21}^k \frac{x_2^k - x_1^k}{\Delta z_{12}} + G_2^{k-1} \frac{x_2^{k-1} - x_2^k}{\Delta y} - G_2^k \frac{x_2^k - x_2^{k+1}}{\Delta y} \quad (5.14)$$

$$A_{23}^k = \frac{G_{32}^k}{\Delta y \Delta z_2 \Delta z_{23}} \quad (5.15)$$

$$A_{21}^k = \frac{G_{21}^k}{\Delta y \Delta z_2 \Delta z_{12}} \quad (5.16)$$

$$A_2^{k-1} = \frac{G_2^{k-1}}{\Delta y^2 \Delta z_2} \quad (5.17)$$

$$A_2^k = \frac{G_2^k}{\Delta y^2 \Delta z_2} \quad (5.18)$$

$$\begin{aligned}
 x_2^{k,j+1} = & x_2^{k,i} [1 - (A_{21}^k + A_{23}^k + A_2^{k-1} + A_2^k)\Delta t] + \\
 & + x_1^{k,j} A_{21}^k \Delta t + x_3^{k,j} A_{23}^k \Delta t + \\
 & + x_2^{k-i,j} A_2^{k-1} \Delta t + x_2^{k+1,i} A_2^k \Delta t
 \end{aligned} \tag{5.19}$$

zône 3:

$$\begin{aligned}
 \Delta y \Delta z \frac{\partial x_3^k}{\partial t} = & G_{43}^k \frac{x_4^k - x_3^k}{\Delta z_{34}} - G_{32} \frac{x_3^k - x_2^k}{\Delta z_{23}} + G_3^{k-1} \frac{x_3^{k-1} - x_3^k}{\Delta y} - \\
 & - G_3 \frac{x_3^k - x_3^{k+1}}{\Delta y}
 \end{aligned} \tag{5.20}$$

$$A_{34}^k = \frac{G_{43}^k}{\Delta y \Delta z_3 \Delta z_{34}} \tag{5.21}$$

$$A_{32}^k = \frac{G_{32}^k}{\Delta y \Delta z_3 \Delta z_{23}} \tag{5.22}$$

$$A_3^{k-1} = \frac{G_3^{k-1}}{\Delta y^2 \Delta z_3} \tag{5.23}$$

$$A_3^k = \frac{G_3^k}{\Delta y^2 \Delta z_3} \tag{5.24}$$

$$\begin{aligned}
 x_3^{k,j+1} = & x_3^{k,j} [1 - (A_{32}^k + A_{34}^k + A_3^{k-1} + A_3^k)\Delta t] + \\
 & + x_2^{k,j} A_{32}^k \Delta t + x_4^{k,j} A_{34}^k \Delta t + \\
 & + x_3^{k-1,j} A_3^{k-1} \Delta t + x_3^{k+1,j} A_3^k \Delta t
 \end{aligned} \tag{5.25}$$

zône 4:

$$\Delta y \Delta z \frac{\partial x_4^k}{\partial t} = - G_{43}^k \frac{x_4^k - x_3^k}{\Delta z_{34}} + G_4^{k-1} \frac{x_4^{k-1} - x_4^k}{\Delta y} - G_4^k \frac{x_4^k - x_4^{k+1}}{\Delta y} \tag{5.26}$$

$$A_{43}^k = \frac{G_{43}^k}{\Delta y \Delta z_4 \Delta z_{34}} \quad (5.27)$$

$$A_4^k = \frac{G_4^k}{\Delta y^2 \Delta z_4} \quad A_4^{k-1} = \frac{G_4^{k-1}}{\Delta y^2 \Delta z_4} \quad (5.28)$$

$$x_4^{k,j+1} = x_4^{k,j} [1 - (A_{43}^k + A_4^{k-1} + A_4^k) \Delta t] + \quad (5.29)$$

$$+ x_3^{k,j} A_{43}^k \Delta t + x_4^{k-1,j} A_4^{k-1} \Delta t + \quad (5.30)$$

$$+ x_4^{k+1,j} A_4^k \Delta t$$

Met behulp van deze systeemvergelijkingen kan, gegeven de toestand op tijdsniveau j , zeer eenvoudig de toestand op tijdsniveau $j+1$, na tijdstap Δt , worden berekend.

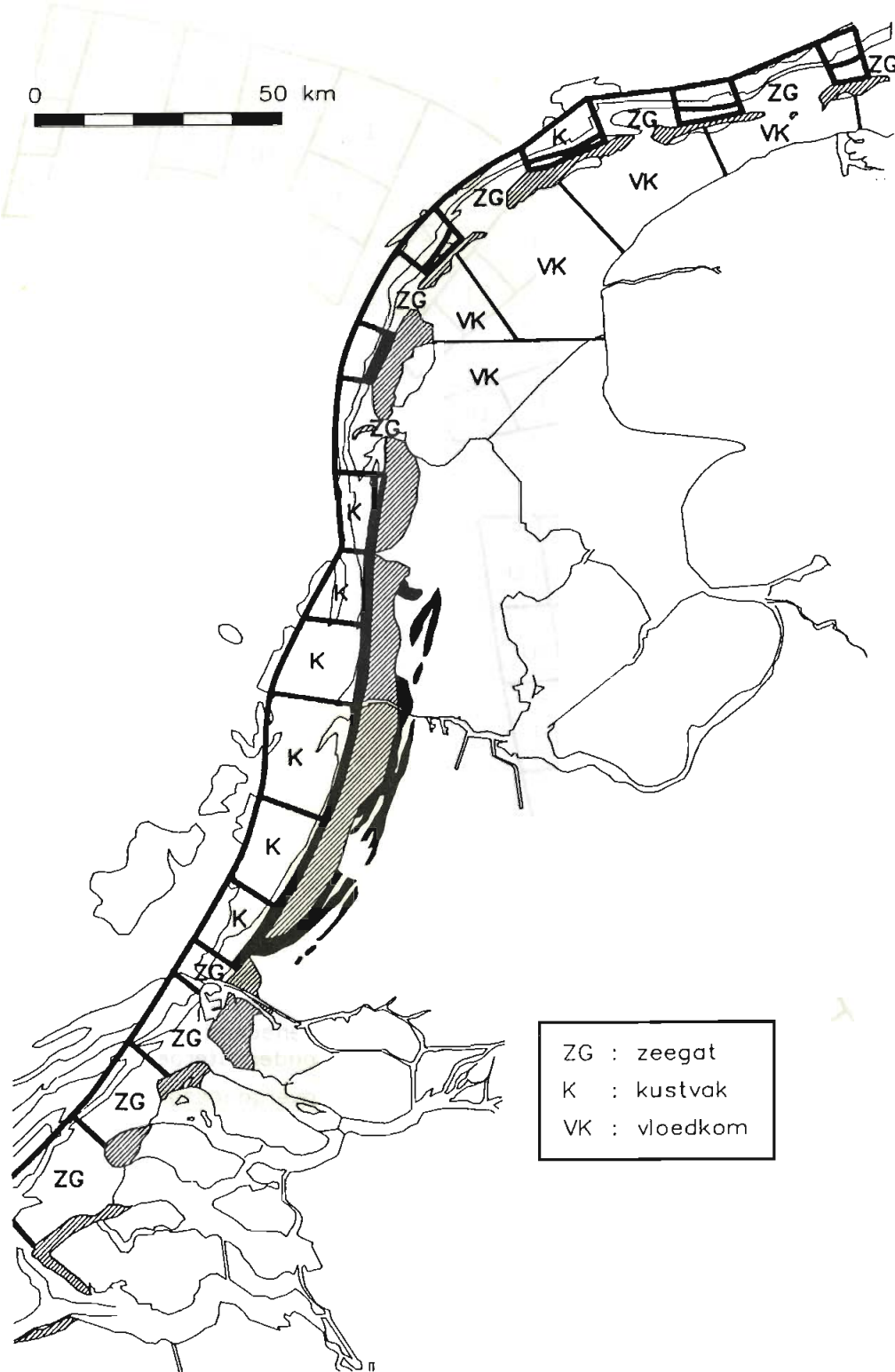
Uiteraard kunnen op ieder moment de x -waarden ook worden uitgedrukt in volumina.

5.5 Geldigheid en toepasbaarheid

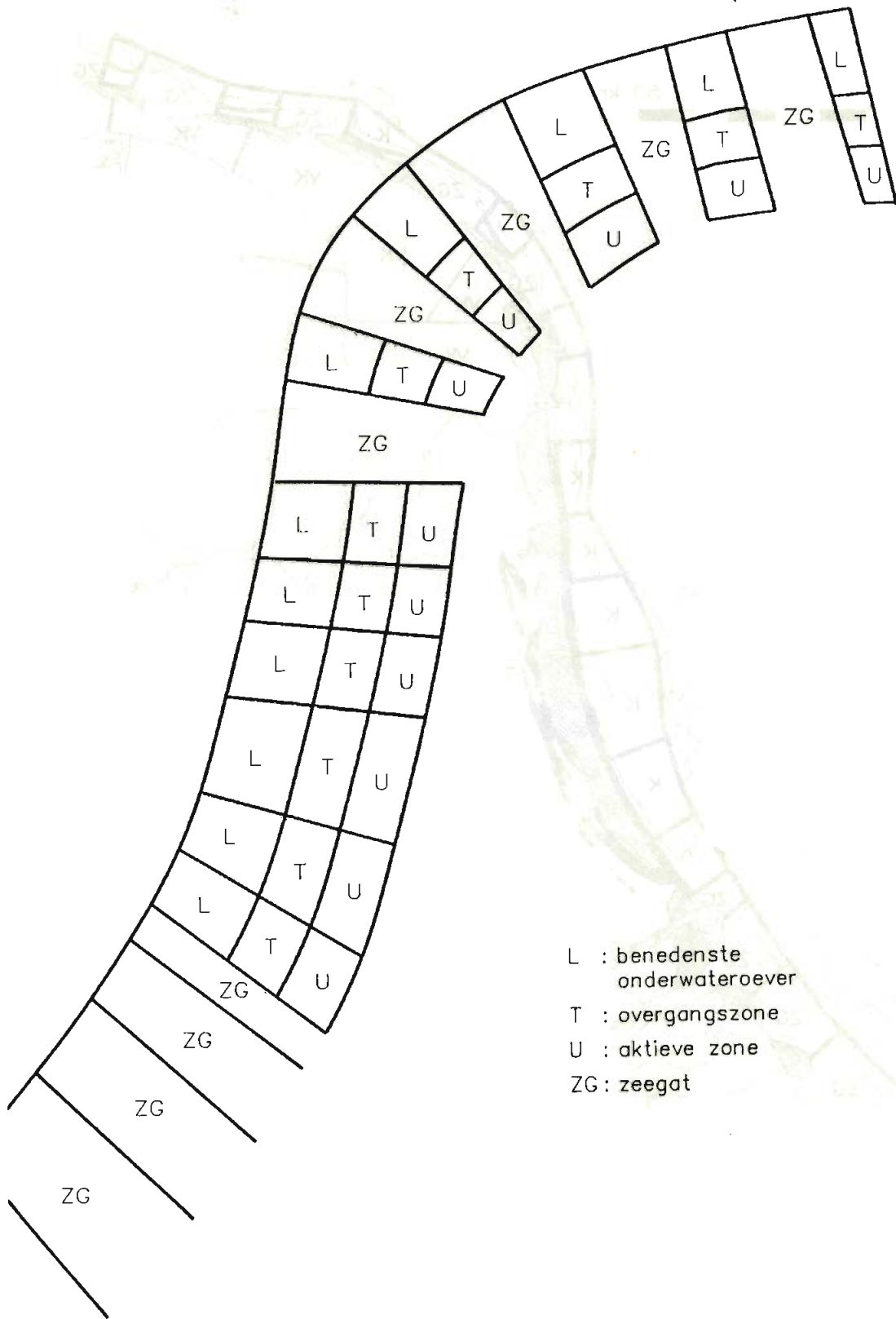
Het hier beschreven systeem mag niet opgevat worden als een fysisch-mathematisch model met algemene geldigheid. Evenals het grootschalige systeem is het veeleer fenomenologisch van karakter: het geeft een afbeelding van het waargenomen gedrag van een gedeelte van de gesloten Hollandse kust, binnen een gegeven bereik van omstandigheden. Als zodanig voegt het systeem ook niets toe aan de bestaande kennis, maar brengt deze hoogstens voor dit specifieke geval in een hanteerbaarder vorm.

locatie	dwarstransport over -18 m lijn, positief kustwaarts (m ³ /m'/jr)
Scheveningen	2
Noordwijk	2
Petten	3
Callantsoog	5
Texel	6

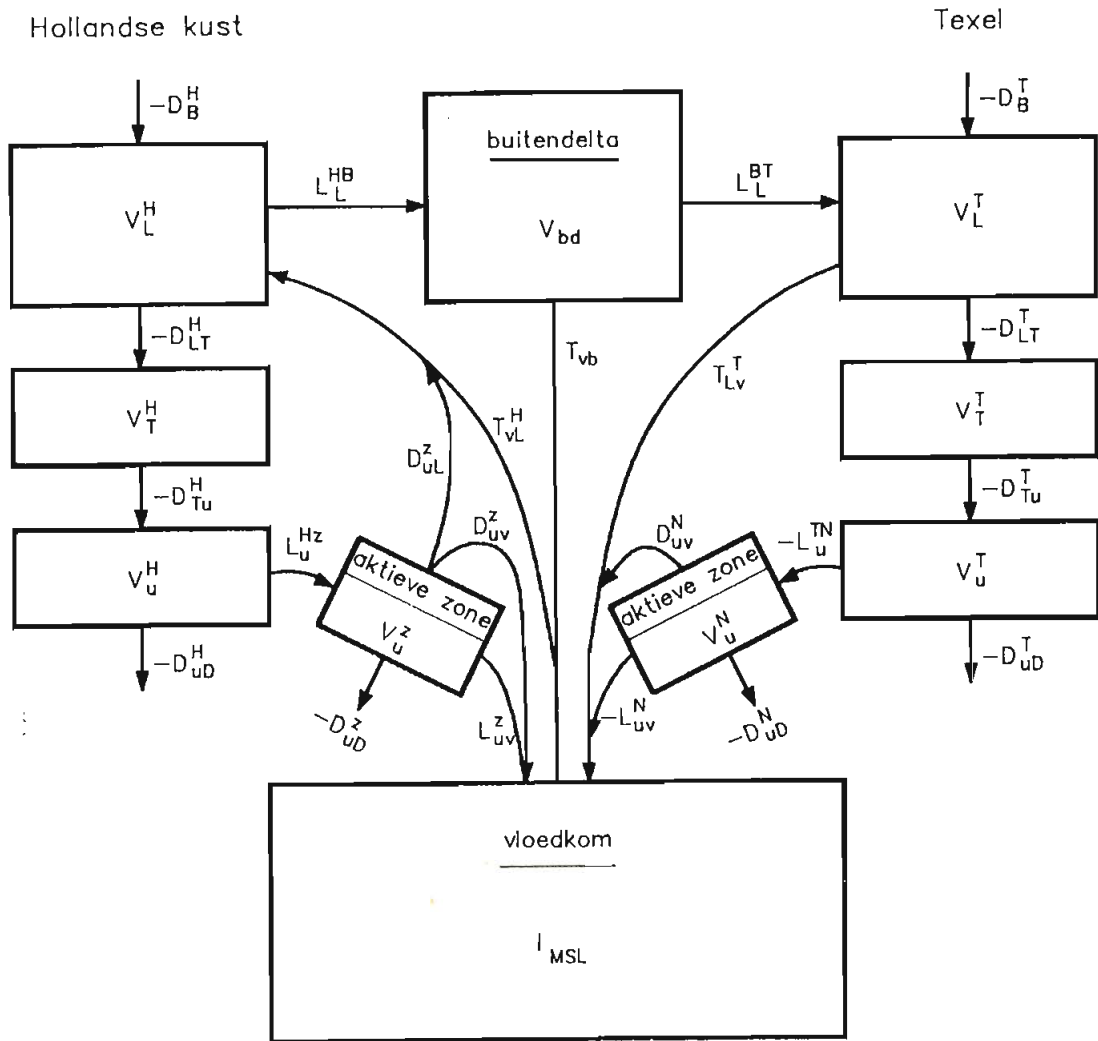
Tabel I Geschatte dwarstransporten over -18 m lijn
voor de Nederlandse kust



Figuur 1

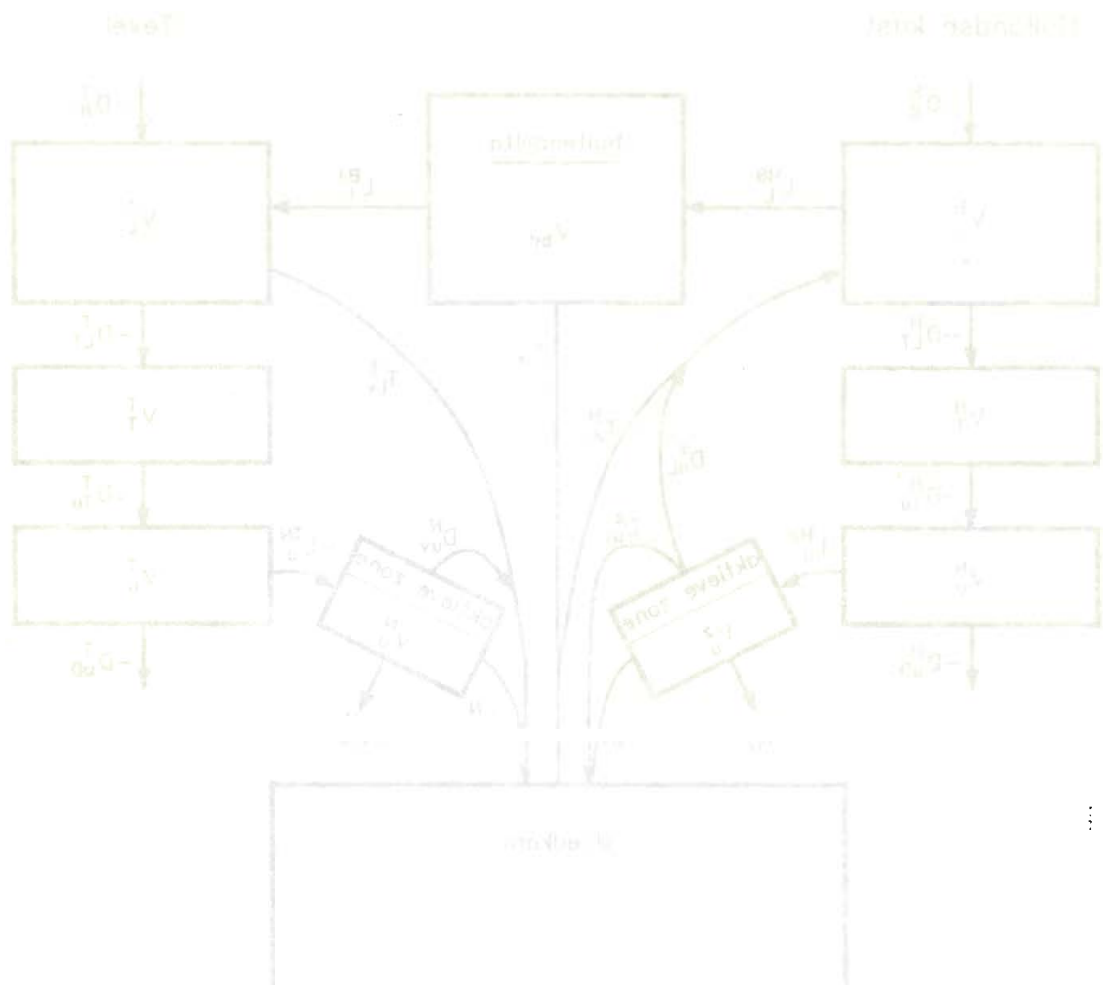


Figuur 2

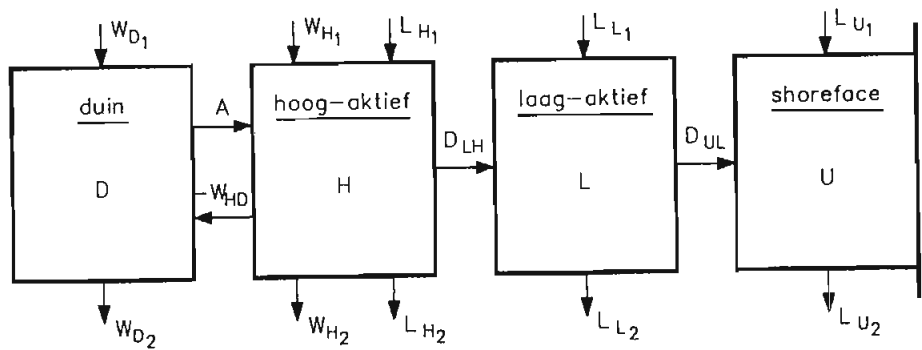
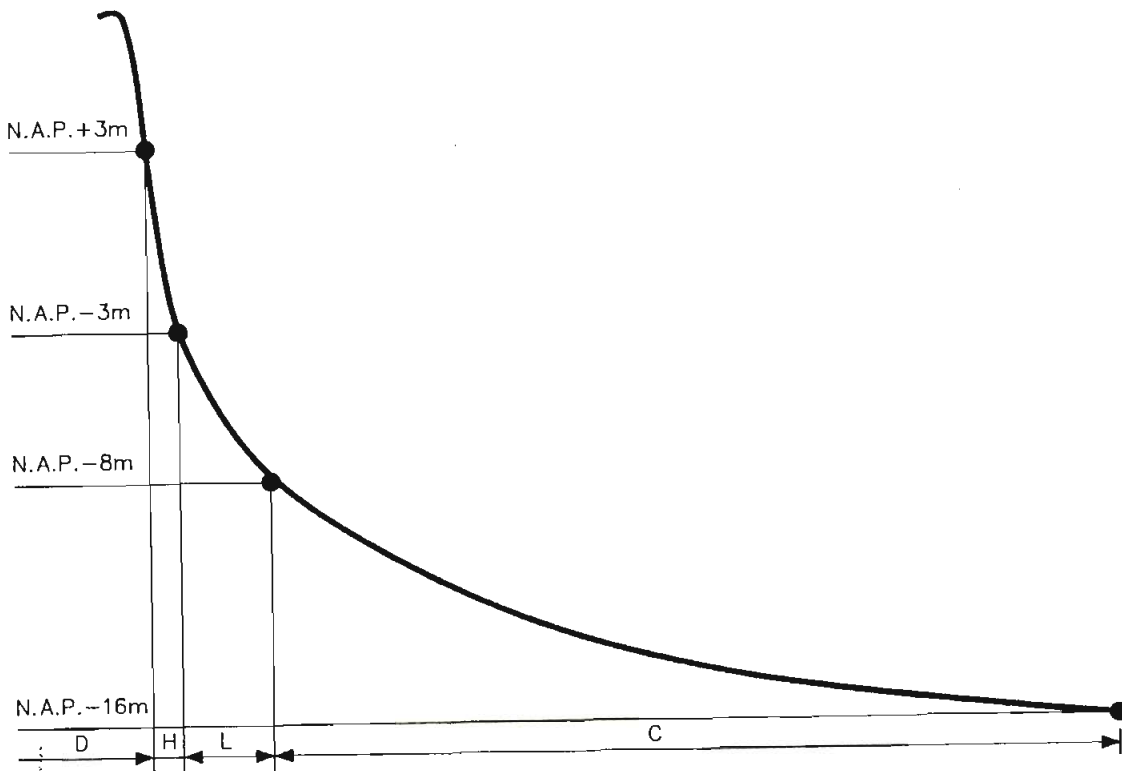


Legenda: V : zandinhoud
 D : dwarstransport
 L : langstransport
 T : transport door geulen
 I : waterinhoud

Figuur 3



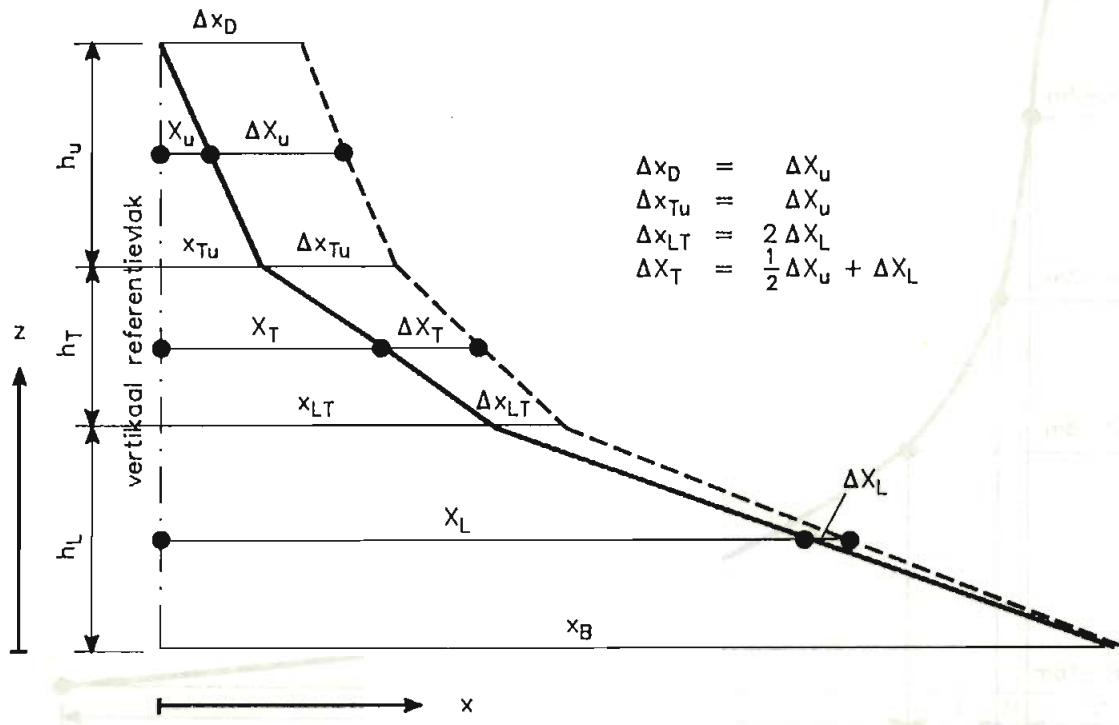
Figuur 4 (Nog niet opgenomen)



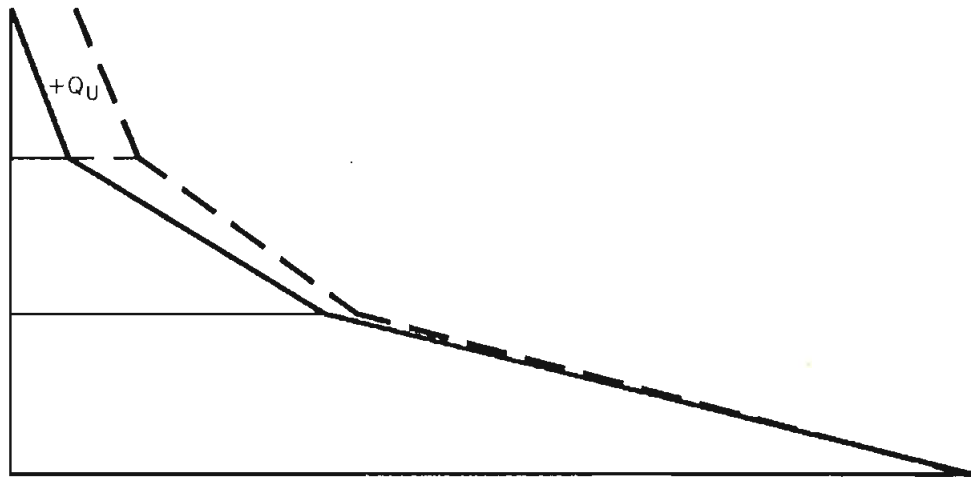
W : aeolisch transport
L : langtransport

D : dwarstransport
A : idem, t.g.v. duinafslag

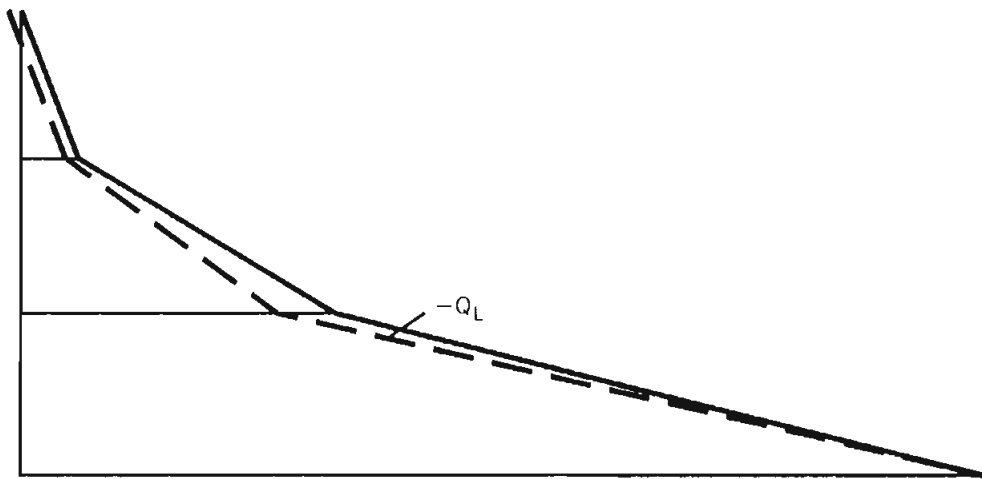
Figuur 5



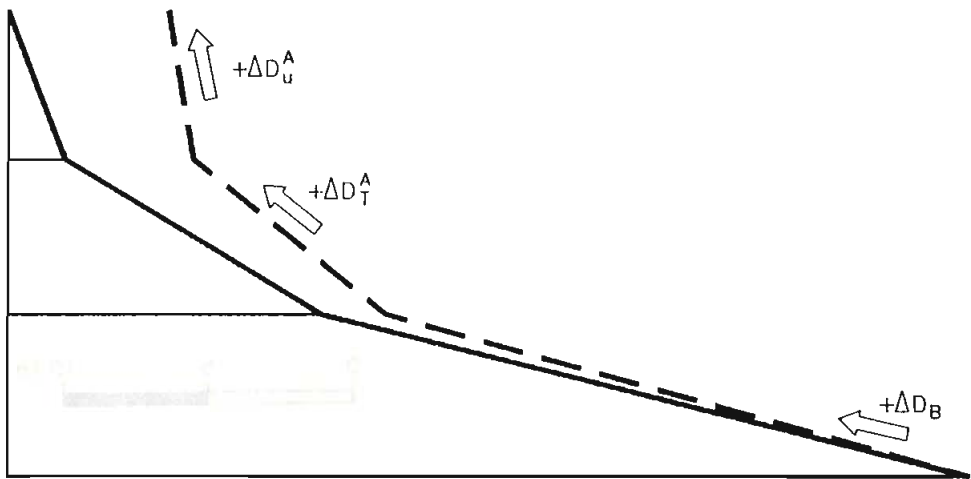
Figuur 6



a) Aangroei actieve zône

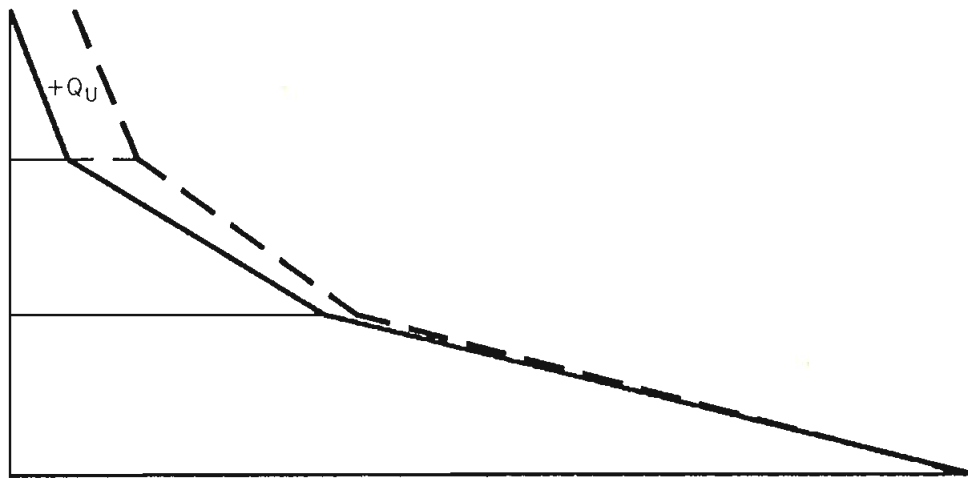


b) Erosie benedenste ondiepwateroever

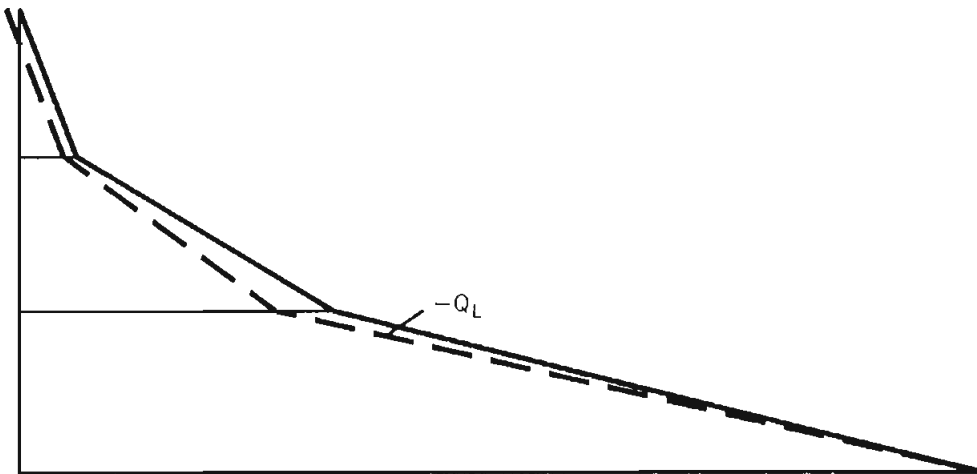


c) Toename autonoom kustwaarts transport

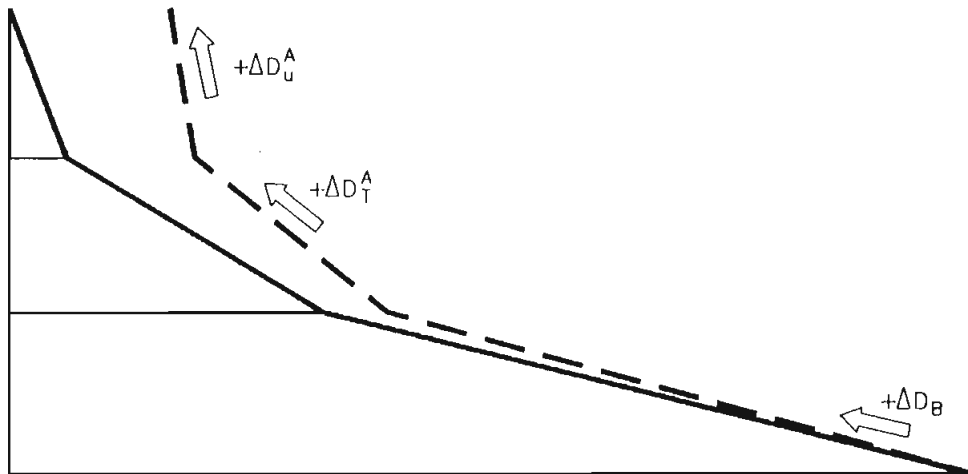
Figuur 7



a) Aangroei actieve zône

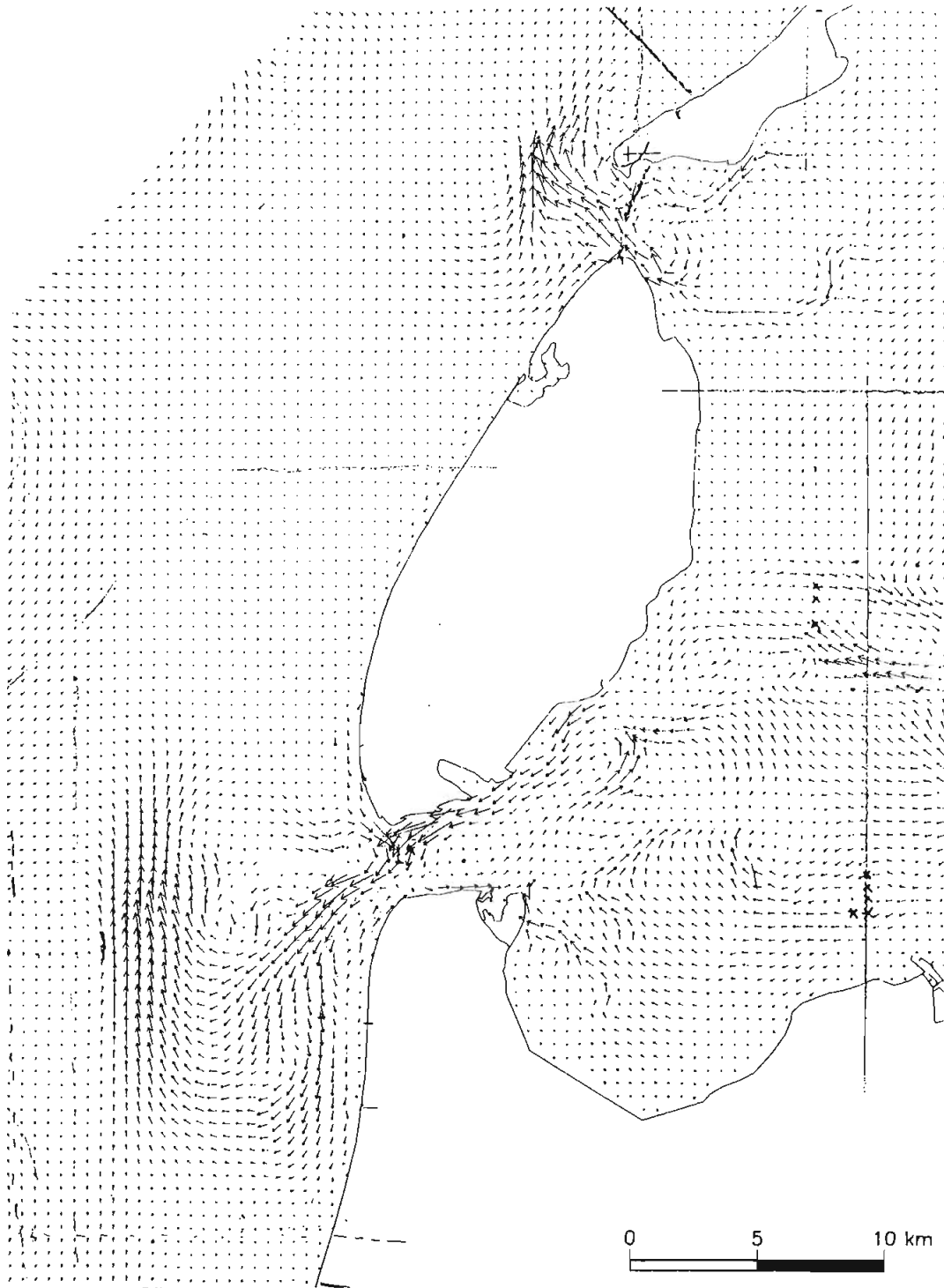


b) Erosie benedenste ondiepwateroever

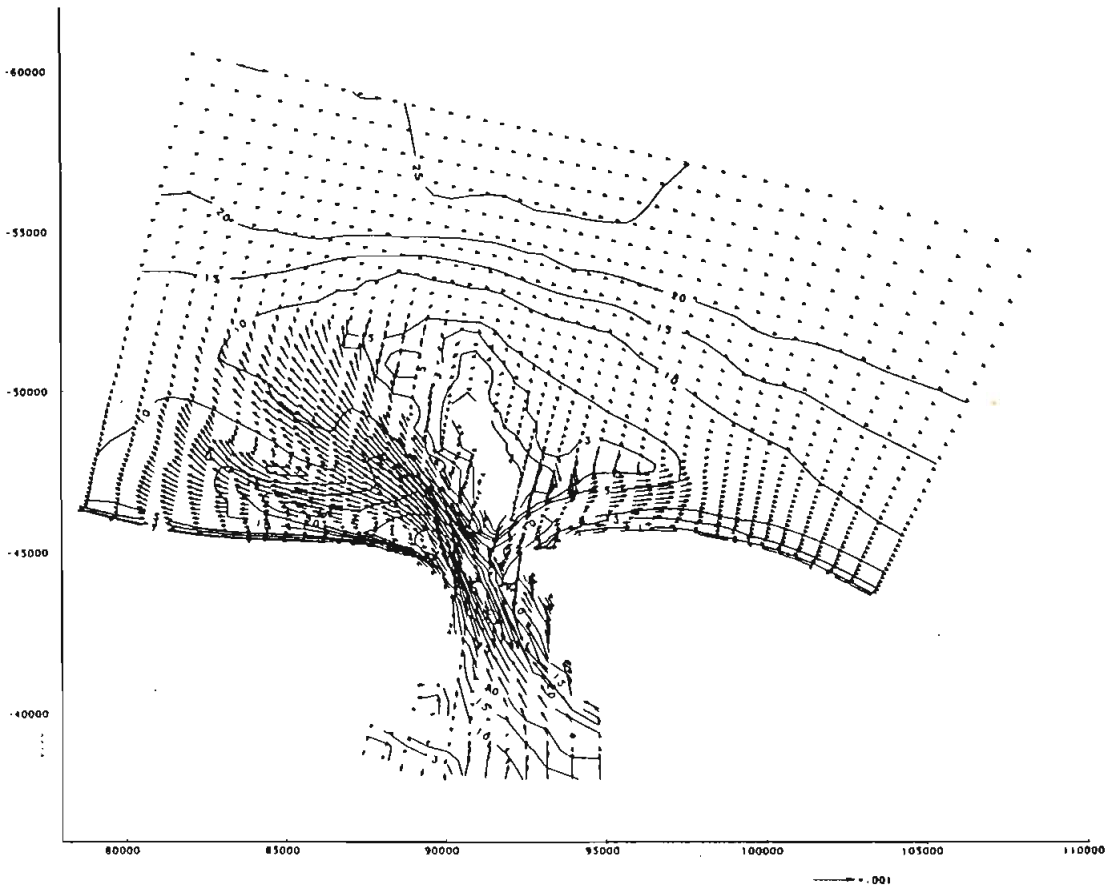


c) Toename autonoom kustwaarts transport

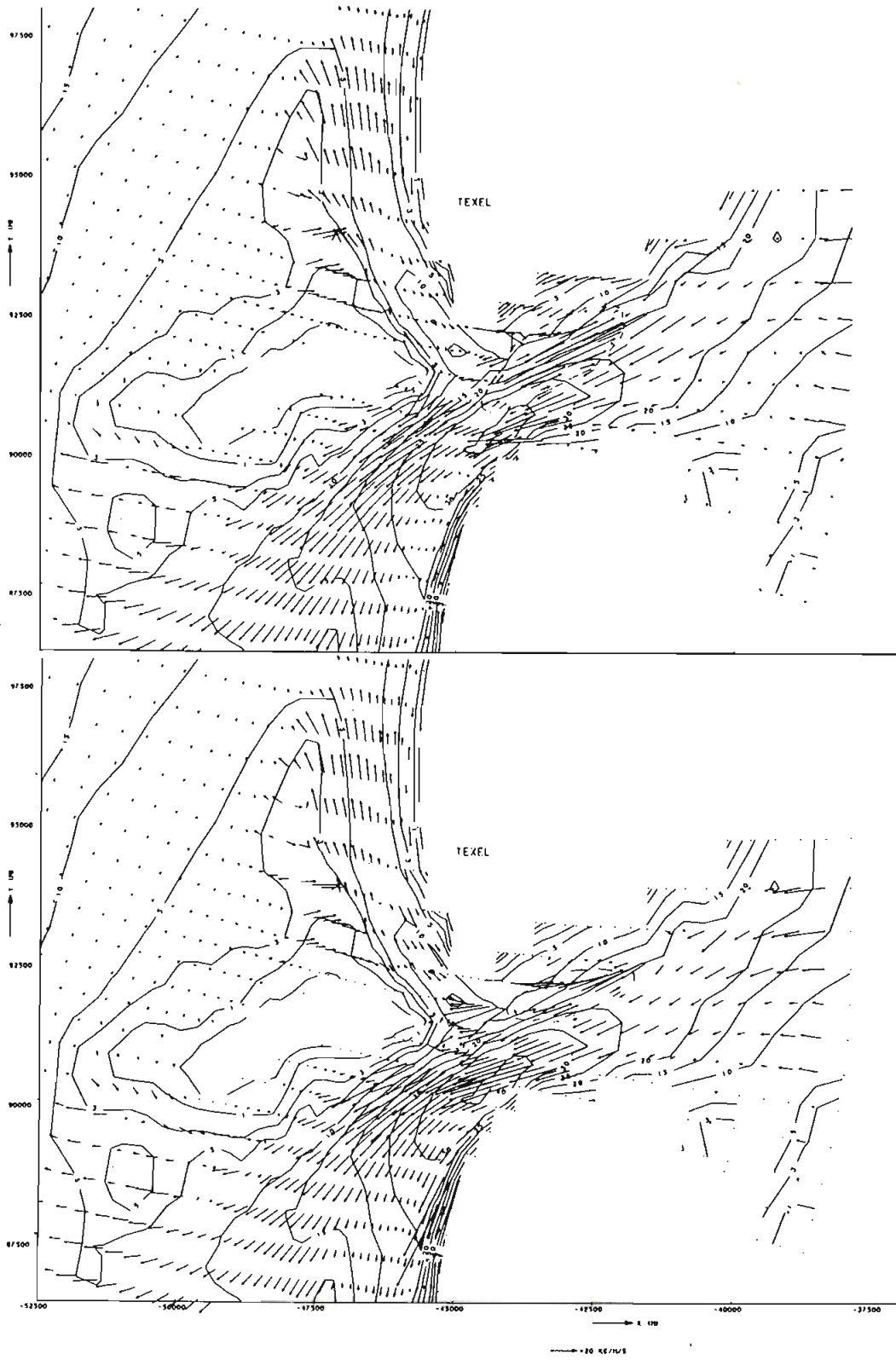
Figuur 7



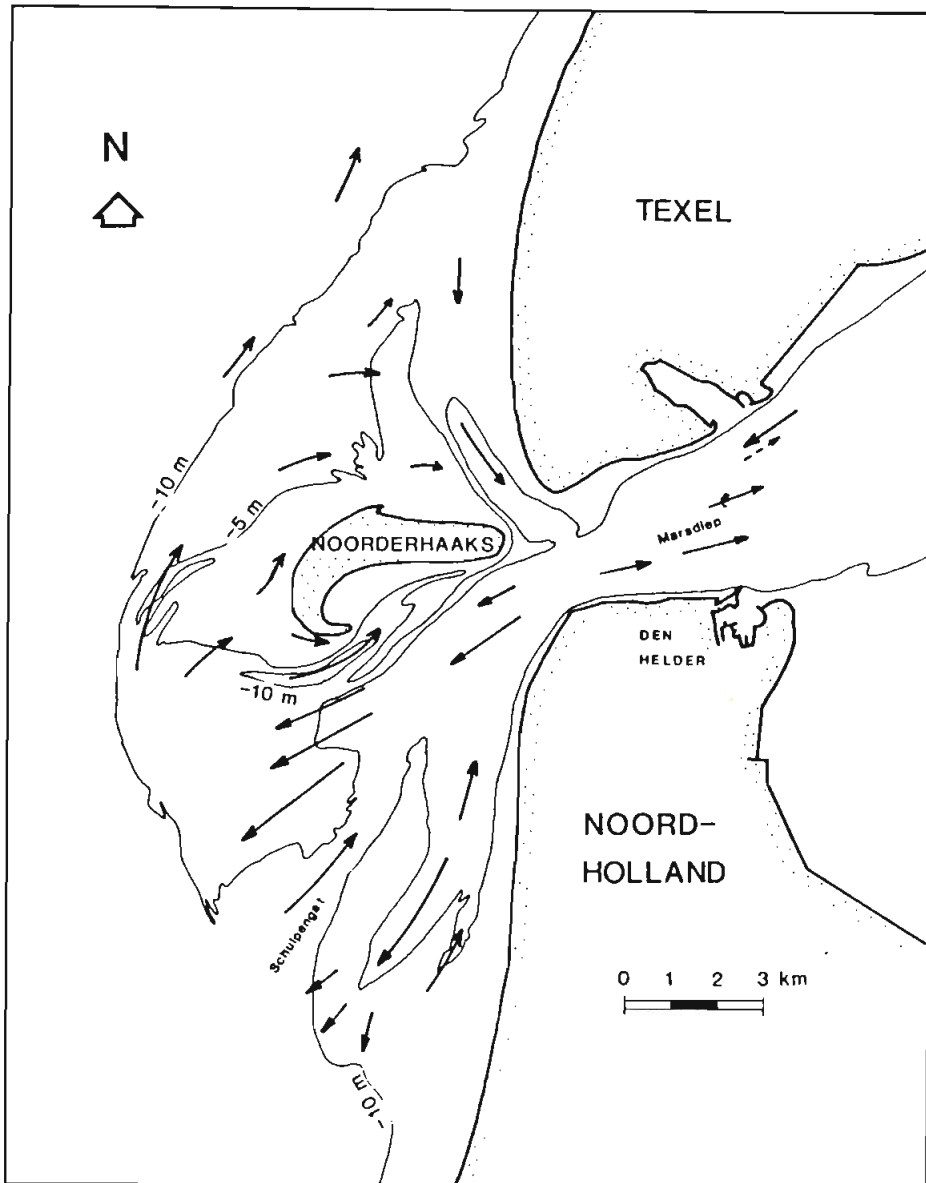
Figuur 8



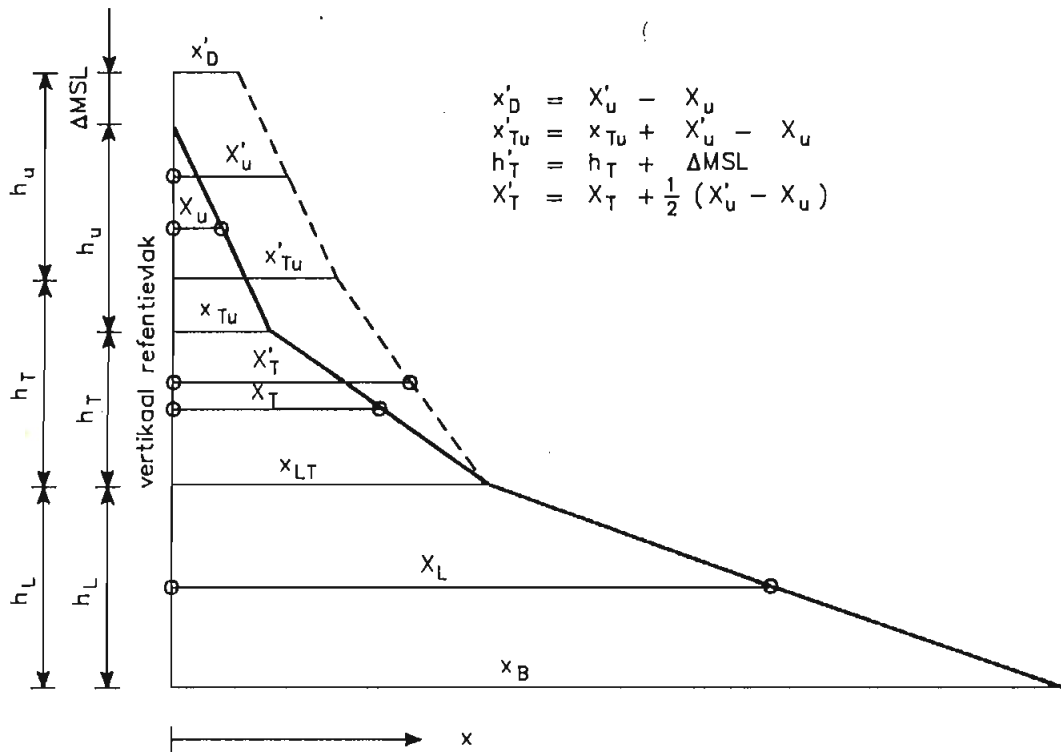
Figuur 9



Figuur 10



Figuur 11



Figuur 12

BIJLAGE A

Overgangshellingen

De gemiddelde bodemhelling op de grens van twee vakken, die nodig is om de morfologisch bepaalde dwarstransporten te kunnen berekenen, is als volgt te bepalen (zie ook Figuur 6).

- Helling op overgang LT:

$$S_{LT} = \left(\frac{\partial z}{\partial x} \right)_{LT} = \frac{x_L - x_{LT}}{x_L - x_T} \frac{-\frac{1}{2} h_T}{x_{LT} - x_T} + \frac{x_{LT} - x_T}{x_L - x_T} \frac{-\frac{1}{2} h_L}{x_L - x_{LT}} \quad (A.1)$$

- Kleine verstoring:

$$S_{LT} = \frac{x_L - x_{LT} - \Delta x_L}{x_L - x_T - \frac{1}{2} \Delta x_u} \frac{-\frac{1}{2} h_T}{x_{LT} - x_T + \Delta x_L - \frac{1}{2} \Delta x_u} +$$

$$+ \frac{x_{LT} - x_T + \Delta x_L - \frac{1}{2} \Delta x_u}{x_L - x_T - \frac{1}{2} \Delta x_u} \frac{-\frac{1}{2} h_L}{x_L - x_{LT} - \Delta x_L}$$

$$\Delta S_{LT} \approx -\Delta x_L \frac{x_L - x_T}{(x_{LT} - x_T)(x_L - x_{LT})} (S_{LT_1} - S_{LT_2}) +$$

$$+ \frac{1}{2} \Delta x_u \left\{ \frac{S_{LT_1} + S_{LT_2}}{x_L - x_T} + \frac{S_{LT_1} - S_{LT_2}}{x_{LT} - x_T} \right\} \quad (A.2)$$

waarin: $S_{LT_1} = \frac{x_L - x_{LT}}{x_L - x_T} \frac{-\frac{1}{2} h_T}{x_{LT} - x_T} \quad (A.3)$

$$S_{LT_2} = \frac{x_{LT} - x_T}{x_L - x_T} \frac{-\frac{1}{2} h_L}{x_L - x_{LT}} \quad (A.4)$$

- Herschreven:

$$\Delta S_{LT} = \alpha_{LT} \Delta V_u + \beta_{LT} \Delta V_L \quad (A.5)$$

$$\text{met: } \alpha_{LT} = \frac{1}{2Bh_u} \left\{ \frac{S_{LT_1} + S_{LT_2}}{x_L - x_T} + \frac{S_{LT_1} - S_{LT_2}}{x_{LT} - x_T} \right\} \quad (A.6)$$

$$\beta_{LT} = \frac{-1}{Bh_L} \frac{(x_L - x_T)(S_{LT_1} - S_{LT_2})}{(x_{LT} - x_T)(x_L - x_{LT})} \quad (A.7)$$

- Helling op overgang TU:

$$S_{TU} = \left(\frac{\partial z}{\partial x} \right)_{TU} = \frac{x_T - x_{TU}}{x_T - x_u} \frac{-\frac{1}{2} h_u}{x_{TU} - x_u} + \frac{x_{TU} - x_u}{x_T - x_u} \frac{-\frac{1}{2} h_T}{x_T - x_{TU}} \quad (A.8)$$

- Kleine verstoring:

$$S_{TU} = \frac{x_T - x_{TU} + \Delta x_L - \frac{1}{2} \Delta x_u}{x_T - x_u + \Delta x_L - \frac{1}{2} \Delta x_u} \frac{-\frac{1}{2} h_u}{x_{TU} - x_u} + \frac{x_{TU} - x_u}{x_T - x_{TU} + \Delta x_L - \frac{1}{2} \Delta x_u} \frac{-\frac{1}{2} h_T}{x_T - x_{TU}}$$

$$\begin{aligned} \Delta S_{TU} \approx & - \Delta x_L \frac{1}{(x_T - x_{TU})(x_T - x_u)} \{ - (x_{TU} - x_u) S_{TU_1} + \\ & + (2x_T - x_u - x_{TU}) S_{TU_2} \} + \frac{1}{2} \Delta x_u \frac{1}{(x_T - x_{TU})(x_T - x_u)} \\ & \{ - (x_{TU} - x_u) S_{TU_1} + (2x_T - x_u - x_{TU}) S_{TU_2} \} \end{aligned} \quad (A.9)$$

$$\text{waarin: } S_{TU_1} = \frac{x_T - x_{TU}}{x_T - x_u} \frac{-\frac{1}{2} h_u}{x_{TU} - x_u} \quad (A.10)$$

$$S_{TU_2} = \frac{x_{TU} - x_u}{x_T - x_u} \frac{-\frac{1}{2} h_T}{x_T - x_{TU}} \quad (A.11)$$

- Herschreven:

$$\Delta S_{TU} = \alpha_{TU} \Delta V_U + \beta_{TU} \Delta V_L \quad (A.12)$$

met:

$$\alpha_{TU} = \frac{1}{2Bh_u} \frac{1}{(x_T - x_{TU})(x_T - x_u)} \{ (2x_T - x_u - x_{TU}) S_{TU_2} - (x_{TU} - x_u) S_{TU_1} \} \quad (A.13)$$

$$\beta_{TU} = \frac{-1}{Bh_L} \frac{1}{(x_T - x_{TU})(x_T - x_u)} \{ (2x_T - x_u - x_{TU}) S_{TU_2} - (x_{TU} - x_u) S_{TU_1} \} \quad (A.14)$$

BIJLAGE B

Systeemvergelijking per dwarsprofiel (grootschalig)

Het systeem in een raai langs een uniforme kust wordt beschreven door de toestandsvergelijkingen (zie par. 4.2.5):

$$\frac{d(\Delta V_u)}{dt} = D_{uD} - D_{Tu} + Q_u \quad (B.1)$$

$$\frac{d(\Delta V_L)}{dt} = D_{LT} + Q_L - D_B^A \quad (B.2)$$

waarin D_B^A het autonome dwarstransport aan de zeerand van het systeem is, en door de overdrachtsrelaties

$$D_{LT} = G_{LT} (\alpha_{LT} \Delta V_u + \beta_{LT} \Delta V_L) + D_{LT}^A \quad (B.3)$$

$$D_{Tu} = G_{Tu} (\alpha_{Tu} \Delta V_u + \beta_{Tu} \Delta V_L) + D_{Tu}^A \quad (B.4)$$

Dit stelsel is te herleiden tot een tweede-orde gewone D.V. in bijvoorbeeld ΔV_u :

$$\begin{aligned} \frac{d^2(\Delta V_u)}{dt^2} + (G_{Tu} \alpha_{Tu} - G_{LT} \beta_{LT}) \frac{d(\Delta V_u)}{dt} + (G_{Tu} \beta_{Tu} G_{LT} \alpha_{LT} - G_{Tu} \alpha_{Tu} G_{LT} \beta_{LT}) \Delta V_u = \\ - G_{Tu} \beta_{Tu} (Q_L + D_{LT}^A - D_B^A) - G_{LT} \beta_{LT} (Q_u + D_{uD} - D_{Tu}^A) \end{aligned} \quad (B.5)$$

De discriminant van de karakteristieke vergelijking van (B.5) is:

$$\det = (G_{Tu} \alpha_{Tu} - G_{LT} \beta_{LT})^2 - 4 (G_{Tu} \beta_{Tu} G_{LT} \alpha_{LT} - G_{Tu} \alpha_{Tu} G_{LT} \beta_{LT}) \quad (B.6)$$

$$= (G_{Tu} \alpha_{Tu} + G_{LT} \beta_{LT})^2 - 4 G_{Tu} \beta_{Tu} G_{LT} \alpha_{LT} \quad (B.7)$$

Uit (B.3) en (B.4) is af te leiden, dat:

$$G_{LT} \alpha_{LT} > 0 \quad \text{en} \quad G_{LT} \beta_{LT} < 0 \quad (B.8)$$

$$G_{Tu} \alpha_{Tu} > 0 \quad \text{en} \quad G_{Tu} \beta_{Tu} < 0 \quad (B.9)$$

Daaruit volgt, dat de determinant (B.7) altijd positief is, dus dat de homogene variant van (B.5) alleen exponentiële functies van t als oplossing heeft.

Uit de karakteristieke vergelijking volgen verder de volgende eigenschappen van de wortels:

$$\text{som} = - (G_{Tu} \alpha_{Tu} - G_{LT} \beta_{LT}) \quad (B.10)$$

$$\text{produkt} = G_{Tu} \beta_{Tu} G_{LT} \alpha_{LT} - G_{Tu} \alpha_{Tu} G_{LT} \beta_{LT} \quad (B.11)$$

In het algemeen zal D_{Tu} sterker op een verandering ΔV_u reageren dan D_{LT} , d.w.z. dat

$$G_{TU} \alpha_{TU} > G_{LT} \alpha_{LT} \quad (B.12)$$

Ook zal D_{TU} sterker reageren op een verandering ΔV_u dan op een verandering ΔV_L , dus

$$G_{TU} \alpha_{TU} > G_{TU} \beta_{TU} \quad (B.13)$$

Of D_{TU} ook sterker reageert op ΔV_L dan D_{LT} is niet zo duidelijk, maar wel is uit Bijlage 1 af te leiden, dat $|\alpha_{LT}| < |\beta_{LT}|$, dus dat

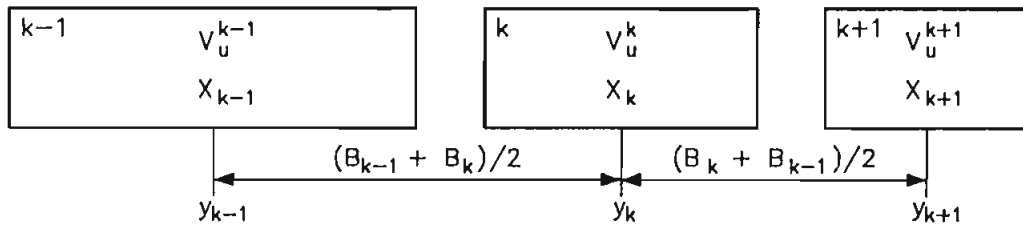
$$G_{LT} \alpha_{LT} < - G_{LT} \beta_{LT} \quad (B.14)$$

Uit (B.12) tot (B.14) volgt, dat de som van de wortels negatief is en het produkt positief, m.a.w. dat beide wortels altijd negatief zijn, dus dat de oplossing van de homogene variant van (B.5) bestaat uit een combinatie van twee gedempte exponentiële functies.

Dit betekent, dat het systeem altijd bovenkritisch gedempt is en derhalve geen inherente oscillaties of zelfs exponentiële groei vertoont.

BIJLAGE C

Verband tussen langstransportfactor G_u en de kustkonstante



$$\left(\frac{\partial^2 X}{\partial y^2}\right)_k = \frac{8}{B_{k-1} + 2B_k + B_{k+1}} \left(\frac{X_{k+1} - X_k}{B_{k+1} + B_k} - \frac{X_k - X_{k-1}}{B_k + B_{k-1}} \right) \quad (C.1)$$

$$= \frac{8}{B_{k-1} + 2B_k + B_{k+1}} \frac{1}{h_u} \left[\frac{B_k V_u^{k+1} - B_{k+1} V_u^k}{B_{k+1} B_k (B_{k+1} + B_k)} - \frac{B_{k-1} V_u^k - B_k V_u^{k-1}}{B_k B_{k-1} (B_k + B_{k-1})} \right] \quad (C.2)$$

$$\left(\frac{\partial X}{\partial t}\right)_k = \frac{1}{h_u} \frac{\partial V_u^k}{\partial t} \quad (C.3)$$

Uit (4.18) en de sedimentbalans in langsricting volgt:

$$\frac{\partial(\Delta V_u^k)}{\partial t} = \frac{G_u^{k-1,k}}{1-p} \left(\frac{\Delta V_u^{k-1}}{B_{k-1}} - \frac{\Delta V_u^k}{B_k} \right) - \frac{G_u^{k,k+1}}{1-p} \left(\frac{\Delta V_u^k}{B_k} - \frac{\Delta V_u^{k+1}}{B_{k+1}} \right) \quad (C.4)$$

Combinatie met (C.2) en (C.3) in (4.19) leidt tot

$$G_u^{k-1,k} = \frac{8B_k s'}{B_{k-1} + 2B_k + B_{k+1}} \cdot \frac{1}{B_k + B_{k-1}} (1-p) \quad (C.5)$$

$$G_u^{k,k+1} = \frac{8B_k s'}{B_{k-1} + 2B_k + B_{k+1}} \cdot \frac{1}{B_{k+1} + B_k} (1-p) \quad (C.6)$$

Deze uitdrukkingen zijn echter niet consistent, want bij vervanging van k in (C.5) door k+1 ontstaat niet (C.6), maar

$$G_u^{k,k+1} = \frac{8B_{k+1} s'}{B_k + 2B_{k+1} + B_{k+2}} \cdot \frac{1}{B_{k+1} + B_k} (1-p) \quad (C.7)$$

Om toch een consistent geheel te krijgen, wordt daarom bij benadering (en in overeenstemming met de benadering in C.4) gesteld

$$G_u^{k-1,k} \approx (1-p) \frac{2}{B_{k-1} + B_k} s' \quad (C.8)$$

BIJLAGE D

Uitwerking systeem Zeegat van Texel

Hoewel de kennis van de werking van een zeegat nog tekort schiet voor een goed onderbouwde systeembeschrijving, is het wellicht mogelijk op grond van de bestaande kennis en een aantal veronderstellingen te komen tot een eenvoudig conceptueel model, te gebruiken als speelmodel bij verder onderzoek.

Alvorens te kijken naar het systeem voor verstoringen op de quasi-evenwichtstoestand (4.22), moet deze toestand zelf nader beschreven worden. Hiertoe wordt verondersteld, dat

- de dwarstransporten in de kustvakken "Hollandse kust" en "Texel" bekend zijn, evenals de kustligging in die vakken.
- het langstransport vanuit deze kustvakken naar het zeegat, L_u^H resp. L_u^T , voor wat betreft de actieve zône is af te leiden uit de kustlijnontwik-keling over de laatste honderd jaar.
- dat dit langstransport niet afhankelijk is van de kustligging in de desbetreffende kustvakken (m.a.w.: de kustlijnen van de kop van Noord-Holland en van Texel hebben een vaste oriëntatie).
- de actieve zônes direkt langs de geulen van het zeegat werken slechts als "doorgeefluik" van sediment (dus niet als buffer).
- het duinwaartse transport vanuit deze zônes is verwaarloosbaar (dus: $D_{ud}^Z \approx 0$ en $D_{ud}^n \approx 0$).
- de langstransporten in de buitenste zône, L_L^{HB} en L_L^{BT} , bestaan uit twee componenten, L_{LC} (coriolis c.a.) en L_{LG} (golven + getij) zodanig, dat

$$L_L^{HB} = L_{LC} - L_{LG}^{HB} \quad \text{en} \quad L_L^{BT} = L_{LC} + L_{LG}^{BT} \quad (D.1)$$

- het golf/getij-geïnduceerde gedeelte, L_{LG} , kan worden gerelateerd aan de positie van de buitendelta ten opzichte van de aangrenzende kust, op soortgelijke wijze als in de actieve zône van een gesloten stuk kust:

$$L_{LG}^{HB} \sim X_L^H - X_{bd} \quad \text{en} \quad L_{LG}^{BT} \sim X_{bd} - X_L^T \quad (D.2)$$

waarin X_{bd} een representatieve afstand van de buitendelta tot de doorgetrokken referentielijn is. De evenredigheidskonstanten in deze relaties worden overeenkomstig die voor de actieve zône van de gesloten kust gekozen en zijn derhalve bekend.

- het transport vanuit het estuarium naar het kustvak "Hollandse kust" en dat vanuit het kustvak "Texel" naar het estuarium, resp. T_{VL}^H en T_{LV}^T , zijn onafhankelijk van de kustligging in de desbetreffende kustvakken.
- de dwarstransporten vanuit de actieve zônes direkt langs de geulen, D_{uL} , D_{uv}^Z , D_{uv}^n , kunnen worden ondergebracht bij de langstransporten vanuit het aangrenzende kustvak naar het zeegat (dus: $D_{uv}^Z \rightarrow L_u^H$ en $D_{uv}^n \rightarrow L_u^T$), c.q. bij het interne uitwisselingsproces in het kustvak (v.w.b. D_{uL}^Z).
- de uitwisseling tussen de elementen, L, T en H in de aangrenzende kustvakken heeft een zodanige tijdschaal, dat de quasi-evenwichtsontwikkeling van vloedkom en buitendelta op de voet gevolgd wordt, zodat het kustprofiel in deze vakken steeds dezelfde vorm heeft.

Op grond van deze veronderstellingen, die ongetwijfeld een sterk vereenvoudigde weergave van de realiteit zijn, wordt het stelsel van Figuur 3 vereenvoudigd tot dat in Figuur D.1.

Hierin zijn de grootheden L_u^H en L_u^T dus bekend, terwijl ook L_{LC} als gegeven autonome grootheid wordt aangenomen. De onbekenden zijn L_{LG}^{HB} ,

L_{LG}^{BT} , T_{VL}^H , T_{yb} , V_{bd} , I_{MSL} , V_k^H en V_k^T . Tussen deze onbekenden bestaan de volgende relaties:

- (1) Golf/getijd-gedreven transportrelaties (zie ook (D.2)):

$$L_{LG}^{HB} = - G_{LG}^{HB} (X_{bd} - X_L^H) \quad (D.3)$$

Aangezien V_{bd} gedefinieerd is ten opzichte van het "normale" kustprofiel, d.w.z. bij benadering halverwege de profielen in de aangrenzende kustvakken, is dit uit te werken tot

$$L_{LG}^{HB} = - G_{LG}^{HB} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{V_k^H}{h_k B_k^H} + \frac{V_k^T}{h_k B_k^T} \right) + \frac{V_{bd}}{h_{bd} B_{bd}} - \frac{V_k^H}{h_k B_k^H} \right] \quad (D.4)$$

$$= - G_{LG}^{HB} \left[\frac{V_{bd}}{h_{bd} B_{bd}} - \frac{1}{2} \frac{V_k^H}{h_k B_k^H} + \frac{1}{2} \frac{V_k^T}{h_k B_k^T} \right] \quad (D.5)$$

waarin: h_k = profielhoogte kustvakken (= m)
 B_k^H, B_k^T = breedte kustvakken
 h_{bd} = profielhoogte buitendelta
 B_{bd} = breedtemaat buitendelta

Evenzo geldt:

$$L_{LG}^{BT} = G_{LG}^{BT} \left[\frac{V_{bd}}{h_{bd} B_{bd}} - \frac{1}{2} \frac{V_k^T}{h_k B_k^T} + \frac{1}{2} \frac{V_k^H}{h_k B_k^H} \right] \quad (D.6)$$

- (2) Sedimentbalans kustvakken:

$$\frac{dV_k^H}{dt} = T_{VL}^H - L_{LG}^{HB} - L_{LC} - L_u^H + \dots \quad (D.7)$$

$$\frac{dV_k^T}{dt} = - T_{LV}^T + L_{LG}^{BT} + L_{LC} + L_u^T + \dots \quad (D.8)$$

waarin de ...termen de aansluiting met de overige elementen van het complete grootschalige systeem weergeven.

- (3) Sedimentbalans buitendelta

Gezien de definitie van V_{bd} , ten opzichte van het "normale profiel", is de relevante volumegrootheid voor de sedimentbalans in het buitendelta-gebied:

$$V_{bd}^* \hat{=} B_{bd} h_{bd} X_{bd} = \frac{1}{2} B_{bd} h_{bd} \left(\frac{V_k^H}{h_k B_k^H} + \frac{V_k^T}{h_k B_k^T} \right) + V_{bd} \quad (D.9)$$

en wordt deze balans:

$$\frac{dV_{db}^*}{dt} = L_{LG}^{HB} - L_{LG}^{BT} + T_{vb} \quad (D.10)$$

zodat:

$$\frac{dV_{bd}}{dt} + \frac{1}{2} \frac{B_{bd} h_{bd}}{B_k^H h_k} \frac{dV_k^H}{dt} + \frac{1}{2} \frac{B_{bd} h_{bd}}{B_k^T h_k} \frac{dV_k^T}{dt} = L_{LG}^{HB} - L_{LG}^{BT} + T_{vb} \quad (D.11)$$

(4) Sedimentbalans vloedkom

Aannemend, dat al het sediment dat door het zeegat heen de vloedkom inkomt in de geulen blijft en dus bijdraagt aan de verandering van I_{MSL} , wordt de sedimentbalans voor de vloedkom:

$$\frac{dI_{MSL}}{dt} = T_{vb} + T_{VL}^H - T_{LV}^T - L_u^H + L_u^T \quad (D.12)$$

(5) Empirische relatie vloedkom-buitendelta (zie (3.21) e.v.):

$$\frac{dV_{bd}}{dt} = 0.8 \frac{V_{bd}}{I_{MSL}} \frac{dI_{MSL}}{dt} \approx 0.8 \frac{V_{bd}^{(o)}}{I_{MSL}^{(o)}} \frac{dI_{MSL}}{dt} \quad (D.13)$$

Het resultaat van (1) - (5) is zeven relaties tussen de negen onbekenden. Er ontbreken dus nog twee relaties om tot een volledig bepaald systeem te kunnen komen. Aangezien de sedimentbalans voor elk van de elementen in Figuur D.1 al is gebruikt, moeten dit transportrelaties zijn, en een voor de hand liggende keus is dan de beschrijving van T_{VL}^H en T_{LV}^T , dus de transporten door de hoofdgeulen.

Stel nu eens, in eerste grove benadering, dat T_{VL}^H en T_{LV}^T autonoom zijn, dus niet afhankelijk van enige andere variabele in het systeem. In principe hoeft deze aanname niet strijdig te zijn met de empirische relatie tussen geuldoorsnede en vloedvolume (TR-5/1). Gebruik makend van deze veronderstelling is het systeem dan volledig bepaald en te herleiden tot

$$\frac{dV_k^H}{dt} = \text{fnct} (V_k^H, V_k^T, V_{bd}) \quad (D.14)$$

$$\frac{dV_k^T}{dt} = \text{fnct} (V_k^H, V_k^T, V_{bd}) \quad (D.15)$$

$$\frac{dV_{bd}}{dt} = \text{fnct} (V_k^H, V_k^T, V_{bd}) \quad (D.16)$$

De overige onbekenden zijn met behulp van de overige relaties te elimineren.

Het resulterende stelsel is van de derde orde, gezien de meervoudige interacties tussen de elementen, waarschijnlijk moeilijk te splitsen in lagere-orde stelsels. Het gedrag van het zeegat-systeem in samenhang met de kust laat zich dan ook minder gemakkelijk analyseren dan bv. het tweede-orde systeem voor het kustprofiel (zie Bijlage B). Het daadwerkelijk bouwen van een dergelijk systeem, desnoods eerst voor

één enkel zeegat in een overigens gesloten kust, en daarmee "spelen" lijkt dan ook de beste manier om na te gaan hoe het zich gedraagt en of dat in overeenstemming met de werkelijkheid is.

Voor verstoringen op een iets kortere tijdschaal, zodanig dat de quasi-evenwichtsrelatie niet meer geldig is, is een aantal van de in het voorgaande gedane veronderstellingen niet meer te handhaven:

- de dynamiek van het dwarsprofiel in de aangrenzende kustvakken kan niet langer buiten beschouwing blijven; het systeem komt er voor wat betreft deze vakken dus meer uit te zien als in Figuur 3.
- onder handhaving van het concept van de actieve zônes langs de geulen als "doorgeefluik" van de kustvakken naar het zeegat, zal de verstoring op het transport vanuit de kustvakken naar het zeegat nu toch waarschijnlijk afhankelijk gemaakt moeten worden van de verstoring op de ligging van de actieve zône in het kustvak.
- de verstoring op het golf/getij-geïnduceerde transport tussen de kustvakken en de buitendelta is gerelateerd aan de verstoring in de positie van de buitendelta ten opzichte van het L-vak van het aangrenzende kustvak.
- de dwarstransporten vanuit de actieve zônes langs de geulen kunnen niet langer worden ondergebracht bij andere elementen; zij moeten worden gekwantificeerd en meegenomen in het systeem.

De overige veronderstellingen, t.a.v. het autonome karakter van T_{VL}^H , L_{LC} en T_{LV}^T en t.a.v. de verwaarlozing van de duinwaartse transporten D_{UD}^Z en D_{UD}^N , worden ook voor de verstoringen op deze grootheden gehandhaafd (+ verstoringen gelijk aan nul).

Het systeem in de termen van "snelle" verstoringen wordt dan gebaseerd op de volgende relaties (zie ook Figuur D.8):

(1') Golf/getij-gedreven transportrelaties

$$\delta L_{LG}^{HB} = - G_{LG}^{HB} \left[\frac{\delta V_{bd}}{h_{bd} B_{bd}} - \frac{1}{2} \frac{\delta V_L^H}{h_k B_k^H} + \frac{1}{2} \frac{\delta V_L^T}{h_k B_k^T} \right] \quad (D.17)$$

$$\delta L_{LG}^{BT} = G_{LG}^{BT} \left[\frac{\delta F_{bd}}{h_{bd} B_{bd}} + \frac{1}{2} \frac{\delta V_L^H}{h_k B_k^H} - \frac{1}{2} \frac{\delta V_L^T}{h_k B_k^T} \right] \quad (D.18)$$

(2') Sedimentbalansen en transportrelaties kustvakken

Voor zover ze afwijken van de relaties voor de gesloten kust, worden deze

$$\frac{d(\delta V_L^H)}{dt} = - \delta L_{LG}^{HB} + \delta D_{uL}^Z + \dots \quad (D.19)$$

$$\frac{d(\delta V_u^H)}{dt} = - \delta L_u^{HZ} + \dots = - G_u^{HZ} \frac{\delta V_u^H}{h_u B_k^H} + \dots \quad (D.20)$$

$$\frac{d(\delta V_L^T)}{dt} = \delta L_{LG}^{BT} + \dots \quad (D.21)$$

$$\frac{d(\delta L_u^T)}{dt} = + \delta L_u^{TN} + \dots = - G_u^{TN} \frac{\delta V_u^T}{h_u B_k^T} + \dots \quad (D.22)$$

(2'') Sedimentbalans actieve zônes naast de geulen

$$0 = \delta L_u^{HZ} - \delta D_{uL}^Z - \delta D_{uv}^Z - \delta L_{uv}^Z \quad (D.23)$$

$$0 = - \delta L_u^{TN} - \delta D_{uv}^N + \delta L_{uv}^N \quad (D.24)$$

$$\text{zodat: } \delta D_{uL}^Z + \delta D_{uv}^Z + \delta L_{uv}^Z = + G_u^Z \frac{\delta V_u^H}{h_u B_k^H} \quad (D.25)$$

$$\delta D_{uv}^N - \delta L_{uv}^N = + G_u^{TN} \frac{\delta V_u^T}{h_u B_k^T} \quad (D.26)$$

(3') Sedimentbalans buitendelta

$$\frac{d(\delta V_{bd})}{dt} + \frac{1}{2} \frac{B_{bd} h_{bd}}{B_k^H h_L} \frac{d(\delta V_L^H)}{dt} + \frac{1}{2} \frac{B_{bd} h_{bd}}{B_k^T h_L} \frac{d(\delta V_L^T)}{dt} = \delta L_{LG}^{HB} - \delta L_{LG}^{BT} + \delta T_{vb} \quad (D.27)$$

(4') Sedimentbalans vloedkom

$$\frac{d(\delta I_{MSL})}{dt} = \delta T_{vb} - \delta L_{uv}^Z - \delta D_{uv}^Z + \delta L_{uv}^N - \delta D_{uv}^N \quad (D.28)$$

(5') Dynamicsh gedrag vloedkom (zie TR-5/1 en par. 4.5.2):

$$\frac{d(\delta I_{MSL})}{dt} + \frac{\delta I_{MSL}}{\tau_h} = 0 \quad (D.29)$$

(5'') Empirische evenwichtsrelatie inhoud vloedkom vs. vloedvolume (zie TR-5/1):

$$I_{MSL}^{(e)} = C_{vk} V^{3/2} \quad (D.30)$$

(6) Dwarstransport naar de geulen:

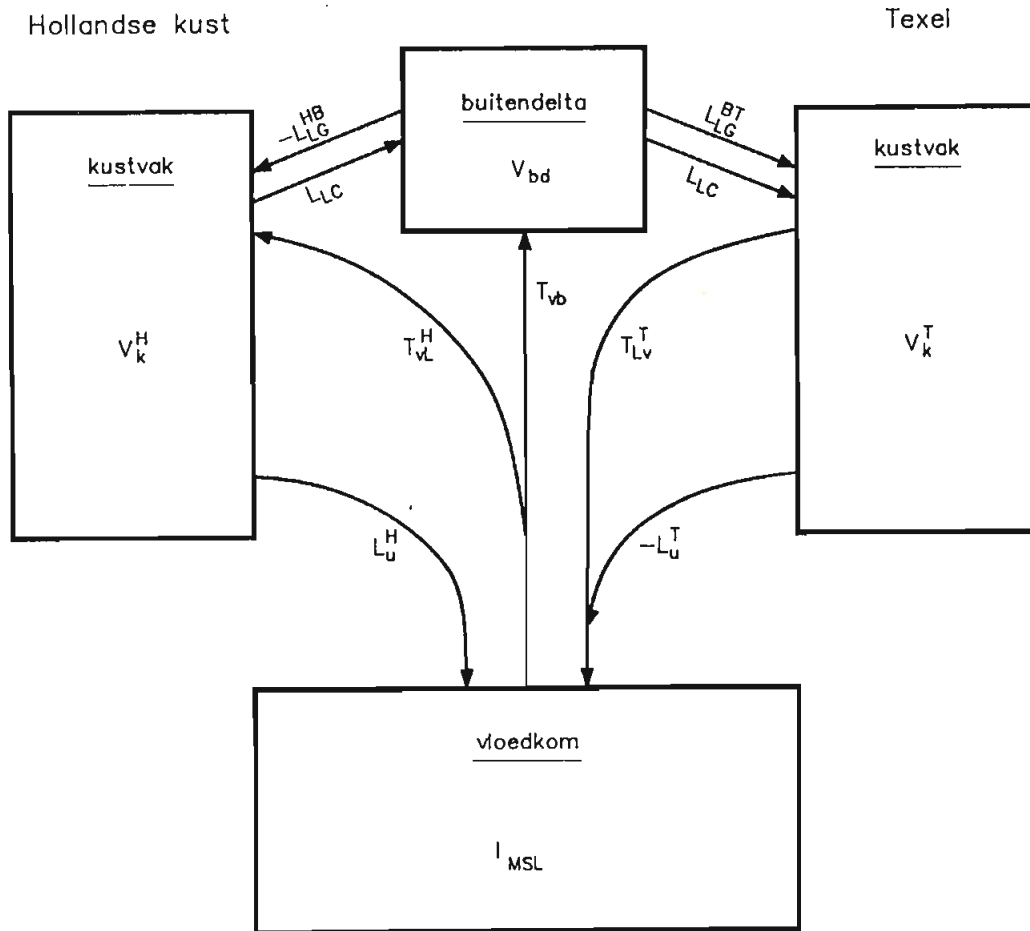
$$\delta D_{uL}^Z = p_L^Z \delta L_u^{HZ}; \delta D_{uv}^Z = p_V^Z \delta L_u^{HZ} + \delta L_{uv}^Z = (1 - p_L^Z - p_V^Z) \delta L_u^{HZ} \quad (D.31)$$

$$\delta D_{uv}^N = - p_V^N \delta L_u^{TN}; + \delta L_{uv}^N = (1 - p_V^N) \delta L_u^{TN} \quad (D.32)$$

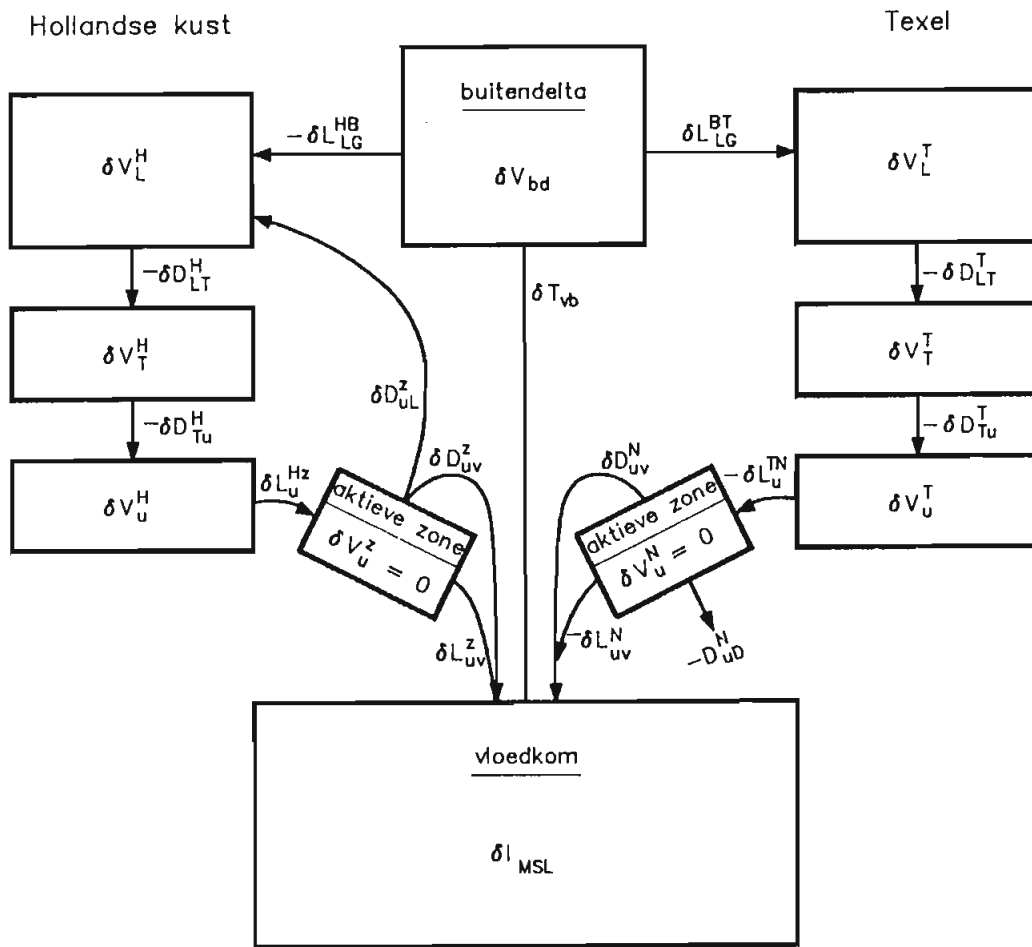
waarin de fracties p_L^Z , p_V^Z en p_V^N gegeven moeten worden.

Hiermee is het aantal extra relaties (t.o.v. de gesloten kust) even groot als het aantal extra onbekenden en is het systeem volledig bepaald.

De orde van het systeem is op het eerste gezicht 8, maar wellicht is het op te splitsen in eenvoudiger delen met een onderling zwakke koppeling (de relatiematrix is verre van vol). In elk geval is het systeem te ingewikkeld om te analyseren op de in Bijlage B uitgewerkte manier. Ook hier is de meest voor de hand liggende aanpak: bouwen en spelenderwijs onderzoeken hoe het werkt en of dat overeenkomt met de realiteit.



Figuur D.1



Figuur D.2

BIJLAGE E

Invloed zeespiegelrijzing op de gesloten kust

Uitgaande van de aannamen genoemd in par. 4.5.1., echter met een verandering in de L-zône ten gevolge van sedimentuitwisseling met de T-zône, wordt de invloed van zeespiegelrijzing op een langsrichting uniforme, aanvankelijk in evenwicht verkerende kust beschreven door het stelsel:

$$\frac{d(\Delta V_U)}{dt} = -D_{TU} + B h_U c_p \quad (E.1)$$

$$\frac{d(\Delta V_T)}{dt} = D_{TU} - D_{LT} + \frac{1}{2} B h_{T_{ev}}^{(o)} c_p + B x_{T_{ev}}^{(o)} \frac{dMSL}{dt} \quad (E.2)$$

$$\frac{d(\Delta V_L)}{dt} = D_{LT} - D_B^A \quad (E.3)$$

$$D_{TU} = G_{TU} (\alpha_{TU} \Delta V_U + \beta_{TU} \Delta V_L) + D_{TU}^A \quad (E.4)$$

$$D_{LT} = G_{LT} (\alpha_{LT} \Delta V_U + \beta_{LT} \Delta V_L) + D_{LT}^A \quad (E.5)$$

De sedimentbalans voor het hele profiel vereist, dat op elk moment $\Delta V_U + \Delta V_T + \Delta V_L = 0$, zodat:

$$c_p = \frac{1}{h_U + \frac{1}{2} h_{T_{ev}}^{(o)}} \left[\frac{D_B^A}{B} - x_{T_{ev}}^{(o)} \frac{dMSL}{dt} \right] \quad (E.6)$$

Herleid tot een differentiaalvergelijking in ΔV_U , wordt dit stelsel (zie ook Bijlage B):

$$\begin{aligned} \frac{d^2(\Delta V_U)}{dt^2} + (G_{TU} \alpha_{TU} - G_{LT} \beta_{LT}) \frac{d(\Delta V_U)}{dt} + (G_{TU} \beta_{TU} G_{LT} \alpha_{LT} - \\ - G_{TU} \alpha_{TU} G_{LT} \beta_{LT}) \Delta V_U = \frac{B h_U}{h_U + \frac{1}{2} h_{T_{ev}}^{(o)}} \left(- x_{T_{ev}}^{(o)} \frac{d^2MSL}{dt^2} - \right. \\ \left. G_{LT} \beta_{LT} \left[\frac{D_B^A}{B} - x_{T_{ev}}^{(o)} \frac{dMSL}{dt} \right] + G_{LT} \beta_{LT} D_{TU}^A + G_{TU} \beta_{TU} D_B^A \right) \quad (E.7) \end{aligned}$$

In Bijlage B is al aangetoond, dat het inherente gedrag van dit stelsel altijd dempend is. Zo zal een initiële verstoring altijd uitgedempt worden als er geen externe forcering is. In dit geval is die externe forcering er wel, maar deze is konstant of monotoon toenemend (in absolute waarde) en zal derhalve geen aanleiding geven tot een wezenlijk ander gedrag (slingeringen, bijvoorbeeld).

In het geval van een konstante forcering (dus: konstante snelheid van zeespiegelrijzing), is de oplossing van (E.7) te schrijven als:

$$\begin{aligned} \Delta V_U = (\Delta V_U)_\infty \left[1 + \frac{1}{2} \tau_2 e^{-t/\tau_1} \left\{ \left(-\frac{1}{\tau_1} - \frac{1}{\tau_2} \right) e^{t/\tau_2} - \left(-\frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} \right) e^{-t/\tau_2} \right\} \right] + \\ \left\{ \frac{d(\Delta V_U)}{dt} \right\}_{t=0} \frac{1}{2} \tau_2 e^{-t/\tau_1} \left(e^{t/\tau_2} - e^{-t/\tau_2} \right) \quad (E.8) \end{aligned}$$

$$\text{waarin: } (\Delta V_u)_\infty = \frac{-G_{LT} \beta_{LT} (B h_U c_p - D_{TU}^A) + G_{TU} \beta_{TU} D_B^A}{G_{TU} \beta_{TU} G_{LT} \alpha_{LT} - G_{TU} \alpha_{TU} G_{LT} \beta_{LT}} \quad (\text{E.9})$$

$$\left\{ \frac{d(\Delta V_u)}{dt} \right\}_{t=0} = B h_U c_p - D_{TU}^A \quad (\text{E.10})$$

$$\tau_1 = \frac{2}{G_{TU} \alpha_{TU} - G_{LT} \beta_{LT}} \quad (\text{E.11})$$

$$\tau_2 = \frac{2}{\{(G_{TU} \alpha_{TU} + G_{LT} \beta_{LT})^2 - 4 G_{TU} \beta_{TU} G_{LT} \alpha_{LT}\}^{1/2}} \quad (\text{E.12})$$

Het systeem streeft dus naar een evenwichtstoestand, $(\Delta V_u)_\infty$, die voor $D_{TU}^A = D_B^A = 0$ $G_{LT} + 0$ (geen transport tussen L- en T-zône) overeenkomt met (4.34). Verder is duidelijk, dat de tijdschalen in het proces bepaald worden door de evenredigheidsfactoren in de transportrelaties.

-S. 9-

BIJLAGE F

Modellering getij-effect in kleinschalig verstoringsmodel

Gezien de vele onzekerheden elders in het model wordt hier een pragmatische aanpak gekozen; doel is het schatten van de orde van grootte van de diffusiecoëfficiënten samenhangend met de verspreiding van verstoringen in dwarsrichting.

Evenals de diffusie coëfficiënten in dwarsrichting, worden deze geschat uit het waargenomen gedrag van numerieke modellen, in dit geval het model LOMOR, zoals beschreven in TR-10. De simulaties hierin beschreven wijzen op een verspreiding van een diepte-verstoring met een (gedeeltelijk) diffusie-achtig karakter, convectie-termen (verplaatsing van het zwaartepunt van een kuil) verwaarlozen we hier voorlopig. Het uitgangspunt bij de berekeningen in TR-10 is steeds een blokfunctie-achtige verstoring geweest. De theoretische vervorming van een blok-achtige verstoring ten gevolge van een diffusieproces wordt gegeven door:

$$\frac{y}{y_0} = \frac{1}{2} \left\{ \operatorname{erf} \left[L_* \left(\frac{1}{2} - \frac{x}{L} \right) \right] + \operatorname{erf} \left[L_* \left(\frac{1}{2} + \frac{x}{L} \right) \right] \right\} \quad (\text{F.1})$$

waarin y = uitwijking
 y_0 = initiële uitwijking
 L = lengte verstoring
 x = plaats t.o.v. midden verstoring
 L_* = $L/\sqrt{4D \cdot t}$ = dimensieloze verstoringlengte
 D = diffusiecoëfficiënt
 t = tijd

Dit betekent, dat de vorm van y/y_0 als functie van $\frac{x}{L}$ uitsluitend afhangt van de dimensieloze verstoringlengte L_* (zie figuur F.1).

We kunnen vanuit de simulatieresultaten van TR.10 de waarde van de diffusiecoëfficiënt schatten, door de vorm van een kuil na 40 jaar te vergelijken met figuur F.1; hieruit kan dan redelijk nauwkeurig de waarde van L_* na 40 jaar worden geschat. De diffusiecoëfficiënt D volgt dan uit:

$$D = \frac{L^2}{4tL_*^2} \quad (\text{F.2})$$

waarin: L = lengte kuil,
 t = 40 jaar.

Uit TR-10 volgen nu de volgende waarden:

test	t (jaar)	L_* (-)	L (m)	D (m ² /jaar)
10.2	40	4	2000	1600
16.2	40	5	2000	1000
16.3	40	4	2000	1600
16.4	40	12	5000	1100
20.1	40	5	2000	1000
20.2	40	15	5000	700

Tabel F.1 Uit TR-10 bepaalde diffusiecoëfficiënten

Voor de benedenste zône van -12 m tot -8 m kunnen we ongeveer aanhouden:

$$D = 1600 \text{ m}^2/\text{jaar}$$

Deze zal iets hoger liggen voor de zône van -8 m tot -3 m, hoewel niet spectaculair veel. Enig inzicht hierin verschaffen de transporttrozen uit deelrapport 4 van het project kustvoorspelling fase 3 (zie figuren 4, 5, 8, 9, 12, 13, 17 en 18 aldaar). Gezien het feit, dat het diffusie-proces vooral afhangt van de amplitude van het getijdgedreven transport, volgt uit deze figuren, dat de waarde van D hooguit een factor 2 hoger wordt. Een redelijke schatting voor de zone van -8 m tot -3 m blijkt dan:

$$D = 2500 \text{ m}^2/\text{jaar}$$

De overdrachtscoëfficiënten G_4^k en G_3^k worden bepaald door de D-waarden te vermenigvuldigen met de vakhogte; er volgt dan:

$$G_4^k = 6.400 \text{ m}^3/\text{jaar}$$

$$G_3^k = 12.500 \text{ m}^3/\text{jaar}$$

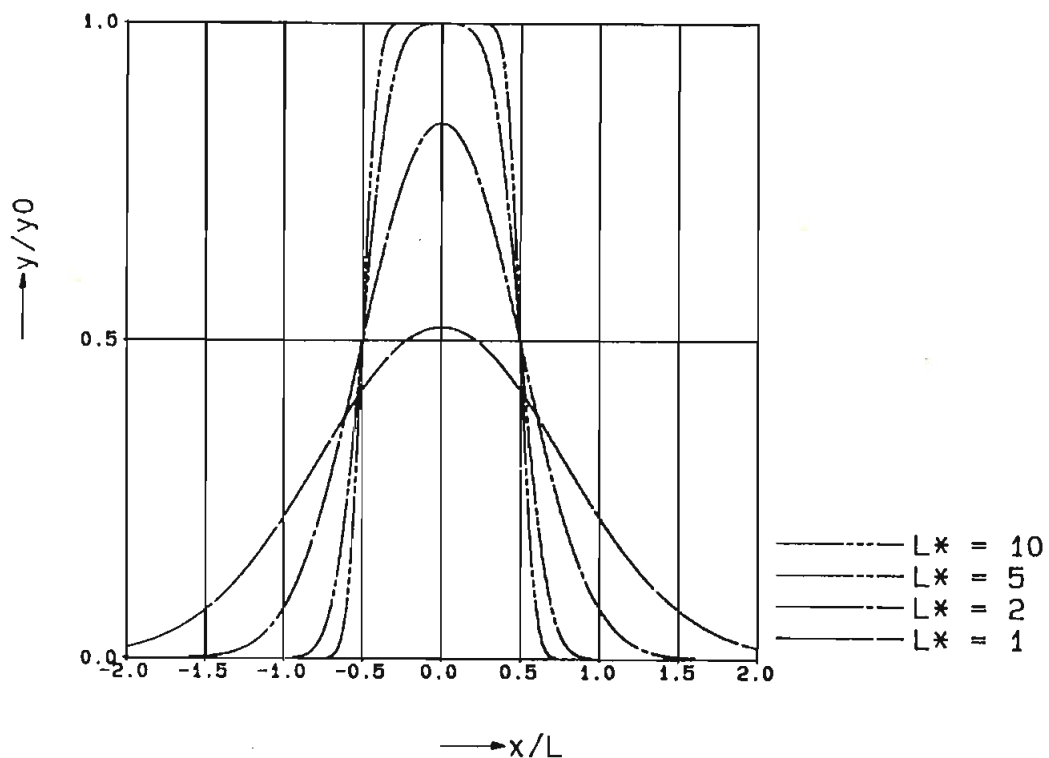


Fig. F.1 Verloop van y/y_0 als functie van h/L voor verschillende waarden van L^*

BIJLAGE G

Dwarstransport tussen hoog-actieve zône en duinfront

Dwarstransport tussen de hoog-actieve zône en het duinfront vindt enerzijds plaats door windtransport, anderzijds door duinafslag. Is een kustvak over langere tijd gemiddeld in evenwicht, dan houden deze termen elkaar gemiddeld in evenwicht.

Een belangrijke parameter in dit evenwicht is de strandbreedte; is het strand relatief breed, dan kan enerzijds meer transport door wind plaatsvinden en neemt anderzijds de kans op duinafslag af. Is het strand smaller, dan neemt de kans op duinafslag toe en neemt het windtransport af.

Het is dus te verwachten, dat er een relatie bestaat tussen de verplaatsingssnelheid van het duinfront en de strandbreedte. Daarnaast is te verwachten, dat het duinfront sneller reageert op het smaller worden van een strand dan op het breder worden, aangezien duinafslag een veel sneller proces is dan transport door wind.

Empirische gegevens over deze processen kunnen we halen uit langjarige meetreeksen van de ligging van de LW, HW en DV-lijnen langs de Hollandse kust. Nemen we als maat voor de strandbreedte de afstand tussen DV en LW en nemen we als maat voor de ligging van het duinfront de DV-lijn, dan kunnen we door de relatie tussen deze parameters te onderzoeken, een beeld krijgen van het dwarstransport tussen de hoog-actieve zône en het duinfront.

In figuur G.1 zijn het verloop van DV-LW en de trend in de DV-lijn, gemiddeld over 130 jaar, langs de Hollandse kust uitgezet. Het ruimtelijke verloop van beide parameters komt goed overeen; strandbreedte en trend in de duinvoetlijn zijn inderdaad sterk aan elkaar gerelateerd.

De 'evenwichtsstrandbreedte', de strandbreedte waarbij de DV-lijn gemiddeld stabiel is, is ongeveer 115 m.

In figuur G.2 is de trend in de DV-lijn uitgezet tegen de strandbreedte, gedefinieerd als de afstand tussen LW en DV. Er lijkt duidelijk een knik op te treden ter plaatse van de evenwichtsstrandbreedte, waaruit blijkt, dat het duinfront inderdaad sneller reageert op een versmalling van het strand dan op een verbreding.

In de buurt van de evenwichtsstrandbreedte kan het verband tussen de genoemde parameters ruw worden benaderd door de gestreepte lijnen.

In formulevorm:

$$\frac{\partial DV}{\partial t} \approx 0.024 (DV-LW - 115), \quad DV-LW > 115$$

$$\frac{\partial DV}{\partial t} \approx 0.13 (DV-LW - 115), \quad DV-LW \leq 115$$

Nemen we het duinfront vormvast aan, en stellen we dat de hoog-actieve zône ongeveer gekarakteriseerd wordt door de LW-lijn, dan geldt t.o.v. evenwicht:

$$\frac{\partial x_1^k}{\partial t} \approx 0.024 (x_2^k - x_1^k), \quad x_2^k - x_1^k > 0$$

$$\frac{\partial x_1^k}{\partial t} \approx 0.13 (x_2^k - x_1^k), \quad x_2^k - x_1^k \leq 0$$

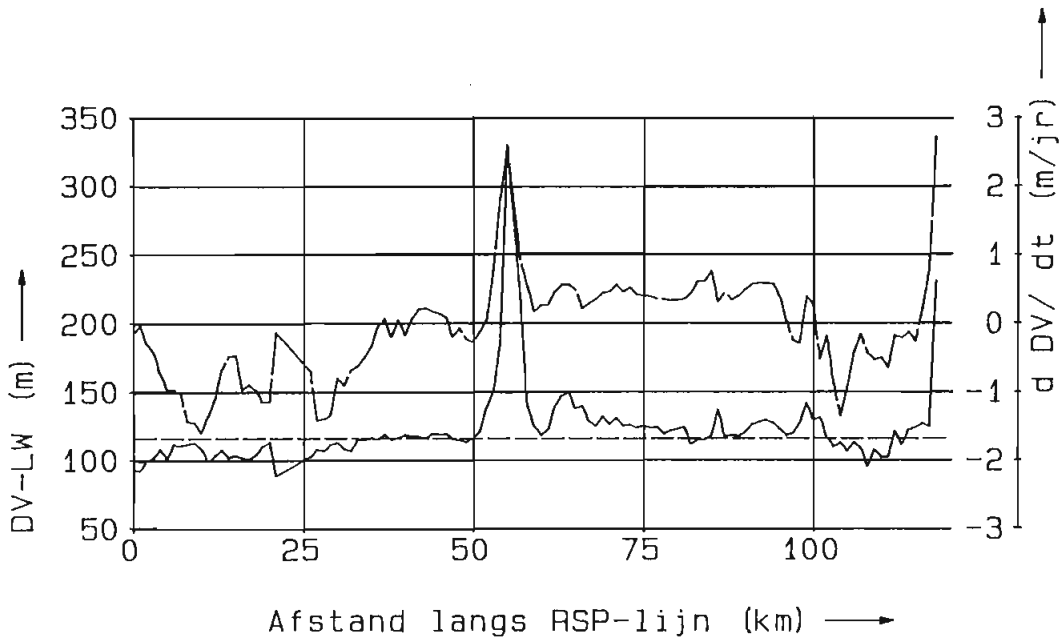
Het dwarstransport D_{12}^k wordt nu beschreven door:

$$D_{12}^k = \Delta z_1 \frac{\partial x_1^k}{\partial t} = 0.024 \Delta z_1 \Delta z_{12} \frac{(x_2^k - x_1^k)}{\Delta z_{12}}, \quad x_2^k - x_1^k > 0$$

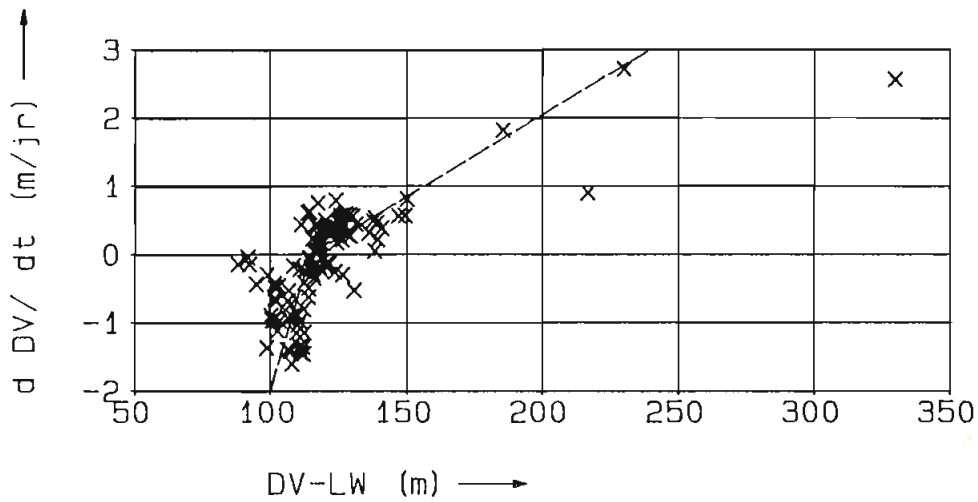
$$D_{12}^k = \Delta z_1 \frac{\partial x_1^k}{\partial t} = 0.13 \Delta z_1 \Delta z_{12} \frac{(x_2^k - x_1^k)}{\Delta z_{12}}, \quad x_2^k - x_1^k \leq 0$$

Voor de overdrachtscoefficient G_{12}^k geldt dus, met $\Delta z_1 = 10$ m en $\Delta z_{12} = 8$ m:

$$G_{12}^k = \begin{array}{l} 2 \text{ m}^2/\text{jr}, \quad x_2^k - x_1^k > 0 \\ 10 \text{ m}^2/\text{jr}, \quad x_2^k - x_1^k \leq 0 \end{array}$$



Figuur G.1 Verdeling strandbreedte (DV-LW) en trend in ligging DV-lijn gemiddeld over 130 jaar, langs de Hollandse kust



Figuur G.2 Trend in duinvoetlijn uitgezet tegen gemiddelde strandbreedte (DV-LW). Streepjeslijn: benadering in de buurt van 'evenwichts'-strandbreedte

BIJLAGE H

Schatting overdrachtscoëfficiënten G_{34} en G_{23} uit CROSTRAN-simulaties

De overdachtscoëfficiënten in G_{34} en G_{23} t.g.v. dwarstransport worden (ruw) geschat uit simulatieresultaten met CROSTRAN t.b.v. TR-14.

Beschikbaar zijn simulaties met en zonder suppletie op resp. 5 m en 7 m waterdiepte; beide dus in zône 3.

Door horizontaal te kuberen kunnen we in eerste instantie verschilvolumina uitrekenen tussen de situatie op zeker tijdstip, met en zonder één van de suppleties, over de zônes 2, 3 en 4. De resultaten zijn gegeven in tabel H.1.

De 'verschil-dwarstransporten' D_{23} en D_{34} kunnen worden berekend uit de toename van zônes 2 en 4. De waarden van x_2 , x_3 en x_4 volgen door de verschilvolumina te delen door de strookhoogten. Uit deze gegevens kunnen dan op verschillende tijdstippen schattingen worden gemaakt van de overdrachtscoëfficiënten; zie tabel H.2.

De (grote) variatie in de zo berekende overdrachtscoëfficiënten wordt verklaard door de onregelmatige verdeling van de verstoringen over zône 3; daarnaast speelt het optreden van banken een verstorende rol. Tenslotte is het benaderde model nogal grof, zodat geen grote nauwkeurigheid te verwachten is. Aangezien we in een ruwe schatting van G_{34} en G_{23} geïnteresseerd zijn, wordt een simpele indeling toegepast en vinden we waarden van respectievelijk ongeveer 1 en 5 m²/jr.

Suppletie 7 m

t(jr)	V ₄ (m ²)	V ₃ (m ²)	V ₂ (m ²)
0	0	100	0
1	1.1	87.6	5.5
2	4.0	79.6	16.4
3	7.6	73.1	19.3
4	11.3	68.0	21.7
5	15.0	62.2	22.8

Suppletie 5 m

t(jr)	V ₄ (m ²)	V ₃ (m ²)	V ₂ (m ²)
0	0	100	0
1	.1	72	28
2	.3	66	34
3	1.0	63	36
4	2.4	61	37
5	4.8	58	37

Tabel H.1 Verschilvolumina stroken 2, 3 en 4 na 0-5 jaar (CROSTRAN-simulatie)

t	$\frac{x_3' - x_4'}{4.5 \text{ m}}$ (-)	D ₃₄ (m ² /jr)	G ₃₄ (m ² /jr)	$\frac{x_2' - x_3'}{4 \text{ m}}$ (-)	D ₂₃ (m ² /jr)	G ₂₃ (m ² /jr)
0.5	4	1.1	.3	4.3	5.5	1.3
1.5	3.6	2.9	.8	3.0	10.9	3.6
2.5	2.9	3.6	1.2	2.0	2.9	1.5
3.5	2.4	3.7	1.5	1.8	2.4	1.3
4.5	2	3.7	1.9	1.5	1.1	0.7
0.5	3.8	.1	0.	3.0	28	9.3
1.5	2.9	.2	.1	0.8	6	7.5
2.5	2.9	.7	.2	0.4	2	5
3.5	2.7	1.4	.5	0.1	1	10
4.5	2.4	2.4	1.	0	0	
gemiddeld			0.8			4.5
afgerond			1			5

Tabel H.2 Bepaling overdrachtscoëfficiënten G₃₄ en G₂₃