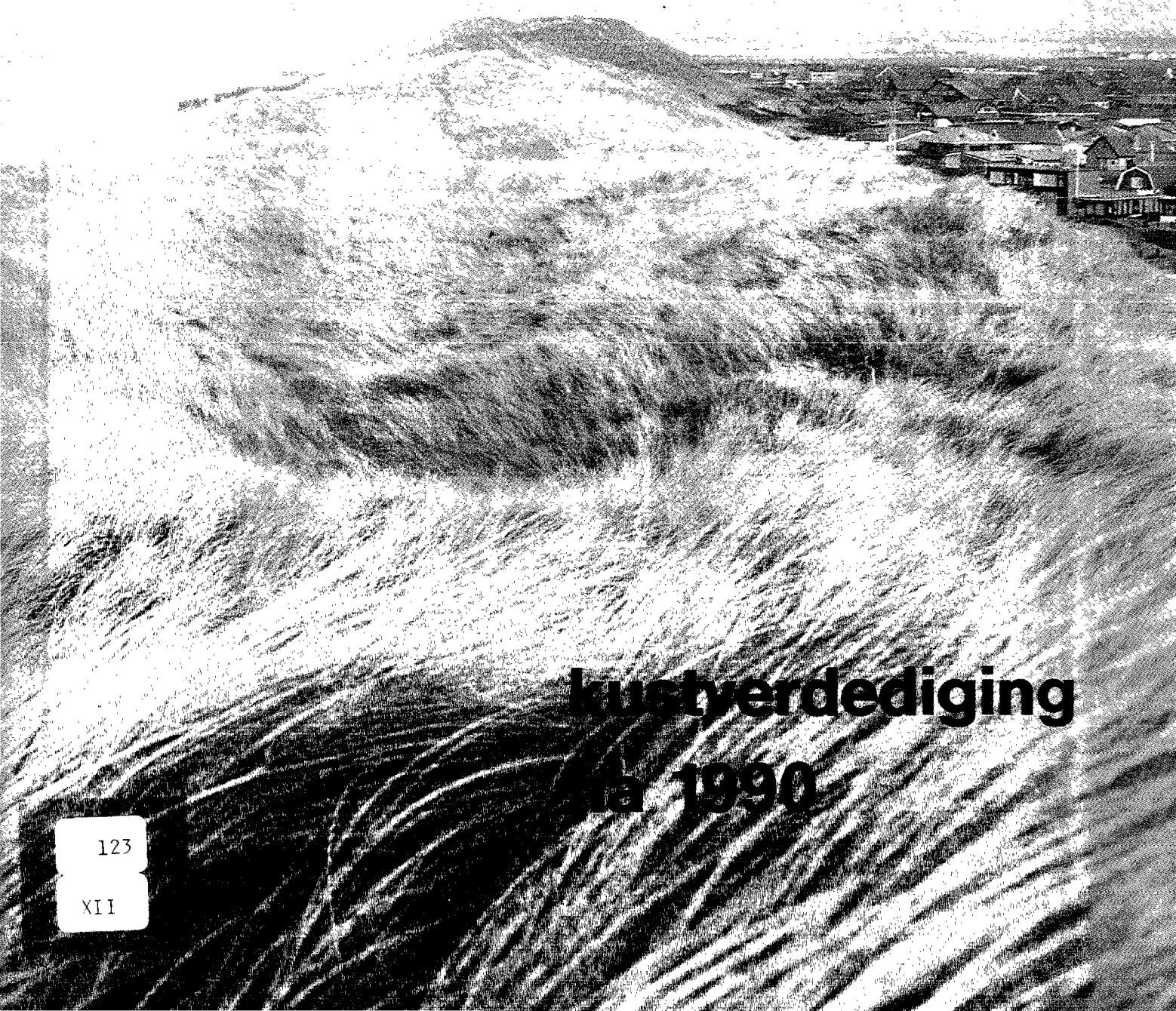


RIJKSWATERSTAAT
Directie Verkeer en Waterstaat, afdeling
Rijksbuis 5044, 2015 CA, ROTTERDAM
Tel. 015-809111

technisch rapport 12 strandhoofden en paalrijen



kustverdediging in 1990

9.5-123
XII

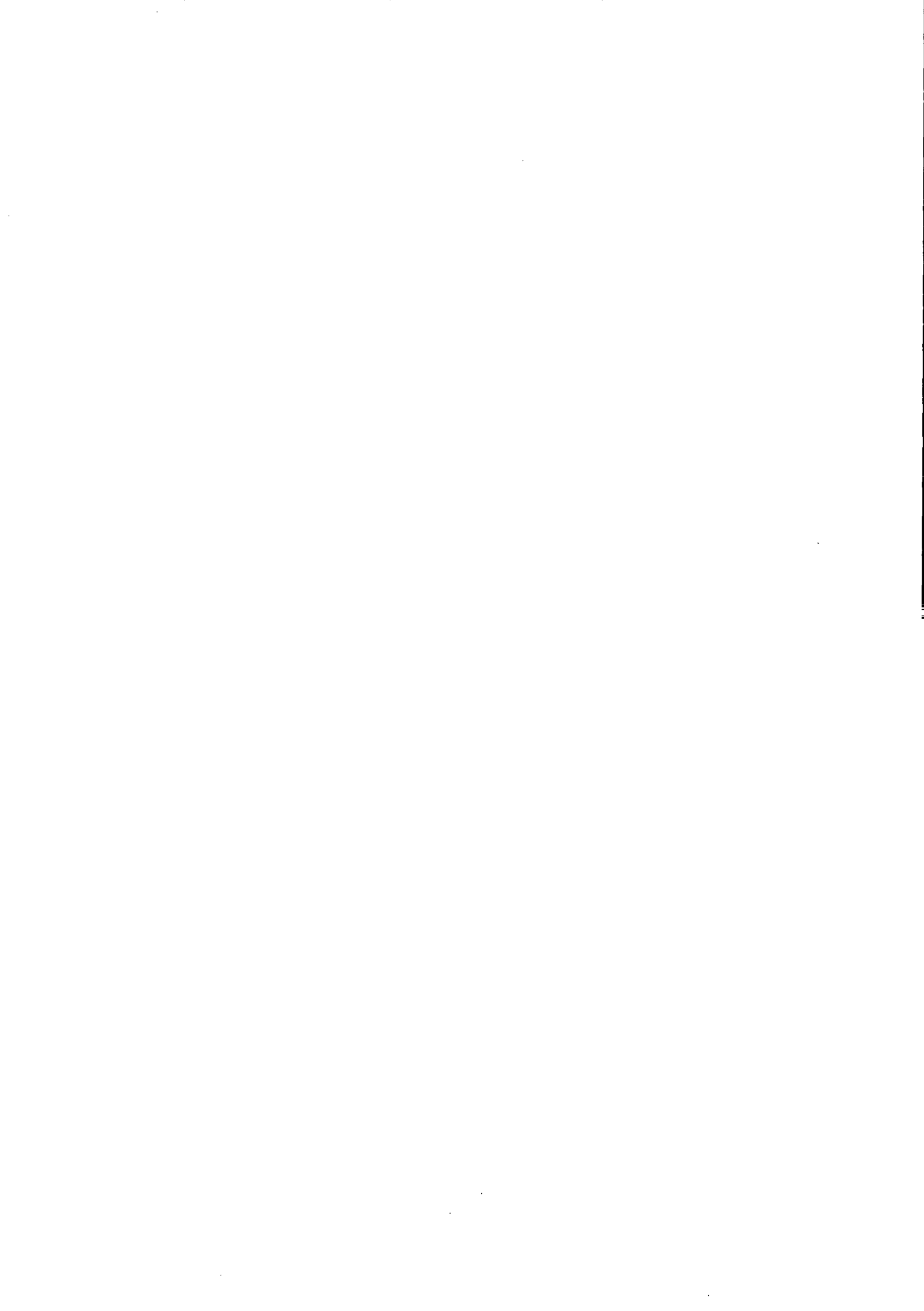
BIBLIOTHEEK
Dienst Weg- en Waterbouwkunde
Postbus 5044, 2600 GA DELFT
Tel. 015-639111

**Technisch Rapport nr 12
strandhoofden en paalrijen
evaluatie van hun werking**

opgesteld door: ir. H.J. Verhagen
Dienst Weg- en Waterbouwkunde

m.m.v. ir. H. van Rossum
Ingenieursbureau Svasek

INHOUDSOPGAVE	BLZ.
KADER VOOR DIT RAPPORT	5
SAMENVATTING EN CONCLUSIES	7
1 INLEIDING	9
2 THEORETISCHE ACHTERGROND	10
2.1 De processen	10
2.2 Berekeningsmethoden	12
3 ANALYSE PROTOTYPEGEGEVENS	14
3.1 Verschillende processen	14
3.2 Beschikbare gegevens	16
3.3 Lijzijde erosie	17
3.4 Zandgolven	17
3.5 Andere constructies	18
3.6 Combinaties	18
4 ERVARINGEN MET STRANDHOOFDEN	20
4.1 Inleiding	20
4.2 Vlieland	20
4.3 Texel	22
4.4 Noord-Holland	23
4.5 Delfland	25
4.6 Schouwen	27
4.7 Walcheren	29
4.8 Zeeuws-Vlaanderen	31
4.9 Overzicht van de kans op werking	32
5 ERVARINGEN MET PAALSCHERMEN	34
6 BRANDINGSRUGGEN EN STRANDHOOFDEN	34
7 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	37
Literatuuroverzicht	39



HET KADER VAN DIT RAPPORT

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

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

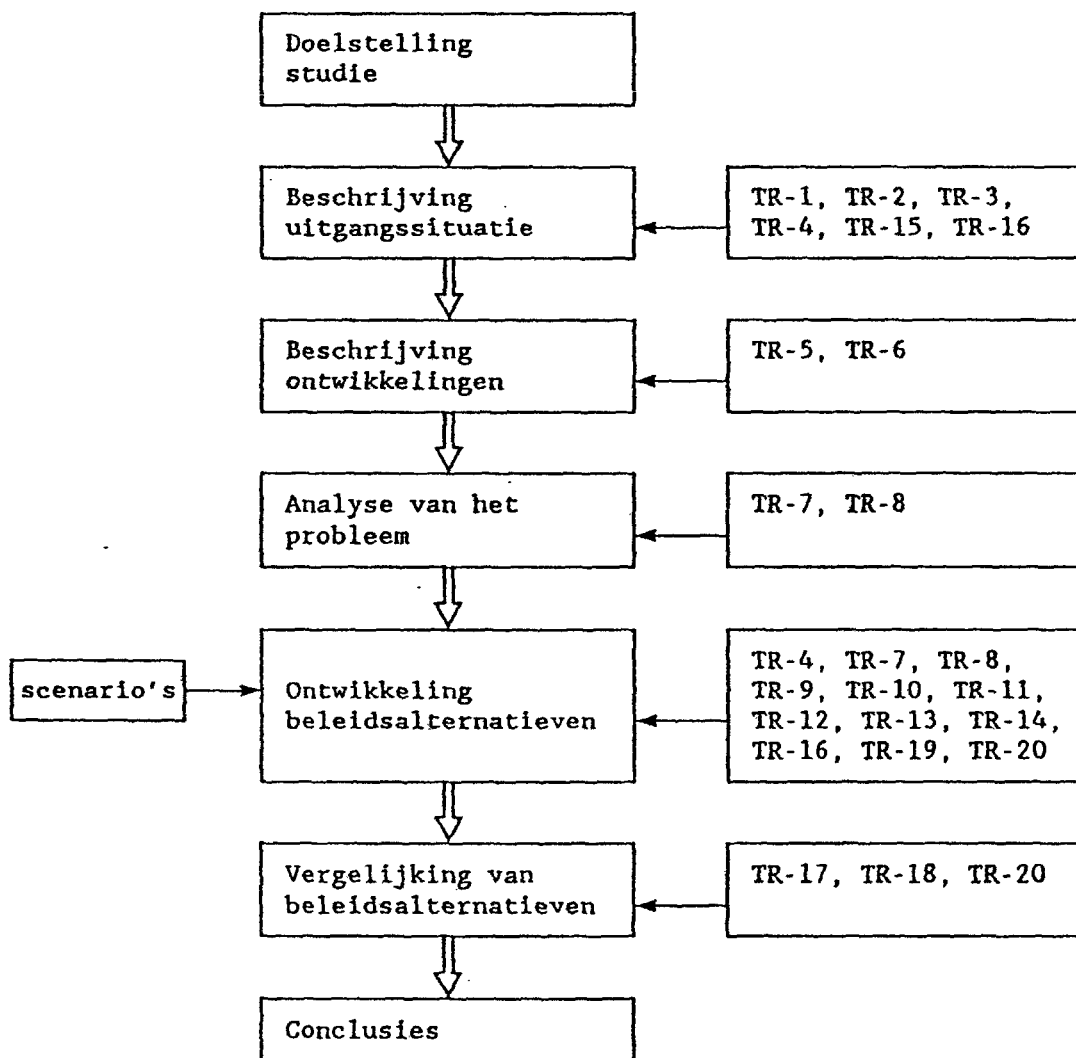
Het onderhavige rapport bevat de technische onderbouwing van een van de aspecten van de beleidsanalytische studie.

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

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

- TR-17 Systeemanalytisch model
 beschrijving computermodel.
- TR-18 Berekeningsresultaten beleidsalternatieven
 detailresultaten van computermodel.
- TR-19 Innovatie van kustverdediging
 inspelen op het kuststelsel.
- TR-20 Zeewaartse kustverdediging
 een globale analyse van enkele mogelijkheden.

De onderbouwende studies bestrijken het brede scala van onderwerpen die met de beleidsanalyse 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 EN CONCLUSIES

Langs de Nederlandse kust zijn in de loop der eeuwen een groot aantal strandhoofden en (na 1965) een kleiner aantal paalschermen gebouwd. Het doel van deze hoofden is het verminderen van de kusterosie. Hoofden zijn, naast de bouw van zeedijken, lange tijd het enige middel geweest om iets aan kustverdediging te doen. Veel hoofden zijn gepland en gebouwd op basis van ervaring en evaluaties van het kustgedrag over een relatief korte periode.

De theoretische concepten, die de laatste 20 jaar ontwikkeld zijn, hebben geen afdoende kwantitatieve beschrijving kunnen geven van de werking van strandhoofden op de lange termijn.

Door een analyse uit te voeren van de werking van de strandhoofden langs de Nederlandse kust, wordt in dit rapport getracht een uitspraak te doen over het nut van de bestaande hoofdenstelsels en over de vraag of het zinvol is nieuwe hoofdenstelsels te bouwen.

Geconstateerd wordt dat hoofden op twee verschillende manieren invloed kunnen hebben op het kustgedrag, nl. via een beïnvloeding van het door golven aangedreven brandingsstroomtransport en door een beïnvloeding van de aanval van de getijstroom op de kust. In dit laatste geval is de werking van een strandhoofd te vergelijken met die van een rivierkrib.

Uit de analyse is gebleken dat op die plaatsen waar strandhoofden de getijstroom van de kust afhouden (dus als krib werken), zij over het algemeen goed tot zeer goed functioneren. Dit zijn vrij kostbare hoofden, omdat door de stroming contractiekuilen voor de koppen van de hoofden ontstaan, die op hun beurt weer een zware kopbestorting van het hoofd vereisen. Het handhaven van deze hoofden is noodzakelijk. Afbreken zal automatisch tot kusterosie gaan leiden.

Op plaatsen waar strandhoofden als brandingsstroom remmers werken, is hun werking minder duidelijk aan te tonen. In die gevallen waar de resulterende brandingsstroom klein is (bijv. door golfval uit vele verschillende richtingen) blijken strandhoofden nauwelijks te functioneren in het tegengaan van doorgaande erosie. De indruk bestaat dat door de bouw van deze hoofden het strand en de onderwateroever iets steiler is gaan staan. Afbraak van deze hoofden leidt wellicht tot verflauwing van de kust, en dientengevolge tot tijdelijke erosie. Bij de meeste kustvakken waar dit soort hoofden liggen is een dergelijke tijdelijke erosie niet toelaatbaar; afbraak van hoofden mag dus alleen plaatsvinden na een zeer gedegen studie over de morfologische gevolgen van het verwijderen van de hoofden.

In die gevallen waar duidelijk wel een overheersende golfrichting is, blijken strandhoofden de doorgaande erosie (met name boven de laagwaterlijn) te verminderen. Dit leidt wel altijd tot grote lijerosie, die bestreden kan worden door de bouw van nog meer hoofden. In deze gevallen is het doel wel min of meer bereikt. De kosten zijn echter zeer hoog, door de noodzaak om "lijerosiehoofden" te bouwen. Afbraak van deze hoofden moet afgeraden worden, omdat de kust zich inmiddels aan de nieuwe situatie aangepast heeft (is een stuk steiler geworden). Hierdoor zal afbraak altijd leiden tot versterkte erosie.

Nieuwbouw van hoofden zal zelden in aanmerking komen. Nieuwbouw kan overwogen worden bij kustvakken met een sterke aanval door de getijstroom. De kustvakken waar een dergelijke aanval is, zijn echter overal al met hoofden verdedigd.

In geval van brandingsstroom kan de bouw van strandhoofden alleen overwogen worden in die gevallen waar een duidelijk overheersende golfrichting is. Het ligt echter in de rede dat voor die gevallen het alternatief (uitvoeren periodieke zandsuppletie) een goedkopere oplossing is, met name bij langere kustvakken.

Indien er geen overheersende golfrichting is, moet de bouw van strandhoofden worden afgeraden.

Een algemeen bezwaar van strandhoofden is, dat niet ingespeeld kan worden op de dynamiek van het kustgebied, zoals bijv. op het effect van voorbijtrekkende zandgolven.

De effectiviteit van paalschermen is zeer klein gebleken. Slechts in die gevallen waar een overheersende golfrichting is, blijken zij in staat te zijn om de gevolgen van lijerosie te beïnvloeden. De inscharring achter een harde verdediging wordt door het aanbrengen van paalschermen minder diep, maar zal zich over een grotere lengte uitstrekken. Aanleg van nieuwe paalschermen en instandhouding van bestaande schermen moeten derhalve met de nodige terughoudendheid beschouwd worden.

Nader onderzoek naar het functioneren van strandhoofden als zodanig wordt thans weinig zinvol geacht. Wel is het nodig kennis te verwerven t.a.v. het gedrag van hoofden in relatie tot suppleties. De verwachting is dat de levensduur van suppleties verlengd kan worden, met name op steile stranden, door de aanwezigheid van strandhoofden. Kwantitatieve inzichten hierover ontbreken nog, en kunnen door gericht onderzoek verworven worden.

1 INLEIDING

Langs de Nederlandse kust zijn een groot aantal strandhoofden en een kleiner aantal paalschermen gebouwd. Daarnast zijn, met name in Zeeland vaak combinaties toegepast, die de naam paalhoofd gekregen hebben. Dit zijn strandhoofden met daarop palen geplaatst, of paalschermen met daarnaast een steenbestorting. Paalhoofden worden in dit rapport niet afzonderlijk behandeld, maar als een technische variant van de strandhoofden gezien.

Het doel van deze hoofden is het verminderen van kusterosie. Lange tijd is dit het enige middel geweest om iets aan kustverdediging te doen. De effectiviteit van hoofden op lange termijn is nauwelijks onderwerp van studie geweest. Veel hoofden zijn gepland en gebouwd op basis van ervaring en van evaluatie van het kustgedrag over een korte periode.

In de laatste 20 jaar zijn enige theoretische concepten ontwikkeld over de werking van strandhoofden. Deze concepten gaan vrijwel allemaal uit van kusterosie t.g.v. een gradient in het langstransport, en dan vooral een gradient in het brandingsstroomtransport.

In dit rapport zullen de theoretische concepten vergeleken worden met de ervaringen in de laatste 150 jaar met strandhoofden, bovendien zullen de ervaringen ook statistisch geanalyseerd worden.

Aan de hand van deze analyse zal getracht worden een uitspraak te doen over het nut van de bestaande hoofdenstelsels langs de Nederlandse kust (moeten ze uitgebouwd worden, gehandhaafd worden of afgebroken worden) en of het zinvol is om nieuwe hoofdenstelsels te bouwen.

In dit rapport wordt niet ingegaan op de verschillen in de ondergrond. Door de geologische opbouw is de ondergrond in meer of mindere mate resistent tegen erosie. Bij de beoordeling van de hoofden moet hier altijd rekening mee gehouden worden. Dit is echter alleen mogelijk per locatie, zodat hier geen algemene conclusies uit te trekken zijn. Deze locatiespecifiekheid is reden geweest de geologie slechts marginaal bij de evaluatie te betrekken.

Dit rapport is opgesteld onder verantwoordelijkheid van de Dienst Wegen Waterbouwkunde van de Rijkswaterstaat door ir. H.J. Verhagen van deze dienst. Enig voorbereidend werk is verricht door ir. H. van Rossum van Ingenieursbureau Svasek. Een kwaliteitscontrole heeft plaatsgevonden door prof.dr. J. Terwindt van de Rijksuniversiteit Utrecht en door prof.dr.ir. E.W. Bijker en dr.ir. J. v.d. Graaff, beide van de Technische Universiteit Delft.

2 THEORETISCHE ACHTERGROND

2.1 De processen

Het is gebruikelijk om de zandbewegingen in het kustgebied te splitsen in een component evenwijdig aan de kust en een component dwars op de kust. Ook wordt vaak aangenomen dat deze beide componenten elkaar niet beïnvloeden. Deze aanname zal ook in dit hoofdstuk gedaan worden. Er zijn geen theoretische concepten beschikbaar waarmee de invloed van strandhoofden op het transport dwars op de kust beschreven wordt. Wellicht hebben hoofden behalve door het vastleggen van muien enige invloed op het dwarsprofiel.

Wel zijn er concepten beschikbaar voor het beschrijven van de invloed van hoofden op de transporten in langsricting. Primair hebben hoofden een invloed op de stroming langs de kust. Dit kan op een drietal manieren gebeuren:

- a. ze belemmeren de brandingsstroom en zijn als zodanig weerstandselementen in de stroming;
- b. ze leggen het circulatiepatroon vast; muien zullen zich concentreren ter plaatse van het hoofd;
- c. ze houden een getijstroom weg van de kust, en geven daardoor ook iets meer weerstand tegen de getijstroom.

Strandhoofden hebben dus invloed op de stroom. De getijstroom wordt afgeleid, de brandingsstroom geremd. Zandtransport is een functie van de stroomsnelheid en de opwoeling; opwoeling wordt veroorzaakt door golven, lokale stroomturbulenties en, in mindere mate, door de gemiddelde stroomsnelheid.

De invloed van strandhoofden op de opwoeling door golven is vrij beperkt. Als golven reflecteren tegen vrijwel verticale hoofden kan er sprake zijn van enige invloed. Vertikale flanken komen in Nederland echter niet veel voor bij strandhoofden.

Extra opwoeling kan ook ontstaan doordat water over een stenen berm heen stroomt. Dit verschijnsel treedt echter alleen op bij bermen met taluds steiler dan 1:1 tot 1:2 en een zekere hoogte. Bij wat flauwe taluds kan wel benedenstrooms enige verdieping optreden (vorming van een "ontgrondingskuil").

Bij paalschermen kan tussen de palen erosie ontstaan door stroomcontractie. De stroomsnelheid tussen de palen is vaak twee maal de stroomsnelheid tussen de hoofden, de zandtransportcapaciteit is dan vele malen groter.

Bij een vaste waterstand of bij een vaste stroomsnelheid zijn deze verdiepingen wel te bepalen, voor een oscillerende beweging is e.e.a. uiterst moeizaam (met name doordat de stroom omkeert).

Wel kunnen (hogere) strandhoofden bepaalde delen van het strand beschermen tegen golfaanval. Dit is overigens alleen het geval als aan de volgende voorwaarden wordt voldaan:

- de hoofden zijn hoog (minstens $\frac{2}{3}$ van de diepte)
- de hoofden zijn breed (ca. 10 m of breder, want op een te smal hoofd breekt de golf niet)
- de golven zijn lang ten opzichte van de onderlinge afstand van de hoofden
- de golven vallen scheef in.

De getallen in bovenstaand overzicht zijn grotendeels gebaseerd op ervaringen van de kustbeheerders.

Uit het bovenstaande volgt dat strandhoofden, onder bepaalde condities het zandtransport kunnen verminderen. Dit betekent niet dat zij ook de aanzanding bevorderen. Dit hangt nl. af van het verschil in langstransport in langsrichting langs de kust.

Voor een type c werking, stroom uit de kust houden, werken de hoofden als stroomkribben. Er zal dus per definitie contractie optreden ter plaatse van de koppen. Deze zullen in dat geval dus zodanig uitgevoerd moeten worden dat zij:

- of weerstand bieden tegen de ontgronding
- of de ontgronding tot grote diepte kunnen volgen.

De getijstroom wordt "uitwendig" aangedreven, d.w.z. de aandrijving vindt plaats doordat er een verhang langs de kust staat. Door dit verhang ontstaat een stroming, die in evenwicht is met de gemiddelde weerstand in het kustvak. Door de weerstand te verhogen (bijv. door de aanleg van hoofden) wordt de gemiddelde snelheid lager. ($v=C/\sqrt{hi}$); h en i blijven gelijk en C wordt verlaagd). Hierdoor neemt de zandtransportcapaciteit langs het gehele kustvak gemiddeld af.

De brandingsstroom wordt "inwendig" aangedreven door brekende golven. Deze stroomsnelheid past zich zeer snel aan de variërende condities aan. Bij tamelijk recht invallende golven veranderen tussen twee hoofden in deze condities nauwelijks, en blijft de brandingsstroom z'n oorspronkelijke snelheid houden.

Door de aanleg van hoofden wordt de brandingsstroom, en dus ook het zandtransport niet gelijkmatig langs de gehele kust verminderd, maar alleen lokaal ter plaatse van het hoofd. Het gevolg is een aanzanding bovenstrooms en een erosie benedenstrooms van het hoofd, waardoor de kenmerkende vertande kustlijn ontstaat. Een dergelijke vertanding ontstaat nauwelijks als alleen getijstroom geremd wordt.

Als instrument om een geheel kustvak te laten aangroeien kunnen strandhoofden eigenlijk theoretisch nooit goed functioneren, omdat alle zandwinst per definitie te koste gaat van het gebied benedenstrooms. De lij-erosie in m^3 is gelijk aan de zandwinst in het beschermde gebied. Slechts in enkele bijzondere gevallen (bijvoorbeeld aan de benedenstroomse zijde van eilanden of bij duidelijke hoeken in de kustlijn) is er voor een kustvak echt zandwinst te boeken. Als zuiver defensief instrument zijn er wel theoretische overwegingen volgens welke een strandhoofd kan functioneren. Hun taak is dan het lokaal verminderen of voorkomen van erosie. Dit heeft soms het gevolg dat aan de lijzijde de erosie versterkt of de sedimentatie vermindert. Het eerste kan vaak niet getolereerd worden, het tweede is soms wel acceptabel.

De aanleg van een hoofdenstelsel beïnvloedt de evenwichtsligging van de kust. Meestal ontstaat na vele tientallen jaren van aanleg en verplaatsing van hoofden e.d. een nieuwe evenwichtsligging met een dynamisch evenwicht. Het voorspellen van een dergelijke verstoring is moeilijk omdat er een aantal tegengestelde factoren zijn.

2.2 Berekeningsmethoden

Door Bakker [1967, 1971] zijn op basis van de Pelnard-Considerere methode een aantal modellen ontwikkeld voor de berekening van kustlijnligging bij strandhoofden. Hij bouwt hierin door op de gedachtenvorming van Van Bendegom [1949]. In deze methode moet een "kustconstante" worden ingevoerd, die in een aantal gevallen niet zo constant is, maar echter wel aan de hand van analyses van kustlijnverplaatsingen in het verleden te bepalen is. Hindcast-berekeningen met deze methode blijken voor de Nederlandse kust, over een beperkt aantal jaren goed mogelijk. Forecast-berekeningen zijn een stuk moeilijker in verband met problemen bij het bepalen van de kustconstante. De oorzaak van dit probleem is te vinden in het feit dat er in Nederland een zeer variabel golfklimaat is, waarbij vaak de resulterende golf ongeveer loodrecht op de kust staat. Het resulterende zandtransport langs de kust is het verschil tussen twee grote transporten. De fout die in de berekening gemaakt wordt is daarom relatief groot.

Bovendien gaat de methode er vanuit dat het hoofd een groot deel van het brandingsstroomtransport blokkeert. Doordat de brekerzone bij stormen vaak veel breder is dan de lengte van de hoofden is dat geenszins het geval. Hiervoor moet een correctieterm ingevoerd worden, die ook weer een bron van onnauwkeurigheden is.

Toepassing van deze methode langs oceaankusten met een redelijk constante golfaanval en weinig getijstroom hebben wel tot zeer goede forecasts geleid.

De hier geschetste methode blijkt niet goed bruikbaar om de werking van strandhoofden op lange termijn (meer dan 10 jaar) te voorspellen.

In Nederland is verder op beperkte schaal modelonderzoek naar strandhoofden gedaan [Waterloopkundig Laboratorium, 1979]. Bij deze proeven in een bassin van 20 x 40 m onder invloed van scheef invallende, regelmatige golven het effect van strandhoofden bestudeerd. Deze proeven bevestigden kwalitatief de theoretische concepten van Bakker voor de effecten van een brandingsstroomtransport. De invloed van het getij is niet onderzocht.

Het buitenlandse onderzoek naar strandhoofden tot 1980 is samengevat in een publicatie van Hydraulic Research in Wallingford [Tomlinson, 1980]. In deze publicatie wordt een groot aantal strandhoofd-projecten in de wereld geevalueerd, en aan de hand van deze evaluatie worden een aantal algemene criteria voor hoofden geponeerd. Het onderzoek is na 1980 in Engeland voortgezet, maar heeft zich met name gericht op het aldaar gebruikelijke type strandhoofd (kort hoofd, veelal op grindstrand, bestaande uit palen met daartussen een beplanking; een schutting). Deze situatie is niet vergelijkbaar met de situatie in Nederland.

Uit het literatuuronderzoek bleek dat er veel theoretisch-mathematische modellen in laboratoria getoetst zijn, maar zelden aan prototype gegevens. Bij het onderzoek in laboratoria is overigens de nadruk gelegd op hoofden aan kusten met duidelijk scheef invallende golven uit een richting, zonder getijstroom, gelegen langs lange rechte kusten met een flauw onderwatertalud.

De invloed van het hoofd op de langjarige morfologische ontwikkeling werd daarbij nooit bestudeerd.

Bij de beschrijving van prototype-situaties wordt veelal een beschrijving gegeven van de bestaande, niet bevredigende situatie en van het ontwerp van de nieuwe situatie. Publicaties waarin na een groter aantal jaren de werking van een hoofdenstelsel wordt beschreven zijn er nauwelijks.

Ten aanzien van de werking van paalschermen is door Svasek [1975] onderzoek gedaan. Ook hier is doorgebouwd op het Bakkerconcept, en worden de paalschermen als een weerstandselement in de langstransportberekening ingevoerd. Ook voor deze methode geldt het bezwaar dat toepassing bij de variabele golfcondities in Nederland tot relatief onbetrouwbare resultaten zal leiden.

Geconcludeerd moet dus worden dat de theoretische benadering nog niet tot een goede beoordeling van strandhoofden en paalschermen op langere termijn kan leiden.

3 ANALYSE VAN PROTOTYPEGEDEVENS

3.1 Verschillende processen

De algemene vraag is of het bouwen van hoofden enig erosieremmend effect op de kust gehad heeft. Dit is te onderzoeken aan de hand van meetgegevens van de ligging van de kust in de loop der tijd. Het feit dat tussen strandhoofden soms een zaagtandvorm of een kustboog waar te nemen is, is geen bewijs dat deze hoofden effect hebben op de kustregressie. Uit dit soort waarnemingen kan men alleen concluderen dat ze een invloed hebben op het langstransport. Een (soms tijdelijke) verandering in het langstransport heeft vaak geen invloed op de kustregressie. Om het effect van hoofden te kunnen definiëren moet eerst een onderscheid gemaakt worden tussen een vijftal kustprocessen. Deze processen hebben ieder hun eigen tijdschaal (zie fig. 3.1).

- . Korte termijn fluctuaties.
Ieder jaar ligt de kustlijn op een iets andere plaats. Deze jaarlijkse verschillen worden bijvoorbeeld veroorzaakt door het feit dat het niet ieder jaar even stormachtig is.
- . Zandgolven.
Min of meer periodieke erosie en aanzanding van de kust met periodes van 50 - 150 jaar.
- . Klimaatschommelingen.
Doordat het windklimaat zich zo nu en dan wijzigt, verandert ook de gemiddelde ligging van de kustlijn.
- . Langjarige kustregressie.
Lineaire voor- of achteruitgang van de kust op een tijdschaal van eeuwen.
- . Effect van menselijk ingrijpen.
Een trendbreuk in de langjarige kustregressie, veroorzaakt door de aanleg van kunstwerken, zoals strandhoofden en havendammen.

In fig. 3.1 zijn deze vijf processen weergegeven. Alleen de resultaten van deze 5 processen, de lijn van fig. 3.1e kan worden waargenomen. Voor het beoordelen van de effectiviteit van strandhoofden is het met name nodig om het 5e proces (menselijk ingrijpen) goed in beeld te krijgen. Dit kan echter alleen als de andere vier processen ook gekwantificeerd kunnen worden. Hierbij blijkt het onderkennen van zandgolven en klimaatschommelingen van essentieel belang te zijn.

Vanaf ca. 1850 zijn in Nederland strandmetingen uitgevoerd. Hierbij werd met onderlinge afstanden van 1 km de ligging van de duinvoet, de hoogwaterlijn en de laagwaterlijn vastgelegd ten opzichte van een vaste referentielijn, de rijksstrandpalenlijn. Om een goed beeld te krijgen van de variaties in de kustligging is eigenlijk een kubering van ieder vak van 1 km lengte nodig. Dit is echter alleen mogelijk als profielmetingen beschikbaar zijn; die zijn echter slechts op grotere schaal beschikbaar over de periode vanaf 1965. Een periode van 25 jaar blijkt echter te kort om een goede analyse uit te voeren, bovendien zijn veel strandhoofden al veel eerder aangelegd.

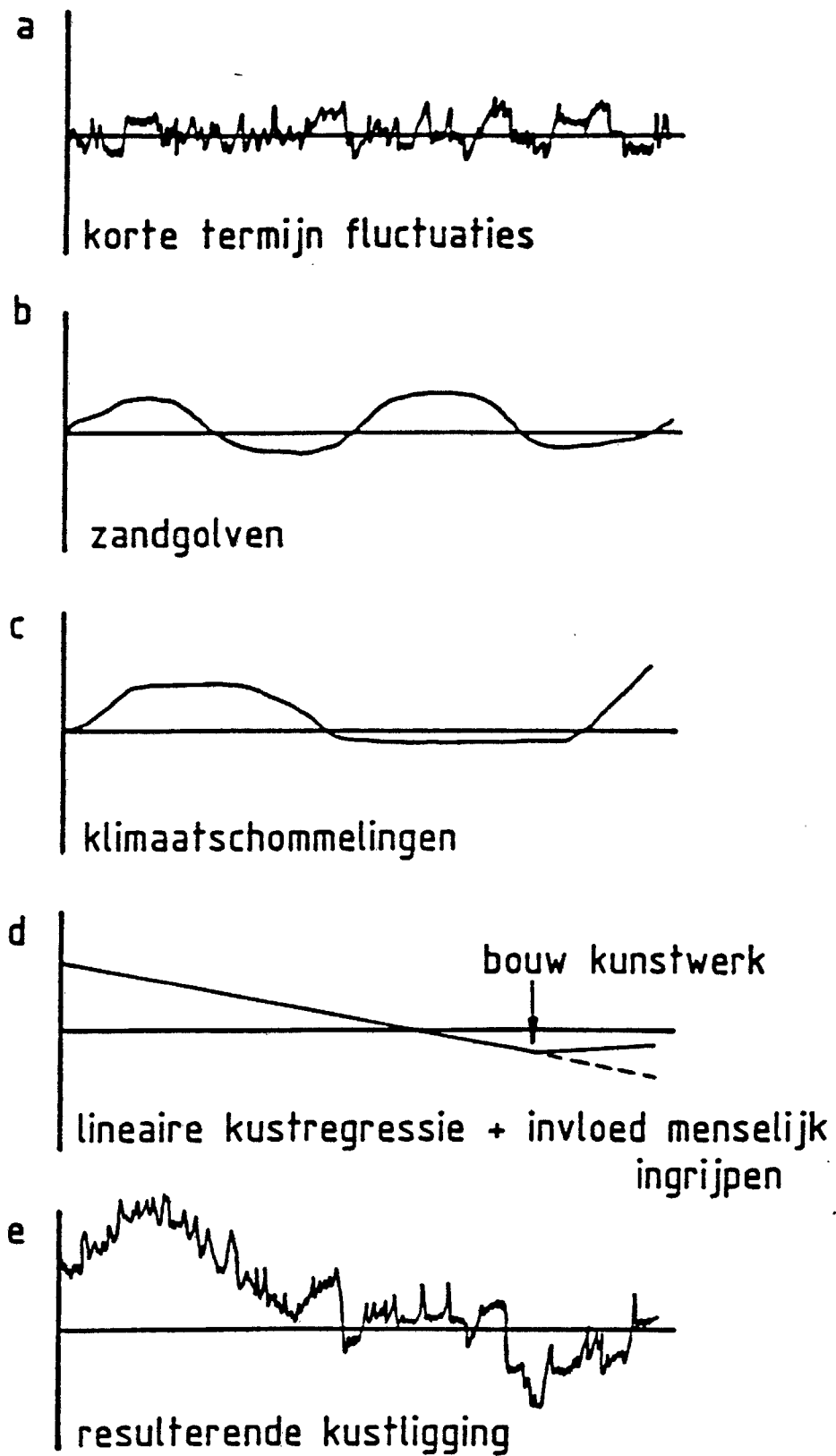


fig 3.1 Kustprocessen.

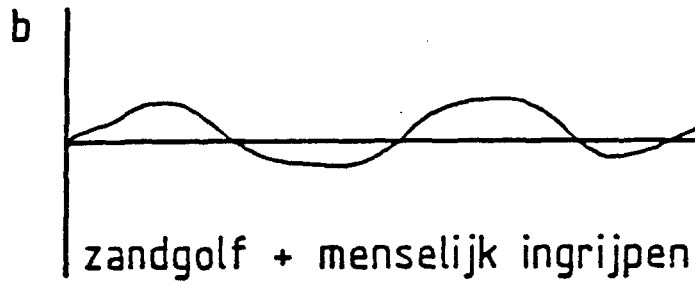
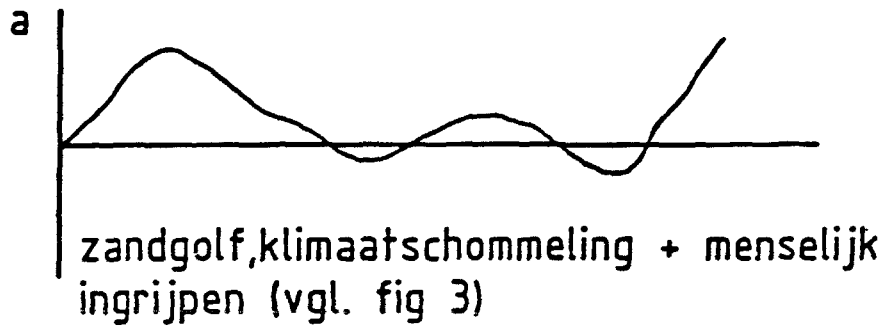


fig. 3.2 Samengestelde kustprocessen.

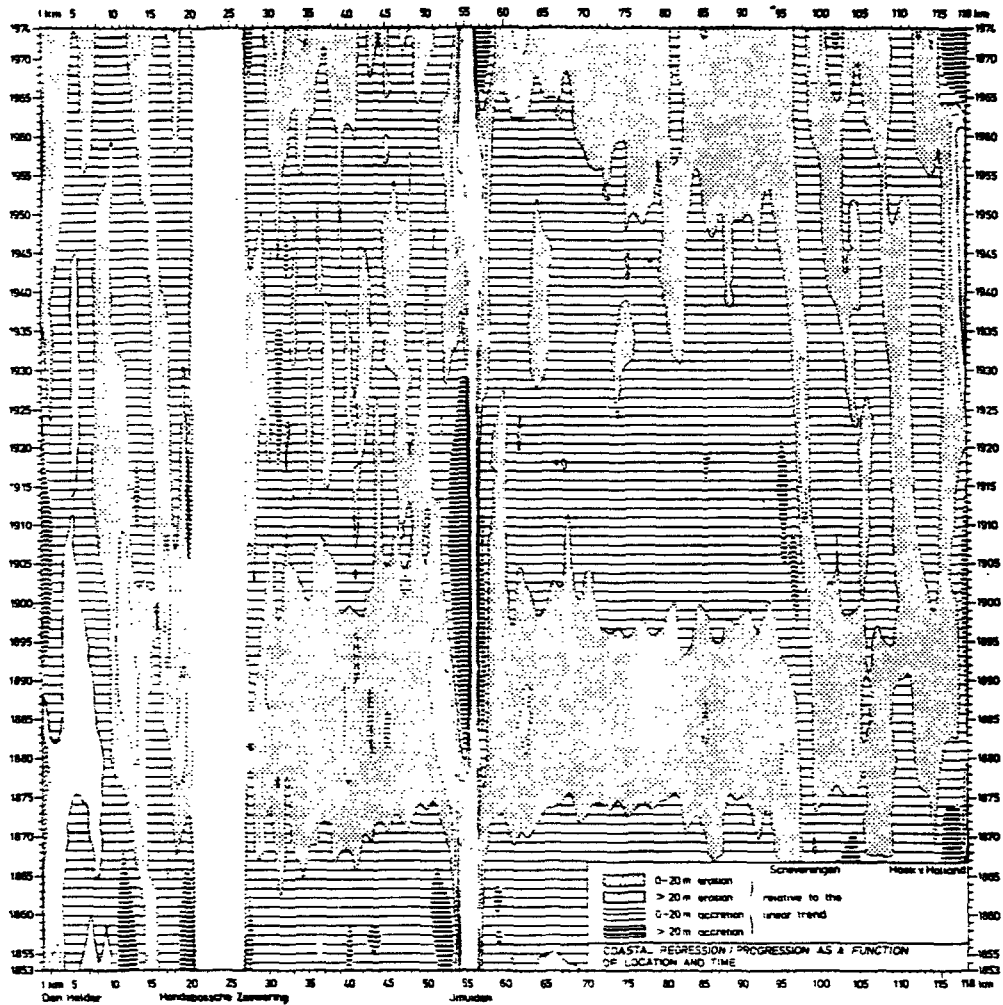


fig. 3.3 Isolijnen van kustregressie langs de Hollandse kust.

Omdat kuberen niet mogelijk is, is als definitie van de "kustlijn" het gemiddelde van de ligging van de hoog- en de laagwaterlijn in een bepaalde raai gekozen.

Het eerste proces, de jaarlijkse fluctuaties, is vrij eenvoudig uit de kustgrafieken te verwijderen, door toepassing van een filter; met andere woorden, er wordt een vloeiende lijn door de kustgrafieken getrokken. Ook de langjarige kustregressie kan simpel geëlimineerd worden door een lineaire regressie-analyse toe te passen. De residuele waarde ten opzichte van de regressielijn worden geplott. De nu gevonden lijn (fig. 3.2a) bevat dus zandgolven, effecten van klimaat-schommelingen en het effect van menselijk ingrijpen. Het vinden van de zandgolven en de effecten van klimaat-schommelingen is moeilijk. Dit kan bijv. door een tweedimensionale grafiek te maken. Een voorbeeld hiervan is figuur 3.3; ontleend aan Verhagen [1988].

Hier is langs de horizontale as de kilometrering uitgezet en langs de vertikale as staat de tijd. In deze grafiek staan isolijnen voor de residuele kustverplaatsing uitgezet. Afgelezen kan worden dat bijv. in km 66 in 1900 de kust 20 m meer landwaarts lag, dan hij volgens de lineaire regressie voor dit punt zou moeten liggen. Opvallend in fig. 3.3 is de horizontale band met meer landwaartse kustliggingen in de periode tussen 1875 en 1900. Het blijkt dat deze periode overeenkomt met een periode waarin er relatief veel westen en zuidwesten wind was. Dit fenomeen is reeds beschreven door Van Straaten [1960]; fig. 3.4a en 3.4b zijn ontleend aan deze publicatie. Dit is dus typisch een klimaat-schommeling. Het is zeer aannemelijk dat het effect van zo'n klimaat-schommeling overal langs de Hollandse kust gelijk is, omdat de orientatie van de kust overal hetzelfde is. De klimaat-schommeling is uit fig. 3.3 te verwijderen door voor ieder jaar een middeling over alle gemeten kustliggingen uit te voeren. Het resultaat is weergegeven in fig. 3.5. Dit is dus de gemiddelde ligging van de Hollandse kust als functie van de tijd, relatief ten opzichte van de ligging ten gevolge van de lineaire regressie. Het is nu mogelijk om fig. 3.5 van fig. 3.3 af te trekken. Het resultaat is fig. 3.6. Fig. 3.6 bevat dus slechts nog informatie over 2 processen, nl. zandgolven en effecten van menselijk ingrijpen (zie ook fig. 3.2b). De zandgolven zijn met name in het noordelijk deel en het zuidelijk deel goed te herkennen. In het middendeel met name tussen IJmuiden en de Hondsbossche Zeewering is dat wat moeilijker. De loopsnelheid van de golven is eenvoudig uit de grafiek af te lezen, deze is 65 m/jaar. Het blijkt dat de zandgolf-amplitude sterk varieert, maar een top-dal afstand van minstens 50 m komt vrijwel overal voor.

Door nu in figuur 3.2b de zandgolf weg te filteren blijft het effect van menselijk ingrijpen over. De bouw van havendammen e.d. is in dit soort grafieken inderdaad goed terug te vinden. De bouw van een strandhoofd moet terug te vinden zijn door een knik in de overblijvende figuur, zoals in figuur 3.1d. Indien de knik zodanig is dat de lineaire kustregressie tot nul gereduceerd wordt (dwz. de lijn in fig. 3.1d gaat horizontaal lopen) dan is de effectiviteit van het hoofd 100 %. Indien er absoluut geen knik is waar te nemen op het moment van aanleg, is de effectiviteit van het hoofd 0 %. De grootte van de knik is dus een maat voor de effectiviteit.

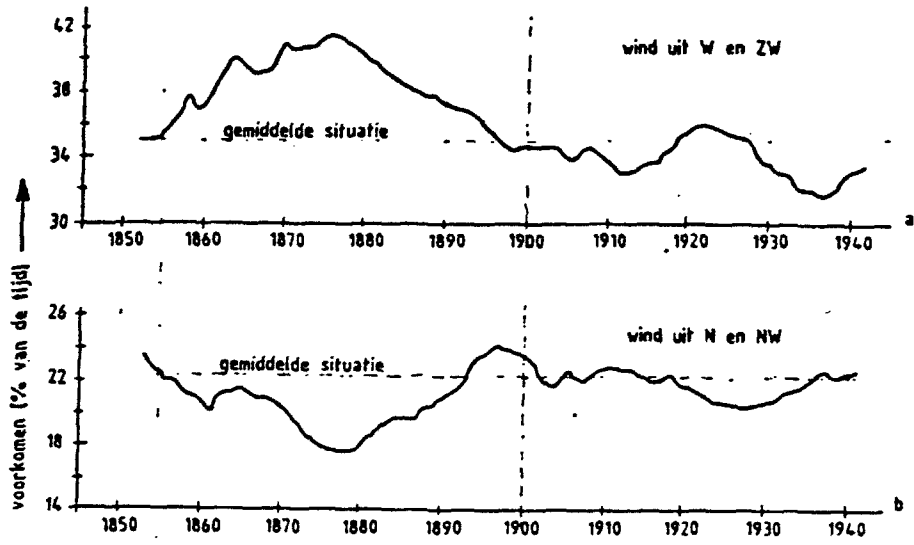


fig. 3.4 Voorkomen van wind.

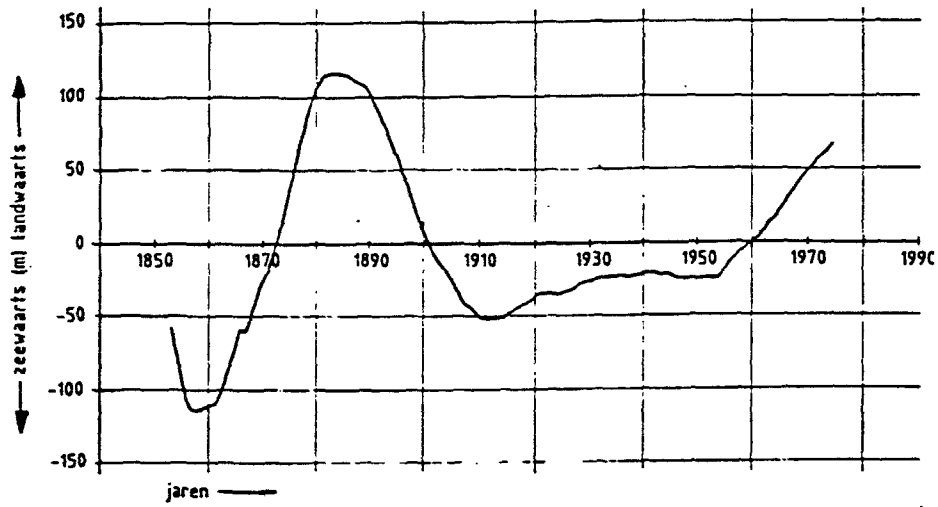


fig. 3.5 Gemiddelde ligging van de Hollandse kust.

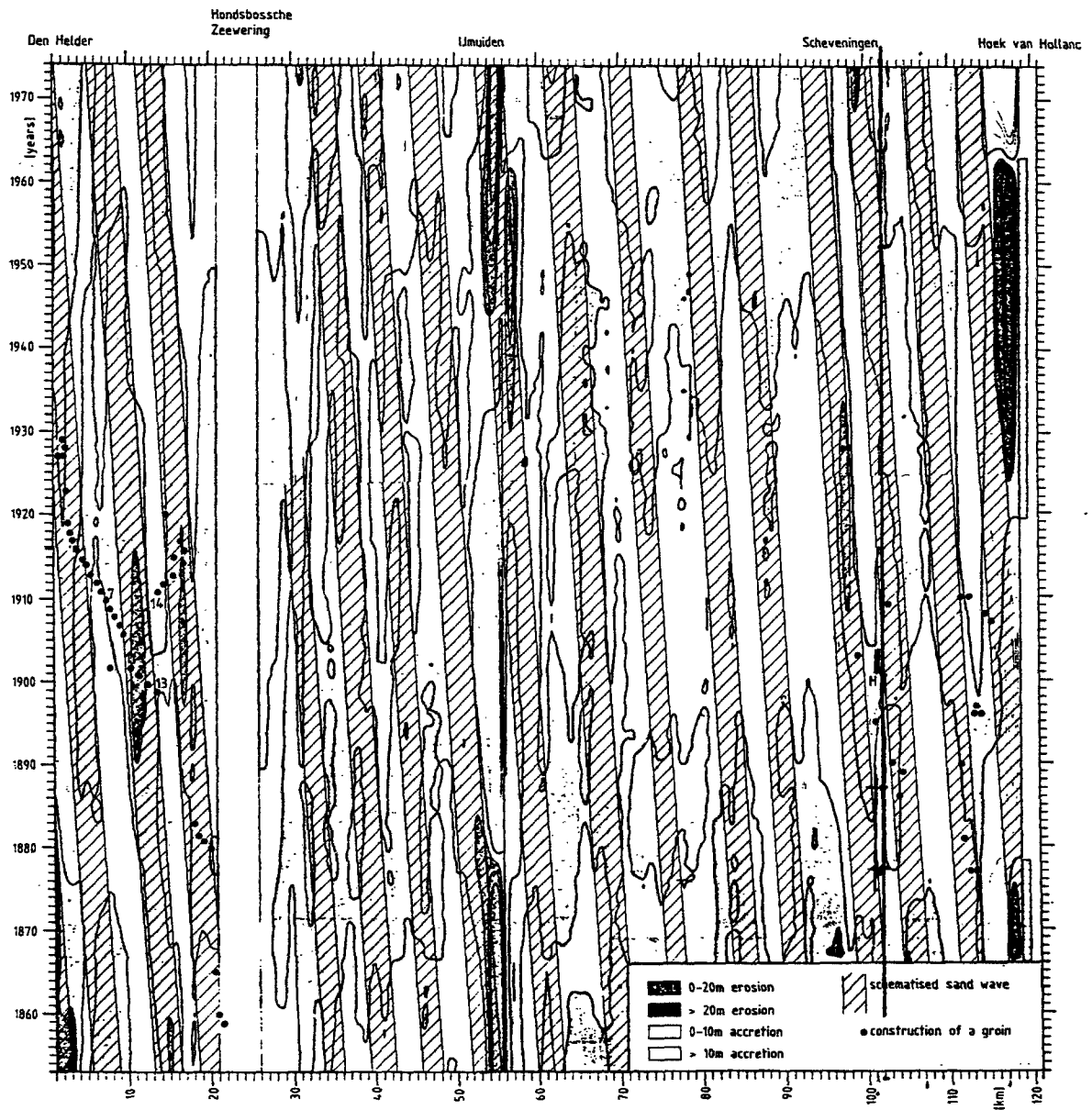


fig. 3.6 Gecorrigeerde zandgolven langs de Hollandse kust.

Het blijkt echter dat de bouw van strandhoofden op deze wijze nauwelijks nog detecteerbaar is. Hierdoor wordt het moeilijk objectief te beoordelen of een strandhoofd wel of niet effectief is.

Ten behoeve van dit onderzoek is toch getracht dit uit te voeren. Er is echter vanaf gezien om de mate van effectiviteit van het hoofd te bepalen. Het onderzoek heeft zich beperkt tot het trachten aan te geven of er wel of geen knik optreedt in de regressielijn.

3.2 Beschikbare gegevens

De bestaande strandhoofden zijn gebouwd sinds ongeveer 1775 tot zeer recent. Om de werking te beoordelen moeten daarom de ene keer de kustontwikkeling voor 1750 vergeleken worden met die na 1800. In het andere geval kan worden volstaan met de ontwikkeling voor 1960 en na 1965. De meest recente gegevens zijn veel gedetailleerder dan de oudere. In het kader van deze studie is teruggegaan tot 1600.

Voor de kustlijnontwikkeling van 1600 tot 1800 is gebruik gemaakt van een studie [Ligtendag, 1987] die van honderden oude kaarten gemaakt is. In die studie is de aandacht geconcentreerd op de jaartallen 1600 en 1750. Op basis van de beschikbare kaarten zijn de kustlijnen van 1600, 1750 en heden zo goed mogelijk in een kaart geschetst. Een voorbeeld hiervan is de kustontwikkeling van Vlieland en Texel (zie figuur 3.7).

De kustlijnen rond 1750 en zeker rond 1600 hebben een grote onnauwkeurigheid. De makers van vroegere kaarten hadden niet dezelfde nauwkeurige hulpmiddelen en hadden bovendien vaak meer interesse in andere zaken dan in de kustlijn. Toch is op de oude kaarten duidelijk te zien dat voor Domburg en 's-Gravenzande ordegrootte een kilometer duin lag. Thans is dat vrijwel niets meer. In het algemeen kan gezegd worden dat de resulterende kaarten met kustlijnen in 1600 en 1750 een nauwkeurigheid hebben van enkele honderden meters.

Uit deze kaarten kan vaak geconcludeerd worden, dat er een sterke erosie is voor de bouw van strandhoofden en een beperkte erosie na de bouw. Daaruit zou geconcludeerd kunnen worden, dat de erosie door strandhoofden tegen gegaan wordt. Toch moeten hierbij enige kanttekeningen geplaatst worden. In de periode rond 1800 werd ook begonnen met andere methoden van stabilisatie, met name van het duingebied. Het (waterstaatkundig) beheer van het kustgebied werd aanmerkelijk verbeterd. Hierdoor is het niet zonder meer mogelijk alle verandering in kustgedrag toe te schrijven aan de aanleg van strandhoofden.

Rond 1850 is begonnen met jaarlijkse strandmetingen. De afstand van de laagwaterlijn, hoogwaterlijn en duinvoet tot een vaste lijn evenwijdig aan de kust (de Rijksstrandpalenlijn) wordt om de kilometer gemeten. Het resultaat uitgezet in de tijd is een zogenaamde bliksemgrafiek. De naam bliksemgrafiek komt voort uit de sterke wisselingen van jaar tot jaar waardoor een bliksemschichtachtig beeld ontstaat. Op lange termijn zijn er echter wel degelijk tendensen uit te halen. Zo is in figuur 3.8a te zien dat de erosie halverwege de Delflandse Hoofden bijna 50 m per eeuw is.

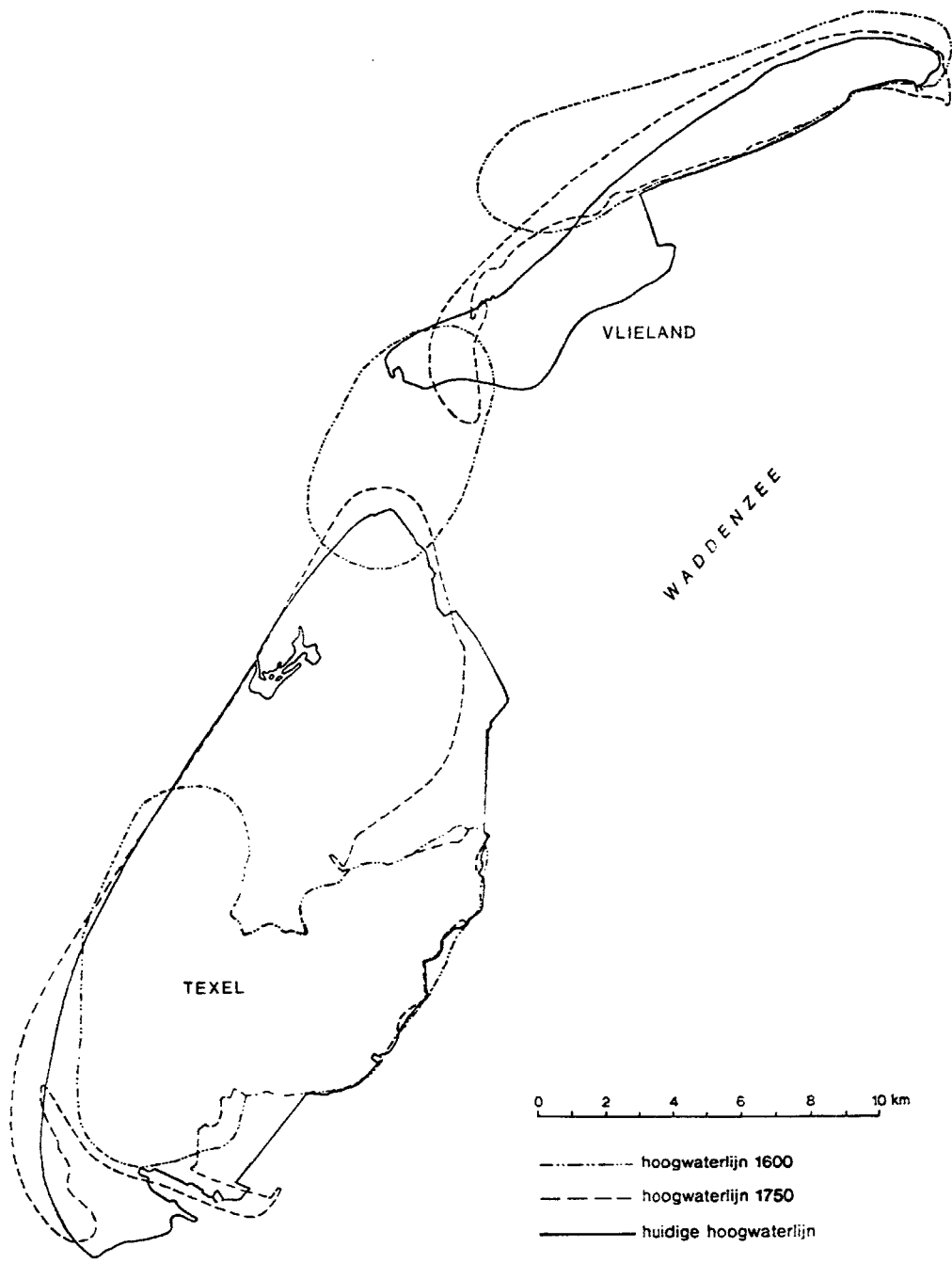


fig. 3.7 De ontwikkeling van Texel en Vlieland.

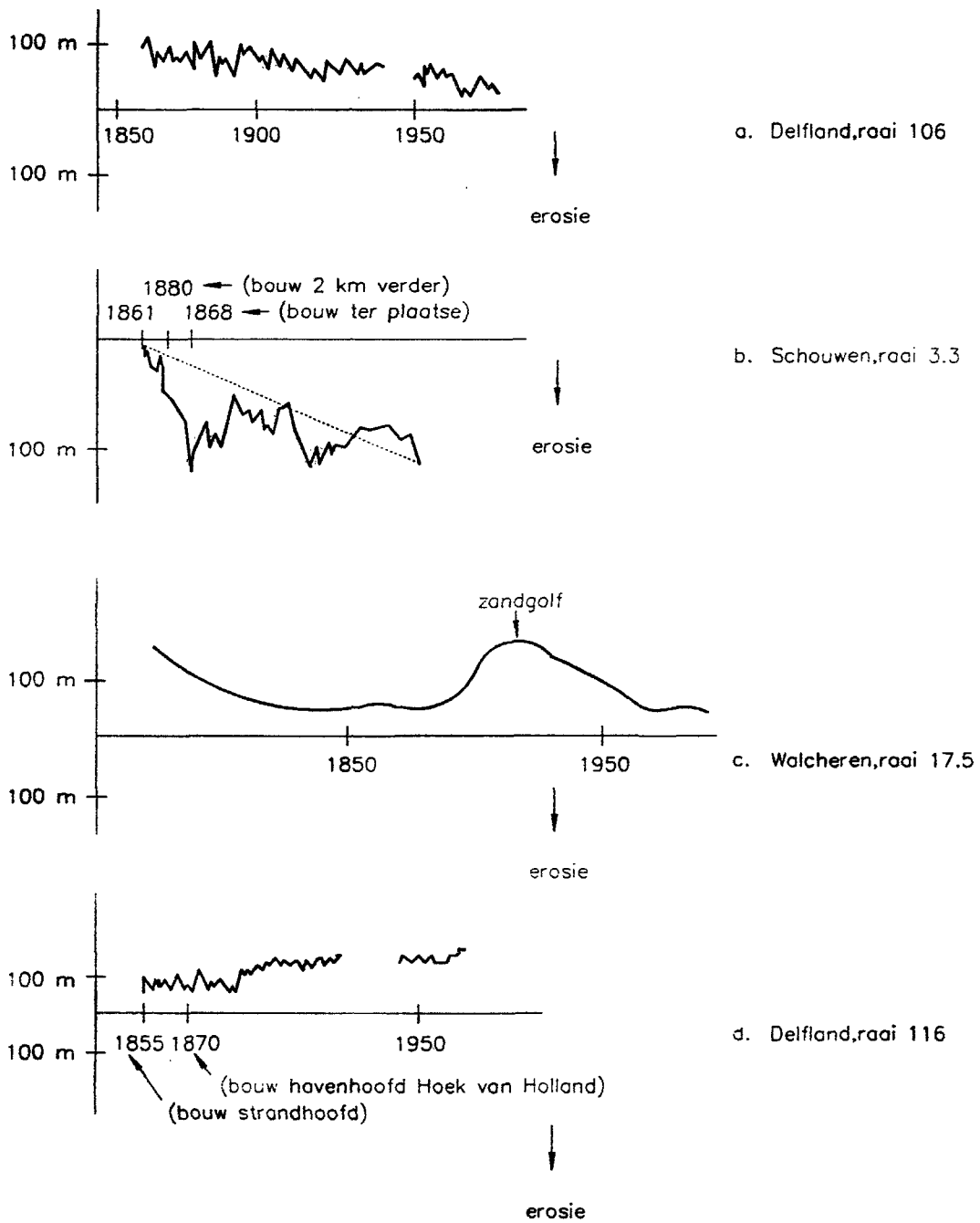
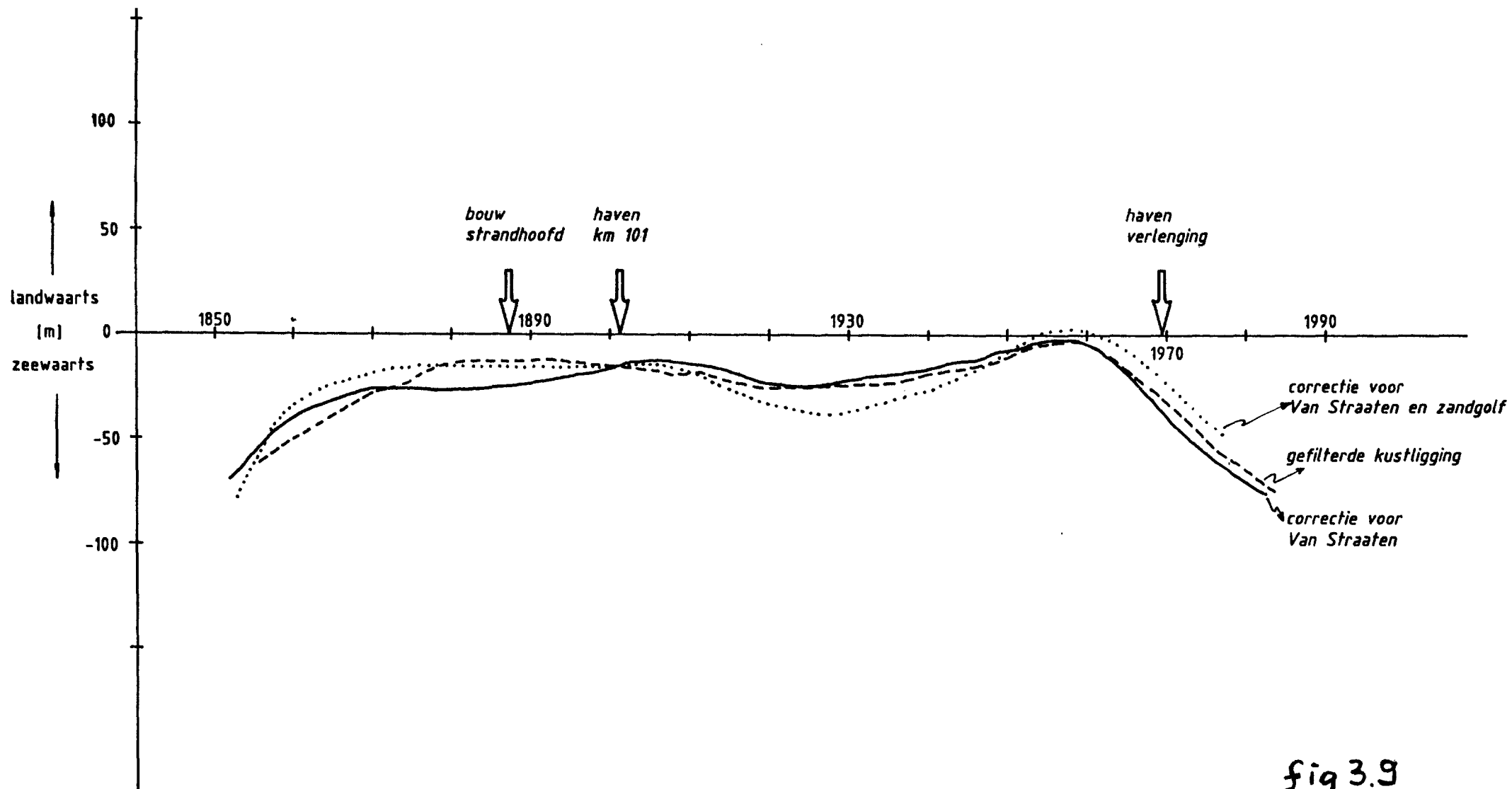


fig. 3.8 Bliksemgrafieken



Door de tendensen voor en na de bouw van een strandhoofd met elkaar te vergelijken kan een oordeel over deze hoofden worden gegeven. Hierbij moet de bliksemgrafiek echter wel in de 5 componenten uitgesplitst worden die in hoofdstuk 3.1 genoemd zijn. Daarnaast is het noodzakelijk de effecten van lijzijde-erosie apart te beschouwen.

3.3 Lijzijde-erosie

In geval van een kustvak met een overheersende constante brandingsstroom veroorzaakt een strandhoofd aanzanding aan de loefzijde en erosie aan de lijzijde. Bij een eroderend kustvak kan de aanzanding aan de loefzijde in een aantal gevallen de langjarige erosie aldaar compenseren. De langjarige erosie aan de lijzijde wordt dan versterkt. De lijzijde erosie probeert men dan vaak te stoppen door de bouw van een tweede strandhoofd in het erosiegebied. In veel gevallen kan de lijzijde erosie daarmee gestopt worden. Het tweede hoofd veroorzaakt op zijn beurt weer lijzijde erosie, waardoor een derde hoofd noodzakelijk wordt. Enzovoorts, enzovoorts. De functie van het tweede hoofd en de daaropvolgende hoofden is dus uitsluitend het compenseren van de nadelige neveneffecten van het eerste hoofd. Het is daarom onjuist om bij deze vervolghoofden te concluderen dat zij de langjarige erosie tegen gaan. Feitelijk gaan zij alleen de extra erosie t.g.v. het eerste hoofd tegen.

Een voorbeeld hiervan wordt gegeven in fig. 3.8b. Dit is de bliksemgrafiek van de laagwaterlijn bij raai 3.3 aan de noordkust van Schouwen. In 1868 worden 2 km ten westen van dit punt enkele strandhoofden gebouwd. Vanaf 1868 vindt in raai 3.3 snelle erosie plaats. In de periode 1876-1878 worden tussen de bestaande strandhoofden en raai 3.3 nog enkele hoofden gebouwd. De lijerosie in raai 3.3 wordt hierdoor nog versterkt. In 1880 wordt juist ten oosten van deze raai een strandhoofd gebouwd. In raai 3.3 vindt daardoor tijdelijk snelle aanzanding plaats, totdat rond 1890 de laagwaterlijn op een plaats ligt, die redelijk overeenkomt met de ligging die verwacht mocht worden op grond van de langjarige doorgaande erosie van de (onderwater) oever. Dit kustvak ligt nl. in de buitenbocht van een stroomgeul van het Brouwershavense Gat.

3.4 Zandgolven

Met de in hoofdstuk 3.1 beschreven methode is het mogelijk om zandgolven te traceren, te kwantificeren en een correctie op de kustontwikkeling aan te brengen. Met name voor de Zeeuwse eilanden is dit van groot belang, omdat daar de golven kwantitatief het belangrijkste zijn. Kwantificeren van zandgolfeffecten is alleen mogelijk na zeer gedetailleerd onderzoek van de langjarige veranderingen in een kustvak. Hierbij moeten zoveel mogelijk ook gegevens uit oude kustprofielmetingen gebruikt worden. Voor de kustvakken in Zeeland is dat inmiddels gebeurd. Zie hiervoor onder andere Maranus en Verhagen [1987]. Voor de Hollandse kust en de Waddeneilanden zijn deze gegevens minder betrouwbaar.

Een duidelijk voorbeeld van het verstoring effect van een zandgolf kan ontleend worden aan Maranus [1986]. In raai 17.55, iets ten noorden van Westkapelle op Walcheren, vindt tussen 1750 en 1830 erosie plaats.

Zie figuur 3.8c. In 1830 wordt een paalhoofd gebouwd en stopt de erosie. Er vindt zelfs aanzienlijke aanzanding plaats. Daarna is er weer erosie, die verder gaat dan de oorspronkelijke erosie. De golf van aanzanding trad 1 km zuidelijker 20 jaar eerder op en 20 jaar later 1 km noordelijker. Deze zandgolf schuift dus langs de kust met een snelheid van ongeveer 1 km per 20 jaar. Het paalhoofd werd in het dal van de zandgolf gebouwd en leek door het stoppen van de erosie zeer effectief te zijn. Dit is echter gezichtsbedrog, veroorzaakt door de zandgolf. Vaak zullen beheerders strandhoofden bouwen na een snelle erosie van een zandgolf. Ten onrechte wordt dan succes geclaimd als daarna de erosie stopt of aanzanding optreedt.

3.5 Andere constructies

Het effect van andere constructies is soms wat eenvoudiger te vinden. Een voorbeeld van zo'n geval is raai 117 bij de Delflandse Hoofden (zie figuur 3.8d). In 1855 en 1856 is in deze omgeving een reeks strandhoofden gebouwd. Daarvoor was erosie opgetreden. Uit figuur 3.8d blijkt tussen 1855 en 1920 een gestage aanzanding (orde 50 m). Deze aanzanding wordt in dit geval echter veroorzaakt door de 1,5 km verderop gelegen havenhoofden van Hoek van Holland, die rond 1870 zijn gebouwd.

3.6 Combinaties

Een voorbeeld van een combinatie van de verschillende correcties, waaruit tevens blijkt dat alles niet zo eenduidig is als het in het voorafgaande gesuggereerd wordt, kan gevonden worden in raai 102 van Delfland, juist ten zuiden van de haven van Scheveningen. In figuur 3.9 is aangegeven:

- de gemeten ligging van de kustlijn
- de gefilterde ligging van de kustlijn
- de gecorrigeerde ligging t.g.v. klimaatschommelingen, hierbij is figuur 3.5 als correctiefactor gebruikt
- de gecorrigeerde ligging t.g.v. de zandgolf van fig 3.6; aangenomen is hierbij een zandgolfamplitude van 20 m en een periode van 90 jaar (gebaseerd op fig. 3.6)

Aan de hand van het gecorrigeerde kustverloop moet geconcludeerd worden dat er:

- tot 1870 een behoorlijke erosie optrad (ca. 3 m per jaar)
- tussen 1870 en 1960 de kust redelijk stabiel was (ca. 0.25 m erosie per jaar)
- na 1960 een behoorlijke aanzanding optrad (ca 3,5 m per jaar)

Het menselijk ingrijpen in de omgeving van deze raai is:

- aanleg strandhoofden tussen 1861 en 1867, ca 2,5 km ten zuiden van raai 102
- aanleg strandhoofden en verversingskanaal in 1887 ter plaatse van raai 102
- aanleg haven van Scheveningen in 1901-1904, ca. 0,5 km ten noorden van raai 102
- afdamming verversingskanaal in 1960
- verlenging havendammen in 1970

Vergelijking van het menselijk ingrijpen en het kustgedrag leidt dan tot de volgende conclusies:

- de erosie tot 1870 is vermoedelijk lij-erosie t.g.v. de hoofden aan de zuidzijde, en is uit zichzelf gestopt (rond 1870 zijn er geen ingrepen).
- de bouw van het hoofd in 1887 is niet terug te vinden in het kustgedrag.
- de bouw van de haven in 1904 is eigenlijk ook niet terug te vinden in het kustgedrag.
- de start van de aanzanding in 1960 komt overeen met het afsluiten van het verversingskanaal.

Het blijkt dus heel moeilijk om te concluderen of hoofden in dit gebied wel of niet gewerkt hebben. Het lijkt het meest waarschijnlijk dat hoofd 102 geen invloed op het kustgedrag heeft gehad. Uit dit voorbeeld blijkt tevens één van de grote problemen die bij dit onderzoek overal naar voren komt, nl. dat de aanleg van hoofden vrijwel samenvalt met het begin van de (betrouwbare) meetreeks.

4 ERVARINGEN MET STRANDHOOFDEN

4.1 Inleiding

Voor alle kustvakken die met hoofden verdedigd zijn is een analyse uitgevoerd met de hiervoor beschreven methode. Steeds is getracht aan te geven of strandhoofden wel of niet een invloed gehad hebben op het langjarig kustgedrag. Zoals uit de voorgaande voorbeelden al is gebleken, is het zelden mogelijk op deze vraag met volledige stelligheid "ja" of "nee" te antwoorden. Om dit grijze gebied toch enigszins te kwantificeren wordt steeds een percentage gegeven. Dit percentage geeft een ordegrrootte van de mate van zekerheid waarmee gesteld kan worden dat de hoofden enige mate van effectiviteit bezitten bij het tegengaan van kusterosie. Dit wordt de "kans op werking" genoemd. Dit percentage is een zeer subjectieve waarde. Mede daarom is besloten bij de beoordeling van kustvakken geen kanswaarden te gebruiken groter dan 80 % en kleiner dan 20 %.

4.2 Vlieland

Op Vlieland bevinden zich 64 hoofden (zie fig. 4.1, ontleend aan Rakhorst [1984b]). De meeste hiervan zijn gebouwd in de periode van 1854 - 1885, beginnend halverwege het eiland (raai 43) en in de loop der jaren over 8 kilometer uitgebouwd in oostelijke richting. In de periode 1916 - 1923 is de reeks met 2 km verlengd, wederom in oostelijke richting. Van 1957 - 1959 is de reeks naar het westen uitgebreid. Hier manifesteert zich ook het probleem dat het begin van de standmetingen samenvalt met de aanleg van de hoofden. Oudere gegevens zijn alleen beschikbaar in de vorm van een kustlijn (hoogwaterlijn ?) van 1600 en 1750. Op grond van deze, deels onbetrouwbare informatie is de volgende tabel op te stellen:

raai	erosiesnelheid m/jaar		
	1600-1750	1750-1850	1885-1985
43	7.3	3.8	0.0
44	6.7	4.3	1.2
45	5.3	3.5	1.3
46	4.7	4.8	0.9
47	3.3	3.7	0.5
48	3.3	3.6	0.0
49	3.3	3.5	-0.5
50	3.3	2.7	0.0
51	3.3	2.2	0.0

Deze tabel wekt sterk de indruk dat na aanleg van de hoofden de erosie verminderd is, en zelfs tot staan is gebracht. Deze indruk wordt versterkt door het beeld van fig. 4.2, ontleend aan Bakker & Joustra [1970]. In deze figuur is te zien dat in de nog niet verdedigde kustvakken er tussen 1860 en 1880 behoorlijke erosie is, en dat deze erosie vrijwel tot nul teruggaat na de bouw van de strandhoofden.

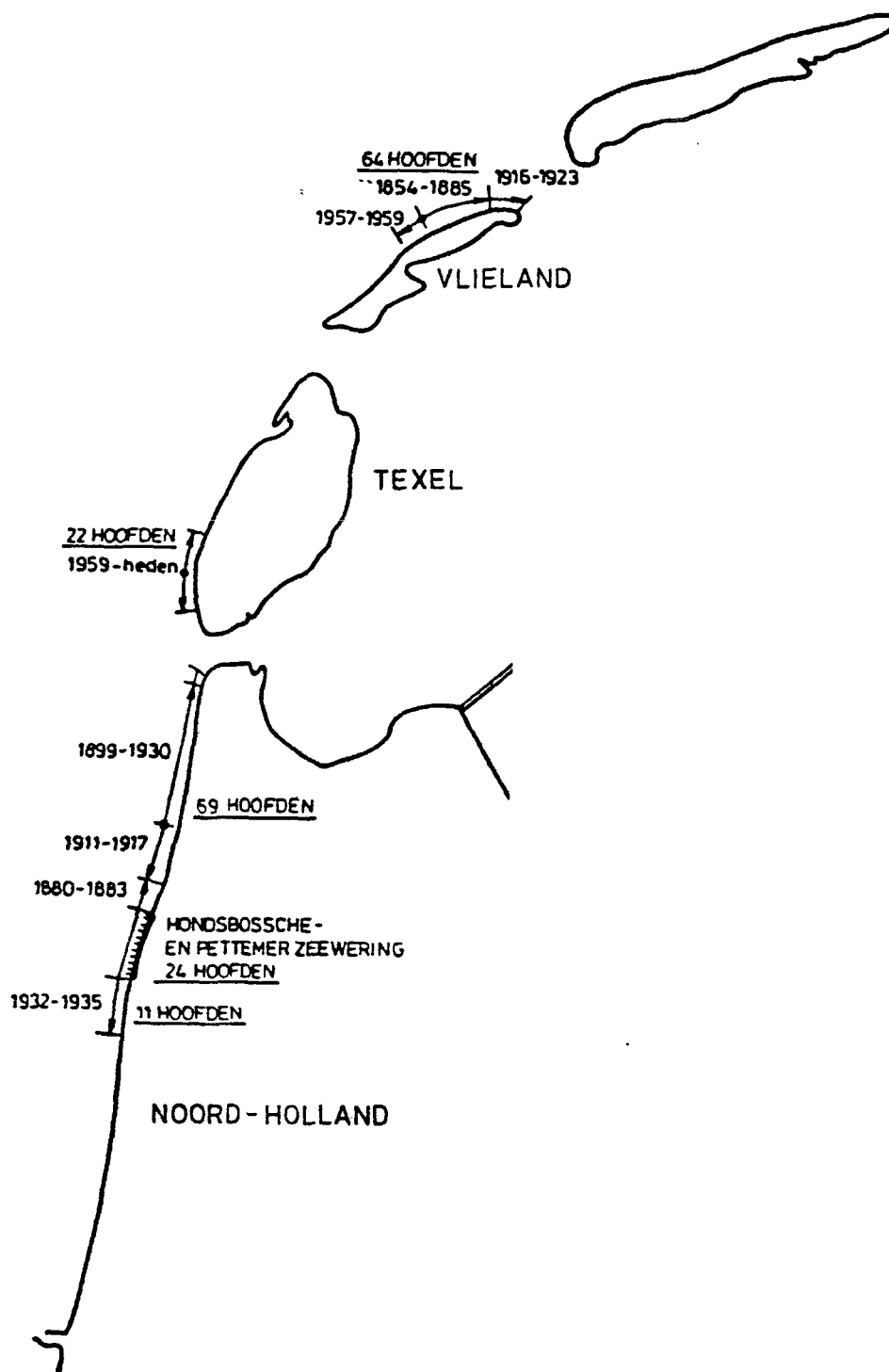


fig. 4.1 Strandhoofden Noord-Holland en Waddeneilanden.

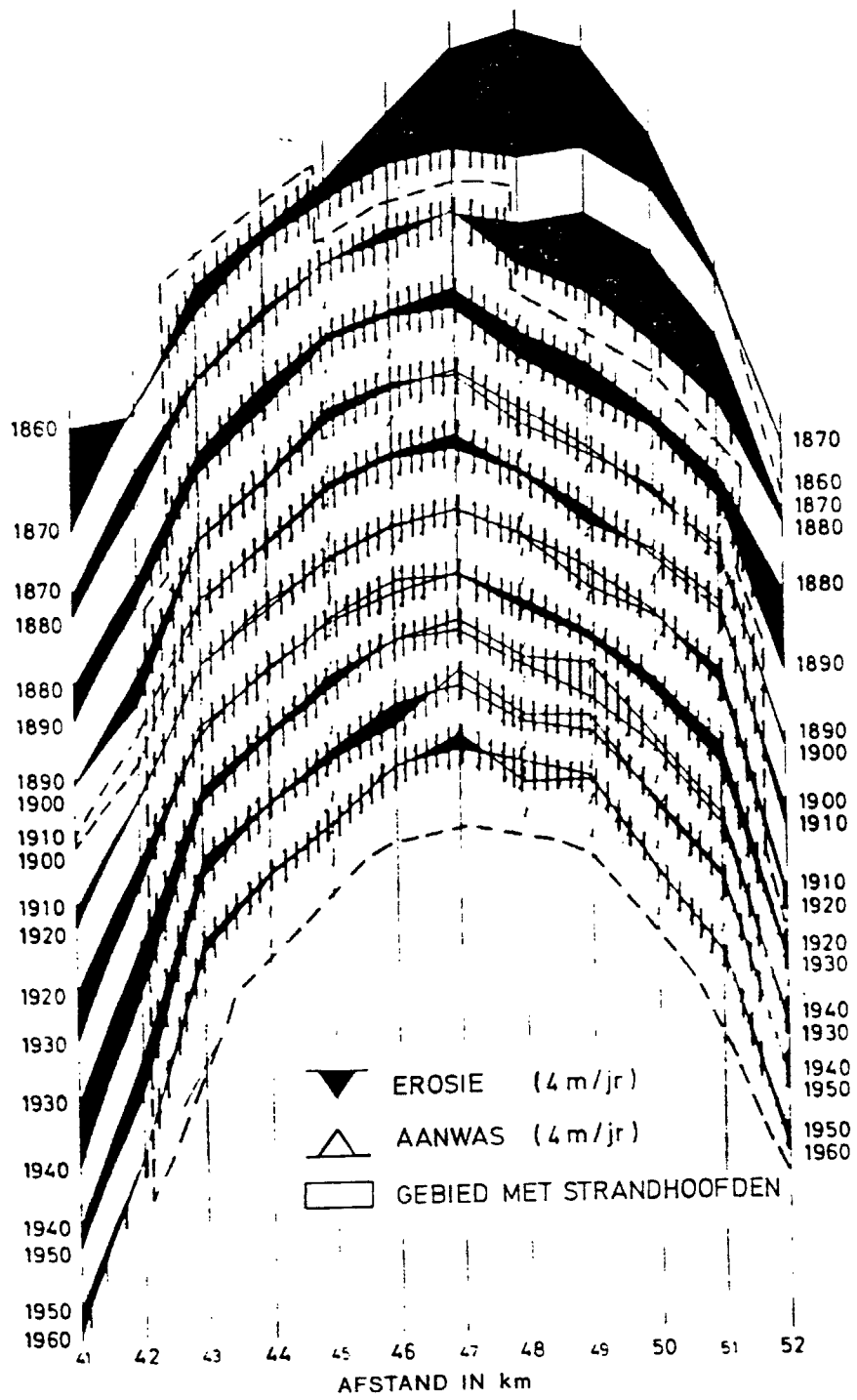


fig. 4.2 Erosievergelijking van Vlieland.

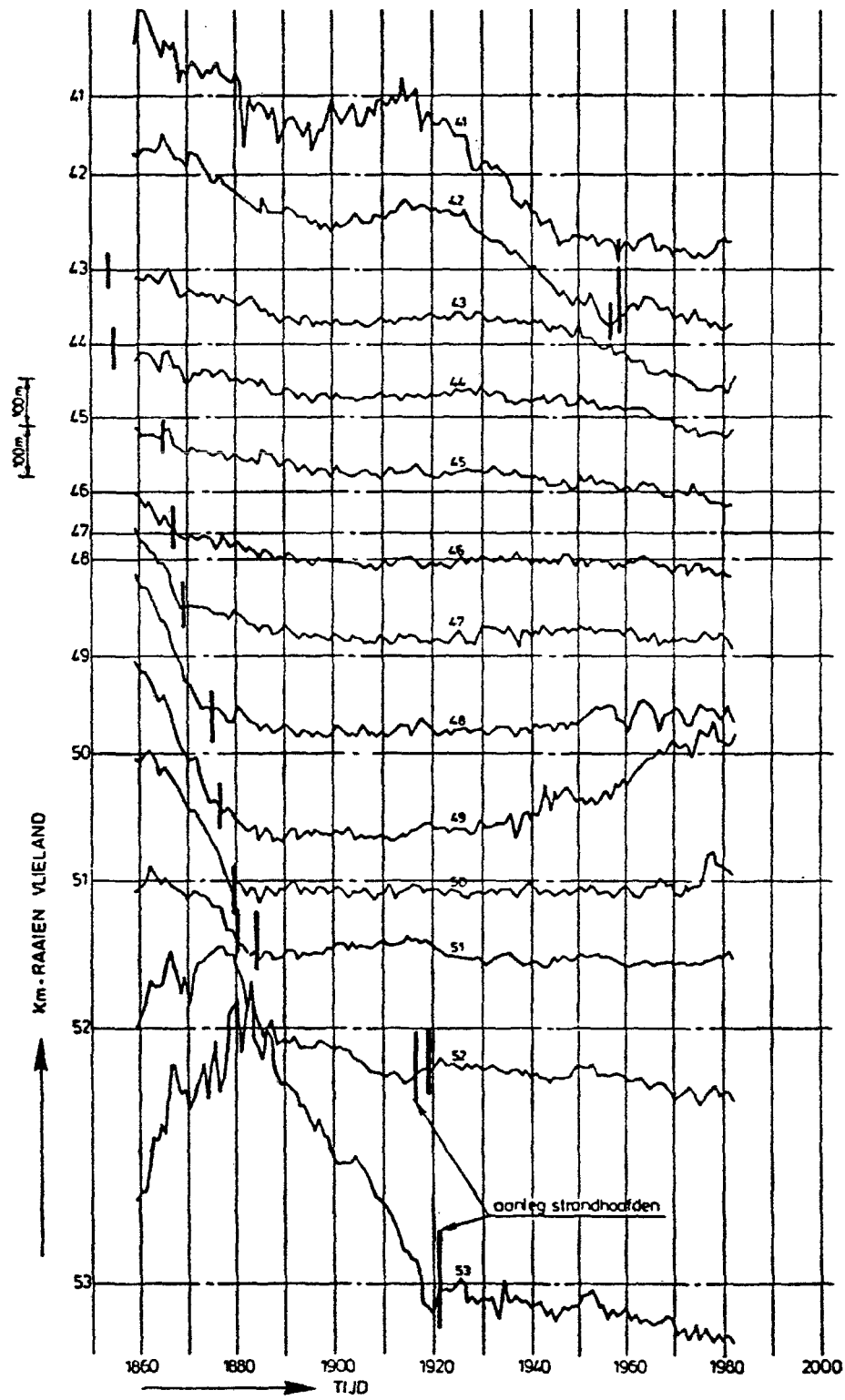


fig. 4.3 Bliksemgrafieken van een deel van Vlieland.

De waargenomen erosie in figuur 4.2 tussen 1860 en 1880 kan echter volledig het gevolg zijn van de lijzijde erosie ten gevolge van het reeds verdedigde kustvak. Op Vlieland is sprake van een duidelijk overheersende golfaanval uit westelijke richting, waardoor er een resulterend brandingsstroomtransport in oostelijke richting is. Er is dus duidelijk een lijzijde en een loefzijde aanwezig.

In het niet-verdedigde kustvak ten westen van raai 43 is na 1860 de kusterosie ook veel lager dan de waarden die volgen uit de periode 1600 - 1750 en 1750 - 1850, maar de erosie is daar niet tot nul gereduceerd. In de vorm van het eiland Vlieland (zie figuur 3.7) is ook duidelijk te zien dat het oostelijk deel als een soort bolwerk in zee steekt t.o.v. het westelijk deel.

Het feit dat na de bouw van een strandhoofd de snelle kustachteruitgang in de raaien 46 t/m 53 steeds tot staan gebracht wordt (zie fig. 4.3), zegt niets over de grootschalige effectiviteit van deze hoofden, omdat ze steeds in het lijerosiegebied van hun voorgangers gebouwd zijn. Maatgevend voor de beoordeling van het hoofdenstelsel is het gemiddeld kustgedrag in de raaien 35 - 45 over de periode 1800 - 1900. Deze gegevens zijn echter niet aanwezig.

Op het eiland Vlieland treden zandgolven op. De zandgolven op de Waddeneilanden vinden zeer waarschijnlijk hun oorsprong in aanlandende banken aan de westzijde van de eilanden. Deze banken verplaatsen zich dan oostwaarts, waarbij de amplitude vermindert. De zandgolven langs de Waddeneilanden lijken meer op eenlinggolven dan op oscillaties.

De zandgolf, die zeer duidelijk waarneembaar is in de raaien 41 en 42, is nauwelijks meer te zien in de meer oostelijke raaien. Het ligt daarom voor de hand te veronderstellen dat de strandhoofden de zandgolven versterkt uitdempen in het kustprofiel boven de laagwaterlijn. Op grond hiervan kan men dus voorzichtig concluderen dat strandhoofden een stabiliserende werking hebben op de strandligging.

De uitbreiding van het hoofdenstelsel op Vlieland in 1920 en 1958 hebben het algemene beeld niet echt veranderd. De meest westelijke hoofden zijn overduidelijk in het dal van een zandgolf gebouwd, en daarom mag hieraan niet zonder meer effectiviteit t.a.v. langjarige erosie worden toegeschreven. De hoofden aan de oostzijde liggen in de invloedssfeer van de getijgeul Het Stortemelk. Het is moeilijk zonder zeer gedetailleerde analyse hieraan conclusies te verbinden.

Het effect van de strandhoofden op Vlieland kan als volgt samengevat worden:

- De hoofden hebben een stabiliserende invloed gehad op het kustgedrag.
- Het met hoofden verdedigde deel van de kust steekt als een soort bolwerk in zee.
- Er is sterke lij-erosie opgetreden, die door nieuwe hoofden gecompenseerd moest worden.

Op grond hiervan kan geconcludeerd worden dat de kans dat de hoofden op Vlieland enige invloed op het langjarig kustgedrag gehad hebben. Die invloed wordt als ingeschat: redelijk groot, orde 70 %.

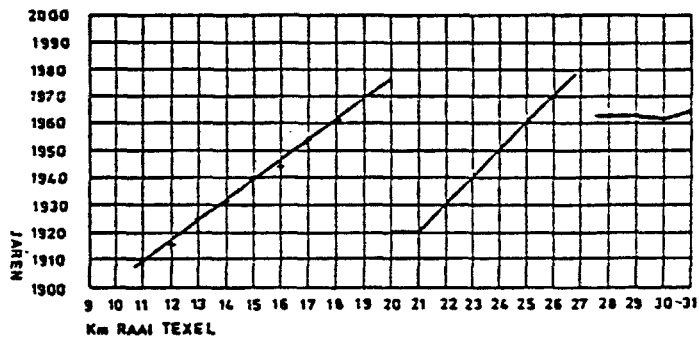


fig. 4.4 Moment van passeren van de zandgolf op Texel.

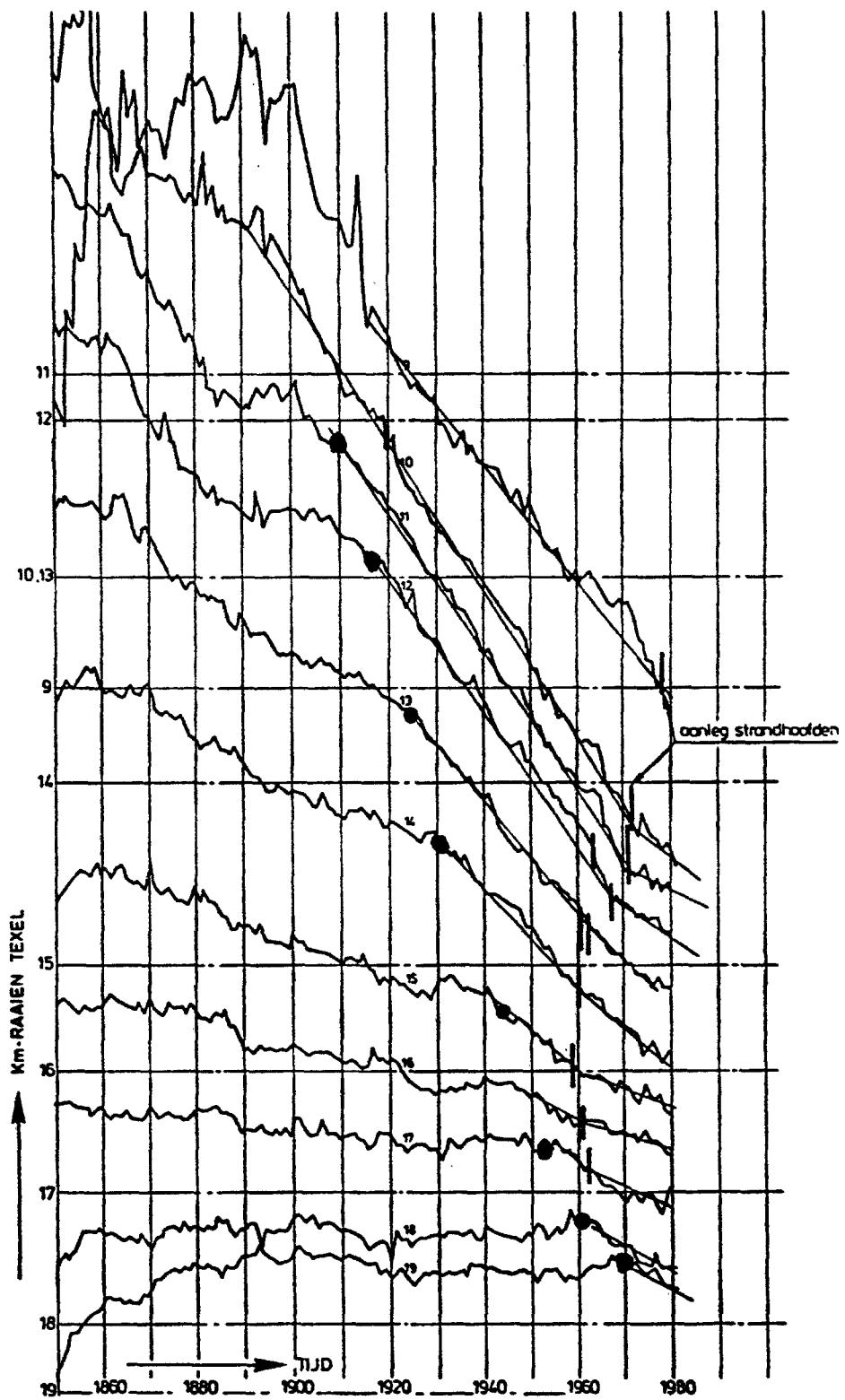


fig. 4.5 Bliksemgrafieken van een deel van Texel.

4.3 Texel

Op Texel (zie figuur 4.1) zijn tussen 1959 en 1987 langs de zuidelijke helft van de kust 24 hoofden en enkele paalrijen gebouwd. Begonnen werd rond raai 15 waar in 1959 en 1960 over 2 km strandhoofden werden aangelegd. Naar het noorden werd in de loop der tijd de verdediging met nog 2 km uitgebreid. Naar het zuiden toe werd over nogmaals 4 km de kust met strandhoofden verdedigd.

De bouw van de strandhoofden is zo recent, dat met een beschouwing van de bliksemgrafieken kan worden volstaan. Aan de ontwikkelingen uit een verder verleden (figuur 3.7) is trouwens te zien dat de kust hier niet altijd erosief is geweest. In 1600 lag de kust veel verder naar binnen. Rond 1750 is een plaat met de kust verheeld. Stuifzand van deze plaat laat de duinen aangroeien tot ongeveer 1900. In die tijd is ook de plaat Onrust met de kust verheeld. Rond 1900 is de laagwaterlijn zover geërodeerd en het duin weer aangegroeid, dat een strand van normale breedte overblijft. Gezamenlijk eroderen strand en duin daarna. Dit proces heeft zich zo tot nu toe voortgezet. Bij de interpretatie van de bliksemgrafieken (zie figuur 4.5, ontleend aan Rakhorst [1984b], aangevuld met gegevens tot 1986) moet rekening worden gehouden met een verstoring van het beeld door zandgolven.

Door Rakhorst [1984a] wordt beschreven dat er zandgolf-dal langs de kust loopt met vrij konstante snelheid. In figuur 4.4 is aangegeven waar dit knikpunt als functie van de tijd ligt. Deze punten zijn ook met bolletjes in figuur 4.5 aangegeven. De ongestoorde regressie moet dus bepaald worden vanaf dit moment tot aan de bouw van het strandhoofd. De invloed van de hoofden kan dan bepaald worden door vergelijking van de regressie voor en na de bouw van het strandhoofd.

raai	bouwjaar	kusterosie in m/jaar	
		voor aanleg	na aanleg
10	1972	15	7
11	1971	15	5
12	1968	15	7
13	1960	10	10
14	1960	10	10
15	1959	8	4
16	1960	5	4
17	1962	5	5

Op Texel is er minder duidelijk een overheersende golfrichting aan te wijzen dan op Vlieland. Er is daardoor ook minder sprake van een duidelijke lijzijde erosie. De resulterende brandingsstroom is overigens wel van zuid naar noord gericht. In raai 16 en noordelijker is mogelijk sprake van enige lij-erosie t.g.v. de brandingsstroom.

Daarnaast is er langs de kust van Texel wel sprake van een getijstroom met een duidelijk zuidwaartse gerichte resultante. Deze resulterende, zuidwaarts gerichte getijstroom geeft wel lijerosie aan de zuidzijde. Op Texel zijn strandhoofden gebouwd door op de laagwaterlijn een kop aan te leggen, en daarvandaan een verbindingsdam met de duinvoet. Bij voortgaande terugschrijding van de duinvoet, is de verbindingsdam steeds verlengd, waardoor de hoofden relatief steeds verder in zee gaan steken. De invloed van zo'n hoofd wordt hierdoor in de tijd

steeds groter. Dit verklaart waardoor knikken in de kustregressie niet altijd even scherp zijn.

Gezien de grootte van de kustregressie op Texel en de variaties daarin door zuiver natuurlijke oorzaak (zie bijv. raai 9, in 1915 verandert het karakter van het kustgedrag zeer resoluut; er is echter geen enkel werk uitgevoerd rond die tijd), gezien de kleine afwijkingen in de kustregressie voor een aantal raaien, en gezien de toch nog korte waarnemingsperiode is een absoluut oordeel over de werking van de hoofden op Texel niet mogelijk. Het is echter wel waarschijnlijk dat enkele hoofden in staat geweest zijn de kustregressie te verminderen. Op grond hiervan moet dus geconstateerd worden dat de kans op werking van de hoofden op Texel ongeveer 50 % is.

4.4 Noord-Holland

In de 20 km tussen de Hondsbossche en Pettemer Zeewering en de Helderse Zeewering bevinden zich 69 hoofden (zie figuur 4.6). Vanaf 1880 tot 1883 werd over 2 km hoofden aangelegd voor Callantsoog, welke verdediging tot 1930 uitgebouwd werd tot aan de Helderse Zeewering. Het overblijvende gat tussen Callantsoog en de reeks ten noorden van Petten werd met strandhoofden gevuld tussen 1911 en 1917. Ten zuiden van de Hondsbossche Zeewering is van 1932 tot 1935 over 4 km een reeks hoofden aangelegd, later aangevuld met een kilometer paalrijen.

In 1600 lagen de duinen en dijken bij Den Helder een kilometer naar buiten (zie figuur 4.6, ontleend aan Ligtendag [1987]). Het oprukken van het diepe Marsdiep naar het zuiden en het diepe Schulpengat naar het oosten leidde tot verdwijnen van het duin en het prijsgeven van de ene dijk na de andere [Schoorl, zj.]. Rond 1750 werd een stabiele situatie bereikt, hetzij door verbeterde dijkbouw, hetzij door een morfologisch gestabiliseerde situatie. Hetzelfde Schulpengat erodeerde de drie kilometer duin die ten zuiden van de Helderse Zeewering lag. De rest van de kust ten noorden van Petten was na 1600 een vlakte die met hoog water onderstroomde, met uitzondering van 2 km duin bij Callantsoog en een miniem duin enkele kilometers noordelijker. Rond 1600 zijn over het gehele traject (zand-)dijken aangelegd. Deze dijken lagen in de meeste gevallen een kilometer naar binnen, zodat er een zeer breed strand was. Na 1600 is dit strand teruggeschreden en heeft het opgestoven zand van de dijken naar voren groeiende duinen gemaakt. In 1750 is lokaal nog een breed strand aanwezig [Schoorl, zj.], maar bij het begin van de bliksemgrafieken in 1843 is overal het strand teruggebracht tot normale breedtes. Vanaf dan eroderen laagwaterlijn en duin in gelijk tempo.

Op basis van het voorgaande mag aan de ontwikkeling tussen 1600 en 1750 niet veel waarde worden toegekend bij de regressieanalyse om tot beoordeling van de werking van de strandhoofden te komen. De situatie in die tijd was een compleet andere.

Van het gebied ten noorden van de Pettemer Zeewering staan de erosiesnelheden in onderstaande tabel. Daarbij is uitgegaan van de gevolgen van de bouw van een strandhoofd 2 km verderop in zuidelijke richting.

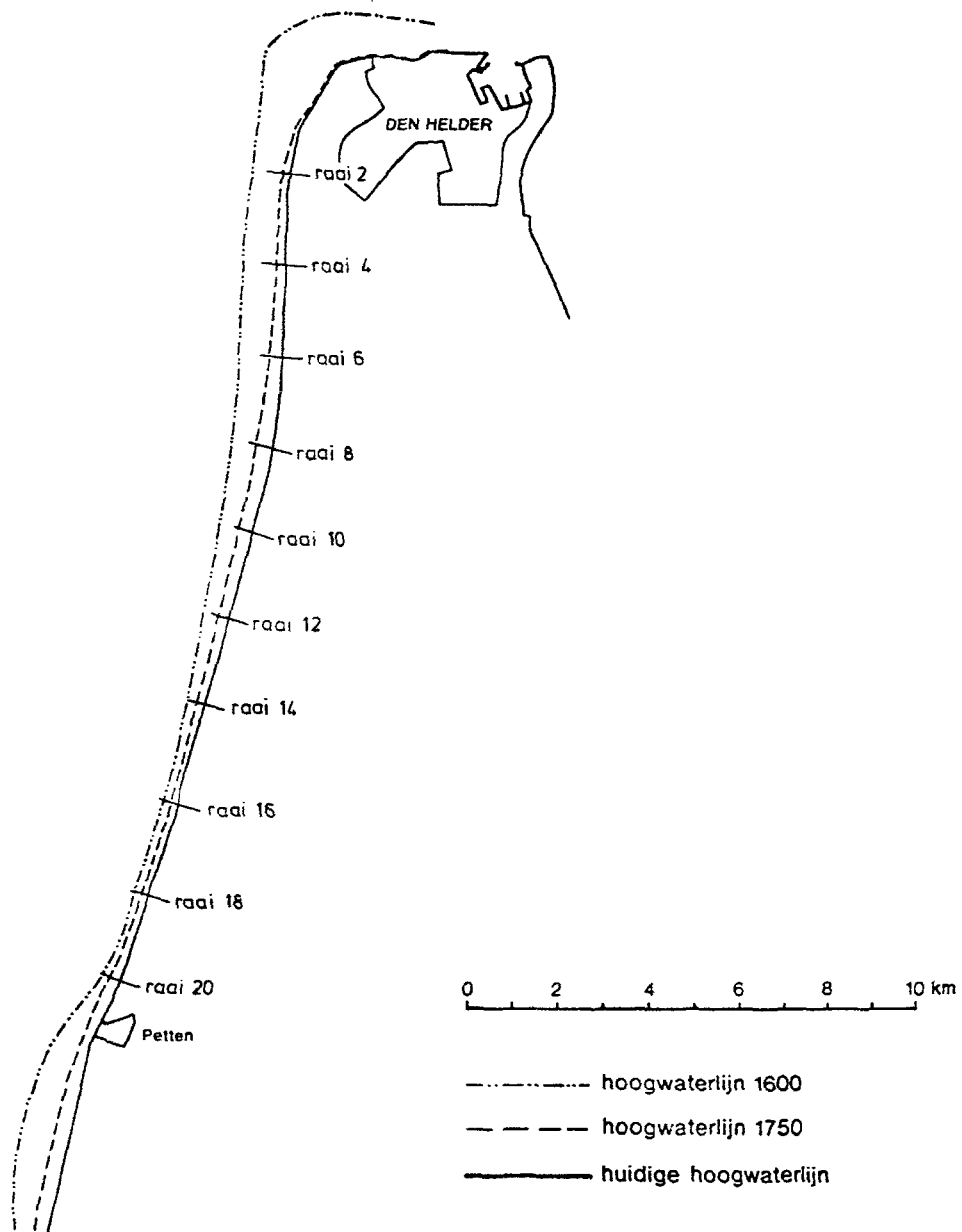


fig. 4.6 De ontwikkeling van Noord-Holland.

Deze afstand is genomen om de directe lij-erosie effecten uit te schakelen. De getallen zijn in dit geval gebaseerd op laagwaterlijn-gegevens.

raai	bouwjaar	erosiesnelheid in m/jaar	
		1843 - bouw	bouw - 1984
2	1916	0.5	1.6
3	1914	0.4	1.1
4	1912	0.4	1.1
5	1910	0.4	1.4
6	1909	0.0	1.6
7	1907	0.0	1.4
8	1902	0.3	1.5
9	1901	0.3	1.3
10	1900	1.1	0.7
11	1899	1.4	0.5
12	1899	0.9	0.5
13	1899	0.9	-0.2
14	1899	0.0	0.2
15	1899	0.0	0.2
16	1883	0.0	1.0
17	1882	0.0	1.5
18	1880	1.6	1.2
19	1859	0.6	0.7
20	1840	0.9	0.8

Voor raai 2 t/m 9 is sprake van een toename van de erosiesnelheid na de bouw van de hoofden, voor de raaien 10 t/m 13 is sprake van een afname van de erosiesnelheid, verder zuidelijk varieert het ongeveer per kilometer.

Door Verhagen [1988] wordt aangegeven dat in dit gebied sprake is van zandgolven die in noordelijke richting lopen. Figuur 3.6 geeft hier een beeld van. De "effecten" van de strandhoofden zijn in dit gebied grotendeels toe te schrijven aan de effecten van zandgolven.

In 1898 heeft men bijv. bij km 13 een hoofd gebouwd (dus precies midden in het dal van de zandgolf). Dit hoofd had succes. Direct na aanleg ging de kust vooruit. Al 10 jaar later kon men duidelijk verbetering waarnemen. In de periode voor 1898 was de erosie 1,3 m per jaar. Tussen 1899 en 1907 ging de kust 70 m vooruit, wat een aanzanding van bijna 9 m per jaar is. Inderdaad een spectaculaire verbetering, die naar de inzichten van die tijd, geheel aan het strandhoofd te danken was. Het hoofdenstelsel werd vervolgens vrij snel noordwaarts uitgebreid. Na de bouw van strandhoofd 11 in 1902 was nog verbetering waar te nemen, maar na de bouw van de hoofden bij km 7 en 9 in 1906 en 1910 werd geen kustvoortgang meer waargenomen. Integendeel, na aanleg van de hoofden ging de kust nog sneller achteruit. Rond 1915 werd een serie hoofden gebouwd tussen km 13 en 18, ook met een zeer wisselend succes [Rakhorst, 1984a].

In fig 3.6 kan gezien worden waarom bepaalde hoofden wel en andere geen succes hadden. Alleen bij hoofden die in het dal van een zandgolf aangelegd werden, trad aanzanding op. Uit het grootschalige beeld van fig. 3.6 is te zien dat deze aanzanding weinig tot niets met de aanleg van het hoofd te maken heeft. Het geheel werd veroorzaakt door het

passeren van de zandgolf ter plekke. De gedachte dat de hoofden goed werkten werd nog versterkt doordat de aanleg van de hoofden samen viel met het einde van de Van Straaten-periode (zie fig. 3.4 en 3.5). Hierdoor ging de gehele Hollandse kust aanzanden, maar dat kon men toen natuurlijk nog niet weten.

Ook voor de strandhoofden en paalrijen ten zuiden van de Hondbossche Zeewering is het effect op de regressie bepaald. Ook hier het jaar genomen waarin een strandhoofd 2 km zuidwaarts is aangelegd.

raai	bouwjaar	erosiesnelheid in m/jaar	
		1843-bouw	bouw-1984
27	1839	?	0.2
28	1912	1.6	0.8
29	1933	0.9	1.0
30	1933	0.6	1.4
31	1933	0.2	2.0

In dit gebied zijn zandgolven niet duidelijk traceerbaar, er kan daarom ook geen verband met de plaats in de zandgolf gevonden worden. Wel kan geconcludeerd worden dat geen sprake is van een duidelijke erosieremmende werking in het gehele kustvak.

Ten aanzien van de hoofden in Noord-Holland moet geconcludeerd worden dat hun werking als erosieremmend element geenszins aantoonbaar is. Vermoedelijk hebben deze hoofden dan ook geen erosieremmende werking gehad. De kans op werking wordt daarom ook zeer laag ingeschat, orde 20.

Hierbij moet wel aangetekend worden dat de hoofden nabij de Helderse Zeewering, met de bijbehorende bestortingswerken wel in staat gebleken zijn de oprukkende getijgeul te beteugelen.

4.5 Delfland

De Delflandse hoofden vormen de oudste hoofdenreeks in Nederland die nog in gebruik is. Oorspronkelijk lag ter plaatse een breed duin, dat echter in en na de middeleeuwen wegerodeerde. Daarom werd in 1776 op drie kilometer ten noorden van de toen nog niet bestaande Nieuwe Waterweg begonnen met de bouw van strandhoofden [Van der Kolff, 1983]. Kilometer voor kilometer zijn deze in anderhalve eeuw naar het noorden uitgebreid. Rond 1890 werden de toen nog niet bestaande havenhoofden van Scheveningen gepasseerd. Het laatste hoofd werd rond 1930 vier km ten noorden van de haven van Scheveningen gebouwd. Ten zuiden van de eerste hoofden werden nog drie km kust van strandhoofden voorzien in 1855 en 1856.

In 1600 bevond zich in Delfland een breed duin dat een kilometer ten noorden van het huidige Hoek van Holland eindigde, omdat daar de zeer brede Maasmond in zee uitmondde (zie figuur 4.7, ontleend aan Ligten-dag [1987]). Deze kust erodeerde sneller dan het overgrote deel van de nederlandse kust tussen 1600 en 1750. In de Maasmond vormde zich een zand tong die zich ongeveer vijf kilometer ten zuiden van de oorspronkelijke Maasoevers uitstreekte en de hoofdmonding van de Maas naar het zuiden verlegde. Door deze tong werd rond 1860 de Nieuwe Waterweg

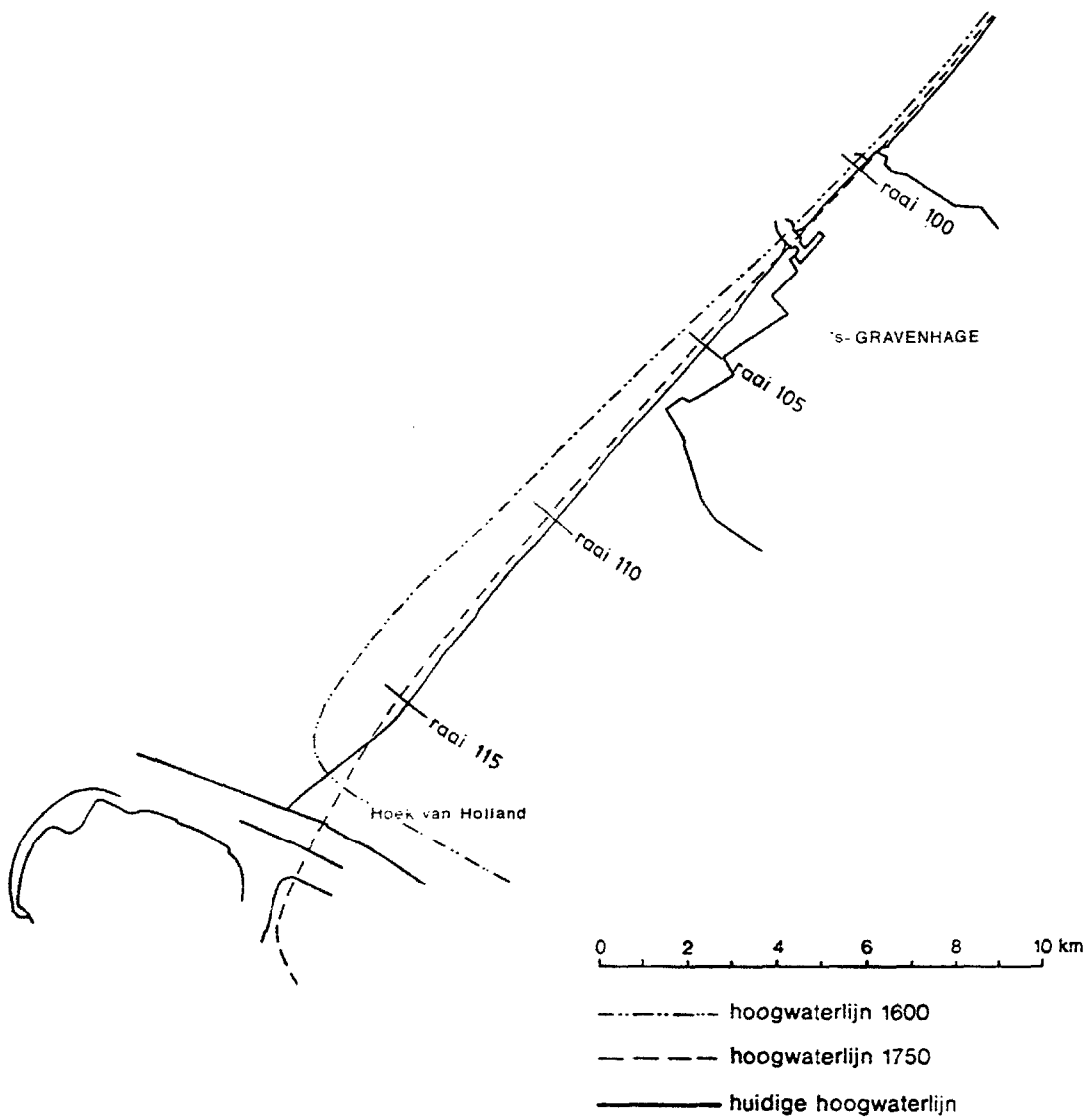


fig. 4.7 De ontwikkeling van Delfland.

gegraven, waarvoor rond 1870 havenhoofden werden gebouwd van bijna 2 km lengte.

Het is heel moeilijk om de effectiviteit van deze strandhoofden te bepalen, omdat de meeste gebouwd zijn voor aanvang van de regelmatige strandmetingen. In de onderstaande tabel is de gemiddelde kustregressie gegeven voor de bouw van het strandhoofd (gebaseerd op de kustlijnen van Ligtendag [1987]) en de kustregressie na de bouw, gebaseerd op de strandmetingen. Als bouwjaar is het bouwjaar van een hoofd 2 km verderop genomen, om geen problemen te hebben met lijerosie.

raai	bouwjaar	erosiesnelheid in m/jaar	
		voor de bouw	na de bouw
102	1890	0.4	-0.5
103	1865	0.2	0.4
104	1861	0.5	0.8
105	1855	0.9	0.8
106	1826	0.7	0.6
107	1826	2.2	0.2
108	1826	1.4	0.4
109	1807	1.9	0.2
110	1792	3.0	0.4
111	1791	3.4	0.3
112	1791	4.4	0.1
113	1776	7.7	0.0
114	1776	7.3	0.3

Met name bij de hoofden in de omgeving van Hoek van Holland is de teruggang van de erosiesnelheid indrukwekkend. Deze sterkte teruggang in erosie is destijds ook de reden geweest om in de 19e eeuw de bouw van hoofden met kracht voort te zetten. Gezien de grootschalige morfologische ontwikkelingen in het gebied, en de grote veranderingen die rond de Maasmond hebben plaats gevonden, is het zeer de vraag, of de vermindering van erosie geheel mag worden toegeschreven aan de strandhoofden. Bovendien is niet bekend in hoeverre deze hoofden invloed gehad hebben op de getijstrooming voor de kust van Delfland, daar deze stromen uit die periode niet precies bekend zijn.

Momenteel is er geen getijgeul voor de kust van Delfland aanwezig. Desondanks is de onderwateroever relatief steil, in ieder geval steiler dan bij vergelijkbare kustvakken langs de Nederlandse kust. Volgens Pluijm [1988] is dit het gevolg van de bouw van de havendammen van Hoek van Holland, en als zodanig dus niet te relateren aan de strandhoofden. Deze versteiling schijnt zich overigens inmiddels gestabiliseerd te hebben, de laatste metingen laten geen verdergaande versteiling meer zien.

Geconstateerd moet worden dat de kustlijn van Delfland rond 1860 gestabiliseerd is. In hoeverre dit zijn oorzaak vindt in de natuurlijke morfologische ontwikkelingen, in de bouw van strandhoofden of in de bouw van de havenmond van Hoek van Holland is momenteel moeilijk te achterhalen. Het lijkt daarom verstandig om de voor 1850 gebouwde hoofden niet bij de analyse te betrekken.

De hoofden ten noorden van Scheveningen zijn gebouwd in een periode die volledig gedekt wordt door de strandmetingen. De eventuele effectiviteit van deze reeks kan daardoor nader beschouwd worden. Hier is de erosie bekeken tussen 1855 en de bouw en na de bouw van het strandhoofd. Ook hier is gekeken naar de bouw van een hoofd 2 km verderop, in verband met mogelijke lijerosie effecten.

raai	bouwjaar	erosiesnelheid in m/jaar	
		1855-bouw	bouw-1960
101	1887	2.5	0.3
100	1887	0.6	0.0
99	1895	0.7	0.0
98	1896	0.2	0.9

Doch hier moet ook grote voorzichtigheid betracht worden. Ook langs de kust van Delfland lopen zandgolven (zie figuur 3.6). Deze golven zijn niet zo groot, maar gezien de relatief geringe kusterosie bij Delfland, moeten zij wel meegenomen worden in de analyse. In figuur 3.9 is dat in detail gedaan voor raai 102. Daaruit blijkt dat de regressielijn toch wel wezenlijk verandert door rekening te houden met zandgolven. Verder blijkt ook uit figuur 3.6 dat vele hoofden op het "goede" moment gebouwd zijn. Ook hier werd de positieve indruk versterkt door het einde van de Van Straaten-periode.

Zeer illustratief is ook het effect van de aanleg van de havendammen van Scheveningen in 1900 - 1904 (km 101.5). Deze dammen zijn in het aanzandingspatroon in de jaren na 1900 nauwelijks terug te vinden. Het enige wat men ziet is dat de in periode 1910 - 1930 de amplitude van de zandgolf tot ca 5 km ten noorden van de haven wat vergroot is.

Daarnaast is in de periode tussen 1895 en 1909 de boulevard van Scheveningen aangelegd (raai 99 - 101). De invloed van deze boulevard is niet aantoonbaar in de bliksemgrafieken; de interactie tussen de boulevard en de strandhoofden is derhalve ook niet geheel duidelijk.

Op grond van bovenstaande overwegingen moet geconstateerd worden dat ten aanzien van de hoofden, gebouwd voor 1850 geen uitspraak gedaan kan worden, en dat de kans dat de hoofden die na die tijd gebouwd zijn, enig effect gehad hebben op de kustontwikkeling vrij klein is. De "kans op werking" wordt voor deze hoofden ingeschat op niet meer dan 20 %.

4.6 Schouwen

Aan de noordoever van Schouwen rukte het Brouwershavense Gat steeds verder op naar de oever. Ter bescherming van dijken en duinen ten westen van Brouwershaven is men halverwege de 19e eeuw begonnen met uitgebreide beteugelingswerken (bestortingen en hoofden). Het westelijk deel van dit kustvak bestaat uit een duinkust. Daar zijn vanaf 1834 enige strandhoofden gebouwd. (zie figuur 4.8). Deze reeks is in de jaren daarna naar het oosten uitgebreid. In 1846 werd oostelijker begonnen met een nieuwe reeks. Hierop sloot de eerste reeks in 1881 aan, zodat een doorgaande reeks ontstond. De geul ligt pal voor de koppen van de strandhoofden.

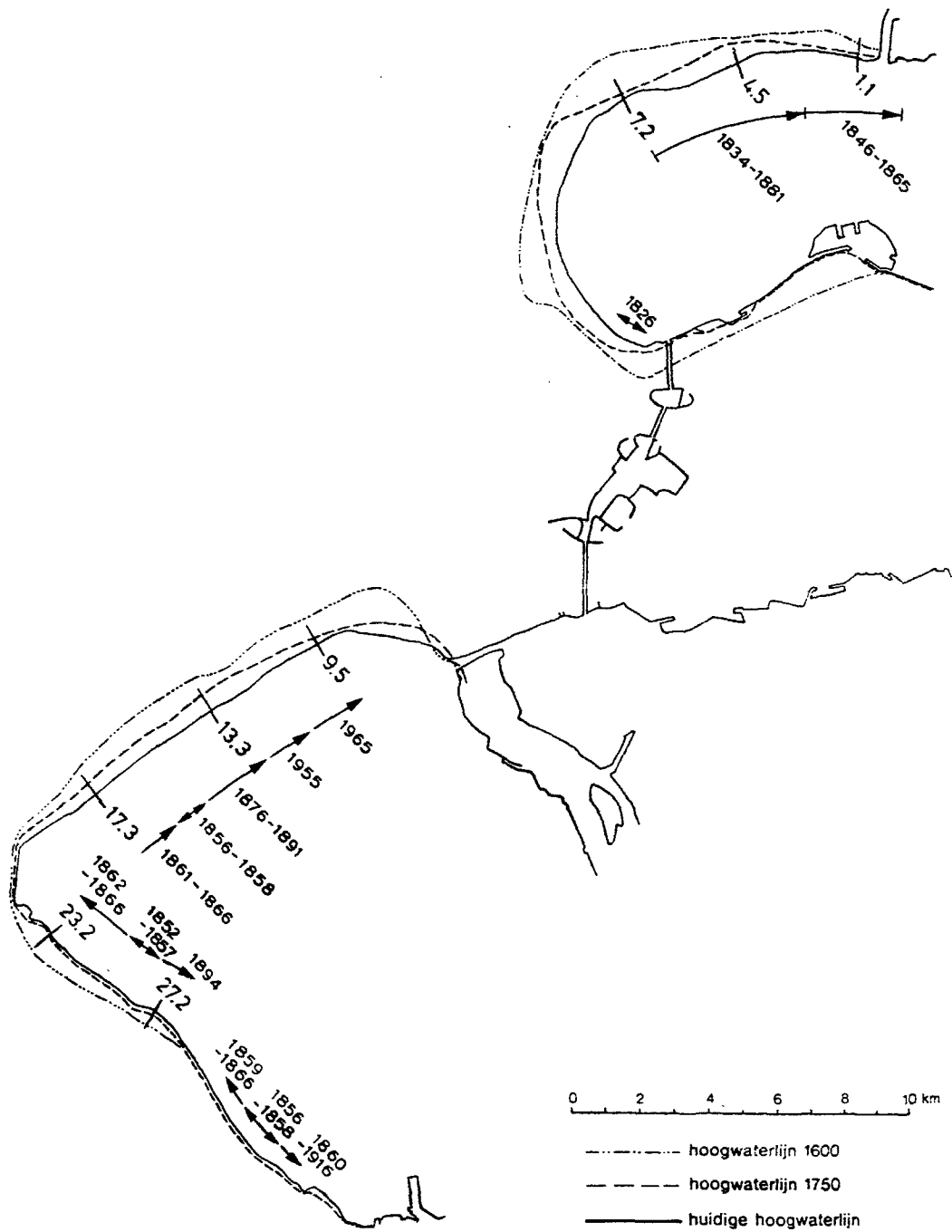


fig. 4.8 De ontwikkeling van Schouwen en Walcheren.

Aan de zuidwestzijde rukte het Krabbengat steeds verder op. Daar werden tussen 1826 en 1883 zeven hoofden gebouwd. Ten noorden daarvan is in de zeventiger jaren een reeks paalschermen gebouwd. Op deze paalschermen zal in hoofdstuk 5 nader worden teruggekomen.

Uit de kustlijn van 1600 en 1750 (figuur 4.8) is duidelijk te zien dat niet alleen erosie optrad, maar ook het verschuiven van de meest naar buitengelegen kustvakken. Hier spelen zandgolven een belangrijke rol. Rond 1960 komt de top van een zandgolf bij de noordelijke strandhoofdenreeks, die zich in 1890 vier kilometer westelijk bevond. Ook de bliksemgrafieken van de zuidwestelijke hoofdenreeks worden door een zandgolf verstoord. Bij de beoordeling van de hoofden moet hier terdege rekening mee worden gehouden.

Voor de noordelijke hoofdenreeks is met behulp van fig. 4.8 en de bliksemgrafieken onderstaande tabel opgesteld. De raainummers zijn vertaald uit een ondertussen verlaten systeem naar het nu gangbare uniforme raai-stelsel. Wederom is uitgegaan van de gevolgen van een 2 km verderop gelegen hoofd.

raai	bouwjaar	erosiesnelheid in m/jaar	
		1750-1865	1886-heden
0.7	1846	1.7	0.1
1.1	1846	1.8	0.0
1.5	1846	1.2	0.2
2.0	1846	0.7	0.2
2.3	1846	0.7	0.2
2.6	1877	1.2	0.0
3.0	1876	1.3	0.5
3.3	1868	2.0	0.6
3.6	1867	2.3	0.3
4.1	1866	2.8	0.3
4.5	1865	3.2	0.3
4.8	1864	5.2	0.1
5.1	1860	5.8	0.1
5.4	1856	5.4	0.0
5.6	1837	5.4	0.0
5.9	1834	5.4	0.2
6.3	1834	5.4	0.0
6.5	1834	5.0	-0.5
6.8	1834	5.4	-1.0
7.1	1834	4.7	-2.1
7.4	1834	5.9	-3.9
7.7	1834	5.1	-3.6

Over het gehele gebied is de erosie sterk verminderd na aanleg van de strandhoofden. In het gebied ten zuid-westen van raai 6 is zelfs aanzanding opgetreden. Dit laatste is echter meer het gevolg van de voorttrekkende zandgolven, dan een gevolg van de strandhoofden. In het meer oostelijke gebied is de erosie duidelijk door de strandhoofden tot staan gebracht. Deze hoofden functioneerden hier als stroomkribben in de getijgeul van het Brouwershavense Gat. Na de bouw van de Brouwersdam (raai 0.5) was er geen stroming meer. Wel is er een duidelijke scheef invallende golf (alle golven komen hier uit het noordwesten), dus er is een brandingsstroom transport van west naar oost. De

strandhoofden remmen dit transport momenteel enigszins. Het gevolg hiervan is dat de verwachte aanzanding van het Noorderstrand van Schouwen wat langzamer gaat dan verwacht. Het zand "blijft steken" op het strand bij raai 5 en omgeving. De aanzanding van de onderwateroever gaat nauwelijks langzamer, er ontstaat een relatief brede onderwaterberm.

Geconcludeerd moet worden dat de hoofden bij het Noorderstrand voor de afsluiting van de Brouwersdam gewerkt hebben als stroomkrib (kans op werking 80 %). Na de afsluiting hebben de hoofden gewerkt als brandingsstroomremmer en hebben het strand lokaal verbreed. De "kans op werking" wordt t.a.v. het strand ingeschat op 70 %, voor de onderwateroever op 20 %.

Voor de zuidwestelijke hoofden geldt de onderstaande tabel:

raai	bouwjaar	erosiesnelheid in m/jaar	
		1750-1861	1861-1964
16.9	1826	3.8	-0.2
17.2	1826	4.1	-0.5
17.6	1826	2.4	-0.7

Ook hier is sprake van een sterke erosie voor de bouw en een veel mindere erosie na de bouw. Ook deze hoofden werken als stroomkribben van de Hammen. De "kans op werken" van deze hoofden wordt derhalve ingeschat op 80 %.

4.7 Walcheren

De Noordwestkust van Walcheren is in enkele eeuwen ca. 1 km geërodeerd. In de 17e eeuw is begonnen met de bouw van bescheiden strandhoofden. Deze hoofden bestaan echter niet meer. In 1856 is men begonnen om een kustvak van 1 km lengte van hoofden te voorzien. Van 1861-1866 is de ruimte tussen deze hoofden en de Westkappelse Zeedijk met hoofden gevuld. Aan de noordkant is 2 km uitgebouwd tussen 1876 en 1891, aangevuld met 1,5 km in 1955. In 1965 is aansluitend nog 1,5 km paalrijen gebouwd. De onderwateroever is relatief steil, 1:25 tot 1:50; er ligt een soort geultje voor de kust. Dit geultje wordt Urk genoemd. Waarin sinds 1890 niet veel verandering gekomen.

De dynamiek van de Zuidwestkust van Walcheren wordt geheel bepaald door het direct onder de oever liggende Oostgat, een diepe getijgeul van de de Westerschelde. De hellingen variëren van 1:5 tot 1:25. Plaatselijk rukt deze geul landwaarts op, op andere plaatsen heeft men dat door nollen en strandhoofden trachten te voorkomen. De natuurlijke oostwaartse verplaatsing van het Oostgat is langzaam, maar gestaag. Dit komt door harde lagen in de diepere ondergrond, die de erosie op grotere diepte beperken. Ten noorden van Vlissingen is begonnen in 1856 met het bouwen van 3 km strandhoofden. Naar weerszijden is dit strandhoofdenvak vervolgens uitgebreid, het laatste hoofd in het noorden is in 1866 aangelegd, in zuidelijke richting tot 1916. Ten noorden van dit stuk is ca 3 km onbeschermd strand. Daarna is 5 km hoofden aangelegd tot aan de Westkappelse Zeedijk. Er werd begonnen op 3 - 4 km vanaf de dijk in 1852. Het gat tot aan de dijk werd gevuld in de periode 1862-1866. De zuidelijkste kilometer werd gebouwd in 1894.

Verplaatsing van laagwaterlijnen voor de noordwestkust Walcheren na eliminatie van de lokale gemiddelde regressie

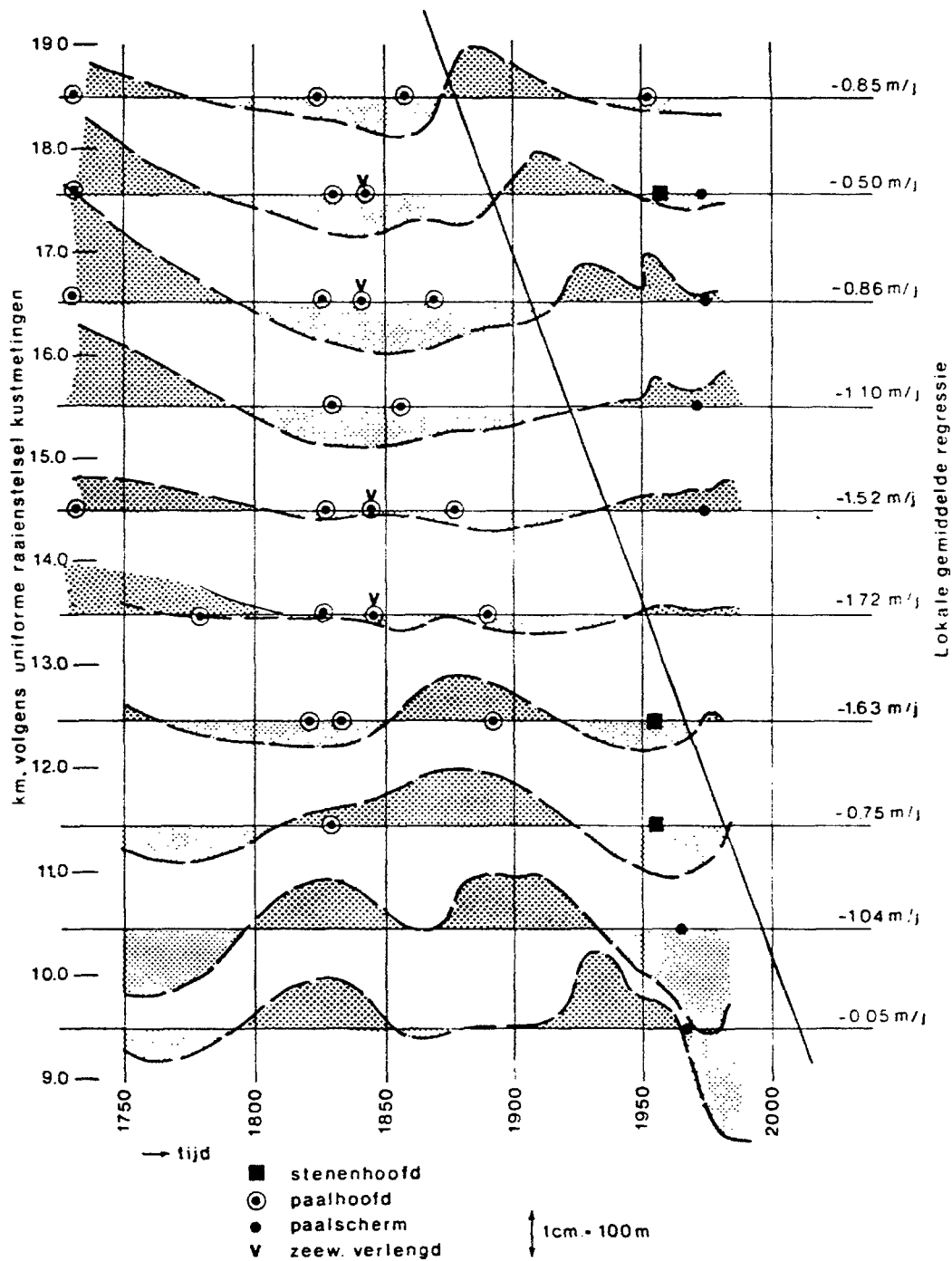


fig. 4.9 Zandgolf op Walcheren.

De erosiesnelheden zijn voor de Noordwestkust in de volgende tabel samengevat; ook hier is wederom de waarde genomen t.g.v. de bouw van een strandhoofd 2 km verderop. De raainummering is omgezet naar het huidige uniforme raai-stelsel.

raai	bouwjaar	erosiesnelheid in m/jaar	
		1750-bouwjaar	1890-1967
9.5	1955	0.3	3.3 *
9.7	1955	0.0	6.2 *
10.1	1955	0.2	8.3 *
10.5	1955	0.6	6.2 *
10.9	1891	4.0	4.3
11.3	1891	-0.5	4.3
11.7	1890	2.0	3.0
12.1	1890	1.8	3.4
12.5	1856	2.1	2.8
12.9	1856	2.9	1.4
13.1	1856	2.6	1.2
13.7	1856	5.8	0.7
14.1	1856	2.5	0.1
14.5	1856	2.8	0.1
14.9	1856	2.7	0.3
15.3	1856	2.7	0.3
15.7	1856	3.0	-0.9
16.1	1856	3.2	-0.7
16.5	1856	2.9	0.0
16.9	1856	2.1	0.1
17.3	1856	2.1	0.1

* bij deze waarden is de erosie gemeten over de periode 1955-1967

Langs de Noordwestkust van Walcheren is een sterke zandgolfactiviteit, die het beeld in detail behoorlijk verstoort (zie figuur 4.9, ontleend aan Maranus [1986]). Doch los van deze zandgolf kan gesteld worden dat de erosie in het gebied juist ten n.w. van de Westkappelse Zeedijk behoorlijk verminderd is door de strandhoofden. Voor het meer oostelijke deel is dat in mindere mate van toepassing. Feitelijk vangen de hoofden hier een deel van de lijerosie op die ontstaat t.g.v. de Westkappelse Zeedijk. In het oostelijk deel is de ligging van de Urk maatgevend voor het al dan niet eroderen van het kustvak. De ligging van deze geul hangt daar ter plaatse sterk af van de dynamiek van de morfologie in de Oosterscheldemonde, en is dientengevolge niet direct gekoppeld aan de kust. De "kans op werking" van de hoofden in dit kustvak wordt op grond van bovenstaande gegevens ingeschat op 60 %.

Voor de 5 km strandhoofden ten zuiden van de Westkappelse Zeedijk is de erosie tussen 1750 en 1967 uit figuur 4.8 minder dan 100 m. Deze waarde is kleiner dan de nauwkeurigheidsmarge van het historische kaartmateriaal en wordt daarom niet gebruikt. Raai 23.1 ligt tegen de dijk aan.

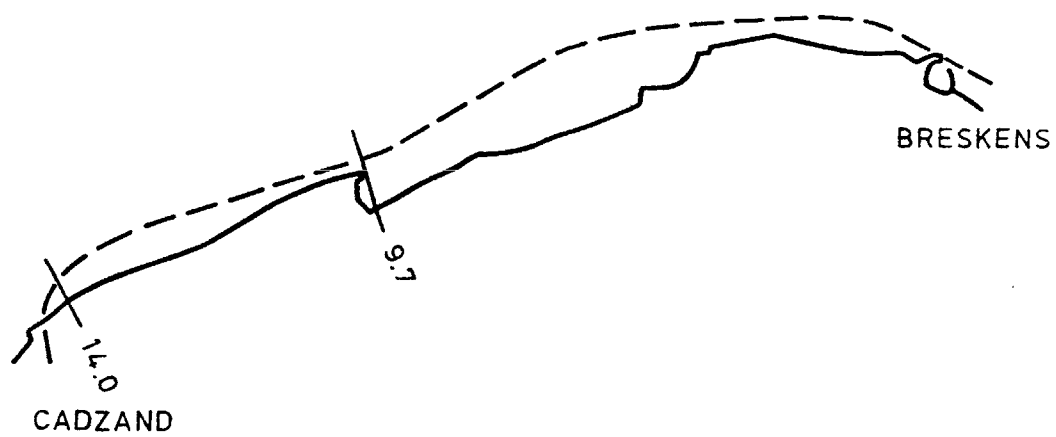
raai	bouwjaar	erosiesnelheid in m/jaar	
		1600-1750	1890-1967
23.1	1866	4.7	0.4
23.6	1866	4.0	0.5
24.0	1856	4.0	0.4
24.4	1856	3.3	0.6
24.8	1856	3.3	0.8
25.2	1856	3.3	0.4
25.6	1856	2.7	0.4
26.0	1856	2.3	0.3
26.4	1856	1.7	0.9
26.8	1856	1.7	1.0
27.2	1856	2.3	0.9

Na 1890 zijn de erosiesnelheden aanmerkelijk minder geworden. In dit geval werken de hoofden zeer nadrukkelijk als stroomkribben in het Oostgat. Zij zijn dan ook voorzien van soms zeer zware kopbestortingen, om hun stabiliteit te garanderen. Geconcludeerd moet worden dat deze hoofden goed werken; de "kans op werken" is derhalve 80 %.

De drie km strandhoofden ten noorden van Vlissingen bevinden zich in een situatie die kennelijk al eeuwen stabiel is (zie figuur 4.8). De bliksemgrafieken laten in een enkele raai 40 m erosie zien; in een andere 20 m erosie; de rest vertoont minder dan 10 m erosie. Dit wekt de suggestie op dat er weinig veranderd is door de bouw van de strandhoofden. Dit beeld wordt echter gecorrigeerd door de Bruin [1956]. Rond 1300 lag de kust hier ongeveer een kilometer meer naar buiten, en had toen dijken in plaats van duinen. Na enkele doorbraken is in de volgende eeuwen de kustlijn uit 1600 bereikt. Op een kaart rond 1560 [de Bruin, 1956] is te zien dat deze kustlijn toen al werd verdedigd door strandhoofdachtige constructies. Op dezelfde kaart zijn al duinen waar te nemen. Met deze gegevens kan toch besloten worden tot een relatief hoge "kans op werken", orde 70 %. Dit wordt verklaart door het functioneren als stroomkribben.

4.8 Zeeuws-Vlaanderen

De kust van Zeeuws-Vlaanderen bestaat uit een mengeling van dijk en duin. Duinen zijn vaak tegen dijken opgestoven. Soms zijn ook polders geïnundeerd, waarvan de binnendijk dan de nieuwe waterkering is gaan vormen, eventueel met voorgestoven duin. Voor de gehele kust liggen strandhoofden, die gebouwd zijn gedurende een groot deel van de vorige eeuw. Het kustprofiel staat tamelijk steil, 1:10 tot 1:25. Voor de kust langs loopt de hoofdgeul van de Westerschelde, de Wielingen. In het westelijk deel ligt deze geul niet vlak onder de kust. Daar is een kleine nevengeul ontstaan, de Appelzak, die inmiddels op Belgisch grondgebied "doodloopt" in de havenuitbreiding van Zeebrugge. Omdat polderinundatie een verstorend element is voor de in dit rapport gebruikte beschouwingen wordt hier alleen in detail gekeken naar het stuk duin van 5 km bij Cadzand. Hiervan zijn bliksemgrafieken beschikbaar van 1900 - 1965 en de kustlijn van 1750 (zie figuur 4.10).



0 2 4 6 8 10 km

--- laagwaterlijn 1750
 — huidige hoogwaterlijn

fig. 4.10 De ontwikkeling van Zeeuwsch-Vlaanderen

De erosiesnelheden zijn in onderstaande tabel weergegeven.

raai	erosiesnelheid in m/jaar	
	1600-1750	1890-1967
9.7	0.9	-0.6
9.9	0.6	0.2
10.2	0.5	0.3
10.4	0.5	0.5
10.6	0.7	0.0
10.8	1.4	-0.2
11.0	1.7	0.0
11.2	1.9	0.3
11.5	2.1	0.5
11.8	2.3	0.9
12.1	2.8	0.5
12.3	2.7	0.6
12.5	2.5	1.1
12.8	2.9	0.2
13.1	2.8	-0.3
13.5	2.4	-0.2
13.7	2.5	-0.5
14.0	1.9	0.2

Het is duidelijk dat over de gehele lijn de erosie minder geworden is na 1890. Het is te verwachten dat dit deels veroorzaakt is door de aanleg van de hoofden in de 2e helft van de 19e eeuw. In dit kustvak is ook sprake van een sterke getijstroom langs de kust, de hoofden hebben ook hier een duidelijke kribfunctie. Een en ander is voor dit kustvak in detail geanalyseerd door Verhagen en Butter [1985].

Langs dit kustvak is ook duidelijk een zandgolf te onderscheiden, de amplitude van deze golf is echter zodanig klein dat het bovenstaande beeld daar niet kwalitatief door verstoord wordt. Geconcludeerd kan daarom worden dat de "kans op werken" voor dit kustvak 80 % is.

4.9 Overzicht van de kans op werking

In deze paragraaf wordt een samenvatting gegeven van de resultaten uit de vorige paragrafen. Benadrukt moet nogmaals worden dat de "Kans op werking" niet de mate van effectiviteit is.

locatie	aantal km	getijgeul	overheersende golfrichting	kans op werken
Vlieland	12		ja	70 %
Texel	9			50 %
Noord-Holland	24			20 %
Delfland (na 1850)	13			20 %
Schouwen Noord	7	ja(vroeger) nee(nu)	ja	80 %
Schouwen Zuid	1	ja		80 %
Walcheren NW	6	enigszins		60 %
Walcheren ZW	8	ja	ja	80 %
Zeeuws-Vlaanderen	10	ja	enigszins	80 %

Samenvattend kan dus geconcludeerd worden dat een onderverdeling in drie categorieën zinvol is:

- kusten langs getijgeulen

Strandhoofden werken hier als stroomkribben, en hebben een grote "kans op werken"; aangenomen kan worden dat strandhoofden in deze gevallen effectief zijn.

- kusten met overheersende golfrichting

Strandhoofden houden hier de brandingsstroom tegen, en zorgen lokaal voor een uitbouw van de kust; er is een redelijk grote "kans op werken"; aangenomen kan worden dat strandhoofden zeker enige effectiviteit hebben.

- kusten zonder overheersende golfrichting

Met uitzondering van Texel blijken strandhoofden langs dit soort kusten nauwelijks enig effect te hebben; de "kans op werken" is erg laag.

5 ERVARINGEN MET PAALSCHERMEN

Paalschermen zijn gebouwd langs de kust van Schouwen en Walcheren, in totaal over een lengte van 21,3 km. In eerste instantie leken de ervaringen met deze hoofden vrij positief. Na plaatsing trad in de meeste gevallen aanzanding op. Na gedetailleerde analyse (zie Roelse [1984]) bleek echter achteraf dat dit in alle gevallen aanzanding was die andere oorzaak had, zoals migrerende zandgolven (zie figuur 5.1, Westkust van Schouwen) en verplaatsen van getijgeulen. Op sommige plaatsen werkten ze zelfs "zo goed", dat de palen vrijwel volledig onder het zand verdwenen (Schouwen). Bij oprukkende getijgeulen bleek dat de palen geen enkele weerstand konden bieden aan het oprukken van de geul, de palen vielen vrij snel om na verdieping van de onderwateroever (o.a. palen van 12 m lengte vielen om t.g.v. het landwaarts verplaatsen van de Urk op Walcheren).

In het kustvak ten zuidoosten van Zoutelande op Walcheren bleken de paalschermen in staat om de ter plaatse optredende lijerosie (ten gevolge van de harde verdediging aldaar) wat te spreiden. De inscharring werd wat minder diep, het eroderende gebied strekte zich echter over een grotere afstand uit.

In een aantal gevallen is tussen twee strandhoofden een paalscherm gebouwd. Het blijkt dat zich tussen de hoofden de gebruikelijke strandboog vormt, en dat de aanwezigheid van het paalscherm geen enkele invloed had op de vorm van deze strandboog. Ook in dit geval moeten dus twijfels gezet worden bij de effectiviteit van paalschermen.

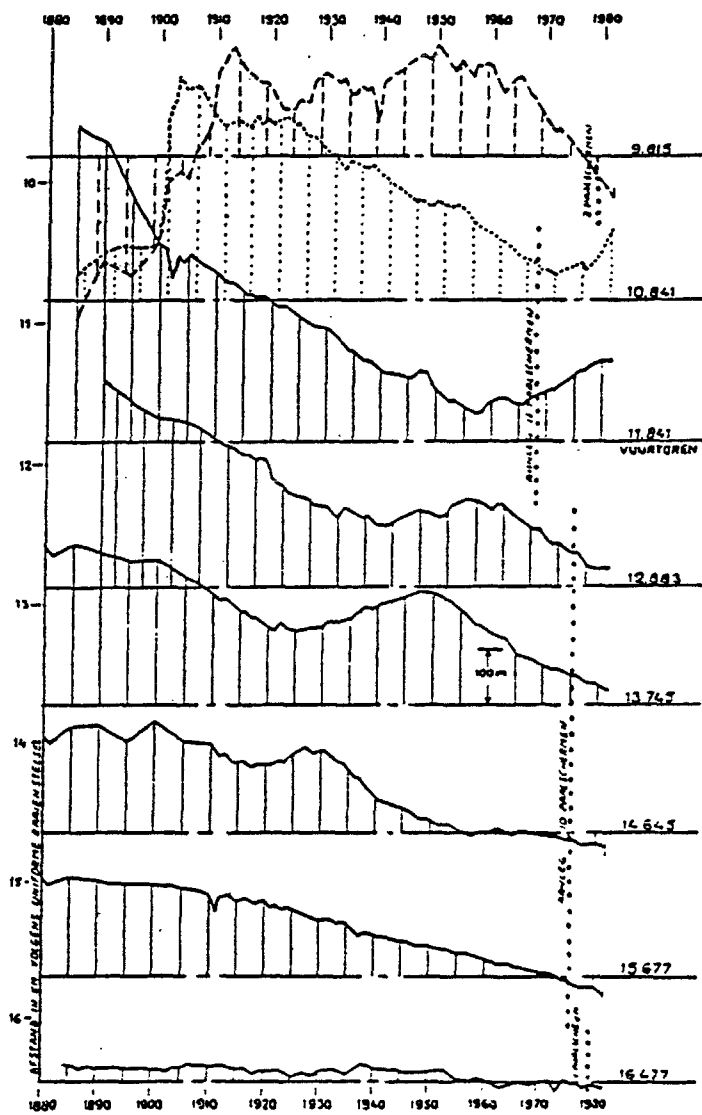


fig. 5.1 Aanleg paalschermen op Schouwen.

6 BRANDINGSRUGGEN EN STRANDHOOFDEN

In het vooronderzoek voor dit technisch rapport is een correlatie gemaakt tussen de aanwezigheid van strandhoofden en het voorkomen van bepaalde typen brandingsruggen. Hierbij is gebruik gemaakt van het onderzoek naar brandingsruggen door Bakker en De Vroeg [1988].

Voor de Hollandse kust liggen brandingsruggen op een onderlinge afstand van ordegrrootte 300 m. Deze ruggen hebben vaak een lengte van meer dan 10 kilometer min of meer evenwijdig aan de kust (zie figuur 6.1). Bij ordegrrootte 400 m uit de kustlijn is het hoogteverschil tussen de toppen van de brandingsruggen en dalen tussen de ruggen het grootst. De verticale top-dal grootte is daar ongeveer 1 - 2 m. Meer naar de kust neemt dit hoogteverschil af. Ook zeewaarts neemt het hoogteverschil af, en op ca. 800 m uit de kustlijn zijn de brandingsruggen geheel verdwenen.

Langs een deel van de Hollandse kust bewegen deze ruggen zich zeewaarts met een snelheid van tussen de 20 en 100 m/jaar.

Het is duidelijk dat zich daarbij grote zandverplaatsingen moeten voordoen, ook al wordt niet het volume van de rug in z'n geheel van de kust naar zee getransporteerd, want dan zou er zeer grote kusterosie moeten zijn.

Op basis van kustlodingen is onderzocht waar brandingsruggen optreden. Dit blijkt overal te zijn tussen Ameland en Delfland. Ze komen niet voor op Rottum en de Zeeuwse eilanden. Het zou kunnen zijn dat dit te maken heeft met het grote getijverschil in die gebieden. De gebieden zonder brandingsruggen worden in dit hoofdstuk verder buiten beschouwing gelaten.

Bij de analyse zijn drie typen brandingsruggen onderscheiden:

- type A Brandingsruggen die heen en weer bewegen, maar nooit buiten een bepaald gebied komen. Tussen twee brandingsruggen is een gebied van ca. 100 m breed waarin gedurende alle 20 onderzochte jaren geen enkele brandingsrug is voorgekomen. De brandingsruggen van dit type zijn min of meer gefixeerd.
- type B Brandingsruggen die zowel van de kust af bewegen als er naar toe. In de 20 onderzochte jaren komt op ieder punt in het dwarsprofiel altijd wel een keer een brandingsrug voor.
- type C Brandingsruggen die altijd van de kust af naar zee toe bewegen.

De drie vormen zijn geïllustreerd in figuur 6.2. Tussen Ameland en Wassenaar is voor de meeste raaien (dwz. om de 200 m) gekeken tot welk type de brandingsruggen ter plaatse behoren. De resultaten hiervan staan in figuur 6.3.

Wat opvalt is dat ter plaatse van strandhoofden vrijwel altijd type A optreedt, en op de plaatsen waar geen hoofden liggen de types B of C optreden. Er zijn slechts een beperkt aantal uitzonderingen op deze regel. Uit een verdere globale analyse van de brandingsruggen van het type A blijkt dat ter plaatse van het strandhoofd het dal tussen de beide brandingsruggen direct voor de kop van het hoofd ligt. Het diepste punt ligt zo'n 20 - 30 m voor de kop. Slechts in 10 % van de gevallen ligt het diepste punt verder dan 70 m vanaf de kop. Dit geldt ook in die gevallen waar de strandhoofden afwisselend lang en kort zijn.

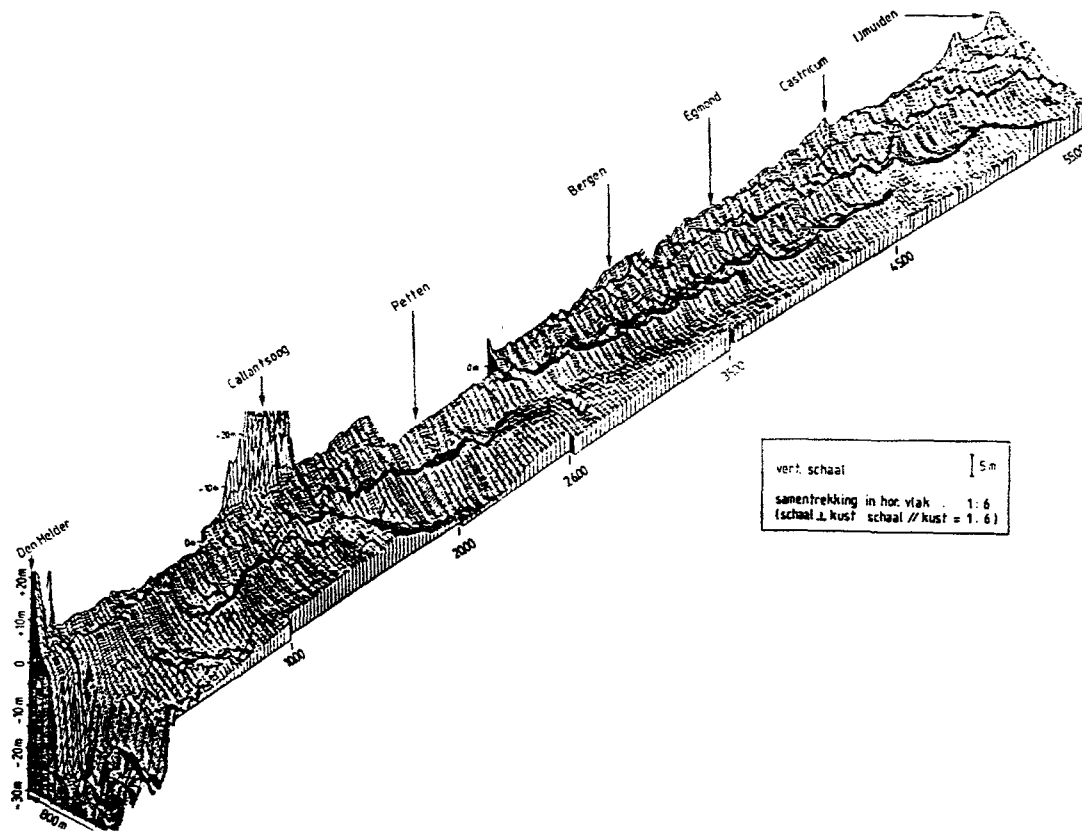
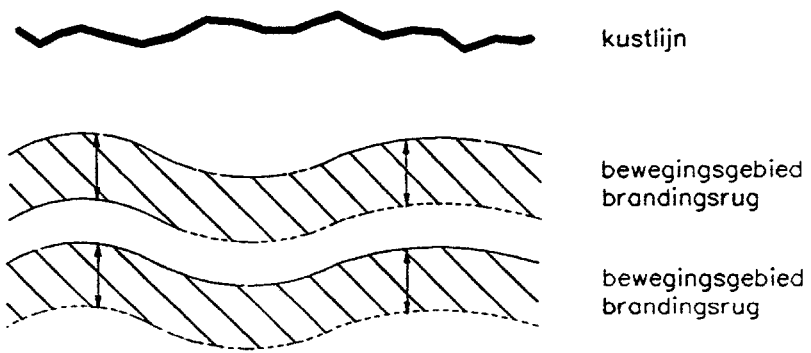
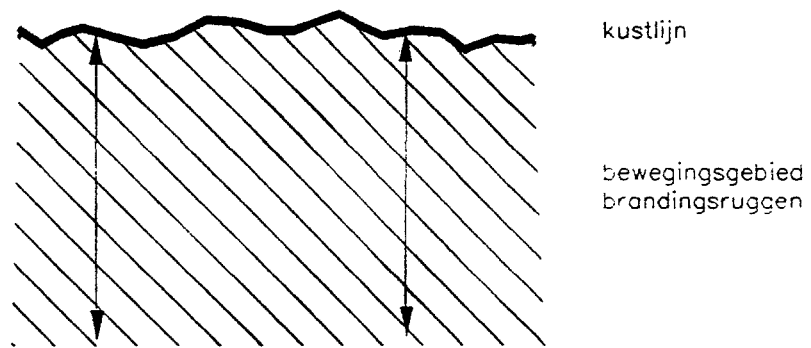


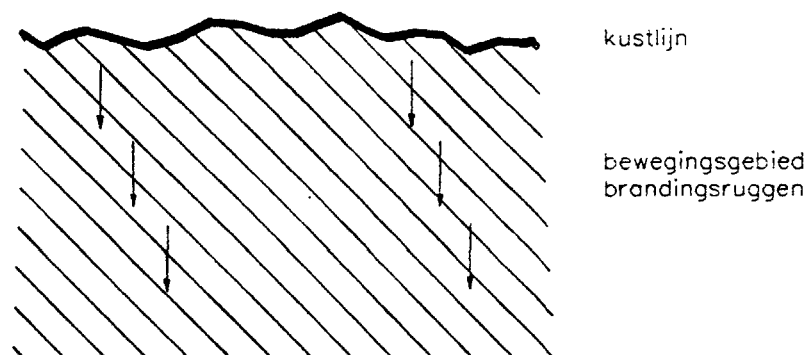
fig. 6.1 Brandingsruggen ten noorden van IJmuiden



a. Brandingsruggen bewegen binnen beperkte gebieden
Tussen die gebieden komen nooit brandingsruggen voor



b. Brandingsruggen bewegen heen en weer over het gehele gebied



c. Brandingsruggen bewegen achter elkaar naar zee

fig. 6.2 Manieren waarop brandingsruggen bewegen.

Tussen twee strandhoofden in ligt het dal iets meer naar de kust, gemiddeld zo'n 15 m. Voor strandhoofden die beurtelings lang en kort zijn is een dergelijke waarde niet te geven, omdat er te veel variatie is.

Op ongeveer 200 m buiten de kop van het hoofd bevindt zich de tweede brandingsrug.

Het bovenstaande zou kunnen impliceren dat strandhoofden een stabiliserende werking op de brandingsruggen hebben, en wellicht daarmee een stabiliserende werking op de kustdynamiek.

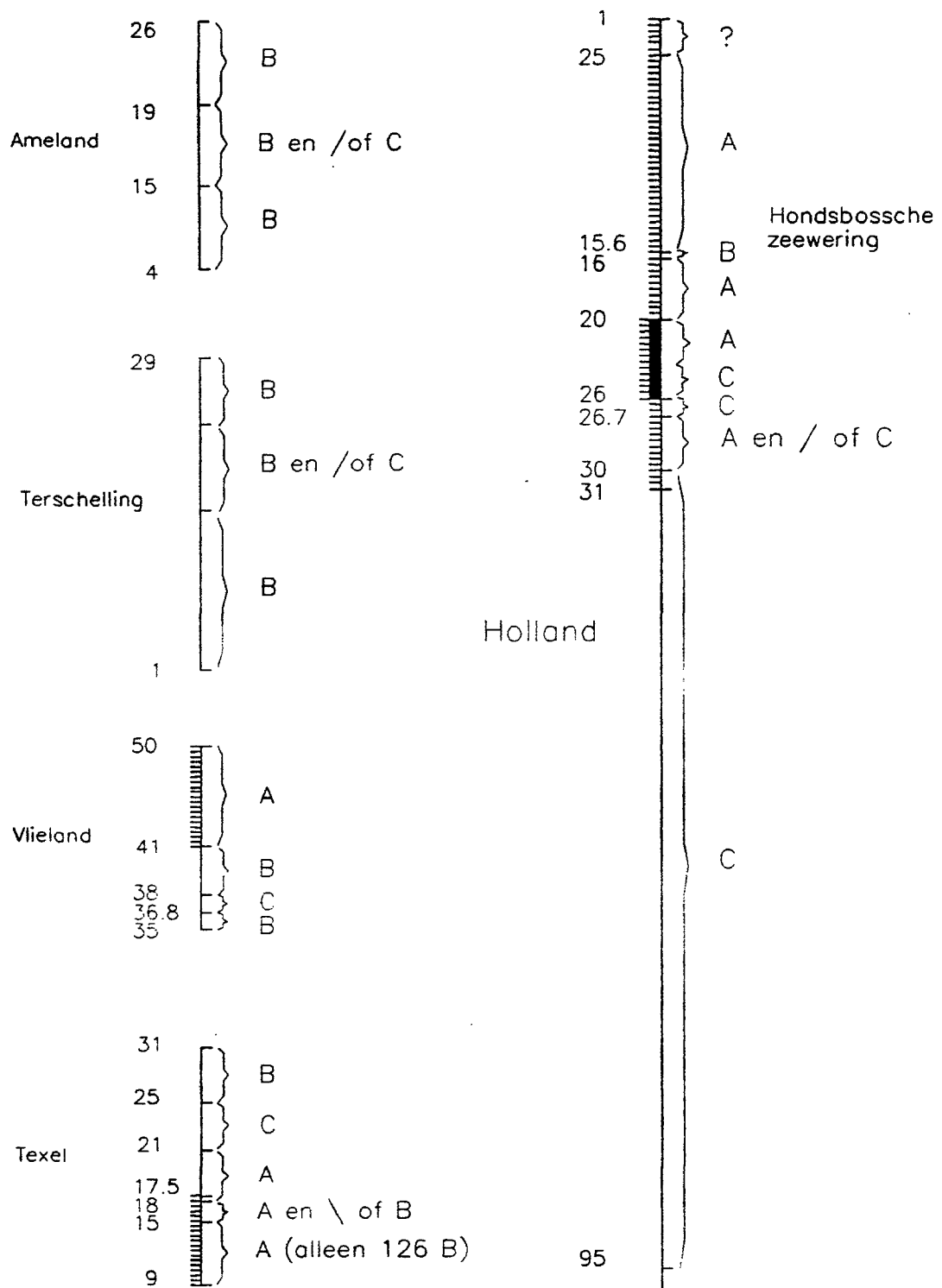


fig. 6.3 Plaats van voorkomen van soorten brandingsruggen.

7 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

In het hoofdstuk over de theoretische achtergrond wordt geconstateerd dat hoofden op twee verschillende manieren invloed kunnen hebben op het kustgedrag, nl. via een beïnvloeding van het door golven aangedreven brandingsstroomtransport en door een beïnvloeding van de aanval van de getijstroom op de kust. In dit laatste geval is de werking van een strandhoofd te vergelijken met die van een rivierkrib.

Uit de analyse van hoofdstuk 4 is gebleken dat op die plaatsen waar strandhoofden de getijstroom van de kust afhouden (dus als krib werken), zij over het algemeen goed tot zeer goed functioneren. Dit zijn vrij kostbare hoofden, omdat door de stroming contractiekuilen voor de koppen van de hoofden ontstaan, die op hun beurt weer een zware kopbestorting van het hoofd vereisen. Het handhaven van deze hoofden is noodzakelijk. Afbreken zal automatisch tot kusterosie gaan leiden.

Op plaatsen waar strandhoofden als brandingsstroom remmers werken, is hun werking minder goed. In die gevallen waar de resulterende brandingsstroom klein is (t.g.v. golfval uit vele verschillende richtingen) blijken strandhoofden nauwelijks te functioneren in het tegengaan van doorgaande erosie. De indruk bestaat dat door de bouw van deze hoofden het strand en de onderwateroever iets steiler is gaan staan. Afbraak van deze hoofden leidt wellicht tot verflauwing van de kust, en dientengevolge tot tijdelijke erosie. Bij de meeste kustvakken waar dit soort hoofden liggen is een dergelijke tijdelijke erosie niet toelaatbaar; afbraak van hoofden mag dus alleen plaatsvinden na een zeer gedegen studie over de morfologische gevolgen van het verwijderen van de hoofden.

In die gevallen waar duidelijk wel een overheersende golfrichting is, blijken strandhoofden de doorgaande erosie (met name boven de laagwaterlijn) te verminderen. Dit leidt wel altijd tot grote lijerosie, die bestreden kan worden door de bouw van nog meer hoofden. In deze gevallen is het doel wel min of meer bereikt, de kosten zijn echter zeer hoog, door de noodzaak om "lijerosiehoofden" te bouwen. Afbraak van deze hoofden moet afgeraden worden, omdat de kust zich inmiddels aan de nieuwe situatie aangepast heeft (is een stuk steiler geworden). Hierdoor zal afbraak altijd leiden tot versterkte erosie.

Nieuwbouw zal zelden nog in aanmerking komen. Nieuwbouw kan overwogen worden bij kustvakken met een sterke aanval door de getijstroom. De kustvakken waar een dergelijke aanval is, zijn echter overal al met hoofden verdedigd.

In geval van brandingsstroom kan de bouw van strandhoofden alleen overwogen worden in die gevallen waar een duidelijk overheersende golfrichting is. Het ligt echter in de rede dat voor die gevallen het alternatief (uitvoeren periodieke zandsuppletie) een goedkopere oplossing is.

Indien er geen overheersende golfrichting is, moet de bouw van strandhoofden worden afgeraden.

Een algemeen bezwaar van strandhoofden is, dat niet ingespeeld kan worden op de dynamiek van het kustgebied, zoals bijv. de voorbijtrekkende zandgolven.

De effectiviteit van paalschermen is zeer minimaal gebleken. Slechts in die gevallen waar een overheersende golfrichting is, blijken zij in staat te zijn om de gevolgen van lijerosie te beïnvloeden. De inscharing achter een harde verdediging wordt door het aanbrengen van paalschermen minder diep, maar zal zich over een grotere lengte uitstrekken. Aanleg van nieuwe paalschermen en instandhouding van bestaande schermen moeten derhalve met de nodige terughoudendheid beschouwd worden.

Samenvattend kan gesteld worden dat in principe geen nieuwe paalschermen meer aangelegd moeten worden en dat ook vraagtekens gezet moeten worden bij het instandhouden van de bestaande schermen. Ook de aanleg van nieuwe strandhoofden wordt in principe niet aangeraden, behalve ter plaatse van sterke getijstroom. Op deze plaatsen liggen echter meestal al strandhoofden. Ten aanzien van de afbraak van strandhoofden is terughoudendheid op z'n plaats. In de loop der jaren is versteiling van de kust opgetreden. Na afbraak van het strandhoofd zal de kust zich relatief snel willen aanpassen, hetgeen ten koste zal gaan van de zeereep. Gedurende enige jaren zal dit versnelde erosie van de duinvoet tot gevolg hebben.

Nader onderzoek naar het functioneren van strandhoofden als zodanig is niet zinvol. Wel is het nodig kennis te verwerven t.a.v. het gedrag van hoofden in relatie tot suppleties. De verwachting is dat de levensduur van suppleties verlengd kan worden, met name op steile stranden, door de aanwezigheid van strandhoofden. Kwantitatieve inzichten hierover ontbreken nog, en kunnen door gericht onderzoek verworven worden.

Zoals in hoofdstuk 2 reeds vermeld is er geen theoretische kennis over de beïnvloeding van het dwarstransport door strandhoofden. Uit hoofdstuk 6 blijkt dat strandhoofden mogelijk een stabiliserende werking op de dynamiek van brandingsruggen hebben. Verdieping van kennis ten aanzien van dit fenomeen is gewenst, mede in relatie tot de levensduur van strandsuppleties. Verondersteld kan nl. worden dat de beweging van de brandingsruggen enigermate gerelateerd is aan het dwarstransport.

Literatuuroverzicht

Bakker, W.T. (1967)

One aspect of the dynamics of a coast partly protected by a row of groynes

Rijkswaterstaat, nota 67-7

Bakker, W.T. en Joustra, D.S. (1970)

The history of the dutch coast in the last century

Rijkswaterstaat, nota WWK 70-12

Bakker, W.T. (1971)

De dynamica van kusten

Rijkswaterstaat, nota WWK 71-22

Bakker, W.T en H.J. de Vroeg (1988)

Is de kust veilig ? Analyse van het gedrag van de Hollandse kust in de laatste 20 jaar

Rijkswaterstaat, nota GWAO 88.017

Bendegom, L. van (1949)

Beschouwingen over de grondslagen van kustverdediging

Rijkswaterstaat, Hoorn

de Bruin, M.P. (1956)

De kust van Walcheren

Kolff, J. van der (1983)

Het ontstaan van Delfands zeewering

Polytechnisch Tijdschrift/civiel 38,10,pp 6-14

Ligtendag, W.A. (1987)

Van IJzer tot Jade; een reconstructie van de zuidelijke Noordzeekust in de jaren 1600 en 1750, Amsterdam

Maranus, J.W. (1986)

Grootschalige zandgolfbewegingen langs de zuidelijke deltakust

Rijkswaterstaat, nota GWWS-86.002

Maranus, W. & Verhagen H.J. (1987)

Zandgolven en Kustverdediging in Zeeland

Polytechnisch Tijdschrift/civiel 42,2;pp 34-38

Pluijm, M. (1988)

Zandhuishouding kust Zuid-Holland

Rijkswaterstaat, nota GWWS-88.162

Rakhorst, H.D. (1984a)

Werking strandhoofden Noord-Holland, Texel, Vlieland

Kust en Zee, 3, pp 13-23

- Rakhorst, H.D. (1984b)
Werking strandhoofden Noord-Holland, Texel en Vlieland
Rijkswaterstaat, nota WWKZ-84.H007
- Roelse, P (1984)
Ervaringen met paalschermen in Zeeland
Kust en Zee, 3, pp 24-35
- Schoorl, H. (zj.)
Zeshonderd jaar water en land, Bijdrage tot de historische geografie
en hydrografie van de kop van Noord-Holland in de periode ca. 1150-
1750
Groningen
- Straaten, L.M.J.U. van (1960)
Directional effects of Winds, Waves and Currents along the Dutch North
Sea coast
Geologie en Mijnbouw 40;pp 310-391.
- Ingenieursbureau Svasek (1975)
Paalrijen
Rapport nr. 193
- Tomlinson, (1980)
- Verhagen, H.J. (1988)
Zandgolven en strandhoofden; de effectiviteit van strandhoofden in het
licht van recente resultaten van zandgolfontoerzoek
Otar, mei 1988, pp162-168
- Verhagen, H.J. en J. Butter (1985)
De werking van strandhoofden langs de Zeeuwschvlaamse kust
Rijkswaterstaat, nota WWKZ-85.V016
- Waterloopkundig Laboratorium (1979)
Invloed van strandhoofden op de kustvorm
onderzoeksverslag M918

