

Studierapport no. 15

EROSIE EN SEDIMENTATIE
AAN DE SCHOR-SLIKOVERGANGEN
IN DE WESTERSCHELDE

A. v.d. Meulen
M.M. Schoor
o.l.v.
Drs. P. Hoekstra

RIJKSUNIVERSITEIT UTRECHT
Geografisch Instituut

Utrecht, juni 1988

Erosie en sedimentatie aan de schor-slikovergangen
in de Westerschelde ten Oosten van Terneuzen

Studierapport no. 15

UITGAVE IN DE REEKS WESTERSCHELDE STUDIES

Informatie:

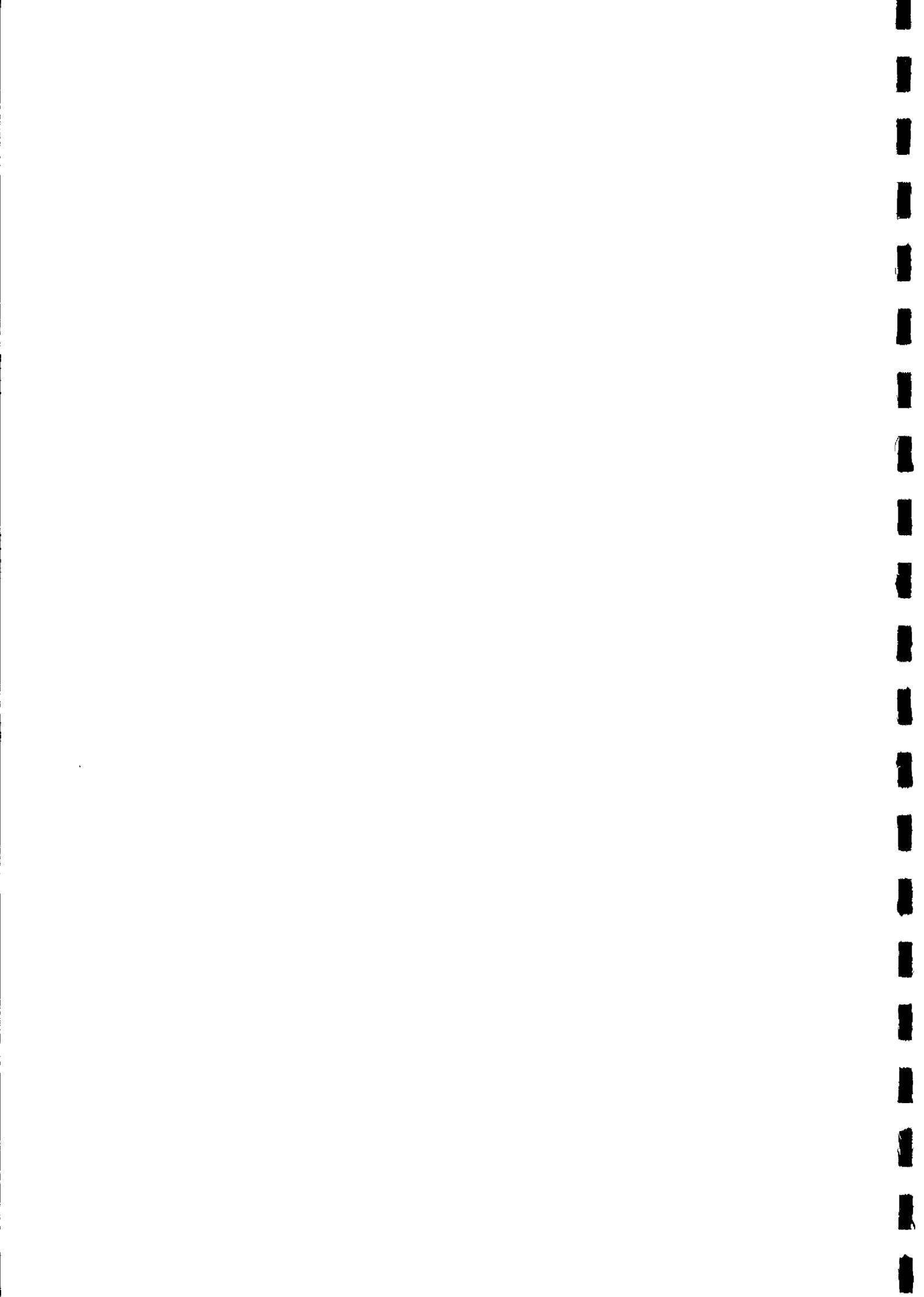
Coördinatiecentrum Westerschelde Studies

* Geografisch Instituut - Rijksuniversiteit Utrecht *

Dr. R.J. Schoele, project-coordinator

Heidelberglaan 2, tel: 030-531399/531368

3508 TC UTRECHT NL



INHOUD

	biz.
Lijst van tabellen	4
Lijst van figuren	5
Lijst van foto's	6
Lijst van bijlagen	6
Voorwoord	7
1. Inleiding	9
1.1. Gebiedsbeschrijving	9
1.2. Doelstelling en probleemstelling	11
2. Werkwijze	13
2.1. Inleiding	13
2.2. Morfologie van de schor-slikovergangen	13
2.3. Profielen	14
2.4. Bodemparameters	15
2.5. Vegetatie	17
2.6. Fouten	18
3. Factoren en processen met betrekking tot erosie en sedimentatie -theorie-	20
3.1. Inleiding	20
3.2. Erosieve factoren	20
3.2.1. Golven	20
3.2.2. Stromingen	21
3.3. Weerstand tegen erosie	22
3.4. Proces van erosie	23
3.4.1. Homogeen materiaal	23
3.4.2. Gelaagde kliffen	25
3.5. Aangroei	27
4. Resultaten van het onderzoek	29
4.1. Inventarisatie schor-slikovergangen	29
4.1.1. Schor-slikovergangen in het Verdrongen Land van Saeftinghe	29
4.1.2. De geulen in het binnenland van het Verdrongen Land van Saeftinghe	31
4.1.3. Schor-slikovergangen aan de noordzijde van de Westerschelde	31
4.2. Resultaten erosiemetingen	33
4.2.1. Erosiemetingen met behulp van waterpassingen	33
4.2.2. Erosie in de onderzochte gebieden	36
4.2.3. Erosiemetingen met behulp van erosiepinen	43
4.2.4. Erosie en sedimentatie in cijfers en in kaart	45
4.3. Bodemparameters	46
4.3.1. Textuuranalyse	46
4.3.2. Bulkgewicht en gewichtspercentage vocht	47
4.3.3. Sterkte	48
4.3.4. Grondwaterfluctuaties	50

5. Analyses en modellering	50
5.1. Golfenergie	50
5.2. Statistische analyse van de erosie	55
5.3. Beschouwing mogelijk optredende massabewegingen	57
5.3.1. Homogene kliffen	57
5.3.2. Gelaagde kliffen	61
6. Discussie en conclusies	65
Literatuurlijst	72

LIJST VAN TABELLEN

	blz.
Tabel 4.1. Enkele morfologische parameters van de schor- slikovergangen in het oostelijk deel van de Westerschelde	29
Tabel 4.2. Overzicht van de erosie bij de dubbele metingen	36
Tabel 4.3. Meetresultaten van de schorren voor Emanueipolder (bij Waarde)	41
Tabel 4.4. Overzicht van de erosie en sedimentatie in het onderzoekgebied	46
Tabel 4.5. Vergelijking tussen bepaalde en geschatte textuur	47
Tabel 4.6. Sterkte zoals bepaald met de vrije prisma proeven	49
Tabel 4.7. Correlatiematrix bodemparameters	50
Tabel 4.8. Meetresultaten grondwaterstandsbuizen	51
 Tabel 5.1. Gemiddelde golfenergie van windgolven in de onderzochte gebieden	 55
Tabel 5.2. Correlatiematrix met betrekking tot erosie	56
Tabel 5.3. Veiligheidsfactoren voor ondergraven echorkliffen in de periode juni-juli '86	63

LIJST VAN FIGUREN

	blz.
Figuur 1.1. Overzichtkaart van de Westerschelde	8
Figuur 1.2. Schematische voorstelling van eb- en vloedscharen (naar Zonneveld, 1981)	9
Figuur 1.3. Schematische indeling van het getijdegebied	10
Figuur 1.4. Meest bedreigde schorranden in het oostelijk deel van de Westerschelde volgens Sieraveld (1984)	12
 Figuur 2.1. Klifvormen	 14
Figuur 2.2. Meetopstelling bij de vrije priema proef	16
 Figuur 3.1. Mogelijke glijvlakken in een schorklif (naar Thorne, 1982)	 24
Figuur 3.2. Bezwijkingsmodellen voor ondergraven schorkliffen (Thorne en Lewin, 1979)	26
Figuur 3.3. Definitie-schets van beam failure volgens Van Eerd (1985a)	27
 Figuur 4.1. Het Verdrongen Land van Saeftinghe	 30
Figuur 4.2. De schor bij Baarland in 1967 (Wilderom, 1968)	32
Figuur 4.3. Ligging van de meetpunten	34
Figuur 4.4. Resultaten erosiepinmetingen	44
Figuur 4.5. Grondwater- en waterstandeverloop aan de schorrand van de schorren voor Emanuelpolder	52
 Figuur 5.1. Windroos voor Vlissingen (Klimaatatlas van Nederland, 1972)	 54
Figuur 5.2. Gemeten erosie t.o.v. de met meervoudige regressie berekende erosie (vergelijking (5.2))	57
Figuur 5.3. Gemeten erosie t.o.v. de met het model van Schoot en Van Eerd berekende erosie (vergelijking (5.3))	57
Figuur 5.4. De Mohr's cirkel	58
Figuur 5.5. Schorklif bij Waarde A. Scheur 0.5m diep B. Enkele meters oostelijk van A, scheur nog alleen 0.12m diep	61

LIJST VAN FOTO'S

	blz.
Foto 1. Geleidelijke schor-slikovergang aan het Speelmanegat (kreek in het Verdrongen Land van Saeftinghe)	69
Foto 2. Getrapt echorklif (totale hoogte 0.7 meter)	69
Foto 3. Overzicht van de schorren bij Oessendrecht (Appelzak)	70
Foto 4. Het uitvoeren van een waterpassing, aan de 'Ijebreker' (kreek in het Verdrongen Land van Saeftinghe)	70
Foto 5. Scheur in de schorrand van de schorren voor Emanuelpolder (bij Waarde)	71

LIJST VAN BIJLAGEN

Bijlage 1.1. Morfologische kaart van de schor-slikovergangen in het Verdrongen Land van Saeftinghe
Bijlage 1.2. Morfologische kaart van de schor-slikovergangen van de schor voor de Hellegatpolder
Bijlage 1.3. Morfologische kaart van de schor-slikovergangen van de schorren bij Ellewoutedijk en Baarland
Bijlage 1.4. Morfologische kaart van de schor-slikovergangen van de Biezelingse Ham
Bijlage 1.5. Morfologische kaart van de schor-slikovergangen van de schorren voor Emanuelpolder
Bijlage 1.6. Morfologische kaart van de schor-slikovergangen van de schorren bij Bath
Bijlage 1.7. Morfologische kaart van de schor-slikovergangen van de schorren van Oessendrecht (Appelzak)
Bijlage 2. Erosiekaart van de schorren in de Westerschelde (ten oosten van Terneuzen)
Bijlage 3. Profielen bepaald met behulp van de waterpassingen
Bijlage 4. Resultaten waterpassingen: erosie/sedimentatie in m en m ² , in de meetperiode en per jaar en van de begroeiingsgrens
Bijlage 5. Bepaling vermenigvuldigingefactor X
Bijlage 6. Druksterkte van 44 monsters met bijbehorende bodemparameters
Bijlage 7. Parameters gebruikt bij de regressie analyse met betrekking tot erosie
Bijlage 8. Frequenties p (in procenten) van windrichtingen en gemiddelde snelheid v (in halve m/s): jaar-normalen tijdvak 1951-1980; periode juli 1985-oktober 1986; periode juni 1986-oktober 1986
Bijlage 9. Grafiek ter bepaling van de golfhoogte H (Groen en Dorrestein, 1976)
Bijlage 10. Grondwater- en waterstandeverloop aan de schorrand van de schorren voor Emanuelpolder
Bijlage 11. Stability charts voor ondergraven rivieroeveren bij r = 0.1 (Thorne en Tovey, 1981)

VOORWOORD

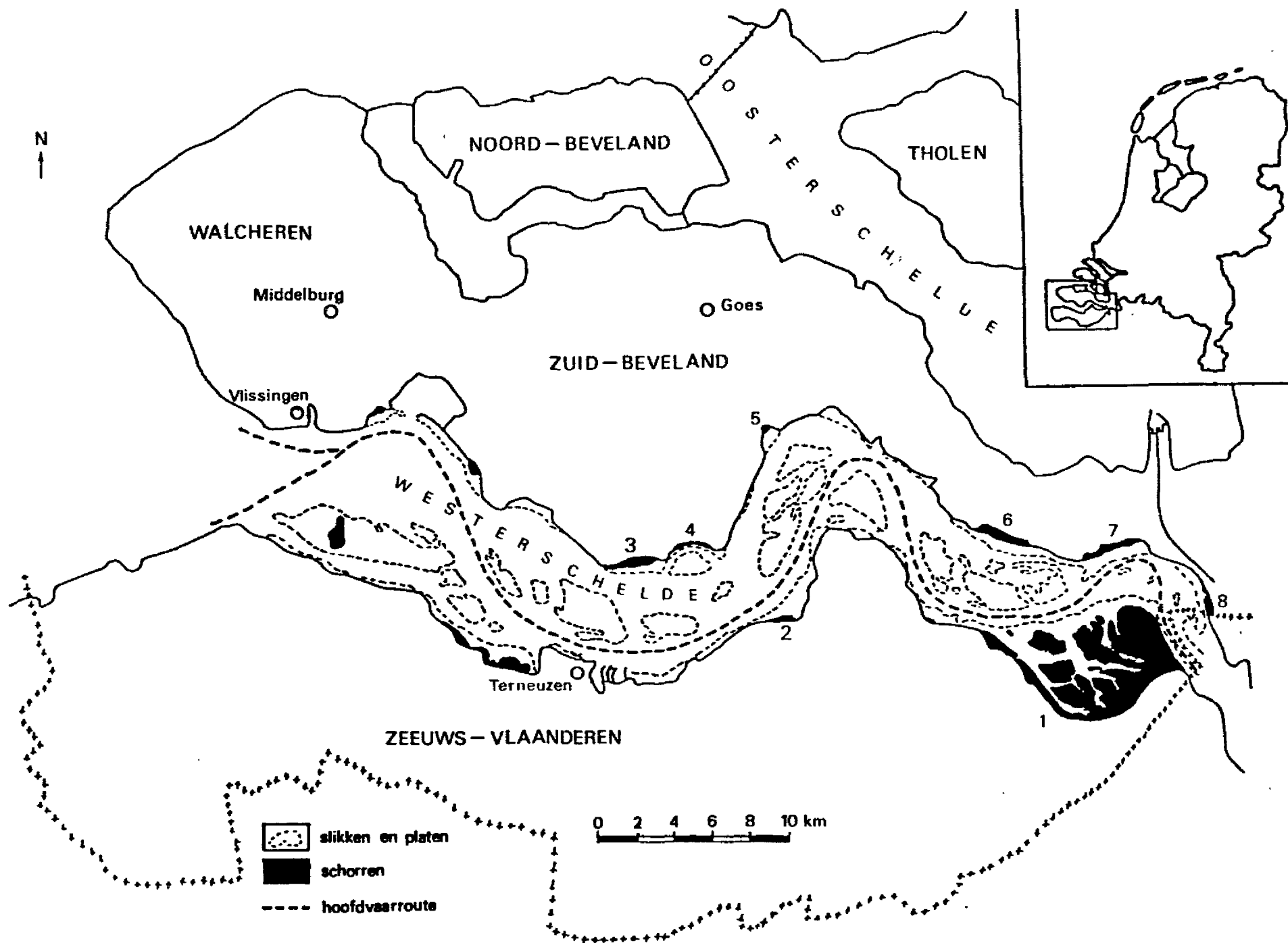
Dit is het eindrapport van een studie naar de erosie en sedimentatie aan het buitendijkse land in de Westerschelde. Deze studie is door ons, studenten Fysische Geografie van de Rijksuniversiteit Utrecht, verricht tijdens twee doctoraal veldwerken. In het kader van het Westerschelde project is daarbij stage gelopen bij de Dienst Getijdewateren van Rijkswaterstaat.

Het Westerschelde project is een multidisciplinair onderzoeksproject naar verschillende facetten van de Westerschelde, met als doel tot een beleidsplan te komen waarin zowel sociaal-economische als milieu factoren tot hun recht komen. In het Westerschelde project werken onder andere Rijkswaterstaat en de Rijksuniversiteit Utrecht samen.

Het onderzoek vond plaats gedurende zes weken in de zomer van 1985 en gedurende acht weken tussen april 1986 en november 1986. In 1987 vonden uitwerking en interpretatie van de gegevens en verslaggeving plaats. De begeleider van het onderzoek is drs. P. Hoekstra, medewerker van de vakgroep Fysische Geografie van de faculteit Ruimtelijke Wetenschappen, Rijksuniversiteit Utrecht. Wij danken hem en de medewerkers van de Dienst Getijde Wateren van Rijkswaterstaat, de medewerkers van de Rijksuniversiteit Utrecht, Stichting Het Zeeuwsche Landchap en Staatsbosbeheer voor de verleende samenwerking.

A. v.d. Meulen,
M.M. Schoor,
Utrecht, juni 1988

Fig. 1.1. Overzichtskaart van de Westerschelde



1. INLEIDING

1.1. Gebiedsbeschrijving

De Westerschelde ligt in het deltagebied van zuid-west Nederland (zie fig. 1.1). Naast de Eems-Dollard is de Westerschelde het enige overgebleven natuurlijke estuarium in Nederland. Een estuarium is een riviermonding in vrije, trechtervormige verbinding met zee, waarin zeewater via natuurlijke weg verdund wordt met zoet water, aangevoerd van de landzijde (Stronkhorst, 1983). Voor de Westerschelde is de regenrivier de Schelde de belangrijkste zoetwaterbron. De aanvoer van zoet rivierwater is relatief gering, het gemiddeld debiet bedraagt ongeveer 100 m³/s (Stronkhorst, 1983). De waterbeweging in de Westerschelde wordt grotendeels beheerst door het vanuit de Noordzee binnendringende getij, dat een sterk mengend karakter heeft. Daardoor is de Westerschelde een goed gemengd estuarium, waarin de verticale gradiënt in het zoutgehalte over het algemeen minder dan 0.2‰ is (Stronkhorst, 1983).

Met de getijetromen (het horizontaal getij) treden variaties in de waterstand op (het verticaal getij). Bij eb treedt als gevolg van het wegstromen van water uit het estuarium een algehele daling van de waterspiegel op, waarbij slikken en platen droogvallen. De geulen die door het getij ontstaan noemt men eb- en vloedecharen (zie fig. 1.2). De vloedecharen eindigen blind omdat bij overstroming van de geulen de stroom-eenheden plotseling afnemen en er geen inenijding meer plaatsvindt. De ebscharen zijn diep uitgeleeten, de diepte bedraagt gemiddeld twaalf meter met uitschieters naar zestig meter (Stronkhorst, 1983). Ze vormen de hoofdvaargeul in de Westerschelde.

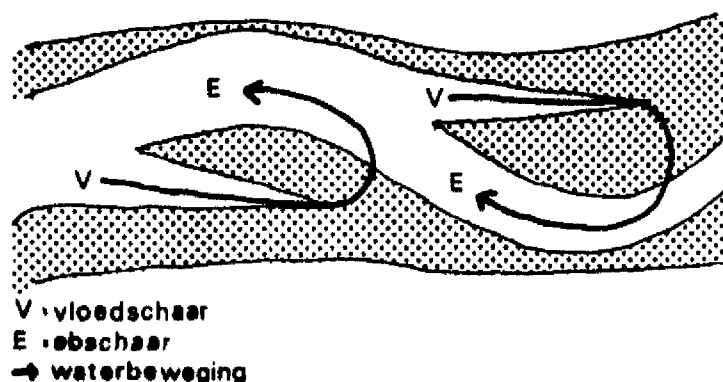


Fig. 1.2. Schematische voorstelling van eb- en vloedecharen
(naar Zonneveld, 1981)

Als gevolg van de trechtervorm van het estuarium vindt opstuw-
wing van water landinwaarts plaats. Het getijde-verschil neemt
daardoor naar het oosten gaande toe, van 3.78 meter gemiddeld
getijverschil bij Vlissingen tot 4.52 meter bij Bath. De invloeden van het getij en van de rivier bepalen de
geomorfologische en landschappelijke variatie van het buiten-
dijke gebied in de Westerschelde. De geomorfologische eenheden
die in de Westerschelde onderscheiden kunnen worden, zijn
schorren, slikken, platen en geulen (zie fig. 1.3).

Slikken en platen liggen tussen gemiddeld laag water (GLW) en gemiddeld hoog water (GHW), het intergetijdegebied. Ze worden bij vloed overstroomd en vallen bij eb droog. Het verschil tussen slikken en platen wordt bepaald door de mate waarin ze bij hoog water met water omringd zijn. Platen zijn dan geheel met water omringd, terwijl slikken dan voor een deel aan een schor of dijk grenzen. De slikken en platen in de Westerschelde bestaan over het algemeen uit kleilig en kleiarm zand (Reynders, 1985). Schorren liggen boven gemiddeld hoog water en worden alleen bij springtij en stormvloed overstroomd. Er heeft zich vegetatie gevestigd en de bovengrond is kleirijk. De schorren zijn doorsneden met kreken, waarbij oeverwallen en kommen zijn gevormd welke zich onderscheiden in hoogteligging, textuur en vegetatie.

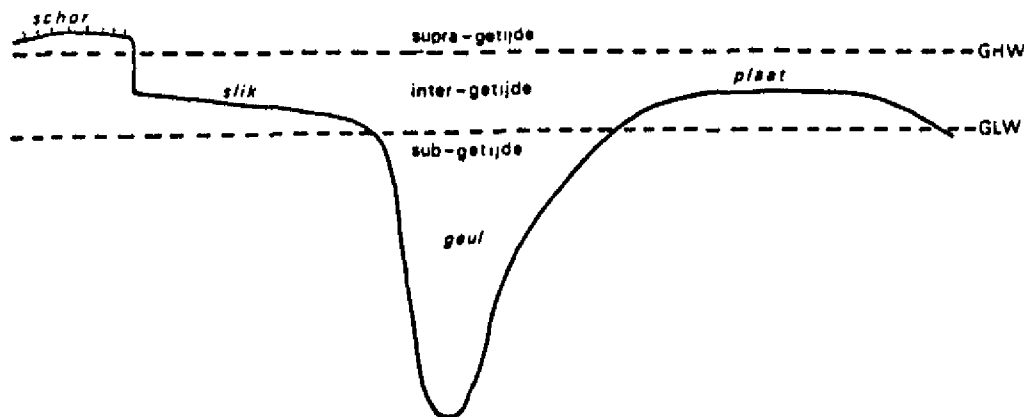


Fig. 1.3. Schematische indeling van het getijdegebied

De grensgebieden tussen de schorren en de slikken zijn de schor-slikovergangen. Deze schor-slikovergangen kunnen geleidelijk van aard zijn (zie foto 1), of er kan sprake zijn van een schorklif (foto 2; foto 3). In de onderzochte gebieden hebben de schorkliffen een hoogte van 0.1 tot 1.6 meter. Bij de geleidelijke overgangen is er geen abrupt hoogteverschil en neemt de vegetatiebedekking geleidelijk af.

Lange de Westerschelde ligt ongeveer 2550 ha schor. Hiervan ligt ca. 90% in het Verdrongen Land van Saeftinghe. Het schoroppervlak in de Westerschelde is vier maal zo groot als in de Oosterschelde na het gereedkomen van de Deltawerken. De schorgebieden die zijn onderzocht liggen ten oosten van de lijn Terneuzen-Ellewoutsdijk. De oostelijke begrenzing van het onderzochte gebied is de rijksgrens met België. In figuur 1.1 is de ligging van de onderzochte schorgebieden aangegeven. Het zijn achtereenvolgens:

1. Het Verdrongen Land van Saeftinghe	2315 ha
2. Schor voor de Hellegatpolder	15 ha
3. Schor bij Ellewoutdijk	55 ha
4. Schor bij Baarland	13 ha
5. Biezelinge Ham	2 ha
6. Schorren voor Emanuelpolder	115 ha
7. Schorren bij Bath	22 ha
8. Schorren van Oessendrecht (Appelzak)	25 ha

Schorren zijn unieke natuurgebieden. De waarde van de schorren qua vegetatie ligt niet zozeer in de diversiteit aan planten-

soorten maar vooral in het voorkomen van specifieke brakwater-soorten. Van belang zijn ook de plantengroepen, zoals zeebies-associaties en lamsoor-associaties, die voorkomen in het brakke respectievelijk in het zoute gebied van de Westerschelde (Stronkhorst, 1983). Door de gradiënten in abiotische factoren (zoals overspoelingsfrequentie en zoutgehalte) vormen de schorren in de Westerschelde een keten van terreinen met een onderlinge samenhang, die van grote natuurwetenschappelijke waarde is. Als door afslag van de schorranden het echorareaal afneemt, gaat hiermee uniek natuurgebied verloren.

1.2. Doelstelling en probleemstelling

De doelstelling van het onderzoek is vast te stellen of de randen van de echorgebieden in de Westerschelde onderhevig zijn aan erosie of dat langs deze randen sedimentatie optreedt. Indien erosie of sedimentatie plaatsvindt, wordt daarbij gepoogd vast te stellen met welke snelheid dit gebeurt. Daarnaast wordt vastgesteld wat de ruimtelijke variatie in het onderzoeksgebied is, en waardoor deze variatie veroorzaakt wordt. Hiertoe is bepaald welke factoren en processen de erosie dan wel sedimentatie beïnvloeden, en in welke mate van beïnvloeding sprake is. Tevens is getoetst of bestaande erosie-modellen in het onderzoeksgebied bruikbaar zijn.

Deze doelstellingen zijn mede naar aanleiding van een rapport van Van Genuchten (1982) geformuleerd. In dit rapport wordt gesteld dat in de Westerschelde afslag van schorren veel meer voorkomt dan aangroei van schorren. Dit wordt veroorzaakt door baggeractiviteiten om de vaargeul naar Antwerpen te verdiepen. Hiertoe worden drempels in de hoofdvaargeul weggebaggerd, waarbij verruiming van de doorsnede van de gehele vaargeul optreedt. De baggerspecie stort men in vloedscharen. Door dit baggeren is volgens Van Genuchten (1982) door versterkte erosie het areaal aan platen, slikken en schorren aanzienlijk vermindert. Het rapport is geheel gebaseerd op luchtfoto- en literatuurstudie en richt zich voornamelijk op de slikken en platen in het oostelijk deel van de Westerschelde.

Siereveld (1984) geeft een overzicht van de door afslag meest bedreigde echorranden in de Westerschelde. Hij baseert zijn gegevens op de achteruitgang van de vooroever (de slikranden) in de laatste 30 jaar, welke als gevolg van versterkte inecharing door baggeractiviteiten is opgetreden. Deze achteruitgang is het grootst tussen Baalhoek en Paal en op Konijnenschor (beide in het Verdrongen Land van Saeftinghe), namelijk 100 tot 200 meter in 30 jaar. Uitgangspunt is dat door versteiling en versmalling van de vooroever de golfwerking toeneemt en daarmee de erosie van de echorren. De meest bedreigde echorgebieden liggen dan ook daar waar de vooroever achteruitgegaan is (zie fig. 1.4). Dit zijn de echorgebieden tussen Baalhoek en Paal, Konijnenschor, Marlemontse Plaat (alle in het Verdrongen Land van Saeftinghe), de echor voor de Hellegatpolder en de echorren bij Bath en ter plaatse van de Hedwige polder (zuidelijk van het Verdrongen land van Saeftinghe).

Siereveld (1984) heeft zijn uitgangspunt echter niet in het

veld getoetst. Schoot en Van Eerd (1985) veronderstellen dat er bij erosie schorkliffen ontstaan. Bij een eerste verkenning is echter gebleken dat er langs de door Sieraveld (1984) genoemde schorren tussen Baalhoek en Paal en op Konijnenschor vrijwel geen schorkliffen voorkomen.

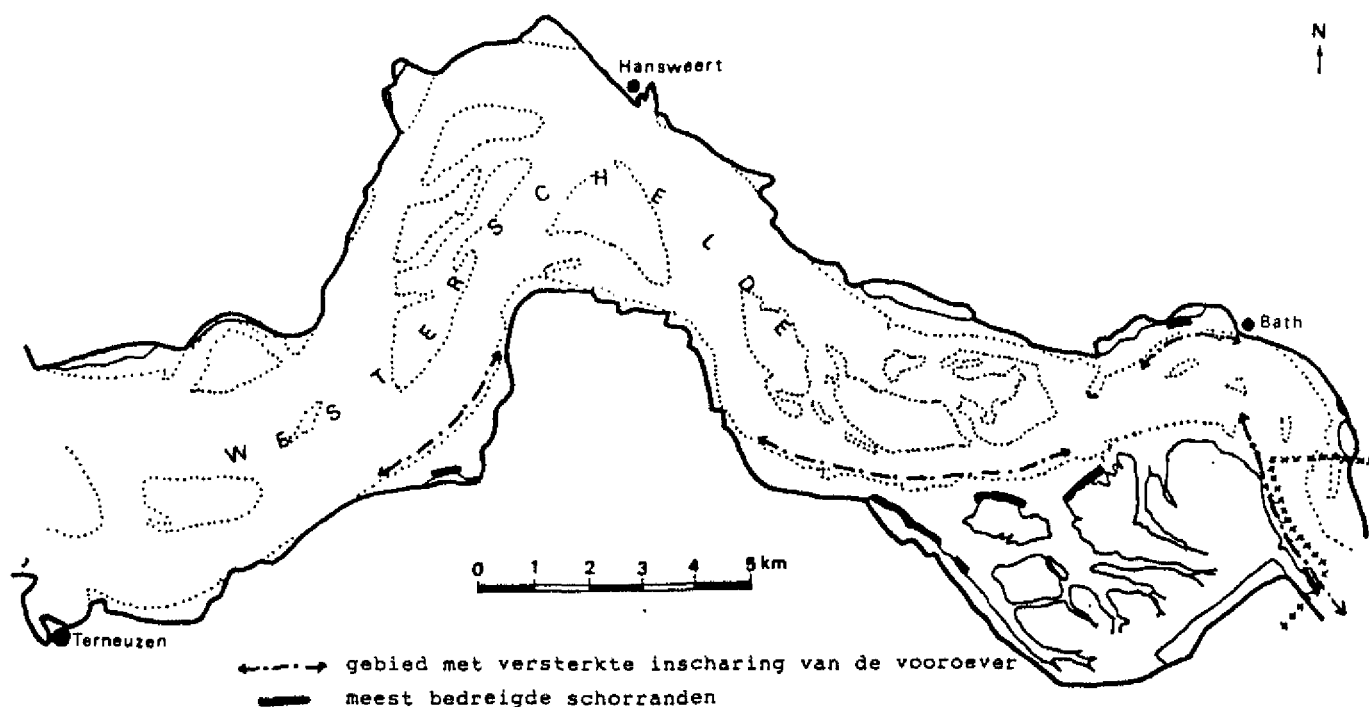


Fig. 1.4. Meest bedreigde schorranden in het oostelijk deel van de Westerschelde volgens Sieraveld (1984)

2. WERKWIJZE

2.1. Inleiding

In de zomer van 1985 is een inventarisatie gemaakt van de schor-slikovergangen gelegen aan de Westerschelde en van de schor-slikovergangen gelegen aan kreken in het Verdrunken land van Saeftinghe, die breder zijn dan 200m. Deze inventarisatie had betrekking op de vorm en afmetingen van de schor-slikovergangen, op de bodemparameters en op de vegetatie langs de schorrand. Aan de hand van de inventarisatie zijn schattingen gemaakt van de percentages schor-slikovergang waar erosie optrad, waar sedimentatie optrad en waar erosie en sedimentatie met elkaar in evenwicht waren. Ook is van enkele punten een voorspelling gedaan van de snelheid van de erosie. Om de werkelijke snelheden van erosie en sedimentatie te meten is een aantal profielen uitgezet die zijn ingemeten door middel van relatieve waterpassing.

In 1986 zijn de uitgezette profielen drie keer opnieuw ingemeten. In het veld en in het laboratorium zijn proeven verricht om de schatting van enkele bodemparameters te verifiëren en om enkele aanvullende bodemparameters te bepalen. Een aantal van deze parameters zijn gebruikt bij toetsing van enkele erosie- en sedimentatiemodellen, ontwikkeld voor de Oosterschelde.

2.2. Morfologie van de schor-slikovergangen

Er zijn in 1985 metingen aan de schor-slikovergangen verricht waarbij de volgende parameters bepaald zijn:

- hoogte van de schor-slikovergang (klifhoogte),
- grootte van eventuele ondergravingen en treden,
- grootte van eventuele afstortingen,
- helling van het slik,
- breedte van het slik.

De schorklifhoogte alsmede de grootte van ondergravingen, treden en afstortingen zijn bepaald met behulp van een meetlat met centimeterverdeling. De helling van het slik is met een inclinometer in graden bepaald, wat naderhand omgerekend is in procenten (cm/m). Daarnaast is op enkele plaatsen de slikhelling bepaald met een waterpasinstrument. In het Verdrunken Land van Saeftinghe is de slikhelling bepaald uit de hoogte-lijnenkaart (Daamen, 1983). De breedte van het slik is gedefinieerd als de afstand tussen de schorrand en de GLW-lijn. Deze afstand is in de topografische kaarten (schaal 1:5.000, voor het Verdrunken land van Saeftinghe 1:10.000) van de Meetkundige Dienst van Rijkswaterstaat gemeten, daar het onmogelijk is de ligging van de GLW-lijn in het veld te bepalen.

Op grond van de hoogte van de schor-slikovergang is een indeling gemaakt in vijf typen overgangen:

- geleidelijke overgang,
- laag klif (0.1-0.5m),
- matig hoog klif (0.5-1.0m),
- hoog klif (1.0-2.0m),
- zeer hoog klif (2.0-3.0m).

Daarnaast is een indeling van schorkliffen gemaakt op grond van hun vorm, die gerelateerd is aan de texturele opbouw van de schorrand (Stein, 1984). Deze indeling is voor een deel gebaseerd op de indeling van schor-slikovergangen in de Oosterschelde (Stein, 1984) en is als volgt (zie fig. 2.1):

- ondergraven klif,
- recht klif,
- getrapt klif,
- klif met voet (als basis van een van de andere vormen).

Aan de hand van vorm en hoogte van de schor-slikovergangen zijn de morfologische kaarten van de deelgebieden gemaakt (bijlage 1.1. t/m 1.7.).

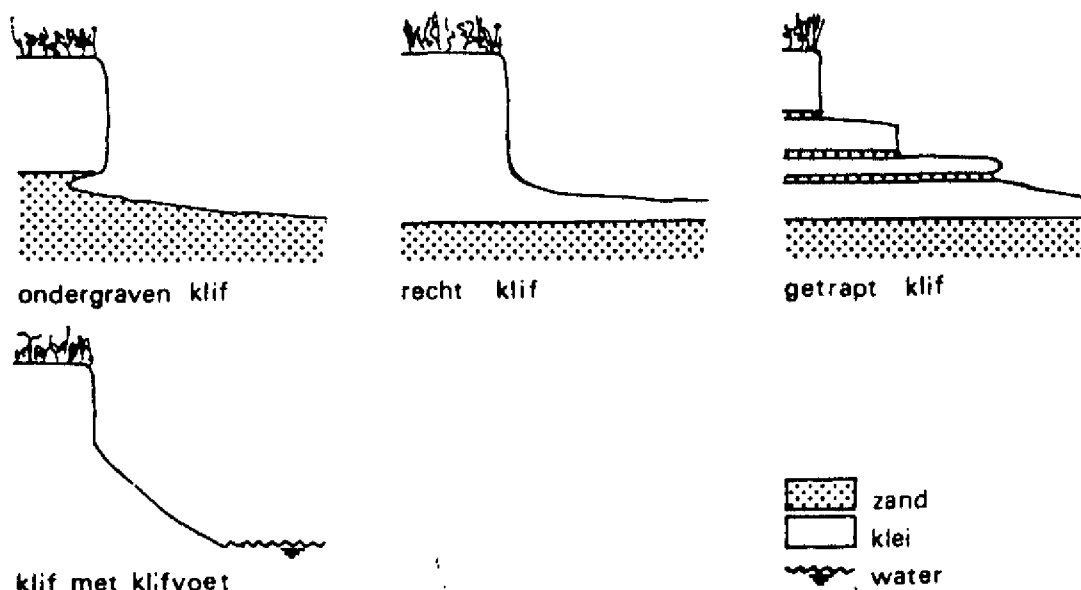


Fig. 2.1. Klifvormen

2.3. Profielen

Verondersteld is dat de vorm van de schor-slikovergang een indicatie is met betrekking tot erosie en sedimentatie. Na de morfologische inventarisatie zijn onderstaande hypothesen opgesteld:

- een schorklif duidt op erosie,
- een geleidelijke overgang duidt op sedimentatie,
- een afwisseling van lage kliffen/geleidelijke overgangen, alsmede een geleidelijke overgang vóór een klif, duiden op een stabiel schor.

Op grond van de hypothesen is een voorlopige erosie/sedimentatie kaart gemaakt van de schorgebieden, waarin de verwachtingen met betrekking tot de ontwikkeling van de schorgebieden zijn weergegeven.

Om te onderzoeken of deze hypothesen juist zijn en om de snelheden van erosie en sedimentatie te meten, zijn in juli 1985 op 24 locaties in totaal 30 profielen uitgezet. Om een zo representatief mogelijk beeld te verkrijgen, zijn locaties uitgezocht waar de schorrand over minimaal enkele honderden

meters weinig varieerde in vorm en hoogte. Indien dit niet het geval was, zijn meerdere profielen dicht bij elkaar uitgezet. De profielen zijn aangegeven door twee piketten op het schor in een lijn loodrecht op de schorrand. Met een waterpasinstrument zijn de relatieve hoogtes ingemeten van de piketten, van de schorrand, van eventuele treden en van enkele punten op het slik, alsmede de afstanden tussen al deze punten (zie foto 4). Deze profielen zijn in 1986 nog drie keer ingemeten, de eerste keer in maart, de tweede keer in juni/juli en de derde keer in oktober/november. Van de 26 in 1985 uitgezette profielen zijn in maart 1986 een zestal niet teruggevonden. Daarom zijn in juni/juli 1986 negen nieuwe profielen uitgezet, die dus slechts twee keer ingemeten zijn. Op het schor voor de Hellegatspolder zijn geen verdere metingen gedaan, omdat toeristen de piketten verwijderden.

Om de snelheid van de erosie te meten is naast de profielen een methode gebruikt die door Wolman (1959) bij de erosie van rivieroeveren is ontwikkeld. Volgens deze methode worden pinnen, stukken draadijzer van in dit geval 25 of 30cm, horizontaal in een schorklif gestoken. Wanneer erosie optreedt, geeft de lengte van het uitstekende gedeelte van de pin aan hoeveel materiaal is verdwenen. Door enkele pinnen boven en naast elkaar in het schorklif te plaatsen, is goed te volgen hoe het proces van erosie verloopt. De pinnen zijn tijdens het veldwerk in juni 1986 geplaatst en drie keer opgemeten met tussenpozen van ongeveer tien dagen. Tenslotte zijn de nog aanwezige pinnen in oktober/november nog één keer opgemeten. Aan de hand van de gegevens uit de metingen aan profielen en pinnen en gegevens verkregen door de inventarisatie, is de definitieve erosie/sedimentatie kaart gemaakt (bijlage 2). Daarin is weergegeven of aan een schorrand erosie of sedimentatie optreedt en in het geval van erosie van welke orde van grootte deze is.

2.4. Bodemparameters

In de schorranden zijn in 1985 grondboringen verricht met een Edelmanboor en -guts. In totaal zijn 115 boringen met een maximale diepte van 1.8m gezet, waardoor gegevens zijn verkregen met betrekking tot:

- textuuroopbouw,
- rijping,
- oxidatie/reductie,
- gehalte aan CaCO_3 (kalk),
- gehalte aan organisch stof.

De rijpingeklasse en de gehalten aan CaCO_3 en organisch stof zijn indicaties voor de bodemsterkte. Door fysische rijping (dehydratie van het sediment) wordt de bodemsterkte vergroot. Zo zal bij aangroeiende schorren de schorrand nog niet gerijpt zijn. CaCO_3 en organisch stof zijn kitmiddelen, hoge gehalten dragen bij tot een hoge bodemsterkte. Deze gehalten en de rijpingeklasse zijn geschat.

De gebruikte textuurindeling is afkomstig uit het systeem van de Stichting voor Bodemkartering (Bakker en Schelling, 1966). Deze indeling berust op het percentage lutum (fractie < $2\mu\text{m}$) en op de mediaan van de zandfractie (D_{50}). De volgende textuurindeling is gehanteerd:

- FZ fijn zand (0-8% lutum, $D_{50} = 50-210\mu\text{m}$),
- LZI lichte zavel (8-12% lutum),
- MZI matig lichte zavel (12-17.5% lutum),
- ZZI zware zavel (17.5-25% lutum),
- LK lichte klei (25-35% lutum),
- MK matig zware klei (35-50% lutum).

Tijdens de inventarisatie in 1985 is het percentage lutum in het veld geschat, evenals de mediane klasse van de zandfractie. Om de schattingen te controleren, zijn in 1986 elf monsters gestoken waarop naderhand in het laboratorium een textuuranalyse in duplo is verricht. De gewichtspercentages van de fracties groter dan $54\mu\text{m}$ zijn bepaald door een zeefanalyse, terwijl de gewichtspercentages van de fracties kleiner dan $54\mu\text{m}$ zijn bepaald door een slibanalyse, gebaseerd op verschillen in bezinkingssnelheid bij deeltjes van verschillende grootte.

Behalve de monsters voor de textuurbepaling zijn 44 monsters gestoken (lengte 25-40cm, $\varnothing = \pm 6.6\text{cm}$) ter bepaling van de druksterkte (compressive strenght) van de grond. Van de monsters zijn 13cm lange delen beproefd in het vrije priema apparaat. Dit apparaat bestaat uit een frame, een dynamometer-ring om de uitgeoefende kracht af te kunnen lezen en twee stempels (zie fig. 2.2). Het te beproeven monster wordt tussen de twee stempels geklemd waarna de onderste langzaam omhoog wordt gedraaid. Daardoor neemt de druk op het monster toe zodat het monster op een bepaald ogenblik bezwijkt. Daarbij wordt de piekspanning bereikt. Bij verder omhoog draaien van het stempel daalt de spanning en blijft vervolgens ongeveer constant, op het nivo van de restspanning.

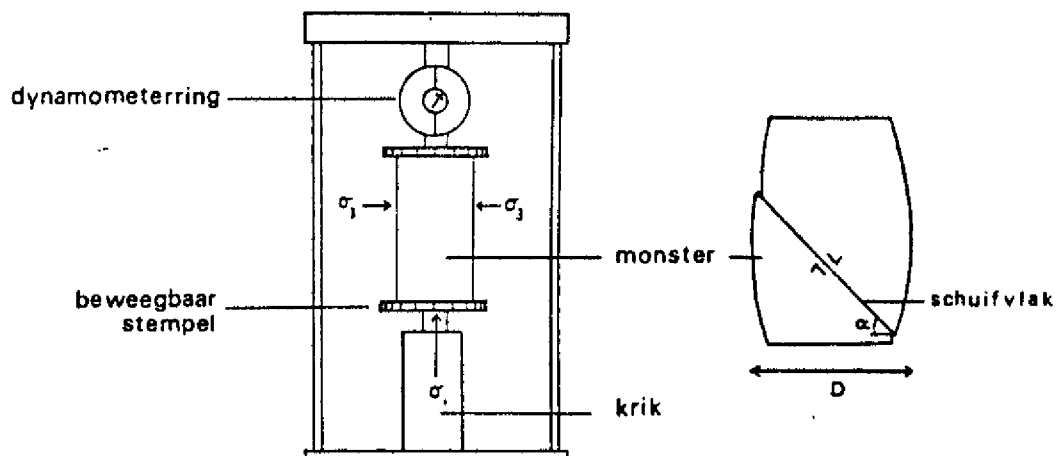


Fig. 2.2. Meetopstelling bij de vrije priema proef

De bij piek- en restspanning uitgeoefende kracht kan worden bepaald door de indrukking van de dynamometerring te vergelijken met een ijkgrafiek. De kracht vermenigvuldigd met de sinus van de hellingshoek van het schuifvlak is de schuifkracht op het schuifvlak. De druksterkte is de schuifkracht bij de pieksterkte gedeeld door het oppervlak van het schuifvlak. Uitgaande van een ellipsvormig schuifvlak wordt de (druk)sterkte gegeven door:

$$S = \frac{F \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha}{1/4 \cdot \pi \cdot D^2} \quad (2.1)$$

waarin: S = (druk)sterkte (N/m²)

F = met dynamometerring bepaalde kracht (N)

α = hellingshoek van het schuifvlak

D = grootste diameter van het monster na de proef (m)

De bepaling van de sterkte is om twee redenen uitgevoerd met de vrije prisma proef. Ten eerste komen de proefomstandigheden (verzadigd monster, snelle lastaanbrenging) goed overeen met de omstandigheden in het veld, ten tweede is de vrije prisma proef relatief snel en eenvoudig, dus goedkoop.

De monsters ter bepaling van de sterkte van de grond zijn alleen bij schorkliffen genomen, daar de sterkte alleen van belang is bij erosie. In het algemeen zijn twee monsters met een tussenruimte van ongeveer een meter op dezelfde diepte genomen.

Op de plaatsen waar twee monsters zijn genomen voor de sterktebepaling, is minimaal één monster gestoken ter bepaling van het gewichtspercentage vocht en het droge bulkgewicht (soortelijk gewicht van de grond inclusief met lucht gevulde poriën). De in totaal 26 monsters zijn eerst nat gewogen, daarna 24 uur in een oven bij 105°C gedroogd en vervolgens opnieuw gewogen. Het verschil in gewicht was het gewicht aan vocht dat het monster bevatte. Daar het volume van de monsters bekend was, kon ook het bulkgewicht bepaald worden.

Als laatste (bodem)parameter is de fluctuatie van de grondwaterspiegel in relatie tot het getij gemeten. Deze metingen zijn verricht op een gedeelte van het schor voor Emanuelpolder waar een schorklif van ongeveer 1m hoog zich over een afstand van ruim 500m uitstrekt. Deze locatie is gekozen omdat het schorklif hier geen sterke variaties in afmetingen vertoont en omdat deze locatie relatief redelijk bereikbaar is.

Ten behoeve van de metingen zijn vijf peilbuizen geplaatst (lengte 110-140cm, onderste 20cm geperforeerd, $\varnothing = 3$ cm) tot een diepte van een meter, waarbij de perforatie zich in een zavelaag bevond. De peilbuizen stonden gegroepeerd in twee groepjes van twee buizen en één buis apart. De afstand tussen de groepjes was ongeveer 40 meter, de afstand tussen de buizen binnen de groepjes was ongeveer twee meter. Alle peilbuizen stonden één meter van de schorrand af.

Gedurende twee volledige getijperioden van elk ruim 12.5 uur zijn de waterstand aan de schorrand alsmede de grondwaterstand gemeten in centimeters beneden het schoroppervlak. Het meetinterval bedroeg een kwartier tijdens snelle stijging of daling van het grondwater, en maximaal drie kwartier tijdens langzame stijging of daling.

2.5. Vegetatie

Wat de vegetatie langs de schorranden betreft, zijn in 1985 bepaald:

- dominante soorten,
- bedekkingsgraad,
- bewortelingsdiepte,
- bewortelingsgraad.

De dominante soort(en) en de bedekkingsgraad van deze soorten bepalen de beworteling. De diepte en sterkte van de beworteling zijn van belang omdat de sterkte van het bodemmateriaal door wortels beïnvloed wordt. Daarnaast is de vegetatie van belang omdat uitbreiding van het schor door uitbreiding van de vegetatie plaats zal vinden.

In 1986 is de vegetatie niet aan een nader onderzoek onderworpen.

2.6. Fouten

De klifhoogtes zijn bij het karteren van de morfologie van de schor-slikovergangen met een meetlat met centimeterverdeling gemeten. Als gevolg van de vegetatiebedekking en het voorkomen van treden in het profiel was schatting soms noodzakelijk. De klifhoogtes zijn afgerond op 5cm, de fout is hierbij ongeveer 2.5cm.

Bij het maken van de morfologische kaarten was generalisatie nodig en eenheden met een lengte van minder dan ca. 25m zijn daarom niet weergegeven. Tevens moet er rekening mee worden gehouden dat de morfologische kaarten de situatie weergeven van de zomer 1985. Het hoogteverschil en de vorm van de schor-slikovergangen kunnen sinds deze tijd veranderd zijn. Bij het bepalen van de slikhelling is in het Verdrongen Land van Saeftinghe gebruik gemaakt van een hoogtekaart, de fout in de berekende slikhelling wordt er gesteld op 0.1%. Voor de andere schorgebieden was geen hoogtekaart beschikbaar en de fout is er, als gevolg van het feit dat de meting slechts de helling vlak voor het schor beschrijft en niet de gemiddelde helling, groter, nl. 1%. De afstand tot de vaargeul is opgemeten uit een kaart 1:50.000, de fout hierbij is 100m.

Bij de bepalingen van de bodemeigenschappen kleigehalte, bulkgewicht en vochtgehalte zijn de fouten als gevolg van de analysemethoden waarschijnlijk minder dan enkele procenten. Bij het verrichten van de duplobepalingen bleken deze resultaten echter soms zeer afwijkend, tot meer dan 20%. Dit is het gevolg van de grote ruimtelijke variatie in textuur op korte afstand door de gelaagdheid. De duplomonsters komen in deze gevallen uit een andere laag.

Voor de bepaling van de druksterkte zijn ook duplo- en soms triplobepalingen verricht. Deze monsters zijn echter groter dan die voor de bepaling van de andere bodemeigenschappen, daardoor zijn de afwijkingen tussen de duplo- of triplomonsters kleiner. Wel kan een kleine systematische fout ontstaan zijn als gevolg van lichte compactie van het monster die ontstaat bij het steken van het monster. Daarnaast wordt in de berekening van de sterkte de oppervlakte van het glijvlak benaderd met een ellips. De uiteindelijke fout in de druksterkte wordt vanwege deze verschillende fouten geschat op 10%.

Bij het verrichten van de erosiemetingen met behulp van erosiepin-
ninnen is een fout van 0.25cm mogelijk. Daar de pinnen 3 tot 4
keer gemeten zijn wordt de totale fout bij de erosiemetingen
met behulp van de pinnen gesteld op ca. 0.5cm. Een fout van een
geheel andere aard die bij deze erosiemetingen op kan treden,
is de versteviging van de schorrand door het 'bewapenings-
effect' van de pinnen (Thorne en Tovey, 1981). Dit effect is
tijdens het onderzoek echter niet waargenomen. Daarentegen is
op één locatie wel waargenomen dat juist ter plaatse van een
erosiepin een horizontale scheur in het schorklif ontstond,
waarna afstorting optrad. Er lijkt dus wel een effect van de
pinnen op de sterkte te zijn, maar welke richting dit op werkt
en hoe groot dit is, is onbekend.

De erosiemetingen met behulp van relatieve waterpassing verto-
nen een grotere fout dan die met erosiepin-
ninnen. Met de gebruikte
waterpasapparatuur kunnen hoogteverschillen op 1mm en afstands-
verschillen op 10cm nauwkeurig gemeten worden, indien de baak
goed geplaatst is. Als gevolg van het wegzakken van de baak in
elap materiaal en het scheefvallen van de baak bij harde wind
zijn de hoogtemetingen echter op 5mm nauwkeurig. De fouten in de
metingen van de horizontale afstanden kunnen echter worden
gesignaleerd door vergelijking met de situaties op andere
tijdstippen en door vergelijking met de erosiepinmetingen.
Bij herhaling van de waterpasmetingen is het belangrijk dat
behalve op de juiste plaats aan de schorrand ook in de juiste
richting wordt gemeten. Plaatsbepaling is geschied met behulp
van piketten en de nauwkeurigheid is derhalve groot (tot op 1cm
nauwkeurig). De richting is bepaald met behulp van een kompas.
Door onnauwkeurigheden in het bepalen van deze meetrichting bij
de volgende waterpasmetingen bij hetzelfde punt, wordt de
gemaakte fout bij toenemende afstand groter. De grootste fouten
worden daardoor gemaakt bij het begrenzen van vegetatiepollen
die enige tientallen meters voor het schor op het slik liggen
en veelal zeer onregelmatig van vorm zijn. Gesteld wordt daarom
dat de fout in de horizontale afstand bij de waterpasmetingen
vlak bij de schorrand 10cm kan zijn. Verder van de schorrand af
(meer dan 20m) kan de fout oplopen tot meer dan 0.5 meter. Bij
waterpasmetingen aan geleidelijke schor-slikovergangen is
zoveel mogelijk een piket precies op de begroeiingsgrens
geplaatst, zodat daar op 5cm nauwkeurig de eventuele aangroei
of terugschrijding gemeten kan worden.
Bij het maken van de erosie/sedimentatiekaart (bijlage 2) is
uitgegaan van representativiteit van de metingen. Als gevolg
van het aantal metingen en de kaartschaal (1:50.000) heeft
hierbij de nodige generalisatie plaatsgevonden. De grenzen
tussen de kaarteenheden hebben een geschatte nauwkeurigheid van
ca. 100m.

3. FACTOREN EN PROCESSEN MET BETREKKING TOT EROSIE EN SEDIMENTATIE -THEORIE-

3.1. Inleiding

De factoren die bepalen of er erosie danwel sedimentatie plaatsvindt, zijn in drie groepen te verdelen. Als eerste zijn er de factoren die erosie veroorzaken, daarnaast zijn er de factoren die weerstand tegen erosie bieden en tenslotte zijn er de factoren die aangroei veroorzaken.

De erosieve factoren zijn de krachten die golven en stromingen op de schor-slikovergang uitoefenen. De weerstand tegen deze erosieve krachten is afhankelijk van de sterkte van het materiaal waaruit de schor is opgebouwd. De variatie in de erosieve krachten en in de sterkte in het schorklifprofiel bepalen de manier en de snelheid van erosie, met andere woorden het proces van erosie.

Aangroei van de schor wordt veroorzaakt door sedimentatie en door uitbreiding van de vegetatie. De snelheid van deze aangroei wordt bepaald door de manier van uitbreiding van de vegetatie en door de snelheid van de sedimentatie.

3.2. Erosieve factoren

3.2.1. Golven

Zowel de krachten die golven op een schorklif uitoefenen als het transportvermogen van golven, wordt bepaald door de energie die de golven bezitten. Deze energie hangt van de hoogte van de golven af, volgens onderstaande vergelijking (Komar, 1976):

$$E = 1/8 \rho g H^2 \quad (3.1)$$

waarin: E = energie (J/m²)

ρ = dichtheid van het water (kg/m³)

g = versnelling van de zwaartekracht (m/s²)

H = golfhoogte (m)

In het geval van golven die door de wind worden opgewekt wordt de golfhoogte bepaald door de windsnelheid, de windbaan en de tijdsduur waarin de wind over het wateroppervlak blaast (Komar, 1976). De windbaan of strijklengte is de afstand die de wind over het wateroppervlak aflegt. Voor de uiteindelijk bereikte golfhoogte is of de windbaan of de tijdsduur de beperkende factor. Met behulp van een diagram (Groen en Dorrestein, 1976) kan de door de wind opgewekte golfhoogte bij bekende windsnelheid, windbaan en tijdsduur bepaald worden.

Naast het opwekken van golven door de wind worden er in de Westerschelde golven opgewekt door schepen. Bij scheepsgolven is de hoogte afhankelijk van verscheidene scheepseigenschappen, als waterverplaatsing, rompvorm en vaarsnelheid. Daarnaast zal de hoogte van de scheepsgolven aan de echorrand afhankelijk zijn van de afstand van de echorrand tot de positie van het schip, dus in de meeste gevallen tot de vaargeul. Scheepsgolven

worden namelijk opgewekt door een puntbron, waarbij de beschikbare hoeveelheid energie over een groter oppervlak verspreid wordt naarmate de afstand tot de bron groter wordt. Hierdoor neemt de hoeveelheid energie per oppervlakte eenheid en daarmee de golfhogte af bij toenemende afstand tot het schip.

Sterk energieverlies van zowel wind- als scheepsgolven treedt op wanneer de golven breken doordat ze in ondiep water komen. In het geval van echorgebieden breken de golven op het slik. De mate waarin de golven breken wordt bepaald door de absolute hoogte, de helling en de breedte van het slik. Deze drie parameters hangen nauw met elkaar samen. Zo zal bij eenzelfde absolute hoogte van het slik ter plaatse van de echor-slikovergang het slik een kleinere helling vertonen naarmate het breder is.

De hoeveelheid energie die erosie van een schor kan veroorzaken, is uiteindelijk afhankelijk van de duur van de golfwerking tegen de echorrand. Deze duur van de golfwerking is een functie van de absolute hoogte van de klifbasis, van de hoogte van het klif en van de fase in de springtij-doodtij cyclus. Naarmate de absolute hoogte van de klifbasis lager is, zullen de golven in een vroeger stadium van een getijperiode tegen het klif kunnen slaan. Bij een hoog klif kunnen de golven gedurende een groter deel van een getijperiode eroderen. De fase in de springtij-doodtij cyclus tenelotte, bepaalt de duur van de golfwerking op één niveau. Bij doodtij stijgt en daalt het water langzamer dan bij springtij, en dus zullen de golven langer op een bepaald niveau eroderen. Daarentegen komt het water bij doodtij minder hoog tegen de klifrand en bij een absoluut hoog gelegen schor is het zelfs mogelijk dat het schor tijdens hoogwater helemaal niet bereikt wordt.

3.2.2. Stromingen

De erosieve kracht van stroming aan de bodem in een waterloop is een functie van de stroom snelheid, de diepte en de korrelgrootte van het bodemmateriaal (Richards, 1982). Bij erosie aan echorkliffen is de diepte te vergelijken met de afstand van echorklif tot de stroomdraad, de -denkbeeldige- lijn waar de stroom snelheid het grootste is.

In de Westerschelde zullen de belangrijkste stromingen optreden als gevolg van de getijden. Deze getijstromen zijn het sterkste in de eb- en vloedecharen (zie 1.1), welke meestal ver van de echor-slikovergangen liggen. Wel liggen er op het slik, soms dicht bij de echor-slikovergangen, afwateringsgeultjes, prielen genaamd. Deze zijn meestal klein en ondiep waardoor er geen sterke stromingen in op zullen treden.

In de brede kreken binnen de echorgebieden is de stroming het sterkst in de diepste gedeelten. In deze delen van de kreken bevindt zich ook tijdens laagwater nog water. Deze waterlopen, verder subgeulen genoemd, meanderen door de kreken. Daardoor liggen de subgeulen soms tegen de echor-slikovergangen aan. In het geval van smalle kreken kan niet van een slik, en dus niet van echor-slikovergangen gesproken worden.

Naaft stromingen als gevolg van de getijden kan er bij hoog water een stroming langs de schor-slikovergangen ontstaan door scheef invallende golven, de 'longshore current'. Door refractie (de ombuiging van golven in ondieper wordend water) is de hoek van inval van de golven nabij de schorrand gewoonlijk niet groot meer. Daarom zal de longshore current waarschijnlijk nauwelijks merkbaar zijn.

3.3. Weerstand tegen erosie

De weerstand van de schor tegen de erosie door golven en stromingen wordt bepaald door de sterkte van het materiaal waaruit de schor is opgebouwd. Op de schaal van bodemdeeltjes is de sterkte afhankelijk van de cohesie tussen de afzonderlijke bodemdeeltjes en van eventueel aanwezige kitmiddelen (CaCO_3 en organisch stof). Bij cohesieloze materiaal (zand) kunnen de korrels relatief gemakkelijk door golven en stromingen worden 'weggeplukt' (Schoot en Van Eerd, 1985). Bij materiaal met cohesie of kitmiddelen zal dit minder snel gebeuren. Ook kunnen in dit geval bodemaggregaten worden gevormd, die beschouwd kunnen worden als grote, zware en dus moeilijk weg te plukken korrels.

Op grotere schaal wordt de sterkte van het schormateriaal gegeven door de wet van Coulomb (Carson, 1971):

$$s = c + (\sigma - u) \cdot \tan \phi \quad (3.2)$$

waarin: s = sterkte (N/m^2)

c = cohesie (N/m^2)

σ = korrelspanning (N/m^2)

u = waterspanning = poriëndruk (N/m^2)

ϕ = hoek van inwendige wrijving

De cohesie, korrelspanning en hoek van inwendige wrijving zijn materiaaleigenschappen, afhankelijk van eigenschappen als het lutumgehalte en de mate van rijping. De poriëndruk is afhankelijk van de hoeveelheid water in de bodemporiën. Wanneer er geen water in de poriën aanwezig is, is de poriëndruk nul. Wanneer de poriën vol water zitten is de poriëndruk positief en dientengevolge de sterkte kleiner dan bij een poriëndruk die nul is. Wanneer tenslotte de poriën slechts voor een deel met water gevuld zijn dan oefent dit water een zuigkracht uit en is de poriëndruk negatief. In dit geval is de sterkte groter dan bij een poriëndruk die nul is.

De grens tussen geheel met water verzadigde en niet geheel met water verzadigde poriën ligt ongeveer op het niveau van het grondwater. De sterkte in homogeen bodemmateriaal zal boven de grondwaterspiegel daarom groter zijn dan eronder. In de schorren zal, vooral aan de randen, het grondwater vaak stijgen en dalen ten gevolge van het getij. De weerstand tegen erosie zal dus niet constant zijn.

De sterkte zoals die gegeven wordt door de wet van Coulomb kan nog door enkele externe factoren sterk beïnvloed worden. Deze factoren zijn de aanwezigheid van scheuren en van wortels.

Scheuren werken verzwakkend, beworteling daarentegen zorgt voor een 'bewapening' van het bodemmateriaal. Van de verschillende soorten beworteling is die van *Spartina anglica* (Engels slijkgras) sterker dan die van de andere op de schorren veel voorkomende soorten (Van Eerd, 1985c).

3.4. Proces van erosie

3.4.1. Homogeen materiaal

Erosie kan op twee manieren plaatsvinden, overeenkomstig met de schaalniveau's die in 3.3 beschreven zijn. Ten eerste kan er erosie plaatsvinden door 'schuren' en door 'plukken', ten tweede door massabewegingen in de vorm van afglijdingen en afstortingen (Letzech en Frey, 1980).

Schuren en plukken treden op als gevolg van golven en stromingen. Deze processen vinden relatief geleidelijk plaats (Schoot en Van Eerd, 1985). In het geval van cohesieloze materiaal wordt een korrel verplaatst of afgevoerd wanneer de component van de zwaartekracht loodrecht op de helling waarop de korrel ligt, overwonnen wordt door de resultante van de component van de zwaartekracht langs de helling en de liftkracht van het water. Deze liftkracht ontstaat doordat het water boven de korrel sneller stroomt dan dat eronder (Thorne, 1982).

Over de wijze van erosie door schuren en plukken in het geval van cohesief materiaal is veel minder bekend. Bij rivieroeveren, waar schorranden mee te vergelijken zijn, is hierbij waarschijnlijk vooral sprake van schuren en plukken van materiaal in de vorm van aggregaten (Thorne, 1982).

Welke massabewegingen optreden en op welke schaal hangt voornamelijk af van de texturele opbouw van het schorkliff. Echter voor elke massabeweging is een uitdrukking voor de veiligheidsfactor te vinden. Deze veiligheidsfactor F wordt gedefinieerd als de verhouding tussen het moment ten gevolge van de weerstandskrachten en het moment ten gevolge van de drijvende krachten:

$$F = \frac{M_w}{M_d} \quad (3.3)$$

waarin: F = veiligheidsfactor

M_w = weerstandsmoment (Nm)

M_d = drijvend moment (Nm)

Wanneer de veiligheidsfactor kleiner wordt dan 1 bezwijkt het materiaal en vindt er een massabeweging plaats. Voor cohesieloze materiaal geldt (Thorne, 1982):

$$F = \frac{\tan \phi (\gamma z \cos^2 \theta - u)}{\tan \theta + \gamma z \cos^2 \theta} \quad (3.4)$$

waarin: F = veiligheidsfactor

ϕ = hoek van inwendige wrijving

θ = hellingshoek waaronder het materiaal ligt

γ = bulkgewicht (kg/m^3)

z = afstand van oppervlak tot afschuivingsvlak (m)

u = poriëndruk (kg/m^2)

De poriëndruk is nul in het geval van droog materiaal (zie 3.3). Daarnaast is de poriëndruk nul in het geval van geheel verzadigd materiaal wat onder water is gelegen, daar de druk tussen de deeltjes dan gelijk is aan die erbuiten. In deze gevallen is de veiligheidsfactor gelijk aan 1 indien $\tan \theta = \tan \phi$. Dit houdt in dat de maximale hellingshoek gelijk is aan de hoek van inwendige wrijving. Wanneer het materiaal wel geheel is verzadigd maar niet ondergedompeld dan is de veiligheidsfactor gelijk aan 1 indien $\tan \theta = 1/2 \cdot \tan \phi$. Nu is de maximale hellingshoek dus veel kleiner dan de hoek van inwendige wrijving. In schorgebieden zal deze situatie zich direct na elk hoogwater voordoen omdat het schormateriaal dan nog verzadigd is maar er zich geen water meer tegen de schorrand bevindt. Eventuele massabewegingen zullen dan ook vlak na hoogwater optreden, ook in het geval van cohesief materiaal (Schoot en Van Eerd, 1985).

In schorkliffen opgebouwd uit cohesief materiaal kunnen massabewegingen langs gebogen of lange rechte glijvlakken optreden (zie fig. 3.1). Voor steile, niet zeer hoge rivieroeveren kunnen volgens Thorne (1982) beide vormen van massabewegingen beschreven worden met behulp van de methode van Culman, die uitgaat van een recht glijvlak door de basis van de klif (A in fig. 3.1).

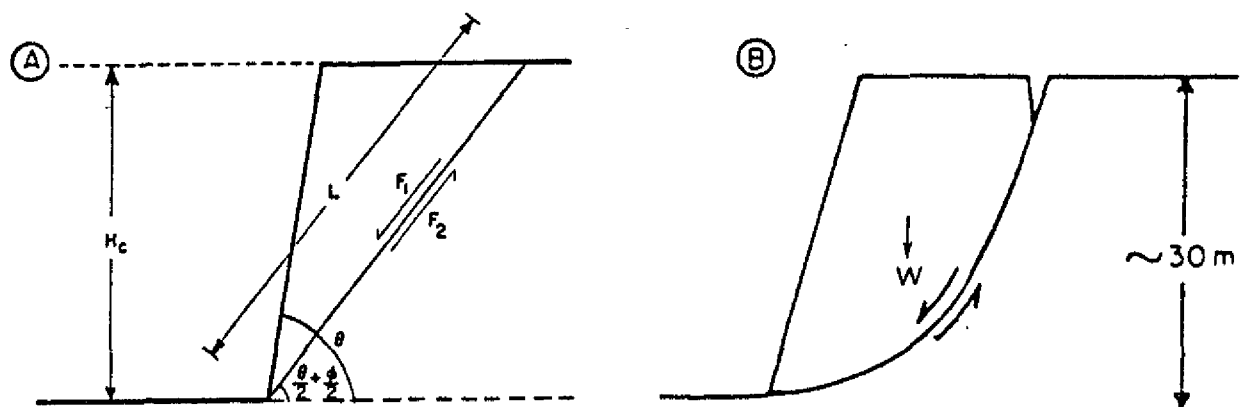


Fig. 3.1. Mogelijke glijvlakken in een schorklif
(naar Thorne, 1982)

In dit geval bestaat er bij de veiligheidsfactor $F = 1$ een bepaalde kritieke hoogte H_c welke niet overschreden kan worden. Aangevoerd kan worden dat voor deze kritieke hoogte geldt (Carson, 1971):

$$H_c = \frac{2c \cdot \sin \theta}{\gamma \cdot \sin(\theta - i) \cdot (\sin i - \cos i \cdot \tan \phi)} \quad (3.5)$$

waarin: H_c = kritieke hoogte (m)
 c = cohesie (N/m^2)
 γ = bulkgewicht (N/m^3)
 θ = hellingshoek
 i = helling schuifvlak
 ϕ = hoek van inwendige wrijving

Carson kiest $i = 1/2.\theta + 1/2.\phi$. Dan gaat de vergelijking voor H_c over in:

$$H_c = \frac{4c \cdot \sin \theta \cdot \cos \phi}{\gamma \cdot [1 - \cos(\theta - \phi)]} \quad (3.6)$$

Deze vergelijking kan zowel voor kliffen in rotatiesieven als in klei gebruikt worden en geeft soms goede resultaten. Voor klei is H_c bij een hellingshoek van 90° echter meer dan 3 meter. Een kleipakket met een dergelijk dikte zal in de schorgebieden langs de Westerschelde echter nooit worden aangetroffen.

3.4.2. Gelaagde kliffen

Schorren zijn veelal opgebouwd uit verschillende lagen met verschillende sterkte-eigenschappen, bijvoorbeeld door verschil in cohesie. Twee eenvoudige mogelijkheden voor kliferosie kunnen nader uitgewerkt worden: erosie in het geval van cohesieloze materiaal (zand) op cohesief materiaal (klei), en erosie in het omgekeerde geval (klei op zand).

In het eerste geval, een zandlaag op een kleilaag, zal het zand door echuren en plukken veel sneller geërodeerd worden dan de klei. Hierdoor ontstaat een trede in het profiel, waarbij zand en klei onder hun maximale hellingshoek kunnen komen te liggen. Zowel in de zand- als in de kleilaag zullen zich afglijdingen voordoen indien de veiligheidsfactor tot onder de 1 daalt, bijvoorbeeld door overschrijding van de maximale hellingshoek of door scheuren.

Bij een afwisseling van meerdere, dunne zand- en kleilaagjes treedt een ander proces op: oppervlakkige erosie (Schoot en Van Eerd, 1985). In een periode van lage hoogwaterstanden droogt het kleilaagje dat de bovenkant van de trede vormt uit. Daardoor ontstaan krimppecheuren in de klei. Wanneer de kleilaag naderhand door golven overspoeld wordt zal de waterdruk van een golf sneller worden doorgegeven naar het onderliggende zandlaagje via de krimppecheuren dan via de klei. Door het drukverschil dat hierbij ontstaat wordt het kleilaagje als het ware uit het profiel gelicht. Het zand eronder kan vervolgens gemakkelijk eroderen door echuren en plukken.

Het tweede geval, een kleilaag op een zandlaag, zal zich vaker voordoen dan het eerste, daar bij een hoger wordend schor gewoonlijk steeds minder zand en meer klei zal worden afgezet. Ook in dit geval zal door echuren en plukken het zand sneller eroderen dan de klei. De kleilaag wordt daardoor ondergraven. De weerstand tegen erosie daalt, waardoor de veiligheidsfactor ook daalt. Wanneer deze lager wordt dan 1 zal zich een massabeweging voordoen.

Thorne en Tovey (1981) hebben een drietal mogelijke manieren van afstorting beschreven die na ondermijning op kunnen treden (fig. 3.2). Met behulp van 'stability charts' kan voor elk van de drie mogelijke manieren de veiligheidsfactor bepaald worden, zodat bekend is of er gevaar voor afstorting bestaat en op welke manier afstorting zal plaatsvinden.

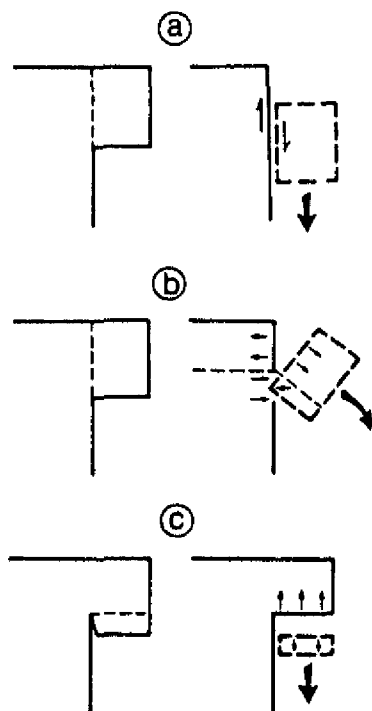


Fig. 3.2. *Bezwijkingsmodellen voor ondergraven schorkliffen*
(Thorne en Lewin, 1979)

a = shear failure (schuiven)

b = beam failure (vooroverzakken)

c = tensile failure (gedeeltelijk afbreken)

Door Van Eerd (1985a) is één van de drie manieren van afstorten nader uitgewerkt: het vooroverzakken van het ondermijnde klif ('beam failure'). Bij het vooroverzakken treedt rek op aan de bovenzijde en druk aan de onderzijde van het overhangende gedeelte (fig. 3.3). De maximale rek treedt op wanneer het klif op het punt staat te bezwijken, dus wanneer de veiligheidsfactor gelijk is aan 1.

Volgens het momenten-evenwicht geldt dan (Van Eerd, 1985b):

$$F = 1 = \frac{1/3 \cdot \sigma_{ds} \cdot d^2 - 1/3 \cdot \sigma_{tm} \cdot t^2}{1/2 \cdot \text{oppABCD} \cdot \gamma \cdot b} \quad (3.7)$$

waarin: F = veiligheidsfactor

σ_{ds} = druksterkte op moment van bezwijken (N/m²)

σ_{tm} = maximale treksterkte (N/m²)

d = afstand OA (m)

t = afstand OB (m)

γ = bulkgewicht (N/m³)

b = ondergravingsdiepte (m)

oppABCD = afmetingen overhangende blok (m²)

Uitgaande van een horizontaal krachtenevenwicht zijn de druk- en de treksterkte aan elkaar gelijk:

$$1/2 \cdot \sigma_{ds} \cdot d + 1/2 \cdot \sigma_{tm} \cdot t = 0 \quad \text{dus} \quad \sigma_{tm} = -\sigma_{ds} \cdot d/t \quad (3.8)$$

Vergelijking (3.7) kan geschreven worden als:

$$b = \frac{1/3 \cdot \sigma_{ds} \cdot d^2 - 1/3 \cdot \sigma_{tm} \cdot t^2}{1/2 \cdot \text{oppABCD} \cdot \gamma} \quad (3.9)$$

Door Van Eerd (1985a) is met deze vergelijking in eerste instantie gecontroleerd of de gemeten en berekende ondergravingsdiepte b overeen kwamen. Daarna is de vergelijking gebruikt om aan de hand van de ondergravingsdiepte en de verhouding d/t de maximale treksterkte σ_{tm} te voorspellen.

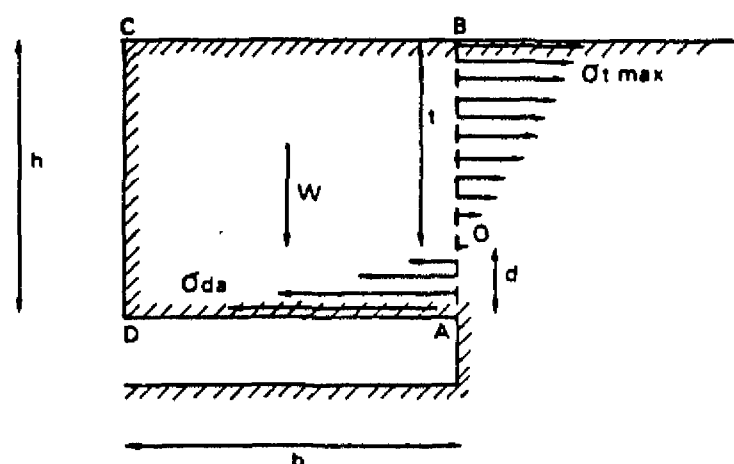


Fig. 3.3. Definitie-schets voor beam failure volgens Van Eerd (1985a)

3.5. Aangroei

Schorren zijn gedefinieerd als begroeide buitendijkse gronden. Aangroei van schorren vindt daarom per definitie plaats door uitbreiding van de vegetatie. De pioniervegetatie in een zout milieu is voornamelijk *Spartina anglica* (Engels rijkgras) en *Salicornia europaea* (Zeekraal) (Van Eerd, 1985c). *Spartina anglica* kan zich uitbreiden door groei van de wortelstokken of door middel van zaad. *Salicornia europaea* kan zich alleen door middel van zaad uitbreiden. In een brak milieu is ook *Scirpus maritimus* (Zeebies) een pioniersoort.

De uitbreiding van de vegetatie door zaad kan veel sneller gaan dan de groei van wortelstokken, maar is gebonden aan een aantal voorwaarden voor het zaad (Schoot en Van Eerd, 1985). De eerste vestigingsvoorwaarde is dat zaden voldoende hoog boven NAP. moeten liggen omdat anders zaadrot optreedt. Dit houdt in dat het eik ten gevolge van sedimentatie voldoende hoog moet zijn komen te liggen. De tweede vestigingsvoorwaarde is dat er klemskrachtige zaden op enkele centimeters beneden het oppervlak van het eik moeten liggen (voor *Spartina anglica*: 1,5-3cm

beneden het oppervlak). Er mag dus niet al te veel sedimentatie optreden en zeker geen netto erosie. Dit impliceert dat de erosieve krachten van golven en stromingen, beschreven in 3.2, klein moeten zijn. Om de erosieve kracht van de golven voldoende te verkleinen is een breed, steil of absoluut hoog gelegen slik noodzakelijk (zie 3.2.1). Daar de eerste vestigingsvoorwaarde een absoluut hoog gelegen slik impliceerde kan geconcludeerd worden dat echoruitbreiding mogelijk is daar waar het slik voldoende hoog is gelegen en er zich geen prieltje in bevindt waar een te sterke stroming in op zou kunnen treden.

Uit het voorgaande blijkt dat het niet zo is dat echoruitbreiding tegen het schor aan hoeft op te treden. Het is ook mogelijk dat nieuw schor op het slik een eindje van het schor verwijderd ontstaat, mits aan de vestigingsvoorwaarden is voldaan.

Daar waar nieuw schor gevormd is, hetzij door zaad hetzij door wortelstokken, worden de golven en stromingen sterk afgeremd door de planten. Daardoor wordt het eventueel door het water meegevoerde sediment voor het grootste gedeelte afgezet. Het nieuwe schor wordt aldus snel opgehoogd, waardoor andere planten dan de pioniers de kans krijgen er zich te vestigen.

4. RESULTATEN VAN HET ONDERZOEK

4.1. Inventarisatie schor-slikovergangen

De morfologische kenmerken van de schor-slikovergangen in het oostelijk deel van de Westerschelde zijn in 1985 bepaald. Uit de beschrijving van deze morfologische kenmerken (Van der Meulen en Schoor, 1986) is onderstaand overzicht afgeleid (tabel 4.1). Daarnaast wordt in het eerste deel van dit hoofdstuk (4.1.2 en 4.1.3) een beknopte beschrijving van de onderzochte gebieden gegeven (zie ook bijlage 1.1 t/m 1.7).

Tabel 4.1. Enkele morfologische parameters van de schor-slikovergangen in het oostelijk deel van de Westerschelde

gebied	lengte echorrand		gel. overg	klif laag hoog		expo- sitie	slik hell. br.		vaar geul
	km	%		%	%		%	m	
Saeftinghe	9	41	55	20	25				
bij Baalhoek	1.8	8	80	20	0	NO	3	700	1
Konijnenschor	2.0	9	85	15	0	N	1	600	1
Marlem. Plaat	1.8	8	45	40	15	N	1.5	500	1
Blauwe Plaat	1.3	6	15	0	85	N	1	500	2
De Noord	1.1	5	10	30	60	NO	2.5	250	2
Boogaard	1.0	5	60	30	10	O	4	150	0.5
Noordoever	13	59	15	50	35				
Ellewoutdijk	2.7	12	25	65	10	Z	3	250	4
Baarland	1.6	7	0	5	95	Z	10	50	4
Blezel. Ham	0.4	2	90	10	0	ZO	1	600	4
Emanuelpolder	3.4	16	15	35	50	ZW	3	400	4
Bath	3.7	17	10	80	10	Z	2	500	1
Appelzak	1.2	5	10	25	65	W	5	200	2
Totaal langs Westerschelde	22	100	30	40	30				
Langs geulen in Saeftinghe	16	100	45	5	50		<30		

4.1.1. Schor-slikovergangen in het Verdrongen Land van Saeftinghe

Het schorareaal van het Verdrongen Land van Saeftinghe grenst over een lengte van ca. 9km aan de Westerschelde. De schorranden bestaan voor 45% uit echorkliffen en voor 55% uit geleidelijke overgangen van schor naar slik.

De gebieden die voornamelijk gekenmerkt worden door een geleidelijke echor-elikovergang zijn (zie bijlage 1.1): Schor tussen Baaihoek en Paal, Konijnenschor O, Marlemontse Plaat W (het Scheldestrand) en Boogaard (de ligging van deze en andere gebieden in het Verdronken Land van Saeftinghe is te vinden in fig. 4.1).

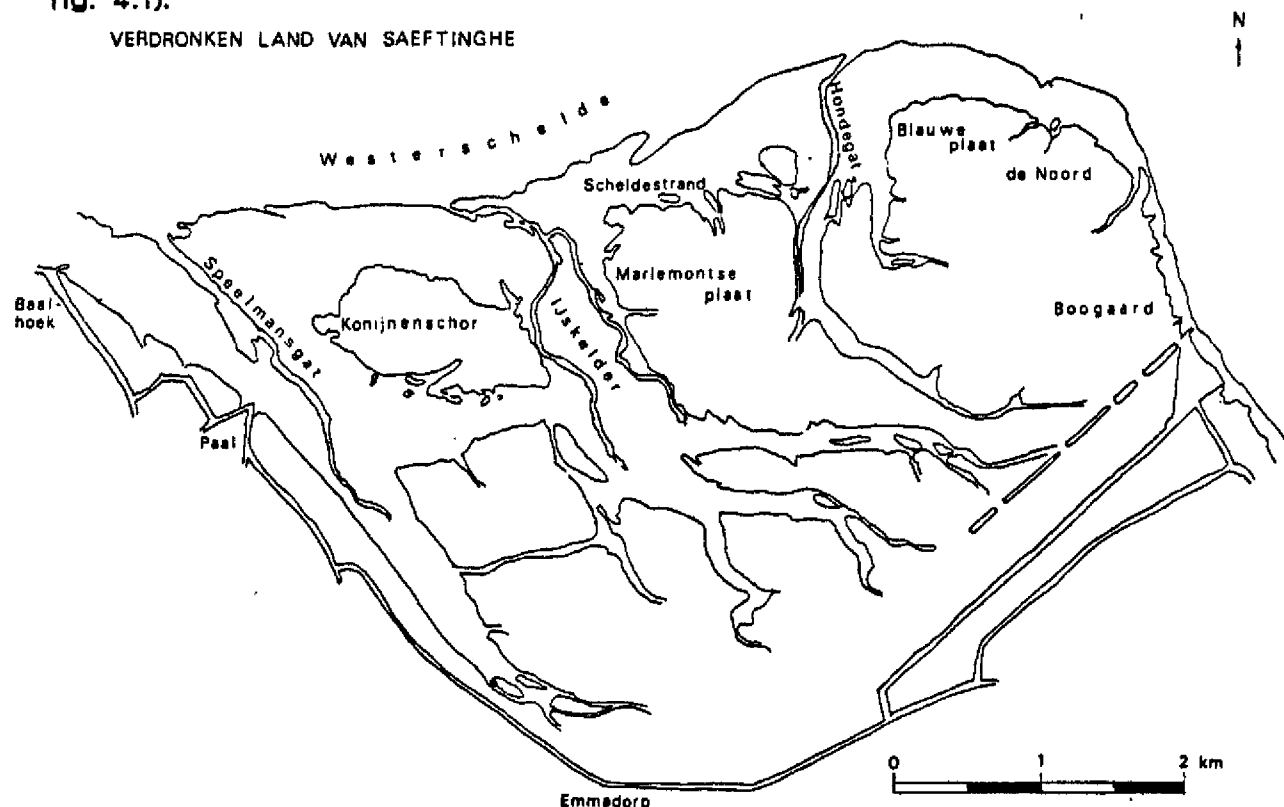


Fig. 4.1. Het Verdronken Land van Saeftinghe

Boogaard is geëxposeerd op het oosten en heeft een smal (150m) en steil (4%) elik. De vaargeul ligt op slechts 500m afstand van de echorrand. De andere bovengenoemde echorren zijn geëxposeerd op het noorden en hebben een flauwer hellend elik (1-3%) dat ca. 800m breed is. De afstand tot de vaargeul is er 1km. Voor vrijwel alle geleidelijke echor-elik overgangen geldt dat de textuur zandig is en dat de vegetatie bestaat uit de pioniersoorten *Spartina anglica* (Engels elikgras) of *Scirpus maritimus* (zeebie). Met uitzondering van de schor tussen Baaihoek en Paal zijn de geleidelijke echor-elikovergangen gelegen boven het gemiddeld hoogwater niveau (GHW = NAP +2.5m, Daamen, 1983). Dit lijkt een belangrijke factor voor de aard van de morfologie.

Gebieden die gekenmerkt worden door lage kliffen (tot 25cm hoog) afgewisseld met geleidelijke echor-elikovergangen zijn de schor ten zuiden van Baaihoek, Konijnenschor NW en De Noord NW (zie bijlage 1.1). Over het algemeen is de echorrand gelobd en liggen de geleidelijke echor-elikovergangen in de beschutte inhammen. De textuur is meestal zandig met dunne kleibandjes. Het elik is net als bij de gebieden met alleen geleidelijke echor-elikovergangen breed en flauw hellend. Daarentegen ligt het schor lager dan GHW. In de inhammen met geleidelijke echor-elikovergangen bestaat de begroeiing uit *Spartina anglica*. Op de echorkliffen komen ook andere plantensoorten voor.

Gebieden met schorkliffen tussen 25cm en 1m hoogte liggen in het oostelijke deel van de Marlemontse Plaat en op de Blauwe Plaat (zie bijlage 1.1). Op de Marlemontse Plaat is de klifhoogte 30-60cm. De kliffen zijn getrapt van vorm bij gelaagde profielopbouw en ondergraven indien de klifbasis lager ligt dan de zandige ondergrond. Alleen in het meest oostelijke deel van de Marlemontse Plaat liggen er afstortingen voor het klif. De schorkliffen van de Blauwe Plaat zijn ca. 90cm hoog en getrapte, rechte en ondergraven kliffen komen voor. Een gelaagd pakket van klei, zavel en zand van ca. 90cm dikte ligt op een zandige ondergrond. De schorrand ligt lager dan GHW. Het 1% hellende elik heeft een breedte van 500m. De vaargeul ligt in vergelijking met andere delen van het Verdrongen Land van Saeftinghe wat verder van de schorrand verwijderd (2km).

Aan de schorranden van het zuidoosten van De Noord komen zeer hoge kliffen voor (ca. 1.3m). Deze zijn ondergraven of recht van vorm en er ligt een groot aantal afstortingen op het elik. De bovengrond bestaat uit een zandig, gelaagd kleipakket met daar onder ongelaagde klei. Het geheel ligt op een zandige ondergrond, die op een diepte van ca. 1.2m begint. Het schor ligt beneden GHW en het elik is smal (80-300m) en tamelijk steil (5%). De schorrand is gelegen op korte afstand van de vaargeul (0.5km).

4.1.2. De geulen in het binnenland van het Verdrongen Land van Saeftinghe

Ook de schor-elikovergangen aan de kreek in het Verdrongen Land van Saeftinghe met een breedte van meer dan 200m zijn in het onderzoek betrokken. Deze kreek zijn tijdens hoog water geheel met water gevuld, terwijl bij laag water er zich alleen water bevindt in de subgeulen (zie 3.2.2)

De subgeulen meanderen in de geulen en de processen die daardoor optreden zijn vergelijkbaar met die in meanderende rivieren: erosie in buitenbochten, sedimentatie in binnenbochten, meandermigratie en meanderhalsafsnijding. Daar waar de subgeul zich tegen de schorrand aan bevindt, worden de hoogste kliffen aangetroffen. Deze kliffen kunnen een hoogte bereiken van ca. 3m (inclusief klifvoet), dit is aanzienlijk hoger dan de kliffen elders langs de Westerschelde. Geleidelijke schor-geul overgangen vindt men daar waar de subgeul ver van de schorrand verwijderd ligt, meestal tegenover de hoogste schorkliffen. Aan 55% van de geulranden komen kliffen voor en aan 45% geleidelijke schor-geulovergangen. In het binnenland overheerst volgens Van Genuchten (1982) sedimentatie.

4.1.3. Schor-elikovergangen aan de noordzijde van de Westerschelde

De totale lengte van de schorranden die aan de noordzijde van de Westerschelde liggen, bedraagt 13km. Geleidelijke schor-elikovergangen komen slechts over 15% van de lengte van deze schorranden voor. Het gaat hier voornamelijk om

de 'zijanten' van de schorren: die gedeelten die aan de dijk grenzen, zoals bijvoorbeeld het meest oostelijk deel van de schorren bij Bath (bijlage 1.6) en bij Ellewoutedijk (bijlage 1.3). Het enige schorgebied dat hoofdzakelijk (90%) geleidelijke schor-slik overgangen kent is de Biezelingse Ham (bijlage 1.4). Dit schorgebied ligt zeer beschut in een bocht van de dijk (expositie ZO). Het schoroppervlak is echter zeer klein (ca. 2 ha).

Over het algemeen bestaat de vegetatie ter plaatse van de geleidelijke schor-slikovergangen, net als in het Verdrongen Land van Saeftinghe, uit *Spartina anglica* (Engels elikgras) en in mindere mate uit *Scirpus maritimus* (Zeebies). De bodem bestaat veelal uit een laagje lichte klei (± 10 cm dik) op zand en is ongerijpt als gevolg van veelvuldige overspoeling en/of recente afzetting.

Lage kliffen (tot 0.5 m hoog) komen veelvuldig voor aan de schor bij Ellewoutedijk (zie bijlage 1.3). De schorrand is er gelobd en de schorkliffen in de inhammen zijn lager dan op de lobben. Ook geleidelijke schor-slikovergangen komen in de inhammen wel voor. De profiel-opbouw is uniform en bestaat uit lichte klei op een zandige ondergrond. Op deze zandige ondergrond zijn de kliffen ondergraven, tot 0.5 m. De vegetatie ter plaatse van de schorrand bestaat uit *Spartina Anglica* (Engels elikgras). De elikbreedte voor de schor bij Ellewoutedijk neemt van west naar oost toe van 80 tot 380 m.

Ook gedeelten van de schor-slikovergangen van de schorren bij Bath (bijlage 1.6), het oostelijk deel van de schorren voor Emanuelpolder (bijlage 1.5) en het noordelijk deel van Appelzak (bijlage 1.7) bestaan uit lage schorkliffen. Dit zijn rechte of ondergraven schorkliffen, behalve bij Appelzak waar getrapte kliffen worden aangetroffen.

Hoge schorkliffen (ca. 1 m) komen lange 35% van de schorranden aan de noordzijde van de Westerschelde voor, met name lange de schor bij Baarland, het westelijk deel van de schorren voor Emanuelpolder en het zuidelijk deel van Appelzak.

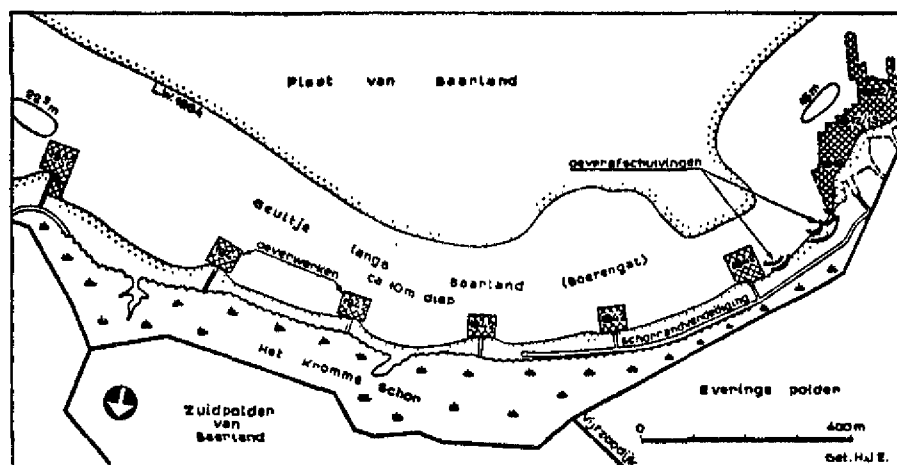


Fig. 4.2. De schor bij Baarland in 1967 (Wilderom, 1968)

De schor bij Baarland is gelegen aan een getijdegeul (zie bijlage 1.3). In het midden is het slik het smalst en zijn de kliffen het hoogst (ca. 2 m). Naar de randen toe neemt de

slikbreedte toe en de klifhoogte af. De meeste kliffen zijn ondergraven of recht. In 1922 en 1942 zijn er strekdammen aangelegd (Wilderom, 1988) en in de zestiger jaren een dam ter verdediging parallel aan de schorrand voor het westelijk deel van de schor (zie fig. 4.2).

Het westelijk deel van de schorren voor Emanuelpolder (bijlage 1.5) wordt gekenmerkt door schorkliffen van 1.0 tot 1.4m hoog, die voornamelijk getrapt van vorm zijn. Voor het gelobde schorfront liggen veel afgeronde afetorringen op het klif. De vegetatie vertoont een grote soortenrijkdom en de bodem is gelaagd opgebouwd. Het slik is er ca. 400m breed en vertoont een helling van ongeveer 3%.

Langs een klein deel (ongeveer 200m) van de schorrand bij Bath (bijlage 1.6) komen kliffen van ca. 1m hoogte voor. De begroeiingsgrens ligt hier verder landinwaarts dan het rechte klif; er is een trede ontstaan. De vegetatie bestaat uit *Scirpus maritimus* (Zeebies) en het 500 brede slik heit flauw ($\pm 2\%$). De vaargeul ligt dicht onder de kust, namelijk ongeveer 1km van de schorrand verwijderd. De andere schorgebieden aan de noordzijde van de Westerschelde liggen op grotere afstand van de vaargeul: Appelzak op 2km, de overige op 4km.

Als enige schorgebied is Appelzak op het weeten geëxposeerd (zie bijlage 1.7). Het zuidelijk deel van de schor-slikovergangen bestaat uit schorkliffen met een hoogte variërend van 0.8 tot 1.1m, en een veelal getrapte vorm. Daar waar de vegetatie uit *Phragmites communis* (Riet; zie foto 3) bestaat treft men de hoogste kliffen aan, die aan de basis, ter plaatse van de zandige ondergrond, ondergraven zijn. Het slik bij Appelzak is slechts 80 tot 200m breed, waarbij de hoogste kliffen daar liggen waar het slik het smalst is.

4.2. Resultaten erosiemetingen

4.2.1. Erosiemeting met behulp van waterpassingen

Op 24 locaties zijn de schor-slikovergangen verscheidene malen met behulp van relatieve waterpassing ingemeten. Deze locaties zijn aangegeven in fig. 4.3. Om een indruk te krijgen van de variatie in erosie en sedimentatie op korte afstand zijn op vijf van deze locaties steeds 2 metingen met een onderlinge afstand van ca. 1.5m verricht.

De metingen werden indien mogelijk vier keer verricht, te weten in juli 1985, april 1986, juni 1986 en oktober/november 1986. De meeste metingen (15) zijn over de gehele periode van 15.5 maanden aan de noordzijde of 16 maanden in Het Verdrongen Land van Saeftinghe 4 maal uitgevoerd. Vijf meetreeksen zijn voortijdig afgebroken en omvatten een meetperiode van 9 of 11 maanden. Acht meetreeksen zijn pas later gestart (juni 1986) en bestaan een periode van 4 maanden. De ingemeten profielen zijn getekend (zie bijlage 3) en de totale erosie in de meetperiode is berekend in strekkende en vierkante meters (zie bijlage 4). Om de verschillende meetperiodes met elkaar te vergelijken is de erosie op jaarbasis berekend. Hiertoe is aangenomen dat in de meetperiode van 16 maanden tussen juli 1985 en november 1986, $16/12 = 1.33$ maal de jaarlijkse erosie optrad.

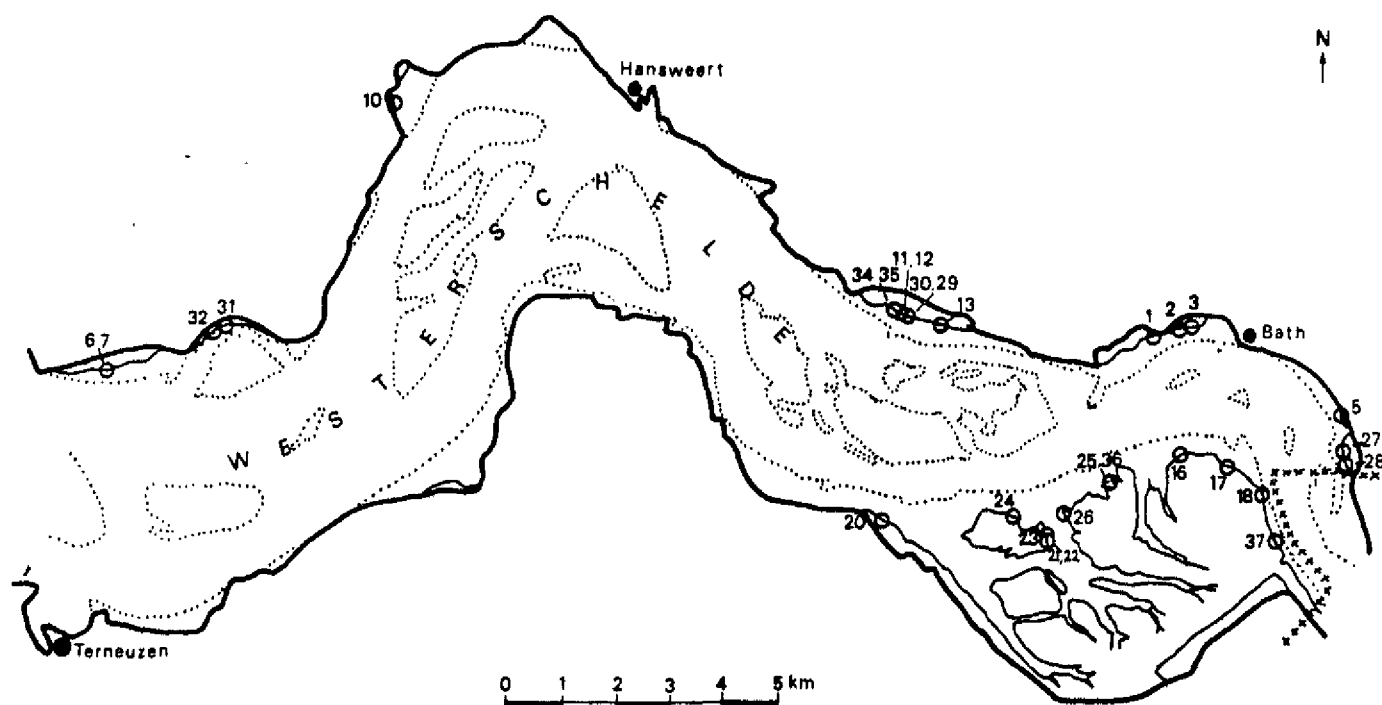


Fig. 4.3. Ligging van de meetpunten

Dit is te rechtvaardigen indien de grootte van de erosieve factoren in deze meetperiode niet significant afweek van het gemiddelde. De erosieve factoren zijn onder te verdelen in golven en in stromingen (zie 3.2). De invloed van de stromingen is daarbij waarschijnlijk ondergeschikt aan de invloed van de golven (zie 3.2), daarom is alleen het golfregime nader beschouwd.

De erosieve kracht van windgolven wordt bepaald door de golfhoogte, die afhankelijk is van de windenelheid (zie 3.2.1). De frequenties en de gemiddelde snelheden van de wind zijn, per windrichting, vermeld in bijlage 8. De daarin gegeven waarden voor de periodes juli 85 t/m oktober 86 en juni 86 t/m oktober 86 zijn berekend aan de hand van de cijfers per decade (periode van tien dagen).

Uit bijlage 8 blijkt dat de gemiddelde windenelheid in de meetperiode juli 85 t/m oktober 86 voor vrijwel alle windrichtingen $1/2$ m/s lager is dan het langjarig gemiddelde van het tijdvak 1951 t/m 1980. De verdeling over de windrichtingen (de frequenties) wijkt echter meer af. In de meetperiode waait de wind meer uit noordoostelijke en uit zuidwestelijke tot zuidelijke richtingen, dan in het tijdvak 1951 t/m 1980. Daar de winden uit zuidelijke en westelijke richtingen het krachtigste zijn, zal het totale erosieve effect in de meetperiode niet of enigszins lager zijn dan het gemiddelde.

Dit blijkt ook uit gewogen gemiddelde (zie bijlage 8), dat is bepaald door het percentage van de wind uit een bepaalde richting te vermenigvuldigen met de gemiddelde snelheid van deze wind, en de uitkomsten daarvan per periode te sommeren. Er blijkt dat het gewogen gemiddelde van de snelheid in de meetperiode ongeveer 3.5% lager is dan van het tijdvak 1951 t/m 1980.

Bij de meetperioden van 15.5, 11 en 9 maanden is dezelfde methode van evenredigheid toegepast om de erosie op jaarbasis te berekenen als bij de periode van 16 maanden. Bij de berekening van de erosie op jaarbasis van de acht meetpunten die slechts over een periode van 4 maanden (juni-oktober 1986) zijn ingemeten, is er vanuit gegaan dat deze korte zomerperiode waarschijnlijk niet in evenredigheid heeft bijgedragen aan de erosie op jaarbasis.

Om na te gaan welke relatie er bestaat tussen de erosie van juni 1986 tot oktober 1986 en de erosie op jaarbasis zijn de metingen van 14 punten, die over de gehele periode van 15.5 of 16 maanden verricht zijn, bestudeerd (zie bijlage 5). Hierbij is een vermenigvuldigingsfactor X geïntroduceerd:

$$\text{Erosie juni 1986-oktober 1986} * X = \text{Erosie op jaarbasis} \quad (4.1)$$

Uit de gegevens blijkt dat $X = 5.5$ met een standaardfout van 4.3. Als de vermenigvuldigingsfactor X gelijk aan 3 zou zijn, zou er sprake zijn van gemiddelde erosie in de periode juni 1986 tot oktober 1986. Uit het feit dat $X = 5.5$ blijkt dat er in deze periode relatief weinig erosie is opgetreden. Dit stemt overeen met de waarnemingen van Van Eerd (1985b) in de Oosterschelde, dat klifrugwijing in de periode december tot maart sterker is dan gedurende de rest van het jaar. Met behulp van de vermenigvuldigingsfactor X is de erosie op jaarbasis berekend voor die meetpunten waar de meetperiode 4 maanden was.

De geringe erosie in de periode juni 86 t/m oktober 86 zou ook moeten blijken uit lagere windeneligheden in deze periode. Daarom zijn ook voor deze periode de frequenties en de gemiddelde snelheden berekend (zie bijlage 8). Daaruit blijkt dat de gemiddelde snelheid 1/2 of 1 m/s lager is dan het langjarig gemiddelde. De wind waait daarbij meer uit het noordoosten en uit het westen dan normaal.

Het gewogen gemiddelde is aanzienlijk lager dan in het tijdvak 1954 t/m 1980, bijna 11%. Ook is dit gemiddelde ruim 7% lager dan dat van de gehele meetperiode, juli 85 t/m oktober 86.

Dit verschil in windenelheid verklaart voor een deel de relatief geringe erosie in de periode juni 86 t/m oktober 86. Daarbij speelt ook de verdeling van de wind over deze periode een rol. De winden sterker dan het gemiddelde kwamen namelijk vooral voor in de laatste maand van de periode. Het werkelijk erosieve effect hiervan (bijvoorbeeld afstorting van een ondermijnd gedeelte) kan pas later opgetreden zijn. Daarnaast speelt de vegetatie een rol, die in de zomermaanden het erosieve effect meer zal tegengaan dan 's winters.

Om een indruk te krijgen van de variatie in erosiesnelheid op korte afstand, zijn een vijftal dubbele metingen gedaan (zie fig. 4.3). Dit wil zeggen dat op één locatie twee metingen met een onderlinge afstand van ongeveer anderhalve meter gerealiiseerd zijn. In vier van de vijf gevallen is gekozen voor de situatie waarbij één van de metingen op een uitstekend deel van de schorrand (lob) is gedaan en de andere in een inham.

Uit een overzicht van deze dubbele metingen (tabel 4.2) blijkt dat er situaties zijn waarbij geen verschil in erosiesnelheid optreedt, en waarbij dit zeker wel het geval is.

Tabel 4.2. *Overzicht van de erosie
bij de dubbele metingen*

koppels nr's	erosie in m/jr
6 en 7	1.3 resp. 0.5
11 en 12	3.5 resp. 3.5
21 en 22	3.5 resp. 3.5
29 en 30	5.0 resp. 5.5
34 en 35	3.0 resp. 1.4

De metingen nr 6, 11, 30 en 35 lagen op de vooruitstekende lobben, terwijl de metingen nr 7, 12, 29 en 34 in inhammen gesitueerd waren. De metingen nr 21 en 22 lagen aan een rechte schorrand. Duidelijk wordt dat de erosie in drie van de vier gevallen sneller gaat op de lobben dan in de inhammen. Dit kan het gevolg zijn van het convergen van golfstralen als gevolg van de refractie die optreedt in ondieper wordend water.

4.2.2. Erosie in de onderzochte gebieden

Schorren in het Verdrunken Land van Saeftinghe

Schor tussen Baalhoek en Paal.

In het noordwestelijke deel van de schor, bij een afwisseling van geleidelijke schor-elikovergangen en kliffen tot 25cm hoogte en combinaties hiervan, is meting nr 20 (zie fig. 4.3) verricht tussen juli 1985 en april 1986. Het betrof hier een klifje van 20cm hoogte met 6m begroeiing voor het echorklif. De gemeten erosie van het klif bedraagt 0.1m, terwijl op het laag-schor de begroeiing 0.2m is teruggetrokken. Beide gemeten waarden liggen binnen de meetfout, waarbij tevens in beschouwing dient te worden genomen dat in april de nieuwe loten van *Spartina anglica* (Engels elijkgras) nog niet opgekomen zijn. Er wordt aangenomen dat deze schor een erosie vertoont van minder dan 0.1m per jaar (zie bijlage 2). De grens stabiliteit/erosie is hier moeilijk te leggen in verband met de korte meetreeks en de meetfout. De meting wordt representatief geacht voor het noordwestelijke deel van de schor tussen Baalhoek en Paal. In het zuidoostelijke deel, waar alleen geleidelijke schor-elikovergangen voorkomen, treedt waarschijnlijk geen erosie op.

Konijnenschor.

De schor-elikovergangen op Konijnenschor zijn hoofdzakelijk geleidelijk, met op vooruitstekende lobben af en toe lage echorkliffen (tot 30cm). De waterpaemetingen zijn gedaan ter plaatse van een geleidelijke schor-elikovergang in het noordoosten van Konijnenschor, waar de begroeiing uit *Spartina anglica* bestaat (nr 24). In de periode juli 1985 tot april 1986 trad verlaging van het elik en het laag-schor op met ongeveer 5cm. Tussen april 1986 en juni 1986 was er geen verandering. Van juni 1986 tot november 1986 is er een achteruitgang van de

begroeiing met ca. 0.1m gemeten.

In dit geval is de erosie van 0.1m toch groter dan de meetfout, daar de piket ten tijde van de eerste meting precies op de grens tussen de vegetatie en het onbegroeide slik is geplaatst. Aan deze aanvankelijk als stabiel aangeduide echorrand treedt dus toch erosie op. Dit impliceert dat althans één van de in 2.3 gestelde hypothesen (een afwisseling van laag klif/geleidelijke overgang duidt op sedimentatie) niet juist is. De erosie is in dit geval weliswaar gering in vergelijking tot enkele andere echorgebieden, maar in ieder geval niet verwaarloosbaar.

De meting wordt representatief geacht voor in ieder geval 60% van de echorrand van Konijnenschor, dat deel waar af en toe lage schorkliffen zijn. De echorrand van Konijnenschor wordt getypeerd als zijnde gering erosief met een erosie van maximaal ca. 0.1 meter per jaar (zie bijlage 2).

Marlemontse Plaat

Op de Marlemontse Plaat zijn op twee locaties waterpaasmetingen gedaan, meting nr 26, gelegen op de westpunt en metingen nr 25 en 36, gelegen in het oostelijk deel.

Meting nr 26, op de westpunt van Scheldestrand (het westelijk deel van de Marlemontse Plaat), is gesitueerd ter plaatse van een geleidelijke echor-slikovergang. Er ligt een vegetatiepol van ongeveer 3,5m lang op het slik. De waterpaasmetingen werden verricht tussen juli 1985 en juni 1986. Tot maart 1986 gebeurt er weinig, de gemeten terugtrekking van de vegetatiepol ligt binnen de meetfout. Tussen maart 1986 en juni 1986 treedt verlagings van het echoroppervlak met ca. 5cm op en de vegetatie trekt zich 5 à 10cm terug. Tevens wordt de vegetatiepol 70 à 90cm kleiner als gevolg van erosie aan de 'zeewaartse' kant. Evenals bij Konijnenschor is een geleidelijke echor-slikovergang, hier met vegetatiepollen, geen indicatie voor echor-uitbreiding. De meting wordt representatief geacht voor geheel Scheldestrand en de erosie bedraagt er ca. 0.1 meter per jaar (zie bijlage 2).

Meting nr 25 betreft een laag klif (0.2m) in een gebied met afwisselend ondergraven klif en geleidelijke echor-slik overgangen in het oosten van de Marlemontse Plaat. De erosie is gemeten tussen juli 1985 en april 1986. In die periode bedroeg de klifrugwijing 0.4m, hetgeen een erosie van 0.5m op jaarbasis inhoudt. Ongeveer ter plekke van meetlocatie nr 25 is tussen juni 1986 en november 1986 meting nr 36 verricht, bij een abrupte echor-slikovergang met een klifhoogte van minder dan 10cm. De echorugwijing bedroeg in de meetperiode 0.2m, terwijl er tevens een verlagings van het echoroppervlak en van het slik optrad van 5-10cm. De erosie op jaarbasis is er 1.1m. De punten nr 25 en 36 zijn representatief voor het oostelijk deel van de Marlemontse Plaat (bijlage 2). De erosie is er 0.5-1.0 meter per jaar.

Het meest oostelijke deel van de Marlemontse Plaat, grenzend aan het Groot Hondgat, is qua morfologie vergelijkbaar met de Blauwe Plaat welke hierna besproken wordt. Lage absolute hoogteligging van echor en slik, en schorkliffen van ca. 50cm hoog zijn de belangrijkste morfologische kenmerken in vergelijking met de rest van de Marlemontse Plaat. De erosie bedraagt er waarschijnlijk meer dan 1 meter per jaar.

Blauwe Plaat

Op de Blauwe Plaat is meting nr 16 verricht aan een 0.95m hoog schorklif met een getrapte vorm. Het punt wordt representatief geacht voor het westen van de Blauwe Plaat (zie bijlage 2). De schorkliferosie was in de meetperiode juli 1985 tot november 1986 2.1m (2.0m²). Hierbij ging de begroeiingsgrens slechts 0.9m achteruit. De erosie op jaarbasis van de schorrand bedraagt 1.8 meter.

In dit westelijk deel van de Blauwe Plaat ligt de klifbasis op ca. NAP +1.0-1.5m. Meer naar het oosten echter ligt deze op een hoogte van NAP +2.0m. Hierdoor zal de golfwerking er wellicht minder zijn dan in het westelijk deel van de Blauwe Plaat hetgeen een minder sterke erosie kan impliceren.

De Noord

Ter plaatse van een laag gelegen deel van De Noord (NAP +1.6m) met lage kliffen (0.2m) is meting nr 17 uitgevoerd. In de meetperiode, tussen juli 1985 en november 1986, bedroeg de erosie 1.9 meter (0.5m²). Dit komt overeen met een erosie van 1.6 meter per jaar (bijlage 2). De klifhoogte zegt hier dus niets omtrent de mate van erosie. De lage absolute hoogte van het slik en dus van de klifbasis veroorzaken een relatief langdurige golfwerking en deze speelt waarschijnlijk een grote rol in het veroorzaken van de erosie.

In het zuiden van De Noord treft men een schorrand aan die bestaat uit hoge kliffen tussen de 1.2 en 1.4m. Deze schorkliffen zijn vaak ondergraven op de op 1.15m -mv beginnende zandige ondergrond. De waterpeasmetingen zijn verricht tussen juli 1985 en november 1986, in die periode erodeerde de schorrand 4.7m (6.9m²). Op jaarbasis is dit ca. 4.0m.

Dit gedeelte van De Noord is blootgesteld aan een energierijk milieu, waar als gevolg van de lage absolute hoogteligging (NAP +1.8m), de grote elikhelling (3-5%) en de geringe elikbreedte (ca. 150m) de golven weinig afgeremd zullen worden. Als gevolg van de geringe strijklengte en de expositie op het oosten is de golfwerking door wind echter gering. Scheepsgolven, gegenereerd vanuit de op minder dan 1km afstand liggende vaargeul, zijn daardoor zeker van invloed op de erosie.

Boogaard

In het zuid-oostelijk deel van het Verdronken Land van Saeftinghe genaamd Boogaard, treft men een hoog (NAP +2.5m), zandig schor aan, dat geleidelijk overgaat in het slik. De vegetatie bestaat er uit *Scirpus maritimus* (Zeebies). In de meetperiode juni 1986 tot november 1986 werd er, ter plaatse van meetpunt nr 37, 10cm schoruitbreiding geconstateerd. Blijkbaar is de hoogteligging hier van groter belang bij het al dan niet optreden van erosie/sedimentatie dan de grote elikhelling (4%), de kleine elikbreedte (150m) en de nabijheid van de vaargeul op 0.5km afstand.

In een poging de elikuitbreiding in de tijd te extrapoleren is uitgegaan van een groeiseizoen van 6 maanden van april tot en met september. De meting vond plaats tijdens de laatste 3 maanden van het groeiseizoen. Bij gelijkmatige uitbreiding zou er per groeiseizoen, en dus per jaar, 20cm schoruitbreiding

plaatsvinden. De schoruitbreiding wordt dan ook geschat op 10 tot 20cm per jaar (zie bijlage 2).

De geulen in het Verdronken Land van Saeftinghe

Aan de oostzijde van Konijnenschor, waar de geul Ijsbreker schorkliffen heeft gevormd, zijn een drietal waterpas-profiel-metingen gedaan.

Meetpunt nr 21 en 22 waren gesitueerd op dat gedeelte van het schor waar een van de twee subgeulen van de Ijsbreker nabij de schorrand aan lag. De kliffen hadden een hoogte van respectievelijk 0.85m en 1.10m. Daaronder bevond zich een klifvoet die tot aan de subgeul reikte. De erosie bedroeg tijdens de meetperiode, van juni 1985 tot november 1986, 4.6 resp. 4.7m (7.00 resp. 7.65m²). Dit komt overeen met een erosiesnelheid van 3.5 meter per jaar. Meetpunt nr 23 was gelegen ter plaatse van een 0.75m hoog klif, waar de subgeul op grotere afstand van het schor lag dan bij de punten 21 en 22. In dezelfde meetperiode bedroeg de erosie 2.5m (2.53m²). Dit komt neer op een erosie snelheid van 1.9 meter per jaar, aanzienlijk minder dan bij de punten 21 en 22 (zie bijlage 2).

Schorren aan de noordzijde van de Westerschelde

Schor bij Ellewoutdijk

Ongeveer in het midden van de gelobde schorrand van de schor bij Ellewoutdijk zijn op een uitstekende punt en in een inham de meting nr 6 en 7 verricht. De afstand tussen de profielen bedroeg ongeveer 3 meter. De metingen worden als combinatie representatief beschouwd voor de gehele schorrand, uitgezonderd het meest oostelijke deel, waar zich geleidelijke schor-slikovergangen bevinden.

Meetpunt nr 6 betrof een laag klif (0.4m) die ondergraven werd op een 5cm dikke zandlaag op 35-40cm -mv, net onder de wortelvoet van de *Spartina anglica*. Tussen juli 1985 en oktober 1986 is er een erosie van 1.70m (0.90m²) gemeten. Het grootste gedeelte hiervan vond plaats na april 1986, als gevolg van voornamelijk zijwaartse afkalving. Op jaarbasis bedraagt de gemeten erosie 1.5 meter. Het erosieve proces was zeer duidelijk ondergraving en afetorting. De maximale gemeten ondergravingsdiepte bedroeg 30cm. Bezwijking had toen reeds plaatsgevonden.

Meting nr 7 vond plaats in een inham, 3 meter van meting nr 6 verwijderd, waar zich in juli 1985 een vrijwel geleidelijke overgang van schor naar slik bevond. In de meetperiode, van juli 1985 tot oktober 1986, heeft er zich echter een ondergraven klif van ruim 50cm hoogte ontwikkeld. Het slik is hierbij 40cm verlaagd. De terugschrijding van de schorrand bedroeg 0.60m. Dit komt overeen met een erosiesnelheid van 0.50 meter per jaar. De erosie van de schorrand van Ellewoutdijk wordt geschat op 1.0 meter per jaar, waarbij de erosie zich concentreert op de uitstekende lobben van de schorrand. De afwisseling van kliffen op de lobben en geleidelijke overgangen in de inhammen kan niet als gemiddeld stabiel worden beschouwd.

Schor bij Baarland

Op de schor bij Baarland is in juni 1986 en oktober 1986 profiel nr 31 ingemeten. De dam parallel aan de echorrand ligt niet voor dit deel van de schor. Andere meetpogingen zijn gestrand als gevolg van het verwijderen van piketten door mensen. Met behulp van erosiepinen is een profiel van een echorklif waarvoor de parallelle dam op het slik ligt (nr 32), alsnog beschikbaar. Beide profielen zijn ongeveer in het midden tussen twee strekdammen gelegen.

Op locatie nr 31 is in twee profielen met een onderlinge afstand van 1.5m tussen juni en oktober 1986 een achteruitgang van 40 en 30cm gemeten aan kliffen met een hoogte van respectievelijk 1.25 en 1.35m. Omgerekend naar jaarbasis is dit ongeveer 2 meter. Dit punt is waarschijnlijk representatief voor het middendeel van het schor bij Baarland, waar hoge kliffen voorkomen en geen parallelle dam op het slik ligt.

Achter deze parallelle dam, ter plaatse van meetpunt nr 32, bedroeg de erosie in de meetperiode gemiddeld 3cm, hetgeen overeen komt met een erosie van ongeveer 0.2 meter per jaar. De parallelle dam heeft duidelijk vermindering van de erosie tot gevolg alhoewel deze niet tot stilstand is gebracht (bijlage 2).

De Biezelingse Ham

Er is op de Biezelingse Ham, waar vrijwel alleen geleidelijke schor-slikovergangen met *Spartina anglica* voorkomen, een profielmeting (nr 10) verricht in juli 1985, maart 1986 en juni 1986. Hierbij is schorerosie noch schoruitbreiding geconstateerd. Wel zijn schor en slik als gevolg van sedimentatie van slib in één jaar ca. 30cm opgehoogd. Waarschijnlijk is er ook een zekere mate van schoruitbreiding (uitbreiding van de vegetatie) opgetreden (zie bijlage 2), maar deze was met de gebruikte methode niet meetbaar. De meting werd zeer bemoeilijkt vanwege de textuur die uit ongerijpte klei bestond.

Schorren voor Emanuelpolder (bij Waarde)

Op de schorren voor Emanuelpolder zijn op vier locaties schor-klif-profielen ingemeten. Het zijn in het westen de koppels 11-12, 29-30 en 34-35, en in het oosten profiel nr 13.

Meetpunt nr 13 betrof een laag klif (30cm) met vegetatievestiging op het slik/laageschor. In de periode juli 1985 tot oktober 1986 is erosie van het klif geconstateerd, alsmede ophoging en eventueel uitbreiding van de vegetatiepol. De klifsterugwijking bedroeg 0.8m (0.1m²), dit is op jaarbasis 0.7m. Ondanks de vegetatie die zich voor het klif gevestigd heeft, en die de golfhoogte zal verminderen is het klif dus niet stabiel. In de winter zal de afremming van de golven ook maar gering zijn door de afsterven van de vegetatie, terwijl de erosieve krachten dan vaak het grootst zijn. Onduidelijk is of de vegetatiepol zich uitbreidt of dat er sprake is van een meetfout bij het meten over grote afstand.

Uit de vergelijking tussen de topografische kaart van 1980 (gebruikt als ondergrond voor bijlage 1.5) en veldwaarnemingen in 1985, blijkt dat delen van de in 1980 gekarteerde vegetatie in 1985 niet meer aanwezig waren. Daaruit kan men concluderen

dat ook de vegetatiepollen voor de schorkliffen onderhevig zijn aan erosie. Verondersteld wordt dat profielpunt nr 13 representatief is voor het oostelijke deel van de schorren voor Emanuelpolder, en dat de erosie er 0.5 tot 1.0 meter per jaar bedraagt (zie bijlage 2).

Iets westelijk van het midden van de schorren voor Emanuelpolder bevonden zich de westelijke meetlocaties. De schorrand wordt hier gekenmerkt door hoge getrapte kliffen met een sterk gelaagd bodemprofiel. De klifhoogte is ca. 1.15m, de vaste zanddiepte zit er op 1.30m.

De meetperiode duurde voor meting nr 11 en 12 van juli 1985 tot oktober 1986. De andere profielen zijn alleen in juni 1986 en oktober 1986 ingemeten. Ter plaatse van elk van de 6 profielen zijn 2 of 3 erosiepin-meetreeksen beschikbaar.

De locaties van de waterpasprofielen liggen ca. 150m van elkaar verwijderd, terwijl de afstand tussen 2 metingen op 1 locatie ongeveer 1.50m bedraagt.

In onderstaande tabel (tabel 4.3) wordt een overzicht gegeven van de meetresultaten van de 6 metingen.

Tabel 4.3. Meetresultaten van de schorren voor Emanuelpolder

nr	klif- hoogte (m)	klif- erosie (m)	erosie veget. (m)	erosie (m ²)	tijd (mnd)	erosie jaar (m/jr)	erosie gem. (m/jr)
35	1.15	0.25	2.7	0.56	4	1.40	— 2.2
34	1.30	0.55	0.55	0.91	4	3.0	/
11 ¹	1.15	4.5	5.6	5.6	15.5	3.5	— 3.5
12 ¹	1.15	4.5	6.2	6.2	15.5	3.5	/
11 ²	1.15	0.5	1.3	0.62	4	2.8	— 2.2
12 ²	1.15	0.3	0.85	0.36	4	1.7	/
30	1.00	0.9	1.1	0.73	4	5.0	— 5.3
29	1.20	1.0	0.65	0.85	4	5.5	/

¹periode juli 85 t/m oktober 86

²periode juni 86 t/m oktober 86

Hieruit blijkt dat er in de periode van juli 1985 tot oktober 1986 bij de profielen nr 11 en 12 meer erosie optreedt dan geschat aan de hand van de erosie tussen juni 1986 en oktober 1986, met de vermenigvuldigingsfactor X. De erosie op jaarbasis bij de punten nr 29, 30, 34 en 35 is dus waarschijnlijk hoger. In vrijwel alle gevallen trekt de begroeiingsgrens zich sneller terug dan het schorklif, de trede aan de bovenzijde van het klif wordt breder. Blijkbaar neemt de aanwezigheid van een hoger percentage zand in de bovengrond de sterkte meer af, dan dat de aanwezige wortelmat de sterkte verhoogt.

Van de 6 metingen zijn nr 11 en 12 door hun langere meetperiode het betrouwbaarst, de erosie is hier 3.5 meter per jaar. Uit de andere metingen volgt een erosie van 2.2 tot 5.3 meter per jaar. Voor het westelijk deel van de schorren voor Emanuelpolder, waar de metingen representatief voor zijn, wordt de erosie op 3 tot 4 meter per jaar geschat.

Het westelijk deel van de schorren voor Emanuelpolder (bij Waarde) moet dan ook als één van de meest bedreigde schor-gebieden in de Westerschelde gezien worden (zie bijlage 2).

Schorren bij Bath

Meting nr 1, welke representatief wordt geacht voor het westelijk deel van de schorren bij Bath, vond plaats bij een recht klif van 20cm hoog waarvoor, op het elik, zich vier vegetatiepollen bevonden. Ongeveer 50m van de schorrand lag de verst verwijderde vegetatiepol. Uit de waterpasmetingen, welke plaats vonden tussen juli 1985 en juni 1986, komt enige variatie in de grootte van de vegetatiepollen tot uitdrukking. Er is sprake van een licht erosieve schorrand met een erosie van minder dan 1 meter per jaar (bijlage 2).

Het oostelijk deel van de schorren bij Bath vertoont grote variatie. Er is één profielmeting verricht ter plaatse van een dubbel klif (nr 2) en één in een gedeelte met hoge kliffen, wat iets verder van de laagwaterlijn afligt (nr 3). Dit laatste waterpasprofiel is aangevuld met metingen met behulp van erosiepinen.

Het dubbele klif (nr 2) bestaat uit een 75cm hoog schorklif waarvoor zich, op de grens van de vegetatie en het elik, een tweede klif heeft ontwikkeld (hoogte 0.2m). Deze twee kliffen liggen ongeveer 25 meter uit elkaar. Beide kliffen zijn onderhevig aan erosie. In de periode juli 1985 tot maart 1986 is bij het tweede, voorste klif een achteruitgang van 3.5m ($0.5m^2$) gemeten, terwijl het achterste klif 0.4m ($0.5m^2$) achteruit schreed, voornamelijk in de periode juni 1986 tot oktober 1986. Tevens is het vegetatieoppervlak voor het achterste klif als gevolg van erosie 0.1m verlaagd.

Meting nr 3, die een 0.95m hoog schorklif betrof, vond plaats tussen juli 1985 en oktober 1986. Hierbij is de meeste erosie gemeten tussen juli 1985 en maart 1986, in welke periode tevens een groot deel van de bovenste laag met de vegetatie weggeslagen is. In de periode maart 1986 tot juni 1986 vond verdere achteruitgang van de begroeiing en velaging van het onbegroeide oppervlak plaats, terwijl tussen juni 1986 en oktober 1986 de schorrand zelf erodeerde. De totale gemeten erosie bedroeg 2.1m ($2.4m^2$). Dit komt overeen met 1.6 meter per jaar.

In dit oostelijk deel van de schorren bij Bath maken de grote variatie in klifhoogte en klifvorm extrapolatie van de metingen moeilijk. In het meest oostelijke deel, gelegen in de bocht van de dijk, is de situatie wellicht wat meer vergelijkbaar met die ter plaatse van meetpunt nr 1, de erosie wordt hier daarom op minder dan 1 meter per jaar geschat. Voor het middendeel, waar meetpunten nr 2 en 3 gesitueerd zijn, bedraagt de geschatte jaarlijkse erosie 1.5 tot 2.0 meter (bijlage 2).

Schorren van Oessendrecht (Appelzak)

In het noordelijk deel van Appelzak, waar lage kliffen voorkomen, is profielmeting nr 5 verricht, tussen juli 1985 en oktober 1986. In het profiel bevond zich een 10cm hoog schorklif met een getrapte vorm. Voor het klif, in het elik, bevonden zich wortelstokken en wortelresten, die op eerdere erosie duiden. In de meetperiode bedroeg de erosie 2.1m ($0.4m^2$), op jaarbasis is dit 1.7m. Verwacht wordt dat meetpunt nr 5 representatief is voor het gehele noordelijk deel van Appelzak (bijlage 2).

In het zuidelijk deel van Appelzak zijn twee profielmetingen gedaan. Meetpunt nr 27, waarbij waterpassing en erosiepinmeting zijn toegepast, en punt nr 28, waar alleen met erosiepinnen is gemeten daar de piketten voor de waterpassing na verloop van tijd waren verdwenen. In beide gevallen betrof het de meetperiode juni 1986 tot en met oktober 1986.

Ter plaatse van meetpunt nr 27 bevinden zich ondergraven kliffen met een hoogte van ongeveer 0.9m. De vegetatie op het schor bestaat uit *Phragmites Communis* (Riet; foto 3), wat zeer dikke wortels en wortelstokken heeft (tot 2cm Ø). Het meetpunt is slechts representatief voor een klein gedeelte van de zuidelijke schor, daar morfologie en vegetatie zoals die zijn bij punt nr 27 niet algemeen voorkomen op Appelzak. Opvallend bij de meting is de ondergraving van ruim 20cm diep, die op de zandige ondergrond plaats vond. De beworteling van het riet versterkt hier de bovengrond. In de meetperiode bedroeg de erosie 0.7m, hetgeen overeenkomt met 3.9 meter per jaar.

Meetpunt nr 28 is waarschijnlijk representatief voor vrijwel het gehele zuidelijke schor, uitgezonderd de omgeving van punt nr 27. Het schorklifprofiel is min of meer schuin en er is geen sprake van ondergraving daar het schorklif uit homogene klei bestaat. Tussen 9-6-86 en 15-7-86 was de erosie enige centimeters. Op 24-10-86 waren de 30cm lange pinnen als gevolg van erosie verdwenen. De schorrand is in die tijd dus minimaal 30cm achteruit gegaan. De erosie per jaar wordt daarom geschat op 1.5 tot 2.5 meter (bijlage 2).

4.2.3. Erosiemetingen met behulp van erosiepinnen

Met behulp van de in de zomer van 1986 geplaatste erosiepinnen is het proces van schorkliferosie nader bestudeerd en vergeleken met beschrijvingen uit de literatuur. Er is onderscheid gemaakt tussen getrapte, ondergraven en rechte schorklifpen.

Bij getrapte kliffen (foto 2) is oppervlakkige erosie waargenomen (zie fig. 4.4A). In het gelaagde schorklif werden de afzonderlijke nivo's eerst ondergraven op de minder cohesieve zandlaag en daarna trad laagsgewijze erosie op. Deze is volgens Schoot en Van Eerd (1985) het gevolg van drukverschillen die ontstaan doordat de zandige lagen bij overspoeling eerder met water verzadigd zijn dan de kleilagen (zie 3.4.2). Deze drukverschillen veroorzaken het wegslaan van de kleilagen. Het zand dat daarna aan de oppervlakte tevoorschijn komt, erodeert.

Naast oppervlakkige erosie is veelvuldig waargenomen dat iedere trap van het schorklif gelijkmatig erodeert en zich terugtrekt (fig. 4.4B). Dit is het gevolg van schuren en plukken. Het proces gaat langzamer maar regelmatig dan de oppervlakkige erosie. Het kwam voor dat bij een meetpunt, gelegen op een uitstekende lob, oppervlakkige erosie optrad met een klifterugwijing van 85cm, terwijl in dezelfde meetperiode van 16 dagen anderhalve meter verderop in een inham, door plukken en schuren een klifterugwijing van slechts 3cm gemeten werd. Het verschil in intensiteit van de erosie wordt veroorzaakt doordat als gevolg van refractie de lob bloot staat aan hogere golfenergie dan de inham.

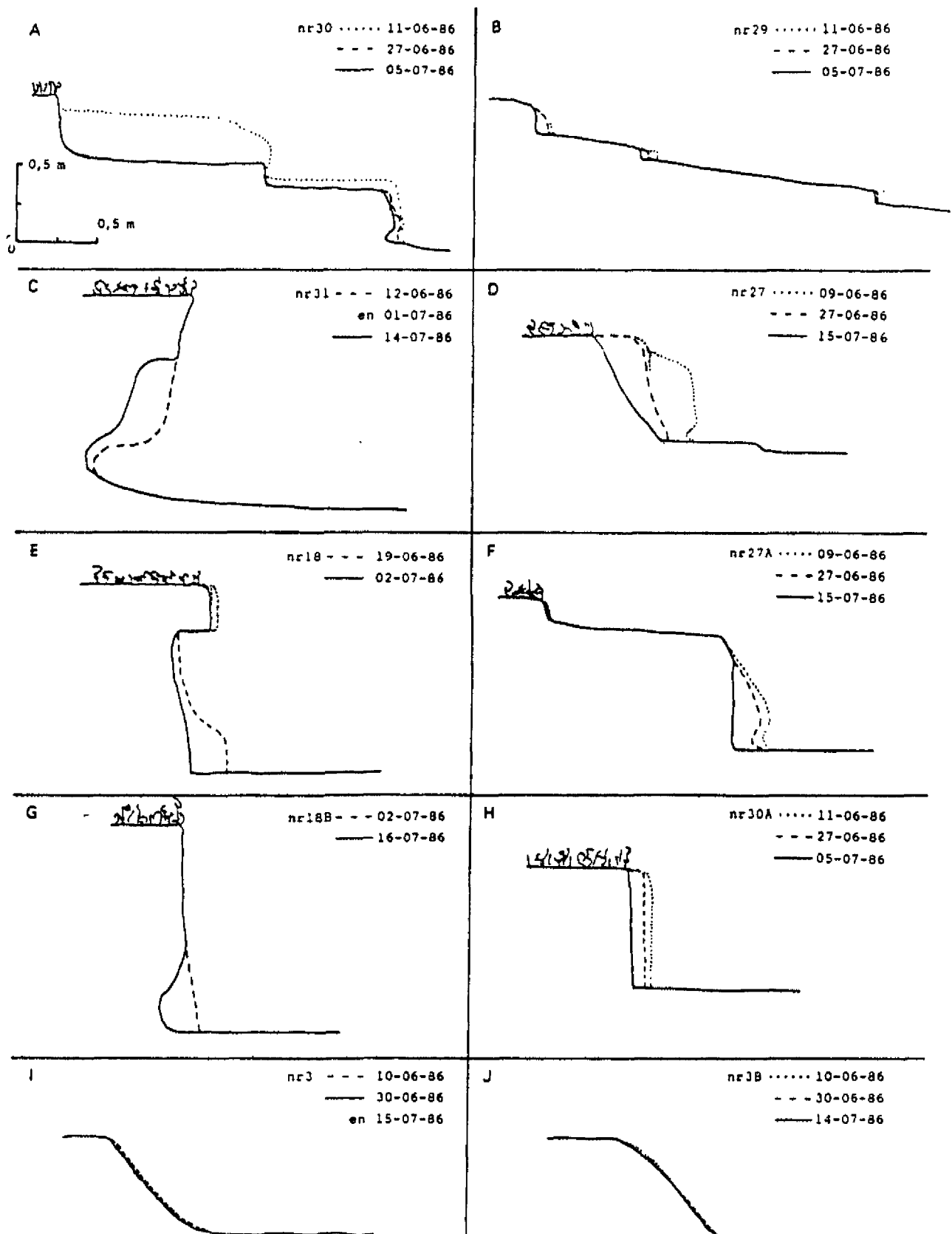


Fig. 4.4. Resultaten erosiepinmetingen

Bij ondergraven kliffen is naast plukken en echuren het belangrijkste erosieproces ondergraving en afstorting. Het schorklif wordt in dit geval op de zandige ondergrond ondergraven en het overstekende blok stort af indien het gewicht hiervan de inwendige weerstand overtreft. Ondergravingsdiepten van 65cm zijn waargenomen (fig. 4.4C). Evenals in de literatuur (Thorne en Tovey, 1982; Van Eerd, 1985a) is hier waarschijnlijk vooroverzakken ('beam failure') het meest voorkomende bezwijkingsgedrag. Het ontstaan van scheuren in de schor speelt hierbij een rol (zie fig. 4.4D; zie foto 5). Uit de metingen blijkt eveneens dat het overstekende blok niet noodzakelijkerwijs in zijn geheel hoeft af te storten. Indien er zich een scheur halverwege het overhangende blok bevindt, kan ook op die plaats bezwijking plaatsvinden (fig. 4.4E). Tijdens het proces van ondergraving, afstorting en opruiming doen zich vaak fasen voor waarbij de klifvorm recht is (fig. 4.4F en 4.4G). Dit is met name het geval na het bezwijken van het schorklif, waarbij de erosieve energie gebruikt wordt voor het opruimen van het afgestorte materiaal en hernieuwde ondergraving nog niet begonnen is.

Er zijn ook rechte kliffen aangetroffen waarbij geen sprake was van ondergraving, maar waar de erosie alleen veroorzaakt werd door het regelmatig plukken en wegschuren van aggregaten (fig. 4.4H). Het voorkomen van rechte kliffen geeft dus geen uitsluitend over het eroderende proces. Van doorslaggevend belang is de diepte van de zandige ondergrond ten opzichte van de klifbasis. Bij geheel kleiige, ongelaaide profielen trad geen laagsgewijze oppervlakkige erosie en geen ondergraving en afstorting op. De waargenomen erosie is er alleen een gevolg van echuren en plukken.

Dit laatste erosieproces werd ook vaak als enige erosieproces aangetroffen bij schuine schorkliffen, die daarom als een variant gezien worden op de rechte. Bij concave (fig. 4.4I) en convexe (fig. 4.4J) schorkliffen is geen verschil in wijze van erosie waargenomen. Bij beide trad regelmatige, lichte achteruitgang op (max. 5cm per maand) als gevolg van plukken en echuren.

Volgens Thorne en Lewin (1979) kan het voorkomen dat het plaatsen van erosiepinna de sterkte van schorkliffen positief beïnvloedt en dat met name ondergravingsdiepten groter worden dan dat ze in een natuurlijke situatie zouden zijn. Gezien de geringe lengte van de gebruikte erosiepinna (max. 30cm lang) in verhouding tot de dimensies van de schorkliffen, en gezien het voorkomen van een zeer grote en dichte wortelzone, wordt dit effect in dit onderzoek als te verwaarlozen beschouwd (zie 2.6).

4.2.4. Erosie en sedimentatie in cijfers en in kaart

Voor de erosie/sedimentatiekaart (bijlage 2) zijn de onderstaande schattingen gebruikt (tabel 4.4). De schattingen zijn gebaseerd op de waterpaasmetingen, de erosiepinmetingen en de waarnemingen met betrekking tot homogeniteit en representativiteit in de morfologie van de schor-slikovergangen.

Tabel 4.4. *Overzicht van de erosie en sedimentatie in het onderzoeksgebied*

gebied	erosie (m/jr)	sedimentatie (m/jr)
Verdronken Land van Saeftinghe		
Baalhoek	<0.1	
Konijnenschor	<0.1	
Marlemontse Plaat		
west	0.1	
oost	0.5-1.0	
meest oostelijk	0.5-1.5	
Blauwe Plaat/De Noord, noord	1.5-2.0	
De Noord, zuid	4.0	
Boogaard		
noord	1.0	
zuid		0.1-0.2
Schor bij Ellewoutedijk		
west	1.0	
oost	<1.0	
Schor bij Baarland		
west (achter parallelle dam)	0.1-0.2	
midden	2.0	
oost	1.0-2.0	
Biezellingse Ham		<0.1
Schorren voor Emanuelpolder		
west	3.0-4.0	
oost	0.5-1.0	
Schorren bij Bath		
west	0.1-1.0	
midden/oost	1.5-2.0	
meest oostelijk	<0.1	
Appelzak (Schorren bij Ossendrecht)		
- noord	1.0-2.0	
zuid	1.5-2.5	

Voor de erosie/sedimentatiekaart zijn deze gegevens omgezet in de volgende vijf klassen (zie bijlage 2):

- sedimentatie,
- erosie gering, <0.1 m/jr,
- erosie matig, 0.1-1 m/jr,
- erosie sterk, 1-2 m/jr,
- erosie zeer sterk, >2 m/jr.

4.3. Bodemparameters

4.3.1. Textuuranalyse

De schattingen van de textuur in het veld zijn gebruikt bij de beschrijving van de schorgebieden in 4.1.1. Om deze schattingen te controleren zijn textuuranalyses in duplo uitgevoerd op elf monsters. Een vergelijking met de textuur die geschat is volgens de indeling van Bakker en Schelling (1966; zie 2.4) is gemaakt in tabel 4.5.

Tabel 4.5. *Vergelijking tussen bepaalde en geschatte textuur*

Gebied	Monster- nummer	kleipercentsages duplobepalingen		textuur- klasse	textuur geschat
Saeftinghe	1	32	34	LK	LK
(De Noord)	2	28	31	LK	LK
Ellewoutedijk	3	21	24	ZZI	LK-FZ gel.
Baarland	4	16	24	MZI-ZZI	LK-FZ gel.
Emanuelpolder	5	25	26	LK	LK-FZ gel.
	6	16	21	MZI-ZZI	LK-FZ gel.
	7	40	31	MK-LK	LK
Bath	8	13	-	MZI	ZZI
	9	33	29	LK	LK
Appelzak	10	39	39	MK	MK
	11	43	42	MK	MK

De bepaling van monster 8 is niet in duplo uitgevoerd daar één monster verloren is gegaan.

Bij bestudering van tabel 4.5 valt op dat er bij enkele monsters een groot verschil bestaat tussen de duplo bepalingen. Dit is het gevolg van de gelaagdheid van deze monsters. Daardoor kan bij het in tweeën delen van de monsters voor de duplobepaling het ene deelmonster een andere textuur vertonen dan het andere. Ook bij de niet-gelaagde monsters ontstaan dergelijke verschillen wanneer ze niet geheel homogeen zijn. De gebruikte textuurindeling beruht alleen op het percentage lutum. Daardoor is de gelaagdheid die in het veld voor enkele monsters onderkend was, niet gevonden bij de analyse. Wel blijkt bij nauwkeurige bestudering van de resultaten van de analyse dat bij de gelaagde monsters een piek in de korrelgrootte-verdeling aanwezig te zijn, welke correspondeert met de zandfractie. Dit wijst wel op gelaagdheid.

Uit de vergelijking tussen schattingen en analyses kan geconcludeerd worden dat de gemaakte schattingen redelijk betrouwbaar zijn. Deze schattingen zijn echter niet nauwkeurig genoeg om in eventuele berekeningen te gebruiken.

4.3.2. Bulkgewicht en gewichtspercentage vocht

De resultaten van de bepaling van het gewichtspercentage vocht en het droge bulkgewicht zijn verzameld in bijlage 6. Daar is ook in opgenomen het natte bulkgewicht, dat is het soortelijk gewicht van de grond inclusief de geheel met water gevulde poriën. Dit natte bulkgewicht is berekend aan de hand van de vergelijking:

$$\gamma_{\text{nat}} = \gamma_{\text{droog}} / (1 - W) \quad (4.2)$$

waarin: γ_{nat} = nat bulkgewicht (kg/m³)

γ_{droog} = droog bulkgewicht (kg/m³)

W = gewichtspercentage vocht

Deze formule geldt alleen indien alle poriën geheel met water gevuld zijn. Daar de monsters in het algemeen spoedig na hoogwater genomen zijn kan worden aangenomen dat aan deze voorwaarde is voldaan. Toch zullen de gegevens wat betreft het droge bulkgewicht nauwkeuriger zijn dan de gegevens wat betreft het natte bulkgewicht.

Uit bijlage 6 blijkt dat het droge bulkgewicht een grote spreiding kent en tussen ruim 500 kg/m^3 en ruim 1300 kg/m^3 ligt. Binnen de afzonderlijke echorgebieden is de spreiding echter veel minder dan 800 kg/m^3 . In het Verdrongen Land van Saeftinghe is de spreiding nog ongeveer 500 kg/m^3 , maar verder maximaal 300 kg/m^3 per echorgebied.

De grote verschillen in droog bulkgewicht tussen de echorgebieden kunnen worden verklaard door verschillen in textuur, in organisch stofgehalte en in fysische rijping. Kleinrijke en vooral organisch stof-rijke gronden bezitten een relatief hoog poriëngehalte en ze hebben een relatief lage dichtheid wat betreft de vaste bestanddelen. Fysische rijping houdt de dehydratie van sedimenten in waardoor een vergroting van de dichtheid ontstaat. De monsters met een hoog droog bulkgewicht zijn dus fysisch enigszins gerijpt en bevatten relatief weinig klei en wortels. Dientengevolge kunnen deze monsters relatief weinig water bevatten, in de onderzochte gebieden vanaf 25% (zie bijlage 6). De monsters met lage bulkgewichten vertonen soms vochtpercentages van meer dan 50%. Door deze relatie tussen het droge bulkgewicht en het gewichtspercentage vocht is de spreiding in het natte bulkgewicht kleiner dan die in het droge bulkgewicht (zie bijlage 6). De relatie tussen droog bulkgewicht en gewichtspercentage vocht blijkt overduidelijk uit de correlatiematrix in 4.3.3. (tabel 4.7). Daaruit blijkt dat de correlatie factor r tussen deze twee variabelen maar liefst 0.95 bedraagt.

4.3.3. Sterkte

De druksterkte die bepaald is met de vrije priema proeven, zoals beschreven is in 2.4, is uitgedrukt in kPa ($1 \text{ kPa} = 1000 \text{ N/m}^2$). De resultaten van deze bepalingen zijn verzameld in bijlage 6, samen met de resultaten van de bepalingen van droog en nat bulkgewicht, gewichtspercentage vocht en het percentage lutum. In tabel 4.6 zijn de sterkte en de textuur weergegeven, gegroepeerd naar gebied en naar de diepte waarop het middelpunt van het monster gelegen was.

De druksterkte ligt in het gebied van 4 tot 23 kPa . In de echorgebieden in de Oosterschelde is dit echter 10 tot 40 kPa (Schoot en Van Eerd, 1985). Dit verschil kan door meerdere factoren verklaard worden. Als eerste speelt waarschijnlijk een rol dat, alhoewel in de Oosterschelde ook de vrije priema proef gebruikt is, de monsters aldaar op een andere manier genomen zijn. In de Oosterschelde zijn de monsters horizontaal uit de echorkliffen gestoken, terwijl in de Westerschelde de monsters vertikaal van het oppervlak van het echor af zijn gestoken. Daardoor zullen de monsters uit de Oosterschelde minder of geen laagvlakken bezitten en mogelijk meer weerstand tegen afschuiving bieden. Ook is in het geval van horizontaal gestoken monsters de verdeling en het aantal wortels en wortelstokken

anders dan bij vertikaal gestoken monsters.

Ten tweede kan als mogelijke verklaring voor het verschil in sterkte het verschil in kleigehalte worden aangevoerd. Een toename van het kleigehalte veroorzaakt namelijk een verhoging van de plasticiteits-index, oftewel de vervormbaarheid. Wanneer een monster gemakkelijk te vervormen is zal het bij het uitoefenen van druk erop (zoals in de vrije prisma proef) snel afschuiven en dus een lage sterkte vertonen (Schoot en Van Eerd, 1985). Uit een vergelijking tussen Reynders (1985) en Stein (1984), blijkt dat de schorren in de Oosterschelde over het algemeen minder kleirijk, en dus sterker zijn dan de schorren in de Westerschelde. Mogelijk wordt het verschil in kleigehalte veroorzaakt door het feit dat de Oosterschelde in tegenstelling tot de Westerschelde geen estuarium is, waardoor er geen fijn rivierslib aangevoerd wordt.

Tabel 4.6. Druksterkte zoals bepaald met de vrije prisma proeven

Gebied	diepte (cm)	textuur	sterkte (kPa)			
Saeftinghe Blauwe Plaat De Noord	21-28	ZZI	5.7	7.2	8.4	
	33	LK	5.0	6.4		
	60	LK	7.2	7.5		
	90-100	LK	4.8	5.5		
Ellewoutedijk	25	LK-FZ	9.7	9.7	9.7	
Baarland	34-44	LK-FZ	18.1	20.0	20.0	
	97	LK	10.5	12.2	12.6	
Emanuelpolder	23-41	LK-FZ	12.3	13.1	15.1	16.0
			17.0	22.3	22.3	
	63-77	LK	6.1	7.1	8.4	8.7
			8.9	9.3	11.1	
Bath	28-36	LK	11.8	13.2	13.3	
			13.3	13.4	20.9	
Appelzak	25	MK	5.6	6.2	6.6	6.8
	45	MK	4.2	5.2		

Om te onderzoeken of de sterkte in de echorgebieden langs de Westerschelde inderdaad samenhangt met het kleigehalte of met een van de andere bodemparameters, is eenvoudige regressie toegepast op de resultaten zoals die zijn verzameld in bijlage 6. Onderstaande correlatiematrix (tabel 4.7) is daarvan het resultaat. Bij bestudering van deze correlatiematrix moet echter wel bedacht worden dat het aantal waarnemingen (n) per variabele verschilt (sterkte en diepte: n = 44, percentage klei: n = 22, percentage vocht en droog en nat bulkgewicht: n = 27). Daarnaast moet bedacht worden dat het percentage klei aan de hand van slechts 11 monsters geschat is (zie 4.3.1).

Tabel 4.7. *Correlatiematrix bodemparameters*

	Sterkte (kPa)	Diepte (cm)	% Klei	% Vocht	γ_{droog} (kN/m ³)	γ_{nat} (kN/m ³)
Sterkte	1	-0.20	-0.77	-0.61	0.51	0.39
Diepte		1	0.52	-0.29	0.40	0.43
% Klei			1	0.55	-0.47	-0.35
% Vocht				1	-0.95	-0.82
γ_{droog}					1	0.95
γ_{nat}						1

Uit de tabel blijkt dat de sterkte inderdaad redelijk goed correleert met het percentage klei ($r = -0.77$), maar ook met het percentage vocht ($r = -0.61$). Met behulp van meervoudige regressie is naar de vergelijking gezocht waarmee de sterkte het beste werd verklaard. Met twee onafhankelijke variabelen is deze vergelijking:

$$\text{Sterkte} = -0.41 * \% \text{klei} + 1.47 * \gamma_{nat} + 3.32 \quad r^2 = 0.61 \quad (4.3)$$

Met deze vergelijking wordt dus 61% van de variantie in de sterkte verklaart. De vergelijking bevat echter niet de variabele vochtgehalte. Dit is waarschijnlijk het gevolg van de relatief hoge onderlinge correlatie tussen klei- en vochtgehalte ($r = 0.55$). Waarschijnlijk is per schorgebied de correlatie tussen sterkte en kleigehalte groter dan voor alle schorgebieden samen. Bij de schorren voor Emanuelpolder en bij Baarland bevatten de schorren in een oppervlaktelaag van enkele decimeters dikte minder klei dan daaronder, de sterkte is nabij het oppervlak dan ook veel groter (zie tabel 4.6).

Een belangrijke factor in verband met de sterkte, naast de factoren die bij de correlatie gebruikt zijn, is de vegetatie en daarvan vooral de beworteling. De verschillen in sterkte tussen boven- en onderkant kunnen verklaard worden door de afname van de beworteling en dus afname van de 'bewapening' met de diepte.

4.3.4. Grondwaterfluctuaties

Bij de vijf grondwaterstandsbuizen die geplaatst zijn op de schorren voor de Emanuelpolder (bij Waarde) is twee keer gedurende een periode van ruim 12.5 uur de grondwaterstand en waterstand regelmatig ingemeten (zie 2.4). De twee meetreeksen zijn verricht onder vrijwel gelijke getij omstandigheden (er is gemeten ± 2 dagen na springtij, HW = NAP +2.6m) en onder gelijke weersomstandigheden (geen neerslag, geen beïnvloeding van het getij door wind). De metingen hebben geresulteerd in tien grafieken waarin beide waterstanden met elkaar vergeleken kunnen worden (bijlage 10).

Eén van de buizen (nr 1) leverde geen bruikbare gegevens op, omdat als gevolg van de te kleine lengte deze buis met hoog water vanaf de bovenkant volliep.

Bij een andere buis (nr 5) waren de fluctuaties van het grondwater zo gering (3-5cm) dat geen goed beeld verkregen werd. De oorzaak van deze geringe fluctuaties is niet bekend, maar aangenomen wordt dat de perforaties van de buis zodanig waren dat de fluctuaties te zeer uitgedempt en ook vertraagd werden. De meetresultaten van de buizen nr 1 en nr 5, zijn daarom buiten beschouwing gelaten.

De belangrijkste kenmerken van de zes overige meetreeksen zijn weergegeven in onderstaande tabel (4.8).

Tabel 4.8. Meetresultaten grondwaterstandsbuizen

nr	vertra- ging stijging (min.)	vertra- ging gw.piek (min.)	getij- piek (cm±mv)	getij - gw. (cm)	gw.max (cm-mv)	gw.min (cm-mv)	gw. fluct. (cm)
2a ¹	0	54	+1	20	20	50	30
2b	0	60	-3	20	26	60	34
3a	0	90	+9	52	41	57	18
3b	18	21	+10	7	-3	36	39
4a	0	76	+9	54	40	72	32
4b	18	76	+10	63	53	76	23

¹a: meetreeks op 24-06-86

b: meetreeks op 26-06-86

Uit de tabel is een standaard grafiek voor het grondwater- en waterstands verloop aan de schorrand van de schorren voor Emanuelpolder afgeleid, die onder de gegeven omstandigheden de volgende kenmerken heeft (zie fig. 4.5):

- de grondwater-curve is asymmetrisch,
- gedurende drie uur staat er water tegen de schorrand,
- de hoogste waterstand is 6cm boven maaiveld, deze treed op anderhalf uur nadat het water de klifbasis bereikt heeft,
- de grondwaterstand fluctueert tussen 60cm en 30cm -mv,
- het grondwater begint te stijgen zodra het water de klifbasis bereikt heeft,
- de piek in de grondwaterstand treed op ca. één uur na hoogwater.

Uit de loop van de grafiek blijkt dat de meest kritieke periode voor het optreden van massabewegingen ligt tussen ca. één uur na hoog water en drie uur na hoog water. Hierin treden namelijk de hoogste grondwaterstanden op, die een grote massa en positieve poriëndruk veroorzaken, terwijl de waterdruk aan het schorklif reeds verdwenen is.

Erosie door schuren en plukken zal alleen plaats kunnen vinden tussen ongeveer anderhalf uur voor en anderhalf uur na hoog water, dit is de periode dat het water tegen de schorrand aan staat.

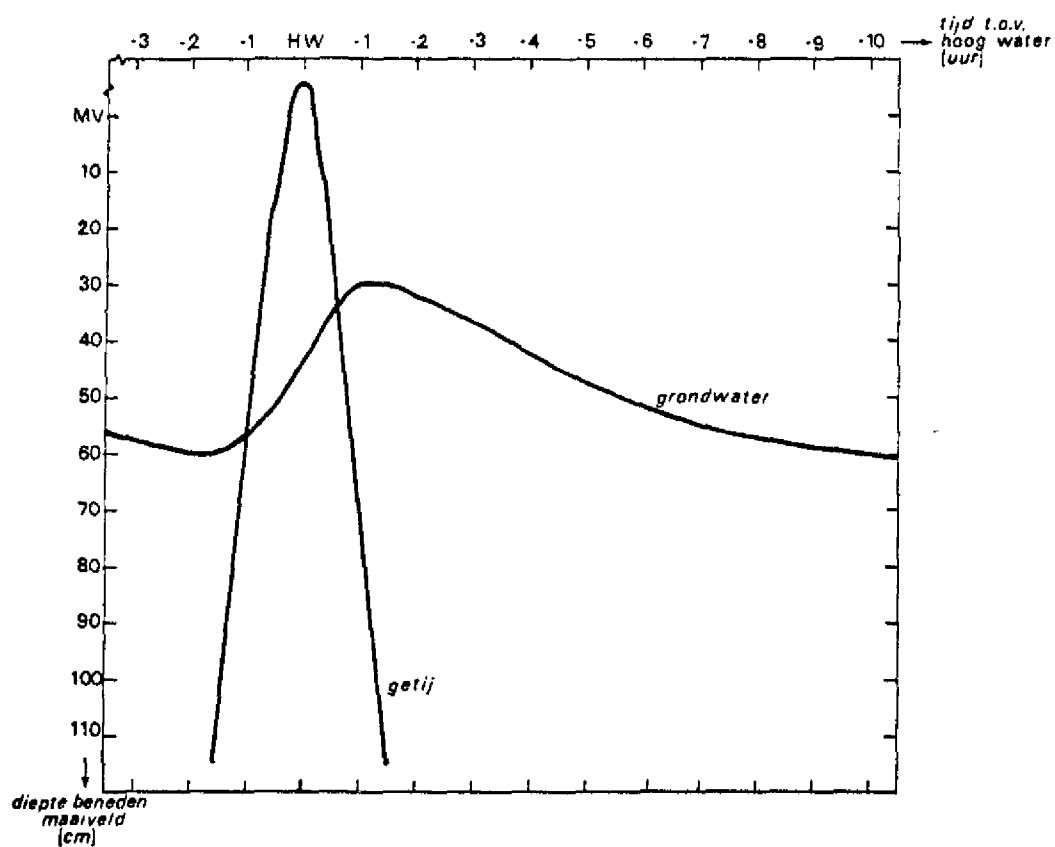


Fig. 4.5. Grondwater- en waterstandsverloop aan de schorrand van de schorren voor Emanuelpolder

5. ANALYSES EN MODELLERING

5.1. Golfenergie

De golfenergie is te berekenen met de formule die in 3.2.1 is gegeven:

$$E = 1/8 \rho g H^2 \quad (5.1)$$

waarin: E = energie (J/m^2)

ρ = dichtheid van het water (kg/m^3)

g = versnelling van de zwaartekracht (m/s^2)

H = golfhoogte (m)

Indien de dichtheid constant wordt verondersteld, is de hoogte van de golven de enige factor die bepaald moet worden om de golfenergie te berekenen. Deze golfhoogte is bepaald aan de hand van de windroos voor Vlissingen (zie fig. 5.1) uit de klimaatatlas van Nederland (1972) en aan de hand van een diagram ter bepaling van de golfhoogte (bijlage 9) uit Groen en Dorrestein (1976).

Bij het gebruik van het diagram ter bepaling van de golfhoogte is aangenomen dat de windbaan zo groot is als de breedte van het wateroppervlak bij GHW, dus de afstand van dijk tot dijk of schor. De platen en slikken zijn dan ondergelopen. Daar de overdracht van golfenergie op de schorren ook alleen bij hoogwater optreedt mag deze aanname gedaan worden.

Aangenomen is ook dat voor de uiteindelijke bereikte golfhoogte de windbaan beperkend is en niet de tijdduur waarin de wind met een bepaalde snelheid blaast. Dat dit mag worden aangenomen kunnen enkele voorbeelden illustreren. Bij een windbaan van 5.5km en een windsnelheid van 7.5m/s (windkracht 4 Beaufort) wordt de maximale golfhoogte na ruim een uur bereikt (zie bijlage 9). Bij een windbaan van 3km en een windsnelheid van 15m/s (windkracht 7 Beaufort) wordt de maximale golfhoogte al na een half uur bereikt. Deze tijdduren lijken geen beperking op te zullen leveren, gezien de lengte van de hoogwaterfase.

In de windroos (fig. 5.1; zie ook bijlage 8) is het percentage van de tijd dat de wind uit een bepaalde richting komt af te lezen, alsmede de gemiddelde windsnelheid uit deze richting. Aangenomen is dat golven opgewekt door wind uit een kwart van de windroos een schor kunnen bereiken zonder al te veel energie verloren te hebben. Bij een expositie op bijvoorbeeld het zuidwesten worden de golven opgewekt door winden tussen west en zuid in de berekening opgenomen.

Voor het betreffende kwart van de windroos zijn de gemiddelde windsnelheid, de gemiddelde windbaan voor de betreffende windrichtingen en het totale percentage van de tijd dat de wind uit deze richtingen waait bepaald. Aan de hand van snelheid en windbaan is de golfhoogte H bepaald. Met vergelijking (5.1) is vervolgens de energie uitgerekend. Tenslotte is een maat voor de totale energie over een lange periode bepaald door de berekende energie te vermenigvuldigen met het betreffende percentage van de tijd (tabel 5.1).

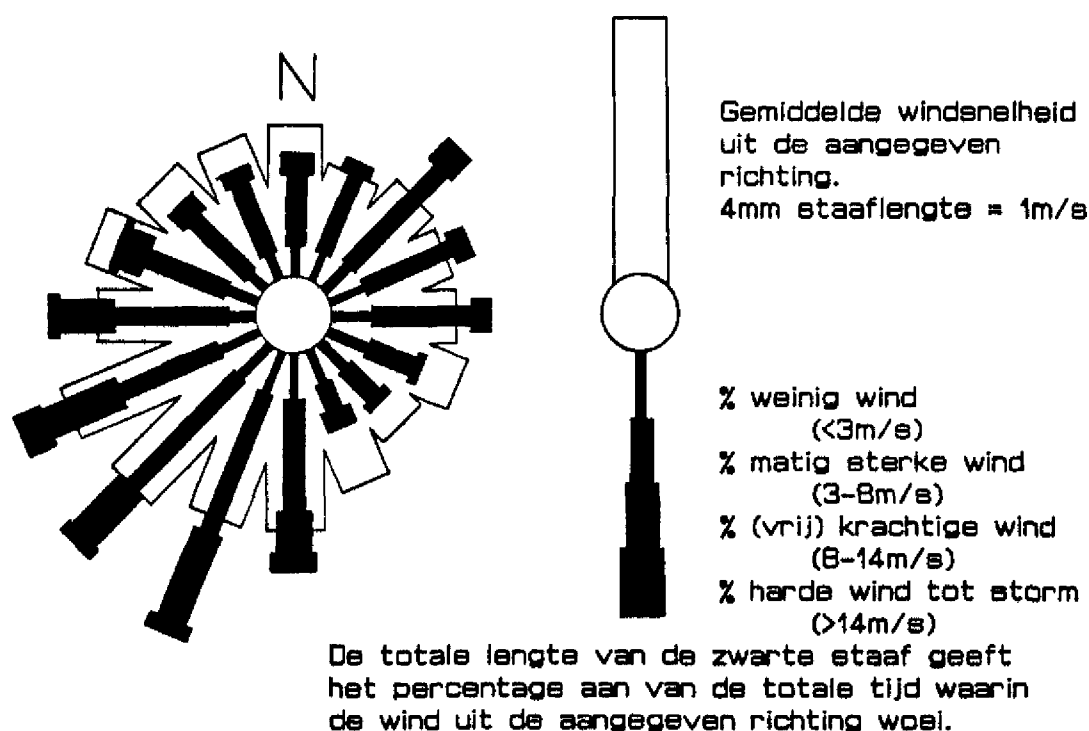


Fig. 5.1. Windroos voor Vlissingen (Klimaatatlas van Nederland, 1972)

De berekende energie en energie*tijd zijn slechts relatief vanwege een aantal factoren. Ten eerste wordt er uitgegaan van gemiddelde toestanden. Ten tweede is er geen rekening gehouden met refractie en met breken van de golven op slikken en platen, en is er geen rekening gehouden met verschillen in de mate van de refractie en van het breken tussen en binnen de verschillende echorgebieden. Toch geven de berekende waarden waarschijnlijk wel een goed relatief beeld van de mate waarin de verschillende echorgebieden aan erosie door windgolven bloot staan.

Uit tabel 5.1 kan geconcludeerd worden dat het Verdrongen Land van Saeftinghe in vergelijking met de echorgebieden aan de noordzijde (uitgezonderd de Biezelings Ham) van de Westerschelde veel minder aan erosie door windgolven onderhevig zal zijn. Tussen de noord- en de oostzijde van het Verdrongen Land van Saeftinghe bestaat slechts een klein verschil. De verschillen tussen de overige echorgebieden zijn ook vrij gering. Alleen de schorren voor Emanuelpolder (bij Waarde) zullen veel meer geërodeerd kunnen worden als gevolg van een combinatie van een relatief grote strijklengte en een ongunstige expositie. Deze conclusies komen ten dele overeen met de bevindingen uit 4.2. De erosie van de schorren voor Emanuelpolder gaat inderdaad sneller dan van de overige echorgebieden; de Biezelings Ham wordt inderdaad niet of nauwelijks geërodeerd (zie tabel 4.4). Ook komt de over het algemeen geringe erosie van de zuidelijke oever overeen met bovenstaande conclusies. Een sterke afwijking daarvan vertoont echter De Noord, waar de erosie zeer hoog is (tabel 4.4), maar de golfenergie door windgolven zeer laag (tabel 5.1). De sterke erosie van dit echorgebied wordt waarschijnlijk niet door windgolven maar door scheepsgolven veroorzaakt.

Tabel 5.1. Gemiddelde golfenergie in de onderzochte gebieden

gebied	expo- sitie	strijk- lengte (km)	gem. winden. (m/s)	H (cm)	E (J/m ²)	%	E.% 100 (J/m ²)
Saeftinghe							
Marlem. Pl.	NNW	2.5	5	20	50	29	15
Blauwe Pl.	N	3	4.5	20	50	30	15
De Noord	O	2.5	4.5	18	41	26	11
Ellewoutsdijk	ZZO	5.5	6	32	128	35	45
Baarland	ZZO	5	6	30	113	35	39
Biezel. Ham	ZO	6	6	32	128	24	30
Emanuelpolder	ZZW	4.5	7	38	181	43	78
Bath	ZZW	3	7	30	113	43	48
Appelzak ¹	W	2-14	4-7	30	113	41	46

¹Voor Appelzak is de golfhoogte het gewogen gemiddelde van de golfhoogten van de verschillende richtingen, daar de strijklengte voor dit schorgebied enorm verschilt voor de verschillende windrichtingen.

5.2. Statistische analyse van de erosie

Om tot een model te komen dat de schorkliferosie beschrijft is enkelvoudige en meervoudige regressie uitgevoerd. In de analyse zijn die meetpunten betrokken die gelegen zijn aan één van de schorranden langs de Westerschelde, met een klifhoogte van minimaal 0.1m en minimaal 0.1m erosie per jaar. Binnen deze criteria vielen 20 meetpunten.

De factoren die betrokken zijn in de regressie analyses zijn: de erosie per jaar, de erosie van de begroeiingsgrens per jaar, de klifhoogte, de slikhelling en slikbreedte, een maat voor de golfenergie van windgolven (zie 5.1), de afstand tot de vaargeul, het lutumgehalte en de druksterkte. De laatste twee parameters gelden op een hoogte van enkele decimeters boven het nivo van de klifbasis. De waarden van al deze parameters staan verzameld in bijlage 7.

Teneinde een indruk te krijgen van de onderlinge afhankelijkheid van de verschillende parameters, is een correlatiematrix opgesteld waarin de correlatie coëfficiënten r zijn verzameld (tabel 5.2).

Uit tabel 5.2 blijkt dat geen van de variabelen een duidelijke correlatie ($r > 0.8$) vertoont met de mate van schorkliferosie. Een onderlinge correlatie van meer dan 0.6 vertonen de variabelen: slikhelling met slikbreedte, sterkte met het percentage lutum, afstand tot de vaargeul met golfenergie. De negatieve correlatie tussen slikhelling en slikbreedte is logisch: bij een bepaald hoogteverschil zal een sliik steiler zijn naarmate het smaller is. Ook de correlatie tussen sterkte en percentage lutum is niet onverwacht, daar bij een toename van het lutumgehalte de vervormbaarheid van het materiaal groter wordt (zie 4.3.3). De correlatie tussen de golfenergie en de afstand tot de vaargeul is echter moeilijker te verklaren, daar in de

berekening van de golfenergie geen rekening is gehouden met de ligging van de vaargeul. De oorzaak van deze correlatie moet mogelijk worden gezocht in het feit dat een grote afstand tot de vaargeul vaker voorkomt naarmate de breedte van de Westerschelde en daarmee de strijklengte van de wind groter is.

Tabel 5.2. Correlatiematrix met betrekking tot erosie

	B	C	D	E	F	G	H	I
A=Erosie	0.41	0.57	0.23	0.08	0.45	0.22	0.68	-0.47
B=Erosie _{beers}	1	0.52	0.06	0.08	0.51	0.29	0.50	-0.31
C=Kliffhoogte		1	0.56	-0.24	0.41	0.32	0.42	0.08
D=Slikhelling			1	-0.74	-0.09	0.31	-0.06	0.13
E=Slikbreedte				1	0.26	-0.22	0.13	0.07
F=Eaolven					1	0.66	0.38	0.06
G=km-vaargeul						1	-0.02	0.12
H=% lutum							1	-0.69
I=Sterkte								1

Met behulp van meervoudige regressie analyse is gezocht naar het best mogelijke verband tussen de kliferosie en de overige variabelen. Het blijkt dat de erosie hoofdzakelijk afhangt van het lutumgehalte en de klifhoogte, volgens de vergelijking:

$$\text{Erosie(cm/jr)} = 10.4 \cdot L + 1.33 \cdot K - 203 \quad r = 0.75 \quad (5.2)$$

waarin: L = percentage lutum
K = klifhoogte (cm)

De verklaarde variantie (r^2) van de erosie is hierbij 56%. Toevoeging van de variabelen energie en/of sterkte levert geen significant hogere verklaarde variantie door de te hoge correlatie tussen de variabelen.

In figuur 5.2 is de gemeten erosie uitgezet tegen de met behulp van vergelijking (5.2) berekende erosie. Uit de figuur blijkt dat vooral bij een zeer lage of zeer hoge werkelijke erosie, de grootste fouten met de vergelijking worden gemaakt. Voor twee punten is de berekende erosie zelfs negatief.

Schoot en Van Eerd (1985) hebben bij onderzoek naar de schorklif erosie in de Oosterschelde onderstaande vergelijking (5.3) opgesteld met behulp van stepwise regressie analyse.

$$\text{Erosie(cm/jr)} = 133.S + 28.H - 56.S.H - 18 \quad r = 0.83 \quad (5.3)$$

waarin: S = slikhelling (%)
H = hoogte klifbasis boven GLW (m)

Tevens bleek dat de hoogte van de klifbasis boven GLW gerelateerd is met de klifhoogte.

Bij toepassing van deze vergelijking op de onderzochte schorren in de Westerschelde (waarbij de hoogte van de klifbasis berekend wordt uit de klifhoogte) blijkt dat de berekende erosie in de meeste gevallen veel te laag is (zie fig. 5.3). De grote invloed van de elikhelling in vergelijking (5.3) is hier de oorzaak van, daar in het onderzochte gebied in de Westerschelde de correlatie r tussen elikhelling en erosie slechts 0.23 bedraagt (zie tabel 5.2). Deze geringe correlatie tussen elikhelling en erosie is waarschijnlijk het gevolg van het feit dat de elikhelling alleen vlak bij het schor gemeten is (zie 2.2). De gemiddelde helling van het gehele elik (waardoor de golfenergie en dus de erosie wordt beïnvloed), zal daar vaak sterk van afwijken.

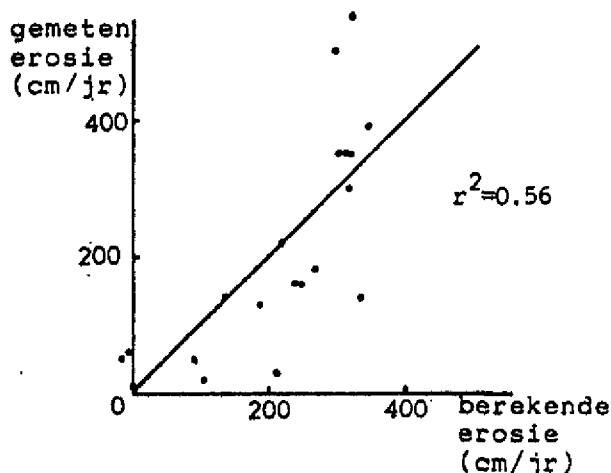


Fig. 5.2. Gemeten erosie t.o.v. de met meervoudige regressie berekende erosie (vergelijking (5.2))

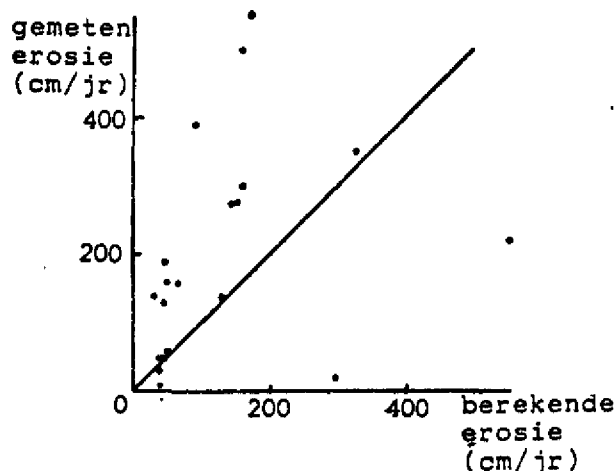


Fig. 5.3. Gemeten erosie t.o.v. de met het model van Schout en Van Eerd berekende erosie (vergelijking (5.3))

Waarschijnlijk zijn de grote verschillen in ligging van de verschillende onderzoeksgebieden in de Westerschelde en de beperkte bruikbaarheid van de erosie metingen over een meetperiode van 4 maanden, voor een deel de oorzaak van het relatief lage percentage verklaarde variantie uit vergelijking (5.2). Gegevens uit het Verdrongen Land van Saeftinghe omtrent de hoogteligging van de klifbasis boven GLW wijzen uit dat ook in de Westerschelde de invloed van de absolute hoogte op de erosie groot is. Daar deze gegevens voor de andere onderzochte gebieden niet bekend zijn, konden deze niet meegenomen worden in de regressie analyse.

5.3. Beschouwing mogelijk optredende massabewegingen

5.3.1. Homogene kliffen

In cohesielos homogeen materiaal geldt voor de maximale hellingelhoek θ in het geval van verzadiging: $\tan \theta = 1/2 \cdot \tan \phi$ (zie 3.4.1). De hoek van inwendige wrijving ϕ varieert voor los

gepakt zand tussen 30° en 35° en voor dicht gepakt zand tussen 45° en 50°. Dit impliceert voor de maximale hellingshoek een waarde tussen 16° en 19° voor los gepakt zand, en tussen 27° en 31° voor dicht gepakt zand. Deze waarden verklaren dat er in cohesielos materiaal dat regelmatig verzadigd is geen kliffen voor kunnen komen.

In cohesief homogeen materiaal kunnen wel kliffen voorkomen. Dergelijke homogene kliffen zijn in de onderzochte gebieden echter nauwelijks aangetroffen daar de meeste echorren gelaagd zijn opgebouwd, niet alleen qua textuur maar ook qua verdeling van wortels. Van de locaties waar zowel alle morfologische als alle bodemparameters bekend zijn, is slechts één duidelijk homogeen: die op het oostelijk deel van de echorren bij Bath (fig. 4.9, 4.10). Voor dit klif geldt vergelijking (3.6):

$$H_c = \frac{4c \cdot \sin \theta \cdot \cos \phi}{\gamma \cdot [1 - \cos (\theta - \phi)]} \quad (5.4)$$

waarin: H_c = kritieke hoogte (m)
 c = cohesie (N/m^2)
 γ = bulkgewicht (N/m^3)
 θ = hellingshoek
 ϕ = hoek van inwendige wrijving

De cohesie c is in de vrije prisma proeven niet rechtstreeks bepaald, maar is wel af te leiden met behulp van de Mohrse cirkel (fig. 5.4). De Mohrse cirkel geeft de relatie tussen normaalspanning σ (loodrecht op het schuifvlak) en schuifspanning τ (parallel aan het schuifvlak) voor alle potentiële schuifvlakken in een monster (voor een uitgebreide beschrijving: zie Carson, 1971).

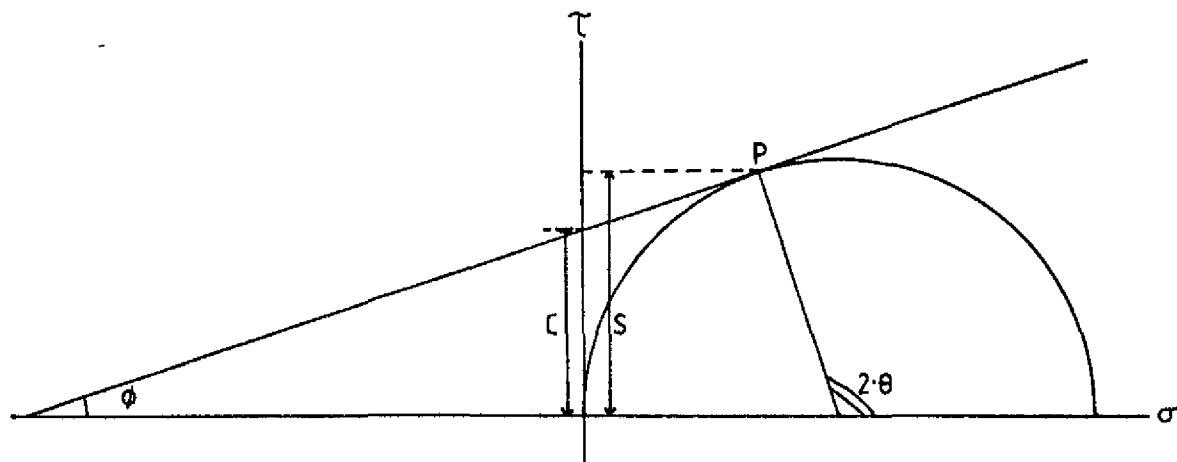


Fig. 5.4. De Mohrse cirkel

De in de vrije prisma proef bepaalde sterkte s is de schuifspanning τ voor één bepaald schuifvlak, weergegeven door punt P in figuur 5.4. Dit punt P kan gevonden worden door vanuit het middelpunt van de Mohrse cirkel een lijn te trekken onder een hoek van 2θ (2.hoek van het afschuivingevlak). De raaklijn aan punt P ligt onder een hoek die gelijk is aan de hoek van inwendige wrijving ϕ en snijdt de τ -as af bij de cohesie c .

Bij het klif bij Bath zijn drie monsters gestoken voor de vrije priema proef. De hoek van afschuiving in de vrije priema proeven bedroeg ongeveer 50°, de sterkte was 13.4kPa. De hieruit met behulp van de Mohrse cirkel bepaalde cohesie is ca. 1000kg/m², de hoek van inwendige wrijving ϕ is 18 à 22°. Daar massabewegingen in verzadigde grond op zullen treden is voor γ het natte bulk-gewicht genomen, dit is aan twee monsters bepaald en is ongeveer 1500kg/m³. De helling θ van het klif was bijna 50°.

Invullen van deze numerieke waarden in vergelijking (5.4) geeft:

$$H_c = \frac{4.1000. \sin 50^\circ. \cos 20^\circ}{1500. [1 - \cos (50^\circ - 20^\circ)]} = 14m$$

De berekende klifhoogte is veel hoger dan de werkelijke klifhoogte, welke 0.6m bedraagt. Het is duidelijk dat er zich in dit klif geen afschuivingen zullen voordoen, erosie zal alleen door schuren en plukken plaatsvinden wat overeenkomt met de waarnemingen (zie 4.2.3).

Indien het klif door schuren en plukken ongeveer loodrecht wordt, gaat vergelijking (5.4) over in:

$$H_c = \frac{4c. \cos \phi}{\gamma. (1 - \sin \phi)} \quad (5.5)$$

In dit geval geldt bij de invulling van de numerieke waarden:

$$H_c = \frac{4.1000. \cos 20^\circ}{1500. (1 - \sin 20^\circ)} = 3.8m$$

Wanneer de cohesie en de hoek van inwendige wrijving beide 10% lager worden gesteld en het bulkgewicht 10% hoger, dan is H_c ongeveer 3.0m. Zelfs bij dergelijke veranderingen van 20% ($c = 800\text{kg/m}^2$, $\gamma = 1800\text{kg/m}^3$, $\phi = 16^\circ$) is H_c nog altijd 2.4m. Het is daarom niet waarschijnlijk dat er in homogene kliffen afschuivingen zullen optreden indien geen scheuren (bijvoorbeeld door droogte) of ondergravingen (door scheuren en plukken op één nivo) aanwezig zijn.

Bij de schorren voor Emanuelpolder (bij Waarde) is het echorklif weliswaar niet homogeen, maar er zijn wel situaties aangetroffen waarbij op ruim een halve meter van de schorrand een scheur was ontstaan tot in de homogene onderzijde van de schorrand (zie fig. 5.5A; zie foto 5). Afschuivingen kunnen zich in dit geval voordoen lange een vlak dat alleen in het homogene gedeelte van de schorrand is gelegen.

De veiligheidsfactor F (verhouding weerstandemoment/drijvend moment, zie 3.4.1) is voor deze situatie relatief moeilijk te bepalen. Voor het weerstandemoment per eenheid van lengte van de schorrand kan geschreven worden (Carson, 1971):

$$c.L + W.\cos \alpha.\tan \phi, \text{ oftewel: } c.B/\cos \alpha + W.\cos \alpha.\tan \phi \quad (5.6)$$

waarin: c = cohesie (kg/m)

L = lengte van het afschuivingsvlak (m)

W = gewicht afschuivende blok (kg/m²)

B = breedte van het blok: afstand schorrand-scheur (m)

α = hoek van afschuiving

ϕ = hoek van inwendige wrijving

Het drijvend moment is: $W \cdot \sin \alpha$, zodat voor F geschreven kan worden:

$$F = \frac{c \cdot B / \cos \alpha + W \cdot \cos \alpha \cdot \tan \phi}{W \cdot \sin \alpha} \quad (5.7)$$

Het natte bulkgewicht van zowel het gelaagde als het ongelaagde deel van deze schor is ongeveer (per lengte-eenheid) 1450 kg/m². De cohesie c bedraagt 580 kg/m, de hoek van inwendige wrijving ϕ is 30°. Na enig rekenwerk blijkt dat F voor dit geval het kleinste is bij $\alpha = 40^\circ$, F is dan ongeveer 2.5. Bij $\alpha = 40^\circ$ loopt het potentiële schuifvlak niet van de klifbasis tot in de onderste punt van de scheur, maar het komt iets hoger in de scheur uit (zie fig. 5.5A). Bij een kleinere helling van het schuifvlak dan 40° is het weerstandsmoment groter en F daardoor ook. Bij een grotere helling wordt het drijvend moment kleiner omdat het gewicht W afneemt, het weerstandsmoment wordt dan op een gegeven ogenblik groter door de toename van de lengte van het schuifvlak L .

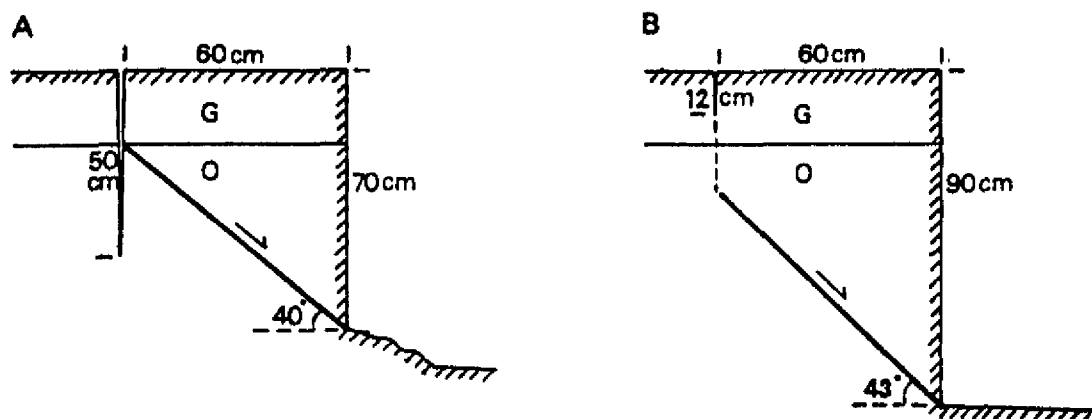
De invloed van het gewicht W is echter gering, daar W zowel in het weerstand- als in het drijvend moment vertegenwoordigd is. Bij de metingen met de grondwaterstandebuizen is gebleken dat de bovenste 20 cm van deze schor onder normale condities niet verzadigd is. Indien daarom voor het gehele gelaagde gedeelte het droge bulkgewicht (950 kg/m²) in plaats van het natte wordt genomen, stijgt de veiligheidsfactor met slechts 10% tot 2.8. De invloed van de hoek van inwendige wrijving is eveneens klein. Zelfs bij een ϕ van 20° in plaats van 30°, is de veiligheidsfactor nog altijd 2.3 (bij $\alpha = 38^\circ$).

De cohesie heeft een veel grotere invloed op de veiligheidsfactor F . Wanneer de cohesie 10% lager wordt gesteld, daalt F met 7.5%; bij een cohesie die 20% lager wordt gesteld, daalt F met 15% tot ruim 2.1.

Enkele meters oostelijk van het beschouwde punt is de scheur nog slechts 12 cm diep. Het klif is hier echter 90 cm hoog in plaats van 70 cm. De overige condities (cohesie, bulkgewicht, breedte van het blok) zijn vrijwel identiek (zie fig. 5.5B). Wanneer de scheur hier diep genoeg zou zijn (ruim 30 cm) dan zou voor een potentieel afschuivingsvlak onder een hoek $\alpha = 43^\circ$ de veiligheidsfactor F ongeveer 1.9 zijn. Dit is aanzienlijk lager dan bij het 75 cm hoge klif.

Reductie van de veiligheidsfactor treed dus op door vergroting van de klifhoogte. Dit kan gebeuren wanneer het slijk voor het klif door erosie wordt verlaagd. Vergelijkbaar met vergroting van de klifhoogte lijkt in eerste instantie verkleining van de breedte van het blok. Bij verkleining van de breedte van het blok daalt echter het gewicht van het afschuivende blok ook. Zo zal in het laatste geval bij verkleining van de breedte B van

0.6 naar 0.5m, het gewicht W dalen van 520kg naar 410kg. De veiligheidsfactor daalt daardoor slechts een fractie, en blijft afgerond 1.9. Het afschuivingevlak zal onder een dezelfde hoek (ca. 43°) liggen. Erosie door schuren en plukken zal er dus niet toe leiden dat afschuiving plaatsvindt.



G: gelaagde klei en zand

O: ongelaagde klei

Fig. 5.5. Schorklif bij Waarde

A. Scheur 0.5m diep

B. Enkele meters oostelijk van A, scheur
nog slechts 0.12m diep

De veiligheidsfactor zal in de beschouwde voorbeelden niet snel tot 1 dalen. Dit is echter misschien niet noodzakelijk voor afschuiving. Er kunnen in het schorklif namelijk zwakkere en sterkere zones voorkomen die bij de bepalingen niet onderscheiden zijn maar bij afschuiving wel een rol spelen. Tevens treden er als gevolg van de golven druk- en trekkrachten op waardoor afschuiving bij een hogere waarde van de veiligheidsfactor op kan treden. In de beschreven situaties kan het water zelfs aan de zijkant van het blok in de scheur stromen, waardoor drukfluctuaties op kunnen treden die niet in de berekeningen verwerkt zijn.

5.3.2. Gelaagde kliffen

Oppervlakkige erosie van gelaagde kliffen komt op verscheidene locaties voor (zie 4.2.3). Hiervoor zijn echter geen voorspellende, kwantitatieve berekeningswijzen bekend. Voor de kliffen die zijn opgebouwd uit twee duidelijk te onderscheiden lagen waarvan de bovenste het sterkste is zijn wel dergelijke berekeningen uit te voeren.

Thorne en Tovey (1981) hebben drie mogelijke manieren van afstorting beschreven die op kunnen treden na ondergraving (zie 3.4.2, fig. 3.2). Deze drie manieren zijn:

- shear failure (naar beneden schuiven),
- beam failure (vooroverzakken),
- tensile failure (gedeeltelijk afbreken).

Voor elk type afstorting is een vergelijking opgesteld voor de dimensionloze factor F/A , waarin F de veiligheidsfactor is en A een parameter opgebouwd uit treksterkte, bulkgewicht en ondergravingsdiepte. Deze vergelijkingen zijn:

$$\text{-voor shear failure: } F_s/A = (\beta - X)/2.r \quad (5.8)$$

$$\text{-voor beam failure: } F_b/A = \beta^2/[(1 + r).B'] \quad (5.9)$$

$$\text{-voor tensile failure: } F_t/A = B/(1 - \beta) \quad (5.10)$$

waarbij geldt: $r = \sigma_t/\sigma_d$
 $A = \sigma_t/\gamma.b = \sigma_d.r/\gamma.b$
 $B = b/H$
 $B' = B.[\beta/(\beta - X)]^2$
 $\beta = (H-l)/H$
 $X = m/H$

waarin: σ_t = treksterkte (kPa)
 σ_d = druksterkte (kPa)
 γ = bulkgewicht (kN/m³)
 b = ondergravingsdiepte (m)
 H = hoogte blok (m)
 l = lengte scheur aan onderkant blok (m)
 m = lengte scheur aan bovenkant blok (m)

Met behulp van deze vergelijkingen zijn Stability charts te maken. Daarin zijn de waarden van F/A af te lezen. Voor $r = 0.1$ zijn de stability charts als in bijlage 11. Het type massabeweging dat zal optreden is die waarvan de factor F/A de laagste waarde heeft. De veiligheidsfactor F is vervolgens te bepalen door de met de vergelijkingen berekende of in de stability charts afgelezen factor F/A te vermenigvuldigen met A .

Daar in het onderzoek in de Westerschelde de druksterkte wel is gemeten maar de treksterkte niet, is de waarde van r niet bekend. Uit Schoot en Van Eerd (1985) en Van Eerd (1985a) blijkt dat in de Oosterschelde de verhouding tussen treksterkte en druksterkte 0.2 tot 0.4 bedraagt. Daarom is in de berekeningen van F en van A , $r = 0.3$ gebruikt.

Het rechterlid van de vergelijkingen (5.8) tot en met (5.10) is ongevoelig voor veranderingen in de waarde van r . Bij een vergroting van r met een factor 2 verandert de veiligheidsfactor maximaal 10% (Thorne en Tovey, 1981). De grootte van A en daarmee de uiteindelijke waarde van de veiligheidsfactor, is echter veel gevoeliger voor veranderingen in de waarde van r : A zal 10% veranderen bij een verandering in r van 10%. Met de vergelijkingen van Thorne en Tovey (1981) zal de veiligheidsfactor daarom alleen nauwkeurig bepaald kunnen worden, indien in plaats van de druksterkte de treksterkte bekend is.

Van Eerd (1985a) heeft het 'vooroverzakken' (= beam failure) van ondergraven schorkliffen nader beschouwd en is tot een uitdrukking gekomen voor de maximale ondergravingsdiepte b (vergelijking (3.9), zie 3.4.2). Om deze vergelijking toe te passen en te controleren moeten echter de trek- en druksterkte op het moment van bezwijken bekend zijn. Daarom is vergelijking (3.9) met behulp van vergelijking (3.8) herschreven in de vorm:

$$F = \frac{2.\sigma_d.d.(d + t)}{3.oppABCD.\gamma.b} \quad (5.11)$$

waarin: F = veiligheidsfactor

σ_d = druksterkte (N/m²)

d = afstand OA (m; zie fig. 3.3)

t = afstand OB (m; zie fig. 3.3)

γ = bulkgewicht (N/m³)

b = ondergravingsdiepte (m)

oppABCD = afmetingen overhangende blok (m²)

Aangezien ($d + t$) gelijk is aan de dikte van het overhangende blok kunnen d en t berekend worden indien de verhouding d/t bekend is. Deze verhouding is in de Oosterschelde 0.4 tot 0.8, met een gemiddelde van 0.7 (Van Eerd, 1985a). De waarde voor d/t van 0.7 is daarom in de berekeningen aangehouden. Voor alle tijdens de metingen met de erosiepinen duidelijk ondergraven kliffen zijn de veiligheidsfactoren zowel met vergelijking (5.8) t/m (5.10) van Thorne en Tovey (1981) als met vergelijking (5.11) naar Van Eerd (1985a) bepaald. De resultaten van deze berekeningen zijn verzameld in tabel 5.3.

Tabel 5.3. Veiligheidsfactoren voor ondergraven schorkliffen in de periode juni-juli '86

nr	b (m)	H (m)	l (m)	m (m)	F_a	F_b	F_t	F_{Eerd}	opmerkingen
12	0.05	0.25	0	0	12	27	—	32	27-6-86; goeddeels verdwenen 14 dagen later, wrsch. door schuren en plukken
18	0.20	0.30	0	0	1.7	1.2	—	1.4	02-7-86; afgestort a.g.v beam failure
18A	0.10	0.30	0	0	3.4	4.7	—	5.4	19-6-86
	0.10	0.30	0	0.1	2.3	2.1	—	2.4	02-7-86
	0.10	0.30	0	0.2	1.1	0.5	—	0.6	niet mogelijk, afgestorting heeft dan ook plaatsgevonden voor 19-6-86
18B	0.20	1.00	0	0	1.7	3.9	—	4.5	19-6-86; afgestort binnen twee weken
27	0.04	0.40	0	0	6.1	28	—	36	09-6-86
	0.10	0.40	0	0	2.4	4.5	—	6.0	27-6-86
	0.22	0.40	0	0	1.1	0.9	—	1.2	voor 15-7-86, vlak voor deze datum is blok afgestort
31	0.30	1.00	0.3	0	1.6	1.7	1.3	2.1	01-7-86
	0.30	1.00	0.4	0	1.3	1.2	1.0	1.5	14-7-86, blok 45cm hoog binnen 14 dagen van onderzijde afgestort (tensile failure)

Uit tabel 5.3 blijkt dat de methode van Van Eerd steeds een iets hogere veiligheidsfactor oplevert dan het beam failure model van Thorne en Tovey. Dit kan zijn veroorzaakt door een verkeerde keuze van de verhouding d/t bij het gebruik van vergelijking (5.11). Mogelijk is een verhouding van 0.6 of 0.65 meer in overeenstemming met de werkelijkheid dan de 0.7 die is

gebruikt. Om met de methode van Van Eerdt een nauwkeurige bepaling te maken van de veiligheidsfactor, is naast de druksterkte ook de treksterkte noodzakelijk.

Voor een nauwkeurige bepaling met de methode van Thorne en Tovey hoeft alleen de treksterkte bekend te zijn. Het model van Thorne en Tovey heeft daarnaast het voordeel dat ook andere manieren van bezwijken dan beam failure onderkend worden. In één van de onderzochte gevallen is duidelijk tensile failure opgetreden (no 31, tabel 5.3), overeenkomstig het model.

Indien naast de druksterkte ook de treksterkte zou worden gemeten, zouden waarschijnlijk met beide methodes betrouwbaarder resultaten verkregen worden. In dat geval kunnen de modellen ook goed voorspellend gebruikt worden.

6. DISCUSSIE EN CONCLUSIES

Uit het onderzoek is gebleken dat 90% van de schor-slikovergangen in het oostelijk deel van de Westerschelde onderhevig is aan erosie. Deze schor-slikovergangen bestaan uit schorkliffen, die in hoogte variëren van 5 cm tot 140 cm. De vorm van de schorkliffen kan recht, getrapt dan wel ondergraven zijn, afhankelijk van de texturele opbouw van de schor en de fase van het erosieproces (zie bijlage 1).

Aan de schorranden zijn met behulp van waterpassingen en erosiepinnen gedurende circa anderhalf jaar erosiemetingen verricht. Hieruit is gebleken dat de erosie in het onderzoeksgebied varieert van enkele centimeters tot meer dan twee meter per jaar (zie bijlage 2).

Erosie komt langs vrijwel alle onderzochte schorgebieden voor. De sterkste erosie doet zich voor bij de schorren in het noord-oostelijke gedeelte van het Verdrongen Land van Saeftinghe (De Noord) en het westelijk deel van de schorren voor de Emanuelpolder. Deze schorgebieden worden ernstig bedreigd; de afslag bedraagt meer dan 2 meter per jaar. Daarnaast zijn de Blauwe Plaat in het Verdrongen Land van Saeftinghe, de schorren van Ossendrecht (Appelzak), de schor bij Baarland en het middelste deel van de schorren bij Bath onderhevig aan een erosie van 1 tot 2 meter per jaar.

De gemeten erosie wijkt op een aantal plaatsen af van de door ons in 1986, op grond van een morfologische inventarisatie, gemaakte voorspellingen. Hierin werd het percentage erosieve of stabiele schor-slikovergangen geschat op 70%. Sedimentatie zou, volgens deze schattingen, optreden langs 30% van de schor-slikovergangen. Uit de metingen blijkt nu dat de erosie onderschat is. Het betreft hier met name schorgebieden met lage kliffen (< 0.5 m), waarbij in beschutte inhammen ook geleidelijke schor-slikovergangen voorkomen. Deze in eerste instantie als stabiel gekarakteriseerde gebieden (delen van de schorgebieden van Ellewoutsdijk, Emanuelpolder, het Verdrongen Land van Saeftinghe) blijken onderhevig te zijn aan erosie, tot 1 meter per jaar.

De overschatting van de sedimentatie betreft met name de schorgebieden in het westelijk deel van het Verdrongen Land van Saeftinghe. Uit metingen op Konijnenschor, ter plaats van geleidelijke schor-slikovergangen, blijkt aldaar geen schoruitbreiding plaats te vinden. Er was sprake van een stabiele situatie of van lichte erosie (< 0.1 meter per jaar). De fout in onze prognoses is een gevolg van verkeerde theoretische conclusies omtrent het al dan niet optreden van erosie, op basis van morfologische gegevens. De aanwezigheid van geleidelijke schor-slikovergangen leidde tot de conclusie dat er sedimentatie plaats zou vinden. Uit de metingen blijkt dat ook sprake kan zijn van een stabiele schorrand of van een keine achteruitgang van de begroeiing, zonder dat dit tot klifvorming leidt. Daarnaast blijkt uit één van de erosiemetingen op de schor bij Ellewoutsdijk, dat uit een geleidelijke schor-slikovergang, in relatief korte tijd (binnen een half jaar) een schorklif tot stand kan komen indien er verlaging van het slik plaatsvindt.

De erosie van de schorren is een gevolg van de invloed van krachten van golven en stromingen. De grootte van deze krachten zijn afhankelijk factoren als windrichting, windkracht, slikhelling en slikbreedte. Het effect van de krachten op de schorren is afhankelijk van factoren als texturele opbouw en beworteling van de schorren. De snelheid van de erosie wordt dus veroorzaakt door een groot aantal, moeilijk te modelleren factoren. Met behulp van meervoudige regressie analyse van een aantal variabelen die van invloed kunnen zijn op de gemeten erosie, kan dan ook slechts 56% van de variatie in de erosie verklaard worden. Er blijkt dat de erosie in geringe mate correleert met de klifhoogte en het percentage lutum onder in het klif.

Slikbreedte en slikhelling blijken niet gecorreleerd te zijn met de mate van erosie. Bij de factor slikhelling kan dit het gevolg zijn van het feit dat in ongeveer de helft van de gevallen niet de gemiddelde slikhelling tot de gemiddelde laag water (GLW) lijn bekend was, maar alleen de slikhelling vlak voor het schorklif. Aangezien de slikhelling vaak afneemt naarmate men verder van de GLW lijn verwijderd is, geeft dit een onnauwkeurig beeld van de gemiddelde slikhelling. Dat de erosie niet negatief correleert met de slikbreedte lijkt in tegenspraak met de theorie dat de golfhoogte en daarmee de golfenergie afnemen naarmate de golven zich langer in ondiep water bevinden. De slikbreedte moet blijkbaar beneden een bepaalde drempelwaarde komen wil de golfenergie significant toenemen. Siereveld (1984) heeft reeds in het verleden schattingen gemaakt omtrent de erosie van schorgebieden in de Westerschelde. Zijn conclusies zijn echter volledig gebaseerd op gegevens omtrent de erosie van de vooroever van het slik. Als gevolg van versterkte inscharing is onder andere ter plaatse van het westelijk deel van het Verdrongen Land van Saeftinghe in een periode van 30 jaar het slik over een afstand van 100 à 200 meter geërodeerd. In dit deel van het Verdrongen Land van Saeftinghe komen echter nog veel geleidelijke echorslikovergangen voor en uit de metingen blijkt dat de erosie er minder dan 0.1 meter per jaar bedraagt. Het slik is hier ondanks de erosie in de afgelopen 30 jaar blijkbaar nog breed genoeg om voldoende golfenergie te disperseren, zodanig dat de erosieve krachten onvoldoende zijn om aan de echorrand veel erosie tot gevolg te hebben.

Ter plaatse van het oostelijk deel van Verdrongen Land van Saeftinghe vindt echter wel versterkte afslag van de echorranden plaats. Hier treedt ook versterkte inscharing van de vooroever van het slik op (40 tot 80 meter ter plaatse van de Hedwige polder; Siereveld 1984). Het slik is daardoor te smal geworden om de golfenergie voldoende te verminderen: de kritische slikbreedte is overschreden. De afslag neemt met name in het zuidelijk deel van De Noord grote vormen aan. Er is hier een erosie van ongeveer 4 meter per jaar gemeten.

Naast golfenergie spelen ook de opbouw en sterkte-eigenschappen een belangrijke rol bij de intense erosie in dit gebied. De schorren in dit deel van het Verdrongen Land van Saeftinghe zijn kleirijk en vertonen een geringe sterkte (ca. 6 kPa). Daarbij is het slik in zo'n sterke mate verlaagd dat een schorklif met een hoogte van 1.2 meter is ontstaan, die ondergraven wordt als gevolg van de zandige ondergrond. Een groot dus zwaar overhangend blok, in combinatie met materiaal

met een geringe sterkte, levert een schorrand op die relatief weinig weerstand biedt tegen erosieve krachten. De golven die in het noordoostelijk deel van het Verdrongen Land van Saef-tinghe erosie veroorzaken kunnen, gezien de expositie van de schorrand en de strijklengte van de wind bij hoog water, vrijwel niet ontstaan zijn door windwerking. Het moeten hier voornamelijk de scheepsgolven zijn die de erosie veroorzaken. Langa de schor-slikovergangen in het zuidelijk deel van Boogaard, ten zuiden van De Noord, vindt geen erosie maar juist schoruitbreiding plaats. Dit wordt veroorzaakt door de grote absolute hoogte van het slik, ruim boven GHW. Daardoor zullen de golven het schor slechts incidenteel bereiken.

Evenals bij De Noord in het Verdrongen Land van Saef-tinghe treedt bij de schorren voor de Emanuelpolder sterke erosie op, dit heeft echter vermoedelijk een andere oorzaak. Volgens Sieraveld (1984) heeft ter plaatse van de schorren voor de Emanuelpolder geen versterkte erosie van de vooroever van het slik plaatsgevonden. Tevens is aan de hand van de vrije priema proeven vastgesteld dat de sterkte van het schorklif redelijk groot is (ca. 17 kPa op 30 cm -mv, ca. 9 kPa op 70 cm -mv, zie tabel 4.6). Als gevolg van de ZZW expositie van de schorrand met de daarbij behorende relatief grote strijklengte en veel voorkomende harde winden, is de golfenergie van windgolven er echter hoog (zie tabel 5.1). Dit veroorzaakt, bij voldoende lage ligging van de klifbasis ten opzichte van NAP, de hoge mate van afslag (3 tot 4 meter per jaar) in het westelijk deel. Het oostelijk deel van de schorren voor de Emanuelpolder is waarschijnlijk als gevolg van de grotere breedte van het slik aldaar, wat minder aan erosie onderhevig. De schorren bij Ossendrecht (Appelzak) zijn onderhevig aan een erosie van 1 tot 2.5 meter per jaar, hetgeen waarschijnlijk veroorzaakt wordt door de expositie op het westen, in combinatie met een geringe bodemsterkte als gevolg van een hoog lutumgehalte.

De erosie van het merendeel van de schorren bij Bath (1.5 tot 2 meter per jaar) houdt waarschijnlijk verband met de geringe afetand tot de vaargeul en de versterkte erosie van de vooroever van het slik. Bij de schor van Baarland wordt de erosie hoofdzakelijk bepaald door de zeer nabije ligging van de vloed-schaar 'Boerengat' ten opzichte van de schorrand. Ondanks de strekdammen die zijn aangelegd erodeert het oostelijk deel als gevolg van stroming en nauwelijks geremde golfwerking waarschijnlijk nog met een snelheid van 1 tot 2 meter per jaar. Aan de westelijke schorrand is de erosie als gevolg van het aanleggen van een dam parallel aan de schorrand beduidend lager (0.1 tot 0.2 meter per jaar).

Hoewel de erosie bij de schorren van Ellewoutsdijk niet extreem hoog is (ca. 1 meter per jaar), is de situatie in 1986 verslechterd ten opzichte van 1985. Het slik is er op sommige plaatsen enkele decimeters verlaagd en geleidelijke schor-slik-overgangen zijn overgegaan in schorkliffen. Of deze trend zich voort zal zetten, is moeilijk te voorspellen.

De manier waarop de erosie optreedt, is voornamelijk afhanke-lijk van de profielopbouw van het schorklif. Bij kliffen die zowel qua textuur als qua wortelverdeling homogeen zijn, treedt alleen erosie door schuren en plukken op. Dit is een relatief langzaam maar constant proces. De afslag aan de schorren van

Ossendrecht (Appelzak) wordt vrijwel volledig door schuren en plukken veroorzaakt. Bij kliffen die opgebouwd zijn uit een afwisseling van zand- en kleilaagjes, treedt naast erosie door schuren en plukken oppervlakkige erosie op. Daardoor is dit type klif vaak getrapt. De schorren voor de Emanuelpolder worden op deze manier geërodeerd. Kliffen tenslotte die zijn opgebouwd uit een cohesieve (lutumrijke) laag op een zandlaag, worden ondergraven door snellere erosie door schuren en plukken van de onderste laag. Na deze ondergraving treedt afstorting en opruiming van het afgestorte blok op. Dit erosie proces komt veelvuldig voor op de schorren bij Ellewoutsdijk.

Thorne en Tovey (1981) hebben vergelijkingen opgesteld waarmee voor een ondergraven klif aan een rivieroever kan worden bepaald of de toestand kritiek is of niet. Tevens kan hiermee bepaald worden op welke manier deze afstorting plaats zal vinden. Deze methode bleek voor de onderzochte schorgebieden redelijk goed te gebruiken. Van Eerdts (1985a) heeft voor ondergraven schorkliffen een model opgesteld waarmee de ondergravingsdiepte kan worden berekend. Voor dit model zijn echter niet de precies de juiste gegevens bepaald, dit model was daarom niet goed te controleren voor de onderzochte gebieden in de Westerschelde. Indien naast de druksterkte de treksterkte gemeten zou worden zouden de resultaten van zowel het model van Van Eerdts als dat van Thorne en Tovey waarschijnlijk nauwkeuriger zijn.

Sedimentatie of schoruitbreiding is alleen geconstateerd bij het meest zuidelijke deel van Boogaard in het Verdrongen Land van Saeftinghe en bij de Biezelingse Ham aan de noordzijde van de Westerschelde. Gedurende de periode van het onderzoek bedroeg de snelheid van schoruitbreiding enkele centimeters per jaar. De schoruitbreiding is het gevolg van aangroei van de wortelstokken van de vegetatie. In de genoemde gevallen bestond de vegetatie uit respectievelijk *Scirpus maritimus* (Zeebies) en *Spartina Anglica* (Engels elikgras). Schoruitbreiding kan ook plaatsvinden door verspreiding van zaad. Daardoor kunnen ook geheel nieuwe schorgebieden ontstaan.

De belangrijkste voorwaarde voor schoruitbreiding lijkt een minimale absolute hoogte van het slik voor het schor te zijn, in combinatie met een enigszins beschutte ligging. De duur en de kracht van de golfwerking is hierdoor minimaal. In het Verdrongen Land van Saeftinghe is deze minimale hoogte van het slik 2.4m +NAP, dit is GHW -0.1m. Alleen de slikken voor het zuidelijk deel van Boogaard en voor een deel van Konijnenschor voldoen aan deze voorwaarde. Van de schorgebieden langs de noordzijde van de Westerschelde is de absolute hoogte niet bekend, maar verondersteld mag worden dat het slik voor de Biezelingse Ham relatief hoog gelegen is. Daarnaast speelt de beschutte ligging van de Biezelingse Ham voor zowel wind- als scheepsgolven een rol.

Duidelijk is dat uitbreiding van het schorareaal vele malen langzamer gaat dan de afslag ervan, en dat dit ook op veel minder plaatsen langs de schorranden in het oostelijk deel van de Westerschelde geschied.

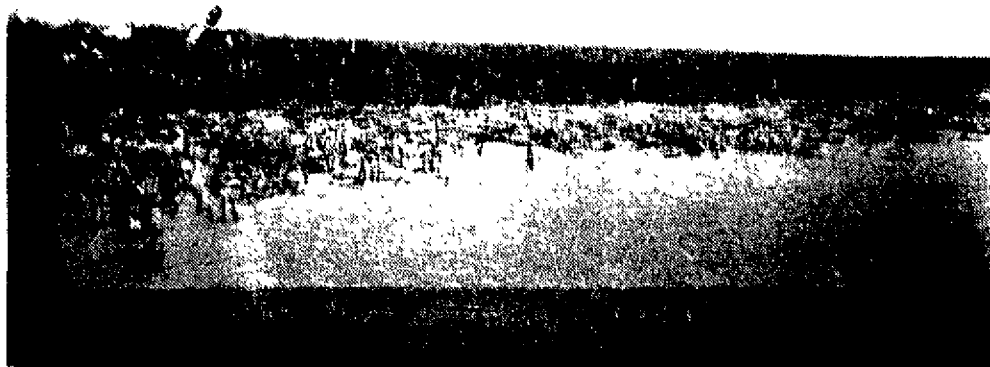


Foto 1. Geleidelijke schor-slikovergang aan het 'Speelmansgat'
(kreek in het Verdrongen Land van Saeftinghe)



Foto 2. Getrapt echorklif (totale hoogte 0.7 meter)



Foto 3. Overzicht van de schorren bij Ossendrecht (Appelzak)



Foto 4. Het uitvoeren van een waterpassing, aan de 'Ijebreker'
(kreek in het Verdrinken Land van Saeftinghe)



Foto 5. Scheur in de schorrand van de schoren voor Emanuelpolder
(bij Waarde)

LITERATUURLIJST

Bakker, H. & J. Schelling (1966) Systeem van de bodemklassificatie voor Nederland. Pudoc, Wageningen.

Carson, M.A. (1971) *The Mechanics of Erosion*. Pion, London, 174 pp.

Daamen, J.W. et al. (1983) Beschrijving van het getij en zoutregime in de Westerschelde, omgeving Land van Saeftinghe. RWS-WWKZ 83.V002.

Eerd, M.M. van (1985a) Salt Marsh Cliff Stability in de Oosterschelde. *Earth Surface Processes and Landforms* 10, pp. 95-106.

Eerd, M.M. van (1985b) Schorkliferosie in de Oosterschelde. *Landschap* 2, pp. 99-108.

Eerd, M.M. van (1985c) The influence of vegetation on erosion and accretion in salt marshes of the Oosterschelde, The Netherlands. *Vegetatio* 62, pp. 367-373.

Genuchten, P.M.B. van (1982) Effecten van de verdieping van de vaargeul naar Antwerpen op de schor- en intergetijdegebieden in het oostelijk deel van de Westerschelde. RWS DDMI 1.83, Middelburg.

Groen, P. & R. Dorrestein (1976) *Zeegolven*. Staatsuitgeverij, 's-Gravenhage, 124 pp.

Hooke, J. M. (1979) An analysis of the processes of river bank erosion. *Journal of Hydrology* 42, pp. 39-62.

Klimaatatlas van Nederland (1972) Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut. Staatsuitgeverij, 's-Gravenhage.

Komar, P.D. (1976) *Beach Processes and Sedimentation*. Prentice-Hall, London, 429 pp.

Leenmans, J. & B. Verpaardonk (1980) Saeftinghe, vegetatiekaart 1972. Stichting Het Zeeuwsche Landschap, Heinkenszand, 24 pp.

Letzsch, W. S. & R. W. Frey (1980) Erosion of salt marsh tidal creek banks, Sapelo Island Georgia. *Senckenbergiana maritima*, 15(5/6), pp. 201-212.

Meulen, A. van der & M.M. Schoor (1986) Schor-slikovergangen in de Westerschelde, resultaten van een morfologische kartering en voorspellingen van erosie en sedimentatie. *Doctoraal verslag, ongepubl.* 41 pp.

Reynders, J.J. (1985) Het Bodemkundig Milieu van het Intergetijdegebied van de Westerschelde. RWS DDMI-WWKZ.

Richards, K.S. (1982) *Rivers, form and processes in alluvial channels*. University paperbacks, London, 358 pp.

Schoot, P.M. & M.M. van Eerd (1985) Toekomstige ontwikkelingen van de schorgebieden in de Oosterschelde. RWS DDMI 85-23, Middelburg.

Siereveld, J.J. (1984) Beknopt overzicht van de meest bedreigde schorranden in de Westerschelde. RWS DDMI 84.391, Middelburg.

Stein, M.A.M. (1984) Schor-slikovergangen in de Oosterschelde -de resultaten van een bodemkundige en morfologische kartering-. RWS DDMI 84.08, Middelburg.

Stronkhorst, J. (1983) Een milieukundige probleemschets van de Westerschelde. RWS DDMI 82.08, Middelburg.

Thorne, C.R. & H.K. Lewin (1979) Bank Processes, bed material movement and planform development in a meandering river. in: Adjustments of the fluvial system. R. D. Rhodes & G. P. William Kendal & Hunt, Dubuque, Iowa, pp. 117-137.

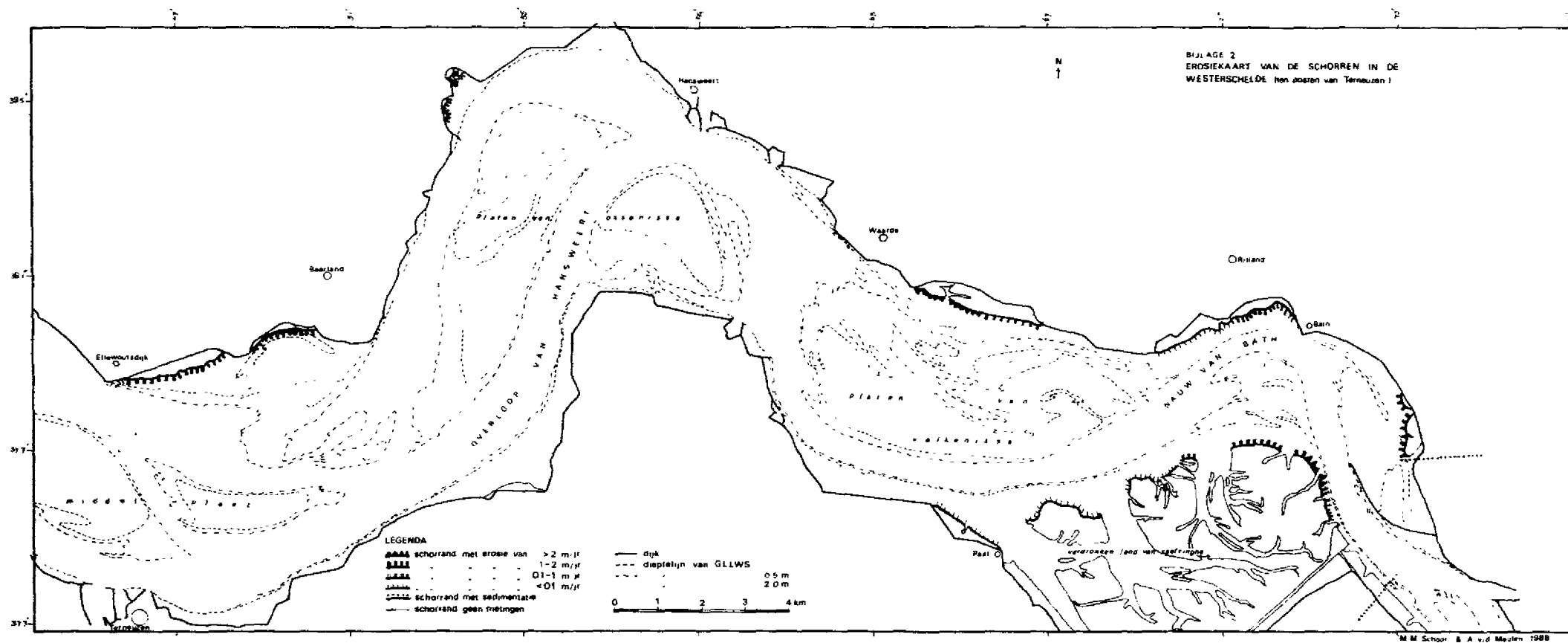
Thorne, C.R. & H.K. Tovey (1981) Stability of composite river banks, *Earth Surface Processes and Landforms* 6, pp. 469-484.

Thorne, C.R. (1982) Processes and mechanisms of river bank erosion. in : R.D. Hay et al. Gravel Bed Rivers. Wiley, Chichester.

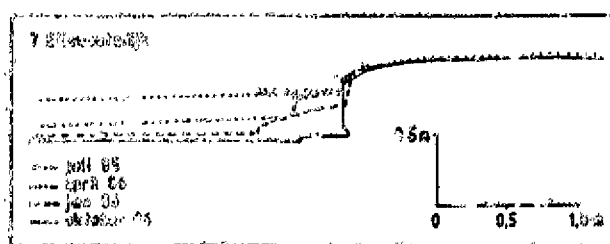
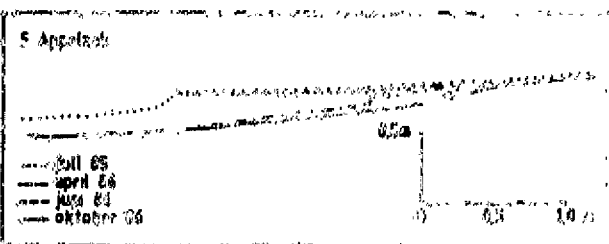
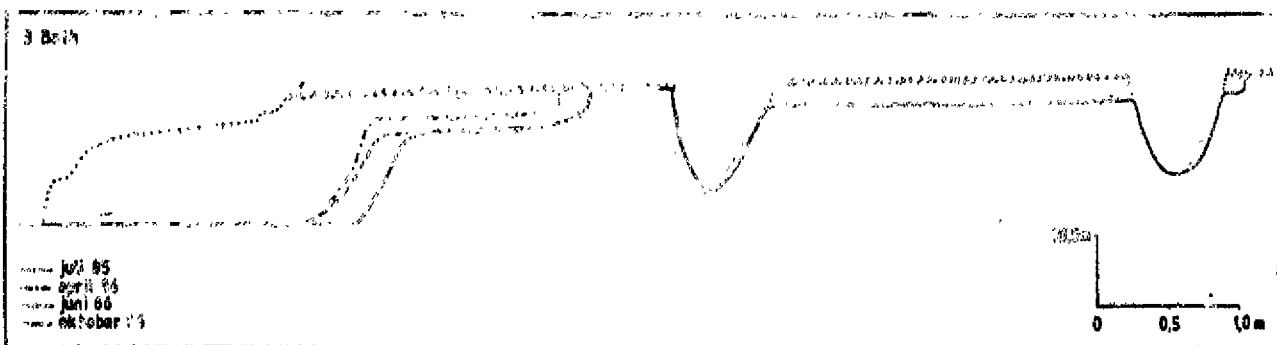
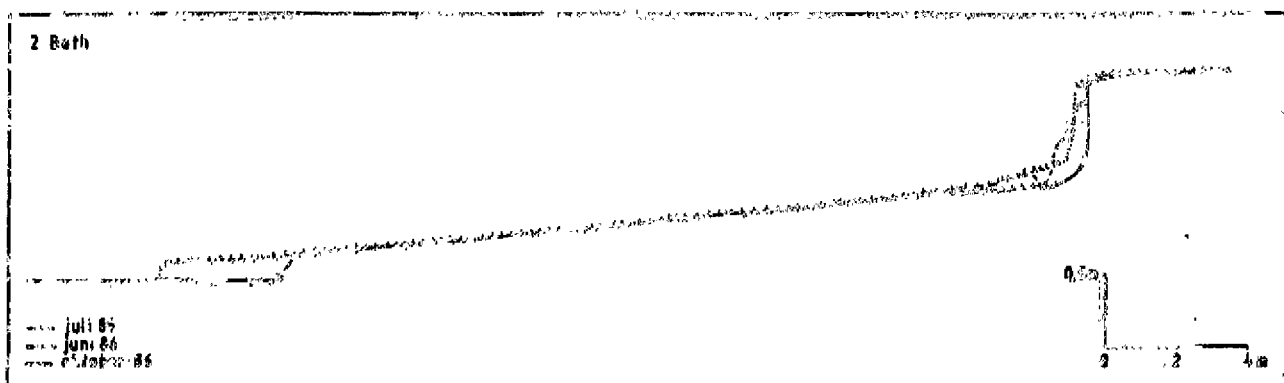
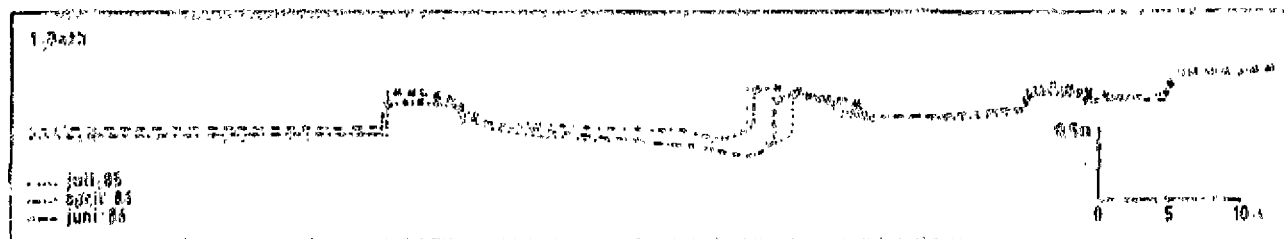
Wilderom, M.H. (1968) Tussen afsluitdijken en deltadijken. Deel 3, midden Zeeland, pp. 48-50.

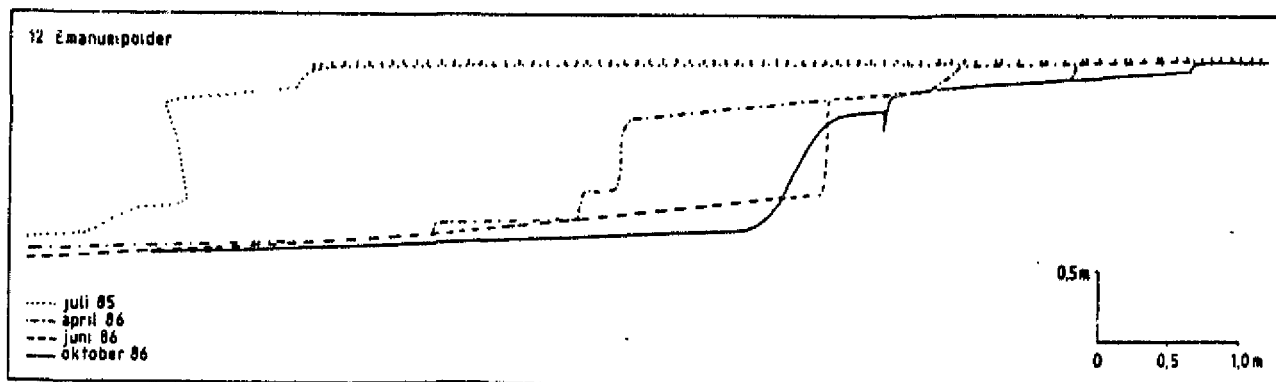
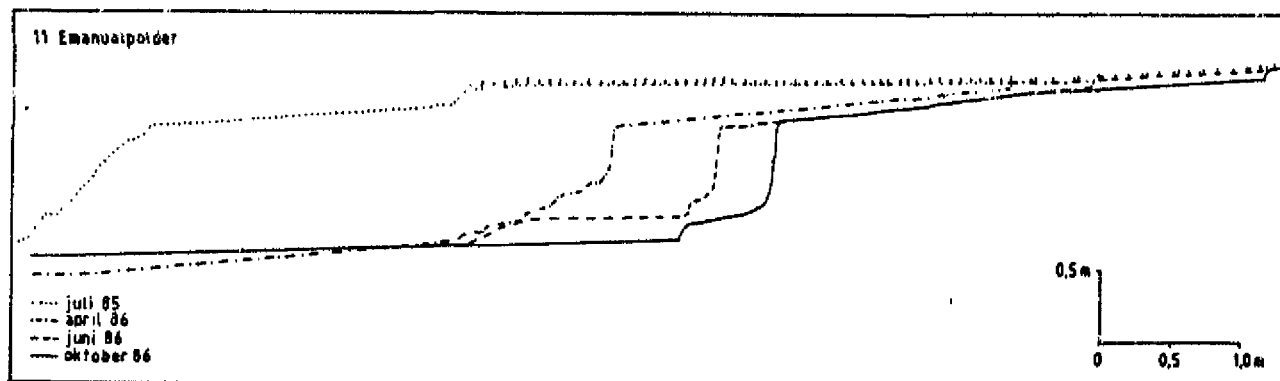
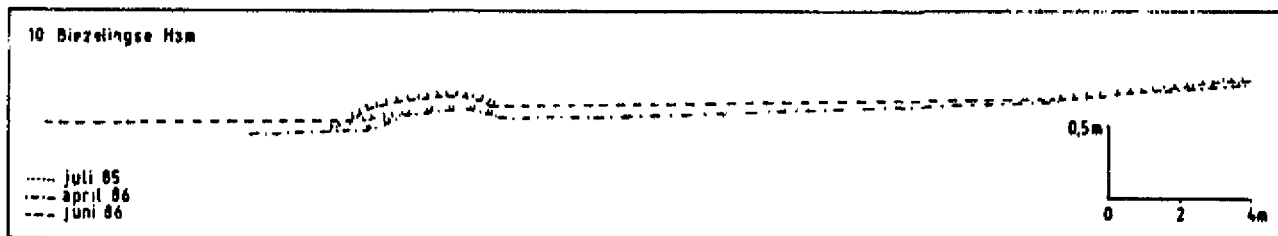
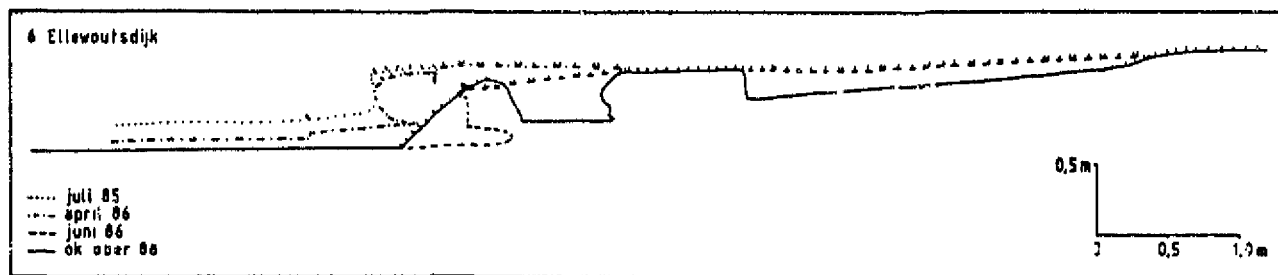
Wolman, M.G. (1959) Factors influencing erosion of a cohesive riverbank. *American Journal of Science* 257, maart, pp. 204-218.

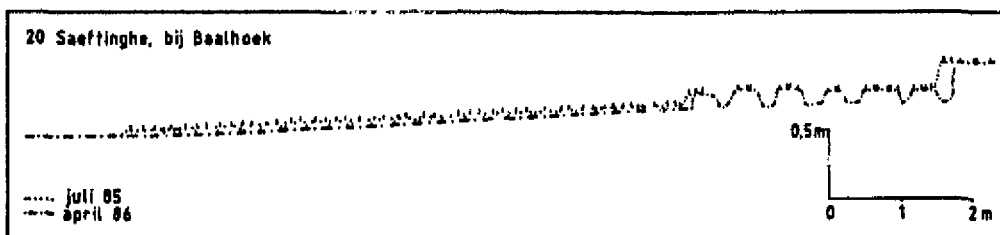
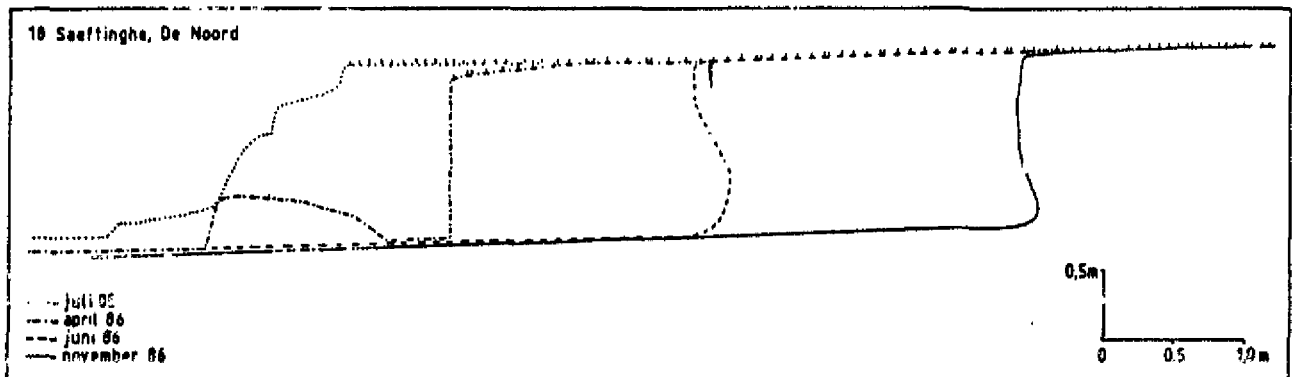
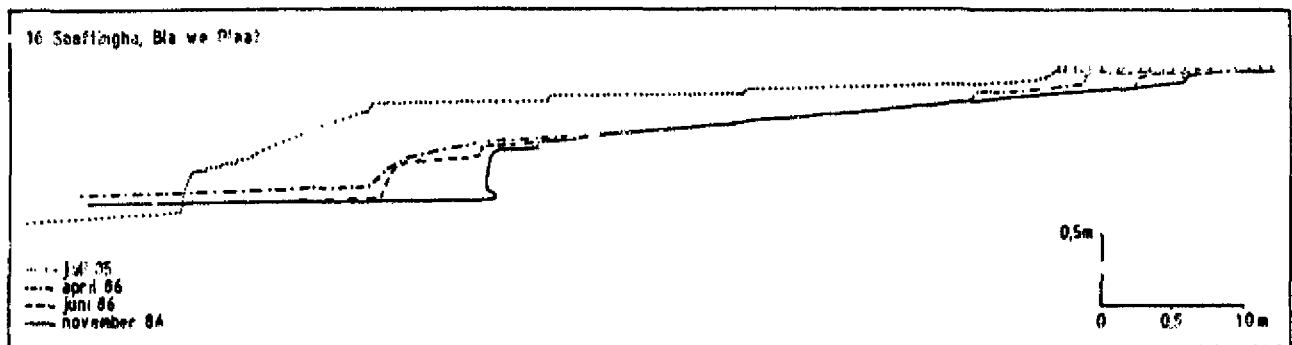
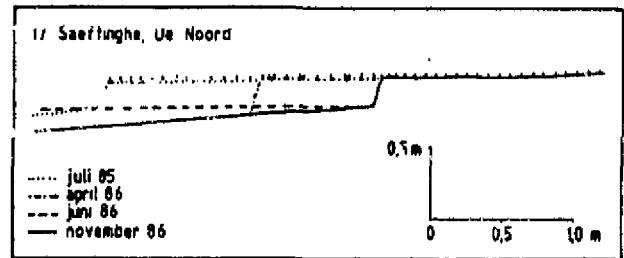
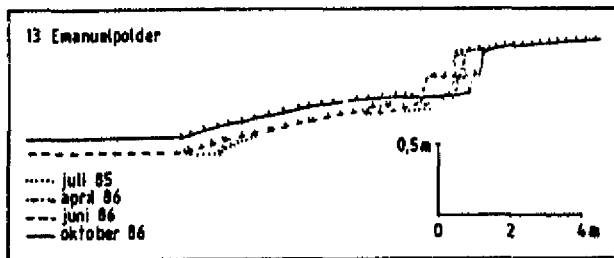
Zonneveld, J.L.S. (1981) Vormen in het landschap. Het Spectrum, Utrecht, pp. 314-315.

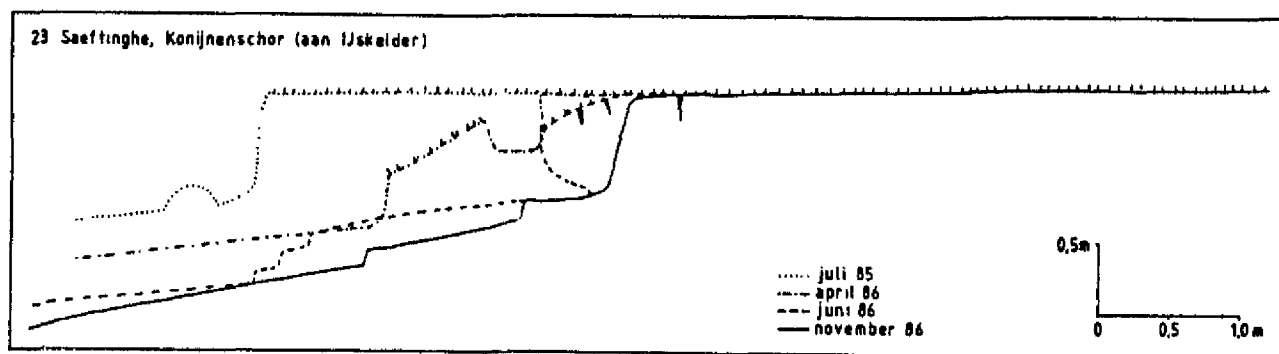
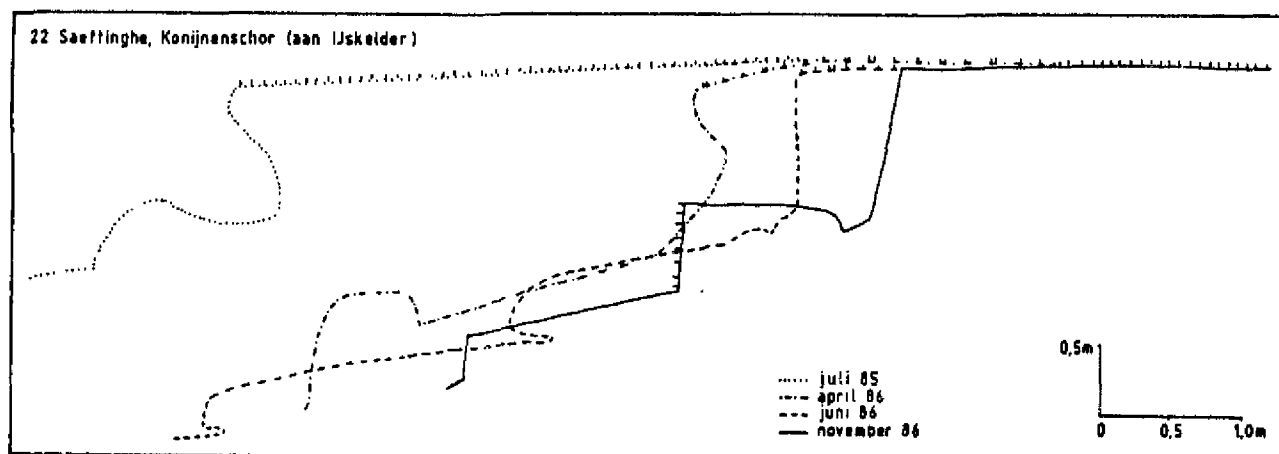
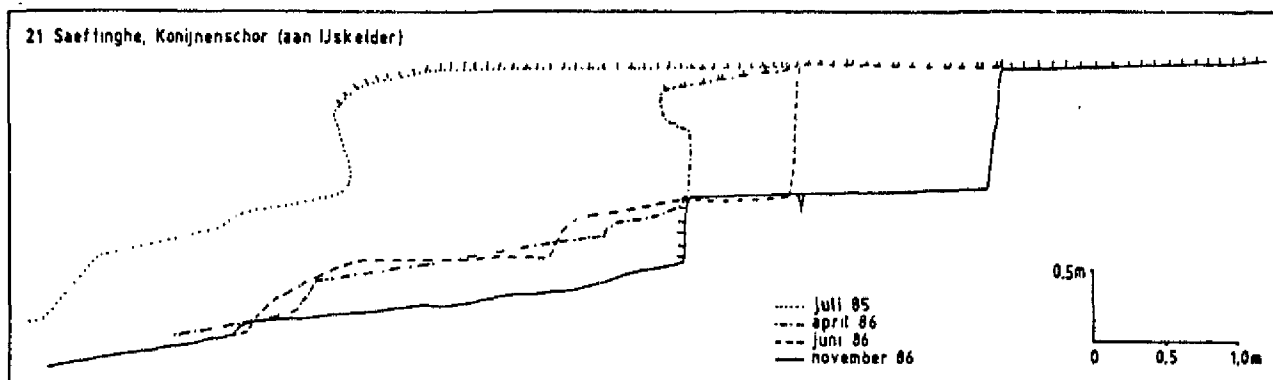


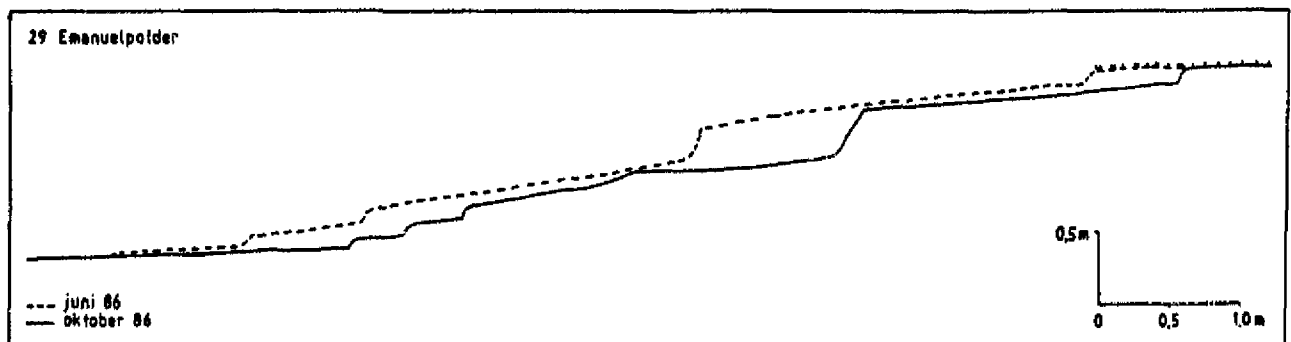
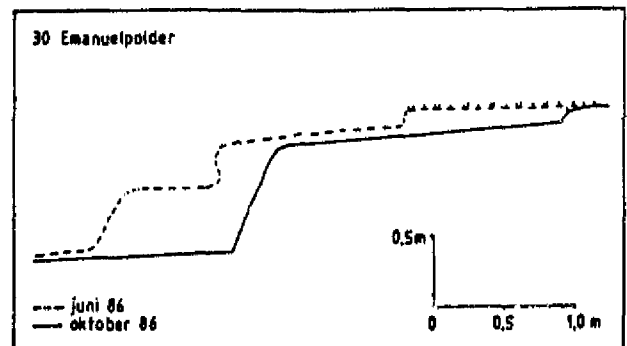
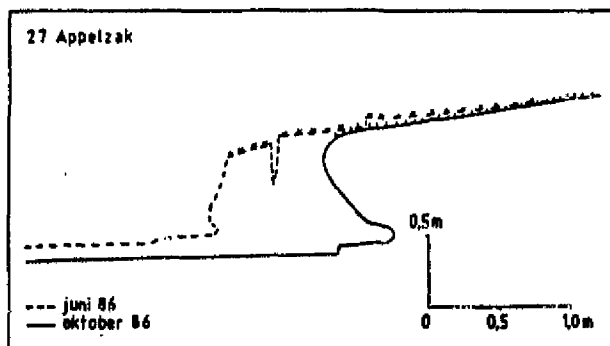
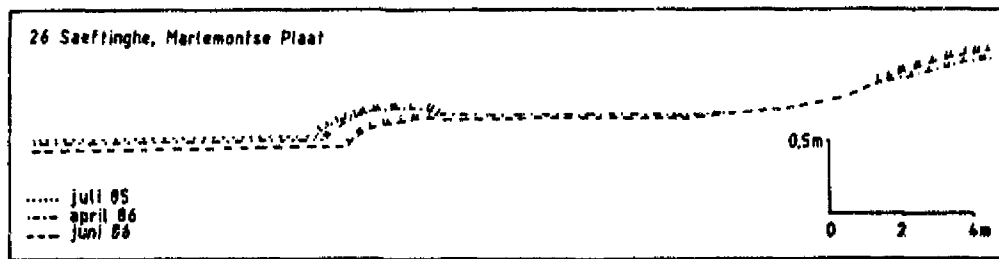
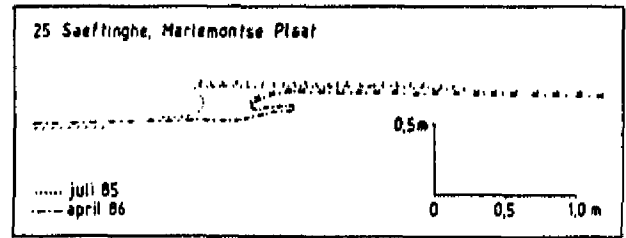
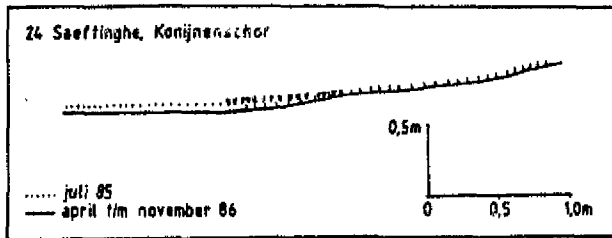
Bijlage 13. Profielen bepaald met behulp van de waterpeemingen

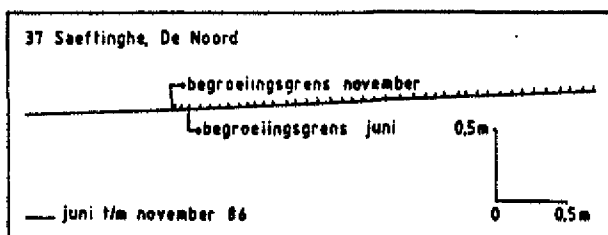
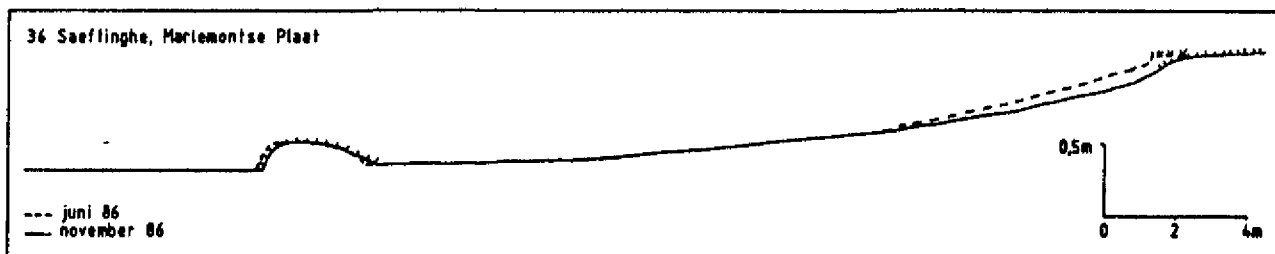
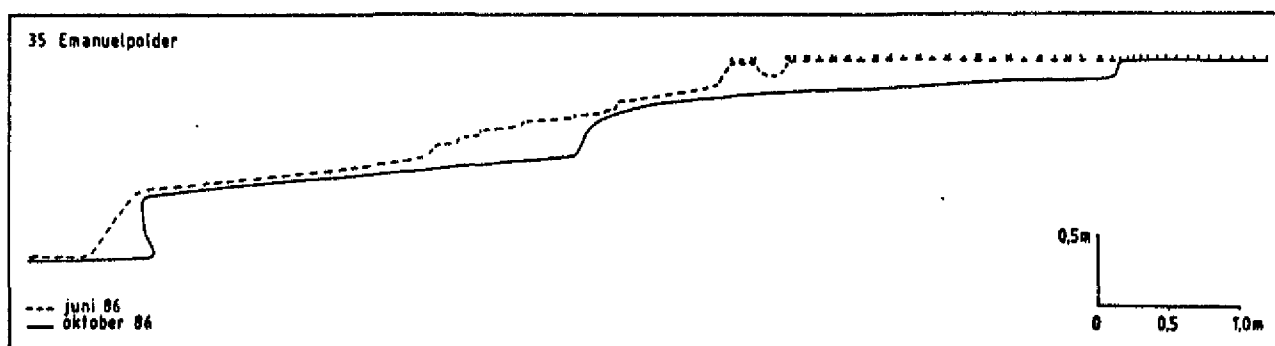
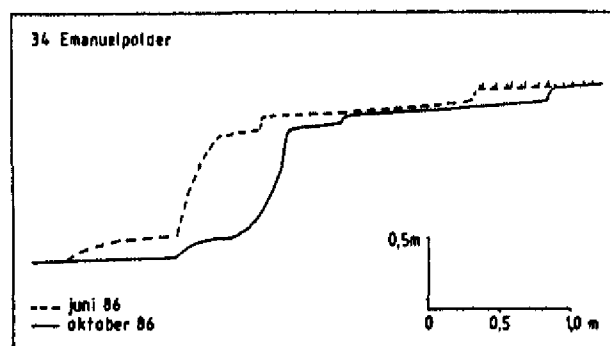
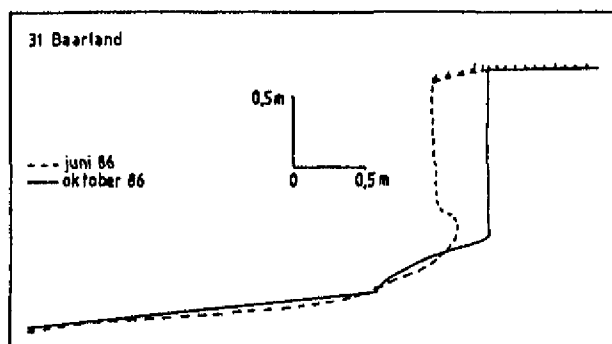












BIJLAGE 4. Resultaten waterpassingen: erosie/sedimentatie
in m en m², in de meetperiode en per jaar
en van de begroeiingsgrens

profiel nummer	gebied	klif- hoogte (m)	lengte meet- periode (mnd)	erosie in meetp. (m)	erosie begr. grens (m)	erosie in m ² (m ²)	erosie per jaar (m/jr)
1	Bath	0.20	11	0	0	0	0
2	..	0.95 ¹	15.5	0.4	3.5	1.0	0.3
3	..	0.95	15.5	2.1	2.1	2.4	1.6
5	Appelzak	0.10	15.5	2.3	2.3	0.4	1.8
6	Elewoute-	0.35	15.5	1.7	1.7	0.9	1.3
7	dijk	0.55	15.5	0.6	0.6	0.2	0.5
10	Biezel. Ham	0	11	0	0	-0.1	-0.1
11	Emanuel-	1.15	15.5	4.5	5.6	5.1	3.5
12	polder	1.15	15.5	4.5	6.2	5.5	3.5
13	..	0.30	15.5	0.8	0.8	0.1	0.6
16	Blauwe Pl.	0.95	16	2.1	0.9	2.0	1.6
17	De Noord	0.20	16	1.9	1.9	0.5	1.4
18	..	1.20	16	4.7	4.7	6.9	3.5
20	Baalhoek	0.35	9	0.1	0.1	0.2	0.1
21	IJekelder ²	0.65	16	4.6	4.6	7.0	3.5
22	..	1.10	16	4.7	4.7	7.7	3.5
23	..	0.75	16	2.5	2.5	2.5	1.9
24	Konijnens.	0	16	0	0.1	0.0	<0.1
25	Marlemontse	0.2	9	0.4	0.4	0.2	0.5
26	Plaat	0	11	0.2	0.1	0	0.2
27	Appelzak	0.90	4	0.7	0.7	0.8	3.9
29	Emanuel-	1.20	4	1.0	0.7	0.9	5.5
30	polder	1.00	4	0.9	1.1	0.7	5.0
31	Baarland	1.60	4	0.4	0.4	0.4	2.2
32 ³	..	1.00	4	0.03	0.03	0.03	0.2
34	Emanuel-	1.15	4	0.6	0.6	0.6	3.0
35	polder	1.3	4	0.3	2.7	0.9	1.4
36	Marlem. Pl	0.05	4	0.2	0.2	0.5	1.1
37	Boogaard	0	4	0	-0.1	0	-0.1

¹Dubbel klif, bestaande uit een klif van 0.20m vóór een klif van 0.75m

²IJekelder: geul gelegen aan de oostkant van Konijnenschor

³Meting gebaseerd op erosiepin-metingen tussen punt 32 en 33, daar piketten t.b.v. waterpassingen verwijderd waren

BIJLAGE 5. Bepaling vermenigvuldigingsfactor X

punt	erosie juni '86- okt/nov 1986 (m)	erosie op jaar- jaarbasis (m/jr)	vermenigvuldi- gings-factor X
2	0.3	0.3	1.0
3	0.2	1.6	8.0
5	0.3	1.8	6.0
6	0.95	1.3	1.4
7	0.1	0.5	5.0
11	0.4	3.5	8.8
12	0.25	3.5	14.0
13	0.2	0.6	3.0
16	0.65	1.6	2.5
17	0.1	1.4	14.0
18	2.2	3.5	1.6
21	1.4	3.5	2.5
22	0.7	3.5	5.0
23	0.55	1.9	3.5

X = 5.5
SD = 4.3
n = 14

BIJLAGE 6. Druksterkte van 44 monsters met bijbehorende bodemparameters

moneter nummer	druk- sterkte (kPa)	diepte (cm)	vocht- gehalte (%)	γ_{droog} (g/cm ³)	γ_{nat} (g/cm ³)	lutum ¹ gehalte (%)	locatie
1	16.0	39	25	1.12	1.49	25	Emanuel-
2	8.9	71	44	0.77	1.37	35	polder
3	12.3	31	41	0.85	1.43	25	"
4	8.4	64	-	-	-	-	"
5	5.2	46	43	0.69	1.22	41	Appelzak
6	6.2	28	-	-	-	-	"
7	4.2	47	50	0.67	1.33	41	"
8	5.6	25	52	0.63	1.29	-	"
9	6.8	25	-	-	-	-	"
10	6.6	27	-	-	-	-	"
11	20.9	28	40	0.91	1.51	31	Bath
12	13.4	29	37	0.97	1.53	31	"
13	13.3	28	38	0.94	1.52	-	"
14	20.0	44	30	1.12	1.59	20	Baarland
15	10.5	98	30	1.31	1.86	-	"
16	20.0	44	34	0.96	1.44	20	"
17	12.2	97	26	1.25	1.70	-	"
18	18.1	45	-	-	-	20	"
19	12.6	98	-	-	-	-	"
20	13.1	41	40	0.84	1.39	25	Emanuel-
21	7.1	78	36	0.98	1.53	35	polder
22	22.3	35	-	-	-	19	"
23	11.1	73	-	-	-	-	"
24	17.0	41	31	0.95	1.39	-	"
25	8.7	73	40	0.90	1.49	-	"
26	9.7	25	37	0.92	1.45	23	Ellew.-
27	9.7	23	43	0.73	1.27	23	dijk
28	9.7	26	-	-	-	-	"
29	13.2	36	30	1.17	1.66	31	Bath
30	13.3	32	39	0.85	1.39	31	"
31	11.8	36	-	-	-	-	"
32	5.7	21	-	-	-	-	Blauwe
33	7.2	23	48	0.67	1.31	-	Plaat
34	8.4	28	49	0.64	1.27	-	"
35	6.4	34	-	-	-	30	De
36	7.2	60	51	0.58	1.18	33	Noord
37	5.5	100	34	1.04	1.59	-	"
38	5.0	32	-	-	-	30	"
39	7.5	60	53	0.52	1.10	33	"
40	4.8	90	-	-	-	-	"
41	6.1	76	-	-	-	35	Emanuel-
42	22.3	24	-	-	-	19	polder
43	9.3	72	-	-	-	-	"
44	15.1	31	-	-	-	-	"
45	-	-	35	0.99	1.52	-	"

¹Het lutumgehalte is geschat a.d.h.v. 11 monsters

BIJLAGE 7. Parameters gebruikt bij de regressie analyse
met betrekking tot erosie

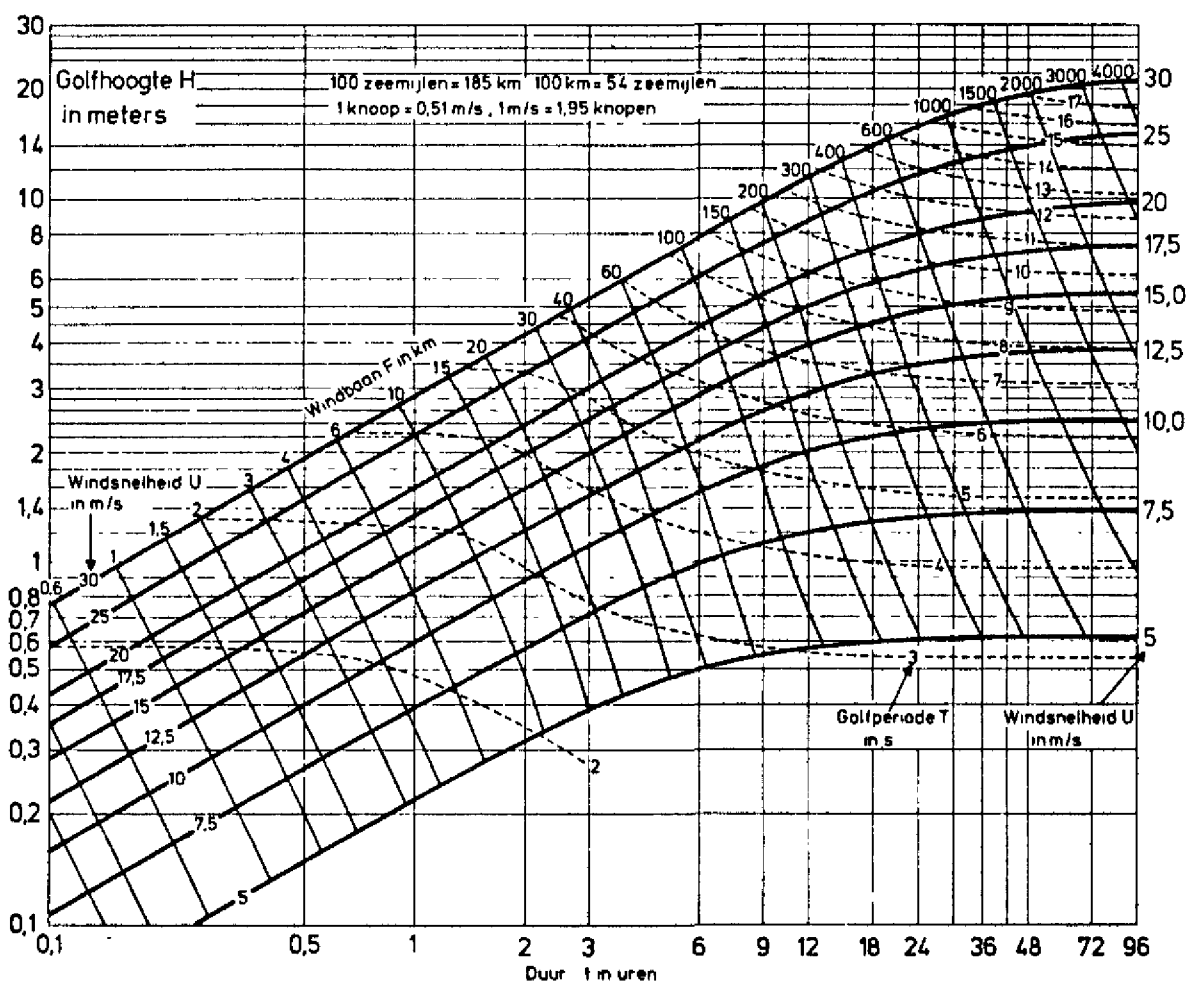
A = Erosie (cm/jr)
B = Erosie van de begroeiingsgrens (cm/jr)
C = Klifhoogte (cm)
D = Slikhelling (%)
E = Slikbreedte (m)
F = Golfenergie in de tijd (J/m²)
G = Afstand tot vaargeul (km)
H = Lutumgehalte (%)
I = Druksterkte (kPa)

profiel nummer	A	B	C	D	E	F	G	H	I
2	30	30	75	0.5	430	48	1.0	30	12.8
3	160	160	95	0.5	550	48	0.8	31	13.4
5	180	190	40	2.1	310	46	2.3	41	6.3
6	130	130	35	1.5	225	45	4.3	23	9.7
7	50	50	40	2.0	225	45	4.3	23	9.7
11	350	430	115	2.5	350	74	3.9	35	8.4
12	350	480	115	2.6	350	74	3.9	35	8.4
13	60	60	30	0.4	440	74	3.7	15	-
16	160	70	95	1.0	450	15	1.9	30	7.1
17	140	140	20	1.7	410	11	1.2	30	-
18	350	350	120	6.0	80	11	0.3	33	6.2
20	10	10	35	2.0	200	11	0.8	15	-
25	50	50	25	1.0	560	15	1.4	15	-
27	390	390	90	1.8	140	46	2.3	41	4.7
29	550	390	120	2.9	480	74	3.9	35	9.0
30	500	610	100	3.4	480	74	3.9	35	9.0
31	220	220	160	7.0	20	39	4.5	20	12.4
32	20	20	100	7.0	30	39	4.5	20	12.4
34	300	300	115	2.4	360	74	3.9	35	8.1
35	140	1490	130	1.9	360	74	3.9	35	8.1

BIJLAGE B. Frequenties p (in procenten) van windrichtingen en
gemiddelde snelheid v (in halve m/s): jaar-normalen
tijdvak 1951-1980; periode juli 1985-oktober 1986;
periode juni 1986-oktober 1986.

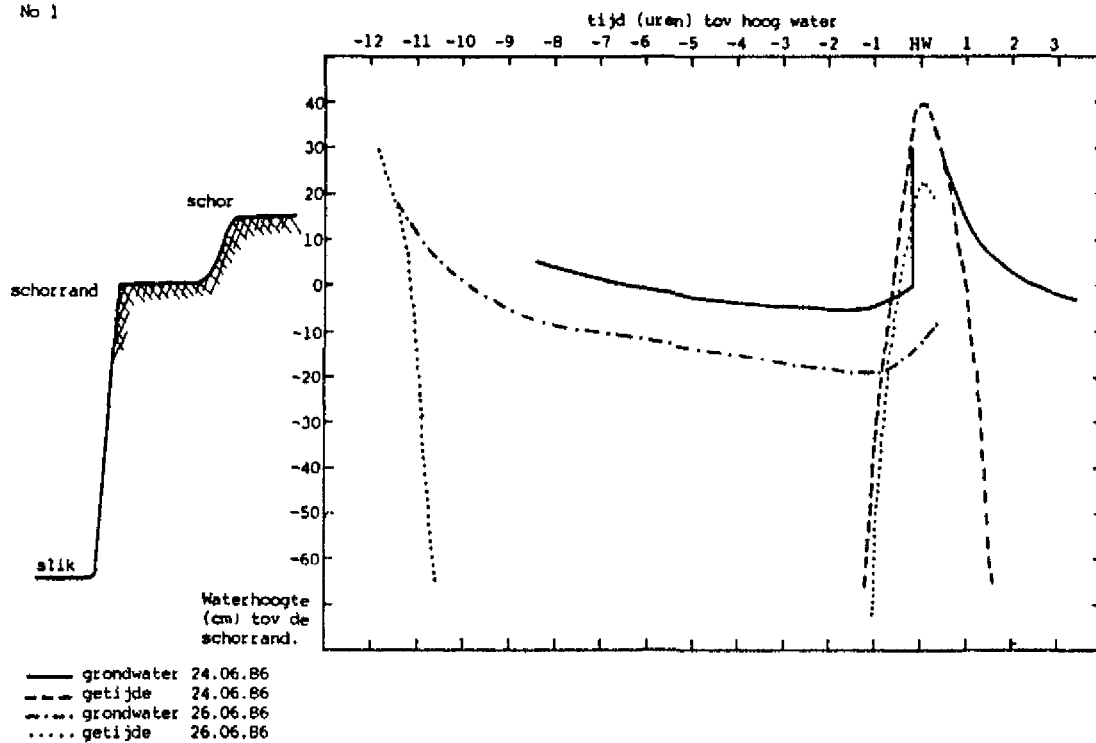
richting	1951-1980		juli 85- oktober 86		juni 86- oktober 86		
	p	v	p	v	p	v	
320-340	7	9	5	8	8	8	
350-010 N	7	9	4	7	6	8	
020-040	8	9	9	8	12	7	
050-070	9	10	12	9	10	8	
080-100 O	6	9	5	8	4	7	
110-130	4	9	3	8	3	8	
140-160	5	9	4	9	3	8	
170-190 Z	9	12	9	11	5	10	
200-220	13	14	15	13	11	12	
230-250	13	15	15	14	15	14	
260-280 W	11	14	14	14	15	14	
290-310	7	11	6	10	7	10	
gewogen gemiddelde ($\sum p_n \cdot v_n$)		11.4		11.0		10.2	

Bijlage 9. Grafiek ter bepaling van de golfhoogte H
(Groen en Dorrestein, 1976)

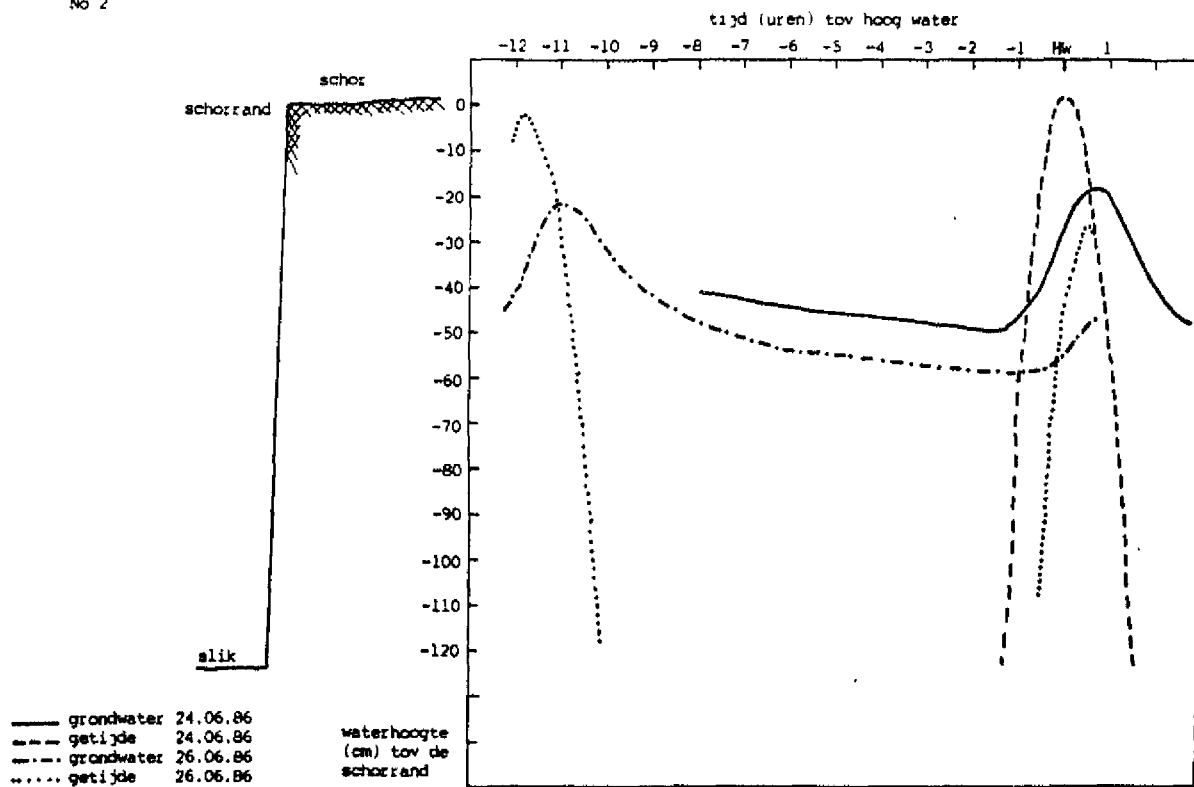


Bijlage 10. Grondwater- en waterstandsverloop aan de schorrand van de schorren voor Emanuelpolder

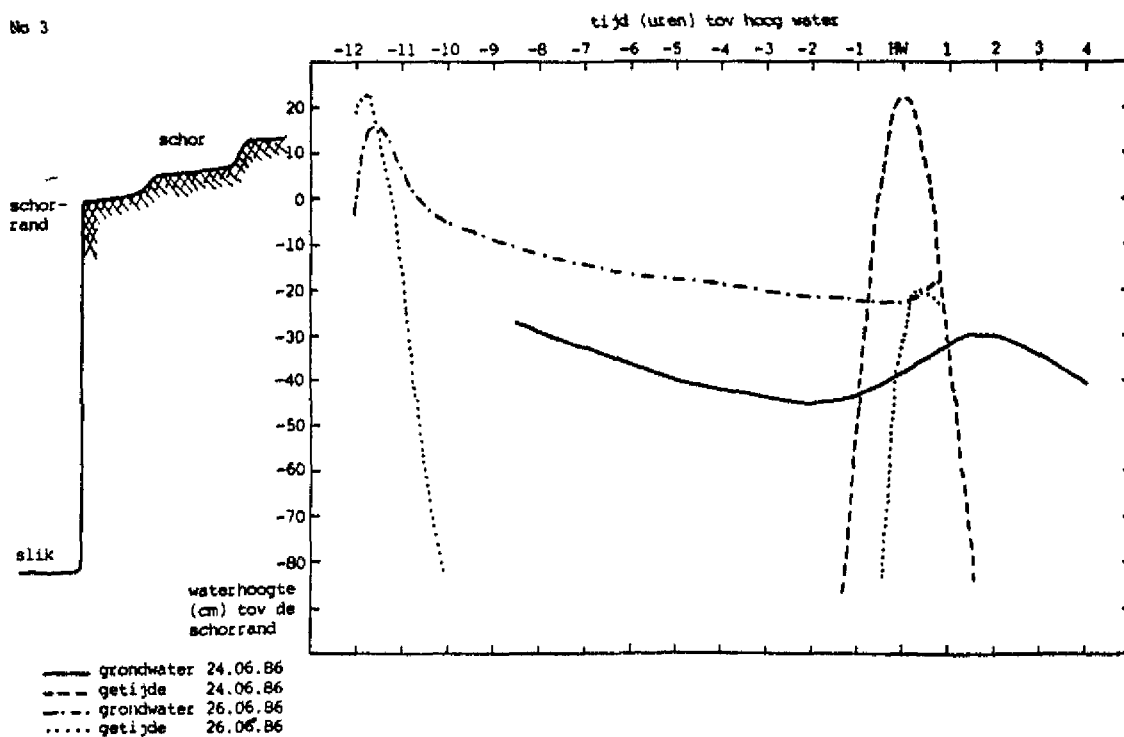
No 1



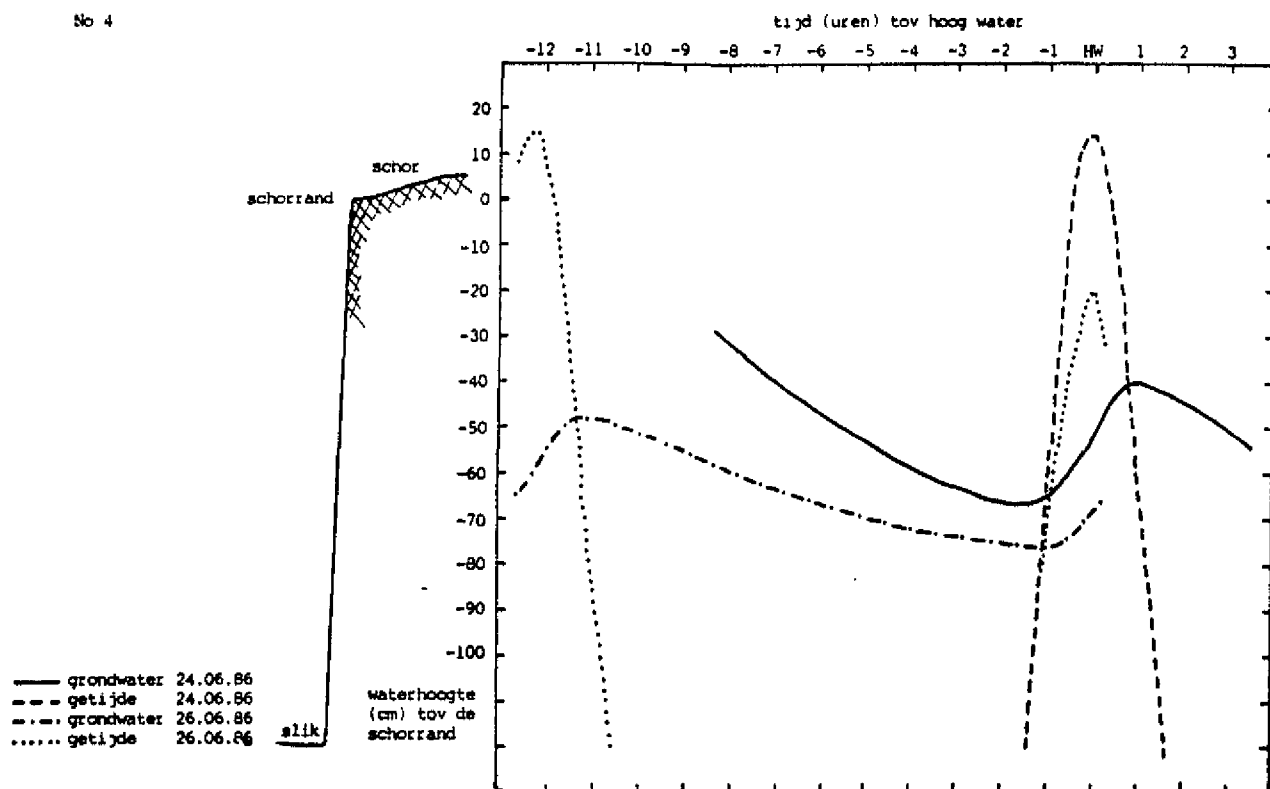
No 2



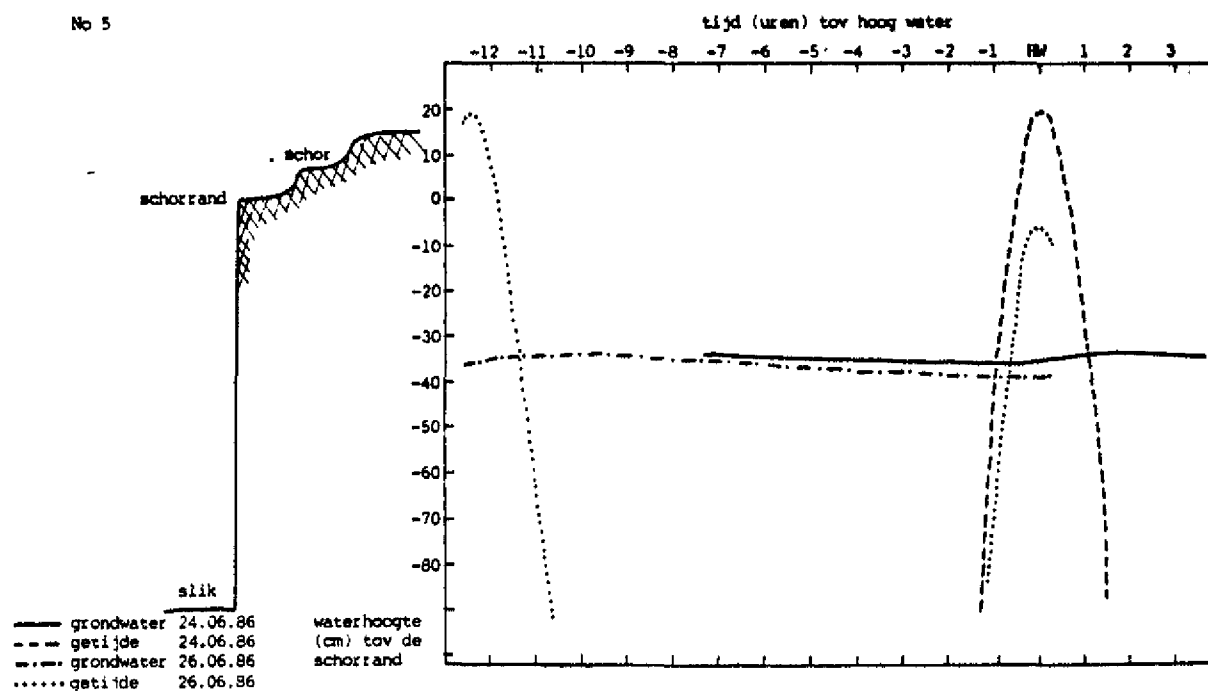
No 3



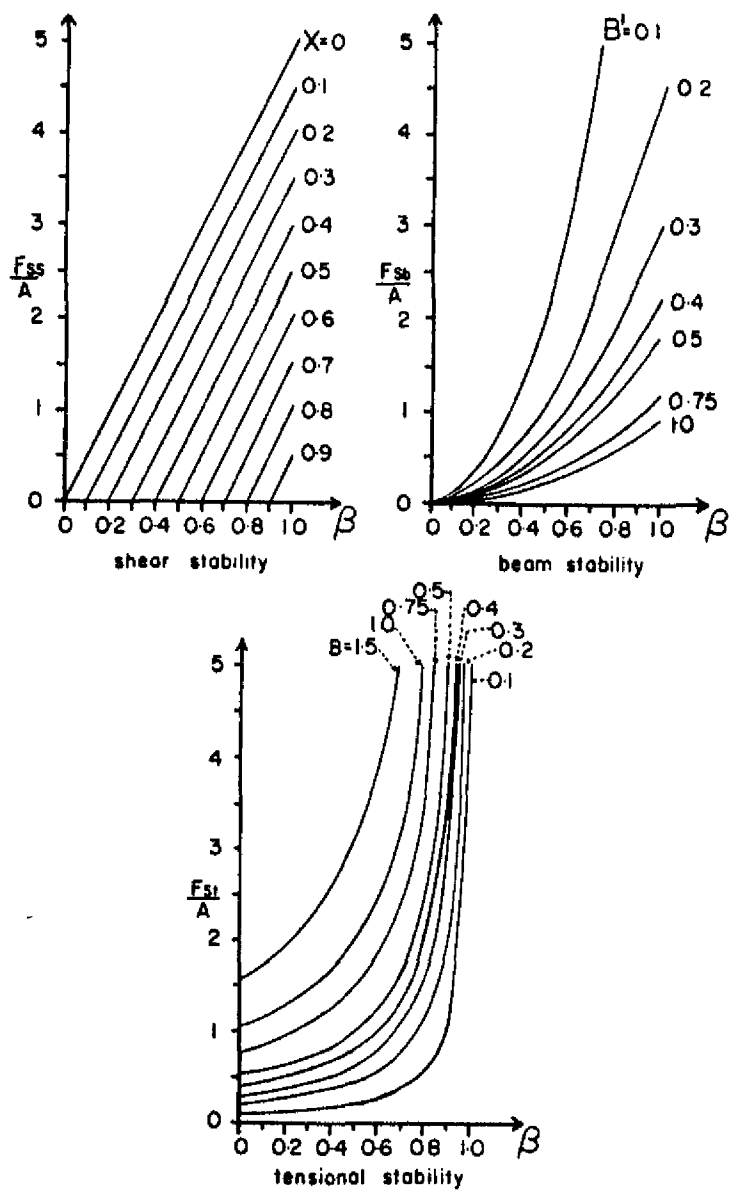
No 4



No 5



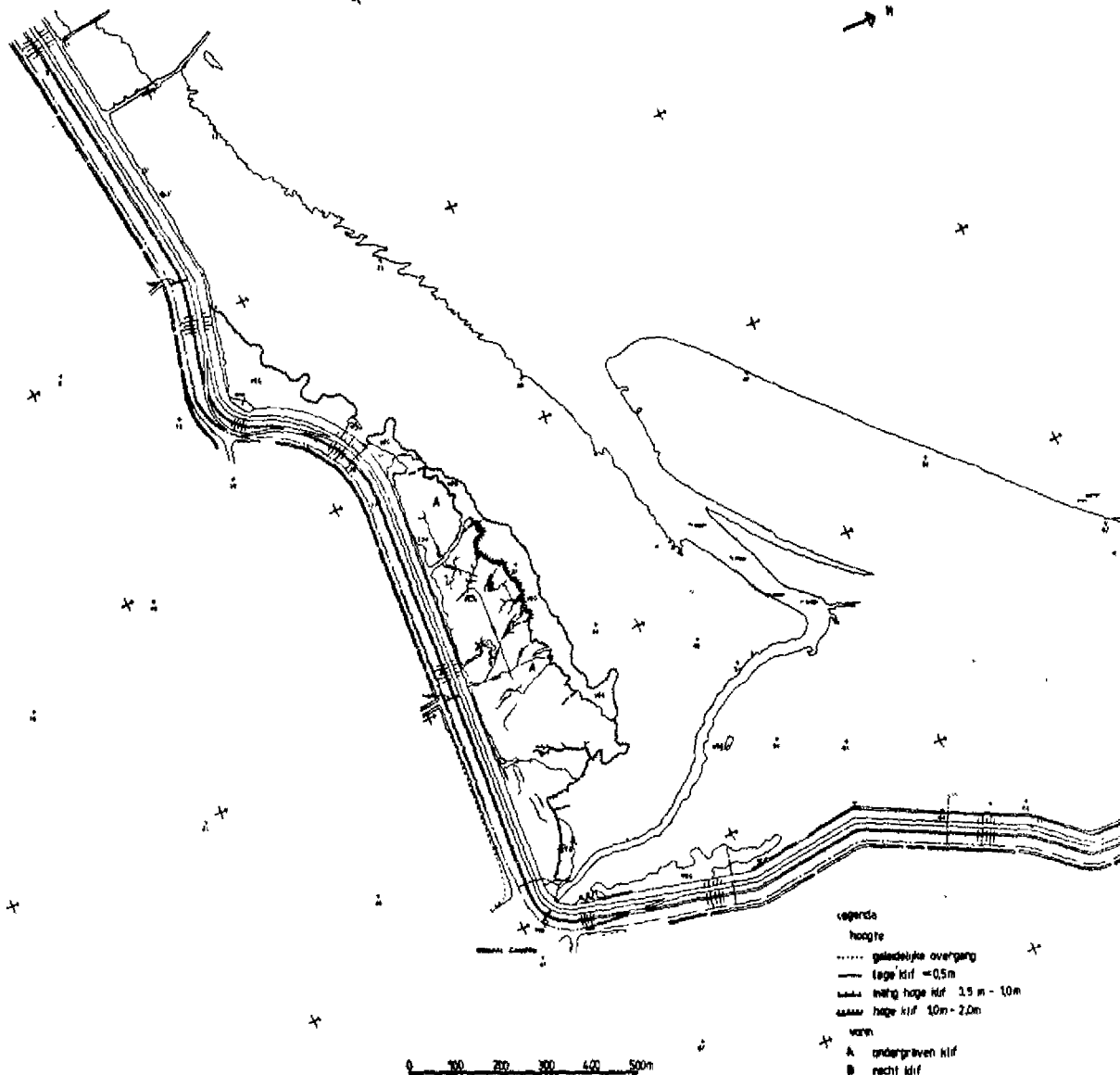
Bijlage 11. Stability charts voor ondergraven rivieroeveren
bij $r = 0.1$ (Thorne en Tovey, 1981)



202 300 600 300 200

486MC25

BILAGE 12
MORFOLOGISCHE KAART VAN DE SCHOR-SLIJKOEVEREN VAN DE
ZAKOR VOOR DE MELLEKATSPOLDER



4 86M034

KARTERING METEOROLOGIE DIENST RIJKSWATERSTAAT
SCHORREN, BIJ BAARLAND EN ELLEWOUTSDIJK 487

BIJLAGE 13
MORFOLOGISCHE KAART VAN DE SCHOR-SLIJDOVERGANGEN VAN
DE SCHORREN BIJ BAARLAND EN ELLEWOUTSDIJK

ELLEWOUTSDIJK

0 100 200 300 400 500m

WESTERSCHELDE

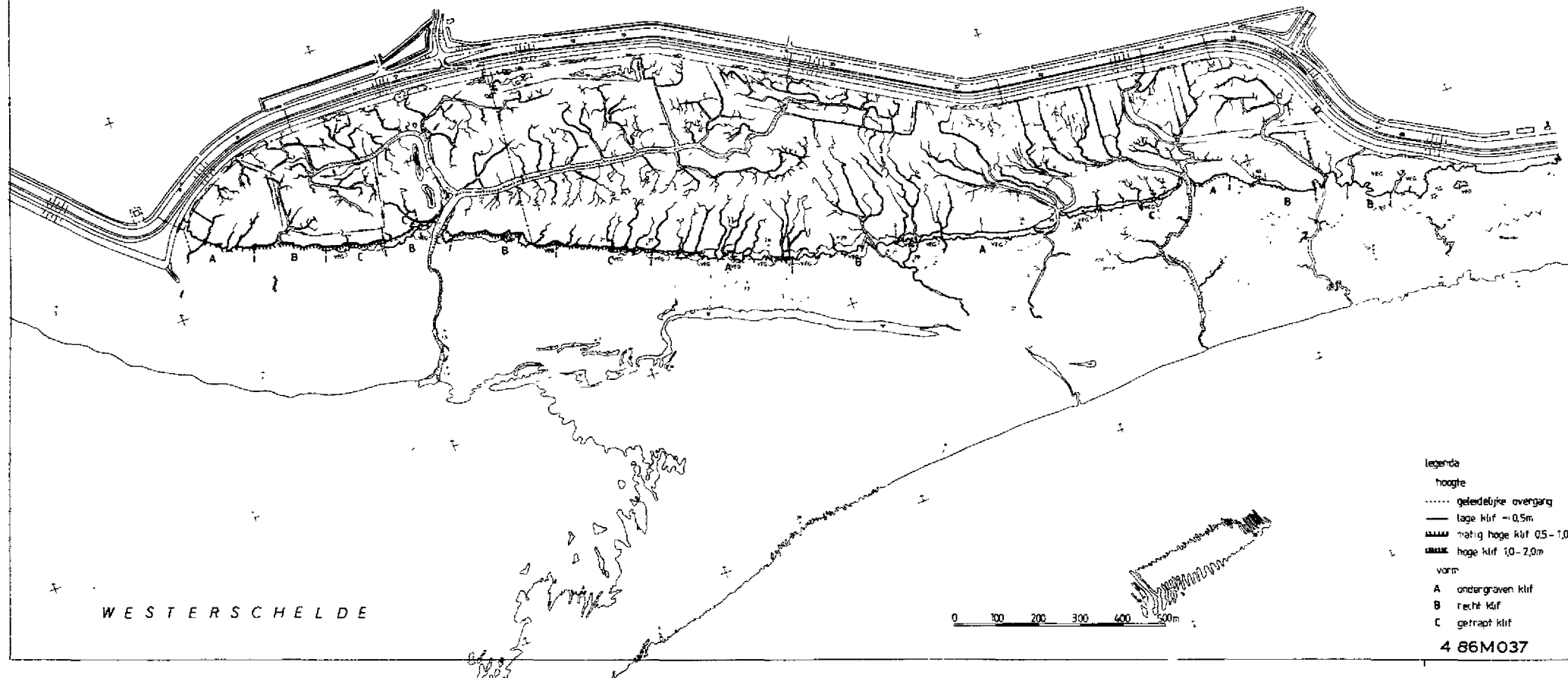
legenda
hoogte
- geleidelijke overgang
— lage klf - 0.5m
— matig hoge klf 0.5m-10m
— hoge klf 10m-20m
vorm
A ondergraven klf
B recht klf
C getrappt klf

4 86M035



BIJLAGE 15.

MORFOLOGISCHE KAART VAN DE SCHOR-SLIJVOERGANGEN VAN
DE SCHORREN VOOR EMANUELPOLDER



legenda

hoogte

..... geleidelijke overgang

— lage klif — 0,5m

— matig hoge klif 0,5 — 1,0m

— hoge klif 1,0 — 2,0m

vorm

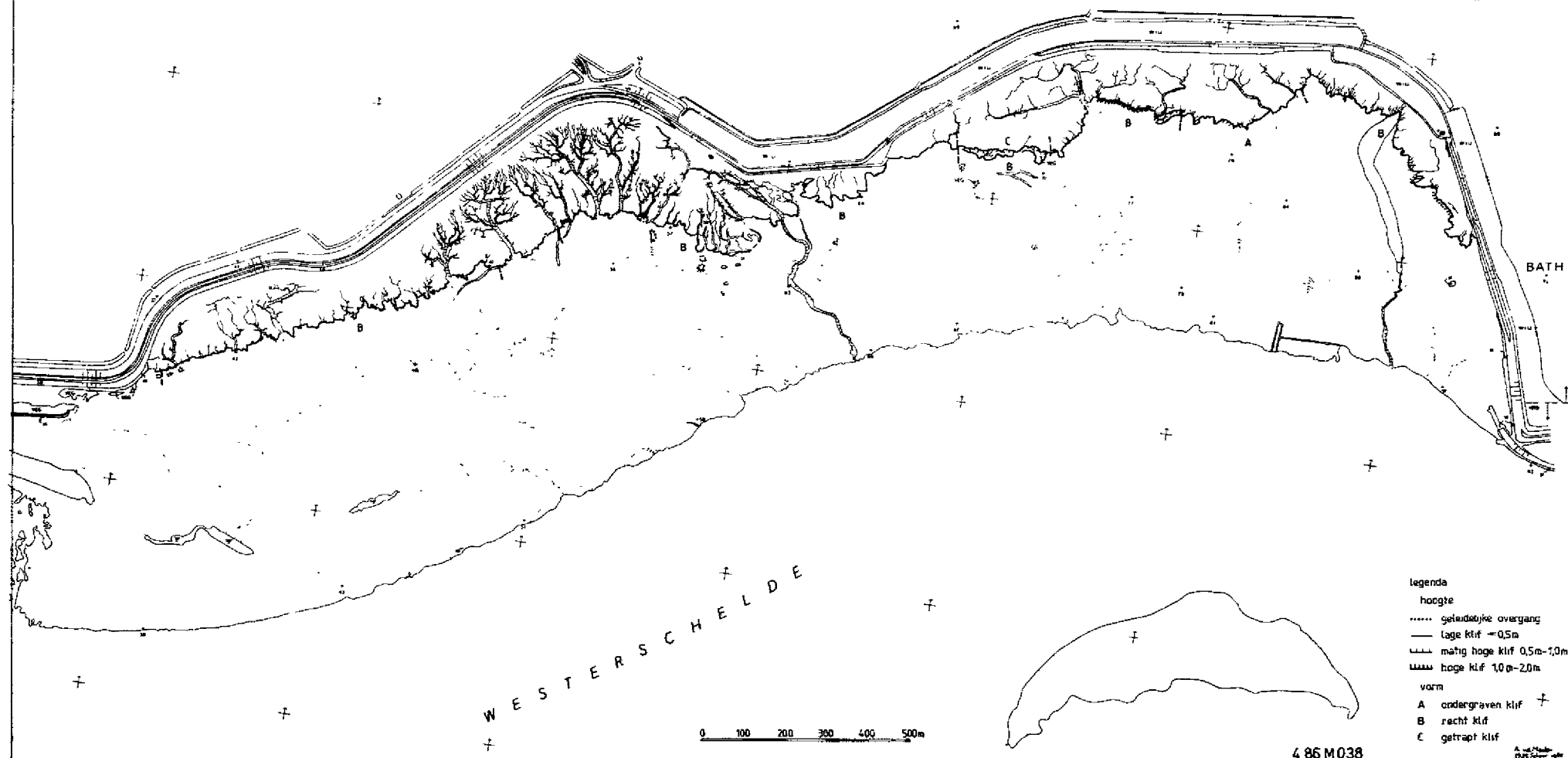
A ondergraven klif

B rechte klif

C getrapte klif

4 86M037

BILAGE 1A
MORFOLOGISCHE KAART VAN DE SCHOR-SLIKOVERGANGEN VAN
DE SCHORREN BIJ BATH



4 86 M038

A. van der Vliet
1925 Schiedamsche dijk

BIJLAGE 1.7

MORFOLOGISCHE KAART VAN DE SCHOR-SLIKOVERGANGEN VAN DE SCHORREN BIJ OSSENDRECHT (APPELZAK)

N



legenda

hoogte

- geleidelijke overgang
- lage klif < 0,5m
- ▤ matig hoge klif 0,5-1,0m
- ▥ hoge klif 1,0-2,0m

vorm

- A ondergraven klif
- B recht klif
- C getrapt klif

0 100 200 300 400 500m

4.86 M039

Ant. Meulen
1985