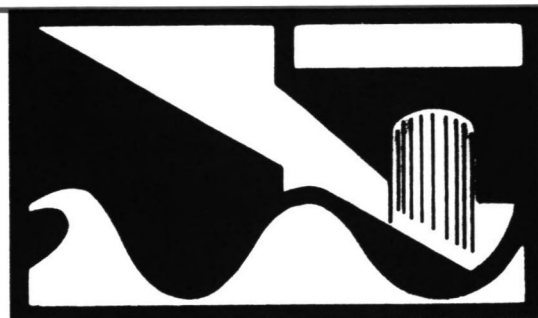


683A



EROSIE BINNENTALUD SLUFTERDEPOT

H.A.M. Bok

EROSIE BINNENTALUD SLUFTERDEPOT

- zandtransportberekeningen ter
bepaling van oevererosie in een meer
met stagnant waterpeil -
afstudeerrapport H.A.M. Bok

Code: 103.16 - R8640

Begeleider: ir. R. Reinalda

Hoogleraar: prof. dr. ir. E.W. Bijker

Vakgroep Kustwaterbouwkunde
afdeling Civiele Techniek
Technische Hogeschool Delft
maart 1986

INHOUDSOPGAVE

Blz.

1. INLEIDING	
1.1 Algemeen	1
1.2 Probleem	1
1.3 Doel	2
1.4 Aanpak ter bepaling van de zandverliezen	2
2. LANGSTRANSPORTEN, THEORIE	
2.1 Inleiding	4
2.2 Gradiënten in golfspanning langs de oever	4
2.3 Verschillen in golfopzet langs de oever	5
2.4 Gradiënten in de schuifspanningscomponent van de golfspanning	7
2.5 Bodemwrijving	8
2.6 Krachtenevenwicht	8
2.7 Effecten van turbulentie	10
2.8 Zandtransportberekening	11
3. LANGSTRANSPORTEN, COMPUTERPROGRAMMA	
3.1 Inleiding	13
3.2 Werkwijze	13
3.3 Beperkingen	17
3.4 Invoer	17
3.5 Uitvoer	19
4. RESULTATEN LANGSTRANSPORT	
4.1 Nauwkeurigheid	21
4.2 Invloed van turbulentie	21
4.3 Invloeden van golfspannings- en golfopzetverschillen	22
4.4 Eindresultaten	23
4.5 Ribbelhoogte	24
5. DWARSTRANSPORTEN	
5.1 Theorie	25
5.2 Aanpak	27
5.3 Programma	28
5.4 Resultaten	31
6. INTEGRATIE LANGS- EN DWARSTRANSPORTEN	35
7. CONCLUSIES	37

LITERATUUROPGAVE
SYMBOLENLIJST

BIJLAGEN

- A : tekeningen
- B : resultaten langstransportberekening
- C : resultaten dwarstransportberekening
- D : listing langstransportprogramma
- E : listing dwarstransportprogramma

EXTRA BIJLAGE

Berekening taludvorm na 1 jaar met extreme storm

INLEIDING

1.1 Algemeen

In het benedenrivierengebied dient door continu onderhoudsbaggerwerk van de Rotterdamse havens en vaarwegen de toegankelijkheid voor de scheepvaart gegarandeerd te worden. De hoeveelheid jaarlijks opgebaggerde specie bedraagt ca. 23 miljoen m³. Een deel hiervan, ca. 13 miljoen, grotendeels afkomstig van zee, is slechts licht verontreinigd en kan in zee worden teruggestort. Het overige deel, ca. 10 miljoen m³, hoofdzakelijk door de rivieren aangevoerd, is zodanig verontreinigd, dat het niet rechtstreeks op zee gestort kan worden, maar op een beheersbare wijze geborgen dient te worden. Het realiseren van de benodigde bergingsruimte op het land is vanaf het begin van de jaren '70 in toenemende mate problematisch geworden.

De gemeente Rotterdam, Rijkswaterstaat en het openbaar lichaam Rijnmond hebben een oplossing voor de baggerspecieproblematiek gevonden door het realiseren van een grootschalige bergingslocatie in het Zuidhollandse kustgebied (het zgn. Slufterdepot). Een uitgebreid onderzoek heeft geleid tot een projectnota/ Milieu-effectrapport (lit. 1); het centrale document, dat de basis is geweest voor een vergelijking van de verschillende alternatieven en de besluitvorming ten aanzien van de grootschalige locatie voor berging van baggerspecie. De keuze is uiteindelijk gevallen op een aangepaste vorm van alternatief III, een locatie aan de Maasvlakte, die geheel is gelegen boven de verlengde demarcatielijn (zie bijlage A1).

Het accent wat betreft situering is sterk gelegd op natuurwetenschappelijke en visueel-landschappelijke aspecten. De aanleg van de depotdammen geschiedt met het zand, dat vrijkomt uit de ontgraving van het depot (zie dwarsprofielen in bijlagen A2 en 3). Ter beperking van de aanlegkosten worden harde verdedigingsconstructies vermeden.

1.2 Probleem

Ter bepaling van de zandverliezen en daaruit voortvloeiende onderhoudskosten zijn verschillende kustmorfologische berekeningen uitgevoerd (lit. 2). Deze hebben alle betrekking op de zeezijde van de zanddam. Er zijn geen berekeningen verricht naar de erosie van de binnentaluds.

Na aanleg van de zanddam zal in het depot een min of meer vaste waterstand (N.A.P.) gehandhaafd blijven gedurende het eerste tijdsbestek van vulling (6 à 7 jaar). Gedurende deze tijd treedt een continue golfinwerking op een vast niveau op.

Metingen aan oevers in bestaande stagnante meren (Oostvoornse Meer, Grevelingen en Haringvliet) hebben aangetoond, dat de afkalving van oevers en platen aanzienlijk kan zijn (lit. 3).

Voor situaties, die vergelijkbaar zijn met het golfklimaat, dat in het slufterdepot kan optreden, is op sommige plaatsen een oeverafkalving van ongeveer 10 m per jaar waargenomen.

1.3 Doel

Dit rapport heeft tot doel vast te stellen welke delen van de binnenzijde van het slufterdepot het meest onderhevig zijn aan erosie en inzicht te verschaffen in de grootte van het zandverlies als gevolg van golfwerking.

1.4 Aanpak ter bepaling van de zandverliezen

Verliezen kunnen worden verwacht als gevolg van transport door stroming en golfwerking op het onderwatertalud en transport door wind op het bovenwatertalud. Hier wordt alleen het transport in het water behandeld.

De specifieke rol van golfwerking op de sedimentbeweging in een kustgebied is tot op heden niet geheel duidelijk en slechts te benaderen in berekeningen.

In principe kunnen alle mechanismen die een rol spelen pas worden verdisconteerd, wanneer juiste beschrijvingen beschikbaar zijn voor zowel het snelheidsveld als het sedimentconcentratieveld. Vooral de beschrijving van sedimentconcentraties in de tijd en in de ruimte is een groot probleem. In dit rapport worden dan ook benaderende berekeningswijzen gevolgd voor de bepaling van de transporten.

Een van die benaderingen is de splitsing van het transport in een richting evenwijdig aan de oever en in een richting loodrecht op de oever. De fysische kennis van de, zeker aanwezige, onderlinge invloed is namelijk te gebrekkig voor een integrale aanpak.

Zandtransport evenwijdig aan de oever treedt op als er stroming langs de oever aanwezig is. Deze stroming kan door 3 verschillende oorzaken ontstaan:

- golven komen onder een bepaalde hoek van inval aan op de dieptelijnen;
- het golfbeeld varieert langs een bepaalde oever;
- getijwerking of rivierafvoer.

De langstransporten worden bepaald voor de situatie dat de dam geheel is aangelegd, zodat getijwerking geen rol speelt en er alleen een golfgedreven stroming optreedt bij een vaste waterstand.

Van de fysische achtergronden van de transportmechanismen bij transport loodrecht op de oever is slechts weinig bekend. Voor de bepaling van het dwarstransport is uitgegaan van de benadering die Swart (lit. 4) heeft gevolgd. Swart heeft uit een groot aantal metingen een rekenwijze ontwikkeld, die hier getoetst wordt aan de profielveranderingen, die zijn opgetreden aan de oevers in de stagnante meren.

De theorie van de mechanismen die bij langstransport een rol spelen is behandeld in hoofdstuk 2 en verwerkt in een computerprogramma (hoofdstuk 3).

De resultaten van de langstransportberekeningen zijn vermeld in hoofdstuk 4.

Een summierende beschrijving van de methode van Swart te zamen met het berekeningsprogramma ter bepaling van de dwarstransporten volgt in hoofdstuk 5.

De resultaten van de berekeningen worden in paragraaf 5.4 vergeleken met profielveranderingen die in de natuur zijn waargenomen. Tenslotte worden de resultaten uit hoofdstuk 4 gecombineerd met die uit paragraaf 5.4 om tot een voorspelling te komen van de profielveranderingen van de binnentaluds in het slufsterdepot (hoofdstuk 6).

OPMERKING

Waar in het voorgaande en het vervolg gesproken is over 'depot' wordt bedoeld het toekomstige bekken.

2. LANGSTRANSPORTEN, THEORIE

2.1 Inleiding

Zoals reeds eerder vermeld zal het zandtransport langs de oevers veroorzaakt worden door golven en golfgedreven stromingen. De aandrijvende krachten, die deze stromingen beïnvloeden, kunnen worden bepaald uit:

1. gradiënten in golfspanning langs de oever;
2. verschillen in golfopzet langs de oever;
3. gradiënten in schuifspanningscomponent van de golfspanning;
4. bodemwrijving, met name de bodemschuifspanning;
5. turbulente krachten.

In principe moeten de snelheden en de snelheidsvariëaties van de langsstroming berekend worden uit het dynamisch evenwicht van deze 5 componenten te zamen. Zolang de golfconditie en de oevergeometrie niet veranderen langs de oever, spelen de eerste twee componenten geen rol.

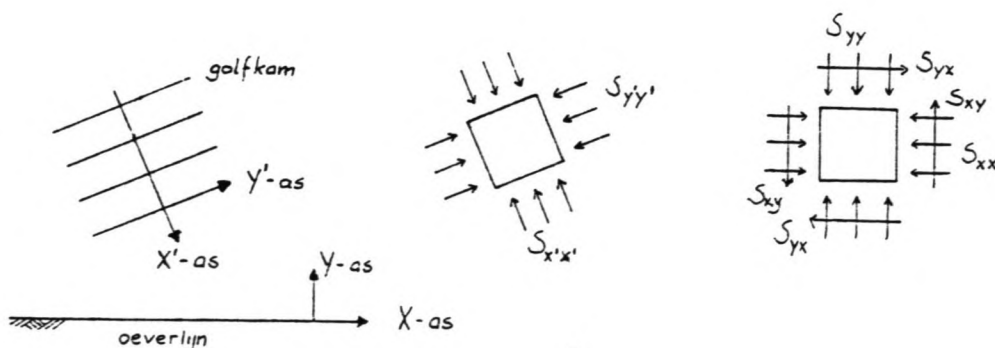
De geometrie verandert niet langs een begrenzing van het depot, maar als gevolg van verschillen in strijklengten zullen de golfcondities wel variëren.

Hier worden de snelheden van de stroming dan ook bepaald uit het krachtenevenwicht van de eerste vier componenten. Later wordt de invloed van turbulentie afgeschat.

2.2 Gradiënten in golfspanning langs de oever

De golfspanning is een extra kracht per lengte-eenheid (spanning geïntegreerd over de waterdiepte) boven de hydrostatische druk, als gevolg van de aanwezigheid van golven.

De golfspanning is niet isotroop, maar heeft componenten in verschillende richtingen. De hoofdrichtingen zijn in de richting van de golfvoortplanting (x' -as) en de richting loodrecht daarop (evenwijdig aan de golfkammen, y' -as); zie figuur 2.1.



Figuur 2.1

De hoofdspansingen zijn:

$$S_{x'x'} = \left(\frac{2kd}{\sinh(2kd)} + \frac{1}{2} \right) * \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad (2.1)$$

$$S_{y'y'} = \frac{kd}{\sinh(2kd)} * \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad (2.2)$$

waarin: $k = 2\pi/L$, golfgetal (m^{-1})
 L = golflengte (m)
 d = diepte (m)
 ρ = dichtheid water (kg/m^3)
 g = zwaartekrachtsversnelling (m/s^2)
 H = golfhoogte (m)

Wanneer de hoek van golfinval, dit is de hoek tussen dieptelijn en golfkammen, φ is, dan bedraagt de verdraaiing van het $x'-y'$ assenstelsel $(\pi/2 - \varphi)$ of $(\pi/2 + \varphi)$ t.o.v. $x-y$ assenstelsel, afhankelijk van de zijde waar de golven vandaan komen.

$$\text{Er geldt: } \cos 2(\pi/2 - \varphi) = \cos 2(\pi/2 + \varphi) \quad (2.3)$$

De grootte van S_{xx} is dan:

$$S_{xx} = \frac{1}{2} (S_{x'x'} + S_{y'y'}) + \frac{1}{2} (S_{x'x'} - S_{y'y'}) \cos 2\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) \quad (2.4)$$

Uit bovenstaande vergelijkingen blijkt, dat S_{xx} afhangt van de golfhoogte. Deze verandert langs de oever, zodat ook S_{xx} verandert, met als gevolg een aandrijvende kracht:

$$\tau_{rs} = - \frac{d(S_{xx})}{dx} \quad (2.5)$$

Wanneer S_{xx} toeneemt in x -richting betekent dat een stroming in de negatieve x -richting. De spanningen werken dan dus ook in de negatieve x -richting.

2.3 Verschillen in golfopzet langs de oever

Golven die een oever naderen ondergaan veranderingen a.g.v. refractie, diffractie en breking. Omdat de golfspanning direct afhangt van de golfparameters, zal deze ook veranderen in de richting loodrecht op de oever. Een van de gevolgen hiervan is een verandering van de gemiddelde waterspiegel in y -richting (zogenaamde golfopzet).

Wanneer ervan uitgegaan wordt, dat de golven met een zeer kleine invalshoek invallen op het talud, is de verandering van de waterspiegel (η) te beschrijven met:

$$\frac{dS_{yy}}{dy} + \rho g(d + \eta) \frac{d\eta}{dy} = 0 \quad (2.6)$$

$$S_{yy} = \frac{1}{2}(S_{x \cdot x \cdot} + S_{y \cdot y \cdot}) - \frac{1}{2}(S_{x \cdot x \cdot} - S_{y \cdot y \cdot}) \cos 2\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) \quad (2.7)$$

Battjes (1977) heeft een analytische oplossing gevonden voor vergelijking (2.6), welke alleen geldig is buiten de brekerzone:

$$\eta = -\frac{1}{8} \frac{kH^2}{\sinh(2kd)} \quad (2.7a)$$

Voor het gebied binnen de brekerzone is een analytische oplossing moeilijk te vinden. Hier wordt gekozen voor een differentiebenadering van vergelijking (2.6), zowel binnen als buiten de brekerzone.

De invloed van de golfopzet op de waterdiepte wordt verwaarloosd, zodat vergelijking (2.6) overgaat in:

$$\frac{dS_{yy}}{dy} + \rho g d \frac{d\eta}{dy} = 0 \quad (2.8)$$

Voor ieder punt y_i moet de golfopzet η_i worden berekend. Daartoe worden S_{i+1} en η_{i+1} in een Taylorreeks ontwikkeld:

$$S_{i+1} = S_i + (y_{i+1} - y_i) \left. \frac{dS}{dy} \right|_i + \frac{1}{2} (y_{i+1} - y_i)^2 \left. \frac{d^2S}{dy^2} \right|_i + \dots \quad (2.9)$$

of anders geschreven:

$$\left. \frac{dS}{dy} \right|_i = \frac{S_{i+1} - S_i}{y_{i+1} - y_i} - \frac{1}{2} (y_{i+1} - y_i) \left. \frac{d^2S}{dy^2} \right|_i + \dots \quad (2.10)$$

Analoog geldt er voor η , na vermenigvuldiging met $\rho g d_i$:

$$\rho g d_i \left. \frac{d\eta}{dy} \right|_i = \rho g d_i \frac{\eta_{i+1} - \eta_i}{y_{i+1} - y_i} - \frac{1}{2} \rho g d_i (y_{i+1} - y_i) \left. \frac{d^2\eta}{dy^2} \right|_i + \dots \quad (2.11)$$

Optellen van vergelijkingen (2.10) en (2.11) levert:

$$\left. \frac{dS}{dy} \right|_i + \rho g d_i \left. \frac{d\eta}{dy} \right|_i = \frac{S_{i+1} - S_i}{y_{i+1} - y_i} + \rho g d_i \frac{\eta_{i+1} - \eta_i}{y_{i+1} - y_i} + 0(y_{i+1} - y_i) = 0 \quad (2.12)$$

Vermenigvuldiging van vergelijking (2.12) met $(y_{i+1} - y_i)$ levert:

$$(S_{i+1} - S_i) + \rho g d_i (\eta_{i+1} - \eta_i) = 0 ((y_{i+1} - y_i)^2) \quad (2.13)$$

Hieruit kan η_{i+1} opgelost worden als η_i bekend is:

$$\eta_{i+1} = \eta_i + \frac{S_i - S_{i+1}}{\rho g d_i} \quad (2.14)$$

De fout in vergelijking (2.14) is in orde van grootte de stapgrootte in het kwadraat.

De beginvoorwaarde voor het oplossen van vergelijking (2.14) kan gevonden worden uit vergelijking (2.7a).

Nu is het verloop van de gemiddelde waterspiegel in één raai bekend. Om tot een aandrijvende kracht te komen moet dit verloop vergeleken worden met de waterstandsverlopen in direct aangrenzende raaien.

Voor de spanning die resulteert uit het verschil in waterniveau geldt:

$$\tau_\eta = \rho g d_i, \text{ waarbij } i = - \frac{d\eta}{dx} \quad (2.15)$$

Immers, als η toeneemt in positieve x-richting resulteert dit in een stroming in negatieve x-richting, zodat in dat geval de spanningen negatief moeten zijn.

2.4 Gradiënten in de schuifspanningscomponent van de golfspanning

De schuifspanning, die hier van belang is, werkt op een vlak evenwijdig aan de oeverlijn en in de richting van de x-as; S_{yx} (zie figuur 2.1).

$$S_{yx} = \frac{1}{2}(S_x \cdot x' - S_y \cdot y') \sin 2\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) \quad (2.16)$$

$$\text{Er geldt: } \sin 2\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) = - \sin 2\left(\frac{\pi}{2} + \varphi\right) \quad (2.17)$$

Hieruit blijkt, dat S_{yx} alleen van teken (en dus richting) verandert, wanneer de golven van de andere zijde onder een hoek φ invallen.

Uit de refractietheorie en met name uit de aanname dat er geen energieverlies optreedt, blijkt dat S_{yx} niet verandert buiten de brekerzone. Binnen de brekerzone verandert S_{yx} echter wel in y-richting (als gevolg van veranderende golfcondities varieert S_{yx} ook in x-richting). Wanneer ondiep-watercondities en een kleine hoek van inval in de brekerzone worden verondersteld, dan kan deze verandering worden beschreven met (zie lit. 5):

$$\frac{dS_{yx}}{dy} = \frac{5}{16} \rho \gamma^2 (gd)^{1,5} \frac{\sin \varphi_0}{c_0} m \quad (2.18)$$

waarin: γ = brekingsindex (-)
 c_0 = voortplantingssnelheid op diep water (m/s)
 m = taludhelling (-)

2.5 Bodemwrijving

De schuifspanning aan de bodem is direct gerelateerd aan de snelheid daarboven, bepaald door de langsstroming en de snel variërende snelheidscomponenten in brekende golven.

Een exacte beschrijving hiervan is vooralsnog onmogelijk. Hier wordt de beschrijving van Bijker (1967) (zie: lit. 5) aangehouden met de volgende vereenvoudigingen:

- . de hoek tussen de golfkammen en stroomrichting is zeer klein;
- . de orbitaalsnelheid aan de bodem is groot ten opzichte van de stroomsnelheid van de langsstroom.

Deze twee veronderstellingen leveren grotere stroomsnelheden dan welke verkregen zouden zijn met een meer exacte benadering van de bodemwrijving (vooral bij de brekerlijn).

De gemiddelde schuifspanning aan de bodem als gevolg van golfwerking en stroming is dan:

$$\tau_{cwx} = \frac{\rho g}{\sqrt{2} \pi C} \gamma \sqrt{df_w} v \quad (2.19)$$

waarin: f_w = wrijvingsfactor (-)
 v = stroomsnelheid (m/s)
 $C = 18 \log \frac{12d}{D_{50}}$, Chézy-waarde ($m^{0,5}/s$)

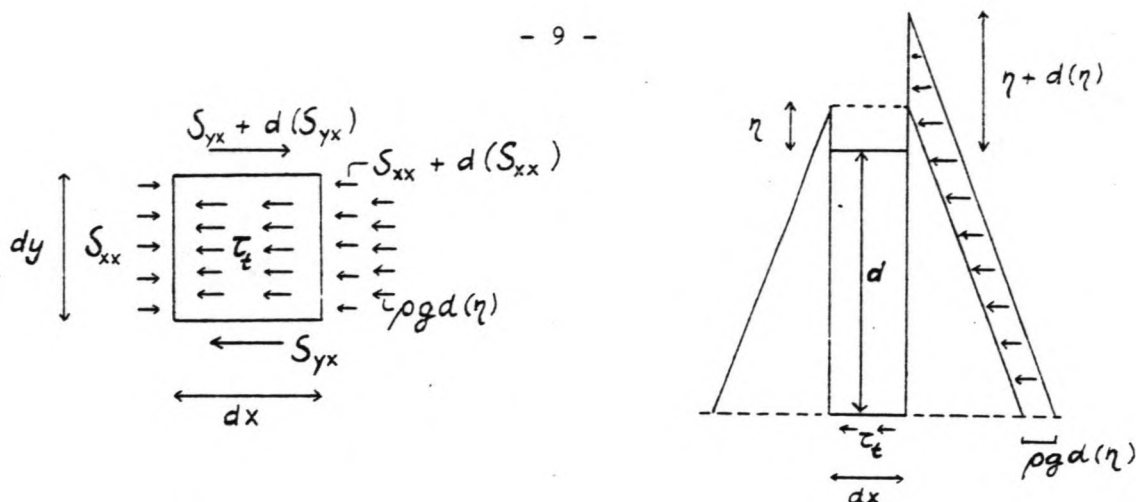
Vergelijking (2.19) gecombineerd met (2.18) levert een driehoekig snelheidsprofiel met maximum op de brekerlijn, als de helling constant is.

Als gevolg van het feit, dat S_{yx} constant blijft buiten de brekerzone is de snelheid daar nul (zie: figuur 2.3.a).

2.6 Krachtenevenwicht

Voor de stroming langs de oever zijn alleen van belang de spanningen die in x-richting werken.

Op een kolom water met afmetingen dx , dy en d werken die spanningen zoals in figuur 2.2 is getekend.



Figuur 2.2

De bodemschuifspanning τ_t werkt op het grondvlak en moet evenwicht maken met de andere spanningen.

De golfspanning is een over de hoogte geïntegreerde spanning, dus een kracht per eenheid van lengte. De spanning als gevolg van opzetverschillen volgt uit het rechtse deel van figuur 2.2 en wordt als gelijkmatig verdeeld beschouwd.

Het krachtenevenwicht wordt dan:

$$F_{\text{bodem}} = F_{\text{schuifsp.}} + F_{\text{golfsp.}} + F_{\text{opzet}} \quad (2.20)$$

$$\tau_t dx dy = d(S_{yx}) dx - d(S_{xx}) dy - \rho g d(\eta) ddy \quad (2.21)$$

Na deling door $dx dy$ volgt voor de spanningen:

$$\tau_t = \frac{d(S_{yx})}{dy} - \frac{d(S_{xx})}{dx} - \rho g d \frac{d(\eta)}{dx} \quad (2.22)$$

Dit is in overeenstemming met de vergelijkingen (2.5), (2.15), (2.18) en (2.19).

Wanneer vergelijkingen (2.18) en (2.19) ingevuld worden in vergelijking (2.22) volgt hieruit:

$$\frac{\rho g}{\pi C \sqrt{2}} \gamma \sqrt{df_w} v = \frac{5}{16} \rho \gamma (gd) \frac{1,5 \sin \varphi_0}{c_0} m - \frac{d(S_{xx})}{dx} - \rho g d \frac{d(\eta)}{dx} \quad (2.23)$$

Hiermee zijn de snelheden voor verschillende punten binnen de brekerzone te bepalen.

In theorie geldt buiten de brekerzone dat: $\frac{dS_{yx}}{dy} = 0$,

zodat voor de snelheid in een punt buiten de brekerzone geldt:

$$v = \frac{-\frac{d(S_{xx})}{dx} - \rho g d \frac{d(\eta)}{dx}}{\frac{\rho g}{\pi C \sqrt{2}} \gamma \sqrt{df_w}} \quad (2.24)$$

2.7 Effecten van turbulentie

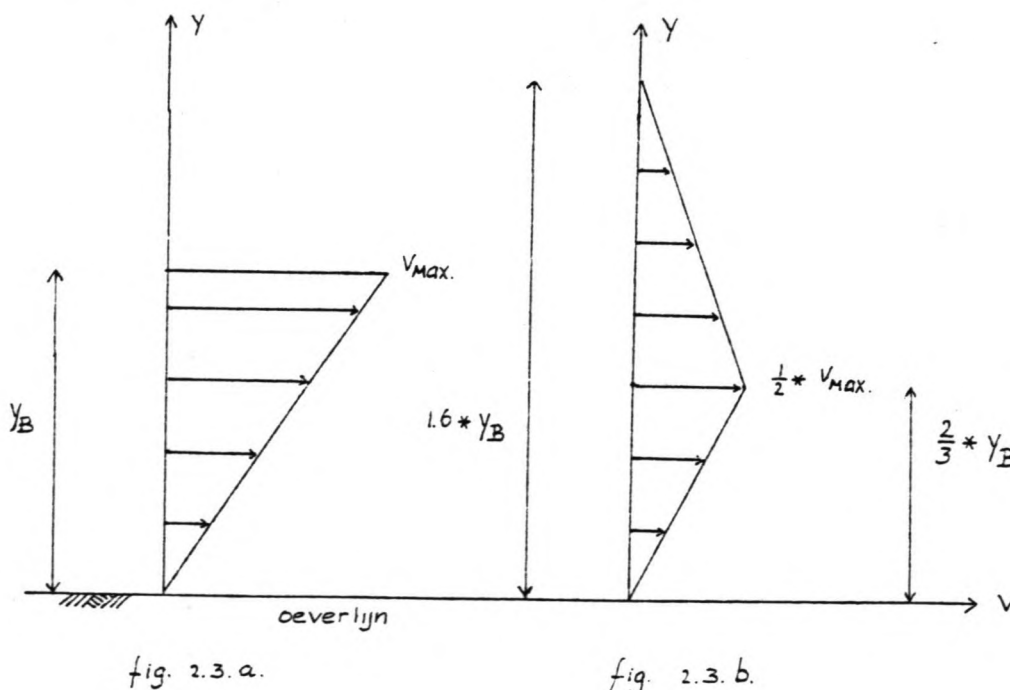
Turbulente krachten kunnen de vloeistofbeweging aandrijven en/of afremmen, omdat ze neigen tot afvlakking van sterk variërende snelheidsprofielen.

De turbulente schuifspanning is:

$$\tau_{yx} = \rho \epsilon_y \frac{\delta v}{\delta y} \quad (2.25)$$

waarin: ϵ_y = turbulente diffusie-coëfficiënt (m²/s)

Omdat de snelheidsgradiënt $\frac{\delta v}{\delta y}$ ter plaatse van de brekerlijn zeer groot (oneindig) is, zal het snelheidsprofiel daar het meest beïnvloed worden door turbulentie (zie nl.: paragraaf 2.5 Bodemwrijving). Battjes (1974) en Longuet-Higgins (1971) hebben de invloed van deze laterale wrijving onderzocht voor stroming veroorzaakt door alleen schuifspanningsgradiënten in de golfspanning en kwamen tot snelheidsverdelingen, die zich uitstrekken tot een afstand uit de oever van $\pm 1,6$ maal de brekerafstand. De maximale snelheid is tot de helft gereduceerd en treedt op op $\pm 2/3$ maal de brekerafstand. De schematisatie die hier is aangehouden is op deze resultaten gebaseerd. Het voordeel hiervan is dat de eerder gemaakte overschatting van de snelheden (zie: paragraaf 2.5) teniet worden gedaan.



Figuur 2.3

De effecten van deze turbulente krachten is in een tweede versie van het programma onderzocht. Hiervoor zijn spanningen berekend uit de schematisatie van het snelheidsverloop (figuur 2.3b) met behulp van de vergelijking:

$$\tau = \frac{\rho g}{\sqrt{2} \pi c} \gamma \sqrt{d f_w} v \quad (2.26)$$

2.8 Zandtransportberekening

Het zandtransport is berekend met de door Bijker aangepaste formule van Kalinske-Frijlink voor het bodemtransport (S_b) gekoppeld aan de formules van Einstein voor het gesuspenseerde transport (S_s).

$$S_b = \frac{B D_{50} v \sqrt{g}}{C} \exp \left(\frac{-0,27 \Delta D_{50} C^2}{\mu v^2 \left(1 + \frac{1}{2} \left(\xi \frac{\hat{u}_b}{v} \right)^2 \right)} \right) \quad (2.27)$$

Hierin is: $B = 5$;

$$\Delta = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w};$$

$$\mu = \left(\frac{C}{C_{90}} \right)^{1,5};$$

$$C_{90} = 18 \log \frac{12d}{D_{90}};$$

$$\xi = C \frac{\sqrt{f_w}}{\sqrt{2g}}.$$

Voor het suspensietransport geldt:

$$S_s = 1,83 Q S_b \quad (2.28)$$

waarin:

$$Q = I_1 \ln \frac{33d}{r} + I_2;$$

$$I_1 = \frac{0,216 A^{(z^* - 1)}}{(1 - A)^{z^*}} \int \left(\frac{1 - \zeta}{A \zeta} \right)^{z^*} d(\zeta);$$

$$I_2 = \frac{0,216 A^{(z^* - 1)}}{(1 - A)^{z^*}} \int \left(\frac{1 - \zeta}{A \zeta} \right)^{z^*} \ln(\zeta) d(\zeta);$$

$$A = r/d;$$

$$z^* = \frac{W \sqrt{\rho}}{\kappa \sqrt{\tau_c} \left(1 + \frac{1}{2} \left(\zeta \frac{\hat{u}_b^2}{v} \right)\right)};$$

$$\zeta = \frac{z}{d}.$$

Het totale transport is dan:

$$S = S_b + S_s = (1,83Q + 1)S_b \quad (2.29)$$

3. LANGSTRANSPORTEN, COMPUTERPROGRAMMA

3.1 Inleiding

Het computerprogramma bepaalt het langstransport in een willekeurige raai aan een recht deel van de begrenzing van het speciedepot. Het is geschreven in de taal Fortran IV (lit. 10). De basis van de berekeningen wordt gevormd door het krachterevenwicht en de transportformules van Bijker en Einstein, zoals geformuleerd in het voorgaande hoofdstuk.

De lokale golfparameters worden bepaald met de formules van Bretschneider (lit. 9) en de sinusoidale korte-golftheorie voor de bepaling van de golfveranderingen als gevolg van refractie en shoaling.

In dit hoofdstuk worden de werkwijze en de daarmee gepaard gaande beperkingen (paragrafen 3.2 en 3.3) en het gebruik (paragrafen 3.4 en 3.5) behandeld. De resultaten van de gemaakte berekeningen volgen in hoofdstuk 4.

De listing van het programma is toegevoegd in bijlage D.

3.2 Werkwijze

Het programma is gesplitst in drie delen.

Het hoofddeel, GOLVEN, dient voor de sturing van in- en uitvoer, de berekening van diep-watergolfparameters, het sturen van de berekening naar de twee subroutines en de bepaling van de aandrijvende kracht als gevolg van gradiënten in de schuifspanningscomponent van de golfspanning.

Subroutine HOOGTE wordt gebruikt voor de bepaling van het brekingspunt, de golfcondities aldaar en ook voor de golfcondities, golfspanning en golfopzet in elk gewenst punt in een raai.

In subroutine TRANS worden de golfspanning en golfopzet in de hulpraaien links en rechts van een hoofdraai met elkaar vergeleken. Hiermee wordt in elk punt van de hoofdraai het krachterevenwicht opgelost om vervolgens het bodem- en suspensietransport te bepalen.

GOLVEN

Voor een van invloed zijnde windrichtingssector wordt, per windsnelheidsinterval (zie paragraaf 3.3), het totaaltransport in de hoofdraaien aan een begrenzing bepaald.

De hoofdraaien zijn de raaien met een even raainummer en de hulpraaien, bedoeld voor vergelijking van golfopzet en golfspanning, hebben een oneven raainummer.

In alle raaien worden de diepwatergolfcondities berekend met de formules van Bretschneider (1973). Deze zijn geschikt voor de bepaling van golfontwikkeling op zowel diep als ondiep water en luiden:

diep water:

$$H_0 = 0,283 \frac{v^2}{g} \tanh \left(\frac{1}{80} \left(\frac{gF}{v^2} \right)^{0,42} \right) \quad (3.1)$$

$$T = 1,2 \frac{2\pi v}{g} \tanh \left(0,077 \left(\frac{gF}{v^2} \right)^{0,25} \right) \quad (3.2)$$

ondiep water:

$$H_0 = 0,283 \frac{v^2}{g} \tanh \left(0,53 \left(\frac{gd}{v^2} \right)^{0,75} \right) * \tanh \frac{\frac{1}{80} \left(\frac{gF}{v^2} \right)^{0,42}}{\tanh \left(0,53 \left(\frac{gd}{v^2} \right)^{0,75} \right)} \quad (3.3)$$

$$T = 1,2 \frac{2\pi v}{g} \tanh \left(0,833 \left(\frac{gd}{v^2} \right)^{0,375} \right) * \tanh \frac{0,077 \left(\frac{gF}{v^2} \right)^{0,25}}{\tanh \left(0,833 \left(\frac{gd}{v^2} \right)^{0,375} \right)} \quad (3.4)$$

Hierin is: H_0 : ongestoorde golfhoogte (m)
 T : golfperiode (s)
 F : strijklengte (m);
 v_w : windsnelheid (m/s);
 d : waterdiepte (m).

Alhoewel het in principe mogelijk is om de waarde van de diepte hierin te variëren, wordt deze vooralsnog op 10 m gehouden.

Via subroutine HOOGTE wordt het brekingspunt bepaald. De golven worden verondersteld gebroken te zijn wanneer geldt:

$$H > \gamma * d \quad \text{of} \quad H > 1/7 L.$$

γ is de brekingsindex, die gesteld is op 0,7. Vanwege de relatief kleine strijklengte (max. ± 2 km) kan een smal spectrum (golfhoogte en periode) verwacht worden, zodat bij benadering regelmatige golven verondersteld kunnen worden en alle golven breken wanneer bovenstaande condities gelden.

Wanneer het brekingspunt bekend is kan, met behulp van subroutine HOOGTE, in elk gewenst punt in een raai de golfhoogte, golflengte, de golfspanning en de golfopzet worden bepaald. De kracht als gevolg van schuifspanningsgradiënten wordt dan bepaald via vergelijking (2.18). Deze gegevens kunnen worden afgedrukt (IPR1 = 1, zie paragraaf 3.5).

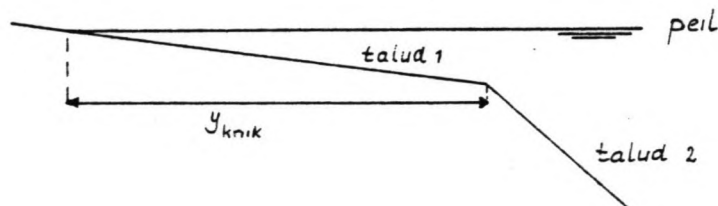
Bij een bepaalde windsnelheid worden deze gegevens voor alle raaien bepaald, zodat de vergelijking van golfopzet en golfspanning kan geschieden met subroutine TRANS. De waarden van de aandrijvende krachten (in de vorm van spanningen) kunnen dan worden afgedrukt voor elk punt van een hoofdraai (IPR2 = 1). Het bodem-, suspensie- en totaaltransport kan ook worden afgedrukt voor elk punt van een hoofdraai (IPR3 = 1).

De aldus gevonden transportlijn (in een raai) wordt geïntegreerd en vermenigvuldigd met het voorkomenspercentage van de windsnelheid en met de tijd waarvoor het transport bepaald moet worden. Zo kunnen voor één windrichtingssector de totaaltransporten per raai en per windsnelheid afgedrukt worden (IPR4 = 1). Voordat een nieuwe windrichtingssector kan worden doorgerekend dienen alle arrays op nul gezet te worden.

HOOGTE

In subroutine HOOGTE wordt ter plaatse van een afstand y uit de oever achtereenvolgens bepaald:

- de diepte, waarbij het talud wordt geschematiseerd als twee rechte hellingen, die elkaar snijden in het punt Y_{knik} ;



- de golflengte, door middel van iteratie van de formule:

$$L = L_0 \tanh \frac{2\pi d}{L} .$$

Deze iteratie geschiedt met behulp van het schema:

$$L_{2i+1} = L_0 \tanh \frac{2\pi d}{L_{2i}}$$

$$L_{2i+2} = 1/3 (2L_{2i+1} + L_{2i})$$

en stopt als geldt:

$$L_{2i+2} - L_{2i} < 0,01 \text{ m};$$

- de golfhoogte, uit de refractie en shoalingcoëfficiënt (K_r en K_{sh}).

Er geldt $H = K_r * K_{sh} * H_o$, waarbij:

$$K_r = \frac{\cos \varphi_o}{\cos \varphi};$$

$$K_{sh} = \frac{\sqrt{1}}{\left(\frac{2\pi d}{L} \tanh \left(1 + \frac{4\pi d/L}{\sinh(\pi d/L)} \right) \right)}$$

Binnen de brekerzone geldt voor H een lineair verloop van de brekerhoogte op de brekerlijn tot 0 op de oeverlijn;

- de golfspanning evenwijdig aan de kust via vergelijking (2.4);
- de golfspanning loodrecht op de kust (vergelijking (2.7)) en daaruit de golfopzet via vergelijking (2.14).

TRANS

In subroutine TRANS worden de golfopzet en golfspanning in de hulpraaien vergeleken. Dit gebeurt voor elk punt waarvoor in de hulpraai met het laagste raainummer de golfparameters met behulp van HOOGTE zijn bepaald. Stroming als gevolg van opzetverschillen wordt evenwijdig aan de kust verondersteld, zodat de vergelijking plaatsvindt tussen punten met een zelfde diepte.

De vergelijkingen (2.5) en (2.15) worden dan respectievelijk:

$$\sigma_{rs} = - \frac{d(S_{xx})}{dx} = \frac{S_{xx,j} - S_{xx,j+2}}{\Delta x} \quad \text{op een bepaalde dieptelijn.}$$

$$\tau_\eta = - \rho g d \frac{d(\eta)}{dx} = \rho g d \frac{\eta_j - \eta_{j+2}}{\Delta x} \quad \text{op een bepaalde dieptelijn.}$$

Hierin is: j : raainummer; $j = 1, 3, 5, 7 \dots$;
 Δx : afstand tussen hulpraaien = 200 m.

Omdat de transporten alleen in de hoofd-raaien bepaald worden, moeten de verkregen spanningen, met een dieptefactor, omgerekend worden naar de dieptelijnen, waarvoor in de raaien $j + 1$ (hoofd-raaien) de berekeningen zijn uitgevoerd.

In een punt van raai $j + 1$ wordt dan de optredende stroomsnelheid bepaald uit het krachteenevenwicht en ingevuld in de Bijkerformule. De berekening van de integralen van Einstein voor het gesuspenseerde transport geschiedt met een door anderen gevonden methode, die berust op het binomium van Newton.

Met de gevonden waarde van Q kan dan het totale transport in elk punt van een hoofdraai worden bepaald.

3.3 Beperkingen

Het model berekent slechts de initiële transportlijn langs een begrenzing bij een bepaalde windrichtingssector. Alhoewel de mogelijkheid bestaat om het talud te veranderen, kan niet op iteratieve wijze het uiteindelijke profiel en de daarbij behorende erosie bepaald worden.

Aan de transporten die gevonden worden in de buitenste raaien kan niet veel waarde gehecht worden. Deze raaien bevinden zich namelijk in de hoeken van het depot, waar de refractie van de golven sterk beïnvloed wordt door de andere begrenzing.

Verondersteld is dat de stroming evenwijdig aan de oeverlijn verloopt. Dit houdt in dat het stroombeeld ééndimensionaal is voorgesteld. Stroming kan echter niet los worden gezien van het verschijnsel continuïteit. Inbrengen van dat verschijnsel levert een aanpassing van het verhang als gevolg van opzetverschillen en golfspanningsverschillen en betekent direct een tweedimensionale aanpak.

De voorgestelde aanpak is dus slechts een benadering van het werkelijke hydraulische gebeuren.

In de hoofdraai $j + 1$ wordt de invloed van golfopzet- en golfspanningsverhang verdisconteerd vanaf het punt met grootste diepte in hulpraai j . Wanneer de variatie in strijklengte (dus golfhoogte) groot is tussen deze raaien, betekent dit een verwaarlozing van die beide invloeden voor de verst verwijderde punten (met grootste diepte) van hoofdraai $j + 1$.

Het transport in een raai wordt berekend tussen 0 en 1,6 maal de brekerafstand in die raai. Dit hangt direct samen met het snelheidsverloop, dat geconstateerd is als gevolg van laterale wrijving (zie paragraaf 2.7).

Golfopzet en golfspanning worden ook slechts in de berekening betrokken in dit gebied.

3.4 Invoer

Het programma biedt slechts de mogelijkheid om de zandtransporten langs één begrenzing te berekenen. Voor de berekening van een andere begrenzing moet een andere invoer-file worden gecreëerd. De invoer dient te bestaan uit (zie bijlage B1):

1	tekst 1
2	tekst 2

2 tekstregels van maximaal 70 posities (verplicht).

3	IPR1, IPR2, IPR3, IPR4
---	------------------------

Printopdrachten; voor verklaring zie paragraaf 3.5.

IPRi = 1: gegevens worden afgedrukt:

IPRi = 0: gegevens worden niet afgedrukt.

4	NGOLF, NRAAI, DAGEN, NSTAP, TALUD1, TALUD2, YKNIK
---	---

NGOLF	: aantal windrichtingssectoren	maximaal 6;
NRAAI	: aantal raaian	maximaal 15;
DAGEN	: tijdsperiode voor berekening	(dagen);
NSTAP	: aantal tussenstappen bij een ver- fijndere berekening	positief geheel getal;
TALUD1	: reciproke van eerste deel van de taludhelling;	
TALUD2	: reciproke van tweede deel van de taludhelling;	
YKNIK	: afstand uit oever waar de talud- hellingen in elkaar overgaan	(m).

5	RADSTR, GOLFOP, TURB
---	----------------------

Opties voor het betrekken van de golfspanning (evenwijdig aan de kust) en de golfopzet en de invloed van turbulentie in de berekening.

```

RADSTR = 0: niet;
        = 1: wel;
GOLFOP = 0: niet;
        = 1: wel;
TURB   = 0: niet;
        = 1: wel;

```

6	D50, D90, R, W, ROW
---	---------------------

D₅₀ = 50% korreldiameter (m);
D₉₀ = 90% korreldiameter (m);
R = ribbelhoogte (m);
W = valsnelheid korrel D50 (m/s);
ROW = dichtheid water (kg/m³).

7	NAAM, SECT, NPERC
---	-------------------

NAAM = naam windrichtingssector (max. 20 posities);
 SECT = windrichtingshoek t.o.v. normaal
 op de oeverlijn in graden;
 NPERC = aantal windpercentages waarvoor
 transport berekend wordt (max. 6).

8	$F(I), I = 1, NRAAI$
---	----------------------

F = strijklengte voor iedere raai bij deze windrichting (m).

9	$VW(I), I = 1, NPERC$
---	-----------------------

$VW(I)$ = windsnelheden waarvoor transport wordt berekend.

10	$PW(I), I = 1, NPERC$
----	-----------------------

$PW(I)$ = percentage dat $VW(I)$ bij windrichtingssector NAAM voorkomt.

3.5 Uitvoer

Zoals in paragraaf 3.4 al is vermeld wordt printopdracht i uitgevoerd als $IPRi = 1$.

Bij elke printopdracht worden de algemene gegevens afgedrukt.

Deze zijn: de 2 tekstregels;

de naam van de windrichtingssector;

de hoek van inval t.o.v. normaal op de oeverlijn.

De verdere gegevens die afgedrukt worden zijn bij:

IPR1: - windsnelheid en raainummer;
 - golfhoogte, golflengte en voortplantingssnelheid op diep water (resp. HNUL, LNUL en CNUL);
 - golfperiode (T);
 - golfhoogte, diepte en afstand uit de oever bij breking resp. HBRK, DBRK en YBRK;
 - een staatje waarin voor elk punt dat is berekend staat vermeld: afstand uit de oever (YT), de diepte (DT), de golfhoogte (HT), de spanning a.g.v. schuifspanningsgradiënten (τ), de normaal-golfspanning (RSXX) en de golfopzet (ETA).

IPR2: - windsnelheid en raainummer;
 - een staatje waarin voor elk punt dat is berekend staat vermeld: afstand uit oever (YT), de benodigde parameters voor bepaling van het suspensietransport (Z^* en Q), de spanningen als gevolg van resp. schuifspanningsgradiënten (τ), golfopzetverschillen (τ_{eta}), golfspanningsverschillen (τ_{rs}) en de totale resulterende spanning (τ_t).

IPR3: - windsnelheid en raainummer;
 - een staatje waarin voor elk punt dat is berekend staat vermeld: afstand uit de oever (YT), totale resulterende spanning (τ_t), het bodem- (SB), suspensie- (SS) en totale transport (ST) (in m^2/s).

- IPR4: - een aanduiding of golfopzetverschillen (RADSTR.) en golfspanningsverschillen (GOLFOP.) in de berekening zijn meegenomen. Als de waarde 0 wordt toegekend, is de invloed niet verdisconteerd;
- een staatje waarin de eindresultaten voor de windrichtingssector zijn vermeld. De eindresultaten worden weergegeven als de hoeveelheden materiaal die tijdens de beschouwde tijdsduur een raai zijn gepasseerd. Dit geschiedt voor verschillende windsnelheden om zo tot een totale hoeveelheid getransporteerd materiaal door een bepaalde raai te komen.

4. RESULTATEN LANGSTRANSPOORT

4.1 Nauwkeurigheid

De nauwkeurigheid van het programma kan door verschillende factoren worden beïnvloed, te weten:

- het aantal punten, waarvoor een raai wordt doorberekend om de transportlijn en het totaaltransport in die raai te bepalen. Hier geschiedt dat in 32 punten, ongeacht de golfcondities. De afstand tussen 2 punten is maximaal (bij grotere windsnelheden, dus hogere golven) ongeveer 2 meter, hetgeen een diepteverschil betekent van 7 centimeter op het flauwe talud en 0,7 meter op het steile talud.
Vanwege deze geringe diepteverschillen is het niet nodig de resultaten te vergelijken met een berekening met nog kleinere stapgrootte;
- de stapgrootte waarmee het punt van breken wordt gevonden. Deze is gelijkgesteld aan H_0 en in het uiterste geval 0,9 meter, namelijk de maximale golfhoogte op diep water. Dit betekent dat in principe de brekerafstand uit de oever met maximaal 0,9 meter (= 2,5 centimeter diepteverschil!) fout bepaald kan zijn. Uit een vergelijkende berekening met stapgrootte $0,5 H_0$ bleek inderdaad de brekerafstand nog wel eens te variëren. In het totale transport echter trad nauwelijks verschil op ($< 0,5\%$);
- afbreekcriterium bij golflengtebepaling (zie paragraaf 3.2). De golflengte wordt bepaald met behulp van een iteratie, die stopt als het verschil tussen nieuw berekende en vorige waarde kleiner is dan 1 centimeter.
De golflengten variëren hier van ± 2 m tot 20 m, zodat de fout hierin maximaal $0,5\%$ kan zijn;
- het aantal tussenstappen (NSTAP), ter bepaling van de golfparameters. In bijlage B2 zijn de verschillen afgedrukt voor NSTAP = 2 en NSTAP = 4. In het totaaltransport komt nauwelijks verschil voor ($0,06\%$). De verschillen in golfspanning zijn ongeveer $0,5\%$ en in golfopzet (maximaal aan de oever) 3% .

4.2 Invloed van turbulentie

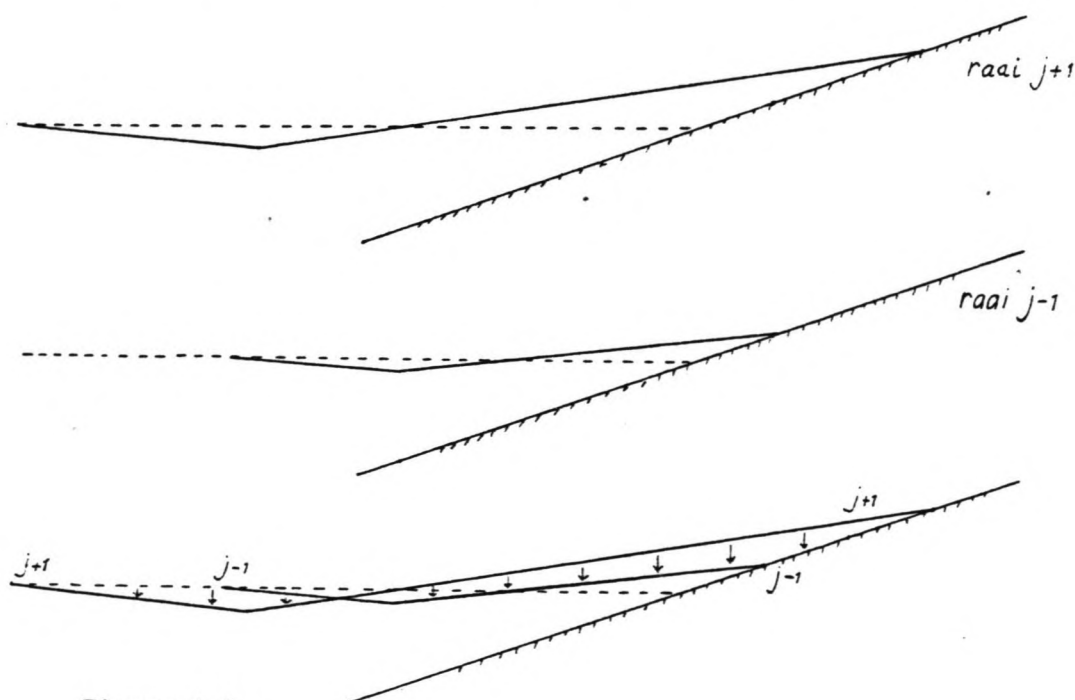
Voor de bepaling van de invloed van turbulentie wordt uitgegaan van het snelheidsverdeling uit figuur 2.3.b (zie paragraaf 2.7). De totale transporten zijn lager als turbulentie in de berekening wordt meegenomen ($\pm 10\%$), omdat de krachten met meer dan de helft worden gereduceerd in het gebied waar de grootste transporten optreden, namelijk rond de brekerzone.

Als gevolg van turbulentie werken de krachten (en dus de stroming) in de gehele raai in dezelfde richting. Dit geldt wanneer de golfspanningsverschillen niet te groot worden. In dat laatste geval namelijk is het mogelijk, dat in het diepere deel stroming in tegengestelde richting optreedt.

De overgang tussen die twee stromingen zal geleidelijker verlopen, wanneer turbulentie wordt verdisconteerd. Een en ander wordt weergegeven in bijlage B3.

4.3 Invloeden van golfspannings- en golfopzetverschillen

In het algemeen werken krachten a.g.v. golfspanningsverschillen (τ_{rs}) tegengesteld aan krachten a.g.v. gradiënten in de schuif- spanningscomponent van de golfspanning (τ). De grootte van τ_{rs} is gemiddeld 5 à 10% van τ en loopt op van nul aan de oever tot een min of meer constante waarde buiten de brekerzone, omdat het verschil in golfhoogte tussen de raaien buiten de brekerzone slechts weinig varieert. De krachten a.g.v. golfopzetverschillen (τ_{eta}) werken in het algemeen binnen de brekerzone in tegengestelde richting en buiten de brekerzone in dezelfde richting als τ . Dit wordt geïllustreerd aan de hand van figuur 4.1.



Figuur 4.1

Wanneer in raai $j - 1$ de stroom naar raai $j + 1$ is gericht, zullen in het algemeen (als gevolg van de vorm van het bekken) in raai $j + 1$ hogere golven optreden. Dit betekent t.o.v. raai $j - 1$ een grotere brekerhoogte, een grotere brekerafstand, een lagere set-down en een hoger set-up. Zoals in figuur 4.1 te zien is, is de waterstand binnen de brekerzone in raai $j + 1$ hoger dan in raai $j - 1$, met als gevolg een stroming van raai $j + 1$ naar raai $j - 1$.

De grootte van τ_{eta} is ook 10 à 20 keer kleiner dan τ . Bijlage B3 geeft een voorbeeld van het bovenstaande.

De invloed van beide fenomenen op de totaaltransporten is weergegeven in bijlage B4. In het algemeen geldt, dat zowel golfspannings- als golfopzetverschillen het totaaltransport verminderen, als ze in de berekening worden betrokken.

De invloed is voor beiden vrijwel even groot; het totaaltransport wordt 15 à 20% minder.

Als beide invloeden te zamen worden verdisconteerd, dan is hun gezamenlijke invloed geen 40%, maar slechts iets meer dan 20%. In bijlage B4 wordt ook duidelijk, dat het voorgaande niet altijd geldig is voor de buitenste raaien; de variaties in golfopzet en golfspanning worden te onnauwkeurig weergegeven in de hoeken van het depot. In paragraaf 3.3 is ook reeds vermeld, dat de refractie- en shoalingsberekening daar te kort schiet en dat niet veel waarde gehecht mag worden aan het gevonden transport in de buitenste raaien.

Waar in het voorgaande over "in het algemeen" is gesproken moet dus vermeld worden, dat deze "algemeenheden" geldig zijn in het middendeel van een begrenzing.

4.4 Eindresultaten

Zoals uit de voorgaande paragrafen van dit hoofdstuk blijkt, wordt het totaaltransport verminderd door elk van de drie (turbulentie, golfspanning, golfopzet) fenomenen.

Wanneer zij dus alle drie in de berekening van de transporten worden verdisconteerd, worden de vermoedelijk meest juiste waarden gevonden.

De resultaten hiervan zijn te vinden in bijlage B6.

Het werkelijk optredend transport en daarmee gepaard gaande erosie of aanzanding zijn gegeven aan het eind van bijlage B6. De eindresultaten zijn afgedrukt als hoeveelheden erosie of aanzanding per jaar. Er blijkt, dat alle begrenzingen eroderen wanneer een heel jaar wordt beschouwd. De knik in de belijning aan de oostzijde wordt het zwaarst aangevallen (N.B. raai 4 en raai 8 aan de oostzijde liggen wel 400 m van elkaar verwijderd, terwijl de onderlinge afstand tussen alle andere raaien 200 m bedraagt).

Wanneer voor het middendeel van een begrenzing de gemiddelde waarde tussen de raaien 4 en 10 voor de zuid- en westzijde en 4 en 8 voor de oost- en noordzijde wordt aangehouden, komen we op de volgende erosiehoeveelheden:

oostzijde	14.500 m ³	per jaar	over 400 m;
noordzijde	4.000 m ³	per jaar	over 200 m;
zuidzijde	1.100 m ³	per jaar	over 200 m;
westzijde	600 m ³	per jaar	over 200 m.

Deze erosie treedt voornamelijk op op het ondiepe deel van het talud. Dit actieve deel van het talud is groter bij hogere golven (namelijk grotere brekerdiepte en dus bredere brandingszone en een grotere run-up en golfopzet).

Aan de oostelijke en noordelijke begrenzing worden de transportverschillen (en dus de erosie) voornamelijk bepaald bij windsnelheden die hoger zijn (10-20 meter per seconde) dan de windsnelheid waar de belangrijkste transportverschillen aan de west- en zuidzijde door worden bepaald (5-15 meter per seconde).

Dit betekent, dat het actieve deel van het talud aan noord- en oostzijde groter zal zijn dan aan west- en zuidzijde.

Aangenomen wordt, dat het actieve deel aan noordzijde 45 m, aan oostzijde 50 m en aan west- en zuidzijde 35 m bedraagt. Dit betekent een verdieping van de oever na het eerste jaar (gemiddeld):

oostzijde : $14.500 / (400 * 50) = 0,72$ m;

noordzijde: $4.000 / (200 * 45) = 0,47$ m;

zuidzijde : $1.100 / (200 * 35) = 0,16$ m;

westzijde : $600 / (200 * 35) = 0,08$ m.

4.5 Ribbelhoogte

In alle berekeningen is voor $r = 0,03$ m aangehouden. Vergelijking met de uitkomsten voor $r = 0,06$ m leert, dat de transporten kleiner worden (zie bijlage B5) als r toeneemt.

Dit wordt bevestigd door de bevindingen van v.d. Graaff en v. Overeem (lit. 11).

De werkelijke waarde zal uit metingen moeten worden bepaald. Hier zitten we voorlopig aan de veilige kant met de ribbelhoogte van 3 centimeter.

5. DWARSTRANSPORTEN

5.1 Theorie

Zoals reeds vermeld in de inleiding (paragraaf 1.4) zijn de mechanismen die een rol spelen in de beweging van het sediment (voor zover ze al bekend zijn) slechts benaderend te beschrijven. Stive en Battjes (lit. 6) hebben aangetoond, dat één van die mechanismen, de retourstroom, een belangrijke rol speelt bij transport loodrecht op de oever.

Deze retourstroom is de in de tijd gemiddelde, zeewaarts gerichte, stroming nabij de bodem, veroorzaakt door breking van golven. Stive (lit. 7) heeft een eerste suggestie gedaan omtrent uitbreiding met andere mechanismen, zoals b.v. golfasymmetrie, hetgeen heeft geleid tot het model CROSTRAN.

In principe kan dit model hier toegepast worden. Echter, ondanks de nauwkeurige beschrijving van het snelheidsveld blijft de koppeling daarvan aan concentratieverdelingen in tijd en plaats dubieus. Dit gegeven nodigt uit om een handzamere methode te kiezen.

Swart (lit. 4) heeft uit talrijke metingen het concept van Bakker (lit. 8) gegeneraliseerd voor een willekeurig punt in het dwarsprofiel. Het concept van Bakker relateert het dwarstransport langs een profiel aan de afwijking die het profiel heeft ten opzichte van het evenwichtsprofiel in een vergelijkbare situatie. Het evenwichtsprofiel is dat profiel, waar geen dwarstransport optreedt bij constant gehouden waterstand, golfhoogte, golfperiode en korreldiameter.

De metingen zijn alle verricht bij proeven met constante golfhoogte en golfperiode, een vaste waterstand en zeewaarts transport.

In het slufteerdepot zullen deze voorwaarden tot op zekere hoogte ook gelden, immers:

- de strijklengte is relatief klein, zodat de looptijd van de golven kort is (10-30 minuten). Alleen zeer kortstondige, sterke windvariaties leiden tot duidelijke verschillen in golfhoogte en golfperiode. Dit betekent wel, dat er voor verschillende wind- (en dus golfhoogte-)klassen gerekend moet worden;
- de waterstand blijft na aanleg van de dam constant;
- de binnentaluds worden zo steil mogelijk ontgraven voor een maximale inhoud, met het gevolg dat verlies van zand naar dieper water verwacht mag worden.

De evenredigheid tussen het dwarstransport en de afwijkende ligging ten opzichte van het evenwichtsprofiel is uit te drukken in vergelijking (5.1)

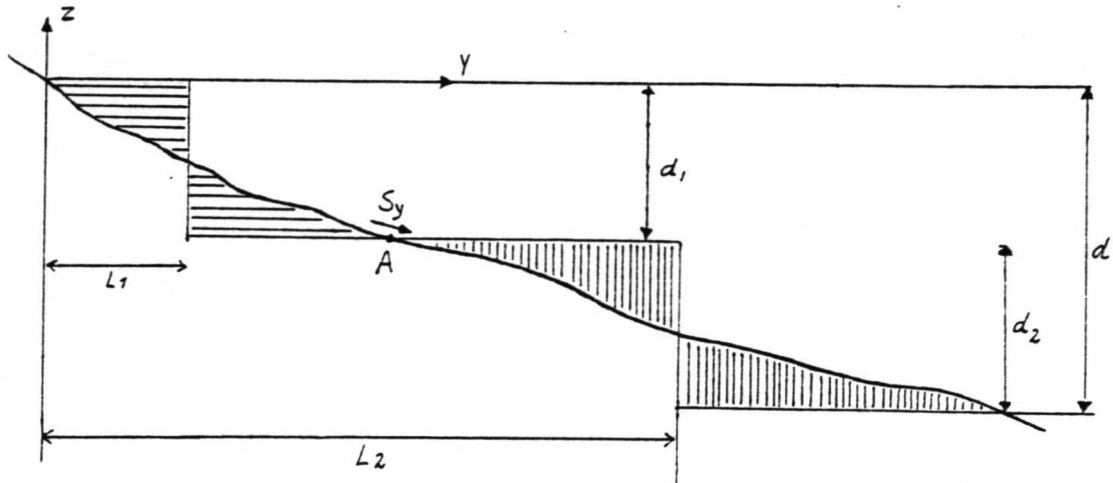
$$S_y : : - (m - m_e) \quad (5.1)$$

Hierin is: S_y : zandtransport per eenheid van lengte langs de oever;

m : gemiddelde taludhelling;

m_e : gemiddelde helling van het evenwichtstalud.

Het eerste minteken komt voort uit de afspraak, dat S_y positief is in de positieve y -richting (zie figuur 5.1).



Figuur 5.1

Het profiel wordt geschematiseerd door twee lijnen en het punt waar het transport bepaald moet worden, A, ligt aan het oppervlak tussen de twee geschematiseerde stappen. Omdat de gearceerde oppervlakten gelijk zijn, geldt er voor L_1 en L_2 :

$$L_1 = \frac{1}{d_1} \int_{-d_1}^0 y(z) dz \quad (5.2)$$

$$L_2 = \frac{1}{d_2} \int_{-d}^{-d_1} y(z) dz \quad (5.3)$$

De helling van het profiel bij punt A kan dan geschreven worden als:

$$\frac{1}{m} = -2 \frac{L_2 - L_1}{d} \quad (5.4)$$

De afstand $L_2 - L_1$, behorend bij de evenwichtshelling, wordt W genoemd, zodat er geldt:

$$\frac{1}{m_e} = -2 \frac{W}{d} \quad (5.5)$$

Invullen van de vergelijkingen (5.4) en (5.5) in vergelijking (5.1) en het toevoegen van een evenredigheidsconstante s_y geeft de uiteindelijk op te lossen vergelijking:

$$S_y = s_y(W - (L_2 - L_1)) \quad (5.6)$$

5.2 Aanpak

Voor de berekening van de transporten loodrecht op de oeverlijn is een computerprogramma gemaakt. Om de methode Swart te vergelijken met de werkelijkheid is in eerste instantie een berekening uitgevoerd voor raaien aan de Punt van Goeree in de Grevelingen (zie bijlage A3). De dwarsprofielen in de raaien 607 en 608 aldaar vertonen veel overeenkomst met het dwarsprofiel in het Slufterdepot; dit is geïllustreerd in onderstaande tabel.

	raai 607	raai 608	Slufterdepot
gem. helling ondiepe vooroever	1 : 35	1 : 30	1 : 35
gem. helling diepere deel	1 : 11	1 : 5	1 : 4
diepte knikpunt (m)	1,4	1	1
D50 (μm)	110	110	130
maximum golfhoogte (m)	0,5*	0,5*	0,8

* voor zuidenwind

De profielen 607 en 608 zijn diverse malen opgemeten, maar alleen de peilingen in november 1971 en in november 1972 zijn bruikbaar (zie bijlage A4). Vergelijking over een langere periode is niet mogelijk vanwege de aanleg van grinddammen op de ondiepe vooroever in mei 1973. Aangezien de Grevelingen werd afgesloten voor het getij in 1971 mag worden verwacht dat de taluds in november 1971 nauwelijks onderhevig waren geweest aan de nieuwe omstandigheden (stagnant peil zonder getijstroming).

Teneinde een goede vergelijking tussen gemeten en berekende profielveranderingen te maken, zijn de windregistraties (Hoek van Holland) van november 1971 tot november 1972 "vertaald" in percentages van voorkomen per richtingssector en snelheidsinterval voor dat jaar.

Voor de berekening van het uiteindelijke talud (dus november 1972) moet in principe als volgt te werk worden gegaan. Laat een bepaalde golfhoogte gedurende een tijdsinterval inwerken op het aanvangstalud. Bepaal de taludverandering als gevolg van de berekende transporten. Bereken de transporten op dit aangepaste talud met een nieuwe golfhoogte (en tijdsinterval). Pas 't talud weer aan enz. enz.

Daar uit windregistraties in het verleden de precieze opeenvolging van golfhoogten (met bijbehorende richting) bekend is, kan bovenstaande methode gevolgd worden om tot een juiste vergelijking, en dus tevens tot een controle van de methode Swart, te komen. Voor transportberekeningen in een toekomstige situatie (Slufter) heeft een dergelijke aanpak echter geen zin. In de toekomst zal immers nauwelijks voorspelbaar zijn welke opeenvolging van golfhoogten (met richting en gedurende welk tijdsbestek) verwacht kan worden. Hier wordt dan ook een andere aanpak gehanteerd.

Het transport wordt voor een periode van een jaar berekend ten opzichte van het aanvangstalud. Het dwarstransport neemt af naarmate het talud flauwer wordt, zodat verwacht mag worden dat de berekende transporten te groot zullen zijn. Het effect van het steeds flauwer wordende talud wordt via reductiefactoren verdisconteerd, zodat gemeten en berekende profielveranderingen met elkaar in overeenstemming zijn. De reductiefactoren worden ook toegepast op de berekende dwarstransporten in het Slufterdepot.

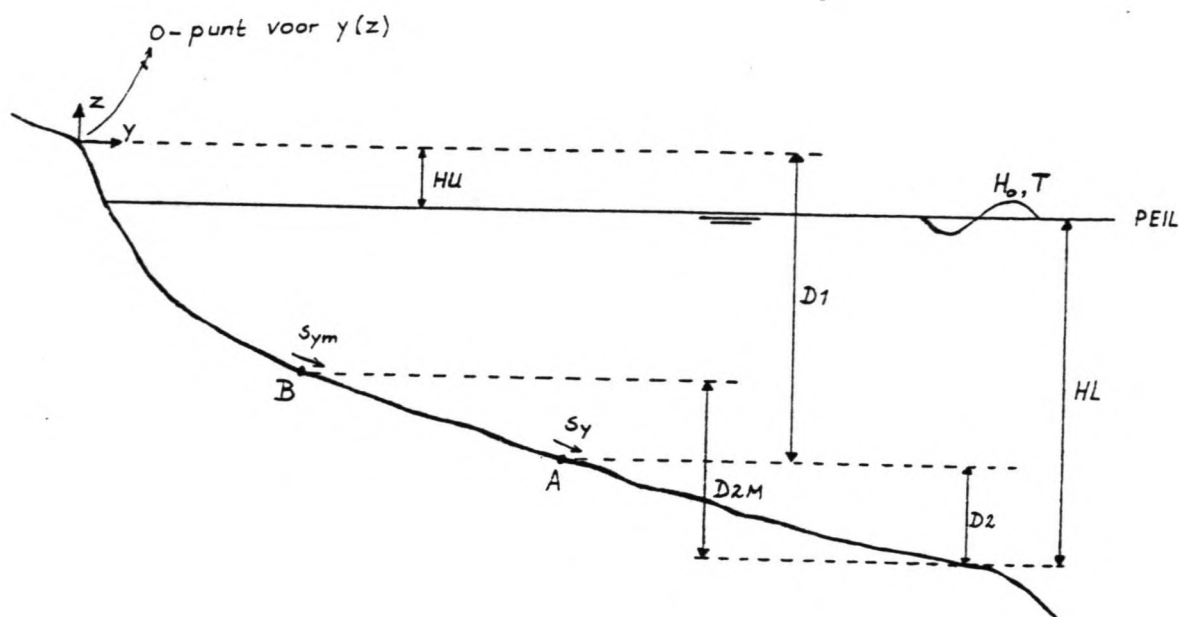
In de vergelijking tussen gemeten en berekende profielveranderingen dient ook de erosie c.q. aanzanding als gevolg van langstransportverschillen betrokken te worden (zie bijlage C1).

De methode van Swart is slechts geldig voor loodrechte golfval. Tijdens latere proeven is geen noemenswaardig verschil geconstateerd in dwarstransport tussen loodrechte en scheve golfval (variatie $\pm 20^\circ$). Deze proeven zijn uitgevoerd in het kader van het onderzoek naar duinafslag tijdens stormvloeden (T.A.W.). Dergelijke proeven zijn echter te kort en te weinig uitgevoerd om een duidelijker beeld te verkrijgen van dwarstransport bij scheve golfval. Het lijkt echter logisch te veronderstellen dat het talud in dergelijke gevallen aangepast moet worden. Immers, scheef invallende golven zullen een andere invloed van de bodem ondervinden dan loodrecht invallende golven. Hier is de taludvorm in de richting van de wind aangehouden bij de berekening van de dwarstransporten.

5.3 Programma

Het computerprogramma (DWATRA) berekent de dwarstransporten ten opzichte van het aanvangstalud op willekeurige dieptelijnen. De basis van de berekeningen wordt gevormd door de empirische formules van Swart (lit. 4 en lit. 5).

Voor elke windrichting die in de berekening wordt betrokken wordt per windsnelheid de golfhoogte en periode berekend met behulp van de Bretschneiderformules (3.3) en (3.4). Met deze gegevens en de D_{50} van het zand wordt het zogenaamde D-profiel vastgelegd. Dit is het actieve deel van het talud en het wordt gekenmerkt door de bovengrens (HU) en de ondergrens (HL). Ter verduidelijking van deze en andere in het programma gebruikte grootheden zie fig. 5.2.



A: punt waar transport S_y berekend wordt
 B: punt waar maximaal transport S_{ym} optreedt

Als $D_{2M} > D_2$ dan ligt A zeewaarts van maximum dwarstransport

Fig. 5.2

Per dieptelijn wordt dan het dwarstransport per tijdseenheid (STY) via de formules van Swart en exacte formules voor de waarden van L_1 en L_2 (van het aanvangstalud) bepaald. Als geldt: $W < L_2 - L_1$ dan wordt $STY=0$, d.w.z. er treedt geen landwaarts transport op. Deze transporten zijn m.b.v. printopdracht IPR2 af te drukken. Na vermenigvuldiging met de tijd, waarover het transport bepaald moet worden en het percentage van voorkomen van het windsnelheidsinterval van de betreffende windrichting levert dat het transport in dat tijdsinterval (STYT). Sommatie voor elk van invloed zijnde windsnelheidsinterval levert dan het totaaltransport (STYTOT) langs een dieptelijn. Deze gegevens kunnen worden afgedrukt m.b.v. printoptie IPR1.

De listing van het programma DWATRA is bijgevoegd in bijlage E.

Invoer

Het programma berekent slechts de dwarstransporten in 1 raai. Voor de berekening van andere raaien (als die een andere taludvorm hebben) moet een nieuwe invoerfile worden gecreëerd. De invoer dient te bestaan uit:

1	tekst 1
2	tekst 2

2 tekstregels van maximaal 70 posities (verplicht)

3	IPR1 , IPR2
---	-------------

printopdrachten;

IPRi = 0 gegevens worden niet afgedrukt

IPRi = 1 gegevens worden afgedrukt

4	D50 , STAP , DIEPTE , DBRET , TIJD
---	------------------------------------

D50 = 50% korreldiameter (m)

STAP = afstand tussen dieptelijnen waarop transport wordt berekend (m)

DIEPTE = maximale diepte waarop transport wordt berekend (m)

DBRET = gemiddelde waterdiepte voor de oever (m)

TIJD = tijd waarover het transport wordt berekend (dagen)

5	NRICHT
---	--------

NRICHT = aantal windrichtingssectoren (maximaal 6)
(voor elke sector volgt dan invoer 6 tot en met 10).

6	A, B, C, E, ZKN1, ZKN2
---	------------------------

constanten voor de beschrijving van het onderwatertalud voor deze betreffende sector.

A = reciproke van de helling 1e taluddeel

B = " " " " 2e "

C = " " " " 3e "

E = constante (zie voorbeeld blz. 31)

ZKN1 = diepte bij overgang helling A naar helling B (m)

ZKN2 = " " " " B " " C (m)

(voor ZKN1 en ZKN2 altijd positieve waarden invullen).

7	NAAM , NPERC
---	--------------

NAAM = naam windrichtingssector (maximaal 20 posities)

NPERC = aantal windpercentages waarvoor transport berekend wordt.

8	F
---	---

F = strijklengte bij windrichtingssector NAAM (m)

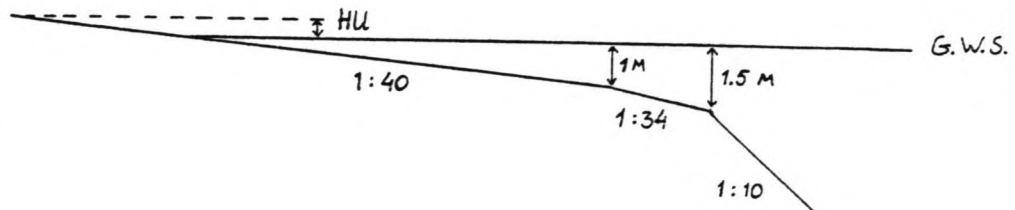
9	VW (I) , I = 1, NPERC
---	-----------------------

VW (I) = windsnelheden waarvoor transport wordt berekend (m/s)

10	PW (I) , I = 1, NPERC
----	-----------------------

PW (I) = percentage dat VW (I) bij windrichtingssector NAAM voorkomt.

Voorbeeld ter bepaling van constante E (gebaseerd op raai 608, De Punt van Goeree, voor zuidenwind)



Het talud is te beschrijven met:

$$y_1(z) = -40 z \quad (5.7)$$

$$y_2(z) = -34 z + C_2 \quad (5.8)$$

$$y_3(z) = -10 z + C_3 \quad (5.9)$$

Invullen van $z = -(1.1 + HU)$ in vergelijkingen (5.7) en (5.8) en gelijkstellen levert: $C_2 = 6 (1.1 + HU)$, dus:

$$y_2(z) = -34 z + 6 (1.1 + HU) \quad (5.10)$$

Invullen van $z = -(1.5 + HU)$ in vergelijkingen (5.10) en (5.9) en gelijkstellen levert: $C_3 = 30 HU + 42.6$, dus:

$$y_3(z) = -10 z + 30 HU + 42.6 \quad (5.11)$$

De constante E heeft in dit geval dan de waarde 42.6 m.

5.4 Resultaten

De werking van het programma is gecontroleerd aan de hand van resultaten van de berekening die beschreven staat in het collegedictaat Kustwaterbouwkunde deel II (lit. 4). Zoals uit bijlage C2 blijkt treden er nauwelijks verschillen op.

De berekeningen voor de Punt van Goeree geven in vrijwel alle gevallen erosie tot 0,2 m beneden de waterspiegel, hetgeen volgt uit het verloop van STYTOT langs het profiel; beneden 0,2 m neemt dat namelijk af, hetgeen duidt op sedimentatie. In werkelijkheid is erosie opgetreden tot 0,3 m beneden peil (zie bijlagen C3 en A4). Dit is mede het gevolg van de schematisatie van het talud. Als gevolg van de dwarstransporten treedt taludaanpassing op, wat resulteert in een wat steilere oeverrand en een flauwer aangrenzend talud. Wanneer met name een steilere oeverrand wordt ingevoerd treedt erosie tot op grotere diepte op.

Gemeten dwarstransport

In bijlage A4 zijn de gemeten profielen in de raaien 607 en 608 opgenomen. De verandering van deze profielen is veroorzaakt door dwars- en langstransport. De langstransporten zijn berekend met behulp van het programma GOLVEN zonder invloed van golfopzet- en golfspanningsverschillen en met de snelheidsverdeling uit fig. 2.3.a, met andere woorden er is een bovengrens voor het transport evenwijdig aan de oever berekend (zie bijlage C1). De resultaten geven voor beide raaien een aanzanding. Dit betekent dat de totale hoeveelheid erosie als gevolg van dwarstransport de som is van de gemeten erosie en de aanzanding (die is nl. ook geërodeerd door dwarstransport).

De gemiddelde aanzanding in raai 607 bedraagt:

$$\frac{207,85 \text{ m}^3 + 442,56 \text{ m}^3}{200 \text{ m}} = 3,25 \text{ m}^3/\text{m}$$

Het actieve deel van het talud loopt tot ± 1 m beneden de waterspiegel (de langstransporten die daar beneden optreden zijn gering). Dit betekent in raai 607 een actieve lengte van ± 40 m, de lengte tot een diepte van 0,3 m beneden waterspiegel is ± 10 m. Wanneer een gelijkmatige verdeling van de aanzanding over de actieve lengte van het talud wordt aangenomen, betekent dit dat $\frac{1}{4}$ van de aanzanding boven 0,3 m heeft plaatsgevonden. Dit is 0,81 m³/m.

De gemiddelde aanzanding in raai 608 bedraagt:

$$\frac{442,56 \text{ m}^3 + 328,46 \text{ m}^3}{200 \text{ m}} = 3,86 \text{ m}^3/\text{m}$$

De actieve lengte van het talud is ± 30 m en de lengte tot 0,3 m diepte is ± 9 m, zodat $\frac{3}{10}$ van de aanzanding boven 0,3 m heeft plaatsgevonden. Dit is 1,16 m³/m.

De gemeten erosie bedraagt (vanaf de waterspiegel tot 0,3 m diepte)

in raai 607: ± 8 m³/m';
in raai 608: ± 11 m³/m'.

Totaal dus in raai 607: 8,8 m³/m';
raai 608: 12,2 m³/m'.

Berekening

In onderstaande tabel zijn de eindresultaten van de getransporteerde hoeveelheden bij verschillende windrichtingen weergegeven. De berekening is verricht op basis van de werkelijk opgetreden wind en geeft het jaarlijks transport in m³/m. (Erosie - ; Aanzanding +)

Raai 607

Diepte	Oost	Ozo	Zzo	Zuid	Totaal
boven G.W.S.	-2,55	-1,49	-3,68	- 5,74	-13,46
0 - 0,1	-6,13	-2,84	-4,88	-10,9	-24,75
0,1 - 0,2	-2,6	-0,85	-1,85	-10	-15,3
					<u>-53,5</u>
0,2 - 0,3	1,66	1,35	1,84	- 2,42	2,43
0,3 - 0,4	2,33	1,12	2,36	2,31	8,12
0,4 - 0,5	1,57	0,65	1,55	3,06	6,83

Raai 608

Diepte	Oost	Ozo	Zzo	Zuid	Totaal
boven G.W.S.	-6,84	-2,28	-5,15	-17,51	-31,78
0 - 0,1	-8,74	-3,27	-5,58	-14,82	-32,14
0,1 - 0,2	-1,46	-0,6	-1,59	- 9,39	-13,04
					<u>-77</u>
0,2 - 0,3	3,83	1,81	2,56	1,05	9,25
0,3 - 0,4	3,74	1,36	2,87	5,59	13,56
0,4 - 0,5	3,3	0,76	1,82	5,31	11,19

De totale hoeveelheid erosie tot een diepte van 0,2 m bedraagt dus 53.5 m³/m in raai 607 en 77 m³/m in raai 608.

Om de invloed van het veranderde talud op de snelheid van het transport na te gaan is een berekening gemaakt met een wat flauwer talud. In bijlage C4 zijn daartoe de snelheden in raai 607 voor oostenwind vergeleken. Enerzijds is een berekening gemaakt waarbij het talud loodrecht op de oever is uitgevoerd en anderzijds met een aangepast talud wat overeenkomt met het talud in de richting van de wind (hoek is dan 45°).
(Zie ook bijlage A5.)

De transporten zijn dan, zoals verwacht, lager bij het flauwere talud. De reductie ligt gemiddeld tussen de 20 en 30 procent voor diepten tot 0,3 m.

De verschillen tussen meting en berekening kunnen dan, gezien de relatief geringe transportvermindering bij een wat flauwer talud, niet geheel toegewezen worden aan geleidelijke taludaanpassing. In de metingen, die Swart heeft verricht ter ondersteuning van zijn theorie, blijkt echter ook een aanzienlijke spreiding voor te komen (voor het transport tot een factor 4 verschil).

Beide transportreducerende invloeden worden vervat in een reductiefactor. De berekende erosie vermenigvuldigen met de reductiefactor moet dan de gemeten erosie leveren.

Dit betekent voor raai 607 $R.F. = \frac{8,8}{53,5} = 0,164$

en voor raai 608 $R.F. = \frac{12,2}{77} = 0,158$

Voor de verdere berekening wordt voor R.F. aangehouden: 0,16.

In alle berekeningen is het talud aangepast; d.w.z. het talud in de richting van de wind is ingevoerd. Uit de resultaten van de dwarstransportberekening voor de binnentaluds van het Slufterdepot (zie: bijlage C5) blijkt dat de noordelijke en oostelijke oever het zwaarst worden aangevallen. In alle gevallen blijkt er erosie berekend te worden tot $\pm 0,4$ m beneden de waterspiegel. Dit is een gevolg van de taludschematisatie.

Zoals reeds eerder vermeld zal de werkelijke erosie tot op grotere diepte optreden als gevolg van taludaanpassing (in dit geval heeft de steiler wordende oeverrand dus een belangrijke invloed).

Gezien de verschillen tussen het gemeten en berekende punt van maximum transport (erosie boven en aanzanding beneden dit punt) aan de Punt van Goeree, wordt hier aangenomen dat de erosie optreedt tot een diepte van 0,5 à 0,6 m beneden de waterspiegel.

De te verwachten erosie boven dit punt is (na het eerste jaar) gelijk aan de berekende erosie maal de reductiefactor.

Oostzijde : $0,16 \times 272,8 = 43,6$ m³/m.

Noordzijde: $0,16 \times 224,5 = 35,9$ m³/m.

Zuidzijde : $0,16 \times 111,6 = 17,8$ m³/m.

Westzijde : $0,16 \times 33,4 = 5,3$ m³/m.

Gezien de vorm van het aanvangstalud en de vorm van een eroderend talud zal deze erosie resulteren in een achteruitgang van de oeverlijn.

Oostzijde ± 40 m.

Noordzijde ± 35 m.

Zuidzijde ± 25 m.

Westzijde ± 10 m.

Aan de oostzijde is een berekening uitgevoerd voor het geërodeerde talud, dus het talud na 1 jaar. Uit de resultaten (zie: bijlage C6) blijkt dat de erosie veel minder is geworden en ook tot geringere diepte optreedt.

Alhoewel het niet zeker is of de reductiefactor ook voor de transporten op dit talud toegepast mag worden, wordt wel duidelijk dat de snelheid waarmee de oeverlijn achteruitgaat snel afneemt in de tijd.

Metingen aan zeer flauwe taluds (1:500; westelijke oever Stampersplaat in de Grevelingen) leren dat de erosie niet stopt, maar met gemiddeld 2 à 3 m³/m per jaar, voor aan westelijke winden geëxposeerde oevers, voortgaat (lit. 3). Deze voortgaande erosie aan de oeverlijn komt voornamelijk door de steilheid van de oeverrand, waarbij zand naar diep water verdwijnt.

6. INTEGRATIE LANGS- EN DWARSTRANSPORTEN

Om een indruk te verkrijgen van de erosie is de langtransportberekening losgekoppeld van de dwarstransportberekening. In dit hoofdstuk worden de consequenties hiervan besproken.

De verandering van het talud als gevolg van langtransport geeft niet direct aanleiding tot grote variatie in het langtransport. Een gebruikelijke aanname is immers dat de bodemlijn horizontaal verschuift tot aan de diepte beneden welke het langtransport verwaarloosbaar is. Dit betekent dat de taludhelling van het actieve deel van het talud, ondanks erosie of aanzanding, onveranderd blijft, zodat de langtransporten ook slechts zeer weinig zullen variëren.

Echter als gevolg van dwarstransporten verandert de taludvorm dermate ingrijpend, dat langtransporten hier mogelijk invloed van ondervinden.

Wanneer dan ook het langtransport ten opzichte van het nieuwe talud (zie: bijlage A6) berekend wordt, worden kleinere waarden gevonden dan die welke volgen uit een berekening ten opzichte van het aanvangstalud. De transporten zijn gereduceerd met $\pm 25\%$ aan de oostelijke en noordelijke zijde en met $\pm 15\%$ aan de westelijke en zuidelijke zijde van het depot. Hierbij dient wel vermeld te worden, dat er in de schematisatie van het talud wordt verondersteld dat een constante helling doorloopt tot aan de waterlijn. Dit is niet geheel correct, omdat aan de waterlijn een steilere oeverrand optreedt.

Van de Graaff en Van Overeem (lit. 11) hebben in een evaluatie van langtransportformules echter gevonden, dat de Bijker-formule praktisch ongevoelig is voor variaties in taludhelling. Daar de berekende transportreductie relatief gering is (15-25%) kan het meenemen ervan in de taludvariaties slechts een suggestieve nauwkeurigheid inhouden, die mogelijk helemaal niet aanwezig is. Bovendien treedt er alleen in het begin een groot verschil op tussen berekend talud en uitgangstalud. Daarna zal de helling slechts langzaam flauwer worden, zodat de reductie nog minder wordt.

Voor de bepaling van de voortgaande taludverandering wordt dan ook geen reductie toegepast op het langtransport dat berekend wordt ten opzichte van het uitgangstalud. Er wordt dus gesteld dat het langtransport constant is tijdens een tijdstap van een jaar.

Zoals reeds vermeld, wordt de invloed van het geleidelijk veranderende talud op de grootte van het dwarstransport verrekend met behulp van een reductiefactor.

Deze reductiefactor is bepaald uit een vergelijking met het vrijwel identieke aanvangstalud aan de Punt van Goeree. Echter, wanneer het talud veel flauwer wordt, is het goed mogelijk dat de reductiefactor verandert. Metingen aan dergelijke taluds ontbreken, zodat een vergelijking niet te maken is. Voor de berekening van voortgaande erosie als gevolg van dwarstransport op het flauwere talud wordt daarom vooralsnog dezelfde reductiefactor aangehouden.

In bijlage A7 worden de aldus berekende profielen weergegeven.

7. CONCLUSIES

De berekening van de transporten is gesplitst in een richting evenwijdig aan de oeverlijn en een richting loodrecht op de oever. IJking van de langstransportberekening aan de hand van gemeten situaties heeft niet kunnen plaatsvinden, omdat vergelijkingsmateriaal daartoe ontbreekt. Er bestaat slechts een gering verschil tussen boven- en ondergrens. De ééndimensionale aanpak heeft tot gevolg dat het stroombeeld bij een sterk gekromde oeverlijn niet juist wordt weergegeven. Dit houdt in dat alleen ter plaatse van het middendeel van een rechte begrenzing (waar de invloed van de kromming nauwelijks meer merkbaar is) waarde gehecht kan worden aan de grootte van het langstransport en van de erosie.

Voor de transporten loodrecht op de oever heeft wel een vergelijking plaats kunnen vinden met een bestaande (opgemeten) situatie. De omstandigheden, waarvoor de theorie geldig is, treden ook op aan de Punt van Goeree in de Grevelingen. Desondanks blijkt er nog een aanzienlijk verschil op te treden tussen berekende en gemeten hoeveelheid erosie.

De volgende oorzaken zijn hieraan debet:

- schematische profielweergave (met behulp van rechte lijnen);
- als gevolg van dwarstransporten treedt geleidelijke taludaanpassing op welke niet juist is weer te geven;
- de methode Swart berekent slechts het transport van de oever af, terwijl onder bepaalde omstandigheden transport naar de oever toe op kan treden;
- de spreiding in meetgegevens bij verschillende van Swarts proeven duidt erop, dat aanzienlijke afwijkingen van de voorgestelde formules mogelijk zijn.

Vanwege deze oorzaken zijn de gemeten erosiehoeveelheden ongeveer een factor 0,16 van de berekende hoeveelheden aan de Punt. Voor de Punt van Goeree en het Slufterdepot worden de transporten berekend ten opzichte van een vrijwel identiek talud, wat in beide gevallen nauwelijks onderhevig is geweest aan erosie door golfinwerking op een vast niveau.

Deze overeenkomsten rechtvaardigen de aanpak om de berekende erosie in het Slufterdepot met diezelfde factor te reduceren om het werkelijke verlies te bepalen. Hieruit kan dus een goede indicatie gevonden worden voor de teruggang van de oeverlijn een jaar na aanleg van de zanddam (zie: bijlage A6).

Gedurende de eerste fase van vulling (tot 5 à 6 jaar na aanleg) zal het waterpeil ongeveer constant blijven. De berekening van de voortgaande erosie op het steeds veranderende talud is niet geijkt aan metingen (die ontbreken namelijk). De taludvorm na 6 jaar is dan ook bepaald met de veronderstelling dat de reductiefactor hetzelfde blijft en de langstransporten niet aangepast hoeven te worden als gevolg van taludverandering (zie: bijlage A7).

Na deze eerste fase van vulling zal het waterniveau geleidelijk stijgen en zal golfinwerking optreden op het steile talud (1:3) van de dam. Wanneer dit steile talud onverdedigd blijft kan er een aanzienlijke afkalving optreden. Dit kan mogelijk de gestelde veiligheid tegen doorbreken in gevaar brengen of misschien uittredend water op het buitentalud veroorzaken (freatisch vlak buiten dam). De grootte van de erosie hangt voornamelijk af van de waterdiepte, die gehandhaafd moet blijven om opwoeling (stankoverlast!) van de geborgen specie te vermijden.

De grootte van de erosie moet niet onderschat worden, omdat de strijklengten groter worden en de beschermende werking van de zanddam minder wordt bij een hoger waterniveau. De wind zal dan meer en langer grip op het water hebben zodat hogere golven optreden. Ook het transport door wind speelt een rol. Voor de gehele oever aan de Punt van Goeree met een oost-west oriëntatie is een jaarlijks verlies van de 10 à 15 cm in verticale zin geconstateerd.

Het is daarom ook raadzaam om continu te zorgen dat een afslagberm tot boven waterniveau aanwezig is om de dam te beschermen. Tegen de verstuiwing kan een directe aanplant van helmgras en/of het inleggen met stro een oplossing bieden.

LITERATUUROPGAVE

1. Gemeentewerken Rotterdam
Projectnota/Milieu-effectrapport
Gemeentedrukkerij Rotterdam (okt. 1984)
2. Gemeentewerken Rotterdam
Werkgroeprapport Kustmorfologie Slufter
Gemeentedrukkerij Rotterdam (nov. 1984)
3. Rijkswaterstaat, Projectgroep Oevers
Oevererosie en oeververdediging Grevelingenmeer
notitie DDMI - 85.323 (mei 1985)
4. Swart D.H.
Offshore sedimenttransport and Equilibrium
Beach Profiles
Rapport M918, deel 2; Waterloopkundig Lab. Delft (1974)
5. Collegedictaat Kustwaterbouwkunde, deel II
Harbor and Beach Problems
Vakgroep Kustwaterbouwkunde; T.H. Delft (1980)
6. Stive M.J.F., Battjes J.A.
A model for offshore sedimenttransport
Proceedings 19th Int. Conference on Coastal Engineering
Chapter 79 vol. II; Houston (1984)
7. Stive M.J.F.
Crostran - A model for beach profile changes due to
cross-shore sediment transport under random breaking waves
Rapport R 2238; Waterloopkundig Lab. Delft (1983)
8. Bakker W.T.
The dynamics of a coast with a groyne system
Proc. 11th Coastal Engineering Conference
Chapter 31 Vol. I, London (1968)
9. Holthuysen L.H.
Methoden voor golfvoorspelling
Technische Adviescommissie Waterkeringen,
Rijkswaterstaat (1980)
10. Fortran IV, taalbeschrijving
Rekencentrum; T.H. Delft (april 1976)
11. Van de Graaff J., Van Overeem J.
Evaluation of sediment transport formulae in coastal engineering
practice
Vakgroep Kunstwaterbouwkunde, T.H. Delft (1979)

SYMBOLENLIJST

c	: voortplantingssnelheid golfkammen	(m/s)
c _o	: ongestoorde voortplantingssnelheid op diep water	(m/s)
C	: Chézy waarde	(m ^{1/2} /s)
d	: diepte	(m)
F	: strijklengte	(m)
f _w	: Darcy - Weisbach wrijvingscoëfficiënt	(-)
g	: zwaartekrachts-versnelling	(m/s ²)
H	: golfhoogte	(m)
H _o	: ongestoorde golfhoogte op diep water	(m)
i	: nummer van een punt in 'n bep. raai	(-)
j	: raainummer	(-)
k	: golfgetal	(1/m)
K _r	: refractiecoëfficiënt	(-)
K _{sh}	: shoalings-coëfficiënt	(-)
L	: golflengte	(m)
m	: taludhelling	(-)
M _e	: helling "evenwichtstalud"	(-)
r	: ribbelhoogte	(m)
S _b	: bodemtransport	(m ³ /s,m)
S _s	: suspensietransport	(m ³ /s,m)
S _{xx}	: golf (normaal) spanning in x-richting	(N/m)
S _{yy}	: golf (normaal) spanning in y-richting	(N/m)
S _{yx}	: golf (schuif) spanning in y-richting	(N/m)
S _y	: dwarstransport op plaats y	(m ³ /s,m)
S _{ym}	: maximaal dwarstransport op talud	(m ³ /s,m)
T	: golfperiode	(s)
v	: snelheid evenwijdig aan de oever	(m/s)
v _w	: windsnelheid	(m/s)
X	: coördinaat in richting langs de oever	(-)
Y	: coördinaat in richting loodrecht op de oever	(-)
Y _B	: brekerafstand uit oeverlijn	(m)
Δ	: relatieve dichtheid	(-)
ε _y	: turbulente diffusie	(m ² /s)
γ	: brekingsindex	(-)
η	: golfopzet	(m)
φ	: hoek van golfinval	
φ _o	: hoek van golfinval op diep water	
μ	: ribbelfactor	(-)
τ	: spanning t.g.v. golf (schuif) spanningsverschillen	(N/m ²)
τ _η	= τeta: spanning t.g.v. golfopzetverschillen	(N/m ²)
τ _{rs}	: spanning t.g.v. golf (normaal) spanningsverschillen	(N/m ²)
τ _t	: resulterende schuifspanning aan bodem	(N/m ²)
τ _{cwx}	: gemiddelde schuifspanning aan bodem a.g.v. golfwerking en stroming deze moet gelijk zijn aan τ _t	(N/m ²)
τ _{yx}	: turbulente schuifspanning	(N/m ²)
ρ	: dichtheid	(kg/m ³)

Verder zijn bij de dwarstransport-berekeningen nog enkele afkortingen gebruikt, die hier worden verklaard.

VW	: windsnelheid	(m/s)
PW	: percentage van de tijd dat een bep. windsnelheid VW in de beschouwde sector voorkomt	
HO	: ongestoorde golfhoogte op diep water	(m)
H	: diepte	(m)
STY	: dwarstransport per tijdseenheid	(m ³ /s,m)
STYT	: dwarstransport gedurende de tijd dat een bep. windsnelheid voorkomt	(m ³ /m)
STYTOT	: sommatie van STYT voor alle van invloed zijnde windsnelheden	(m ³ /m)

