

RIJKSWATERSTAAT

Dienst Weg- en Waterbouwkunde

Lokale afschuiving van een steenbekleding  
onder golfaanval

Concept

Hoofdafdeling Waterbouw  
Afdeling Onderzoek  
Onderafdeling Hydraulica

Opsteller; Ir. K.J. Bakker

d.d. augustus 1987

*Stylen behoren te worden  
overgenomen bij de opstelling*

# INHOUDSOPGAVE

1. Samenvatting
2. Inleiding
3. Steenzetting op filter
4. Potentiaalverdeling in het filter
  - 4.1 Schematisering van de stroming
  - 4.2 Schematisering van de golfrandvoorwaarde
  - 4.3 Oplossing van de differentiaalvergelijking
5. Stabiliteitscriteria
6. Stabiliteit van de bekleding
  - 6.1 Losse blokken
  - 6.2 Blokkenmatten
  - 6.3 Verankering of teenconstructie
7. Computermodel
8. Resultaten
9. Conclusies en aanbevelingen
10. Literatuur

Bijlagen 1 t/m 7

SYMBOLENLIJST

b	filterdikte
q	debiet
k	doorlatendheid
k'	toplaagdoorlatendheid
D	toplaagdikte
H <sub>i</sub>	inkomende golfhoogte
H <sub>b</sub>	brekerhoogte
R <sub>d</sub>	rundown
Z <sub>1</sub>	Hoogte freatische lijn boven het rundownpunt
α	taludhelling
β	brekerhelling
σ	spanning
σ <sub>n</sub>	normaalspanning
Φ	potentiaal
Φ <sub>u</sub>	uitwendige potentiaal
φ	wrijvingshoek
φ <sub>f</sub>	wrijvingshoek filtermateriaal
λ	leklengte
ξ	golfsteilheidsparameter
Δ	dimensieloos eigengewicht $(\rho_b - \rho_w) / \rho_w$
τ	$\rho_b g$ ; volume gewicht van de bekleding

## 1. SAMENSVATTING

Ten einde oevers en dijken tegen golfaanval te beschermen, worden deze vaak voorzien van een gezette steenbekleding.

De bij het ontwerp in beschouwing te nemen bezwijkmechanismen zijn onder andere; het door verschildrukken uitlichten van stenen, het afglijden van de bekledingslaag, en instabiliteit van de onderlagen.

In dit verhaal, zullen we ons met name richten op het tweede mechanisme; het afglijden van de bekleding.

Aangezien voor het analyseren van de stabiliteit tegen afglijden, ook kennis over de potentiaalverdeling in het filter vereist is, zullen ook aspecten van de analyse van de toplaagstabiliteit tegen uitlichten, aan de orde komen.

Voor de verschildruk-verdeling wordt gebruikt gemaakt van een analytische uitdrukking, welke van een sterk geschematiseerde beschrijving van waterbeweging, door en onder de bekledingslaag, uitgaat. Aan de hand van deze verschildruk-verdeling wordt de bekleding verdeelt in zones's welke respectievelijk, potentieel stabiel zijn, potentieel afschuiven, of potentieel oplichten. Na integratie van de resulterende kracht, evenwijdig aan het talud, per zone, en vergelijking van netto kracht taludafwaarts, in de potentieel instabiele gebieden, met de reserve's aanwezig in de potentieel stabiele gebieden, wordt de stabiliteit tegen afglijden uitgedrukt in een stabiliteitsfactor.

In het kader van een onderzoeksopdracht van Rijkswaterstaat, is door Grondmechanica Delft een rapport opgesteld over deze materie [2,3]. In dit rapport is onder andere een uitwerking voor de totaalstabiliteit van een steenzetting tegen afglijden opgesteld voor scheepvaartgolven. Deze notitie kan worden beschouwd als een aanvulling op dit werk t.a.v. de uitwerking voor windgolven

## 2. INLEIDING

Bij het beoordelen van de stabiliteit van zetsteen bekledingen dienen voor de toplaag, met name de mechanismen oplichten van de bekleding, (voor losse blokken met name het uittreden van een steen), en het afglijden langs het talud te worden beschouwd. Andere belangrijke aspecten zijn de grondmechanische stabiliteit onder golfklappen, en de filterstabiliteit van de onderlagen. Deze vallen echter buiten het bestek van dit verhaal.

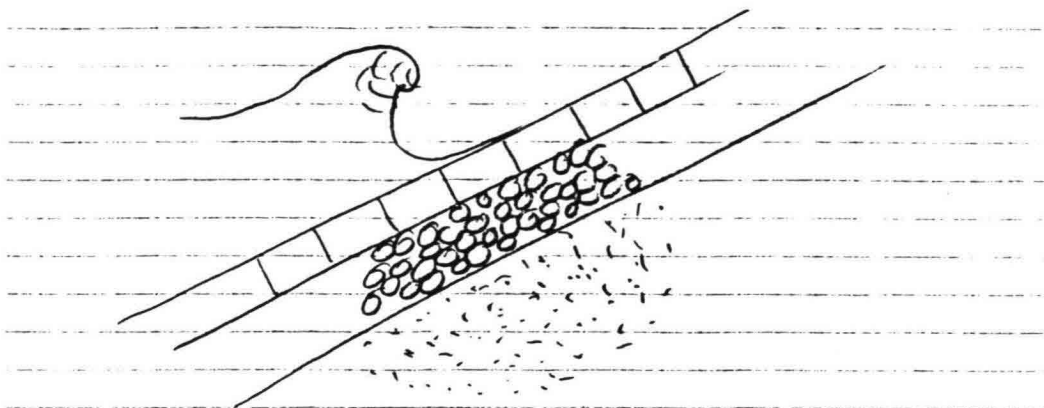
Het uitlichten van losse blokken wordt veroorzaakt, doordat tengevolge van de "belemmerde" uitstroming van water uit de oever, (doordat de bekleding relatief slechter doorlatend is dan de filterlaag), zich een semi-statische verschildruk over de bekleding instelt, met name tijdens de rundown.

Als deze verschildruk voldoende groot van amplitude is, en lang genoeg aanhoudt, kan dit het uitlichten van één of enkele stenen tot gevolg hebben.

Bij een bekleding met voldoende samenhang, bijvoorbeeld door vulmateriaal tussen de blokken, door interlock, of eventueel door kabels, of een verbindend weefsel, zal het geschetste mechanisme niet zo snel optreden. Echter deze semi-statische verschildrukken hebben tevens tot gevolg, dat de wrijving welke de blokken op de ondergrond kunnen uitoefenen, en welke nodig is om het evenwicht evenwijdig aan het talud te verzekeren, afneemt. (We veronderstellen hierbij een wrijvingsrelatie volgens Coulomb)

Er zijn aanwijzingen dat het afnemen van deze afschuifweerstand, bij een aantal schadegevallen aan steenbekledingen de afgelopen jaren, een rol heeft gespeeld.

### 3. STEENZETTING OP FILTER



Figuur 1. Steenbekleding onder golfaanval.

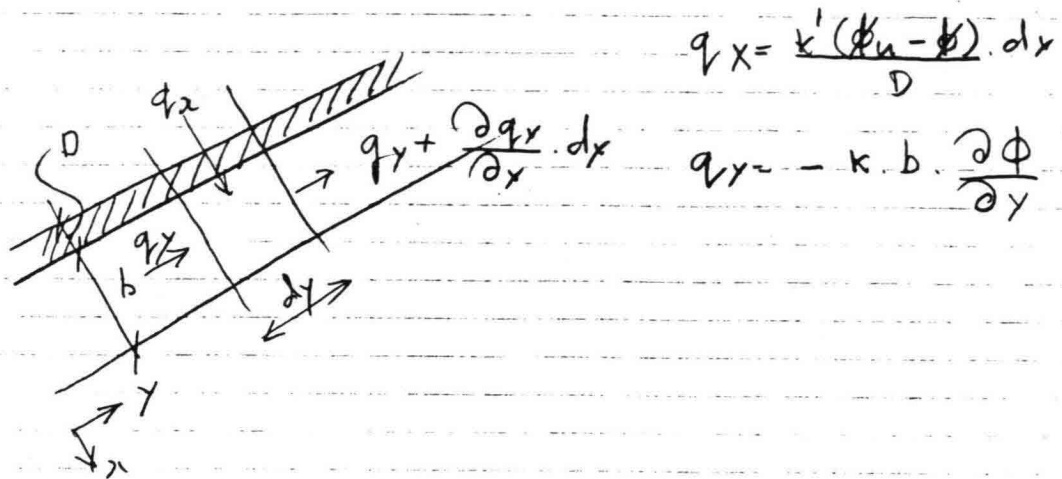
We zullen ons hier met name bezighouden met het tweede mechanisme; het afglijden van de bekleding. We concentreren ons hierbij op een constructie bestaande uit een blokkenbekleding geplaatst op een filter, waarbij de doorlatendheid van het filter groot is ten opzichte van die van de ondergrond.

Uitgaande van een dergelijke constructie, zullen we de grondwaterstroming in het filter schematiseren tot een één-dimensionale stroming. Alleen in de toplaag vindt stroming loodrecht op het talud plaats. Vanwege de voordelen die een analytische oplossing kan bieden, zullen we de stroming in het filter in eerste instantie m.b.v. lineair veronderstellen.

Voor de  $k$ -waarde, kunnen we dan het beste een gelineariseerde versie van een turbulente doorlatendheidsrelatie gebruiken.

#### 4. POTENTIALVERDELING IN HET FILTER

##### 4.1 Schematisering van de stroming



Figuur 2. Schematisering van de stroming onder de bekleding

Uitgaande van de continuïteitsvergelijking, en een laminaire doorlatendheid zowel in de toplaag als in het filter kan de volgende differentiaalvergelijking voor het grondwaterstromingsprobleem worden opgesteld.

$$q_{y,y} + k' * (\Phi - \Phi_u) / D = 0$$

waarbij volgens Darcy

$$q_y = -k * b * \Phi_{,y}$$

hetgeen resulteert tot

$$\Phi_{,yy} - (k' / bDk) * \Phi = - (k' / bDk) * \Phi_u$$

hetgeen kan worden omgewerkt tot een functie van  $z$ , vanwege de kinematische relatie tussen de tweede afgeleiden volgens

$$\Phi_{,zz} = \sin^2 \Phi_{,yy}$$

Een en ander resulteert tot de volgende beschrijvende vergelijking;

$$\Phi_{,zz} - (k' / (\sin^2 \alpha * b D k)) * \Phi = - (k' / (\sin^2 * b D k)) * \Phi_u$$

ter vereenvoudiging zullen we hier de term invoeren, welke we de leklengte noemen.

dus

$$\lambda = \sin^2 \alpha \sqrt{(k D b / k')}$$

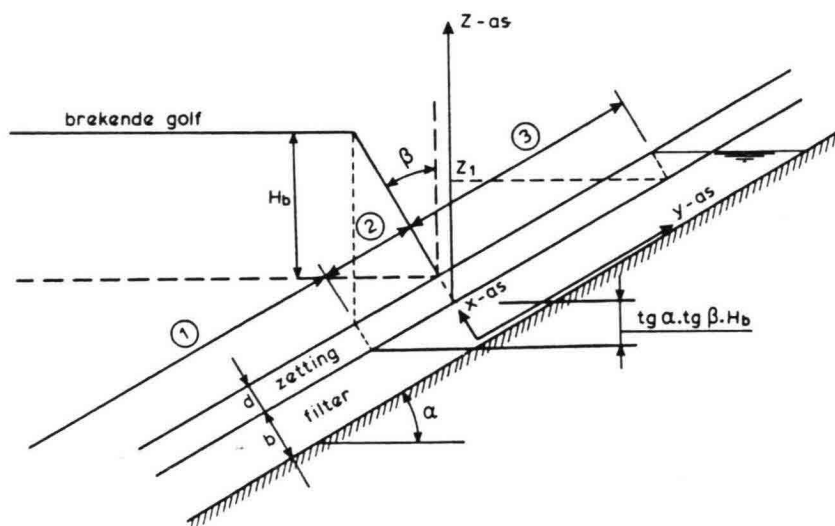
zodat

$$\Phi_{,zz} + \Phi / \lambda^2 * \phi = \Phi_u \lambda^2$$

#### 4.2 Schematisering van de golfrandvoorwaarde

Uitgaande van de hiervoor afgeleide differentiaalvergelijking kan als de potentiaalverdeling op het talud bekend is, de potentiaalverdeling in het filter berekend worden.

Voor de potentiaalverdeling op het talud, kunnen we in een aantal gevallen gebruik maken van golfdrukregistraties verkregen bij modelonderzoek in de Deltagoot van het Waterloopkundig Laboratorium in de Voorst.



figuur 3 Golfschematisering volgens Wolsink.



Gebruik makend van het numerieke model STEENZET/1, is het dan mogelijk op elke plaats in de tijd de verschildrukken over de beklleding te berekenen.

Op deze wijze is het mogelijk gebleken, om de ongunstigste plaats, en de ongunstigste uitwendige potentiaalverdeling voor een aantal golven te bepalen.

Voor een eenvoudige benadering van die ongunstigste toestand kan de potentiaalverdeling op het talud worden geschematiseerd volgens Wolsink, tot een staand golfvront, zoals aangegeven in figuur 3.

Voor het maken van een som dienen we de beschikbare golfinformatie, meestal  $H_i$  en  $T$  te vertalen naar de invoer zoals we deze voor de gekozen schematisering nodig hebben.

Hierbij kunnen we vruchtbaar gebruik maken van het werk van Banach [1] die aan de hand van golfdruk registraties voor een 1 : 3 talud in de Delta-goot, en kleinschalig onderzoek voor 1:2, 1:3, en 1:4 in de Scheldegoot, een regressie analyse heeft gedaan tussen bekende golfgegevens, en geometrische randvoorwaarden, en de hier gewenste gegevens; de maximale brekerhoogte en de brekerhelling.

De aldus afgeleide relaties luiden;

$$H_b/H_i = A_1 \xi_0^{B_1}$$

$$\beta = A_5 \xi_0^{B_5} * (d/H_i)^{C_5}$$

Waarbij

$$A_1 = -0.125 \cot \alpha + 1.22$$

$$B_1 = 0.170 \cot \alpha + 0.07 \quad 1 < \xi_0 < 3$$

$$A_5 = 2.45 \cot \alpha + 26.6 \quad \text{voor } /$$

$$B_5 = -0.215 \cot \alpha + 0.73 \quad \backslash$$

$$C_5 = 0.05 \cot \alpha + 0.06 \quad 1 < \cot \alpha < 5$$

$$\xi_0 = \tan \alpha / \sqrt{(H_i/L_0)}$$

$$L_0 = 1.56T^2$$

Hierbij is  $d$  de diepte van de bodem onder de stilwaterlijn.

### 4.3 Oplossing v.d. Differentiaalvergelijking

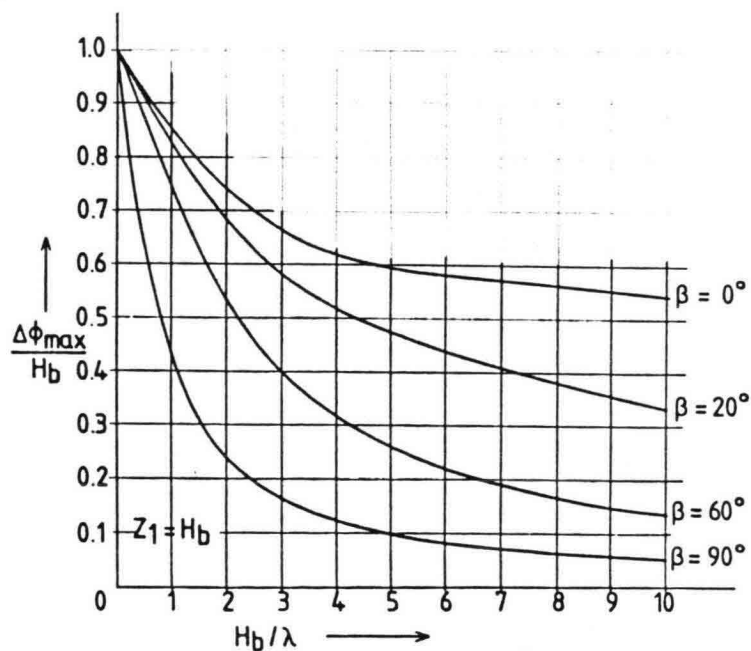
Voor de aldus geschematiseerde golftrandvoorwaarde is de oplossing van de potentiaalverdeling, c.q. verschildrukverdeling bekend [4]. Er worden vanwege de verschillen in de uitwendige randvoorwaarden, hierbij drie gebieden onderscheiden, en de oplossingen voor die drie gebieden luiden

$$\begin{array}{ll}
 \text{gebied 1} & \Delta \phi = A \cdot \exp(z/\lambda) \qquad z < -\tan\alpha \tan\beta \cdot H_b \\
 \text{gebied 2} & \Delta \phi = C \cdot \exp(z/\lambda) + D \cdot \exp(-z/\lambda) \quad -\tan\alpha \tan\beta \cdot H_b \leq z < 0 \\
 \text{gebied 3} & \Delta \phi = E \cdot \exp(z/\lambda) + F \cdot \exp(-z/\lambda) \quad 0 \leq z
 \end{array}$$

Waarbij

$$\begin{aligned}
 DE &= -\lambda \cdot \exp(-\tan\alpha \tan\beta \cdot H_b / \lambda) / (2 \tan\alpha \tan\beta) \\
 F &= \lambda \cdot (1 - \exp(-\tan\alpha \tan\beta \cdot H_b / \lambda)) / (2 \tan\alpha \tan\beta) + \lambda / 2 \\
 C &= -DE + F \cdot (1 - \exp(-Z_1 / \lambda)) \\
 A &= C + DE \cdot \exp(2 \cdot \tan\alpha \tan\beta \cdot H_b / \lambda) \\
 E &= -F \cdot \exp(-2 \cdot Z_1 / \lambda)
 \end{aligned}$$

Bij het formuleren van de oplossing is er voor gekozen, deze direct uit te schrijven in de verschildrukken over de bekleding. Als we in de potentiaalverdeling geïnteresseerd zijn, kunnen we deze voor elk punt langs het talud terugrekenen, door er de potentiaal bovenop het talud +  $D \cdot \cos\alpha$  bij te tellen.



Figuur 4 Grafische voorstelling van de maximale verschildrukken

We kunnen nu ook direct de maximale verschildruk over de bekleding vast stellen, want deze treedt op ter plaatse van het brekerpunt, dus voor  $z = -R_d$ , op de grens tussen gebied 2 en gebied 3. De oplossing voor deze maximale verschildruk luidt;

$$\phi_{\max} = \lambda \left( 1 + \frac{1 - \exp(-\tan\alpha \tan\beta \cdot H_b / \lambda)}{\tan\alpha \tan\beta} \right) \cdot \frac{1 - \exp(-Z_1 / \lambda)}{2}$$

Een grafische voorstelling van deze oplossing is gegeven in figuur 4.

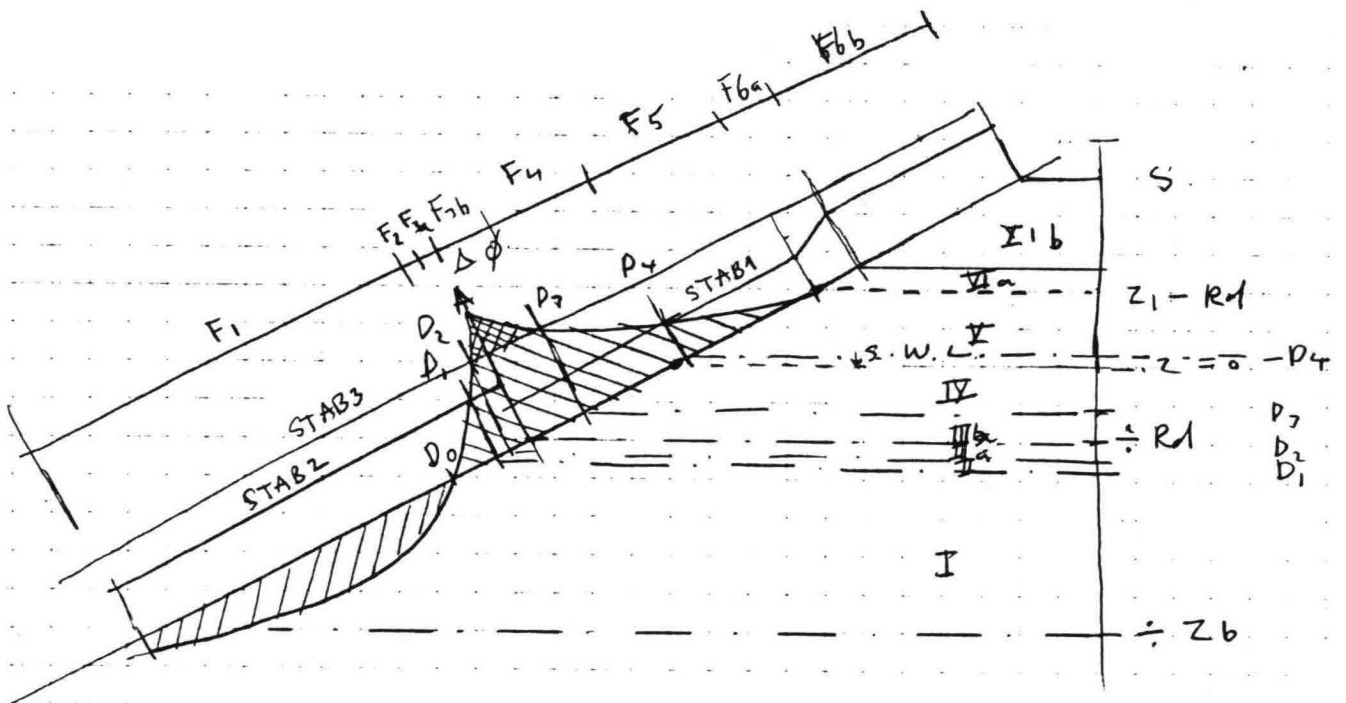
Een lange leklengte en een kleine brekerhoek (stijl golffront) resulteren tot hoge verschildrukken.

## 5. STABILITEITSCRITERIA

Bij de beoordeling van de steenbekleding op zich, komen in het algemeen twee stabiliteitseisen naar voren; evenwicht loodrecht op het talud, het zogenaamde uitlichten van stenen, het evenwicht evenwijdig aan het talud, het afglijden van de bekleding.

In deze notitie zullen we ons alleen met het laatst genoemde mechanisme bezighouden. Het beoordelen van de stabiliteit tegen uitlichten is van een dusdanige complexiteit, dat een behandeling hier, te veel ruimte zou vergen.

Teneinde te komen tot een totaal beoordeling van de stabiliteit tegen afschuiven, dienen we eerst enkele meer globale aanduidingen te specificeren van de potentiële stabiliteit voor elk punt van de bekleding



figuur 5. Karakteristieke verschuldruk-verdeling

Als bezwijkcriterium voor een punt zullen we dat van Coulomb aanhouden, met verwaarlozing van de cohesieterm.

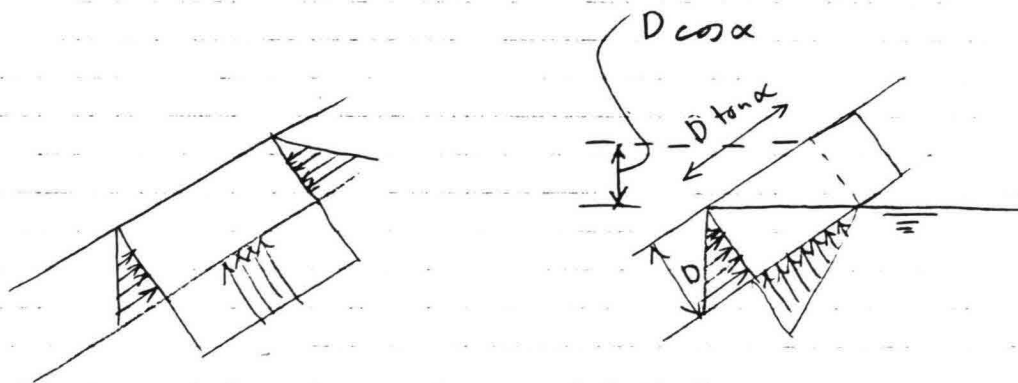
$$\sigma = \sigma_n \tan \phi$$

Vervolgens kan onderscheid worden gemaakt tussen gebieden waar de resultante van de langs het talud gerichte component van het eigengewicht van de bekleding kleiner is dan de potentieel te ontwikkelen schuifkracht, en gebieden waar dat niet het geval is. In het eerste geval is sprake van een reserve, in het tweede geval is voor zo'n punt sprake van potentiële instabiliteit, in die zin, dat het evenwicht verzekerd moet worden door reserves in andere punten.

Ten aanzien van deze potentieel instabiele gebieden kan dan nog onderscheid gemaakt worden tussen gebieden, waar nog schuifkracht geactiveerd kan worden, en gebieden waar dat in het geheel niet meer mogelijk is, als de verschildruk groter is dan de loodrechte component van het eigen gewicht van de bekleding.

Om deze gebieden vast te stellen is het nodig om onderscheid te maken tussen bekleding in het golfoploop gebied, (boven het brekerpunt), en stenen welke altijd geheel onder water blijven, ( zie figuur 5 en figuur 6).

Voor stenen in deze golfoploopzone, dient voor de component van het eigen gewicht evenwijdig aan het talud gerekend te worden het droog volume gewicht, terwijl voor de component loodrecht op het talud met het onderwatergewicht dient te worden gerekend. Dit in afwijking voor de stenen beneden het brekerpunt, waarvoor



figuur 6 Waterdrukken bij stenen in het golfoploopgebied.

zoals vanzelfspreekt voor beide componenten met het onderwatergewicht gerekend moet worden.

Voor het gebied boven de freatische lijn geldt, dat voor beide componenten met het droog volume gewicht gerekend moet worden, behoudens een kleine overgangszone net boven de freatische lijn, waar de stenen door hun schuine ligging voor een deel onder water steken, hier wordt een gemiddelde waarde aangehouden.

We komen zo tot de volgende stabiliteitsgrenzen.

- 1) voor de golfoploopzone

$$\{\Delta D \cos \alpha - \Delta \Phi\} \tan \varphi < (\Delta + 1) D \sin \alpha$$

Of ook

$$\Delta \Phi < D \{ \Delta \cos \alpha - (\Delta + 1) \sin \alpha / \tan \varphi \}$$

- 2) Beneden het brekerpunt

$$\{\Delta D \cos \alpha - \Delta \Phi\} \tan \varphi < \Delta D \sin \alpha$$

Of ook

$$\Delta \Phi < \Delta D \{ \cos \alpha - \sin \alpha / \tan \varphi \}$$

- 3) Overschrijden van het blokgewicht

$$\Delta \Phi < \Delta D \cos \alpha$$

Zoals reeds in figuur 5 aangegeven, kunnen op grond van de hier aangegeven grenzen, in het meest algemene geval, een zestal gebieden worden onderscheiden.

- Zone 1 Van de onderzijde van de bekleding tot punt D1, waarbij D1 wordt bepaald aan de hand van het tweede stabiliteitscriterium  $\Delta \Phi > \Delta D \{ \cos \alpha - \sin \alpha / \tan \varphi \}$   
De potentiële schuifspanning is hier groter dan de ontbondene langs het talud. Dit is dus een zone met reserve.
- Zone 2 Van punt D1 tot Punt D2; Waarbij D2 wordt bepaald door het punt vanaf de onderzijde gerekend waar voor het eerst het blokgewicht wordt overschreden, dus waar  $\Delta \Phi > \Delta D \cos \alpha$

- Zone 3      Wordt begrensd door D2 en D3, dit laatste is het tweede punt waar  $\Delta \Phi = \Delta D \cos \alpha$ , van beneden af gerekend.
- Zone 4      Wordt begrensd door D3 en D4, dit laatste is het punt waar  $\Delta \Phi = D \{ \Delta \cos \alpha - (\Delta + 1) \sin \alpha / \tan \varnothing \}$
- Zone 5      Wordt begrensd door D4 en Z1, de freatische lijn dus.
- Zone 6a     Bestaat uit een overgangszone, waarbij voor de voor de soortelijke massa van de bekleding gerekend wordt met  $\Delta + 1/2$ , de begrenzing ligt bij  $z = + D \cos \alpha$
- Zone 6b     Ligt boven zone 6a, tot de bovenkant van de bekleding.

De resulterende kracht voor elke zone wordt bepaald, door de integraal te berekenen van de verdeelde "belasting" over de zone.

Hierbij wordt nuttig gebruik gemaakt van de volgende formule

$$\int_a^b \exp(z/\lambda) dz = \lambda \{ \exp(b/\lambda) - \exp(a/\lambda) \}$$

Voor zone 1 geeft dit

$$F1 = \tau \int_{-Zb}^{D1} \{ \Delta D \sin \alpha - (\Delta D \cos \alpha - \Delta \Phi) \tan \varnothing \} dy$$

$$(dz = \sin \alpha dy)$$

$$F1 = \tau \int_{-Zb}^{D1} \{ \Delta D - (\Delta D / \tan \alpha - \Delta \Phi / \sin \alpha) \tan \varnothing \} dz$$

Een complicatie hierbij is, dat de integraal van  $-Zb+Rd$  tot  $D1$  niet uit een enkele functie bestaat. We dienen dus hierbij eerst tot aan  $-Hb \tan \alpha \tan \beta$  te integreren voor de functie in gebied 1 volgens de oplossing van Wolsink, en vervolgens vanaf dat punt tot  $D1$  voor gebied 2 van deze oplossing.

Voor de positie van  $D1$  is uitgegaan van het vaste assenstelsel in figuur 5; dat wil zeggen, t.o.v. de stilwaterlijn. Hierbij liggen onderkant bekleding  $Zb$  en bovenkant  $S$  dus vast. Voor het verwerken van de oplossing van  $\Phi$  is echter nog een translatie verwerkt, daar deze oplossing is gegenereerd t.o.v. het brekerpunt, of ook het rundownpunt.

Uitgeschreven zijn de oplossingen ;

$$F1 = \tau \{ \Delta D(1 - \tan\phi / \tan\alpha) * (D1 + Zb) + \\ \lambda \tan\phi / \sin\alpha \{ A[\exp(-\tan\alpha \tan\beta Hb / \lambda) - \exp(-(Zb - Rd) / \lambda)] + \\ C[\exp((D1 + Rd) / \lambda) - \exp(-\tan\alpha \tan\beta Hb / \lambda)] + \\ -DE[\exp(-(D1 + Rd) / \lambda) - \exp(\tan\alpha \tan\beta Hb / \lambda)] \} \}$$

$$F2 = \tau \{ \Delta D(1 - \tan\phi / \tan\alpha) * (D2 - D1) + \\ \lambda \tan\phi / \sin\alpha \{ C[\exp((D2 + Rd) / \lambda) - \exp((D1 + Rd) / \lambda)] + \\ -DE[\exp(-(D2 + Rd) / \lambda) - \exp(-(D1 + Rd) / \lambda)] \} \}$$

$$F3a = \tau \Delta D(-Rd - D2)$$

$$F3b = \tau (\Delta + 1) D(D3 + Rd)$$

$$F4 = \tau \{ D(\Delta + 1 - \Delta \tan\phi / \tan\alpha) * (D4 - D3) + \\ \lambda \tan\phi / \sin\alpha \{ E[\exp((D4 + Rd) / \lambda) - \exp((D3 + Rd) / \lambda)] + \\ -F[\exp(-(D4 + Rd) / \lambda) - \exp(-(D3 + Rd) / \lambda)] \} \}$$

$$F5 = \tau \{ D(\Delta + 1 - \Delta \tan\phi / \tan\alpha) * (Z1 - Rd - D4) + \\ \tan\phi / \sin\alpha \{ E[\exp(Z1 / \lambda) - \exp((D4 + Rd) / \lambda)] + \\ -F[\exp(-Z1 / \lambda) - \exp(-(D4 + Rd) / \lambda)] \} \}$$

$$F6a = \tau \{ (\Delta + 1/2) * D * (1 - \tan\phi / \tan\alpha) * (D \cos\alpha) \}$$

$$F6b = \tau \{ (\Delta + 1) * D * (1 - \tan\phi / \tan\alpha) * (S - Z1 + Rd - D \cos\alpha) \}$$

Teneinde een berekening te kunnen maken dienen we de ligging van de punten D1 t/m D4 te bepalen.

We weten, dat D1 en D2, als ze bestaan in het interval

$-Hb \tan\alpha \tan\beta - Rd < Z < -Rd$  liggen, zodat we de eis direct kunnen uitschrijven in de formules voor gebied 2 van de oplossing van Wolsink n.l.;

$$\Delta D \{ \cos\alpha - \sin\alpha / \tan\phi \} = C \exp((D1 + Rd) / \lambda) + D E \exp(-(D1 + Rd) / \lambda)$$

en

$$\Delta D \cos\alpha = C \exp((D2 + Rd) / \lambda) + D E \exp(-(D2 + R) / \lambda)$$

Voor de punten D3 en D4 moeten we de oplossing in gebied 3 onderzoeken, en dit levert de volgende vergelijkingen;

$$\Delta D \cos\alpha = E \exp((D3 + Rd) / \lambda) + F \exp(-(D3 + Rd) / \lambda)$$

en

$$D \{ \Delta \cos\alpha - (\Delta + 1) \sin\alpha / \tan\phi \} = E \exp((D4 + Rd) / \lambda) + F \exp(-(D4 + Rd) / \lambda)$$



Teneinde te bepalen of de punten D1, D2, D3 en D4 wel bestaan, worden 4 stabiliteitsklassen gedefinieerd.

$$\text{Stab} = 1 ; \Delta \Phi_{\max} < D \{ \Delta \cos\alpha - (\Delta + 1) \sin\alpha / \tan\phi \}$$

In dit geval is het talud altijd stabiel, D1, D2, D3 en D4 vallen voor de berekening samen met het Rundownpunt, en zijn dus -Rd.

$$\text{Stab} = 2 ; D \{ \Delta \cos\alpha - (\Delta + 1) \sin\alpha / \tan\phi \} < \Delta \Phi_{\max} < \Delta D \{ \cos\alpha - \sin\alpha / \tan\phi \}$$

Alleen in de oploophoeft wordt de wrijving overschreden; Rekentechnisch vallen D1, D2 en D3 samen met het Rundownpunt -Rd. Alleen D4 dient berekend te worden.

$$\text{Stab} = 3 ; \Delta D \{ \cos\alpha - \sin\alpha / \tan\phi \} < \Delta \Phi_{\max} < \Delta D \cos\alpha$$

Zowel in de oploophoeft als beneden het Rundownpunt wordt de wrijving overschreden, de punten D2 en D3 vallen voor de berekening samen met het Brekerpunt (-Rd). Alleen D1 en D4 dienen te worden bepaald.

$$\text{Stab} = 4 ; \Delta D \cos\alpha < \Delta \Phi_{\max}$$

De maximale verschuifdruk is groter dan het blokgewicht, in een beperkte zone kan zelfs geen enkele wrijving geactiveerd worden. Alle punten D1 t/m D4 hebben reële waarden, en dienen bepaald te worden.

De bepaling van D1 t/m D4 is op zich niet eenvoudig analytisch uit te voeren, daarom is het voor een praktische uitwerking beter om hiervoor een numerieke bepaling te doen. Bijvoorbeeld Regula Falsi of iets dergelijks.

## 6. STABILITEIT VAN DE BEKLEDING

Als resultaat van de sommaties zoals in par. 5 beschreven, zullen de uitkomsten van F1, F2, F6a, en F6b een negatieve uitkomst hebben, hetgeen betekent dat er voor deze zone's nog reserve aanwezig is. De bijdragen van F2, F3a, F3b en F4 zijn positief, en de grootte hiervan geeft aan hoeveel kracht in de betreffende zone's te weinig kan worden ontwikkeld, om evenwicht te verzekeren.

### 6.1 Losse blokken

Bij een bekleding van losse blokken, zonder kabels of verbindingen d.m.v. geotextiel, dient de instabiele zone in evenwicht te worden gebracht door de reserve in zone 1; door kracht F1. In het geval deze in grootte ontoereikend is, dient het verschil d.m.v. een deugdelijke teenconstructie te worden geleverd. Voor een bekleding zonder een speciale teenconstructie zou de stabiliteitsfactor tegen afglijden als volgt kunnen worden gedefinieerd.

$$\tau_1 = |F1| / (F2+F3+F4)$$

Voor een constructie zonder speciale teenconstructie dient  $\tau_1 > 1$  te zijn.

### 6.2 Blokkenmatten

Bij een gekoppelde bekleding met de mogelijkheid om trek op te nemen, bevindt de reserve zich in de zone's 5 en 6, en kan een stabiliteitsfactor  $\tau_2$  worden gedefinieerd volgens

$$\tau_2 = |F5+F6| / (F2+F3+F4)$$

Ook hier dient als eis te worden gesteld, dat  $\tau_2 > 1$

### 6.3 Verankering of teenconstructie

In het geval dat  $r_1$  resp  $r_2 < 1$ , dient een deugdelijke teenconstructie, respectievelijk verankering te worden ontworpen. Hierbij kan de belasting hierop worden berekend volgens;

$$F_{teen} = F_1 + F_2 + F_3 + F_4$$

Bij een blokkenmat kan de verankeringskracht worden berekend volgens;

$$F_{anker} = F_2 + F_3 + F_4 + F_5 + F_6$$

### 7.0 COMPUTERMODEL

Teneinde de hier vermelde rekenwijze, welke toch vrij complex van structuur is, sneller toegankelijk te maken, is gekozen voor een implementatie van de formules in een Pascal programma op een micro-computer, zodat voor een praktijksituatie, snel een aantal alternatieven geëvalueerd kan worden.

Het betreffende programma is bij Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkund, Hoofdafdeling Waterbouw ter beschikking.

## 8.0 RESULTATEN

Teneinde de resultaten van het programma grafisch in beeld te brengen is er voor gekozen, om voor een denkbeeldige constructie voor een aantal te variëren parameters, te berekenen wat de afmetingen van de bekleding zouden moeten zijn, uitgedrukt in de diepte  $Z_b$ , en de hoogte  $S$ , om zonder constructieve verankering, en of teenconstructie evenwicht van de bekleding tegen afschuiven te verzekeren.

Als uitgangsconstructie is gekozen voor een talud 1 : 3, met een bekledingsdikte van 0.20 m, een blokgewicht uitgedrukt in het dimensieloos eigengewicht van  $\Delta = 1.2$ , en een wrijvingshoek van  $\phi = 25^\circ$ .

Hierop is als belasting een waterspiegeldaling van 1.0 m aangebracht. (Een scheepvaartgolf).

Voor die gevallen, dat met een windgolf is gerekend, is ook uitgegaan van de  $R_d$  diepte van 1.0 m, met een brekerhoogte van dezelfde grootte.

De resultaten zijn grafisch uitgewerkt in de bijlagen 1 t/m 7, waarbij e.e.a. zoveel mogelijk dimensieloos is weergegeven.

In de bijlagen 1 en 2 zijn voor een teruggetrokken golf de teendiepten, oploophoogte weergegeven, als functie van de lek lengte, voor diverse wrijvingshoeken tussen bekleding en ondergrond. Zoals is waar te nemen zullen bij grote lek lengte, resp kleine wrijvingshoek al snel onrealistisch grote waarden van  $Z_b$  en  $S$  nodig zijn, zodat hierbij een verankering of teenconstructie zal dienen te worden overwogen.

In Bijlage 3 is e.e.a uitgewerkt voor een windgolf, en diverse brekerhellingen. Hieruit blijkt, dat voor de teendiepte een horizontale waterspiegeldaling ( $\beta = 90^\circ$ ) vrijwel de meest kritieke schematisering is. Bij kleinere hellingen zal de extra waterdruk op de bekleding er vrij snel voor zorgen, dat extra wrijving in zone 1 kan worden geactiveerd, zodat het negatieve effect van de grotere verschuldruk wordt gecompenseerd.

Voor de oploophoogte  $S$  ligt dit iets anders, omdat hier geen compenserende extra wrijving wordt geactiveerd. Voor  $S$  is een situatie met een Brekerhelling van  $70^\circ$  het meest ongunstig. De oploophoogte

hoogte bij een blokkenmat zonder verankering dient dan ca 35 % groter te zijn.

In de bijlagen 4 en 5 is te zien, dat de invloed van de talud helling vrijwel tegengesteld is aan die van de wrijvingshoek. In bijlage 6 is de invloed van het blokgewicht te zien, en in bijlage 7 is aangegeven hoe de invloed van de Rundown is.

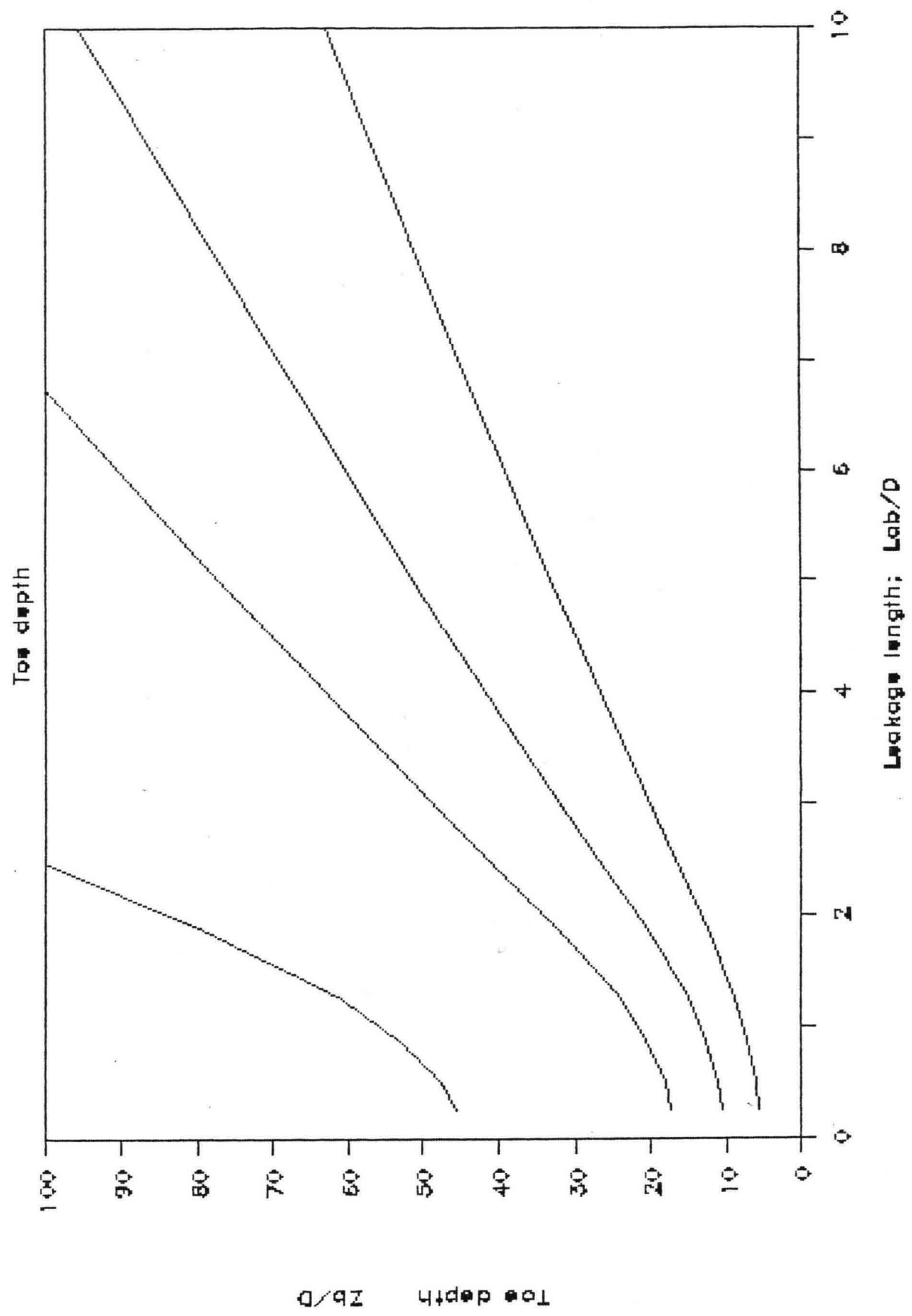
## 9. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

- Teenconstructies en/of verankeringen zijn vaak constructies onontbeerlijk.
- Belasting door waterspiegeldaling (scheepsgolf) kan bij een gelijke "amplitude" schadelijker zijn dan een windgolf
- Wrijving Blokken - Ondergrond, zou wel eens een kleinere wrijvingshoek kunnen activeren, dan die voor de ondergrond zelf wordt bepaald. Voorzichtigheidshalve zou ik willen adviseren voorlopig niet verder te gaan dan  $\phi = 2/3 \phi_f$
- Voor de wrijvingshoek tussen Blokken en geotextiel zouden per constructie proefjes moeten worden gedaan. Bedacht moet worden dat hier wel eens een verrassend kleine wrijvingshoek uit zou kunnen volgen.
- Bij dunne bekledingen van losse blokken zou ook het mechanisme uitknikken van de bekleding nader onderzocht dienen te worden.

## 10. LITERATUUR

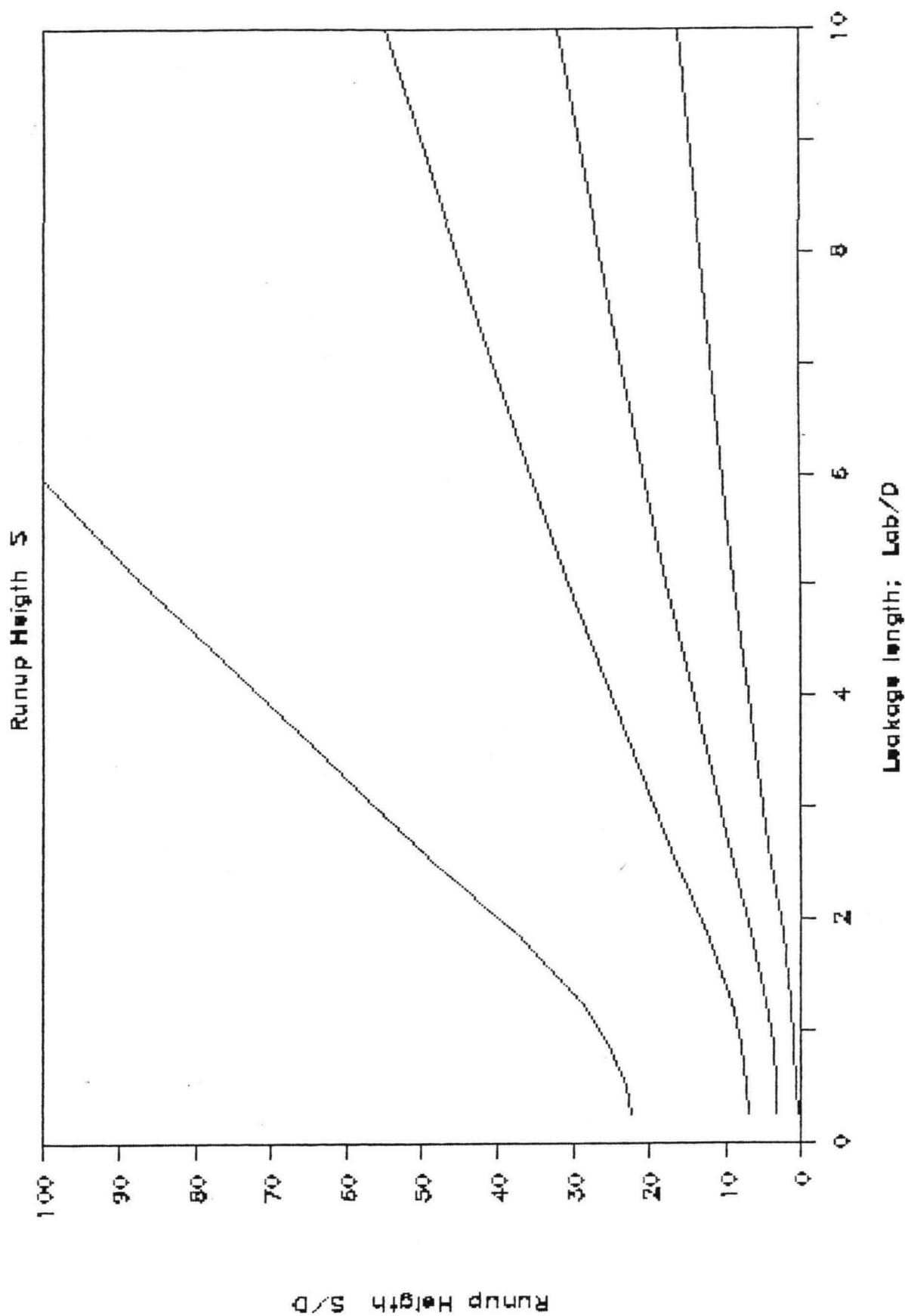
- [ 1 ]      Banach, L.  
Evaluation of measurements of the wave pressures  
on a slope  
H 195-20 Waterloopkundig Laboratorium; 1987
- [ 2 ]      Hoogeveen, R.  
Notitie over afschuiven van de toplaag door een  
golfaanval  
Concept-rapport CO-416641/17  
Grondmechanica Delft; Delft 1986
- [ 3 ]      Meijers, P.  
Afschuiven van taludbekledingen  
rapport CO 286001/2  
Grondmechanica Delft; Delft 1987
- [ 4 ]      v.d. Meer, J.W.  
Taludbekleding van gezette steen  
bezwijken van zettingen; overzicht van bestaande Kennis  
M 1795/M1881 deel XI Waterloopkundig Laboratorium,  
CO 258902 Grondmechanica Delft; 1985

# Slide down of Revetments



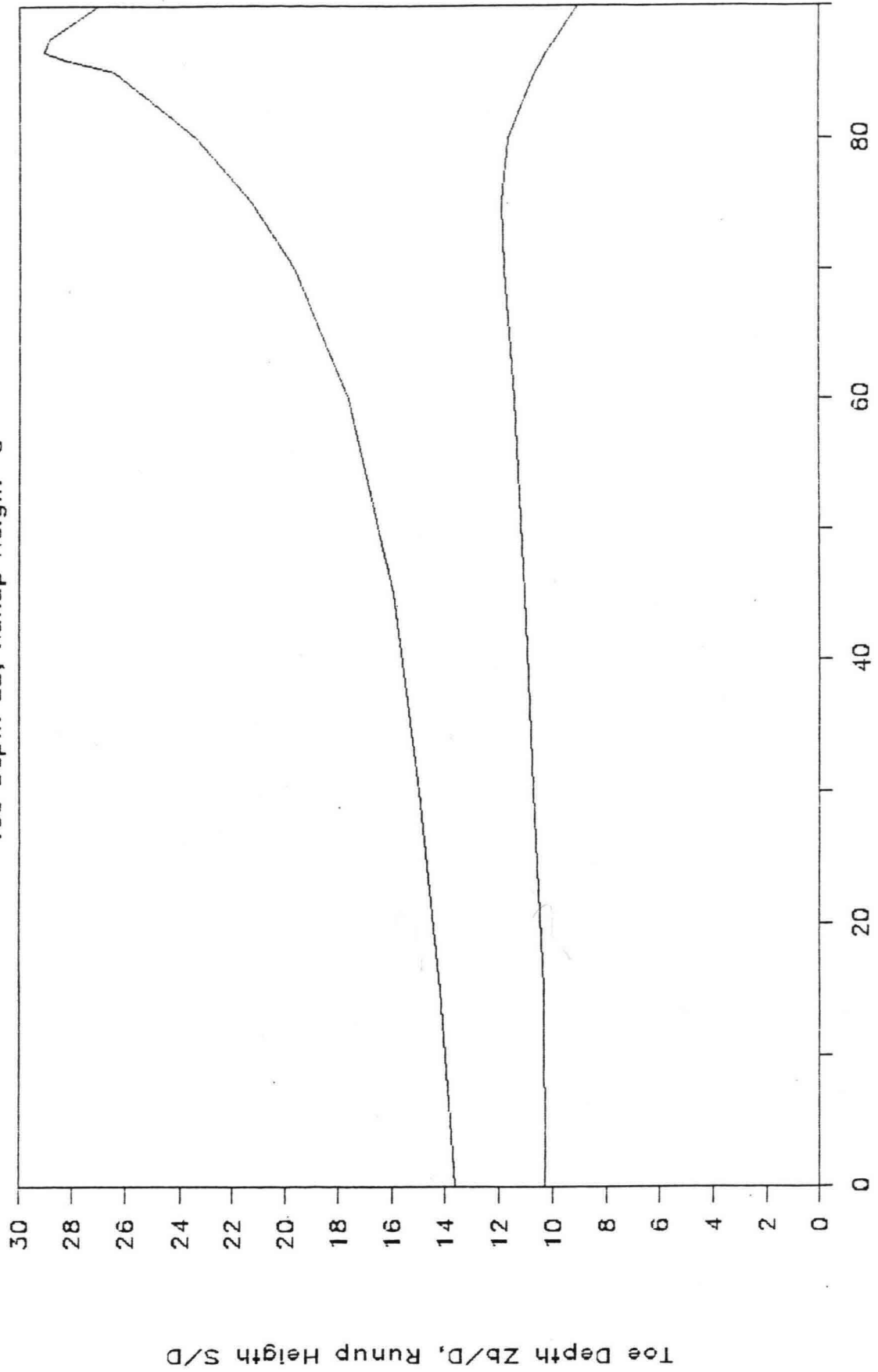


# Slide down of Revetments



# Slide down of Revetments

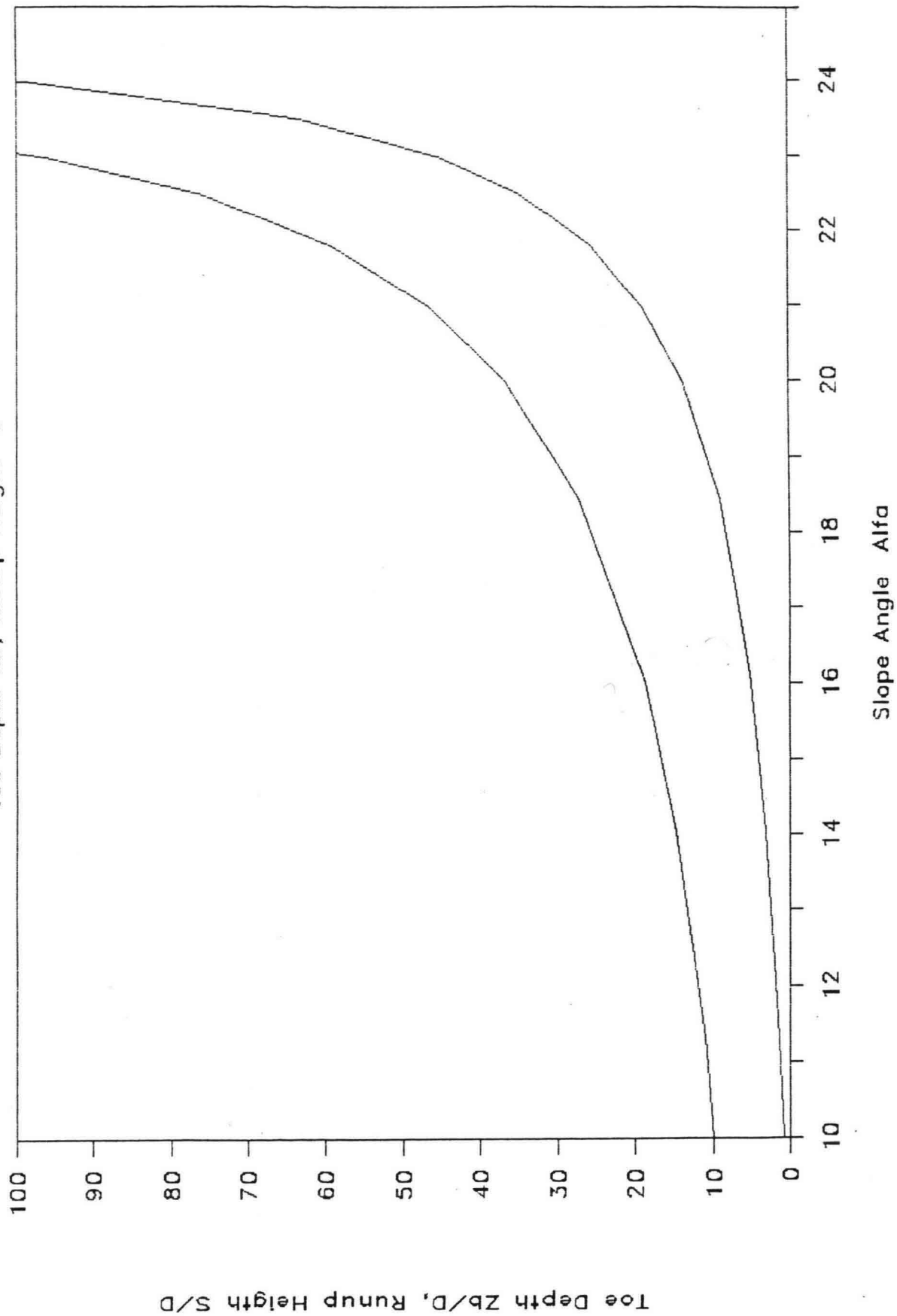
Toe Depth Zb, Runup Height S



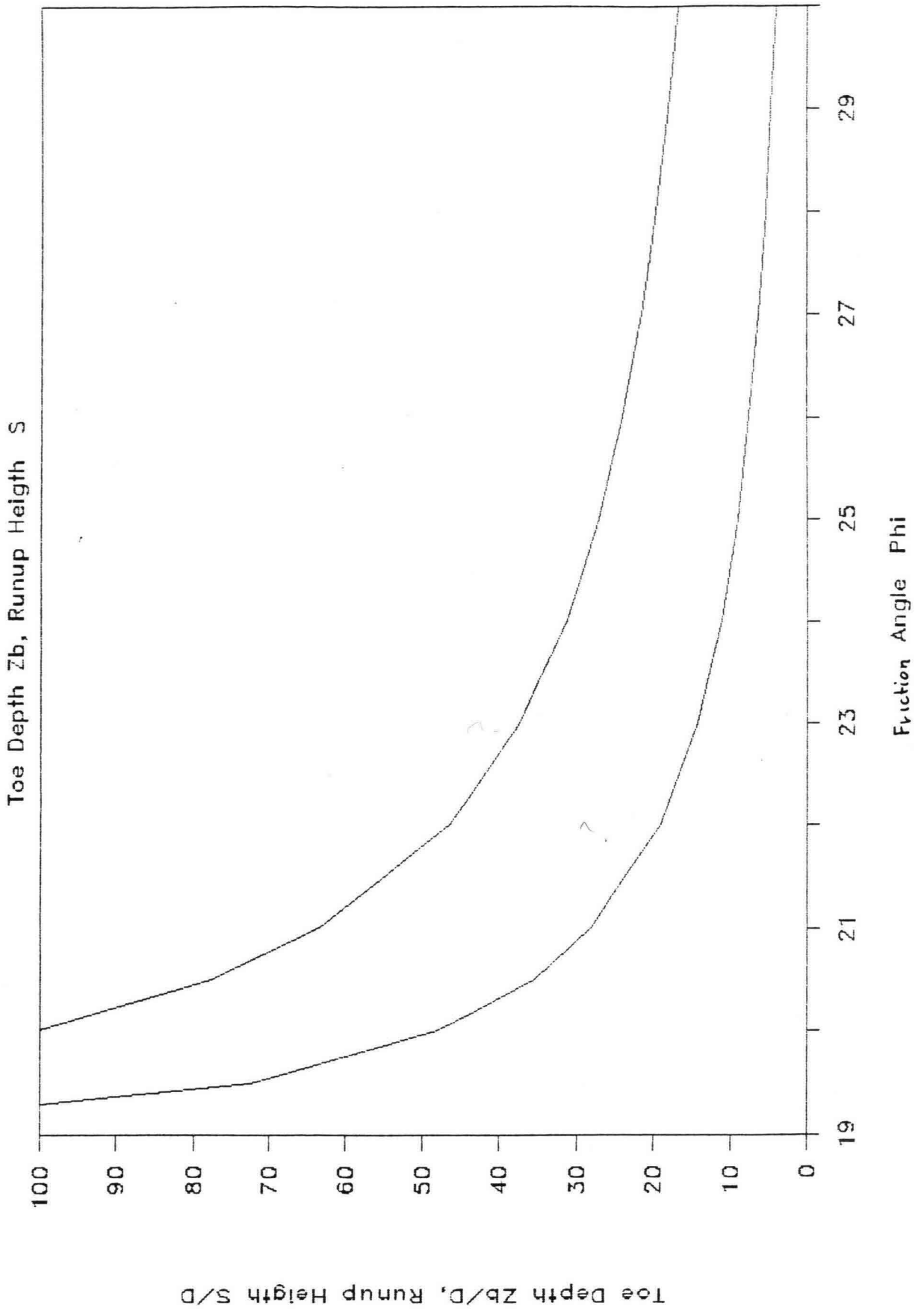
Breaker Angle Beta

# Slide down of Revetments

Toe Depth  $Z_b$ , Runup Height  $S$

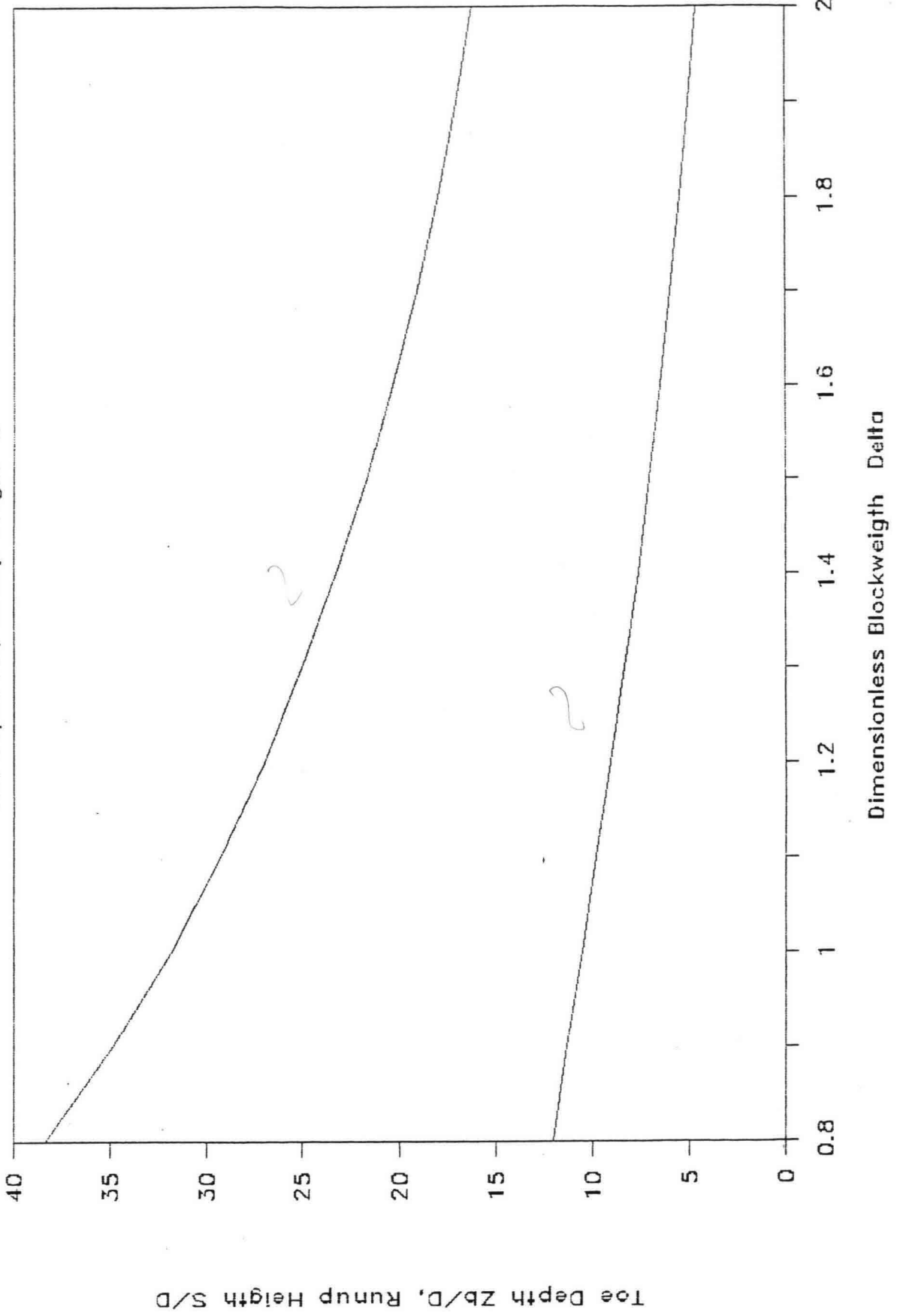


# Slide down of Revetments



# Slide down of Revetments

Toe Depth Zb, Runup Height S



# Slide down of Revetments

