

M.R. vander Drees de Bye
& Dienst
Den Haag
(56) B



waterloopkundig laboratorium
delft hydraulics laboratory

begin van beweging van bodemmateriaal
literatuur 1971-1974

speurwerkverslag

S 159 deel II

september 1976

$$u_* = \sqrt{ghl}$$

$$\psi = \frac{u_*^2}{\Delta g D} = \frac{hl}{\Delta D}$$

begin van beweging van bodemmateriaal
literatuur 1971-1974

H. N. C. Breusers

speurwerkverslag

S 159 deel II

september 1976

INHOUD

blz.

<u>1 Inleiding</u>	1
<u>2 Begin van beweging - algemeen</u>	2
<u>3 Invloed poriënwaterstroming</u>	8
<u>4 Samenstelling en stabiliteit van pantserlagen</u>	11
<u>5 Erosie van kohesief materiaal</u>	17

BEGIN VAN BEWEGING VAN BODEMMATERIAAL. LITERATUUR 1971-1974

1 Inleiding

Sinds het uitgeven van de literatuurstudie S 159-I "Begin van beweging van bodemmateriaal" (december 1971), zijn een aantal artikelen over dit onderwerp verschenen, die een aanvulling op deze studie wenselijk maakten. Voortgang is vooral geboekt in de sectoren: definitie begin van beweging; invloed van de waterstroming in het zandbed; vorming en stabiliteit van pantserlagen en stabiliteit van kohesief materiaal.

*grover fraktioneermateriaal
zand uitgespoelde pipe piles*

2 Begin van beweging - algemeen

White (1970) deed proeven met water en olie (viskositeit $\nu = 0.08$ Stokes) als vloeistof. Voor de resultaten zie figuur 2.1, waaruit blijkt dat de invloed van de viskositeit voldoende in het getal Re_{*} wordt weergegeven. De proeven kunnen beschreven worden met 2 rechten:

$$0,04 < Re_{*} < 3,5 \quad \psi = 0,07 Re_{*}^{-1/2}$$

$$3,5 < Re_{*} < 500 \quad \psi = 0,035 Re_{*}^{1/10}$$

Vergelijk hiermee de relaties gegeven door Bonnefille (1968) met $D_{*} = (\Delta g / \nu^2)^{1/3} \cdot D$ en Re_{*} als parameters:

$$0,03 < Re_{*} < 12 \quad D_{*} = 2,5 Re_{*}^{4/5}$$

$$12 < Re_{*} < 20.000 \quad D_{*} = 3,8 Re_{*}^{5/8}$$

Voor vaste Δ en ν volgt hieruit:

$$Re_{*} \text{ klein: } (< 3,5 \text{ à } 12) \left\{ \begin{array}{l} \text{Bonnefille } u_{*} \sim D^{0,25} \\ \text{White } u_{*} \sim D^{0,2} \end{array} \right.$$

$$Re_{*} \text{ groot: } (> 3,5 \text{ à } 12) \left\{ \begin{array}{l} \text{Bonnefille } u_{*} \sim D^{0,58} \\ \text{White } u_{*} \sim D^{0,62} \end{array} \right.$$

Uit de proeven volgt dus een geringe toename van ψ met afnemende Re_{*} waarbij u_{*} weinig toeneemt met D voor $Re_{*} < 3,5 \text{ à } 12$.

Ashida en Bayazit (1973) hebben de invloed van de verhouding waterdiepte/korrelgrootte h/D onderzocht. ψ was $\approx 0,05$ voor $h/D > 5$, maar voor kleinere waarden nam ψ toe tot ca. $0,07$ bij $h/D = 1$. ψ wordt kennelijk beïnvloed door de verhouding wervelgrootte/korrel diameter (zie verslag S 159-I).

Het begin van beweging is kwantitatief onderzocht door Grass (1970) met 5 zandsoorten tussen 90 en 195μ . De bodem was daarbij hydraulisch glad, zodat de schuifspanning bepaald kon worden uit de snelheden in de viskeuze sublaag met de waterstofbellen-methode. Bepaald werden de gemiddelde waarde $\bar{\tau}$ en de standaardafwijking σ van de bodemschuifspanning ($\sigma / \bar{\tau} \approx 0,4$). Tevens werd gekeken waar korrels bewogen en op die plaats werd de momentane waarde van de bodemschuifspanning bepaald (indien mogelijk door de aanwezigheid van de bellengene-

rator) en gelijkgesteld aan de kritieke schuifspanning. Van deze laatste werd de gemiddelde waarde $\bar{\tau}_c$ en de standaardafwijking σ_c bepaald.

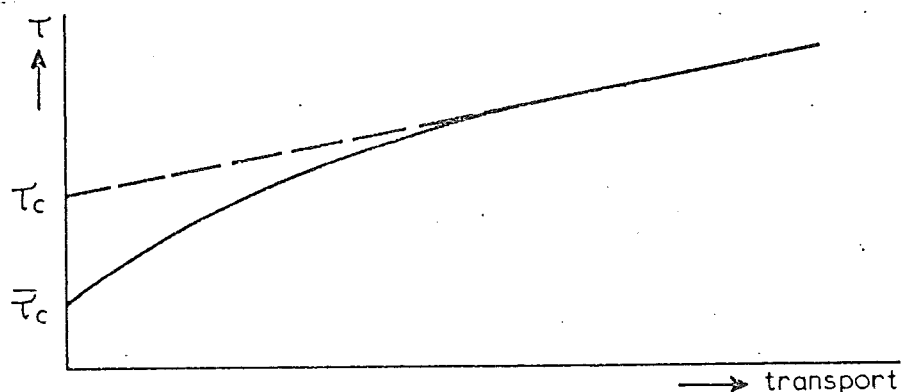
Resultaat: $\sigma / \bar{\tau} = 0,4$ en $\sigma_c / \bar{\tau}_c \approx 0,3$. $\bar{\tau}_c$ varieerde weinig ($\bar{\tau}_c = 2,3 \pm 0,2$ dyne/cm² voor zand met $D = 90 \dots 195 \mu$) (zie figuur 2.2).

Stel nu dat "begin van beweging" wordt bepaald door:

$$\bar{\tau} + n \sigma = \bar{\tau}_c - n \sigma_c \rightarrow \bar{\tau} = \bar{\tau}_c (1 - 0,3 n)(1 + 0,4 n)^{-1}.$$

Dit geeft een relatie $\psi - Re_x$ voor $n = 0 \dots 1$ (figuur 2.3). De kromme van Shields komt in dit gebied overeen met $n = 5/8$ ofwel $\bar{\tau} = 0,65 \bar{\tau}_c$. Stel dat $n = 1$ "altijd stabiel" betekent dan is daarbij $\bar{\tau} = 0,5 \bar{\tau}_c$. Er is dus een gebied van τ -waarden tussen begin van beweging eerste korrel tot "algemene beweging".

Paintal (1971) heeft proeven uitgevoerd met grof materiaal ($D_{50} = 2,5; 7,95$ en 22 mm) bij kleine transporten. De korrelatie $\psi - \phi$, met $\psi = u_x^2 / \Delta g D$ en $\phi = q_s / (\Delta g D^3)^{1/2}$ en gebaseerd op metingen van Paintal en anderen, vertoonde een knik bij $\phi = 10^{-2}$, respectievelijk $\psi = 0,05$ (zie figuur 2.4b). Bij kleinere waarden van ψ nam het transport sterk af ($\phi \sim \psi^{16}$), doch een duidelijke ondergrens werd niet gevonden. Bij lineair uitzetten van q_s tegen ψ (methode Shields) werd door extrapolatie $\psi \approx 0,05$ gevonden (zie figuur 2.4c). De belangrijkste konklusie is dat onder de kritieke waarde van Shields nog een gebied van schuifspanningen is met een meetbaar transport. Een kwantitatieve definitie van "transport" is dus nodig om τ_c te definiëren.



Günter (1971) definiëert 2 waarden van de kritieke schuifspanning, namelijk:

τ_c = de waarde van de bodemschuifspanning τ_o , waarbij gemiddeld 50 % van de korrels bewegen, en

$\bar{\tau}_c$ = de waarde van τ_o , waarbij de maximale waarde van de bodemschuifspanning gelijk is aan de boven gedefiniëerde τ_c .

Volgens Günter komt de eerste definitie overeen met Shields. Volgens hem is $\bar{\tau}_c/\tau_c$ een functie van het getal van Reynolds (figuur 2.5) op grond van metingen uit de literatuur.

Müller, Gyr en Dracos hebben de kracht op een alleenstaande bol gemeten en geven wat spekulatieve beschouwingen over de kritieke schuifspanning.

Van der Meulen (1972) rapporteert proeven met zeegrind ($D_{50} = 1,2$ en $1,65$ cm). Het bovengeschetste verloop van de τ -transportrelatie werd eveneens waargenomen (figuur 2.6). Voor $\bar{\psi}_c$, behorend bij $\bar{\tau}_c$ (respektievelijk $5,1$ en $7,6$ N/m²), werd gevonden $\bar{\psi}_c = 0,028 \pm 0,001$.

De waarde van τ_c was $1,52 \pm 0,06$ maal zo groot ofwel $\psi_c = 0,04 \pm 0,002$.

In het boek "Sedimentation" van Chen (1972) zijn een aantal bijdragen over het begin van beweging opgenomen, onder andere:

Ch 2. Lyles en Woodruff: bepaling ψ_c voor zanddeeltjes in lucht.

Gevonden werd $\psi_c = 0,032 \pm 0,003$.

Ch 3. Cheng en Clyde: metingen van weerstand en liftkracht op grote bollen.

Ch 4. Benedict-Christensen: Afschatting liftkrachten voor bollen met potentiaaltheorie. Gevonden werd $C_L = 0,2$ voor een dichte pakking.

Grass (1974) legt een relatie tussen instabiliteiten in de bewegingen in een turbulente grenslaag en het sedimenttransport. Vooral van belang zijn de "sweep" gebeurtenissen, waarbij vloeistof met grote snelheid dicht bij de wand komt en "ejections" waarbij vloeistof met relatief grote snelheid loodrecht op de wand wordt verplaatst. De eerste zijn van belang voor het transport van korrels; de laatste voor het in suspensie gaan.

Fernandez Luque (1974) heeft gemeten aan de beweging van korrels met $D = 0,9$; $1,8$ en $3,2$ mm in een gesloten leiding. Gemeten werd de bodemtransportconcentratie c_b , gedefiniëerd als het totale geprojecteerde oppervlak van de bewegende korrels per oppervlakte-eenheid. Bij een schuifspanning overeenkomend met het criterium van Shields was $c_b \approx 0,001$. De theoretische afname van τ_c met de stroomafwaartse helling β (afname evenredig met $\sin(\alpha-\beta)/\sin \alpha$) werd bevestigd indien een relatief grote waarde voor α (47°) werd aangenomen.

Helland-Hansen e.a. (1974) hebben soortgelijke proeven als Paintal uitgevoerd met grind ($D_{50} = 25$ mm). Bij afnemend debiet werd gedurende lange tijd het tran-

sport gemeten. De gemiddelde korrelgrootte van het opgevangen materiaal werd daarbij kleiner. Het transport was extreem klein (orde 1 deeltje per dag of per uur), maar nog wel gekorreleerd met het debiet c.q. de schuifspanning. De waarde van ψ bij deze lage transporten was in de orde van 0,01. Wat is nu de praktische betekenis van deze proeven? Bij een waarde van ψ van ca. 0,025, aanbevolen voor bodembeschermingen, is ϕ in de orde van 10^{-7} , zowel volgens Paintal als Helland-Hansen. Voor een steen met $D = 0,3$ m betekent dit ca. 1 steen/m'/dag. Voor een bodembescherming is dit nog wat veel. Anderzijds is hier meestal de afwijkende turbulentie c.q. de veiligheid in de ontwerpgegevens maatgevend. De proeven van Paintal en Helland-Hansen zijn echter een goede waarschuwing tegen het gebruik van Shields' kromme voor het ontwerp van bijvoorbeeld bodembeschermingen.

Literatuur

- R. BONNEFILLE 1968 L'utilisation des paramètres adimensionnelles dans l'étude de l'hydrodynamique des sédiments.
Thèse, Grenoble.
- S.J. WHITE 1970 Plane bed thresholds of fine grained sediments.
Nature, 228 (no. 5267), p. 152-153.
- A.J. GRASS 1970 Initial instability of fine bed sand.
Proc. ASCE 96 (HY 3), p. 619-632.
- A.S. PAINTAL 1971 Concept of a critical shear stress in loose boundary open channels.
J. Hydr. Res. 9 (1), p. 91-113.
- A. GÜNTER 1971 Die kritische mittlere Sohlenschubspannung bei Geschiebe Mischungen.
Mitt. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie no. 3, E.T.H., Zürich.
- A. MULLER, A. GYR, 1971 Interaction of rotating elements of the boundary layer with grains of a bed.
T. DRACOS J. Hydr. Res. 9 (3), p. 373-411.
- T. VAN DER MEULEN 1972 Begin van beweging van zeegrond in een permanente waterstroom.
Waterloopkundig Laboratorium, Verslag M 905-V.
- H.W. SHEN (ed.) 1972 Sedimentation, Fort Collins.
- K. ASHIDA 1973 Initiation of motion and roughness of flow in steep channels.
M. BAYAZIT IAHR - Istanbul, 1973, paper A 58.
- A.J. GRASS 1974 Transport of fine sand on a flat bed: Turbulence and suspension mechanics.
Euromech. 48, Copenhagen.

- R. FERNANDEZ- 1974 Erosion and transport of bed-load sediment.
LUQUE Dissertatie, T.H. Delft.
- E. HELLAND-HANSEN 1974 Sediment transport at low Shields-parameter
R.T. MILHOUS values.
P.C. KLINGEMAN Proc. ASCE 100 (HY 1), p. 261-265, (Technical note).

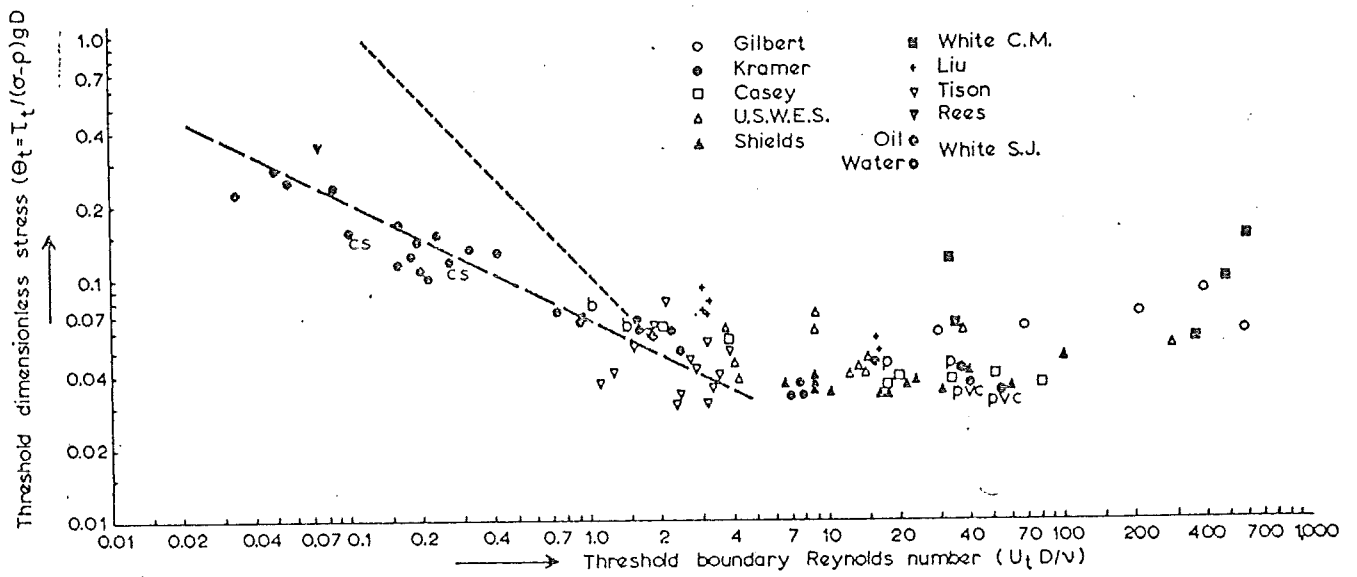


FIG. 2.1
 THE TRESHOLD OF SEDIMENT MOVEMENT AS A FUNCTION OF THE BOUNDARY REYNOLDS NUMBER
 b, BALLOTINI; cs, CRUSHED SILICA; p, POLYSTYRENE; pvc, WELVIC P.V.C. (WHITE 1970)

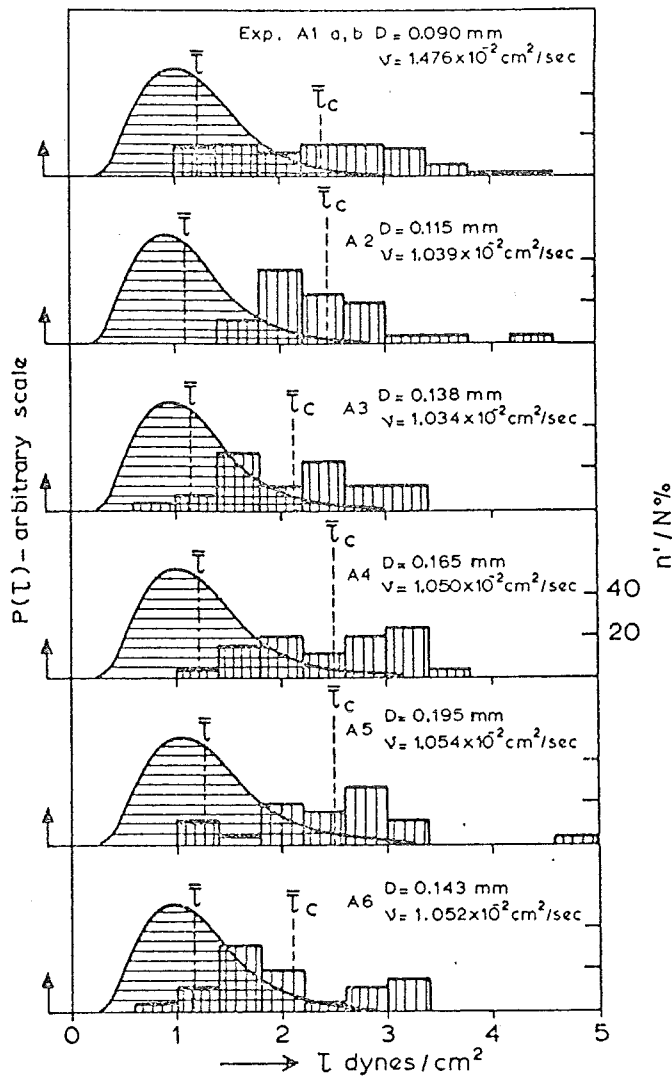


FIG. 2.2
DISTRIBUTIONS OF INSTANTANEOUS BED
SHEAR STRESS FOR TWO DIMENSIONAL
CHANNEL FLOW (SMOOTH CURVES)
PLACED RELATIVE TO MEASURED DIS-
TRIBUTIONS OF INSTANTANEOUS CRITI-
CAL BED SHEAR STRESS ASSOCIATED
WITH BED MATERIAL (BLOCK HISTOGRAMS)
(GRASS 1970)

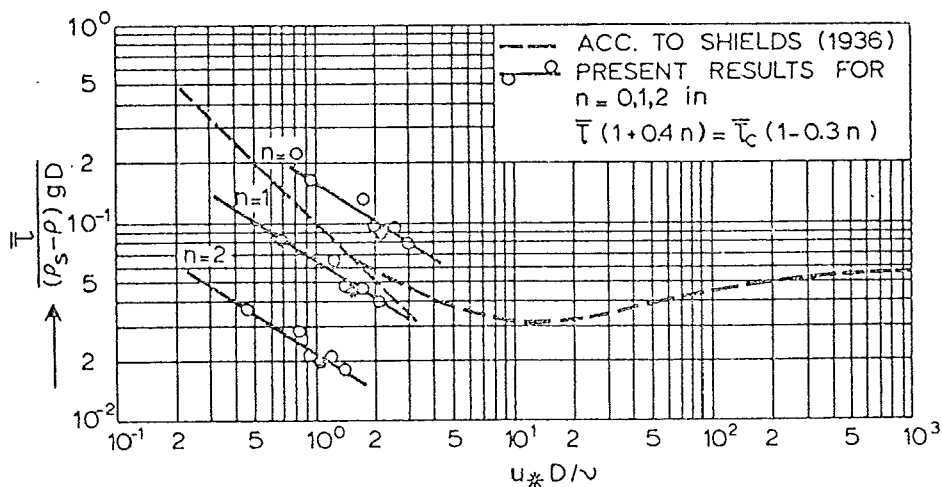


FIG. 2.3
COMPARISON OF PRESENT RESULTS WITH SHIELDS
CURVE USING SHIELDS PARAMETERS
(GRASS 1970)

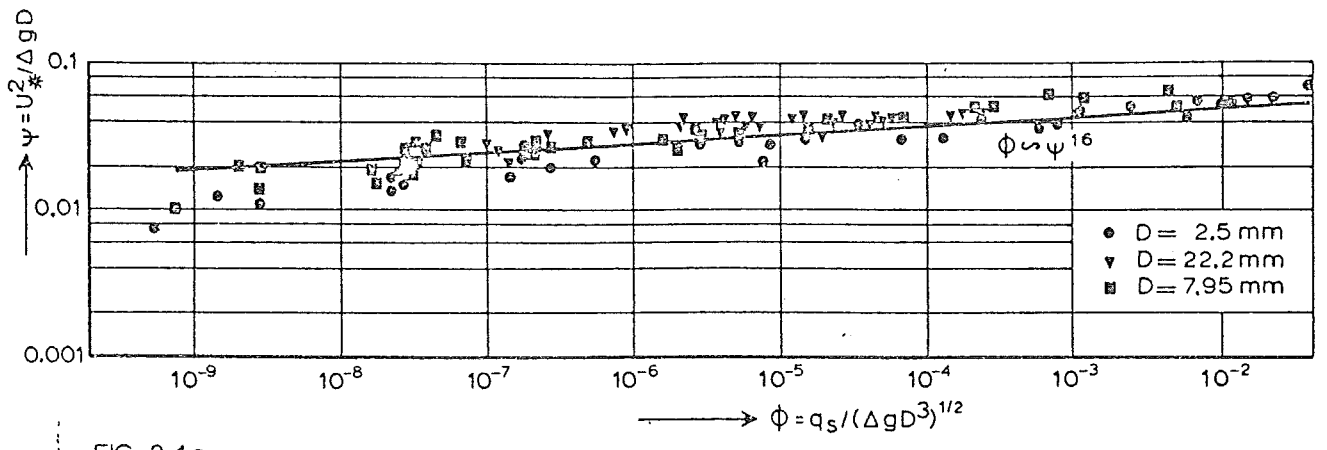


FIG. 2.4a
 VARIATION OF BED LOAD TRANSPORT AT LOW SHEAR VALUES
 (PAINAL 1971)

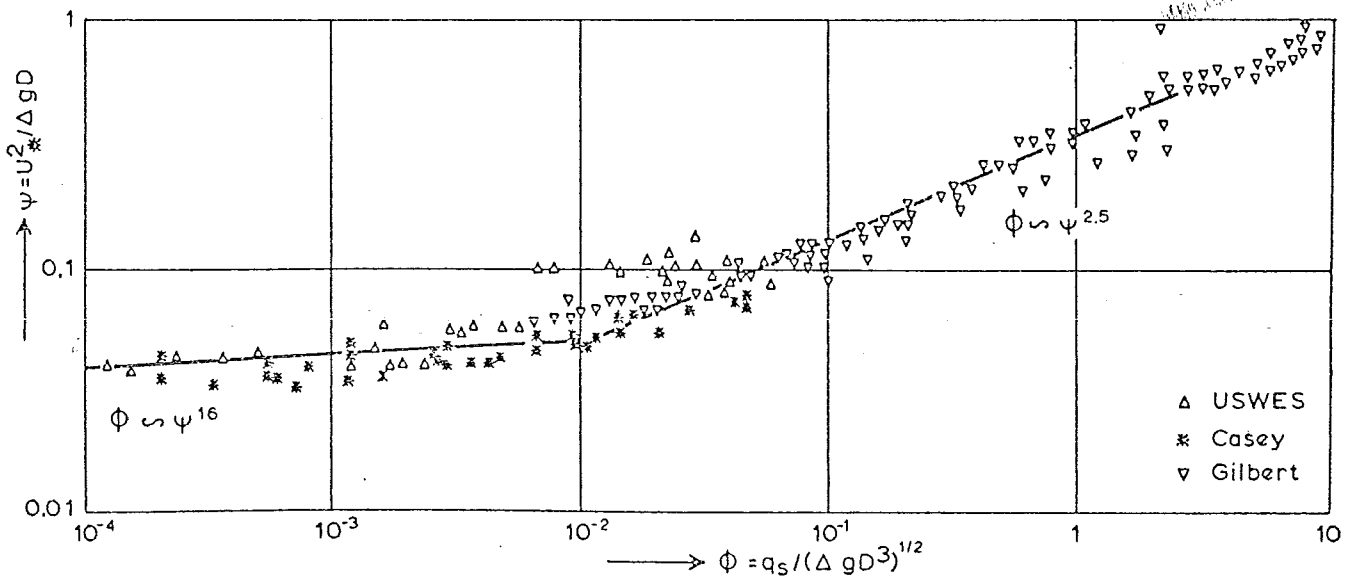


FIG. 2.4b
 VARIATION OF BED LOAD TRANSPORT AT HIGH SHEAR VALUES
 (PAINAL 1971)

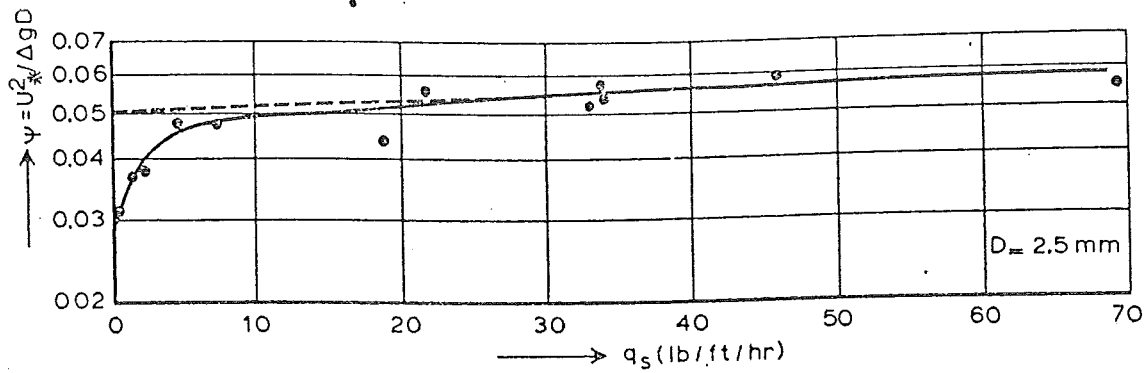


FIG. 2.4 c
DETERMINATION OF CRITICAL SHEAR STRESS
(PAINTAL 1971)

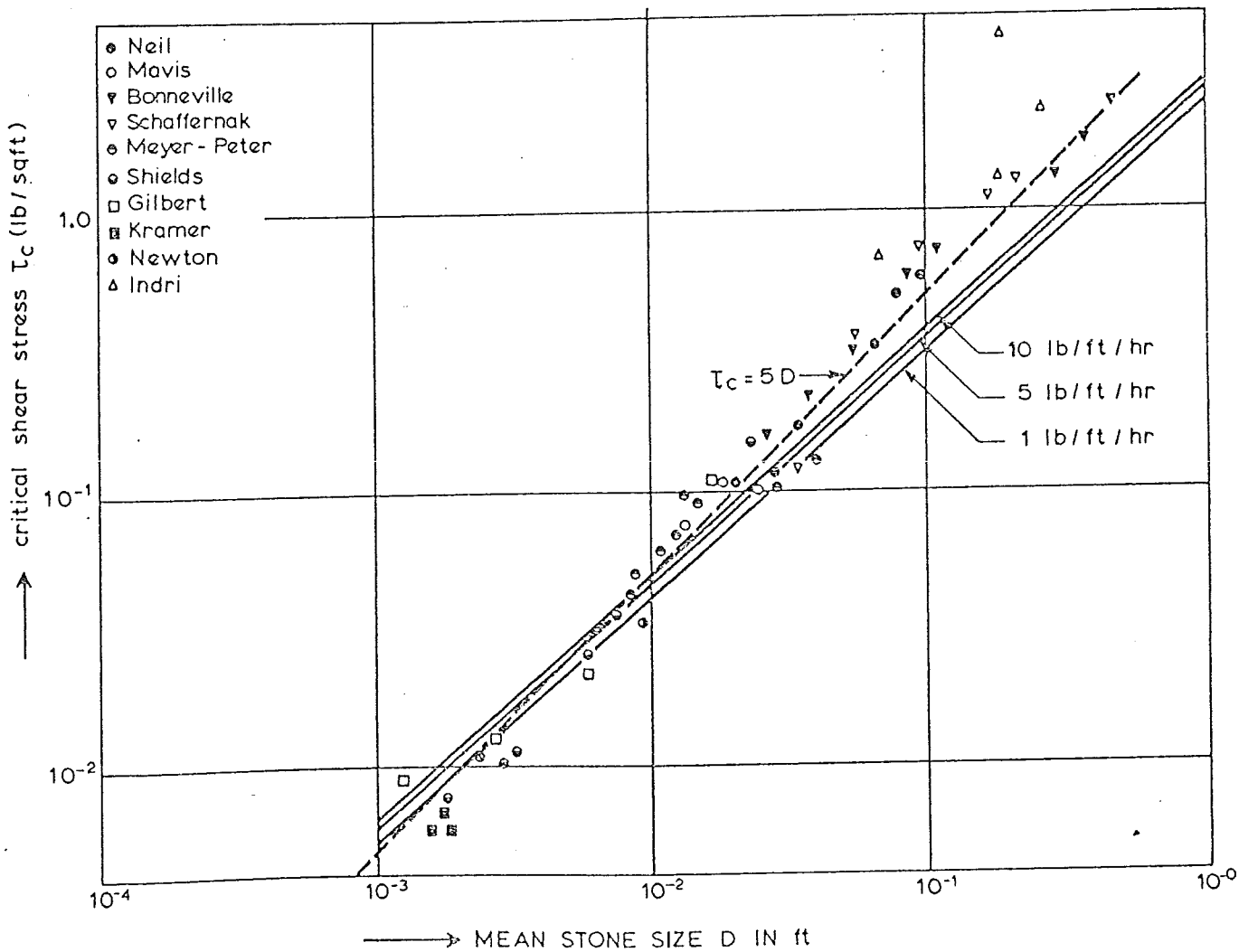


FIG. 2.4 d
CRITICAL BOUNDARY SHEAR STRESS AT INCIPIENT MOVEMENT
(PAINTAL 1971)

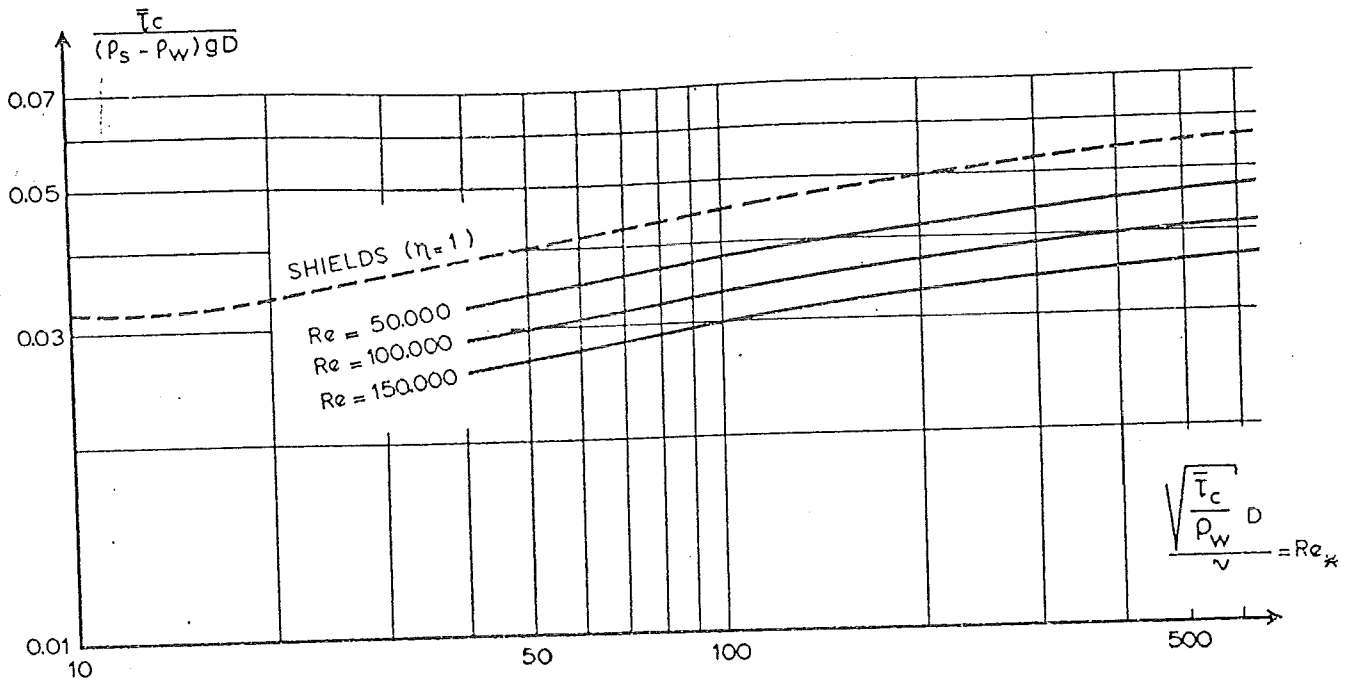


FIG. 2.5
 DARSTELLUNG DER FUNKTION $\bar{\tau}_c / (\rho_s - \rho_w) g D = f_3(Re_*, Re)$ FÜR $Re = 50.000, 100.000$ UND 150.000
 (GÜNTER 1971)

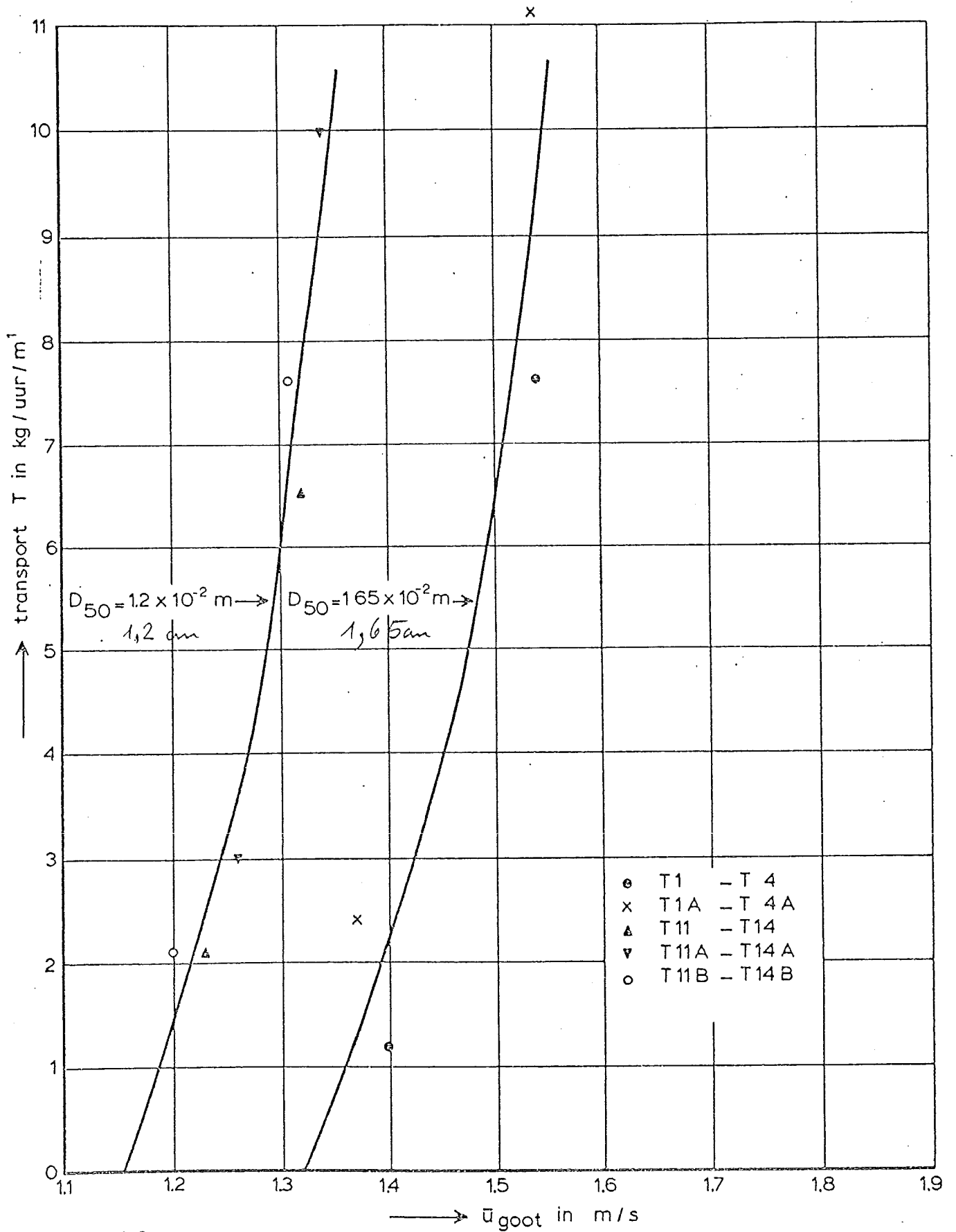


FIG. 2.6
TRANSPORTKROMMEN (V.D. MEULEN 1972)

3 Invloed poriënwaterstroming

Het is denkbaar dat door externe oorzaken water in of uit de bodem stroomt, bijvoorbeeld door ondiep - watergolven of bij een hoog grondwaterpeil buiten een kanaal. In die gevallen is er de vraag of τ_c beïnvloed wordt door deze stroming. Bij het uittreden van water spelen twee tegengestelde effecten een rol:

Door het bij het uitstromen behorende verhang vermindert schijnbaar het gewicht van de korrel, maar tevens vermindert de wandschuifspanning en de snelheid vlak bij de wand. Bij afzuigen zijn beide invloeden uiteraard omgekeerd. Welk effect overheerst zal vooral van de korrelgrootte afhangen. Met toenemende korrelgrootte zal het effect van de schuifspanningsbeïnvloeding relatief toenemen. Door een aantal auteurs is aandacht besteed aan deze verschijnselen:

1. Martin (1970) analyseerde de kracht op een korrel in de bovenste laag van een bed met een drukgradiënt. De theoretische kracht per volume-eenheid korrels is $\rho g(\partial h/\partial y)_{\text{bodem}}$. Doordat de bovenste korrel betrekkelijk vrij is ten opzichte van een korrel in het bed dient deze kracht te worden gereduceerd met een faktor C. Uit proeven naar de stabiliteit van korrels op een talud in stilstaand water onder invloed van een verhang konkludeerde Martin dat C in de orde 0,35 - 0,4 was. Voor de invloed van het uittreden van water op de schuifspanning kan een indruk worden verkregen met de relatie van Turcotte:

$$\frac{\tau^1}{\tau} = 1 - 13,9 \frac{v}{u_{*c}}$$

v = verticale snelheid in het zandbed (uitstromend = positief)

τ^1 = schuifspanning bij in-/uitstromen van water.

Proeven toonden aan dat bij uitblazen van vloeistof ook tot vlak bij fluidisatie (dus een verhang van bijna 1,0) nog geen beweging optrad bij een snelheid dicht bij de kritieke waarde. Proeven waarbij water werd afgezogen gaven bij Ottawa sand (D = 0,58 mm) een vergroting van de kritieke snelheid van ca. 30 % bij een verhang van 4,0, terwijl bij nikkel bollen (s.g. = 8,75; D = 0,57 mm) de kritieke snelheid iets afnam met toenemend verhang.

Bij een fijner zand (185 μm) gaven fijne delen in het water een verstopping van de bovenlaag en een sterke stabiliserende invloed op het bed. Dit is te vergelijken met het afpleisteren van irrigatiekanalen met fijn materiaal.

De konklusie van Martin was dat bij maximale verhangen in de orde van 1,0 het effect van het afzuigen op de stabiliteit van weinig praktisch belang is behalve bij de vorming van een stabiele, kohesieve bovenlaag van fijn materiaal (zie ook Harrison, 1970).

2. Martin (1971) beschrijft de proeven naar de invloed van een verhang op de stabiliteit van korrels op een talud in stilstaand water. Proeven met een 180⁰ gedraaid bed (dus korrels boven, water onder) gaven aan dat deze situatie stabiel was bij een verhang van 2,4 à 3,2. Hieruit volgt dat de koëfficiënt, die de effectiviteit van het verhang op de eerste laag korrels aangeeft 0,35 à 0,4 bedraagt.
3. Oldenziel en Brink (1974) onderzochten eveneens de invloed van een verhang op het transport van zand, maar met een aanzienlijk betere meetopstelling dan Martin (lengte meetsectie 4 m). Uit de relatie tussen de schuifspanning en het transport zonder afzuigen of blazen en de relatie tussen zandtransport en vertikaal verhang blijkt dat een verhang van 0,3 equivalent is met een snelheidsverandering van ca. 6 % (dus blazen onder een verhang van 0,3 wordt gekompenseerd door 6 % snelheidsafname).
Voor alle onderzochte zandsorten (130, 230, 380 en 570 µm) nam het transport toe met blazen en af met afzuigen (zie figuur 3.1). Uit de proeven bleek ook dat bij kleine transporten de gemiddelde korrelgrootte van het getrans-
porteerde zand groter is dan die van het oorspronkelijk materiaal (zie figuur 3.2). Dit effect is het sterkst bij afzuigen, waarschijnlijk omdat de grove korrels hierdoor minder worden beïnvloed.
4. Wedeman (1974) geeft in het Euromech 48 - Colloquium een korte samenvatting van soortgelijke resultaten bij proeven met grof zand (0,5; 2 en 4 mm). Hoewel de samenvatting te beknopt is om de resultaten te beoordelen lijkt het er op dat de invloed van afzuigen/blazen vooral belangrijk is bij kleine transporten, waarbij de tendensen gelijk zijn aan die gevonden door Brink en Oldenziel. Bij grotere transporten treedt soms een omslag op, dus bijvoorbeeld een wat groter transport bij afzuigen.

Konklusie: Er is enige invloed van de grondwaterstroming op het transport van zand. De invloed is echter pas significant bij verhangen in de orde van grootte van 1, zodat in de praktijk de invloed beperkt zal blijven.

Literatuur

- C.S. MARTIN 1970 Effect of a porous bed on incipient sediment motion.
Water Resources Research 6 (4), p. 1162-1174.
- C.S. MARTIN 1971 Seepage force on interfacial bed particles.
M.M. ARAL Proc. ASCE 97 HY 7, p. 1081-1100.
- S.S. HARRISON 1970 Effects of ground water seepage on fluvial processes.
L. CLAYTON Bull. Geol. Soc. Am. no. 811, p. 1217-1225.
- D.M. OLDENZIEL 1974 Influence of suction and blowing on entrainment of sand particles.
W.E. BRINK Proc. ASCE 100 (HY 7), p. 935-949.
- K.E. WEDEMANN 1974 Influence of seepage flow on sediment transport and incipient motion.
(Abstract) Euromech 48, Copenhagen.

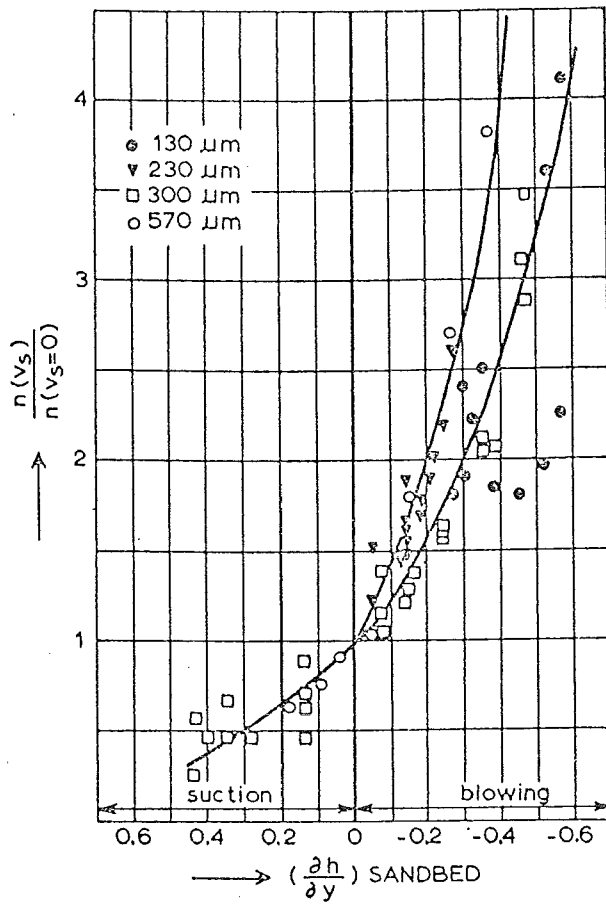


FIG. 3.1
SAND TRANSPORT WITH BLOWING AND SUCTION
(OLDENZIEL EN BRINK 1974)

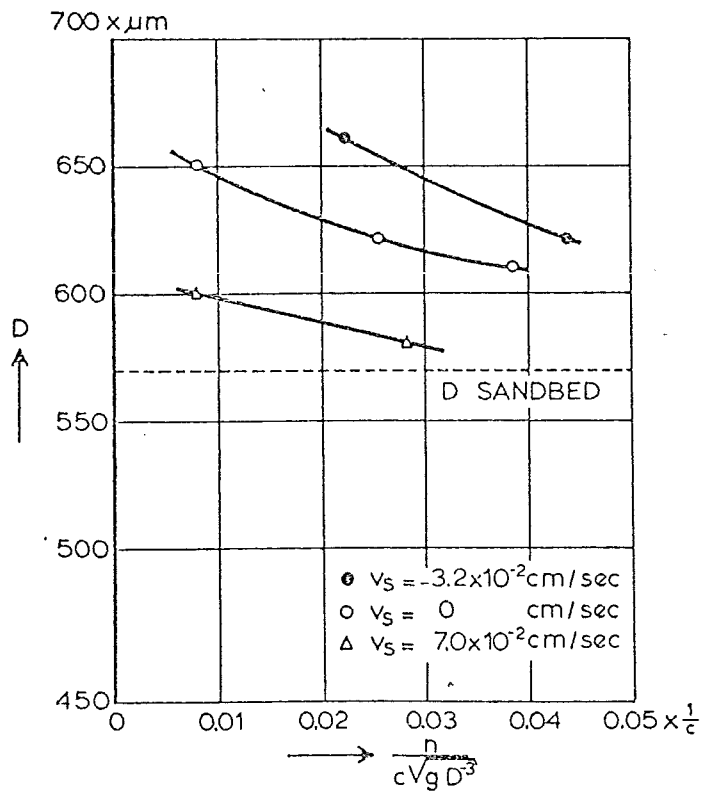


FIG. 3.2
GRAIN SIZE TRANSPORTED SAND PARTICLES
(OLDENZIEL EN BRINK 1974)

4 Samenstelling en stabiliteit van pantserlagen

In de laatste jaren zijn een aantal publikaties verschenen, waarin de vorming en stabiliteit van pantserlagen wordt beschreven. Een uitgebreid overzicht wordt gegeven in het concept verslag WL R 863, Morfologische problemen Maas, 1974. De belangrijkste bijdragen zijn de volgende:

1. Gessler (1970, 1971, 1973) bepaalt uit de oorspronkelijke korrelverdeling en de korrelverdeling van een stabiele pantserlaag, gevormd bij toenemende bodemschuifspanning, een relatie tussen de kans dat een korrel blijft liggen (q = verhouding percentage korrels voor en na de erosie) en de verhouding $\tau_c / \bar{\tau}$ (τ_c = kritieke schuifspanning van de korrel volgens Shields, $\bar{\tau}$ = gemiddelde bodemschuifspanning) zie figuur 4.1.

De relatie is een Gauss-verdeling met standaardafwijking 0,57. De fysische interpretatie van Gessler dat deze verdeling ook iets zou aangeven voor de variatie in de tijd van de optredende schuifspanning berust op een misverstand, nl. een door elkaar gebruiken van ruimtelijke en tijdsafhankelijke verdelingen. De korrelverdeling van een willekeurige pantserlaag p_a kan worden berekend uit de begin-korrelverdeling (fraktieverdeling) p_o met:

$$p_a = \frac{q \cdot p_o d(D)}{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} q p_o d(D)}$$

D = korrelgrootte; min respectievelijk max duidt op minimum respectievelijk maximum korrelgrootte.

q = waarschijnlijkheid dat korrel (met diameter D) achterblijft als onderdeel van stabiele pleisterlaag.

De stabiliteit van de bovenlaag tegen een bepaalde schuifspanning wordt gekenmerkt door het gewogen gemiddelde van q

$$\bar{q} = \frac{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} q p_a d(D)}{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} q p_o d(D)} = \frac{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} q^2 p_o d(D)}{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} q p_o d(D)}$$

Uit een vergelijking met proeven en natuurwaarnemingen volgde $\bar{q} = 0,5$ bij stabiliteit. Veiligheidshalve wordt $\bar{q} = 0,65$ aanbevolen. Deze benadering heeft alleen zin voor $D_{84}/D_{50} > 2,5$. Voor $D_{84}/D_{50} < 2$ kan beter met D_{50} worden gerekend naar de stabiliteit.

In de gegeven voorbeelden is D_{50a} (= D_{50} van de pantserlaag) ongeveer gelijk aan

$D_{80} \text{ à } 85$ van de begin-korrelverdeling (figuur 4.2). De theoretische laagdikte van de erosie, benodigd voor de vorming van een pantserlaag is gering en bedraagt slechts $1 \text{ à } 2 D_{84}$.

De methode van Gessler kan voor alle stadia van het pantserproces worden gebruikt, dit in tegenstelling met die van Günther die alleen de eindtoestand beschrijft.

2. Simons en Hamilton (1969) geven een uitbreiding van Gessler's beschouwingen door ook de variaties van de liftkracht er in te betrekken. Voor de liftkracht wordt ook een Gauss-verdeling aangenomen, onafhankelijk van de schuifspanningsvariaties. Gezien het gekoppeld zijn van variaties in $\tau_c/\bar{\tau}$ zowel in de tijd als in de plaats met variaties in de liftkracht kan hiervan nauwelijks meer inzicht worden verwacht.

3. Günter (1971) vergelijkt eveneens de korrelverdeling voor en na de vorming van de pantserlaag. Gebruikmakend van de zogenaamde Fuller-kromme:

$P_o = \sqrt{D/D_{\max}}$ als standaard werd een P_a verdeling van de vorm:

$$P_a = 0,67 (D/D_{\max})^3 + 0,33 D/D_{\max}$$

bepaald ($P = \text{sommatie-korrelverdeling} = \int p d(D)$)

Voor een willekeurige P_o -verdeling wordt P_a berekend uit:

$$\frac{\Delta P_{ax}}{\Delta P_{aF}} = \frac{\frac{\Delta P_{ox}}{\Delta P_{oF}} \cdot \left(\frac{1 - P_{aF}}{1 - P_{oF}} \right)}{\Sigma \Delta P_{aF} \cdot \text{teller}}$$

waarin Δ de fraktiegrootte aangeeft en de indices F en x respektievelijk de Fuller kromme en de beschouwde krommen aangeven (zie figuur 4.3).

Voor de stabiliteit van de pantserlaag gaat Günter uit van D_{\max} , hierbij wordt $\bar{\tau}_c$ (zie par. 2) bepaald volgens Shields/Günter. Voor de pantserlaag is de werkelijk toelaatbare schuifspanning echter $\lambda \cdot \bar{\tau}_{c\max}$ (voor 3 mengsels werd respektievelijk $\lambda = 0,52, 0,46$ en $0,63$ gevonden).

Uit deze 3 punten werd een relatie tussen λ en de verhouding van de D_m -waarden van pantserlaag en oorspronkelijke korrelverdeling en D_{\max} bepaald:

$$\lambda = \left(\frac{D_{ma}}{D_{\max}} \right)^{0,64} \left(\frac{D_{mo}}{D_{\max}} \right)^{0,33}$$

Deze uitdrukking kan ook worden geschreven (zie ook Gessler 1973) bij enige modifikatie:

$$\lambda = \left(\frac{D_{ma}}{D_{max}} \right)^{0,67} \left(\frac{D_{mo}}{D_{max}} \right)^{0,33} \quad \text{ofwel}$$

$$\bar{\tau}_{ca} = \bar{\psi}_c \cdot \left(\frac{D_{mo}}{D_{ma}} \right)^{0,33} \cdot \Delta\rho g \cdot D_{ma}$$

waarin: $\bar{\tau}_{ca}$ = toelaatbare schuifspanning pantserlaag
 $\bar{\psi}_c$ = Shields parameter behorend bij $\bar{\tau}_c$.

4. Little en Mayer (1972) hebben proeven uitgevoerd met materialen met gelijke D_m en variabele $\sigma_{g_o} = D_{84}/D_{50}$ (1,1 tot 3). Voor de relatie D_{ma}/D_{mo} werd empirisch bepaald:

$$\frac{D_{ma}}{D_{mo}} = 0,908 \cdot \sigma_{g_o}^{\frac{u_{*c}}{\Delta g v}}^{0,352}$$

Toepassing van deze relatie op de Maas gaf absurde resultaten (zie R 863). Pantsering trad alleen op voor $\sigma_g > 1,5 \text{ à } 2$ dus voor $D_{95}/D_5 > 4 \text{ à } 10$ bij een log-normale verdeling.

Voor τ_c van pantserlaag werd gevonden: $\tau_c = (0,022 \pm 0,004) \Delta\rho g D_{max}$

5. Sutherland en Irvine (1973) brengen weinig nieuws en geven een andere q-kromme dan Gessler:

$$q = \exp \left[- \left(\frac{\tau_c}{\bar{\tau}} - 1 \right)^2 / \sigma_{\tau}^2 \right]$$

Hierin is $q = 1$ voor $\bar{\tau} = \tau_c$ terwijl bij Gessler $q = 0,5$ bij $\bar{\tau} = \tau_c$, hetgeen neerkomt op een andere definitie van τ_c (altijd, respectievelijk 50 % kans op bewegen).

6. Ceçen en Bayazit (1973) hebben enkele proeven uitgevoerd naar de stabiliteit van pantserlagen met $D_{max} = 2$ en 3 cm. Gevonden werd $\tau_c \approx 0,03 \Delta\rho g D_{max}$ ($\tau_c = 10,5$ en $16,2 \text{ N/m}^2$). Volgens de methode Günter. werden lagere waarden gevonden. Vergelijking van τ_c met de methode Gessler gaf $\bar{q} = 0,5$.

7. Klaassen (1974) geeft de resultaten van de berekening van een pantserlaag door middel van een stap-voor-stap berekening met een Meyer-Peter-type transportformule waarin τ_c volgens Eguiasaroff wordt bepaald.

Vergelijking met de gemeten waarde geeft aan dat de berekende kromme te grof is vooral bij de fijnere frakties (zie figuur 4.4).

De τ_c volgens Eguiasaroff wordt bepaald uit:

$$\tau_{ci} = \left[\frac{\log 19}{\log (19 D_i / D_m)} \right]^2 \cdot 0,05 \cdot \Delta \rho g D_i \quad \text{voor } \frac{D_i}{D_m} \geq 0,4$$

$$\tau_{ci} = 0,85 \cdot 0,05 \Delta \rho g D_m \quad \text{voor } \frac{D_i}{D_m} < 0,4$$

Samenvatting

1. Pantsering is van belang voor een begin-gradering die voldoet aan $D_{95}/D_5 > 5$ (Knoroz), $\sigma_g > 1,5$ à 2 (Little en Mayer) of $\sigma_g = D_{84}/D_{50} > 2,5$ (Gessler).
2. De samenstelling van de pantserlaag kan worden geschat met behulp van de empirische relaties van Gessler en Günter. Globaal geldt voor de in de literatuur vermelde proeven dat de D_{50} van de pantserlaag gelijk is aan $D_{85} \pm 5$ van de beginverdeling.
3. De stabiliteit van de pantserlaag met gemiddelde diameter D_{ma} kan worden bepaald uit:
$$\tau_c = 0,025 \text{ à } 0,035 \Delta \rho g D_{ma}$$
4. De erosiediepte tijdens de vorming van een pantserlaag is vrij gering en bedraagt 1 à $2 D_{84}$ of 2 à $4 D_{50}$.

Literatuur

- V.S. KNOROZ 1962 Protection naturelle des lits formés de matériaux
a granulométrie hétérogène.
Izr. Gidr. B.E. Vedenov, A70, 1962, p.21-51.
- D.B. SIMONS 1969 Stabilization of channels in coarse non-uniform
J.M. HAMILTON bed material.
CEP-69-70DBS-JMH-6, Fort Collins, Colorado.
- J. GESSLER 1970 Self-stabilizing tendencies of alluvial channels.
Proc. ASCE 96 WW2, p. 235-246.
- J. GESSLER 1971 Beginning and ceasing of sediment motion.
Ch. 7 uit River Mechanics vol I, H.W. SHEN (ed.),
Fort Collins
- A. GÜNTER 1971 Die kritische mittlere Sohlenschubspannung bei
Geschiebe Mischungen etc.
Mitt. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und
Glaziologie ETH Zürich No. 3.
- W.C. LITTLE 1972 The role of sediment gradation on channel armoring.
D.G. MAYER Georgia Inst. of Techn. School of C.E., Atlanta,
Georgia, ERC 0672.
- A.J. SUTHERLAND 1973 A probalistic approach to the initiation of movement
H.M. IRVINE of non-cohesive sediments.
IAHR Int. Symp. on River Mechanics, Bangkok 1,
p. 383-393.
- J. GESSLER 1973 Behavior of sediment mixtures in rivers.
IAHR Int.Symp. on River Mechanics, Bangkok 1, p.395-485
- K. CEÇEN 1973 Critical shear stress of armored beds.
M. BAYAZIT IAHR Congress, Istanbul, paper A 60.
- G.J. KLAASSEN 1974 Armouring as time-dependent phenomenon.
Euromech. 48, Copenhagen.

Waterloopkundig 1974 . Morfologische problemen Maas.
Laboratorium Vooronderzoek,
Concept verslag R 863.

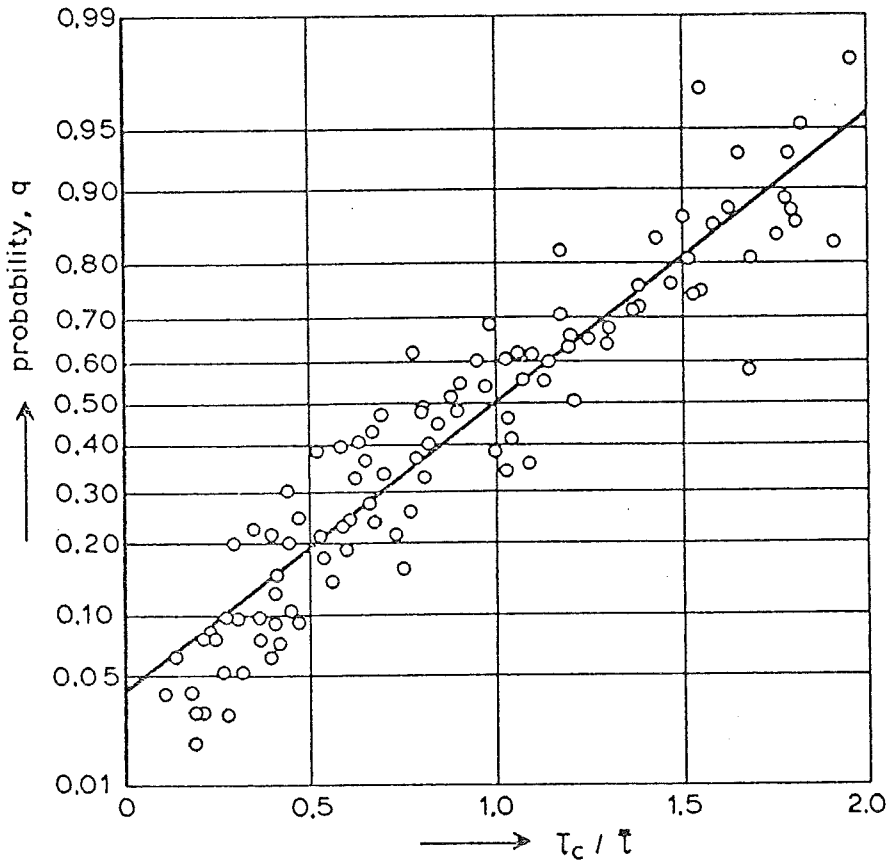


FIG. 4.1
 PROBABILITY OF GRAINS TO STAY AS PART OF
 ARMOR COAT, q VERSUS $\tau_c / \bar{\tau}$
 (GESSLER 1970)

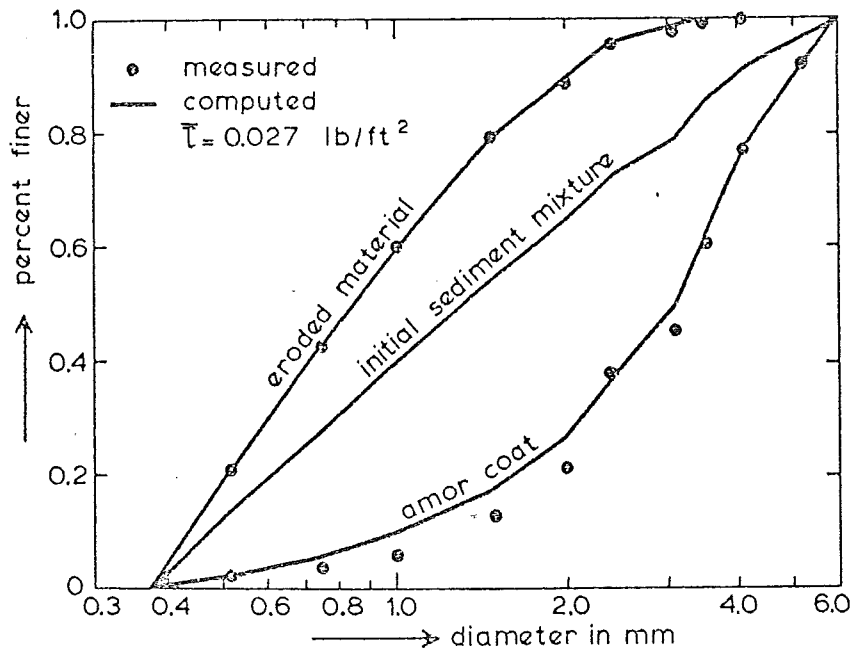


FIG. 4.2
 COMPARISON BETWEEN COMPUTED AND MEASURED
 GRAIN-SIZE DISTRIBUTION CURVES IN FLUME EXPERIMENT
 (GESSLER 1970)

5 Erosie van kohesief materiaal

Recente literatuur over de erosie van kohesieve materialen draagt bij tot een beter inzicht in het belang van een aantal factoren, maar geeft nog geen algemeen beeld van de relatie tussen erodeerbaarheid en grond/water parameters. De volgende artikelen zijn van belang:

1. Mehta en Partheniades (1973). Verslag van een uitgebreide studie over sedimentatie van slibdeeltjes vanuit een stroming. De schuifspanning waarbij dit gebeurt is ca. 0,5 maal die bij begin van erosie van vers slib (dit laatste bij $\tau = 1,25 - 1,65 \text{ dyne/cm}^2$ ofwel $u_* = 1,1 - 1,3 \text{ cm/s}$). De proeven werden uitgevoerd met kaoline en slib uit Lake Maracaibo ($D_{50} = 1,5$ en 4μ). Relaties tussen sedimentatie en schuifspanning werden bepaald. De opstelling zelf bleek van belang in verband met het eventueel verstoren van de vlokken tijdens het rondpompen.
2. Sargunan (1973) beschrijft proeven waarbij het te eroderen materiaal (40 % klei, voornamelijk montmorilloniet) de mantel vormt van een roterende cylinder in een stilstaand vat (figuur 5.1). De eroderende vloeistof was schoon water. De erosiebestendigheid nam sterk toe met het NaCl gehalte in de poriën van de klei (figuur 5.2). CaCl_2 gaf een nog grotere erosiebestendigheid terwijl een proef met 0,027 N NaCl zowel in de klei als in het eroderende water geen erosie gaf tot $\tau = 40 \text{ N/m}^2$. Een konklusie kan zijn dat het eroderen plaatsvindt door binnendringen van schoon water in de klei, zwellen en het verwijderen van kleideeltjes of brokjes tengevolge van de opgelegde schuifspanning.
3. Paaswell (1973) geeft een uitgebreid literatuuroverzicht over het eroderen van klei. Van belang zijn fysische en chemische eigenschappen van klei, de wijze van vorming en de stapeling van de kleideeltjes. Korrelatie met standaard grondmechanische parameters is niet bruikbaar. De inwendige structuur van de klei speelt zeker ook een grote rol.
4. Het artikel van Sargunam e.a. (1973) is een samenvatting van een publikatie door Arulanandan (1973). In dit laatste worden erosieproeven met Yolo-leem (46 % klei, 35 % slib) beschreven. Van belang voor de erosie bleek vooral de natrium-absorptieverhouding:

$$\text{S.A.R.} = \text{Na}^+ / \sqrt{0,5 (\text{C}_a^{++} + \text{Mg}^{++})}$$

(ionen concentratie in milliaequiv./l). Toenemende S.A.R. gaf een afnemende erosiebestendigheid (zie figuur 5.3). De aanduiding bij de krommen geeft de concentratie in de klei aan; de eroderende vloeistof is steeds schoon water. De erosie neemt sterk af bij toenemend zoutgehalte in het eroderende water (figuur 5.4). Korrelatie met andere parameters had weinig resultaat.

5. Christensen en Das (1973) maakten kunstklei van kaolien en grondiet en gebruikten dit als binnenmantel van een buis (lengte meetsectie 10 cm). De relatie tussen schuifspanning en erosie werd bepaald. Konklusies: erosiesnelheid bij vaste τ neemt sterk af met toenemend watergehalte (faktor 10 bij toename van watergehalte van 30 tot 43 %) en neemt toe met toenemende temperatuur (ook faktor 10 bij variatie van 10 tot 35° C). De variatie in τ bij gelijke erosiesnelheid en bovengenoemde variaties is uiteraard gering.
6. Dwayne Nielson (1973) geeft een aardig overzicht van onderzoek aan kohesieve grond. Het werk van Lion (Ph. D. Thesis, FtCollins 1970) wordt genoemd waarin een sterke toename van τ_c met het NaCl gehalte van klei wordt gegeven en evenals bij Christensen een afname van τ_c met de temperatuur (maximaal een faktor 3). Variaties van de zuurgraad (pH 5,6 → 8,2) gaf bij een kaolien klei een sterke afname van τ_c (faktor 10) door de afname van de elektrische krachten tussen de kleideeltjes.
Er was geen duidelijk relatie tussen τ_c en de torsie-schuifspanning. Nielson konkludeert dat het verschijnsel van erosie zeer complex is en dat zeer veel variabelen van belang zijn.
7. Raudkivi en Hutchinson (1974) hebben een groot aantal proeven met kunstmatig vervaardigde kleimonsters uitgevoerd. De klei werd gemaakt van kaolien met diameters < 1 μ , 2-5 μ en 5-8 μ . De monsters werden daarna geërodeerd in een rechthoekig, gesloten, kanaal van 5x5 cm² doorsnede. De monsters werden aangemaakt met en onderzocht in gelijke vloeistoffen (gedestilleerd water en NaNO₃ oplossingen om zwellen te voorkomen).
De voornaamste resultaten waren:
 - 1) Het zoutgehalte van de vloeistof heeft een belangrijke invloed. Bij gedestilleerd water was $\tau_c \approx 0$, terwijl bij 0,01 M een τ_c van ca. 0,5 N/m² ($u_{*x} = 2,2$ cm/s) werd gevonden. De gevoeligheid voor het zoutgehalte was het grootst bij de fijnste klei; de minimale erosie werd bereikt bij een oplossing met 0,005 - 0,01 M.

- 2) De temperatuur van het water heeft ook invloed, vooral bij gedestilleerd water en de fijnste klei. Bij klei van 2-5 μ was de erosiesnelheid het kleinst bij 24^o C en nam toe bij zowel hogere als lagere temperaturen; bij 5-8 μ nam de erosie steeds toe met de temperatuur. Bij toenemend zoutgehalte (0,01 M) werd de temperatuurinvloed gering.
 - 3) Er was weinig korrelatie met de kationen-uitwisselingskapaciteit, althans voor de onderzochte kleien.
8. Einsele (1974) beschrijft sedimentatie-, konsolidatie- en erosieproeven met onder andere kaolien. Bereikte vane shear stress in de orde van 100 - 10⁴ N/m² met bijbehorende kritieke schuifspanningen van 0,6 - 2,0 N/m². De relatie vane shear stress en τ_c was sterk afhankelijk van het kleitype. Bij het erosieproces werd waargenomen dat eerst enige erosie optrad, daarna het proces stilstond en pas bij een flink wat grotere snelheid weer erosie optrad.

Samenvatting

Door het werk van een aantal onderzoekers is het inzicht in de betekenis van een aantal parameters voor de erosiebestendigheid van kohesief materiaal toegenomen. Het proces is echter zo complex dat geen algemeen geldende korrelaties gegeven kunnen worden.

Literatuur

- A.J. MEHTA 1973 Depositional behavior of cohesive sediments.
E. PARTHENIADES Univ. of Florida, Coll. of Eng., Coastal and
Oceanog. Lab., TR no. 16 (voor een samenvatting
zie IAHR symp. Bangkok 1973).
- A. SARGUNAM e.a. 1973 Physico-chemical factors in erosion of cohesive
(o.a. R.B. KRONE) soils.
Proc. ASCE 99 (HY 3), p. 555-558 (technical note).
- R. ARULANANDAN ca 1973 Application of chemical and electrical parameters
to prediction of erodibility.
Nat. Res. Council, Highway Res. Board., Spec. Rep.
135, p. 42-51.
- R.W. CHRISTENSEN 1973 Hydraulic erosion of remolded cohesive soils.
B.M. DAS Nat. Res. Council, Highway Res. Board., Spec. Rep. 135,
p. 8-19.
- R.E. PAASWELL 1973 Causes and mechanisms of cohesive soil erosion:
The state of the art.
Nat. Res. Council, Highway Res. Board., Spec. Rep. 135,
p. 52-72.
- F. DWAYNE/NIELSON 1973 Behavior of cohesive material from a soil engineers
viewpoint.
Ch. 14 from Environmental Impact on Rivers (River
Mechanics III), H.W. Shen ed., Fort Collins
- A.J. RAUDKIVI 1974 Erosion of kaolinite clay by flowing water.
D.L. HUTCHINSON Proc. Roy. Soc. A 337 (1611), p. 537-554.
- G. EINSELE 1974 Mass physical properties, sliding and erodibility
of experimentally deposited and differently
consolidated clayey muds.
Sedimentology 21, p. 339-372.

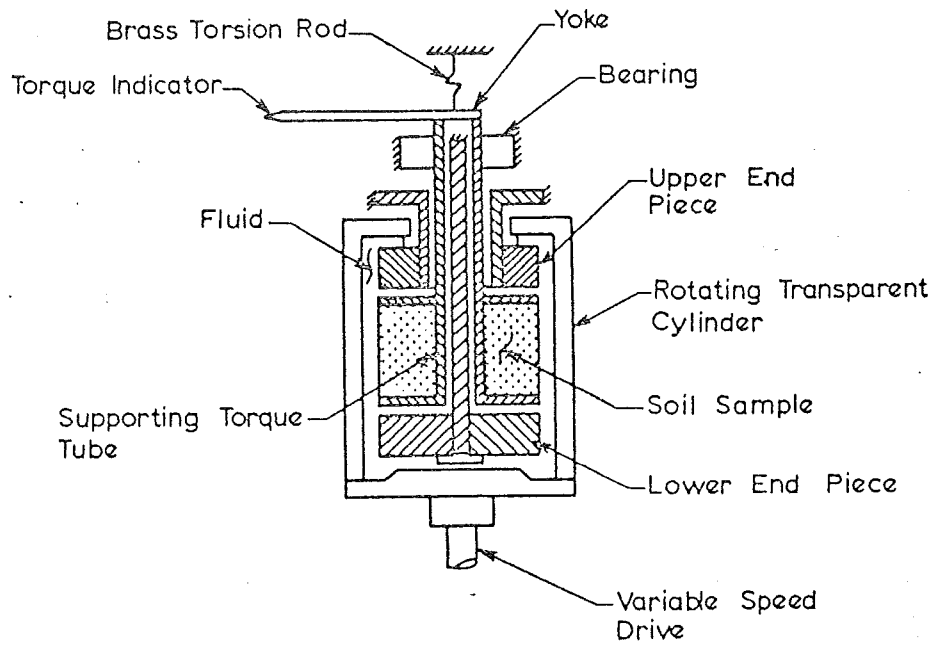


FIG. 5.1
CROSS SECTION OF APPARATUS
(SARGUNAM 1973)

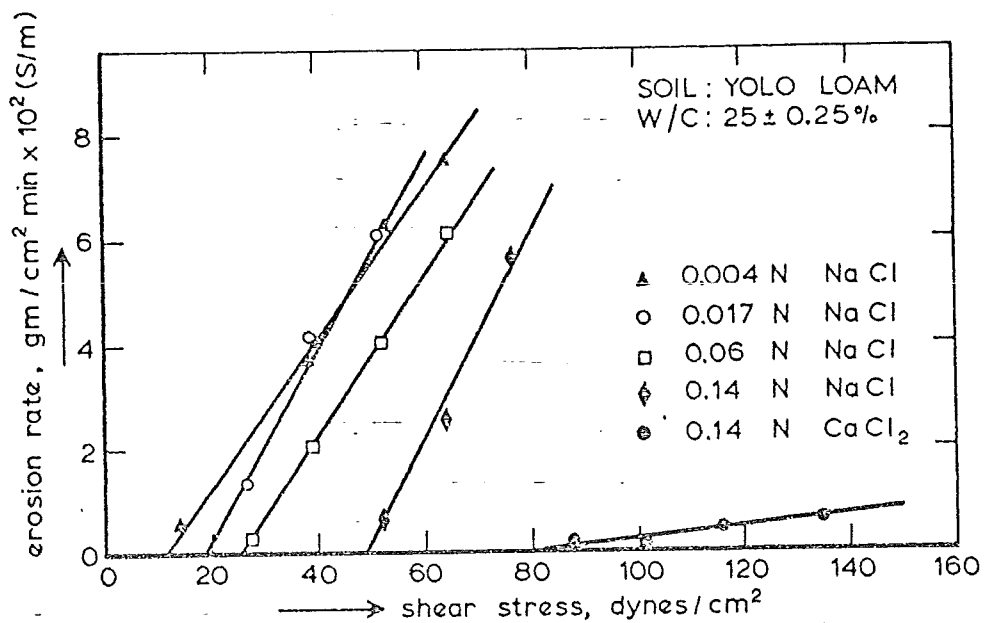


FIG. 5.2
SPECIMEN EROSION RATE VERSUS SHEAR STRESS
(SARGUNAM 1973)