

Bull. Soc. belge de Géologie Bull. Belg. Ver. voor Geologie	T. 88 V. 88	fasc. 2 déeel 2	pp. 113-122 blz. 113-122	Bruxelles 1979 Brussel 1979
--	----------------	--------------------	-----------------------------	--------------------------------

## EXPERIMENTEN BETREFFENDE DE SELECTIVITEIT VAN RUNOFF EN SPAT.

door J. SAVAT (\*\*) en V. JANSSENS (\*)

**SUMMARY.** - Flume experiments on a rigid boundary have shown that grains with a diameter ranging from 500 to 1,000 microns are the most erodible ones. Flow was laminar or nearly laminar.

The vertical distribution of the shear force on individual grains is derived from the law of parabolic velocity distribution. This distribution shows that the point of application of the shear force is high when grains are small, and lower when grains are "large" and when the regime becomes turbulent. Hence, small grains roll, while large grains slide over the bottom of the flume. The limit between "small" and "large" lies at 750 microns; the largest grains that can still roll are the most erodible ones since the rolling friction force is much smaller than the sliding friction force.

This critical grain size is four times larger than the most erodible grain size in rough turbulent rivers, in which lift exists.

**RESUME.** - Des expériences en laboratoire, réalisées avec un écoulement laminaire sur des fonds immobiles, ont montré que des grains, ayant un diamètre compris entre 500 et 1000 microns, s'érodent le plus facilement.

Si on applique la loi de la distribution parabolique de la vitesse dans des films laminaires à la formule de la force tractrice, il devient clair que le point d'application de cette force se déplace vers la partie sommitale du grain lorsqu'il est petit. Le couple de forces par rapport au centre de gravité du grain le fera rouler. Un point d'application "bas" par contre fera glisser le grain sur le fond. Puisque la résistance à un mouvement roulant est nettement plus petite que la résistance à un mouvement glissant, et puisque la pression exercée sur les grains s'accroît avec leur diamètre, le grain le plus grossier qui roule doit être celui qui s'érode en premier lieu.

Se basant sur des lois physiques et hydrauliques il a été démontré que la force tractrice égalait une des résistances au moment du départ des différents grains de sable.

Cette loi ne peut pas être appliquée directement à des fonds mobiles.

### INLEIDING

Theoretische beschouwingen, zowel als metingen verricht in dunne waterfilmen trekken in twijfel dat de meest erosiegevoelige korrel van een zandpopulatie een diameter van 180 micron heeft, zoals dit

- 
- (\*\*) Bevoegdverklaard Navorsers N.F.W.O.  
Laboratorium voor Experimentele Geomorfologie.  
(\*) Laboratorium voor Experimentele Geomorfologie,  
K. U. L. Redingenstraat, 16 bis, B-3000 Leuven

het geval is in turbulent stromende rivieren. Het onderzoek naar de meest erosiegevoelige korrel werd aangevat in drie kanalen die elk een welbepaalde beddingsruwheid hadden. Vermits het onderzoek in het beginstadium is werden de experimentele condities eenvoudig gehouden. De vraag werd gesteld welk de sleepdruk is die een korrel effectief ontvangt wanneer hij in erosie vertrekt, en welke de wrijvingskracht is die hij op dat ogenblik moet overwinnen. Individuele korrels bieden de zekerheid dat zij volledig in de stroming steken.

## PROBLEEMSTELLING

Het diagramma van HJÛLSTRÖM (1935) werd verklaard door SUNDBORG (1956) die vaststelde dat voor een korrel van 180 micron diameter, de curves van de valsnelheid, van de kritische sleepsnelheid, en van de ruwheidssnelheid elkaar snijden. Fijnere korrels gaan derhalve dadelijk in suspensie over terwijl grovere korrels langs de bedding vervoerd worden.

Deze verklaring kan moeilijk worden volgehouden voor dunne waterfilmen.

DAVIES en SAMAD (1978) hebben experimenteel bepaald dat er geen verticale sleepdrukcomponente bestaat wanneer  $Re_{(D)} < 5$ . Deze meetresultaten zijn in overeenstemming met die van COLEMAN (1967) voor analoge stroomregimes. De verticale componente van de sleepdruk kan zelfs neerwaarts gericht zijn.

Metingen van de wrijvingsverliezen van dunne waterfilmen door SAVAT (1979) toonden aan dat de ruwheidssnelheid, waarbij een turbulente stroming van "glad" naar "hydraulisch ruw" overgaat inderdaad nabij  $3,5 v^-/D$  ligt, zoals aangehaald door SUNDBORG, maar tevens een funktie is van het verval  $V$  van het proefkanaal. Voor een kinematische viscositeit van 0,009 ligt de kritische grens bij :

$$D_{cr} = 35,5 v^{-0,40} \quad (1),$$

zodat  $D$  een funktie wordt van de helling  $V$ .

CHIEN (1954) heeft aangehouden dat de kritische sleepdruk, nodig om een korrel in beweging te krijgen, niet zo eenduidig is bepaald als SUNDBORG voorhoudt.

Het snijpunt van de drie krommen uit het SUNDBORG-diagramma ligt dus eerder toevallig bij een absciswaarde van 180 micron.

BAGNOLD (1968), sprekend over transport door stromingen met een schijnbaar geringe competentie, onderschreef de stelling dat deze hoofdzakelijk puin vervoeren dat groffer is dan het gemiddelde beddingspuin. Hij refereerde hierbij naar metingen van het Waterbouwkundig Laboratorium te Vicksburg (1935).

SAVAT en POESEN (1977) toonden aan dat een laminaire stroming hoofdzakelijk grof zand vervoerde; hierbij werd een beduidend fijner residu achtergelaten. De selectiviteit van de stroming was duidelijker naarmate het Froudegetal steeg. Latere experimenten, eveneens op een los substraat uitgevoerd door SAVAT (1979) bevestigden de theorie van KARKI, CHANDER, en MALHOTRA (1972) dat korrels in een superkritische stroming slechts dan kunnen vervoerd worden wanneer het Froudegetal een dergelijke waarde krijgt dat substantiële drukverschillen ontstaan tussen de voor- en de achterzijde van de korrel. Het kritische Froudegetal stijgt van 1,2 naar 1,8 wanneer de korreldiameter stijgt van 50 naar 500 micron. Te grove korrels worden gekenmerkt door een  $Re_{(D)}$ -getal van +40; dan ontstaan dergelijke wervelingen dat de korrel in het losse sediment wordt ingewerveld (PHELPS, 1975) en beschut ligt voor verdere erosie.

Aan gang zijnde laboratorium experimenten tonen aan dat ook zeer fijn zand en silt als beddingspuin wordt vervoerd, zelfs als de lading van het ruissellementswater 20.000 p.p.m. overschrijdt.

Proeven verricht met individuele korrels, bewegend over een hard substraat, toonden zeer duidelijk dat grovere korrels veel

sneller bewegen in laminaire filmen dan fijnere korrels (POESEN en SAVAT, 1979). De gewichtskomponente van de grove korrels speelt ook in hun voordeel omdat hun gewicht toeneemt met  $S^3$ , maar hun wrijvingsoppervlak met slechts  $S^2$ .

Zand met een mediaan van 180 micron wordt, als geheel genomen, gemakkelijker weggespat dan zowel grovere als fijnere zanden of lemen. Toch wordt uit dit zand een fractie preferentieel weggespat die grover is dan de modale fractie (SAVAT en POESEN, 1977; mondelinge mededeling van J. POESEN).

Besloten werd dus :

- In dunne waterfilmen is er geen "lift"-mechanisme en dus geen suspensiemateriaal te verwachten. De valsnelheid van de korrel heeft geen fysische betekenis t.a.v. zijn transport.
- Er zijn vele aanwijzingen dat een korrel van 180 micron niet de meest erosiegevoelige is in dunne waterfilmen; niet deze vertrekt onder de kleinste hellingshoek in een bepaalde stroming.

## BESCHRIJVING VAN DE EXPERIMENTEN

Van zeven korrelgroottefracties, en dit op drie verschillende onvervormbare substraten, werd de kritische erosiedrempel bepaald. De equivalente ruwheid van de substraten bedroeg ( $D_{90}$ -waarden) resp. 40, 160 en 480 micron.

De korrelgroottes waren :

I	:	63	-	125 micron diameter
II	:	125	-	250
III	:	250	-	500
IV	:	500	-	1000
V	:	1000	-	2000
VI	:	2000	-	4000
VII	:	4000	-	8000

De proefbakken maten 300 maal 11.7 cm. De gebruikte debieten varieerden tussen 0.91 en 11.03  $\text{cm}^3/\text{s}$ , cm; derhalve was het regime meestal laminair maar soms ook glad turbulent vermits de viscositeit van het water rond 0.011  $\text{cm}^2/\text{s}$  bedroeg en de overgang van laminair naar turbulent plaats vindt bij een kritisch Reynoldsgetal ( $Re = q/\nu$ ) van 610. De hellingen waarbij de korrels in transport gingen waren tamelijk gering; ze varieerden tussen uitersten van 0.008 en 0.133. Debiet en eenheidsdebiet( $q$ ), helling en temperatuur van het water werden voortdurend geregistreerd. De viscositeit van het water werd uit de temperatuur van het water afgeleid hoewel metingen met een viscosimeter iets hogere waarden opleverden.

## THEORIE

Vermits de snelheid van het water kan afgeleid worden uit de formule van DARCY-WEISBACH (1858-1855) :

$$v = \sqrt{\frac{8 g R V}{f}} \quad (2)$$

zo men de grootte van de wrijvingscoëfficiënt  $f$  kent werd deze laatste experimenteel bepaald. Zowel voor laminaire als voor gladde en ruwe turbulente stromingen is deze groter dan aangenomen door formules afgeleid voor rivieren, of die zuiver theoretisch zijn. Oppervlaktespanningsverliezen, zich uitend in "rollwaves" worden immers relatief belangrijk (SAVAT, 1979).

De sleepdruk op een korrel is gelijk aan de sectie van deze korrel, geprojecteerd op de stroomrichting, maal het kwadraat van de snelheid van het water, ergens ter hoogte van de korrel, en maal de soortelijke massa van het water :

$$F_{Dr} = \pi S^2 v^2 \rho \quad (3); \quad \text{dimensieel wordt } F_{Dr} \text{ in dynes uitgedrukt.}$$

Volgens YALIN (1977) neemt men de snelheid "ergens tussen de bedding en de diameter van de korrel"; volgens RUBEY (1938) is de snelheid aan de top van de laminaire sublaag de meest karakteristieke snelheid, terwijl men vaak, zoals voor de berekening van  $Re(D)$ , de snelheid neemt aan de top van de korrel.

Indien de stroming laminair is, loopt de snelheid van het water parabolisch op naar boven (HORTON, e.a., 1934) :

$$u = 3 v \frac{h}{R} \left(1 - \frac{h}{2R}\right) \quad (4), \text{ omdat de oppervlaktesnelheid } v_s = 1,5 v.$$

Anderzijds is de breedte van een sferisch veronderstelde korrel gelijk aan, wanneer  $h$  de hoogte van het waterpeil voorstelt :

$$B = 2 \sqrt{2hs - h^2} \quad (5).$$

Indien  $k$  de verhouding is tussen de diepte van het water  $R$ , en de diameter van de korrel  $2S$ , is  $R = 2 kS$ ;  
De sleepdruk op een sferische korrel is dan, per oppervlakteëenheid van de sectie van de korrel (in dyne/cm<sup>2</sup>) :

$$F_d = \frac{1}{\pi S^2} \int_0^{2S} B u^2 dh = \frac{1}{\pi S^2} \int_0^{2S} 2 \sqrt{2hs - h^2} \left\{ \frac{3}{2} \frac{vh}{kS} \left(1 - \frac{h}{4kS}\right) \right\}^2 dh =$$

$$\frac{5.625 v^2 \pi S^2}{2 k^2 \pi S^2} \cdot \left(1 + \frac{2.1}{16 k^2} - \frac{0.7}{k}\right) \quad (6).$$

$$\text{Immers, } \arcsin\left(\frac{S}{S}\right) - \arcsin\left(\frac{0-S}{S}\right) = \frac{\pi}{2}.$$

De laatste term maakt deel uit van de integratieconstante.

Sommige korrels staken tijdens de proeven gedeeltelijk boven water; hiervoor is formule (6) uitgewerkt in bijlage (2).

De nodige sleepdruk (= de weerstandskracht) op de korrels werd anderzijds op twee manieren bepaald (fig. 1a). Sedert GILBERT (1914) en RUBEY (1938) wordt de "zesde-macht-wet" algemeen aanvaard. Zij dateert reeds van 1829 en werd geponeerd door J. LESLIE (zie : GILBERT, 1914).

$$F_w = \frac{4}{3} \pi S^3 (\rho_s - \rho) \cdot g \sin(a - V') \quad (7),$$

waarin  $a$  de rusthoek van korrels is, geometrisch bepaald door de diameter van de korrel en de ruwheid van de bedding.

Een niet klassieke, maar fysisch eveneens juiste weg om de weerstand van de korrels te bepalen werd in het laboratorium gevolgd (Fig. 1b). De wrijving van een korrel werd louter empirisch bepaald door te meten wanneer een ondergedompelde korrel wegglijdt in stilstaand water.

$$F_{wb} = \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho_s}\right) \cdot \left[x \cdot \cos(V') - \sin(V')\right] \cdot I_g \quad (8), \text{ en waarin}$$

$x = \text{tg}(a)$ , waarin  $a$  de hoek is waarbij de korrel wegglijdt.

In formule (8) wordt  $\rho_s - \rho$  gelijk aan :

$$\frac{4}{3} \rho_s \pi S^3 - \rho \pi h^2 \cdot \left(S - \frac{h}{3}\right),$$

wanneer de hoogte van het water  $h = R < 2S$ .

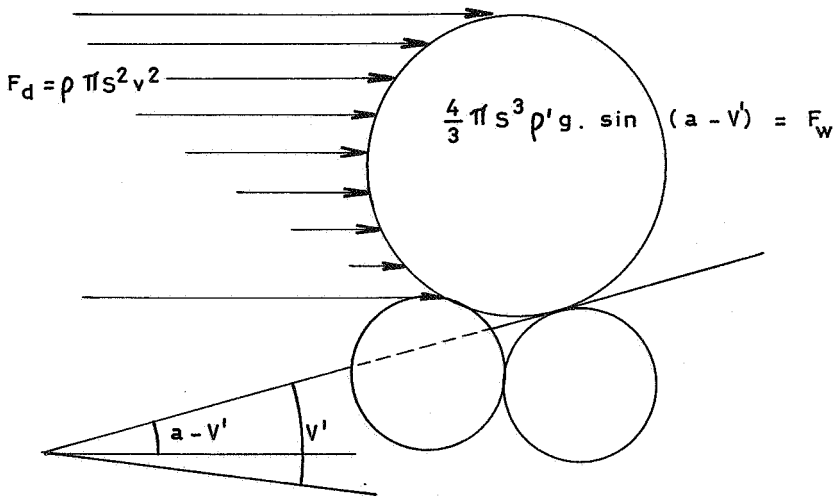


Fig. 1a - Totale sleepkracht op een korrel, vergeleken met de weerstand die moet overwonnen worden (theorie van LESLIE);  $\rho' = \rho_s - \rho$ .

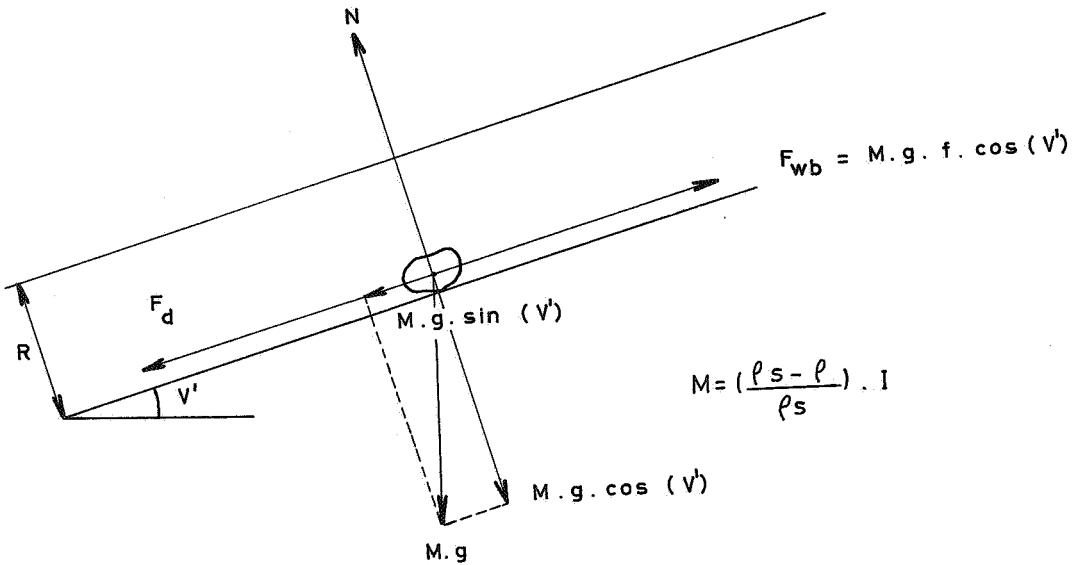


Fig. 2b - weerstandskracht die op een korrel inwerkt indien de weerstand tegen een glijbeweging moet overwonnen worden ( $I =$  volume van korrel;  $N =$  normaalkracht  $= M.g \cos V'$ )

## BESPREKING VAN DE RESULTATEN

Uit formule (6) blijkt dat het aangrijpingspunt van de sleepdruk zich naar boven verplaatst op de korrel wanneer  $k$  groot wordt en de stroming steeds laminair blijft. Hoewel de formule niet werd uitgewerkt daalt het aangrijpingspunt wanneer de snelheidsverdeling regelmatig wordt in een turbulente stroming, zeker voor "gemiddeld grote korrels" (Fig. 2).

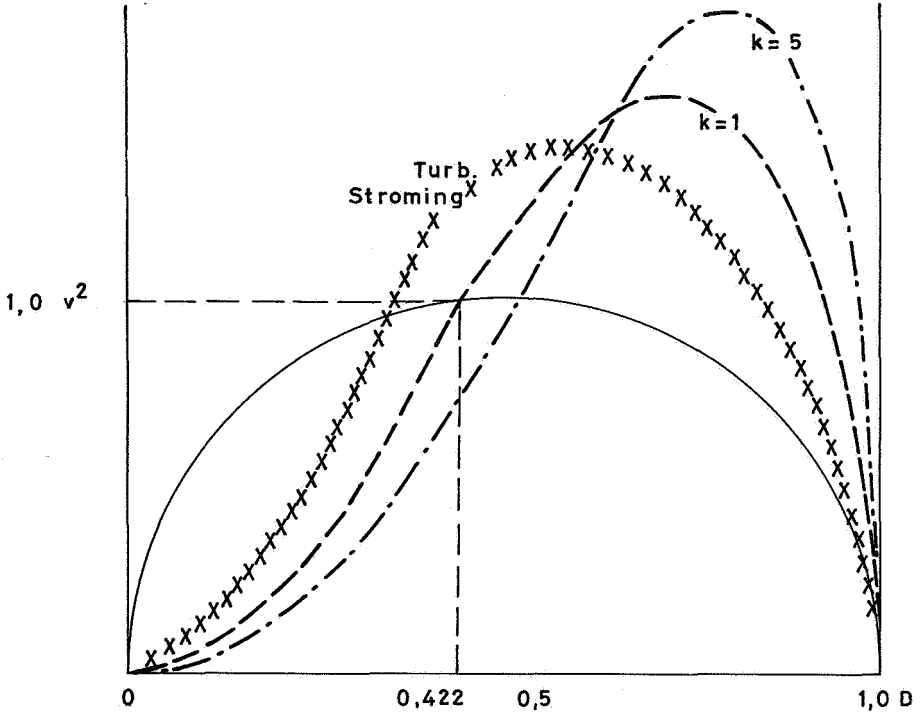


Fig. 2 - De verdeling van de sleepkracht over de hoogte van een korrel. Voor de laminaire stromingen ligt het aangrijpingspunt van de maximale sleepkracht op resp. 0,82 (kleine) en 0,73 (grote korrel); beduidend lager in een turbulente stroming. Wanneer  $k = 1$ , snijdt de sleepkrachtskromme de cirkelvormige korrel bij  $D = 0,422 = 0,422 R$ , omdat bij dit waterpeil  $u = v$ .

Wat dus verwacht werd, nl. dat kleine korrels zouden rollen en grote korrels zouden voortgeduwd worden, bleek inderdaad het geval. De rolbeweging treedt op tot voor korrelgrootte IV.

Per definitie is (7) een maat voor de rollende weerstand, terwijl (8) een maat is voor de glijdende wrijving. De korrels werden niet als sferisch verondersteld, maar zo afgeplat dat hun kleinste as 0,85 maal de grootste as bedroeg.

In Fig. 3 staan de meetresultaten van 150 experimenten geplot. De kritische sleepdruk ligt dicht bij de glijdende wrijvingskracht voor korrelgroottes VI en VII ( $\varnothing > 2000 \text{ m}\mu$ ) en dicht bij de rollende weerstand (7) wanneer de korrels een diameter hebben van minder dan 1000 micron. Onderstaande tabel resumeert bij welke kritische hellingshoeken de korrels in transport gingen :

Tabel 1. De kritische hellingshoek in functie van de korrelgrootte van het sediment en van de ruwheid van de bedding (meestal laminaire debieten; afgeplatte korrels)

Sedimentklasse : Kritische hellingshoek (°/∞) :			
Bedding :	40 Micron	160 Micron	480 Micron = D.
VII	34	47	110
VI	10	36	54
V	13	20	44
IV	12	14	27
III	13	18	38
II	13	45	66
I	16		

Op het gladste substraat starten korrelgrootten II t.e.m. VI bijna even vlug. De fijnste en vooral de grofste fraktie geraken pas weg op steilere hellingen. Op beide ruwere substraten is de fraktie 500-1000  $\mu$  duidelijk de meest erosiegevoelige. Zij ondergaat een snel groter wordende sleepdruk en is tegelijk de grofste populatie die nog zeer geregeld rolt (Fig. 2).

### OPEN PROBLEMEN

Formule (6) dient gewijzigd te worden wanneer de stroming turbulent wordt omdat de snelheidsverdeling hierin niet meer parabolisch verloopt. Grote korrels zullen een kleinere sleepdruk ontvangen dan voorzien door de formule terwijl "relatief kleine" korrels ( $k > 5$ ) een grotere druk zullen ontvangen dan hier berekend; mogelijks klimt ook het aangrijppingspunt van de sleepdruk.

En superkritische laminaire stroming is altijd gekenmerkt door "roll-waves", gegeneerd door de oppervlaktetenspanning. Stereofotos toonden aan dat deze golven dubbel zo hoog kunnen zijn als de gemiddelde waterdiepte R; achter elke kam komt een halvemaanvormige

$\log_{10} (Fd)$

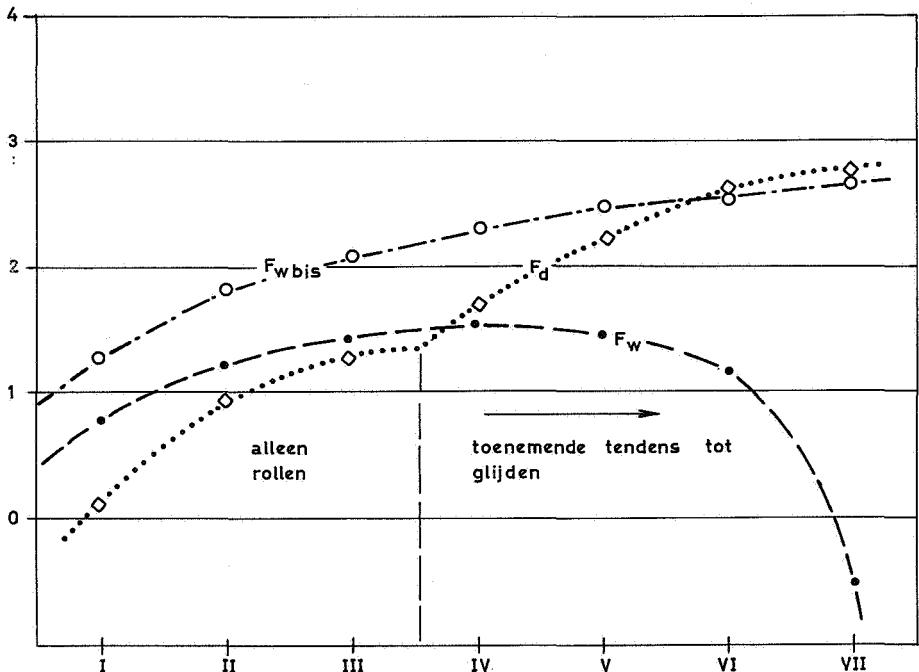


Fig. 3 - Kritische sleepdruk en wrijvingsdrukken als functie van de korrelgrootte (y-as eenheden : dyne/cm<sup>2</sup>)

trog voor waaronder, indien het debiet niet pulserend is, de gemiddelde snelheid v groter is dan de berekende. Zodoende wordt de maximale sleepdruk op de korrels onderschat.

De hydrostatische druk op uitstekende korrels werd nog verwaarloosd; hij is echter niet nul.

Formule (7) is een uitdrukking van de maximale rollende wrijvingskracht. Niet alle korrels liggen echter maximaal ingebed in de oneffenheden van het substraat. De berekende stroomdruk is daarentegen echter die voor een gemiddeld ingebedde korrel. Uiteraard moet dus de  $F_d$ -kurve onder de  $F_w$ -kurve liggen (Fig. 3).

## BESLUITEN

Pogingen om de wrijvingskracht te correleren met de sleepkracht, berekend uit de benaderende sleepdruk per oppervlakte-eenheid  $\rho_g.R.V.$ , met de sleepdruk zoals bepaald door SHIELDS (1936), door WHITE (1940) of door YALIN (zie : FOSTER en MEYER, 1972) leverden zeer slechte correlaties op.

De selectiviteit van de laminaire superkritische stromingen (het Froudegetal heeft steeds meer dan één bedragen) was onverwacht omdat korrels van 750 micron het meest erosiegevoelig blijken te zijn.

Door aan te nemen dat er twee wrijvingsweerstandstanden bestaan, gebaseerd op de theorie van de parabolische snelheidsverdeling binnenin de stroming, kon deze selectiviteit verklaard worden : de grootste korrels die nog kunnen rollen (500-1000 micron) eroderen het gemakkelijkst. Het aangrijpingspunt op de 1 mm+ korrels van de sleepdruk ligt te laag om een draaiende beweging te veroorzaken (Fig. 2); het is evident dat een weerstand tegen rollen veel geringer is dan tegen een glijdende beweging.

Uit deze experimenten, verricht op individuele korrels, mogen geen definitieve besluiten worden getrokken omtrent de selectiviteit van het transport op een mobiel substraat. Zeker is echter reeds dat ook hierop (SAVAT en POESEN, 1977) de meest erodeerbare korrel grover is dan 180 micron.

Ook spatproeven, door dezelfde auteurs uitgevoerd, hadden uitgezonden dat spat een zekere preferentie had voor grovere korrels uit een mengsel, maar dat een kritische korrelgrootte van tussen 750 en 1000 micron de bovenste grens uitmaakt waarvoor dit opgaat. Voor spat namelijk worden deze korrels te zwaar.

Spat en laminaire ruissellement, ruimtelijk belangrijke processen op hellingen, vertonen dus om uiteenlopende redenen een preferentie voor korrels die grover zijn dan de modale fraktie; om eveneens verschillende redenen worden 750 micron korrels te zwaar.

## OVERZICHT VAN DE GEBRUIKTE SYMBOLEN.

a	wrijvings- of rusthoek van een korrel
D	diameter van een korrel of equivalente ruwheid van de bedding
f	Darcy-Weisbach wrijvingscoëfficiënt
$F_d$	sleepdruk (dyne/cm <sup>2</sup> )
$F_{dr}$	sleepkracht (dyne)
$F_w$	wrijvings-druk
$F_{wb}$	idem
k	verhouding tussen R en $2S = D$ .
q	debiet per breedte-eenheid (cm <sup>2</sup> /s)
R	hydraulische straal = gemiddelde waterdiepte



Re (D)	korrelruweheids-Reynoldsgetal = $u_{(D)} \cdot D / \nu$
S	straal van een korrel
u	snelheid van het water op een hoogte h boven de bedding
v	gemiddelde snelheid van het water
V	verval = sinus van de hellingshoek V'
V'	verval = hoek
$\nu$	kinematische viscositeit (cm <sup>2</sup> /s)
$\rho$	soortelijke massa van water
$\rho_s$	soortelijke massa van sediment
$\rho'$	soortelijke massa van ondergedompeld sediment

#### BEREKENING VAN DE SLEEPDRUK OP EEN GEDEELTELIJK ONDERGEDOMPELDE KORREL.

De oplossing van de integraal in formule (6) wordt, wanneer  $R < 2 kS$  :

$$F_d = \frac{\pi G S^3}{4} + \frac{G S^3}{2} \cdot \arcsin\left(\frac{h-S}{S}\right) + \frac{G S}{2} (h-S) \cdot B - \frac{G B^3}{3} - \frac{h B^3 F}{4} + \frac{C h^2 B^3}{5} - \frac{1,5 h^2 B^3 D S}{5} - \frac{h^3 B^3 D}{6},$$

waarin

$$G = \frac{5 S F}{4},$$

$$F = E + A - 1,4 C.S.,$$

$$E = 2,1 D.S^2,$$

$$D = \frac{A}{16 k^2 S^2},$$

$$C = \frac{A}{2k.S}$$

$$B = \sqrt{2hS - h^2}, \text{ en}$$

$$A = \frac{4,5 v^2}{k^2 \cdot S^2}$$

#### BIBLIOGRAFIE

- BAGNOLD, R. A. (1968) - Deposition in the process of hydraulic transport. *Sedimentology*, 10, 45-56.
- CHIEN, N. (1954) - The present status of research in sediment transport. *Proc. A.S.C.E.* 80, *Separate n° 565*.
- COLEMAN, N. L. (1967) - A theoretical and experimental study of drag and lift forces acting on a sphere resting on a hypothetical stream bed. *Proceedings, 12 th. Congress Intern. Ass. for Hydraulic Research, vol. 3 : 184-192*.
- DARCY, H. (1858) - Recherches expérimentales relatives au mouvement de l'eau dans les tuyaux. *Mémoires Acad. des Sciences de Paris*.
- DAVIÉS, T. R. H., and SAMAD, M. F. A. (1978) - Fluid dynamic lift on a bed particle. *Proc. A. S. C. E., Vol. 104, n° HY 8 : 1171-1182*.

- FOSTER, G. R. and MEYER, L. D. (1972) - Transport of soil particles by shallow flow. *Transactions of the ASAE*, 15 : 99-102.
- GILBERT, G. K. (1914) - The transportation of debris by running water. *U. S. Geol. Survey. Prof. Paper 86*.
- HJULSTRÖM, F. (1935) - Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the River Fyris. *Bull. Géol. Institut. Uppsala, Vol. XXV*.
- HORTON, R. E., LEACH, H. R., and VAN VLIET, R. (1934) - Laminar Sheet-Flow. *Amer. Geophys. Union Transactions, Pt. 2 : 393-404*.
- KARKI, K. S., CHANDER, S., and MALHOTRA, R. C. (1972) - Supercritical flow over sills at incipient jump conditions. *Proc. A.S.C.E., Vol. 98, n° HY 10 : 1753-1764*.
- PHELPS, H. O. (1975) - Shallow laminar flows over rough granular surfaces. *Proc. A. S. C. E., Vol. 101, n° HY 3 : 367-384*.
- POESEN, J. and SAVAT, J. (1979) - Grain size selection during erosion by splash and runoff. *Proc. of the Symp. on Assessment of Erosion in the USA and Europe, Ghent, March 1978 (in press)*.
- RUBEY, W. W. (1938) - The force required to move particles on a stream bed. *U. S. Geol. Survey. Prof. Paper 189-E. : 121-140*.
- SAVAT, J. (1979) - Resistance to flow in rough supercritical sheet flow. *Earth Surface Processes (in press)*.
- SAVAT, J. (1979) - Laboratory experiments on erosion and deposition of loess by laminar sheet flow and turbulent rill flow. *Proceedings Seminar "Agricultural Soil Erosion in Temperate Non-Mediterranean Climate", Starsbourg, Sept. 20, 1978*.
- SAVAT, J. and POESEN, J. (1977) - Splash and discontinuous runoff as creators of fine sandy lag deposits with Kalahari sands. *CATENA, 4 : 321-332*.
- SHIELDS, A. (1936) - Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. *Mitteilungen der Preuss. Versuchs-Anst. für Wasserbau un Schiffsbau, Berlin, Heft 26*.
- SUNDBORG, A. (1956) - The river Klarälven : a study of fluvial processes. *Geografiska Annaler, Vol. 38 : 127-316*.
- WEISBACH, J. (1855) - Die Experimentalhydraulik. *Engelhardt Verlag, Freiburg*.
- U. S. WATERWAYS EXPERIMENTAL STATION (1935) - Studies of river bed material and their movement. *Mississippi River Comm., Paper 17 : 1-161*.
- WHITE, C. M. (1940) - The equilibrium of grains on the bed of a stream. *Proceedings Royal Society of London, Series A, Vol. 174 : 322-338*.
- YALIN, M. S. (1977) - Mechanics of sediment transport. 2<sup>nd</sup> Ed. Pergamon Press, Oxford (Chapter I), 295 pp.

Mededeling voorgesteld tijdens  
de zitting van 3 April 1979.