

# GELEIDELIJKE SLUITING

## VI

### INVLOED VAN DE VORM EN GRADERING OP DE STABILITEIT VAN STORTSTEEN

#### RAPPORT MODELONDERZOEK

**BIBLIOTHEEK**  
Dienst Weg- en Waterbouwkunde  
Postbus 5044, 2600 GA DELFT  
Tel. 015 - 699111

**WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM**  
**DELFT** **M 731**

g.5-285

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

GELEIDELIJKE SLUITING

VI

Invloed van de vorm en gradering op de  
stabiliteit van stortsteen

BIBLIOTHEEK  
Dienst Weg- en Waterbouwkunde  
Postbus 5044, 2600 GA DELFT  
Tel. 015 - 699111

M 731

december 1965

04 SEP. 1991

## INHOUD

|                    | <u>blz.</u> |
|--------------------|-------------|
| 1. INLEIDING       | 1           |
| 2. PROEFOPSTELLING | 1           |
| 3. METINGEN        | 2           |
| 4. CONCLUSIES      | 6           |

## FIGUREN

1. Stabiliteit in parallelstroming.
  2. Snelheidsverdeling in parallelstroming.
  3. Stabiliteit achter een dam.
  4. Snelheidsverdeling achter een dam.
  5. Vergelijking snelheidsprofielen met en zonder dam.
  6. Stabiliteit in parallelstroming. Invloed gradering.
  7. Stabiliteit achter een dam. Invloed gradering.
  8. Stabiliteit achter een dam. Invloed gradering.
-

## 1. INLEIDING.

In aansluiting op het onderzoek naar de stabiliteit van stortsteen op dammen (M 731 - II) werd door de Waterloopkundige Afdeling van de Deltadienst opdracht gegeven tot het onderzoeken van de invloed van vorm en gradering van stortsteen. Bij zand en grind is het gebruikelijk de gemiddelde zeefdiameter te gebruiken (gemiddeld naar gewicht). De bepaling van de zeefdiameter is voor stortsteen vrijwel uitgesloten, zodat naar andere maten moet worden gezocht. Hiervoor komt in aanmerking de nominale diameter  $d_n = (\text{volume})^{1/3}$  en een middeling naar aantal.

De proeven werden gedaan in het Waterloopkundig Laboratorium te Delft onder leiding van Ir. H.N.C. Breusers, die tevens dit verslag samenstelde.

## 2. PROEFOPSTELLING.

Voor de proeven werd gebruik gemaakt van een gesloten goot met een breedte van 1,0 m en een hoogte van 0,3 m. De goot was gesloten omdat bij de proeven met gelijkblijvende waterdiepte het verhang willekeurig moest worden gevariëerd. Deze oplossing was eenvoudiger dan het bouwen van een kantelgoot. In de goot was op 7,5 m vanaf de instroming een proefvak van 0,3 x 0,3 m aangebracht waarin in 2 lagen ca. 200 stenen konden worden aangebracht. Het overige deel van de gootbodem was bedekt met vastgekitte stortsteen met vrijwel gelijke afmetingen als de onderzochte stenen.

De debieten werden gemeten met een bochtstukdebietmeter, de drukverhangen met statische buizen en het snelheidsprofiel juist vóór het proefvak met een pitotbuis. In enkele gevallen werd met een micro-molen de gemiddelde snelheid en de turbulentie-intensiteit gemeten. Het gedrag van de stenen in het proefvak kon worden waargenomen door een transparant gedeelte van het gootplafond.

De waarde van de ruwheid  $k$  van de gootbodem werd uit een serie proeven met toenemende waterdiepte bepaald. Uit tabel 1 blijkt dat de

waarde van  $k$  0,06 m bedroeg voor de vastgekitte stortsteen ( $d_n$  0,03 m  $k/d_n = 2$ ).

Tabel 1

| <u>h in m</u> | <u><math>\bar{U}</math> in m/sec</u> | <u><math>U^*</math> in m/sec</u> | <u>k in m</u> |
|---------------|--------------------------------------|----------------------------------|---------------|
| 0,07          | 0,36                                 | 0,0585                           | 0,07          |
| 0,10          | 0,53                                 | 0,070                            | 0,06          |
| 0,14          | 0,68                                 | 0,083                            | 0,06          |
| 0,19          | 0,89                                 | 0,096                            | 0,055         |
| 0,245         | 1,11                                 | 0,110                            | 0,055         |
| 0,272         | 1,16                                 | 0,115                            | 0,06          |
|               |                                      | $I = 5,0 \cdot 10^{-3}$          | 0,06          |

### 3. METINGEN.

De invloed van de vorm van de steen en de bruikbaarheid van  $d_n$  is in twee series proeven onderzocht. Bij de eerste serie was de stroming uniform, bij de tweede serie werd een dam in de goot aangebracht.

De onderzochte vormen zijn: kubussen, cylinders met gelijke hoogte en diameter, tetraëders, gladde bollen, grind, kubisch gebroken stortsteen (vrijwel isometrisch) en platte stortsteen waarvan een afmeting klein was ten opzichte van de twee andere. De kubussen enz. werden van beton vervaardigd, voor de bollen werden glazen knikkers gebruikt. Voor alle stenen was  $\Delta = (\rho_s - \rho_w)/\rho_w$  zoveel mogelijk gelijk, terwijl het produkt  $\Delta d_n$  vrijwel gelijk was. Dit produkt kan als maatgevend voor de stabiliteit worden beschouwd (zie ook M 731 - II).

De stenen werden in 2 lagen in het proefvak aangebracht zodanig dat de bovenkant van de stenen aansloot bij de vastgekitte stenen. In de bovenlaag bevonden zich ca. 100 stenen. Bij iedere steensoort werd het debiet in kleine stappen vergroot, het gedrag van de stenen waargenomen en vergeleken met een van de volgende schade criteria. Verschillende criteria zijn gebruikt omdat de term begin van beweging onvoldoende gedefiniëerd is.

| <u>schade no.</u> | <u>kriterium</u>                 |
|-------------------|----------------------------------|
| 1                 | geen beweging                    |
| 2                 | 1-5% beweegt zonder verplaatsing |
| 3                 | 6-10% " " "                      |
| 4                 | algemene beweging                |
| 5                 | 1-2% verplaatst                  |
| 6                 | 3-5% "                           |
| 7                 | 6-10% "                          |
| 8                 | 10% "                            |

Vergelijking van de debieten waarbij een bepaald criterium werd waargenomen is mogelijk in fig. 1. Uit deze figuur blijkt dat wat het bewegen betreft grote verschillen optreden. Bij het verplaatsen zijn de verschillen betrekkelijk gering. De snelheidsverdeling bij het proefvak is gegeven in fig. 2 waaruit blijkt dat de effectieve hoogte voor de ruwe wand ca. 0,21 m bedraagt. Uit de gemeten verhangen kan de waarde van de kritieke schuifspanningssnelheid  $U_k^*$  worden bepaald. Uit de gemeten relatie tussen het verhang I en het debiet  $Q$  kan met behulp van de relaties  $\tau = \rho g R I$  ( $R = 0,21$  m) en  $U^* = \sqrt{\tau/\rho}$  worden afgeleid:

$$U^*/Q = 0,435 \quad U^* \text{ in m/sec} \quad Q \text{ in m}^3/\text{sec.}$$

Bij alle proeven is ook de snelheid op een hoogte van 0,09 m gemeten. Uit de relatie

$$U(y)/U^* = 2,5 \ln 30 y/K \quad \text{volgt met } K = 6 \text{ cm}$$

$$U^*/Q = 0,445$$

daar de relatie tussen  $U(y)$  op  $y = 9$  cm en  $Q$  bekend was uit metingen. Als gemiddelde waarde kan  $U^*/Q = 0,44$  worden aangehouden.

Indien criterium 6 als begin van beweging wordt gekozen kunnen de volgende waarden van  $U_k^*$  worden bepaald:

Tabel 2

Bepaling Shields parameter bij schade criterium 6

| <u>Materiaal</u>    | $\frac{U_*^*}{m/sec}$ | $\Delta$ | $d_n$<br>cm | $d_{zeef}$<br>cm | $\Delta d_n$<br>cm | $\frac{U_k^{*2}}{\Delta g d_n}$ | $\frac{U_k^{*2}}{\Delta g d_{zeef}}$ |
|---------------------|-----------------------|----------|-------------|------------------|--------------------|---------------------------------|--------------------------------------|
| Kubussen            | 0,145                 | 1,44     | 2,40        | 3,40             | 3,45               | 0,060                           | 0,042                                |
| Cylinders           | 0,146                 | 1,48     | 2,40        | 2,60             | 3,55               | 0,060                           | 0,055                                |
| Tetraëders          | 0,132                 | 1,48     | 2,40        | 5,2              | 3,55               | 0,049                           | 0,022                                |
| Knikkers            | 0,141                 | 1,48     | 2,39        | 2,4              | 3,54               | 0,056                           | 0,056                                |
| Grind               | 0,145                 | 1,59     | 2,13        | 3,0              | 3,38               | 0,062                           | 0,044                                |
| Kubische stortsteen | 0,141                 | 1,72     | 2,06        | 2,7              | 3,55               | 0,056                           | 0,043                                |
| Platte stortsteen   | 0,143                 | 1,74     | 2,06        | 3,2              | 3,58 <sup>5</sup>  | 0,057                           | 0,036                                |
|                     |                       |          |             |                  |                    | = 0,057                         |                                      |
|                     |                       |          |             |                  |                    | Re <sup>*</sup> = 3000          |                                      |

Uit de tabel blijkt dat de waarde van  $\frac{U_k^{*2}}{\Delta g d_n}$ , de parameter door Shields gebruikt, vrij constant is met uitzondering van het geval van de tetraëders. Als gemiddelde waarde wordt 0,057 gevonden, hetgeen goed overeenkomt met de bekende relatie van Shields voor het begin van beweging. Deze waarde kan ook voor grotere stenen worden gebruikt omdat de viscositeit van het water geen invloed meer heeft voor stenen van deze afmetingen. Bij gebruik van de zeefdiameter in plaats van  $d_n$  ontstaat een grote variatie in de waarde van  $\frac{U_k^{*2}}{\Delta g d}$ . De bruikbaarheid van  $d_n$  is hiermee bewezen. Een afzonderlijke vorm parameter is alleen voor de tetraëders noodzakelijk.

De proeven zijn herhaald na plaatsing van een dam in de goot waardoor de stroming meer turbulent werd (zie fig. 3). De spreiding in de debieten is in dit geval minder. De waarden van de kritieke debieten zijn lager door de grotere turbulentie-intensiteit. Het snelheidsprofiel is gegeven in fig. 4 voor deze toestand. De snelheidsprofielen met en zonder dam zijn in de kritieke toestand voor kubussen vergeleken in fig. 5. Bij de toestand met de dam zijn de snelheden bij de bodem lager. Optellen van  $3 \sigma(y)$  bij de gemiddelde snelheid  $U(y)$  brengt de twee gevallen dichter bij elkaar. Voor een normale snelheidsamplitude verdeling zou  $U + 3 \sigma$  de piekwaarde van de snelheidsfluctuatie geven. De verschillen in de twee gevallen ontstaan waarschijn-

lijk doordat de verdeling van de snelheidsamplituden in het geval van de dam scheef is met relatief grote piekwaarden.

De bruikbaarheid van de gemiddelde diameter  $\bar{d}_n$  (middeling naar aantal) voor gegradeerd materiaal is onderzocht in 3 series waarbij aan het gebruikte, uniforme, materiaal stenen met kleiner en groter gewicht werden toegevoegd. In de parallelstroom zijn de volgende graderingen kubische stortsteen onderzocht:

|     | <u>gewicht</u> |          |          |
|-----|----------------|----------|----------|
|     | 11-13 gr       | 22-26 gr | 44-52 gr |
| T6  | 0%             | 100%     | 0%       |
| T21 | 20             | 60       | 20       |
| T22 | 50             | 0        | 50       |

Uit fig. 6 blijkt dat de invloed van deze gradering op de stabiliteit gering is. De proeven zijn herhaald voor de stroming achter een dam met stortsteen (graderingen 0/100/0, 20/60/20, 30/40/30 en 50/0/50) en grind (graderingen 0/100/0, 15/70/15, 30/40/30 en 50/0/50). Uit de resultaten gegeven in fig. 7 en 8 blijkt eveneens een geringe invloed van de gradering.

Bij de proeven bleek dat het percentage grote stenen dat werd verplaatst gelijk was aan het percentage aanwezig in het bed. Lane<sup>⊗</sup> concludeert uit metingen van de gewichten van stenen in een rivierbed, waarbij bleek dat het gemiddeld gewicht van platte stenen kleiner was dan van isometrische stenen, dat platte stenen stabielere zijn. De conclusie uit bovenstaande proeven zou dan zijn dat grote en kleine stenen gelijke stabiliteit bezitten. Dit is evenwel een gevolg van het beschutten van kleine stenen door grote stenen. De conclusie van Lane is dus niet gerechtvaardigd.

<sup>⊗</sup> E.W. Lane, E.J. Carlson, Trans. Am. Geoph. Un. 35 (3), p 453-462, (1954).



#### 4. CONCLUSIES.

Uit de proeven kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

1. De invloed van de vorm van stortsteen is weinig belangrijk indien de nominale diameter  $d_n = (\text{volume})^{1/3}$  wordt gebruikt als maatgevende diameter.
2. De invloed van de gradering wordt in de onderzochte gevallen voldoende weergegeven indien de diameter van de stenen, gemiddeld naar aantal, wordt gebruikt als maatgevende diameter.
3. Voor een parallelstroom kan de kritieke schuifspanningssnelheid  $U_k^*$  worden bepaald met de relatie:

$$U_k^{*2} = 0,057 \Delta g d_n$$

en de kritieke snelheid  $\bar{U}_k$  uit:

$$\bar{U}_k = 2,5 U_k^* \ln 12 R/2 d_n.$$


---

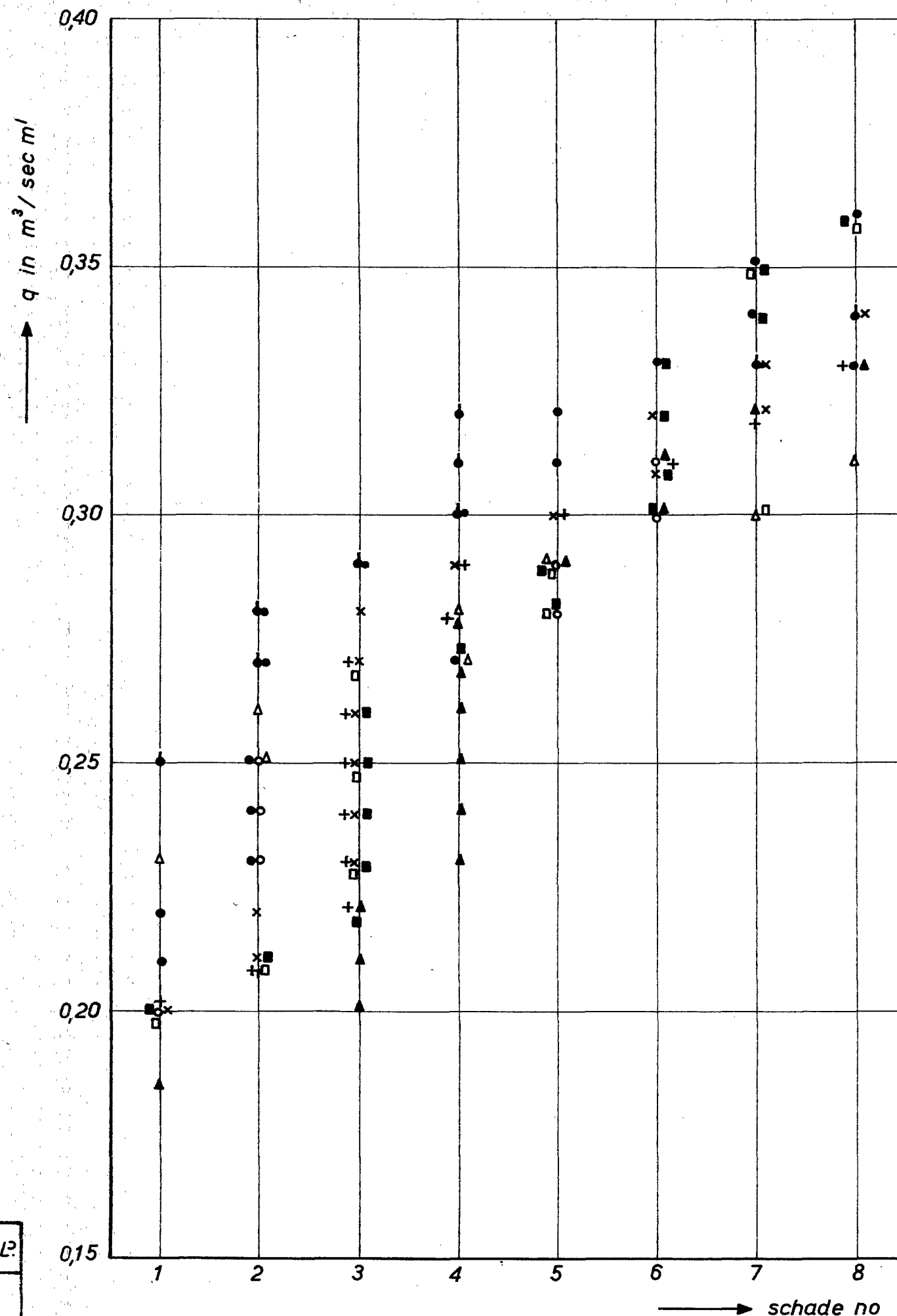
MATERIAAL

- T1 kubussen
- T2 cylinders
- T2 cylinders (herhaling)
- △ T3 tetraëders
- ▲ T4 knikkers
- × T5 grind
- + T6 kubisch gebroken stortsteen
- T7 platte stortsteen
- T7 platte stortsteen (herhaling)

SCHADE No.

KRITERIUM

|   |                       |
|---|-----------------------|
| 1 | geen beweging         |
| 2 | 1-5 stenen bewegen    |
| 3 | 6-10 stenen bewegen   |
| 4 | algemene beweging     |
| 5 | 1-2 stenen verplaatst |
| 6 | 3-5 " "               |
| 7 | 6-10 " "              |
| 8 | >10 " "               |



STABILITEIT IN PARALLELSTROMING

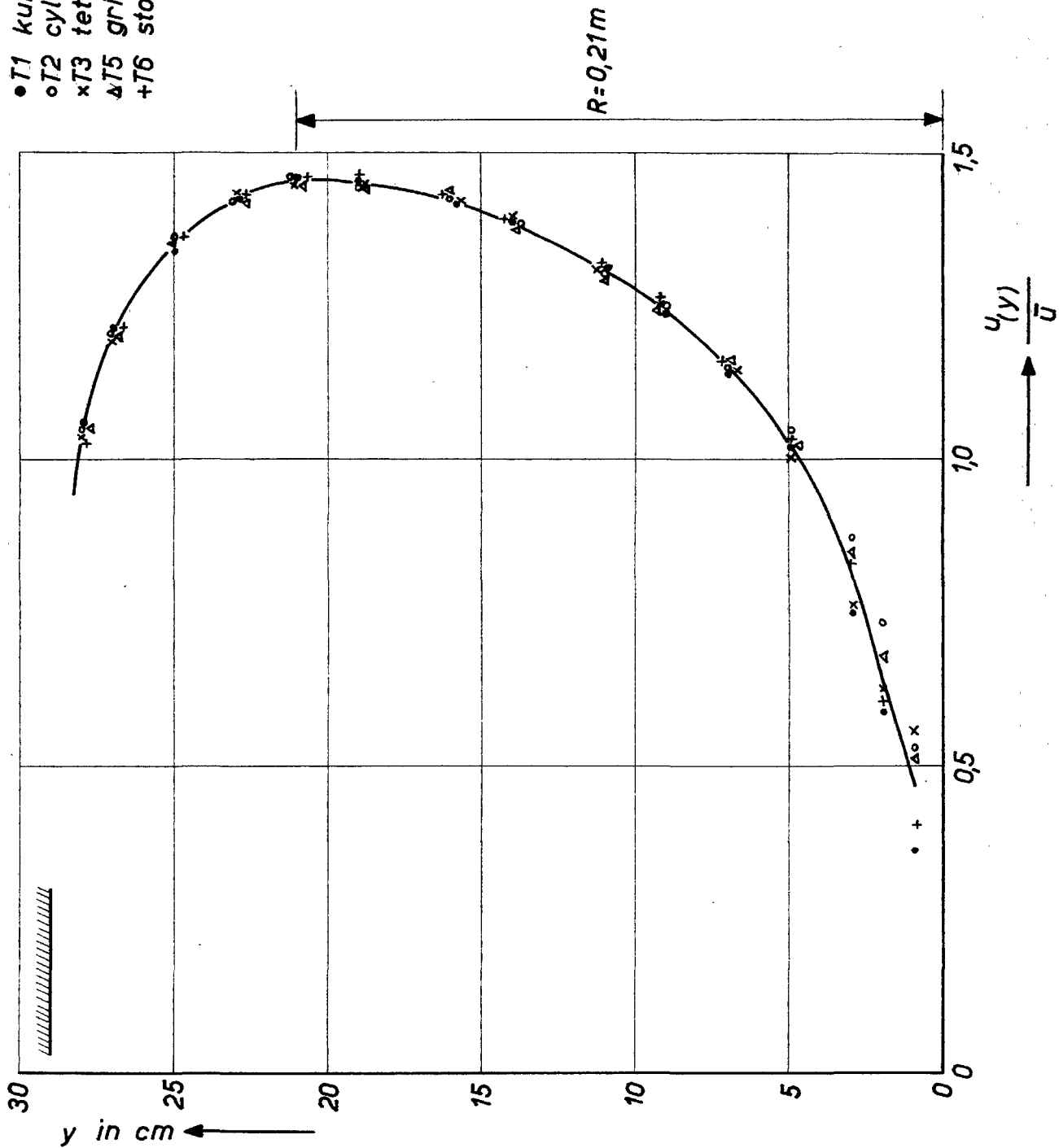
L.P.

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.731-VI

FIG. 1

- $\bar{v}$
- T1 kubussen 1,18 m/sec
  - T2 cylinders 1,08 " "
  - × T3 tetraëders 1,04 " "
  - Δ T5 grind 1,10 " "
  - + T6 stortsteen 1,12 " "

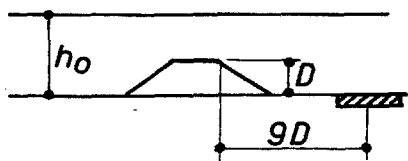
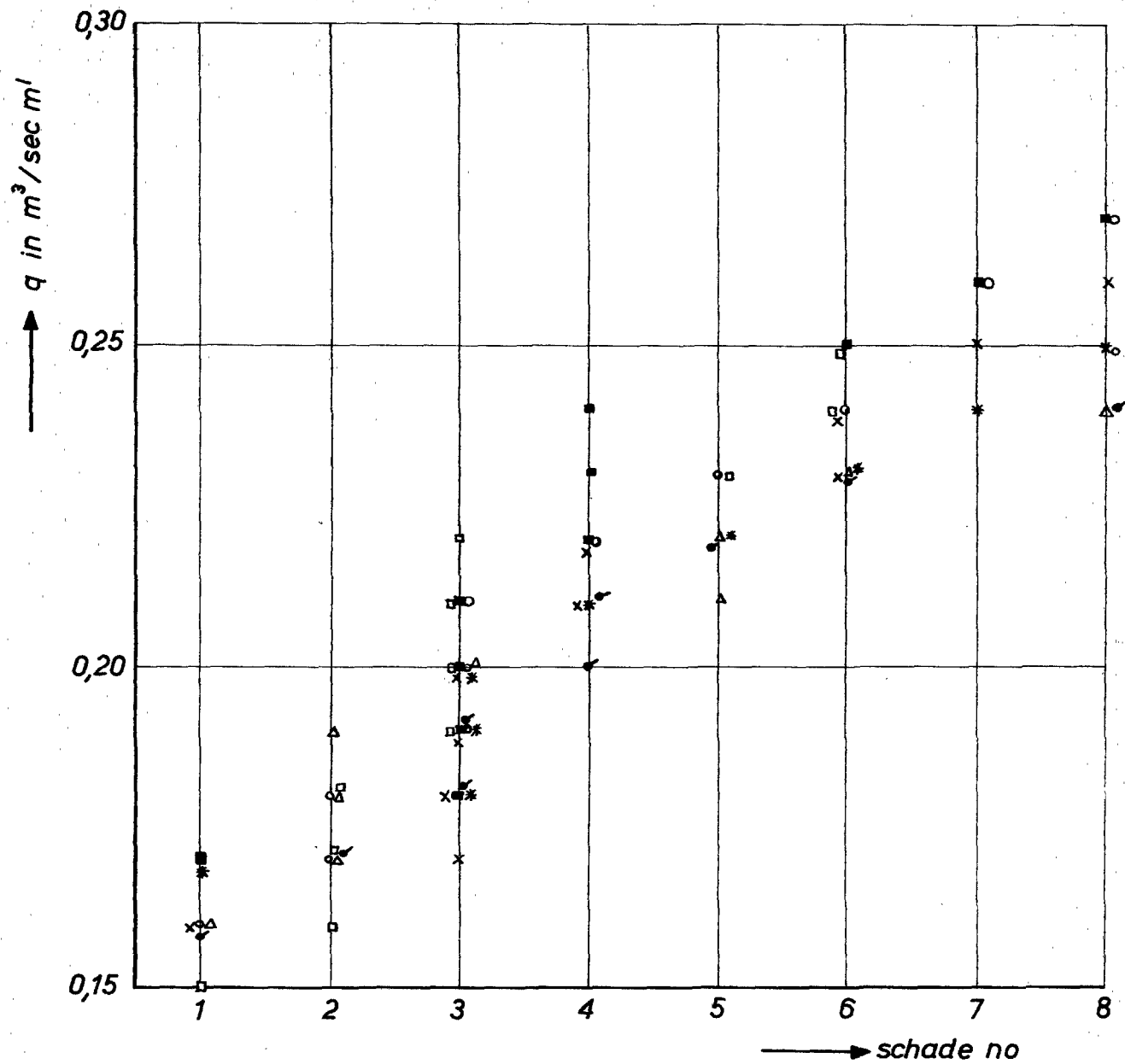


SNELHEIDSVERDELING IN PARALLELSTROMING

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M. 731-VI

FIG. 2



$$\frac{D}{h_0} = 0,39$$

$$h_0 = 0,29 \text{ m}$$

### MATERIAAL

- T8 kubussen
- T9 cylinders
- △ T10 tetraëders
- \* T11 kubisch gebroken stortsteen
- T12 platte stortsteen
- × T13 grind
- T14 knikkers

voor de schade criteria zie fig.1

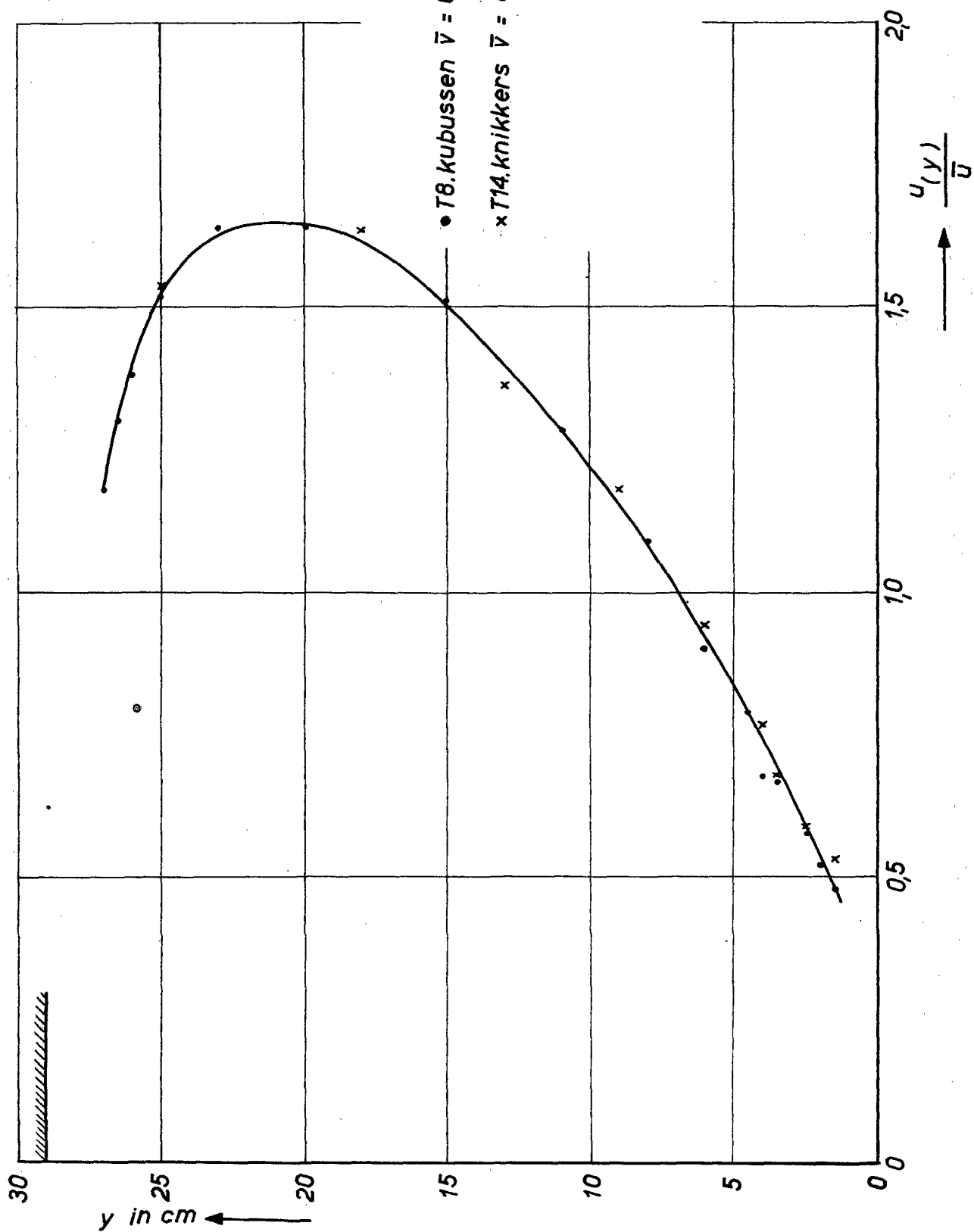
STABILITEIT ACHTER EEN DAM

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.731-VI

FIG. 3

P.



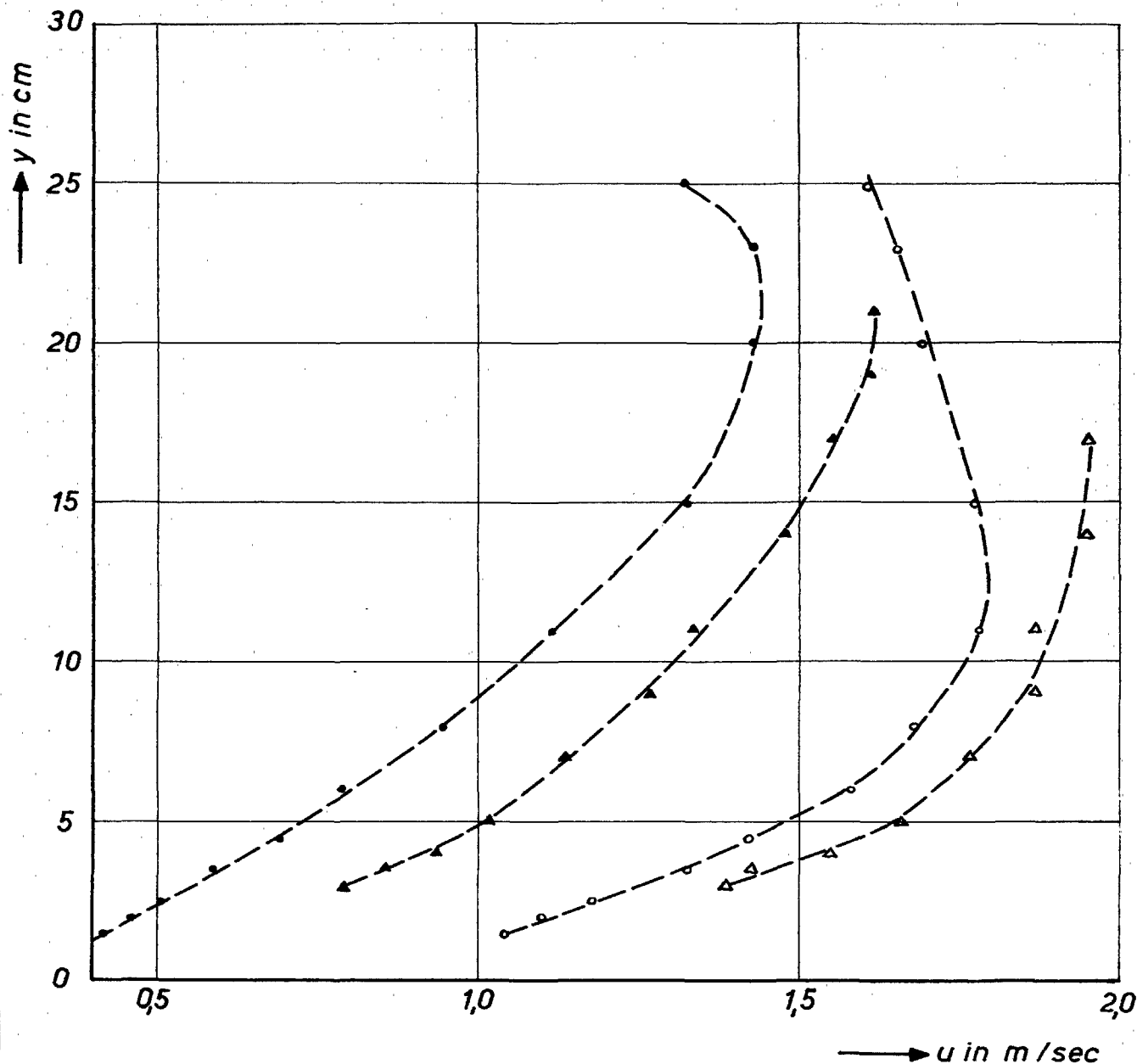
SNELHEIDSVERDELING ACHTER EEN DAM

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M. 731-VI

FIG. 4

L



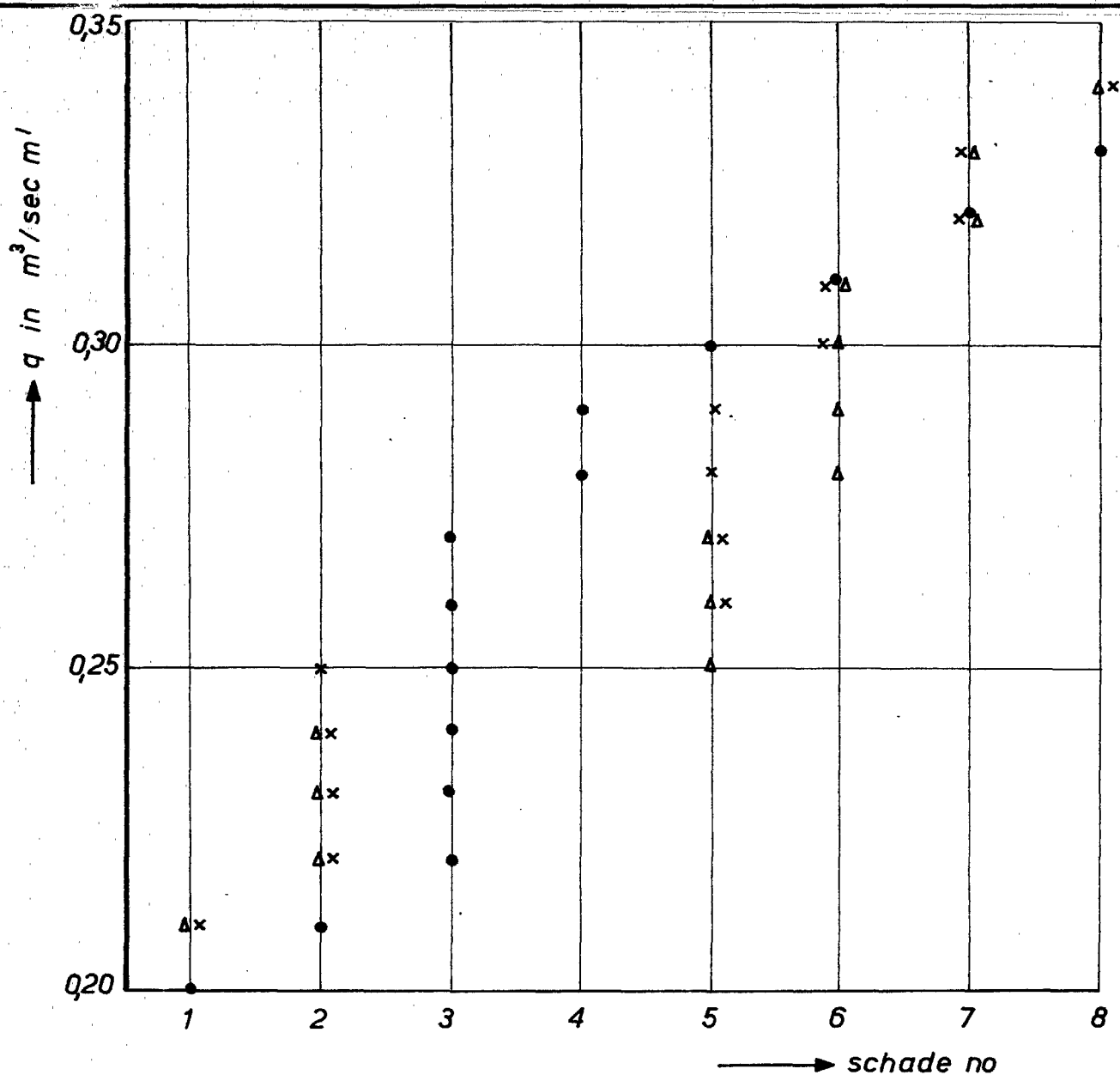
KUBUSSEN

- ● T8 met dam  $Q = 0,25 \text{ m}^3/\text{sec m}^1$
- △ ▲ T1 zonder dam  $Q = 0,33 \text{ m}^3/\text{sec m}^1$

- ▲  $u(y)$   $\sigma = \text{standaardafwijking}$
- △  $u(y) + 3\sigma(y)$

$\bar{\sigma}_{y=3-10\text{cm}}$  : T8 0,24 m/sec  
 : T1 0,20 m/sec

VERGELIJKING SNELHEIDSPROFIELEN  
 MET EN ZONDER DAM



**KUBISCH GEBROKEN STORTSTEEN**

|       | gewicht 11 - 13gr | 22 - 26gr | 44 - 52gr |
|-------|-------------------|-----------|-----------|
| • T6  | 0%                | 100%      | 0%        |
| Δ T21 | 20%               | 60%       | 20%       |
| x T22 | 50%               | 0%        | 50%       |

voor de schadecriteria zie fig. 1

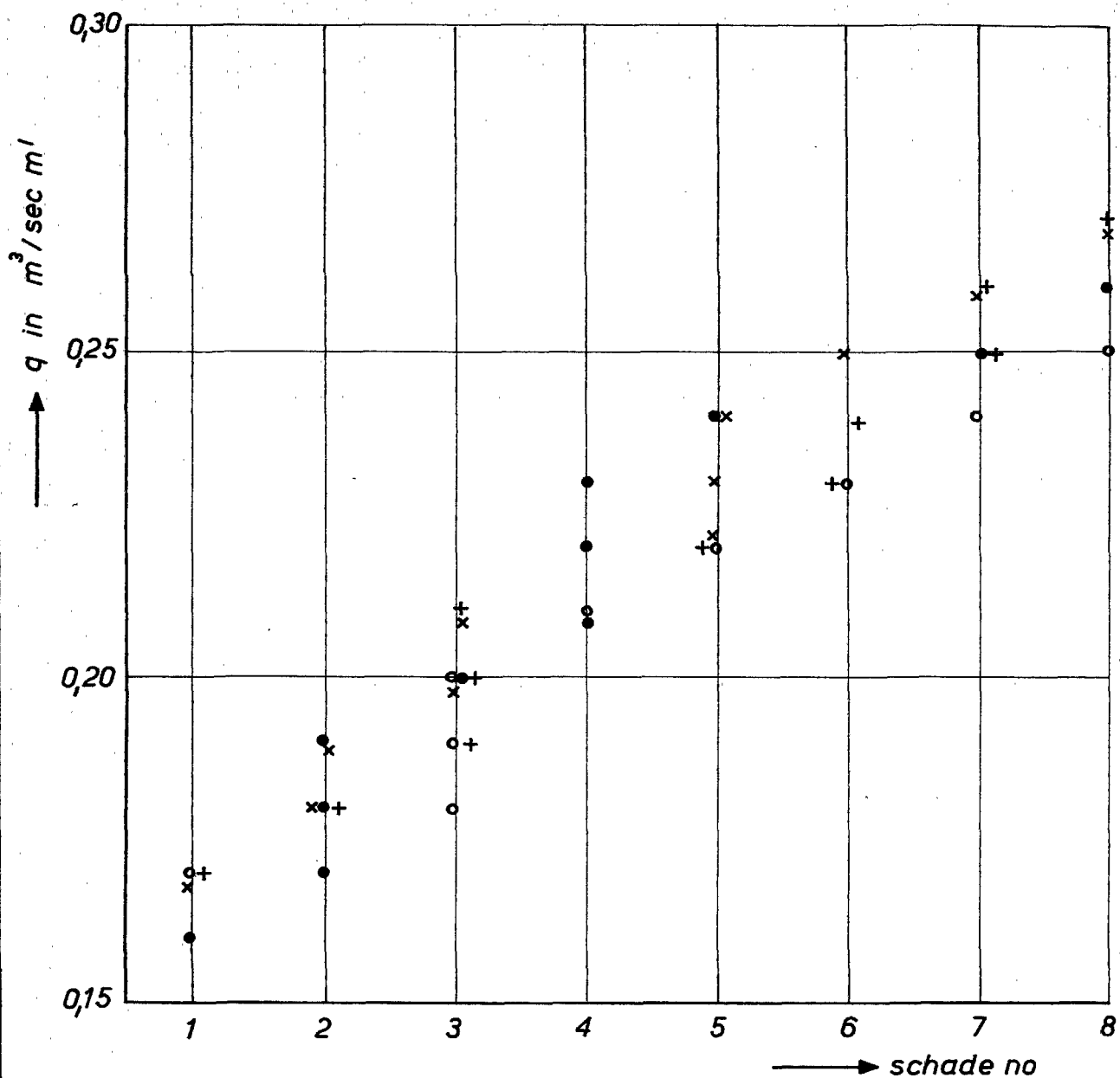
STABILITEIT IN PARALLELSTROMING  
INVLOED GRADERING

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M. 731-VI

FIG. 6

2



**KUBISCH GEBROKEN STORTSTEEN**

|       | gewicht 11 - 13gr | 22 - 26gr | 44 - 52gr |
|-------|-------------------|-----------|-----------|
| ○ T11 | 0 %               | 100 %     | 0 %       |
| ● T15 | 20 %              | 60 %      | 20 %      |
| + T16 | 30 %              | 40 %      | 30 %      |
| x T17 | 50 %              | 0 %       | 50 %      |

voor de schadecriteria zie fig. 1

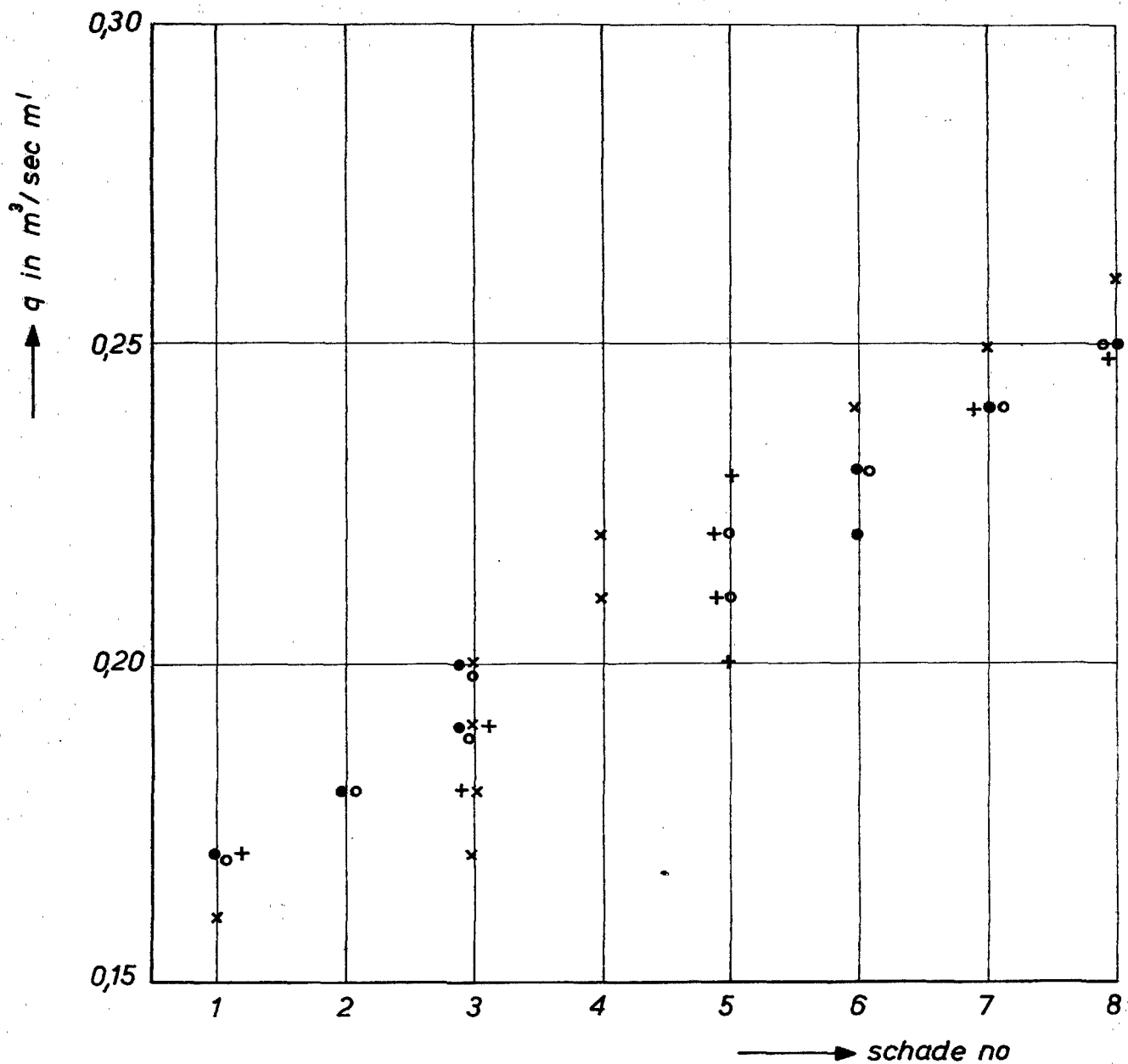
STABILITEIT ACHTER EEN DAM  
INVLOED GRADERING

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M.731-VI

FIG. 7





GRIND

|       | gewicht | 11 - 13 gram | 22 - 26 gram | 44 - 52 gram |
|-------|---------|--------------|--------------|--------------|
| x T13 |         | 0 %          | 100 %        | 0 %          |
| o T19 |         | 15 %         | 70 %         | 15 %         |
| • T18 |         | 30 %         | 40 %         | 30 %         |
| + T20 |         | 50 %         | 0 %          | 50 %         |

voor de schade criteria zie fig. 1

STABILITEIT ACHTER EEN DAM  
INVLOED GRADERING

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M. 731-VI

FIG. 8