

# Analyse van de Pfefferkornproef

door J. H. VAN DER VELDEN

## Hoofdafdeling Maatschappelijke Technologie TNO, Apeldoorn.

Onderzocht wordt in hoeverre stuikproeven en in het bijzonder de Pfefferkornproef zich lenen voor het vaststellen van de schuifweerstand van kleimassa's. Aan de hand van stuikproeven aan drie verschillende Nederlandse kleisoorten, wordt aangetoond, dat de schuifweerstand van een kleimassa in hoofdzaak wordt bepaald door het specifiek oppervlak van de klei, het verschil tussen het watergehalte van de massa en het watergehalte bij de uitzoekgrens van de betreffende klei, alsmede door de stuikenergie per volume-eenheid van het gestuikte proefstuk.

### **Analysis of the Pfefferkorn test**

It is investigated, how far butting tests and in particular the Pfefferkorn test can be utilized for the determination of the shear strength of clay bodies. Butting tests on three different Dutch clays demonstrate, that the shear strength of a clay body is determined substantially by the specific surface of the clay, the difference between the water content of the body and the water content at the lower plastic limit of the clay, as well as by the butting energy per unit of volume of the butted specimen.

### *1. Inleiding*

In 1924 introduceerde Pfefferkorn (1) een meetmethode voor de consistentie van een kleimassa. Dank zij de eenvoud en de korte duur wordt de bepaling vooral in de Europese keramische industrie nog steeds toegepast. Met het in figuur 1 geschetste apparaat wordt daarbij een cilindrisch proefstuk klei (diameter 33 mm, hoogte 40 mm) aan een stuikproef onderworpen. De stuik wordt teweeggebracht door een vlakke stalen schijf met een gewicht van 11,69 N, die van een hoogte van 186 mm op het proefstuk valt. Het quotiënt van de oorspronkelijke hoogte van de kleicylinder en de hoogte na de stuik is een maat voor de consistentie.

In de industriële praktijk wordt de consistentie van een toebereide plastische massa in sterke mate op de toe te passen vormgevingstechniek afgestemd. Figuur 2 geeft hiervan enkele voorbeelden. Voor met de hand goed vervormbare kleimassa's ligt het bedoelde quotiënt tussen 2,5 en 4. Het watergehalte van massa's met een quotiënt van 3,3 gebruikte Pfefferkorn voor het karakteriseren van de kleimassa's. Het is het plasticiteitsgetal van Pfefferkorn en wordt uitgedrukt in procenten van de droge massa.

Met name in Nederland wordt de consistentie gemakshalve vaak aangeduid met de resterende hoogte van het gestuikte proefstuk in mm. Het verloop van deze 'Pfefferkornresthoogte' met het watergehalte van een kleimassa blijkt over een ruim consistentietraject nagenoeg lineair. De hoeveelheid water, uitgedrukt in procenten van de droge massa, die een resthoogteverandering van 1 mm bewerkstelligt wordt in Nederland de 'consistentiestabiliteit' genoemd. De getalwaarde ligt voor de meeste kleien tussen 0,25 en 0,75 en is bijvoorbeeld van belang voor het vaststellen van de toelaatbare spreiding van het vormgevingswatergehalte.

De Pfefferkornproef levert aan het apparaat gebonden getalwaarden op. Volgens Haase (2) leent de stuikproef zich echter ook voor de vaststelling van de schuifweerstand van een kleimassa.

Het Pfefferkornapparaat is in de loop der jaren in Nederland een waardevol instrument voor het beoordelen van het vervormingsgedrag van plastische kleimassa's en voor de controle op de kleiconsistentie bij de vormgeving geworden. Het frequente gebruik van het apparaat was aanleiding de stuikproef voortbouwend op de studie van Haase eens wat nader te analyseren.

Voor een algemeen overzicht van kennis en onderzoek betreffende het vervormingsgedrag van klei wordt naar een recent TNO-rapport van Siskens over dit onderwerp verwezen.

# KLEI EN KERAMIEK

MAANDBLAD VAN DE VERENIGING KLEI INDUSTRIE  
EN VAN DE NEDERLANDSE KERAMISCHE VERENIGING

Redactiecommissie: Prof. Dr. J. M. Stevels, voorzitter, Ir. H. J. Timmers, vice-voorzitter, Mr. W. J. Bollen, secretaris; Ir. J. L. H. H. Bloemen; Drs. H. J. van Buren; Dr. Ir. M. E. A. Hermans; Prof. Ir. A. L. Stuijts; J. de Vast; H. Verberkmoes. Redacteur, Ir. L. L. van Breukelen. Adres voor redactionele aangelegenheden en abonnementen: Postbus 1057, 2280 CB Rijswijk Z.H., telefoon (070 99 20 66 / Voor advertenties: A. T. Verschoor & Zoon B.V., telefoon (03450) 20 45, Postbus 27, 4100 AA Culemborg, Postgiro 847922. Bank: Amrobank N.V., Culemborg, nr. 47.01.86.380 / Abonnementen voor de Benelux f 45,— per jaar, exclusief B.T.W.

## Van uitstel kwam geen afstel

Leden die opvallend goed werk hebben gedaan kunnen bij de Nederlandse Keramische Vereniging erelid worden. Het bestuur moet daartoe een voorstel doen, de ledenvergadering moet er mee instemmen. Met deze mogelijkheid springt men zuinig om, wie de status van erelid bereikt mag zich dus werkelijk bijzonder onderscheiden voelen. In de eerste dertig jaar van haar bestaan heeft de NKV het erelidmaatschap slechts vier maal toegekend, alleen Drs. H. J. van Buren, Ir. G. van Gijn, Prof. Dr. J. M. Stevels en wijlen Ir. J. M. Winkel zijn er in die periode mee begiftigd. Hun benoemingen zijn gewoonlijk bij gelegenheid van een lustrumviering tot stand gekomen, de installatie van het erelid was dan een plechtig intermezzo in het feestprogramma.

Hoewel geen lustrumjaar, heeft toch ook 1979 de NKV een erelid bezorgd. Tijdens de jaarvergadering die op 7 maart in Utrecht heeft plaats gevonden is Prof. Dr. G. H. Jonker namelijk met deze onderscheiding geëerd. Dat juist nu tot de benoeming is overgegaan, heeft uiteraard een reden: professor Jonker neemt aan het eind van de lopende cursus zijn emeritaat. Hij doet dit 5 jaar eerder dan bij hoogleraren gebruikelijk is. De afsluiting van zijn actieve levensperiode heeft de NKV graag aangegrepen om professor Jonker te laten merken hoe zeer men zijn persoon en zijn werk waardeert.

In de vijftiger jaren is Dr. Jonker — toen nog geen hoogleraar, maar chemicus op het Natuurkundig Laboratorium van Philips — voorzitter van de vereniging geweest. Na professor Druifvesteijn en doctor Stevels, was hij de derde aan wie deze hoogste functie werd toevertrouwd. De situatie van de NKV was destijds erg moeilijk. Ze moest zich in Nederland en in Europa nog een eigen plaats veroveren en daarbij mochten geen pijnlijke botsingen met de Vereniging Klei Industrie en de Association Européenne de Céramique ontstaan. Voorzitter Jonker bleek de strijd aan te kunnen; stukje voor stukje wist hij de NKV naar de positie die haar toekwam te leiden. In het buitenland groeide het respect voor de vereniging het snelst en toen daar eenmaal een goede reputatie verkregen was, is ook in Nederland de verstandhouding allengs verbeterd.

Om de kans op volledig succes zo groot mogelijk te maken, is Dr. Jonker in 1957 verzocht zijn voorzitterstermijn te willen verlengen. In plaats van de statutaire 3 jaar is hij 5 jaar aangebleven. Toen hij in april 1959 aftrad was de verbroedering een feit, zij het ook dat pas onder zijn opvolger officiële afspraken tot samenwerking zijn gemaakt.

Wat in het vat zit, verzuurt niet. De beloning waar Dr. Jonker 20 jaar geleden al recht op had zal ongetwijfeld ook nu nog in de smaak vallen.

## 2. Gebruik van het stuikapparaat

Het stuikapparaat wordt trillingsvrij opgesteld met de geleidestang van de stuikschijf in verticale positie. De geleidestang wordt met dunne olie gesmeerd. De onderkant van de stuikschijf en de grondplaat smeert men met een mengsel van negen volumedelen kerosine en één volumedeel oleïne.

De te onderzoeken kleimassa wordt vooraf gewalkt. De kleicylinders vervaardigt men onder vermindering van vochtverlies met een messing vormpje, een stempel en een schraapmes. Ook deze gereedschappen worden met het oleïne-kerosinemengsel licht ingeolied.

Het te stuiken proefstuk zet men midden onder de stuikschijf op de grondplaat. Na de val van de stuikschijf van de vooraf gekozen hoogte, wordt de resthoogte van het gestuikte proefstuk op een aan de stanggeleiders bevestigde maatlat met millimeterverdeling afgelezen. De aanwijzing geschiedt door een op de geleidestang aangebrachte pijlstift of nonius.

## 3. Stuikformule van Haase

### 3.1 Symbolen en eenheden

|            |   |                 |
|------------|---|-----------------|
| $A_V$      | stuikenergie per volume-eenheid klei            | $\text{kJ/m}^3$ |
| $E_V$      | vormveranderingsenergie per volume-eenheid klei | $\text{kJ/m}^3$ |
| $G$        | gewicht van de stuikschijf met geleidestang     | N               |
| $m$        | massa van de stuikschijf met geleidestang       | kg              |
| $g$        | versnelling van de zwaartekracht (9,81)         | $\text{m/s}^2$  |
| $H$        | nominale valhoogte (figuur 1)                   | mm              |
| $V$        | volume van de kleicylinder                      | $\text{mm}^3$   |
| $d_O$      | oorspronkelijke diameter van de kleicylinder    | mm              |
| $h_O$      | oorspronkelijke hoogte van de kleicylinder      | mm              |
| $h_I$      | resthoogte van de kleicylinder                  | mm              |
| $\sigma_n$ | stuikdruk op de stuikschijf                     | $\text{N/mm}^2$ |
| $\tau$     | schuifweerstand van de klei                     | $\text{N/mm}^2$ |

### 3.2 Schuifweerstand

Om uit stuikproefresultaten de schuifweerstand van een kleimassa af te leiden gaat Haase (2) uit van de veronderstelling, dat de bij de val van de stuikschijf ter beschikking komende arbeid geheel wordt gebruikt voor het overwinnen van de inwendige wrijving van de klei bij de vormverandering.

De arbeid, die de stuikschijf tijdens de val en de stuik per volume-eenheid van de kleicylinder verricht bedraagt:

$$A_V = \frac{G}{V} \cdot (H - h_I) \cdot 10^3 \quad (1)$$

Substituties:

$$G = m \cdot g \quad (1a)$$

$$V = \frac{\pi}{4} \cdot d_O^2 \cdot h_O \quad (1b)$$

Eenvoudigheidshalve wordt aangenomen, dat de klei gedurende de stuik een constant blijvende stuikdruk  $\sigma_n$  op de stuikschijf uitoefent, die onafhankelijk is van de vervormingssnelheid van de klei. Ook wordt verondersteld, dat het proefstuk tijdens de stuik niet scheurt, dat het cilindrisch blijft en dat het volume niet verandert. Voor de vormveranderingsenergie per volume-eenheid leidt Haase dan af:

$$E_V = \sigma_n \cdot \ln(h_O/h_I) \cdot 10^3 \quad (2)$$

Omdat wordt aangenomen dat  $E_V$  gelijk is aan  $A_V$ , bedraagt de stuikdruk:

$$\sigma_n = \frac{G \cdot (H - h_I)}{V \cdot \ln(h_O/h_I)} \quad (3)$$

Volgens Haase geldt dan voor de schuifweerstand van de klei de stuikformule:

$$\tau = \frac{G \cdot (H - h_1)}{2 \cdot V \cdot 1n(h_0/h_1)} \quad (4)$$

#### 4. Stuiksnelheid en wrijvingsverliezen

Op het moment dat de vallende stuikschijf de kleicylinder raakt bedraagt de snelheid  $V_0$  in m/s theoretisch:

$$V_0 = \sqrt{2g \cdot 10^3(H - h_0)} \quad (5)$$

Voor een valhoogte  $H$  van 186 mm en een cylinderhoogte  $h_0$  van 40 mm wordt de trefsnelheid  $V_0$  : 1,69 m/s. Het verdere verloop van de stuiksnelheid  $v$  met de hoogte  $h$

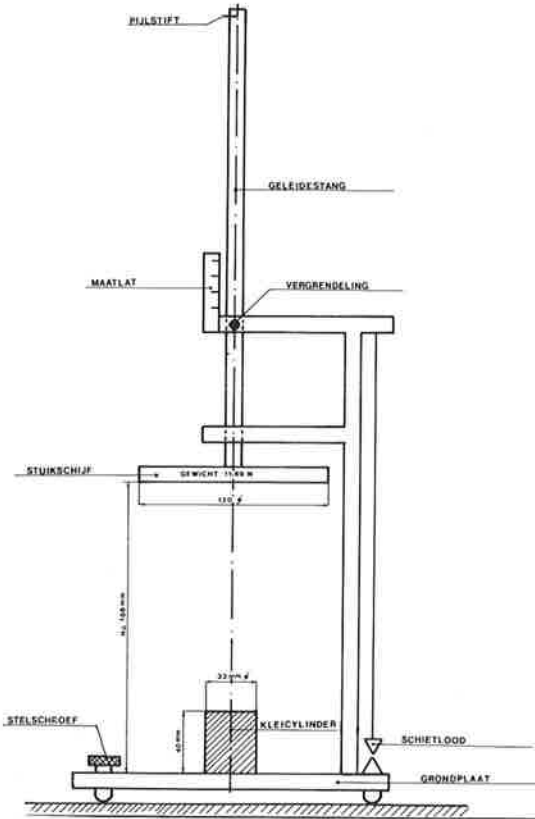


Fig. 1 –  
Pfefferkornapparaat.

van de kleicylinder kan onder verwaarlozing van de uitwendige wrijving als volgt worden afgeleid:

— Tijdens de stuik, bij een hoogte  $h$  van de kleicylinder, wordt op de stuikschijf in opwaartse richting een kracht  $K$  uitgeoefend:

$$K = \frac{\sigma_n \cdot V}{h} - m \cdot g.$$

Deze kracht vertraagt de snelheid  $v$  van de stuikschijf. De vertraging  $a$  bedraagt:

$$a = \frac{\sigma_n \cdot V}{m \cdot h} - g$$

Voor a geldt:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dh} \cdot \frac{dh}{dt} = \frac{dv}{dh} \cdot v = \frac{d(1/2 v^2)}{dh}$$

Hieruit volgt:

$$d(1/2 v^2) = \left[ \frac{\sigma_n \cdot V}{m \cdot h} - g \right] \cdot dh.$$

Integratie en verdere uitwerking leidt tot formule 6 voor het verloop van de stuiksnelheid v in m/s met de cylinderhoogte h in mm:

$$v = \sqrt{2g \cdot 10^{-3} \left[ (H-h) - \frac{(H-h_1)}{\ln(h_0/h_1)} \cdot \ln(h_0/h) \right]} \quad (6)$$

Ter controle van de toepasbaarheid van de formules 5 en 6 is het werkelijke verloop van de stuik bij een aantal Pfefferkornproeven met behulp van ultrasnelle fotografie (0,5 ms per beeldje) geregistreerd en geanalyseerd. Figuur 3 toont bij wijze van voorbeeld het gemeten verloop van de cylinderhoogte met de tijd van een normale Pfefferkornproef aan een masse met een Pfefferkornresthoogte  $h_1$  van 16,9 mm. Tevens is het verloop van de stuiksnelheid met de hoogte weergegeven. Tengevolge van de wrijving van de geleidestang, bleek de trefsnelheid 1,65 m/s in plaats van 1,69 m/s. Voor de

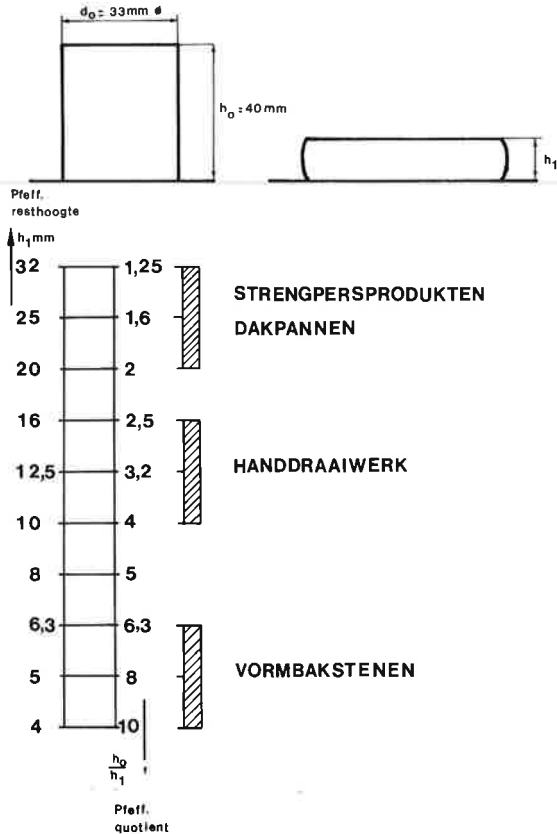


Fig. 2 - Consistentie van kleien voor verschillende vormgevingstechnieken.

geconstateerde trefnelheid zou theoretisch slechts een valhoogte  $H'$  van 178,8 mm nodig zijn geweest. Het uit de metingen afgeleide verloop van de stuiksnelheid met de hoogte blijkt overigens geheel samen te vallen met het verloop volgens formule 6, mits hierin de getalwaarde van  $H'$  en niet die van  $H$  wordt gebruikt.

Het gefilmde verloop van de stuikproeven bevestigde de opvatting, dat onzorgvuldigheid met betrekking tot de smering van de geleidestang, de verticale opstelling van het apparaat of de ontgrendeling, de trefsnelheid en daarmee de beschikbare vervormingsenergie sterk beïnvloedt. Niet alleen vóór, doch ook tijdens de stuik, heeft de wrijving van de geleidestang invloed op het meetresultaat. Dit zal vooral het geval zijn

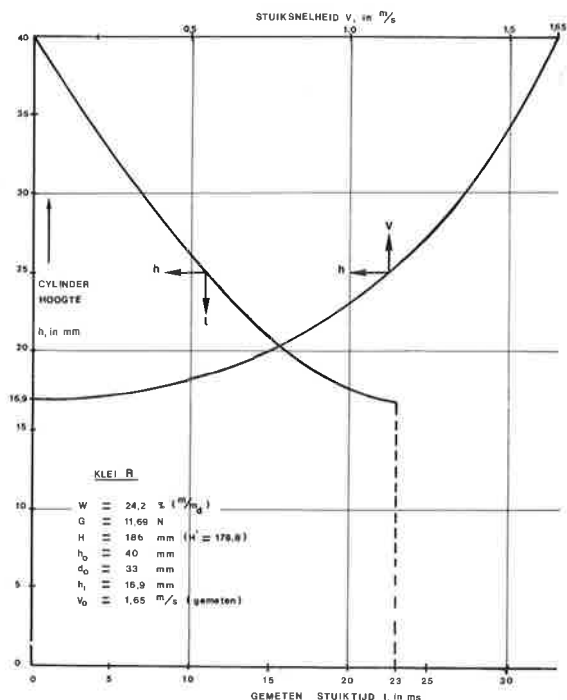


Fig. 3 – Stuiktijd en stuiksnelheid bij een Pfefferkornproef.

bij stuikproeven aan heterogene proefstukken, of bij een excentrische opstelling van de kleicylinders. Bovendien zal een klein deel van de stuikenergie worden gebruikt voor het overwinnen van de wrijving van de klei langs de geoliede en gepolijste stalen stuikschijf en grondplaat. De orde van grootte van de wrijvingscoëfficiënt bedraagt bij goede smering met het oleïne-kerosinemengsel naar schatting 0,05. De schatting is gebaseerd op een oriënterend proefondervindelijk onderzoek. Ook Häusser geeft een getalwaarde van deze orde van grootte (6). Een globale berekening leert, dat de invloed van de bedoelde wrijving op het meetresultaat zich bij deze wrijvingscoëfficiënt vooral bij massa's met een Pfefferkornresthoogte kleiner dan 8 mm doet gelden. De bedoelde verliezen dienen door een goede smering en een zorgvuldige werkwijze te worden beperkt, terwijl voor consistentiemetingen aan zeer slappe kleien een apparaat met een kleinere stuikenergie aanbeveling verdient.

## 5. Stuikproeven

### 5.1 Opzet van het onderzoek

Met drie Nederlandse kleisoorten werd onder gevarieerde omstandigheden een aantal stuikproeven gedaan. De resultaten werden aan de hand van de stuikformule van Haase geanalyseerd. Het onderzoek betrof voornamelijk luchthoudende kleimassa's van circa 20°C met verschillend gekozen watergehaltes. Valhoogte, gewicht van de stuikschijf, alsmede hoogte en diameter van de kleicylinders werden gevarieerd.

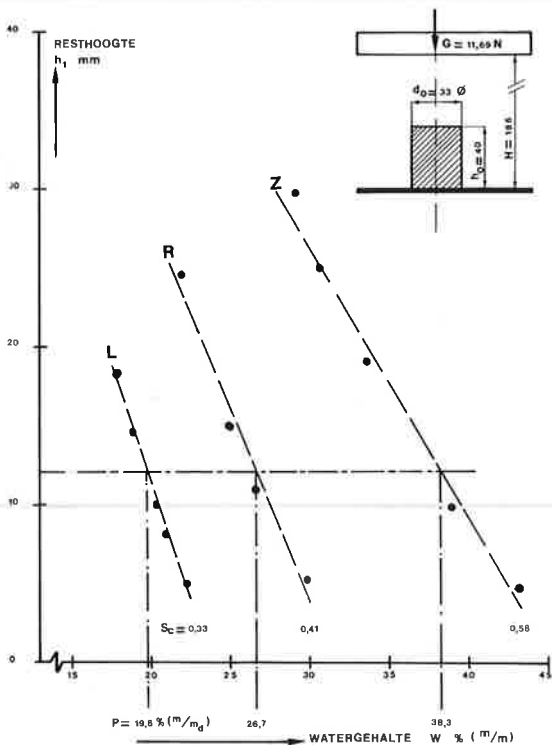


Fig. 4 - Invloed van het watergehalte op de consistentie van drie Nederlandse kleien.

### 5.2 Proefmassa's

Het onderzoek werd uitgevoerd aan een jonge zeelei Z uit Groningen, een jonge rivierklei R uit Gelderland en een lössleem L uit Noord-Brabant. De kleimonsters stonden ter beschikking als bij 40°C gedroogde onsamenhangende korrelmassa's. Deze werden in een planeetmenger met water aangemaakt tot relatief stijve plastische massa's. Na een inweekperiode van een etmaal werden hieruit wederom in een planeetmenger door toevoeging van water, proefmassa's met onderling verschillende watergehaltes samengesteld. Direct daarna werden de proefmassa's aan een aantal stuikproeven onderworpen. Het watergehalte van de proefmassa's werd door het wegen van monsters vóór en na droging bij 105 °C bepaald en uitgedrukt in procenten van de droge massa.

### 5.3 Apparatuur

Er werden twee stuikapparaten gebruikt. Het ene was een origineel Pfefferkornappa-

raat met een stuikschiifgewicht van 11,69 N, het andere een lichter type stuikapparaat met een stuikschiifgewicht van 7,65 N. Laatstgenoemd type wordt in Nederland aanbevolen voor de fabriekscontrôle op de consistentie van slappe kleimassa's bij de fabricage van vormbakstenen.

| % (m/m <sub>d</sub> )          | klei Z | klei R | klei L |
|--------------------------------|--------|--------|--------|
| SiO <sub>2</sub>               | 68     | 63     | 81     |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 11,7   | 10,3   | 9,7    |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5,1    | 3,9    | 2,6    |
| CaO                            | 1,1    | 5,6    | 0,5    |
| MgO                            | 1,2    | 1,5    | 0,8    |
| K <sub>2</sub> O               | 2,3    | 2,2    | 1,3    |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,6    | 0,7    | 1,0    |
| gloeiverlies                   | 6,7    | 8,9    | 2,1    |
| humus                          | 1,6    | 1,3    | 0,4    |
| CO <sub>2</sub>                | 0,3    | 4,2    | 0,0    |

Tabel 1 — Chemische analyse van de drie kleien.

| eigenschap                                      | eenheid               | klei Z | klei R | klei L |
|---|-----------------------|--------|--------|--------|
| korrelfractie < 2 µm                            | % (m/m <sub>d</sub> ) | 41     | 24     | 13     |
| korrelfractie < 10 µm                           | % (m/m <sub>d</sub> ) | 57     | 40     | 22     |
| korrelfractie > 20 µm                           | % (m/m <sub>d</sub> ) | 32     | 49     | 65     |
| totaal specifiek oppervlak<br>(glycoladsorptie) | m <sup>2</sup> /g     | 132    | 75     | 34     |
| uitrolgrens (Atterberg)                         | % (m/m <sub>d</sub> ) | 25     | 19     | 16     |
| plasticiteitsgetal (Pfefferkorn)                | % (m/m <sub>d</sub> ) | 38     | 27     | 20     |
| consistentiestabiliteit                         | % /mm                 | 0,58   | 0,41   | 0,33   |

Tabel 2 — Diverse analysegegevens van de drie kleisoorten.

Grove verontreinigingen van de maasa, alsmede de wrijving van de klei langs stuikschiif en grondplaat hebben bij het lichtere type minder invloed op het meetresultaat bij zeer slappe kleien, terwijl dan ook aan de afleesnauwkeurigheid minder hoge eisen behoeven te worden gesteld. De valhoogte H van dit instrument bedraagt normaliter 100 mm. De proefstukken hebben dezelfde vorm en afmetingen als die van Pfefferkorn. In dit verband dient gewezen te worden op de verschillen in de specificatie van de Pfefferkornproef, die men in de vakliteratuur aantreft. Tabel 3 geeft hiervan een indruk.

| specificatie            | stuikschiif  |                 | cilinder     |                |
|-------------------------|--------------|-----------------|--------------|----------------|
|                         | gewicht<br>N | valhoogte<br>mm | hoogte<br>mm | diameter<br>mm |
| volgens Pfefferkorn (1) | 11,69        | 186             | 40           | 33             |
| volgens Haase (2)       | 11,77        | 185             | 40           | 35             |
| volgens Lehnhäuser (4)  | 11,77        | 185             | 40           | 30             |

Tabel 3 — Verschillende specificaties van de Pfefferkornproef.

Bij het onderhavige onderzoek zijn het stuikschiifgewicht, de valhoogte, de cilinderhoogte en de cilinderdiameter uiteraard gevarieerd.



## 6. Stuikeproefresultaten

### 6.1 Pfefferkornresthoogte

In figuur 4 zijn de bij verschillende watergehalten gevonden Pfefferkornresthoogten van de drie luchthoudende kleisoorten uitgezet. Wanneer men de beperkte nauwkeurigheid van de bepalingen in aanmerking neemt, blijkt het watergehalte-resthoogteverloop voor alle drie bij eerste benadering lineair. In hoofdstuk 1 is hierop reeds gewezen. In de figuur zijn tevens de in tabel 2 vermelde waarden van het plasticiteitsgetal (P) van Pfefferkorn en van de consistentiestabiliteit (Sc) opgenomen.

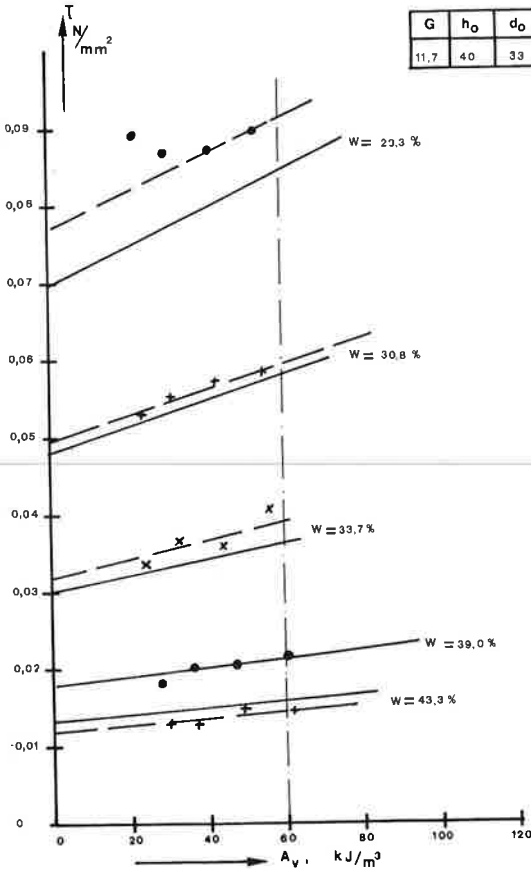


Fig. 5 – Schuifweerstand van klei Z.

### 6.2 Schuifweerstand

Het waarnemingsbestand van de stuikeproeven werd verwerkt tot gegevens over de schuifweerstand  $\tau$  en de stuikeenergie per volume-eenheid klei  $A_V$ . De berekening van  $\tau$  en  $A_V$  geschiedde aan de hand van de formules 1 en 4. Wrijvingsinvloeden op  $\tau$  en  $A_V$  bleven, bij gebrek aan betrouwbare gegevens hierover, buiten beschouwing.

In de figuren 5, 6 en 7 zijn de resultaten van de berekeningen in  $\tau - A_V$ -diagrammen weergegeven. De diagrammen geven een indruk van de mate waarin de berekende waarde van de schuifweerstand afhankelijk is van de omstandigheden waaronder de stuikeproef wordt uitgevoerd. De puntenverzamelingen hebben betrekking op verschil-

lende watergehalten  $W$ . De cijfers bij de afzonderlijke punten verwijzen naar de in de legenda aangegeven beproevingsomstandigheden. Daarenboven werd de valhoogte gevarieerd. Uit het met rechte lijnen aangegeven algemeen verloop van  $\tau$  met  $A_v$  blijkt, dat de schuifweerstand toeneemt indien de stuikenergie per volume-eenheid klei groter wordt gekozen. De schuifweerstand is kennelijk afhankelijk van de specificatie van de stuikproef. De trend manifesteert zich sterker naarmate de klei een lager watergehalte heeft. Voor een gegeven niveau van de schuifweerstand vertonen magere kleien het effect het sterkst. Overigens laat de spreiding van de meetpunten te wensen over.

In de  $\tau$ - $A_v$  relatie komt de invloed van de van proef tot proef en tijdens elke proef va-

| nr | G    | $h_o$ | $d_o$ |
|----|------|-------|-------|
| 1  | 11,7 | 40    | 33    |
| 6  | 11,7 | 40    | 27,2  |
| 7  | 7,65 | 40    | 33    |
| 8  | 7,65 | 40    | 27,2  |
| 9  | 7,65 | 30    | 27,2  |
| 2  | 11,7 | 35,2  | 33    |
| 3  | 11,7 | 30,3  | 33    |
| 4  | 11,7 | 25,5  | 33    |
| 5  | 11,7 | 21    | 33    |

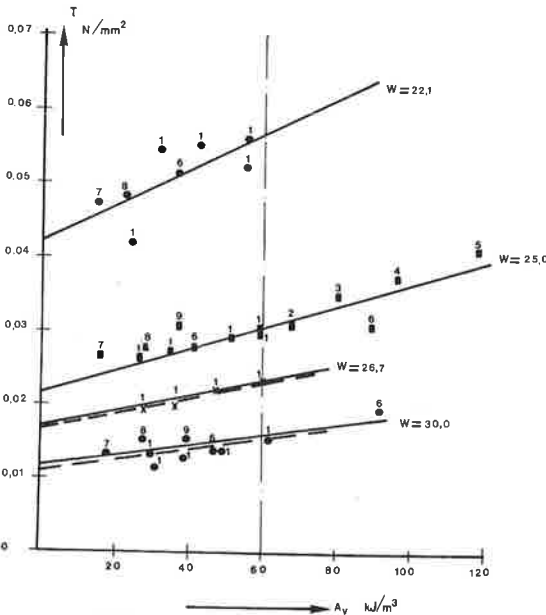


Fig. 6 - Schuifweerstand van klei R.

riërende vervormingssnelheden van de klei op de schuifweerstand waarschijnlijk onvoldoende tot haar recht. Ook variabele wrijvingsverliezen, de vorming van scheurtjes in de proefstukken, alsmede afwijkingen in het watergehalte, zullen echter tot de bedoelde spreiding hebben bijgedragen. De woorden 'trend' en 'algemeen verloop' zijn met opzet gekozen om de nadruk te leggen op het globale karakter van het gevonden verloop van  $\tau$  met  $A_v$ .

Op het verschil van de in figuren 5, 6 en 7 gebruikte twee lijnsorten, zal in het vervolg van dit artikel worden teruggekomen. Voorlopig wordt opgemerkt, dat in gevallen, waar de twee lijnsorten kennelijk betrekking hebben op een zelfde puntenverzameling, de onderbroken lijnen het algemene verloop van de meetpunten beter weergeven.

### 7. Invloed van het watergehalte op de schuifweerstand

De snijpunten van de ordinaten  $A_V = 0$  en  $A_V = 60 \text{ kJ/m}^3$  (fig. 5, 6, 7) met de lijnen die het algemeen verloop van de meetpunten het beste weergeven, zijn opgenomen in het in figuur 8 afgebeelde watergehalte- schuifweerstanddiagram.

Het verloop van de tot  $A_V = 0$  geëxtrapolerde schuifweerstand met het watergehalte

| G    | $h_o$ | $d_o$ |
|------|-------|-------|
| 11,7 | 40    | 33    |

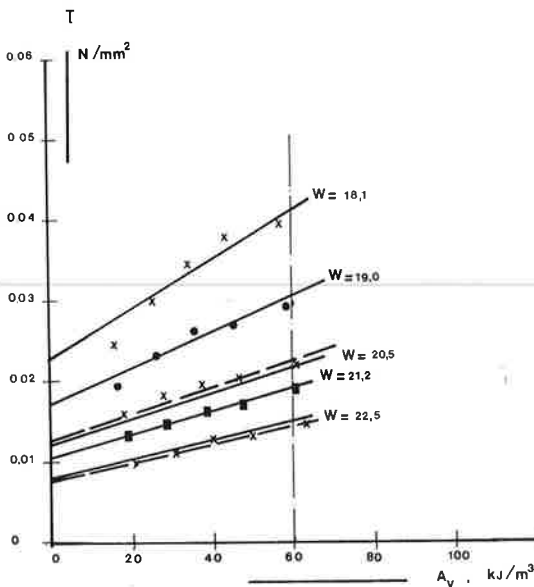


Fig. 7 - Schuifweerstand van klei L.

blijkt voor elk van de drie kleisoorten Z, R en L bij benadering met formule 7 te kunnen worden beschreven.

$$\tau_o = \frac{B \cdot O_s}{(W - W_x)} \quad (7)$$

Hierin is:

- $\tau_o$  schuifweerstand voor  $A = 0$  in  $\text{N/mm}^2$ ,
  - $O_s$  totaal specifiek oppervlak van de droge klei in  $\text{m}^2/\text{g}$ ,
  - $W$  watergehalte betrokken op de massa van de droge klei in % ( $\text{m}/\text{m}_d$ ),
  - $W_x$  watergehalte bij de uitrolgrens volgens Atterberg, betrokken op de massa van de droge klei in % ( $\text{m}/\text{m}_d$ ),
  - $B$  factor.
- $B$  en  $W_x$  werden door iteratie berekend.

Voor  $W$  en  $O_s$  zijn daarbij de experimenteel vastgestelde waarden aangehouden. De getalwaarde van  $B$  bleek bij de onderzochte kleien onafhankelijk van de kleisoort. Gevonden werd:

$$B = 1,75 \cdot 10^{-3} \quad (7a)$$

Voor  $W_x$  werden, zoals tabel 4 aangeeft, getalwaarden berekend, die weinig afwijken van de experimenteel bepaalde uitrolgrenzen.

| kleisoort | uitrolgrens $W_x$ in % (m/m <sub>d</sub> ) |                |
|-----------|--|----------------|
|           | berekend                                   | uit experiment |
| Z         | 26   | 25             |
| R         | 19   | 19             |
| L         | 15,5                                       | 16             |

Tabel 4 — Berekende en experimenteel bepaalde uitrolgrenzen.

De in figuur 8 getekende curven voor  $A_v = 0$  geven de met formule 7 berekende relatie tussen  $\tau_0$  en  $W$  weer.  $\tau_0$  komt mogelijk overeen met de zwichspanning van de kleien.

Bij het ontwerp van formule 7 is uitgegaan van de veronderstelling, dat de bedoelde schuifweerstand omgekeerd evenredig zou kunnen zijn met de toename van de gemid-

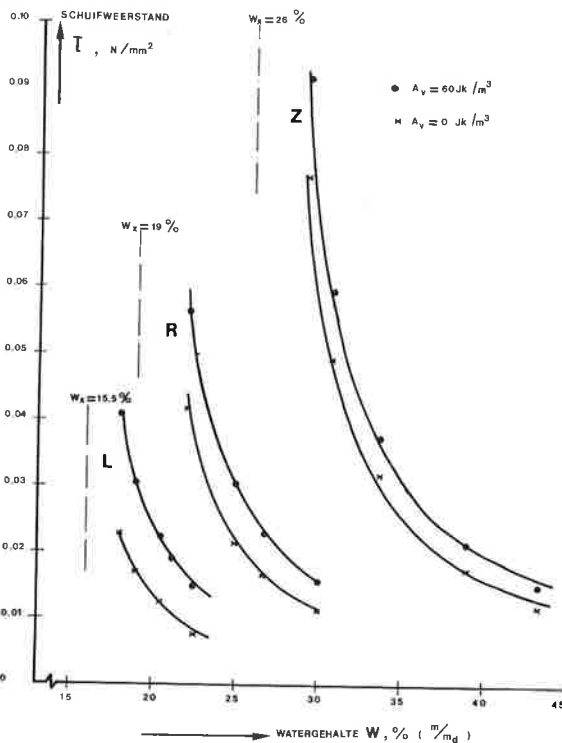


Fig. 8 — Schuifweerstand van drie Nederlandse kleien in afhankelijkheid van het watergehalte.

delde dikte van de waterfilmen tussen de kleideeltjes, gerekend van de bevochtigings-toestand bij de uitrolgrens af. Tevens werd aangenomen dat het totale specifiek oppervlak van de kleien maatgevend zou zijn voor de ruimtelijke verdeling van het water boven de uitrolgrens. De belangrijkste reden voor de keuze van het totale specifiek oppervlak  $O_S$  in plaats van het wellicht eerder in aanmerking komende uitwendige specifiek oppervlak  $A_S$ , was, dat van  $O_S$  eigen meetresultaten ter beschikking stonden. Uit eerder verricht onderzoek (7) valt overigens af te leiden, dat de getalwaarde van het quotiënt  $O_S/A_S$  voor elk van de betrokken kleitypen ongeveer 5 is. De vervanging van  $O_S$  in formule 7 door  $A_S$  zou derhalve een evenredigheidsfactor  $B'$  hebben opgeleverd met

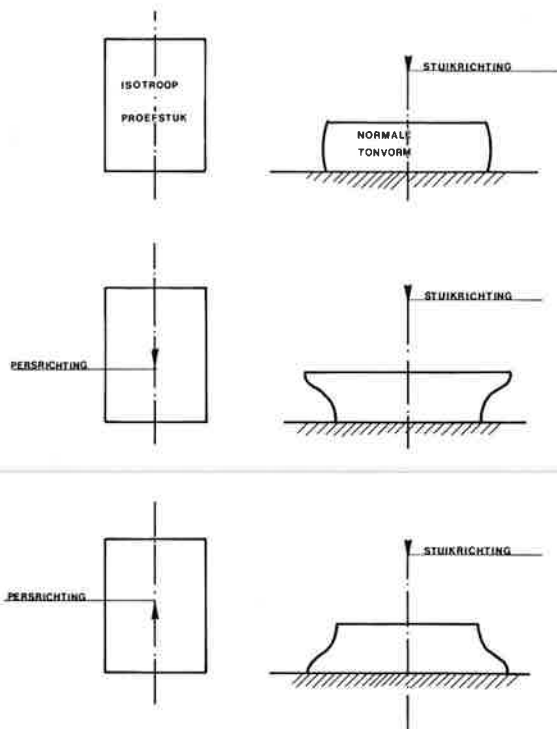


Fig. 9 - Afwijkend stuikgedrag van geëxtrudeerde cylind ers van de ontluuchte klei Z.

een orde van grootte van  $8,8 \cdot 10^{-3}$ . Het wetenschappelijke belang van voortgezet onderzoek met in mineralogisch opzicht sterk verschillende kleien, waarvan zowel  $O_S$  als  $A_S$  met zekerheid bekend zijn, is op grond van het vorenstaande evident. Een extra aanwijzing voor de globale juistheid van formule 7 geeft het door van Amerongen (5) aangetoonde lineaire verband tussen het totale specifiek oppervlak van Nederlandse kleien en de plasticiteitsindex volgens Atterberg. Aan figuur 6 in het bedoelde artikel kan de vuistregel worden ontleend:

$$P_a = (W_v - W_x) = 0,342 \cdot O_S \quad (8)$$

Hierin is:

- $P_a$  plasticiteitsindex volgens Atterberg in % (m/md),
- $W_v$  vloeigrens in % (m/md)
- $W_x$  uitrolgrens in % (m/md)
- $O_v$  totaal specifiek oppervlak in  $m^2/g$ .

Bij de vloeigrens bezit elke massa een vaste lage waarde van de schuifweerstand, die alleen afhankelijk is van de voorgeschreven uitvoeringswijze van de betreffende onderkenningsproef. Hieraan wordt met formule 7 voldaan. Voor de schuifweerstand  $\tau_v$  bij de vloeigrens vindt men namelijk bij substitutie van  $(W - W_X)$  door de betrekking van formule 8:

$$\tau_v = \frac{1,75 \cdot 10^{-3}}{0,342} = 0,005 \text{ N/mm}^2$$

De in hoofdstuk 6.2 geconstateerde afhankelijkheid van de schuifweerstand van de omstandigheden waaronder de stuikproef wordt uitgevoerd, kon althans voorlopig en bij benadering het eenvoudigst tot uitdrukking gebracht worden met de empirische formule 9

$$\tau = \frac{B \cdot O_S + C \cdot A_V}{(W - W_X)} \quad (9)$$

Aanvullend is hierin:

$\tau$  schuifweerstand in  $\text{N/mm}^2$  bij uitoefening van een stuikarbeid per volume-eenheid van  $A_V \text{ kJ/m}^3$ .

C factor.

Ook voor C bleek globaal een van de kleisoort onafhankelijke getalwaarde gekozen te kunnen worden.

$$C = 0,8 \cdot 10^{-3} \quad (9a)$$

In figuur 8 is ook de met formule 9 berekende curve van de relatie tussen  $\tau$  en  $W$  voor  $A_V = 60 \text{ KJ/m}^3$  afgebeeld.

In de figuren 5, 6 en 7 is de berekende trend van  $\tau$  met ononderbroken lijnen aangegeven. Het gebruik van twee lijnsoorten in deze grafieken is daarmee verklaard. Bij klei Z (figuur 5) zijn de verschillen tussen het berekende en het uit de metingen voortvloeiende verloop tamelijk groot. Dit neemt echter niet weg, dat de geschetste analyse van stuikproefresultaten in belangrijke mate tot een beter inzicht in de vervormingseigenschappen van kleimassa's kan bijdragen.

Het gevonden verloop van de schuifweerstand met het watergehalte heeft betrekking op luchthoudende kleien. Uit oriënterende stuikproeven aan de kleien Z en R in ontluchte toestand bleek dat de schuifweerstand van een klei met een gegeven watergehalte door ontluchting met 25 à 35% toeneemt. Voor de ontluchting van de kleimassa werd een vacuümstrengpers gebruikt. De proefstukken werden afgesneden van een cilindrische streng met een diameter van 33 mm.

Opmerkelijk was de bijzondere vorm van de gestuikte proefstukken van de ontluchte klei Z. Bij de proeven met de luchthoudende kleien Z, R en L en de ontluchte klei R waren de gestuikte proefstukken steeds enigszins tonvormig en waren boven- en ondervlak ongeveer gelijk aan elkaar. Bij de ontluchte klei Z waren de bedoelde vlakken echter verschillend van grootte. Of de bovenkant, dan wel de onderkant, zich tijdens de stuik sterker uitbreidde, bleek afhankelijk van de richting waarin het proefstuk was geëxtrudeerd. De bijzondere vorm van de gestuikte proefstukken moet daarom toegeschreven worden aan de strengstructuur van de vette klei Z. Figuur 9 licht een en ander toe. De hoogte van de gestuikte proefstukken bleek overigens nagenoeg onafhankelijk van de richting waarin ze werden beproefd.

#### 8. Verloop van de Pfefferkornresthoogte met het watergehalte

Met de formules 1, 4 en 9 is het verloop van de in hoofdstuk 1 gedefinieerde Pfefferkornresthoogte  $P_r$  met het watergehalte  $W$ , voor de kleien Z, R en L te berekenen. De berekende curven zijn in figuur 10 afgebeeld. In de grafiek zijn tevens de waarnemingsresultaten van de Pfefferkornproeven opgenomen. Bij vergelijking met dezelfde grafiek in figuur 4 wordt het duidelijk, dat de in hoofdstuk 1 gememoreerde heersende opvatting, dat het verband tussen  $P_r$  en  $W$  rechtlijnig zou zijn, correctie behoeft.

De gebruikswaarde van de consistentiestabiliteit blijft overigens, zij het voor een beperkt consistentiegebied, onaangetast.

### 9. Conclusies en aanbevelingen

a. Bij stuikproeven met het Pfefferkornapparaat is de wrijving van het meetsysteem een belangrijke foutenbron. Een zorgvuldige werkwijze is vereist.

b. De met de stuikformule van Haase uit stuikproeven af te leiden schuifweerstand van een kleimassa is afhankelijk van de valhoogte en het gewicht van de stuikschijf en van de afmetingen van het proefstuk. Een grotere stuikenergie per volume-eenheid

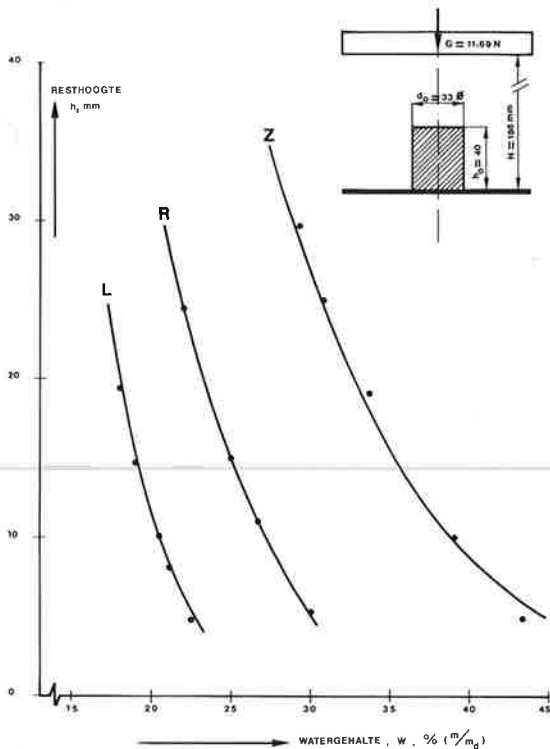


Fig. 10 - Berekende relatie tussen watergehalte en resthoogte, met meetpunten.

levert in het algemeen een hogere uitkomst voor de schuifweerstand op.

c. Op grond van het gestelde onder b, blijft een gestandaardiseerde uitvoering van stuikproeven aan kleimassa's gewenst. Uit respect voor Dr. K. Pfefferkorn verdient de originele specificatie van de stuikproef de voorkeur (stuikschijfgewicht: 11,69 N, nominale valhoogte: 186 mm, vrije val: 146 mm, hoogte van de kleicylinder: 40 mm, cylinderdiameter: 33 mm).

d. Bij eventueel nader onderzoek naar de invloed van de stuiksnelheid op de schuifweerstand van kleimassa's, is het, gezien het complexe karakter van het verloop van de stuik, aan te bevelen, uitsluitend de valhoogte te variëren.

e. Voor de fabriekscontrole op de consistentie van zeer slappe kleimassa's voor vormbakstenen, is de originele uitvoeringsvorm van het Pfefferkornapparaat minder geschikt. Voor dit doel is sinds de vijftiger jaren in Nederland een stuikapparaat in gebruik met een stuikschijfgewicht van 7,65 N en een valhoogte van 100 mm (vrije val

60 mm). De proefstukken zijn gelijk aan die van Pfefferkorn. De nadelen van het Pfefferkornapparaat voor het geschetste gebruiksdoel zouden ook ondervangen kunnen worden door de originele uitvoeringsvorm te voorzien van een valhoogte-instelling van 100 mm (vrije val 60 mm). Dit zou de gebruikswaarde van het instrument vergroten.

f. Uit stuikproeven kan een getalwaarde voor de schuifweerstand van een kleimassa worden afgeleid, die bij benadering recht evenredig blijkt met het specifiek oppervlak van de klei en omgekeerd evenredig met het verschil tussen het watergehalte van de massa en het watergehalte bij de uitrolgrens volgens Atterberg. Die getalwaarde komt mogelijk overeen met de zwichtspanning van de massa. De evenredigheidsfactor blijkt althans voor drie Nederlandse kleisoorten, te weten: een vette zeeklei, een normale rivierklei en een magere lössleem, globaal genomen constant te zijn. Dit onderzoek-resultaat opent nieuwe perspectieven voor het Pfefferkornapparaat bij de technologische expertise van kleien. Voortzetting en verfijning van het onderzoek, op de grondslag van de inmiddels opgedane ervaringen, zou het inzicht in het plastisc gedrag van kleimassa's kunnen verdiepen.

g. Het onderzoek leidt ten slotte ook tot de conclusie, dat het verband tussen het watergehalte van een kleimassa en de Pfefferkornreesthoogte slechts schijnbaar lineair is. De gebruikswaarde van de zogenaamde consistentiestabiliteit van een klei blijft overigens, zij het voor een beperkt consistentiegebied, onaangetaast.

#### 10. LITERATUUR

- (1) Pfefferkorn, K., Spechsaal, 57, 297 (1924).
- (2) Haase, Th., Ber. Dt. Keram. Ges., 43, 593 (1966).
- (3) Siskens, C. A. M. TNO-TPD rapport 821.200-a dd. 1978-12-15: Plasticiteit (beknopte versie).
- (4) Lehnhäuser, W., Keram. Z. 30, 637 (1978).
- (5) Amerongen, H. van, Klei en Keramiek, 17, 66 (1967).
- (6) Häusser, A., Ziegelindustrie, 20, 26 (1967).
- (7) Amerongen, H. van, en J. H. van der Velden, TNO-C.T.I.-rapport 70-04032 dd. 1-11-1970: Samenstelling en eigenschappen van 31 klei soorten, delen I en II.

## Vakvaria

### *Charles H. Herty-Award voor Dr. Ir. J. T. van Konijnenburg*

Op de 37ste Ironmaking Conferences (1978) van de Iron Steel Society van de Verenigde Staten heeft Hoogovens IJmuiden B.V. een artikel van de hand van de heer Van Konijnenburg gepresenteerd met als titel 'Measuring the BOF-Lining during the Campaign by Means of Interferometer'. Voor deze bijdrage is de heer Van Konijnenburg met de Herty-Award onderscheiden.

Deze prijs is in 1960 ingesteld voor de auteur van het beste artikel van het jaarlijkse congres en wel met de volgende considerans: 'Het artikel moet een bijdrage leveren tot de gebruikmaking van een speciale fysische grootheid of een speciaal fysisch verschijnsel bij de productie van staal'.

De prijs is tijdens de 62ste zitting van de National Openhearth and Basic Oxygen Steel Conference op 26 maart in Detroit uitgereikt. Dr. van Konijnenburg, sinds 1 mei 1978 technisch directeur van CGC te Geldermalsen, heeft de onderscheiding persoonlijk in ontvangst genomen.