

Pletproeven t.b.v. wrijvingsmodellen

Citation for published version (APA):

Weys, H. J. G. (1985). *Pletproeven t.b.v. wrijvingsmodellen*. (TH Eindhoven. Afd. Werktuigbouwkunde, Vakgroep Produktietechnologie : WPB; Vol. WPB0189-2). Technische Hogeschool Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1985

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

Ir. L. J. A. Houtackers

Pletproeven t.b.v. wrijvingsmodellen

Door: H.J.G Weys

juni 1985

vF code: A2

WPB (0189-2) G

H.T.S. stageperiode : 010385-150685
Stagebedrijf : TH-Eindhoven
Vakgroep : Produktietechnologie
en Bedrijfsmechanisatie
Werkeenheid : Mechanische bewerking
Begeleiders : Dr.Ir.J.A.H. Ramaekers
M.J.H. Smeets
Bedrijfsmentor : Ir.L.J.A. Houtackers

Samenvatting

Kontaktverschijnselen tussen gereedschap en produkt beïnvloeden in belangrijke mate het verloop van omvormprocessen (extruderen, stuiken, ect.). De gebruiksduur van het gereedschap, de kwaliteit van het produkt en de voor het proces benodigde perskracht zijn factoren die sterk afhankelijk zijn van de wrijvingskondities.

Voor de theoretische benadering van de werkelijkheid wordt een alternatief wrijvingsmodel, het q-model, ontwikkeld naast de twee bestaande modellen van Coulomb en Von-Mises. Als voorbeeld wordt het vlakpletten doorgerekend.

Het q-model blijkt een betere benadering te zijn van de werkelijkheid dan de andere twee modellen.

Zusammenfassung

Kontaktvorgängen zwischen Werkzeug und Produkt beeinflussen in bedeutender Maße den Verlauf von Umformprozessen (auspressen, stauchen, u.s.w.). Die Lebensdauer des Werkzeuges, die Qualität des Produktes und die für den Prozeß benötigte Preßkraft sind Faktoren die stark Abhängig sind von Reibungskonditionierungen.

Für die theoretische Annäherung von die Wirklichkeit wird ein alternativ Reibungsmodell, das q-Modell, entwickelt neben die zwei existierende Modellen von Coulomb und von Von-Mises. Als Vorbild wird das Flachplatten durchgerechnet.

Das q-Modell scheint eine bessere Annäherung zu sein von die Wirklichkeit dann die andere zwei Modellen.

Symbolenlijst

A	mm ²	oppervlakte element
A _w	mm ²	werkelijk kontaktoppervlak
b	mm	breedte stempel
F	N	perskracht
F*	-	genormeerde kracht
L	mm	lengte stempel
m	-	wrijvingsfactor Von-Mises
Q	-	variabele
q	mm ⁻¹	wrijvingscoefficient q-model
s	mm	dikte blenk/strip
u	mm	relatieve verplaatsing
ù	mm/s	snelheid materiaalstroom
w	mm ² /N	variabele
γ	-	afschuifhoek
ε _i	-	hoofdrek
ε̄	-	effectieve rek
μ	-	wrijvingscoefficient Coulomb
σ _i	N/mm ²	hoofdspanning
σ _n	N/mm ²	normaalspanning
σ _v	N/mm ²	vloeispanning produktmateriaal
σ _{vg}	N/mm ²	vloeispanning grenslaag
σ _{vsm}	N/mm ²	vloeispanning smeermiddel
σ̄	N/mm ²	effectieve spanning
τ ₀	N/mm ²	wrijvingsspanning
τ _{max}	N/mm ²	maximale schuifspanning

<u>Inhoudsopgave</u>	blz.
1. Inleiding	1
2.1. De wrijvingsspanning τ_0	2
2.1.1. Het Coulomb wrijvingsmodel	4
2.1.2. Het Von-Mises wrijvingsmodel	5
2.1.3. Het q-wrijvingsmodel	6
2.2. Het drukspanningsverloop over de stempeldoorsnede	7
2.3. De kracht-weg kromme	11
3. De experimenten	12
4. Resultaten	14
5. Conclusie	15
Bijlage 1: Uitwerking berekening drukbergen	16
Bijlage 2: Meetresultaten plet/trekproeven	17 t/m 24

Literatuurlijst

- [1] "Kontaktverschijnselen bij het omvormen"
J.A.H. Ramaekers
rapportnummer WT-0449, 1983
- [2] "Kontaktverschijnselen bij het omvormen"
J.A.H. Ramaekers, M.J.H. Smeets
metaalblad, jaargang 50 no. 3
7 februari 1984, blz 54 t/m 58
- [3] "Vervolgonderzoek plooihouderloos dieptrekken"
P.A.G.M. Dings
rapportnummer WPB-0103, 1984
- [4] "Technische plasticiteitsleer"
P.C. Veenstra, S.M. Hoogenboom
TH Eindhoven, dictaatnr. 4.406, 1984
- [5] "Plastisch omvormen van metalen, grondbegrippen"
J.A.G. Kals, J.A.H. Ramaekers, L.J.A. Houtackers
uitgave OMTEC stichting, mei 1985

1. Inleiding

Het fenomeen wrijving speelt bij veel plastische omvormprocessen (dun-trekken, extrusie) een belangrijke rol.

Vaak wordt dan ook voor de theoretische benadering van de werkelijkheid een wrijvingsmodel opgesteld. In de plasticiteitsmechanica worden een tweetal wrijvingsmodellen gehanteerd:

$$(1.1) \quad \tau_0 = \mu \cdot \sigma_n \quad (\text{wrijvingsmodel volgens Coulomb})$$

$$(1.2) \quad \tau_0 = m \cdot \tau_{\max} \quad (\text{wrijvingsmodel volgens Von-Mises})$$

waarin: μ = wrijvingscoefficient

m = wrijvingsfactor

τ_{\max} = maximale schuifspanning ($= \frac{\sigma_v}{\sqrt{3}}$)

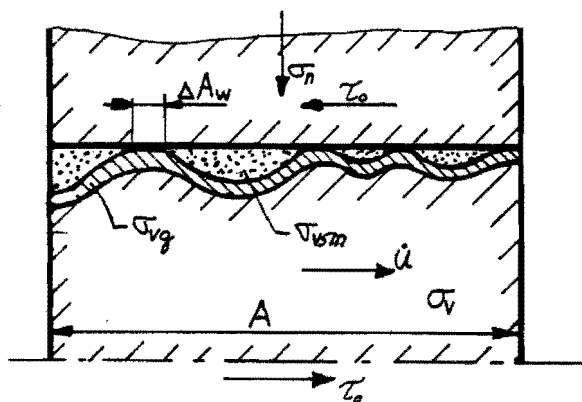
τ_0 = wrijvingsspanning

Geen van beide modellen beschrijft de werkelijke situatie echt goed. Een alternatief model zal derhalve opgesteld worden.

Met behulp van een algemene opgestelde formule worden de drie modellen besproken. Aan de hand van een pletproef wordt het alternatief model getoetst aan de praktijk.

2.1. De wrijvingsspanning τ_0

Als voorbeeld wordt het vlakpletten doorgerekend. De lokale situatie is uitgebeeld in fig. 2.1.



waarin:

- A oppervlakte element
- A_w werkelijk contactvlak
- σ_v vloeigrens produktmateriaal
- σ_{vsm} vloeigrens smeermiddel
- σ_{vg} vloeigrens grenslaag

fig. 2.1, de lokale situatie

Bij de oppervlaktelaag moet niet alleen gedacht worden aan een van tevoren aangebrachte laag (b.v. aluminaat, fosfaat) maar ook aan aangehechte molekulen uit het smeermiddel die onder druk- en temperatuurinvloed, veroorzaakt door het omvormproces, fysisch of chemisch aan het oppervlak gebonden zijn.

Uit onderzoek is gebleken dat de relatieve beweging van produktmateriaal ten opzicht van gereedschap gepaard gaat met afschuiving in een dunne grenslaag. Wrijving is in wezen plastische deformatie in het contactvlak. Hiervoor geldt het model enkelvoudige afschuiving (fig. 2.2), zodat voor de schuifspanning geldt:

$$(2.1) \quad \tau_0 = \tau_{\max} = \frac{\sigma_v}{\sqrt{3}}$$

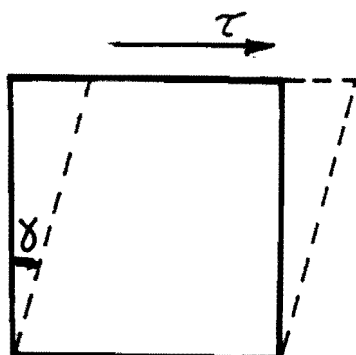


fig. 2.2, model enkelvoudige afschuiving

τ_{\max} is hier de maximale schuifspanning volgens het Von-Mises vloeikriterium.

Evenwicht op het oppervlakte element A (fig. 2.1) geeft dan:

$$(2.2) \quad \tau_0 = \frac{A_w}{A} \cdot \frac{\sigma_{Vq}}{\sqrt{3}} + \left(1 - \frac{A_w}{A}\right) \cdot \frac{\sigma_{VSM}}{\sqrt{3}}$$

Met behulp van (2.2) kunnen we de drie wrijvingsmodellen nader bekijken.

2.1.1. Het Coulomb-wrijvingsmodel.

Hierbij gaat men uit van kontaktoppervlakken zonder smering. Dan geldt:

$$(2.3) \quad \sigma_{vsm} = 0$$

$$(2.4) \quad \sigma_{vg} = \sigma_v$$

Ten gevolge van het afpletten van de ruwheidstoppen, onder invloed van de normaalspanning σ_n , neemt het werkelijke kontaktoppervlak A_w toe (fig. 2.3).

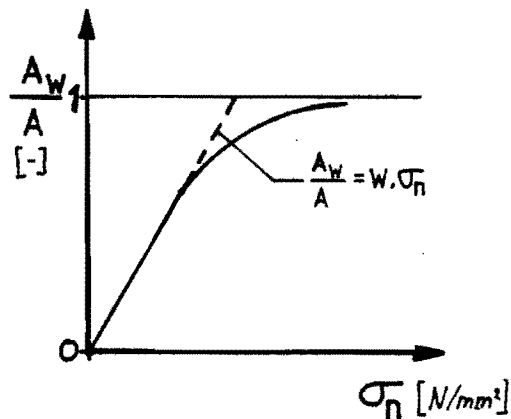


fig. 2.3, verband normaalspanning en werkelijk kontaktoppervlak

Indien lineair verband tussen A_w en σ_n wordt verondersteld:

$$(2.5) \quad \frac{A_w}{A} = w \cdot \sigma_n$$

Met (2.3), (2.4) en (2.5) wordt (2.2):

$$(2.6) \quad \tau_0 = w \cdot \sigma_n \cdot \frac{\sigma_v}{\sqrt{3}}$$

Met verwaarlozing van eventueel verstevigend gedrag (σ_v is konstant) geldt tenslotte:

$$(2.7) \quad \tau_0 = \mu \cdot \sigma_n \quad \text{met} \quad \mu = w \cdot \frac{\sigma_v}{\sqrt{3}}$$

2.1.2. Het Von-Mises wrijvingsmodel

Uitgangssituatie hierbij is dat er tussen gereedschap en produkt een dragende smeerfilm is, die zo sterk is, dat onder invloed van de heersende normaal-en drukspanningen geen direkt kontakt plaats heeft. Er geldt dan:

$$(2.8) \quad A_w = 0$$

Hiermee wordt (2.2):

$$(2.9) \quad \tau_0 = \frac{\sigma_{vsm}}{\sqrt{3}}$$

Nemen we een vaste verhouding aan tussen de vloeigrens van het smeermiddel en die van het produkt:

$$(2.10) \quad \sigma_{vsm} = m \cdot \sigma_v$$

Dan volgt uit (2.9):

$$(2.11) \quad \tau_0 = m \cdot \frac{\sigma_v}{\sqrt{3}}$$

Ook hier is geen rekening gehouden met eventueel verstevigend gedrag (σ_v is konstant). De grenswaarden voor m liggen tussen 0 en 1. De bovengrens is bereikt als de schuifspanning in de grenslaag gelijk is aan $\frac{\sigma_v}{\sqrt{3}}$. Bij waarden groter dan 1 zal het materiaal niet meer afschuiven in de grenslaag doch in het produktmateriaal. De ondergrens ($m=0$) is triviaal.

2.1.3. Het q-wrijvingsmodel

Bekend is dat de viscositeit van smeermiddelen toeneemt met de druk. Smeermiddelen worden 'vast' bij zeer hoge drukken. Er ontstaan aan het oppervlak dunne lagen met een kunststofachtige structuur, dus ook met een vloeigrens in dezelfde orde van grootte ($\sigma_{vg} \approx 10 \text{ à } 40 \text{ N/mm}^2$). De vloeigrens van het smeermiddel (σ_{vsm}) zal vaak verwaarloosbaar klein zijn ($\sigma_{vsm} \ll \sigma_{vg}$).

Onder invloed van druk (σ_n) én relatieve verplaatsing (u) zullen de ruwheidstoppen afgeplat en de smeerfilm weggewreven worden. De globale wrijvingsspanning τ_0 zal dus door druk, oppervlaktevergroting, relatieve verplaatsing e.d. beïnvloed worden. Aangenomen wordt:

$$(2.12) \quad \tau_0 = q \cdot \sigma_n \cdot u \quad (\text{het } q\text{-model})$$

2.2. Het drukspanningsverloop over de stempeldoorsnede

In de hierna volgende beschouwingen is gebruik gemaakt van een aantal basisrelaties uit de plasticiteitsleer ([4] en [5]):

A. De vloeivoorwaarde van Von-Mises, uitgedrukt in de hoofdspinningen σ_1 , σ_2 en σ_3 :

$$(2.13) \quad \bar{\sigma} = \sqrt{\left[\frac{1}{2} \cdot ((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2) \right]} = \sigma_v$$

$\bar{\sigma}$: effectieve spanning (vergelijkspanning)

σ_v : vloeispanning

B. De effectieve of vergelijkrek $\bar{\epsilon}$:

$$(2.14) \quad \bar{\epsilon} = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot (\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2 + \epsilon_3^2)}$$

ϵ_1 , ϵ_2 en ϵ_3 zijn eindige hoofdrekken.

C. Volume-invariantie:

$$(2.15) \quad \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = 0$$

D. Spanning-rek-relatie volgens Levy-Von-Mises:

$$(2.16) \quad \epsilon_1 = \frac{\bar{\epsilon}}{\sigma_v} \cdot \left(\sigma_1 - \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2} \right) \quad (\text{cyclisch})$$

Met behulp van analytische methoden uit de technische plasticiteitsleer kunnen de voor het proces benodigde spanningen worden uitgerekend. Voor de processen met wrijving zijn exacte oplossingen echter vrijwel onbekend. Wel zijn in de technische plasticiteitsleer benaderende analytische methoden ontwikkeld die, zoals blijkt uit confrontatie met de toepassing, uitstekend voldoen. In dit geval is gekozen voor de zogenaamde "schillen"-methode.

Bij de schillenmethode wordt het produkt opgedeeld in schillen. De vorm van de schillen is afhankelijk van de geometrie van het produkt (prismatisch, cilindrisch, bol). Bij dit onderzoek is sprake van een vlakke schil, met hoogte s , dikte dx en lengte L (fig. 2.4 en fig. 2.5).

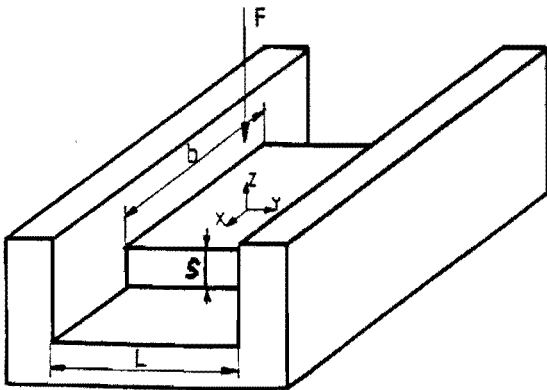


fig. 2.4, vlakpletten

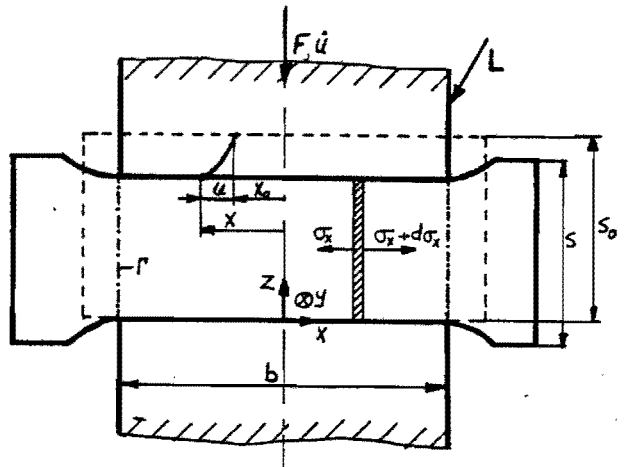


fig. 2.5, schillenmethode bij vlakpletten

Uitgaande van de pletproef kan het volgende worden afgeleid:

$$(2.17) \quad \epsilon_y = 0 \quad (\text{produkt opgesloten in } y\text{-richting})$$

$$(2.18) \quad \epsilon_z = \ln \frac{s}{s_0}$$

Met (2.15) is:

$$(2.19) \quad \epsilon_z = -\epsilon_x = \ln \frac{s}{s_0}$$

Dan wordt met (2.14):

$$(2.20) \quad \bar{\epsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \ln \frac{h_0}{h}$$

Aanname: niet verstevigd materiaal $\rightarrow \sigma_v = \text{konstant}$. Met (2.13), (2.16) en (2.17) volgt:

$$(2.21) \quad \sigma_x - \sigma_z = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_v$$

Evenwicht op de schil (fig. 2.5) geeft:

$$(2.22) \quad -\sigma_x \cdot s \cdot L + (\sigma_x + d\sigma_x) \cdot L - 2 \cdot \tau_0 \cdot dx \cdot L = 0$$

$$(2.23) \quad d\sigma_x = 2 \cdot \tau_0 \cdot \frac{dx}{s}$$

Volume-invariantie hierop geeft:

$$(2.24) \quad x_0 \cdot s_0 \cdot L = x \cdot s \cdot L$$

Voor het q-model geldt verder :

Verplaatsing:

$$(2.25) \quad u = x - x_0 = x \cdot \left(1 - \frac{s}{s_0}\right)$$

Met $\sigma_z = -\sigma_n$ en (2.12), (2.21), (2.23) en (2.25) volgt:

$$(2.26) \quad \frac{2}{\sqrt{3}} \int_{\sigma_n}^{\sigma_n} \frac{d\sigma_n}{\sigma_n} = -2 \cdot \frac{q}{s} \cdot \left(1 - \frac{s}{s_0}\right) \cdot \int_{\frac{b}{2}}^x x \cdot dx$$

Uitgewerkt geeft:

$$(2.27) \quad \frac{\sigma_n}{\sigma_v} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \exp\left\{\frac{q}{4} \cdot \frac{b^2}{s} \cdot \left(1 - \frac{s}{s_0}\right) \cdot \left(1 - 4 \cdot \frac{x^2}{b^2}\right)\right\} \quad (\text{q-model})$$

Indien de wrijvingsmodellen (1.1)-Coulomb of (1.2)-Von-Mises toegepast worden volgt:

$$(2.28) \quad \frac{\sigma_n}{\sigma_v} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \exp\left\{\mu \cdot \frac{b-2x}{s}\right\} \quad (\text{Coulomb})$$

$$(2.29) \quad \frac{\sigma_n}{\sigma_v} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left(1 + \frac{m}{2} \cdot \frac{b-2x}{s}\right) \quad (\text{Von-Mises})$$

Voor één identieke situatie (proefstuk A6) zijn de drukbergen volgens (2.27), (2.28) en (2.29) weergegeven in fig. 2.6 op de volgende bladzijde. (Berekening drukbergen bijlage 1)

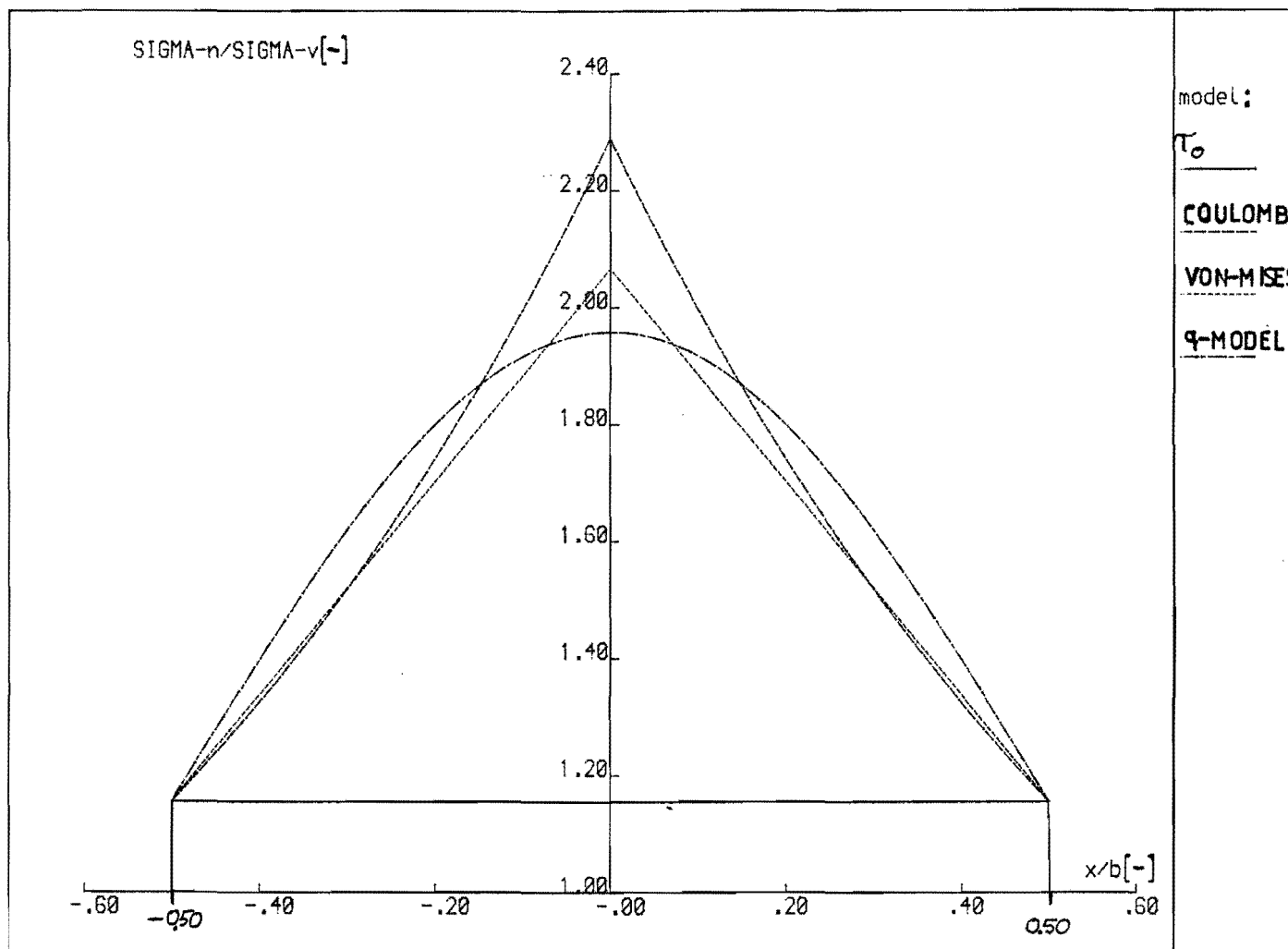


fig 2.6, drukbergen volgens de drie wrijvingsmodellen

2.3. De kracht-weg kromme

Door integratie van de axiale spanning σ_n over het totale oppervlak kan de optredende perskracht worden berekend. In formule:

$$(2.30) \quad F = 2 \int_0^{b/2} \sigma_n \cdot L \cdot dx$$

Voor het q-model volgt dan (2.27):

$$(2.31) \quad \frac{F}{b \cdot L \cdot \sigma_v} \approx \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{e^Q}{1 + 0.33Q} \quad (\text{benadering van de integraal})$$

$$\text{waarin} \quad Q = \frac{1}{4} \cdot q \cdot \frac{b^2}{s} \left(1 - \frac{s}{s_0}\right)$$

Voor de twee bestaande wrijvingsmodellen geeft dit:

$$(2.32) \quad \frac{F}{b \cdot L \cdot \sigma_v} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{\mu \cdot b/s} \cdot (e^{\mu \cdot b/s} - 1) \quad (\text{Coulomb})$$

$$(2.33) \quad \frac{F}{b \cdot L \cdot \sigma_v} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left(1 + \frac{m \cdot b}{4 \cdot s}\right) \quad (\text{Von-Mises})$$

Ten einde de invloed van de wrijving op het pletproces beter te kunnen onderzoeken, wordt de grootheid F^* ingevoerd, zijnde de genormeerde gemiddelde belasting, die dimensieloos is:

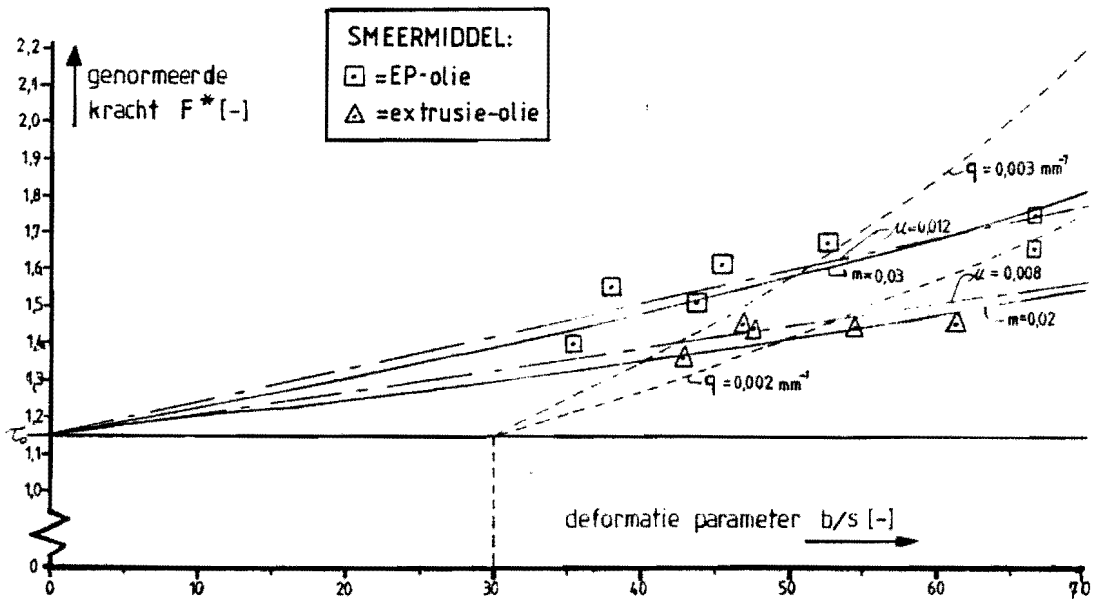
$$(2.34) \quad F^* = \frac{F}{b \cdot L \cdot \sigma_v}$$

3. De experimenten

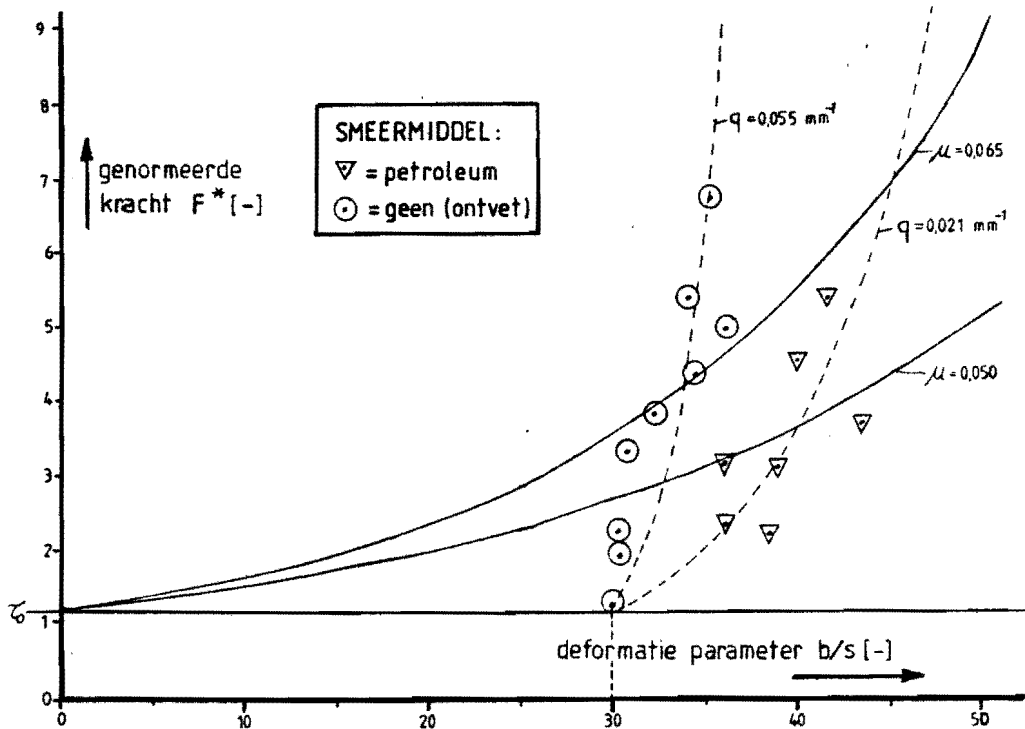
Voor dit onderzoek worden blanks (strippen) gebruikt van 1 mm dik. Voor een viertal smeermiddelen worden een voldoende aantal strips (voor voldoende meetpunten) geplet. Bij elk smeermiddel wordt getracht telkens dezelfde condities te realiseren om betrouwbare metingen te krijgen. Ook worden alle strips uit één plaat, in dezelfde richting, gehaald.

De bepaling van de vloeigrens σ_v gebeurt door middel van de trekproef. Als het materiaal begint te vloeien bij de trekproef wordt de kracht genoteerd en het vloeiooppervlak bepaald.

Alle meetresultaten staan in bijlage 2. De gevonden waarden F^* staan in grafiek I en II op de volgende bladzijde. Door de meetpunten in de grafieken zijn de theoretische lijnen van de drie wrijvingsmodellen getekend. In grafiek II konden geen goede m-lijnen door de meetpunten getrokken worden.



grafiek I, meetresultaten pletproeven met als smeermiddel EP-olie (philips) en petroleum



grafiek II, meetresultaten pletproeven met als smeermiddel extrusie-olie en met geen smeermiddel

4. Resultaten

Bij de pletproeven zijn in principe twee foutenbronnen aanwezig:

- De wrijving langs de zijkanten.
- De inwendige afschuiving langs de Γ -vlakken die de gebieden scheiden van het materiaal onder de stempel en het materiaal naast de stempel.

Deze twee invloeden zijn met behulp van de arbeidsmethode berekend en worden ter correctie van de gemeten kracht afgetrokken:

$$(4.1) \quad P^* = \frac{F_{\text{gem}}}{b \cdot l \cdot \sigma_v} - \frac{m \cdot b}{4 \cdot L} - \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{s}{b}$$

waarin: P^* : genormeerde werkelijk optredende kracht
 F_{gem} : gemeten perskracht

De factor voor de wrijving langs de zijwanden $\frac{m \cdot b}{4 \cdot L}$ ligt bij goed smeren van de zijkanten beneden de 2% en is bijna altijd verwaarloosbaar klein.

De factor voor de afschuifarheid op het Γ -vlak $\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{s}{b}$ is bij dunne blanks zeer klein maar heeft, vooral bij dikkere blanks, in het begin van de stempelslag een merkbare invloed. In deze proef worden dunne blanks (1 mm) gebruikt waardoor ook deze factor hier verwaarloosd kan worden.

De bepaling van de vloeigrens σ_v stuit bij de onderzochte aluminiumsoort (Al 2S) op problemen. De waarde van de versterkingsexponent is extreem laag ($n < 0.1$) waardoor bij de trekproef geen betrouwbare bepaling van σ_v mogelijk was.

Twee van de gebruikte smeermiddelen (petroleum en extrusie-olie) gaven problemen bij het pletten. Bij een bepaalde perskracht ging het materiaal ineens vloeien waarbij de kracht dan iets afnam. Ook nam de dikte van de strip ineens iets af waardoor dikten van bijvoorbeeld 0.9 mm niet te realiseren waren.

5. Conclusie

Het nieuwe q-model geeft een betere drukberg (fig. 2.6, blz. 10).

Voor kleine waarden van μ , m en q vallen de theoretische F^* (b/s)-kurven praktisch over elkaar (grafiek I, blz. 13). Het opvallende verschil van het q-model met de andere twee is het startpunt van plastische deformatie, n.l. op de lijn $\tau_0=0$ (zie fig. 5.1).

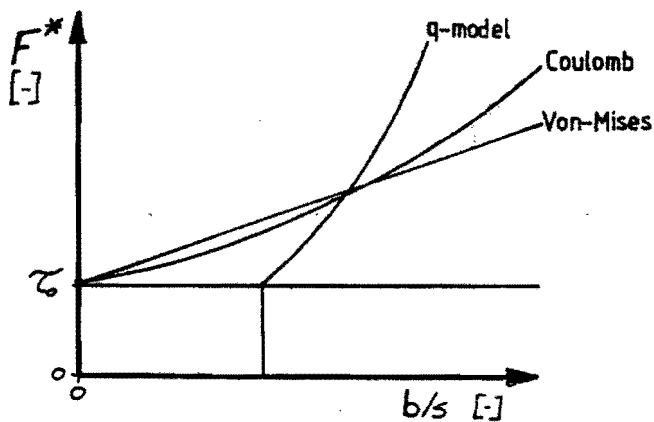


fig. 5.1, principe schets F^* (b/s)

Aan de hand van dit onderzoek blijkt, dat het nieuwe q-model beter overeenkomt met de werkelijkheid dan de bestaande wrijvingsmodellen.

Berekening van de drukbergen van proefstuk A6

$$F_p = 290 \text{ kN} \quad \sigma_v = 116 \text{ N/mm}^2 \quad L = 50 \text{ mm}$$

$$b = 30 \text{ mm} \quad s_0 = 1 \text{ mm} \quad s = 0.57 \text{ mm}$$

Spanningen: (2.28) $\frac{\sigma_v}{\sigma_n} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \exp\left(\mu \cdot \frac{b-2x}{s}\right)$ (Coulomb)

(2.29) $\frac{\sigma_v}{\sigma_n} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left(1 + \frac{m}{2} \cdot \frac{b-2x}{s}\right)$ (Von-Mises)

(2.27) $\frac{\sigma_v}{\sigma_n} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \exp\left\{q \cdot \frac{b^2}{4s} \cdot \left(1 - \frac{s}{s_0}\right) \cdot \left(1 - 4 \cdot \frac{x^2}{b^2}\right)\right\}$ (q-model)

Krachten: (2.32) $\frac{F_p}{b \cdot L \cdot \sigma_v} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{\mu \cdot b/s} \cdot (e^{\mu \cdot b/s} - 1)$ (Coulomb)

(2.33) $\frac{F_p}{b \cdot L \cdot \sigma_v} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left(1 + \frac{m}{4} \cdot \frac{b}{s}\right)$ (Von-Mises)

(2.31) $\frac{F_p}{b \cdot L \cdot \sigma_v} \approx \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{e^Q}{1+0.33Q} \rightarrow Q = q \cdot \frac{b^2}{4s} \cdot \left(1 - \frac{s}{s_0}\right)$ (q-model)

$$\frac{F_p}{b \cdot L \cdot \sigma_v} = 1.667 \quad \frac{b}{s} = 52.6$$

Hieruit volgt:

→ $\mu \approx 0.013$

→ $m \approx 0.03$

→ $Q \approx 0.528$

→ $q = 0.00311 \text{ mm}^{-1}$

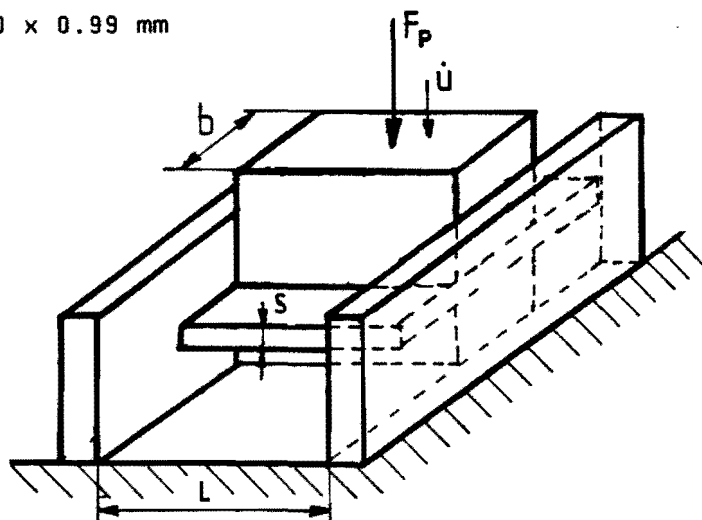
Pletproefserie: A

Smeermiddel : EP-olie (philips)

Materiaal : Al 2S-0

Afmetingen : $L_0 \times b_0 \times s_0 = 50 \times 100 \times 0.99 \text{ mm}$

Stempel : $L \times b = 50 \times 30 \text{ mm}$



nummer proef- strip	stempelver- plaatsing meetklok [mm]	perskracht F_p [kN]	gereduceerde dikte s [mm]	effectieve rek $\bar{\epsilon}$ [-]	vloei- spanning σ_y [N/mm ²]	F^* [-]	$\frac{b}{s}$ [-]
A1	0.30	220 ± 5	0.99	-	-	-	-
A2	0.44	240 ± 5	0.85	0.1761	114.3	1.40	35.29
A3	0.50	250 ± 5	0.79	0.2606	107.4	1.55	37.97
A4	0.63	260 ± 5	0.68	0.4337	114.6	1.51	44.12
A5	0.72	270 ± 5	0.66	0.4682	111.6	1.61	45.45
A6	0.81	290 ± 5	0.57	0.6375	115.5	1.67	52.63
A7	0.93	330 ± 5	0.45	0.9104	133.3	1.65	66.67
A8	1.01	350 ± 5	0.45	0.9104	133.9	1.74	66.67

waarbij: $\bar{\epsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \ln \frac{s_0}{s}$

σ_y uit trekproef

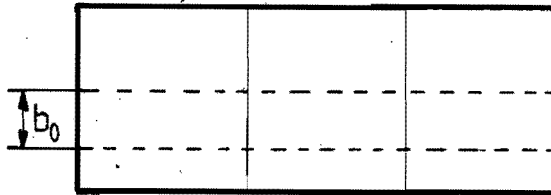
$$F^* = \frac{F_p}{b \cdot L \cdot \sigma_y}$$

Trekproefserie: A

Materiaal : Al 2S-0

Afmetingen : $b_0 \times s_0$

Volgens figuur uit
geplet proefstrip
gehaald.



Bepaling σ_v :



nummer proefstaaf	b_0 [mm]	s_0 [mm]	b [mm]	s [mm]	F_t [N]	σ_v [N/mm ²]
A2	16.27	0.85	16.00	0.82	1500	114.3
A3	16.03	0.79	15.96	0.77	1320	107.4
A4	15.97	0.68	15.86	0.66	1200	114.6
A5	15.90	0.66	15.86	0.65	1150	111.6
A6	16.00	0.57	15.93	0.56	1030	115.5
A7	15.92	0.45	15.88	0.43	910	133.3
A8	15.85	0.45	15.78	0.44	930	133.9

waarbij: b_0 = breedte trekstaaf vóór trekproef (in mm)

s_0 = dikte trekstaaf vóór trekproef (in mm)

b = breedte trekstaaf ná trekproef (in mm)

s = dikte trekstaaf ná trekproef (in mm)

F_t = kracht waarbij materiaal vloeit (in N)

$$\sigma_v = \text{vloeispanning} = \frac{F_t}{b \cdot s} \text{ N/mm}^2$$

Pletproefserie: B

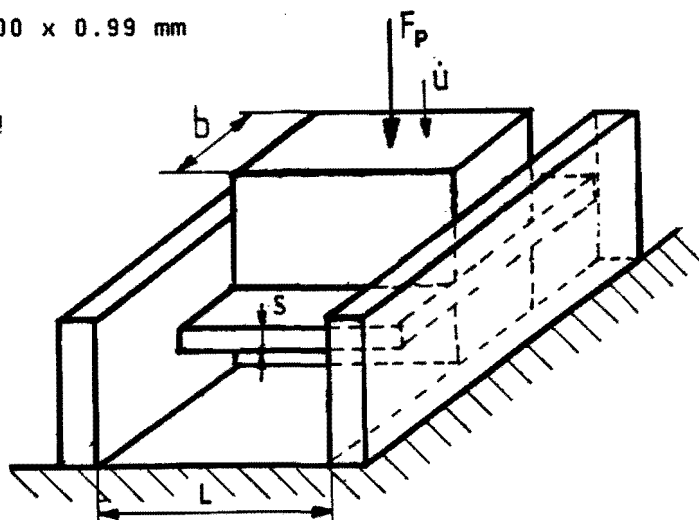
Smeermiddel : geen; ontvet

Materiaal : Al 2S-0

Afmetingen : $L_0 \times b_0 \times s_0 = 50 \times 100 \times 0.99 \text{ mm}$

Stempel : $L \times b = 50 \times 30 \text{ mm}$

opmerking : alleen stempel ontvet!



nummer proef- strip	stempelver- plaatsing meetklok [mm]	perskracht F_p [kN]	gereduceerde dikte s [mm]	effectieve rek $\bar{\epsilon}$ [-]	vloei- spanning σ_y [N/mm ²]	F^* [-]	$\frac{b}{s}$ [-]
81	0.60	550 ± 5	0.97	0.0236	109.9	3.34	30.93
82	0.70	650 ± 5	0.93	0.0722	113.1	3.83	32.26
83	0.76	750 ± 5	0.87	0.1492	115.0	4.35	34.48
84	0.99	1125 ± 5	0.85	0.1761	111.3	6.74	35.29
85	0.98	850 ± 5	0.83	0.2035	114.3	4.96	36.14
86	0.87	950 ± 5	0.88	0.1360	117.4	5.39	34.09
87	0.44	310 ± 5	0.985	0.0058	108.9	1.90	30.46
88	0.44	370 ± 5	0.985	0.0058	109.4	2.25	30.46
89	0.31	180 ± 5	0.99	-	95.8	1.24	30.00

waarbij: $\bar{\epsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \ln \frac{s_0}{s}$

σ_y uit trekproef

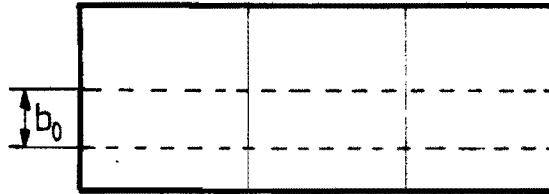
$$F^* = \frac{F_p}{b \cdot L \cdot \sigma_y}$$

Trekproefserie: B

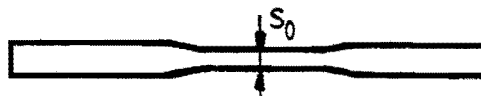
Materiaal : Al 2S-0

Afmetingen : $b_0 \times s_0$

Volgens figuur uit
geplet proefstrip
gehaald.



Bepaling σ_v :



nummer proefstaaf	b_0 [mm]	s_0 [mm]	b [mm]	s [mm]	F_t [N]	σ_v [N/mm ²]
81	15.87	0.97	15.81	0.95	1650	109.9
82	15.88	0.93	15.80	0.89	1590	113.1
83	15.88	0.87	15.80	0.82	1490	115.0
84	15.88	0.85	15.83	0.84	1480	111.3
85	15.87	0.83	15.83	0.79	1430	114.3
86	15.87	0.88	15.73	0.85	1570	117.4
87	15.91	0.985	15.83	0.98	1690	108.9
88	15.88	0.985	15.85	0.98	1700	109.4

waarbij: b_0 = breedte trekstaaf vóór trekproef (in mm)

s_0 = dikte trekstaaf vóór trekproef (in mm)

b = breedte trekstaaf ná trekproef (in mm)

s = dikte trekstaaf ná trekproef (in mm)

F_t = kracht waarbij materiaal vloeit (in N)

$$\sigma_v = \text{vloeispanning} = \frac{F_t}{b \cdot s} \text{ N/mm}^2$$

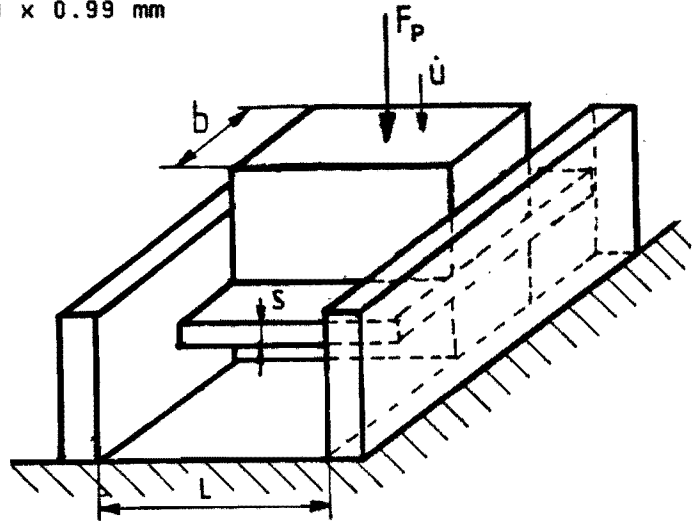
Pletproefserie: C

Smeermiddel : extrusie-olie

Materiaal : Al 2S-0

Afmetingen : $L_0 \times b_0 \times s_0 = 50 \times 100 \times 0.99 \text{ mm}$

Stempel : $L \times b = 50 \times 30 \text{ mm}$



nummer proef- strip	stempelver- plaatsing meetklok [mm]	perskracht F_p [kN]	gereduceerde dikte s [mm]	effectieve rek $\bar{\epsilon}$ [-]	vloei- spanning σ [N/mm ²]	F^* [-]	$\frac{b}{s}$ [-]
C1	0.68	265 ± 5	0.70	0.4002	129.8	1.36	42.86
C2	0.75	280 ± 5	0.64	0.5037	128.6	1.45	46.88
C3	0.78	280 ± 5	0.63	0.5219	129.7	1.44	47.62
C4	0.85	300 ± 5	0.55	0.6787	138.6	1.44	54.55
C5	0.96	310 ± 5	0.49	0.8121	142.4	1.45	61.22

waarbij: $\bar{\epsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \ln \frac{s_0}{s}$

σ_v uit trekproef

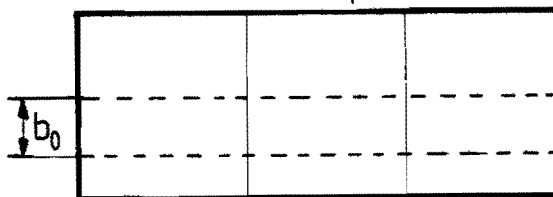
$$F^* = \frac{F_p}{b \cdot L \cdot \sigma_v}$$

Trekproefserie: C

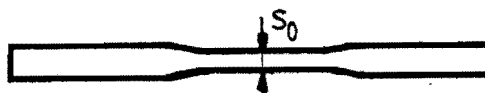
Materiaal : Al 2S-0

Afmetingen : $b_0 \times s_0$

Volgens figuur uit
geplet proefstrip
gehaald.



Bepaling σ_v :



nummer proefstaaf	b_0 [mm]	s_0 [mm]	b [mm]	s [mm]	F_t [N]	σ_v [N/mm ²]
C1	15.85	0.70	15.75	0.68	1390	129.8
C2	15.86	0.64	15.80	0.63	1280	128.6
C3	15.85	0.63	15.79	0.62	1270	129.7
C4	15.85	0.55	15.77	0.54	1180	138.6
C5	15.85	0.49	15.80	0.48	1080	142.4

waarbij: b_0 = breedte trekstaaf vóór trekproef (in mm)

s_0 = dikte trekstaaf vóór trekproef (in mm)

b = breedte trekstaaf ná trekproef (in mm)

s = dikte trekstaaf ná trekproef (in mm)

F_t = kracht waarbij materiaal vloeit (in N)

$$\sigma_v = \text{vloeispanning} = \frac{F_t}{b \cdot s} \text{ N/mm}^2$$

Pletproefserie: 0

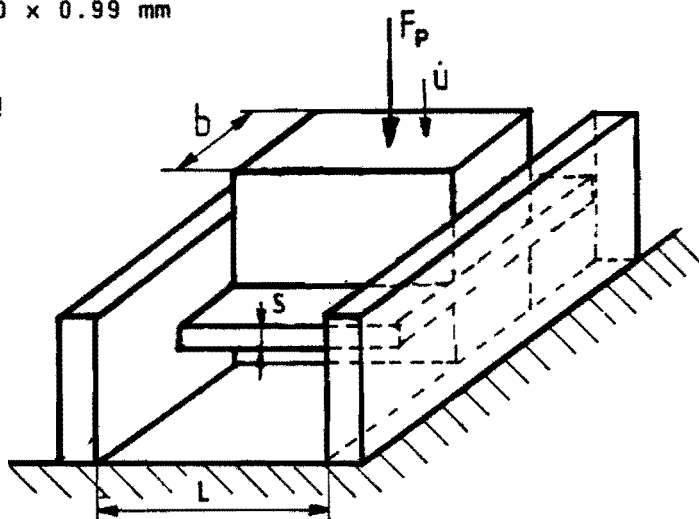
Smeermiddel : petroleum

Materiaal : Al 2S-0

Afmetingen : $L_0 \times b_0 \times s_0 = 50 \times 100 \times 0.99 \text{ mm}$

Stempel : $L \times b = 50 \times 30 \text{ mm}$

opmerking : eerst proefstuk ontvet!



nummer proef- strip	stempelver- plaatsing meetklok [mm]	perskracht F_p [kN]	gereduceerde dikte s [mm]	effectieve rek $\bar{\epsilon}$ [-]	vloei- spanning σ_v [N/mm ²]	F^* [-]	$\frac{b}{s}$ [-]
D1	0.67	460 ± 5	0.83	0.2035	132.0	2.32	36.14
D2	0.71	570 ± 5	0.83	0.2035	120.9	3.14	36.14
D3	0.71	410 ± 5	0.78	0.2753	125.3	2.18	38.46
D4	0.85	650 ± 5	0.77	0.2902	139.7	3.10	38.96
D5	1.00	900 ± 5	0.75	0.3206	132.7	4.52	40.00
D6	1.11	1100 ± 5	0.72	0.3677	136.4	5.38	41.67
D7	0.96	740 ± 5	0.69	0.4169	133.4	3.70	43.48

waarbij: $\bar{\epsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \ln \frac{s_0}{s}$

σ_v uit trekproef

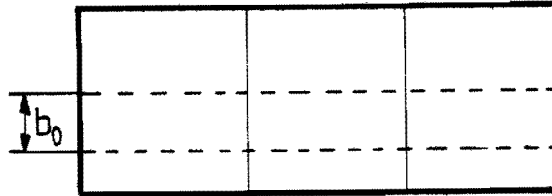
$$F^* = \frac{F_p}{b \cdot L \cdot \sigma_v}$$

Trekproefserie: D

Materiaal : Al 2S-0

Afmetingen : $b_0 \times s_0$

Volgens figuur uit
geplet proefstrip
gehaald.



Bepaling σ_v :



nummer proefstaaf	b_0 [mm]	s_0 [mm]	b [mm]	s [mm]	F_t [N]	σ_v [N/mm ²]
D1	15.91	0.83	15.75	0.76	1580	132.0
D2	15.90	0.83	15.83	0.81	1550	120.9
D3	15.85	0.78	15.75	0.77	1520	125.3
D4	15.87	0.77	15.71	0.67	1470	139.7
D5	15.89	0.75	15.74	0.68	1420	132.7
D6	15.88	0.72	15.79	0.65	1400	136.4
D7	15.89	0.69	15.80	0.65	1370	133.4

waarbij: b_0 = breedte trekstaaf vóór trekproef (in mm)

s_0 = dikte trekstaaf vóór trekproef (in mm)

b = breedte trekstaaf ná trekproef (in mm)

s = dikte trekstaaf ná trekproef (in mm)

F_t = kracht waarbij materiaal vloeit (in N)

$$\sigma_v = \text{vloeispanning} = \frac{F_t}{b \cdot s} \text{ N/mm}^2$$