

Hulsextrusie I : berekeningen

Citation for published version (APA):

Ramaekers, J. A. H. (1982). *Hulsextrusie I : berekeningen*. (TH Eindhoven. Afd. Werktuigbouwkunde, Laboratorium voor mechanische technologie en werkplaatstechniek : WT rapporten; Vol. WT0534). Technische Hogeschool Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1982

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.

BB 431469

A. Houtackers

HULSEXTRUSIE I. (Berekeningen)

Auteur: J.A.H. Ramaekers.

WPT-Rapport nr. 0534

april '82

Met vlak gereedschap met scherpe hoeken

Jah Ramaekers

april 1982

W-WPT- Omvormen

rapport nr. WPT. 0534

Inhoud

1. Hulsextrusie, energiemethode
 - 1.1 De opkomende wand
 - 1.2 De hoek
 - 1.3 De bodem
 - 1.4 Het totale genormeerde vermogen
 - 1.5 De verstevinging $\sigma_v = c \bar{\epsilon}^n$
 - 1.6 De dode zone in de bodem

2. Hulsextrusie, schillenmethode
 - 2.1 De opkomende wand
 - 2.2 De hoek, de belasting op de matrixwand
 - 2.3 De bodem, de maximale druk op het gereedschap.

1. Hulsextrusie, energiemethode.

1.1

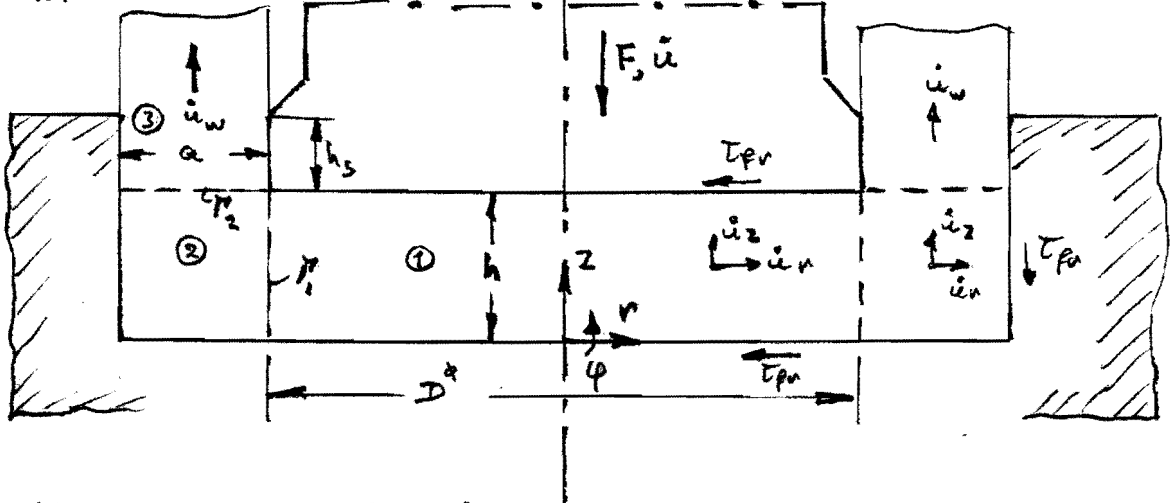


fig 1.1 Hulsextrusie

- a - wanddikte h_0 - initiële platine dikte
- h - momentane bodemdikte D - stempeldiameter
- h_s - hoogte spuittraaf

Bij de analyses wordt de huls in een aantal gebieden opgedeeld (afhankelijk v.d. situatie). In fig 1.1 3 gebieden: ① de bodem; ② de hoek en ③ de opkomende wand. De gebieden worden gescheiden door vlakken met 'n snelheidsdiskontinuiteit (τ -vlakken)

1.1 De opkomende wand.

Nadat het materiaal het τ_2 -vlak gepasseerd is, de formeert het niet meer. Er wordt alleen nog energie gedissipeerd via de wrijving langs het gereedschap.

Met $T_{p\text{wand}} = m_w \sigma_v / \sqrt{2}$ en een contact vlak $2\pi D \cdot h_s$ volgt:

$$P_{f\text{wand}} = m_w \frac{\sigma_v}{\sqrt{2}} \cdot 2\pi D h_s \cdot u_w$$

uit continuïteit volgt $u_w \pi D a = u \pi/4 D^2$ dus:

$$P_{f\text{wand}} = \frac{\pi}{4} D^2 \sigma_v u \frac{2}{\sqrt{2}} m_w \frac{h_s}{a} \tag{1.1}$$

Met het genormaliseerde vermogen (of gemiddelde druk):

$$P^* = \frac{P}{\frac{\pi}{4} D^2 \sigma_v u} \quad (= F^* \pm \frac{\tilde{\sigma}_z}{\sigma_v}) \tag{1.2}$$

volgt:

$$P^*_{f\text{wand}} = \frac{2}{\sqrt{2}} m_w \frac{h_s}{a} \tag{1.3}$$

1.2 De hoek. ($\sigma_v = \text{konst}$)

voor de hoek kennen verschillende modellen opgesteld worden. Nu wordt het model behandeld dat (zeer waarschijnlijk) geldig is bij het begin van de stempelslag ($s <$). Varianten worden in latere paragrafen behandeld.

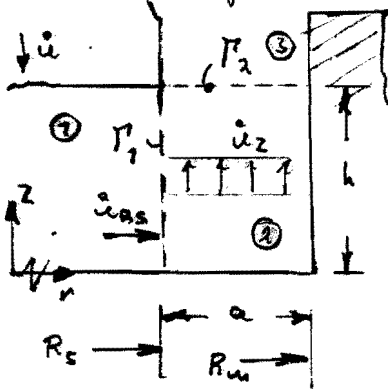


fig 1.2 de hoek bij huls extrusie
 R_s - halve stempel diameter
 R_m - " matrix " "
 a - wanddikte
 h - momentane bodemdikte

Met \dot{u}_z uniform over r volgt uit continuïteit:

$$\dot{u}_z \pi (R_m^2 - R_s^2) = \dot{u}_{RS} 2\pi R_s z$$

met continuïteit $\dot{u}_{RS} 2\pi R_s h = \dot{u} \pi R_s^2$ volgt:

$$\dot{u}_z = \dot{u} \frac{R_s^2}{R_m^2 - R_s^2} \frac{z}{h} = \dot{u} f_R \frac{z}{h} \quad (1.4)$$

voor dunwandige producten geldt ($a \ll R_s$)

$$f_R = \frac{R_s^2}{R_m^2 - R_s^2} = \frac{R_s^2}{(R_m - R_s)(R_m + R_s)} = \frac{R_s^2}{a(2R_s + a)} \approx \frac{1}{2} \frac{R_s}{a} \quad (1.5)$$

met (1.4) $\dot{\epsilon}_z = \dot{u}_{z,z} = \dot{u} \frac{f_R}{h}$ vol. inv. $\dot{\epsilon}_r + \dot{\epsilon}_\varphi = - \dot{u} \frac{f_R}{h}$

$$\dot{\epsilon}_r = \dot{u}_{r,r} \quad \dot{\epsilon}_\varphi = \dot{u}_{\varphi,\varphi} \Rightarrow \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\dot{u}_r \cdot r) = - \dot{u} \frac{f_R}{h}$$

oplossen met $\dot{u}_r(r=R_m) = 0$ geeft:

$$\dot{u}_r = - \frac{1}{2} f_R \frac{\dot{u}}{h} \left(r - \frac{R_m^2}{r} \right) \quad (1.6)$$

$$\dot{\epsilon}_r = - \frac{1}{2} f_R \frac{\dot{u}}{h} \left(1 + \frac{R_m^2}{r^2} \right) \quad \dot{\epsilon}_\varphi = - \frac{1}{2} f_R \frac{\dot{u}}{h} \left(1 - \frac{R_m^2}{r^2} \right)$$

$$\boxed{\dot{\epsilon} = f_R \frac{\dot{u}}{h} \sqrt{1 + \frac{1}{3} \left(\frac{R_m}{r} \right)^4}} \quad (1.7)$$

Het deformatie vermogen $P_D = \int_V \sigma_v \dot{\epsilon} dV$ voor ideaal
 plastisch materiaal $P_{D2} = \sigma_v f_R \frac{\dot{u}}{h} h \int_{R_s}^{R_m} \sqrt{1 + \frac{1}{3} \left(\frac{R_m}{r} \right)^4} 2\pi r dr$

$$P_{D2}^* = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{R_m^2}{R_m^2 - R_s^2} \left[2 - \ln 3 - \sqrt{1 + 3 \left(\frac{R_m}{R_m} \right)^4} + \ln \left\{ \left(\frac{R_m}{R_s} \right)^2 + \sqrt{3 + \left(\frac{R_m}{R_s} \right)^4} \right\} \right] \quad (1.8)$$

zie blz 1-3
 fig 1.3 a

$$\boxed{P_{D2}^* \approx \frac{2}{\sqrt{3}} \left(1 + 26 \frac{a}{R_s} \right)} \quad (1.9)$$

Berekening P_{D2}

$$= 2\pi \nu_0 \rho R \dot{u} \int_{R_B}^{R_m} \sqrt{1 + \frac{1}{3} \left(\frac{R_m}{r}\right)^4} r dr$$

$$x^2 = \frac{1}{3} \left(\frac{R_m}{r}\right)^4$$

$$r^2 = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{R_m^2}{x}$$

$$2r dr = -\frac{1}{\sqrt{3}} \frac{R_m^2}{x^2} dx$$

$$\frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{R_m}{R_S}\right)^2 \int -\frac{1}{2\sqrt{3}} \sqrt{1+x^2} \frac{R_m^2}{x^2} dx$$

$$= -\frac{1}{2\sqrt{3}} R_m^2 \left[-\frac{\sqrt{1+x^2}}{x} + \ln(x + \sqrt{1+x^2}) \right]_{\frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{R_m}{R_S}\right)^2}^{\frac{1}{2}}$$

$$= -\frac{1}{2\sqrt{3}} R_m^2 \left[-\frac{\sqrt{1+\frac{1}{3}}}{1/\sqrt{3}} + \ln\left(\frac{1}{\sqrt{3}} + \sqrt{1+\frac{1}{3}}\right) + \frac{\sqrt{1+\frac{1}{3} \left(\frac{R_m}{R_S}\right)^4}}{\frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{R_m}{R_S}\right)^2} - \ln\left\{ \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{R_m}{R_S}\right)^2 + \sqrt{1+\frac{1}{3} \left(\frac{R_m}{R_S}\right)^4} \right\} \right]$$

$$= -\frac{1}{2\sqrt{3}} R_m^2 \left[-2 + \frac{1}{2} \ln 3 + \sqrt{1+3 \left(\frac{R_S}{R_m}\right)^4} - \ln\left\{ \left(\frac{R_m}{R_S}\right)^2 + \sqrt{3 + \left(\frac{R_m}{R_S}\right)^4} \right\} + \frac{1}{2} \ln 3 \right]$$

$$P_{D2} = \frac{\pi}{\sqrt{3}} R_m^2 \nu_0 \rho R \dot{u} \left[2 - \ln 3 - \sqrt{1+3 \left(\frac{R_S}{R_m}\right)^4} + \ln\left\{ \left(\frac{R_m}{R_S}\right)^2 + \sqrt{3 + \left(\frac{R_m}{R_S}\right)^4} \right\} \right]$$

met $(1+x)^n \approx 1+nx$ en $\ln(1+x) \approx x$ ($x \ll 1$) volgt

$$P_{D2}^* = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{R_m^2}{R_m^2 - R_S^2} \left[2 - \ln 3 - \sqrt{1+3 \left(\frac{R_S}{R_m}\right)^4} + \ln\left\{ \left(\frac{R_m}{R_S}\right)^2 + \sqrt{3 + \left(\frac{R_m}{R_S}\right)^4} \right\} \right]$$

$$P_{D2}^* \approx \frac{2}{\sqrt{3}} \left(1 + 0.26 \frac{a}{R_S}\right) \quad \text{als } \frac{a}{R_S} \leq 0.08 \quad P_D \approx 2/\sqrt{3} \quad (\Delta < 2\%)$$

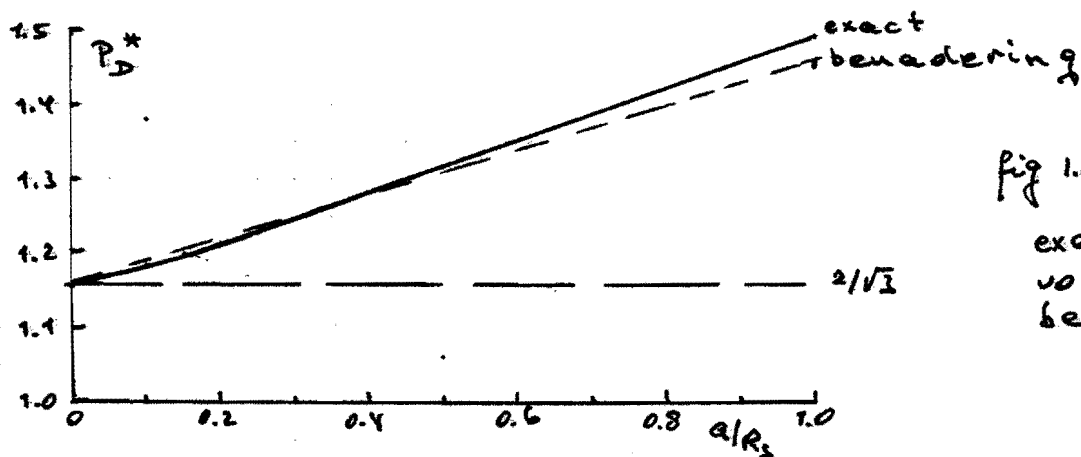


fig 1.3 a $P_{D2}^*(a/R_S)$
exact en volgens benadering

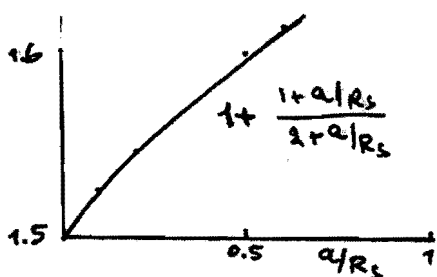


fig 1.3 b P_{D2}^*
 P_{D2}^*

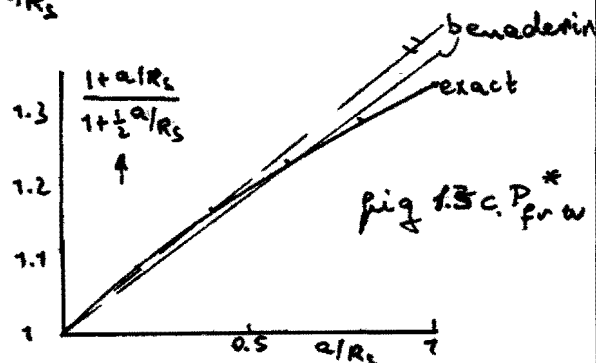


fig 1.3 c P_{D2}^*
 P_{D2}^*

voor het afschuifvermogen op het π_2 -vlak

$$\text{geldt: } P_{\pi_2} = \int_{R_s}^{R_m} \frac{\sigma_v}{\sqrt{2}} |\dot{u}_r| 2\pi r dr$$

$$P_{\pi_2} = \frac{\pi}{3\sqrt{2}} \sigma_v \frac{i}{h} \frac{R_s^2}{R_m + R_s} (2R_m^2 - R_m R_s - R_s^2) \quad (1.10)$$

$$P_{\pi_2}^* = \frac{1}{3\sqrt{2}} \frac{q}{h} \left(1 + \frac{R_m}{R_m + R_s}\right) = \frac{1}{3\sqrt{2}} \frac{q}{h} \left(1 + \frac{R_s + a}{2R_s + a}\right)$$

$$P_{\pi_2}^* \approx \frac{1}{2\sqrt{2}} \frac{q}{h} \left(1 + 0.12 a/R_s\right) \quad (1.11)$$

voor de wrijving langs de bodem $R_s \leq r \leq R_m$ volgt

$$\text{analoog } P_{fr_b}^* \approx \frac{m}{2\sqrt{2}} \frac{q}{h} \left(1 + 0.12 \frac{a}{R_s}\right) \quad (1.12)$$

(zie fig 1.3b)

voor de wrijving langs de matrixwand volgt:

$$P_{fr_w} = \frac{\pi}{\sqrt{2}} m \sigma_v \frac{i}{h} \frac{R_s^2 R_m}{R_m^2 - R_s^2} \quad (1.13)$$

$$P_{fr_w}^* = \frac{m}{\sqrt{2}} \frac{h}{a} \frac{1 + a/R_s}{2 + a/R_s} \approx \frac{m}{2\sqrt{2}} \frac{h}{a} \left(1 + 0.3 \frac{a}{R_s}\right) \quad (1.14)$$

(zie fig 1.3c)

2.3 De bodem

vol. inv. in gebied ① geeft $\dot{u}_r 2\pi r h = \dot{u} \pi r^2$

$$\dot{u}_r = \frac{1}{2} \dot{u} \frac{r}{h} \quad \dot{\epsilon}_r = \frac{1}{2} \frac{\dot{u}}{h} \quad \dot{\epsilon}_\varphi = \frac{1}{2} \frac{\dot{u}}{h} \quad \dot{\epsilon}_z = -\frac{\dot{u}}{h} \quad \dot{u}_z = -\dot{u} \frac{z}{h}$$

$$\dot{\epsilon} = \frac{\dot{u}}{h}$$

deformatievermogen in ① $P_{D①} = \sigma_v \frac{\dot{u}}{h} \pi R_s^2 h$

$$P_{D①}^* = 1 \quad (1.15)$$

wrijvingsvermogen $P_{fr} = 2 \int_0^{R_s} m \frac{\sigma_v}{\sqrt{2}} \dot{u}_r 2\pi r dr$

$$P_{fr①} = \frac{2m}{3\sqrt{2}} \pi \sigma_v \dot{u} R_s^2 \frac{R_s}{h}$$

$$P_{fr①}^* = \frac{m}{3\sqrt{2}} \frac{D}{h} \quad (1.16)$$

Afschuiving op π_1 -vlak $P_{\pi_1} = \frac{\sigma_v}{\sqrt{2}} \int_0^h \left(\dot{u} \frac{z}{h} + \dot{u} f_R \frac{z}{h}\right) 2\pi R_s dz$

$$P_{\pi_1} = \pi R_s^2 \frac{\sigma_v}{\sqrt{2}} \dot{u} \frac{h}{R_s} (1 + f_R)$$

$$P_{\pi_1}^* \approx \frac{1}{2\sqrt{2}} \frac{h}{a} \left(1 + 1.1 a/R_s\right) \quad (1.17)$$

$$\text{co } P_{\pi_1}^* \approx \frac{2}{3} \frac{h}{a} + \frac{1}{3} \frac{h}{a} (1 - 0.35 a/R_s)$$

1.4 Het totale genormeerde vermogen

1.5

$$\Sigma P^* = 1 + \frac{m}{3\sqrt{3}} \frac{D}{h} + \frac{1}{2\sqrt{3}} \frac{h}{a} \left(1 + 2,2 \frac{a}{D}\right) + \frac{m}{2\sqrt{3}} \frac{h}{a} \left(1 + 0,72 \frac{a}{D}\right) + \frac{m+1}{2\sqrt{3}} \frac{a}{h} \left(1 + 0,24 \frac{a}{D}\right) + \frac{2}{\sqrt{3}} \left(1 + 0,52 \frac{a}{D}\right) + \frac{2}{\sqrt{3}} m_w \frac{h_s}{a} \quad (1.18)$$

$$\Sigma P^* = \frac{2}{\sqrt{3}} \left\{ \frac{\sqrt{3}}{2} + 1 + \frac{m}{6} \frac{D}{h} + \frac{m+1}{4} \left(\frac{h}{a} + \frac{a}{h} \right) + m_w \frac{h_s}{a} \right\} + \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{a}{D} \left\{ \frac{h}{a} (0,55 + 0,18 m) + 0,06 \frac{a}{h} (1+m) + 0,52 \right\} \quad (1.19)$$

kan de oude analyse met vlakke def in de hoek ook vervalt het tweede stuk van verg. (1.19). Deze factor wordt voor $a/D = 0.5$ max 15% v. F.*

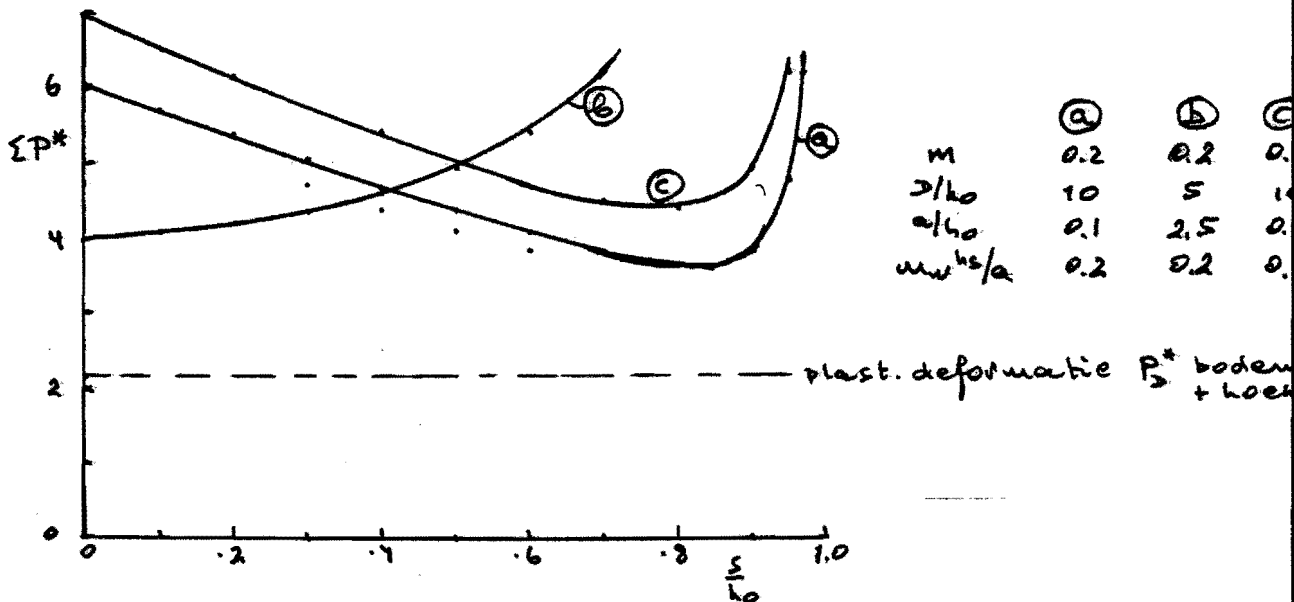


fig. 1.4 $\Sigma P^* (\varepsilon/h_0)$ volgens verg (1.19)

1.5 De versterking

voor de bodem geldt: $\dot{\bar{\varepsilon}}_b = \frac{\dot{u}}{h} = - \frac{\dot{h}}{h}$ dus $\delta \bar{\varepsilon} = - \frac{\delta h}{h}$
 dus $\bar{\varepsilon}_b = \int_{h_0}^h \frac{\delta h}{h} = \ln \frac{h_0}{h}$ (uniform!) (1.20)

voor de hoek geldt: $\dot{\bar{\varepsilon}}_H = \frac{R_s^2}{R_m^2 - R_s^2} \frac{\dot{u}}{h} \sqrt{1 + 1/2 (R_m/r)^4}$ (1.21)

Dus in de hoek is geen uniforme deformatie.

In § 1.5.1 wordt 'n benadering voor $\dot{\bar{\varepsilon}}_H$, $\bar{\varepsilon}_H$ en $\bar{\sigma}_V H$ afgeleid.

1.5.1 Benadering voor $\dot{\bar{\epsilon}}$, $\bar{\epsilon}$ en τ in de hoek.

Er geldt dus $\dot{\bar{\epsilon}}_H = \frac{\dot{\gamma}}{h} \left\{ \frac{1}{(1+a/R_s)^2 - 1} \sqrt{1 + \frac{1}{3} \left(\frac{1+a/R_s}{r/R_s} \right)^4} \right\}$ (1.2)

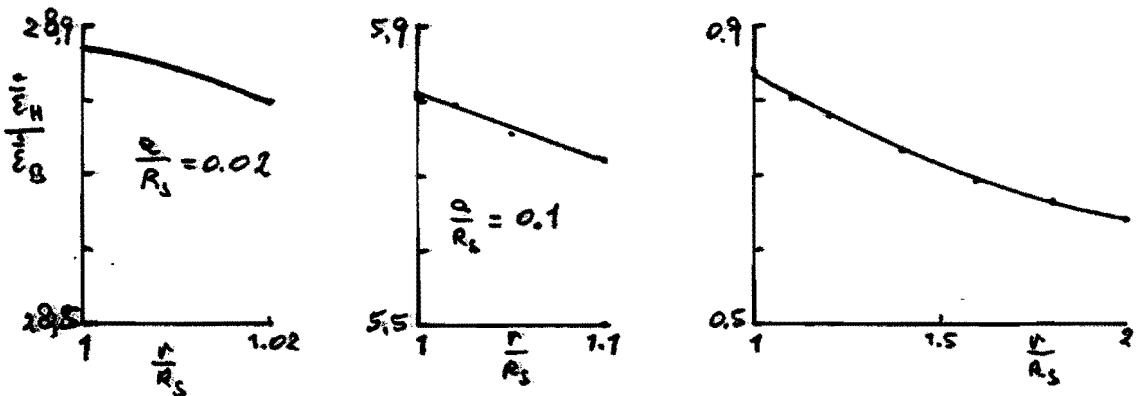


fig 1.5 $\dot{\bar{\epsilon}}_H = \dot{\bar{\epsilon}}\left(\frac{r}{R_s}, \frac{a}{R_s}\right)$ volgens (1.27)

Benadering voor dunwandige producten $\frac{a}{R_s} \ll 0.1$

$r = R_m \rightarrow \dot{\bar{\epsilon}}_H = \frac{\dot{\gamma}}{h} \left\{ \frac{1}{(1+a/R_s)^2 - 1} \sqrt{1 + \frac{1}{3} \left(\frac{R_m}{R_m} \right)^4} \right\} \approx \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{R_s}{a} \cdot \frac{\dot{\gamma}}{h}$
 fout < 1%!

voor dikwandig $\frac{a}{R_s} \approx 1 \rightarrow \dot{\bar{\epsilon}}_H \approx \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{R_s}{a} + 0.25 \right) \frac{\dot{\gamma}}{h}$

dan bij benadering uniforme deformatie voor het materiaal, dat vanaf het tijdstip $t = t_0$ $h = h_0$ zich in de hoek bevindt:

$\bar{\epsilon}_H = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{R_s}{a} \ln \frac{h_0}{h}$ (1.22)

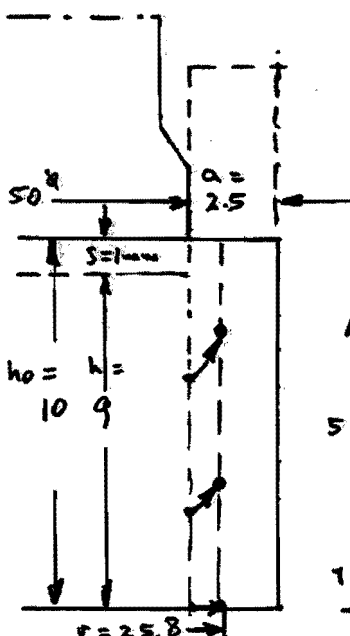
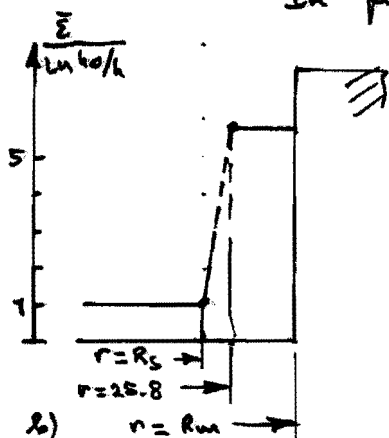


fig 1.6 a)

fig 1.6 a illustreert hoe 'n mat. deeltje vanaf $r_0 = R_s$ (op σ_1 vlak) = 25 verplaatst naar $r = 25.8$ als de stempelverplaatsing 1mm is (van $h_0 = 10$ naar $h = 9$ mm bij 'n wanddikte van 2.5 mm

In fig 1.6 b) is het $\bar{\epsilon}$ verloop over bodem ($r < R_s$) en hoek ($R_s \leq r \leq R_m$) weergegeven



In het begin van de stampelslag geldt dus

$\bar{\epsilon}_H \approx \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{R_s}{a} \ln \frac{h_0}{h}$

op het eind $r \rightarrow R_m$ moet 'n gemiddelde genomen worden.

uit $\dot{v} = -\frac{1}{2} f_R \frac{\dot{v}}{h} (v - \frac{R_m^2}{r})$ volgt: 1-7

$\rightarrow r \dot{v} = +\frac{1}{2} f_R \frac{h}{r} (v^2 - R_m^2)$ met $y = v^2 - R_m^2$
 $\frac{dy}{y} = 2v \frac{dv}{v^2 - R_m^2}$
 $\frac{dy}{y} = 2r \dot{v}$

$$f_R \int_{h_0}^h \frac{dh}{h} \rightarrow \int_{R_s^2}^{r^2 - R_m^2} \frac{dy}{y} \Rightarrow \ln \frac{r^2 - R_m^2}{R_s^2 - R_m^2} = f_R \ln \frac{h}{h_0}$$

$$r = \sqrt{R_m^2 - (R_m^2 - R_s^2) \left(\frac{h}{h_0}\right)^{f_R}}$$

$$\frac{r}{R_s} = \sqrt{\left[\left(1 + \frac{a}{R_s}\right)^2 - \left\{ \left(1 + \frac{a}{R_s}\right)^2 - 1 \right\} \left(\frac{h}{h_0}\right)^{\frac{1}{(1+a/R_s)^2 - 1}} \right]} \quad (1.23)$$

(voor $v_0 = R_s$).

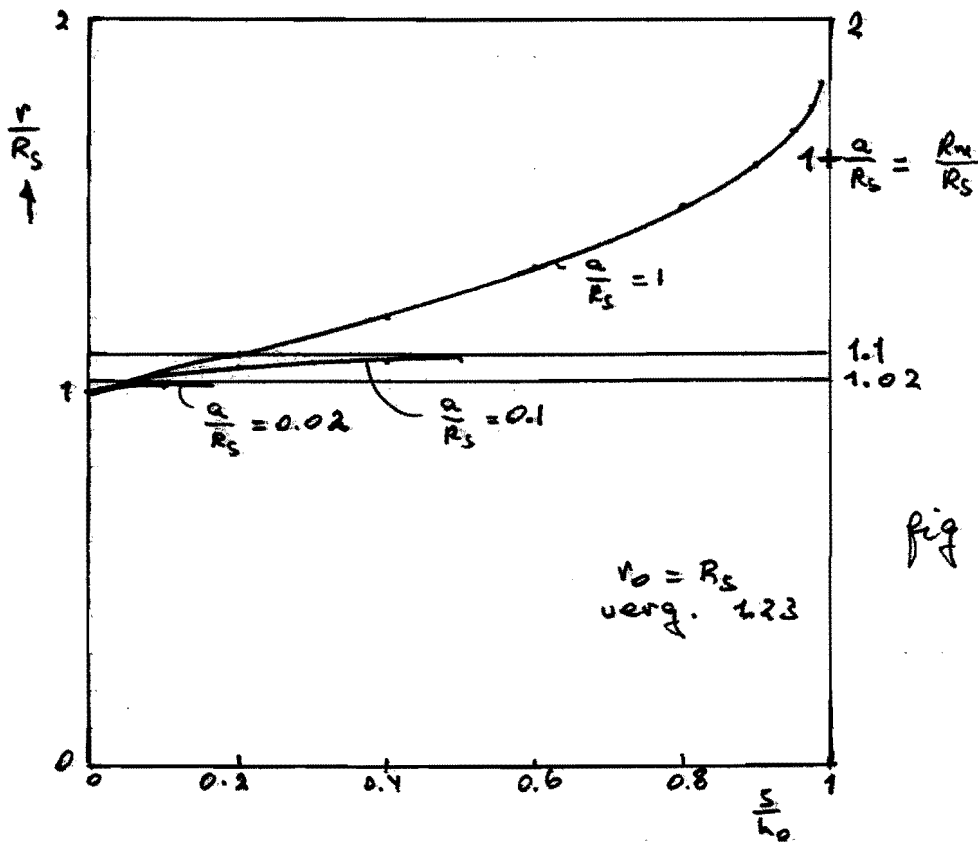


fig 1.7. $\frac{r}{R_s} = f\left(\frac{h}{h_0}, \frac{a}{R_s}\right)$
 voor $v_0 = R_s$

Fig 1.7 illustreert hoe snel het materiaal deeltje op $v_0 = R_s$ naar $v = R_m$ verplaatst. Voor dunwandige producten is dit zeer snel ($\frac{a}{R_s} = 0.02 \rightarrow \frac{h}{h_0} = 0.1$).

Voor dunwandige producten nemen we voor $\bar{\epsilon}_H$ (gemiddeld over 't volume):

$$\bar{\epsilon}_H = \frac{1}{2} (\bar{\epsilon}_z + \bar{\epsilon}_H(r=R_m))$$

$$\bar{\epsilon}_H = \ln \frac{h_0}{h} \frac{1 + \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{R_s}{a}}{2} \quad (1.24)$$

$$\text{en } \sigma_{vH} = C \left(\bar{\epsilon}_H \right)^n = \sigma_{vH} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2\sqrt{3}} \frac{R_s}{a} \right)^n \quad (1.25)$$

uit (1.25) en (1.18) volgt dan met

$$\sigma_v = C \left(\ln \frac{h_0}{h} \right)^n$$

$$\begin{aligned} \Sigma P^* = & 1 + \frac{m}{3\sqrt{3}} \frac{D}{h} + \frac{7}{2\sqrt{3}} \frac{h}{a} \left(1 + 2.2 \frac{a}{D} \right) + \\ & + \frac{m}{2\sqrt{3}} \frac{h}{a} \left(1 + 0.72 \frac{a}{D} \right) + \frac{m}{2\sqrt{3}} \frac{a}{h} \left(1 + 0.24 \frac{a}{D} \right) + \\ & + \frac{1}{2\sqrt{3}} \frac{a}{h} \left(\frac{1}{2} + \frac{7}{4\sqrt{3}} \frac{D}{a} \right)^n \left(1 + 0.24 \frac{a}{D} \right) + \\ & + \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{1}{2} + \frac{7}{4\sqrt{3}} \frac{D}{a} \right)^n \left(1 + 0.52 \frac{a}{D} \right) + \frac{2}{\sqrt{3}} m_w \frac{h_0}{a} \end{aligned} \quad (1.26)$$

(NB $T_p = \text{konst}$)

de perskracht wordt dan

$$F = \frac{\pi}{4} D^2 C \left(\ln \frac{h_0}{h} \right)^n \cdot \Sigma P^* \quad (1.27)$$

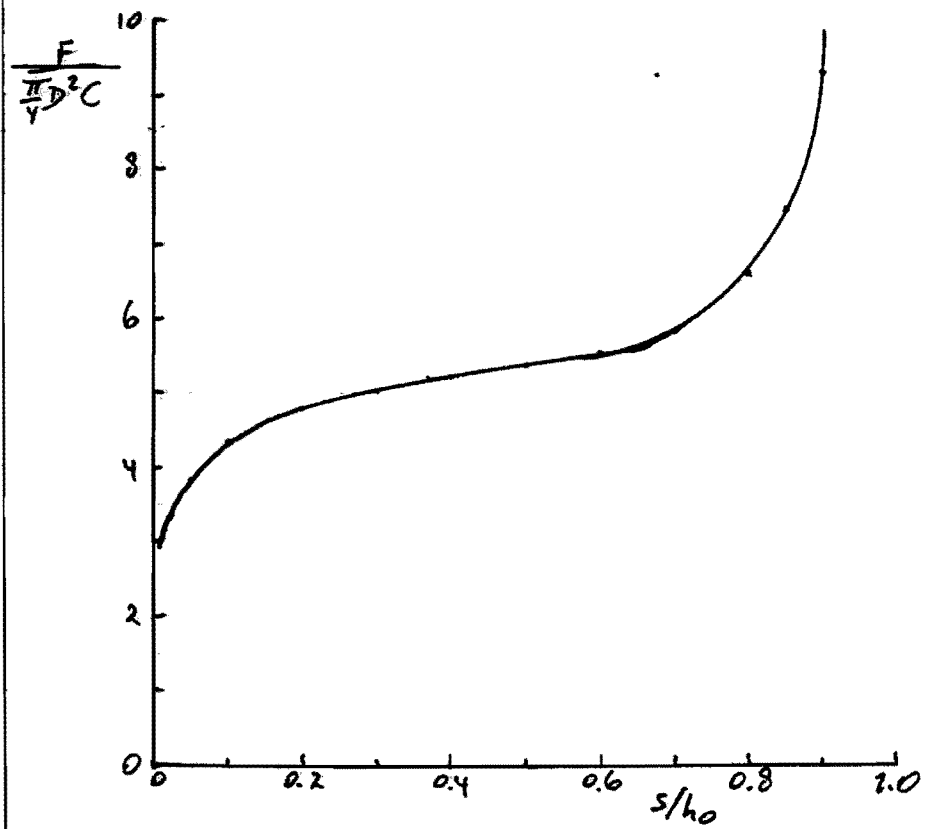


fig 1.8 $F(s)$
volgens (1.27)

- $D = 50$
- $h_0 = 5$
- $a = 0.5$
- $n = 0.2$
- $m = 0.2$
- $m_w \frac{h_0}{a} = 0.1$

algemene relatie $\frac{F}{\pi/4 D^2 C} = \left\{ -\ln(1-s) \right\}^n \left\{ A + B(1-s) + \frac{C}{1-s} \right\}$

$$A = 1 + \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{1}{2} + \frac{7}{4\sqrt{3}} \frac{D}{a} \right)^n \left(1 + 0.52 \frac{a}{D} \right) + \frac{2}{\sqrt{3}} m_w \frac{h_0}{a}$$

$$B = \frac{1}{2\sqrt{3}} \left(\frac{h_0}{a} + 2.2 \frac{h_0}{D} \right) + \frac{m}{2\sqrt{3}} \left(\frac{h_0}{a} + 0.72 \frac{h_0}{D} \right) = \frac{h_0}{a} \frac{m+1}{2\sqrt{3}} + \frac{h_0}{D} \frac{0.72m+2.2}{2\sqrt{3}}$$

$$C = \frac{m}{3\sqrt{3}} \frac{D}{h_0} + \frac{1}{2\sqrt{3}} \frac{a}{h_0} \left(1 + 0.24 \frac{a}{D} \right) \left\{ m + \left(\frac{1}{2} + \frac{7}{4\sqrt{3}} \frac{D}{a} \right)^n \right\}$$

1.6 De dode zone in de bodem

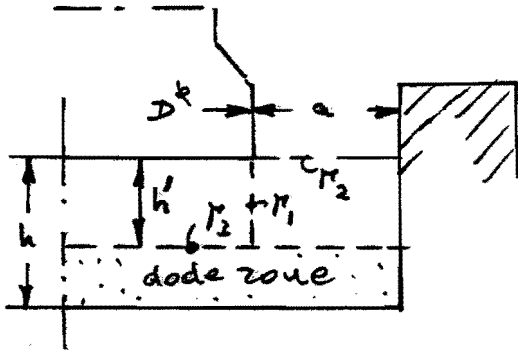


fig 1.9 Hulsextrusie met dode zone in de bodem (h-h').

Energetisch gezien ontstaat deze dode zone als EP met dode zone en afschrijving langs R_3 minder vermogen betekent dan de normale deformatie volgens (1.27)

Dan volgt uit het voorafgegaane:

(1.3) $\rightarrow P_{fuv}^* = \frac{2}{\sqrt{3}} m w \frac{h s}{a}$

(1.9) $\rightarrow P_{D \textcircled{1}}^* = \frac{2}{\sqrt{3}} (1 + 0.52 \frac{a}{D})$

(1.11) $\rightarrow P_{R_2}^* = \frac{1}{2\sqrt{3}} \frac{a}{h'} (1 + 0.24 \frac{a}{D})$

(1.12) $\rightarrow P_{R_2 H}^* = \frac{1}{2\sqrt{3}} \frac{a}{h'} (1 + 0.24 \frac{a}{D})$

(1.14) $\rightarrow P_{f r w}^* = \frac{m}{2\sqrt{3}} \frac{h'}{a} (1 + 0.72 \frac{a}{D})$

(1.15) $\rightarrow P_{D \textcircled{2}}^* = 1$

(1.16) $\rightarrow P_{f r \textcircled{1}}^* = \frac{m}{6\sqrt{3}} \frac{D}{h'}$

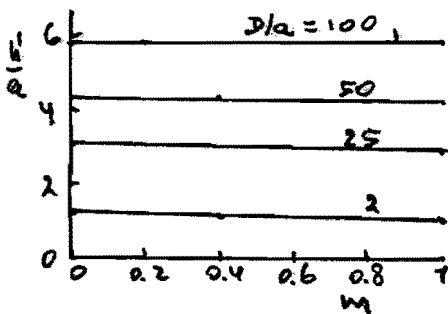
$P_{R_3 a}^* = \frac{1}{6\sqrt{3}} \frac{D}{h'}$

(1.17) $\rightarrow P_{R_1}^* = \frac{1}{2\sqrt{2}} \frac{h'}{a} (1 + 2.2 \frac{a}{D})$

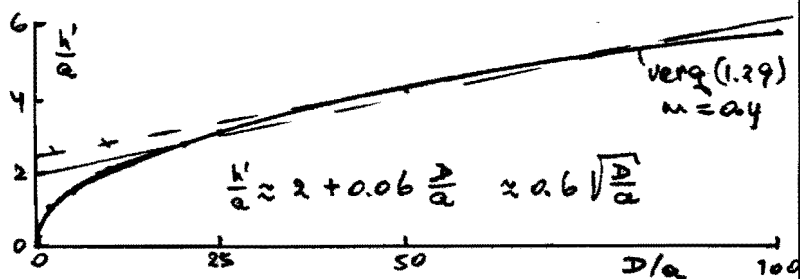
$$\Sigma P_{dz}^* = 1 + \frac{m+1}{6\sqrt{3}} \frac{D}{h'} + \frac{1}{2\sqrt{2}} \frac{h'}{a} (1 + 2.2 \frac{a}{D}) + \frac{2}{\sqrt{3}} (1 + 0.52 \frac{a}{D}) + \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{a}{h'} (1 + 0.24 \frac{a}{D}) + \frac{m}{2\sqrt{2}} \frac{h'}{a} (1 + 0.72 \frac{a}{D}) + \frac{2}{\sqrt{2}} m w \frac{h s}{a} \tag{1.28}$$

met $\frac{\partial \Sigma P^*}{\partial h'/a} = 0$ volgt de optimale h'

$$\frac{h'}{a} = \sqrt{\frac{6 + (m+1) D/a + 7.44 a/D}{3(1+m) + 1/D (6.6 + 2.16 m)}} \tag{1.29}$$



a)



b)

fig 1.70

uit fig 1.10 volgt:

1-10

$$\frac{h^i}{a} \approx 2 + 0.06 \frac{D}{a} \stackrel{cg.}{\approx} 0.6 \sqrt{D/a} \quad (1.30)$$

Met (1.30) in (1.28) kan de optimale F-s kromme uitgerekend worden. Afgezien van versteviging blijft de kracht dan konstant (s_{ho-h^i}). Hoe hier de eindige $\bar{\epsilon}$ berekend moet worden is nog onduidelijk.

2.1 De opkomende wand

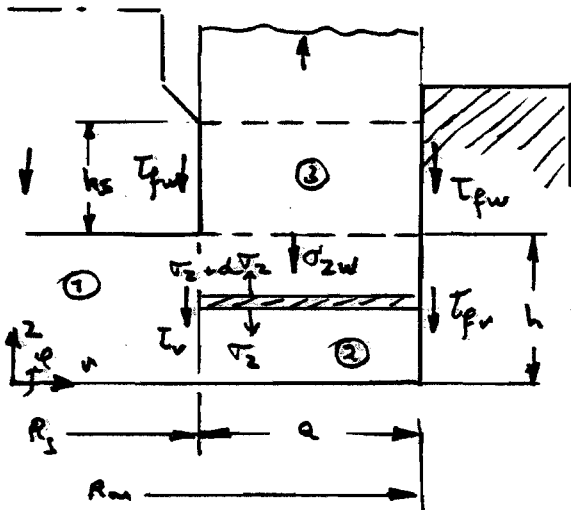


fig 2.1 Evenwicht op wand en hoek.

- T_{fw} wrijving op de wand
- T_{fr} wrijving inside hoek

omdat het materiaal in gebied ① niet meer plastisch is wordt verondersteld dat de wrijvingsspanning hier lager is dan in gebied ① en ③: $T_{fr} < T_{fw}$

voor gebied ③ geldt: $\sigma_{zw} \pi (R_m^2 - R_s^2) + 2\pi T_{fw} (R_m + R_s) - T_v 2\pi R_s dz - T_{fr} 2\pi R_m dz = 0$

$$\sigma_{zw} / \sigma_v = -\frac{2}{\sqrt{3}} m_w \frac{h_s}{a} \quad (2.1)$$

Deze factor is in principe ook afhankelijk van de matrijshoogte, omdat de wandwrijving in gebied ③ een konstante en relatief kleine bijdrage aan de totale kracht is (zie bv. 1.26) moet er kan volstaan worden met 'n globale schatting van m_w .

2.2. De hoek

uit fig 2.1 volgt: $\pi(\sigma_z + d\sigma_z)(R_m^2 - R_s^2) - \sigma_z (R_m^2 - R_s^2) - T_v 2\pi R_s dz - T_{fr} 2\pi R_m dz = 0$

$$d\sigma_z = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_v \frac{(1+m)R_s + am}{2R_s + a} \frac{dz}{a} \quad (2.2)$$

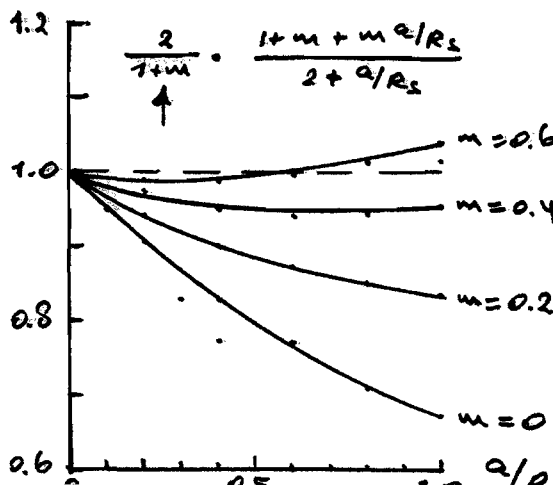


fig 2.2 benadering van verg. (2.1)

uit fig 2.2 volgt dus voor $a/R_s < 0.1$ of $m \approx 0.4$

$$\frac{(1+m)R_s + am}{2R_s + a} \approx \frac{1+m}{2}$$

dus

$$d\sigma_z = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_v \frac{1+m}{2} \frac{dz}{a} \quad (2.3)$$

(te groot voor $\frac{a}{R_s} > 1$)

met (2.3) en $\sigma_z(z=h) = \sigma_{zw}$ volgt: 2-2

$$\frac{\sigma_z}{\sigma_v} \textcircled{2} = -\frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{1+m}{2} \frac{h-z}{a} + m_w \frac{h_s}{a} \right) \quad (2.4)$$

2.2.1 De druk in radiale richting op de matrijz-

voor de hoek geldt $\dot{\epsilon}_\varphi = -\frac{1}{2} \frac{R_s^2}{R_m^2 - R_s^2} \frac{z}{h} \left(1 - \left(\frac{R_m}{r} \right)^2 \right)$

Omdat voor $\frac{a}{R_s} \ll 1$ geldt $\dot{\epsilon}_\varphi \ll \dot{\epsilon}_r$ wordt aangenomen

$\dot{\epsilon}_\varphi = 0$ (voor $r = R_m$ is dit korrekt) en dus:

$$\sigma_\varphi = \frac{\sigma_r + \sigma_z}{2} \Rightarrow |\sigma_r - \sigma_z| = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_v \quad (2.5)$$

met (2.4) volgt dan de druk op de matrijzwand:

$$\boxed{\frac{\sigma_r}{\sigma_v} \textcircled{2} = -\frac{2}{\sqrt{3}} \left(1 + \frac{1+m}{2} \frac{h-z}{a} + m_w \frac{h_s}{a} \right)} \quad (2.6)$$

voor de druk op de bodem (z-richting) voor $r = R_m$ en $z=0$ geldt:

$$\sigma_z / \sigma_v \text{ (hoek)}_{r=R_m} = -\frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{1+m}{2} \frac{h}{a} + m_w \frac{h_s}{a} \right) \quad (2.7)$$

2.2.2. De randvoorwaarde voor de bodem ($\sigma_r(r=R_s) = ?$)

uit het vergelijken van (2.6) en de bovengrens oplossing (§ 7.2) volgt dat met de schillenmethode een tweetal termen wegvallen en wel de wrijving langs de bodem ($R_s \leq r \leq R_m$) en de afschuiving langs het σ_z vlak (of m.a.w. σ_z is niet konstant over σ). De fout wordt ondervangen door $\sigma_r(r=R_s)$ af te leiden met behulp van de vermogens balans:

$$\left| \sigma_r(r=R_s) \right| 2\pi R_s h \dot{\epsilon}_r(r=R_s) = \left[P_{D2}^* \text{ (7.9)} + P_{\sigma_z}^* \text{ (7.77)} + P_{\sigma_r}^* + P_{fwb}^* \text{ (7.72)} + P_{fww}^* \text{ (7.74)} + P_{fww}^* \text{ (7.3)} \right] \frac{\pi}{4} D^2 \sigma_v$$

Dus:
$$\boxed{\frac{\sigma_r}{\sigma_v}(r=R_s) = -\sum P^*_{\text{hoek+wand}} = -\sum P^*_{h+w}} \quad (2.7)$$

voor dunwandige producten geldt:

$$\boxed{\frac{\sigma_r}{\sigma_v}(r=R_s) = -\frac{2}{\sqrt{3}} \left\{ 1 + \frac{m+1}{4} \left(\frac{a}{h} + \frac{h}{a} \right) + \frac{h}{D} + m_w \frac{h_s}{a} \right\}} \quad (2.8)$$

voor de druk op de bodem ($r=R_s$) in de hoek geldt

$$\sigma_z / \sigma_v \text{ (hoek)}_{r=R_s} = -\frac{2}{\sqrt{3}} \left\{ \frac{m+1}{2} \left(\frac{a}{h} + \frac{h}{a} \right) + m_w \frac{h_s}{a} \right\} \quad (2.9)$$

2.2.3 De benadering voor $a/R \ll 1$

uit (2.8) en (2.7) volgt:

$$\frac{f_r}{f_r} = \frac{\sigma_r(2.7) - \sigma_r(2.8)}{\sigma_r(2.8)} = \frac{0.26 + 0.03(1+m)a/h - 0.09(1-m)h/a}{1 + \frac{m+1}{4} (a/h + h/a) + h/D + mw h/a} \cdot \frac{a}{R_s}$$

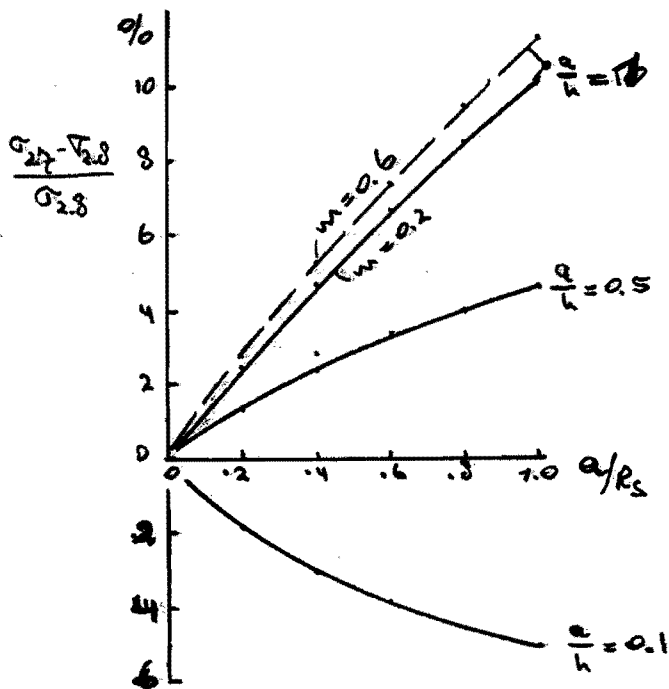


fig 23 de fout bij benadering volgens verg. (2.8)

voor $\frac{a}{R_s} < 0.2 \rightarrow f_r < 3\%$
 zelfs voor $\frac{a}{R_s} = 1 \rightarrow f_r < 10\%$
 dus praktisch steeds toelaatbaar.

$f_{cm} = f(a/h)$ echter nauwelijks $f(m)$!

$$f_r = \left(0.18 \left(\frac{a}{h}\right)^{0.28} - 0.11\right) \frac{a/R_s}{0.6}$$

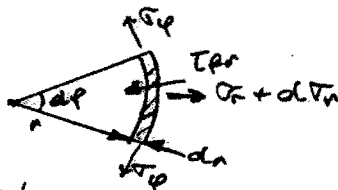
$$f_r = \left\{0.6 \left(\frac{a}{h}\right)^{0.28} - 0.4\right\} \frac{a}{D_s}$$

Dan:

$$\frac{\sigma_r}{\sigma_v(r=R_s)} = \frac{\sigma_r}{\sigma_v(2.8)} (1 + f_r) \tag{2.10}$$

2.3 De Bodem.

Evenwicht in r-richting:



$$- \sigma_r d\varphi r h + (\sigma_r + d\sigma_r)(r + dr) d\varphi h +$$

$$- 2 \sigma_p \frac{d\varphi}{2} dr h - 2 T_{fr} r d\varphi dr = 0$$

met $\sigma_r = \sigma_p$ volgt $d\sigma_r = 2 T_{fr} \frac{dr}{h}$ (2.11)

randvoorwaarde: $\sigma_r(r=R_s) = \sigma_r(2.7)$ resp. (2.8)

$$\frac{\sigma_r}{\sigma_v} \textcircled{1} = \frac{2}{13} \left[m \frac{r-R_s}{h} + \sigma_{rR} \right] \tag{2.12}$$

$$\sigma_{rR} = \left\{ 1 + \frac{m+1}{4} \left(\frac{a}{h} + \frac{h}{a} \right) + \frac{h}{D} + mw \frac{hs}{a} \right\} \left\{ 1 + f_r \right\}$$

Met $\dot{\epsilon}_r = \dot{\epsilon}_\varphi \rightarrow \sigma_r = \sigma_\varphi \rightarrow \sigma_v = \sigma_r - \nu \sigma_z$ volgt

$$\frac{\sigma_z}{\sigma_y} \textcircled{1} = -1 - \frac{2}{\sqrt{3}} \left\{ m \frac{R_3 - \nu}{h} + \sigma_{rR} \right\} \quad (2.13)$$

voor $\nu = 0$ volgt de maximale druk op het gereedschap.

Met $F = \int_A \sigma_z dA$ volgt de kracht. Deze is gelijk aan de oplossing uit § 1.5.

$$\frac{\sigma_z}{\sigma_y} \textcircled{1} \text{ max} = -1 - \frac{2}{\sqrt{3}} \left[\frac{m}{2} \frac{D}{a} \cdot \frac{a}{h} + \left\{ 1 + \frac{m+1}{4} \left(\frac{a}{h} + \frac{h}{a} \right) + \frac{h}{a} \cdot \frac{a}{D} + m_w \frac{h_5}{a} \right\} * \right. \\ \left. * \left\{ 1 + \left(0.6 \left(\frac{a}{h} \right)^{0.38} - 0.4 \right) \frac{a}{D} \right\} \right] \quad (2.14)$$

met verwaarlozing van $(1 + f_r)$ volgt:

$$\left(\frac{\sigma_z}{\sigma_y} \right) \text{max} \approx -\frac{2}{\sqrt{3}} \left[1 + \frac{D}{2} + \frac{m}{2} \frac{D}{a} \cdot \frac{a}{h} + \frac{m+1}{4} \left(\frac{a}{h} + \frac{h}{a} \right) + \frac{h}{a} \cdot \frac{a}{D} + m_w \frac{h_5}{a} \right]$$

