

# Cavitatie



---

Cavitatie, algemene beschouwingen

---

1. Definitie Cavitatie is koken van water (vloeistof) bij verlaagde druk.
2. Beschrijving Bij cavitatie ontstaan of groeien bellen die gedeeltelijk met gas (of lucht) en gedeeltelijk met waterdamp gevuld zijn. Deze bellen kunnen bij implosie aanleiding geven tot interne waterslagverschijnselen, met plaatselijk grote drukstoten.
3. Typen Cavitatie
  - turbulente cavitatie die ontstaat bij momentane en locale lage drukpieken.
  - wandcavitatie die ontstaat bij plaatselijke onregelmatigheden in de wand en hoge snelheid van de vloeistof.
  - volledig ontwikkelde cavitatie die ontstaat als in de lage druk zone in een zog van een voorwerp de druk onder de dampspanning komt.
  - vliescavitatie die ontstaat bij een bol gekromd oppervlak (scheepsschroef\*, kruin van overlaat), het is een bijzondere vorm van volledig ontwikkelde cavitatie.
4. Onderzoeksgebieden Rendement (pompen, turbines, draagvleugelboten), schade, slijtage, onderhoud, lawaai.  
Ultrasoon wassen  
détectie van schepen (militair).
5. Cavitatie bij schutsluizen kan bij vervallen groter dan 10 m voorkomen, benedenstrooms van schuiven, en daar waar plaatselijk hoge snelheden voorkomen. De schade kan variëren afhankelijk van de mate van cavitatie en de duur ervan, de wandbekleding, de sterkte van de schuif, mate van beluchten. Bij beton kan diepe erosie voorkomen.
6. Grootheden die de mate en soort van cavitatie bepalen  
Stroombeeld (geometrie), druk, turbulentie, initiële belgrootte, luchtgehalte vloeistof, dampdruk (temperatuur afhankelijk), oppervlaktespanning, viscositeit, moleculaire structuur, mate dat vloeistof met lucht ver-

zadig is, verdampingswarmte, verontreiniging, chemische samenstelling vloeistof, stijgsnelheid van bellen.

De momentane toestand wordt door de geschiedenis vooraf mede bepaald (hysteresis verschijnselen).

### 7. Sterk vereenvoudigde beschouwing over cavitatie

Aanname: een caviteit ontstaat als de waterdruk onder de dampdruk zou komen, en groeit zodanig dat op de grens de waterdruk gelijk is aan de dampdruk; alle onder 6 genoemde factoren hebben geen invloed en ook die van de zwaartekracht wordt verwaarloosd.

Gaan we bij b.v. twee verschillende modellen nu uit van conforme geometrie en stroombeeld, zonder dat bekend is waar cavitatie ontstaat, dan kiezen we een referentiedruk en een referentiesnelheid. Nu heerst bij alle cavititeiten in het water de dampdruk, en het verschil tussen de referentiedruk en de dampdruk is de drukschaal. Vanuit de schaalregels voor stroming volgt

$$(b.v. \frac{dp}{dx} = \rho \frac{\partial v_x}{\partial t} + \rho v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + \rho v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + \rho v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \quad \text{dus de drukschaal}$$

$n_p = n_\rho n_{v^2}$ ) dat de schaal van  $\rho v^2$  gelijk moet zijn aan de drukschaal. Dus

$$n_{v^2} = n_{(p-p_{damp})}, \text{ of wel } n\left(\frac{\Delta p - p_d}{p}\right) = 1$$

Gebruikt wordt hiervoor het dimensieloze getal van Thoma, of cavitatiegetal

$$\sigma = \frac{p - p_{damp}}{\frac{1}{2} \rho v^2}$$

In de vereenvoudigde beschouwing is dit getal bepalend voor het begin van cavitatie als ( $\sigma = \sigma_i$ ), de mate van cavitatie (als  $\sigma < \sigma_i$ ) en de veiligheid voor het cavitatievrij zijn ( $\sigma > \sigma_i$ ). De bellengroei wordt geheel bepaald door de snelheidsschaal.  $\sigma_i$  is het cavitatie-inceptiegetal.

Het getal van Thoma wordt steeds gebruikt om het begin van cavitatie vast te leggen. De waarde van  $\sigma = \sigma_i$  is als zodanig steeds verschillend, afhankelijk van de geometrie van de stroombegrenzing en van de plaats waar de referentiedruk en de referentiesnelheid wordt genomen. Verder is  $\sigma_i$  uiteraard afhankelijk van alle factoren die onder punt 6 genoemd zijn.

8. Bij implosie van bellen gaat de gelijkvormigheidsbeschouwing alleen op als  $n_v = 1$ . Als de begrenzingen van de caviteit elkaar raken met een snelheid  $v$ , dan ontstaan drukgolven  $p = \rho c \cdot v$ , waarbij  $c$  de voortplantingssnelheid van de drukgolf in de vloeistof is. De drukken blijven alleen op de juiste schaal als de schaal van  $v$  gelijk is aan die van  $c$ , hetgeen bij gelijke vloeistof betekent  $n_v = n_c = 1$ . Hieruit volgt ook dat dan  $n_p = 1$ . Wordt hieraan niet voldaan dan is ook de bellengroei niet conform daar deze door de drukgolven wordt beïnvloed. De drukgolven zijn de oorzaak van hysteresisverschijnselen als bij een situatie met constante snelheid de druk verlaagd en dan weer verhoogd wordt. De cavitatie verdwijnt pas bij een hogere druk, omdat de drukgolven het ontstaan van caviteiten bevorderen.

9. De invloed van de zwaartekracht verstoort de gelijkvormigheidsbeschouwing niet als  $n_v = \sqrt{\frac{n_g n_z}{g}} = \sqrt{\frac{n_L}{L}}$ . De invloed van de zwaartekracht volgt uit

$$\frac{\partial (p + \rho g z)}{\partial x} = \rho \frac{\partial v_x}{\partial t} + \rho v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + \text{etc, waaruit weer volgt}$$

$$n_v^2 = n (P_{ref} + \rho g z_{ref} - P_{damp} - \rho g z_c)$$

Als er zwaartekracht werkt dan ontstaat hierdoor een hydrostatische drukverdeling (dese kan bij stroming zonder vrij oppervlak gesuperponeerd worden zonder dat de stroming beïnvloed wordt), en moeten drukhoogte en plaatshoogte gecombineerd worden beschouwd. (Bernoulli b.v. geeft  $\rho g z + p + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{const.}$ ). Ontstaat er nu cavitatie op verschillende hoogten, dan is  $p$  gelijk (= dampspanning) maar  $(p + \rho g z)$  varieert. Aangezien  $(p + \rho g z)$  op de hoogteschaal gereduceerd wordt, moet  $\rho v^2$  ook op deze schaal gereduceerd worden.

$$n_v = \sqrt{\frac{n_g n_z}{g}} = \sqrt{\frac{n_L}{L}}$$

D.w.z. de froudeschaal moet worden toegepast om het ontstaan van cavitatie bij verschillende onderzoeken te kunnen vergelijken. Het getal van Thoma is niet de enig bepalende factor.

Dit is ook als volgt in te zien.

Achter een schuif treden t.g.v. stroming de laagste drukken op in de wervelstraat tussen de neer en de doorgaande stroom. Wordt nu het zelfde cavitatiegetal ingesteld bij zeer lage snelheden dan moet de druk extra sterk verlaagd worden en zal de dampdruk het eerst bereikt worden bij het hoogstliggende punt, dus aan het plafond.

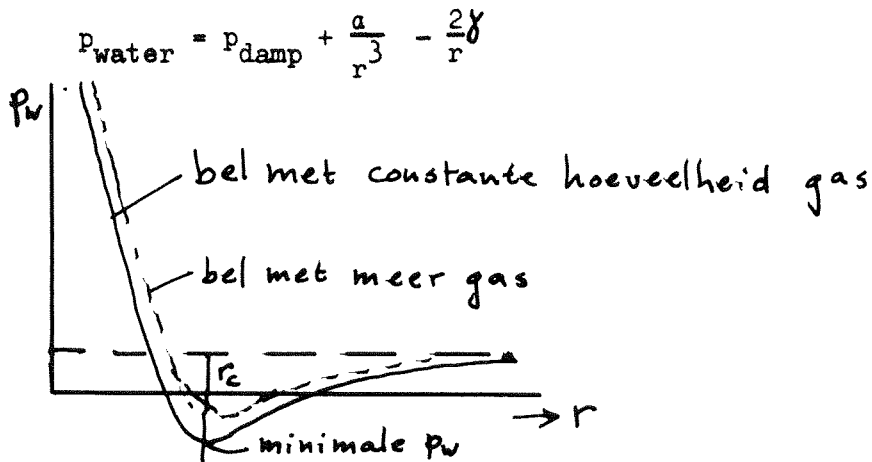
De invloed van de zwaartekracht is gering als  $\frac{1}{2} \rho v^2 \gg \rho g h$ , waarbij h de hoogtevariatie is waarin cavitatie kan voorkomen. Bij stroming in dunnere buisleidingen wordt hieraan vaak voldaan.

Vele andere factoren beïnvloeden de cavitatie zodat schaalregels zeer omzichtig gehanteerd moeten worden. Door de zwaartekracht stijgen bellen op. De stijgsnelheid is niet op één of andere schaal te reproduceren, en is afhankelijk van de belgrootte.

Enige opmerkingen over de invloed van initiële luchtbellen.

Door de oppervlaktespanning is de druk in de bel groter dan in het omringende water, n.l.  $p_{\text{bel}} - p_w = \frac{2\gamma}{r}$  ( $\gamma$  = oppervlaktespanning). Bij constante gashoeveelheid  $= p_{\text{gas}} = \frac{a}{r^3}$  (opm.: de luchthoeveelheid zal bij langzame bellengroei niet constant zijn).

Bij evenwicht geldt



Verlaagd men de waterdruk dan groeit de bel, tot de critieke waarde  $r_c$  is bereikt, daarna groeit de bel door zonder dat de druk behoeft te dalen. Hierdoor wordt het verloop van cavitatie altijd instabiel. Bevatten de bellen in het water weinig lucht dan wordt de bel pas bij veel lagere druk instabiel, d.w.z. het water kan een hogere trekspanning opnemen. Ontlucht

water kan gedurende korte tijd honderden ato trekspanning opnemen!  
 Of in water initieel luchtbelllen aanwezig zijn hangt af van de stromings-  
 toestand en van de verontreiniging. Stilstaand schoon water bevat ~~geen~~ vrije  
 lucht. Zou er n.l. een bel stationair aanwezig zijn dan stijgt deze op  
 waarbij de hydrostatische druk afneemt, de bel groeit. De druk binnen in de  
 bel neemt bovendien af omdat de invloed van de oppervlaktspanning  $\gamma$  afneemt,  
 waardoor meer opgeloste lucht vrij komt in de bel. Zou een bel aanwezig zijn,  
 vastgehouden op één plaats, dan is deze ook labiel; wordt hij kleiner dan  
 neemt t.g.v.  $\gamma$  de druk in de bel toe waardoor lucht in oplossing gaat, de  
 bel kleiner wordt etc. Hierbij komt dat water met een vrij oppervlak ver-  
 zadigd is met een concentratie van lucht behorend bij een druk van 1 ato.  
 Onder het oppervlak is de druk groter en is het water dus onderverzadigd, en  
 is t.g.v.  $\gamma$  de beldruk nog groter dan lost de lucht op. Een vrije bel kan  
 alleen in labiel evenwicht zijn.

Is een luchtbel aan een deeltje gekoppeld dan kan b.v. het deeltje min  
 of meer in de bel dringen waardoor bij volumevermindering de straal van de  
 bel niet hoeft af te nemen. Deze luchtbelllen kunnen hierdoor stabiel zijn.  
 Tevens zijn negatieve kromtestralen mogelijk waardoor de beldruk lager kan  
 zijn dan de waterdruk, en gelijk aan b.v. de "verzadigingsdruk" van 1 ato.

Enige fysieke constanten van lucht en water die cavitatie beïnvloeden.

Dampdruk van water bij 10°C 1250 N/m<sup>2</sup> (12,5 cm waterkolom)  
 " " " " 20°C 2400 N/m<sup>2</sup> (24 " " )

Oppervlaktspanning water/lucht in 10<sup>-3</sup> N/m

bij 10°C = 74,2 + M. 1,64

" 20°C = 72,75 + M. 1,64

M = zcutgehalte in gram NaCl per liter.

Stijgsnelheid luchtbelllen

Ø 1 mm 0,13 m/s, bij kleinere diameter geldt globaal  $V_g :: \text{diameter}$

Ø 7 mm 0,2 m/s

tussen Ø 7 en Ø 30 mm v toenemend van 0,2 naar 0,35 m/s.

(uit Wasser-abwasser, 10 Juli 1964 Heft 28)

Verzadigingsgraad van lucht in water

bij 10°C, 1 ato → 19,4 cc/l

bij 20°C, 1 ato → 16,5 cc/l

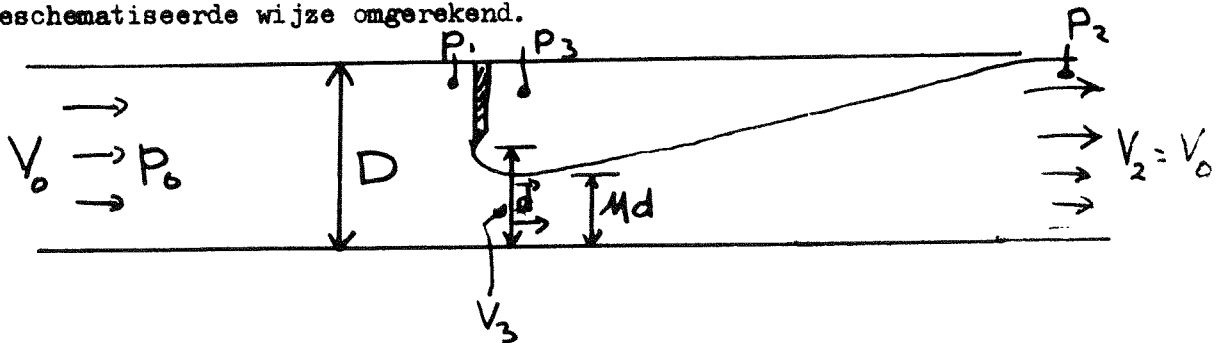


Cavitatie-inceptiegetallen bij schuiven, voorwerpen, wand

Opmerking vooraf: Uit notitie 6 blijkt van hoeveel factoren cavitatie inceptie afhankelijk is. Voor elke onderzoeksinstallatie zijn belgrootte, waterkwaliteit etc. min of meer gekoppeld aan de gevarieerde grootte (b.v. de snelheid of de druk) zodat de resultaten slechts een beperkte geldigheid hebben.

Definitie van het Thoma getal  $\sigma_1$  waarbij inceptie optreedt

Zoals in notitie 6 is vermeld is het noodzakelijk een referentiedruk en een referentiesnelheid in te voeren. Bij een voorwerp in de stroming of bij stroming langs de wand wordt de aankomende snelheid en de druk in het ongestoorde snelheidsveld genomen. Bij schuiven wordt in deze notitie de laagste referentiedruk en de hoogste snelheid genomen, omdat hiermede enigszins vergelijkbare getallen worden verkregen voor verschillende vormgevingen. Omdat verschillende auteurs nogal eens afwijkende definities toepassen zijn de resultaten op geschematiseerde wijze omgerekend.



Per definitie is ingevoerd: 
$$\sigma = \frac{p_3 - p_{damp}}{\frac{1}{2} \rho v_3^2} \quad (1)$$

Het verval over de schuif  $p_0 - p_2 = \xi_s \left( \frac{1}{2} \rho v_0^2 \right)$ ,  $\xi_s$  is te berekenen uit  $\frac{1}{2} \rho (v_3 - v_0)^2 / \frac{1}{2} \rho v_0^2 = \left( \frac{D}{md} - 1 \right)^2$

Nu is ook te berekenen

$$p_2 - p_3 = 2 \sqrt{\xi_s} \left( \frac{1}{2} \rho v_0^2 \right)$$

Hiermede zijn nu anders gedefinieerde  $\sigma$ 's met andere referentiesnelheid en

druk in elkaar om te rekenen.

#### 1. Vernauwing met bovenstroomse afronding ( $\mu = 1$ )

lit: S. Vigander "Wall pressure fluctuations in a cavitating turbulent shear flow" Symposium on cavitation in fluid machinery, Nov. '65 in the Engineering Laboratory T.V.A., Norris, Tennessee.

De resultaten staan vermeld in fig. 1. Gemeten is in een tunnel  $\varnothing$  0,18 m, de snelheid ( $v_0$ ) varieerde van 2 tot 7 m/s; gestroomd werd met vers leidingwater (hoog luchtgehalte). Door het N.S.P. en het Waterloopkundig Laboratorium is een controleproef gedaan met  $d/D = 0,6$  in een tunnel  $\varnothing$  0,3 m met snelheden van 6 à 8 m/s, en in het W.L. is in een tunnel  $\varnothing$  0,1 m gestroomd met een snelheid van 3 m/s.

#### 2. Vernauwing met een scherpe plaat

In samenwerking tussen N.S.P. en W.L. zijn proeven in een tunnel gedaan ( $\varnothing$  0,3 m) waarbij de tunnel met leidingwater werd gevuld en waarbij (t.g.v. het systeem met gesloten circuit) het luchtgehalte door het caviteren tijdens de proeven steeds lager werd. Fig. 2 en 3 geven hiervan de resultaten.

Duidelijk blijkt de afhankelijkheid van lucht, en de onafhankelijkheid van de helling van de schuif. Zou bij de definitie van  $\sigma$  een andere snelheid en een andere referentiesnelheid zijn gebruikt dan zou wel afhankelijkheid zijn gevonden.

#### 3. Riolschuiven

Voor de Carrapatelosluis in Portugal is gebruik gemaakt van gegevens van Sogréah in Grenoble voor een rechte schuif (Scheepv. Congr. 1969). Onderscheid is gemaakt in begin van cavitatie en "volledig ontwikkelde" cavitatie. Bij de sluis is getracht het gebied met "volledig ontwikkelde" cavitatie te vermijden. (het beton achter de schuif is met staal bekleed). Door het W.L. is voor een riolschuif met 20 m verval aan de hand van geluiden een schatting van toelaatbare cavitatie gemaakt (niet gepubliceerd). De resultaten van beide onderzoeken zijn in fig. 4 samengevat. Niet duidelijk is waarom beide resultaten zo sterk verschillen.

#### 4. Afsluiters

Een zeer uitgebreide studie van cavitatie bij afsluiters is gemaakt door het

Hydro Machinery Laboratory Engineering Research Center, Colorado State University, Fort Collins (report 1, June '67: Hydraulic and Cavitation Characteristics of Valves. In fig. 5 en 6 zijn resultaten samengevat van de vlinderklep en de „balschuif". De metingen aan de bolafsluiter zijn gedaan met 100 tot 250 m voordruk bovenstrooms van de schuif zonder dat  $\sigma_c$  veranderde. De  $\sigma_c$  waarden volgens formule (1) zijn berekend via de gegeven verliescoëfficiënten. In de publicatie worden andere referentiedrukken en snelheden gegeven..

#### 5. Plotselinge verwijding

Lit. H. Rouse and V. Jezdinsky: "Cavitation and energy dissipation in conduit expansions", I.A.H.R. congres Leningrad 1965, zie fig 7. De proeven zijn gedaan bij vrij hoge snelheden (dan speelt luchtgehalte kleinere rol) in een  $\phi$  1,5 m expansiegedeelte van 3 m lengte.

#### 6. Scherp voorwerp in stroom

In fig. 8 is de  $\sigma_c$  gegeven met de definitie als is aangegeven, voor een rond schijfje met scherpe rand. De schijfdiameter en de stroomsnelheid zijn gevarieerd. Gevonden is een éénduidig verband met het Reynoldsgetal.

Lit.: 1 R.W. Kermeen, J.T. Mc Graw and B.R. Parkin, Mechanism of Cavitation Inception and the related scale effects problem. Transactions A.S.M.E., Vol 77, 1955 pp 533-541

2 R.W. Kermeen and B.R. Parkin, Incipient Cavitation and Wake flow behind sharp-edged disks. Engineering Div. California Inst. of Technology Pasadena Rep. 85-4, Aug. 1957.

Over gestroomlijnde vormen wordt veel onderzoek gedaan, maar de resultaten hangen zeer sterk van de krommingen van het oppervlak, de ruwheid en het luchtgehalte van water af. Voor de civiele techniek zijn deze resultaten van minder belang.

#### 7. Schuifspanningen

Hierover is in het Int. Ass. of Hydraulic Research Congres Leningrad 1965 een publicatie verschenen van N.P. Rosanov, P.P. Moys, N.N. Pashkov en G.A. Vorobjov "Research of Vacuum and Cavitation Characteristics of elements of hydrotechnical structures". Hoewel te weinig gegevens bekend gemaakt zijn over de proefopstelling, waterkwaliteit etc. geven de  $\sigma_c$  waarden wel een goede

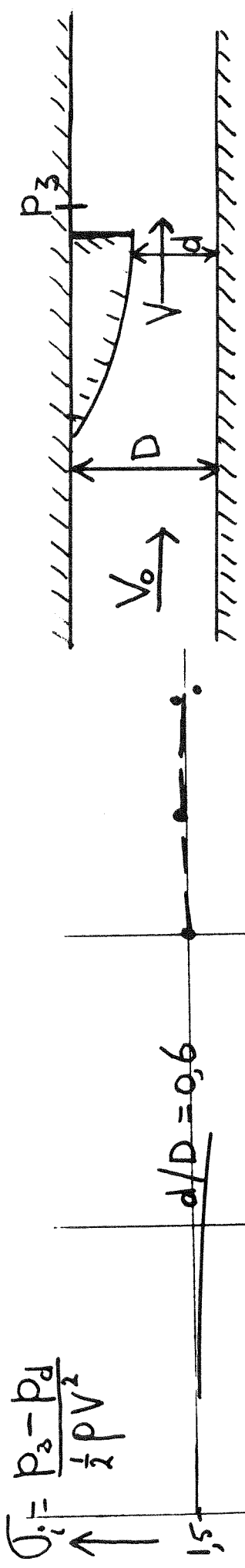
indicatie welke verbeteringen te bereiken zijn. De diepte van de schuifspanning had weinig invloed hierop (diepte  $1/4$  à  $1/2$  breedte).

Onderscheiden wordt de invloed van de boven- en benedenstroomse rand. Het meest effectief voor het verlagen van  $\tau$  is afronden van de benedenstroomse rand (fig. 9).

### 8. Wandruwheden

Hierover zijn gegevens gepubliceerd in het artikel van Rosanov es vermeld in par. 7, en in J.W. Ball "Construction finishes and high velocity flow".

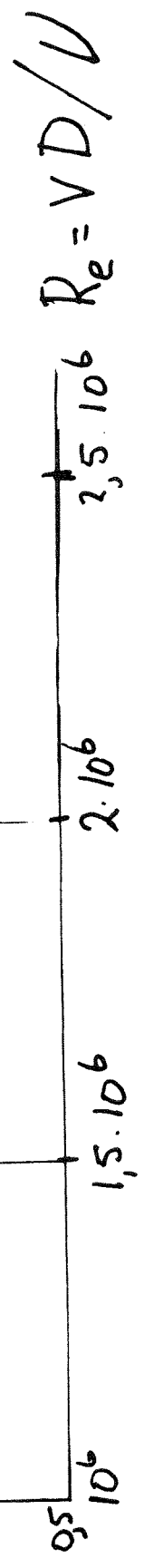
Proc. A.S.C.E. Sept. 1963 CO 2 pp 91-110. Fig. 10 en 11 geeft enkele resultaten. Bij de gegevens van Ball is het opvallend dat de  $\tau$  sterk afhangt van de hoogte van de ruwheid en de watersnelheid. Dit betekent dat de grenslaagdikte en de waterkwaliteit (d.w.z. gegevens over de proefopstelling) van groot zijn. Deze zijn niet vermeld.



— = Vigander  $\phi$  0,18 m  
 - - = WL - N.S.P.  $\phi$  0,3 m  
 - · - · = WL  $\phi$  0,1 m

$d/D = 0,6$   
 $d/D = 0,3$   
 $d/D = 0,2$

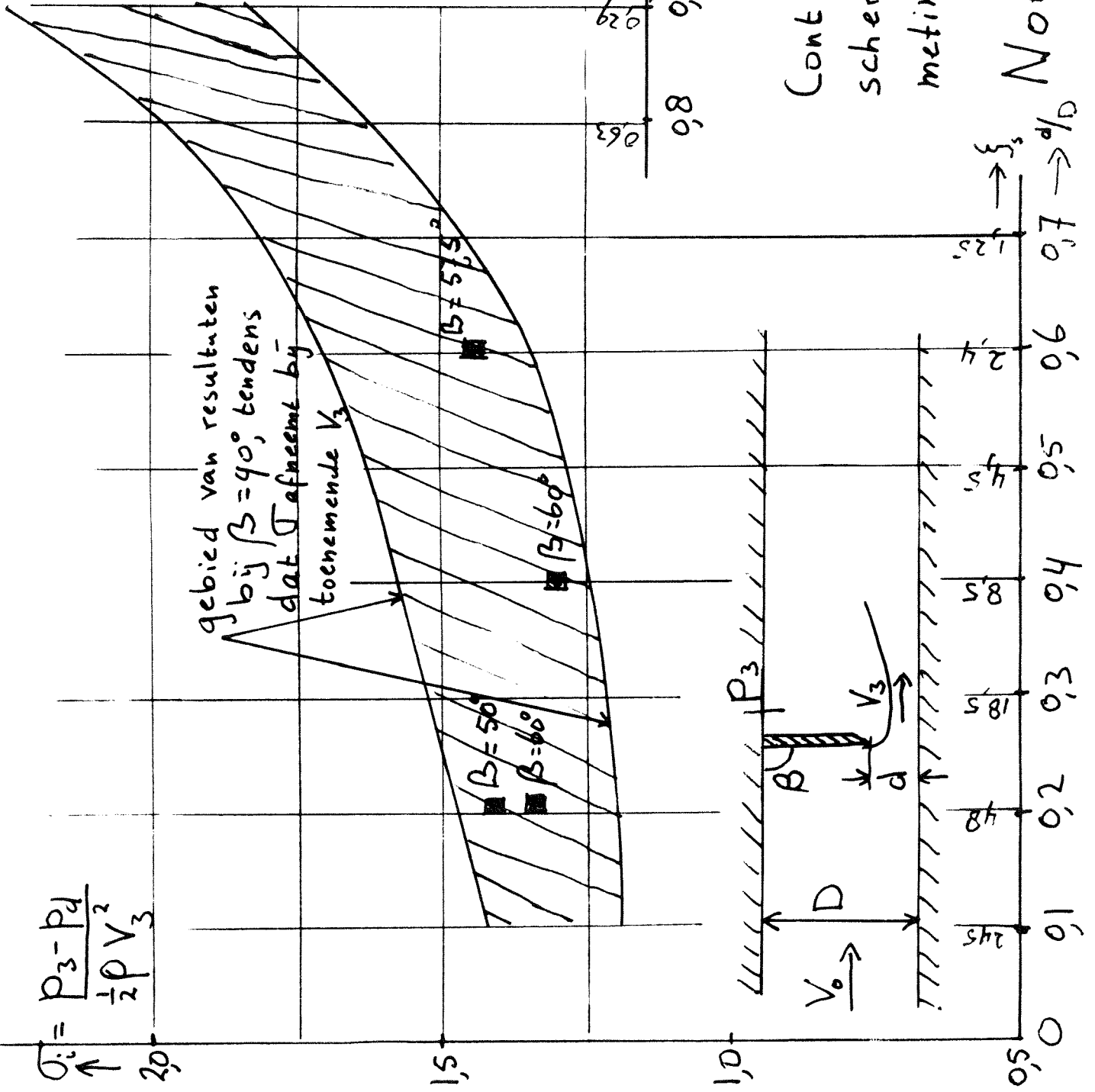
$d/D = 0,8$



Contractie, bovenstrooms afgerond

Notitie 7 fig. 1

$$\sigma_i = \frac{p_3 - p_d}{\frac{1}{2} \rho V_3^2}$$



$\sigma$  bepaald bij  $V_3 = 6 - 10 \text{ m/s}$ .

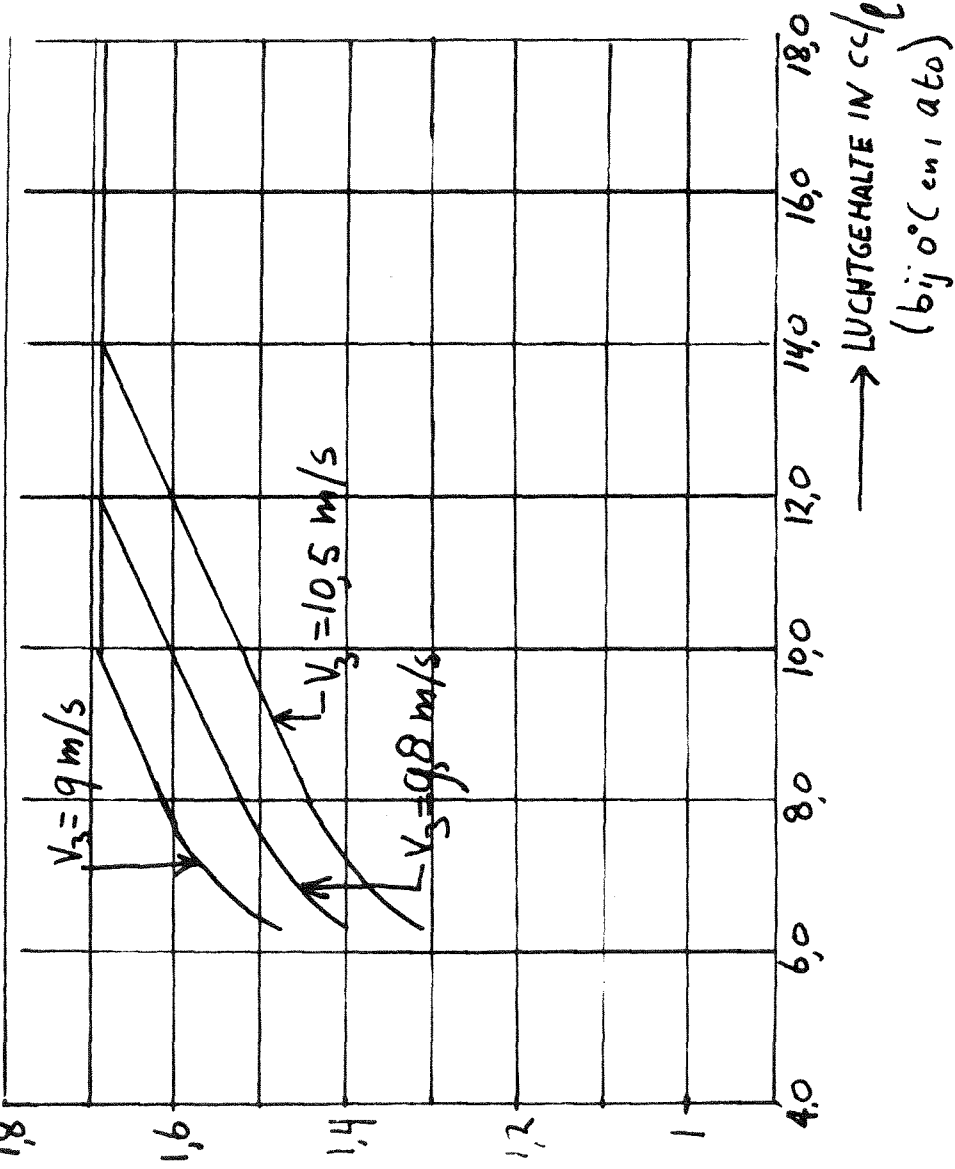
Luchtgehalte, vrij + opgelost, 6, 5 à 7 cc/liter (onder 1 ato)

$\beta$  bij  $\beta = 90^\circ$   
 $\rightarrow d/D$

Contractie met scherpe plaat, metingen WL-NSP

Notitie 7 fig 2

$$\sigma_i = \frac{p_3 - p_d}{\frac{1}{2} \rho V_3^2}$$

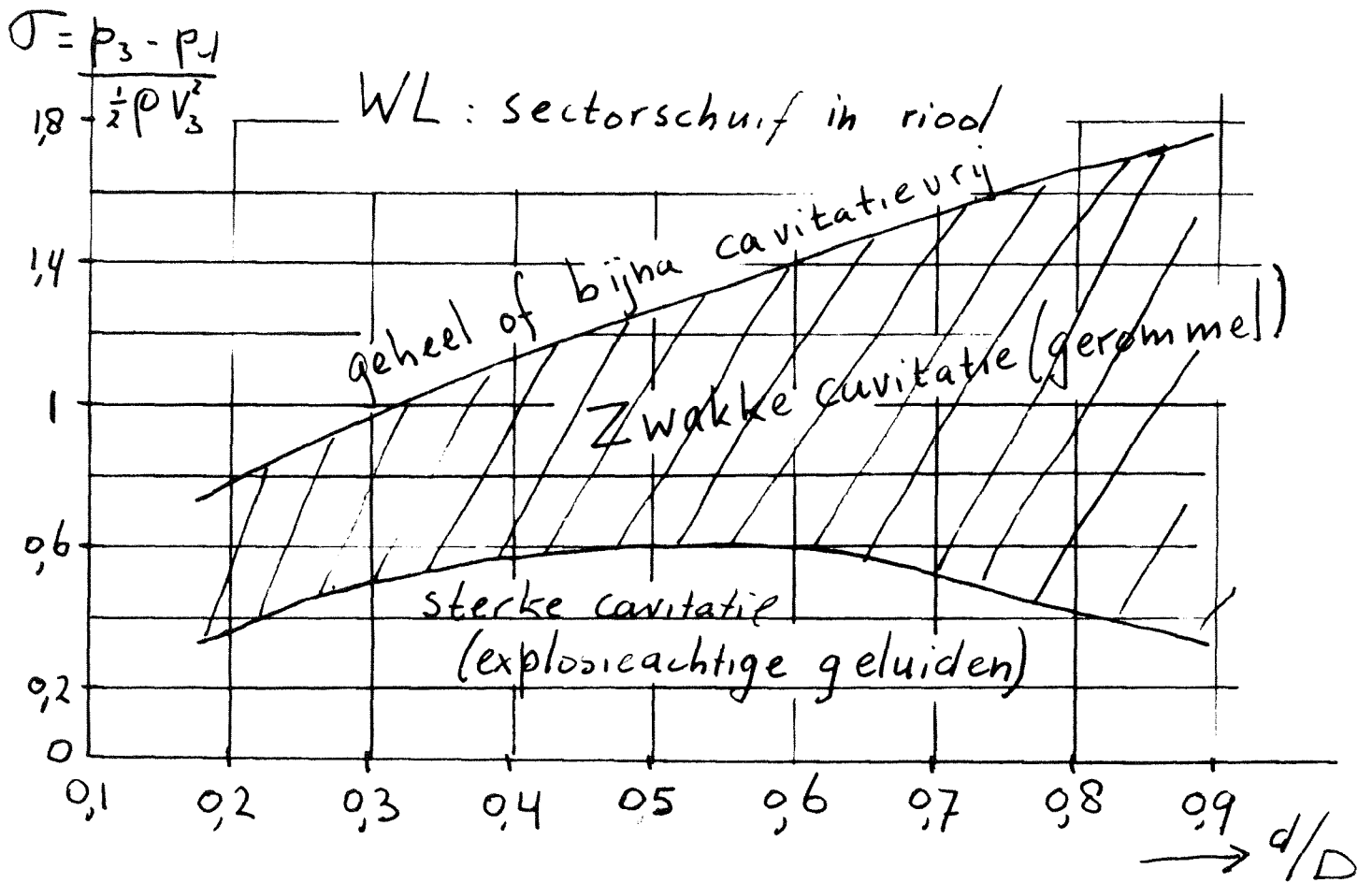
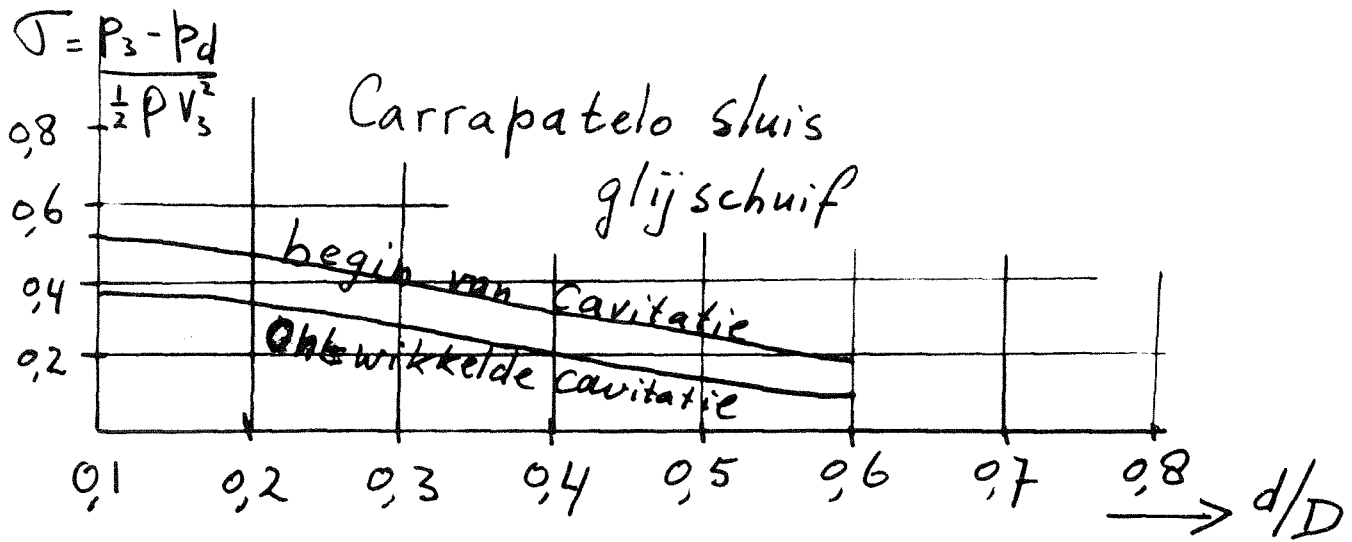


$$d/D = 0,5 \quad \beta = 90^\circ$$

(zie fig. 2)

Invloed luchtgehalte  
metingen WL-NSP

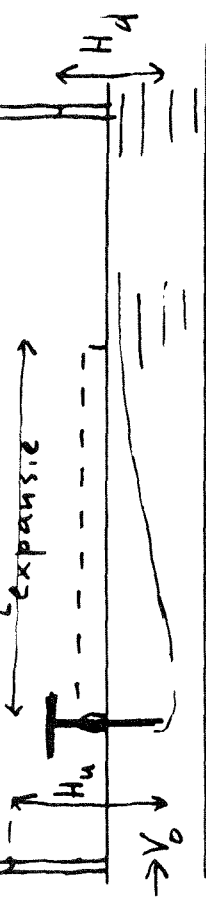
Notitie 7 fig 3



Notitie 7 fig 4



# Notitie 7 fig. 5

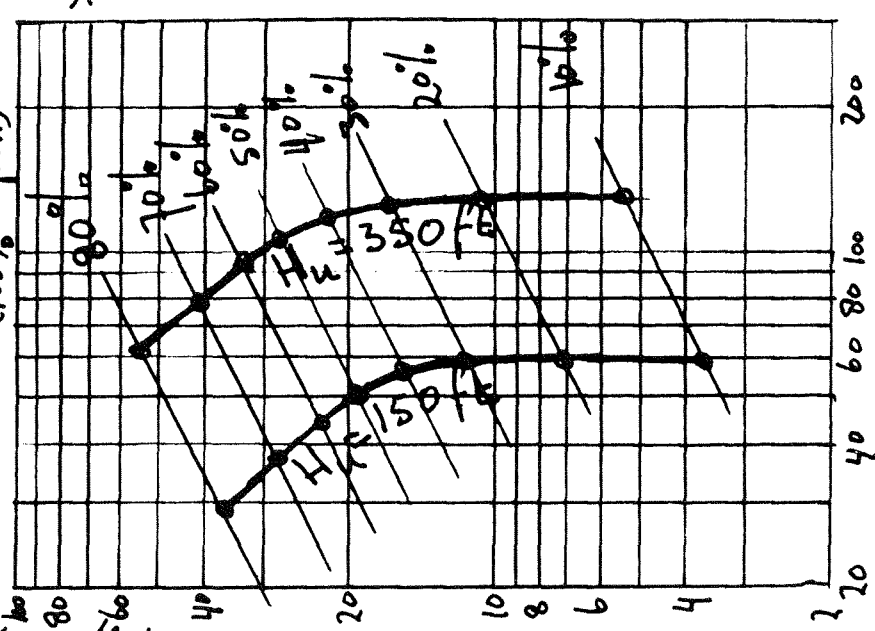


$H_u$  tov. atmosferische druk

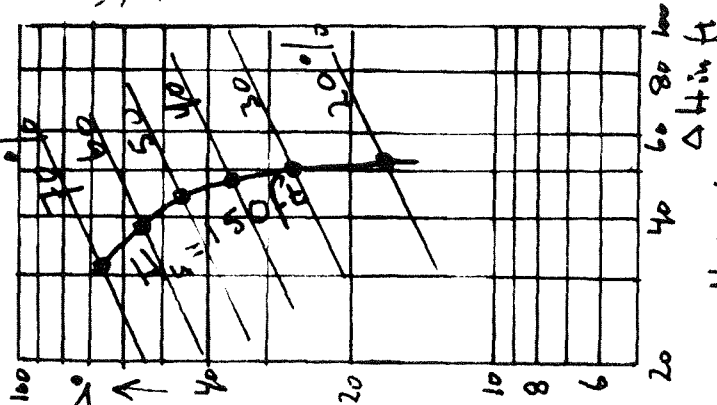
$$\Delta H = H_u - H_d$$

gemiddelde snelheid in pijp (V) in ft/sec

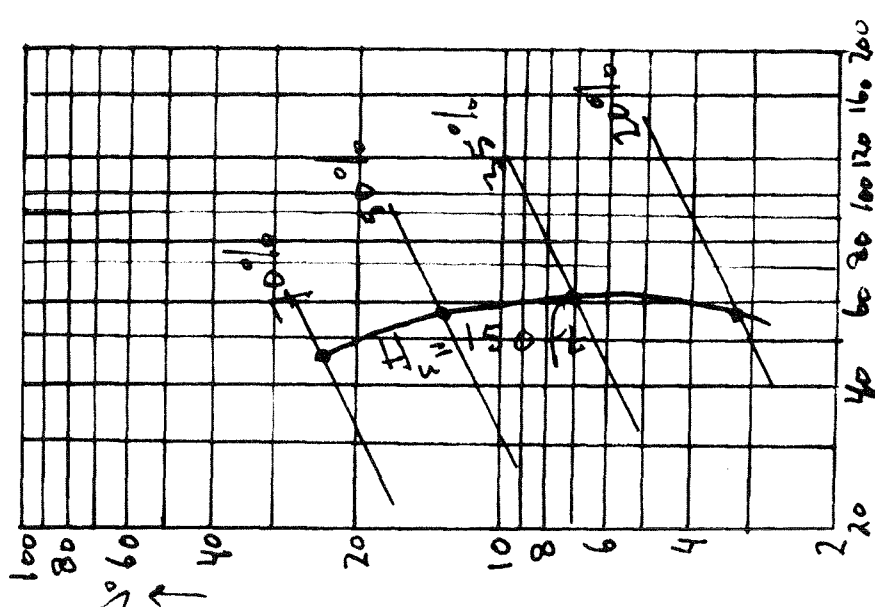
openingshoek (100% = open)



12" bolafsluiter  
24" expansie  
 $L_{exp} = 65"$



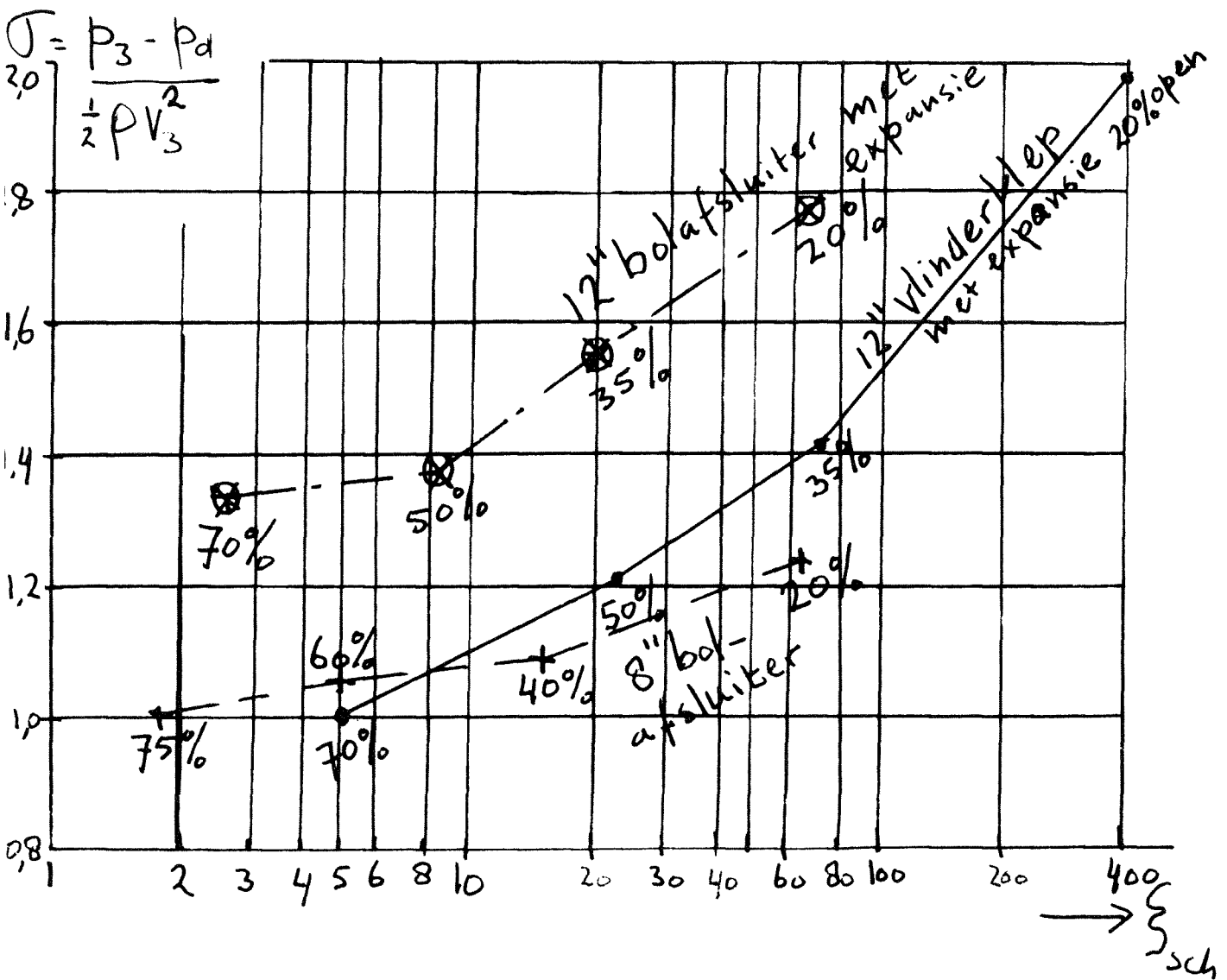
begin van cavitatie, bolafsluiter  $\phi 8"$   
geen expansie



12" vliinderklep met 24" expansie ( $L_{exp} = 65"$ )

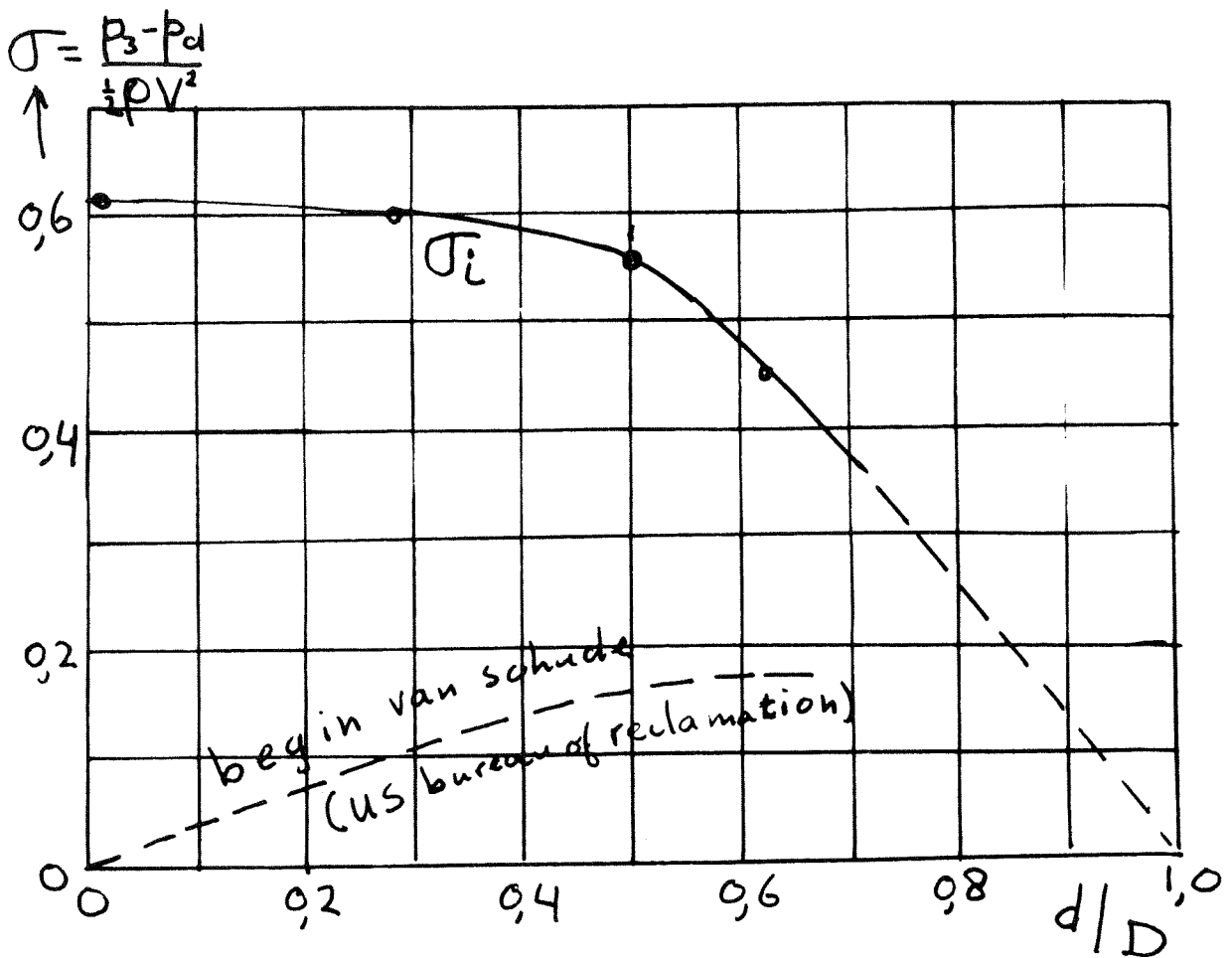
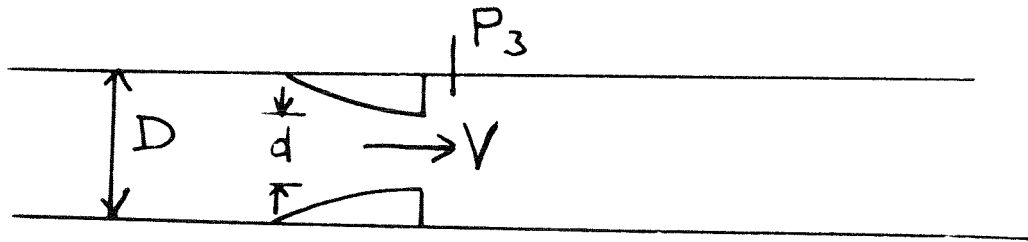
# Notitie 7 fig 6

## bewerkte resultaten fig 5



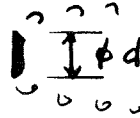
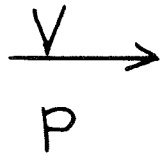
# Notitie 7 fig. 7

## cirkel-cylindrische expansie

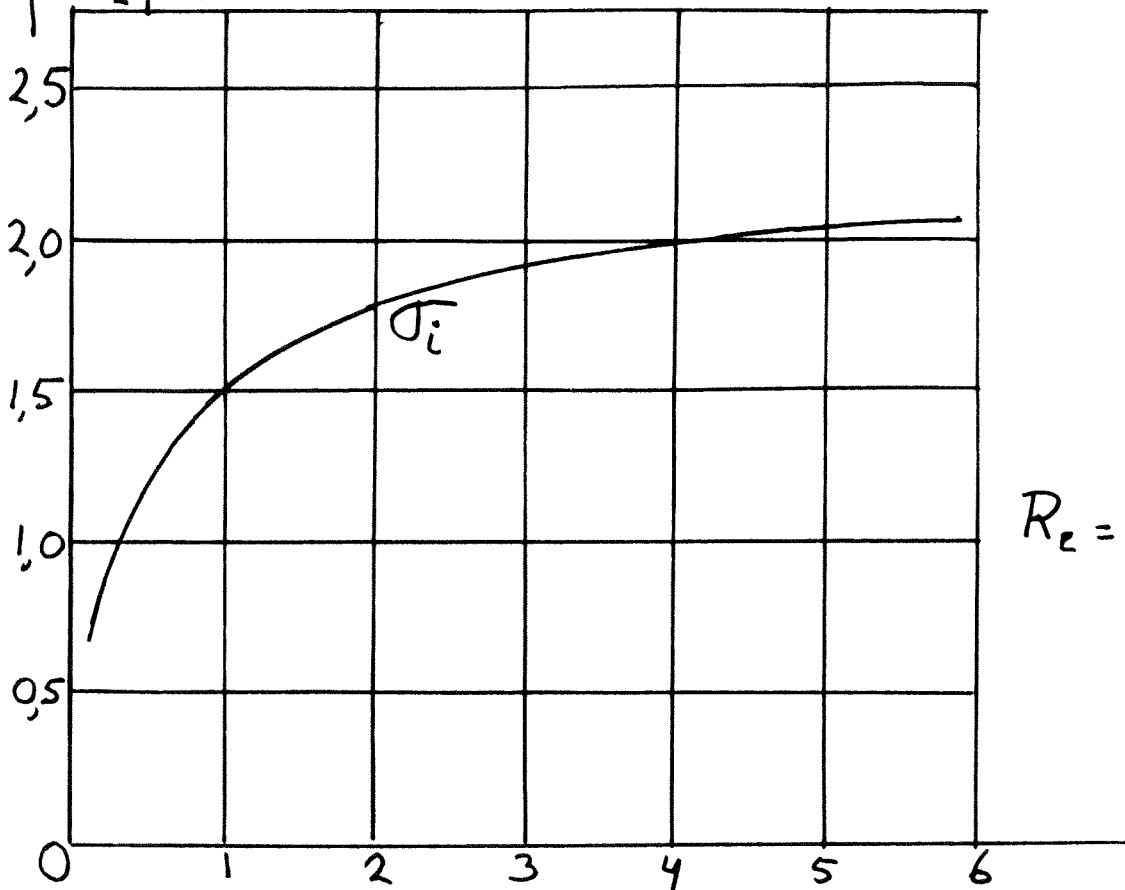


Notitie 7 fig. 8

Rond schijfje



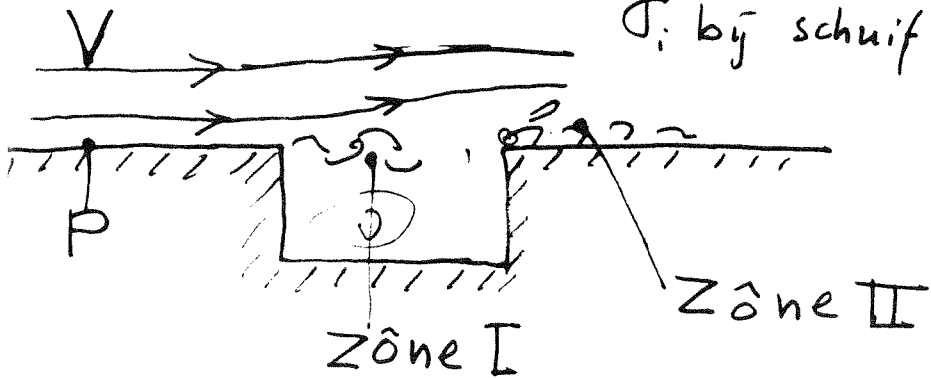
$$\sigma = \frac{P - P_d}{\frac{1}{2} \rho V^2}$$



$\rightarrow R_e \cdot 10^{-5}$

# Notitie 7 fig. 9

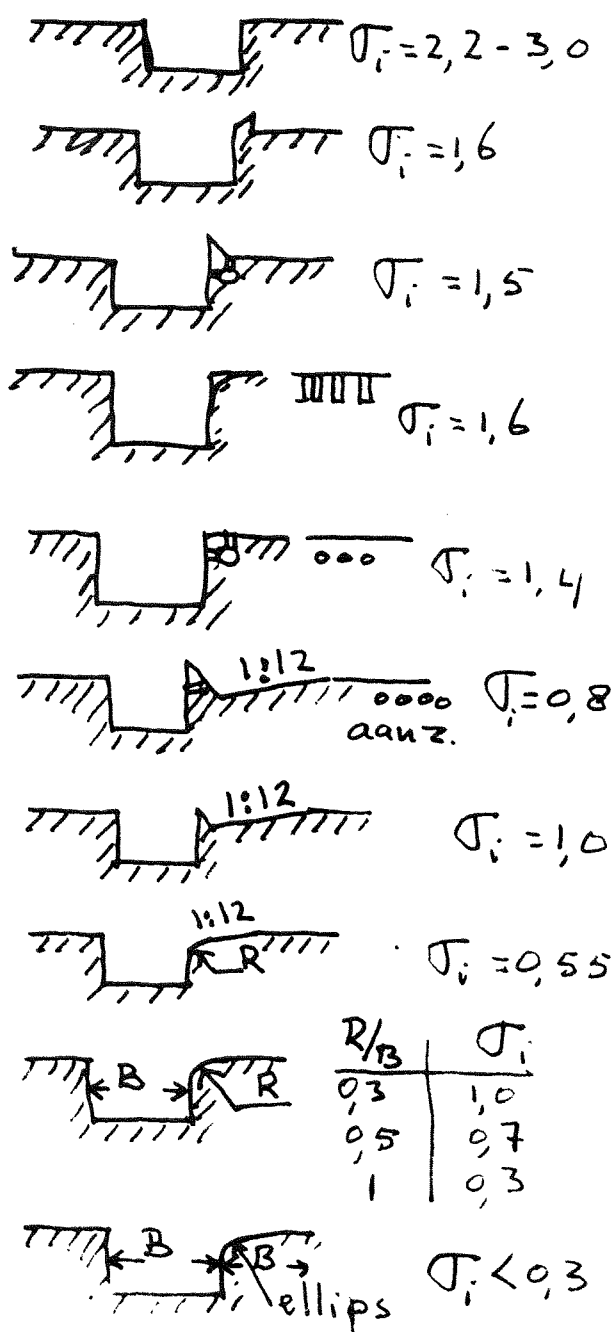
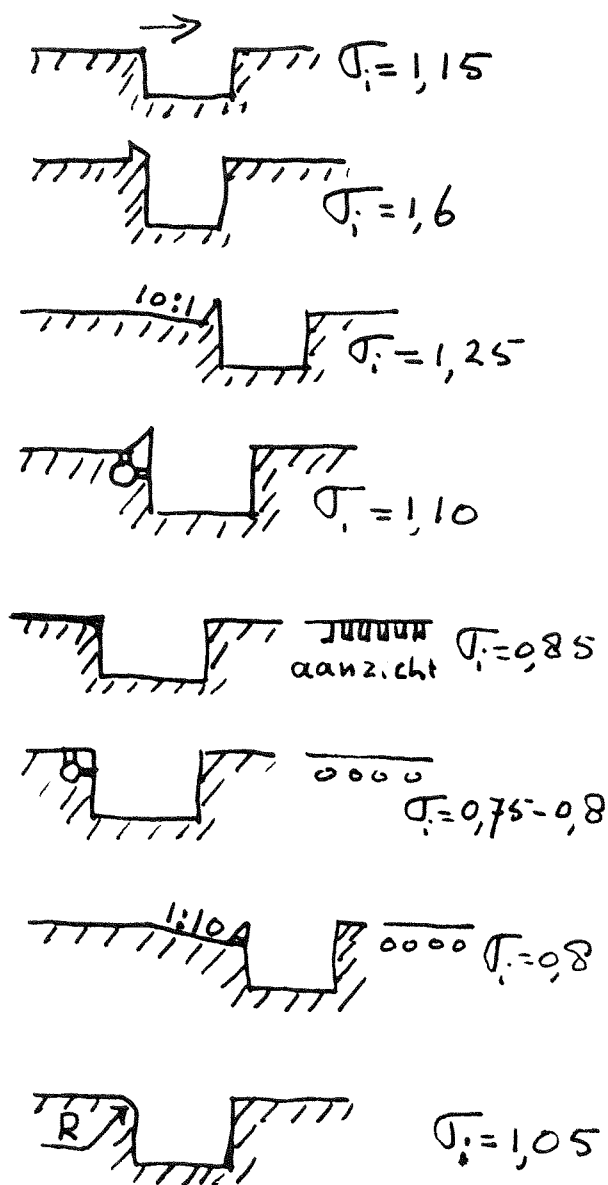
$\sigma_i$  bij schuifspanningen  
(diepte  $0,25 \text{ à } 0,5 \times$  breedte)



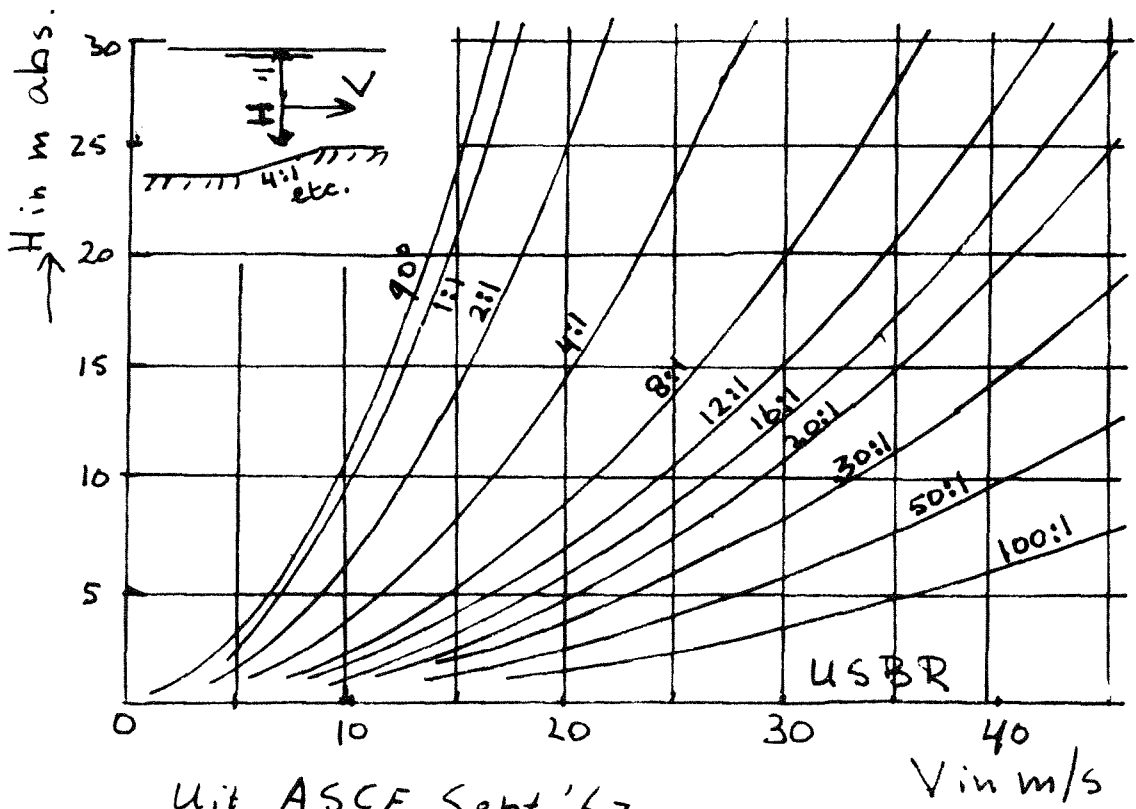
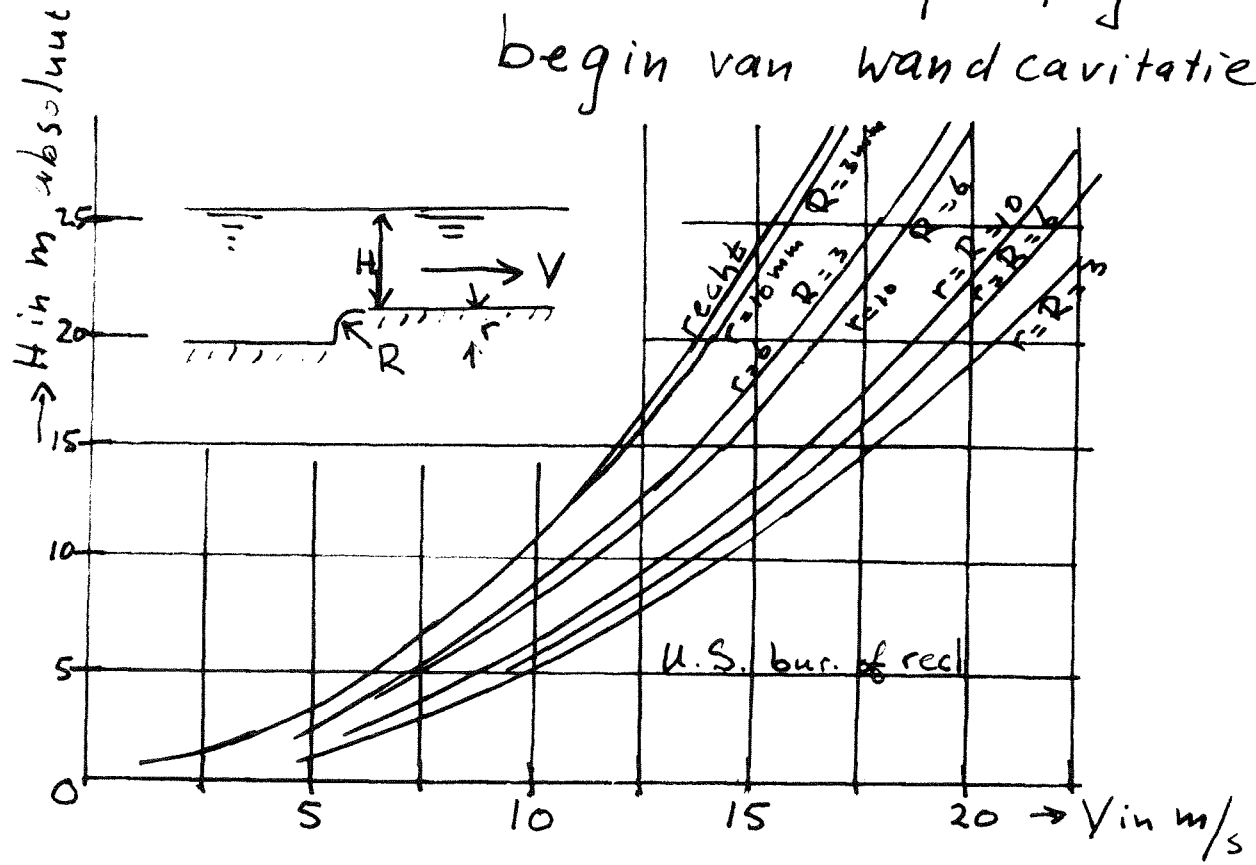
$$\sigma = \frac{P - P_d}{\frac{1}{2} \rho V^2}$$

## cavitatie zône I

## cavitatie zône II



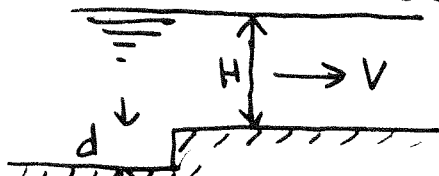
# Notitie 7 fig.10 begin van wandcavitatie



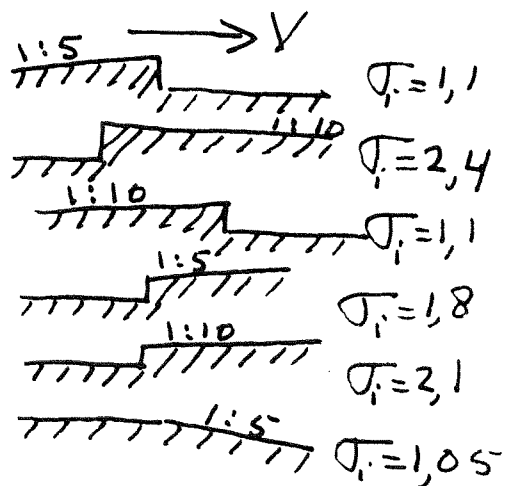
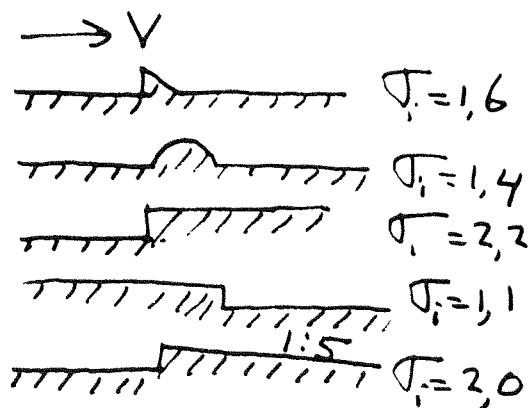
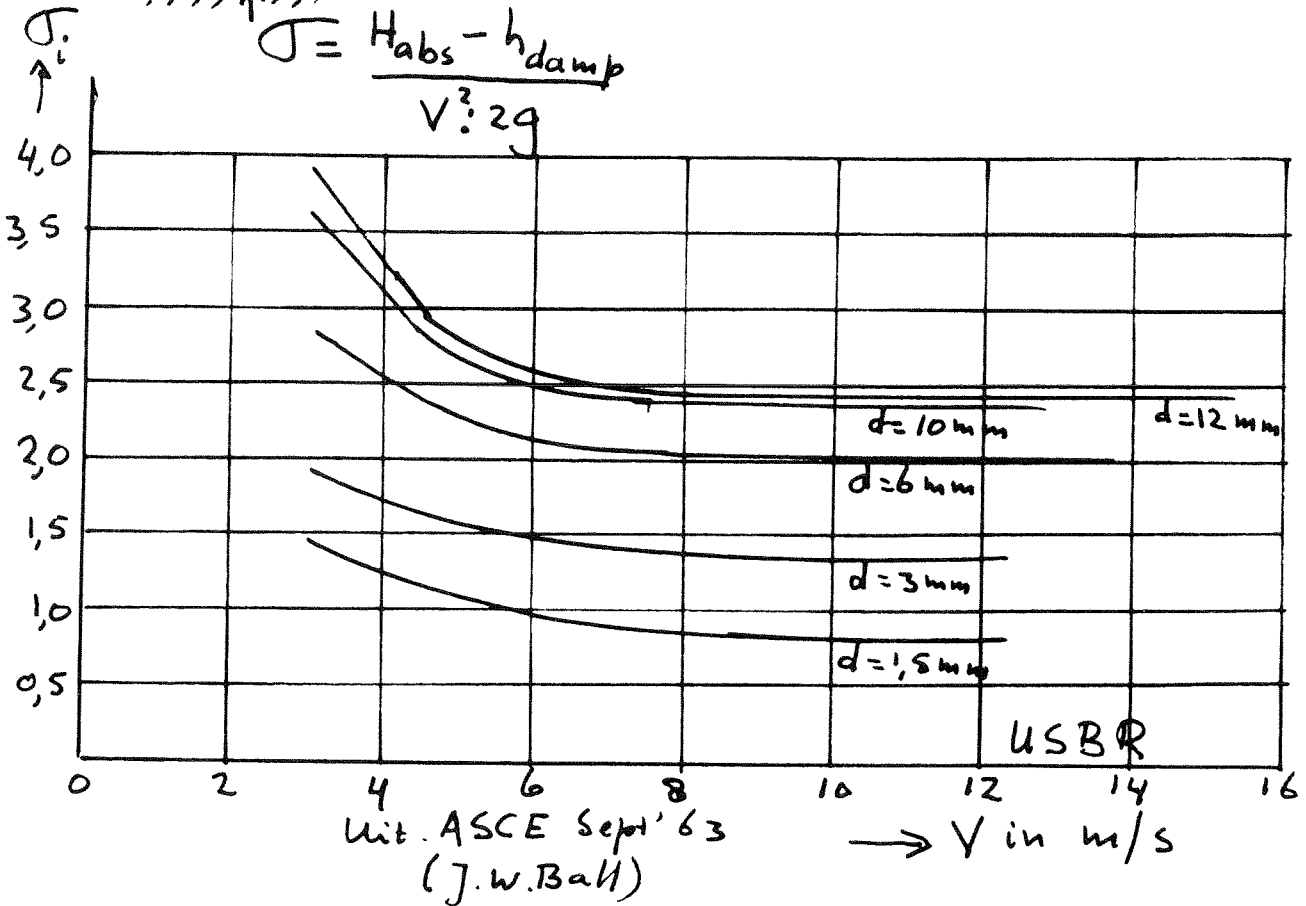
uit ASCE Sept '63  
(J.W. Ball)

# Notitie 7 fig. 11

begin wandcavitatie



$$\sigma_i = \frac{H_{abs} - h_{damp}}{V^2 \cdot 2g}$$



Wit IAHR congres '65 paper 1.33  
(Rosanov, Moys, Pashkov)

