

Wintersemester 2010/2011

Strömungsmaschinen I

Prof. Dr. Hendrik Wurm
Lehrstuhl für Strömungsmaschinen

Grundlagen der Kavitation

- lat. cavitare = aushöhlen
- Kavitation ist die teilweise Verdampfung von Flüssigkeit in einem durchströmten System

Für das Verständnis von Kavitation sind zwei physikalische Phänomene von Bedeutung:

1) Energieerhaltungssatz in der Form

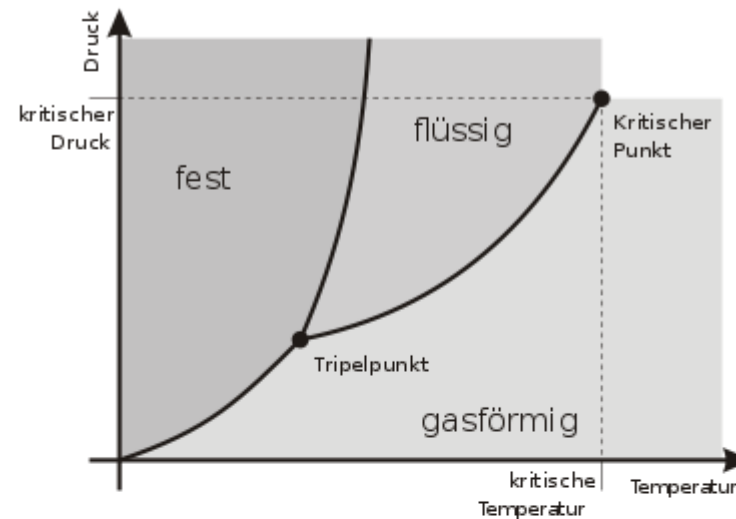
$$\frac{\rho \cdot c^2}{2} + p + \rho \cdot g \cdot h = \text{const.}$$

(Beziehung zwischen Druck und Strömungsgeschwindigkeit)

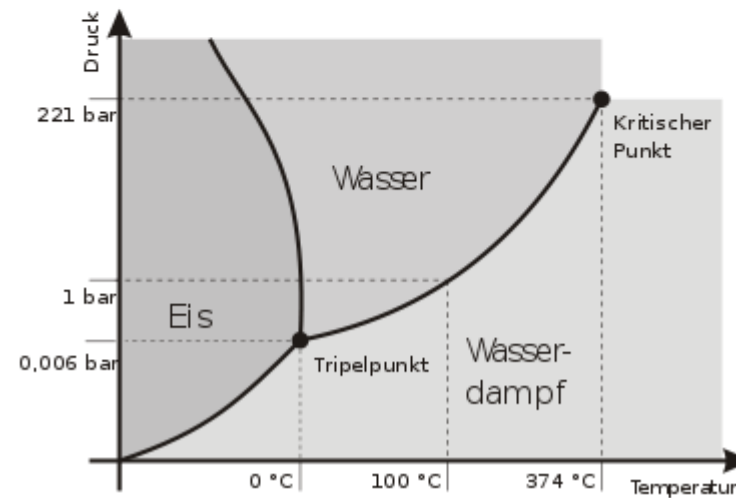
2) Abhängigkeit des Sättigungsdruckes (Dampfdruckes) von der Sättigungstemperatur

Aggregatzustand abhängig von Druck und Temperatur

Stoff ohne Anomalie

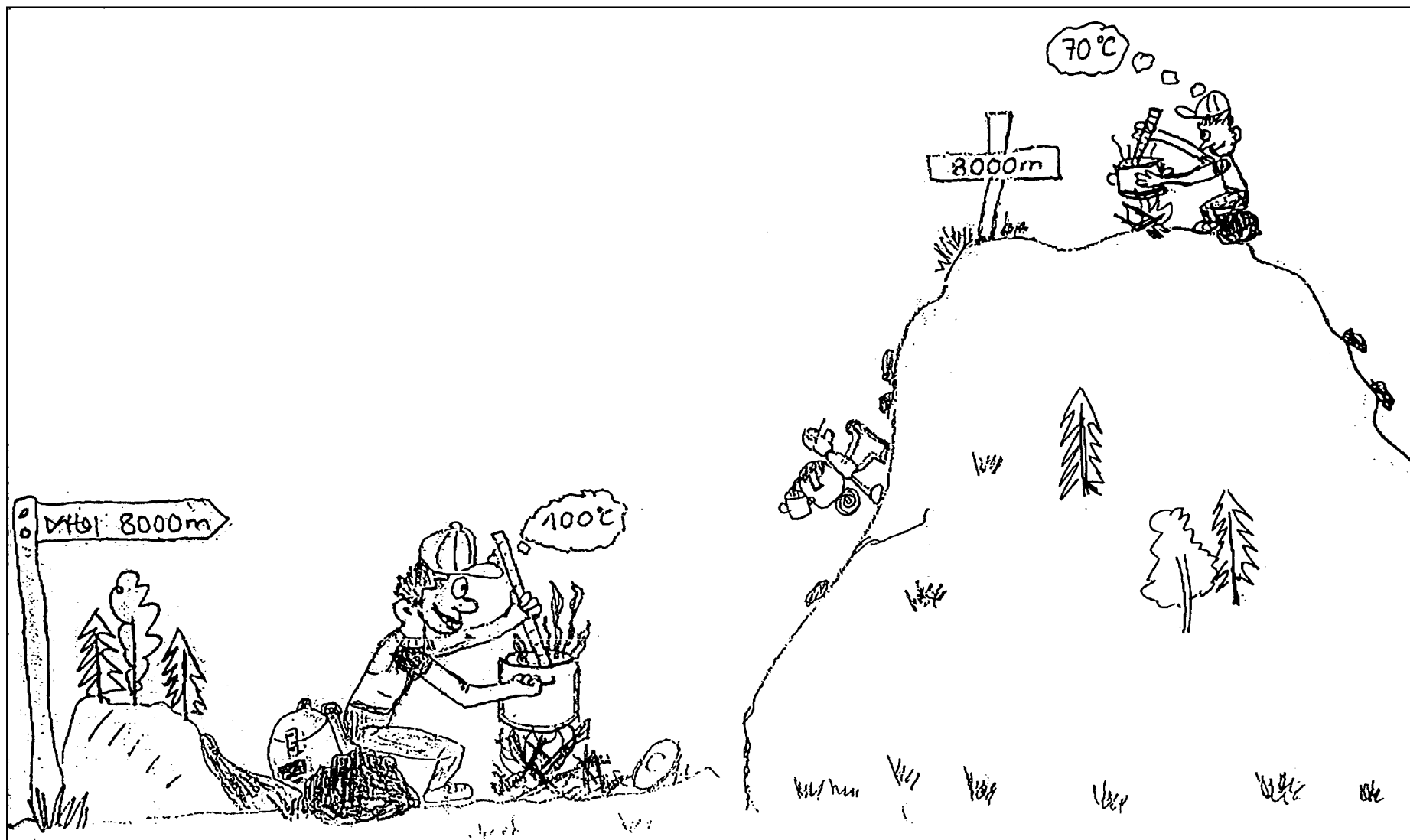


Stoff mit Anomalie (z.B. Wasser)

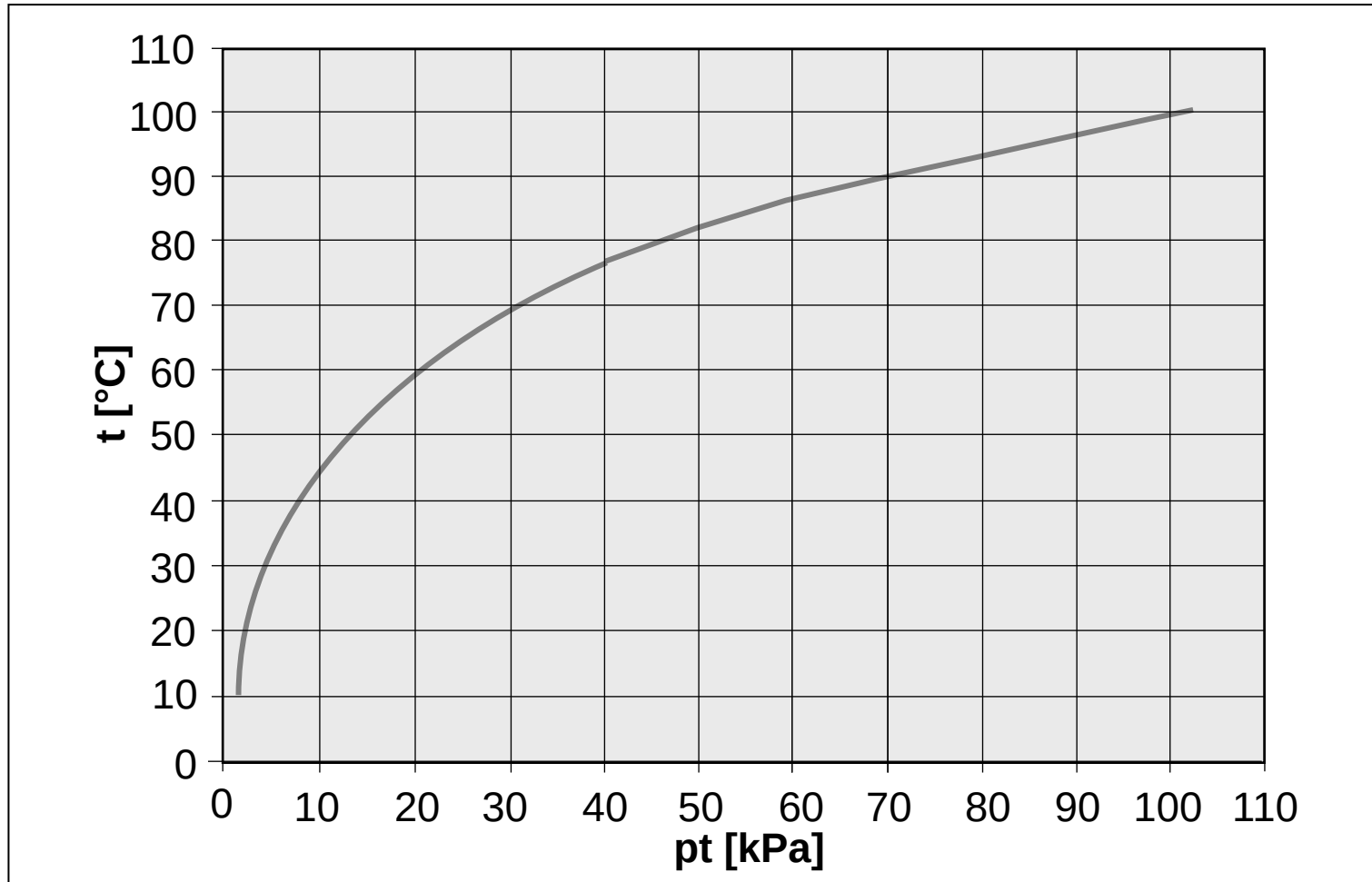


Aus WIKIPEDIA





Abhängigkeit des Dampfdruckes von der Temperatur



Das Verständnis der dargestellten Zusammenhänge erlaubt einen grundlegenden Einblick in die Mechanismen von Kavitationsvorgängen

In realen Strömungen ist die Ausbildung von Kavitation ein sehr komplizierter Vorgang, der von vielen Faktoren abhängt.

Einflußfaktoren sind z.B.:

- ▶ Wasserqualität
- ▶ Stoffeigenschaft
- ▶ Strömungsstrukturen
- ▶ Größe und Geometrie des umströmten Körpers

Beispiele für Kavitation in Maschinen und Anlagen

Kavitation ist in allen Situationen möglich, in denen eine Flüssigkeit beschleunigt wird:

- ▶ Rohre
 - Einspritzleitung bei Fahrzeugen
 - Krümmer
 - Feuerlöschleitung von Pumpen
- ▶ Armaturen
 - Ventile
 - Schieber
- ▶ Turbomaschinen (Pumpen, Turbinen, Propeller)

Effekte:

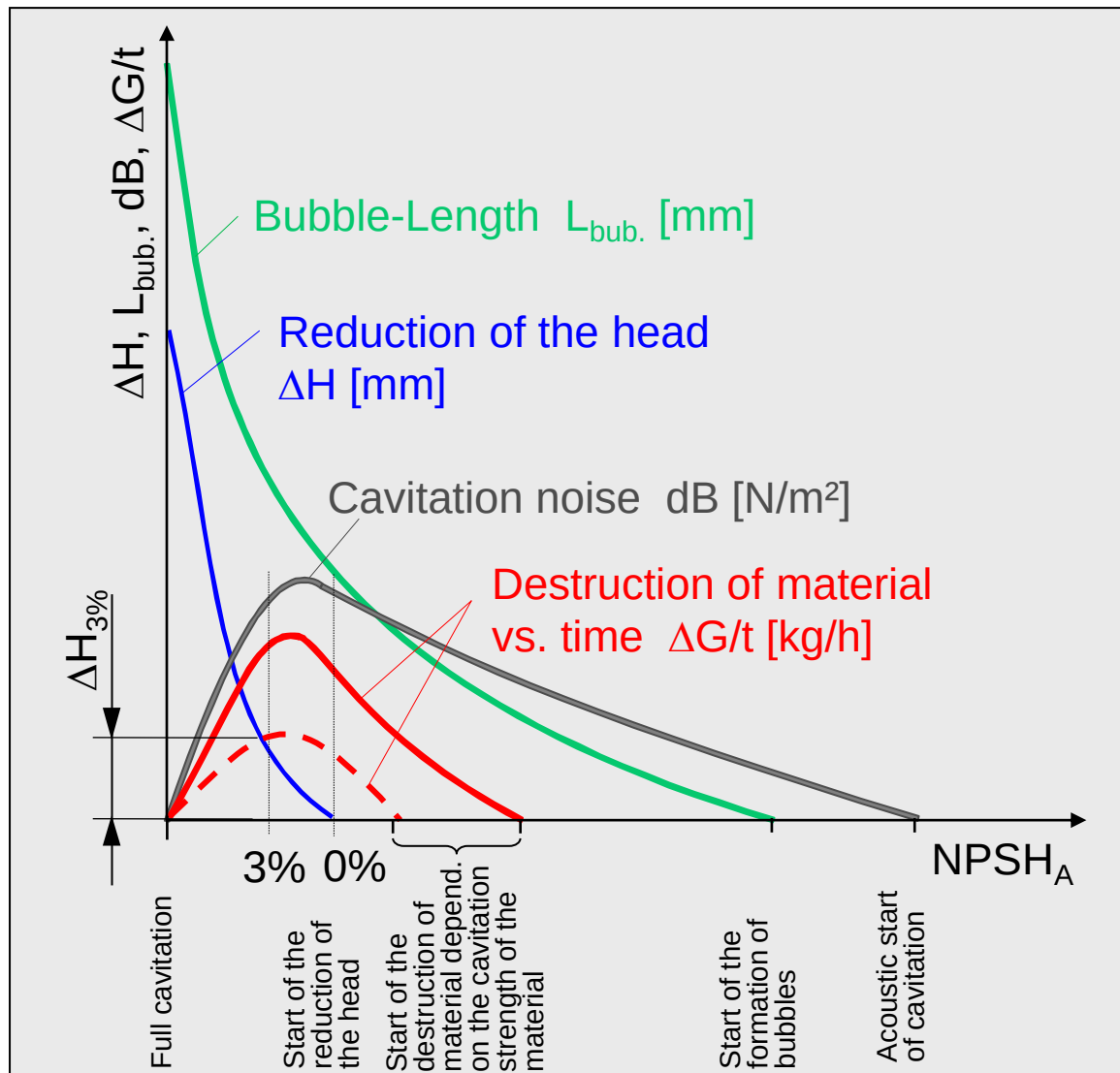
- ▶ Geräusche
- ▶ Zerstörung des Materials
- ▶ Störung der Funktion von Maschinen und Ventilen

- Kavitationszahl: $\sigma = \frac{p - p_D}{\frac{1}{2} \rho c^2}$ $\sigma \leq 0$ Kavitation

- NPSH (net positive suction head, Haltedruckhöhe):

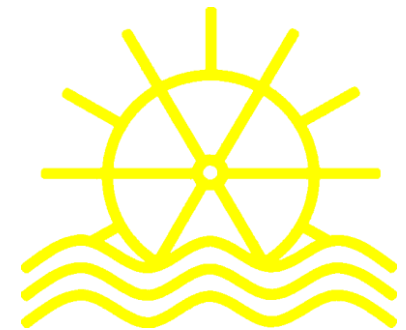
$$\text{NPSH} = \frac{p - p_D}{\rho \cdot g} + \frac{c^2}{2g}$$

- $NPSH_A$... Wert, der in der Anlage durch den Systemdruck zur Verfügung steht
- $NPSH_r$... Wert, den das Laufrad „benötigt“, um kavitationsfrei zu arbeiten
- $NPSH_i$... visueller Kavitationsbeginn
- $NPSH_3$... 3% Abfall von Förderhöhe bzw. Wirkungsgrad
- $NPSH_{vk}$... Vollkavitation, weitgehend Zweiphasenströmung im Laufrad
- definierte Maße von
 - Materialabtrag
 - Geräuschemission
 - Lebensdauer



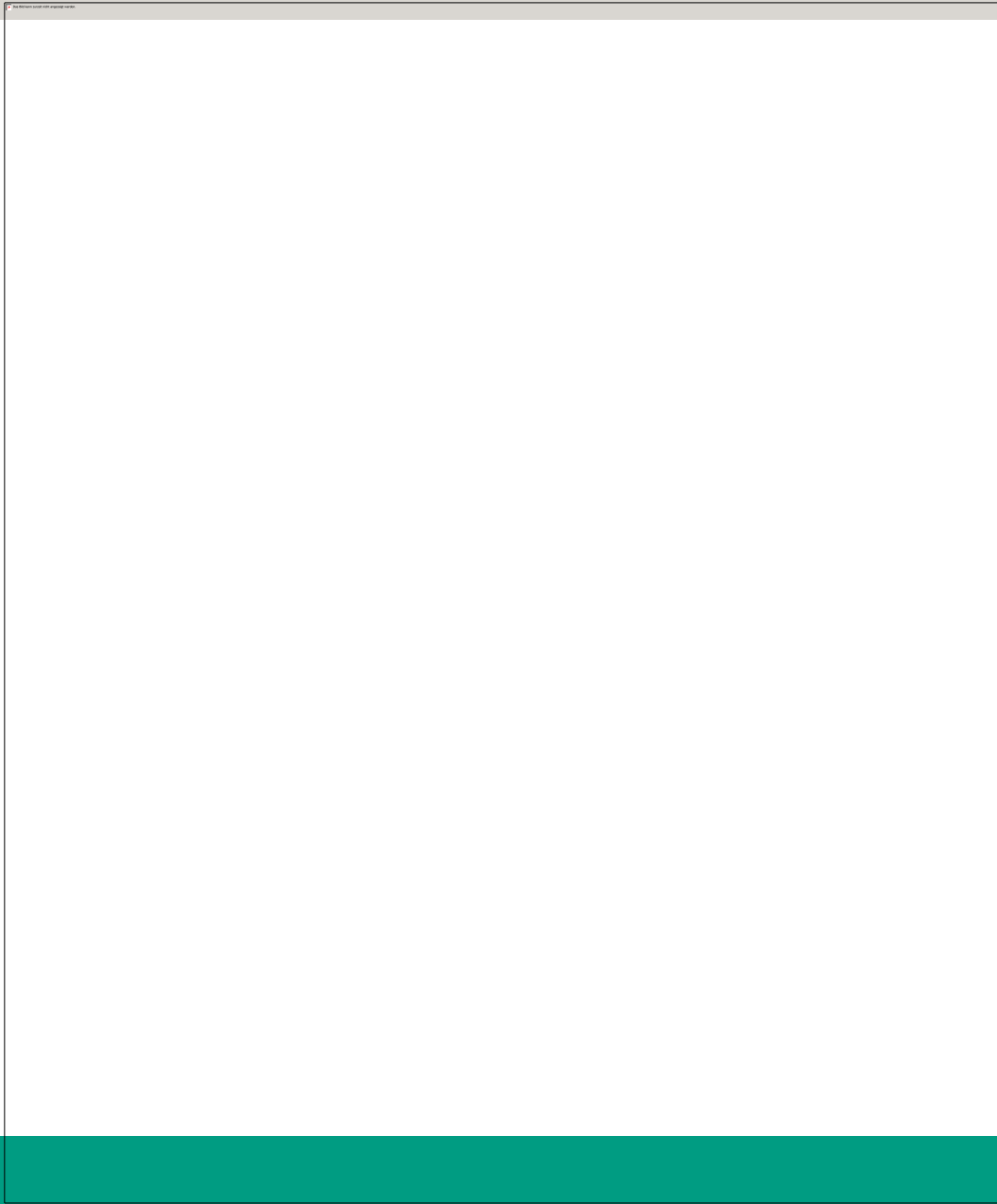
Betriebsverhalten einer Kreiselpumpe als Funktion von $NPSH_A$ bei konstanter Drehzahl und konstantem Förderstrom (nach Florjanic, D.; Gülich, J. und Wesche.: „Beurteilungskriterien für die Wahl des Zulaufdruckes von Kreiselpumpen“. 3R International, 27 [1988], Heft 7, S. 502/509)

entnommen aus Pfeiderer, C.; Petermann, H.: „Strömungsmaschinen“, 6. Auflage

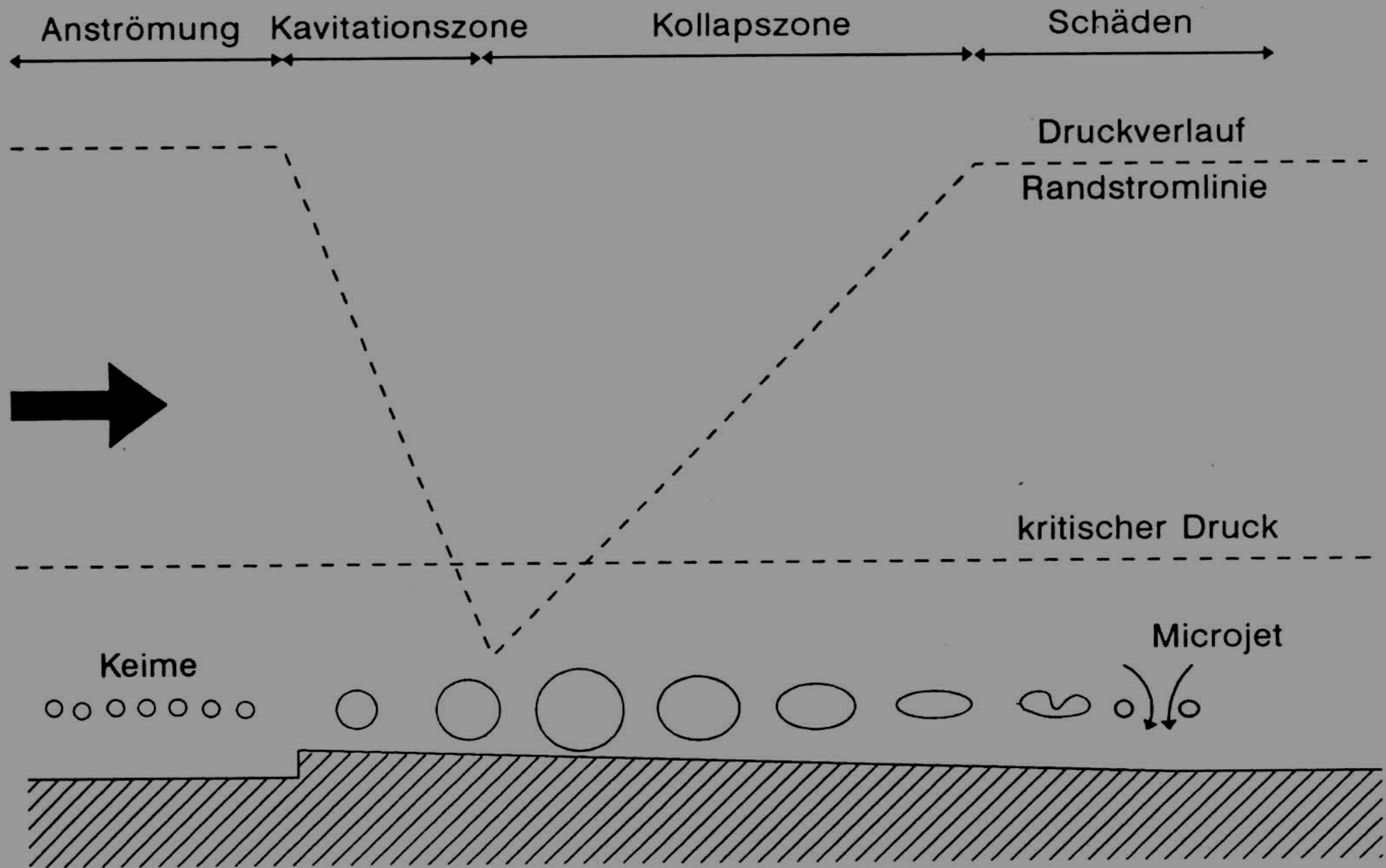


Einführung

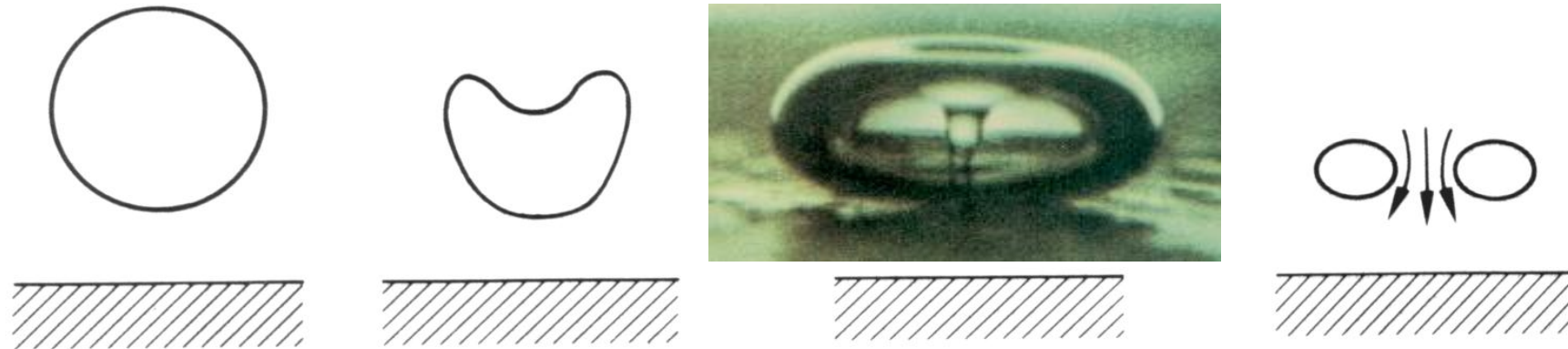


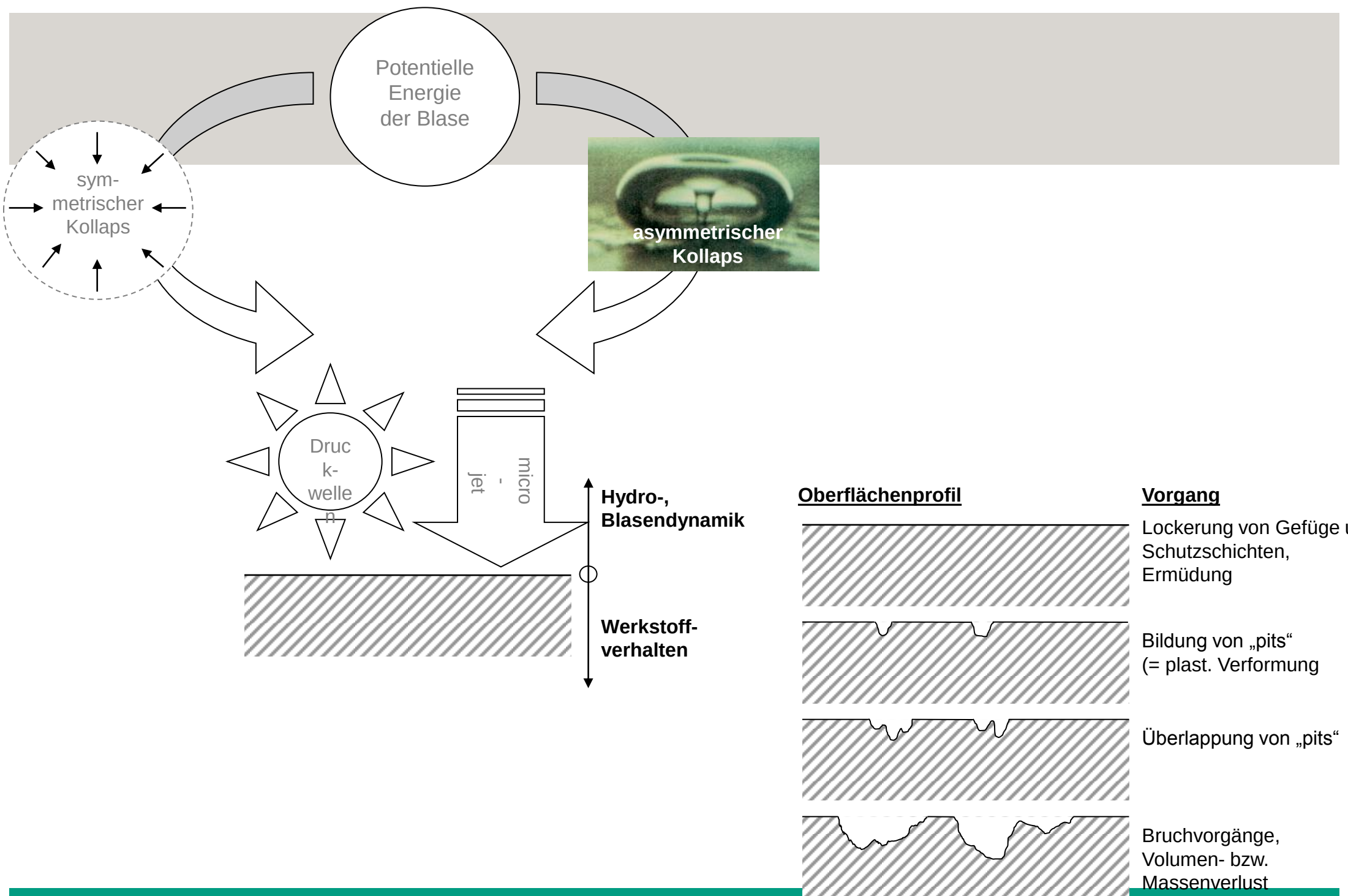






Schadensmechanismus

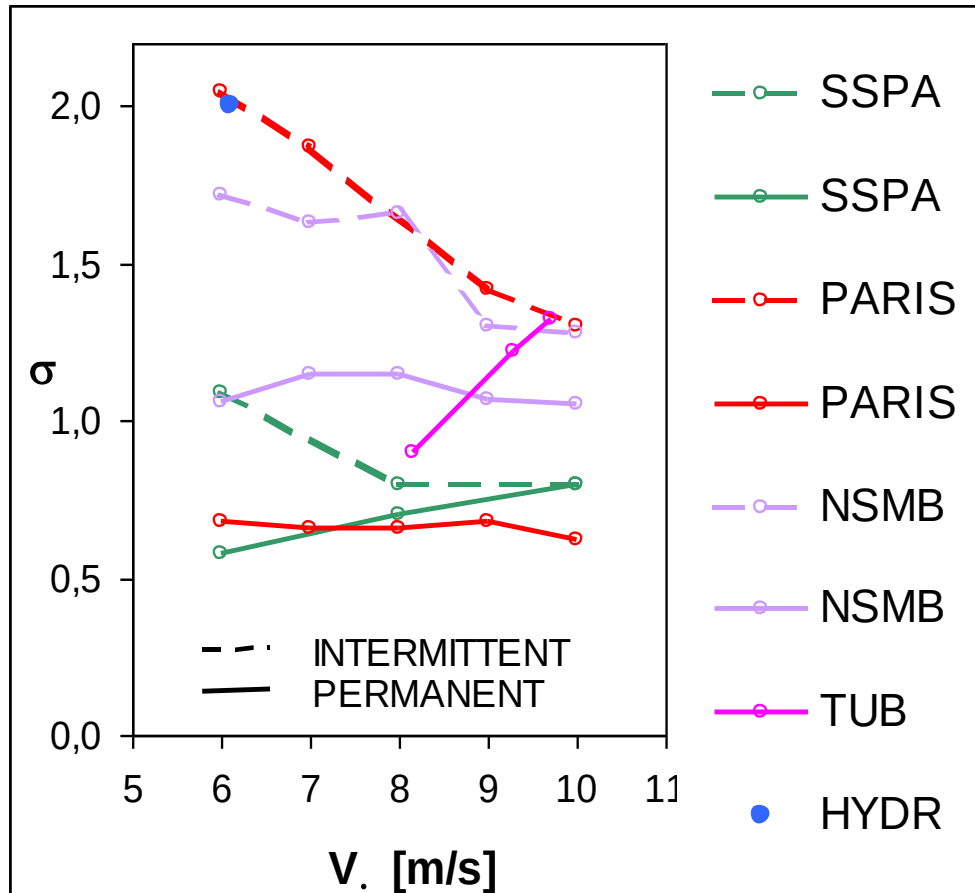




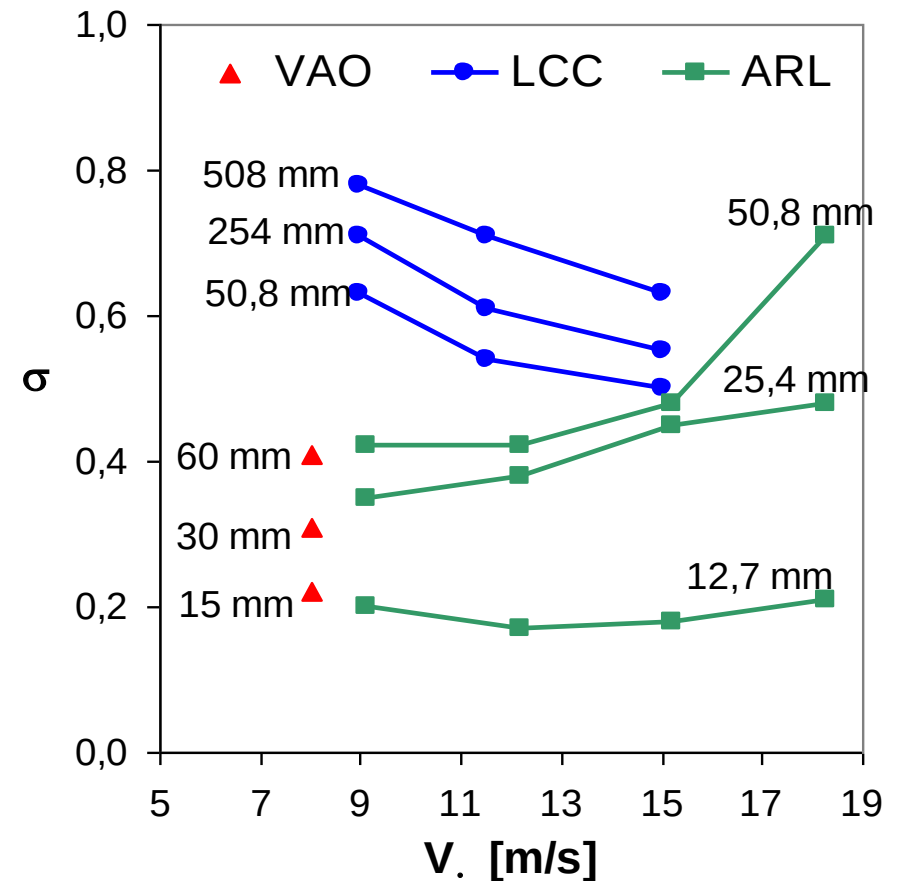
Topics of the lecture

1. Introduction
2. The Dilemma of Incomparability of Test Results – i.e. the Classical Cavitation Index and Water Quality Effects
3. The Empirically Found Hydrodynamic Scale Effects
4. Cavitation Number and its Correlation with Hydrodynamic Parameters like Reynolds Number, Lift and Drag
5. Summary

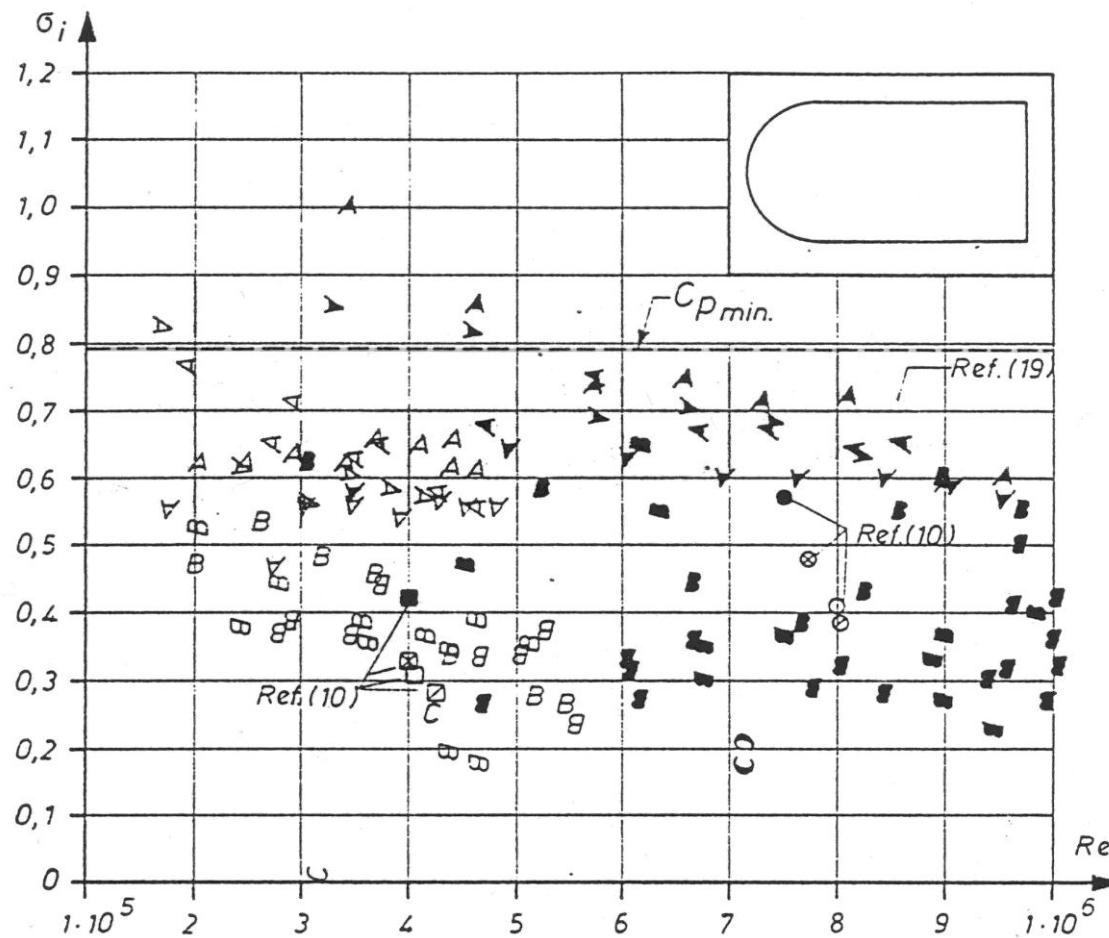
Classical Cavitation Index



TIP VORTEX CAV. INCEPTION

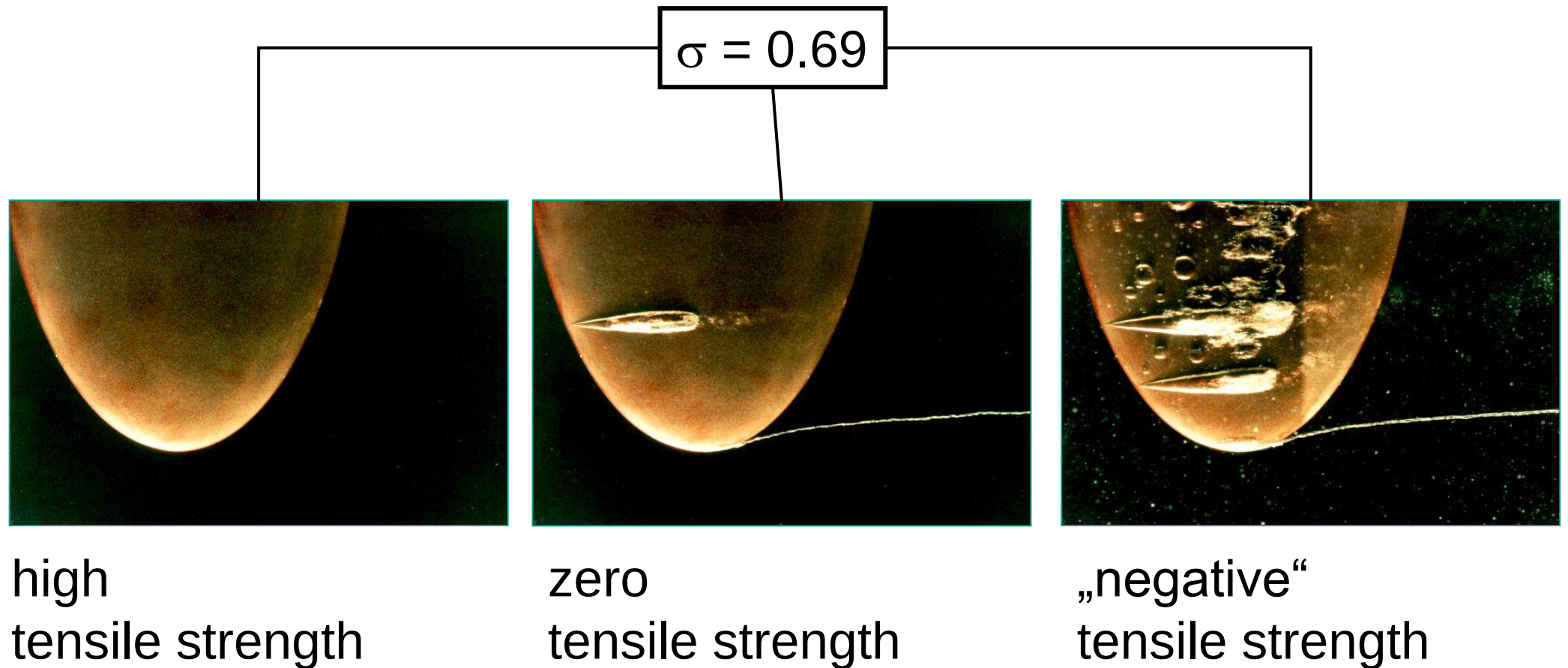


SCHIEBE BODY, CAV. INCEPTION

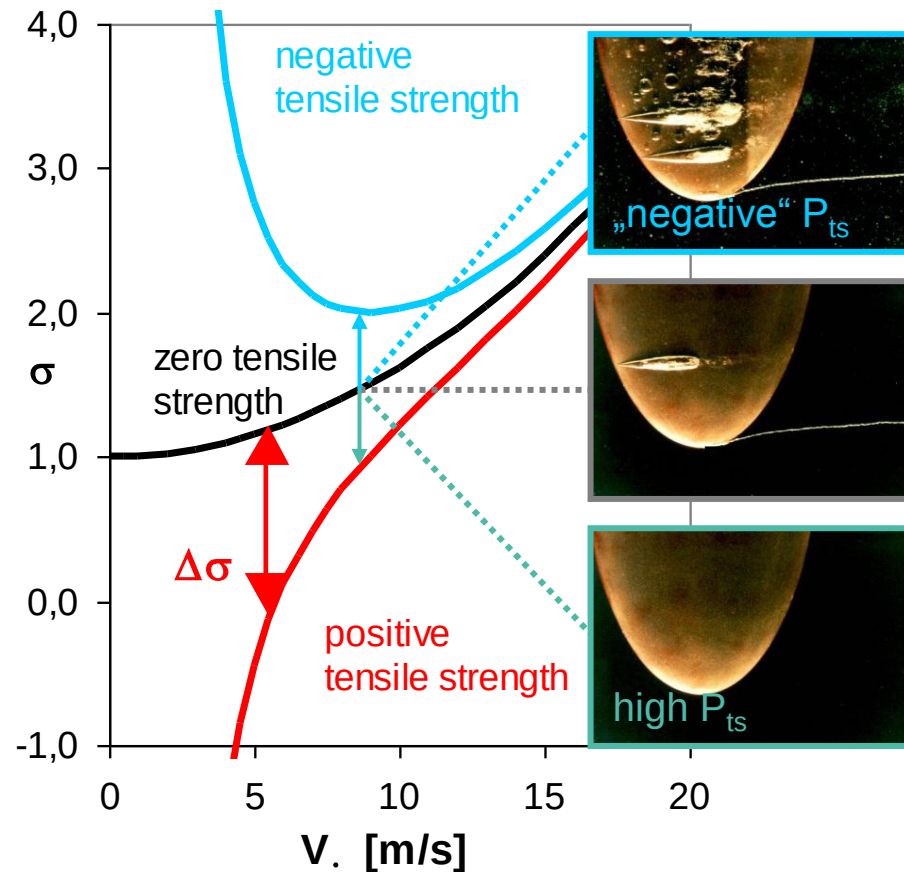


Kavitationszahl σ_i für beginnende Kavitation
an einer halbkugeligen Körperform,
für verschiedene Testprozeduren

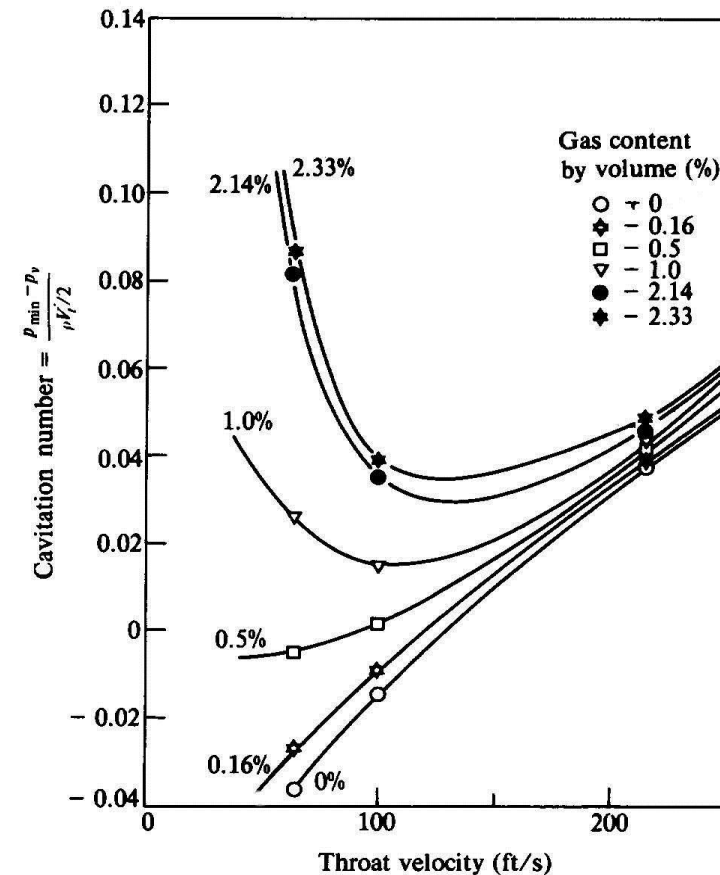
Water Quality Effects



Water Quality Effects



$$\sigma'_i = \frac{P_\infty - P_{crit}}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2} = \frac{P_\infty - P_V + P_{ts}}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2} = \sigma_i + \Delta\sigma_{ts}$$



$$\Delta\sigma_{ts} = \frac{P_{ts}}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2}$$

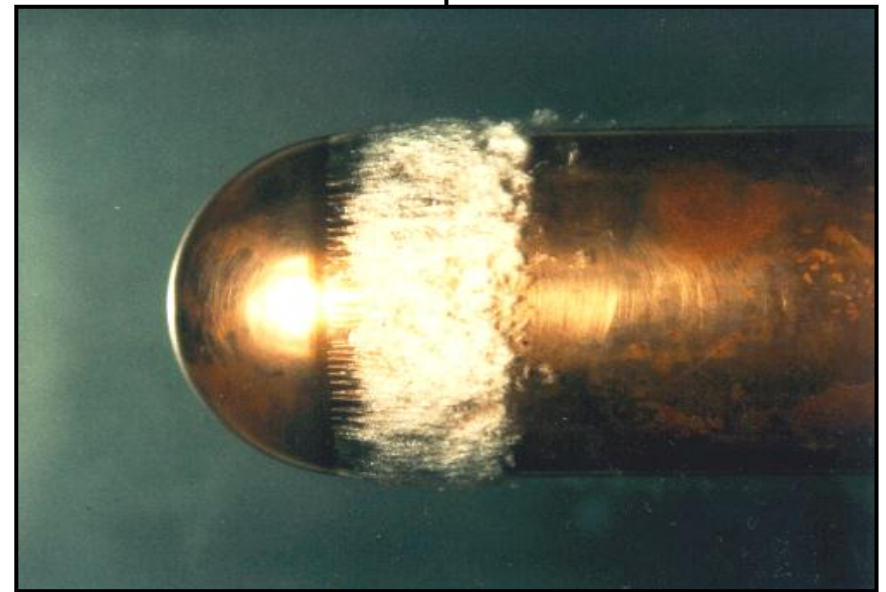
The Empirically Found Hydrodynamic Scale Effects ; Dr. Keller TU München

Visual Appearance of Velocity Scale Effect

$$\sigma = 0.80$$

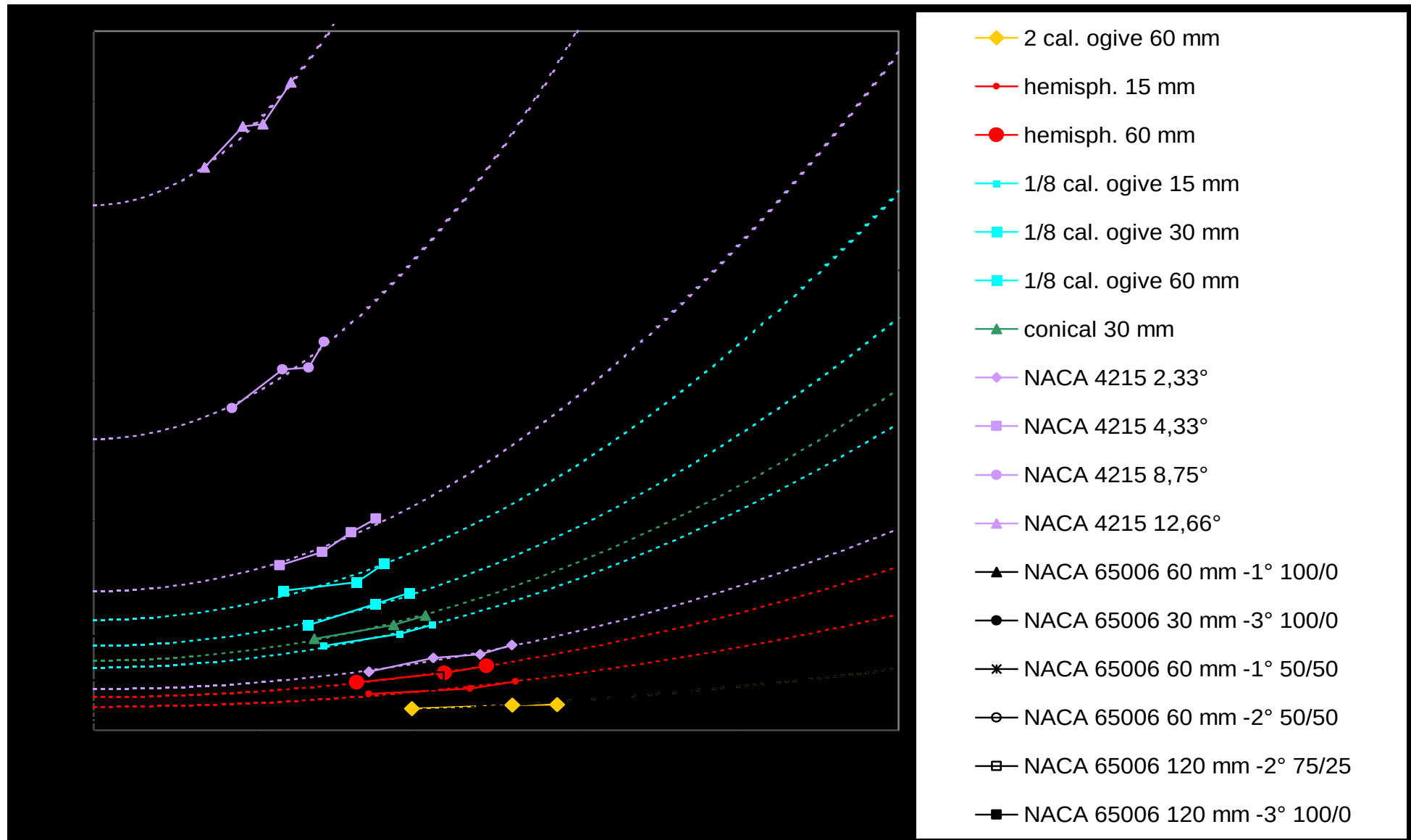


$$V_{\infty} = 8.0 \text{ m/s}$$

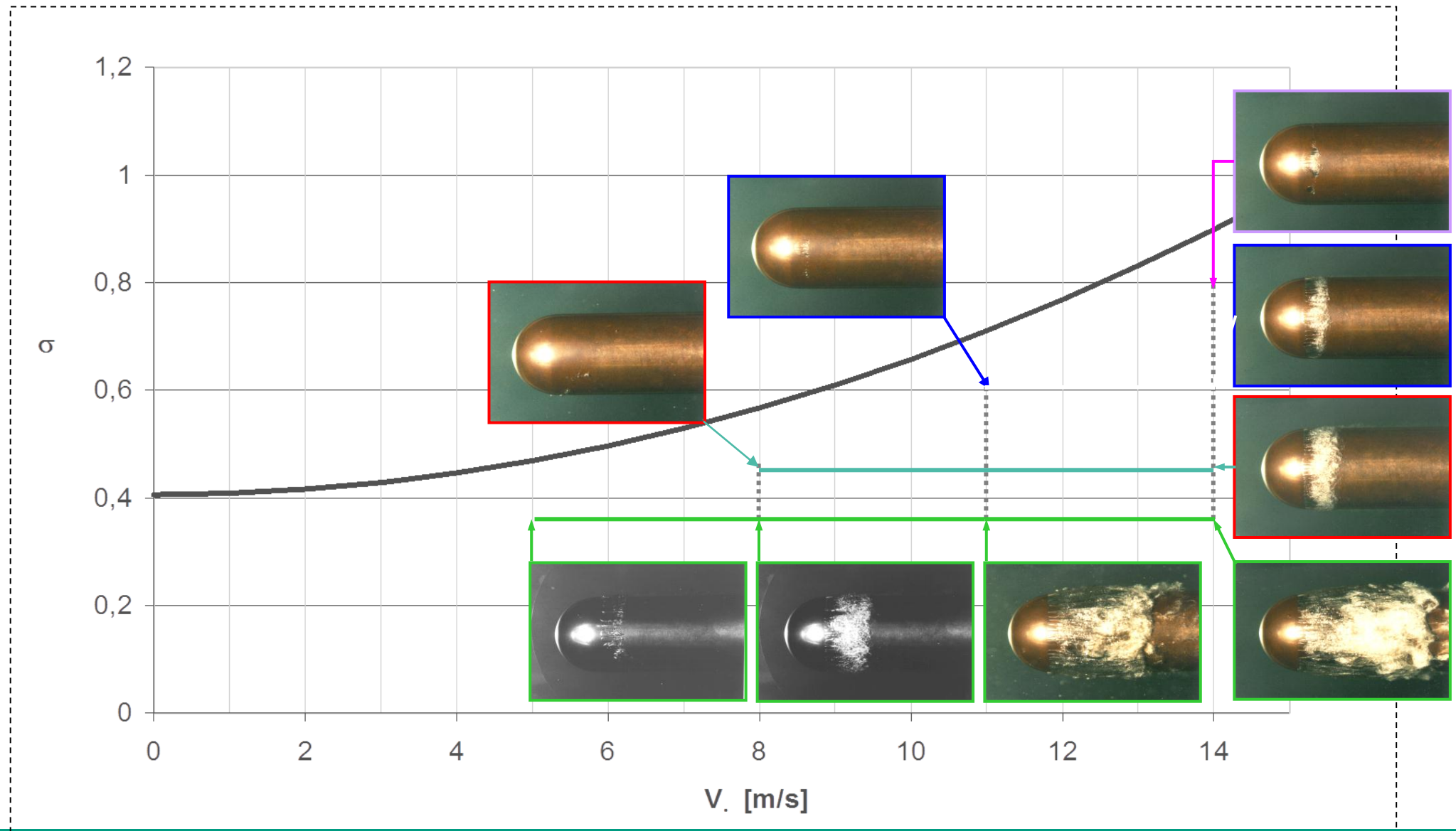


$$V_{\infty} = 14.0 \text{ m/s}$$

Empirical Relation for Velocity Scale Effect

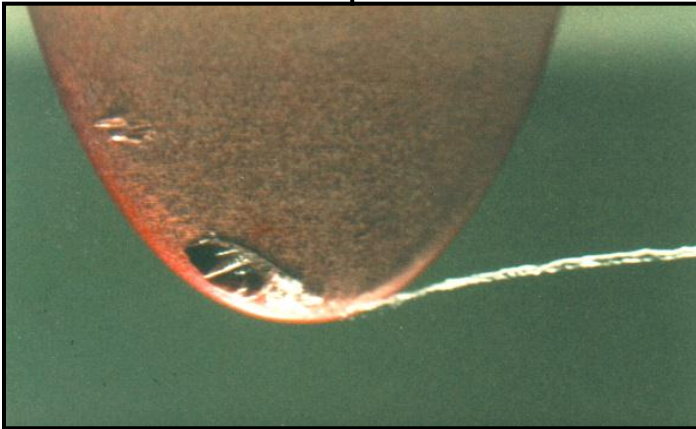


Visual Appearance of Velocity Scale Effect

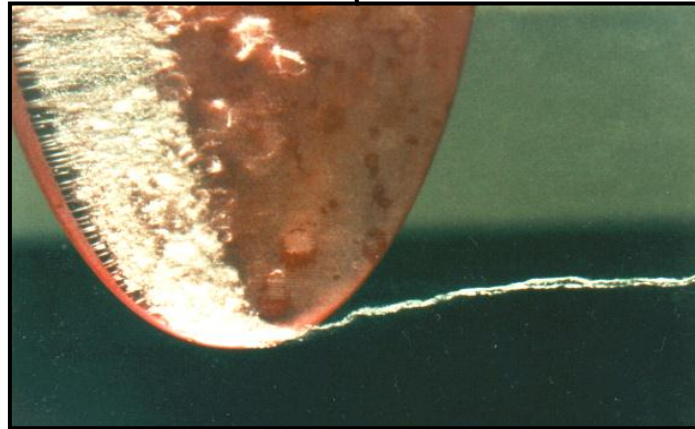


Visual Appearance of Size Scale Effect

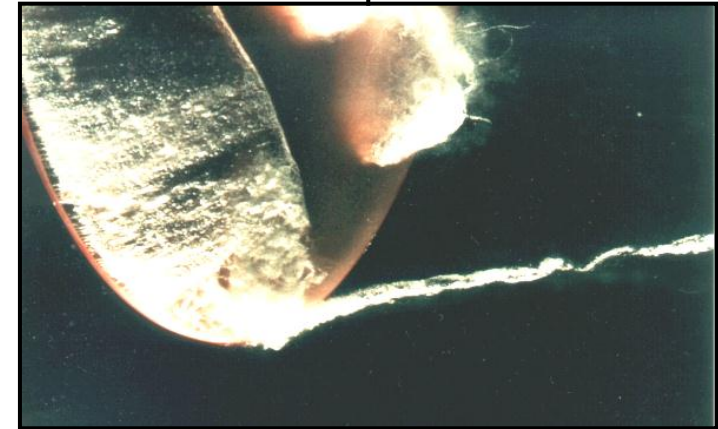
$$\sigma = 2.18, V_{\infty} = 11.0 \text{ m/s}$$



max. chord length
50 mm

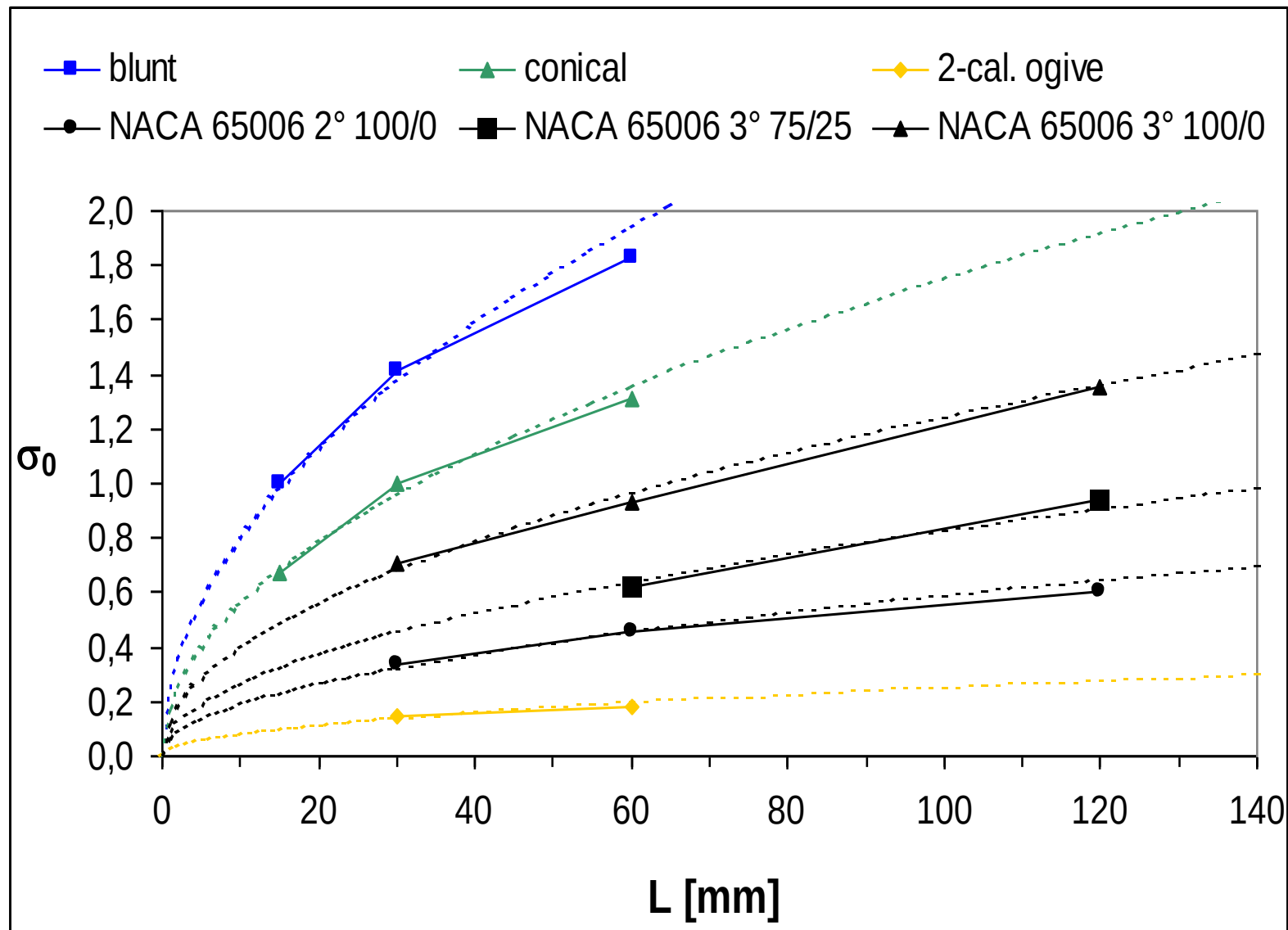


max. chord length
100 mm



max. chord length
200 mm

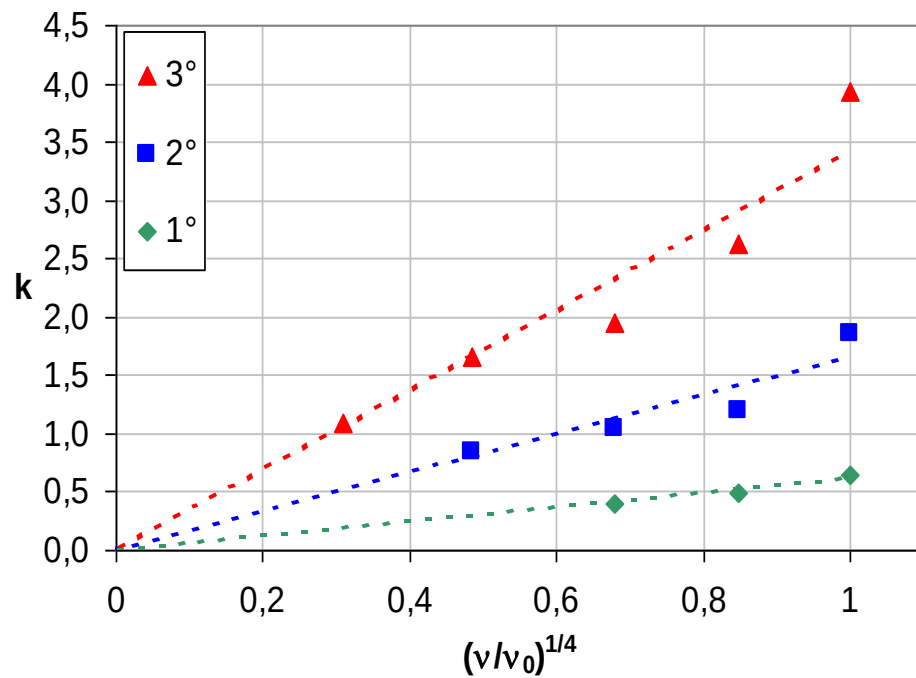
Empirical Relation for Size Scale Effect



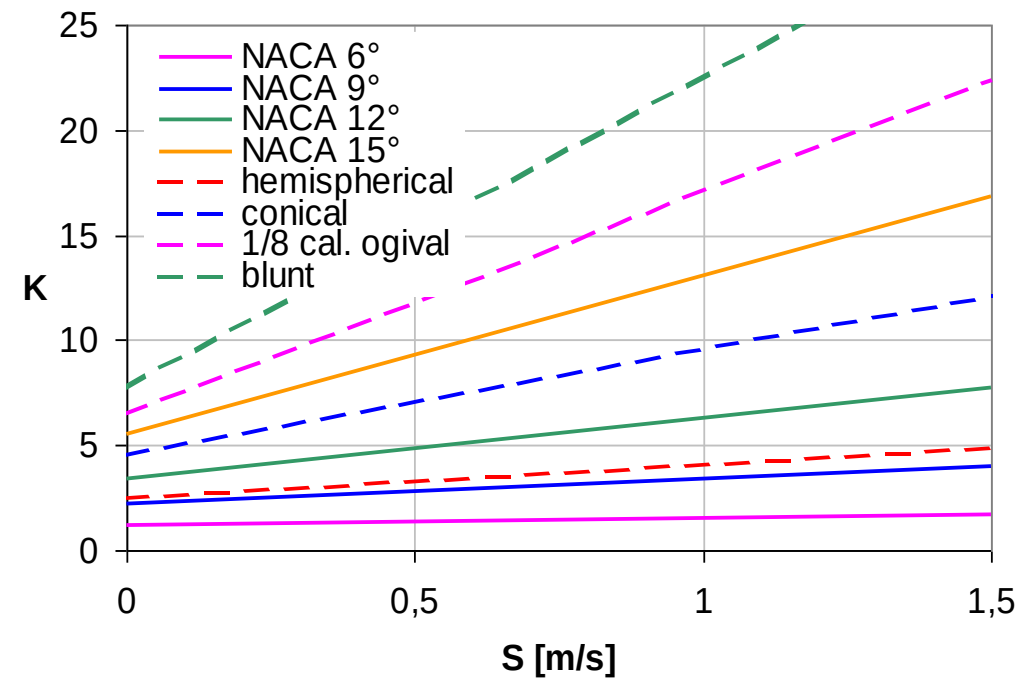
$$\sigma_0 = k \left(\frac{L}{L_0} \right)^{1/2}$$

Empirical Relation for Viscosity and Turbulence Scale Effect

Viscosity



Turbulence



$$k = K \left(\frac{\nu_0}{\nu} \right)^{1/4}$$

$$K = K_0 \left(1 + K_0 \frac{S}{S_0} \right)$$

The overall scaling relation

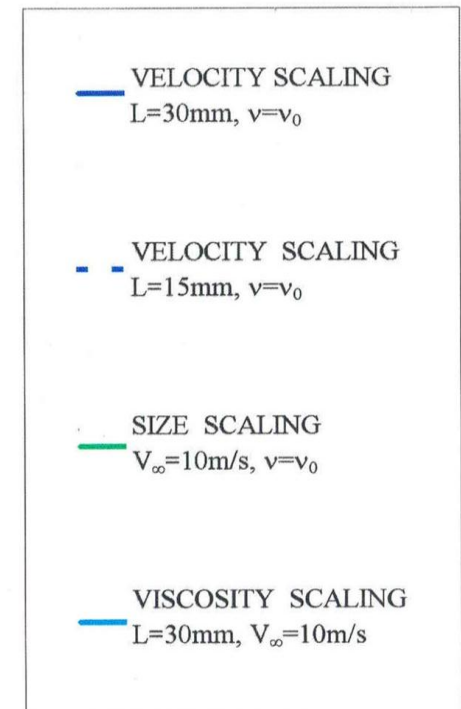
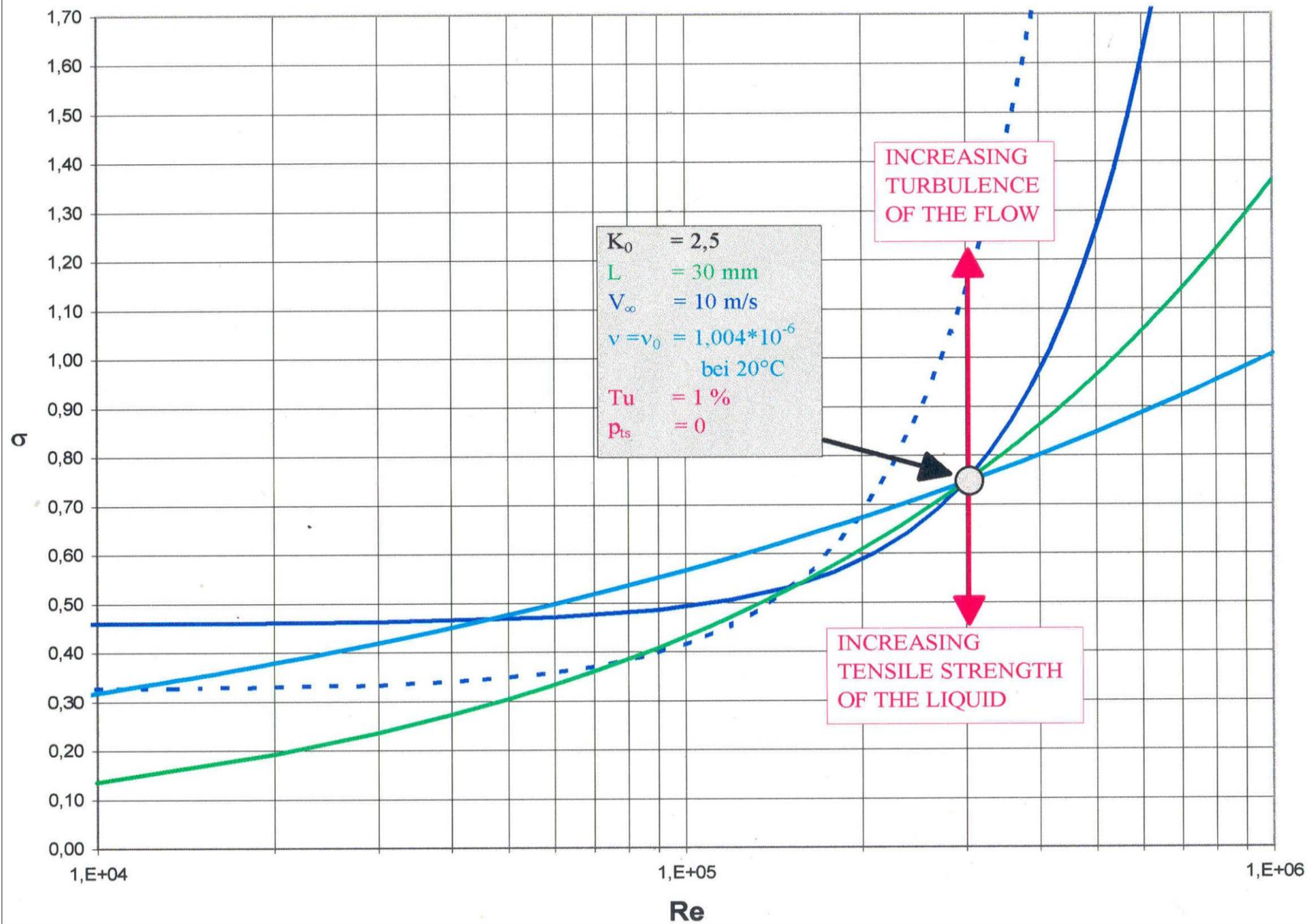
$$\sigma_i = \sigma_0 \left[1 + \left(\frac{V_\infty}{V_0} \right)^2 \right]$$

$$\sigma_0 = k \left(\frac{L}{L_0} \right)^n$$

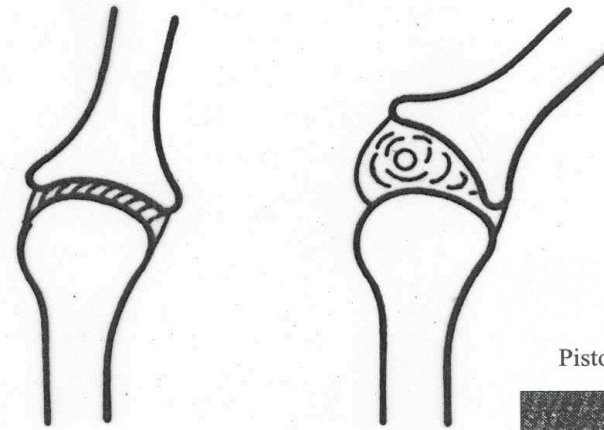
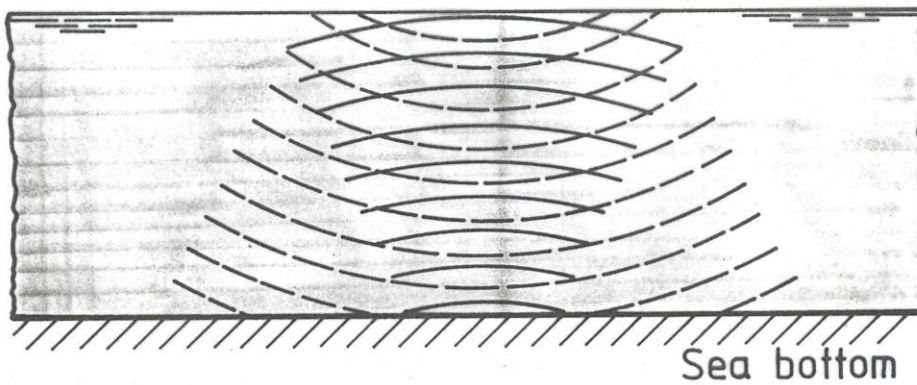
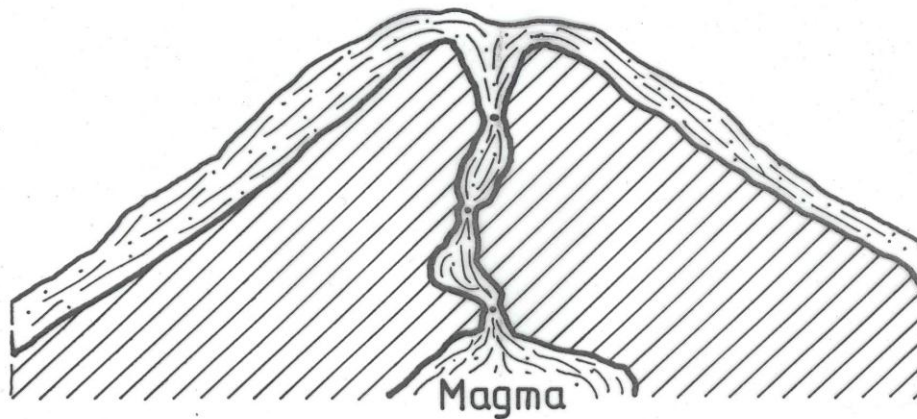
$$k = K \left(\frac{\nu_0}{\nu} \right)^{1/4}$$

$$K = K_0 \left(1 + K_0 \frac{S}{S_0} \right)$$

$$0,35 < n < 0,5 \quad \left. \vphantom{\frac{L}{L_0}} \right\} \sigma_i = K_0 \left(\frac{L}{L_0} \right)^n \left(\frac{\nu_0}{\nu} \right)^{1/4} \left[1 + \left(\frac{V_\infty}{V_0} \right)^2 \right] \left(1 + K_0 \frac{S}{S_0} \right)$$

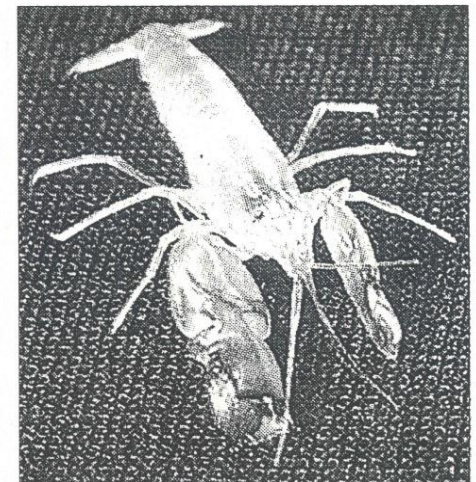


Miscellaneous

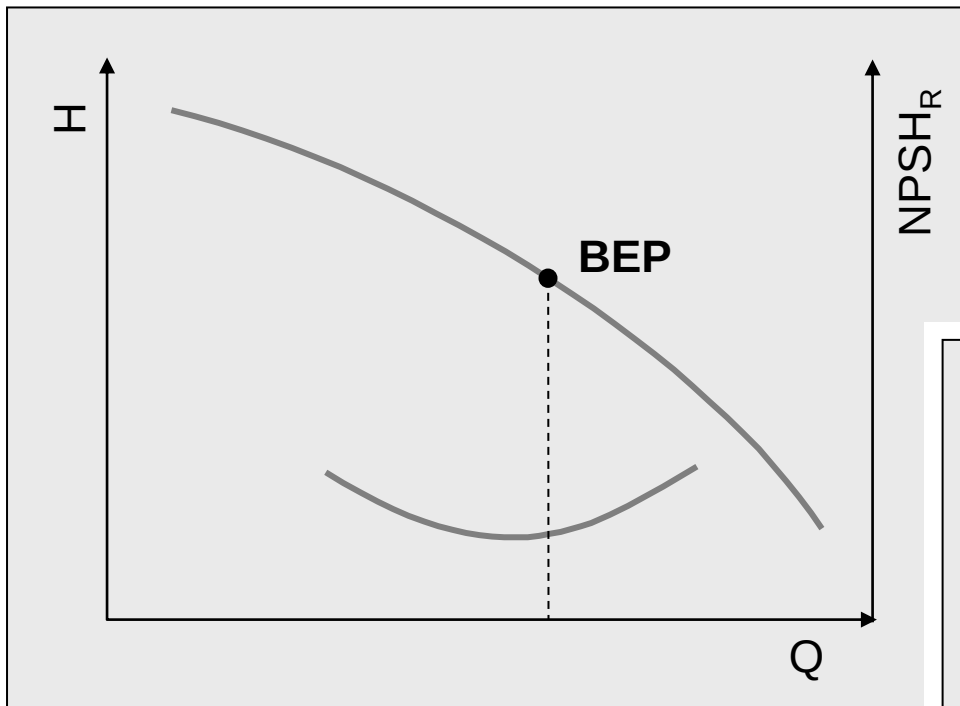


Scheren hoch

Pistolenkrebs ballert mit Luftblasen

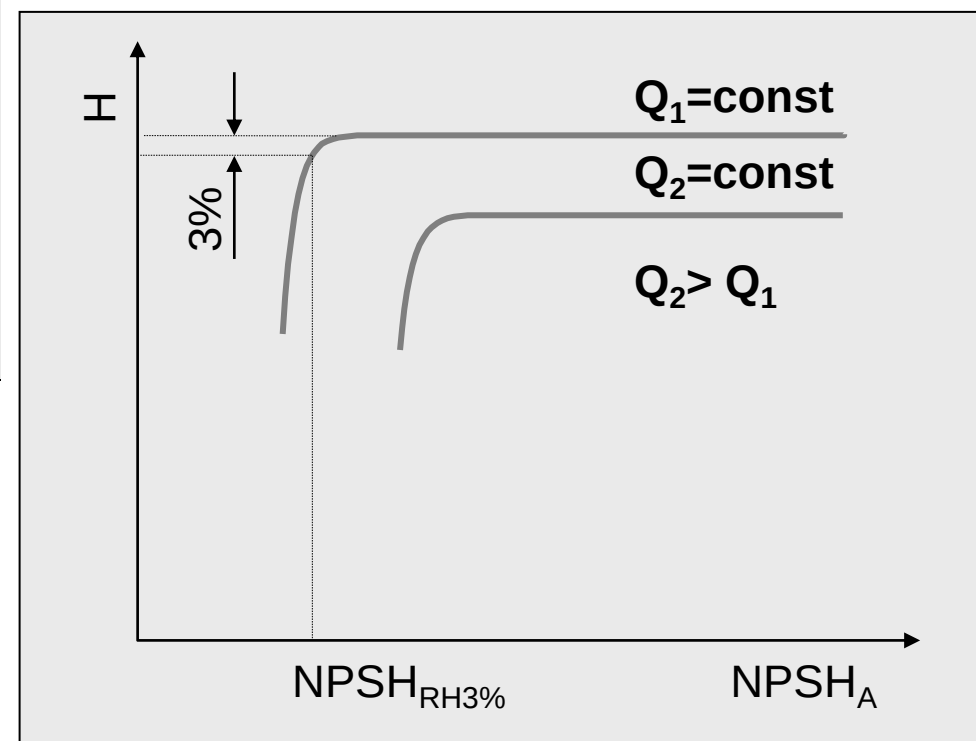


Wenn seine Schere klappt, dann knallt's.
Foto: Streif



Typische Kennlinie einer Kreiselpumpe

Messung des NPSH-Wertes unter Berücksichtigung des 3% H-Kriteriums



Vermeidung von Kavitation und Verzögerung von Materialschäden im Laufrad

Möglichkeiten zur Vermeidung von Kavitation

1) Anlage

- ▶ Erhöhung des NPSH_A , z.B.
 - Zulaufhöhe vergrößern
 - Druck vor der Pumpe vergrößern (z.B. Vorpumpe)
 - Widerstand in der Saugleitung verringern (Nennweite, Einbauten)
- ▶ Wasserqualität
- ▶ Gezieltes Einbringen von Luft in die Saugleitung kurz vor der Pumpe dämpft Schall (hat aber auch Nachteile)
- ▶ etc.

Vermeidung von Kavitation und Verzögerung von Materialschäden im Laufrad

2) Maßnahmen des Pumpenherstellers zur Verringerung von $\text{NPSH}_{\text{erf.}}$

- ▶ Geeignete Drehzahl
- ▶ Zweiflutiges Laufrad
- ▶ Sauglaufrad
- ▶ Spezielle Profile für die Schaufeln
- ▶ Inducer
- ▶ Optimale Gestaltung des Einlaufgehäuses und des Laufrades
- ▶ etc.

Vermeidung von Kavitation und Verzögerung von Materialschäden im Laufrad

Möglichkeiten zur Verzögerung von Materialschäden

- ▶ Verwendung eines "kavitationsfesten" Werkstoffes (evtl. nur für die 1. Stufe)

Besonderes "kavitationsfest" sind z.B.: gewalztes Stellite, Al-Gußbronze, 13 Cr-Stahlguß
(vgl. Tillner, W. "Vermeidung von Kavitationsschäden", in German)