

Fysische en thermische transportverschijnselen

Birger.Hauchecorne@ua.ac.be

- **Fundamentals of Thermal-Fluid Sciences**

Yunus A. Cengel, Robert H. Turner, John M.
Cimbala, McGraw Hill, 3rd edition, 2008,

ISBN: 987-007-126631-4

Inhoud van de cursus

- Stromingsmechanica
- Warmteoverdracht

Stromingsmechanica

- Inleiding stromingsmechanica
- Fluïdumstatica
- Fluïdumkinematica
- Bernoulli- en energievergelijking
- Impulsanalyse van stromingssystemen
- Interne stroming
- Externe stroming

Warmteoverdracht

- Warmteoverdrachtsmechanismen
- Stationaire warmtegeleiding
- Transiënte warmtegeleiding
- Gedwongen convectorie
- Natuurlijke convectorie
- Warmtewisselaars

Hfdst 1: Inleiding stromingsleer

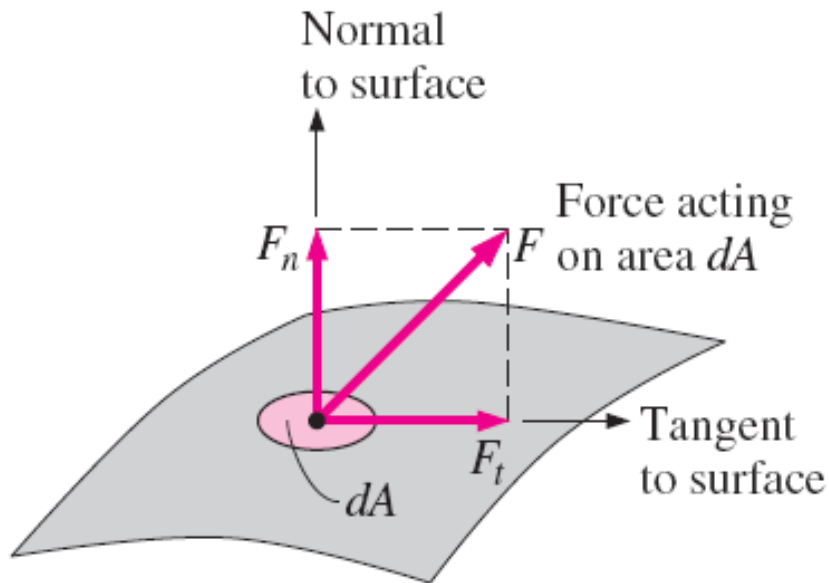
1. Definities stromingsleer, fluïdum
2. “Geen-slip”-conditie
3. Viscositeit
4. Classificatie van stromingsproblemen
5. Oppervlaktespanning en capillair effect

1. Definities

- **Mechanica**: gedrag van stationaire of bewegende lichamen onder invloed van krachten
- **Stromingsmechanica** (stromingsleer): fluïda in rust (stromingsstatica) of in beweging (stromingsdynamica)
- **Hydrodynamica**: stroming van fluïda die praktisch onsamendrukbaar zijn
- **Gasdynamica**: stroming van fluïda die significante dichtheitsveranderingen (samendrukbaar) ondergaan

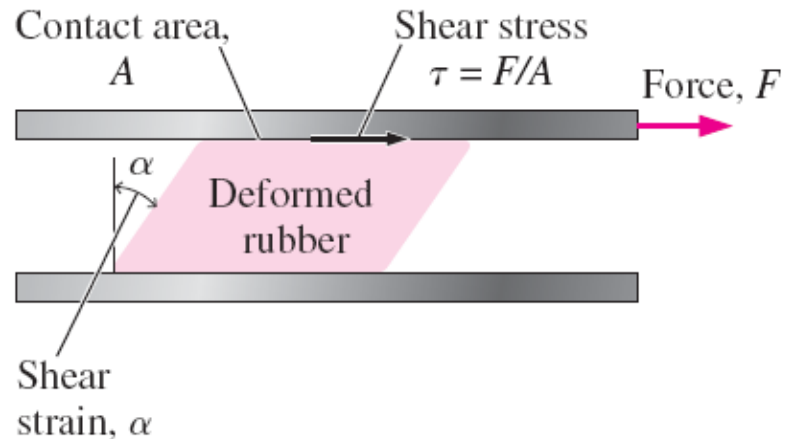
- **Aerodynamica**: stroming van gassen (lucht) over lichamen
- Deelgebieden die betrekking hebben op natuurlijk stroming
 - **Oceanografie, meteorologie, hydrologie**

- Fluidum (vloeibaar medium) = gas of vloeistof
- Vervormt continu onder invloed van schuifspanning



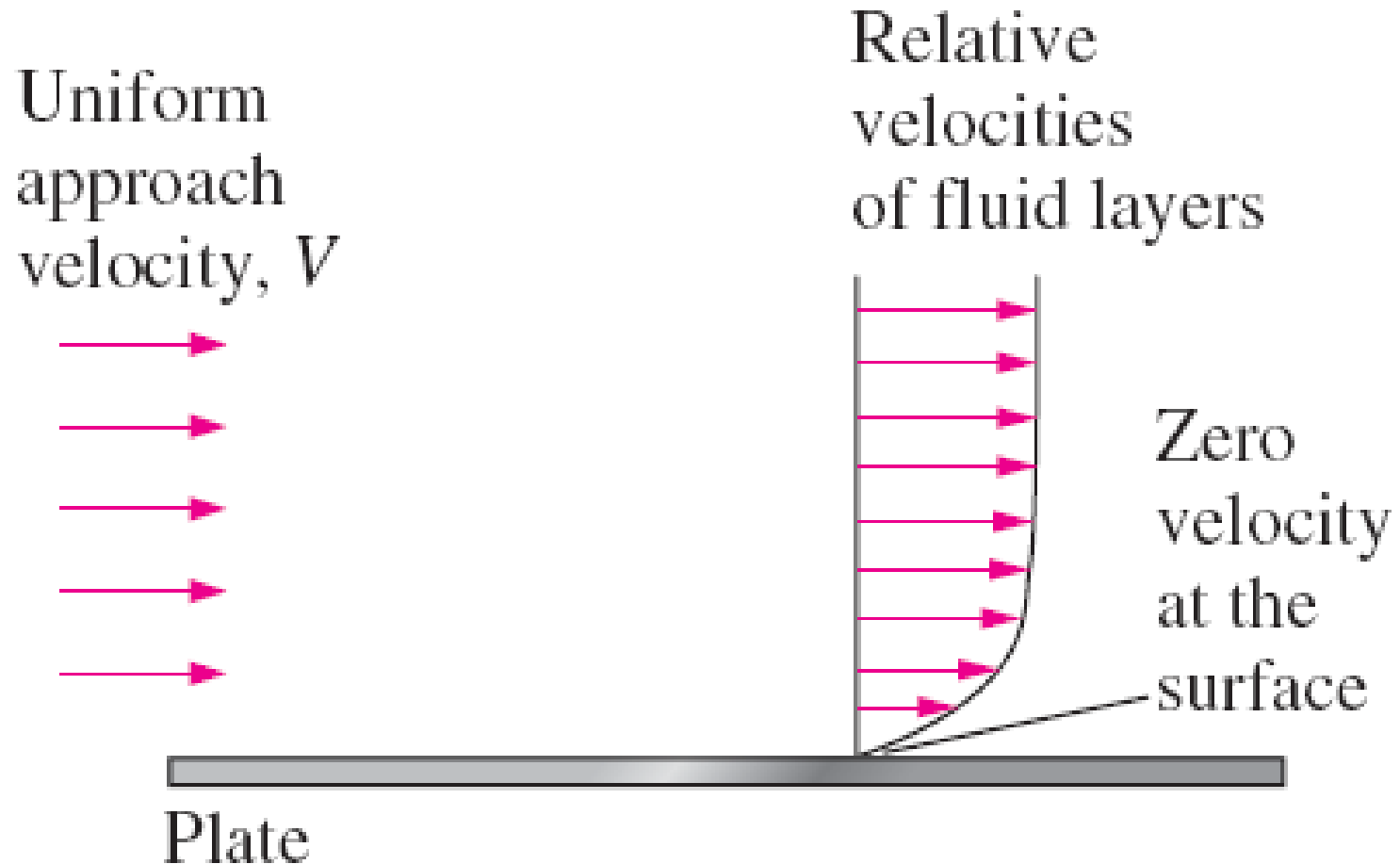
Normaalspanning $\sigma = \frac{F_n}{dA}$

Schuifspanning $\tau = \frac{F_t}{dA}$



Vaste stof: kan bepaalde opgelegde schuifspanning weerstaan door te vervormen

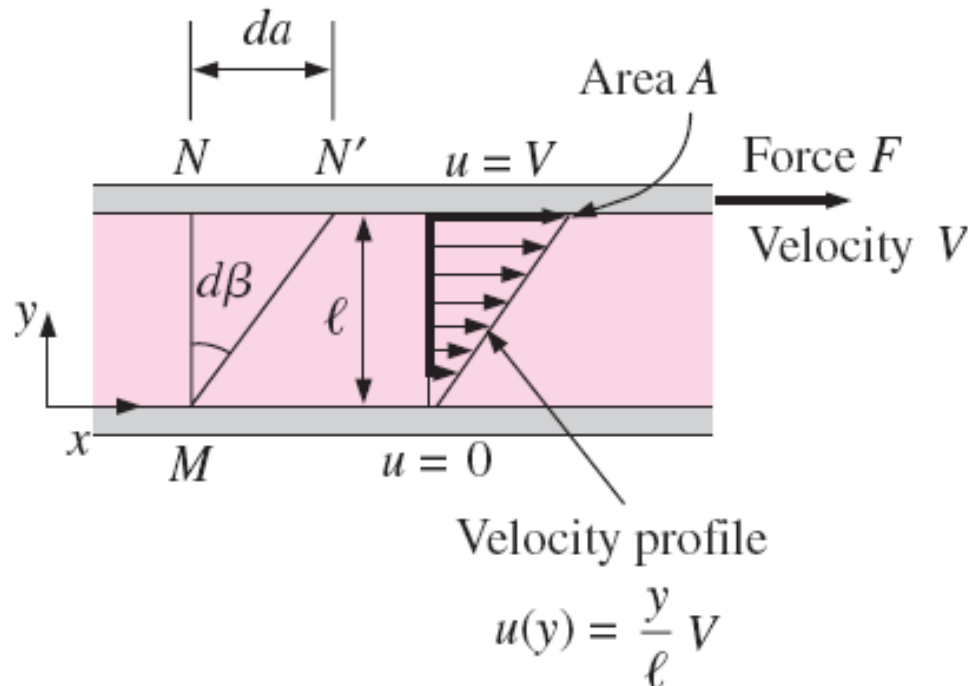
2. De “geen-slip”-conditie



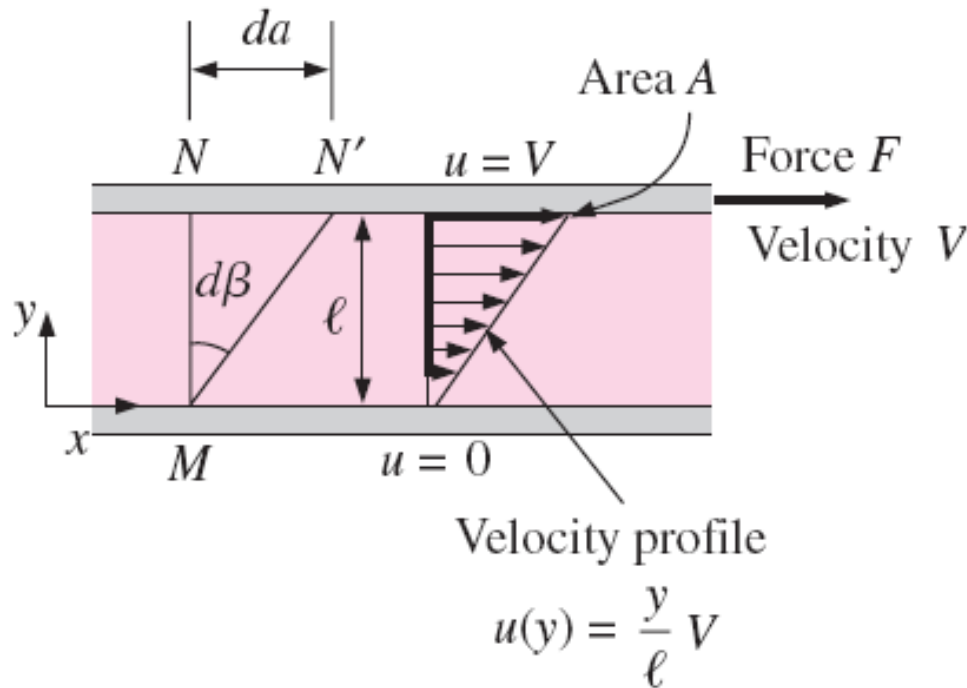
Een vloeistof die over een stilstaande plaat stroomt, komt volledig tot stilstand aan de oppervlakte als gevolg van de “geen-slip” conditie.

3. Viscositeit

- Viscositeit: interne weerstand van een fluïdum voor beweging
- Schuifspanning : absolute (dynamische) viscositeit



Het gedrag van een vloeistof in laminaire stroming tussen twee parallelle platen wanneer de bovenste plaat beweegt met een constante snelheid



Schuifspanning

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (\text{N/m}^2)$$

Schuifspanningkracht

$$F = \tau A = \mu A \frac{du}{dy} \quad (\text{N})$$

μ dynamische viscositeit

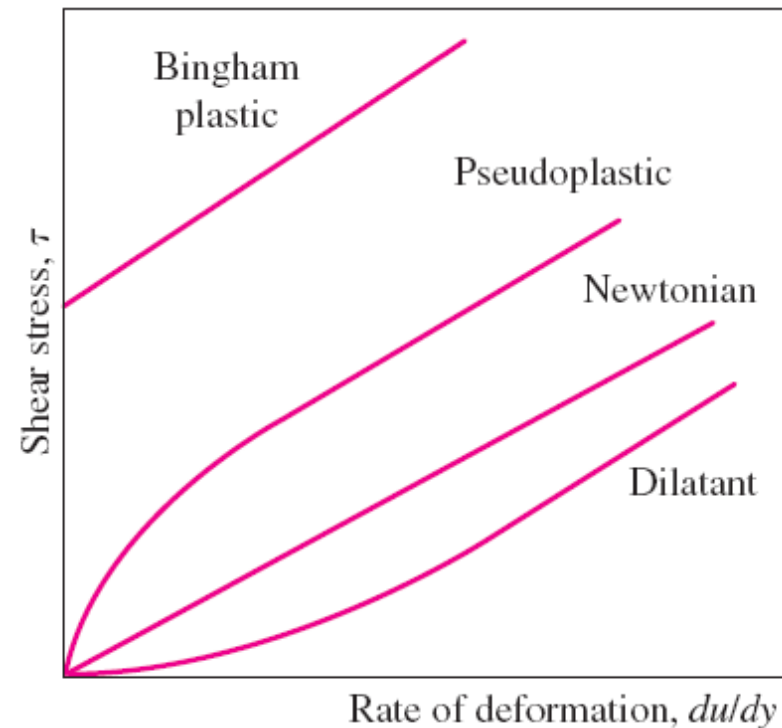
$\text{kg/m} \cdot \text{s}$ or $\text{N} \cdot \text{s/m}^2$ or $\text{Pa} \cdot \text{s}$

1 poise = $0.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$

$$\tau \propto \frac{d(d\beta)}{dt} \quad \text{or} \quad \tau \propto \frac{du}{dy}$$

Fluïda waarvoor de vervormingsnelheid evenredig is met de schuifspanning zijn **Newtoniaanse fluïda**.

- Niet-Newtoniaanse fluïda
 - **Pseudoplastisch** (“afschuif-verdunnend”): ketchup, rubberoplossing, verf, sommige zepen en detergenten, ...
 - **Dilatant** (“afschuif-verdikkend”): druifzand, natte cement, poeders in suspensie, sommige maïsmeel- en suikeroplossingen, ...
 - **Bingham plastisch** (kunnen weerstaan aan beperkte schuifspanning): boter, margarine, tandpasta, sommige vetten, ...

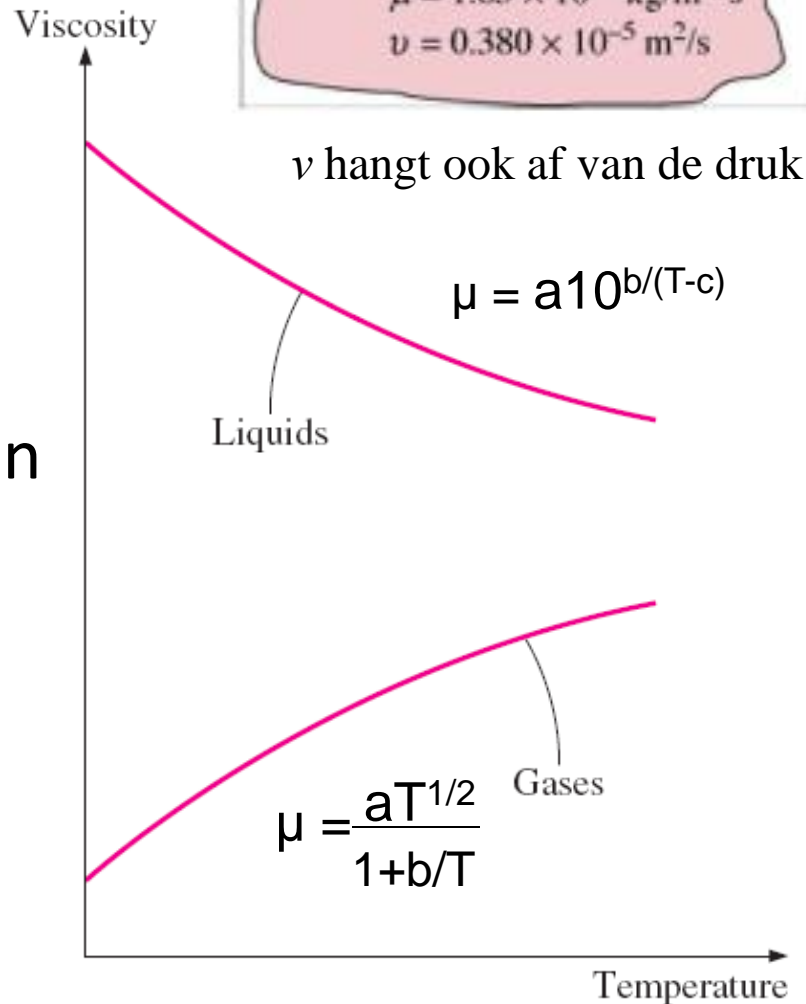




Kinematische viscositeit, $\nu = \mu/\rho$
m²/s or **stoke** (1 stoke = 1 cm²/s)

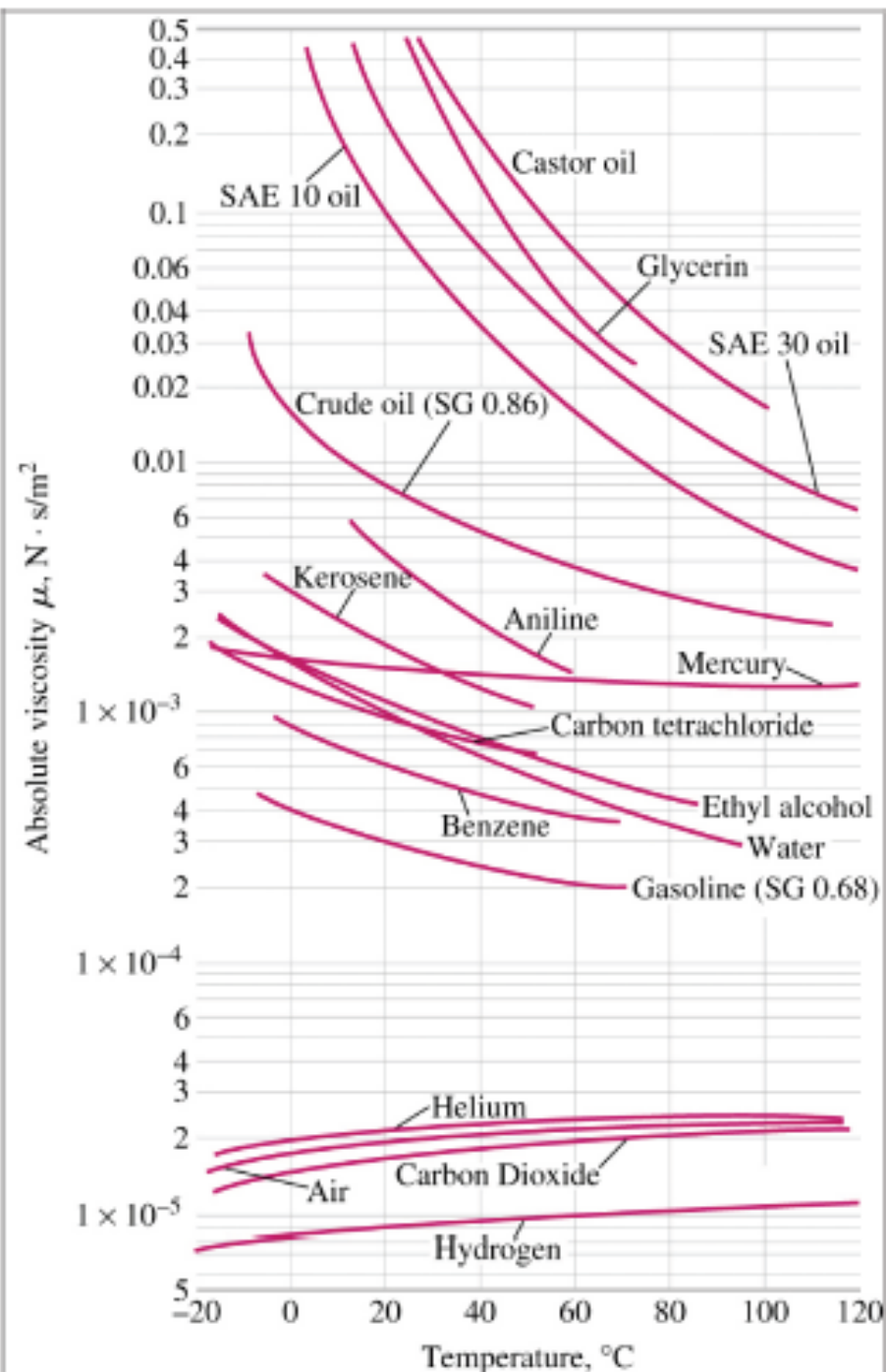
- Invloed van de temperatuur
 - Vloeistoffen: cohesiekrachten
 - Gassen: meer botsingen
→ meer weerstand voor stroming

$$\mu_{\text{gas}} \propto \sqrt{T}$$

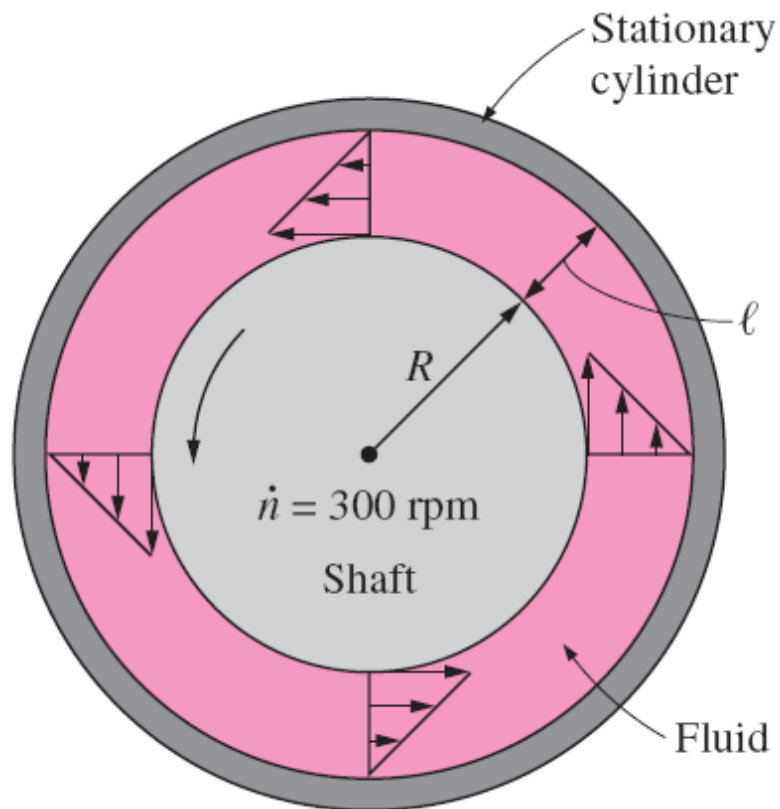


Dynamic viscosities of some fluids
at 1 atm and 20°C (unless
otherwise stated)

Fluid	Dynamic Viscosity μ , kg/m · s
Glycerin:	
−20°C	134.0
0°C	10.5
20°C	1.52
40°C	0.31
Engine oil:	
SAE 10W	0.10
SAE 10W30	0.17
SAE 30	0.29
SAE 50	0.86
Mercury	0.0015
Ethyl alcohol	0.0012
Water:	
0°C	0.0018
20°C	0.0010
100°C (liquid)	0.00028
100°C (vapor)	0.000012
Blood, 37°C	0.00040
Gasoline	0.00029
Ammonia	0.00015
Air	0.000018
Hydrogen, 0°C	0.0000088



- Roterende viscosimeter (Vb. 9-4)



Krachtmoment $T = FR$

Tangentiële snelheid $V = \omega R$

L lengte van de cilinder

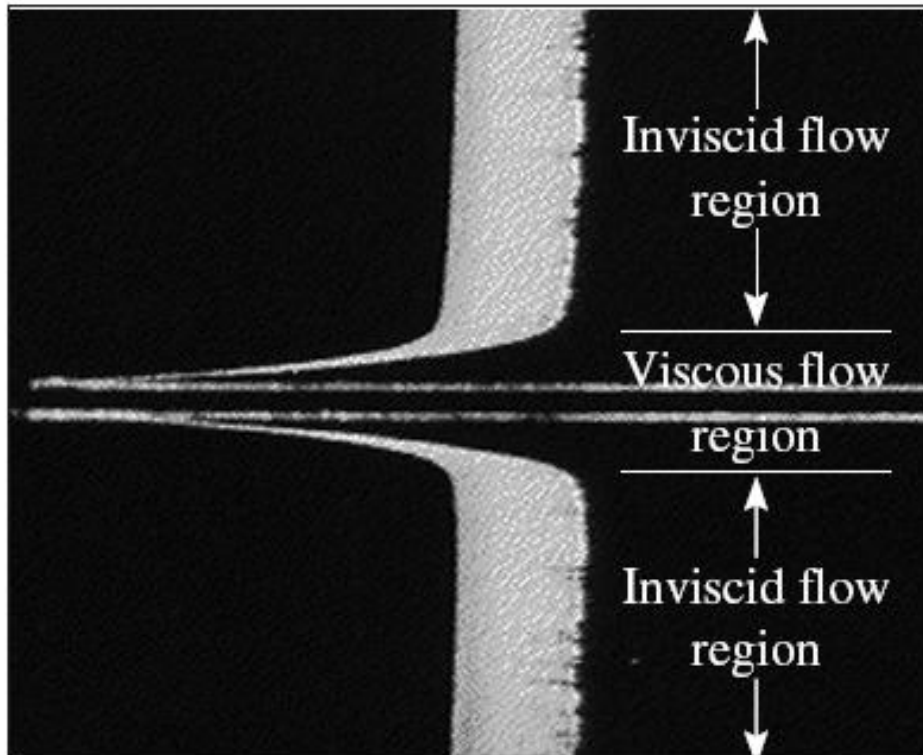
\dot{n} # omwentelingen per tijdseenheid

$$\tau = \mu \frac{du}{dr} = \mu \frac{R\omega}{l}$$

$$T = FR = \mu \frac{2\pi R^3 \omega L}{\ell} = \mu \frac{4\pi^2 R^3 \dot{n} L}{\ell}$$

4. Classificatie van stromingsproblemen

- Viskeuze versus niet-viskeuze gebieden



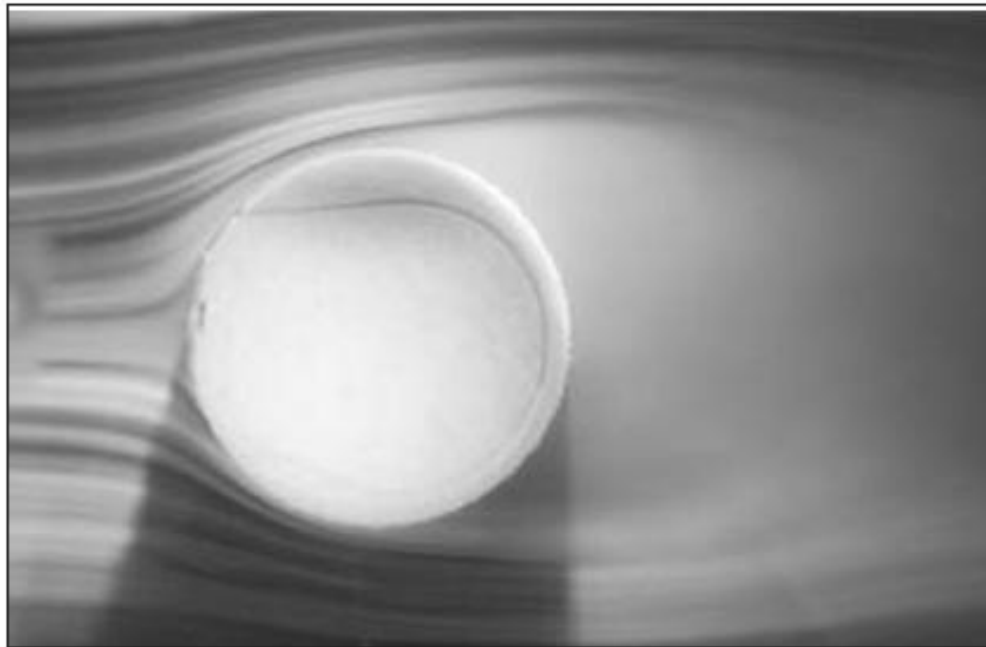
Niet-viskeuze stromen: In veel stromen van praktisch belang zijn er regio's (meestal regio's niet te dicht bij vaste oppervlakken), waar de viskeuze krachten verwaarloosbaar klein zijn in vergelijking met traagheid of druk krachten.

Viskeuze stromen: Stromen waar wrijving significant is

- **Interne versus externe stroming**

Interne stromen: De stroom in een pijp of kanaal is volledig begrensd door vaste oppervlakken.

Externe stromen: De stroom van een onbegrensde vloeistof over een oppervlak, zoals een plaat, een draad of een pijp.



- Samendrukbare versus onsamendrukbare stroming

Samendrukbare stromen: Als de dichtheid varieert tijdens de stroming (vb: hoge snelheidsstromen)

Onsamendrukbare stromen: Als de dichtheid min of meer constant blijft (vb: vloeistoffen)

Mach getal

$$Ma = \frac{V}{c}$$

Met c = geluidssnelheid = 346 m/s (in lucht, kamertemperatuur, zeeniveau)

- $Ma < 0.3$: gas is onsamendrukbaar \Rightarrow luchtsnelheid < 100 m/s
- $Ma < 1$: Subsonisch
- $Ma = 1$: Sonisch
- $Ma > 1$: Supersonisch
- $Ma \gg 1$: Hypersonisch

• Laminaire versus turbulente stroming

Laminair: Hoog viskeuze fluïda, zoals olie, bij lage snelheden. Zeer geordende beweging, gekenmerkt door gladde lagen

Transitioneel: Stroom wisselend tussen laminair en turbulent

Turbulent: Laag viskeuze fluïda, zoals lucht, bij hoge snelheden. Zeer wanordelijke vloeiende beweging, gekenmerkt door snelheidsschommelingen

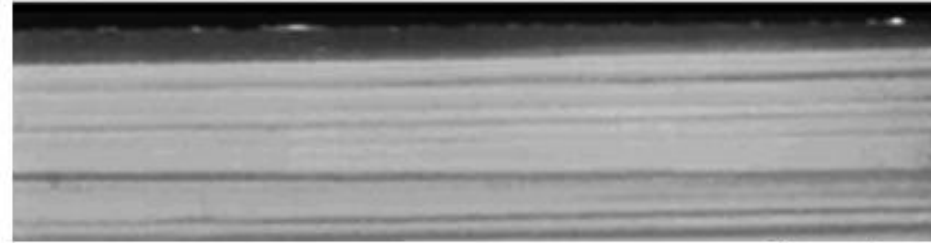
• Getal van Reynolds

$$Re = \frac{\text{Inertial forces}}{\text{Viscous forces}} = \frac{V_{\text{avg}} D}{\nu} = \frac{\rho V_{\text{avg}} D}{\mu}$$

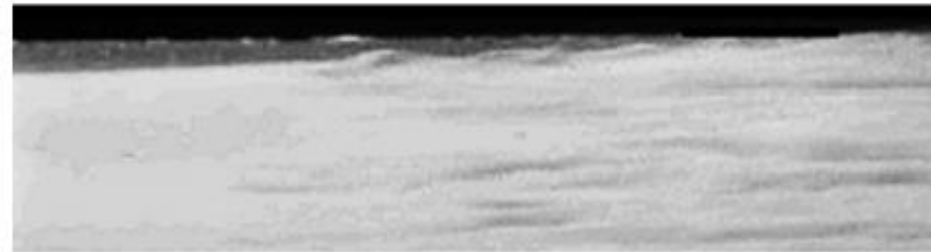
$Re \lesssim 2300$ laminar flow

$2300 \lesssim Re \lesssim 10,000$ transitional flow

$Re \gtrsim 10,000$ turbulent flow



Laminar



Transitional

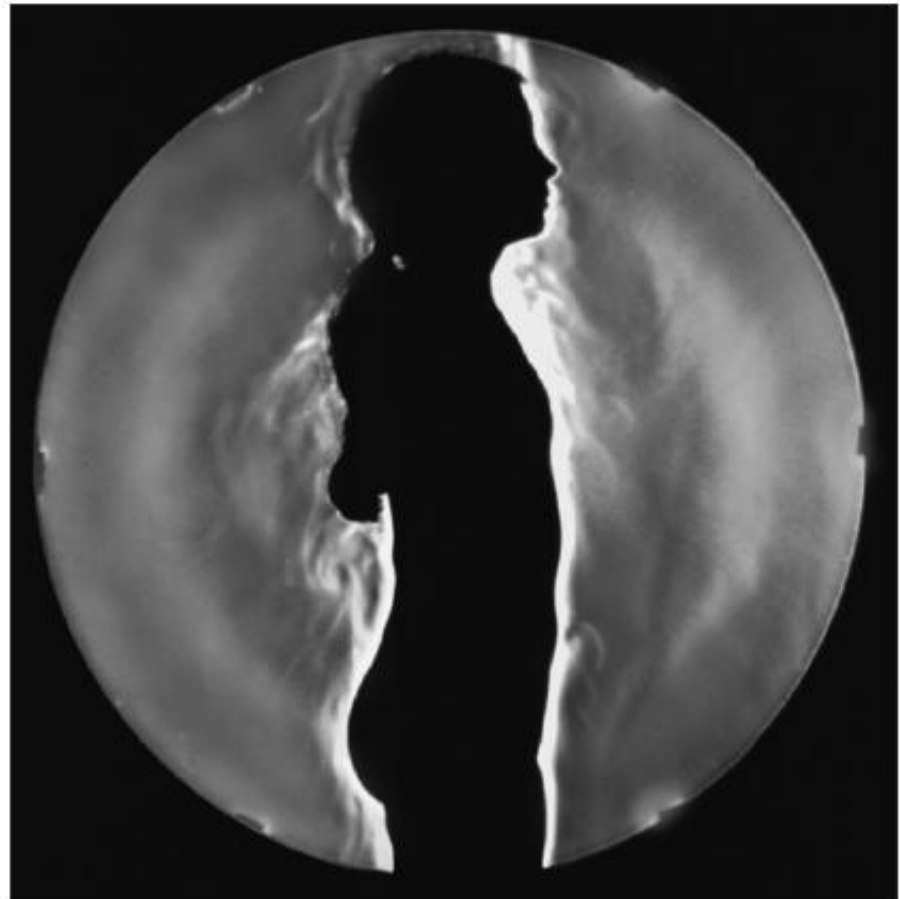


Turbulent

- Natuurlijke versus gedwongen stroming

Natuurlijke stromen: Stroming heeft een natuurlijke oorsprong, zoals drijfkracht (verschil in densiteit door temperatuursverschil)

Gedwongen stromen: Stroming wordt gedwongen over een oppervlak of in een buis d.m.v. een pomp of ventilator



• Stationaire versus transiënte stroming

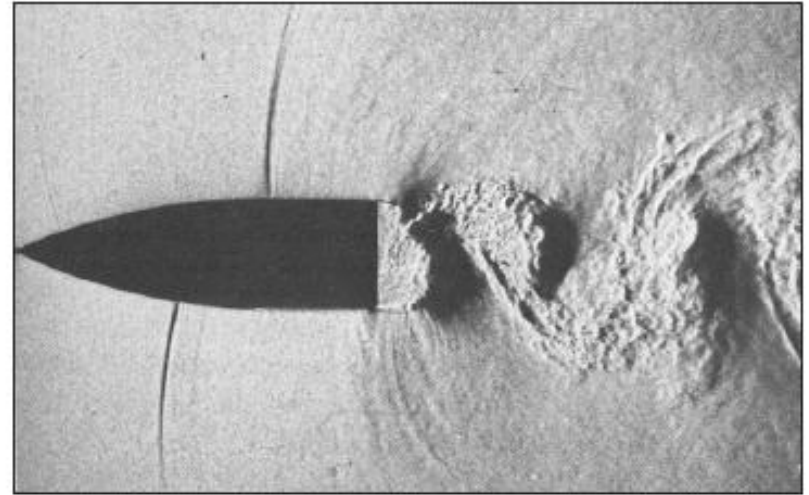
Stationair: geen verandering met de tijd op een bepaalde plaats

Transiënt:

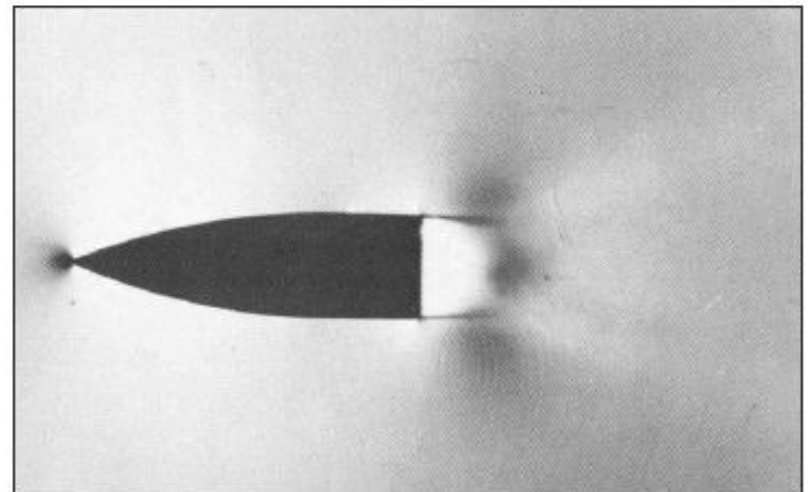
- niet-stationair: ontwikkelende stroming
- periodisch: fluctuatie rond stationair gemiddelde

Uniform: geen verandering op een bepaalde locatie

Veel apparaten, zoals turbines, compressoren, boilers, ... werken lange tijd onder dezelfde condities en kunnen als stationair beschouwd worden



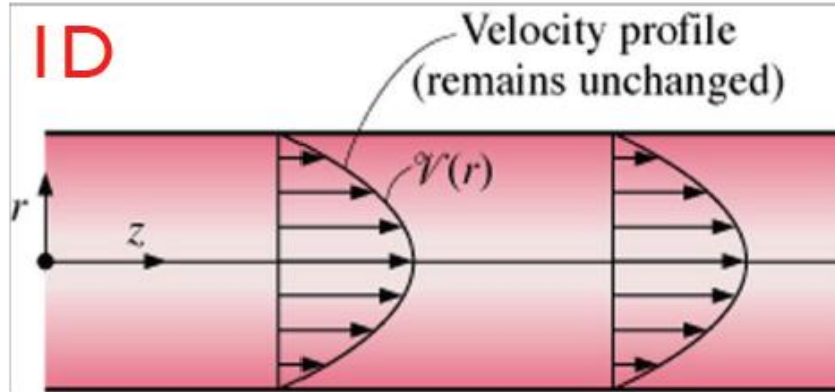
Oscillerend zog van een airfoil bij $Ma=0.6$



Gemiddelde over de tijd

- 1D-, 2D- en 3D- stroming

1D



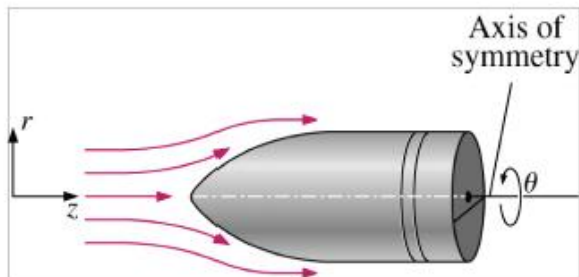
Stroming in een buis

2D



Stroming over antenne

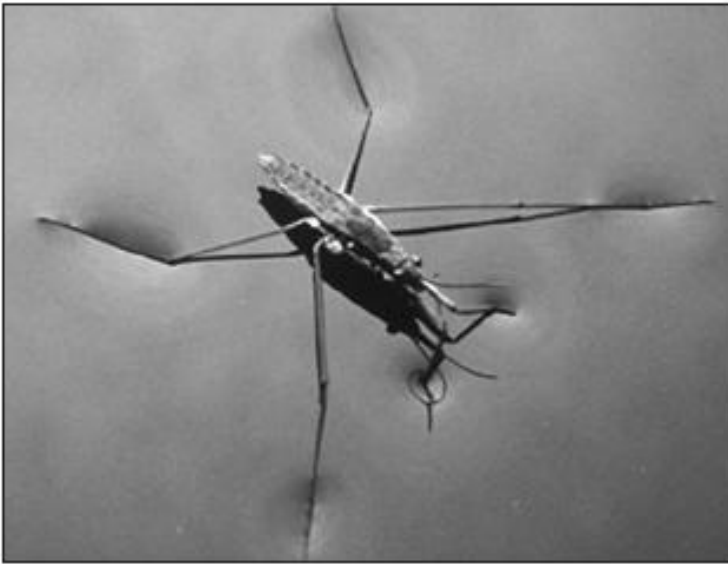
2D



Stroming langs een kogel

5. Oppervlaktespanning en capillair effect

- Oppervlaktespanning



- Oppervlaktespanning

Vloeistofdruppels gedragen zich als kleine sferische ballonnetjes gevuld met vloeistof, oppervlakte is als elastisch membraan onder spanning. De trekkracht die dit veroorzaakt is te wijten aan de **aantrekkingskrachten tussen de moleculen** en wordt de **oppervlaktespanning σ_s** genoemd [N/m].

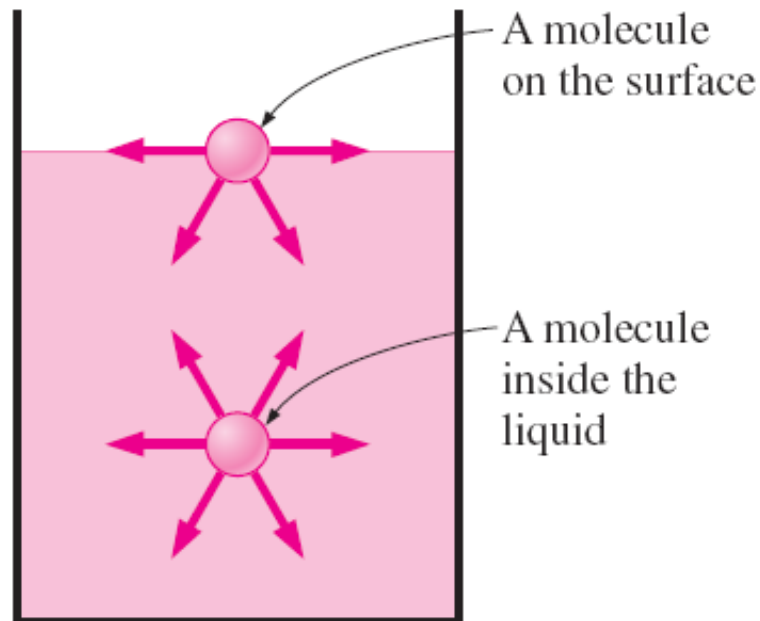
- Oppervlaktespanning

Aan de oppervlakte zijn de aantrekkingskrachten niet symmetrisch

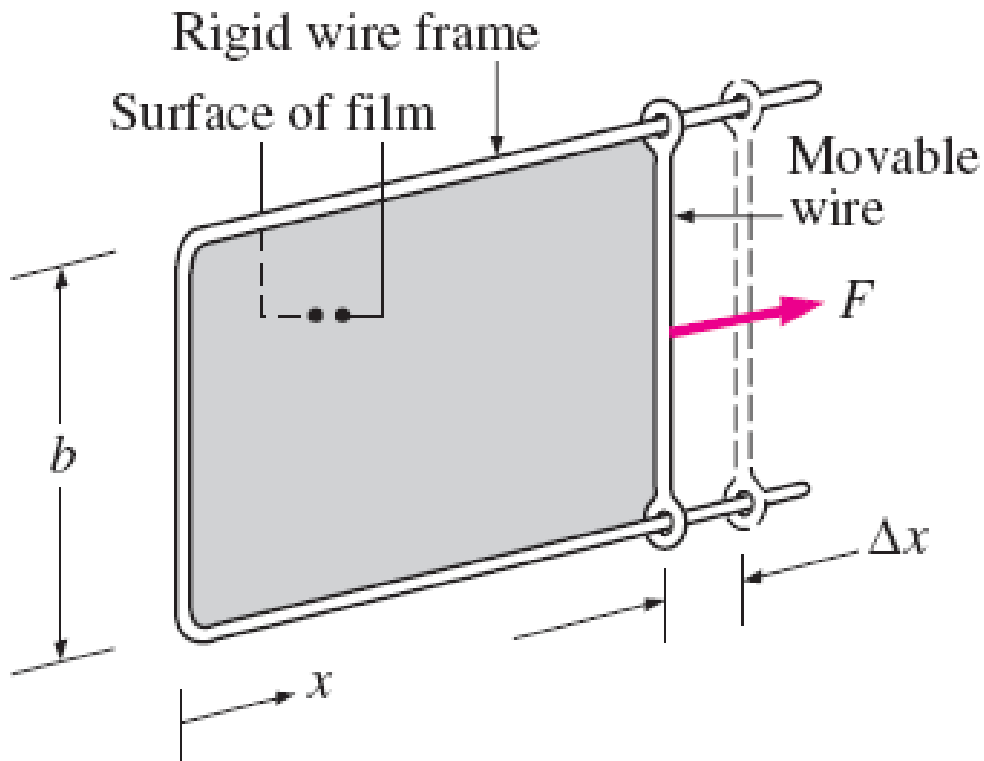
– Resulteert in spanning aan de oppervlakte

– De kracht die spanning veroorzaakt is parallel gericht met de oppervlakte

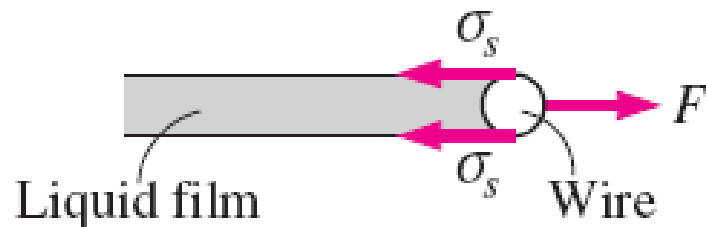
– Oppervlaktespanning = **kracht per eenheidslengte**



- Vloeistoffilm in een raam



$$\sigma_s = \frac{F}{2b}$$



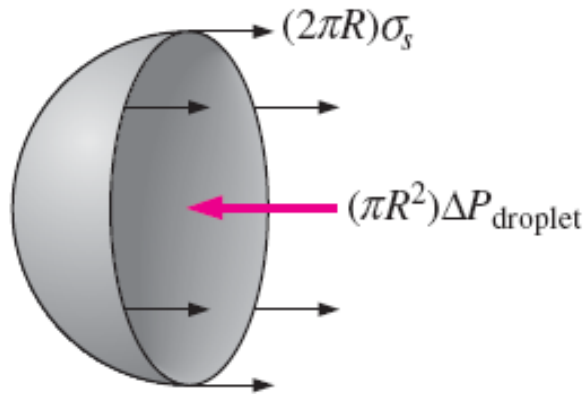
**Arbeid (oppervlakte-energie)
nodig om oppervlakte te
vergroten**

$$W = \text{Force} \times \text{Distance} = F \Delta x = 2b\sigma_s \Delta x = \sigma_s \Delta A$$

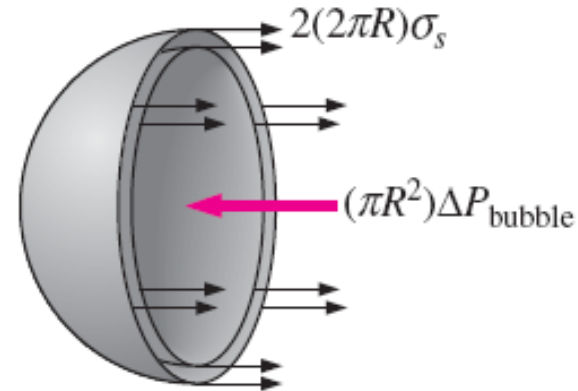
Surface tension of some fluids in air at 1 atm and 20°C (unless otherwise stated)

Fluid	Surface Tension σ_s , N/m*
†Water:	
0°C	0.076
20°C	0.073
100°C	0.059
300°C	0.014
Glycerin	0.063
SAE 30 oil	0.035
Mercury	0.440
Ethyl alcohol	0.023
Blood, 37°C	0.058
Gasoline	0.022
Ammonia	0.021
Soap solution	0.025
Kerosene	0.028

- Druppel —Bel



(a) Half a droplet or air bubble



(b) Half a soap bubble

Druppel:

$$(2\pi R)\sigma_s = (\pi R^2)\Delta P_{\text{droplet}} \rightarrow \Delta P_{\text{droplet}} = P_i - P_o = \frac{2\sigma_s}{R}$$

Bel :

$$2(2\pi R)\sigma_s = (\pi R^2)\Delta P_{\text{bubble}} \rightarrow \Delta P_{\text{bubble}} = P_i - P_o = \frac{4\sigma_s}{R}$$

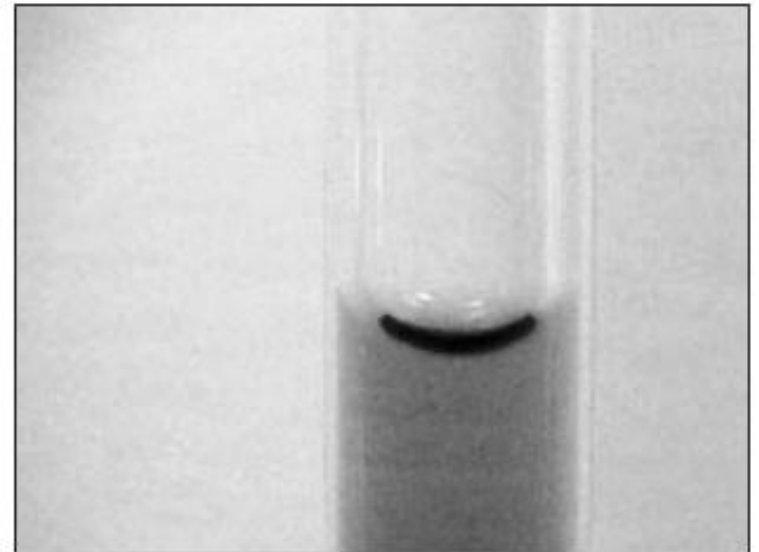
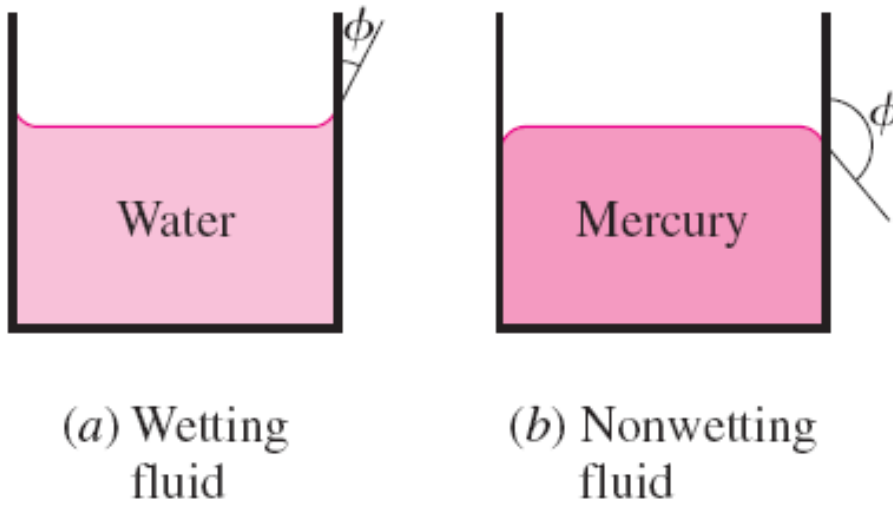
Capillair Effect

Capillair effect: Het stijgen of dalen van een vloeistof in een smalle buis die zich in de vloeistof bevindt.

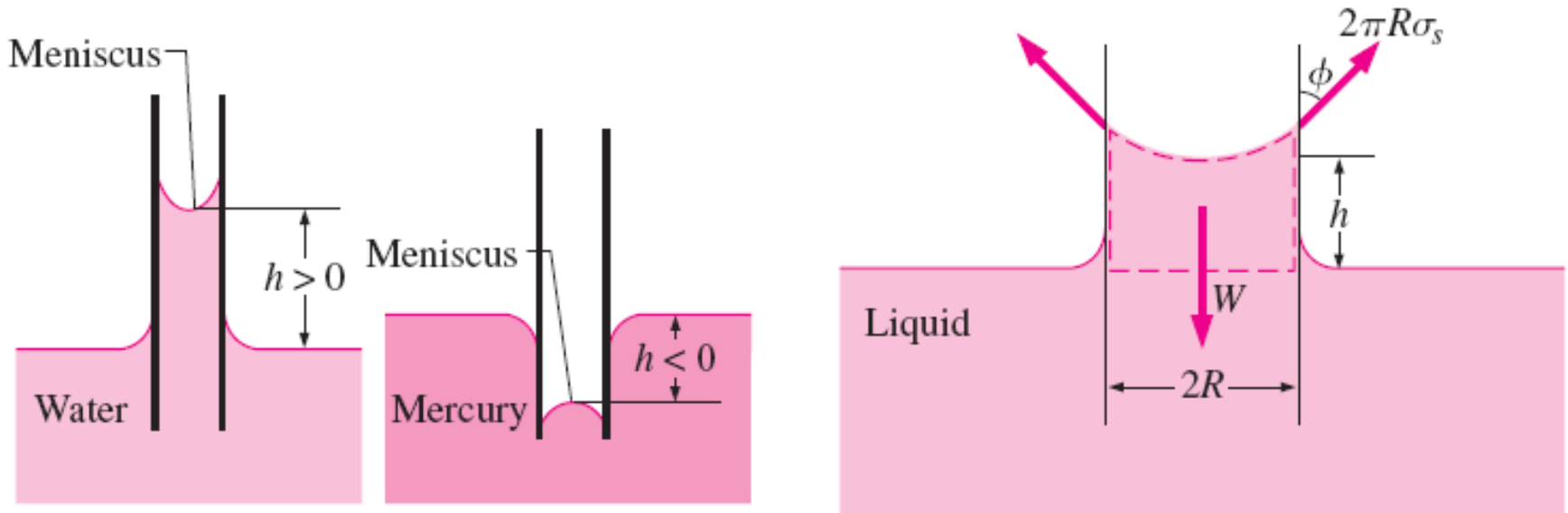
Het capillair effect is deels verantwoordelijk voor de stijging van water in grote bomen

Meniscus: Het gekromde vrije oppervlak van de vloeistof in een capillair

De sterkte van het capillair effect wordt gekwantificeerd door de **contacthoek ϕ** , gedefinieerd als de hoek die de raaklijn aan het vloeistofoppervlak maakt met de vaste ondergrond op het contactpunt



- Capillaire stijging (of daling) (Vb. 9-5)



$$P_{onder} A = P_{boven} A + W - 2\pi R \sigma_s \cos \phi$$

$$W = mg = \rho V g = \rho g (\pi R^2 h)$$

Capillaire stijging (daling): $h = \frac{2\sigma_s}{\rho g R} \cos \phi \quad (R = \text{constant})$