

Cirkulationssystemet

introduktion
och
biofysik

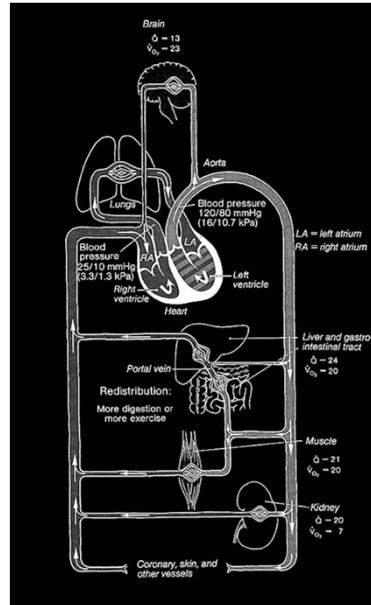
LPG002

2025
Block 5

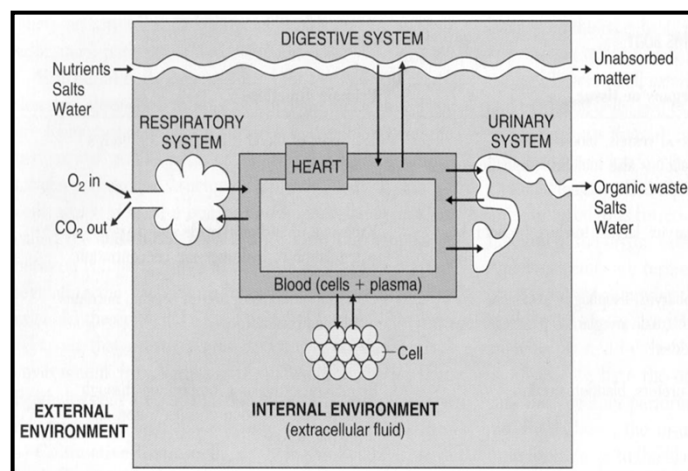
Holger Nilsson
Sektionen för Fysiologi
Göteborgs Universitet



Kretsloppet



Cirkulationens uppgift: Transport



Sjukdomar i vilka cirkulationen har en central roll

- Blodproppar
Trombos, emboli
- Hypertoni
- Angina pectoris
- Hjärtinsufficiens
- Diabetes
- Raynauds syndrom
- Allergiska sjukdomar
- Cancer
- Demens

Tecken på inflammation:

<i>Rubor</i>	rodnad
<i>Tumor</i>	svullnad
<i>Calor</i>	värmeökning
<i>Dolor</i>	smärta
<i>Functio læsa</i>	nedsatt funktion

Historik

- Galenos
- Ibn al-Nafis
- William Harvey
- Marcello Malpighi

se separat video på Canvas

Tryck

Kraft per yta

Kraften kan komma från

- En pump
 - Hjärtat
- Gravitationen
 - Djupet under vattenytan



Tryck-enheter

- Kraft per yta

- N/m^2
= Pascal

- Pelarhöjden

Eftersom $P = \rho h g$

- Vatten

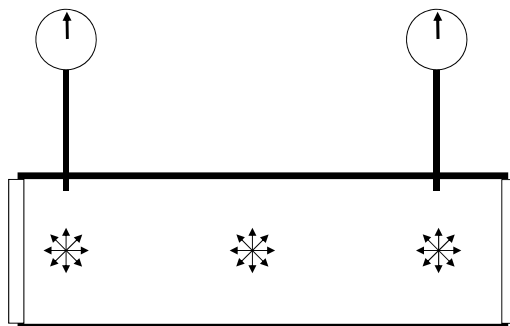
- $\text{cm H}_2\text{O}$

- Kvicksilver

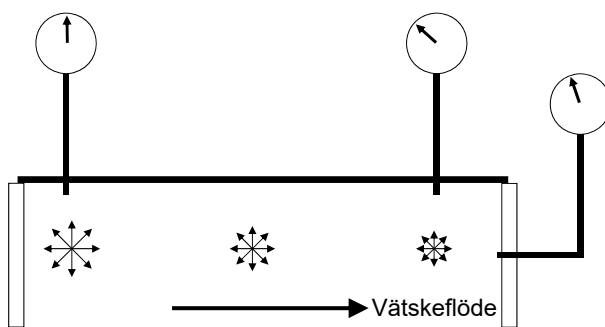
- mm Hg

$$100 \text{ mmHg} = 136 \text{ cm H}_2\text{O} = 13\,332 \text{ Pa}$$

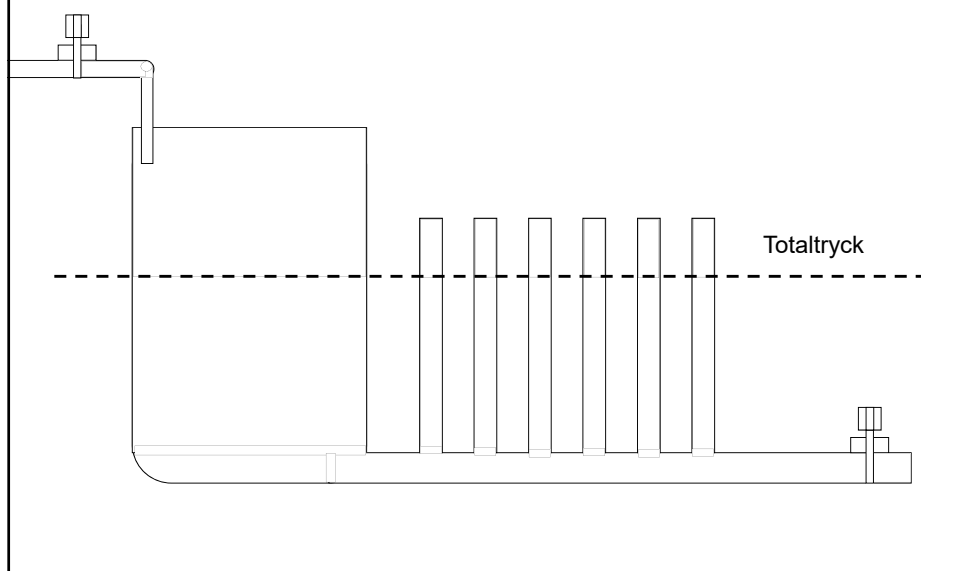
Tryck



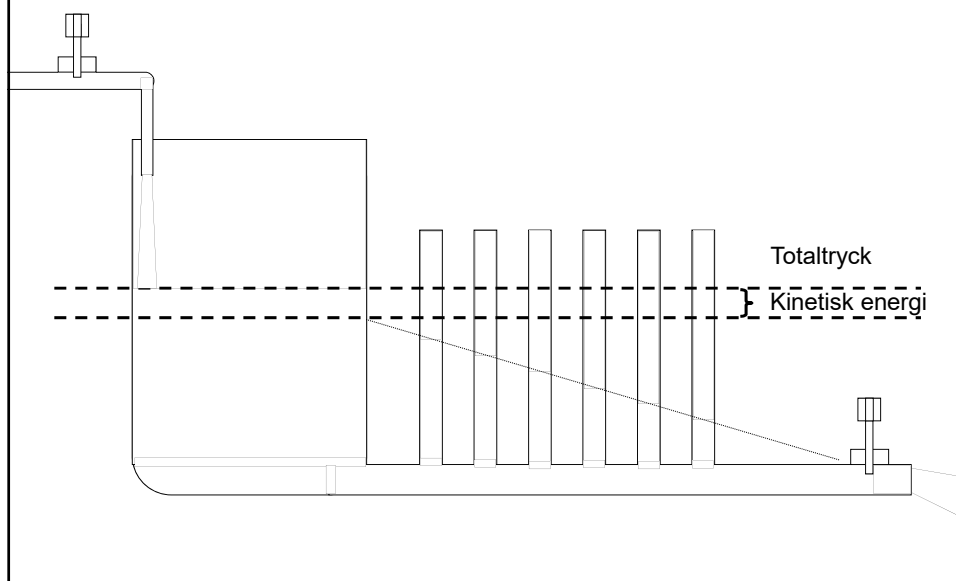
Tryck



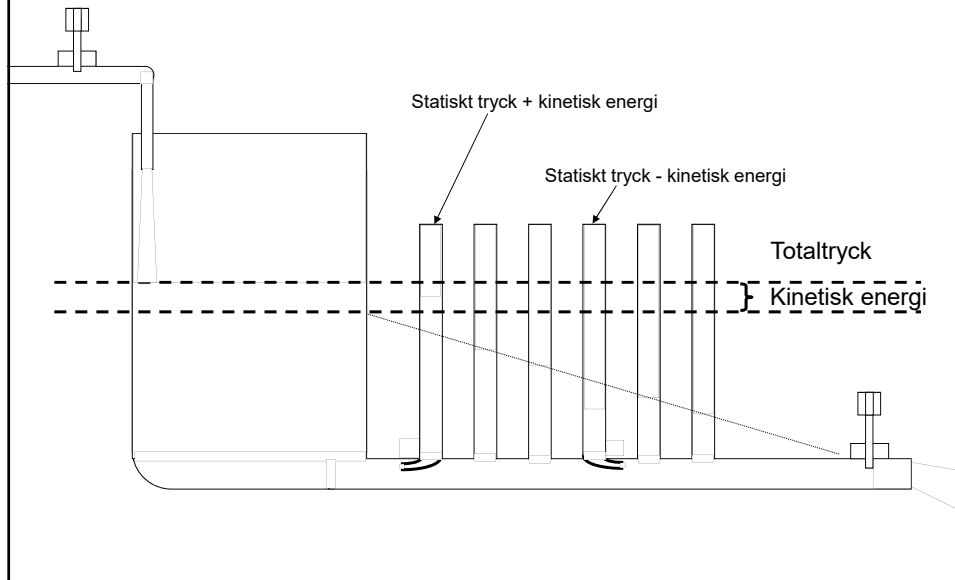
Tryckmätning med piezometer



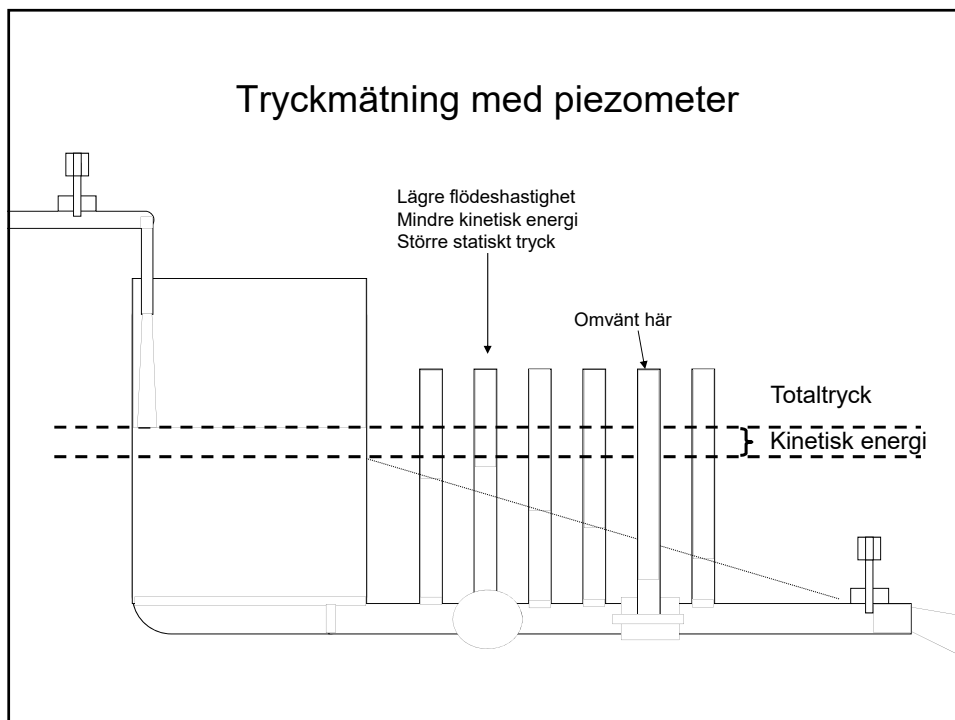
Tryckmätning med piezometer



Tryckmätning med piezometer



Tryckmätning med piezometer



Bernouillis princip

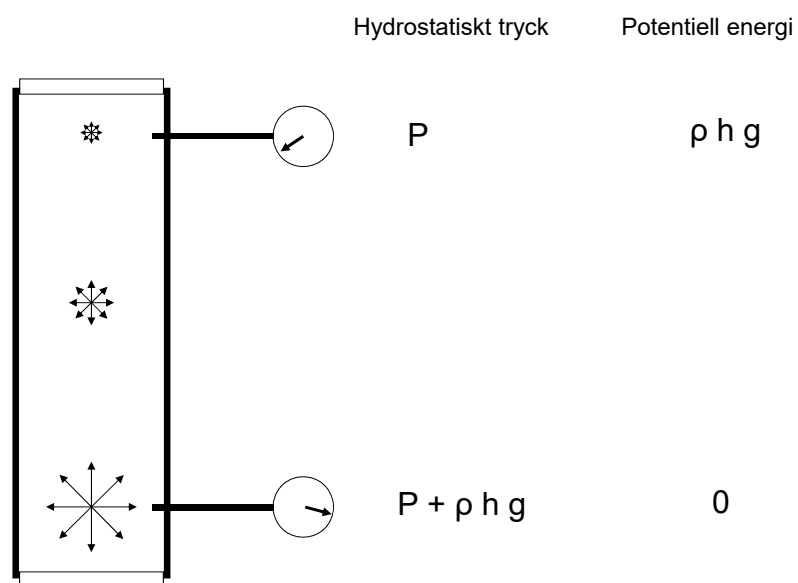
Statiskt tryck + dynamiskt tryck + potentiell energi = konstant

(så länge det inte finns viskösa förluster (dvs resistans))

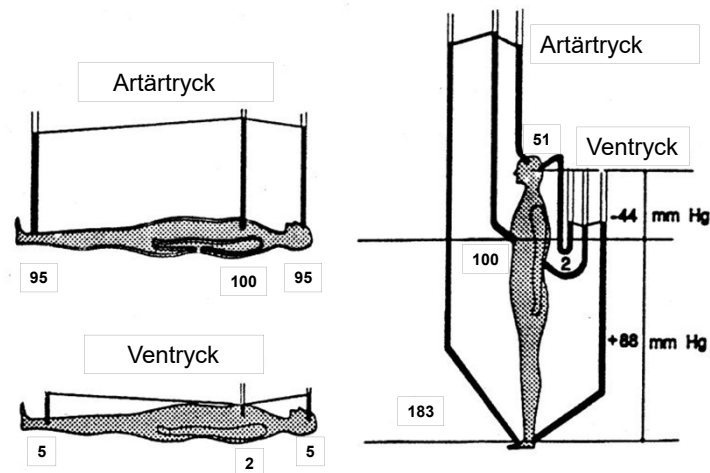
$$P + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho h g = k$$

Se även: <http://www.fysik.org/resurser/experiment-och-annat/filmade-experiment/blaasningar/>

Trycket ökar med djupet



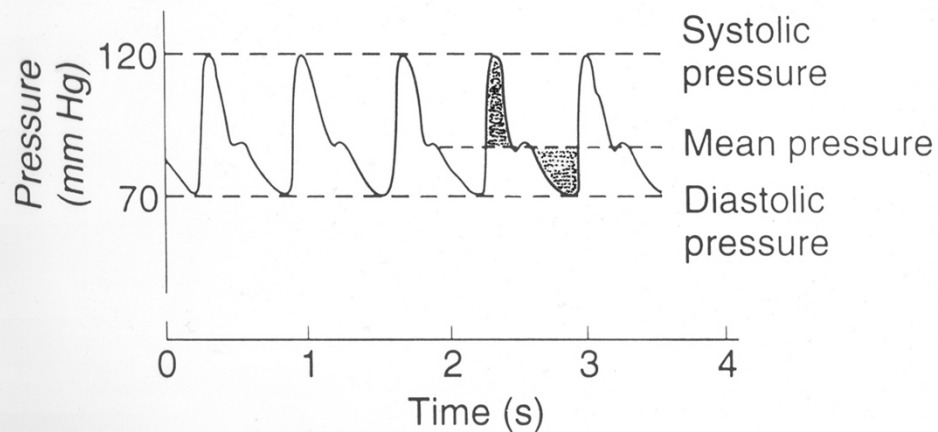
Lägesförändring påverkar blodtrycken



Tryck i kärlsystemet

- Aorta ("systemtryck")
 - ca 100 mmHg
- Kapillärer
 - ca 20-40 mmHg
- Vener
 - ca 0-10 mmHg
- Intravaskulärt tryck
 - trycket i ett kärl i förhållande till ytterluften
- Transmuraltryck
 - Skillnad mellan intravaskulärt tryck och extravaskulärt tryck (i vävnaden)
- Perfusionstryck
 - Tryckskillnad mellan två konsekutiva ställen i kärlbanan (skillnad i intravaskulärt tryck före och efter ett organ)

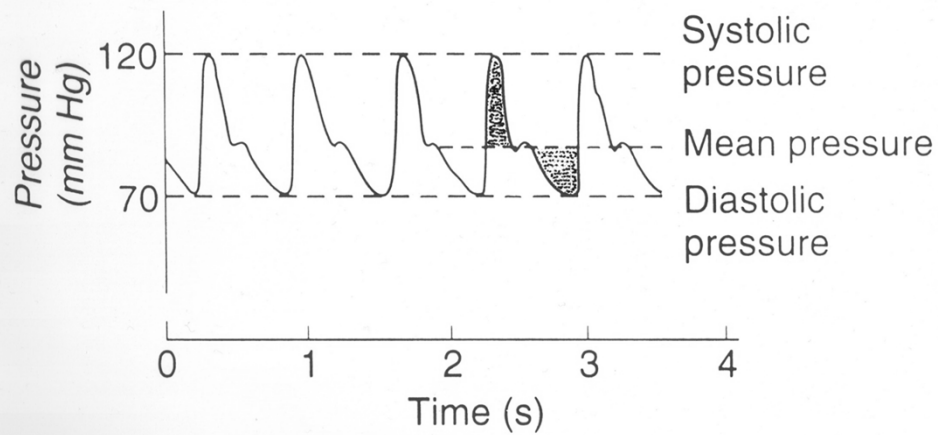
Medelartärtrycket



Pulstryck

- Under hjärtats kontraktionsfas (systole) stiger trycket i de stora artärerna
 - Tryckvågen kan kännas utanpå huden över ytliga artärer
- Pulstryck = skillnad mellan det högsta (systoliska) och det lägsta (diastoliska) trycket under en hjärtcykel
 - Exempel:
 - $P_{\text{systole}} = 120 \text{ mmHg}$
 - $P_{\text{diastole}} = 80 \text{ mmHg}$
 - Pulstryck 40 mmHg

Medelartärtrycket



$$\text{Medelartärtryck} \approx \text{diastoliskt tryck} + \frac{1}{3} \cdot \text{pulstrycket}$$

Tryckrelaterade sjukdomar

- Hypertoni
- Hypotoni
- Hjärnödem
- Perifert ödem
- Papillödem
- Hjärthypertrofi
- Cirkulationssvikt
- Hjärnblödning
- Aortaaneurysm
- Aortadissektion
- Kär remodelering
- Endoteldysfunktion
- Ateroskleros
- mm

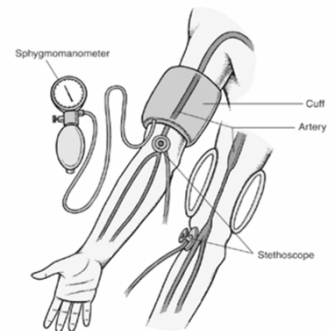
Mätning av blodtrycket

Direkt mätning



www.medscape.com

Indirekt mätning



<http://www.bloodpressurehigh.com/blood-pressure-cuff.html>

Flöde

- Volymsflöde
 - det vi vanligen menar med "flöde"
 - volym per tid
 - liter per minut
- Flödeshastighet
 - längd per tid
 - meter per sekund

Flöde



Rinner fort
stor flödes hastighet

Inte så mycket vatten
måttligt flöde



Porlar sakta
låg flödes hastighet

Ändå mycket vatten
stort flöde

Blodflöde

- Blodflödet i hela systemet kallas
hjärt-minut-volymen
eller
cardiac output

5-35 liter per minut
- Flödet till enskilda organ varierar kraftigt beroende på
organet och dess behov

Flödes hastighet

- Varierar starkt utefter kärlbanan

Aorta	50 cm/s	$A=2,5 \text{ cm}^2$
Kapillärer	0,03 cm/s	$A=4500 \text{ cm}^2$
Vena cava	10-30 cm/s	$A=8 \text{ cm}^2$

Viskositet

- Mått på hur trögflytande en vätska är



hög viskositet

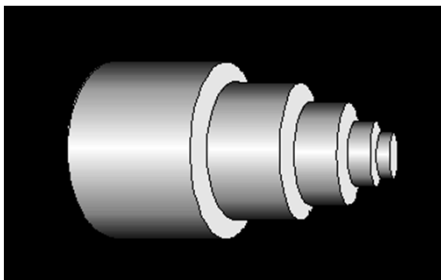


låg viskositet

Viskositet

- Avspeglar friktionen mellan intilliggande vätskeskikt
- Är orsaken till laminära flödesprofiler
- Mäts i pascalsekunder (Ns/m^2)
 - Äldre enhet Poise (dyn s / cm^2) = $0,1 \text{ Pa s}$
- Betecknas η (eta)

Laminärt flöde



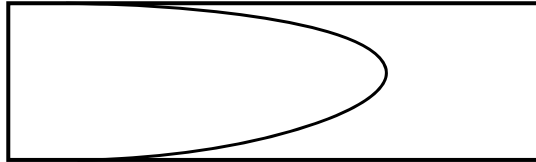
Man kan betrakta vätskan som bestående av koncentriska cylindrar som glider i förhållande till varandra.

Den yttersta cylindern glider mot den stillastående väggen och rör sig långsammast.

Cylindrarna innanför glider i förhållande till varandra. Detta gör att hastigheten får en parabolisk profil och är högst i centrum av kärlet.

Gnidningen mellan de olika cylindrarna (den inre friktionen i vätskan) ger upphov till viskositeten.

Parabolisk flödesprofil



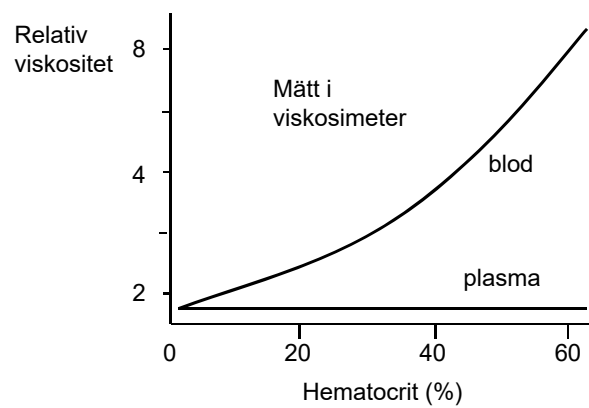
En konsekvens av "gnidningen" mellan vätskeskikten är att flödes hastigheten är högst mitt i kärlet och lägst vid väggen.

Hastigheten fördelas enligt en parabel med toppen i mitten av kärlet.

Typer av vätskor

- Newtonsk vätska
 - Konstant viskositet
 - t.ex. vatten, plasma
- Icke-newtonsk vätska
 - Viskositeten förändras med omständigheterna
 - t.ex. blod
 - rördiameter
 - flödes hastighet
 - temperatur
 - hematokrit

Blodets viskositet beror på hematokriten



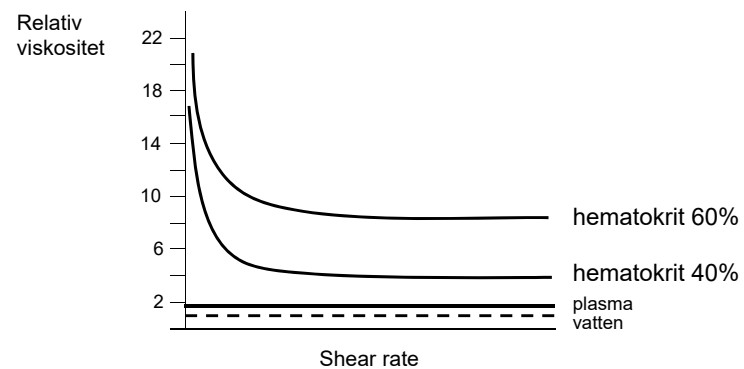
Tixotropi

- Viskositeten ändrar sig med rörelse



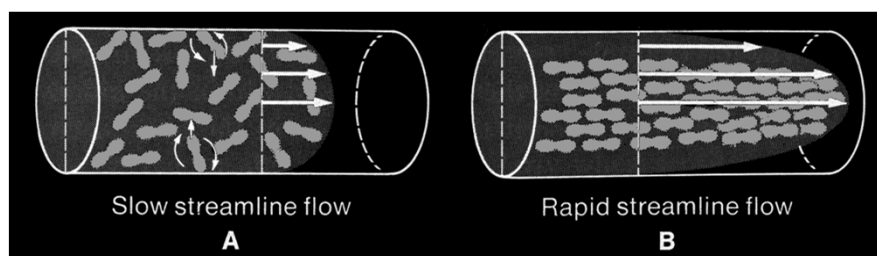
Stillastående: gel
Medan man penslar: flytande

Flödeshastigheten påverkar blodets viskositet



Folkow & Neil, Circulation 1971

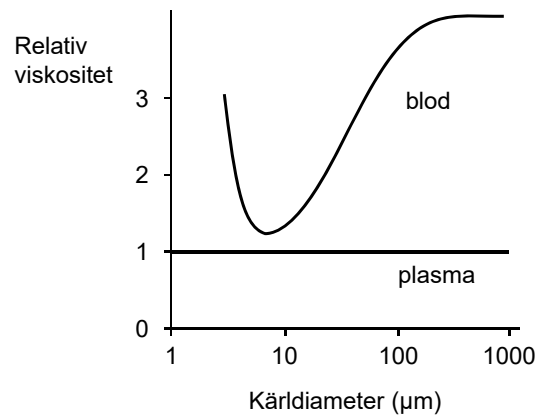
Axial orientering av blodkroppar



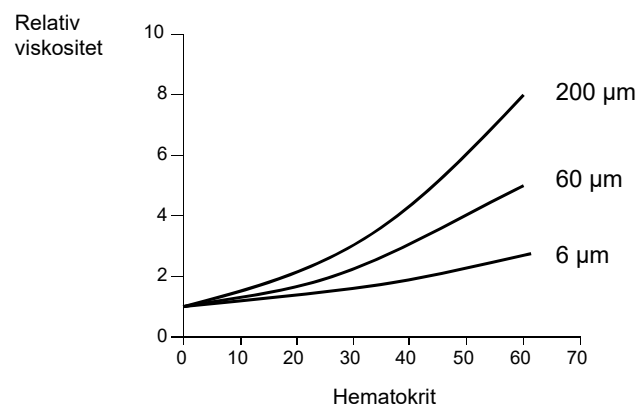
Vid låg flödeshastighet ligger blodkropparna slumpmässigt fördelade i kärlet (A) medan när hastigheten är hög samlas de i mitten (B). Detta sänker viskositeten.

Folkow & Neil, Circulation 1971

Fåhræus-Lindquist-effekten



Hematokriten påverkar viskositeten i större blodkärl



Folkow & Neil, Circulation 1971

Flödesmotstånd (resistans)

- Allt som bromsar vätskerörelser
 - gnidning mot väggen
 - gnidning inuti vätskan

Låg resistans	Hög resistans
Stort rör	Litet rör
Kort rör	Långt rör
Låg viskositet (vatten)	Hög viskositet (sirap)

Ju större tryck desto större flöde vid ett visst motstånd
Lägre motstånd ger högre flöde vid samma tryck

Ohms lag

$$U = R \cdot I \quad \text{spänning} = \text{motstånd} \cdot \text{ström}$$

$$P = R \cdot Q \quad \text{energi (tryck)} = \text{motstånd} \cdot \text{flöde}$$

$$Q = \frac{P}{R}$$

$$\text{tryck} = \text{flöde} \cdot \text{motstånd}$$



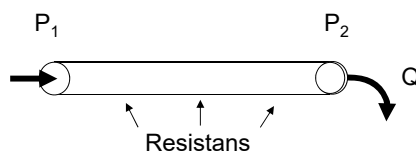
motstånd

flöde

tryck

Poiseuilles lag

(Leonard Marie Poiseuille, Frankrike, 1799-1869)



$$Q = \frac{P_1 - P_2}{\text{Resistans}}$$

$$\text{Resistans} = \frac{8 * L * \eta}{\pi * r^4}$$

$$P_1 - P_2 = Q * \text{Resistans}$$

η (eta) = viskositet

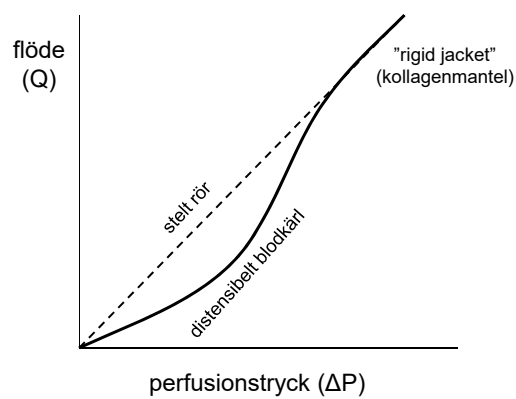
L = längd

r = radie

Poiseuilles lag

$$Q = \frac{\Delta P}{R} = \frac{\Delta P \cdot \pi \cdot r^4}{8 \cdot L \cdot \eta}$$


Blodkärlen är distensibla



Tension och spänning i kärlväggen

Tension är den kraft som förmedlas av en längdenhet av väggen (jfr rullgardin).

Laplace's lag:

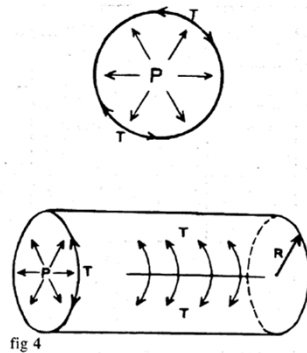
$$T = P \cdot r \quad (\text{N/m})$$

Wall stress (väggspänning) är den kraft som förmedlas av en ytenhet av väggens genomskärning.

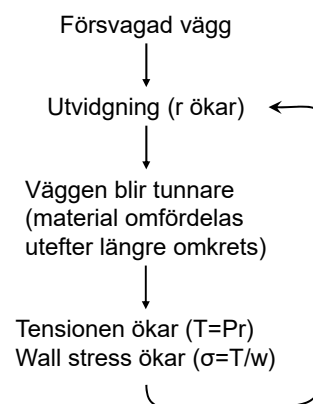
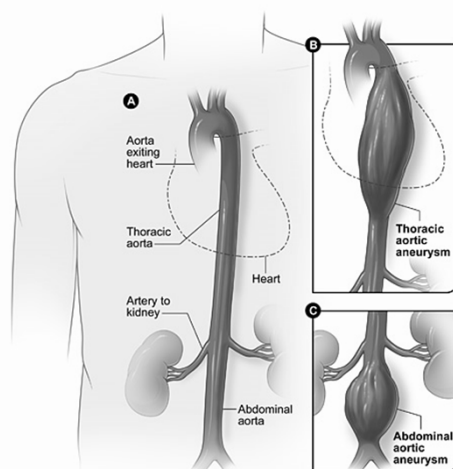
$$\sigma = T / w \quad (\text{N/m}^2)$$

r = radie

w = vägg tjocklek



Aneurysm

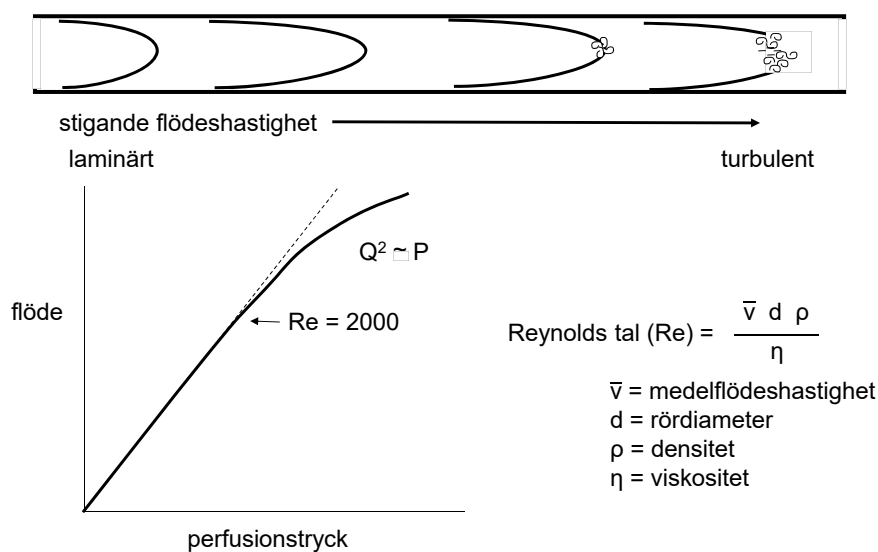


<http://www.daviddarling.info/encyclopedia/>

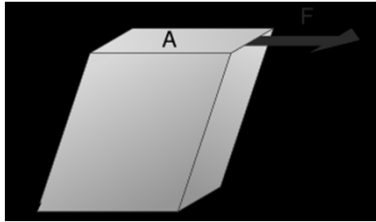
Laminärt och turbulent flöde

- De enskilda molekylerna i vätskan rör sig inte bara i rörets längsriktning utan även åt andra håll.
- Detta kan skapa virvelbildning vid hög flödeshastighet.
- Vid laminärt flöde (avsaknad av virvlar) är sambandet mellan tryck och flöde linjärt ($P=Q \cdot R$)
- När turbulens inträder stiger flödesmotståndet.
- Risken för turbulens är störst i klaffarna och i stora artärers förgreningar

Laminärt och turbulent flöde



Skjuvning



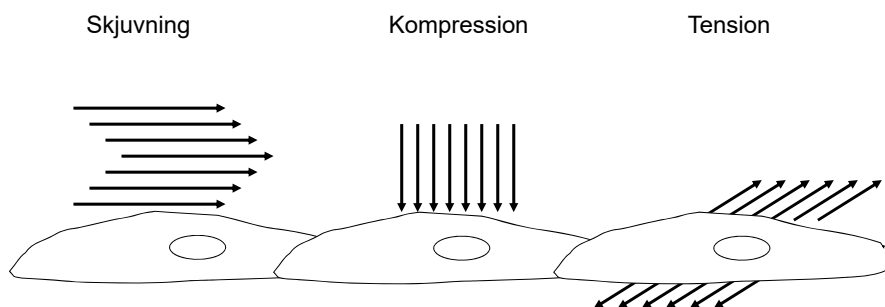
Skjuvning (eng. *shear*) är deformation av ett material som uppstår vid en förskjutning mellan två parallella ytor.

Skjuvspänning (eng. *shear stress*) är skjuvkraft per ytenhet ($\tau = F/A$).

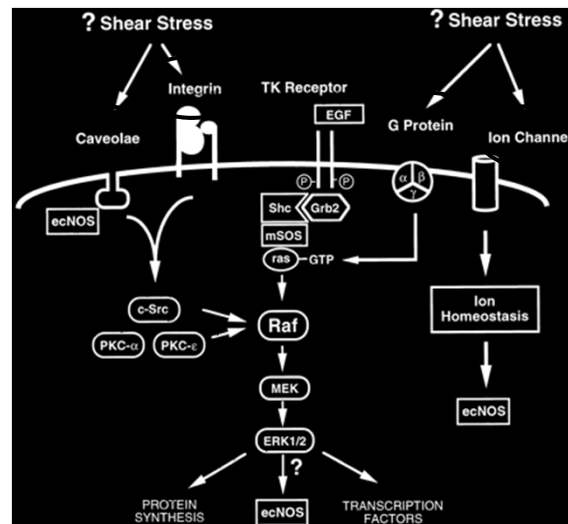
Skjuvkraften verkar parallellt med kärlytan på grund av blodflödet nära kärlväggen.

wikipedia

De krafter som verkar på endotelet

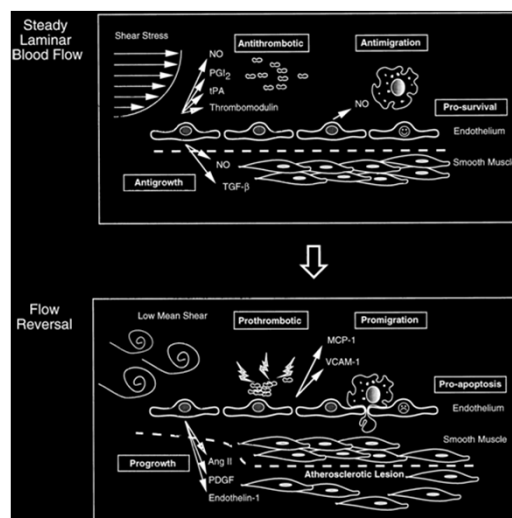


Skjuvkrafter kan ge intracellulära effekter



Traub et al., *Arterioscler Thromb Vasc Biol* 18:677-685, 1998

Olika flöde ger olika signaler



Traub et al., *Arterioscler Thromb Vasc Biol* 18:677-685, 1998