

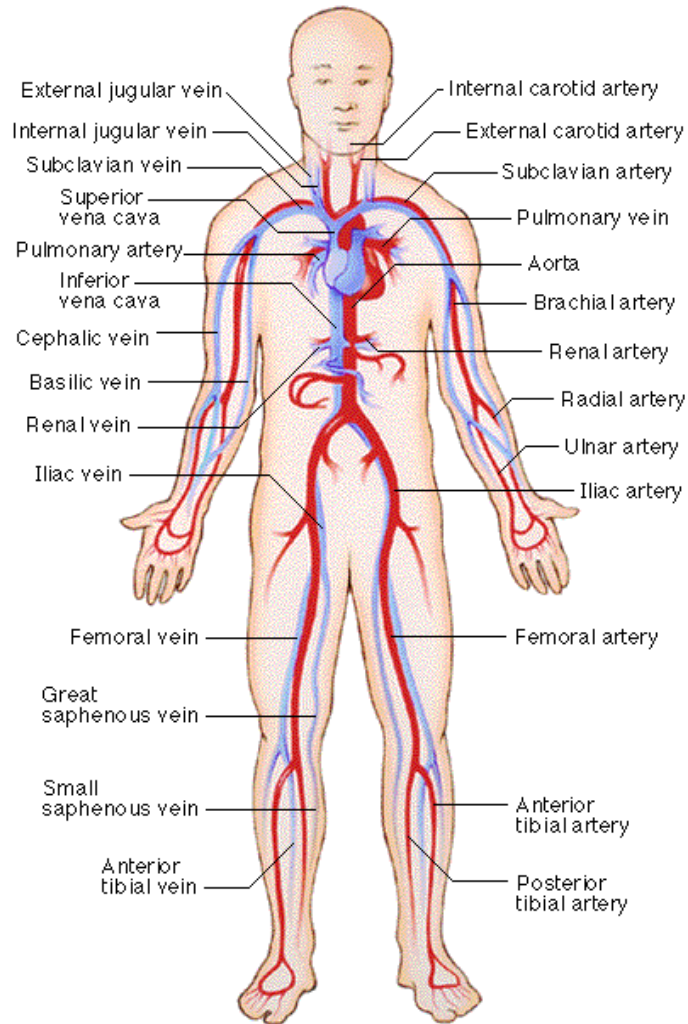


Układ krążenia krwi

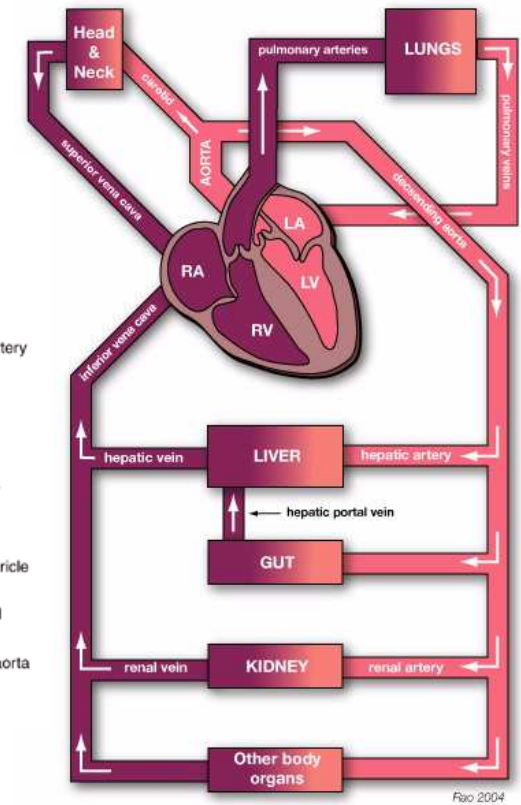
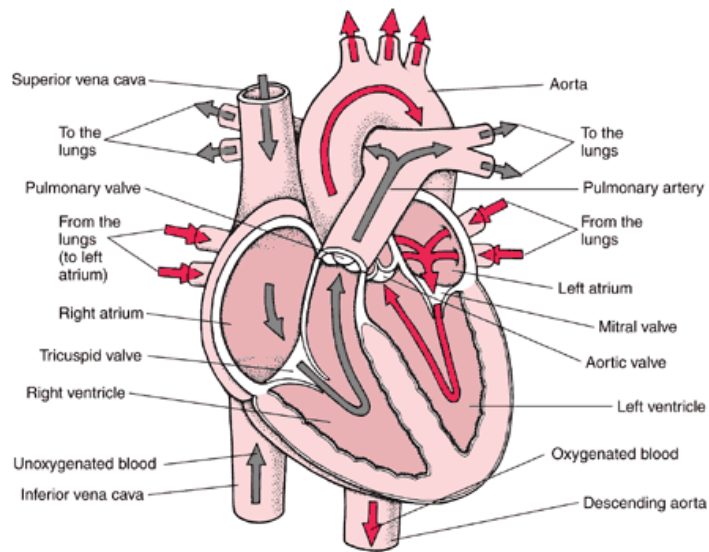
Bogdan Walkowiak

*Zakład Biofizyki
Instytut Inżynierii Materiałowej
Politechnika Łódzka*

Układ krążenia krwi



Source: INTERNET



Co powoduje przepływ krwi?

**Krew płynie w naczyniach w wyniku gradientu
Obecności ciśnienia wytworzonego przez serce**

$$\text{przepływ} = \frac{(\text{ciśnienie skurczowe} - \text{ciśnienie rozkurczowe})}{\text{opór naczyniowy}}$$

Ciśnienie krwi w układzie krążenia

Układ krążenia krwi (obieg duży)

Aorta	100 hPa (70 mm Hg)	rozkurcz skurcz
	160 hPa (120 mm Hg)	
Żyła główna	0	

Krążenie płucne (obieg mały)

Tętnice płucne	10 hPa (8 mm Hg)	rozkurcz skurcz
	30 hPa (15 mm Hg)	
Żyły płucne	9 hPa (7 mm Hg)	

Grawitacja wpływa na ciśnienie krwi

Ciśnienie hydrostatyczne krwi:

$$P = \rho g h$$

gdzie: h - wysokość słupa krwi

g - przyspieszenie ziemskie (około 10 m/s^2)

ρ - gęstość krwi (około 10^3 kg/m^3)

$$P = 100 h \text{ (w hPa)} \text{ i } 75 h \text{ (w mm Hg)}$$

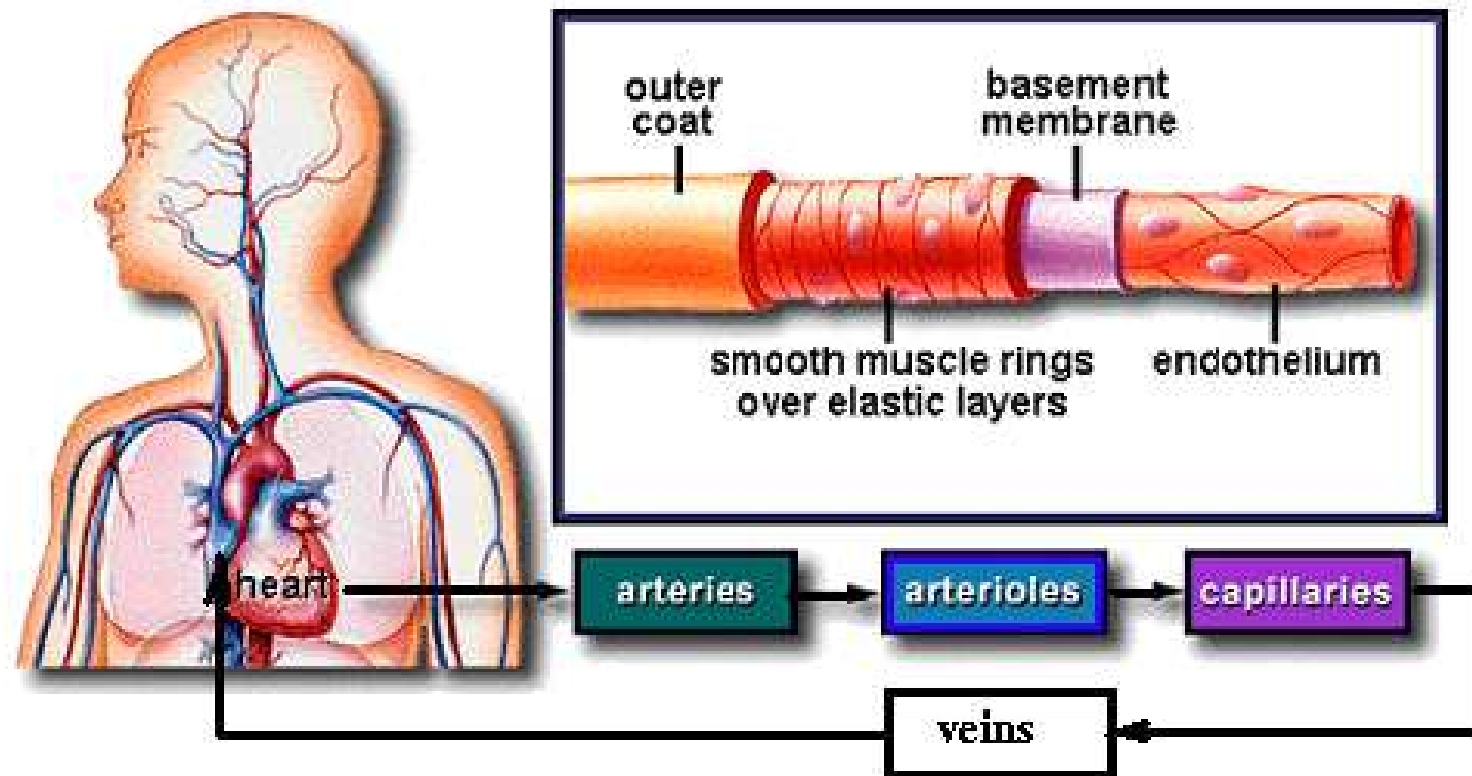
Dla tętnic w głowie ($h = 0.5 \text{ m}$ powyżej serca):

$$P = 130 - 50 = 80 \text{ hPa}$$

Dla tętnic w stopach ($h = 1 \text{ m}$ poniżej serca):

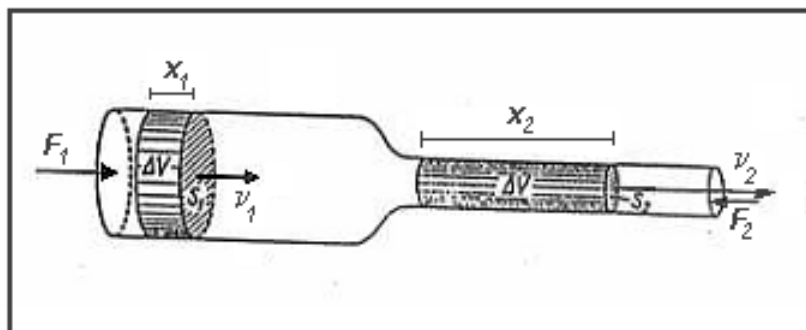
$$P = 130 + 100 = 230 \text{ hPa}$$

Zamknięty obieg krwi



Source: INTERNET

Prawo ciągłości strumienia



Strumień krwi

$$J = \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

$$J_1 = J_2 = \text{const}$$

$$S_1 v_1 = S_2 v_2 = \text{const}$$

$$J = \sum_{i=1}^n J_i$$

$$S = \sum_{i=1}^n S_i$$

Ponieważ naczynia kapilarne obecne są w olbrzymiej liczbie

$$\frac{\sum_{i=1}^n S_i \text{ (capillary vessels)}}{S \text{ (aorta)}} = 750$$

Prawo nie uwzględnia:

1. ścisłości krwi
2. pulsacji krwi
3. wymiany krwi z otoczeniem

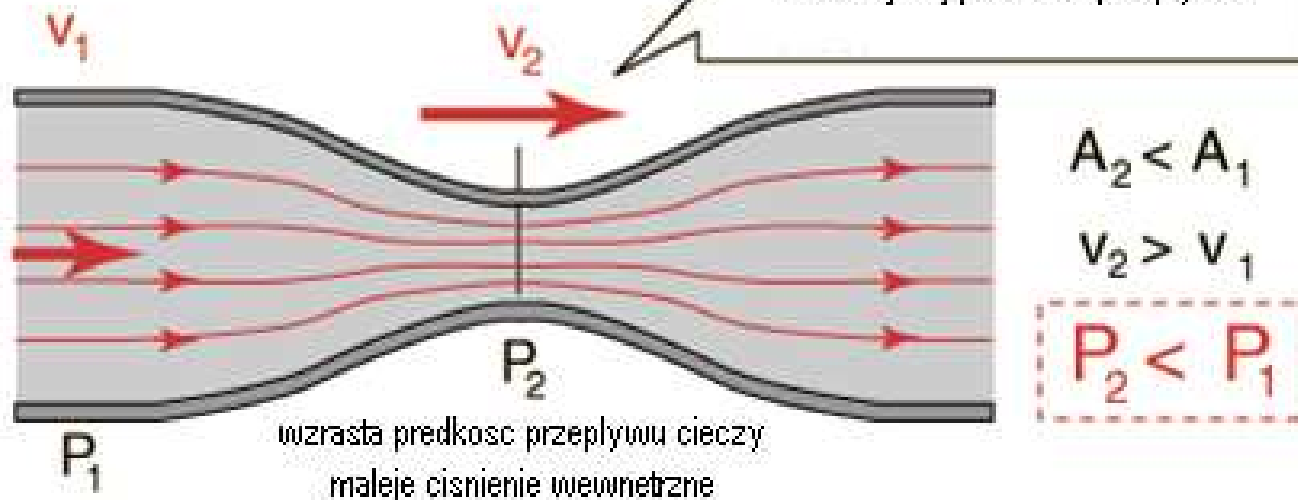
Prawo Bernoulliego

Energia na jednostkę ciśnienia przed = Energia na jednostkę ciśnienia po

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho gh_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho gh_2$$

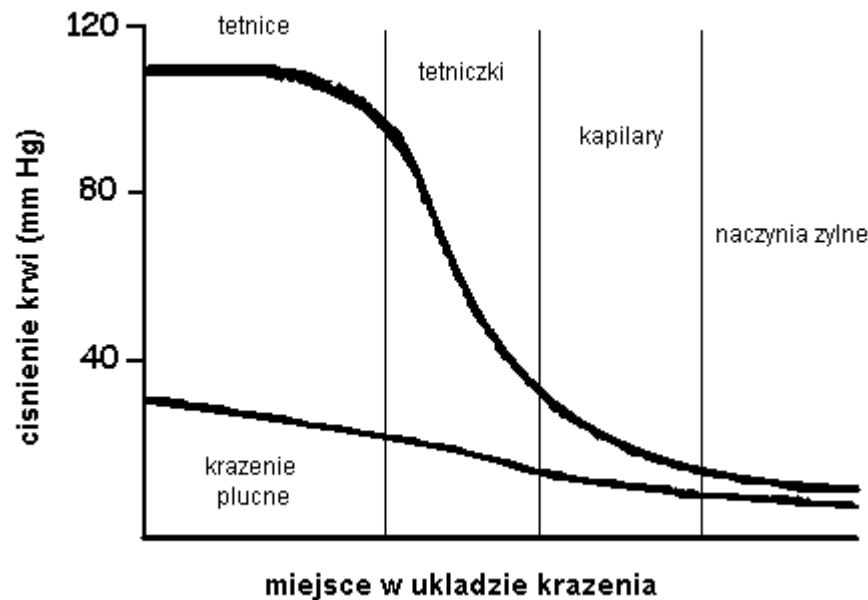
Energia ciśnienia	Energia kinetyczna	Energia potencjalna
----------------------	-----------------------	------------------------

Efekt Bernoulliego opisuje redukcję ciśnienia zachodzącego przy wzrastającej prędkości przepływu



Source: INTERNET

Oporność naczyniowa przepływu krwi



Zgodnie z prawem the Poiseuille'a-Hagen'a, prędkość przepływu objętościowego przez cylindryczne naczynie krwionośne może być opisana równaniem:

$$V = \frac{\Delta P \pi r^4}{8 \eta l}$$

gdzie $\Delta P/l$ jest gradientem ciśnienia,
 η jest lepkością krwi,
 r jest promieniem naczynia.

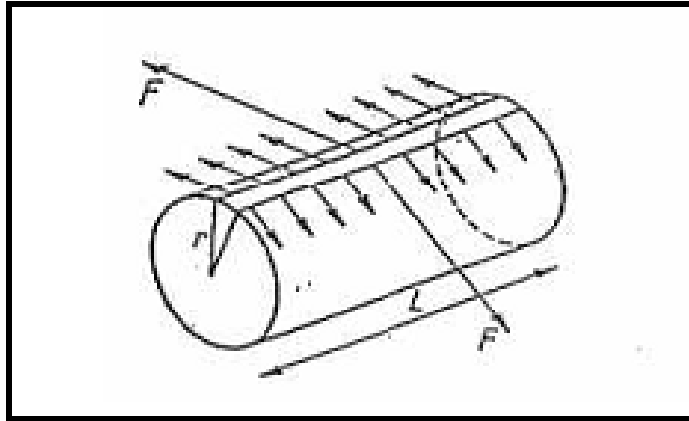
Zakładając $V = \Delta P/R$
 oporność systemu R opisana jest równaniem:

$$R = \frac{8 \eta l}{\pi r^4}$$

$$\frac{l}{r^4} - \text{Czynnik geometryczny}$$

Source: A. Piławski Podstawy Biofizyki

Ciśnienie elastyczne ścian naczyń



Naprężenie sprężyste

$$T = F/L$$

Zgodnie z prawem Laplace'a

$$P = T/r$$

gdzie:

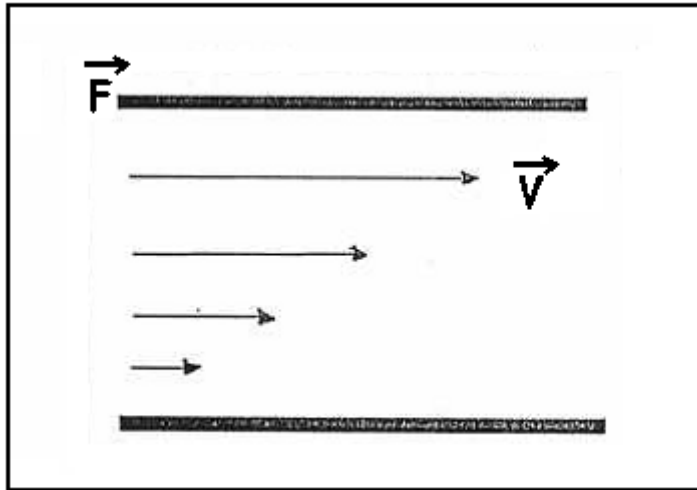
P – ciśnienie sprężyste (napięcie powierzchniowe) ściany

T – naprężenie sprężyste w ścianie

r – promień naczynia

Source: A. Pilawski Podstawy Biofizyki

Lepkość krwi



$$F = \eta S \frac{\Delta v}{\Delta x}$$

$$F/S = \eta \frac{\Delta v}{\Delta x}$$

gdzie:

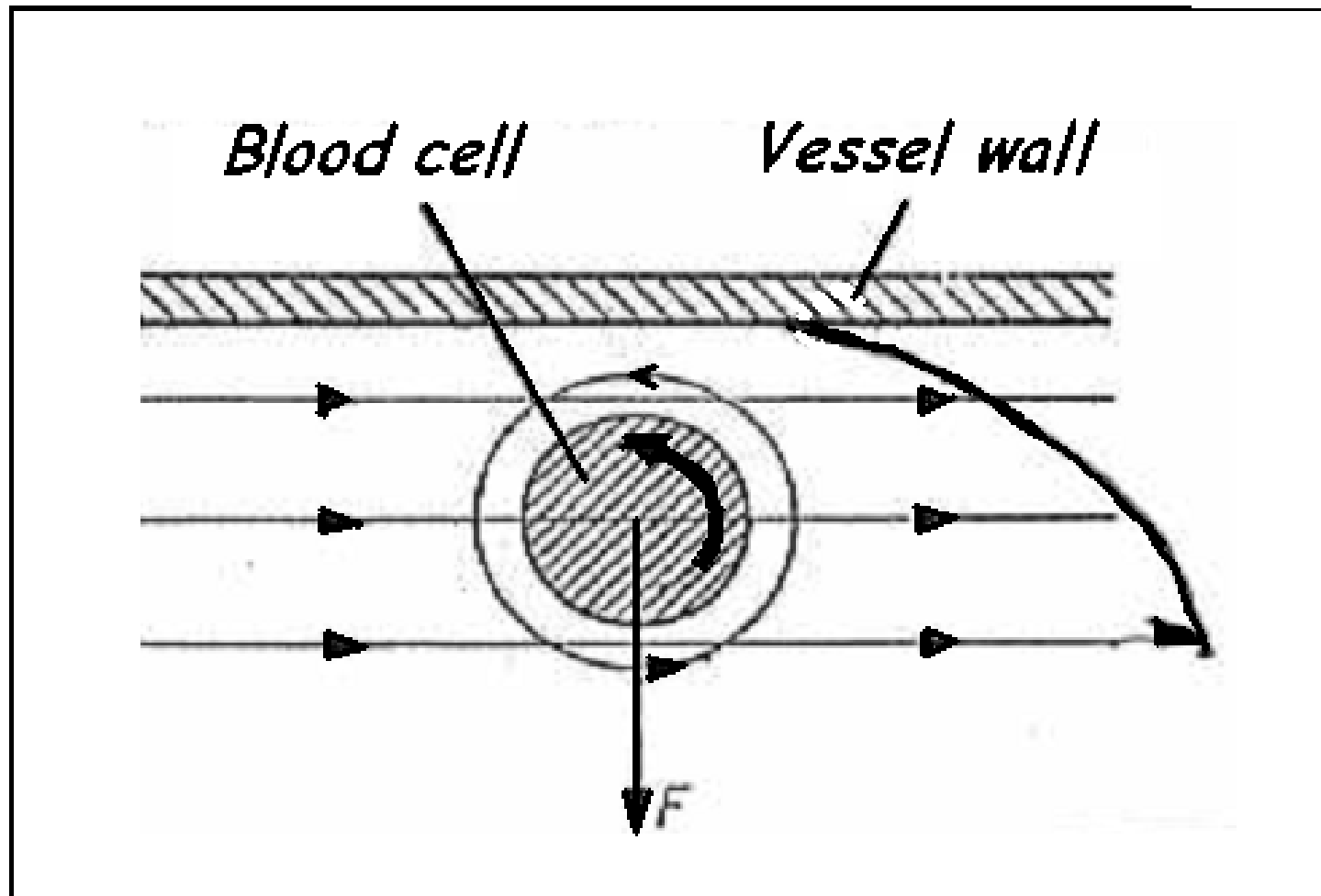
F/S – naprężenie ścinające

dV/dx – prędkość ścinania

Lepkość krwi zależy od:

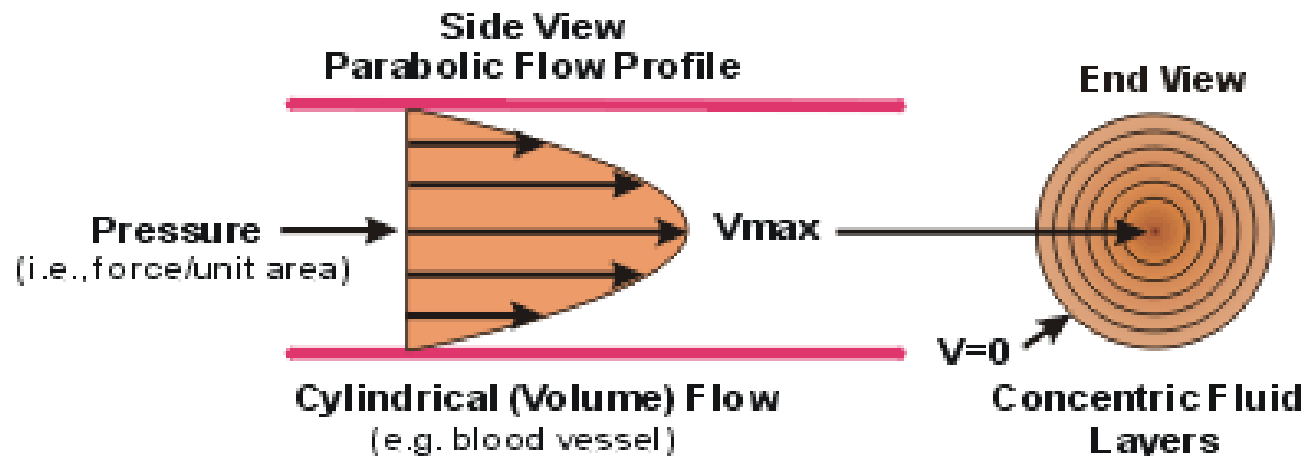
- hematokrytu
- temperatury
- przekroju naczynia
- prędkości przepływu krwi
- składu białek osocza (fibrynogen, albuminy IgG)

Osiowa kumulacja komórek krwi



Laminarny i turbulentny przepływ krwi

Przepływ laminarny jest obserwowany jest w większości odcinków układu naczyniowego. Charakteryzuje się występowaniem koncentrycznych warstw krwi przepływającej wzdłuż naczyń. Największa prędkość przepływu (V_{max}) obserwowana jest w centrum naczyń. Najniższa prędkość przepływu ($V=0$) obserwowana jest przy ścianie naczyń. Profil rozkładu wektorów prędkości przepływu ma kształt paraboliczny. Przepływ laminarny zachodzi wzdłuż długich i prostych naczyń krwionośnych w warunkach przepływu stacjonarnego.



Source: INTERNET

Laminarny i turbulentny przepływ krwi

Turbulencje występują gdy zaburzony zostaje przepływ laminarny. Ma to miejsce w zwężeniach i rozgałęzieniach naczyń, w miejscach pracy zastawek serca oraz w wstępującym odcinku aorty, szczególnie podczas wysiłku. Wystąpienie turbulencji można przewidzieć obliczając wartość liczby Reynolds'a (Re):

$$Re = \frac{v D \rho}{\eta}$$

Dla: $Re < 2100$ przepływ laminarny
 $2100 < Re < 3000$ przepływ przejściowy
 $Re > 3000$ przepływ turbulentny

Gdzie: v = średnia prędkość przepływu,
 D = średnica naczynia,
 ρ = gęstość krwi,
 η = lepkość krwi

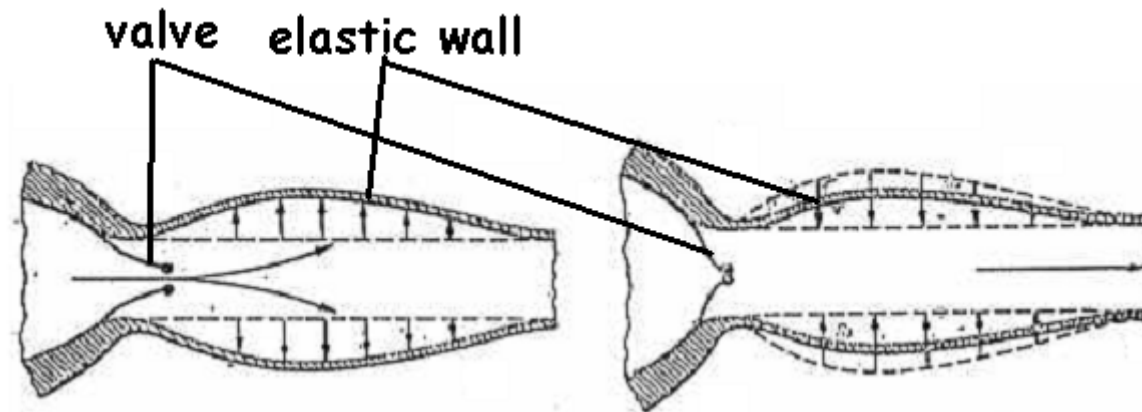
Laminarny i turbulentny przepływ krwi

Turbulencje generują fale akustyczne (szmery wyrzutowe serca), które są dobrze słyszalne za pomocą stetoskopu. Ponieważ prędkość przepływu wzmacnia turbulencje, odgłosy związane z przepływem krwi są lepiej słyszalne podczas wysiłku.



Source: INTERNET

Fale pulsu



- W czasie około 0,8 sekundy około 70 ml krwi jest wyrzucane z lewej komory serca.
- Oporność naczyniowa oraz elastyczność tętnic powodują odkształcenia sprężyste ścian tętnic, co oznacza, że energia kinetyczna przepływu krwi zamieniana jest w energię potencjalną sprężystych ścian naczyń.
- W ten sposób formowana jest fala tętna . Jest to sprężyste odkształcenie ścian naczyń tętniczych.

Source: A. Piławski Podstawy Biofizyki

Praca serca

- Praca objętościowa serca ($p dV$) wykonana jest w celu pokonania ciśnienia obecnego w naczyniach krwionośnych.
- Praca wewnętrzna (praca kinetyczna $\rho v^2 dV/2$) wykonana jest nadania krwi energii kinetycznej.

	komora lewa	komora prawa
praca objętościowa	0,91 J/puls	0,15 J/puls
praca kinetyczna	0,006 J/puls	0,006 J/puls

Serce w stanie spoczynku wykonuje:
pracę objętościową = 1,06 J/puls
Pracę kinetyczną = 0,012 J/puls

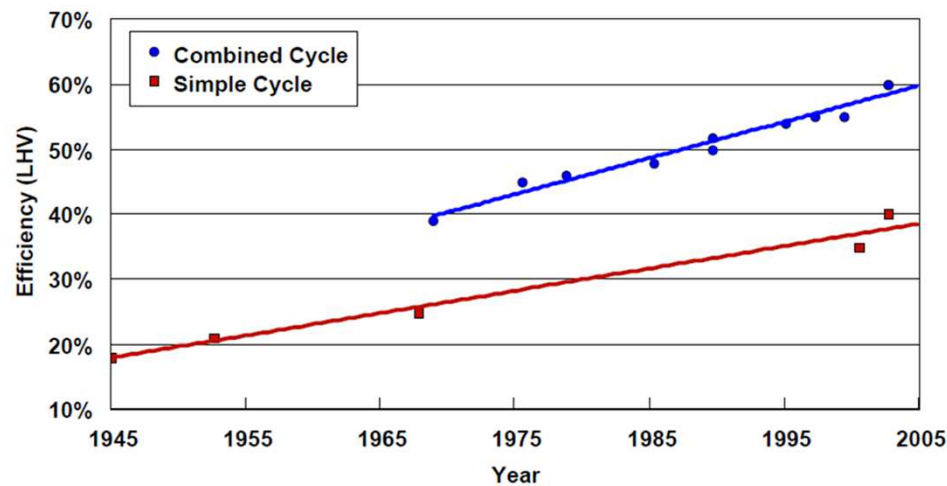
Moc serca

Dzieląc pracę przez czas możemy otrzymać moc serca:

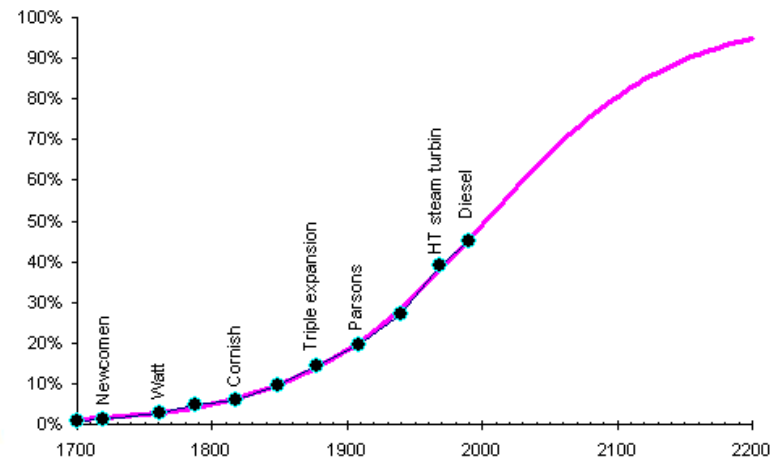
$$\mathbf{P = 1,072\ J / 0.8\ sek. = 1,34\ W}$$

W trakcie wysiłku praca kinetyczna serca może wzrosnąć wiele razy, w związku z czym moc serca również wzrasta.

Wydajność serca



Source: Comparative Study on Energy R&D Performance: Gas Turbine Case Study
Unger D. & Herzog, H., MIT, 1998. (Efficiencies calculated on Lower Heating Value (LHV) basis)



http://www.growth-dynamics.com/news/Jul15_02.htm

Wydajność serca ssaków wynosi **około 20-25%**
i jest stosunkowo stała.