

Plicní cirkulace

Poměr plicní ventilace a perfuse

vaclav.hamp@lf2.cuni.cz

<http://fyziologie.lf2.cuni.cz>

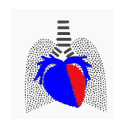
<http://vh.cuni.cz>



prof. MUDr. Jan Herget, DrSc
(1945-2019)



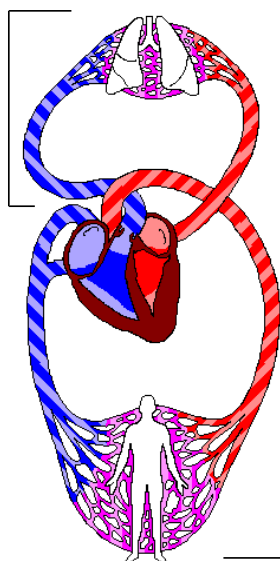
UNIVERZITA KARLOVA
2. lékařská fakulta



Zvláštnosti plicní cirkulace

- Funkce (O_2 do krve)
- ~ celý srdeční výdej
- Kolem kapilár vzduch
→ žádná opora proti
intravaskulárnímu tlaku
→ ten musí být nízký
- Vysoký průtok při nízkém
tlaku → nízký cévní odpor

Malý
(plicní)

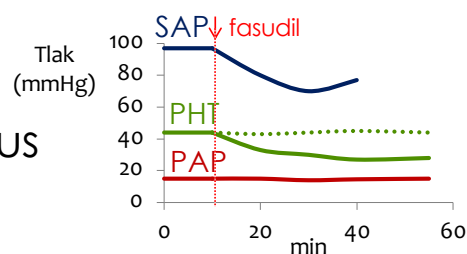
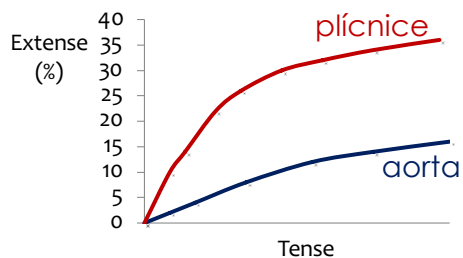


Velký
(systémový)



Plicní cirkulace: ve zdraví nízký klidový cévní odpor

- Krátké cévy
- Hagen–Poiseuille
 $R = 8L\eta / \pi r^4$
- Tenká stěna cév
(velká poddajnost)
- Minimální klidový tonus



Tlaky v plicní cirkulaci

mmHg	Plicní	Systemové
arteriální		
začátek kapiláry		
konec kapiláry		
atrium		
hnací tlak		
zaklínění		



Metody

■ Katetrizace

✓ tlaky



André Frédéric **Cournaud** (1895 - 1988)

Werner Theodor Otto **Forßmann** (1904-1979)

Dickinson Woodruff **Richards, Jr.** (1895-1973)

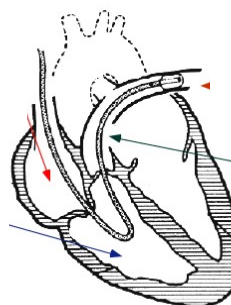
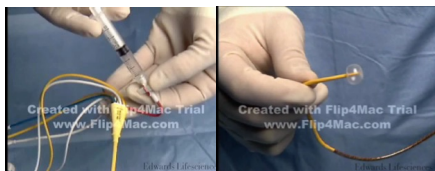
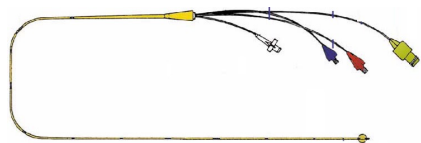
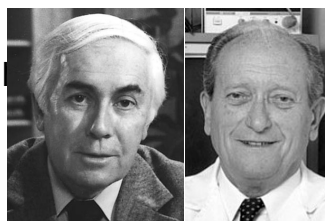
Nobelova cena 1956



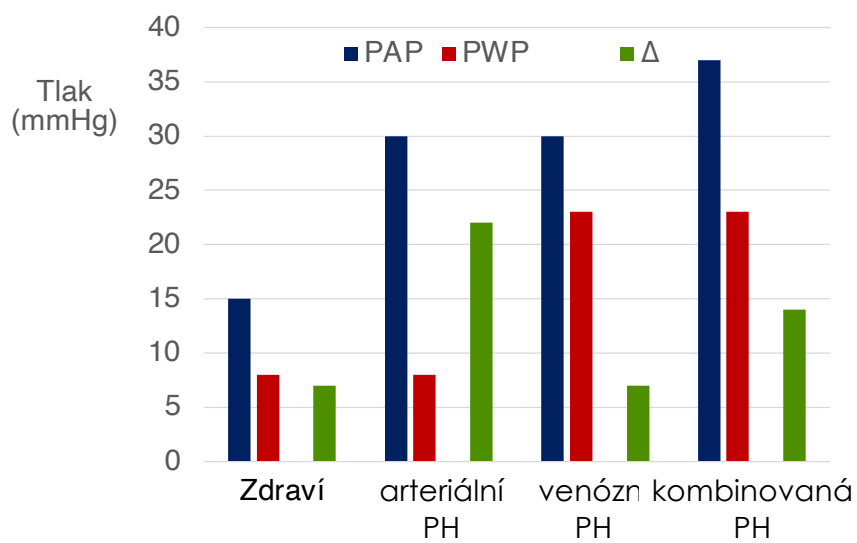
Metody

■ Katetrizace (Swan-Ganz)

- ✓ tlaky (vč. v zaklínění)
- ✓ srdeční výdej



Tlak v zaklínění



Bronchiální cirkulace

- Systémové řečiště
- Výživa dých. cest a větších plicních cév
- Část anastamozuje do plicních žil:
“fyziologický” zkrat
 - cca 1% srdečního výdeje
 - snižuje PaO₂ o ~2 mmHg, SaO₂ o ~0.5%
- Při embolii umí částečně nahradit plicní cévy

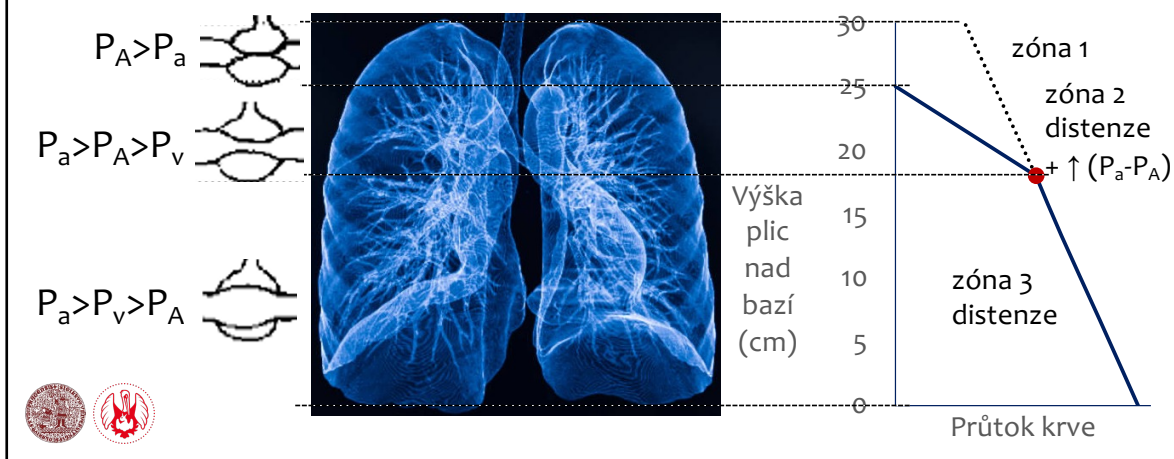


Další funkce plicní cirkulace

- Metabolické
 - ACE (1 & 2)
 - odstraňování BK, ET, 5-HT...
- Filtrování embolů
 - PAP v klidu ↑ až při ucpání >30% řečiště
 - postupně likvidovány



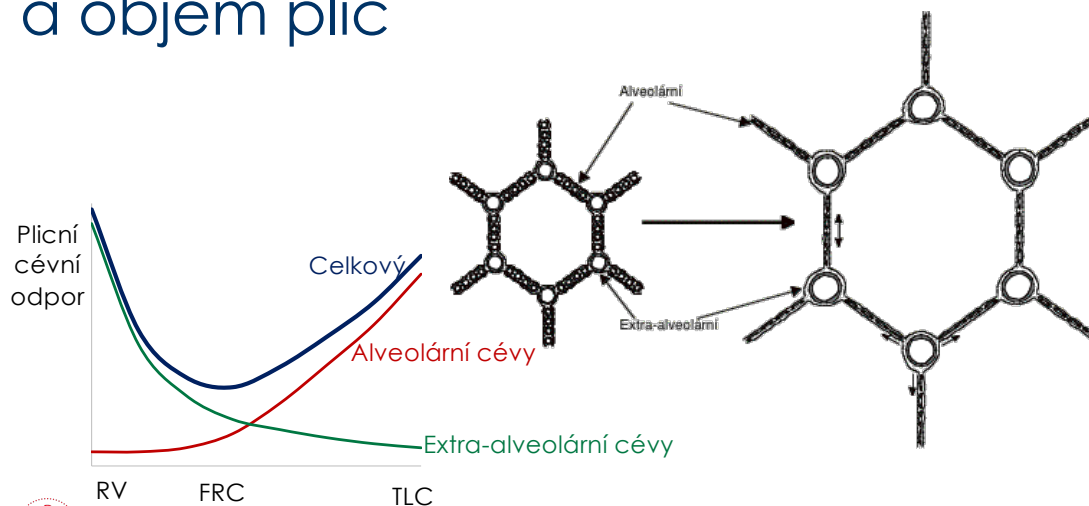
Gravitace a průtok krve plicemi



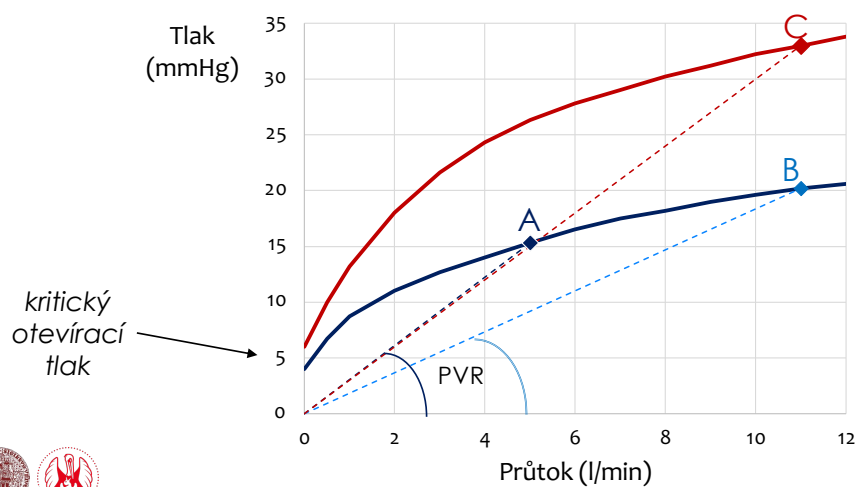
Důsledky zonality plicní hemodynamiky

- Při malém $\uparrow P_v$ nemusí $\uparrow P_a$
 - až při $P_v > P_A$ roste P_a úměrně P_v (zóna 3)
- Edém nejdřív dole (největší tlak a průtok)
- Umělá (přetlaková) ventilace - ubývá zóny 3 ve prospěch zón 1 a 2

Odpor plicního řečiště a objem plic



Plicní cévní odpor



Zvýšení srdečního výdeje (např. námaha)

- ↓ PVR (hl. mikrocirkulace):
 - distenze
 - nábor (zóny, kritický otevírací tlak)
- → jen minimální ↑ tlaku
 - šetří srdce, brání riziku edému
 - extrémní námaha: někdy až tzv. „stress failure“ plicních kapilár
 - průchod krvinky plic. kapilárou se zkracuje z ~0.8 sec až na ~0.3 sec



Regulace plicního oběhu

- Průtok = srdeční výdej
 - nervy minimálně
 - jen ↑ žilního návratu sympatikem
- Humorální vlivy
 - destičky, makrofágy, endotel,...
 - TxA₂, PGI₂, NO, ET, 5-HT, ROS,...
 - hl. patologie
- Lokální regulace
 - intraorgánová distribuce průtoku (udržování V/Q)



Poměr ventilace/perfuze (\dot{V}/\dot{Q})



Poměr ventilace/perfuze (\dot{V}/\dot{Q})



Poměr ventilace/perfuze (\dot{V}/\dot{Q})



Poměr ventilace/perfuze (\dot{V}/\dot{Q})



↑ poměr ventilace/perfuze
(\dot{V}/\dot{Q})

Ventilace



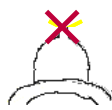
↑ \dot{V}/\dot{Q}
Mrtvý prostor



Perfuzie



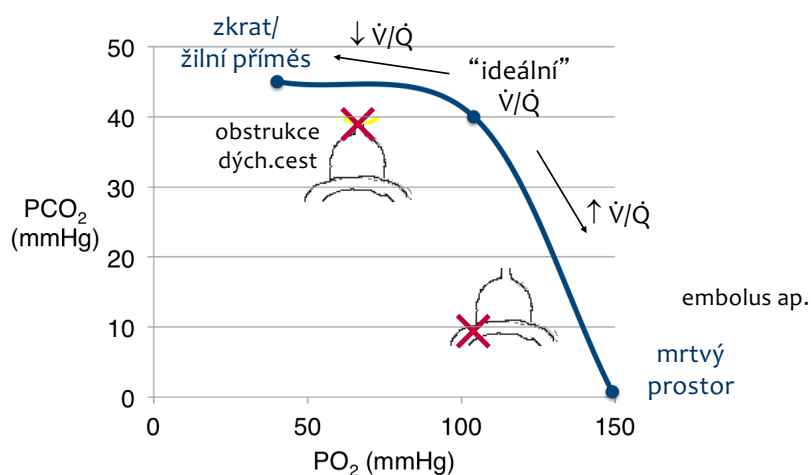
↓ poměr ventilace/perfuze
(\dot{V}/\dot{Q})



↓ \dot{V}/\dot{Q}
Zkrat
Žilní příměs

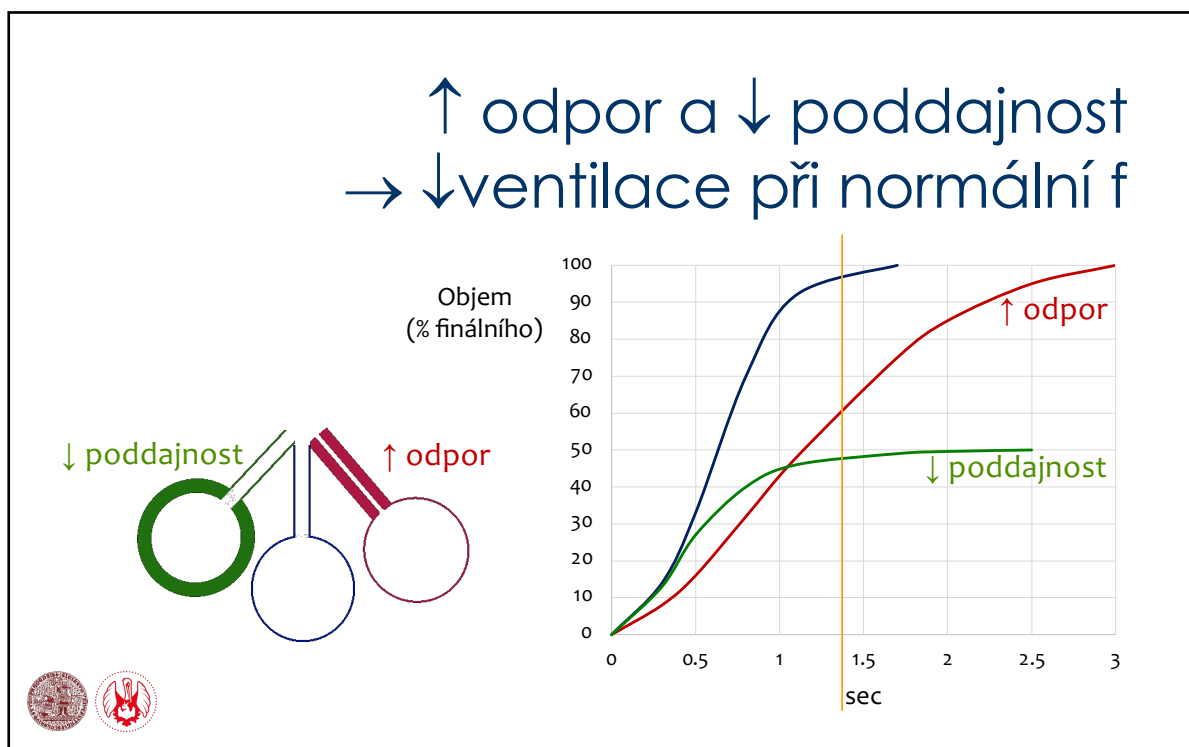


Rahn-Fenn (lokální P_{O_2} - P_{CO_2})



Nerovnoměrnost V/Q

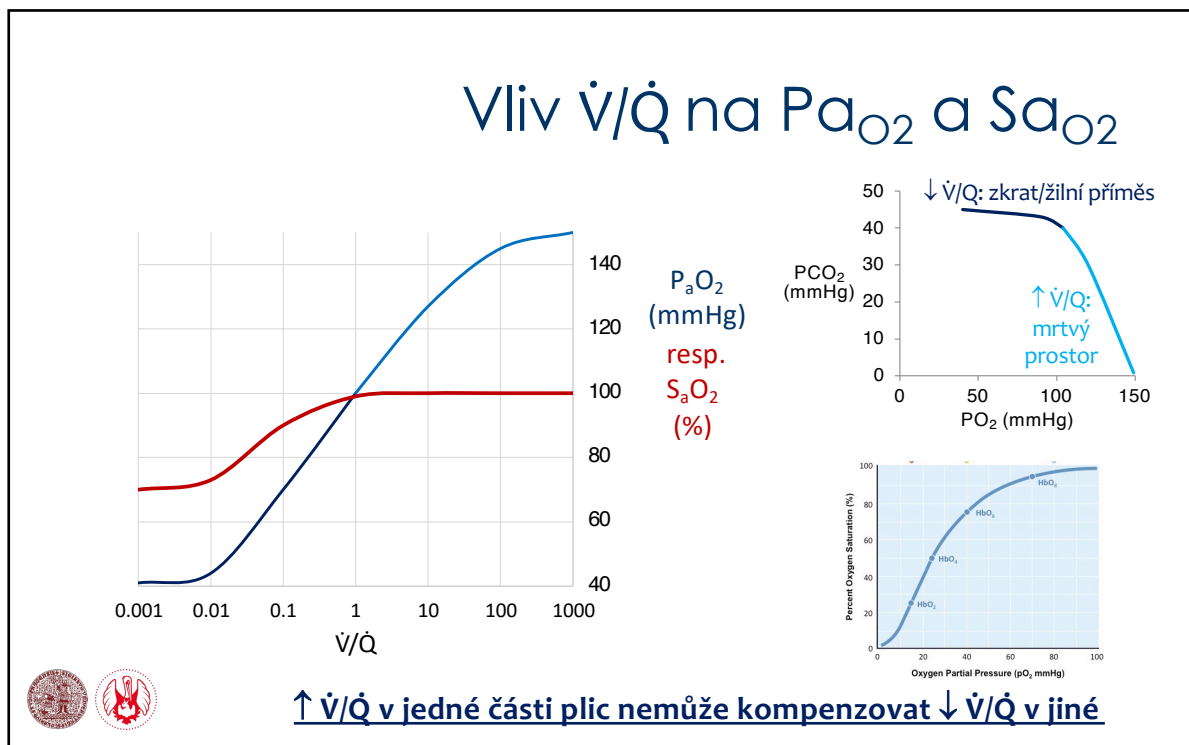
- Trochu i ve zdraví
 - gravitační nerovnoměrnost $\dot{Q} > \dot{V}$
 - mucus
 - různé rezistence a poddajnosti dýchacích cest a alveolů
- Poměr perfuze a O_2 transportu asi nerovnoměrný i v jiných orgánech



Nerovnoměrnost \dot{V}/\dot{Q}

$\rightarrow \downarrow PaO_2$

- Hlavní příčina hypoxémie (a retence CO_2) při plicních nemocech
 - $\downarrow \dot{V}/\dot{Q} \rightarrow$ žilní příměs
 - $\uparrow \dot{V}/\dot{Q} \rightarrow \dot{Q}$ protéká jen nepostíženými částmi, tedy v nich relativně $\uparrow \dot{Q} \rightarrow$ žilní příměs

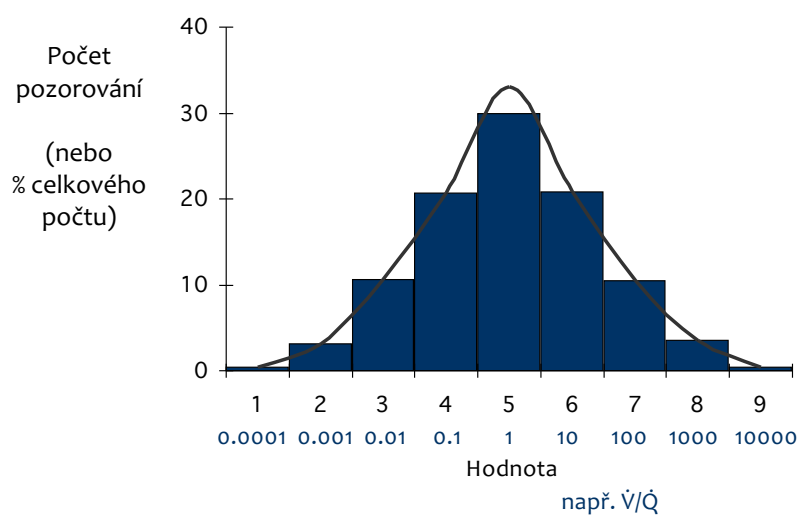


Proč zjišťovat (ne)rovnoměrnost \dot{V}/\dot{Q} ?

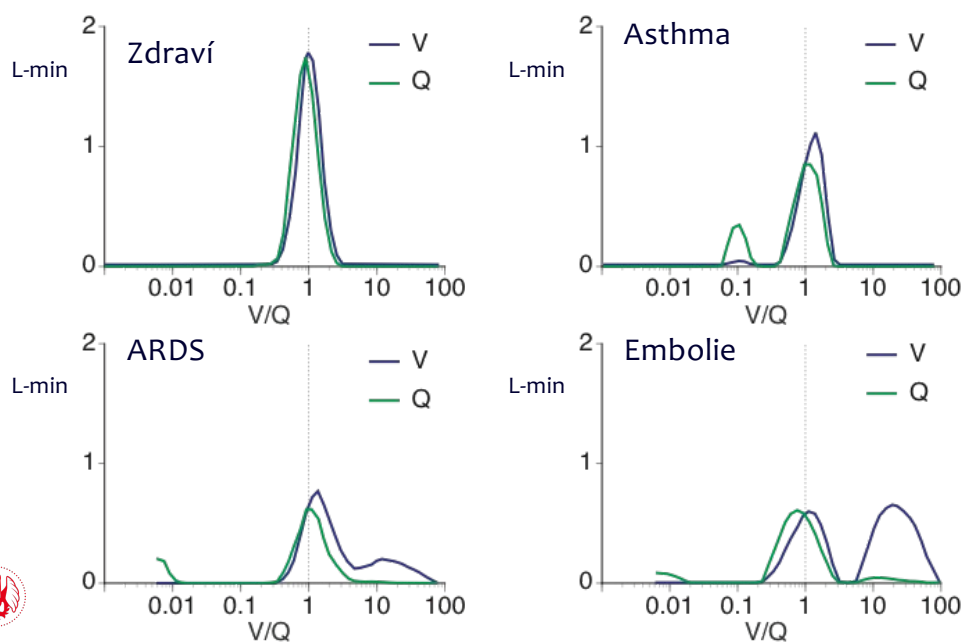
Rozlišení příčin hypoxémie:

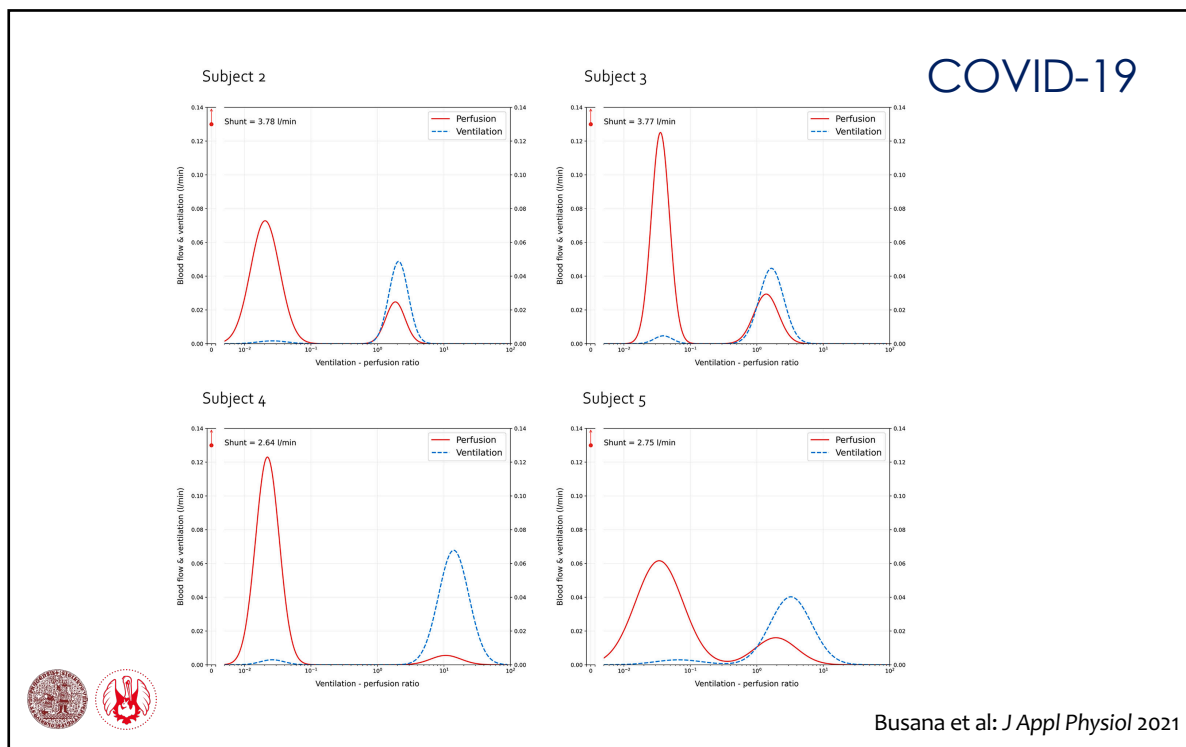
- Intrapulmonární
 - zkraty
 - mrtvý prostor
- Mimoplicní
 - hypoventilace
 - anemie
 - srdeční selhání
 - A-B disbalance

Kvantifikace nerovnoměrnosti \dot{V}/\dot{Q} : distribuce



Multiple Inert Gas Elimination Technique (MIGET)





Jak se MIGET dělá

- I.V. roztok různě rozpustných plynů
 - ✓ Aceton (nejrozpustnější)
 - ✓ Eter
 - ✓ Enfluran
 - ✓ Cyklopropan
 - ✓ Etan
 - ✓ SF₆ (nejméně rozpustný)

- Detekce ve vydechovaném vzduchu a v arteriální krvi



Princip MIGET

- Příměs vzduchu z mrtvého prostoru (kam se injikovaný plyn nemohl z krve dostat) "ředí" celkový exhalovaný vzduch
→ čím vyšší \dot{V}/\dot{Q} , tím méně injikovaného plynu je v exhalovaném vzduchu
- Příměs krve ze zkratu (kde nemohl injikovaný plyn z krve utéct) brání poklesu koncentrace injikovaného plynu v arteriální krvi
→ čím nižší \dot{V}/\dot{Q} , tím víc injikovaného plynu je v arteriální krvi

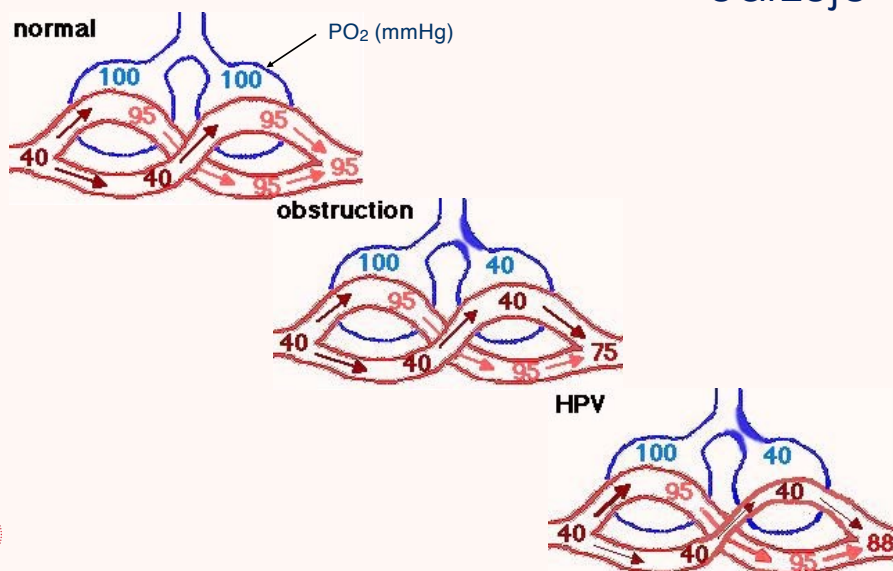


Fyziologická kompenzace nerovnoměrnosti \dot{V}/\dot{Q}

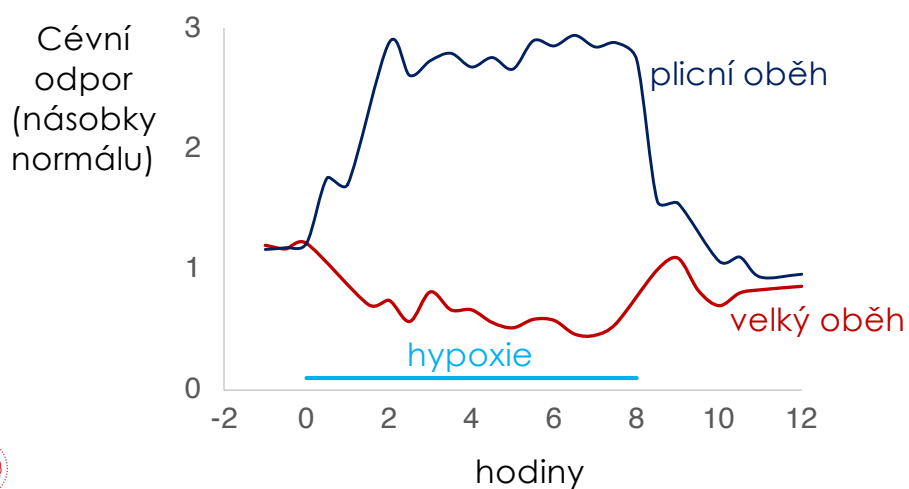
- $\uparrow \dot{V}/\dot{Q} \rightarrow$ lokální hypokapnie $\rightarrow \uparrow \text{pH}$
→ lokální bronchokonstrikce - slabé
- $\uparrow \dot{V}/\dot{Q} \rightarrow \downarrow$ surfaktant
→ \downarrow poddajnost $\rightarrow \downarrow$ ventilace
- $\downarrow \dot{V}/\dot{Q} \rightarrow \uparrow \text{CO}_2 \rightarrow \uparrow$ ventilace
➢ zlepšit $\text{CO}_2 > \text{O}_2$ (disoc. křivky)
- $\downarrow \dot{V}/\dot{Q} \rightarrow \downarrow \text{PaO}_2 \rightarrow \uparrow \text{CO} \rightarrow \uparrow \text{PvO}_2$
➢ \downarrow vliv žilní příměsi na PaO_2
- $\downarrow \dot{V}/\dot{Q} \rightarrow$ **hypoxická plicní vazokonstrikce**



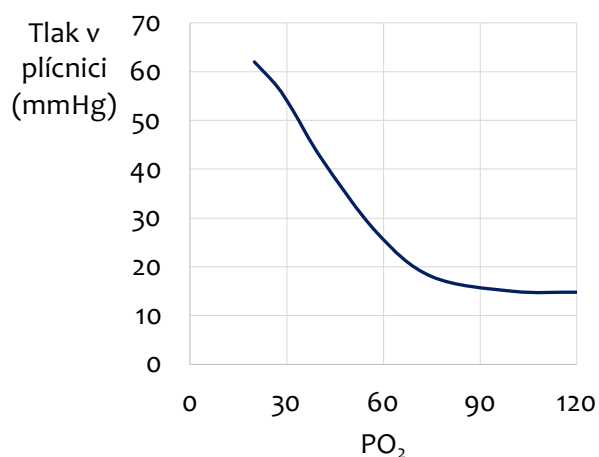
Hypoxická plicní vazokonstrikce (HPV) udržuje \dot{V}/\dot{Q}



HPV: rychlá, setrvalá, rychle reverzibilní

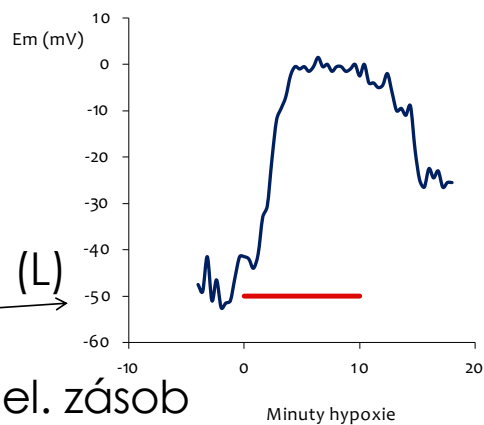


HPV: závislá na stupni hypoxie

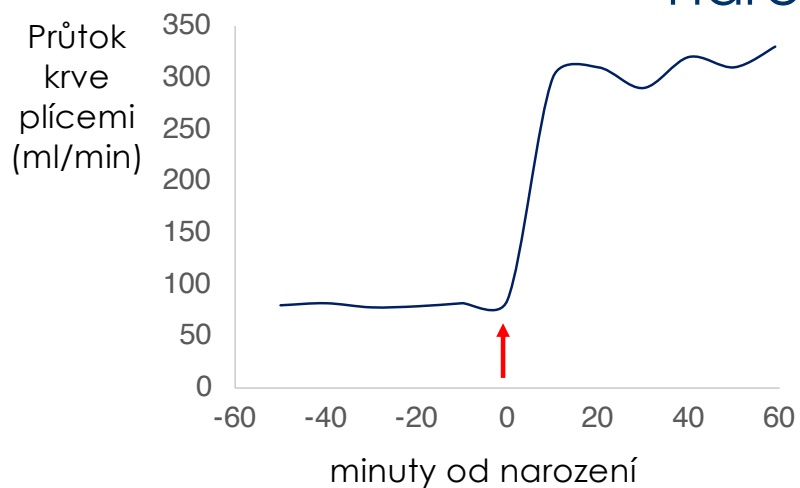


Mechanismus HPV

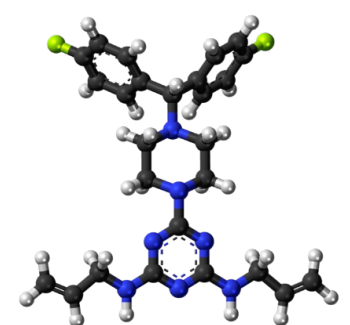
- Redoxní změny???
- Inhibice K⁺ kanálů
- Depolarizace
- Aktivace Ca²⁺ kanálů (L)
- Influx Ca²⁺ →
- Uvolnění Ca²⁺ z intracel. zásob
- Aktivace kontraktálního aparátu



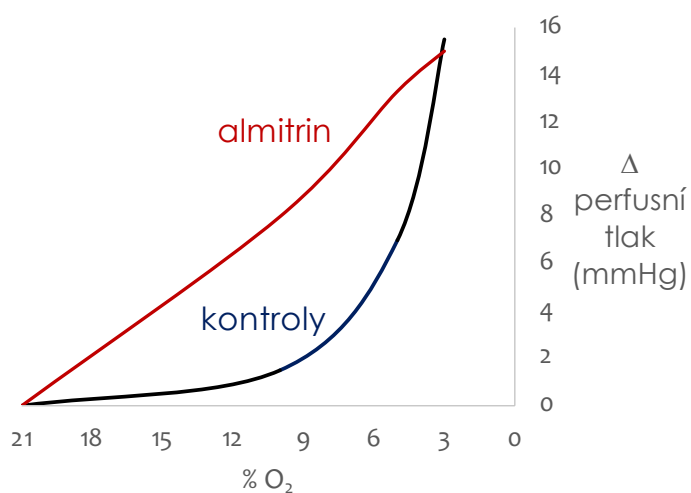
Průtok krve plícemi ↑ při narození



Almitrin zvyšuje citlivost HPV

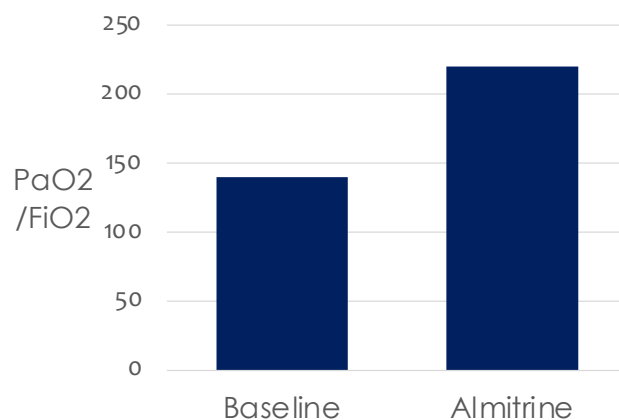


stimulant karotických tělísek



Falus, Herget, Hampel: *Eur Respir J* 1991

Almitrin pomáhá při COVID-19



Losser et al: *Anaesth Crit Care Pain Med* 2020

Filtrace v plicních kapilárách

- kapilární tlak: 7 mmHg
- negativní intersticiální tlak: 8 mmHg
- osmotický tlak intersticiální tekutiny: 14 mmHg
- Σ **CELKOVÁ SÍLA VEN:** 29 mmHg

- osmotický tlak plasmy: 28 mmHg
- Σ **CELKOVÁ SÍLA DOVNITŘ:** 28 mmHg

- Σ **Net filtrační tlak (ven):** 1 mmHg
- odsáváno lymfatickým systémem



Nemoci

■ Plicní hypertenze

- idiopatická
- sekundární
(selhání L ♥, hypoxie [ChOPN], tromby, schistosomy,...)



■ Plicní edém

- ARDS
- kardiogenní
- HAPE



■ Plicní embolie