

# Plicní cirkulace

## Poměr plicní ventilace a perfuze

vaclav.hAMPL@lf2.cuni.cz

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

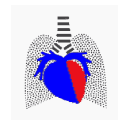
<http://vh.cuni.cz>



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



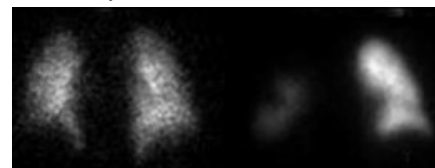
UNIVERZITA KARLOVA  
2. lékařská fakulta



1

## Transport plynů v plicích určují

- Plicní ventilace
  - jak se  $O_2$  a  $CO_2$  dostanou k alveolokapilární membráně
  - co určuje množství plynu, které se vymění mezi atmosférou a alveoly
    - mrtvý prostor
    - funkční reziduální kapacita (FRC)
- Plicní difúze
  - určuje přechod  $O_2$  a  $CO_2$  přes alveolokapilární membránu
- Plicní perfuze
  - jak je krev nasycená  $O_2$ , s malým obsahem  $CO_2$ , z plic odváděna do tkání a přiváděna krev venózní
- Poměr mezi plicní ventilací a perfuzí



ventilace

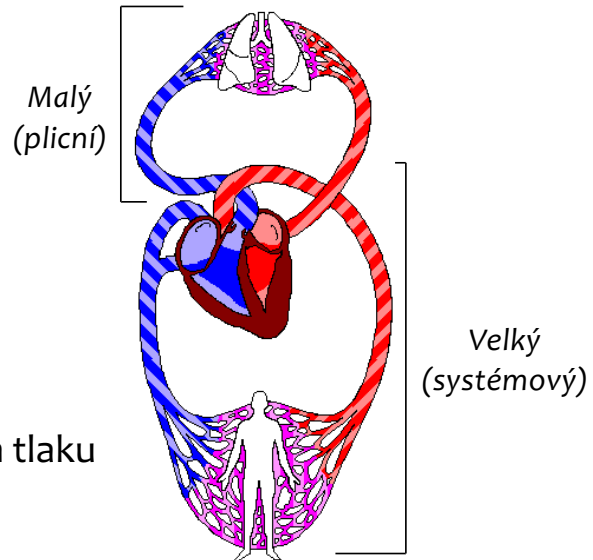
perfuse



2

## Zvláštnosti plicní cirkulace

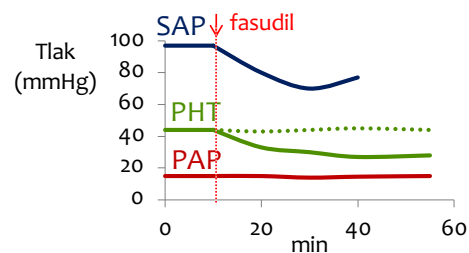
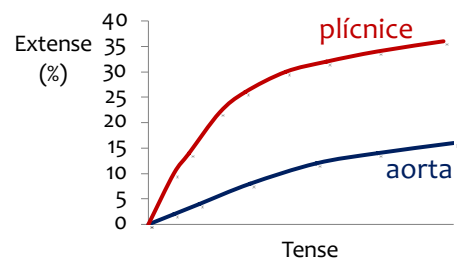
- Funkce (O<sub>2</sub> do krve)
- ~ celý srdeční výdej
- Kolem kapilár vzduch  
→ žádná opora proti intravaskulárnímu tlaku  
→ ten musí být nízký
- Vysoký průtok při nízkém tlaku  
→ nízký cévní odpor



4

## Plicní cirkulace: nízký klidový cévní odpor

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



5

## Parametry plicní vs. systémové cirkulace

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



6

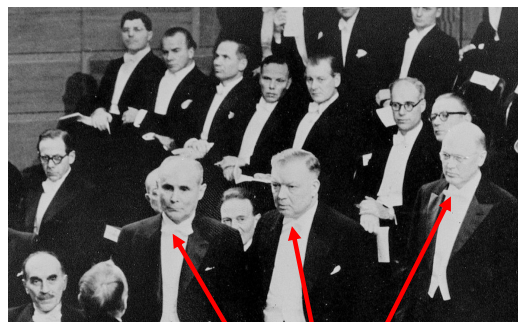
## Metody

### ■ Katetrizace

✓ tlaky



1929



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

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

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

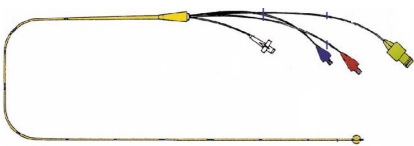
Nobelova cena 1956



7

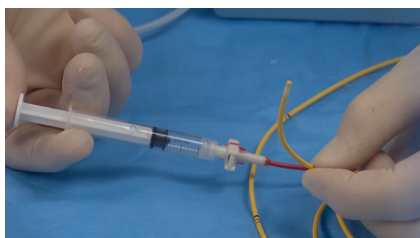


12




■ **Katetrizace (Swan-Ganz)**


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



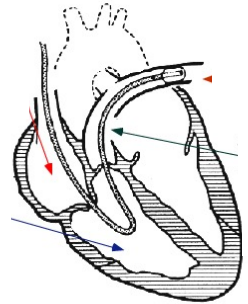
## Metody





H.J.C. "Jeremy" Swan  
(1922-2005)

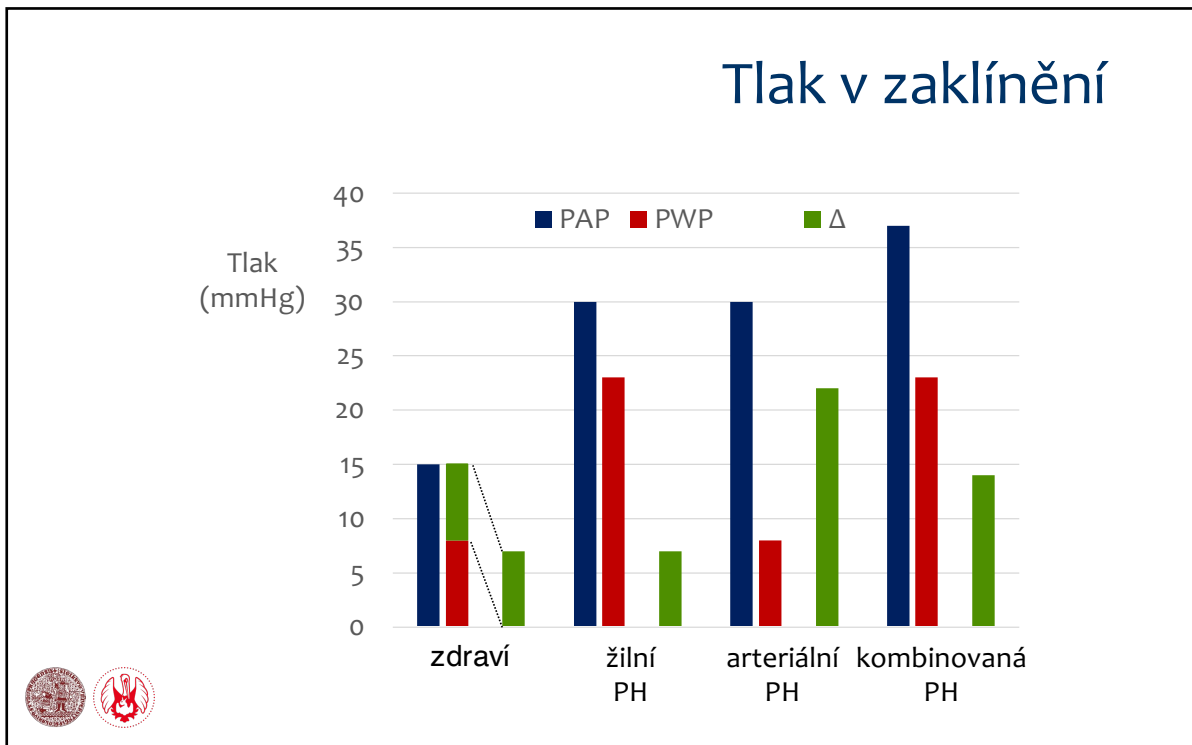


Vilém Ganz  
(1919-2009)







13



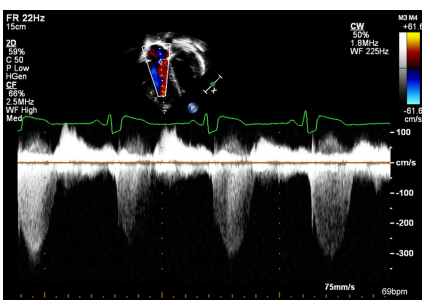
15

## Metody



Christian Andreas Doppler (1803-53)

- Katetrizace (Swan-Ganz)
  - ✓ tlaky (vč. v zaklínění)
  - ✓ srdeční výdej
  - ✓ zátěž
  - ✓ vazodilatační test
- Echokardiografie (Doppler):
  - max. rychlost trikuspidální regurgitace ( $TR_{max}$ )
  - (Bernoulli:  $\Delta P = 4 \times TR_{max}^2$ )



16

## Bronchiální cirkulace

- Systémové řečiště
- Výživa dýchacích cest a větších plicních cév
- Část anastomozuje do plicních žil:  
“fyziologický” zkrat
  - cca 1% srdečního výdeje
  - snižuje PaO<sub>2</sub> o ~2 mmHg, SaO<sub>2</sub> o ~0.5%
- Při embolii umí částečně nahradit plicní cévy



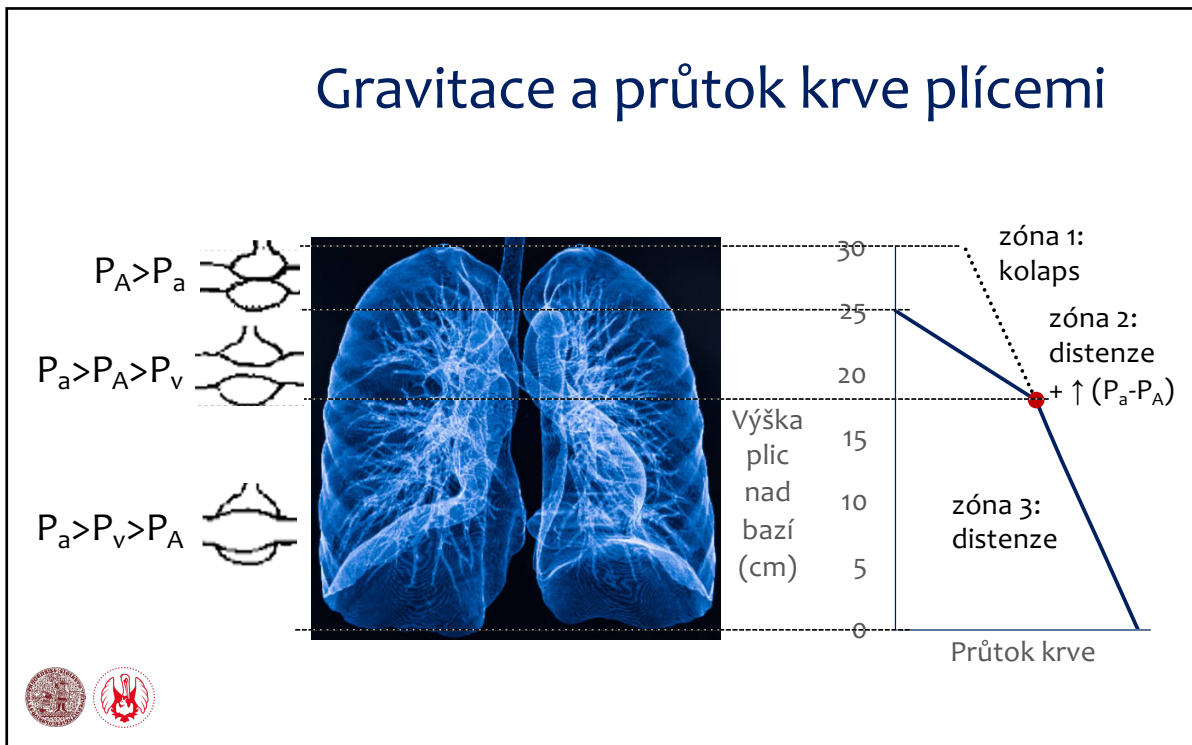
18

## 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



19

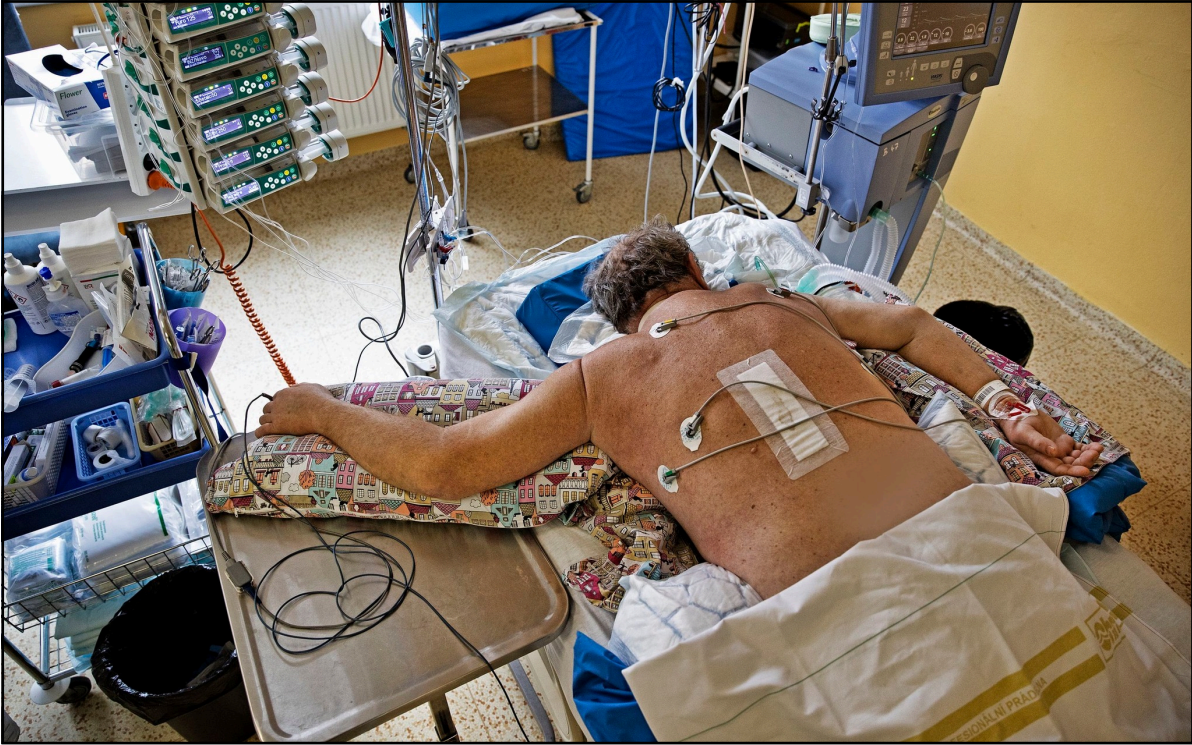


20

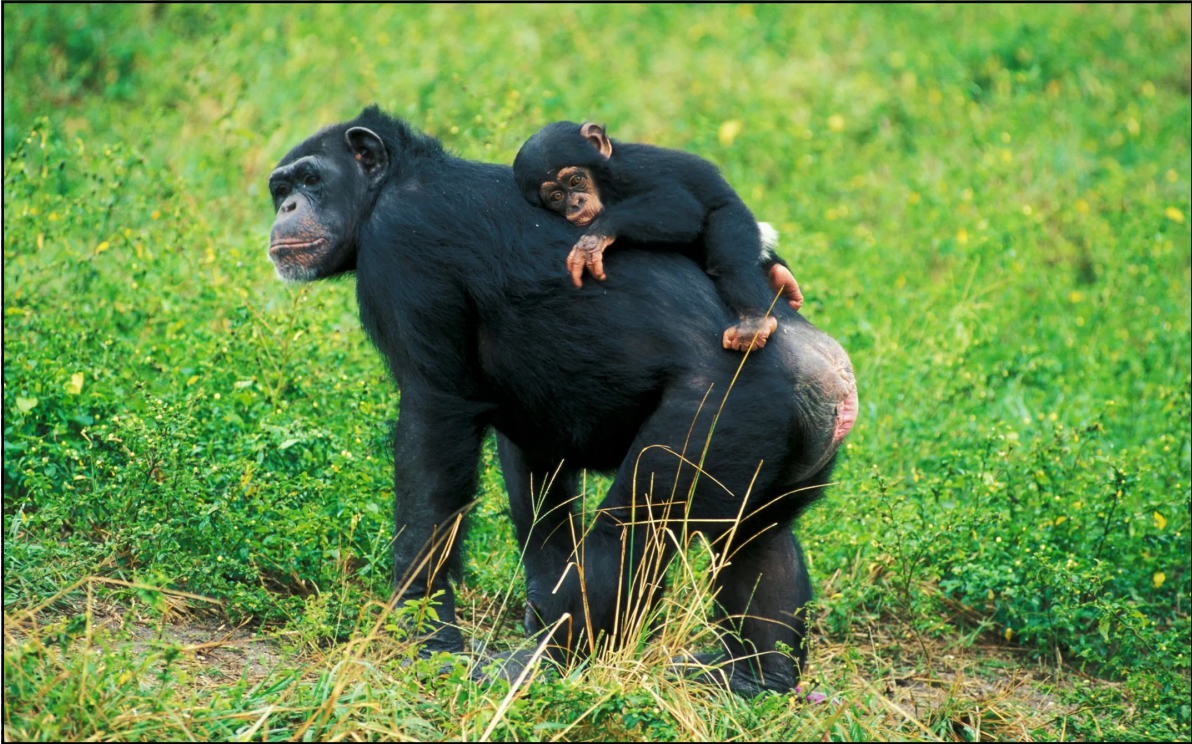
## Důsledky zonality plicní hemodynamiky

- 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)
- Tlak v zaklínění chceme v zóně 3
  - jinak měříme  $P_A$  místo  $P_V$
- Umělá (přetlaková) ventilace
  - ubývá zóny 3 ve prospěch zón 1 a 2

23

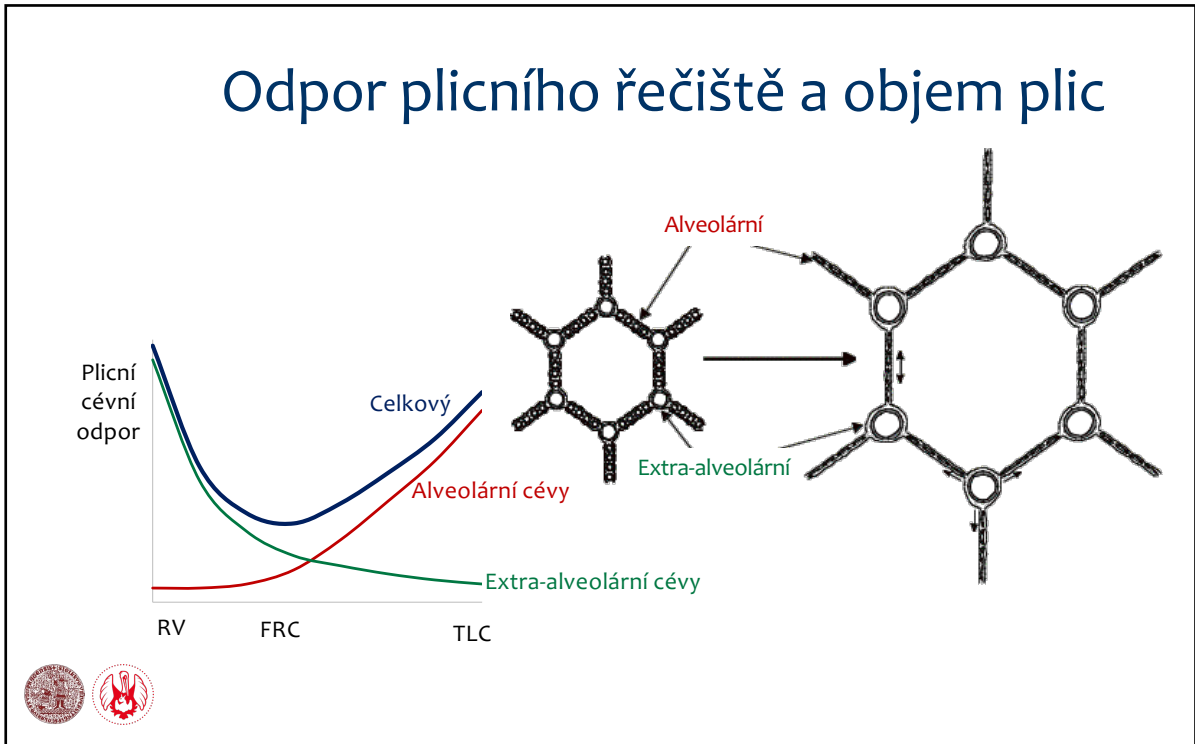


24

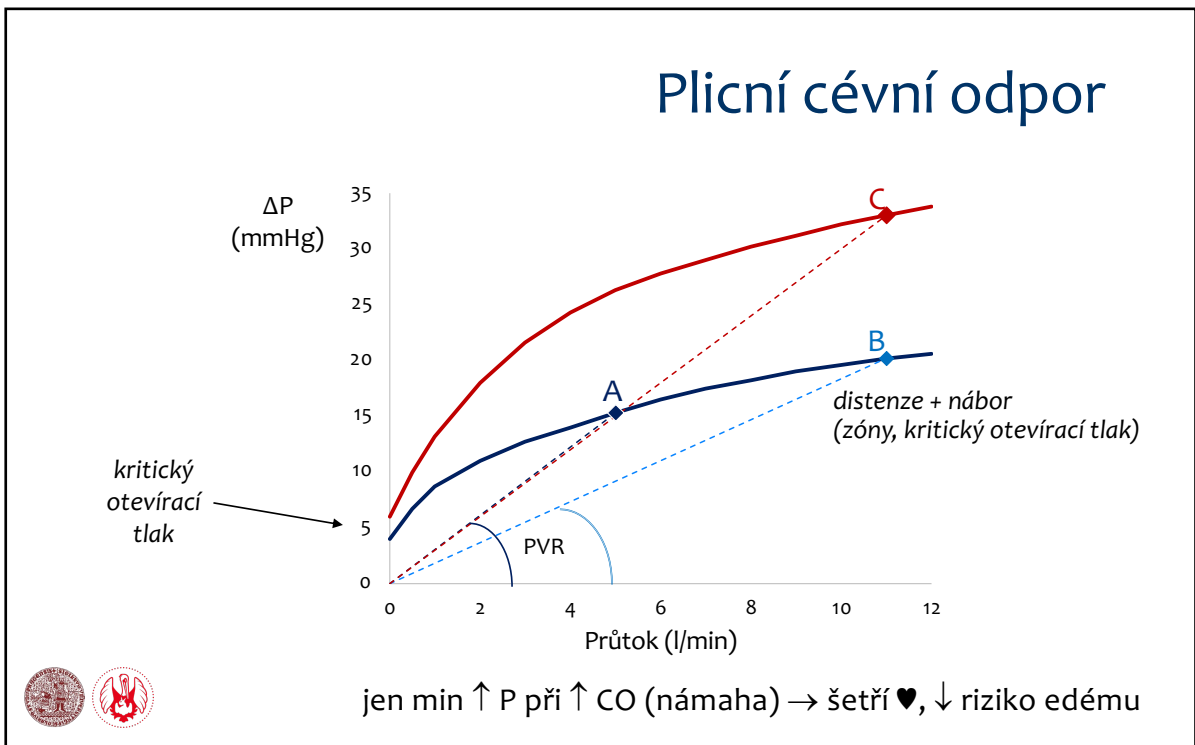


25





26



27

## Regulace plicního oběhu

- Průtok = srdeční výdej
  - nervy minimálně
    - jen ↑ žilního návratu sympatikem
- Humorální vlivy
  - destičky, makrofágy, endotel,...
  - $\text{TxA}_2$ ,  $\text{PGI}_2$ , NO, ET, 5-HT, ROS,...
  - hl. patologie
- Lokální regulace
  - intraorgánová distribuce průtoku (udržování V/Q)



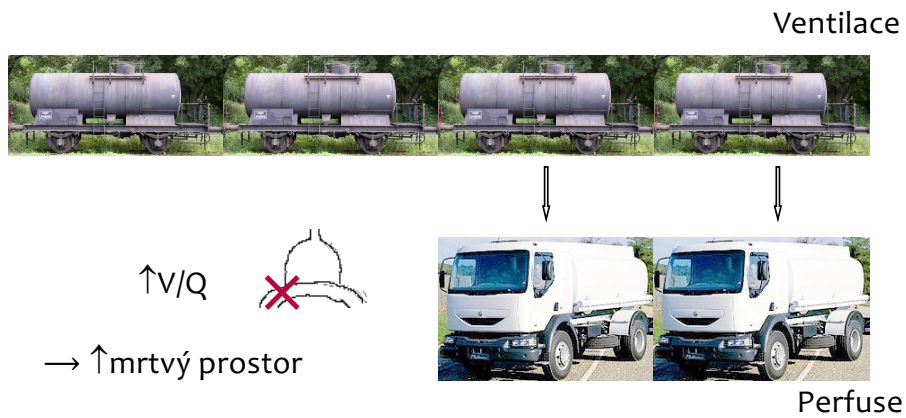
29

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



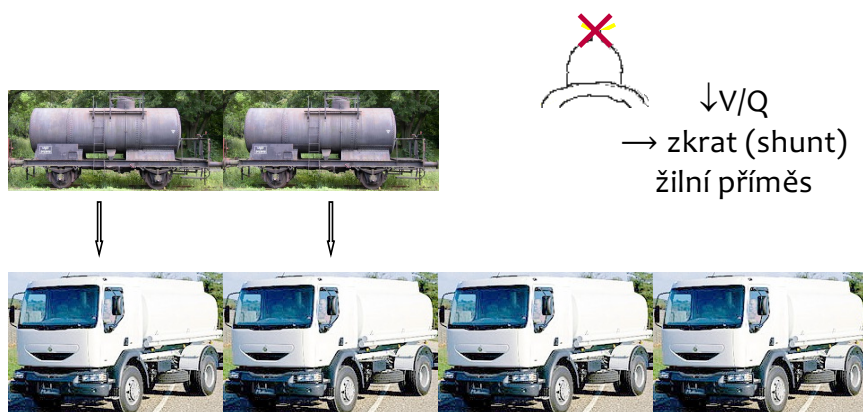
30

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



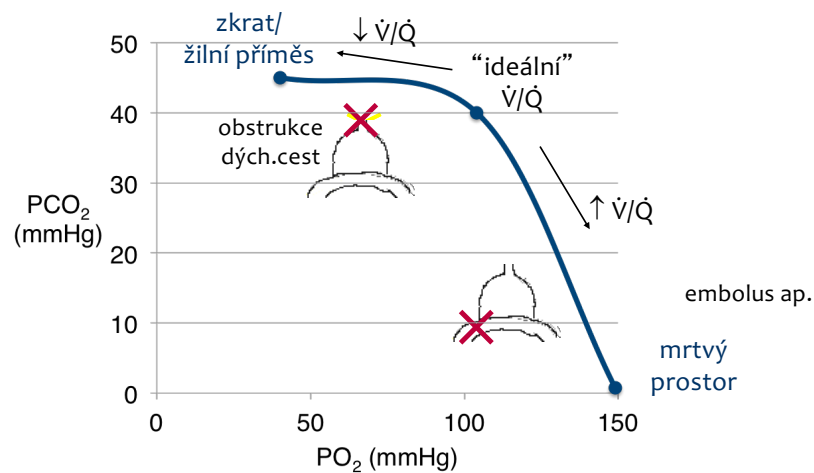
31

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



32

## Rahn-Fennův diagram (lokální $P_{O_2} \times P_{CO_2}$ )

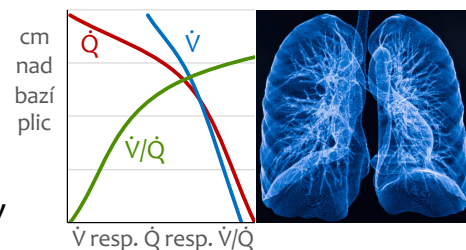


34

## Nerovnoměrnost $\dot{V}/\dot{Q}$

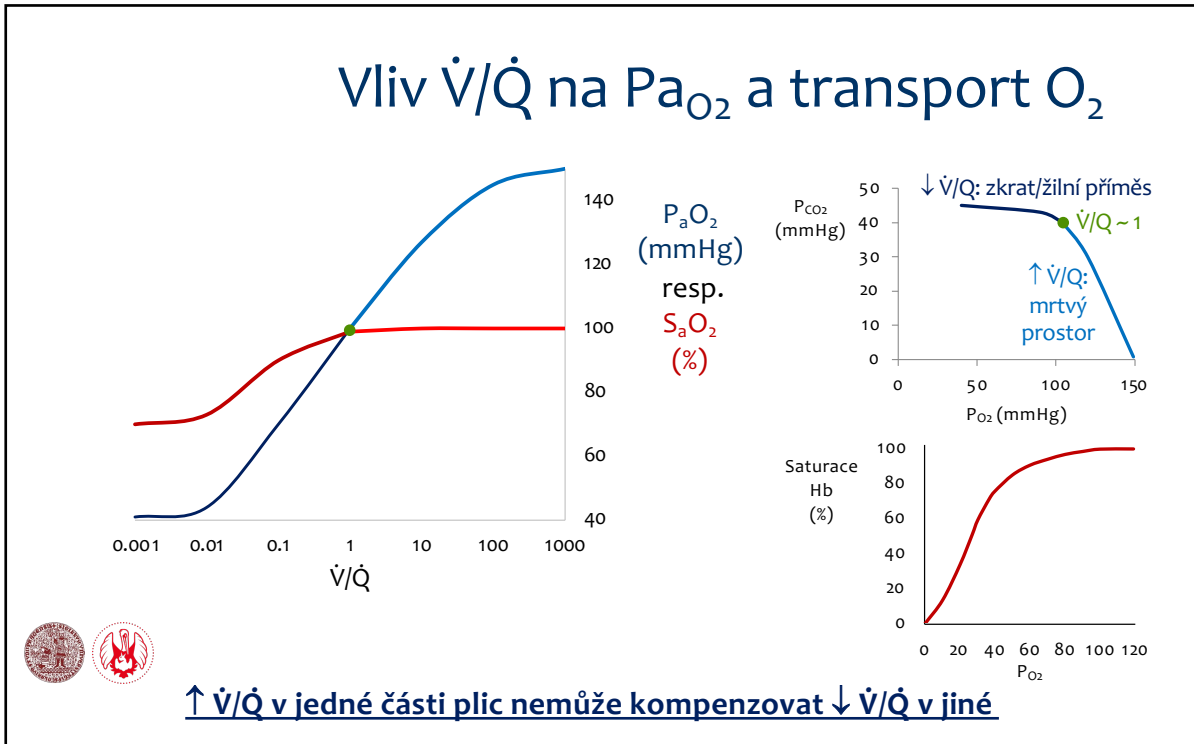
Trochu i ve zdraví

- gravitační nerovnoměrnost  $\dot{Q} > \dot{V}$
- mucus, nečistoty,...
- různé rezistence a poddajnosti dýchacích cest a alveolů

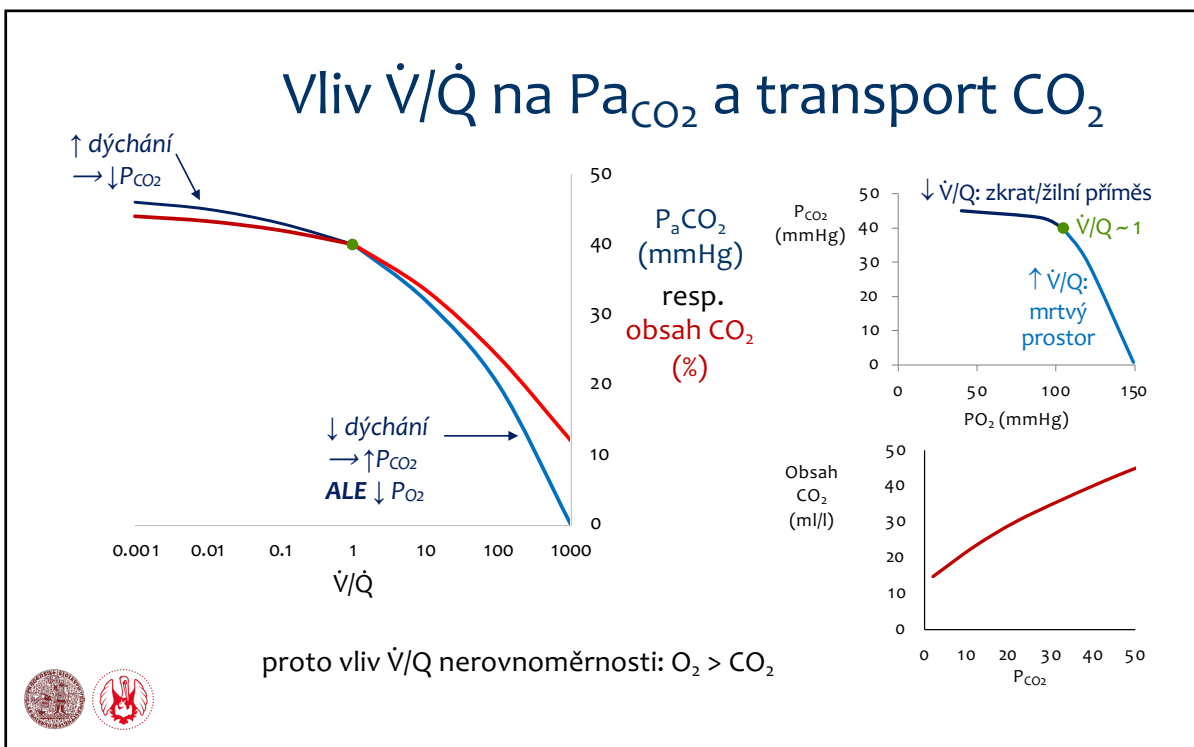


*Poměr perfuze a  $O_2$  transportu  
asi nerovnoměrný i v jiných orgánech*

35



37



38

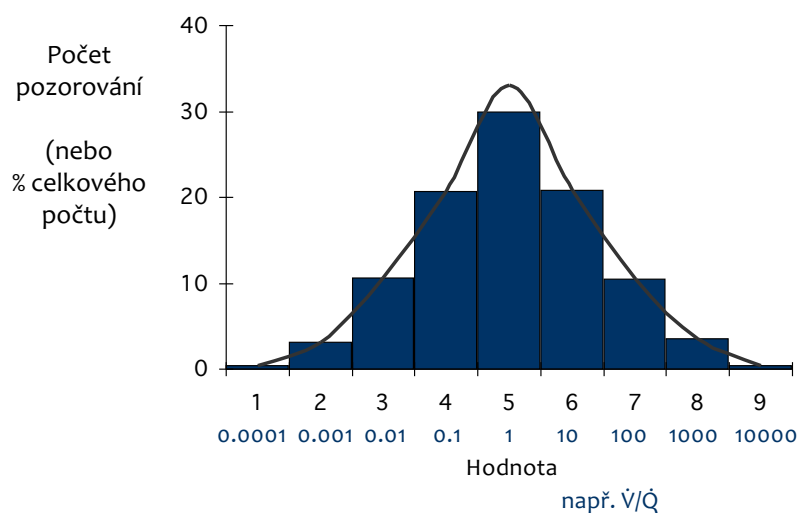
## Nerovnoměrnost $\dot{V}/\dot{Q} \rightarrow \downarrow \text{PaO}_2$

- Hlavní příčina hypoxémie (a retence  $\text{CO}_2$ ) při plicních nemocech
  - $\downarrow \dot{V}/\dot{Q} \rightarrow$  žilní příměs
  - $\uparrow \dot{V}/\dot{Q} \rightarrow \dot{Q}$  protéká jen nepostiženými částmi, tedy v nich relativně  $\uparrow \dot{Q} \rightarrow$  žilní příměs

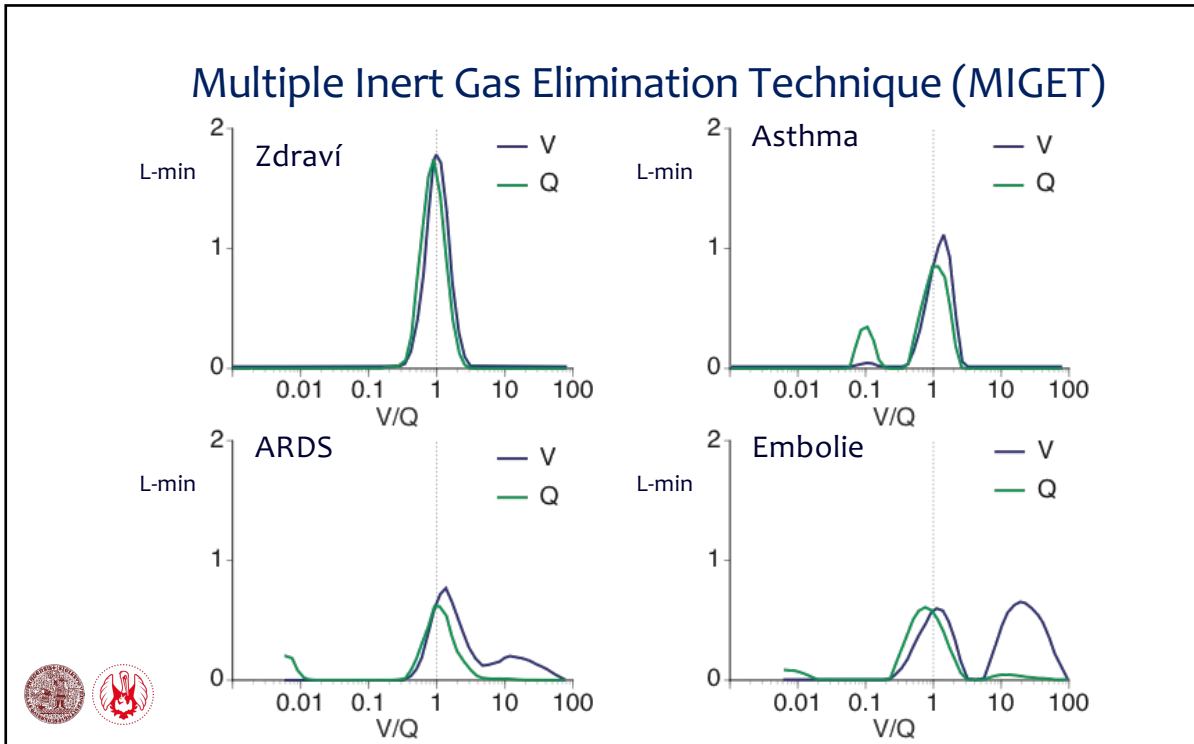


39

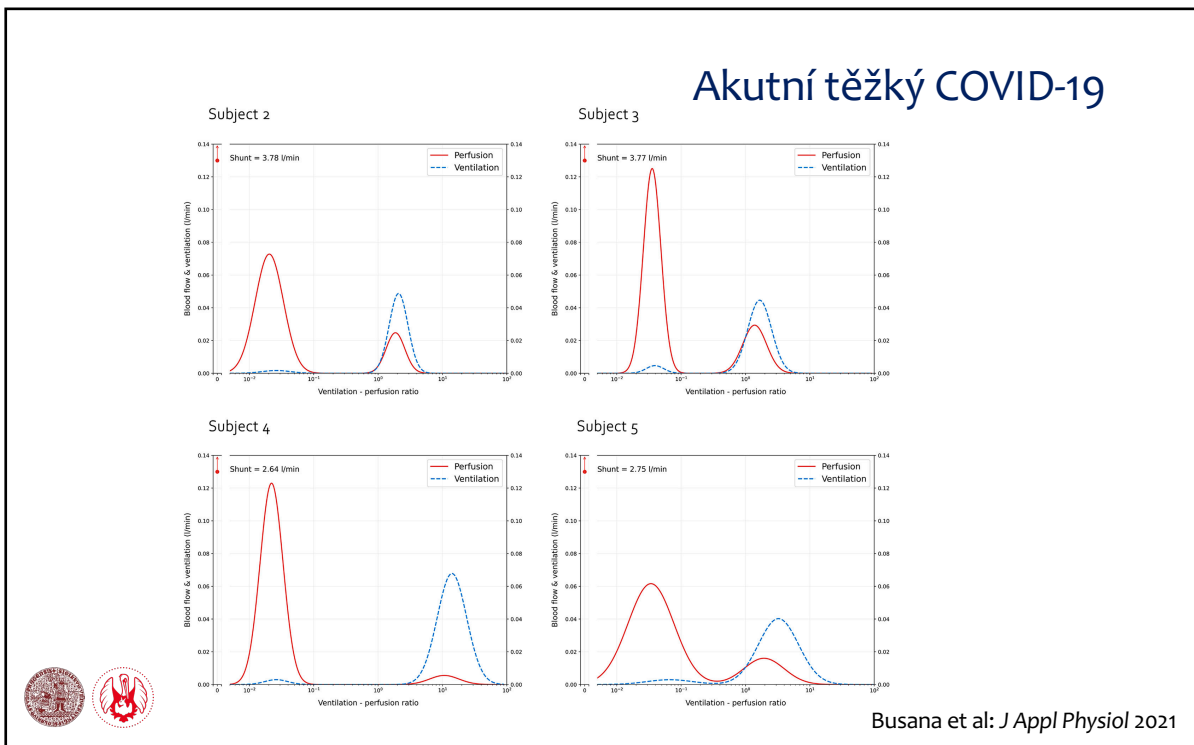
## Kvantifikace nerovnoměrnosti $\dot{V}/\dot{Q}$ : distribuce



41

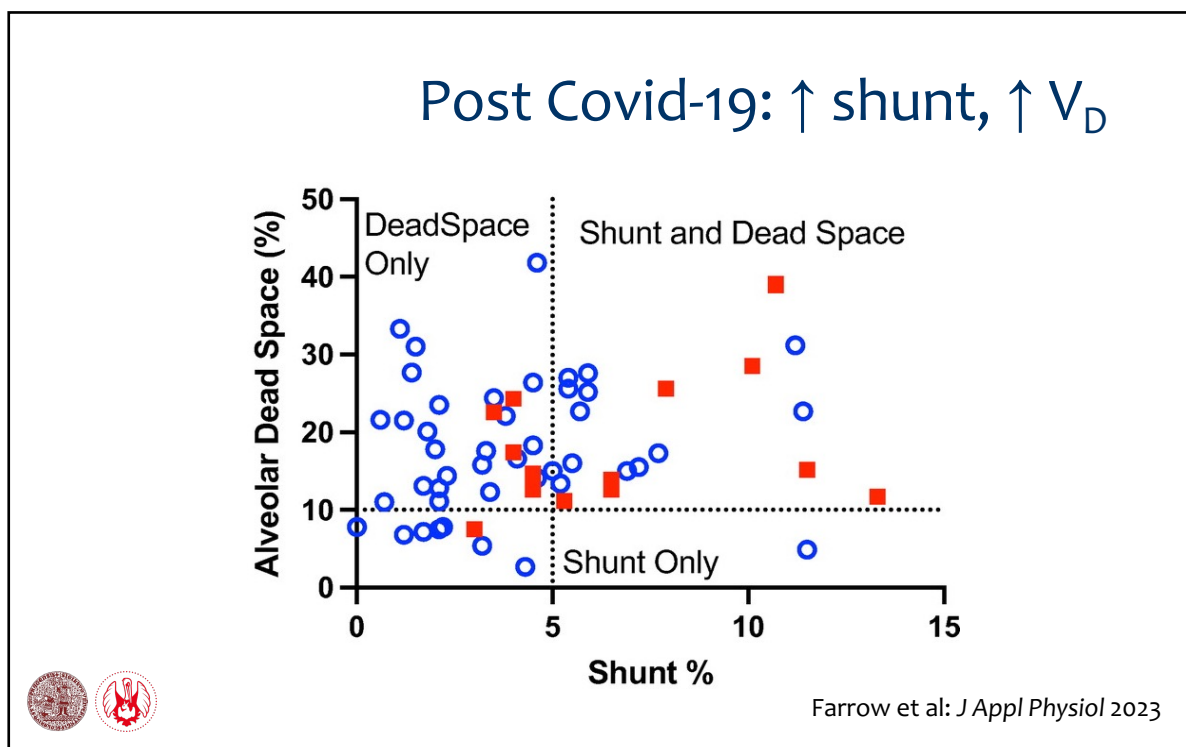


42



Busana et al: *J Appl Physiol* 2021

43



44

## Jak se MIGET dělá

- I.V. roztok různě rozpustných plynů
  - ✓ Aceton (nejrozpustnější)
  - ✓ Eter
  - ✓ Enfluran
  - ✓ Cyklopropan
  - ✓ Etan
  - ✓ SF6 (nejmíň rozpustný)
  
- Detekce ve vydechaném vzduchu a v arteriální krvi

45



## 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



46

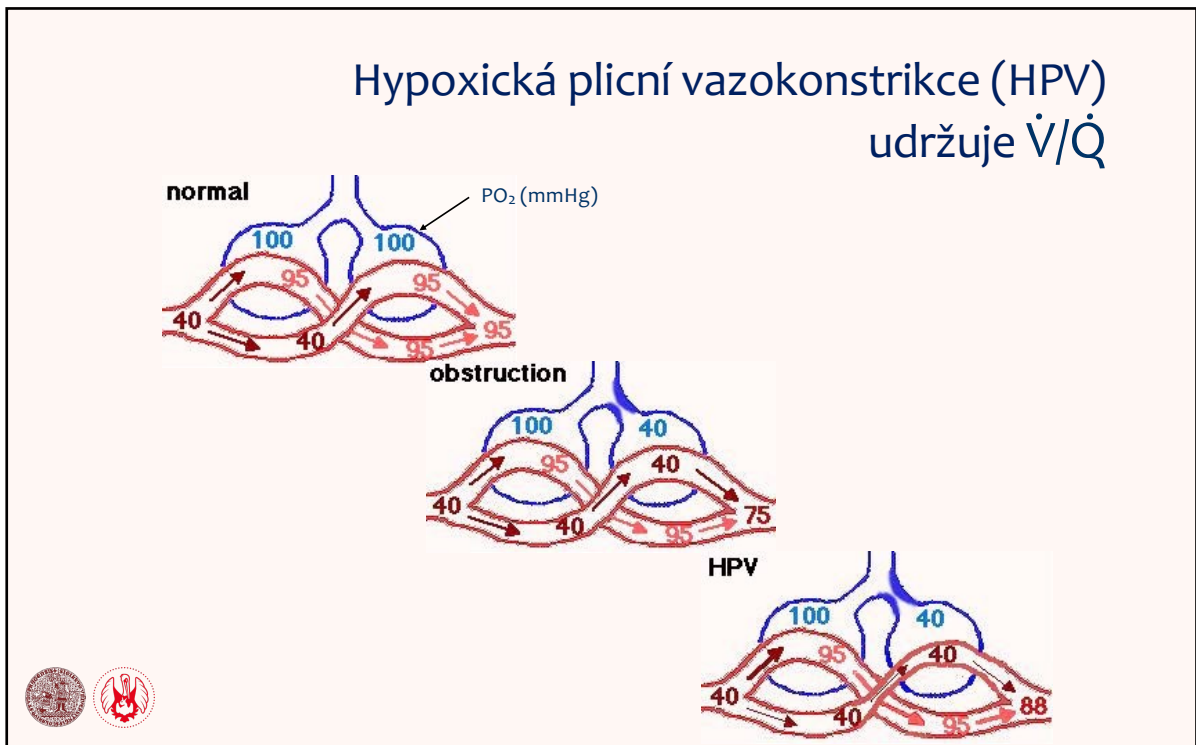
## Fyziologická kompenzace nerovnoměrnosti $\dot{V}/\dot{Q}$

- $\uparrow \dot{V}/\dot{Q} \rightarrow$  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  $\text{PaO}_2$

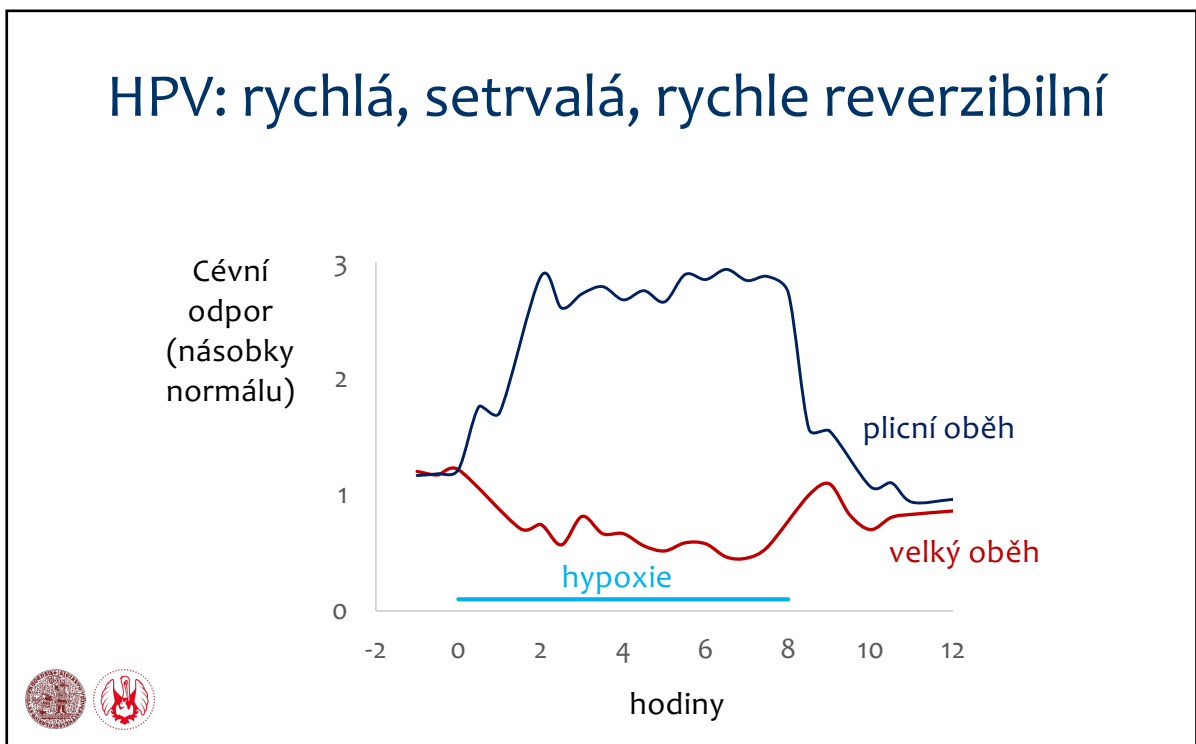


- $\downarrow \dot{V}/\dot{Q} \rightarrow$  **hypoxická plicní vazokonstrikce**

47

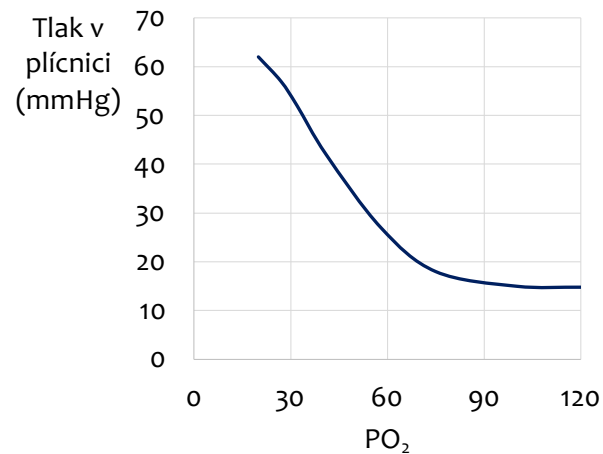


48



49

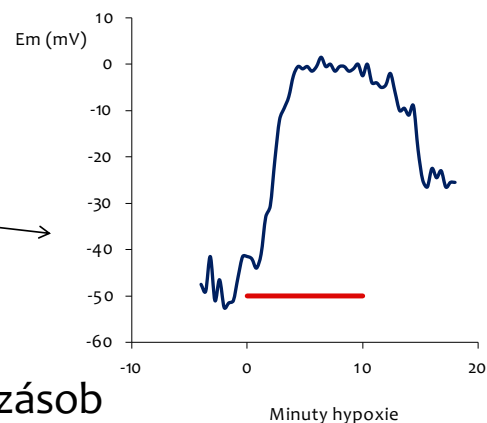
## HPV: závislá na stupni hypoxie



50

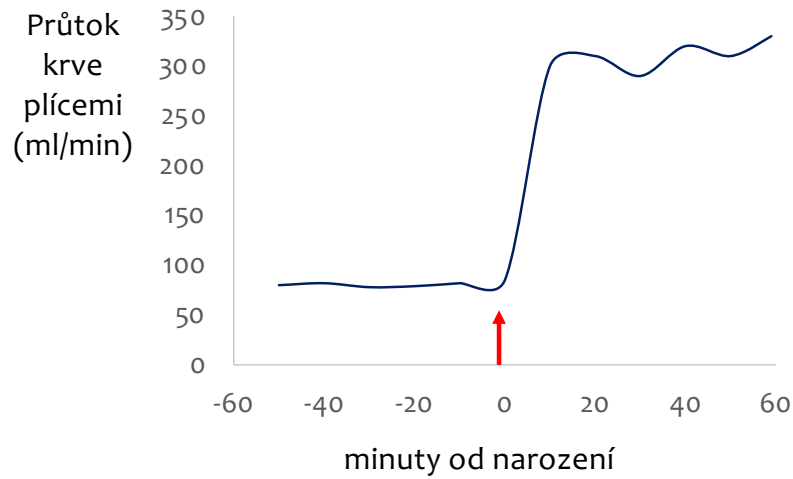
## Mechanismus HPV

- Redoxní změny???
- Inhibice K<sup>+</sup> kanálů
- Depolarizace →
- Aktivace Ca<sup>2+</sup> kanálů (L)
- Influx Ca<sup>2+</sup>
- Uvolnění Ca<sup>2+</sup> z intracel. zásob
- Aktivace kontraktálního aparátu



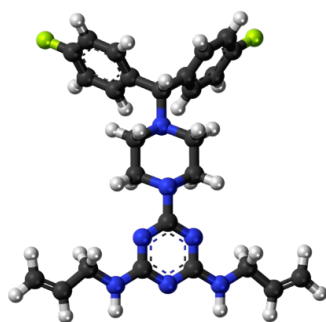
52

## Průtok krve plícemi ↑ při narození

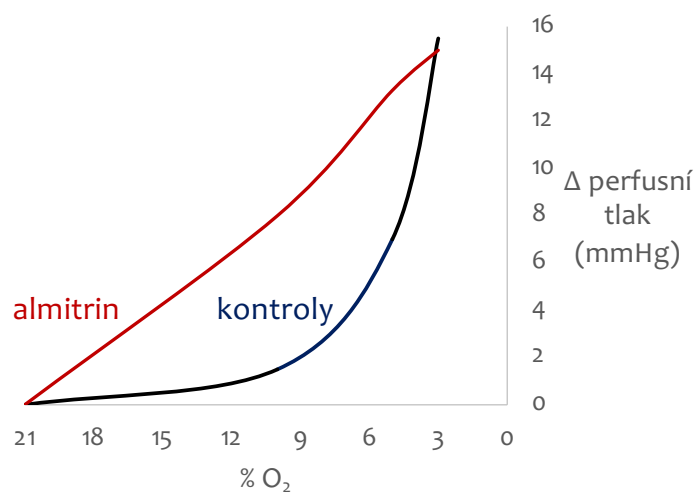


53

## Almitrin zvyšuje citlivost HPV



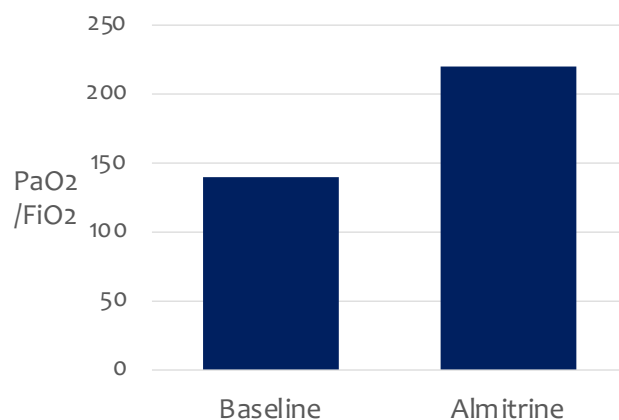
stimulant karotických tělísek



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

55

## Almitrin pomáhá při COVID-19



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

56

## Filtrace v plicních kapilárách

• kapilární tlak:	7 mmHg
• negativní intersticiální tlak:	8 mmHg
• osmotický tlak intersticiální tekutiny:	14 mmHg
<b>Σ CELKOVÁ SÍLA VEN:</b>	<b>29 mmHg</b>
• osmotický tlak plasmy:	28 mmHg
<b>Σ CELKOVÁ SÍLA DOVNITŘ:</b>	<b>28 mmHg</b>
<b>Σ Net filtrační tlak (ven):</b>	<b>1 mmHg</b>
• odsáváno lymfatickým systémem	



57

## Nemoci

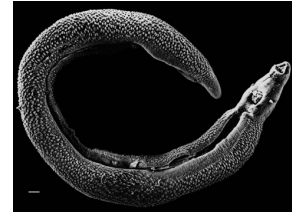
### ■ Plicní hypertenze

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



### ■ Plicní edém

- ARDS
- kardiogenní
- HAPE



### ■ Plicní embolie

