

Dýchání

Mechanika plicní ventilace

vaclav.hampl@lf2.cuni.cz

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

<http://vh.cuni.cz>



UNIVERZITA KARLOVA
2. lékařská fakulta



1



„I vytvořil Hospodin Bůh člověka, prach ze země, a **vdechl** mu v chřípí **dech** života. Tak se stal člověk **živým** tvorem.“
(Genesis 2, 7)

„A Hospodin Bůh utvořil z **žebra**, které vzal z člověka, ženu a přivedl ji k němu.“
(Genesis 2, 22)



2

Kyslík

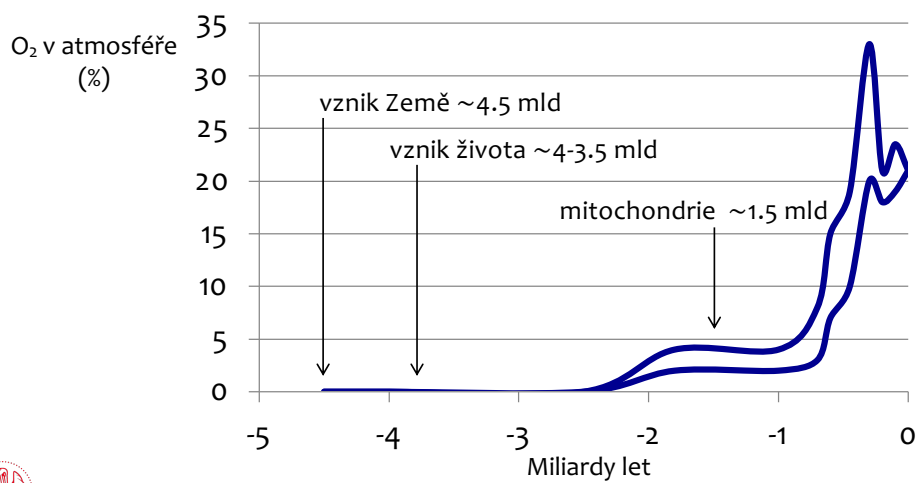
Joseph Priestley 1774

Antoine Laurent Lavoisier



3

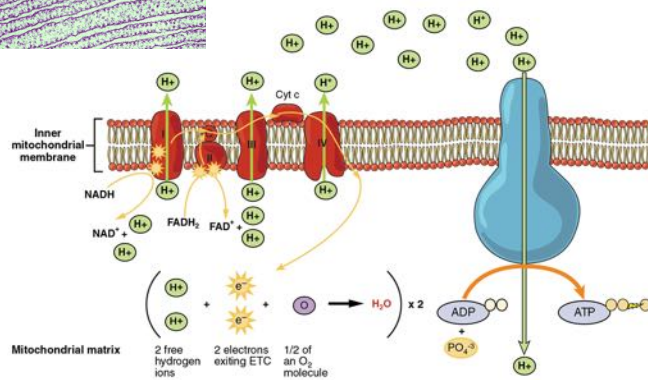
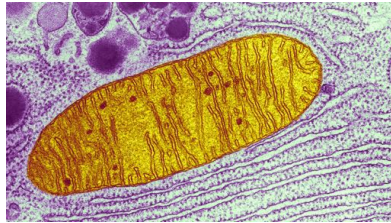
O₂ v atmosféře poměrně nedávno



4

Mitochondrie

endosymbiosa -1.5 mld let



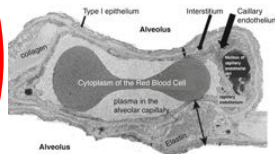
5

Transport O_2 & CO_2 („krevní plyny“) v těle

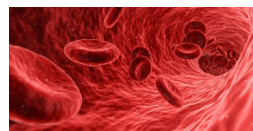
proudění



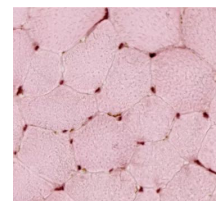
difuse



proudění



difuse



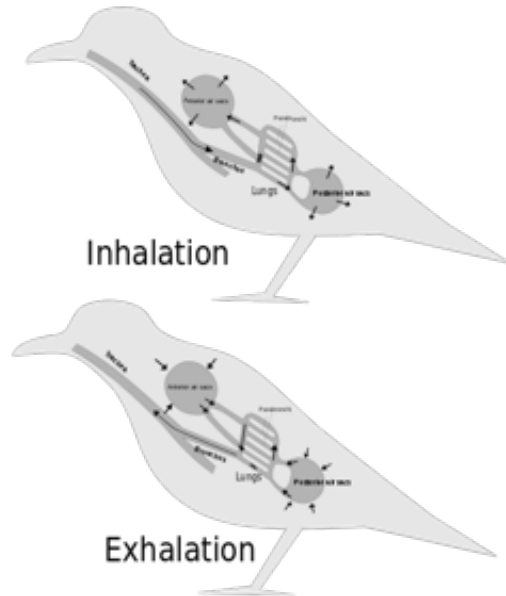
6



Dýchání obratlovců



- obojživelníci – „polykání“ vzduchu (přetlak) + kůže
- plazi
 - dinosauři – asi jako dnes ptáci
 - ostatní – podobně jako savci
- ptáci – parabronchy + vzduchové vaky (7-9)
- savci - alveoly

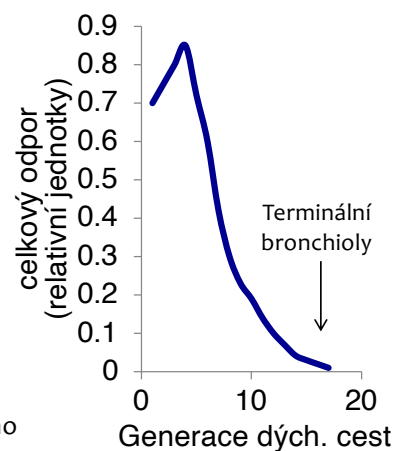


8

Dýchání u savců

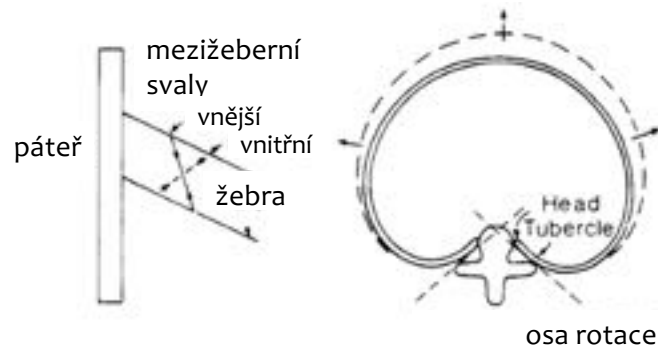
- větvcí se dýchací cesty (celkový odpor ↓)
- alveoly (velký povrch)
- difuze (krátká difusní dráha)
- perfuse
- ventilace:

- nádech aktivní (podtlak)
 - bránice, vnější mezižeberní svaly
- klidový výdech pasivní
 - váha hrudníku, elasticita plic
 - usilovný - vnitřní mezižeberní svaly, břicho



9

Mezižební svaly při dýchání



10

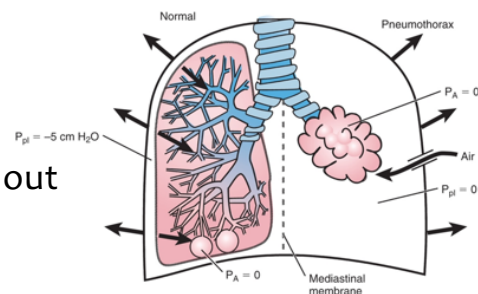
Klidová poloha plic (konec výdechu)

zpětný ráz (elastic recoil) plic

X

tendence hrudníku se rozepnout

↓



mírný podtlak v interpleurálním prostoru ($P_{IP} < P_B$)

($P_{IP} \sim -5 \text{ cmH}_2\text{O}$) ($1 \text{ cmH}_2\text{O} \sim 0.75 \text{ mmHg} \sim 0.1 \text{ kPa}$)



11

Interpleurální prostor

- tenounký
- vyplněný tekutinou (~8-10 ml)
 - nestlačitelnost – přenos tlaků
- tlak se měří v jícnu
- ze savců chybí jen u slonů (pleury spojeny řídkým vazivem)

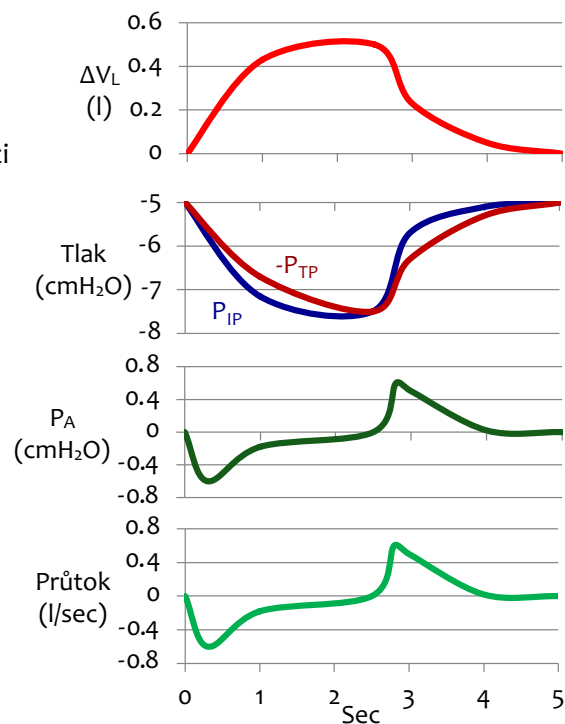


12

Dechový cyklus

- interpleurální tlak (P_{IP} - měřeno oproti P_B) řízen mozkiem (přes dých. svaly)
- transpulmonální tlak ($P_{TP} = P_A - P_{IP}$)
 - s malým zpožděním sleduje P_{IP}
 - na konci vdechu a výdechu: $P_{TP} = -P_{IP}$
 - determinuje objem (V_L) - spolu s poddajností
- alveolární tlak ($P_A = P_{IP} - P_{TP}$)
 - $P_A - P_B$ determinuje průtok - spolu s odporem

*Na začátku nádechu a výdechu víc energie
 ΔP_{IP} na dynamickou složku práce (průtok),
 po zbytek cyklu víc na statickou složku (V_L)*

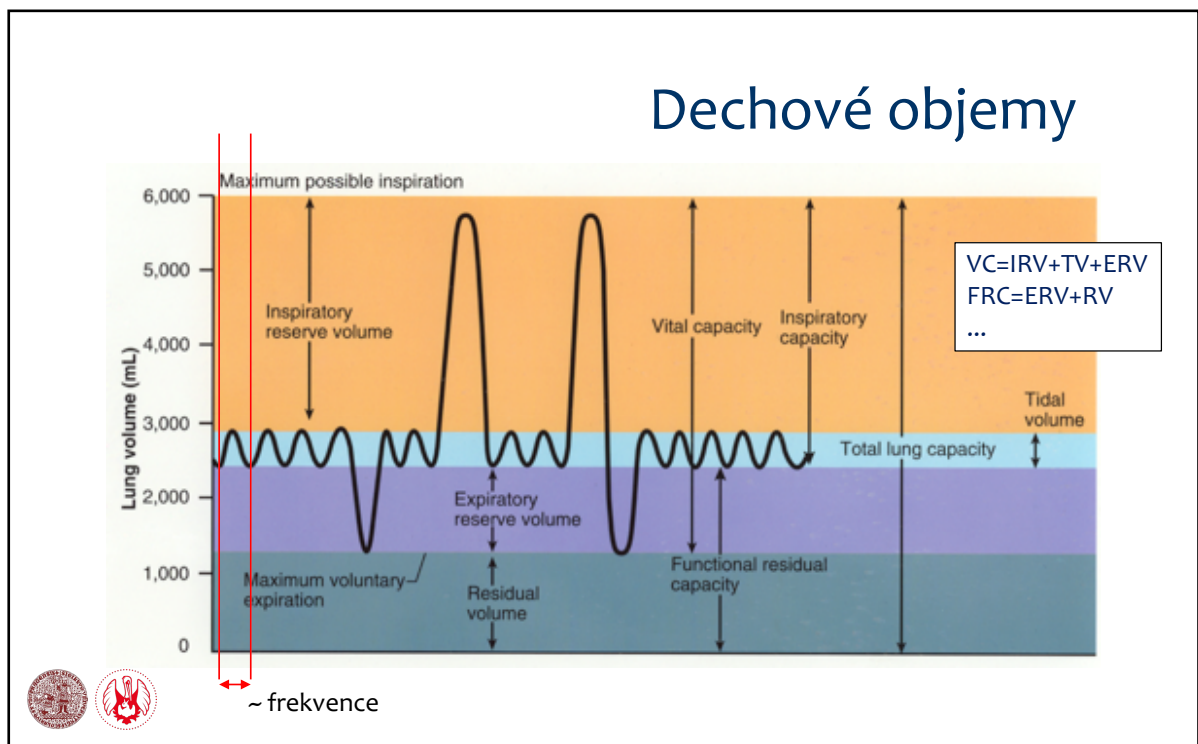


13

Spirometrie

- Dechové objemy a kapacity
 - $V_T \sim 0.5 \text{ l}$
 - $IRV \sim 2.5 \text{ l}$
 - $ERV \sim 1.5 \text{ l}$
 - $RV < 2 \text{ l}$
 - TLC, VLC, FRC
- Rychlosti dechového proudu (pneumotachograf)

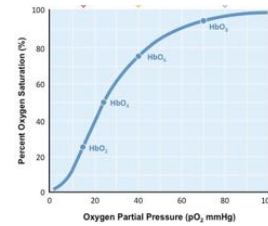
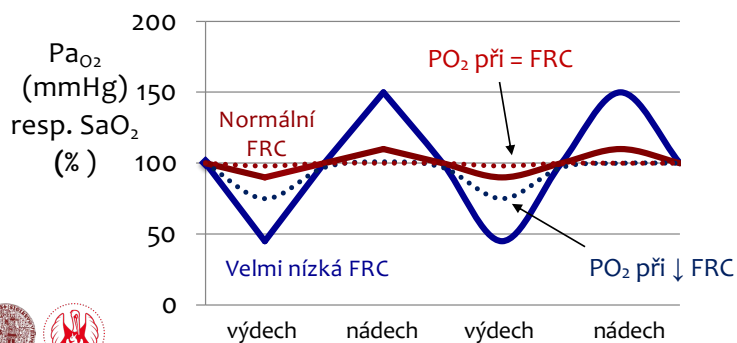
15



16

Proč RV?

- brání kolapsu dých. cest a alveolů (→ poddajnost)
- vyrovnává výkyvy v P_{aO_2} během dech. cyklu (perfuse stálá → relat. stabilní P_{aO_2})



Proto hyperventilujeme spíše zvýšením inspirace

18

Měření FRC

■ $c_1 \times V_1 = c_2 \times V_2$ (= množství)

■ He diluce

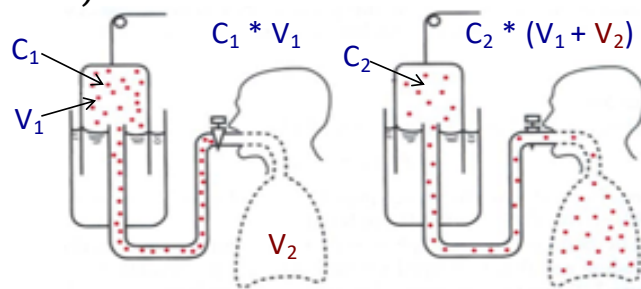
- dýchání z a do
- pytle se známou počáteční [He]

■ vymývání N_2

- dýchání ze zásoby O_2 , vydechování do prázdného pytle

■ po klidném výdechu: FRC

■ po max výdechu: RV



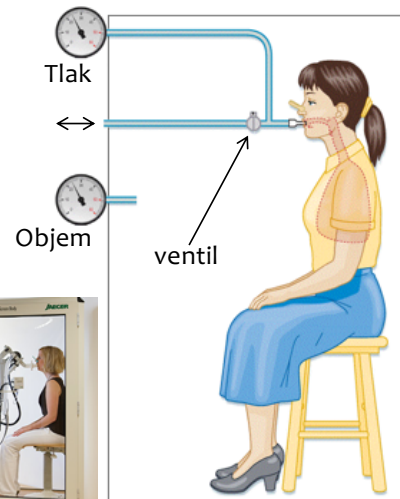
19

Měření FRC - pletysmograf

■ $P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2$ (Boyleův zákon)

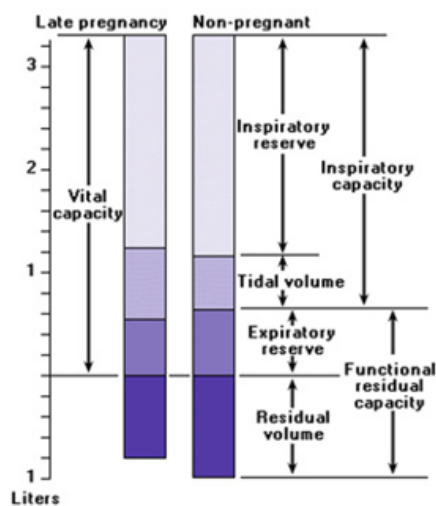
- dýchání zvenku při otevřeném ventilu
- P_1 a V_1 na konci klid. výdechu ($V_1 = \text{FRC}$)
- uzavření ventilu
- malý pokus o nádech ($\rightarrow \Delta V, \Delta P$)
- P_2 a V_2 ($P_1 - \Delta P; V_1 + \Delta V$)
- $P_1 \times \text{FRC} = (P_1 - \Delta P) \times (V_1 + \Delta V)$
- $\text{FRC} = \Delta V \times [(P_1 - \Delta P) / \Delta P]$

- po max výdechu: RV



20

FRC ↓ v těhotenství



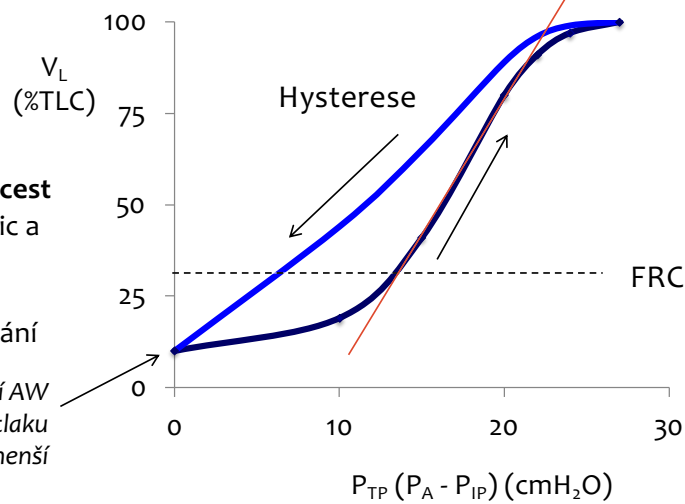
21

Statická poddajnost (compliance)

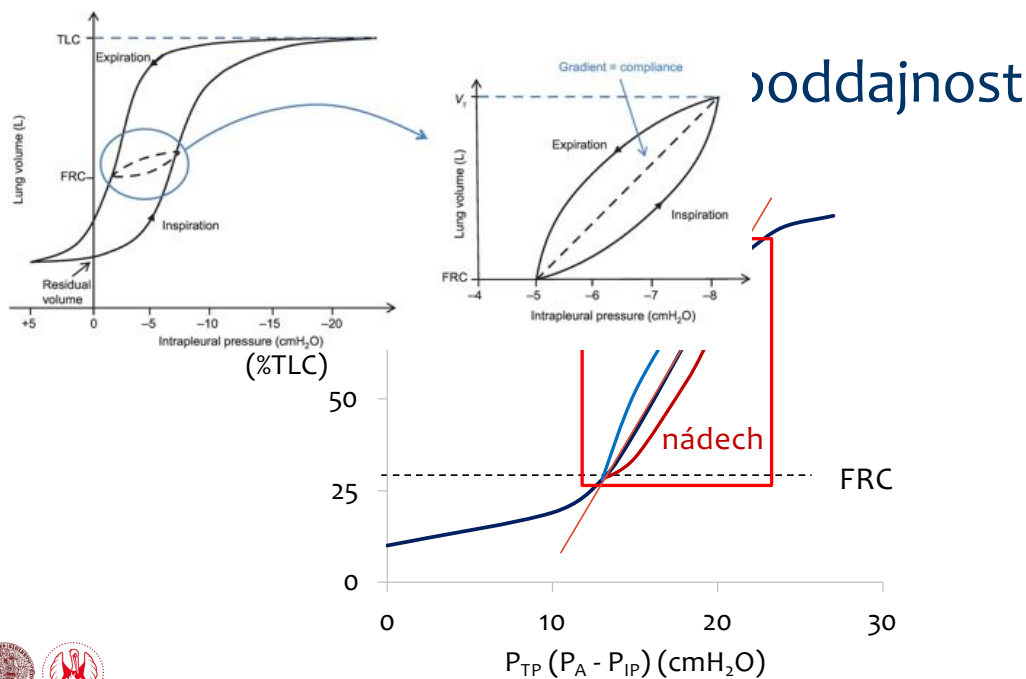
neřeší:

- odpor dých. cest
- tření tkání plic a hrudníku
- setrvačnost vzduchu a tkání

Air-trapping: větší AW kolabují při $\uparrow$ tlaku než menší

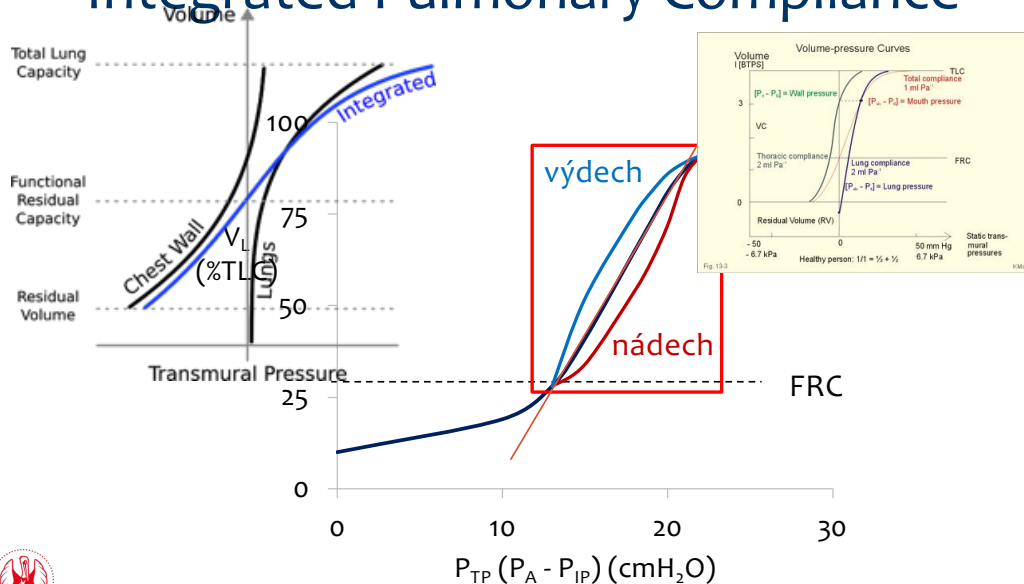


22



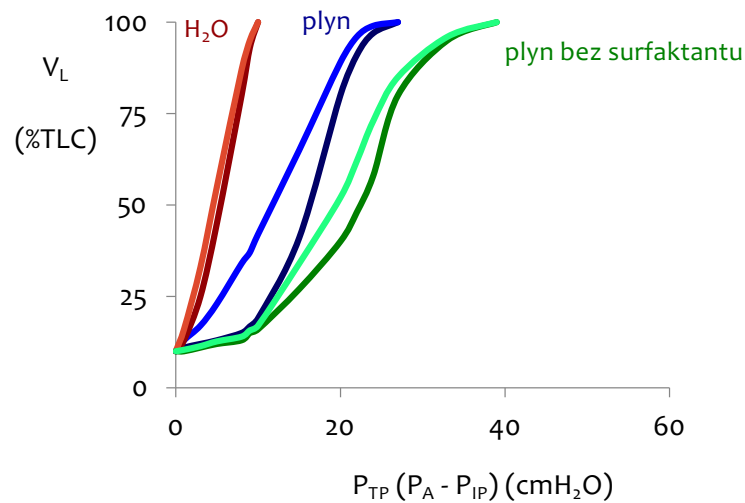
23

Integrated Pulmonary Compliance



24

Statická poddajnost a povrchové napětí



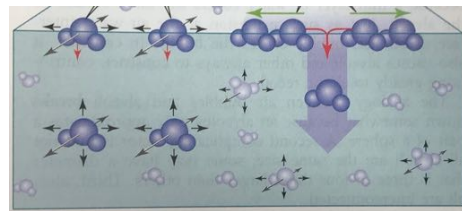
27



Pierre-Simon,
marquis de Laplace
(1806)

Povrchové napětí

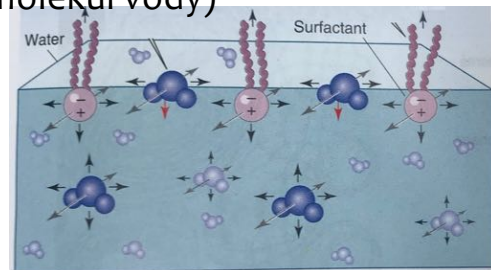
- uvnitř vody na sebe molekuly působí stejně ve všech směrech – vynuluje se to
- na povrchu jen zespodu a z boku – vtahování dovnitř → laterální tah
- na povrchu bubliny jako svěrací kazajka – zvyšuje tlak uvnitř, to brání dalšímu ↓r
- LaPlaceův zákon: $P = 2T/r$
- proto se menší bublina přelije do větší ($T_1/r_1 = T_2/r_2$)



28

Surfaktant: Alveolární buňky II. typu

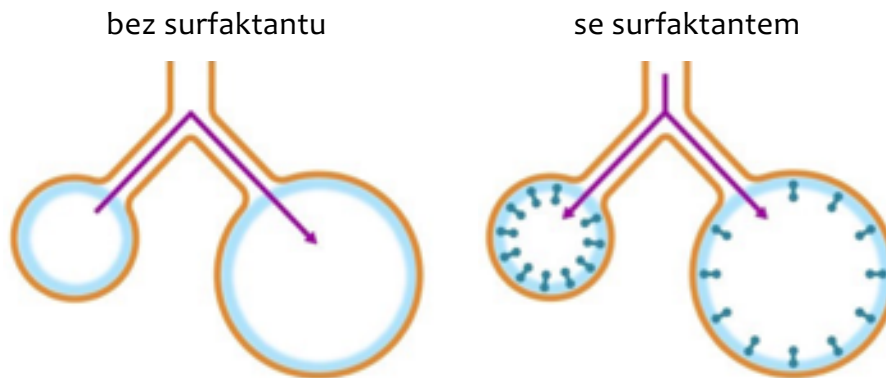
- amfifilní - hydrofobní & hydrofilní skupiny
- hydrofobní skupiny vyčnívají z vodné fáze – táhnou i ven (na rozdíl od molekul vody)
- proteiny ~10%
 - plasmatické (1/2)
 - apolipoproteiny (surfaktantové proteiny SP-A, SP-B, SP-C, SP-D)
- 85% lipidů jsou fosfatidylcholíny
 - nejvíc dipalmitoylfosfatidylcholin (DPPC)
 - fosfatidylglycerol - 11% lipidů



29

Surfaktant brání kolapsu alveolů

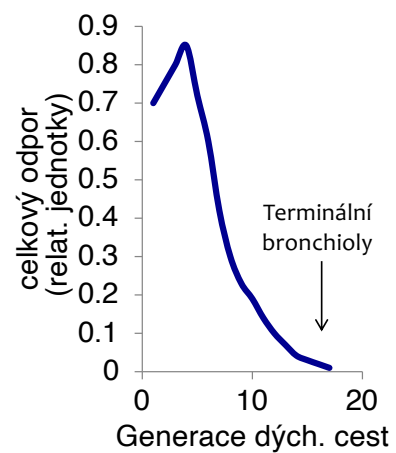
$$P = 2T/r \rightarrow T_1/r_1 = T_2/r_2$$



30

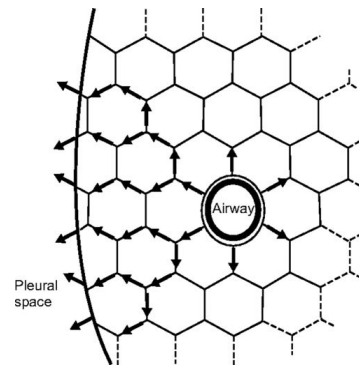
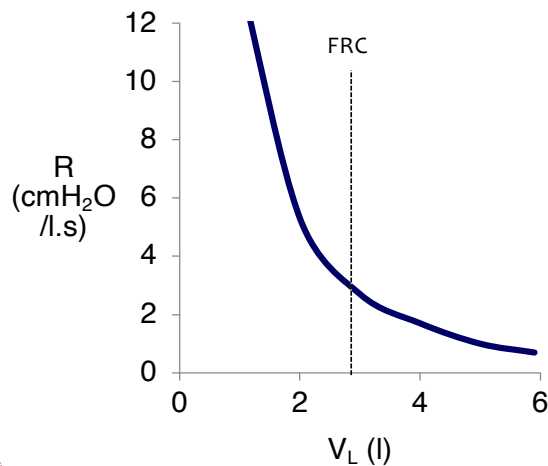
Odpor dýchacích cest

- $\dot{V} = (P_A - P_B)/R$
- $R = (8/\pi) \times (\eta \times l)/r^4$
(Hagen-Poiseulle)
- $R = (P_A - P_B)/\dot{V}$
= odpor dých. cest
(+20% je odpor tkáně - frikce
plic. a hrudní tkáně, když se
vůči sobě pohybují)



32

Odpor dýchacích cest klesá s V_L



↑ r dých. cest při ↑ V_L
(provázanost tkáně)

↑ R při výdechu
(kolaps bronchiol)

33

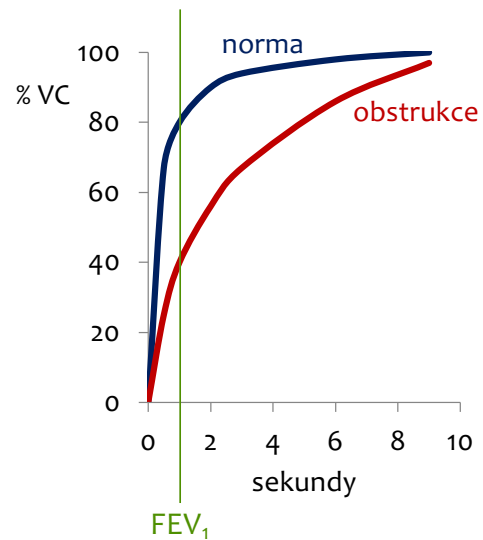
Regulace odporu dých. cest

- vagus – bronchokonstrikce
- sympatikus – β_2 dilatace (NA slabý agonista, adrenalin silný agonista)
- histamin - bronchokonstrikce

37

Klinické měření dechových funkcí

- VC
 - zákl. rámec
 - ↓ při restriktivních nemocech
- Usilovná VC (FVC → FEV₁)
 - ↓ při obstruktivních nemocech
- max. expirační proud (usilovný výdech po max. nádechu)
 - ↓ při obstruktivních nemocech
- max. ventilace (15-30 sec)

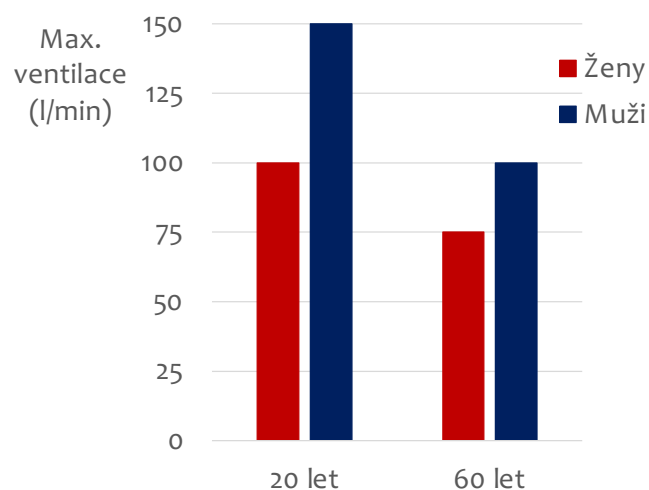


+ FRC, poddajnost,...



38

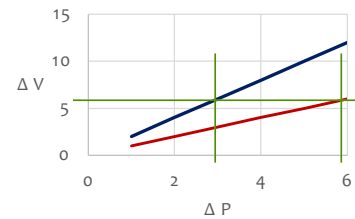
Maximální ventilace klesá s věkem



39

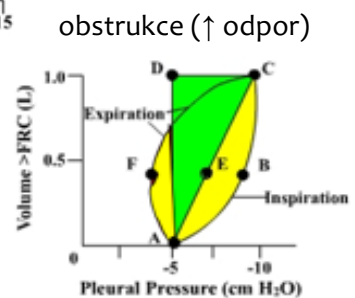
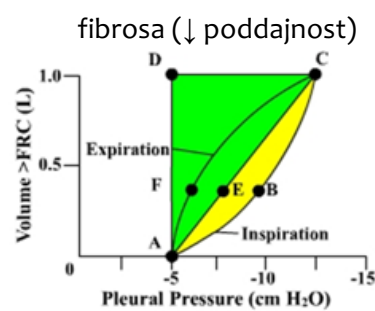
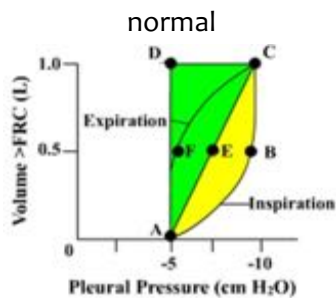
Dechová práce

- $W = \text{síla po dráze}$
- $W = \Delta P \times \Delta V$
- plocha vlevo od křivky = W
 - menší W :
na stejnou ΔV potřebují menší ΔP
- 2 komponenty:
 - elastická (ΔV plic a hrudníku)
 - viskózní (pohyb vzduchu a tkání)



40

Dechová práce



41