

*„Dum spiro, spero“*

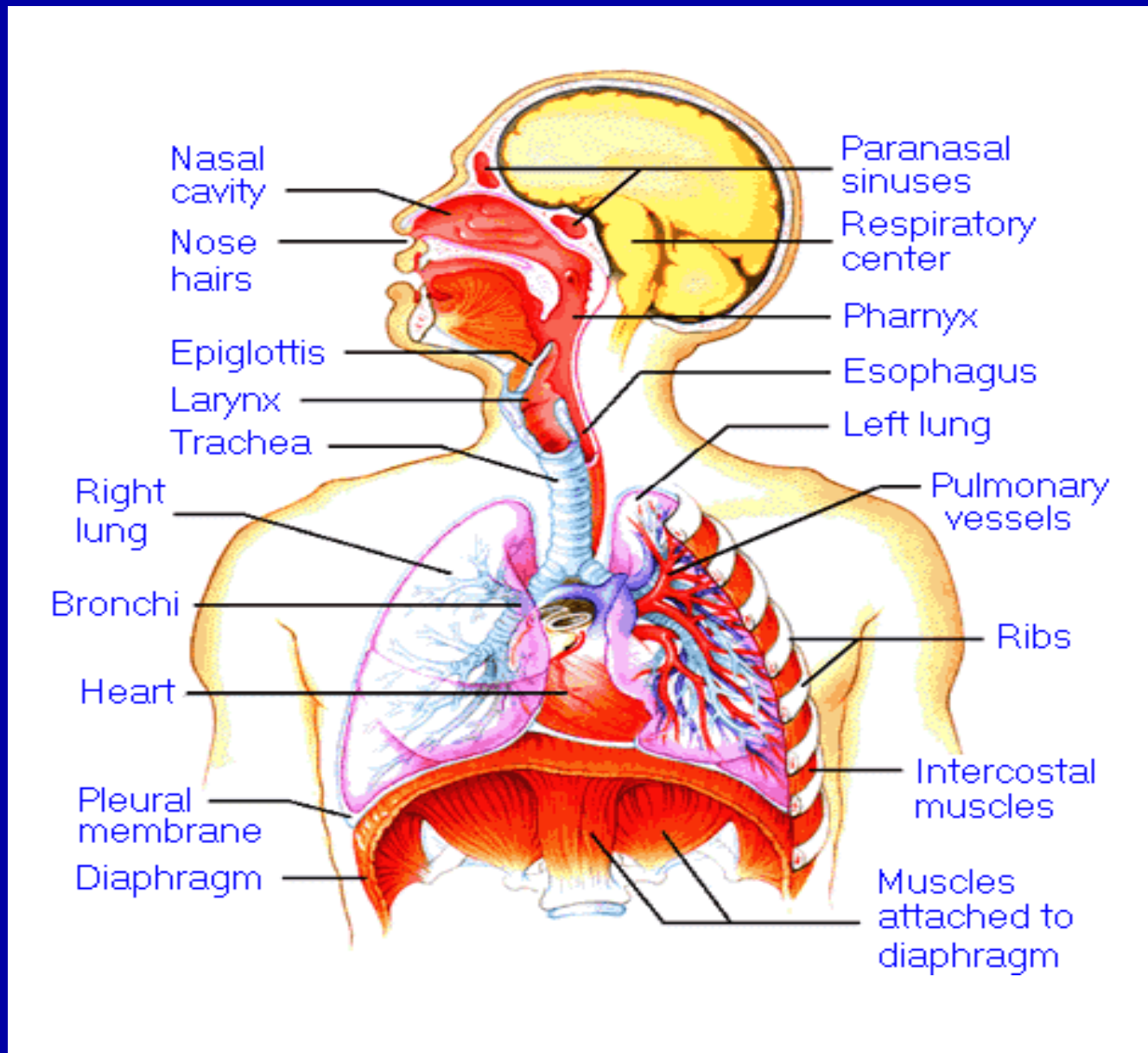
**Fyziológia  
dýchacieho systému**

*Ján Jakuš*

# Fyziologia vonkajšieho a vnútorného dýchania

Definícia: Dýchanie (respirácia) jedna z troch základných „**vitálnych**“ **funkcií** živého organizmu. Je to periodický a rytmický proces vdychovania vzduchu (inspírium) a jeho vydychovania (expírium) z dýchacích ciest a z pľúc, ktorý za každú minútu zabezpečuje dospelému organizmu v klúde **prísun 250 ml O<sub>2</sub>** a **odsun 200 ml CO<sub>2</sub>**, potrebných na pokrytie jeho metabolických požiadaviek.

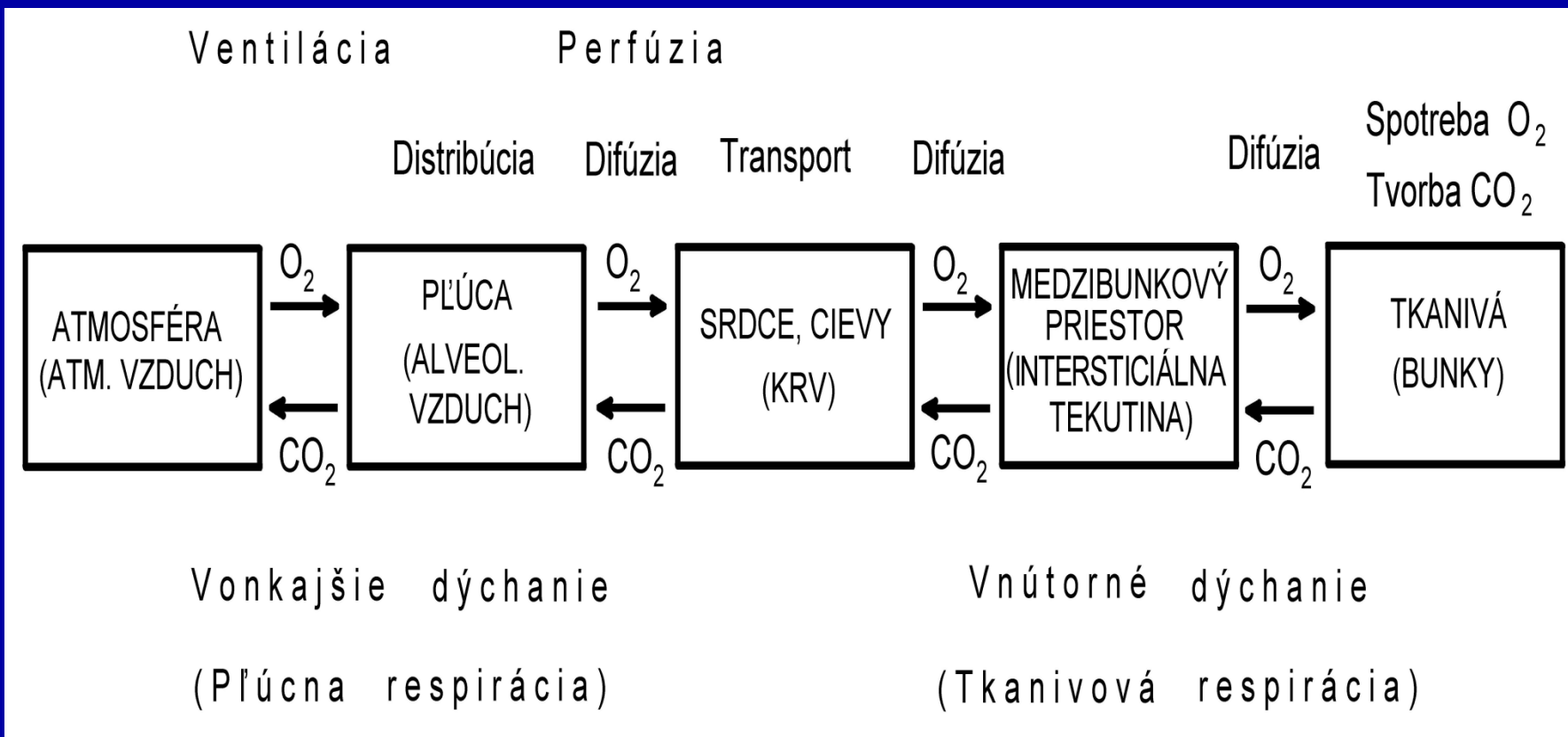
# Anatómia dýchacieho systému



# **Hlavná funkcia dýchania:**

**proces výmeny plynov medzi bunkami a vonkajším prostredím, t.j. transport kyslíka z vonkajšieho vzduchu do buniek tela a odvod oxidu uhličitého z buniek do atmosféry.**

# Dýchanie vonkajšie a vnútorné :



**Schéma respirácie**

# **Vonkajšie dýchanie**

**zahrňuje 4 hlavné procesy:**

- pľúcnu ventiláciu**
- distribúciu vzduchu (miešanie)**
- difúziu plynov**
- perfúziu pľúc (transport dýchacích plynov krvou)**

**Ventilácia** ▶ cyklická výmena vzduchu v pľúcach počas vdychu (inspíria) a výdychu (exspíria), zabezpečená kontrakciou dýchacích svalov

**Distribúcia** ▶ miešanie inšpirovaného vzduchu so vzduchom, ktorý zostal v dýchacích cestách a v pľúcach po výdychu (150 ml = anatomický mŕtvy priestor u dospelého)

**Difúzia** ▶ prestup  $O_2$  a  $CO_2$  v smere tlakového gradientu cez alveolokapilárnu membránu (Fickov zákon)

**Perfúzia** ▶ cirkulácia krvi pľúcnym riečišťom –transport plynov krvou

# Vnútorne dýchanie, resp. tkanivová respirácia,

predstavuje difúziu  $O_2$  a  $CO_2$  medzi krvou a tkanivami v smere gradientu parciálnych tlakov na úrovni kapilár.

Vonkajšie (pľúcne) a vnútorné (tkanivové) dýchanie si vyžadujú normálnu funkciu kardiovaskulárneho (KV) aparátu a centrálného nervového systému – CNS (mozog a miecha).



**Mechanika dýchania** - hodnotí činnosť dých. svalov, hrudného koša a pľúc pre dýchaní. **Pľúca nemajú svaly!**

**Prúdenie vzduchu** v dých. cestách je podmienené tlakovým rozdielom medzi atmosférou a alveolami.

**Inspírium** - tlak v alveolách pľúcnych je nižší ako v atmosfére

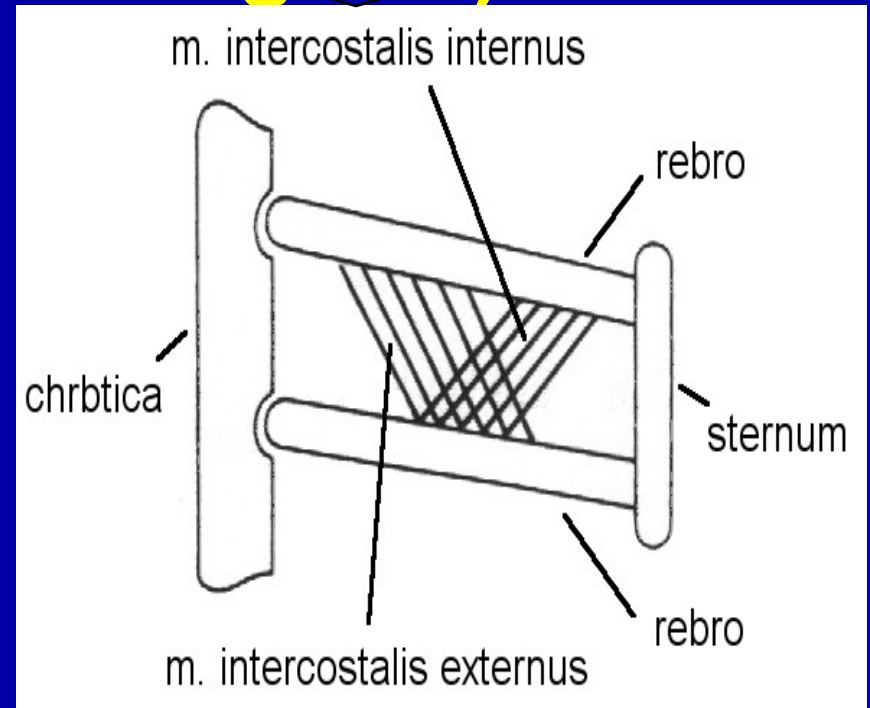
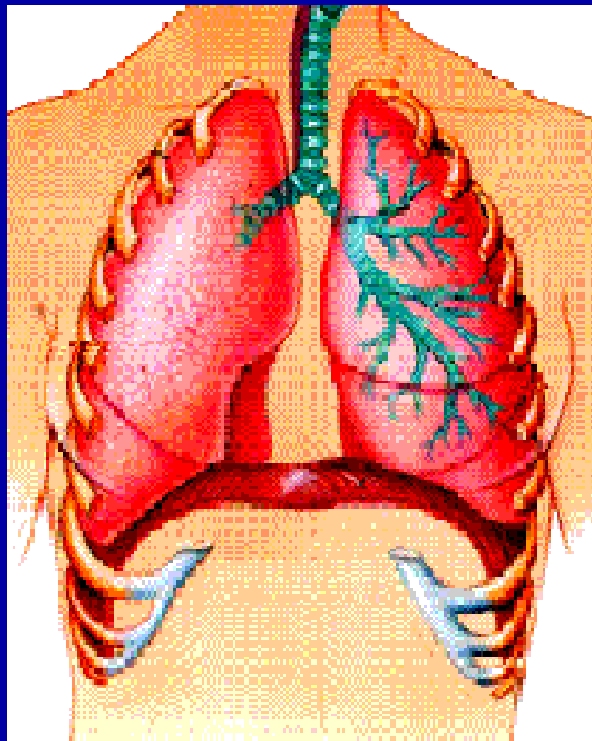
**Exspírium** - tlak v alveolách pľúc prevyšuje atmosferický tlak.

**Dýchanie spontánne** je „podtlakové“.

**Umelé dýchanie** je „pretlakové“.

**Podtlak a pretlak v hrudníku** – sú výsledkom kontrakcie dých. svalov : bránice (diaphragma) a svalov medzi-rebrových (vonkajších a vnútorných)

# Úloha bránice, medzirebrových a prídavných dýchacích svalov (model-Paralelogram)



① →  
bránica

③ prídavné svaly  
(auxiliárne)

② medzirebrové (interkostálne) svaly  
vonkajšie - inspiračné  
vnútorné - expiračné

**Bránica** → hlavný inspiračný sval, zodpovedá za 60 % zmeny objemu hrudníka. Počas pokojného dýchania klesá kaudálnym smerom asi o 1,5 cm, pri hlbokom nádychu však až o 7-13 cm.

**Mm. intercostales externi** → pri kontrakcii zväčšenie predozadného a priečneho priemeru hrudníka → vdych.

**Mm. intercostales interni** → pri kontrakcii pokles rebier a zmenšenie priemeru hrudníka → výdych.

**Pokojnú inspiráciu** → aktívny dej

**Pokojnú expiráciu** → prevažne pasívny

***Pokojný výdych*** → spôsobený pasívnym vytláčaním bránice smerom nahor a retrakčnou silou hrudného koša a pľúc

***Úsilný vdych*** → kontrakcia bránice Mm. Intercostales ext. a prídavných inspiračných svalov (krku a hrudníka).

***Úsilný výdych*** → kontrakcia brušných svalov (brušný lis) a mm. intercostales interni

# Mechanizmus pľúcnej ventilácie:

## **POKOJNÉ INSPÍRIUM**

① kontrakcia bránice a vonkajších medzir. svalov → ② negativita  $P_{PI}$  → ③ negativita  $P_P$  → ④ vznik tlakového gradientu (zvonka-dovnútra) → ⑤ inspiračný prietok → ⑥ inspiračný pľúcny objem

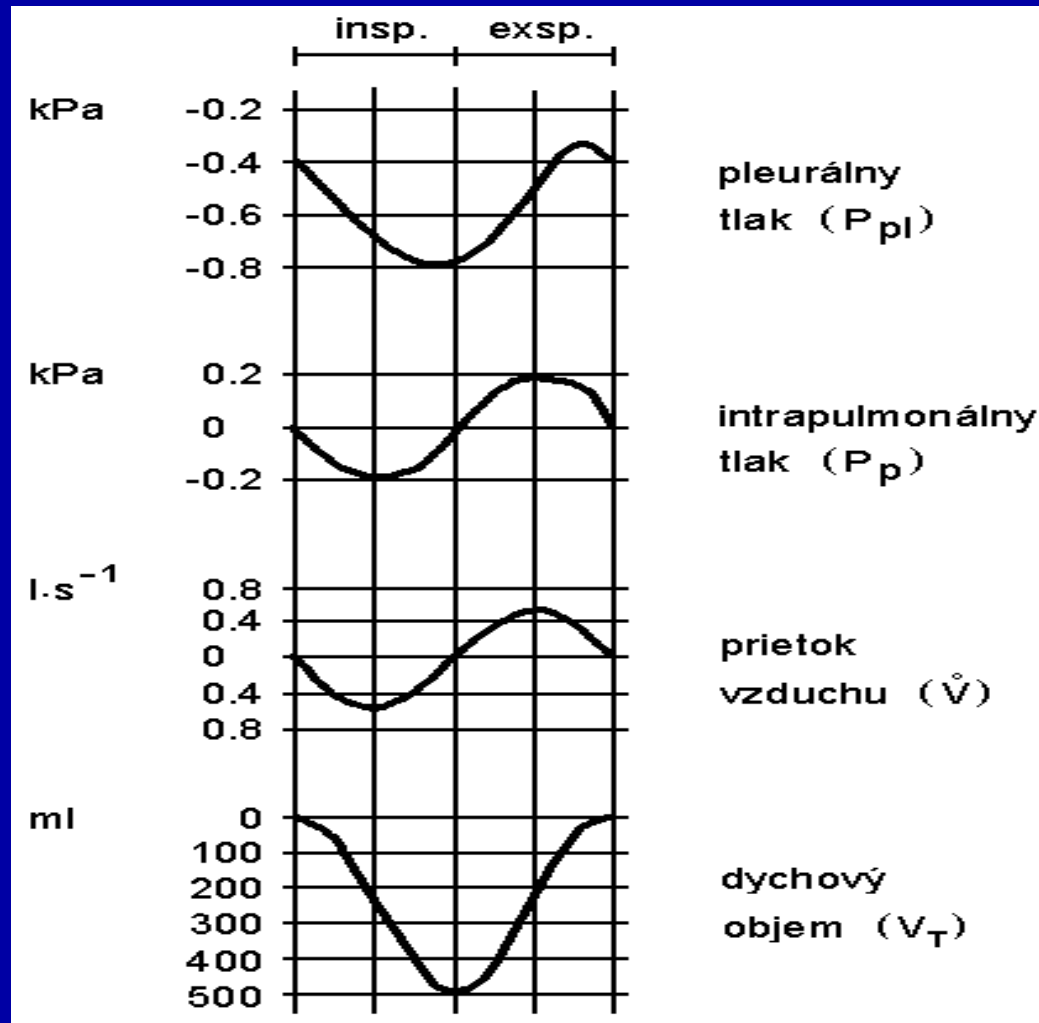
## **POKOJNÉ EXSPÍRIUM:**

① pasívny pohyb bránice nahor a retrakčná sila pľúc a hrudníka → ② ľahko pozitívny  $P_P$  pri malej negativite  $P_{PI}$  → ③ vznik tlakového gradientu (zvnútra-navonok) → ④ exspiračný prietok vzduchu → ⑤ exspiračný pľúcny objem

**ÚSILNÉ INSPÍRIUM** (práca a cvičenie) :  
Zosilnenie st'ahu bránice spolu  
s kontrakciou tzv. auxiliárnych  
inspiračných svalov ➔ väčšia negativita  
 $P_{pl}$ ,  $P_p$  ➔ zvýšenie inspiračného prietoku  
vzduchu ➔ zvýšenie množstva  
vdýchnutého pľúcneho objemu

**ÚSILNÉ EXSPÍRIUM** (kašeľ) Kontrakcia  
brušných svalov a vnútorných medzir.  
svalov ➔ pozitívne hodnoty  $P_{Abd}$ ,  $P_{pl}$ ,  $P_p$   
➔ veľký exspiračný prietok vzduchu  
➔ veľký exspirovaný objem

# Záznam pleurálneho tlaku, intrapulmonálneho tlaku, prietoku vzduchu a dychového objemu počas pokojného inspíria (insp) a expíria (exsp)



# Pľúcne objemy

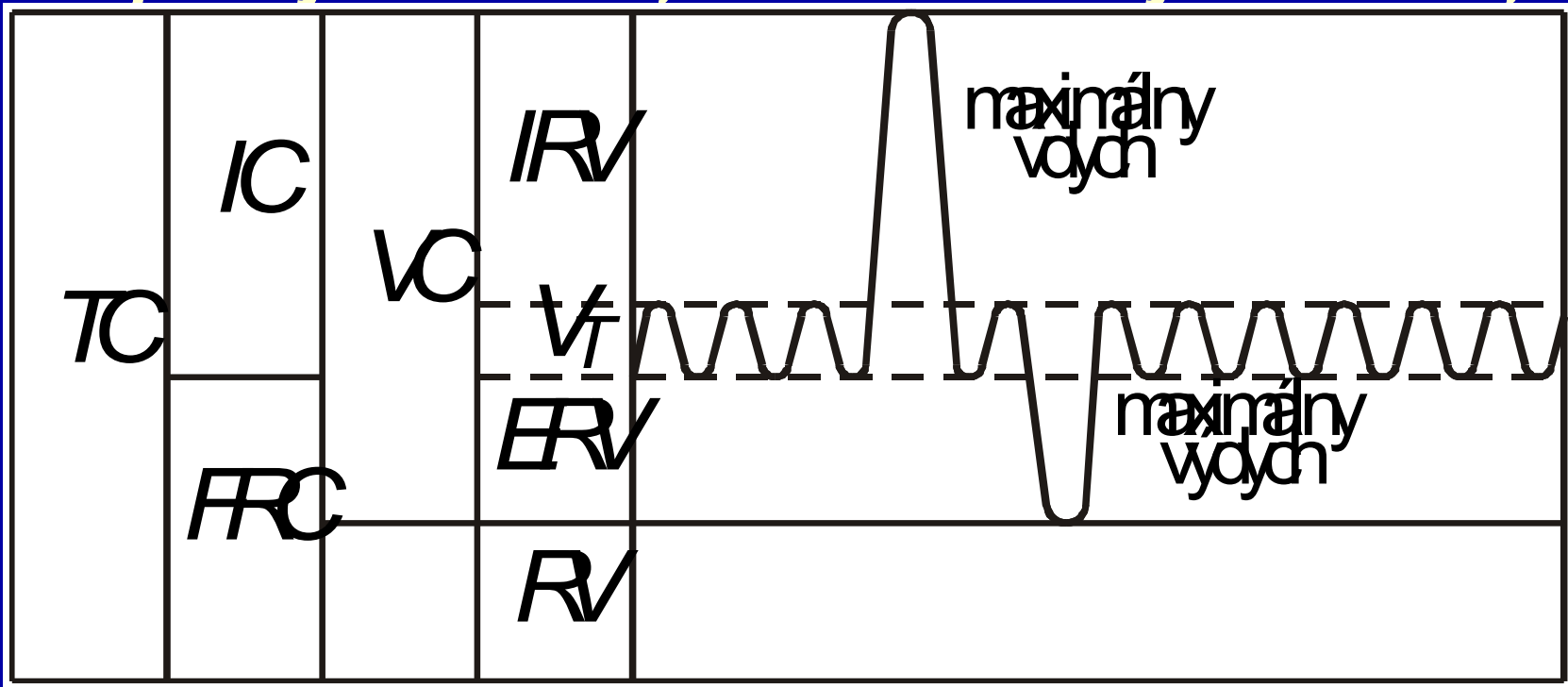
*dychový objem (tidal volume  $V_T$ ) = 0,5 l*

*inspiračný rezervný objem (IRV) = 2,5 l*

*exspiračný rezervný objem (ERV) = 1,0 l*

*reziduálny objem (RV) = 1,2 l*

*(kolapsový vzduch 0,4 l + minimálny vzduch 0,8 l)*





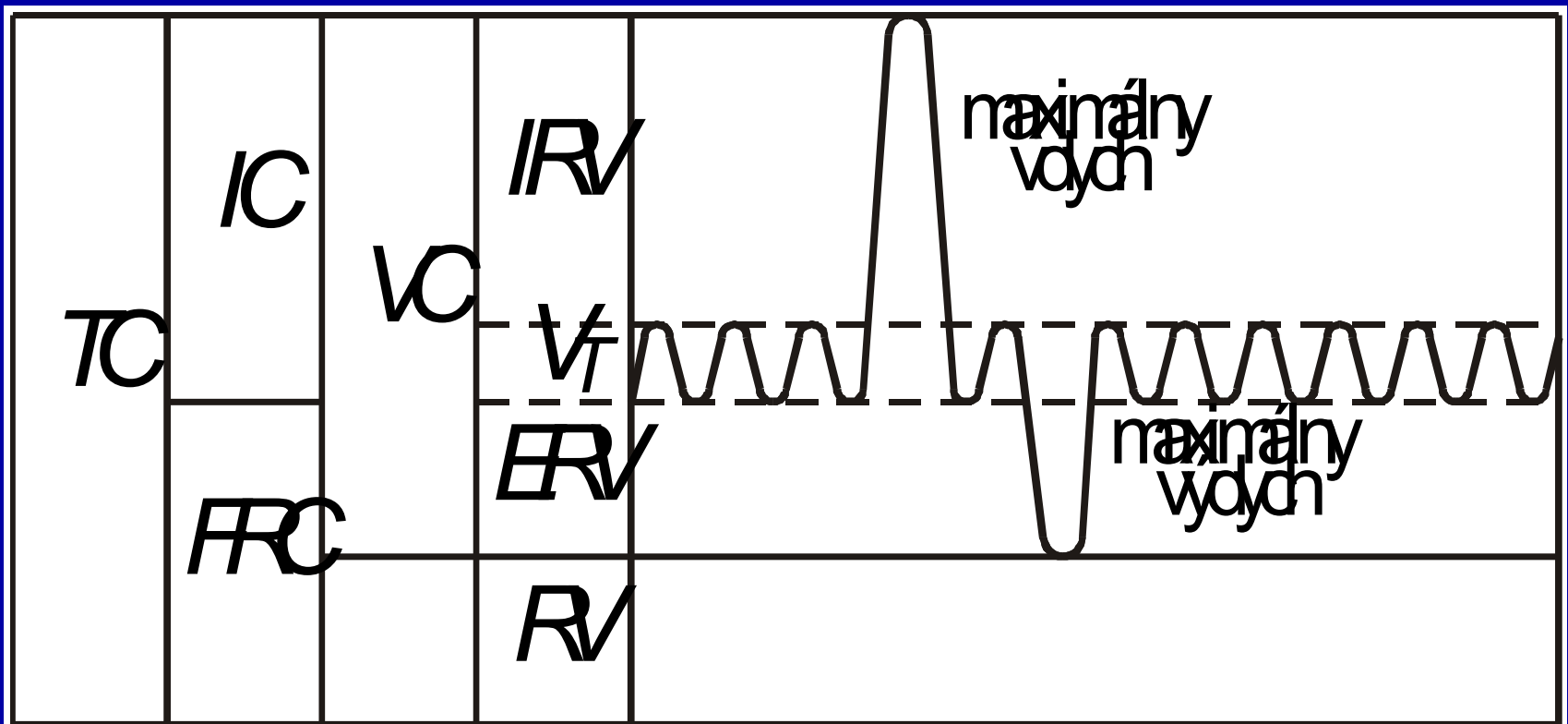
# Pľúcne kapacity

Vitálna kapacita pľúc (VC) =  $V_T + IRV + ERV$

Inspiračná kapacita (IC) =  $V_T + IRV$

Funkčná reziduál. kapacita (FRC) =  $ERV + RV$

Celková kapacita pľúc (TLC) =  $\Sigma$  vš. objemov

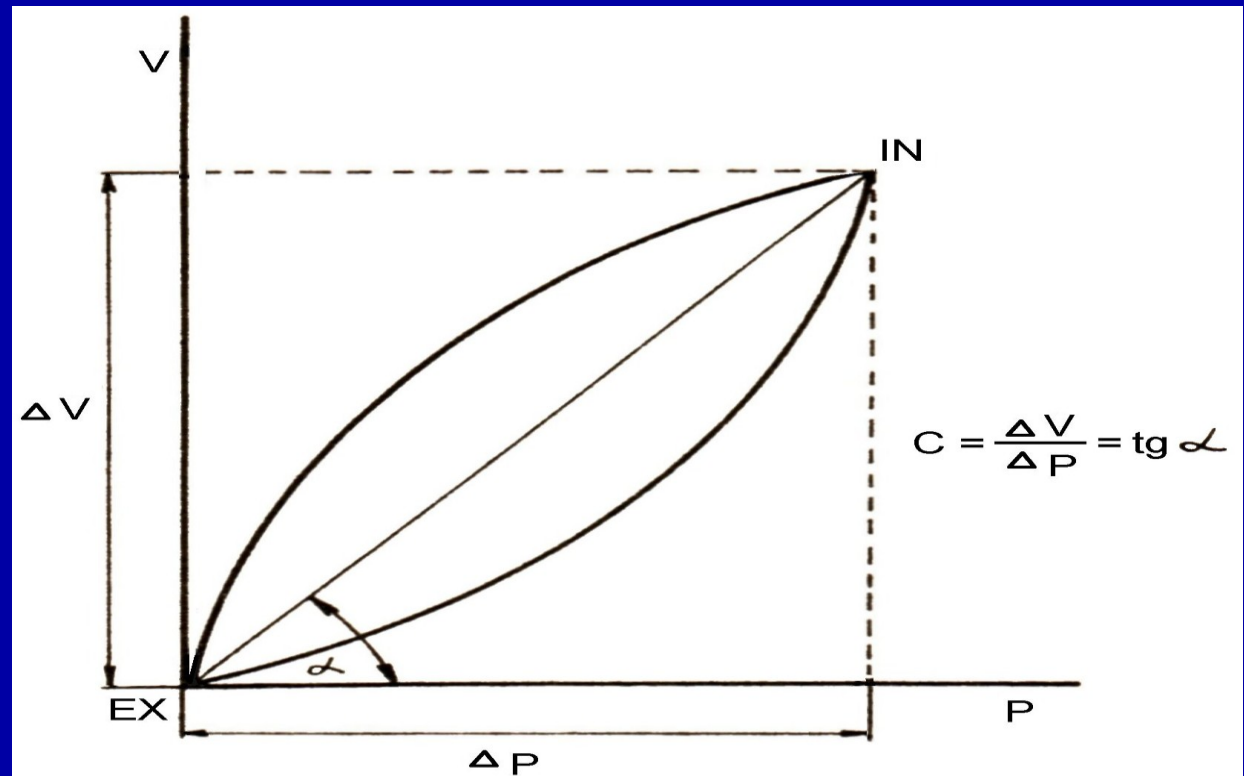


**Poddajnosť pľúc (compliance - C)**  
**je zmena objemu (v l) spôsobená**  
**zmenou tlaku (v kPa) :**

**$N = 2l / kPa$**   
**dosp.človek**

**Fibróza  $\downarrow C$**

**Emfyzém**  
 **$\uparrow C$**



**Slučka dynamickej poddajnosti**

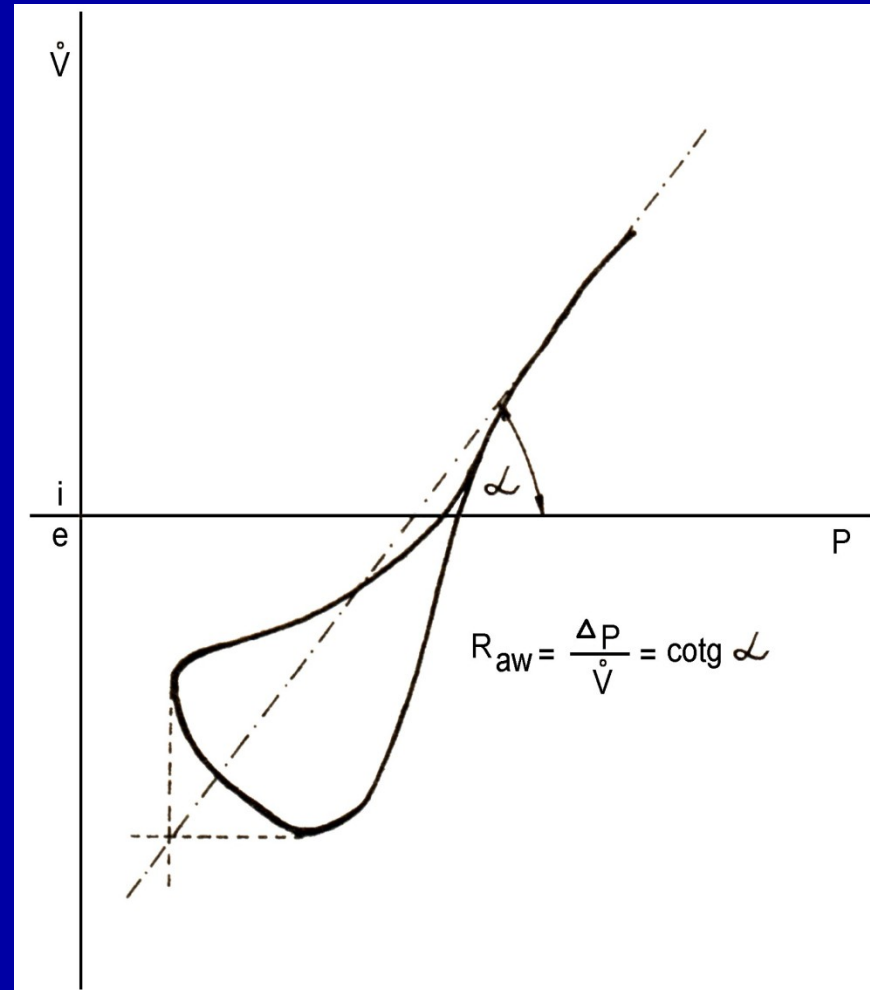
# Slučka celkového prúdového odporu dýchacích ciest (počítame ako pomer tlaku a prietoku)

( $kPa \cdot l \cdot s^{-1}$ )  
*astma bronchiale*

↑  $R_{aw}$

*rozšírenie dýchacích ciest*

↓  $R_{aw}$



# Ventilácia pľúc a distribúcia vzduchu

**Minútová ventilácia :**  $MV = V_T \cdot f$

**Alveolárna ventilácia :**  $AV = MV - (V_D \cdot f)$   
( $V_D = 150$  ml – mŕtvy objem)

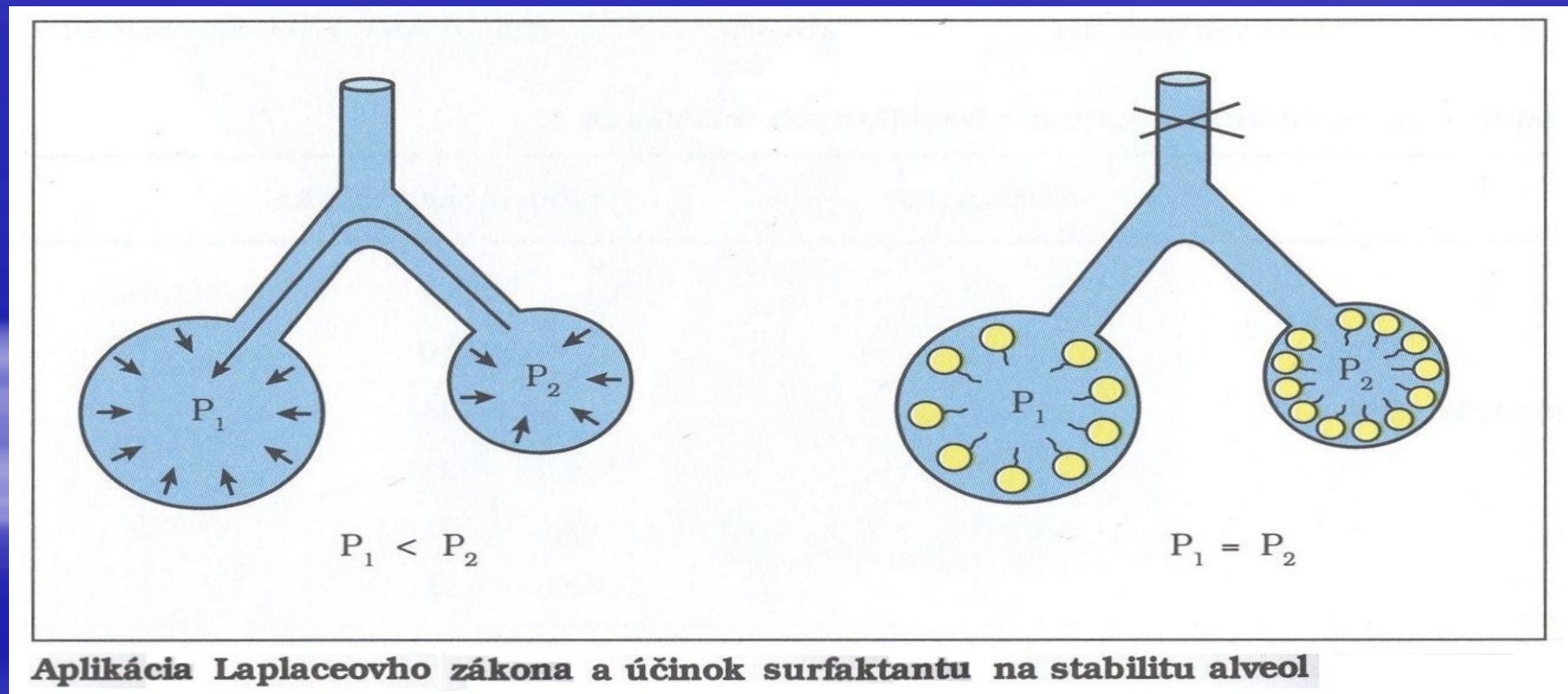
U dosp. človeka pri dychovom objeme ( $V_T$ ) 500 ml a frekvencii dýchania ( $f_d$ ) 12 dychov .  $\text{min}^{-1}$  predstavuje **minútová ventilácia** 6  $\text{l} \cdot \text{min}^{-1}$ , z čoho na **alveolárnu ventiláciu** pripadá 4,2  $\text{l} \cdot \text{min}^{-1}$ .

**Maximálna voluntárna ventilácia (MMV)** je najväčší objem vzduchu preventilovaný pľúcami za 1 minútu (120-170  $\text{l} \cdot \text{min}^{-1}$ ).

# La -Placeov zákon a úloha surfaktantu

$$P = \frac{2 \cdot T}{r}$$

P - tlak, T - tenzia v stene, r - polomer bubliny



**Aplikácia Laplaceovho zákona a účinok surfaktantu na stabilitu alveol**

**Atmosferický vzduch** = zmes  $O_2$  (20,93%),  $CO_2$  (0,03 %),  $N_2$  (78,06 %), He a iných stopových plynov (0,92%) a vodných pár.

**Parciálch vne tlaky plynov** závisia od atmosférického tlaku ( $P_B$ ). Tento tlak klesá pri výstupe do výšok a s ním klesajú aj parciálne tlaky plynov .

**Pri atmosferickom tlaku** 101,3 kPa (760 torr ,1 atm,) a **tlaku vodných pár** 0,8 kPa (suchý vzduch) je **parciálny tlak**  $P_{O_2}$  21,06 kPa a  $P_{CO_2}$  0,04 kPa

# Daltonov zákon

platí pre výpočet parciálnych tlakov dýchacích plynov v zmesi plynov : „čím vyššia je koncentrácia plynu v zmesi plynov, tým väčší je jeho parciálny tlak“

$$P_{O_2} = V\% O_2 \times (P_B - P_{H_2O}) / 100$$

napr.  $P_{O_2}$  v atmosferickom vzduchu pri hladine mora je :

$$P_{O_2} = 20,93 \times (101,3 - 0,8) / 100 = 21,06 \text{ (kPa)}$$

Obdobne počítame  $P_{O_2}$ ,  $P_{CO_2}$ ,  $P_{N_2}$  aj v alveolárnom príp. v exspirovanom vzduchu.

# Zastúpenie O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> (v obj. %) a ich parc. tlaky (v kPa), spolu s parc. tlakom H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub> v atm, v exspir. a v alveol. vzduchu, ako aj v artériovej a venóznei krvi

	O <sub>2</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)	PH <sub>2</sub> O (kPa)	PN <sub>2</sub> (kPa)	PaO <sub>2</sub> (kPa)	PCO <sub>2</sub> (kPa)
Atmosfer. vzduch (suchý)	20,93	0,03	0,8	79,04	21,06	0,04
Exspir. vzduch	15,1	4,3	6,3	75,3	15,3	5,73
Alveolárny vzduch	13,2	5,1	6,2	76,4	13,4	5,33
Artériová krv	19,8	50	6,3	76,4	8 12,7	5,2 0,8
Venózna krv	14-15	55	6,3	76,4	5,2	6,13



**Výmena dýchacích plynov** cez alveolokapilárnu membránu prebieha formou **difúzie**, ktorá závisí od parciálnych tlakov jednotlivých plynov ( $O_2$  a  $CO_2$ ) v alveolárnom vzduchu a v kapilárnom pľúcnom riečišti.

**Pri difúzii:**

tlakový gradient pre:

$$O_2 = 13,4 - 5,2 = 8 \text{ (kPa) t.j.}$$

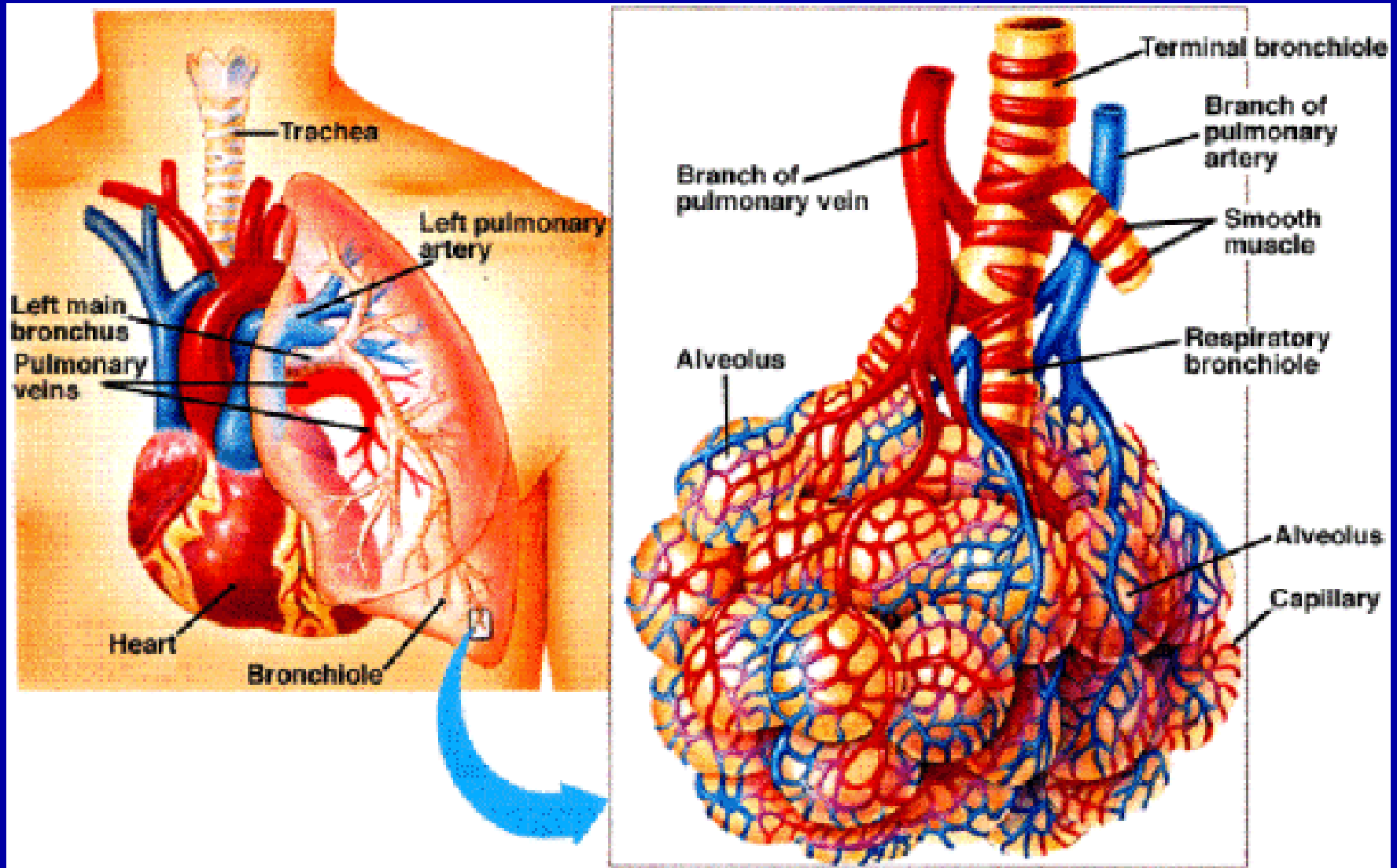
$$O_2 = 100 - 40 = 60 \text{ (torr)}$$

*tlakový gradient :*

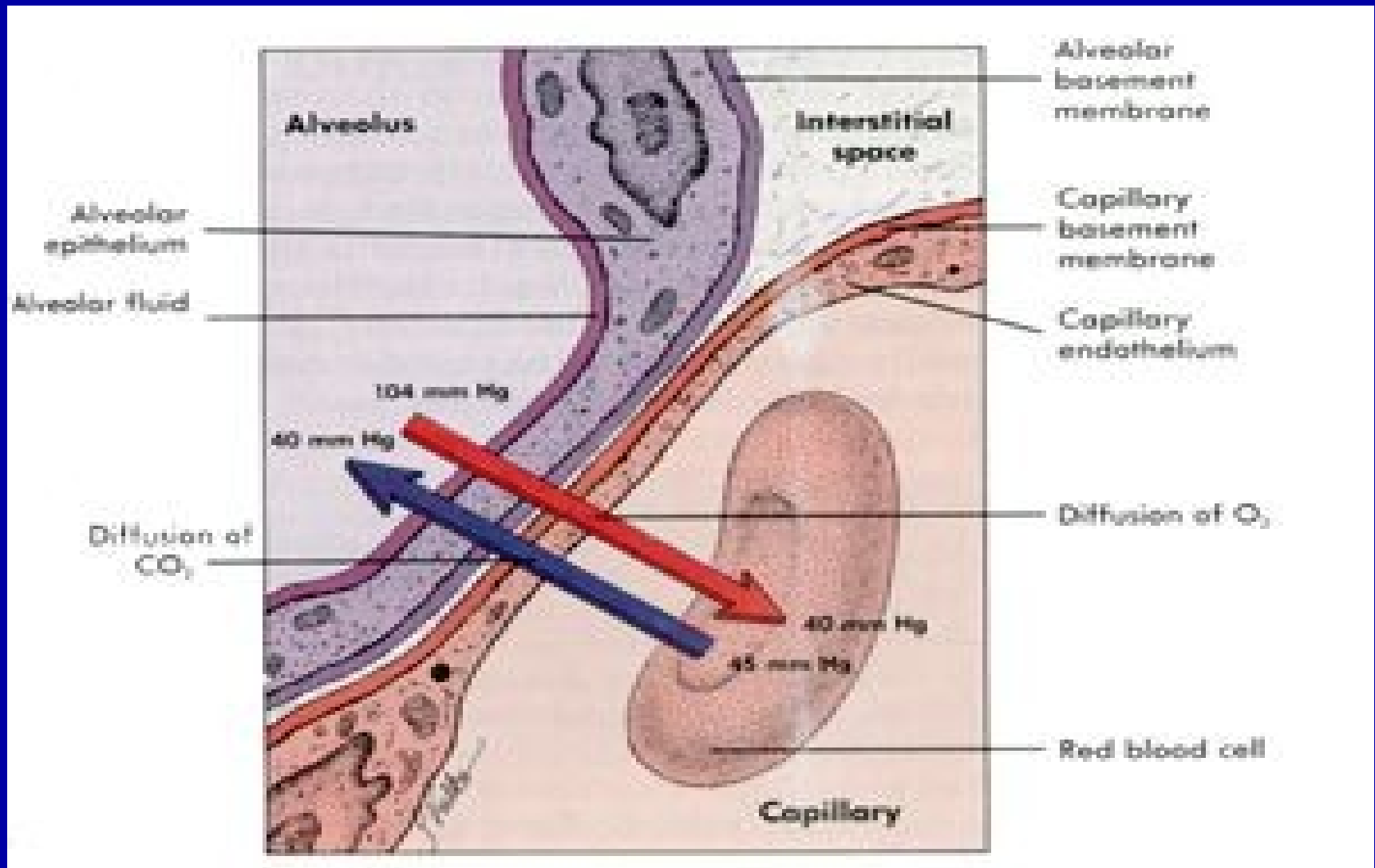
$$\text{pre } CO_2 = 6,13 - 5,33 = 0,8 \text{ (kPa) t.j.}$$

$$CO_2 = 46 - 40 = 6 \text{ (torr)}$$

# Difúzia plynov v pľúcach - morfológia



# Difúzia plynov cez alveolokapilárnu membránu



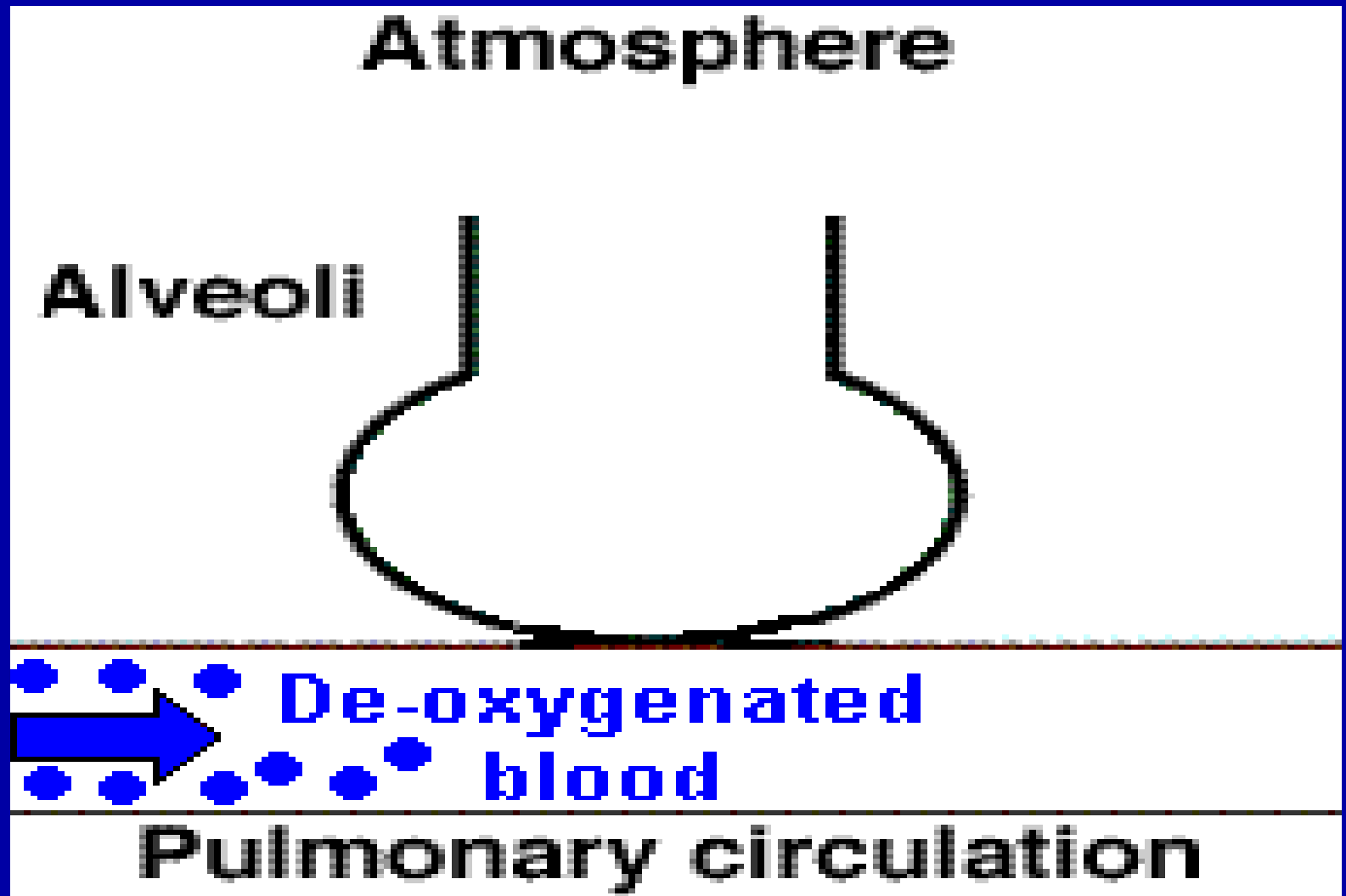
Difúzia  $O_2$  a  $CO_2$  cez alveolokapilárnu (AK) membránu sa riadi **Fickovym** **zákonom**.

$$V = \frac{(P_1 - P_2) \cdot A \cdot k}{s}$$

kde  $P_1$  a  $P_2$  sú parciálne tlaky plynov,  
 $A$  = difúzna plocha ( $70 \text{ m}^2$ ),  
 $s$  = hrúbka membrány ( $0,8 \text{ um}$ )  
 $k$  = difúzna konštanta.

**Difúzna konštanta -k** závisí od zloženia membrány a druhu difundujúceho plynu (pre  $CO_2$  je rýchlosť difúzie 20-krát väčšia ako pre  $O_2$ )  
napr.  $VO_2 = 15 - 20 \text{ ml / min}$ .  
a  $VCO_2 = 350 - 400 \text{ ml / min}$

# Dynamika difúzie cez AK membránu



# Rozpustnosť plynov v krvnej plazme

**Henryho zákon** - množstvo plynu fyzikálne rozpustného v kvapaline je úmerné parciálnemu tlaku plynu nad kvapalinou a jeho koeficientu rozpustnosti.

**Množstvo  $O_2$ , rozpusteného v 1 l krvi:**

$$SO_2 = \alpha \cdot PO_2 \cdot 1000 / P_B = 3,0 \text{ ml/l krvi}$$

**Množstvo  $CO_2$  v 1l krvi :**

$$SCO_2 = \beta \cdot P_{CO_2} \cdot 1000 / P_B = 27 \text{ ml/l krvi.}$$

(kde  $\alpha$  je koeficient rozpustnosti,  $P$  je parciálny tlak plynu a  $P_B$  je celkový barometrický tlak)

**Koeficient rozpustnosti  $\alpha$  pre  $O_2 = 0,024$  a  $\beta$  pre  $CO_2 = 0,57$ . Rozpustnosť  $CO_2$  v krvi je cca 24x väčšia ako kyslíka.**

# PERFÚZIA - transport $O_2$ a $CO_2$ krvou

$O_2$  - je fyzikálne rozpustený v plazme a chemicky viazaný na hemoglobín.

*V 1 l artériovej krvi je 200 ml  $O_2$ , z toho 3 ml pripadajú na fyzikálne rozpustený  $O_2$  a 197 ml je chemicky viazané na hemoglobín.*

**Fyzikálne rozpustený  $O_2$  → parciálny tlak**

**$CO_2$  – vystupuje ako fyzikálne rozpustený v plazme, a chemicky viazaný vo forme bikarbonátov a karbaminohemoglobínu.**

*V 1 l venóznej krvi je 27 ml fyzikálne rozpust.  $CO_2$  (v plazme), zbytok cca 520 ml je viazaný v ostatných dvoch formách.*



**Prajem Vám pekný deň**