

# **DÝCHACÍ SYSTÉM**

## **PLICNÍ FUNKCE MECHANIKA DÝCHACÍHO SYSTÉMU PŘENOS PLYNŮ**

**Autor prezentace:**

**Doc. MUDr. Milena Šimurdová, CSc.**

# FÁZE TRANSPORTU $O_2$ K BUŇKÁM

VENTILACE PLIC

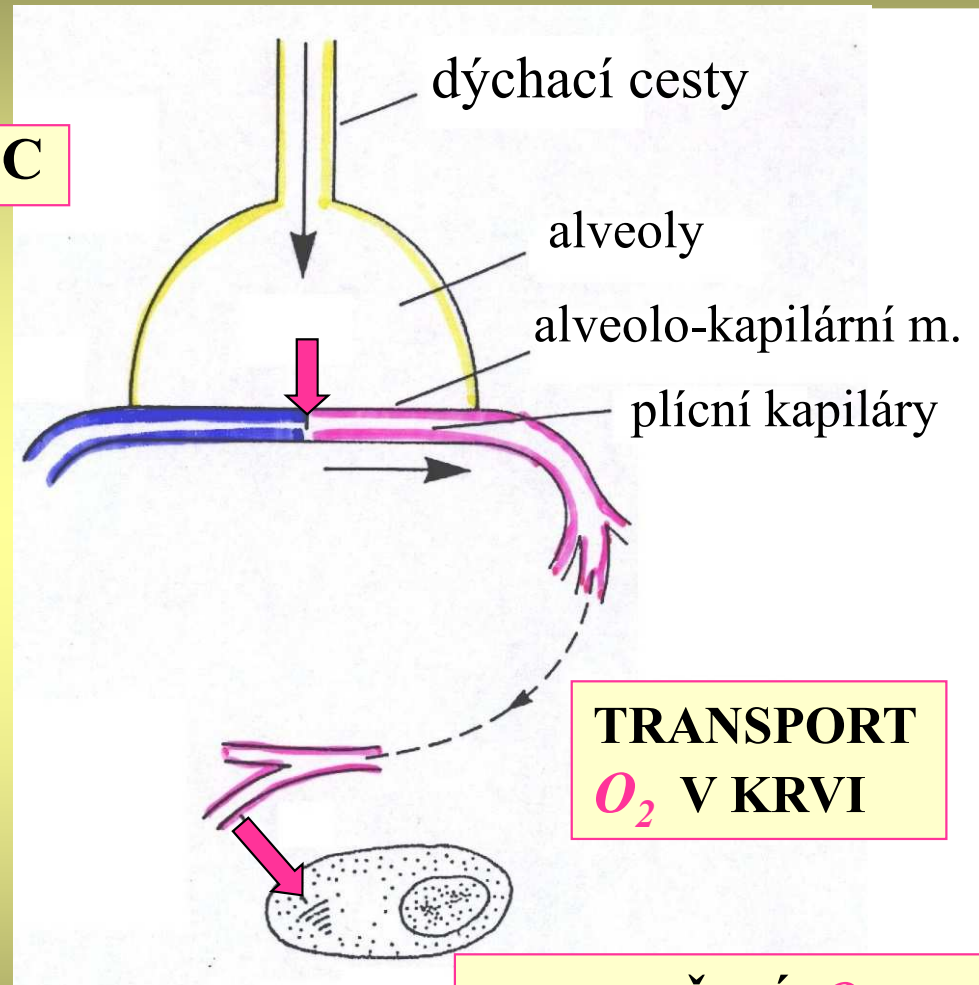
DIFUZE  $O_2$  PŘES  
ALVEOLO-KAPILÁTRNÍ  
MEMBRÁNU

DIFUZE  $O_2$   
Z PERIFERNÍ KAPILÁRY  
DO BUŇKY

V KLIDU

příjem  $O_2$  ~300 ml / min

výdej  $CO_2$  ~250 ml / min

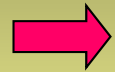


VYUŽITÍ  $O_2$   
MITOCHONRIEMI

VNITŘNÍ DÝCHÁNÍ

# DÝCHACÍ CESTY

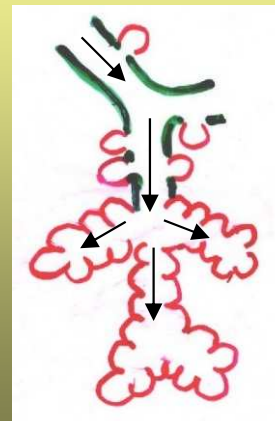
## ANATOMICKÝ MRTVÝ PROSTOR – ZÓNA KONDUKCE



- **NOSNÍ PRŮDUCHY**
- **FARYNX**
- **LARYNX**
- **TRACHEA**
- **BRONCHY**
- **BRONCHIOLY**
- **TERMINÁLNÍ BRONCHIOLY**

Další funkce:

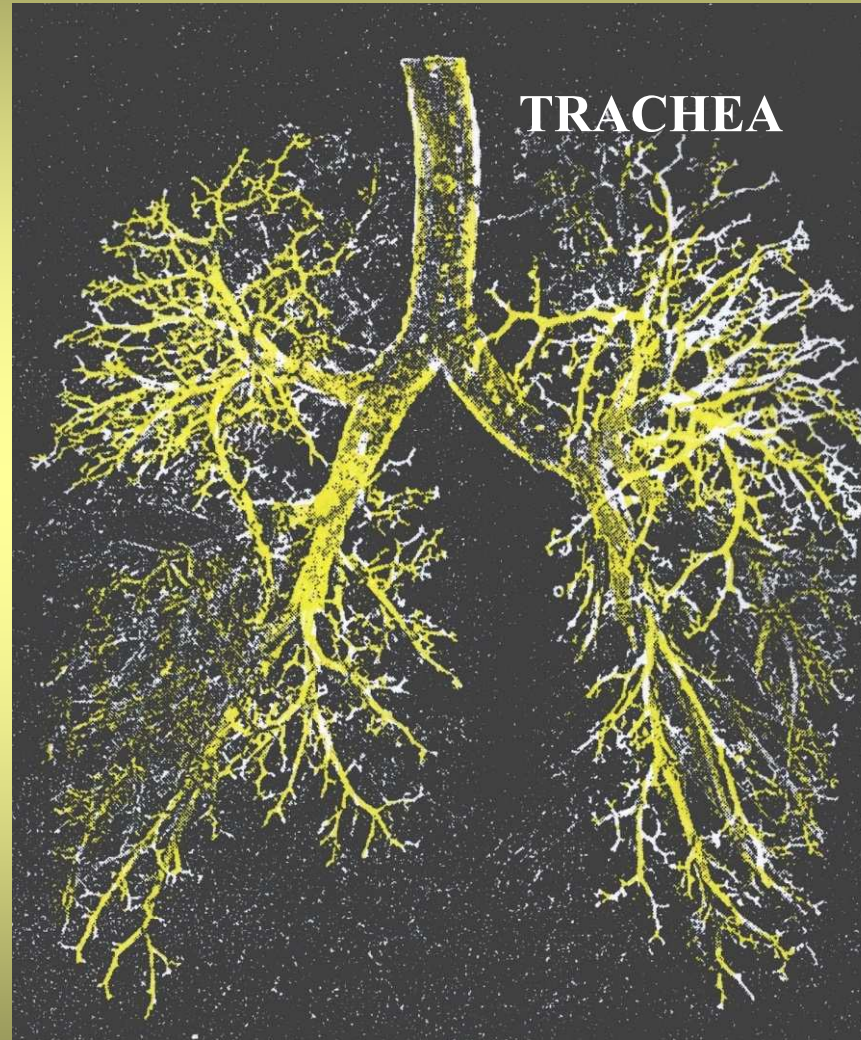
- oteplení vzduchu, očištění, doplnění vodními parami
- reflexní odpovědi na dráždivé podněty
- řeč a zpěv (specifické funkce laryngu)



**ZÓNA  
VÝMĚNY PLYNŮ  
(alveolo-kapilární membána)**

**CELKOVÁ PLOCHA 70 - 100 m<sup>2</sup>**

# ODLITEK DÝCHACÍCH CEST U ČLOVĚKA

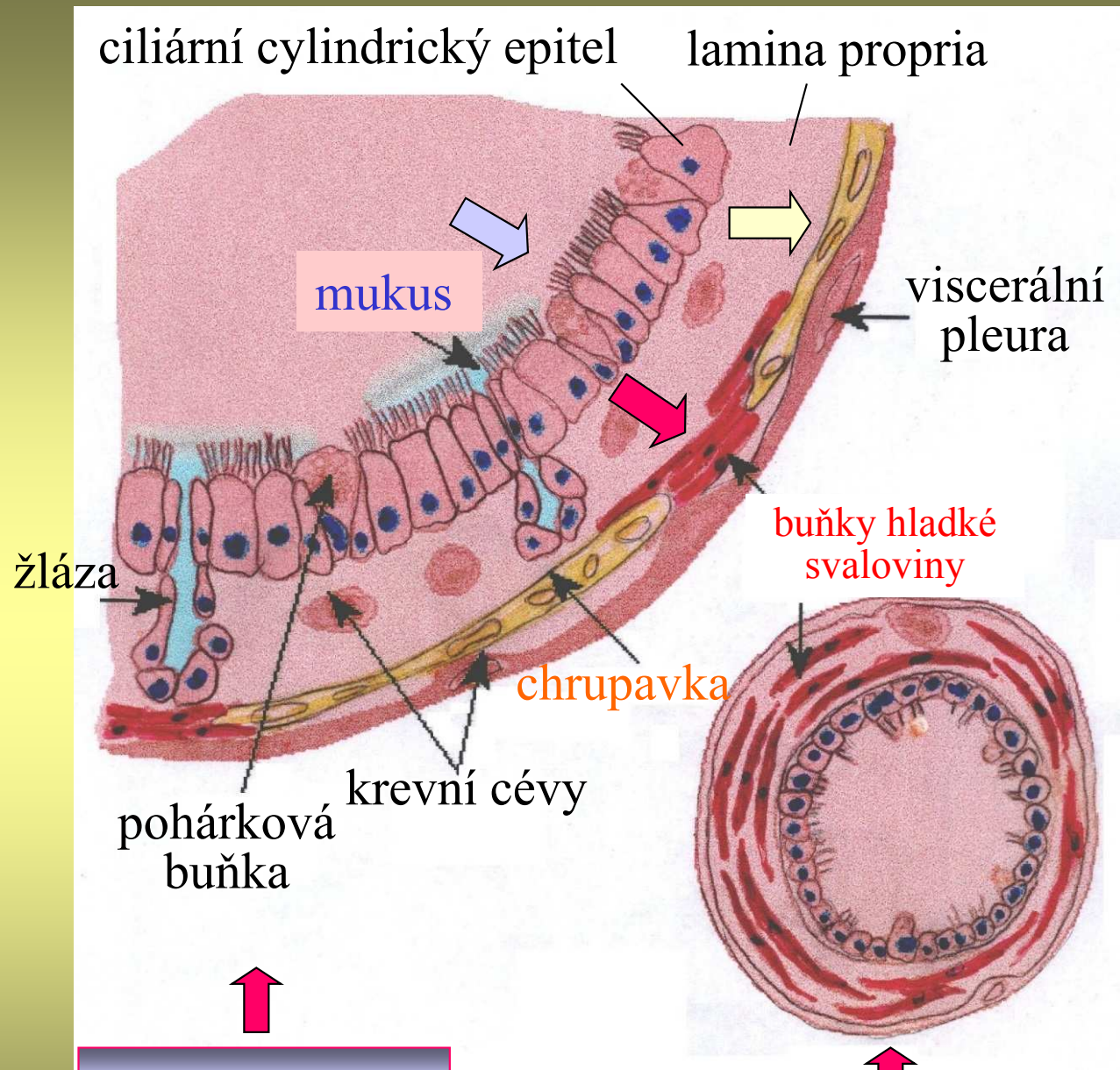


**BRONCHY**

**BRONCHIOLY**

**TERMINÁLNÍ  
BRONCHIOLY**

**AERODYNAMICKÝ ODPOR**



**AUTONOMNÍ INERVACE  
SVALOVÝCH BUNĚK**

**muskarinové** receptory  
aktivace acetylcholinem  
⇒ **bronchokonstrikce**

**β<sub>2</sub>-adrenergní** receptory  
aktivace noradrenalinem  
⇒ **bronchodilatace**

**BRONCHUS**

**TERMINÁLNÍ  
BRONCHIOLUS**

∅ < 1 mm

$V_T$  dechový objem ('*tidal volume*') ~500 ml

$V_A$  alveolární část dechového objemu ~350 ml

$V_D$  část dechového objemu v mrtvém prostoru ('*dead volume*') ~150 ml

$$V_T = V_A + V_D$$

$$f = 12/\text{min}$$

$\dot{V} = V_T \times f$   
**MINUTOVÁ  
VENTILACE PLIC**

6 l/min

$$\dot{V}_A = V_A \times f$$

**ALVEOLÁRNÍ VENTILACE**

4,2 l/min

$$\dot{V}_D = V_D \times f$$

**VENTILACE MRTVÉHO  
PROSTORU**

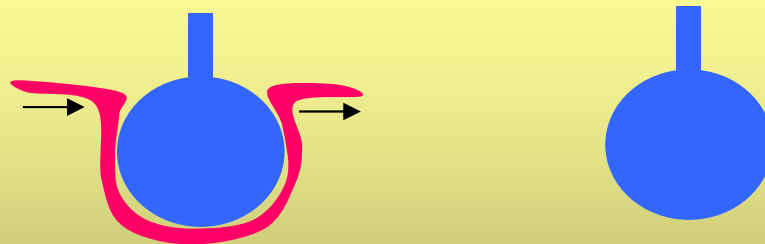
1,8 l/min

# MRTVÝ PROSTOR

CELKOVÝ OBJEM, VE KTERÉM NEDOCHÁZÍ K VÝMĚNĚ PLYNŮ

- ANATOMICKÝ mrtvý prostor - objem dýchacích cest
- FUNKČNÍ (celkový) mrtvý prostor

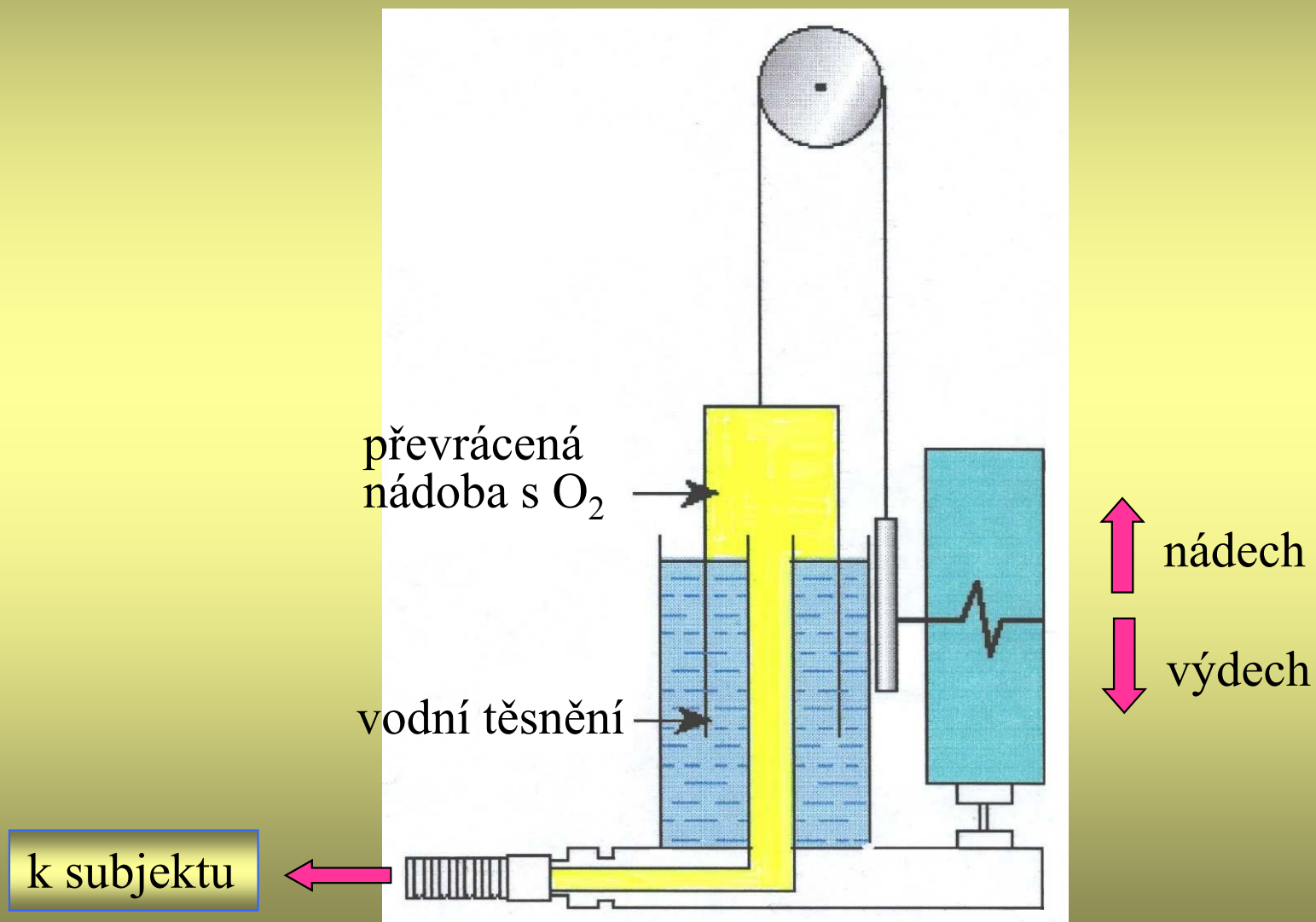
ANATOMICKÝ mrtvý prostor + celkový OBJEM ALVEOLŮ  
bez funkčního kapilárního řečiště



U ZDRAVÉHO JEDINCE  
oba dva prostory jsou prakticky stejné

# SPIROMETRIE

(měření plicních objemů, kapacit, funkčních vyšetření, ...)





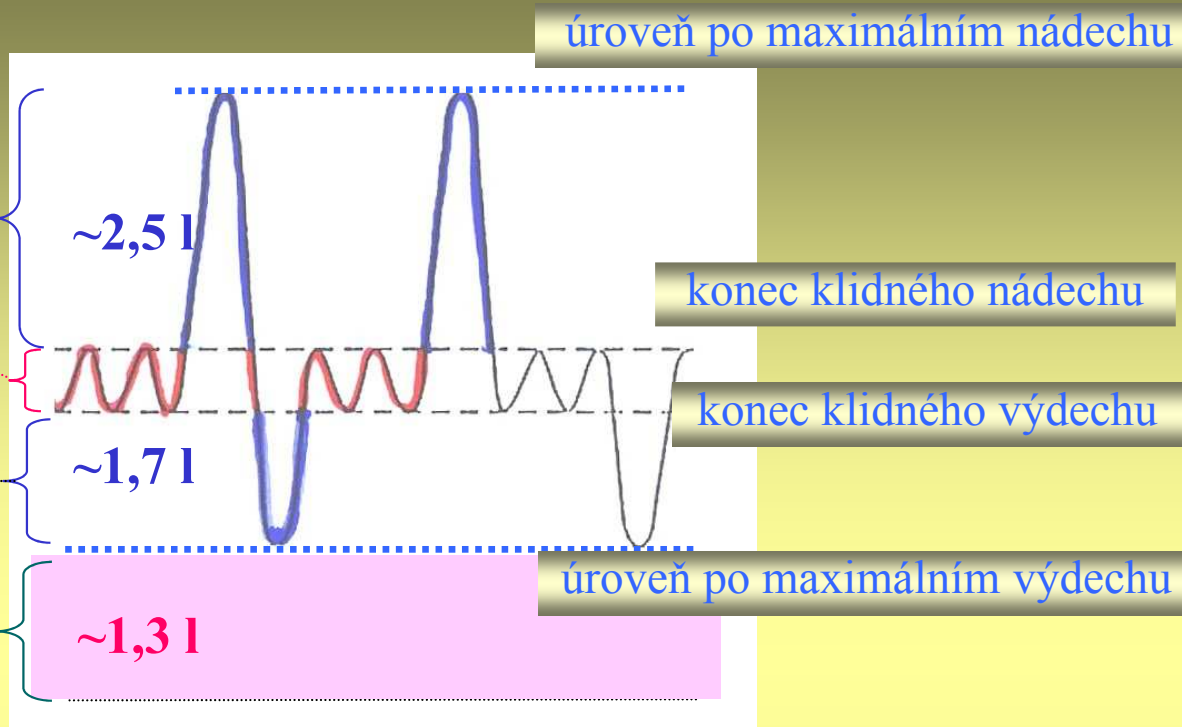
# PLÍČNÍ OBJEMY

INSPIRAČNÍ  
REZERVNÍ OBJEM  $IRV$

DECHOVÝ OBJEM  $V_T$   
(*'tidal volume'*)

EXSPIRAČNÍ  
REZERVNÍ OBJEM  $ERV$

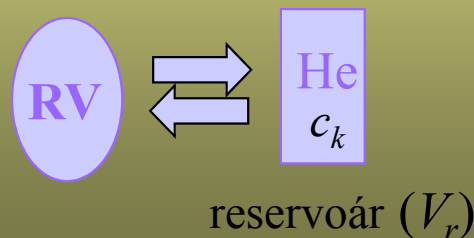
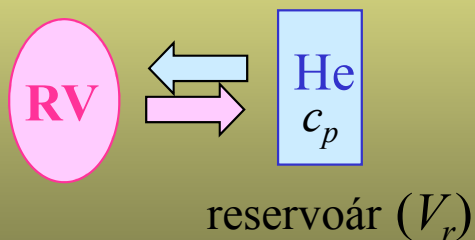
REZIDUÁLNÍ OBJEM  $RV$



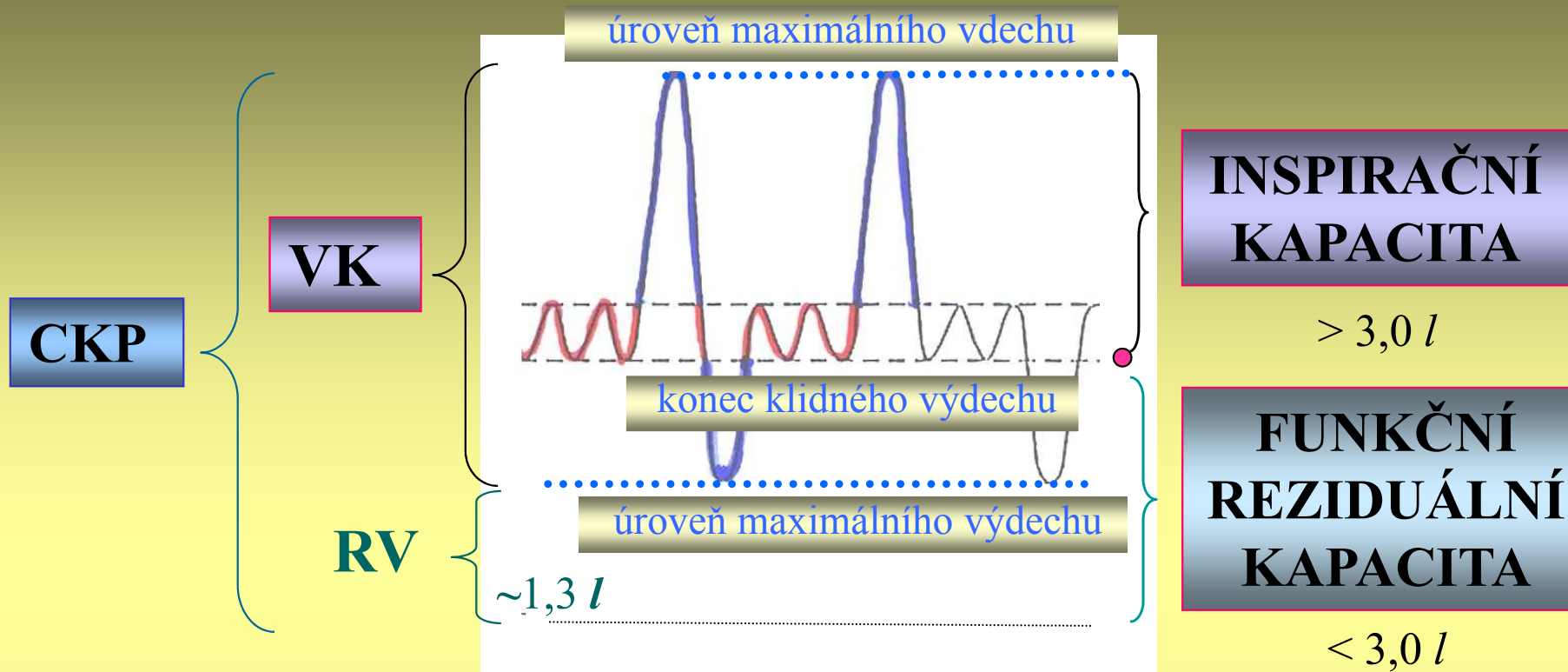
DILUČNÍ METODA  
(metoda zředěného plynu)  
 $He$

Princip metody: **1** Maximální výdech **2** Opakovaný nádech a výdech z a do rezervoáru (známého objemu) s inertním plynem ( $He$ ) známé koncentrace  $c_p$ .  $\Rightarrow$  Složení vzduchu v obou prostorech se vyrovná ( $c_k$ ).

**3** Vypočtení **REZIDUÁLNÍHO OBJEMU** z počáteční a konečné koncentrace  $He$  v rezervoáru ( $c_p, c_k$ ).



$$RV = V_r \frac{c_{pHe} - c_{kHe}}{c_{kHe}}$$



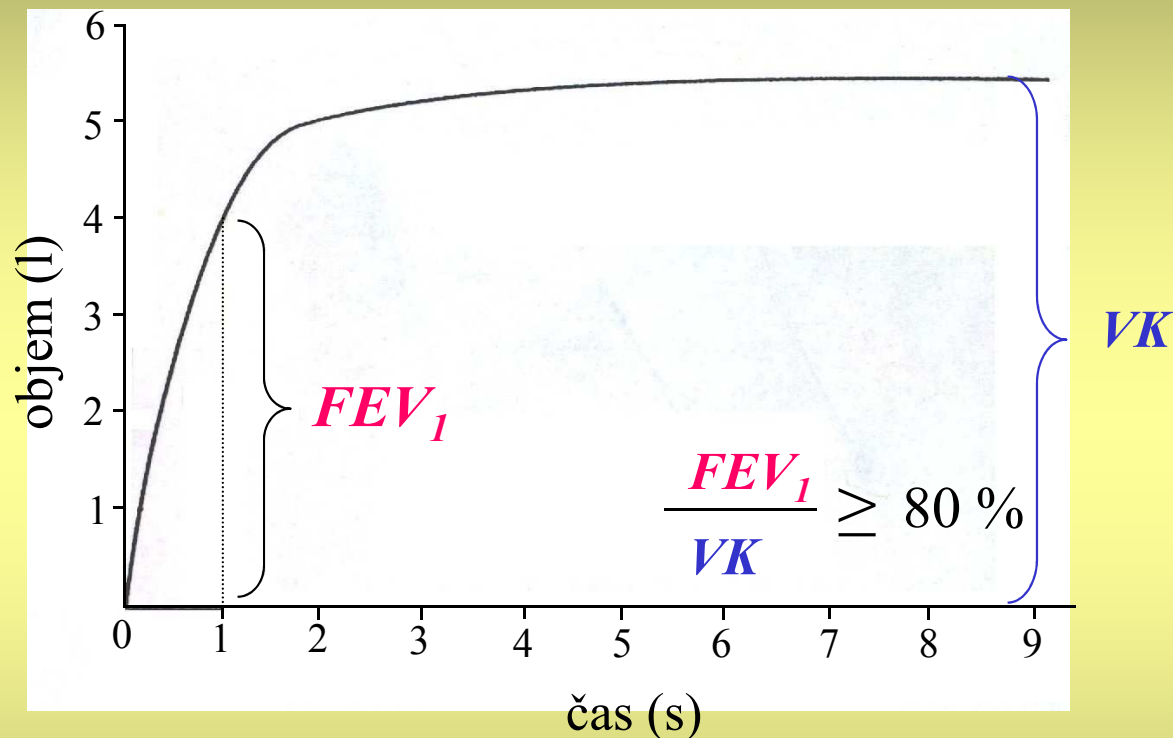
**VK** VITÁLNÍ KAPACITA =  $V_T + IRV + ERV$   $\sim 4,7 l$

*VK - největší objem vzduchu, který je možno vydechnout po maximálním nádechu*

**CKP** CELKOVÁ KAPACITA PLIC =  $VK + RV$   $\sim 6,0 l$

# FUNKČNÍ VYŠETŘENÍ PLIC

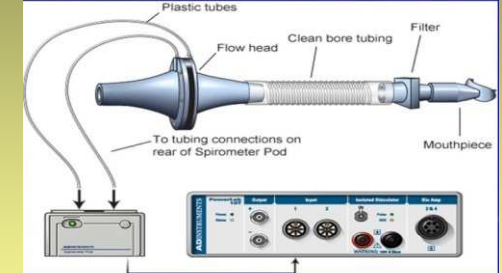
- **VTEŘINOVÁ VITÁLNÍ KAPACITA** (expirační vteřinová *VK*, rozepsaný usilovný výdech *VK*) ***FEV<sub>1</sub>*** (*'forced expiratory volume per 1 sec'*)



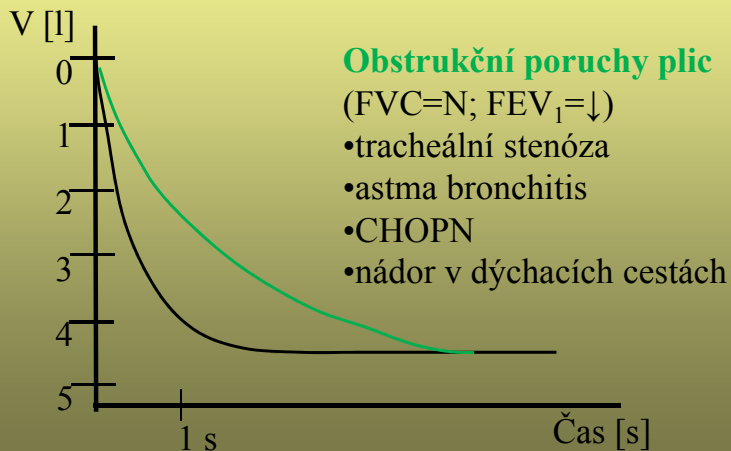
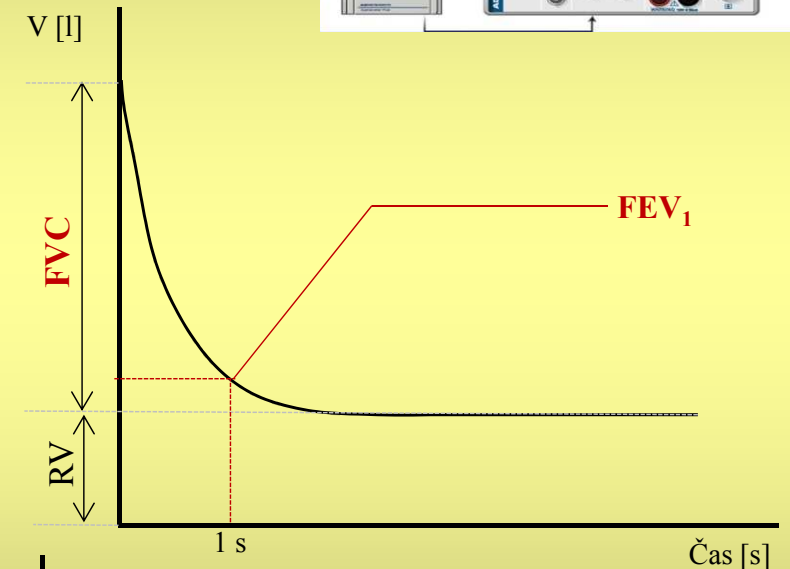
- **KLIDOVÁ MINUTOVÁ VENTILACE** (0,5 l x 12 dechů / min = 6 l/min)
- **MAXIMÁLNÍ VOLNÍ VENTILACE** po dobu 10 s ***MVV*** (125 - 170 l/min)
- **MAXIMÁLNÍ PROUDĚNÍ VYDECHOVANÉHO VZDUCHU *PEFR*** (*'peak expiratory flow rate'*) (~10 l/s)

# VC

**Principem** je stanovení rychlosti proudění vzduchu z měřených rozdílů tlaků mezi vnitřní a vnější stranou membrány spirometru, objemy jsou dopočítávány (spirometry systému PowerLab).



- **FVC** – usilovná vitální kapacita; maximální objem vzduchu, který lze po maximálním nádechu prudce vydechnout
- **FEV<sub>1</sub>** – usilovně vydechnutý objem za první sekundu; objem vzduchu vydechnutý s největším úsilím za 1. sekundu po maximální nádechu
- **FEV<sub>1</sub>/FVC (%)** – Tiffeneauův index – kolem 80 %



## Restrikční poruchy plic

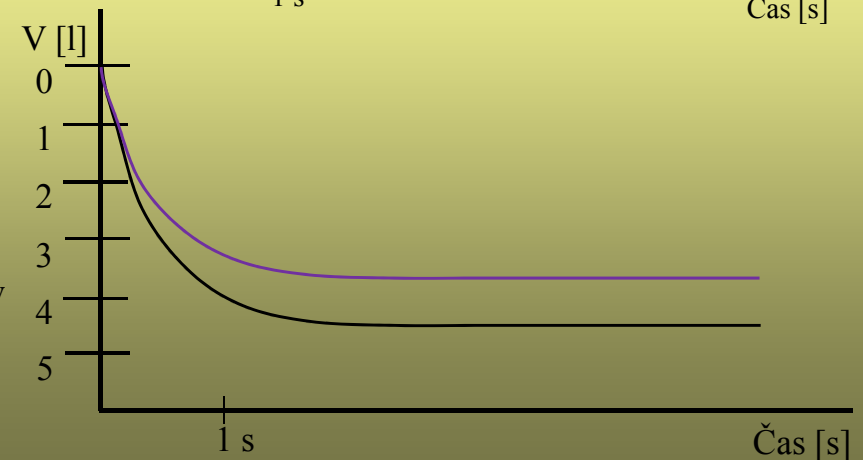
(FVC=↓; FEV<sub>1</sub>=N)

### pulmonální příčiny

- plicní fibróza
- resekce plic
- plicní edém
- pneumonie

### extrapulmonální příčiny

- ascites
- kyfoskolióza
- popáleniny
- vysoký stav bránice

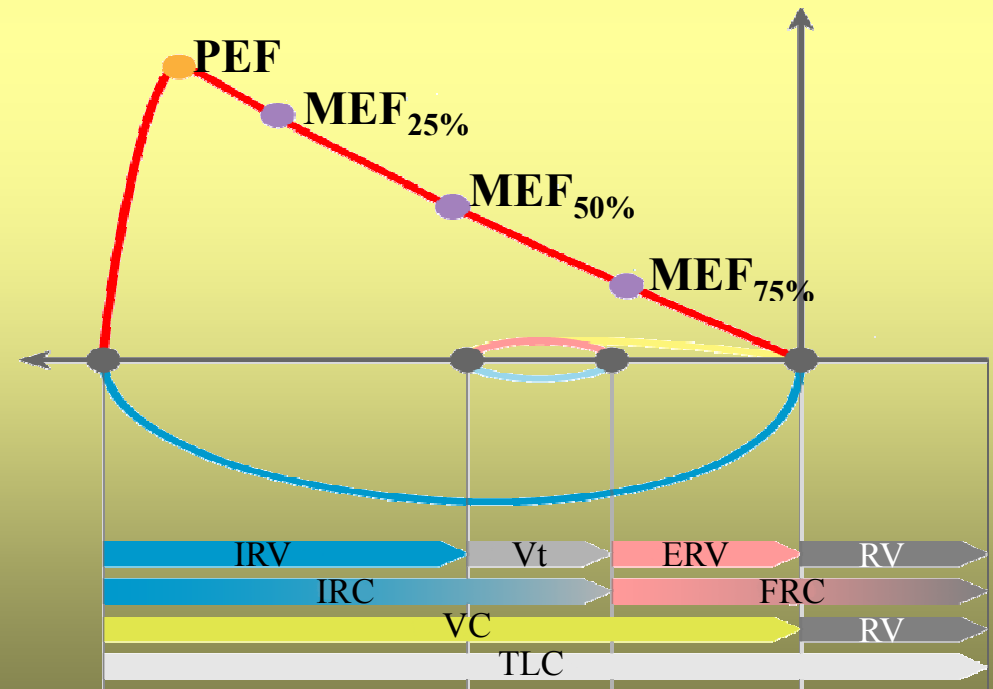


# ROZEPSANÝ VÝDECH VC

**Principem** je měření rychlosti proudění vzduchu definovaným průřezem z otáček turbíny a objemy jsou dopočítávány (Cosmed).



- **PEF** – vrcholový výdechový průtok; nejvyšší rychlost na vrcholu usilovného výdechu (odpovídá vzduchu v horních DC)
- **MEF** – maximální výdechové průtoky (rychlosti) na různých úrovních FVC, kterou je ještě třeba vydechnout (nejčastěji na 75 %, 50 % a 25 % FVC)



$$P \cdot V = konst$$

$$P = \frac{konst}{V}$$

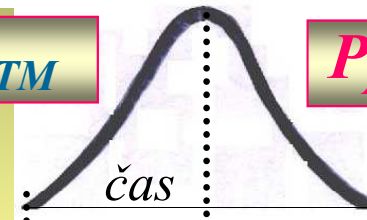
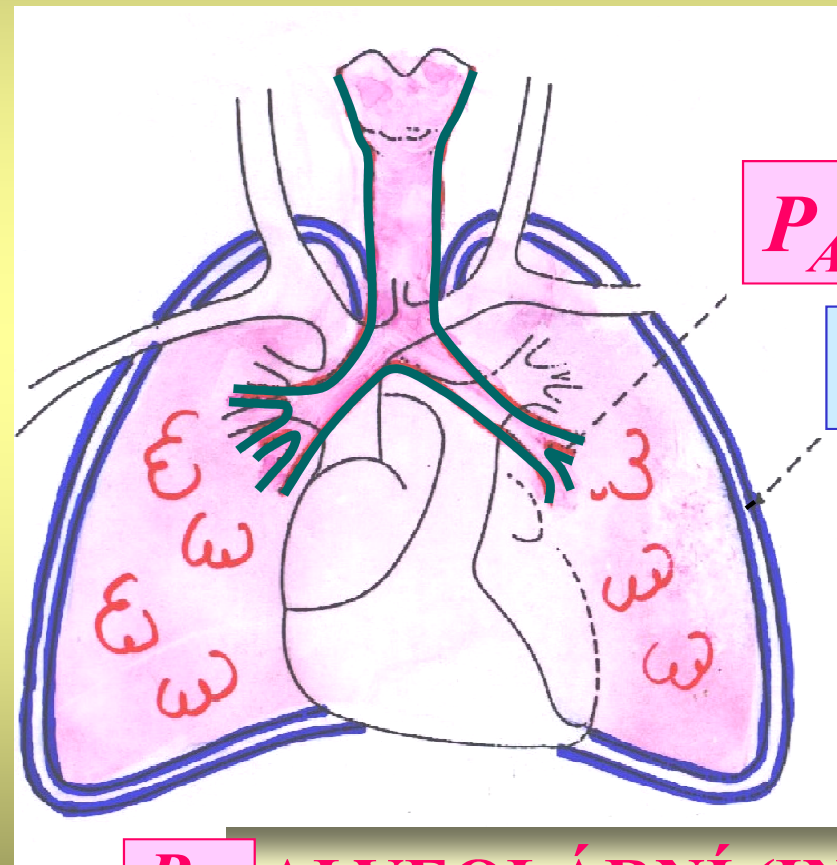
## PRŮBĚHY TLAKŮ PŘI KLIDNÉM DÝCHÁNÍ

INSP

EXSP

$$P_A < P_{ATM}$$

$$P_A > P_{ATM}$$



$V_T$  [l]

+1  
[mm Hg]

-1

-3

[mm Hg]

-6

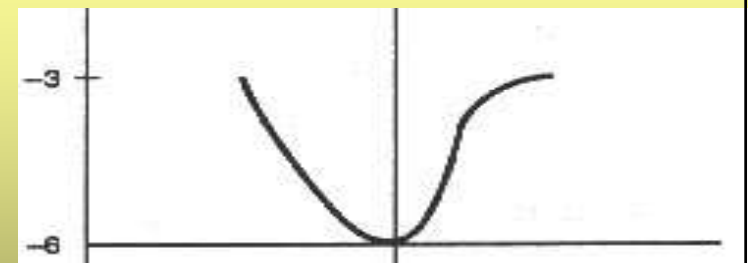
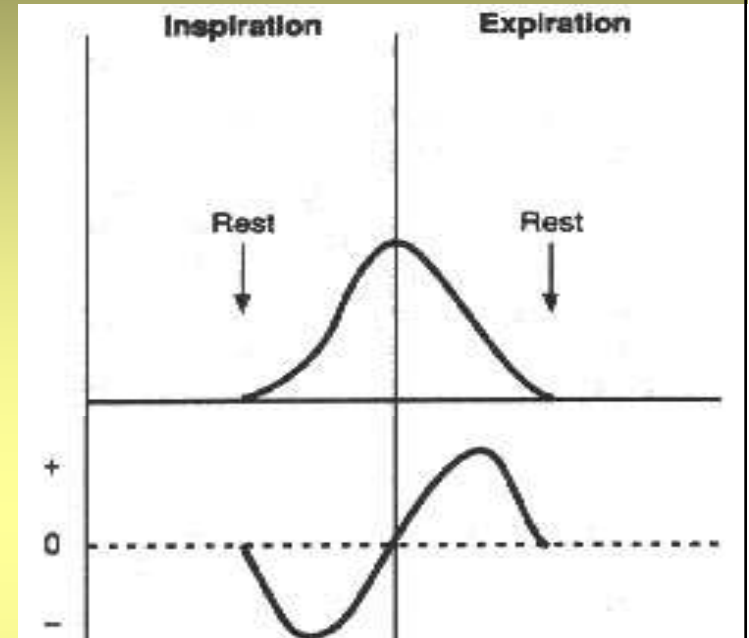
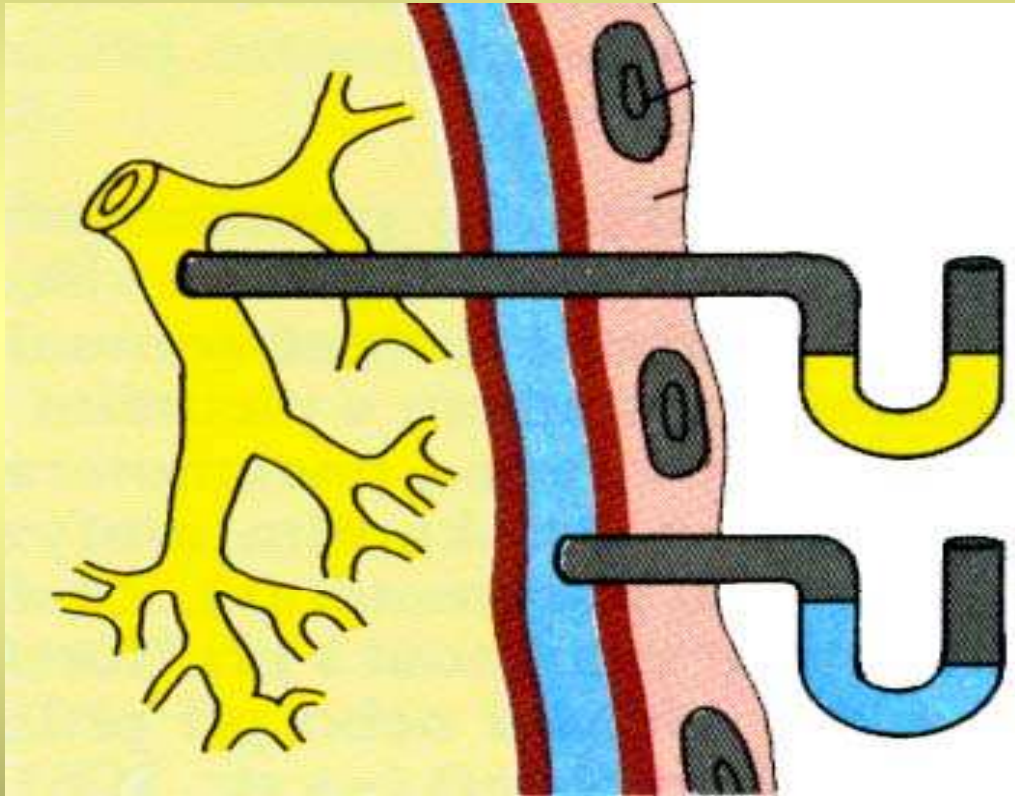
naměřená  
křivka

teoretická  
křivka

$P_A$  ALVEOLÁRNÍ (INTRAPULMONÁLNÍ)

$P_{PL}$  INTRAPLEURÁRNÍ (INTRATORAKÁLNÍ)

PLEURA  
pulmonalis      parietalis



## NA VENTILACI SE PODÍLÍ

- **AKTIVNÍ SÍLY RESPIRAČNÍCH SVALŮ**
- **PASIVNÍ SÍLY**
  - elasticita plic
  - elasticita hrudníku

## DÝCHÁNÍ V KLIDU

**VDECH** - **aktivní síly inspiračních svalů převládají**

**VÝDECH** - **pouze pasivní (elastické) síly (plic)**



# DÝCHACÍ SVALY

akcesorní svaly

mm. intercostales ext.

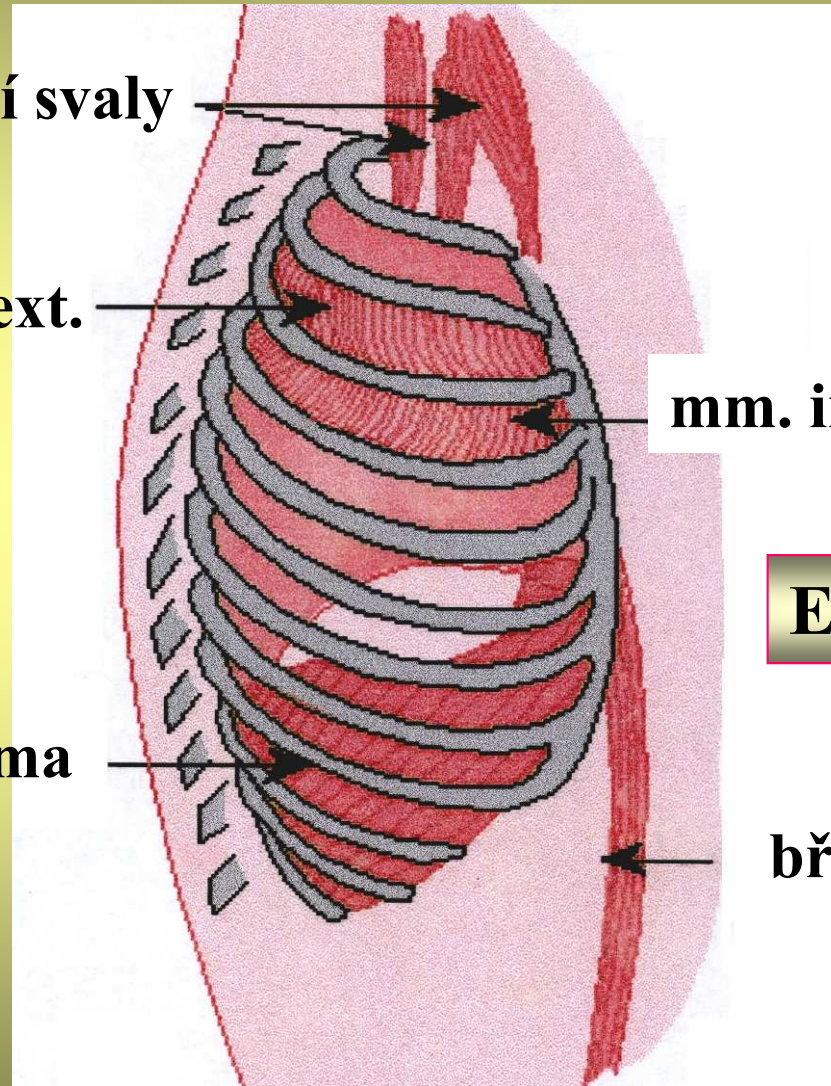
**INSPIRAČNÍ**

mm. intercostales int.

**EXSPIRAČNÍ**

diafragma

břišní svaly



## INSPIRAČNÍ SVALY

### Dýchání **V KLIDU**

- *diafragma* ( $\geq 80 \%$ )
- *mm. intercostales ext.* ( $\leq 20 \%$ )

### **USILOVNÉ** dýchání

- navíc akcesorní dýchací svaly (*mm. scaleni*)

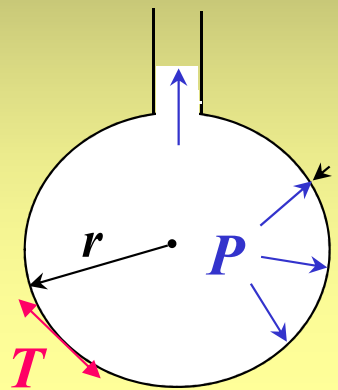
## EXSPIRAČNÍ SVALY

### Pouze při **USILOVNÉM** dýchání

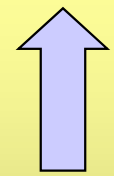
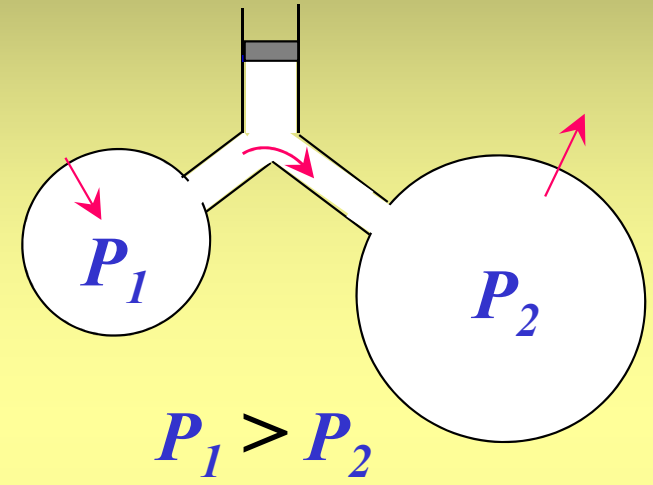
- *mm. intercostales int.*
- svaly přední břišní stěny

# LAPLACEŮV ZÁKON

sférické struktury



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



***P*** tlak (transmurální  $\Delta P$ )

***r*** radius

***T*** napětí stěny

## PATOLOGIE

- Kolaps alveolu - ATELEKTÁZA
- Další zvětšení objemu alveolu

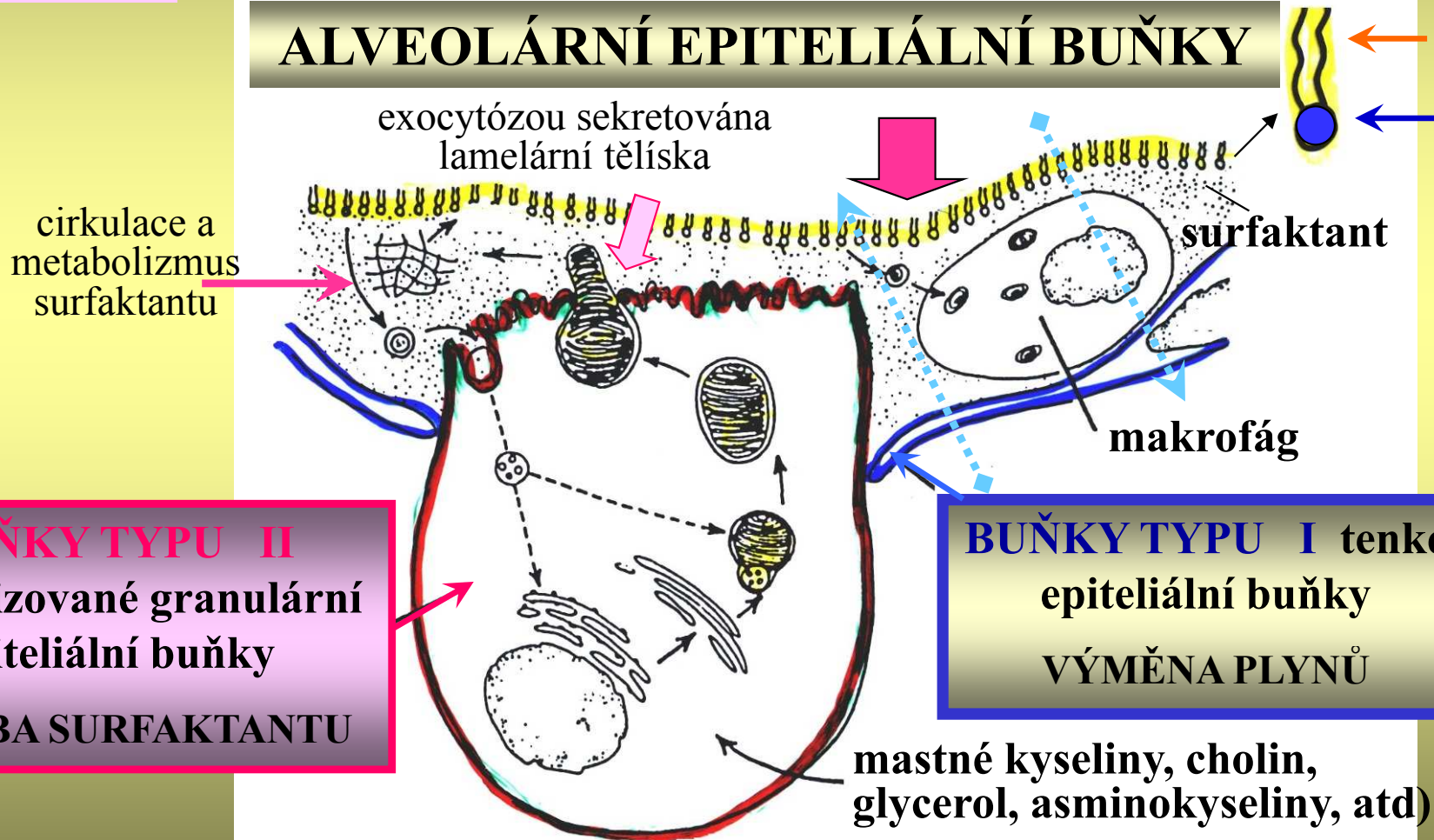
# SURFAKTANT

LÁTKA VÝRAZNĚ SNIŽUJÍCÍ  
POVRCHOVÉ NAPĚTÍ

**FOSFOLIPID**  
dipalmitoyl  
fosfatidyl cholin

ÚČINEK HLAVNĚ VE FÁZI VÝDECHU

## ALVEOLÁRNÍ EPITELIÁLNÍ BUŇKY



**BUŇKY TYPU II**  
specializované granulární  
epiteliální buňky  
TVORBA SURFAKTANTU

**BUŇKY TYPU I** tenké  
epiteliální buňky  
VÝMĚNA PLYNŮ

## SLOŽENÍ SUCHÉHO ATMOSFERICKÉHO VZDUCHU

$O_2$	20,98 %	$F_{O_2} \cong 0,21$
$N_2$	78,06 %	$F_{N_2} \cong 0,78$
$CO_2$	0,04 %	$F_{CO_2} = 0,0004$

Ostatní složky

## BAROMETRICKÝ TLAK VZDUCHU NA ÚROVNI MOŘE

1 atmosféra = 760 mm Hg

## PARCIÁLNÍ TLAKY PLYNŮ SUCHÉHO VZDUCHU NA ÚROVNI MOŘE

$$P_{O_2} = 760 \times 0,21 = \sim 160 \text{ mm Hg}$$

$$P_{N_2} = 760 \times 0,78 = \sim 593 \text{ mm Hg}$$

$$P_{CO_2} = 760 \times 0,0004 = \sim 0,3 \text{ mm Hg}$$

1 kPa = 7,5 mm Hg (torr)

# SLOŽENÍ ALVEOLÁRNÍHO VZDUCHU

parciální tlaky v mm Hg

## INSPIROVANÝ VZDUCH

## EXSPIROVANÝ VZDUCH

O <sub>2</sub>	158,8
CO <sub>2</sub>	0,3
N <sub>2</sub>	601,0
...	

760 mm Hg

O <sub>2</sub>	115,0
CO <sub>2</sub>	33,0
H <sub>2</sub> O	47,0
N <sub>2</sub>	565,0
...	

760 mm Hg

mrtvý prostor

O <sub>2</sub>	100,0
CO <sub>2</sub>	39,0

O <sub>2</sub>	100,0
CO <sub>2</sub>	39,0
H <sub>2</sub> O	47,0
N <sub>2</sub>	...

760 mm Hg

fyziologické zkratky

pravé srdce

levé srdce

vény

O <sub>2</sub>	40,0
CO <sub>2</sub>	45,0
H <sub>2</sub> O	47,0
N <sub>2</sub>	...
...	

arterie

O <sub>2</sub>	95,0
CO <sub>2</sub>	41,0
H <sub>2</sub> O	47,0
N <sub>2</sub>	...
...	

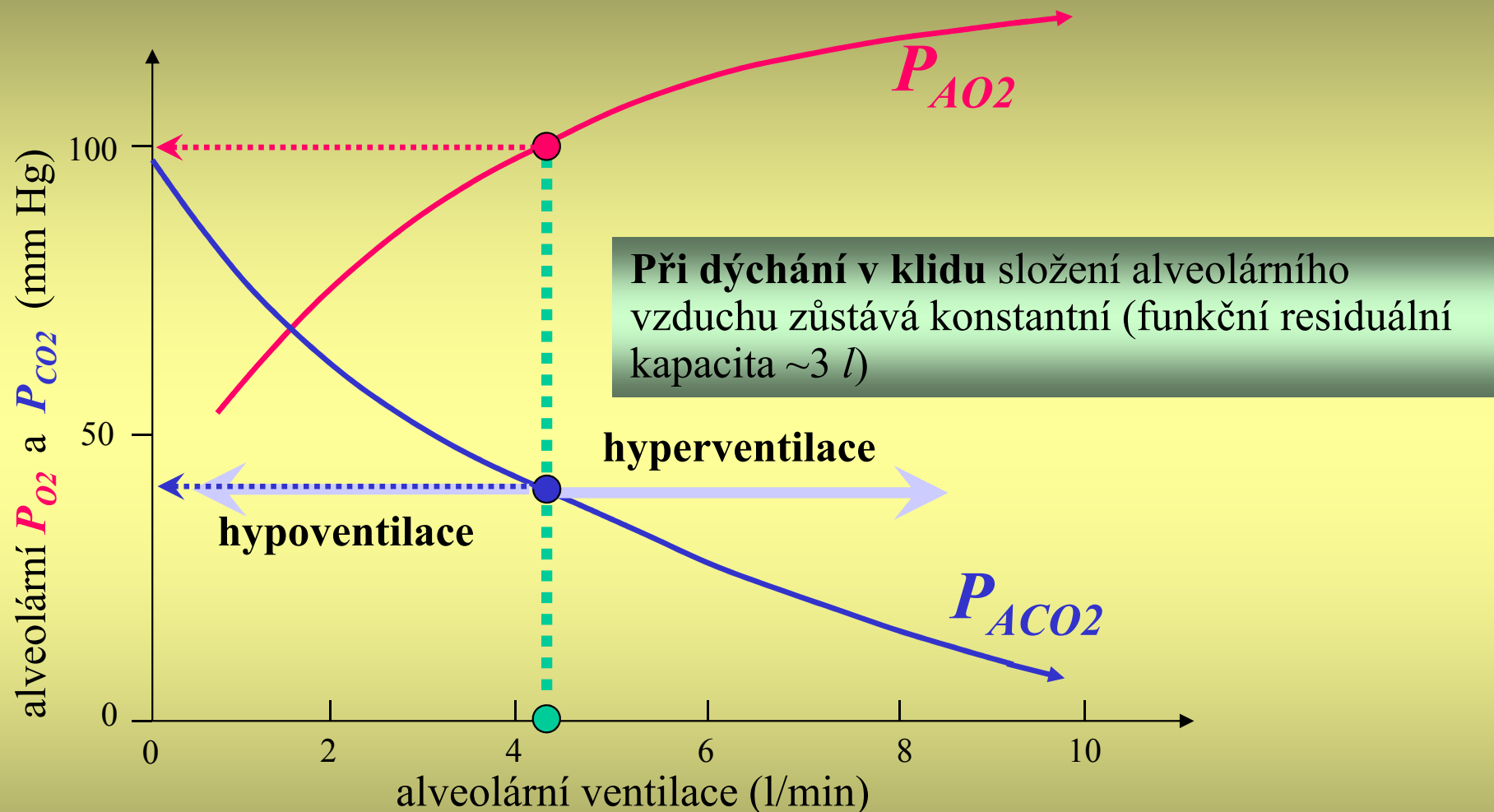
periferní kapiláry

O <sub>2</sub>	40,0
CO <sub>2</sub>	45,0
H <sub>2</sub> O	47,0
N <sub>2</sub>	...
...	

?

?

# Alveolární $P_{O_2}$ a $P_{CO_2}$ při volní hypo- a hyperventilaci

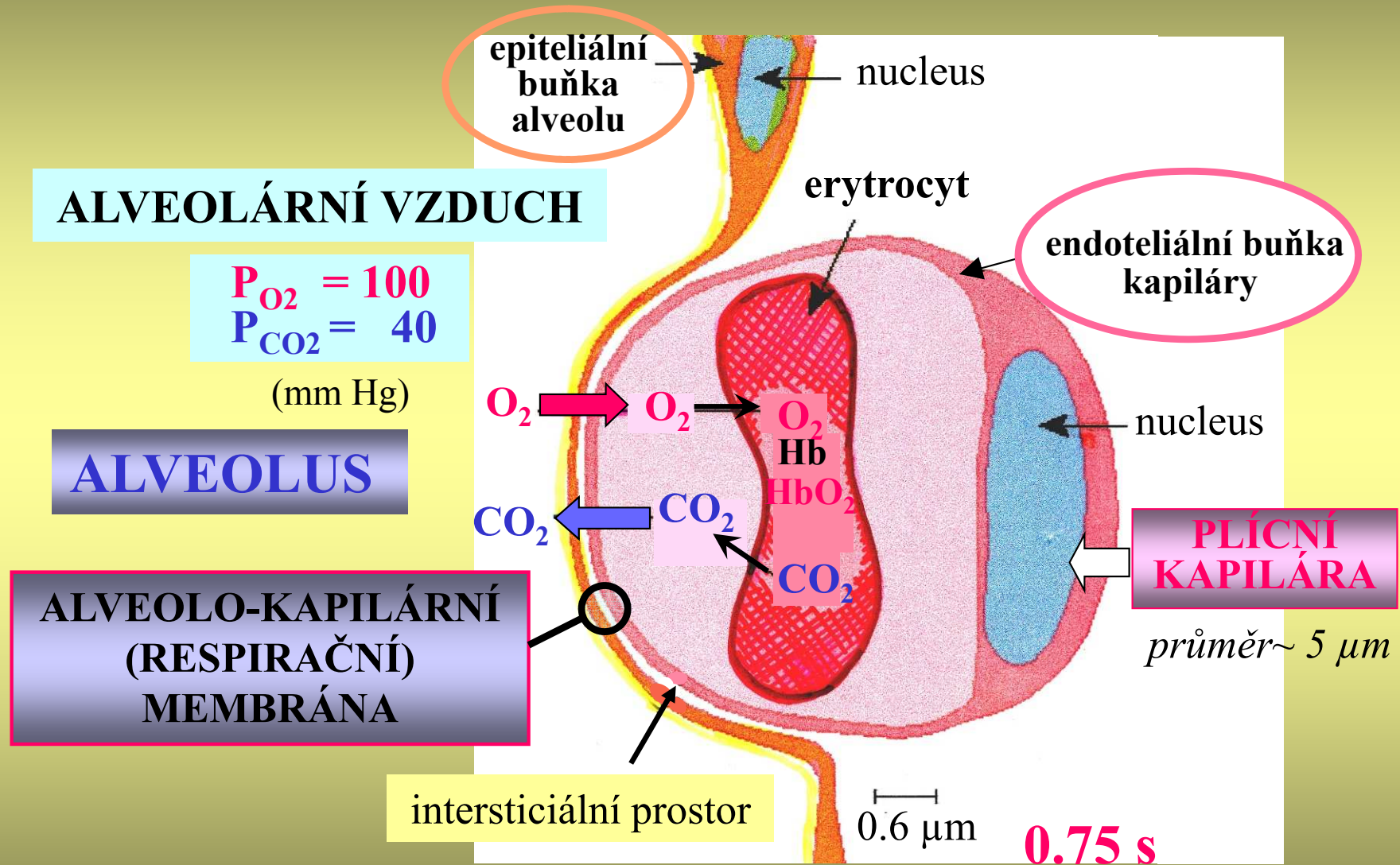


hyperventilace → **HYPOKAPNIE** → respirační alkalóza

hypoventilace → **HYPERKAPNIE** → respirační acidóza

# ALVEOLO-KAPILÁRNÍ (RESPIRAČNÍ) MEMBRÁNA

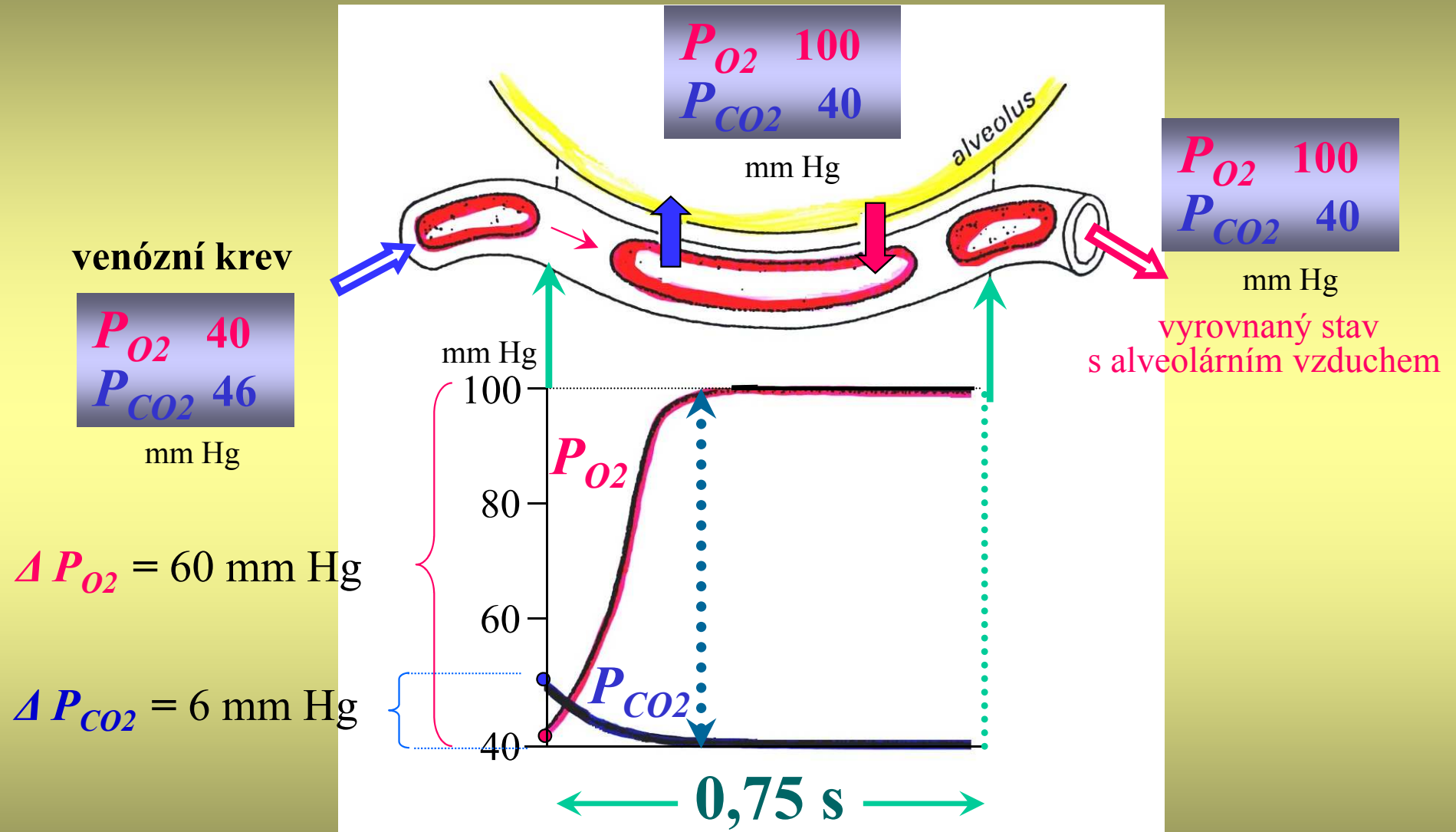
## DIFUZE PLYNŮ



*doba kontaktu erytrocytu  
s respirační membránou v klidu*

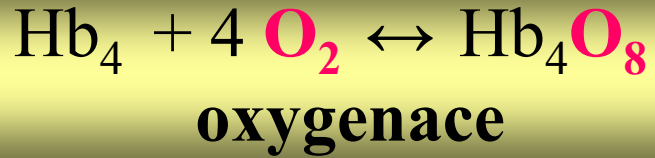


# ČASOVÝ PRŮBĚH VYROVNÁVÁNÍ $P_{O_2}$ A $P_{CO_2}$ V KAPILÁŘE S ALVEOLÁRNÍM VZDUCHEM

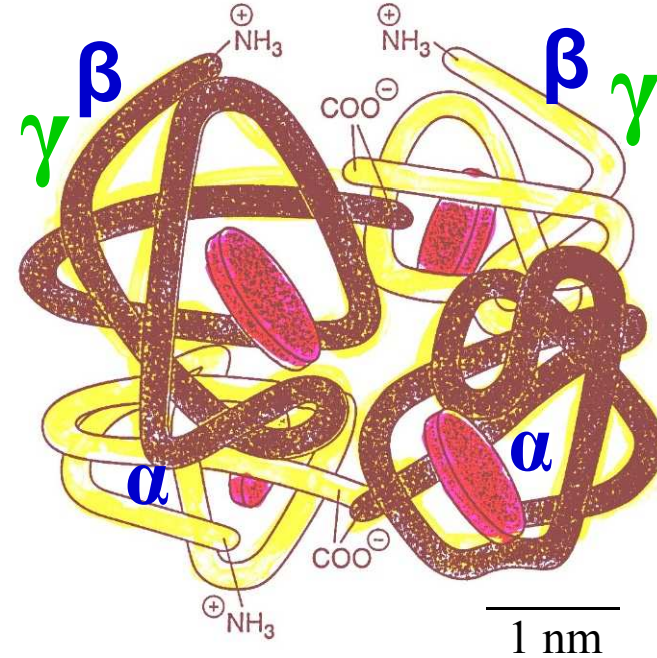


doba kontaktu erytrocytu s respirační membránou v klidu

# HEMOGLOBIN



tetramer

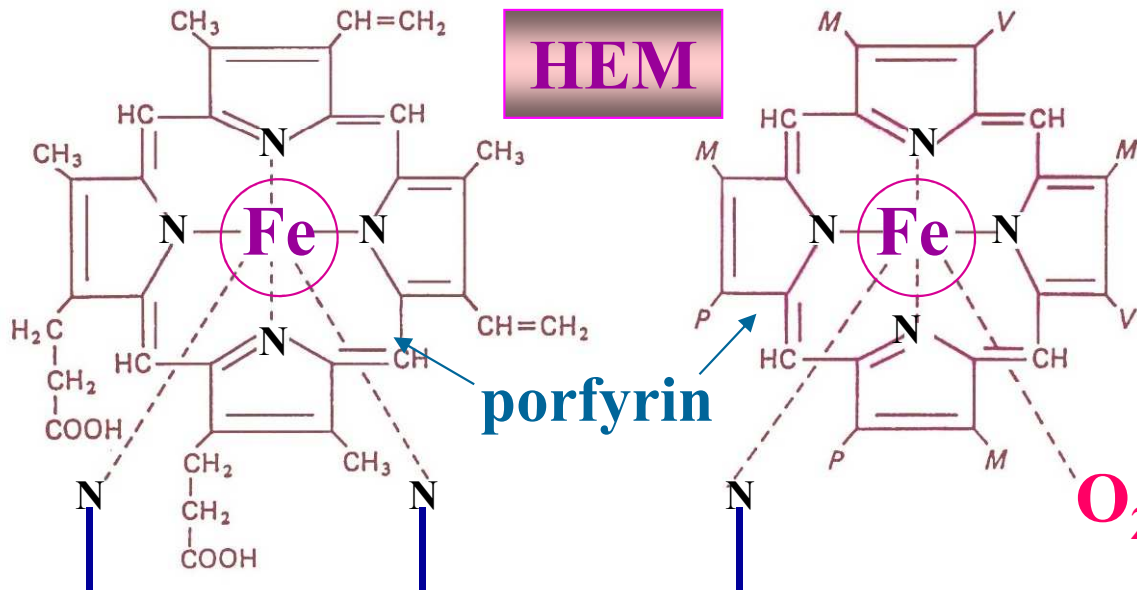


DEOXY

$\text{Fe}^{2+}$

OXY

HEM



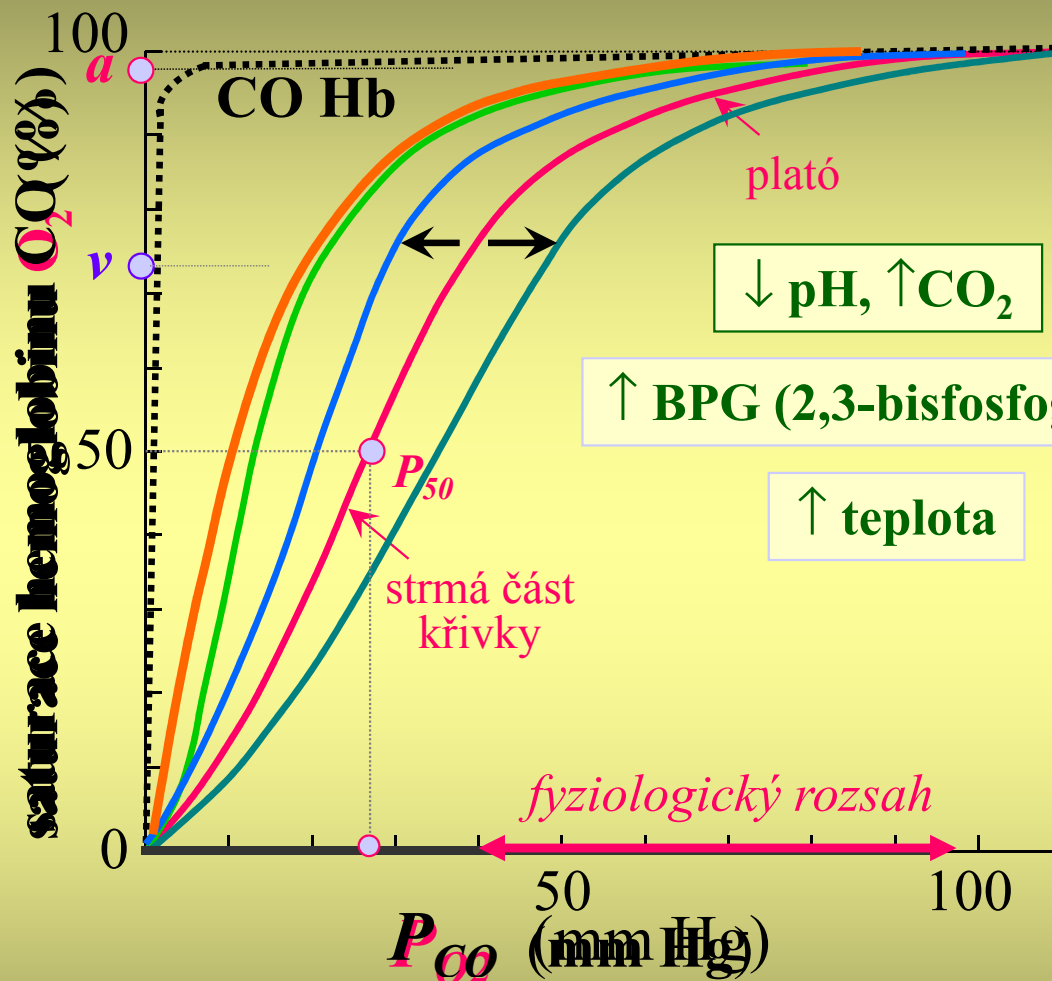
polypeptidový řetězec

polypeptidový řetězec

fetální Hb

$\text{Fe}^{3+}$  (methemoglobin)  
oxidace

# VAZEBNÁ KŘIVKA $O_2$ NA HEMOGLOBIN



**BOHRŮV EFEKT**  
 $\downarrow$  pH,  $\uparrow$   $CO_2$

$\downarrow$  pH,  $\uparrow$   $CO_2$

$\uparrow$  BPG (2,3-bisfosfoglycerát)

$\uparrow$  teplota

fetální Hb

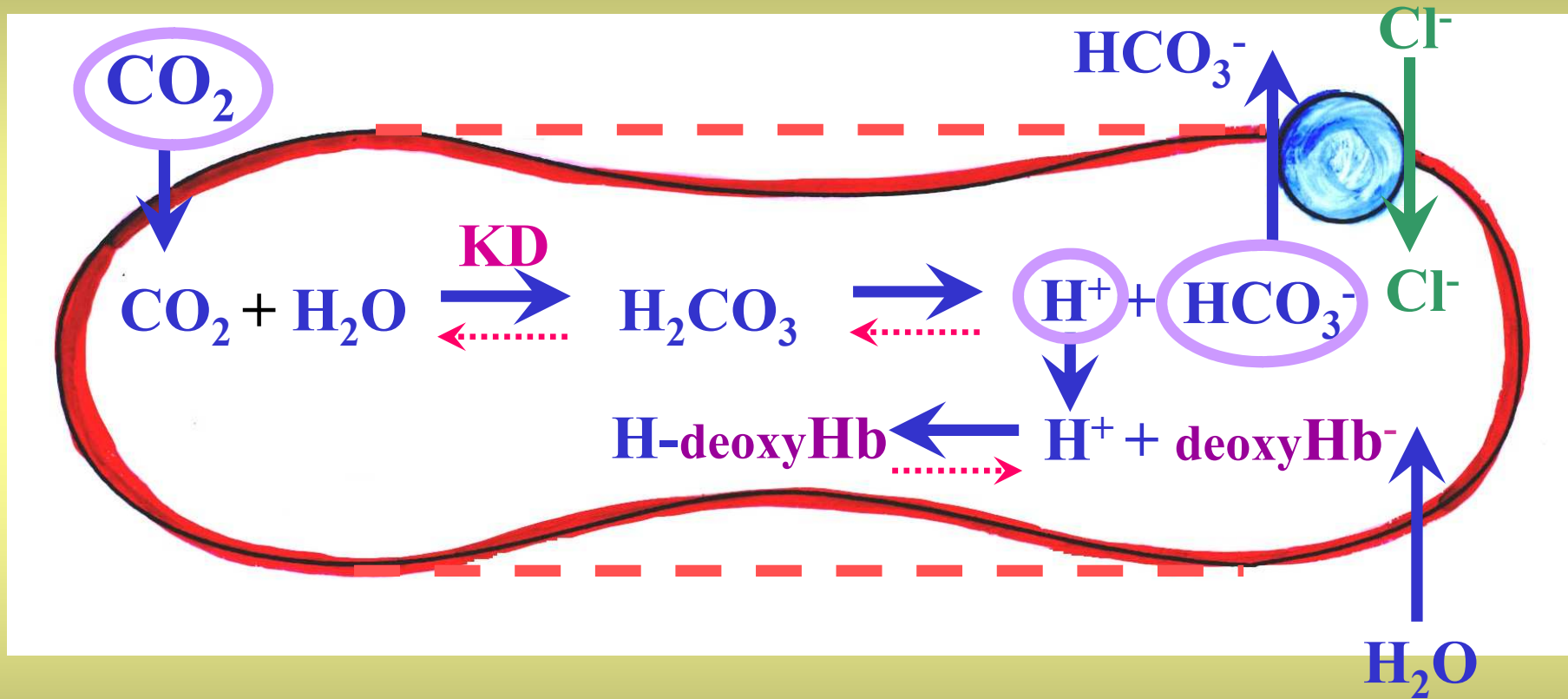
myoglobin

methemoglobin

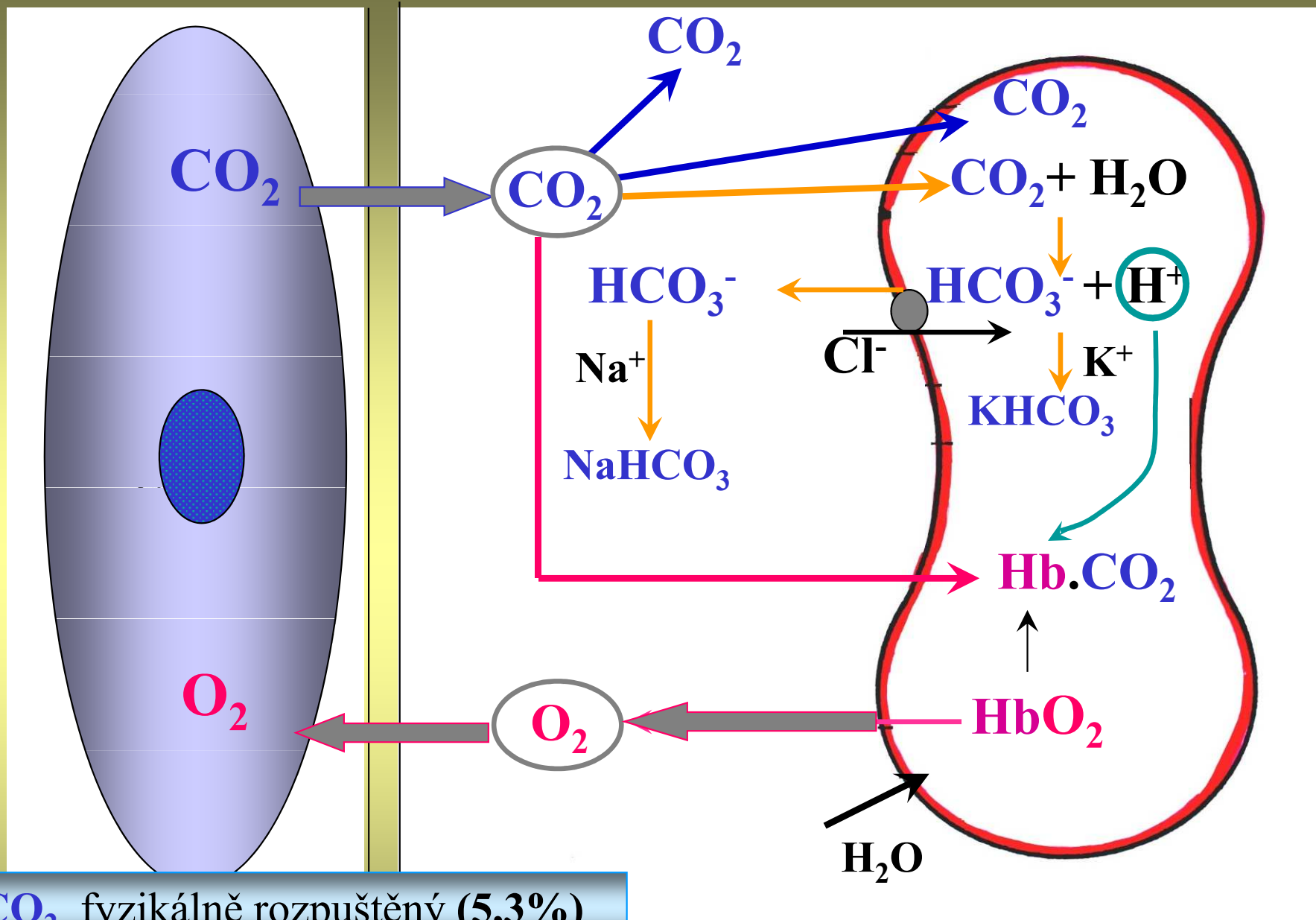
fyzikálně rozpuštěný  $O_2$  (1.4%)

# TRANSPORT $\text{CO}_2$

posun  $\text{Cl}^-$  iontů  
*Hamburgerův posun*



**KD** – karbonát dehydratáza  
(karboanhydráza)



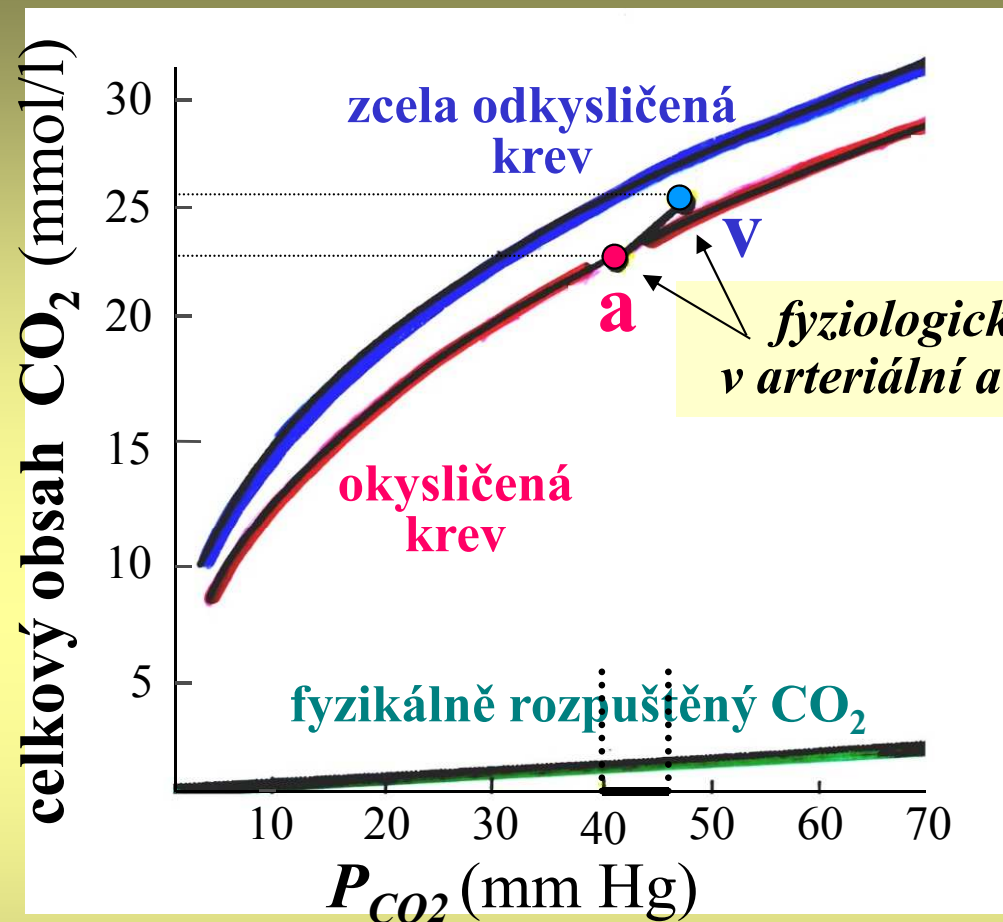
- CO<sub>2</sub> fyzikálně rozpuštěný (5,3%)

- $\text{CO}_2 + \text{Hb-NH}_2 \rightleftharpoons \text{Hb.NHCOO}^-$  (karbamino-Hb) (5,3%)

- $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$  (~89%)

~60% v plasmě, ~29% v erythrocytech

# VAZEBNÁ KŘIVKA CO<sub>2</sub>



## HALDANEŮV EFEKT

?

### DEOXY-Hb

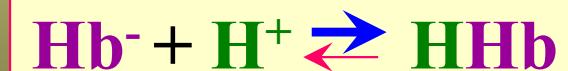


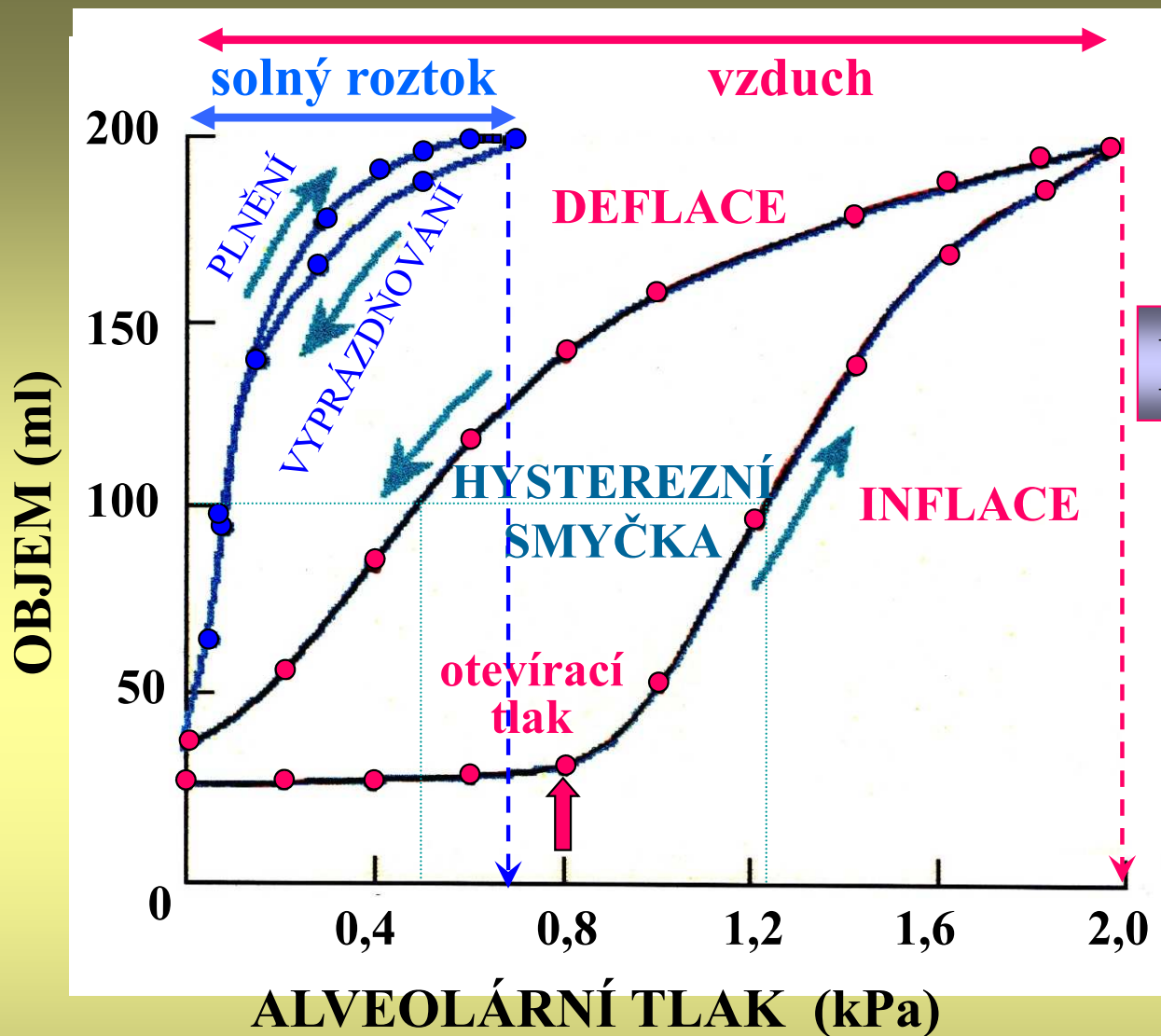
→ v periferních tkáních  
← v plících



**TKÁNĚ:** DEOXY-Hb snadno váže H<sup>+</sup> (jako slabší kyselina) ⇒ ↑ množství chemicky vázaného CO<sub>2</sub>

**PLÍCE:** OXY-Hb uvolňuje H<sup>+</sup> ⇒ ↓ množství chemicky vázaného CO<sub>2</sub>



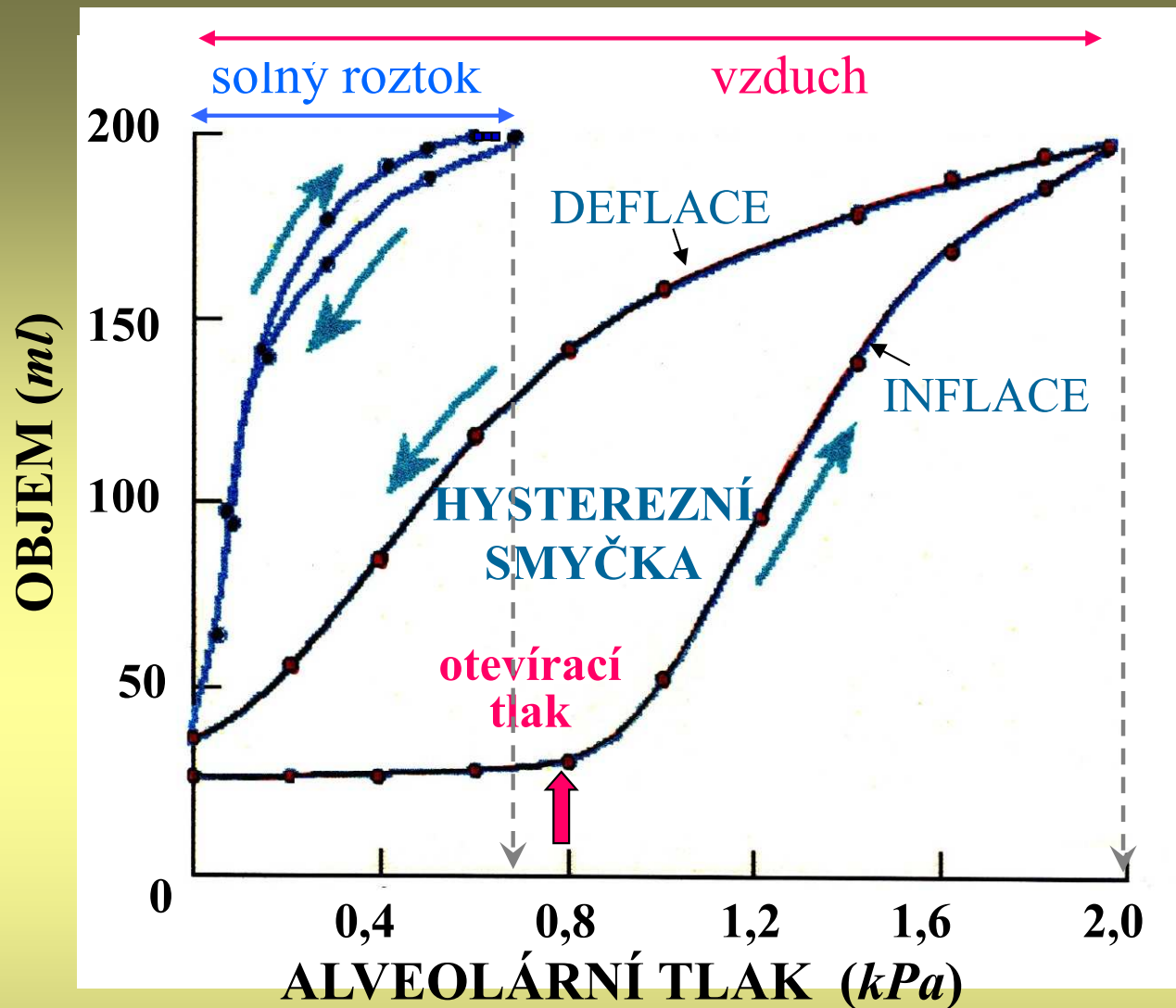


**ELASTICITA PLIC**

**ELASTICITA PLIC**

**VLASTNÍ TKÁŇOVÁ ELASTICITA**  
(vlákna elastinu a kolagenu)

**SÍLY POVRCHOVÉHO NAPĚTÍ**  
(rozhraní tekutina-vzduch)



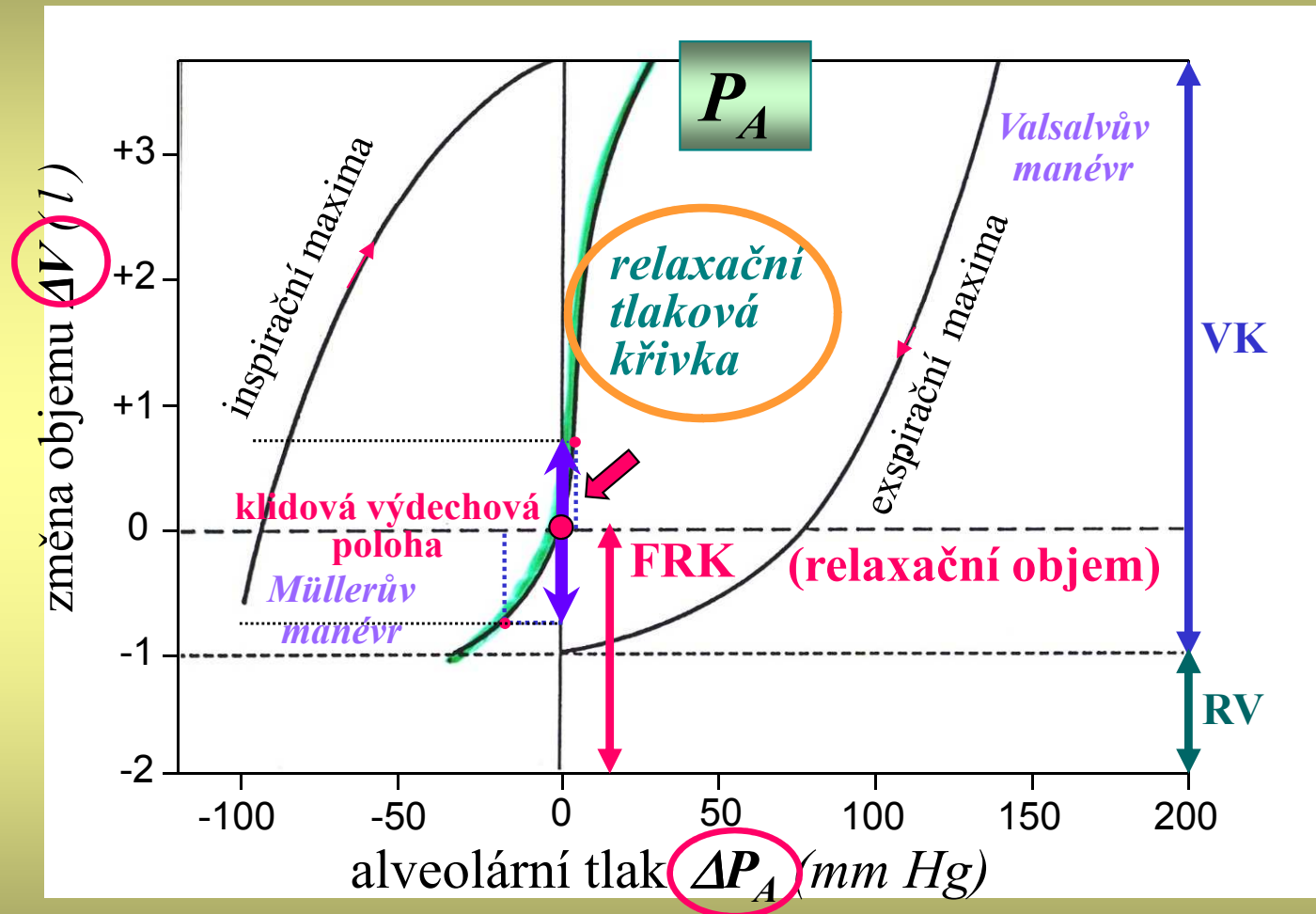
Faktory podílející se na  
HYSTEREZNÍ  
SMYČCE

- **LAPLACEŮV ZÁKON (otevírací tlak alveolů)**
- **Dynamické změny v hustotě molekul SURFAKTANTU v průběhu inspirace a expirace**



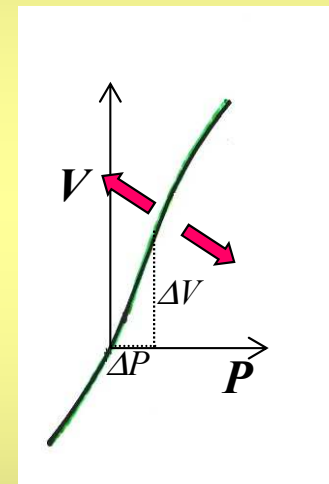
# COMPLIANCE (OBJEMOVÁ ROZTAŽITELNOST)

## STATICKÉ MĚŘENÍ PŘI UZAVŘENÉM SYSTÉMU



**RESPIRAČNÍ SYSTÉM**  
píče a hrudník

$$C = \frac{\Delta V}{\Delta P}$$



↑ tuhost tkáně  
**compliance klesá**

↓ tuhost tkáně  
**compliance vzrůstá**

# CELKOVÁ PRÁCE DÝCHACÍCH SVALŮ PŘI KLIDNÉM DÝCHÁNÍ

## ELASTICKÁ PRÁCE (65%)

pro překonání elastických sil hrudníku a plic

## DYNAMICKÁ PRÁCE (35%)

- pro překonání odporu dýchacích cest při proudění vzduchu - *aerodynamický odpor* (28%)
- pro překonání tření při vzájemnému pohybu neelastických tkání - *viskózní odpor* (7%)