

DÝCHACÍ SYSTÉM

PLICNÍ FUNKCE MECHANIKA DÝCHACÍHO SYSTÉMU PŘENOS PLYNŮ

Prezentaci připravila: doc. MUDr. Milena Šimurdová, CSc.

ANATOMIE DÝCHACÍCH CEST

Dutina nosní

Vedlejší dutiny nosní

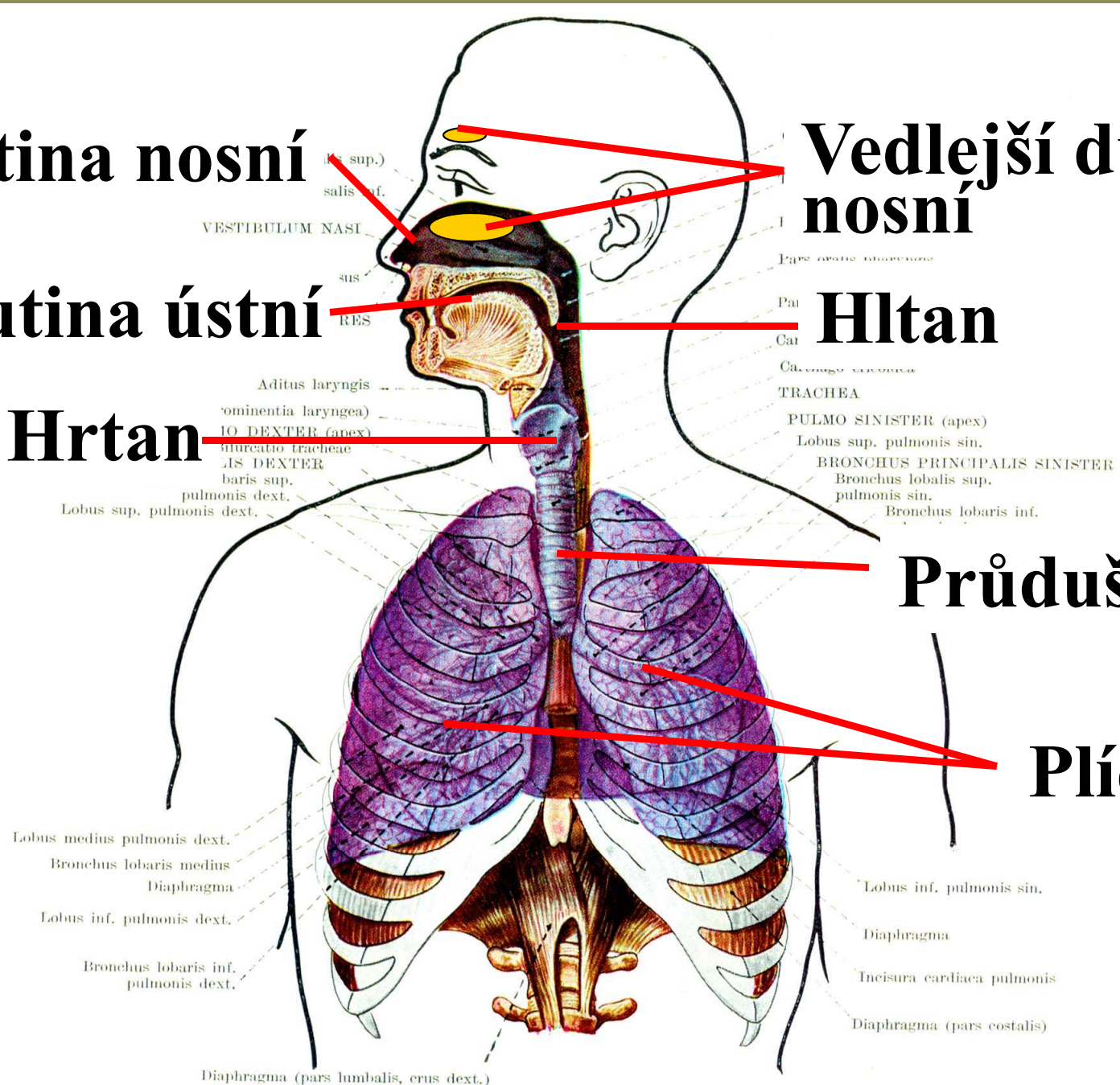
Dutina ústní

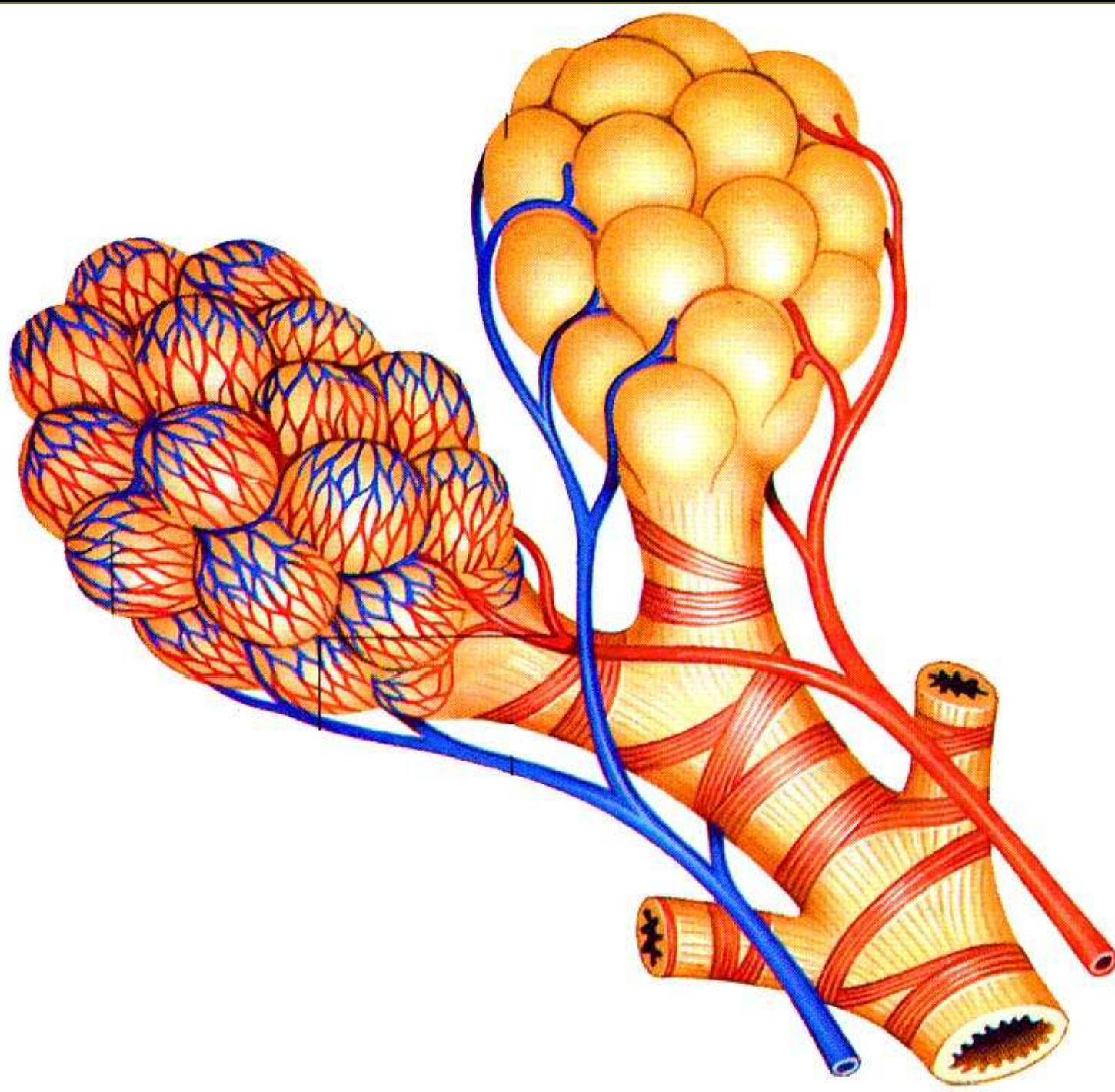
Hltan

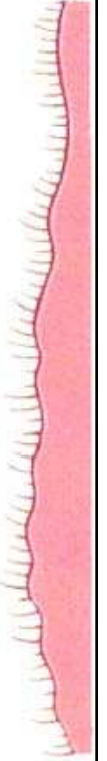
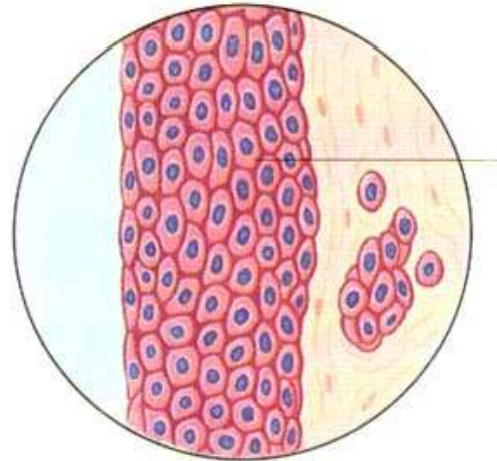
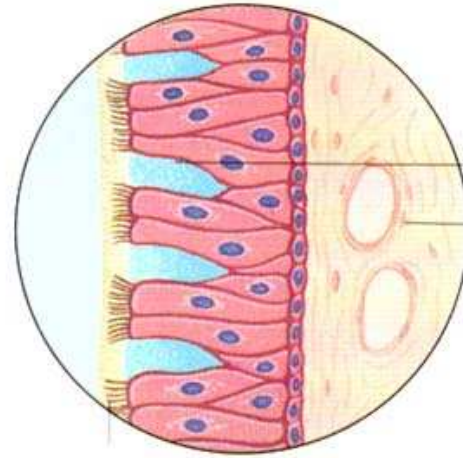
Hrtan

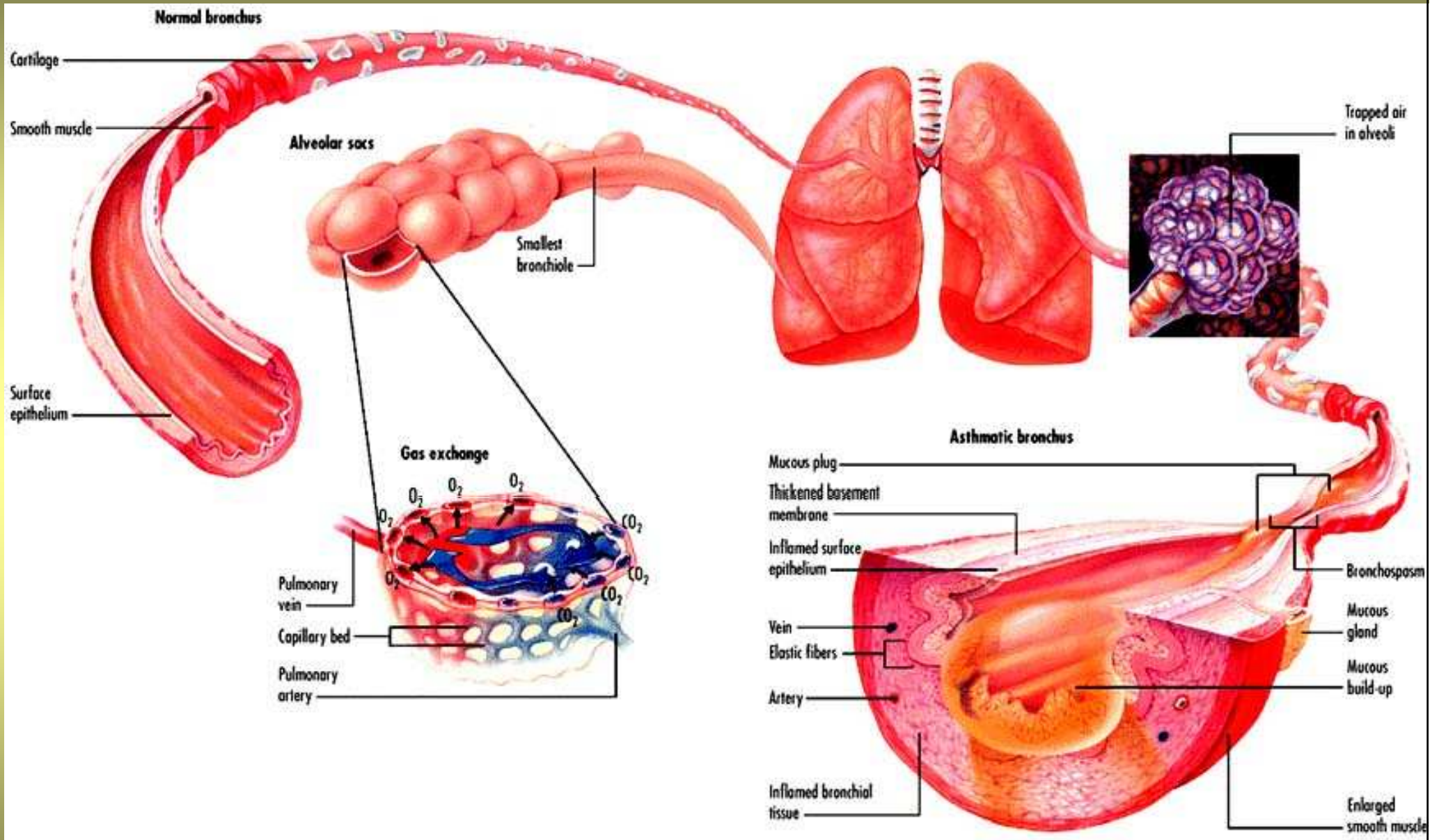
Průdušnice

Plíce









FÁZE TRANSPORTU O_2 K BUŇKÁM

VENTILACE PLIC

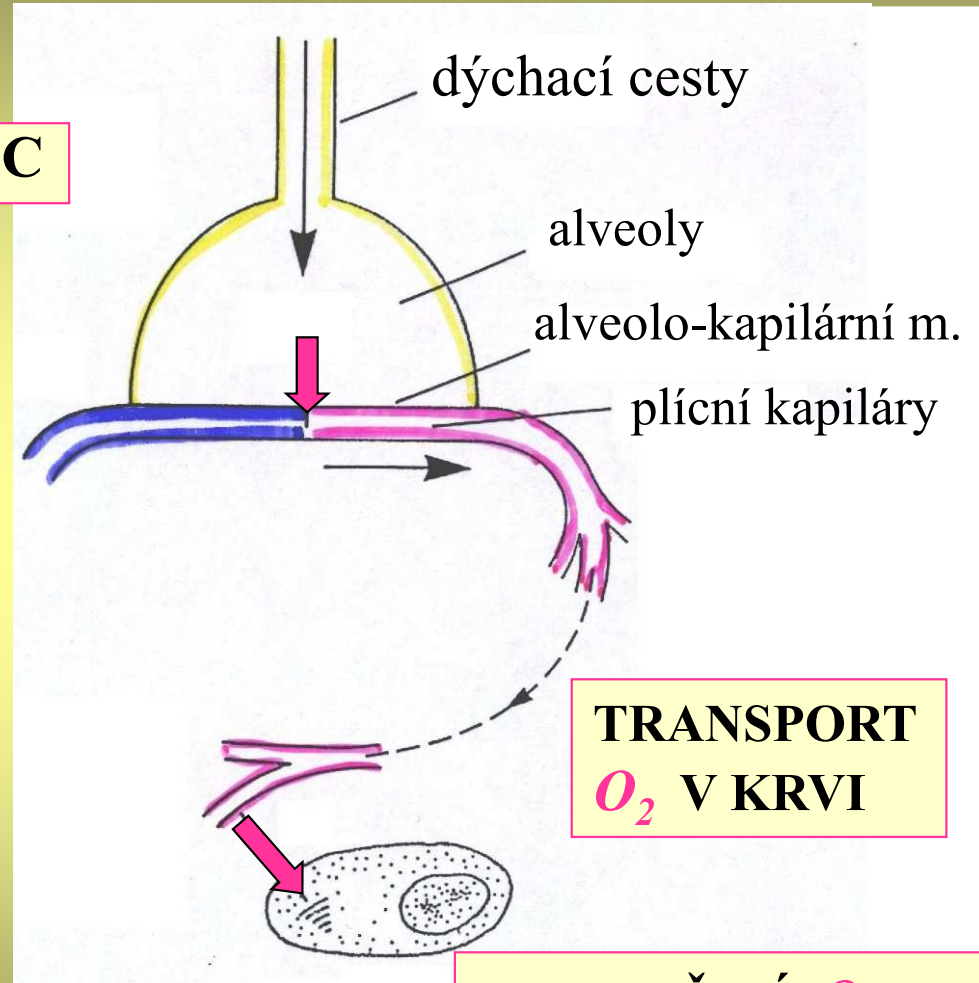
DIFUZE O_2 PŘES
ALVEOLO-KAPILÁTRNÍ
MEMBRÁNU

DIFUZE O_2
Z PERIFERNÍ KAPILÁRY
DO BUŇKY

V KLIDU

příjem O_2 ~300 ml / min

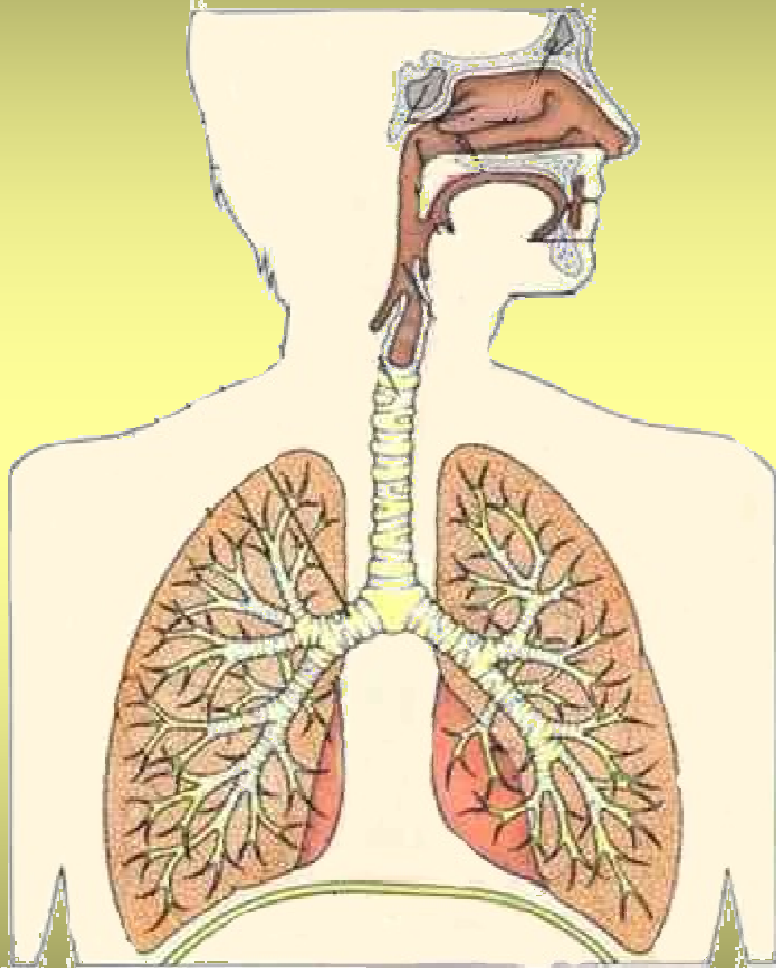
výdej CO_2 ~250 ml / min



VYUŽITÍ O_2
MITOCHONRIEMI

VNITŘNÍ DÝCHÁNÍ

VENTILACE PLIC

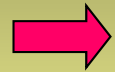


Funkce dýchacích cest:

- ✓ zbavování mechanických nečistot – zachycení ve vrstvičce hlenu (řasinky ho pak sunou do faryngu)
- ✓ bariéra proti vniknutí infekce – lymfatická tkáň
- ✓ úprava teploty vdechovaného vzduchu – na tělesnou teplotu, zvlhčení
- ✓ aktivita hl. svaloviny –

DÝCHACÍ CESTY

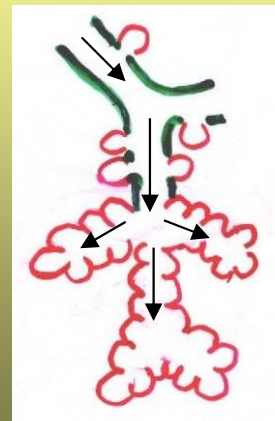
ANATOMICKÝ MRTVÝ PROSTOR – ZÓNA KONDUKCE



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

Další funkce:

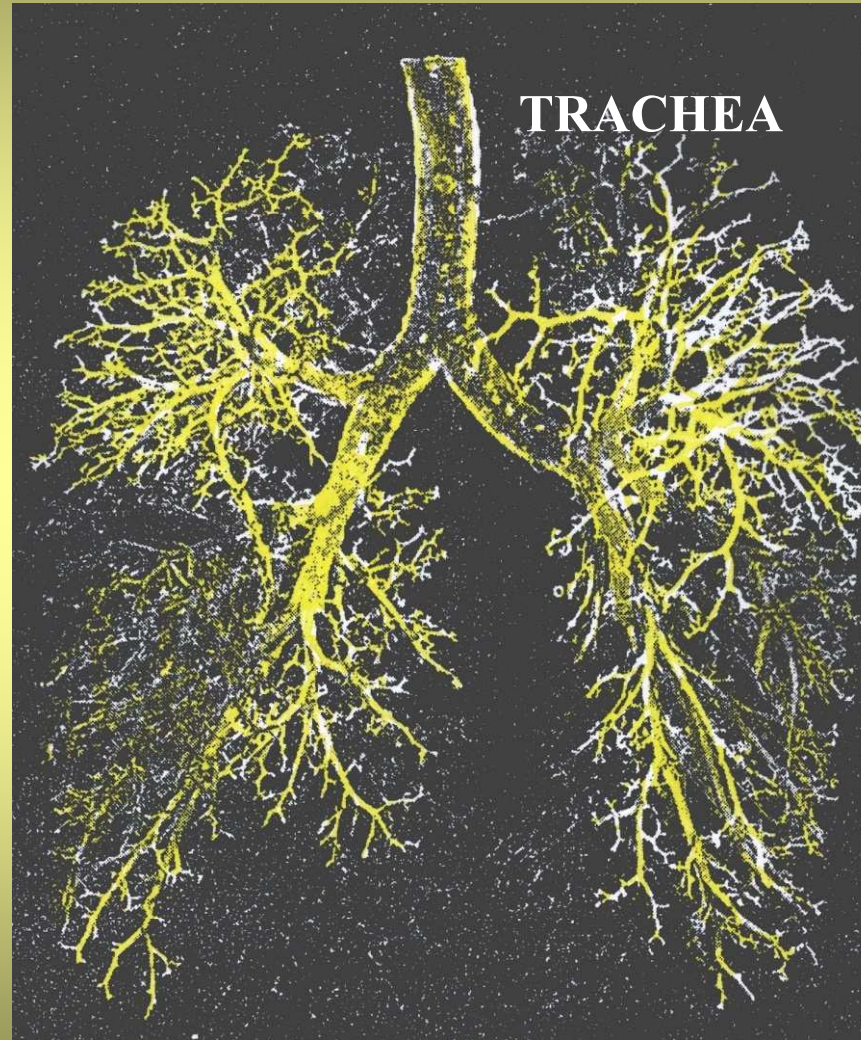
- oteplení vzduchu, očištění, doplnění vodními parami
- reflexní odpovědi na dráždivé podněty
- řeč a zpěv (specifické funkce laryngu)



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

CELKOVÁ PLOCHA 70 - 100 m²

ODLITEK DÝCHACÍCH CEST U ČLOVĚKA

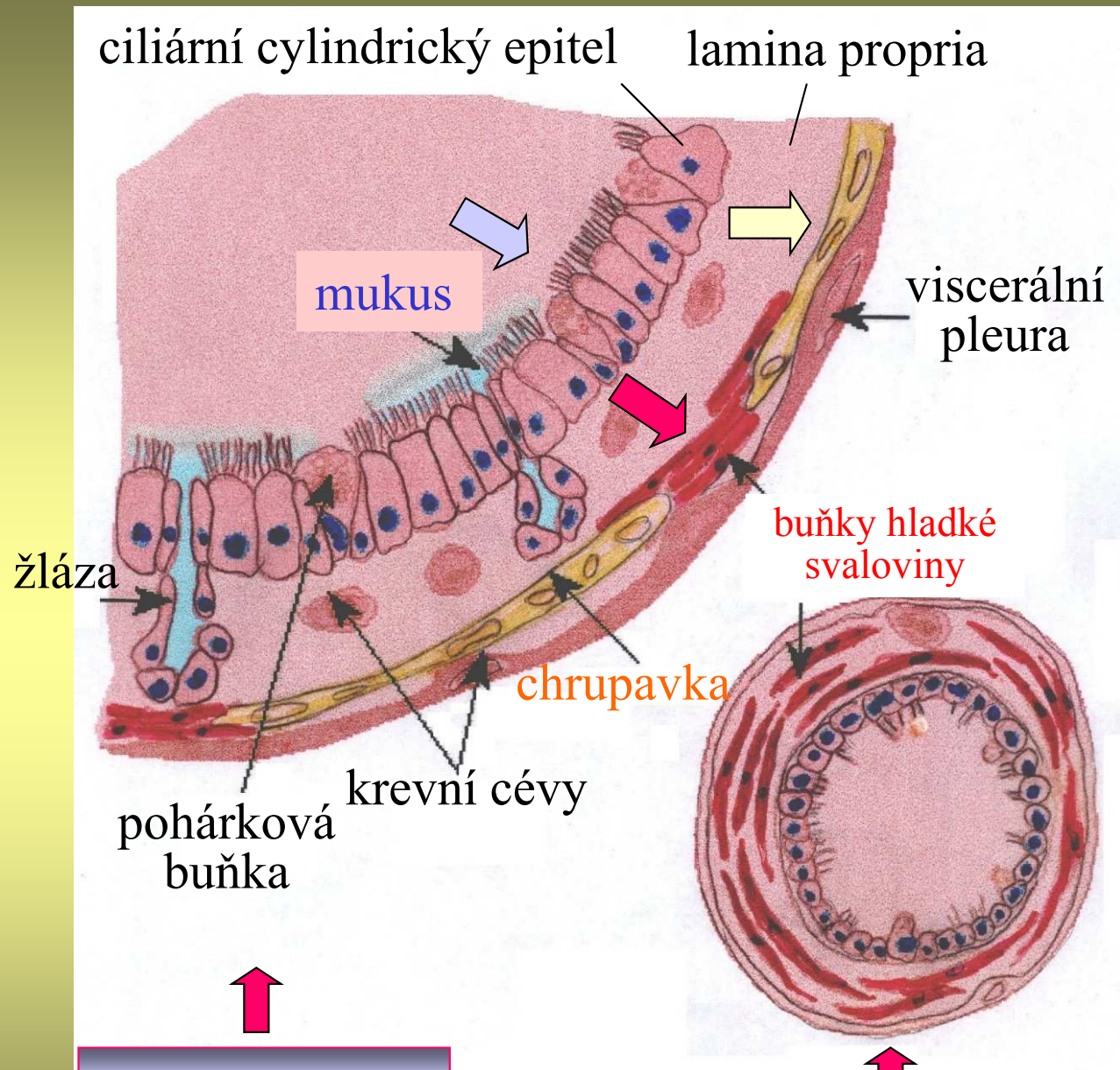


BRONCHY

BRONCHIOLY

**TERMINÁLNÍ
BRONCHIOLY**

AERODYNAMICKÝ ODPOR



BRONCHUS

**TERMINÁLNÍ
BRONCHIOLUS**

**AUTONOMNÍ INERVACE
SVALOVÝCH BUNĚK**

muskarinové receptory
aktivace acetylcholinem
⇒ **bronchokonstrikce**

β₂-adrenergní receptory
aktivace noradrenalinem
⇒ **bronchodilatace**

∅ < 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**

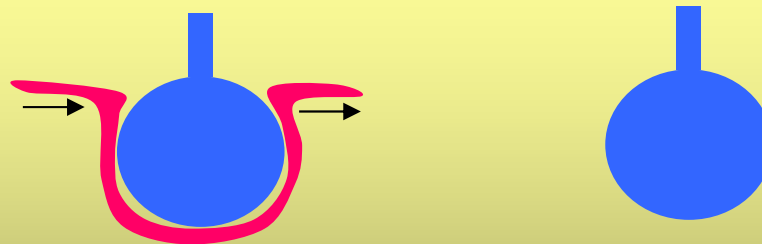
1,8 l/min

MRTVÝ PROSTOR

CELKOVÝ OBJEM, VE KTERÉM NEDOCHÁZÍ K VÝMĚNĚ PLYNŮ

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

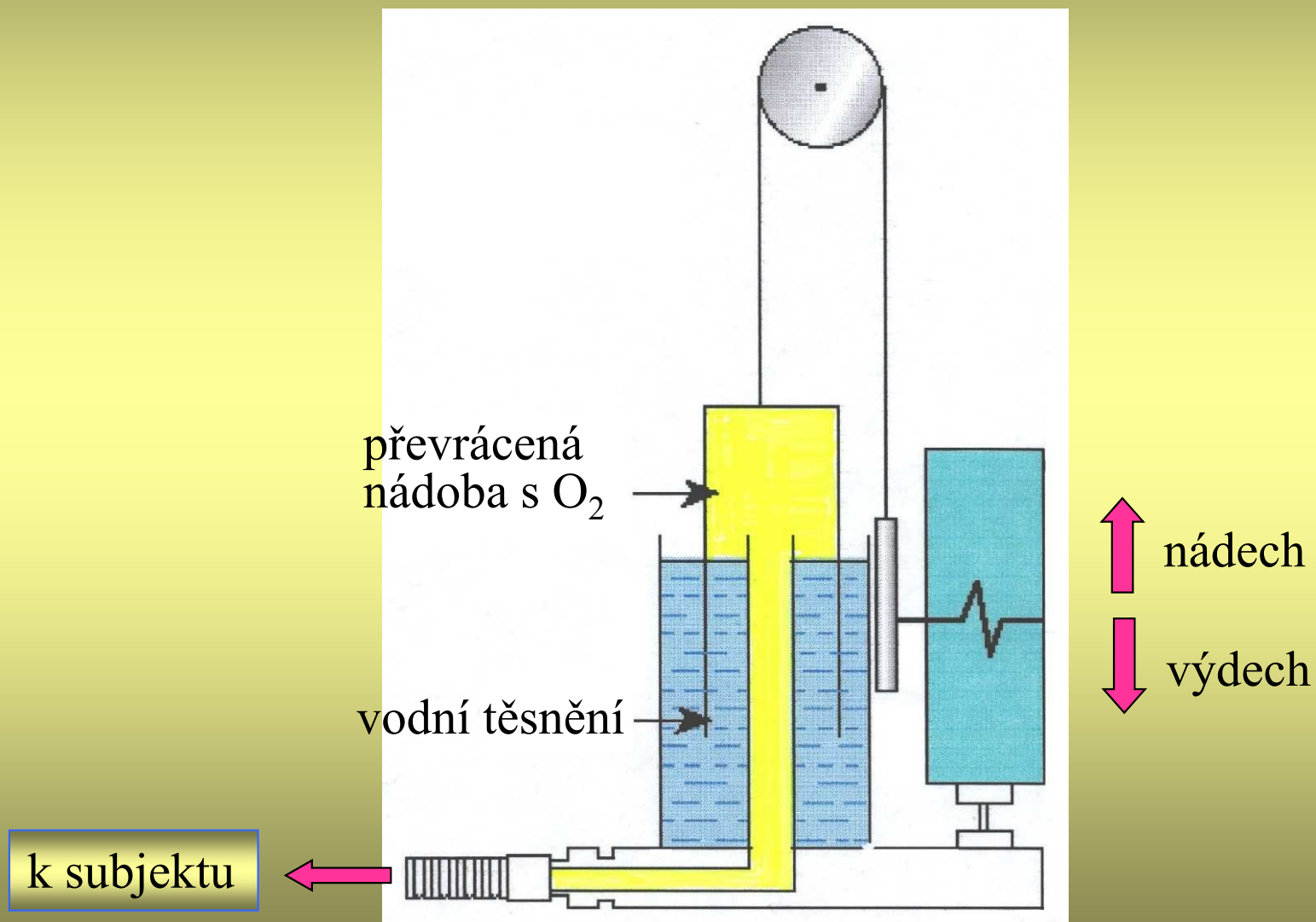
ANATOMICKÝ mrtvý prostor + celkový OBJEM ALVEOLŮ
bez funkčního kapilárního řečiště



U ZDRAVÉHO JEDINCE
oba dva prostory jsou prakticky stejné

SPIROMETRIE

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



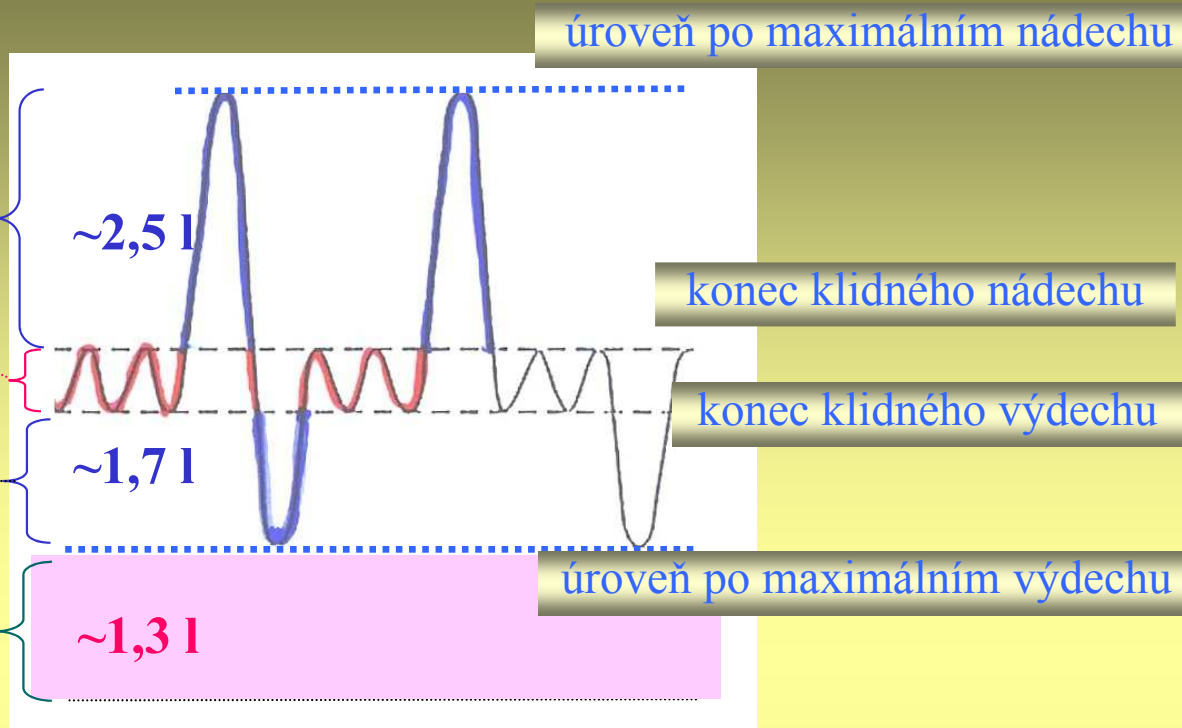
PLÍČNÍ OBJEMY

INSPIRAČNÍ
REZERVNÍ OBJEM IRV

DECHOVÝ OBJEM V_T
(*'tidal volume'*)

EXSPIRAČNÍ
REZERVNÍ OBJEM ERV

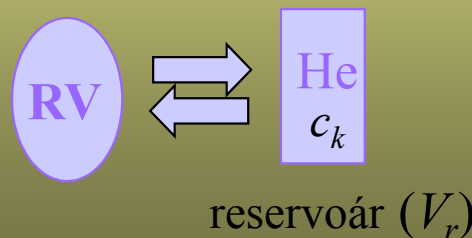
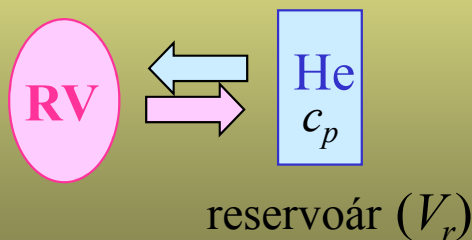
REZIDUÁLNÍ OBJEM RV



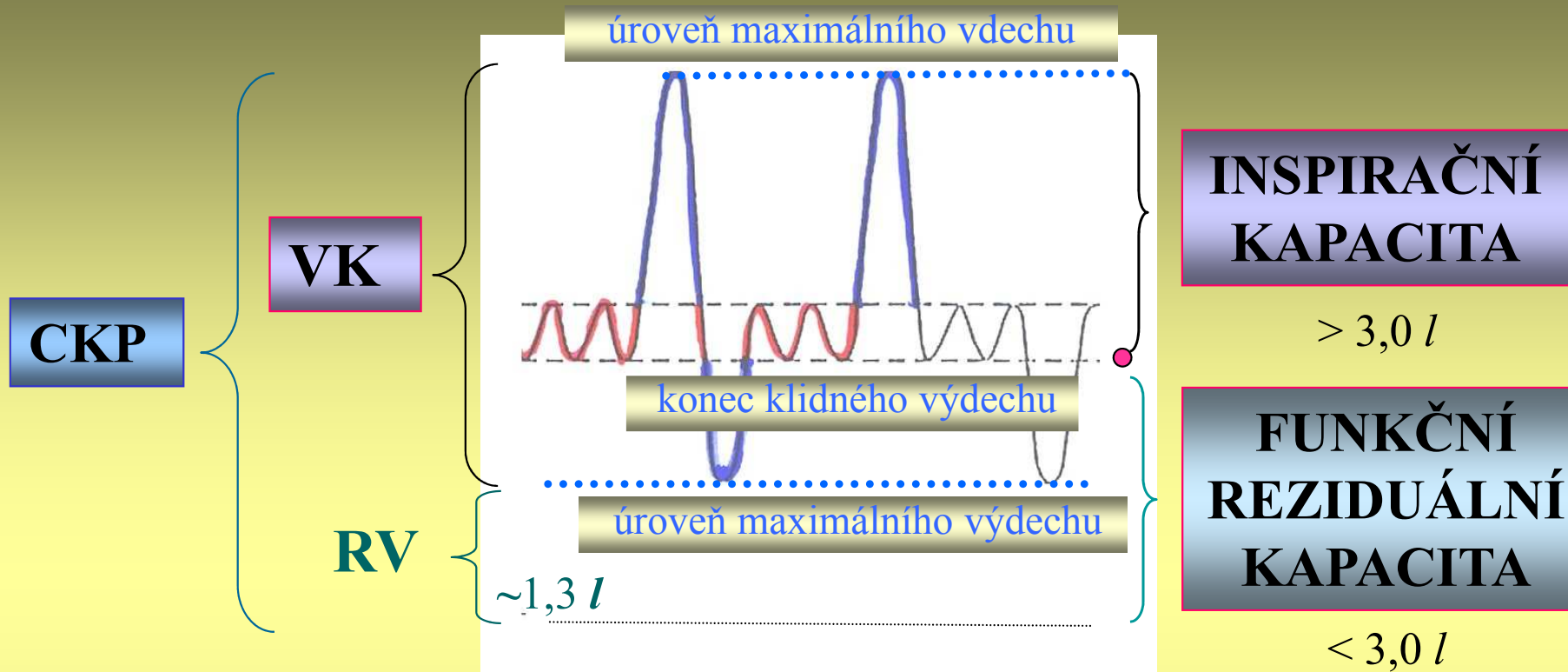
DILUČNÍ METODA
(metoda zředěného plynu)
 He

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).



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



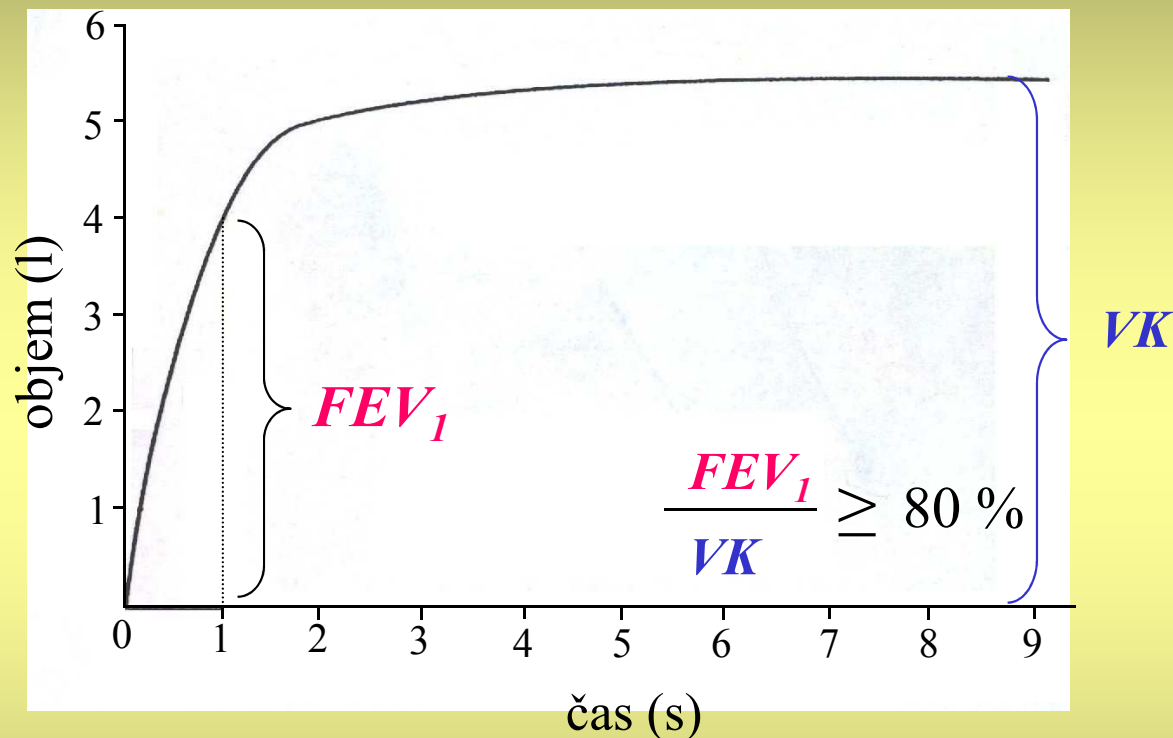
VK VITÁLNÍ KAPACITA = $V_T + IRV + ERV$ $\sim 4,7 l$

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*) ***FEV₁*** (*'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)

$$P \cdot V = konst$$

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

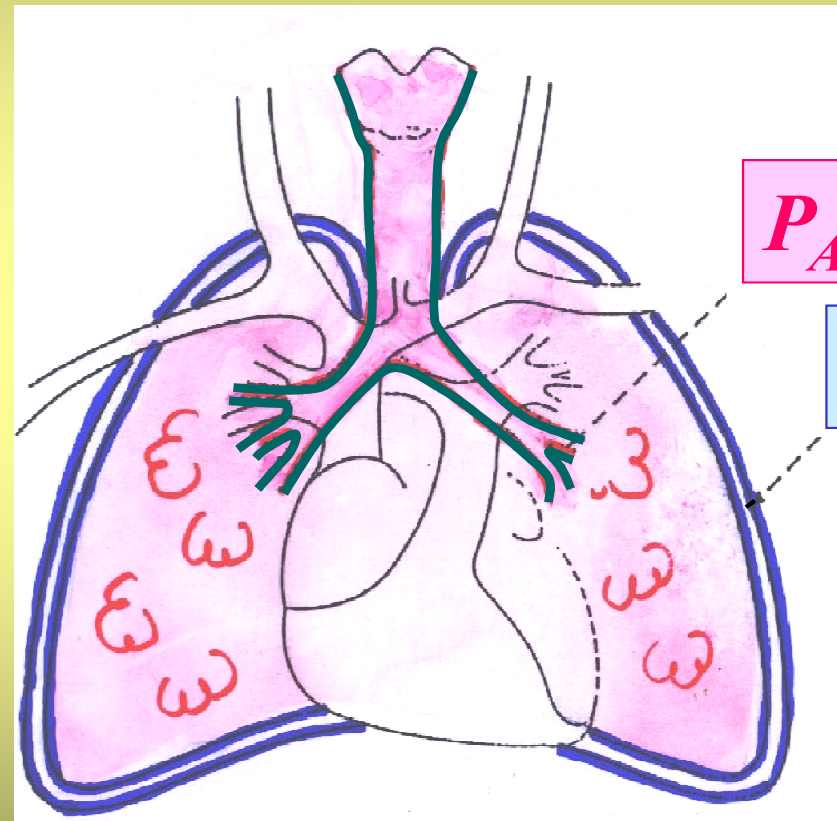
PRŮBĚHY TLAKŮ PŘI KLIDNÉM DÝCHÁNÍ

INSP

EXSP

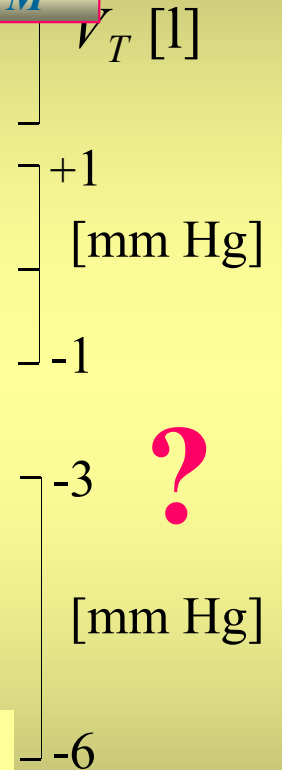
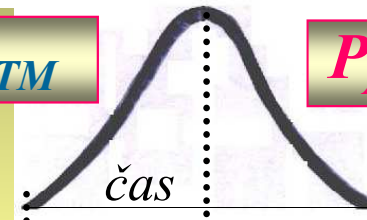
$$P_A < P_{ATM}$$

$$P_A > P_{ATM}$$



P_A

P_{PL}



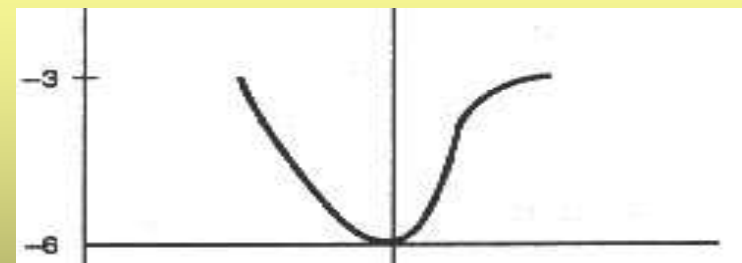
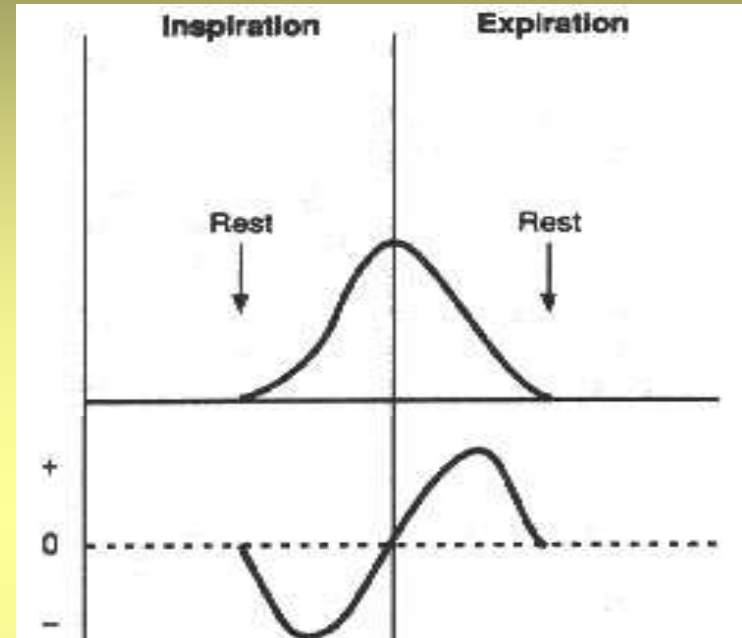
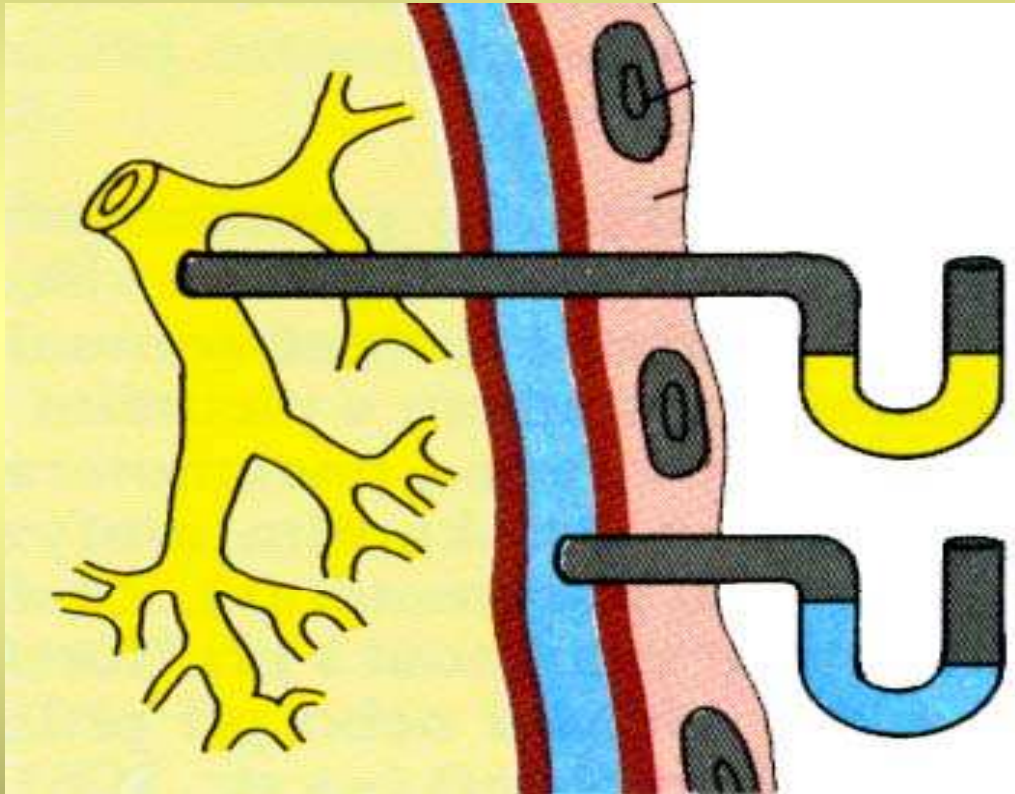
naměřená
křivka

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.

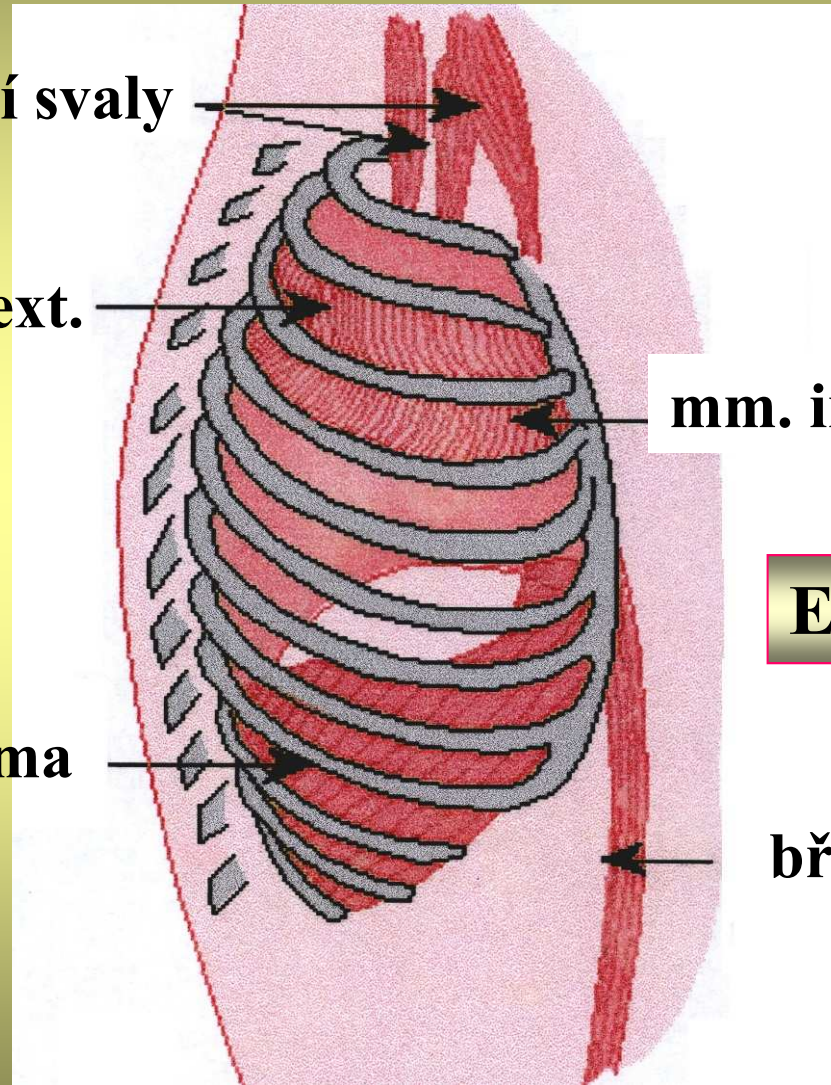
INSPIRAČNÍ

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*)

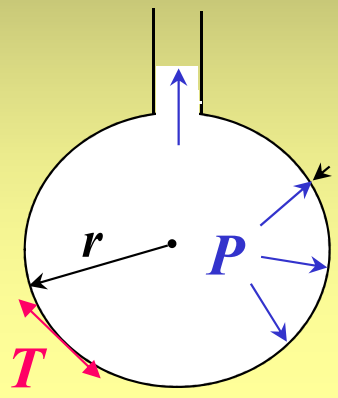
EXSPIRAČNÍ SVALY

Pouze při **USILOVNÉM** dýchání

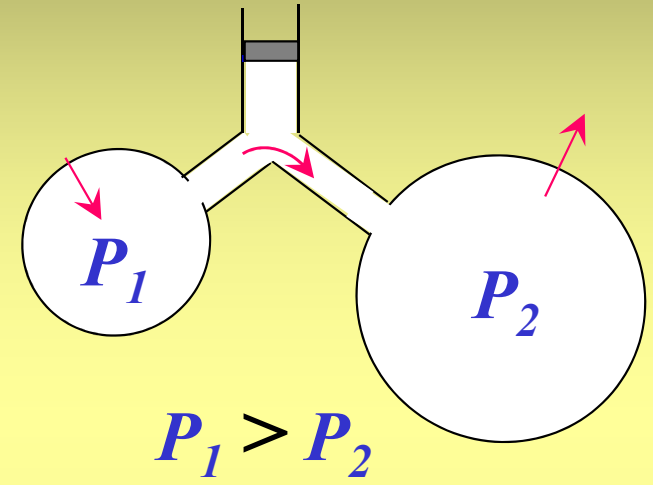
- *mm. intercostales int.*
- svaly přední břišní stěny

LAPLACEŮV ZÁKON

sférické struktury



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



P tlak (transmurální ΔP)

r radius

T napětí stěny

PATOLOGIE

- Kolaps alveolu - ATELEKTÁZA
- Další zvětšení objemu alveolu

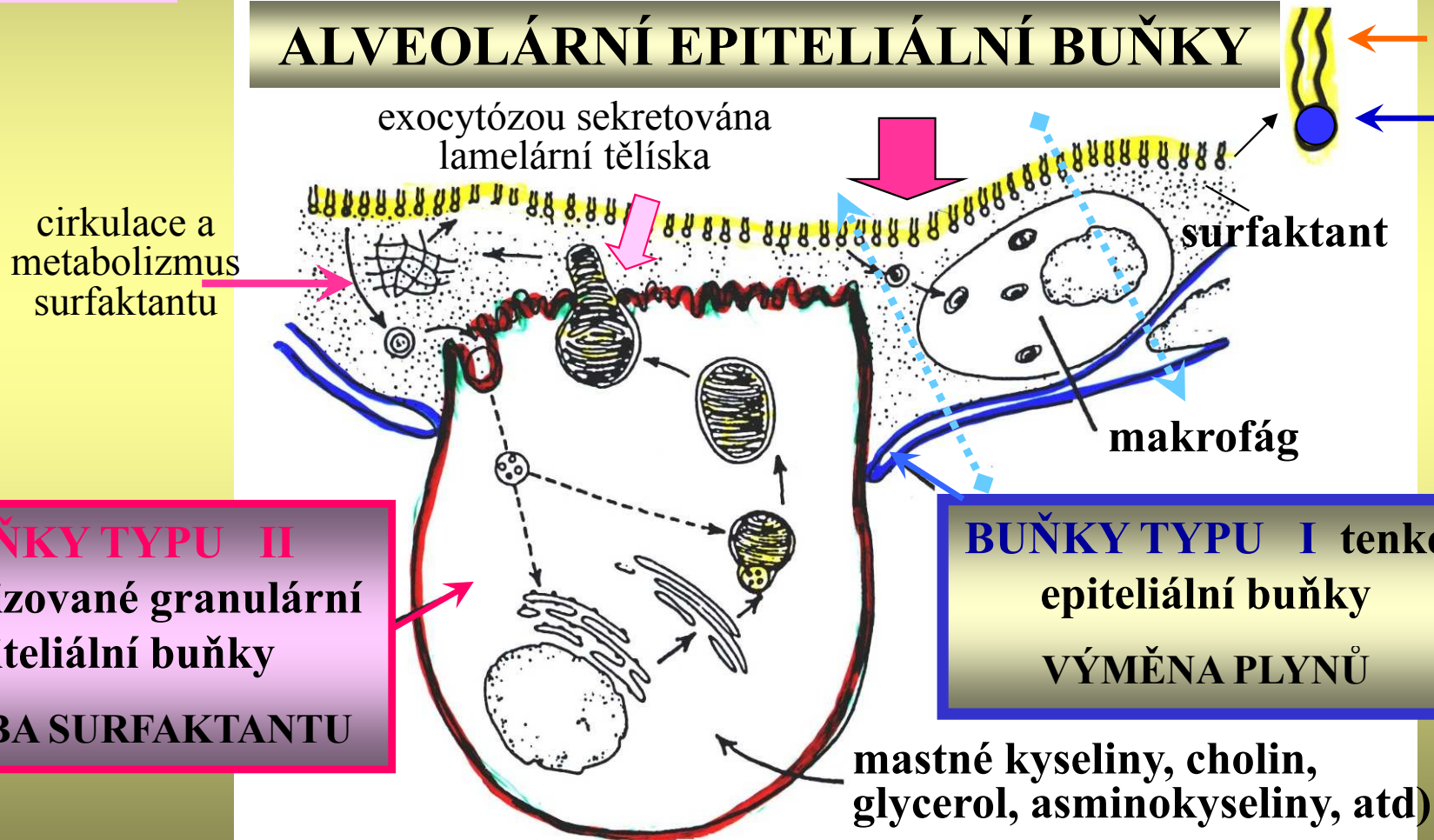
SURFAKTANT

LÁTKA VÝRAZNĚ SNIŽUJÍCÍ
POVRCHOVÉ NAPĚTÍ

FOSFOLIPID
dipalmitoyl
fosfatidyl cholin

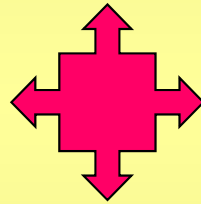
ÚČINEK HLAVNĚ VE FÁZI VÝDECHU

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 ₂	158,8
CO ₂	0,3
N ₂	601,0
...	

760 mm Hg

O ₂	115,0
CO ₂	33,0
H ₂ O	47,0
N ₂	565,0
...	

760 mm Hg

mrtvý prostor

O ₂	100,0
CO ₂	39,0

O ₂	100,0
CO ₂	39,0
H ₂ O	47,0
N ₂	...

760 mm Hg

fyziologické zkratky

pravé srdce

levé srdce

vény

O ₂	40,0
CO ₂	45,0
H ₂ O	47,0
N ₂	...
...	

arterie

O ₂	95,0
CO ₂	41,0
H ₂ O	47,0
N ₂	...
...	

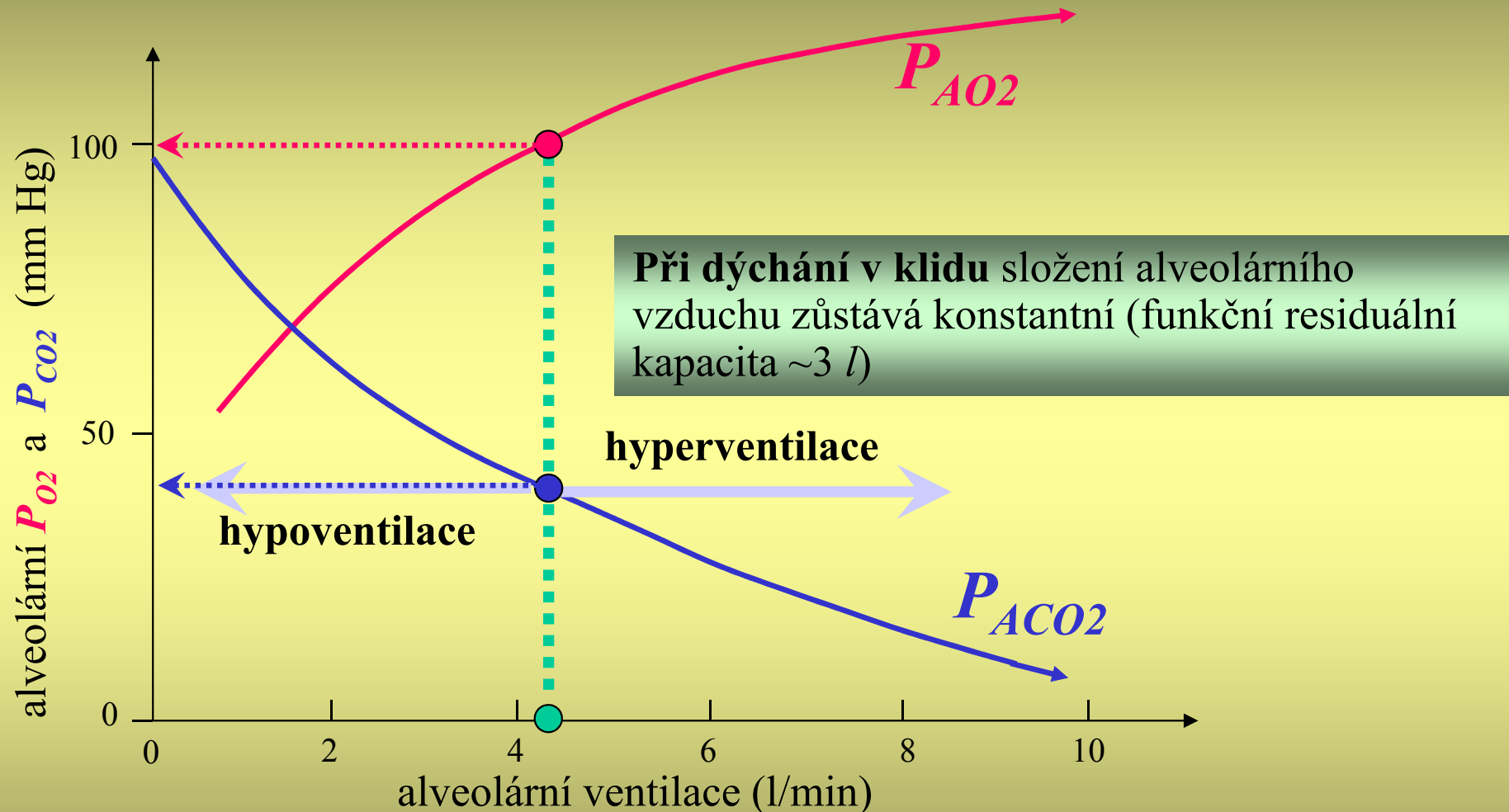
periferní kapiláry

O ₂	40,0
CO ₂	45,0
H ₂ O	47,0
N ₂	...
...	

?

?

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



hyperventilace → HYPOKAPNIE → respirační alkalóza

hypoventilace → HYPERKAPNIE → respirační acidóza

I DÝCHACÍ CESTY

II MĚŘITELNÉ PARAMETRY

- MRTVÝ PROSTOR
- PLÍCNÍ OBJEMY
- FUNKČNÍ VYŠETŘENÍ PLIC
- CHARAKTERISTICKÉ TLAKY

III AKTIVNÍ A PASIVNÍ SÍLY

- DÝCHACÍ SVALY
- ELASTICITA PLIC
- COMPLIANCE
- DECHOVÁ PRÁCE

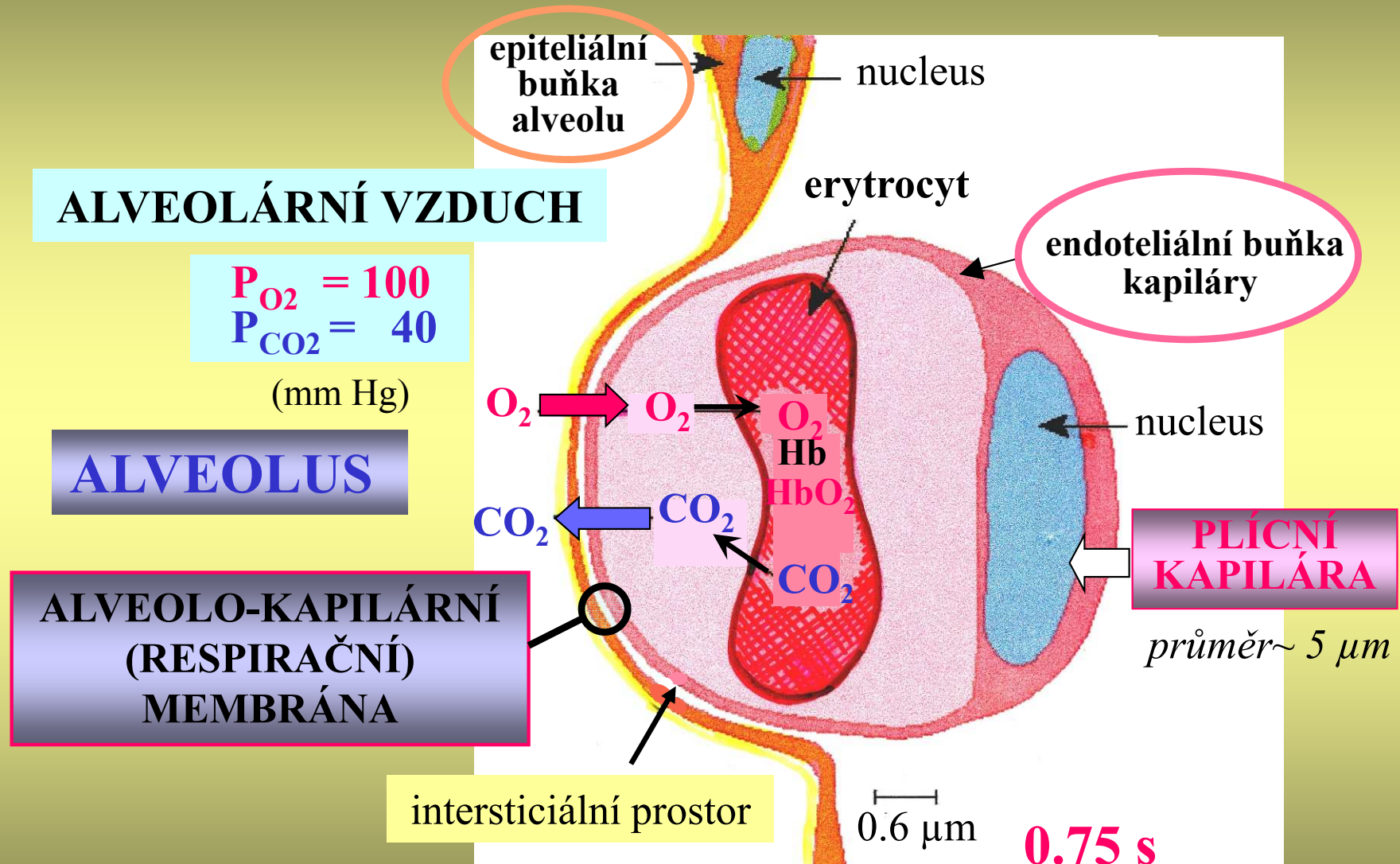
IV ALVEOLÁRNÍ VZDUCH

→ V ALVEOLO-KAPILÁRNÍ MEMBRÁNA

VI TRANSPORT PLYNŮ (O_2 a CO_2)

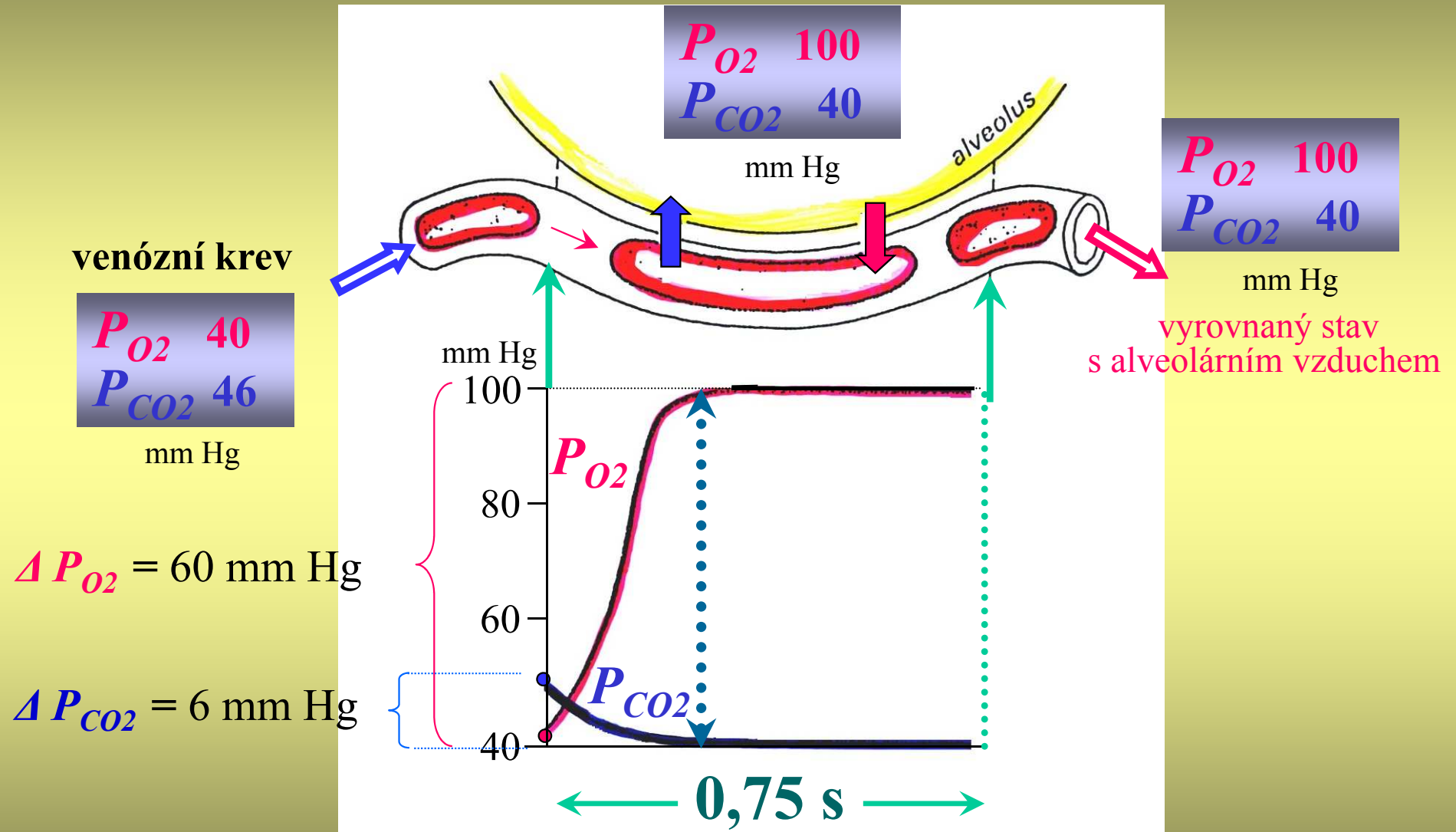
ALVEOLO-KAPILÁRNÍ (RESPIRAČNÍ) MEMBRÁNA

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

I DÝCHACÍ CESTY

II MĚŘITELNÉ PARAMETRY

- MRTVÝ PROSTOR
- PLÍCNÍ OBJEMY
- FUNKČNÍ VYŠETŘENÍ PLIC
- CHARAKTERISTICKÉ TLAKY

III AKTIVNÍ A PASIVNÍ SÍLY

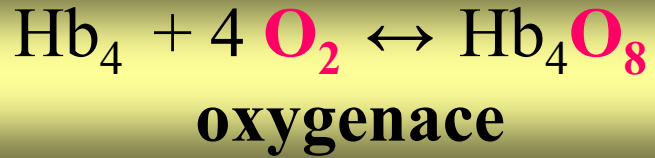
- DÝCHACÍ SVALY
- ELASTICITA PLIC
- COMPLIANCE
- DECHOVÁ PRÁCE

IV ALVEOLÁRNÍ VZDUCH

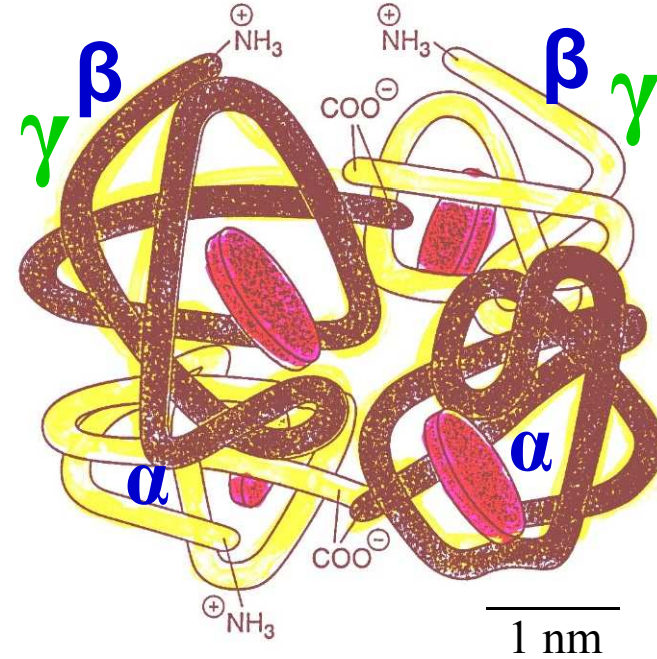
V ALVEOLO-KAPILÁRNÍ MEMBRÁNA

→ VI TRANSPORT PLYNŮ (O_2 a CO_2)

HEMOGLOBIN



tetramer

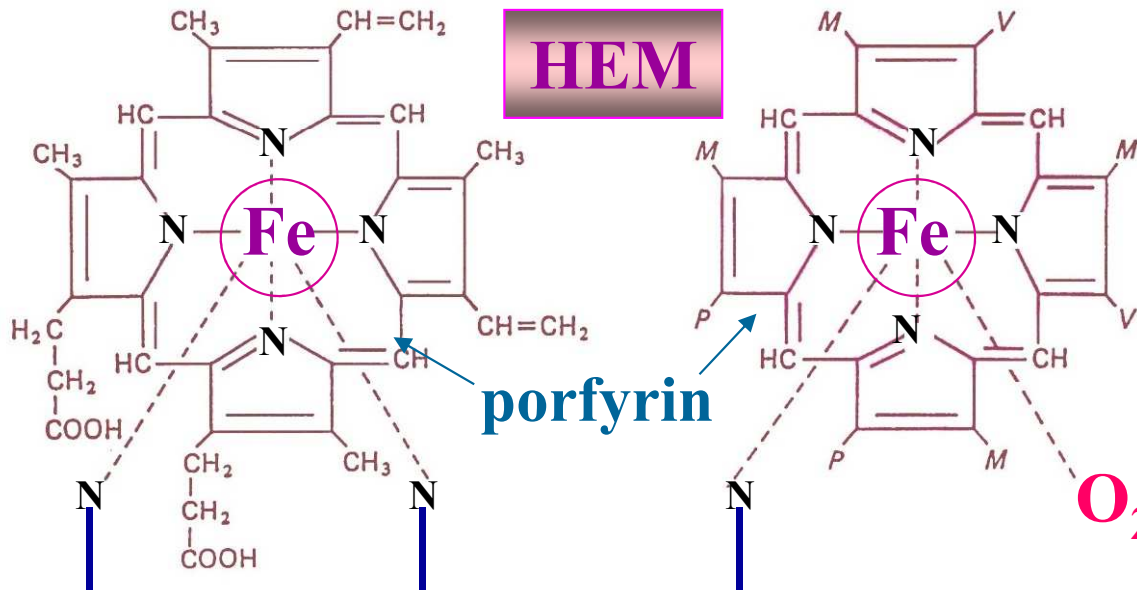


DEOXY

Fe^{2+}

OXY

HEM



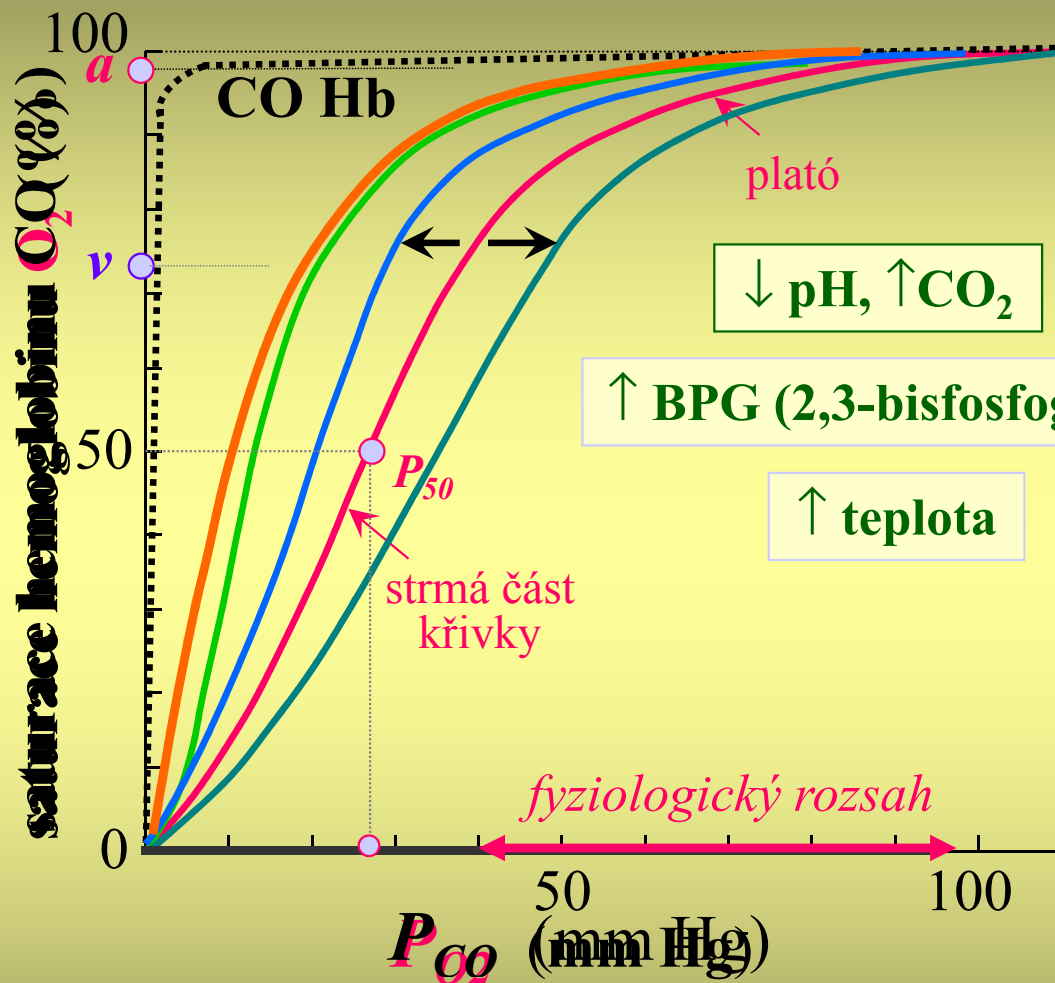
polypeptidový řetězec

polypeptidový řetězec

fetální Hb

Fe^{3+} (methemoglobin)
oxidace

VAZEBNÁ KŘIVKA O_2 NA HEMOGLOBIN



BOHRŮV EFEKT

↓ pH, ↑ CO₂

fetální Hb

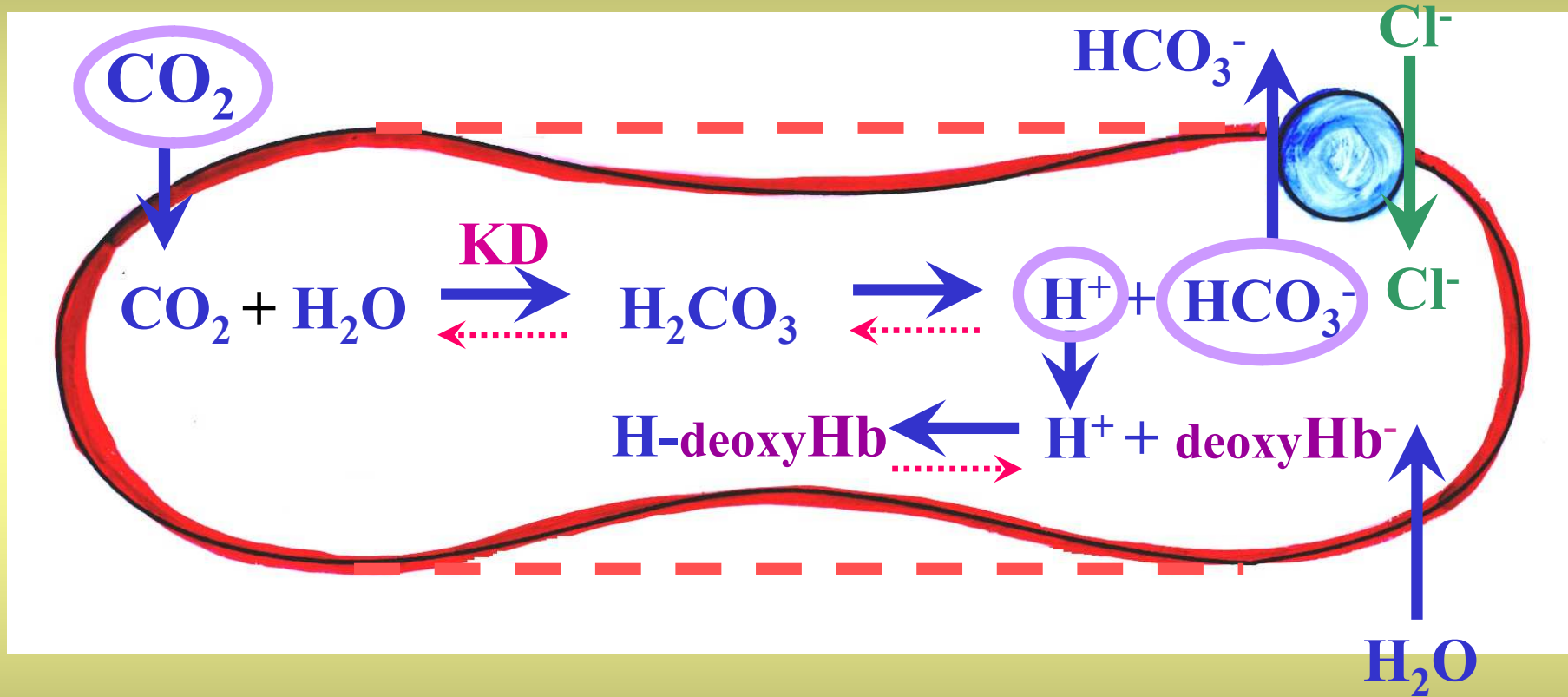
myoglobin

methemoglobin

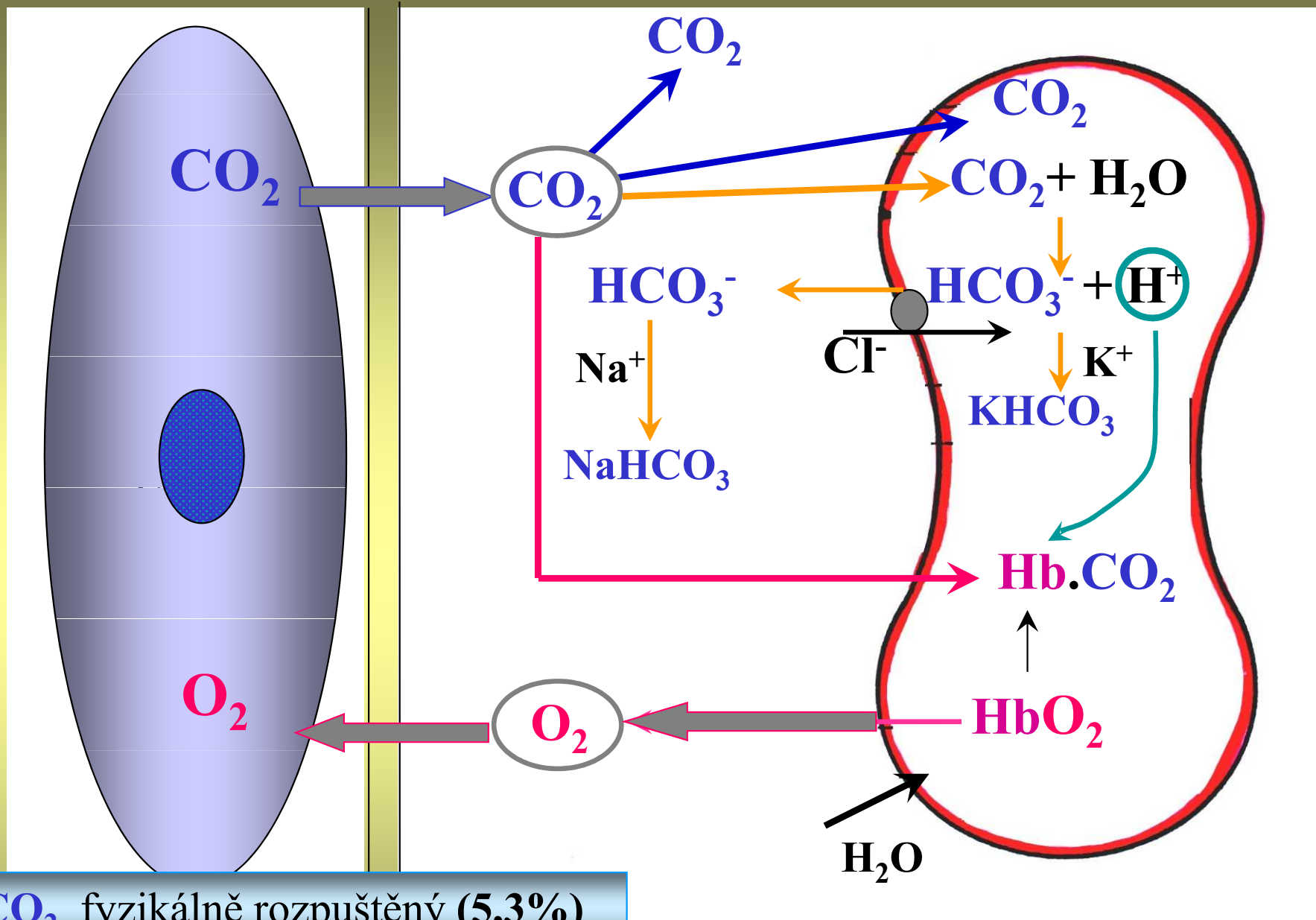
fyziálně rozpustěný O_2 (1.4%)

TRANSPORT CO₂

posun Cl⁻ iontů
Hamburgerův posun



KD – karbonát dehydratáza
(karboanhydráza)



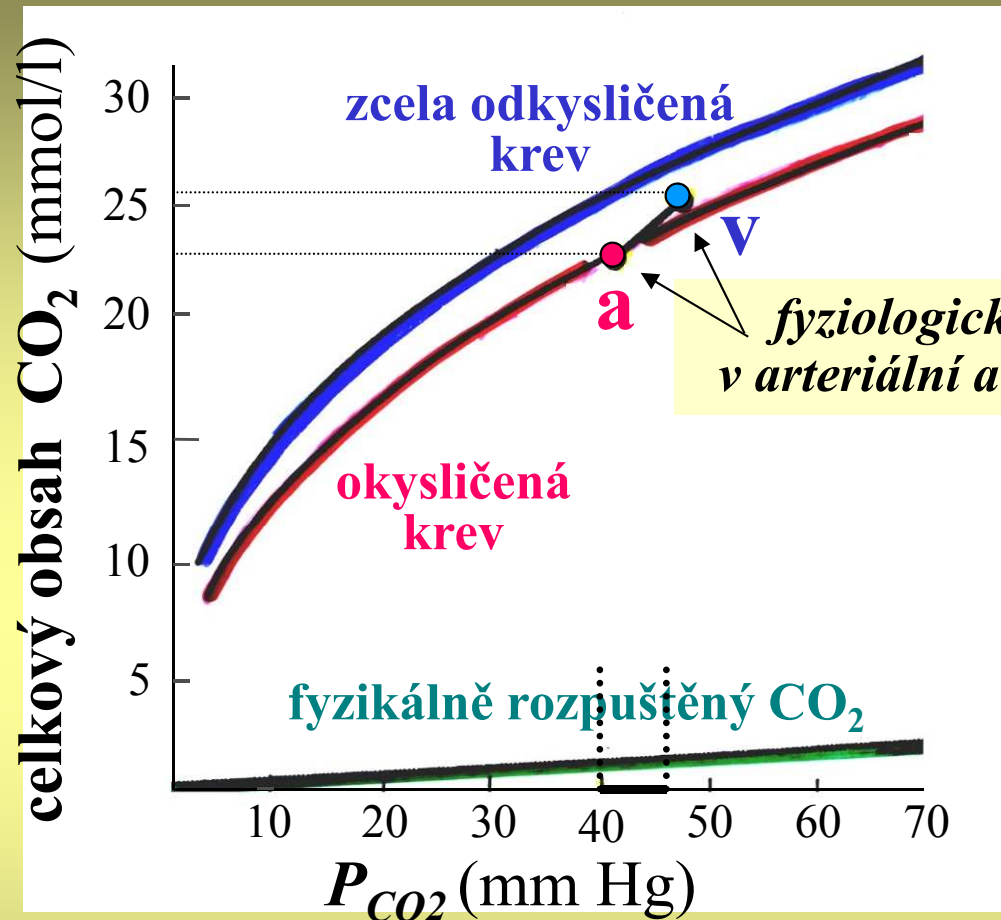
- CO₂ fyzikálně rozpuštěný (5,3%)

- $\text{CO}_2 + \text{Hb-NH}_2 \rightleftharpoons \text{Hb.NHCOO}^-$ (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 CO₂



HALDANEŮV EFEKT

?

DEOXY-Hb

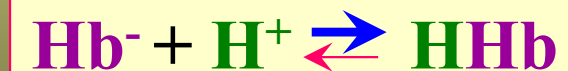


\rightarrow v periferních tkáních
 \leftarrow v plicích



TKÁNĚ: DEOXY-Hb snadno váže H⁺ (jako slabší kyselina) \Rightarrow \uparrow množství chemicky vázaného CO₂

PLÍCE: OXY-Hb uvolňuje H⁺ \Rightarrow \downarrow množství chemicky vázaného CO₂



I DÝCHACÍ CESTY

II MĚŘITELNÉ PARAMETRY

- MRTVÝ PROSTOR
- PLÍCNÍ OBJEMY
- FUNKČNÍ VYŠETŘENÍ PLIC
- CHARAKTERISTICKÉ TLAKY

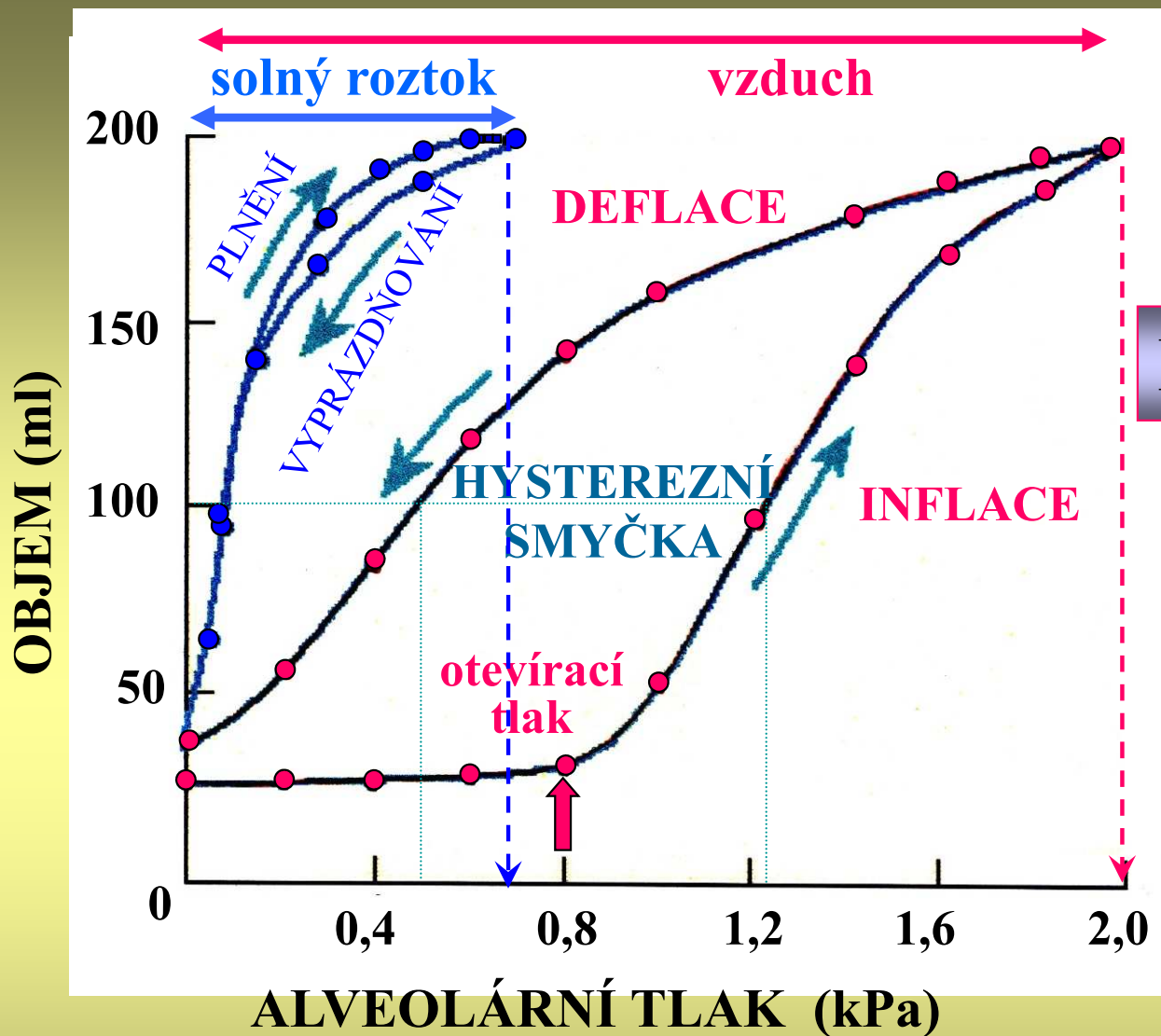
III AKTIVNÍ A PASIVNÍ SÍLY

- DÝCHACÍ SVALY
- ELASTICITA PLIC
- • COMPLIANCE
- DECHOVÁ PRÁCE

IV ALVEOLÁRNÍ VZDUCH

V ALVEOLO-KAPILÁRNÍ MEMBRÁNA

VI TRANSPORT PLYNŮ (O_2 a CO_2)



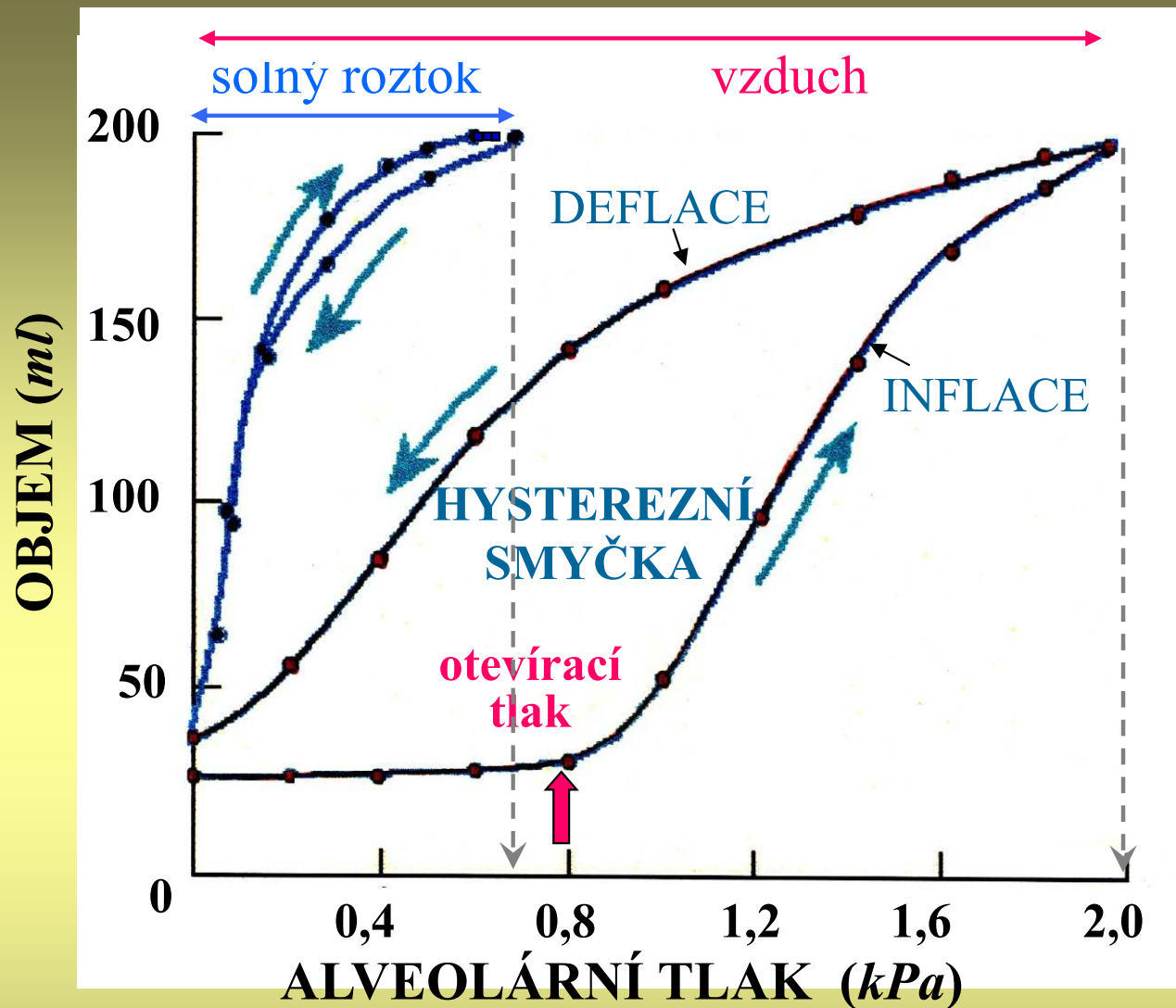
ELASTICITA PLIC

1 kPa = 7,5 mm Hg

ELASTICITA PLIC

VLASTNÍ TKÁŇOVÁ ELASTICITA
(vlákna elastinu a kolagenu)

SÍLY POVRCHOVÉHO NAPĚTÍ
(rozhraní tekutina-vzduch)

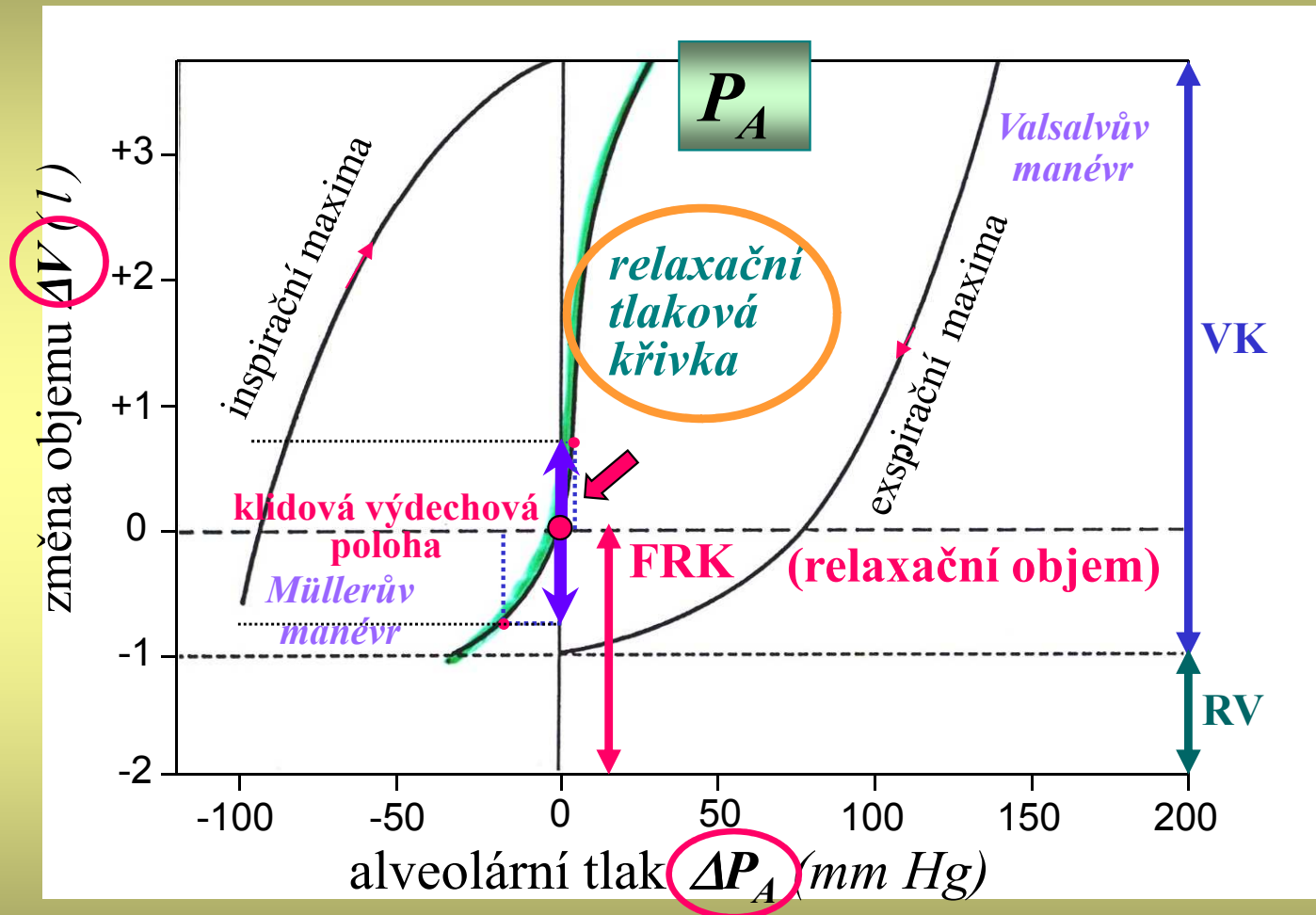


Faktory podílející se na
HYSTEREZNÍ
SMYČCE

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

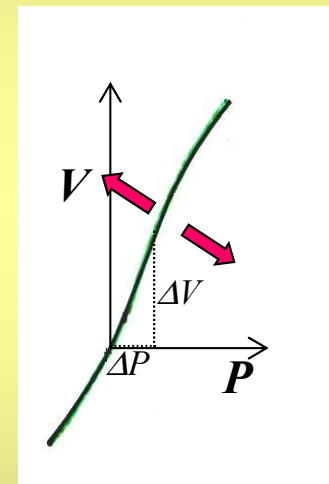
COMPLIANCE (OBJEMOVÁ ROZTAŽITELNOST)

STATICKÉ MĚŘENÍ PŘI UZAVŘENÉM SYSTÉMU



RESPIRAČNÍ SYSTÉM
píče a hrudník

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



↑ tuhost tkáně
compliance klesá

↓ tuhost tkáně
compliance vzrůstá

I DÝCHACÍ CESTY

II MĚŘITELNÉ PARAMETRY

- MRTVÝ PROSTOR
- PLÍCNÍ OBJEMY
- FUNKČNÍ VYŠETŘENÍ PLIC
- CHARAKTERISTICKÉ TLAKY

III AKTIVNÍ A PASIVNÍ SÍLY

- DÝCHACÍ SVALY
- ELASTICITA PLIC
- COMPLIANCE
- • DECHOVÁ PRÁCE

IV ALVEOLÁRNÍ VZDUCH

V ALVEOLO-KAPILÁRNÍ MEMBRÁNA

VI TRANSPORT PLYNŮ (O_2 a CO_2)

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%)