

# FUNKCE DÝCHACÍHO SYSTÉMU

## DALŠÍ FUNKCE

**PLÍCNÍ OBRANNÉ FUNKCE** (např. mukociliární clearance, obranná funkce plicních makrofágů, ...)

**METABOLICKÉ A ENDOKRINNÍ FUNKCE** (např. tvorba surfaktantu, přeměna angiotenzinu I na angiotensin II, ...)

# DÝCHACÍ SYSTÉM

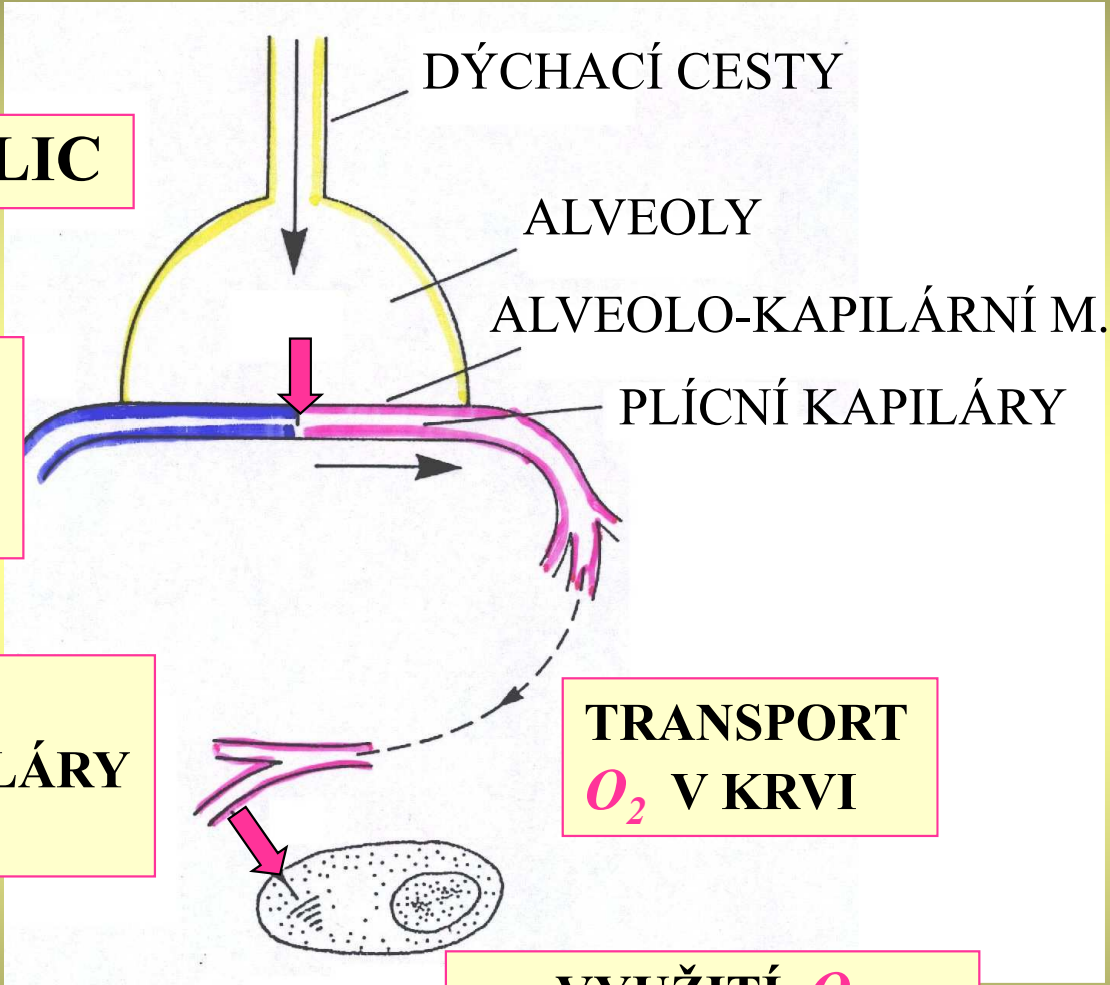
- DÝCHACÍ CESTY (KONVEKCE)
- PLÍCE - orgán, v němž dochází k výměně plynů (DIFUZE)
- PUMPA umožňující VENTILACI plic (HRUDNÍ STĚNA S DÝCHACÍMI SVALY)
- TRANSPORT  $O_2$  A  $CO_2$  V KRVI
- NERVOVÝ SYSTÉM REGULUJÍCÍ FUNKCI DÝCHACÍCH SVALŮ (oblasti CNS, *eferentní* motorické neurony k dýchacím svalům a *aferentní* neurony od různých receptorů)

# FÁZE TRANSPORTU $O_2$ K BUŇKÁM

VENTILACE PLIC

DIFUZE  $O_2$  PŘES ALVEOLO-KAPILÁTRNÍ MEMBRÁNU

DIFUZE  $O_2$  Z PERIFERNÍ KAPILÁRY DO BUNĚK



TRANSPORT  $O_2$  V KRVI

VYUŽITÍ  $O_2$  MITOCHONRIEMI

V KLIDU

příjem  $O_2$  ~300 ml / min

výdej  $CO_2$  ~250 ml / min

$\frac{250}{300}$

VNITŘNÍ DÝCHÁNÍ

# PLÁN

➔ **I ZÁKLADNÍ FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI PLYNŮ**

**II DÝCHACÍ CESTY**

**III MĚŘITELNÉ PARAMETRY**

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

**IV ALVEOLÁRNÍ VZDUCH**

**V ALVEOLO-KAPILÁRNÍ MEMBRÁNA**

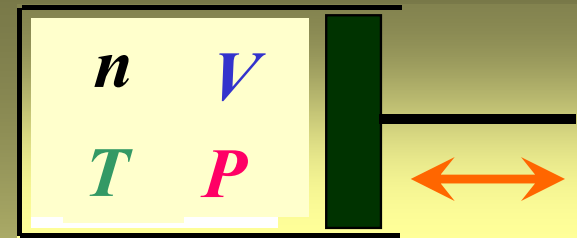
# ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI PLYNŮ

- **RYCHLÉ VYROVNÁNÍ TLAKU** v uzavřeném prostoru
- **POHYB** plynu probíhá z oblasti vyššího tlaku do oblasti s nižším tlakem **podél poklesu TLAKOVÉHO GRADIENTU**
- **DIFUZE PLYNU PŘES BARIÉRU** mezi dvěma oblastmi závisí také na **VLASTNOSTECH BARIÉRY**

## VE SMĚSI PLYNŮ

- **RYCHLOST DIFUZE** složek směsi plynů závisí na jednotlivých **GRADIENTECH PARCIÁLNÍCH TLAKŮ**
- Při **ROVNOVÁZE SMĚSI PLYNŮ NAD KAPALINOU** každá složka se v kapalině rozptýlí úměrně :
  - **PARCIÁLNÍMU TLAKU** v plynné fázi
  - **ROZPUSTNOSTI** této složky v kapalině

# VZTAHY MEZI MĚŘENÝMI VELIČINAMI



## ROVNICE IDEÁLNÍHO PLYNU

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

$P$  - tlak [Pa] [mm Hg]

$n$  - látkové množství [mol]

$V$  - objem [ $\text{m}^3$ ] [l]

$T$  - absolutní teplota [K]

$R$  - univerzální plynová konstanta [J/K.mol]

$$PV = nRT$$

Pokud se  $n$  a  $T$  nemění, je

$$PV = \text{konstanta}$$

[ J ]

fyzikální jednotka práce a energie

$$1 \text{ kPa} = 7,5 \text{ mm Hg (torr)}$$

# PARCIÁLNÍ TLAKY VE SMĚSI PLYNŮ

## Daltonův zákon – ZÁKON PARCIÁLNÍCH TLAKŮ

Ve směsi dvou plynů v daném objemu

$n_1, n_2$  - látková množství plynů ( $n_{celk} = n_1 + n_2$ )

$$F_1 = \frac{n_1}{n_{celk}}, \quad F_2 = \frac{n_2}{n_{celk}} \quad F_1 + F_2 = 1$$

Podle *Daltonova zákona*

PARCIÁLNÍ TLAKY mohou být vyjádřeny pomocí frakcí

$$P_1 = F_1 P_{celk} \quad P_2 = F_2 P_{celk}$$

$$P_1 + P_2 = P_{celk}$$

# SLOŽENÍ SUCHÉHO ATMOSFERICKÉHO VZDUCHU

**O<sub>2</sub> 20,98 %**

**N<sub>2</sub> 78,06 %**

**CO<sub>2</sub> 0,04 %**

ostatní složky

**F<sub>O<sub>2</sub></sub> ≅ 0,21**

**F<sub>N<sub>2</sub></sub> ≅ 0,78**

**F<sub>CO<sub>2</sub></sub> = 0,0004**

**BAROMETRICKÝ (ATMOSFERICKÝ) TLAK NA ÚROVNI MOŘE**

**1 atmosféra = 760 mm Hg**

**PARCIÁLNÍ TLAKY PLYNŮ SUCHÉHO VZDUCHU  
na úrovni moře**

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

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

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

*1 kPa = 7,5 mm Hg (torr)*



# **I FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI PLYNŮ**

## **→ II DÝCHACÍ CESTY**

### **III MĚŘITELNÉ PARAMETRY**

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

### **IV ALVEOLÁRNÍ VZDUCH**

### **V ALVEOLO-KAPILÁRNÍ MEMBRÁNA**

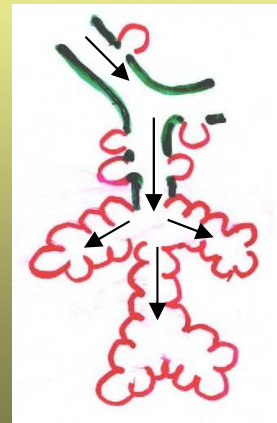
# DÝCHACÍ CESTY

## ANATOMICKÝ MRTVÝ PROSTOR - ZÓNA KONDUKCE

- ➔ • **NOSNÍ PRŮDUCHY**
  - **FARYNX**
  - **LARYNX**
  - **TRACHEA**
  - **BRONCHY**
  - **BRONCHIOLY**
  - **TERMINÁLNÍ BRONCHIOLY**
- Další funkce:
- oteplení vzduchu, očištění a nasycení vodními parami
  - reflexní odpovědi na dráždivé podněty
  - řeč a zpěv (specifické funkce laryngu)

## PŘECHODNÁ ZÓNA

- **RESPIRAČNÍ BRONCHIOLY**
- **ALVEOLÁRNÍ PŘÍVODY**

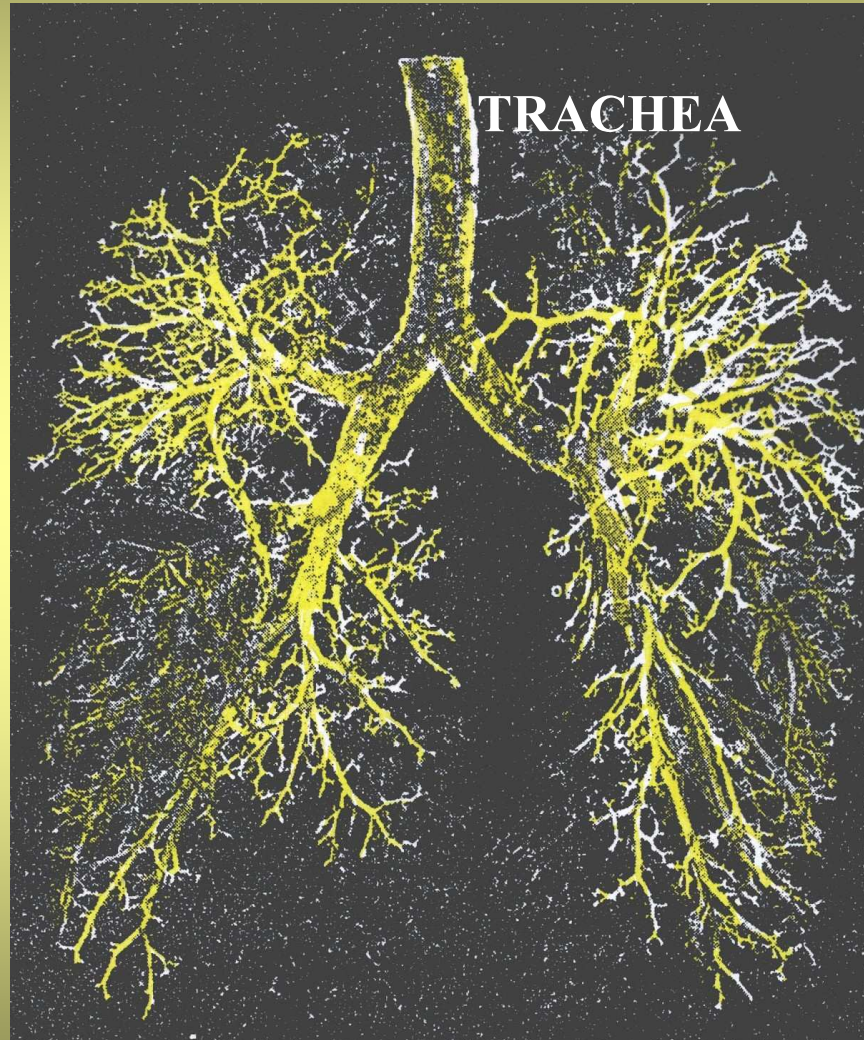


## ZÓNA VÝMĚNY PLYNŮ (alveoly)

**CELKOVÝ OBJEM** alveolů na konci klidného výdechu ~3 l

**CELKOVÁ PLOCHA** ~ 100 m<sup>2</sup>

# ODLITEK DÝCHACÍCH CEST U ČLOVĚKA



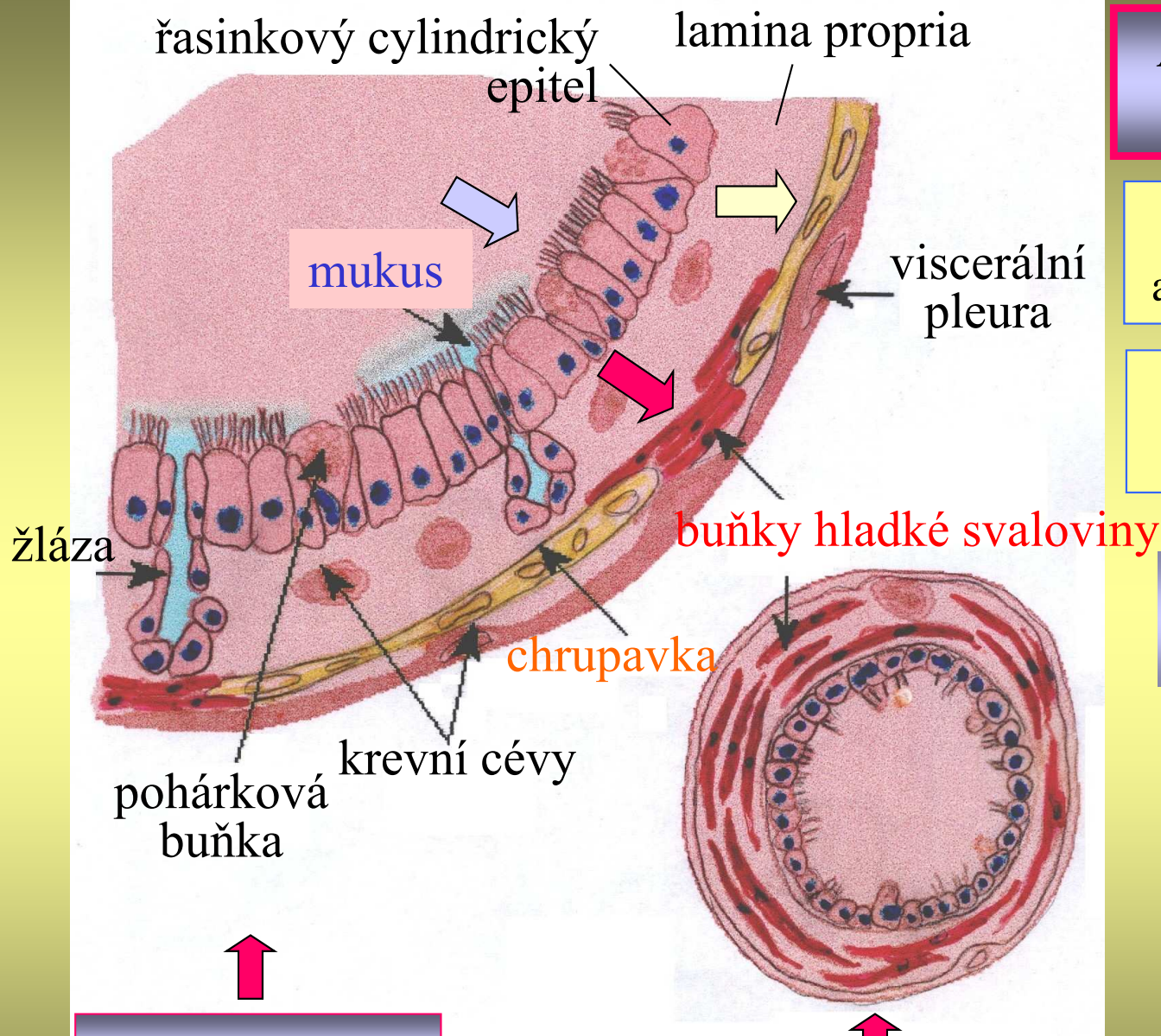
**BRONCHY**

**BRONCHIOLY**

**TERMINÁLNÍ  
BRONCHIOLY**

**AERODYNAMICKÝ ODPOR**





**AUTONOMNÍ INERVACE**  
(tonus hladké svaloviny)

**muskarinové** receptory  
aktivace  $\Rightarrow$  bronchokonstrikce

**$\beta_2$ -adrenergní** receptory  
aktivace  $\Rightarrow$  bronchodilatace

**BRONCHIÁLNÍ TONUS**  
V PRŮBĚHU DÝCHÁNÍ

NÁDECH – bronchodilatace  
(aktivace sympatiku)

VÝDECH – bronchokonstrikce  
(aktivace parasympatiku)

**BRONCHUS**

**TERMINÁLNÍ  
BRONCHIOLUS**

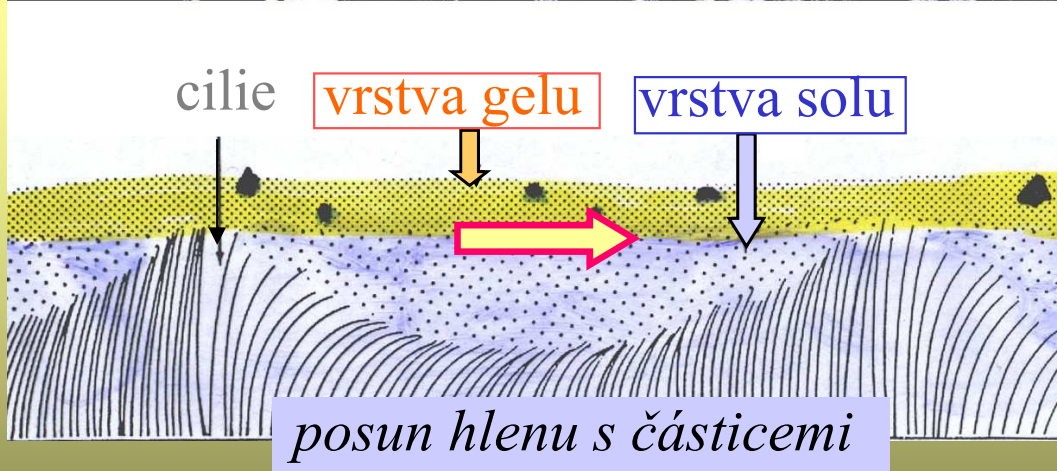
$\varnothing < 1 \text{ mm}$

# MUKOCILIÁRNÍ CLEARANCE

BRONCHITIS CHRONICA

CYSTICKÁ FIBRÓZA  
mukoviscidóza

Komplexní genetická porucha ⇒  
tvorba *solu* je omezena hlavně  
defektními **Cl<sup>-</sup> kanály** v apikální  
membráně epitelálních buněk **CFTR**  
(*Cystic Fibrosis Transmembrane  
conductance Regulator*).



KOLOIDNÍ ROZTOK  
S ROZDÍLNOU  
VISKOZITOU

**I FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI PLYNŮ**

**II DÝCHACÍ CESTY**

**→ III MĚŘITELNÉ PARAMETRY**

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

**IV ALVEOLÁRNÍ VZDUCH**

**V ALVEOLO-KAPILÁRNÍ MEMBRÁNA**



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

$$V_T = V_A + V_D$$

$V_A$  alveolární část dechového objemu ~350 ml

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

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

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

$$\dot{V} = V_T \times f$$

**MINUTOVÁ  
VENTILACE PLIC**

6 l/min

**ALVEOLÁRNÍ VENTILACE**

4,2 l/min

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

**VENTILACE MRTVÉHO  
PROSTORU**

1,8 l/min

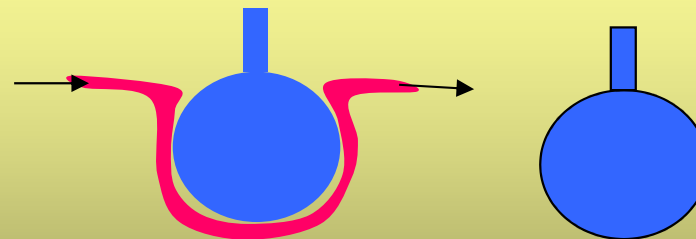
Při **POVRCHNÍM RYCHLÉM DÝCHÁNÍ** MINUTOVÁ VENTILACE PLIC může být normální (6 l/ min), přesto ALVEOLÁRNÍ VENTILACE je snížena ve srovnání s **POMALÝM HLUBOKÝM DÝCHÁNÍM**.

# MRTVÝ PROSTOR V DÝCHACÍM SYSTÉMU

## CELKOVÝ OBJEM, VE KTERÉM NEDOCHÁZÍ K VÝMĚNĚ PLYNŮ

- ANATOMICKÝ - objem dýchacích cest
- FUNKČNÍ (CELKOVÝ)

**ANATOMICKÝ mrtvý prostor + celkový OBJEM ALVEOLŮ  
bez funkčního kapilárního řečiště**



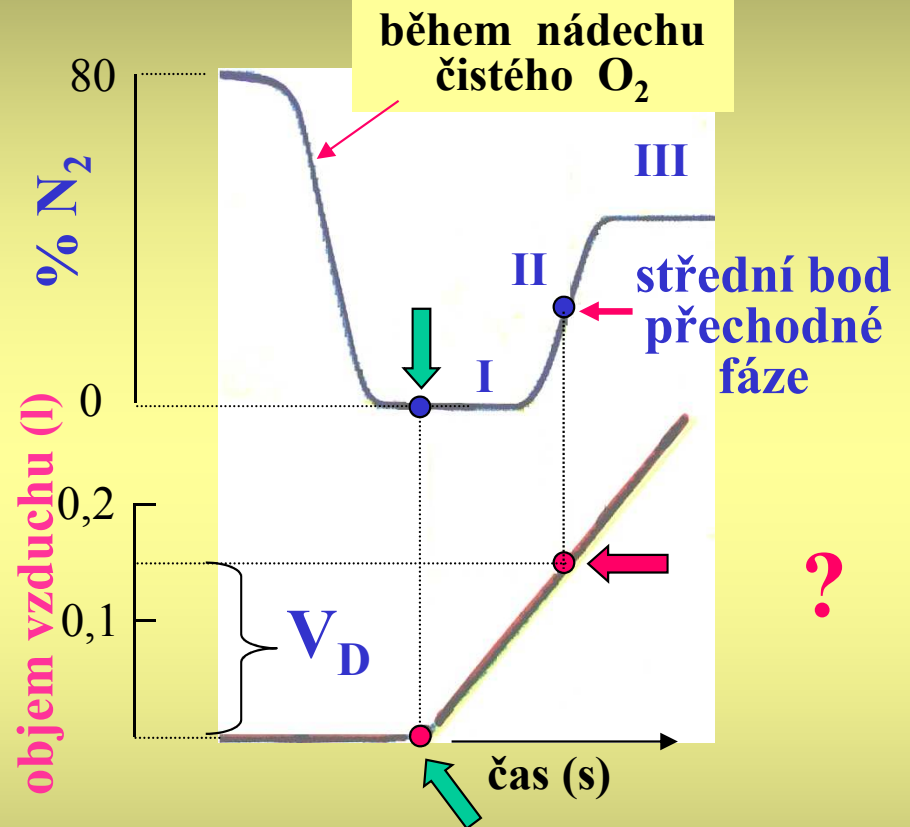
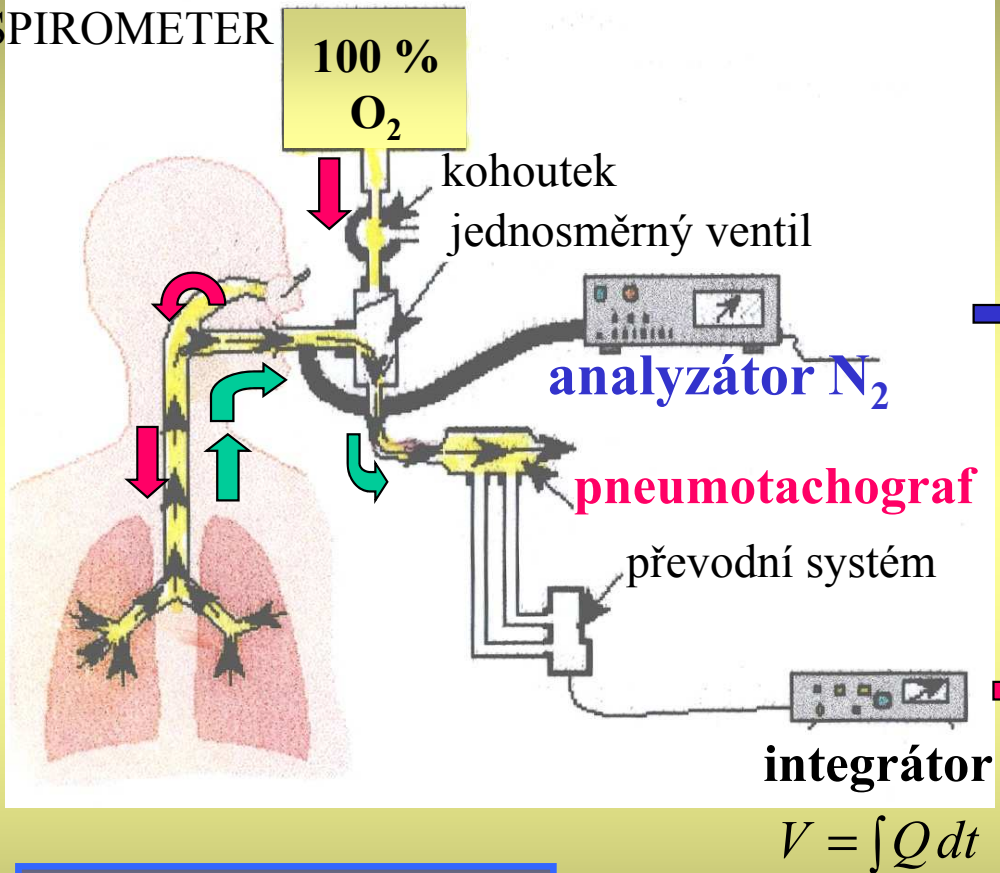
**U ZDRAVÉHO JEDINCE  
oba prostory jsou prakticky identické**



# MĚŘENÍ ANATOMICKÉHO MRTVÉHO PROSTORU

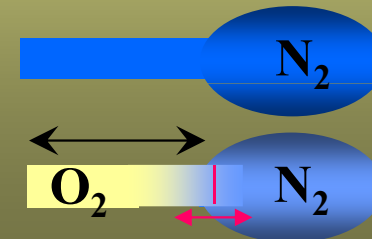
## jednodechový N<sub>2</sub> test ('single breath' N<sub>2</sub> test)

MODIFIKOVANÝ  
SPIROMETER



### KŘIVKA N<sub>2</sub> (%)

- Fáze I** - mrtvý prostor naplněný 100 % O<sub>2</sub>
- Fáze II** - přechodná fáze (směs O<sub>2</sub> a alveolárního vzduchu)
- Fáze III** - alveolární plató



# ANATOMICKÝ MRTVÝ PROSTOR

## BOHROVA ROVNICE

$$V_D = V_E \frac{P_{CO_2A} - P_{CO_2E}}{P_{CO_2A}}$$

$V_E$  ..... objem vydechnutého vzduchu

$$P_{CO_2} = F_{CO_2} \cdot P_{celk}$$

$P_{CO_2E}$  ... parciální tlak  $CO_2$  ve vydechnutém vzduchu

$P_{CO_2A}$  ... parciální tlak  $CO_2$  v alveolárním vzduchu

?

$P_{CO_2A}$  můžeme změřit v posledních 10 ml vydechnutého vzduchu

$$V_E = V_D + V_A$$

$$PV = nRT$$



$$n_{CO_2} \sim P_{CO_2}V$$

$$n_{CO_2E} = n_{CO_2D} + n_{CO_2A}$$

.....?

# FUNKČNÍ (celkový) MRTVÝ PROSTOR

## BOHROVA ROVNICE

$$V_D = V_E \frac{P_{CO_2a} - P_{CO_2E}}{P_{CO_2a}}$$

FUNKČNÍ MRTVÝ PROSTOR získáme, jestliže alveolární  $P_{CO_2A}$  nahradíme  $P_{CO_2a}$  (v arteriální krvi).

$$P_{CO_2a} \geq P_{CO_2A}$$

U ZDRAVÝCH JEDINCŮ oba parciální tlaky jsou téměř identické

U PLÍCNÍCH ONEMOCNĚNÍ více alveolů bez funkčního kapilárního řečiště  $\Rightarrow \uparrow P_{CO_2a}$

# **I FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI PLYNŮ**

## **II DÝCHACÍ CESTY**

### **III MĚŘITELNÉ PARAMETRY**

- **MRTVÝ PROSTOR**
- ➔ • **PLÍCNÍ OBJEMY**
- **FUNKČNÍ VYŠETŘENÍ PLIC**
- **CHARAKTERISTICKÉ TLAKY**

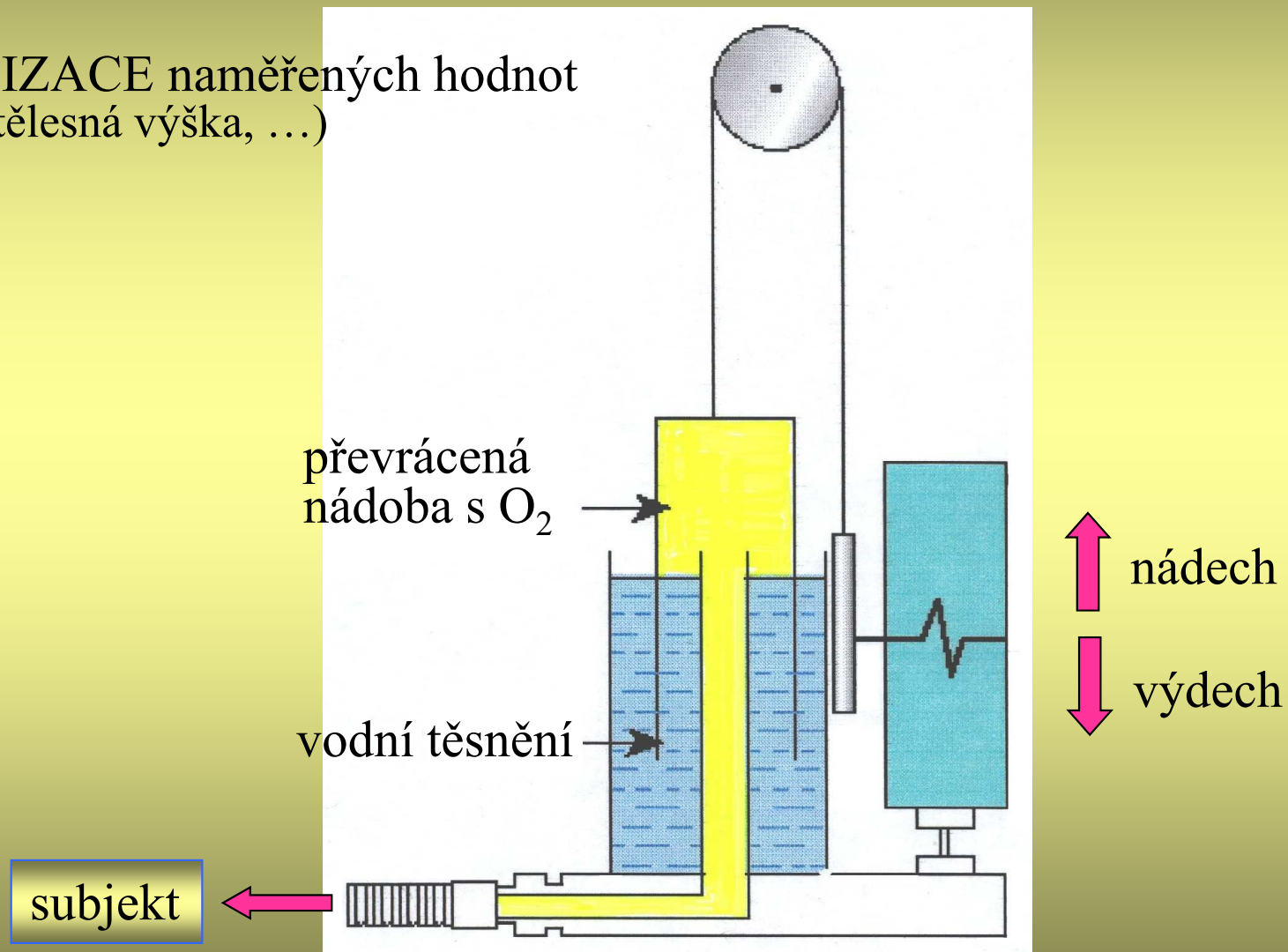
### **IV ALVEOLÁRNÍ VZDUCH**

### **V ALVEOLO-KAPILÁRNÍ MEMBRÁNA**

# SPIROMETRIE

(přímá měření plicních objemů, kapacit, funkční vyšetření, ...)

STANDARDIZACE naměřených hodnot  
(věk, pohlaví, tělesná výška, ...)



# PLÍČNÍ OBJEMY

INSPIRAČNÍ  
REZERVNÍ OBJEM  $IRV$

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

EXSPIRAČNÍ  
REZERVNÍ OBJEM  $ERV$

REZIDUÁLNÍ OBJEM  $RV$

DILUČNÍ METODA  
(inertní plyn  $He$ )

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

$$n = c V$$

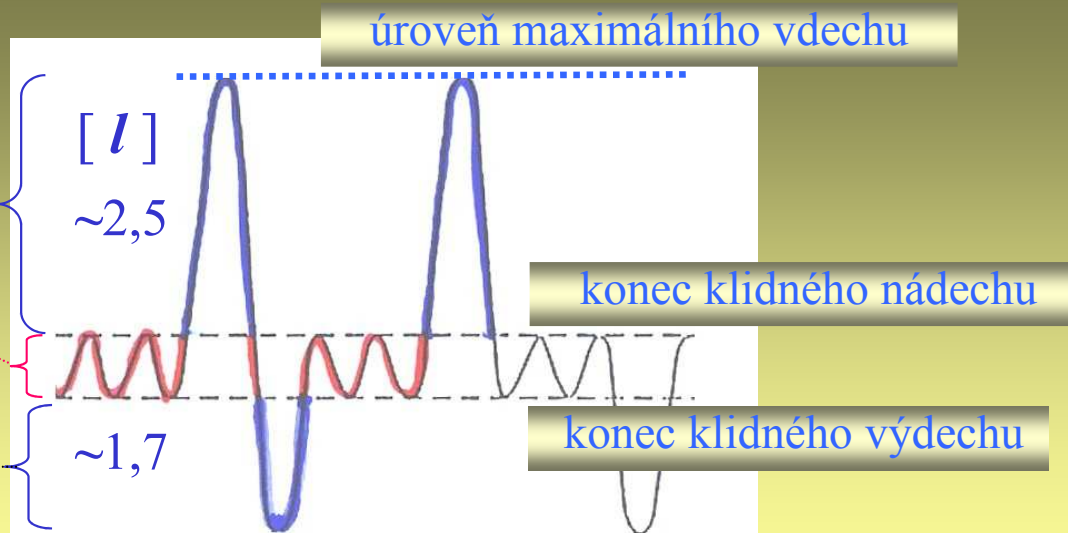
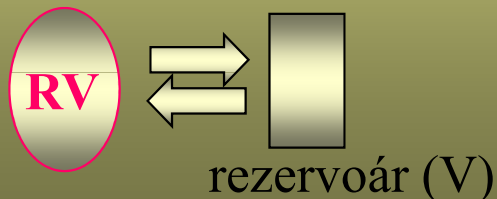
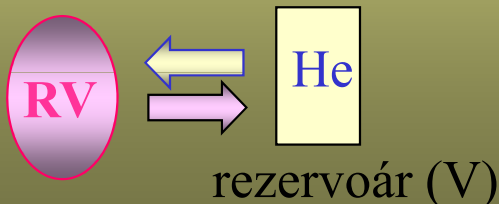
$V_r$  ....objem rezervoáru

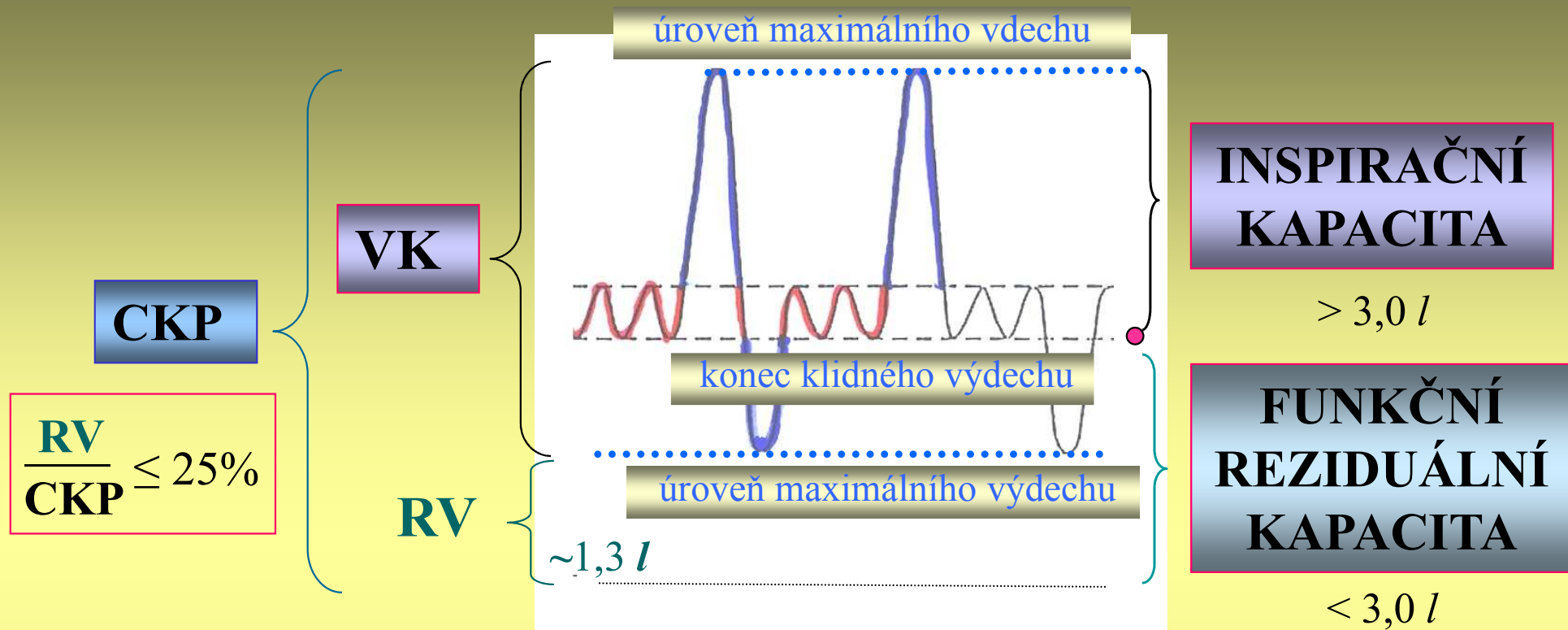
$c_{pHe}$  ...počáteční koncentrace  $He$

$c_{kHe}$  ...konečná koncentrace  $He$

$$n_{RVHe} = n_{p,rHe} - n_{k,rHe}$$

(rozdíl mezi počátečním a konečným množstvím  $He$  v rezervoáru)





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

*Největší objem vzduchu, který je možno vydechnout po maximálním nádechu*

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

# **I FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI PLYNŮ**

## **II DÝCHACÍ CESTY**

### **III MĚŘITELNÉ PARAMETRY**

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

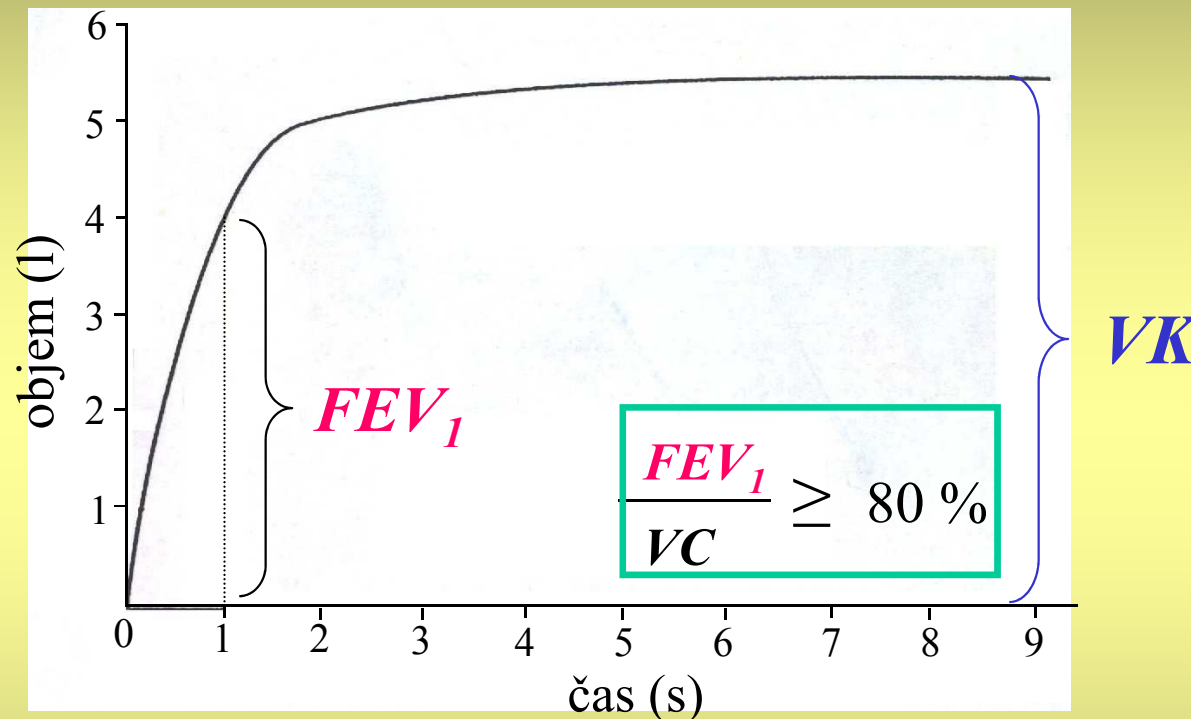
### **IV ALVEOLÁRNÍ VZDUCH**

### **V ALVEOLO-KAPILÁRNÍ MEMBRÁNA**



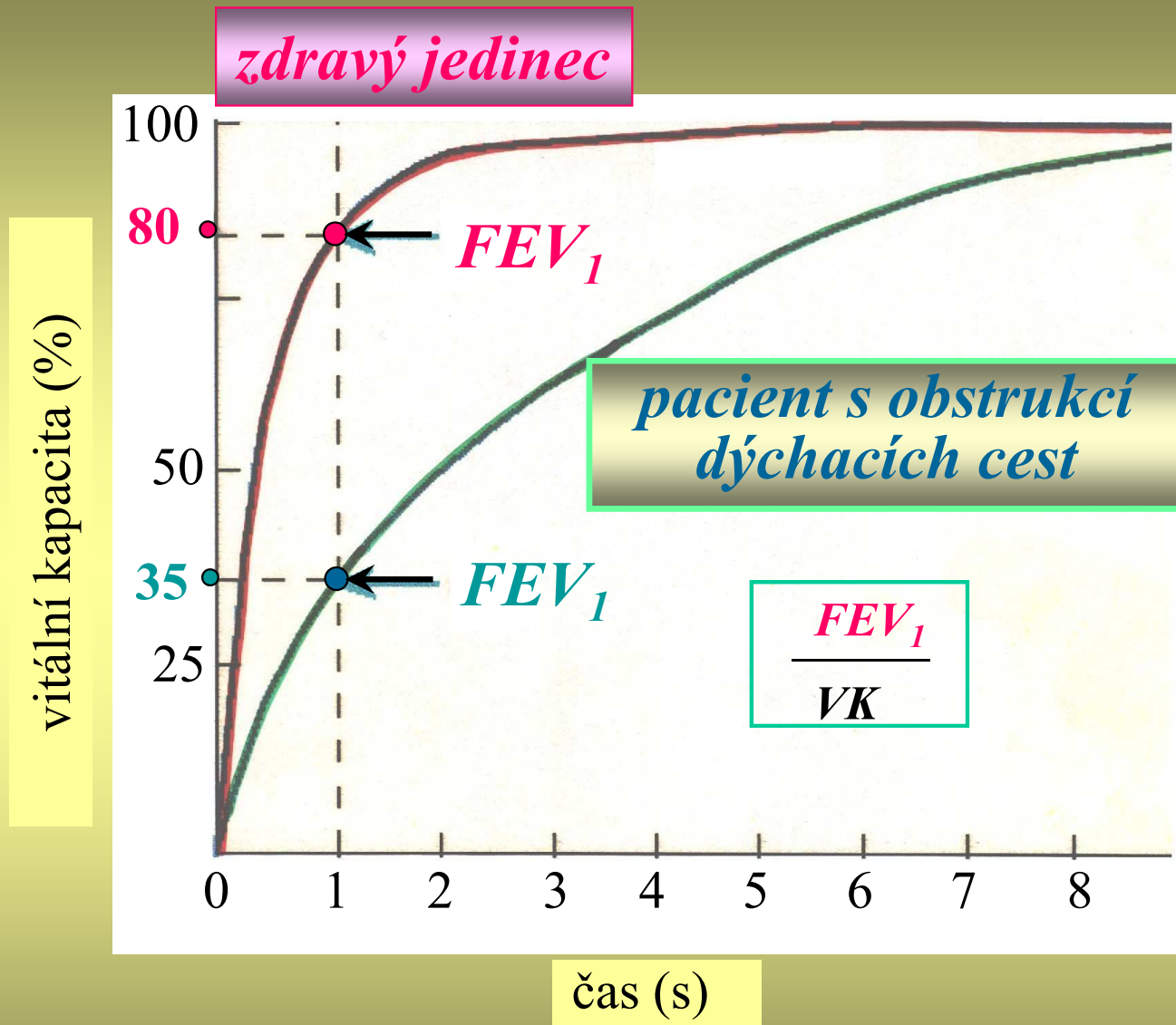
# FUNKČNÍ VYŠETŘENÍ PLIC

- **VTEŘINOVÁ VITÁLNÍ KAPACITA** (expirační vteřinová  $VK$ , rozepsaný usilovný výdech  $VK$ ),  $FEV_1$  ('*forced expiratory volume per 1s*')



- **KLIDOVÁ MINUTOVÁ VENTILACE** ( $0,5 \text{ l} \times 12 \text{ dechů} / \text{min} = 6 \text{ l/min}$ )
- **MAXIMÁLNÍ VOLNÍ VENTILACE** po dobu 10 s ( $125 - 170 \text{ l/min}$ )
- **MAXIMÁLNÍ PRŮTOK VYDECHOVANÉHO VZDUCHU  $PEFR$**  při použití pneumotachografu ('*peak expiratory flow rate*') ( $\sim 10 \text{ l/s}$ )

# VTEŘINOVÁ VITÁLNÍ KAPACITA PLIC $FEV_1$



**VTEŘINOVÁ VITÁLNÍ KAPACITA** umožňuje rozlišení **OBSTRUKČNÍCH PORUCH** (astma bronchiale) od **RESTRIKČNÍCH** (plicní edém, fibróza, emfyzém)

**I FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI PLYNŮ**

**II DÝCHACÍ CESTY**

**III MĚŘITELNÉ PARAMETRY**

- **MRTVÝ PROSTOR**
- **PLÍCNÍ OBJEMY**
- **FUNKČNÍ VYŠETŘENÍ PLIC**
- ➔ • **CHARAKTERISTICKÉ TLAKY**

**IV ALVEOLÁRNÍ VZDUCH**

**V ALVEOLO-KAPILÁRNÍ MEMBRÁNA**

# ČASOVÝ PRŮBĚH TLAKŮ při klidném dýchání

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

$$\Delta P = Q \cdot R$$

POISEUILLEŮV ZÁKON

$Q$  ... průtok vzduchu *analogie Ohmova zákona*

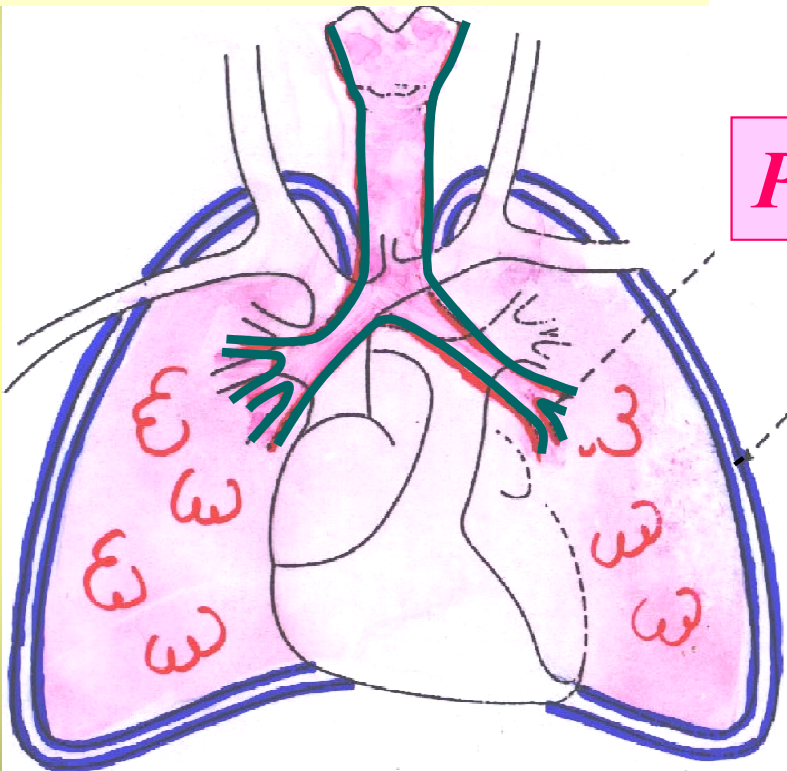
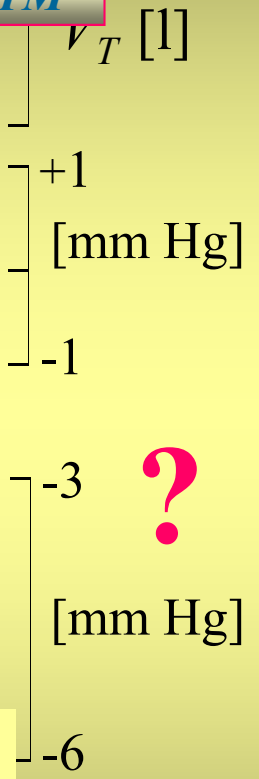
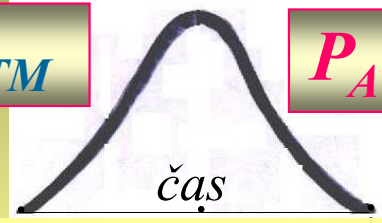
$R$  ... aerodynamický odpor dýchacích cest

**VDECH**

**VÝDECH**

$$P_A < P_{ATM}$$

$$P_A > P_{ATM}$$



?

naměřená křivka

teoretická křivka

$P_A$  ALVEOLÁRNÍ (INTRAPULMONÁLNÍ)

$$P_{TP} = P_A - P_{PL}$$

$P_{PL}$  INTRAPLEURÁRNÍ (INTRATORAKÁLNÍ)

TRANSPULMONÁLNÍ

**I FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI PLYNŮ**

**II DÝCHACÍ CESTY**

**III MĚŘITELNÉ PARAMETRY**

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

**→ IV ALVEOLÁRNÍ VZDUCH**

**V ALVEOLO-KAPILÁRNÍ MEMBRÁNA**

# 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>	564,0
...	

760 mm Hg

mrtvý prostor

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

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

fyziologické zkraty

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>	...
...	

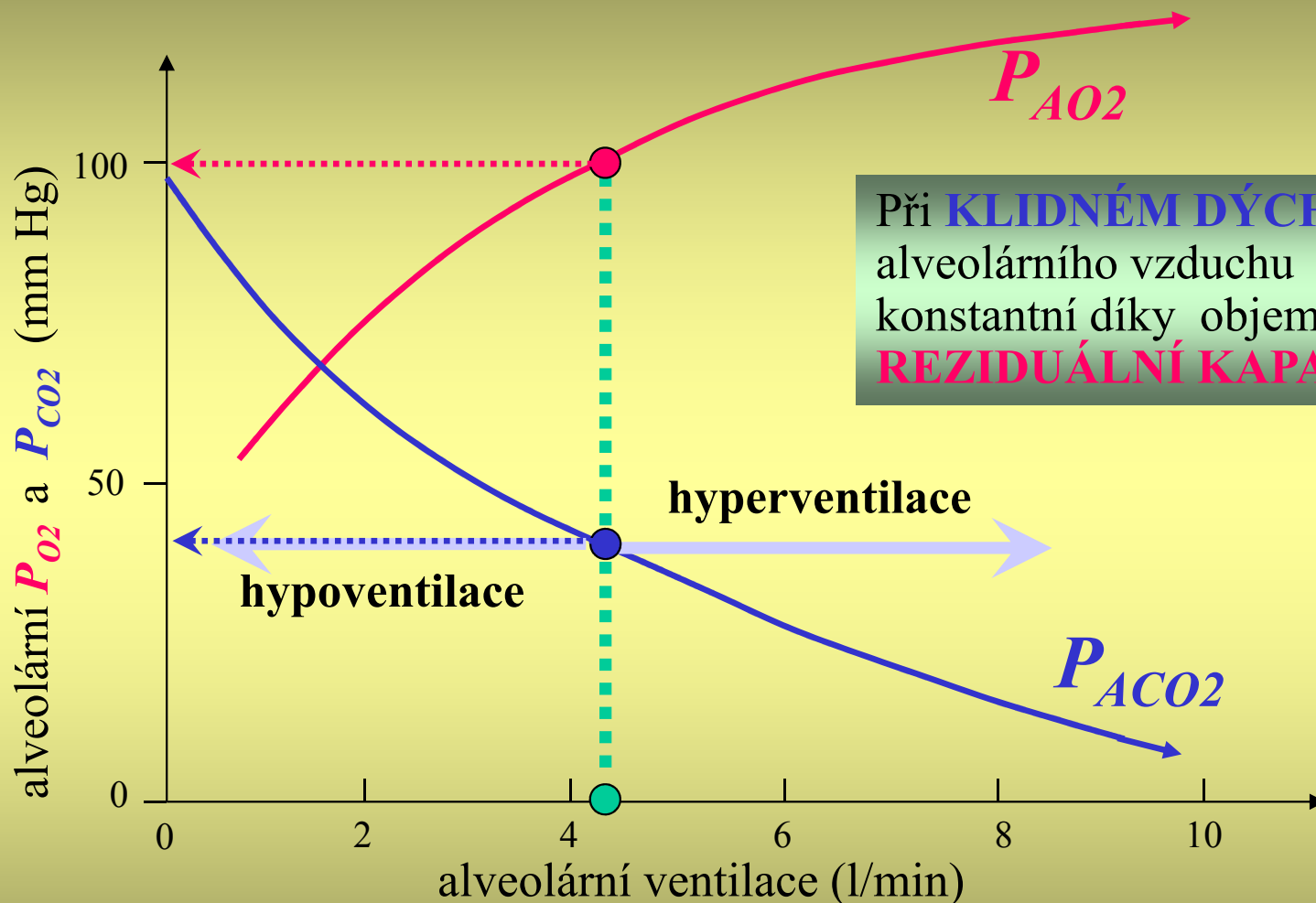
arterie

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

**I FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI PLYNŮ**

**II DÝCHACÍ CESTY**

**III MĚŘITELNÉ PARAMETRY**

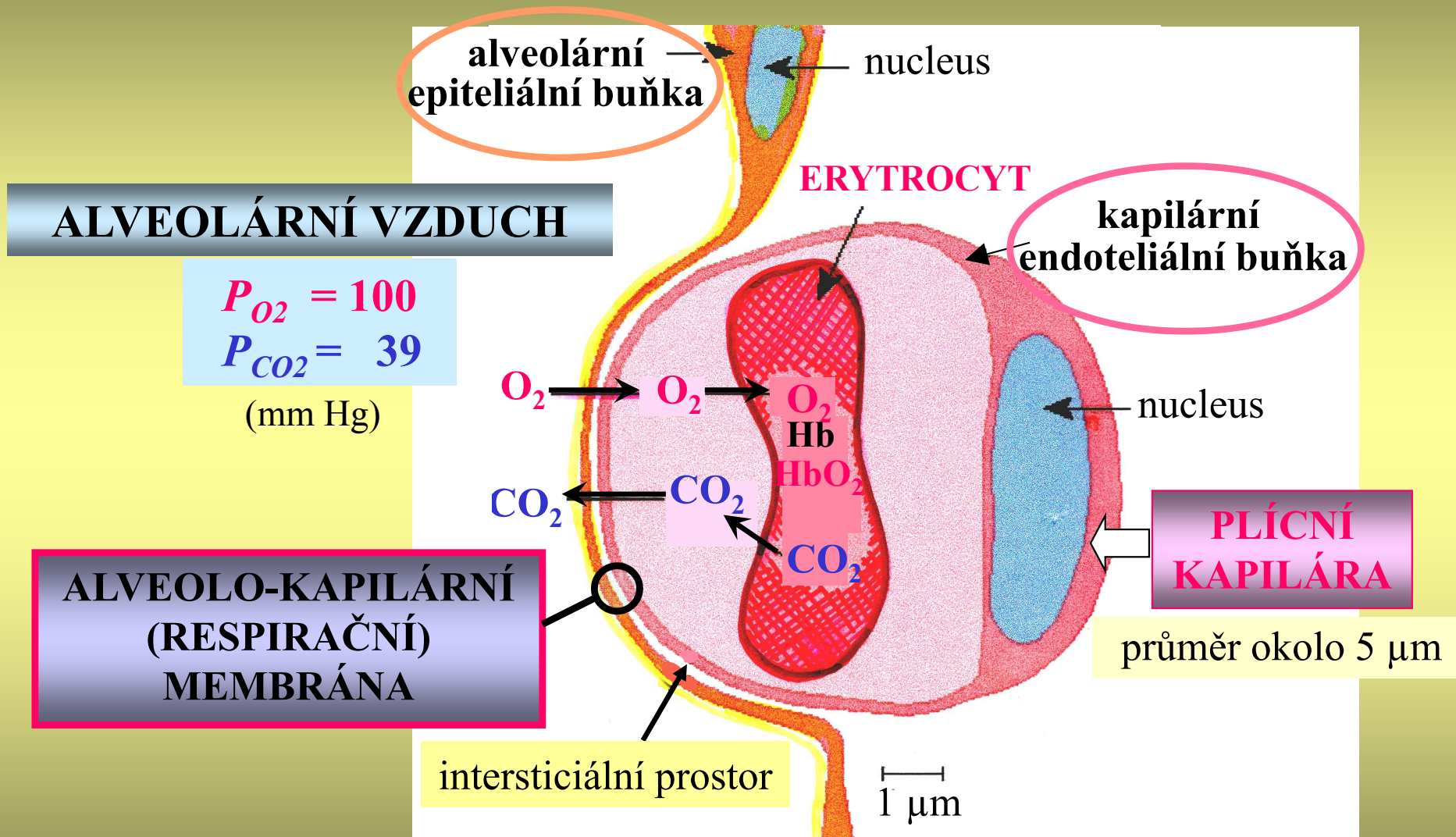
- **MRTVÝ PROSTOR**
- **PLÍCNÍ OBJEMY**
- **FUNKČNÍ VYŠETŘENÍ PLIC**
- **CHARAKTERISTICKÉ TLAKY**

**IV ALVEOLÁRNÍ VZDUCH**

**→ V ALVEOLO-KAPILÁRNÍ MEMBRÁNA**



# RESPIRAČNÍ MEMBRÁNA



0.75 s

doba kontaktu erytrocytu  
s respirační membránou v klidu

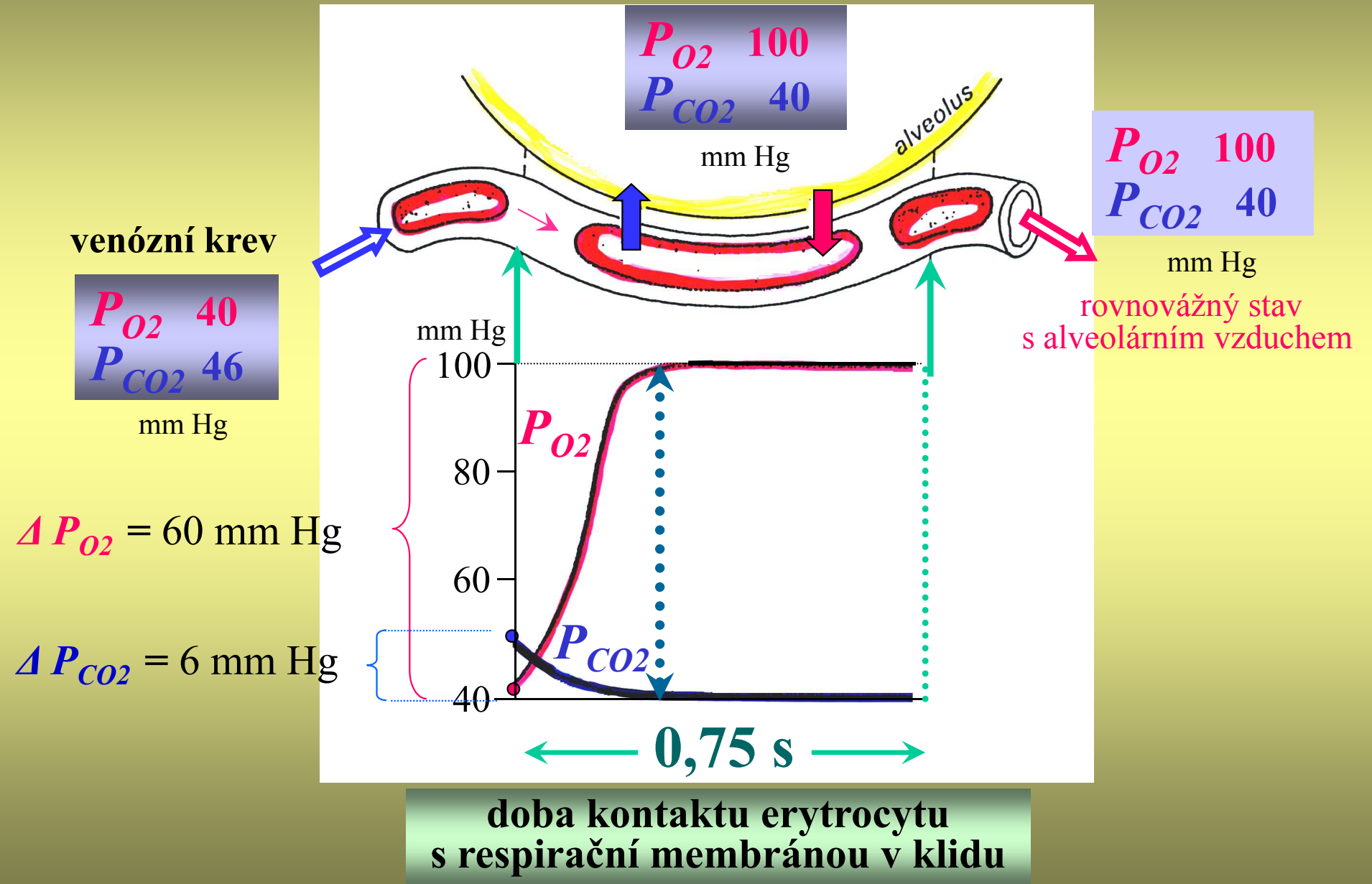
# FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ RYCHLOST DIFUZE PLYNŮ V PLÍCÍCH

## FICKŮV ZÁKON – ZÁKON DIFUZE

$$\dot{V} = \frac{k_D A}{l} (P_A - P_c) \quad (ml/min)$$

- **CELKOVÝ POVRCH ALVEOLO-KAPILÁRNÍ MEMBRÁNY  $A$  ( $\sim 100 \text{ m}^2$ )** ( $\downarrow A$ : *emfyzém*)
- **DÉLKA DIFUZNÍ DRÁHY - TLOUŠŤKA (SÍLA) MEMBRÁNY  $l$  ( $\sim 1 \mu\text{m}$ )** ( $\uparrow l$ : *zánět, plicní edém*)
- **ROZDÍL PARCIÁLNÍCH TLAKŮ ( $P_A - P_c$ )**
- **DIFUZNÍ KOEFICIENT PLYNU  $k_D$**   
(závisí na molekulární hmotnosti a rozpustnosti plynu v daném prostředí – *fibróza plicní tkáně*)

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



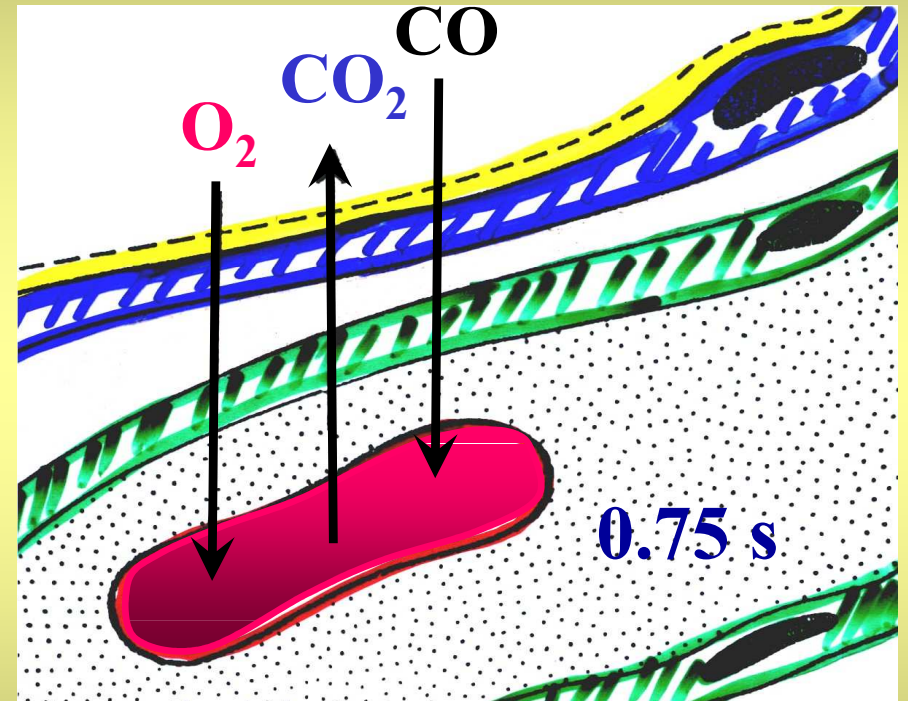
# DIFUZNÍ KAPACITA PLIC $D_L$

$$D_L = \frac{\dot{V}}{P_A - P_c} \left[ \frac{ml/min}{mm\ Hg} \right]$$

$$\dot{V} = \frac{k_D A}{l} (P_A - P_c) \rightarrow D_L = \frac{k_D A}{l}$$

$\dot{V}$  – rychlost difuze plynu ( $ml/min$ )

$P_A - P_c$  – rozdíl parciálních tlaků  
(hnací síla difuze)



## INDEX DIFUZNÍ KAPACITY PLIC

Pro měření  $D_L$  je vhodný  $CO$ .  $P_{CO}$  v plazmě je zanedbatelný, proto se měří pouze  $P_{ACO}$  a pokles  $CO$  v alveolech za jednotku času ( $\dot{V}_{CO}$ ).

$$D_{LCO} = \dot{V}_{CO} / P_{ACO}$$

## V KLIDU

$$D_{LCO} = 17 \text{ ml/min/mm Hg}$$

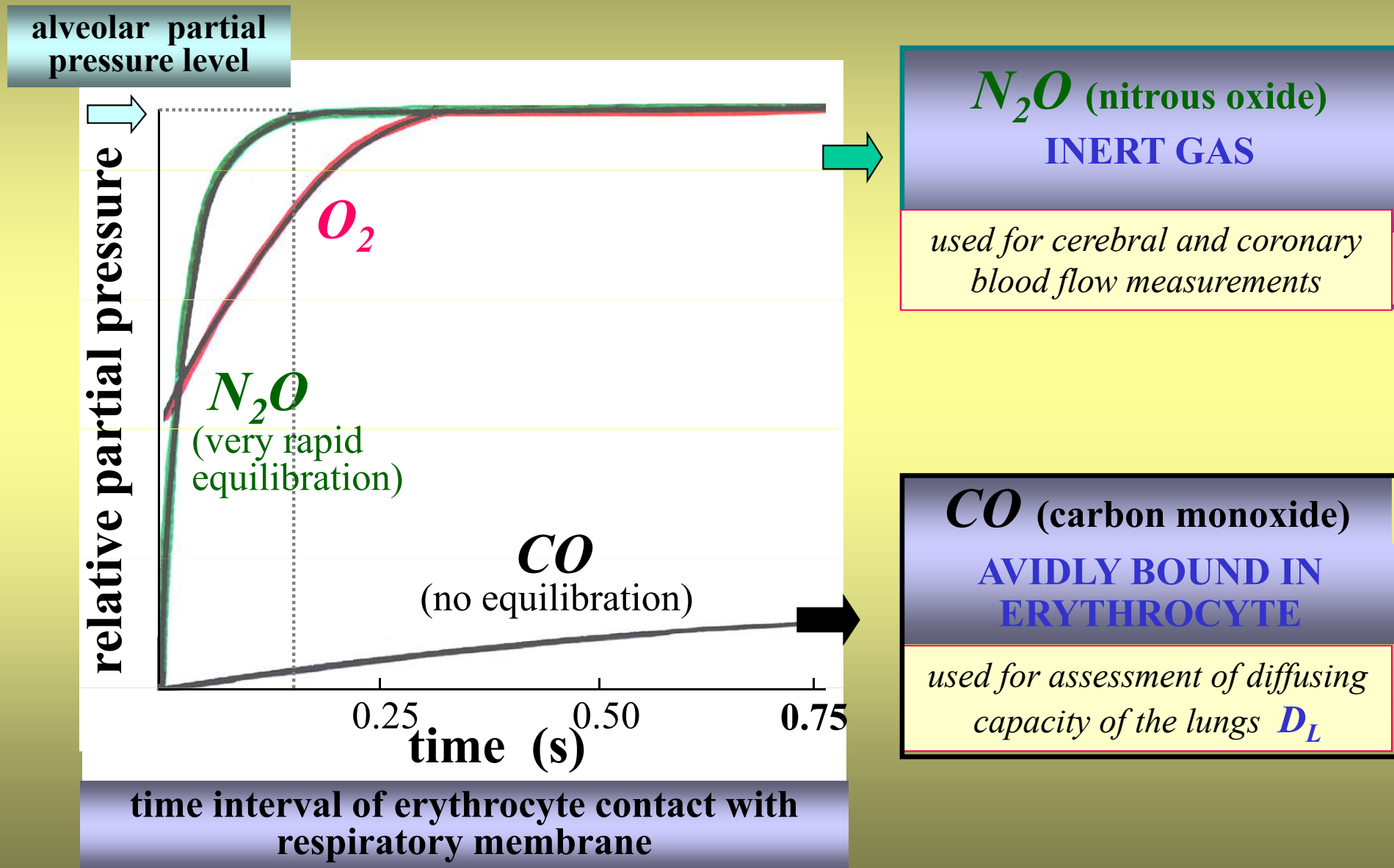
$$D_{LO_2} = 21 \text{ ml/min/mm Hg}$$

$D_{LO_2}$  **vzrůstá** při tělesné námaze ( $\uparrow \dot{V}$ ) a **klesá** u plicních onemocnění ( $\downarrow A, \uparrow l$ )

$$D_{LCO_2} \gg D_{LO_2}$$

$$k_{DCO_2} \gg k_{DO_2}$$

# EQUILIBRATION OF $O_2$ , $N_2O$ , AND $CO$ PARTIAL PRESSURES IN CAPILLARY BLOOD WITH ALVEOLAR PRESSURES



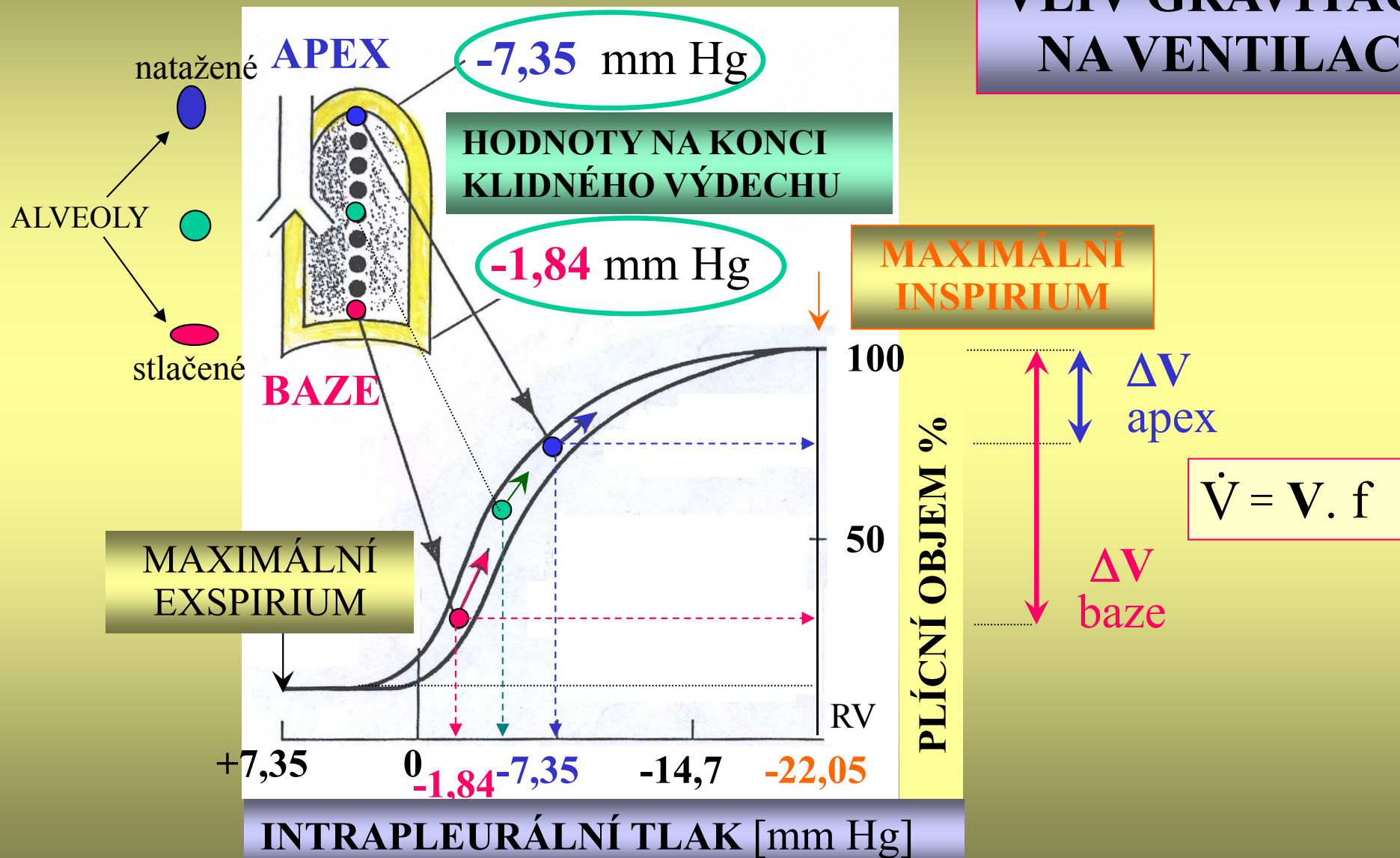


# INTRAPLEURÁLNÍ TLAK

$P_{PL}$

ve vzpřímené poloze

## VLIV GRAVITACE NA VENTILACI



$P_{PL}$

7,35 mm Hg = 10 cm H<sub>2</sub>O

