

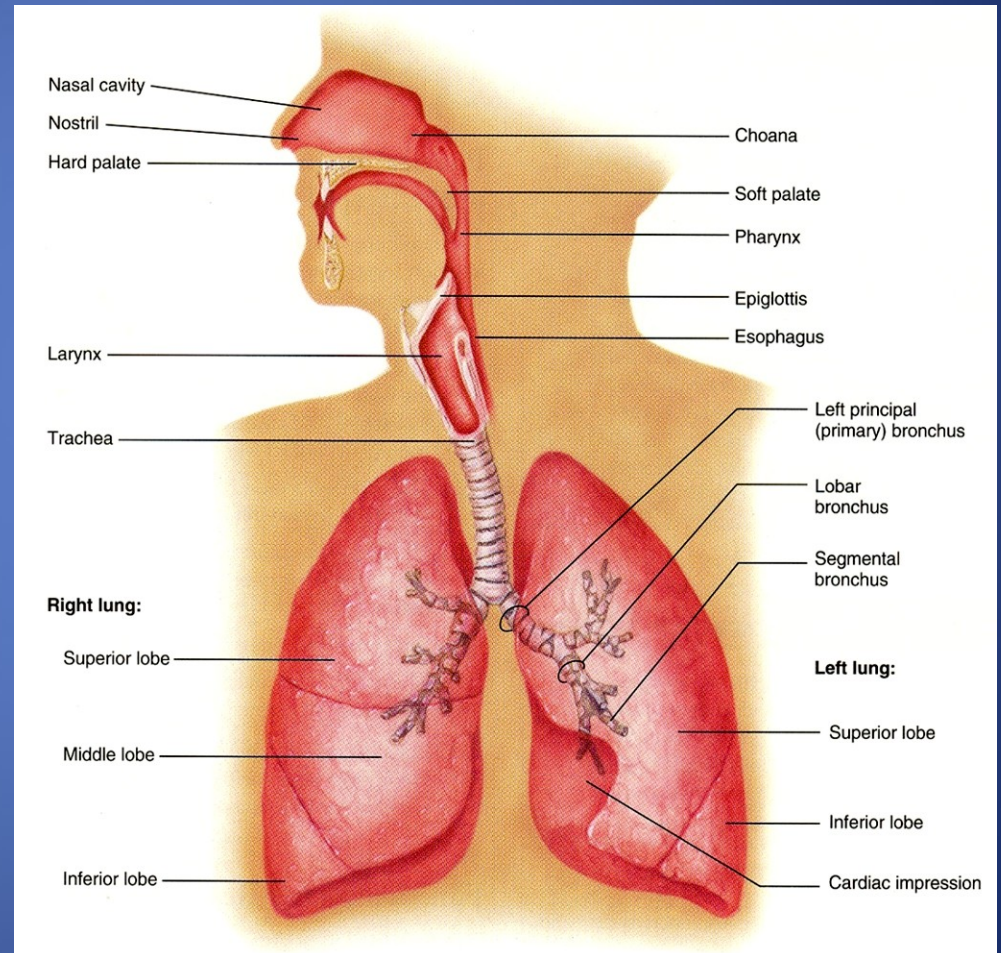
# Fyziologie dýchacího systému

MUDr. Kateřina Kapounková

# Anatomie dýchacího systému

## Dýchací cesty

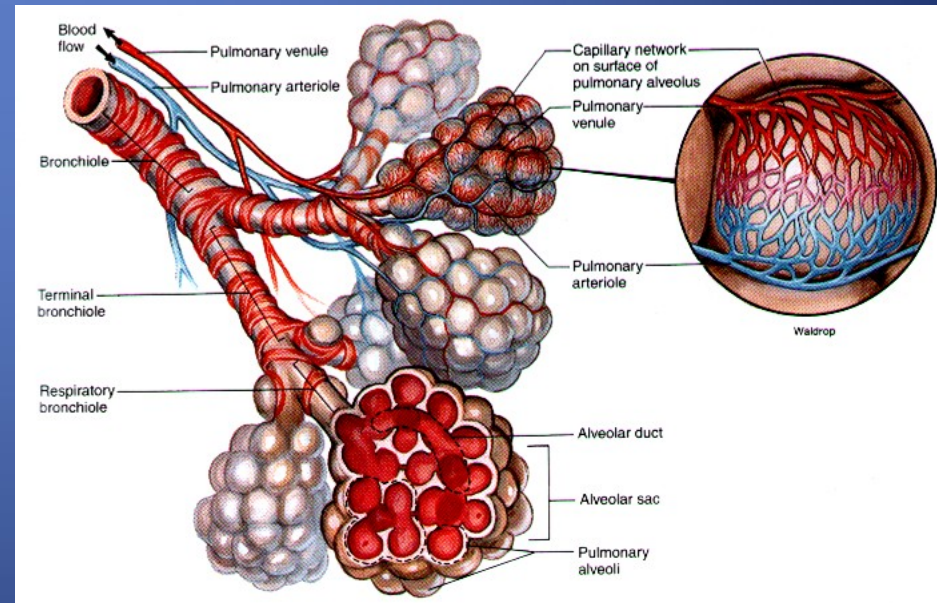
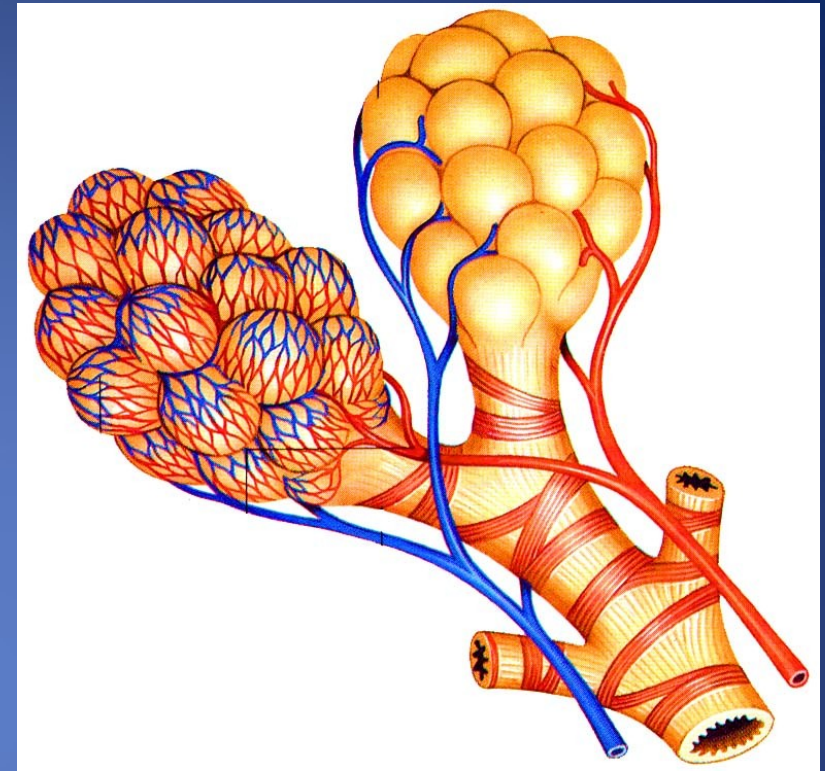
- dutina nosní
- (event.dutina ústní)
- hltan
- hrtan
- trachea
- bronchy
- respirační bronchioly
- alveoly (plicní sklípky)



Obr. č.2

# Plicní sklípky alveoly

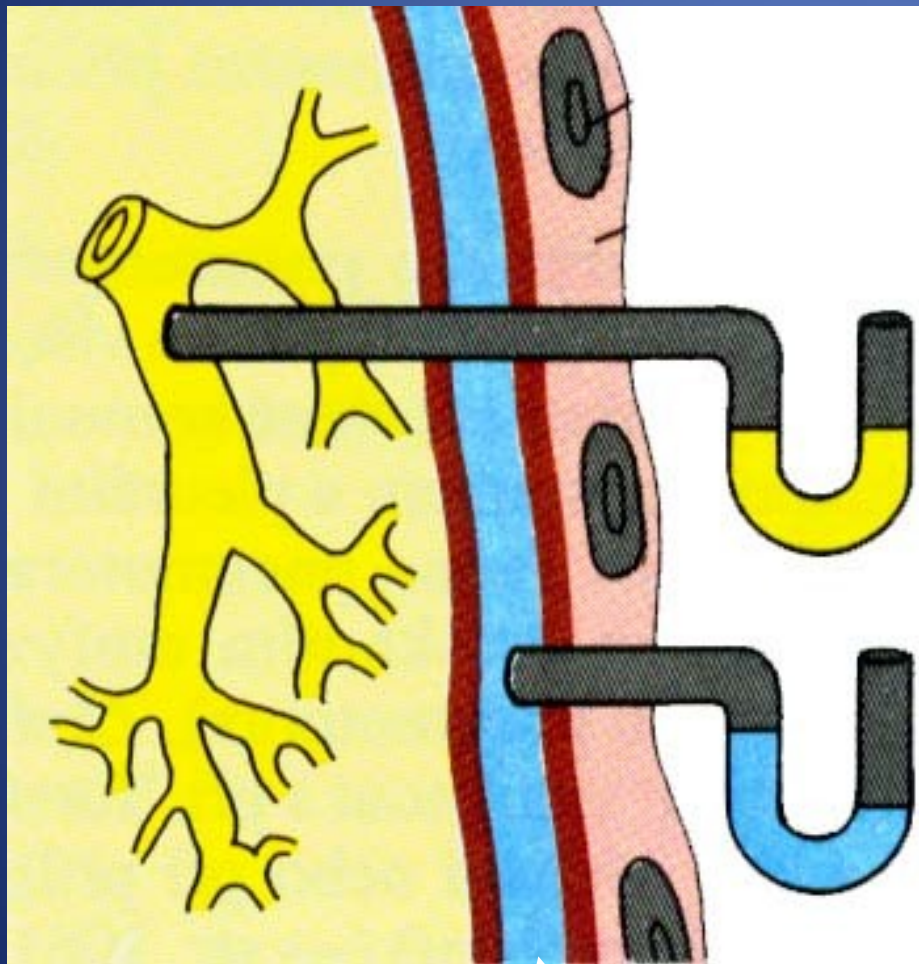
- člověk má asi 300 milionů alveolů
- celková plocha alveolární stěny u dospělého je 70 m<sup>2</sup>
- alveoly jsou obklopeny plicními kapilárami
- difundování O<sub>2</sub> a CO<sub>2</sub> (mezi krví a vzduchem)



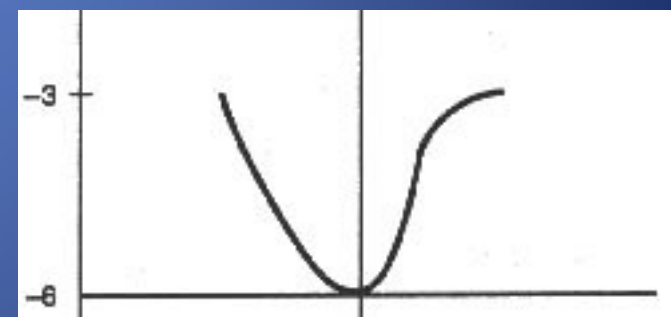
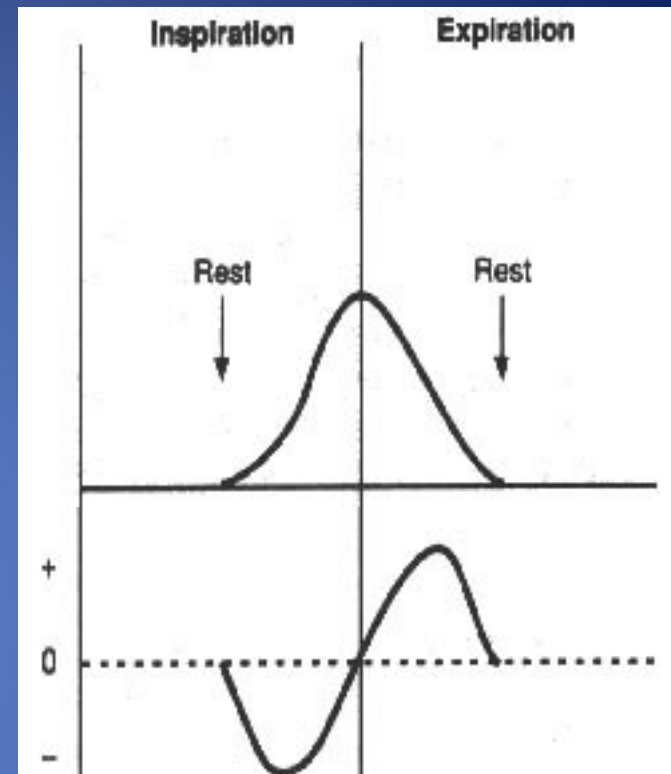
# PLEURA

pulmonalis

parietalis

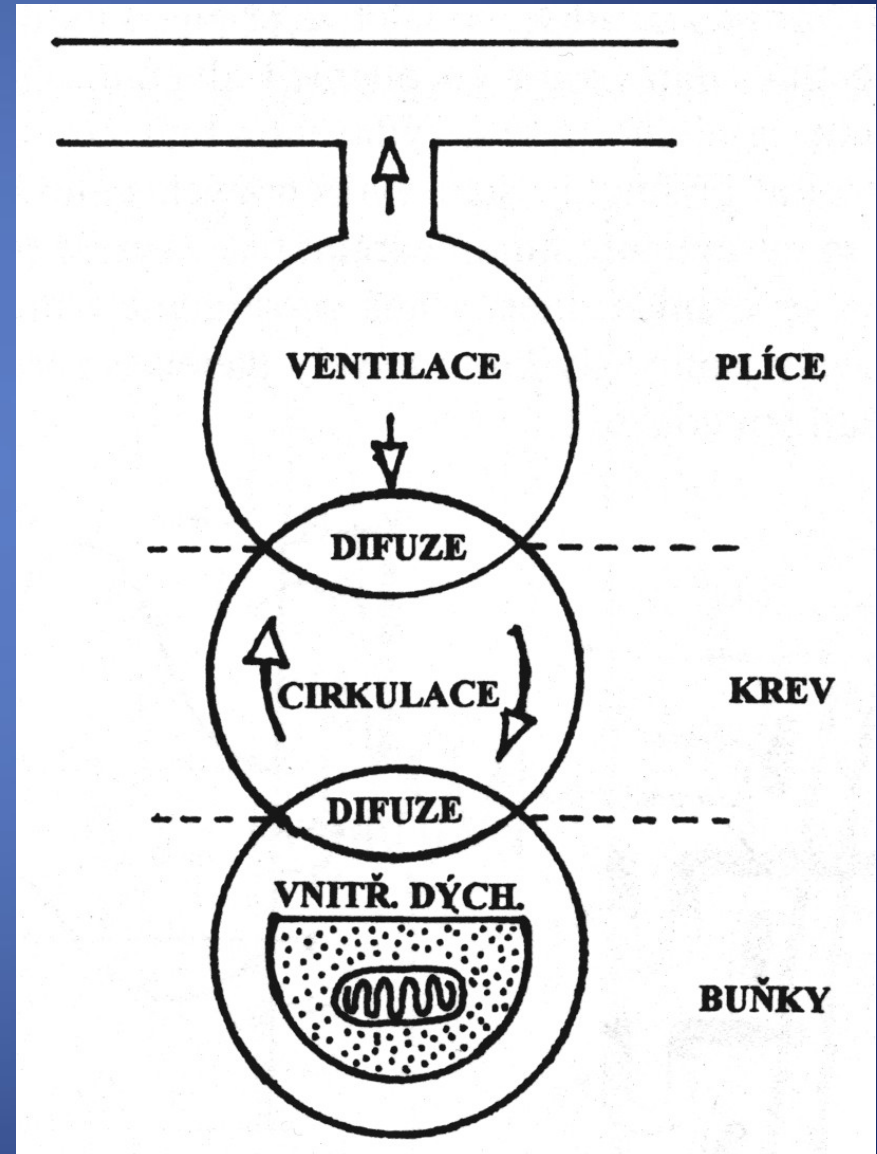


pleurální šterbina



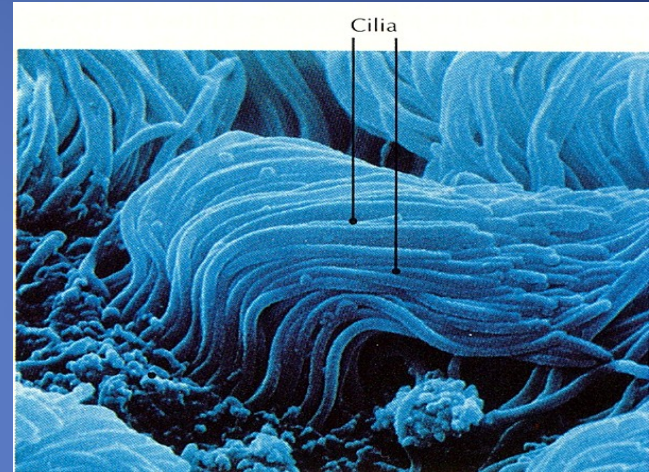
# Základní funkce dýchacího systému

- Ventilace = zajišťuje výměnu vzduchu mezi okolní atmosférou a alveoly (**plicními sklípky**)
- Distribuce = rozdělení vzduchu v dýchacích cestách (nerovnoměrné – dechová cvičení)
- Difúze = výměna plynů alveol.vzduchem a krví a krví a tkání
- Perfúze = průtok krve plicemi
- Respirace = mechanismus příjmu  $O_2$  či výdeje  $CO_2$



# Ventilace plic

1. vzduch se v dýchacích cestách zbavuje většiny mechanických nečistot (hlen, řasinky = cilie – posun hlenu do faryngu – vykašlávání)



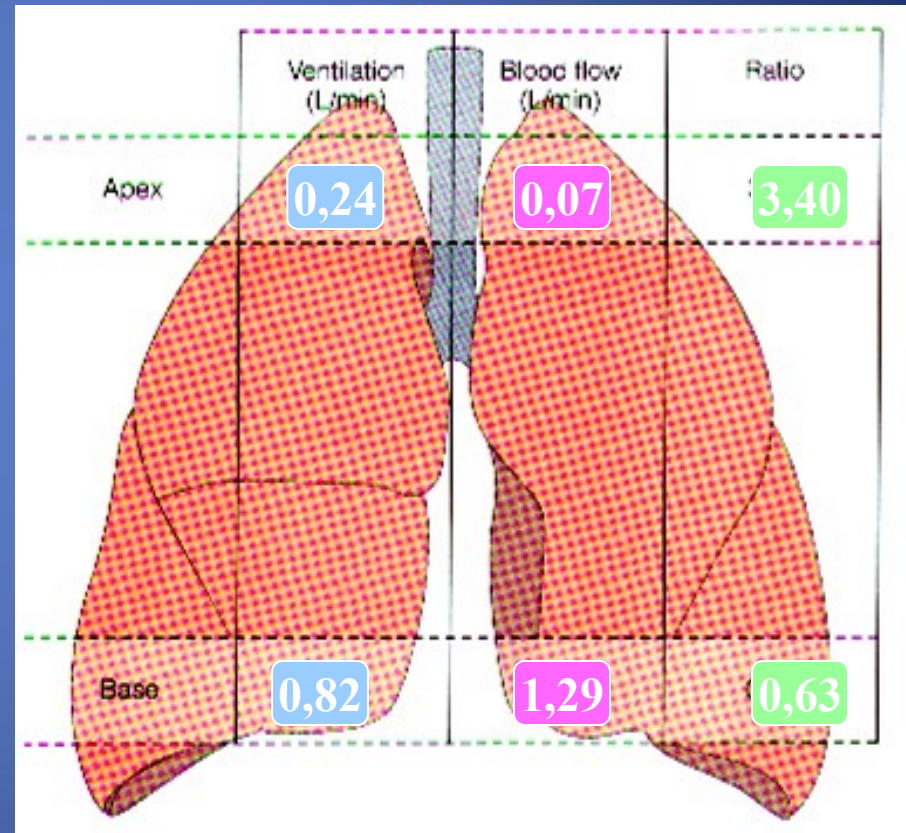
2. lymfatická tkáň – *bariéra proti infekci*
3. *teplota vdechovaného vzduchu + zvlhčení*
4. *hlasové vazy – tvorba hlasu*

# Plicní ventilace a průtok krve v různých částech plic

## Vzpřímená poloha

v **bázi plic** je větší ventilace a průtok krve než v **hrotech**

- **ventilace** ( $\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$ ) = výměna vzduchu v plicních sklípcích
- **perfúze** ( $\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$ ) = průtok krve plicemi
- **poměr ventilace/perfúze**  
(V horních oblastech plic je poměr vysoký = „zbytečná“ ventilace sklípků se sníženým průtokem krve. V dolních partiích plic jsou naopak „méně“ ventilovány jinak dobře prokrveny plicní sklípky)



# Průtok krve plícemi -perfúze

- **Plicní oběh** =  
**nízkotlaká část cirkulace**
- pravá srdeční komora - plicnice (plicní tepna) – plicní kapiláry – plicní žíly – levá srdeční síň
- **význam**: přesun dýchacích plynů
- **Bronchiální cirkulace**
- levá srdeční komora - aorta – bronchiální tepny – kapiláry – bronchiální žíly –horní dutá žíla – pravá srdeční síň
- **význam**: výživa bronchů a poplicnice



# Mrtvý prostor

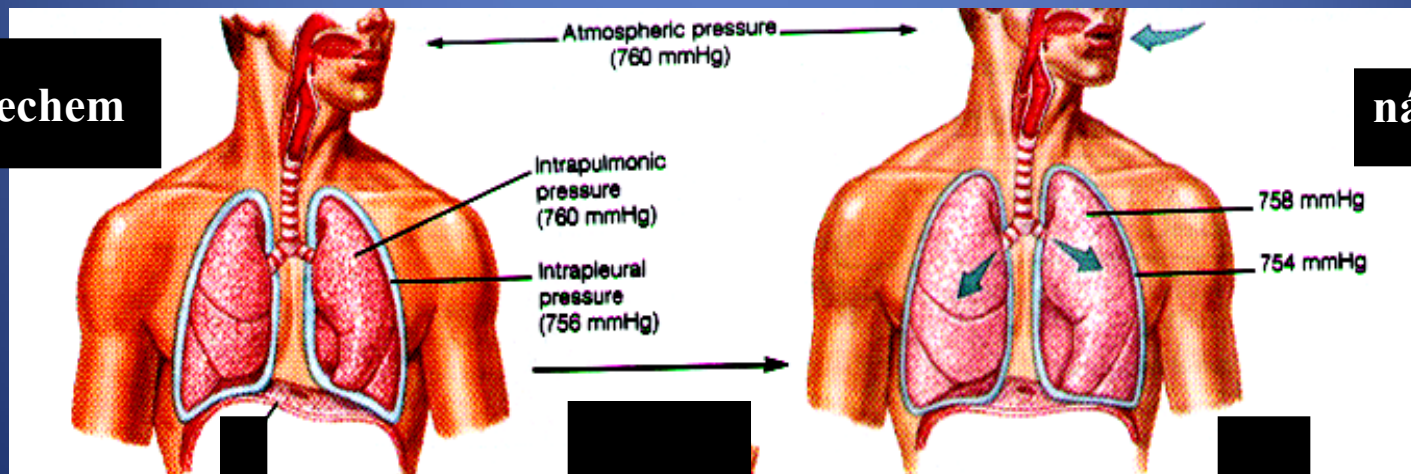
= část respiračního systému, kde nedochází k výměně dýchacích plynů

- Anatomický mrtvý prostor = objem respiračního systému mimo alveoly (u dospělého je 150-200 ml)
- Celkový (fyziologický) mrtvý prostor = objem vzduchu z té části dýchacího systému, kde nedochází k výměně plynů s krví, neúčinná ventilace



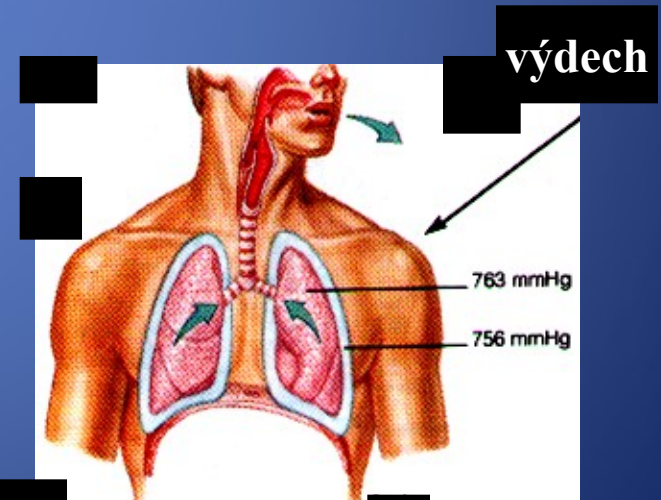
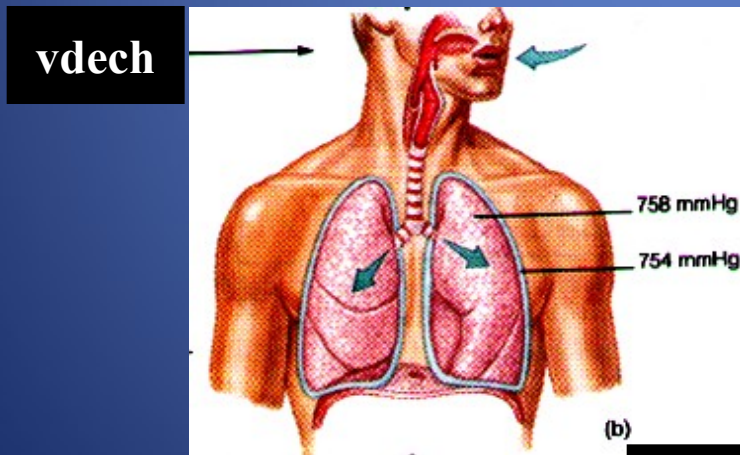
# Vdech - inspirium

- *děj aktivní - kontrakce inspiračních svalů*
- *intrapulmonální tlak klesá*
- *interpleurální tlak klesá (z -2,5 na -6 torrů)*
- *vzduch do plic (tlak v dýchacích cestách je negativní)*

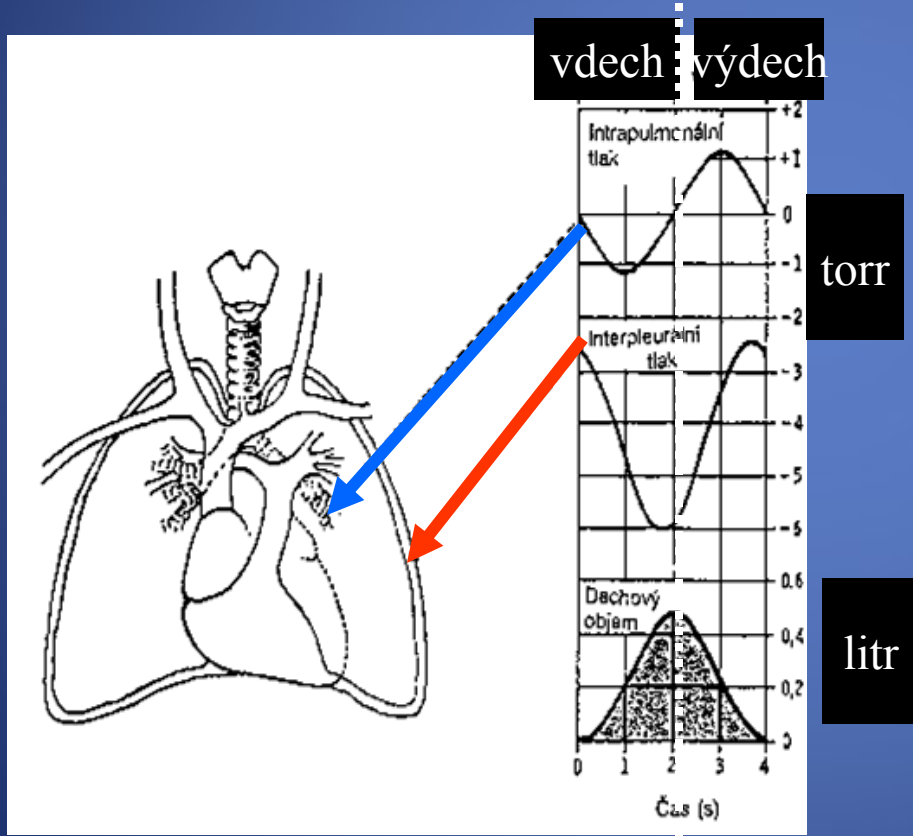


# Výdech - exspirium

- po konci vdechu elasticita plic táhne hrudní stěnu zpět do výdechové polohy – *pasivní výdech*
- **tlak v dýchacích cestách se zvýší** – vzduch proudí z plic
- při *usilovném výdechu (aktivní zapojení dýchacích svalů)* – *interpleurální tlak se zvýší na  $-30$  torrů*



# Změny tlaků při klidném dýchání



- **intrapulmonální tlak**
- **interpleurální tlak**
- **dechový objem**

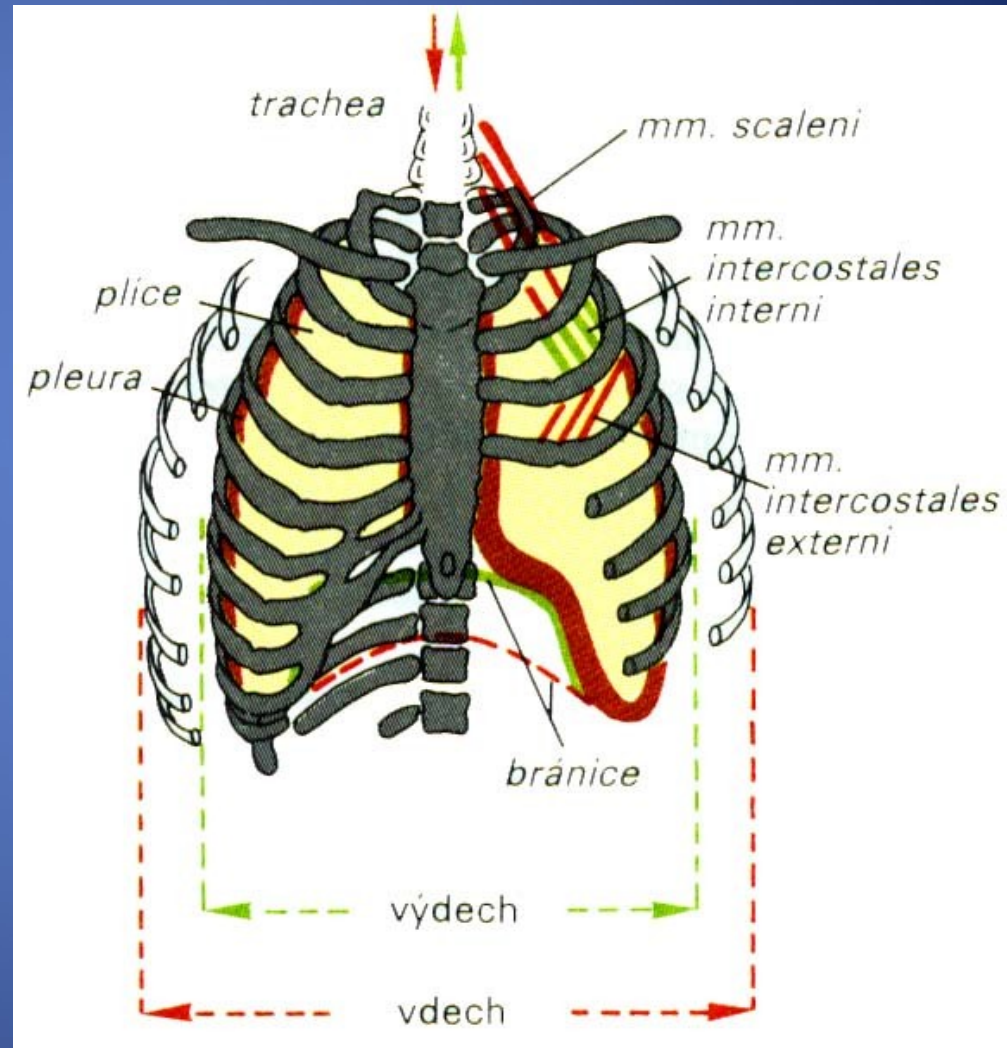
# Inspirační a expirační svaly

## ■ Inspirační svaly:

- *bránice*
- *mm.intercostales ext.*
- *mm.intercostales paraster.*
- *mm.scaleni*
- *mm.pectorales*
- *m.sternocleidiomast.*

## ■ Expirační svaly:

- *mm.intercostales int.*
- *břišní lis*



# Poddajnost plic a hrudníku

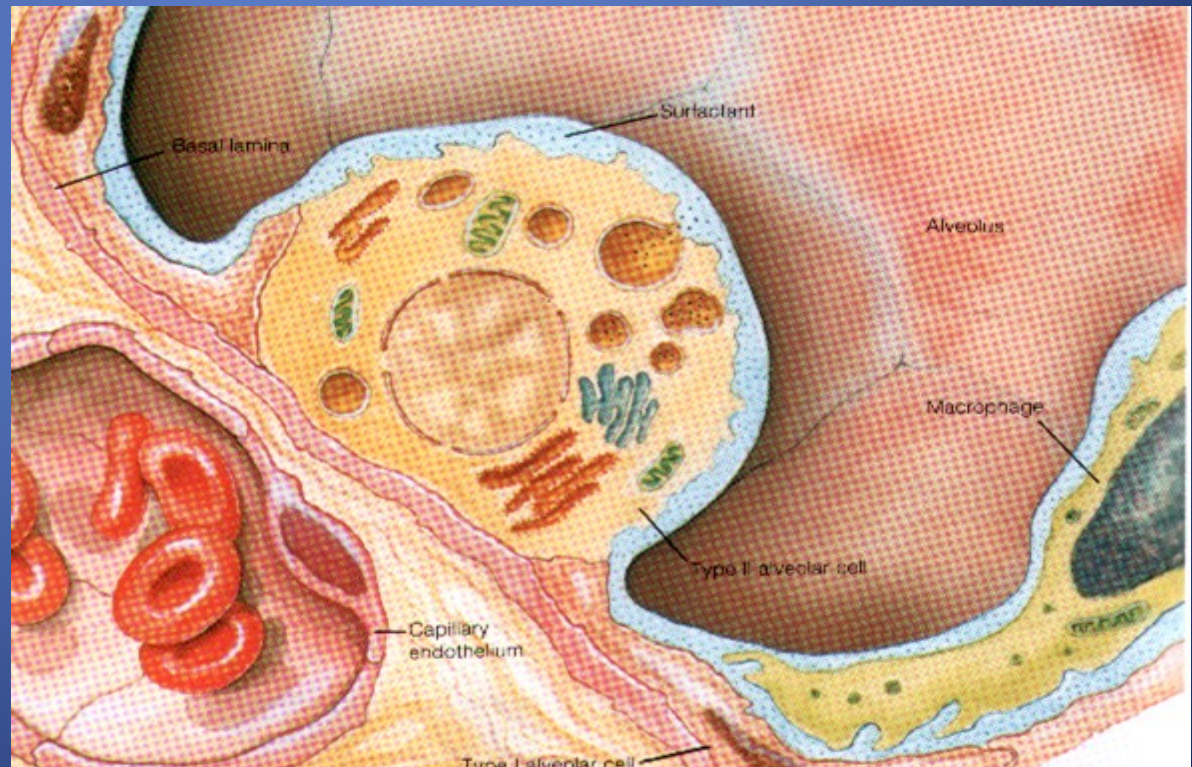
- změny objemu plic *závisí na průtoku vzduchu z a do plic* (otázka tlakových gradientů mezi plícemi a okolní atmosférou)
- změny tlakových gradientů jsou vyvolány *změnami napětí inspiračních a exspiračních svalů*
- vztah mezi silami dýchacích svalů a objemovými změnami plic závisí na **poddajnosti plic a hrudníku a na odporu plic**
- elasticita plic určuje hodnotu plicní poddajnosti = *compliance*
- ta závisí na objemu plic (nejvyšší při FRC)

# ELASTICKÉ VLASTNOSTI PLIC

## Faktory ovlivňující elastické vlastnosti plic:

stavba plic: přítomnost elastických vláken

povrchové napětí alveolu: **SURFAKTANT**- snižuje povrchové napětí



# Dechový cyklus z pohledu compliance

## 1. Nádech:

- ✓ rozpínání hrudníku  
→ vytváří se „prostor“ pro rozpínající se plíce
- ✓ interpleurální tlak ↓
- ✓ alveolární tlak ↓  
= *vzduch do plic*
- ✓ objem plic a retrakční síla ↑
- ✓ hodnota tlaku v alveolech = hodnotě atmosférického tlaku  
= *ukončení nádechu*

## 2. Výdech:

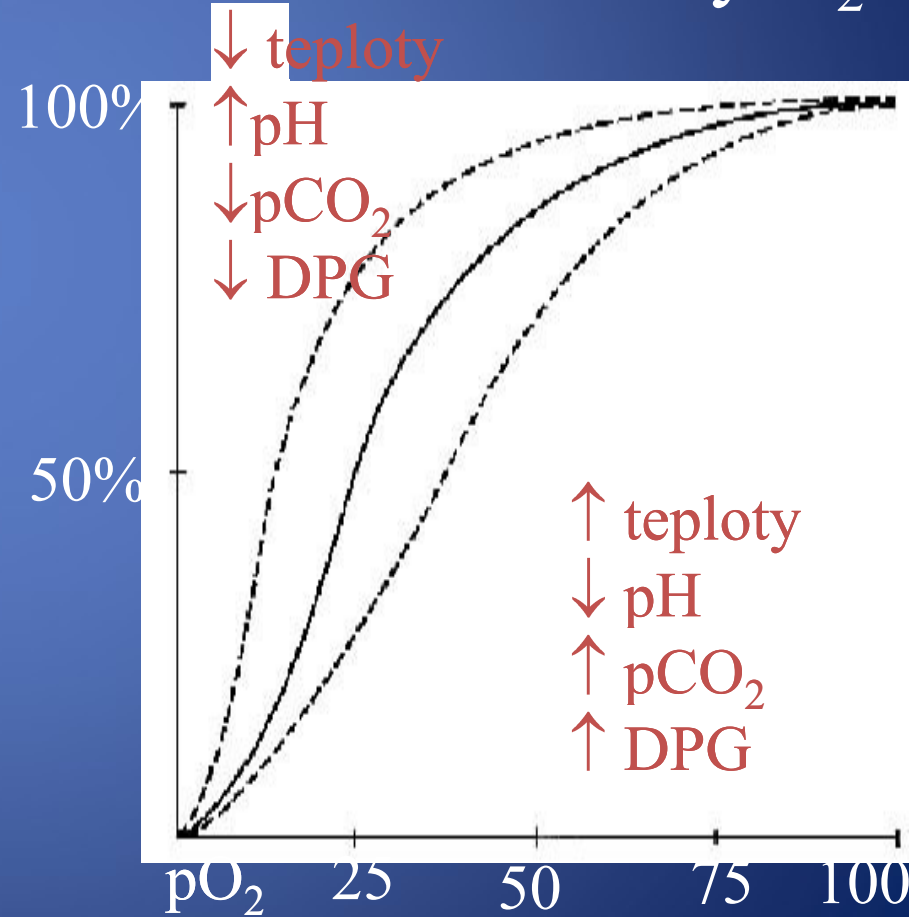
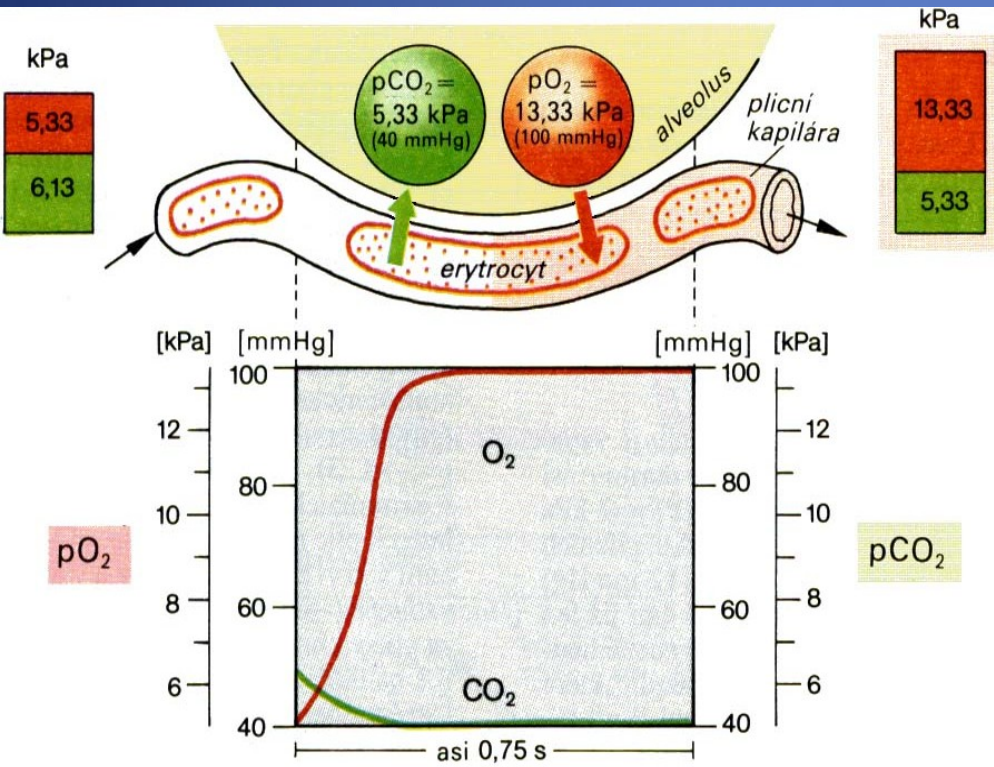
- ✓ napětí inspiračních svalů ↓
- ✓ hrudník se zmenšuje
- ✓ interpleurální a alveolární tlak ↑  
= *vzduch z plic*
- ✓ retrakční síla plic ↓
- ✓ rovnováha mezi retrakční silou plic a napětím hrudní stěny  
= *konec výdechu*



# TRANSPORT O<sub>2</sub>

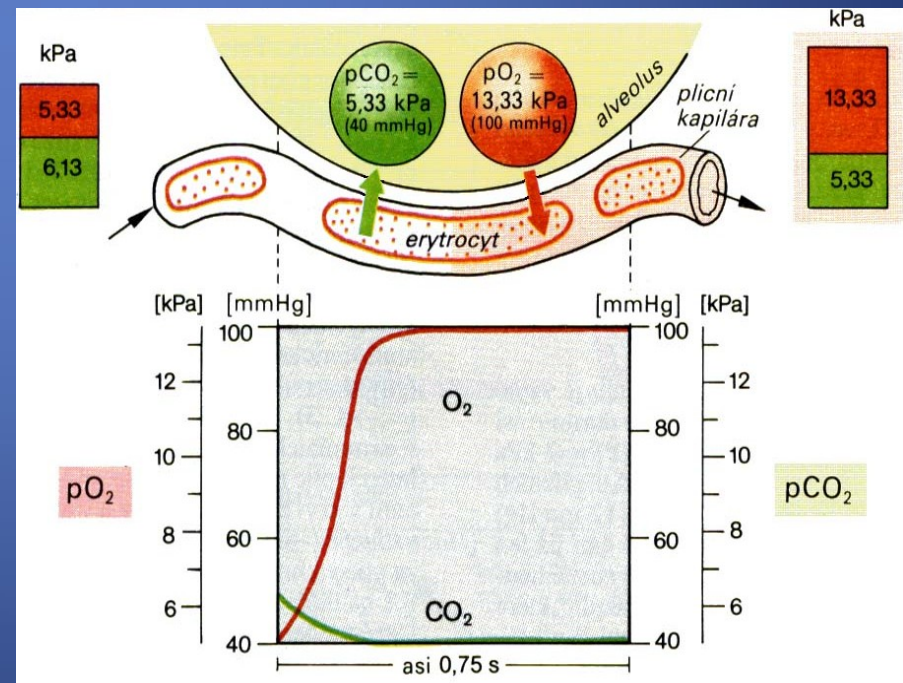
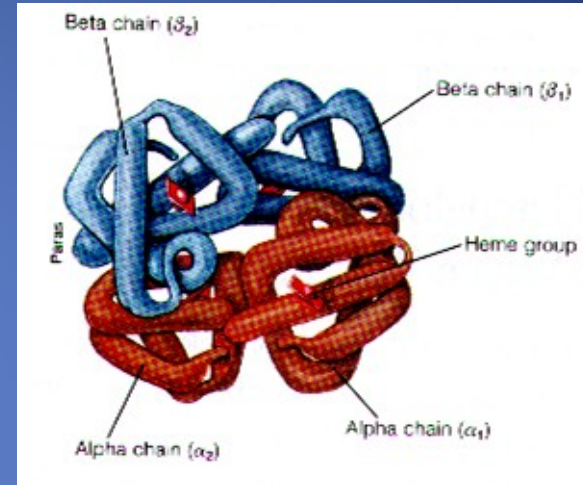
rozpuštěný v plazmě  
vazba na hemoglobin (Fe<sup>2+</sup>)

1 molekula hemoglobinu váže 4 molekuly O<sub>2</sub>



# Transport O<sub>2</sub> krví

- **Hemoglobin (Hb)** = červené krevní barvivo
- Fe<sup>2+</sup> - každé ze 4 atomů železa váže 1 molekulu O<sub>2</sub>  
(= *oxygenace* – železo zůstává dvojmocné = Fe<sup>2+</sup>)
- *oxyhemoglobin* (Hb<sub>4</sub>O<sub>8</sub>) – Hb s navázaným O<sub>2</sub>
- *deoxygenace* (redukovaný Hb) – hemoglobin bez kyslíku
- 1 g Hb obsahuje 1,39 ml O<sub>2</sub>
- v krvi: 160 g.l<sup>-1</sup> u mužů (140 g.l<sup>-1</sup> u žen) Hb



# Transport CO<sub>2</sub> krví

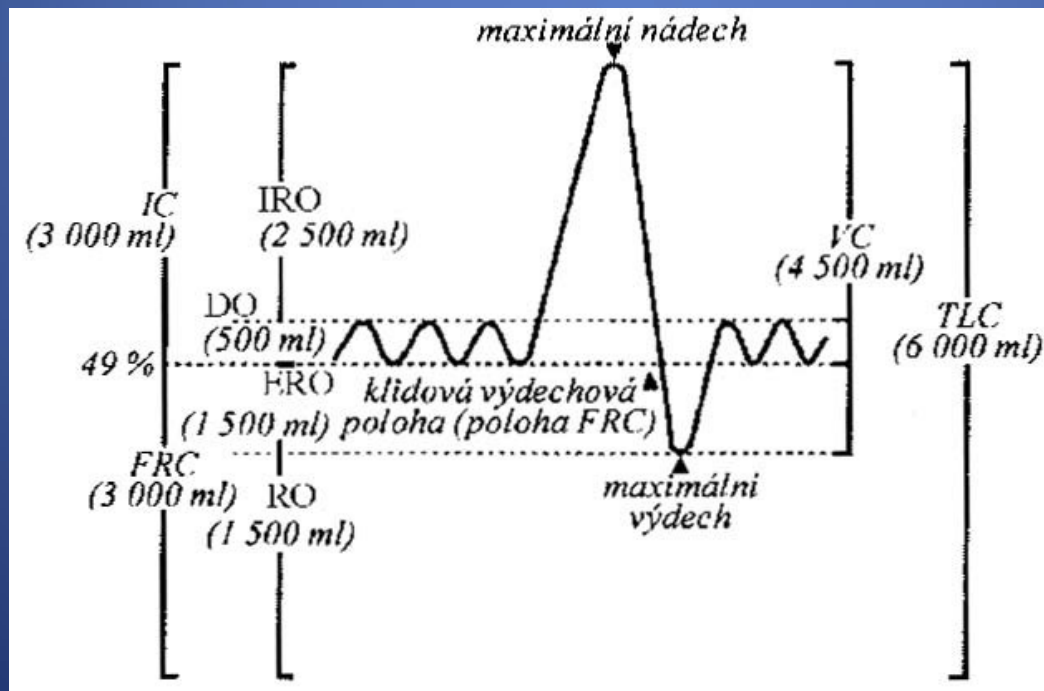
1. fyzikálně rozpuštěný (malý podíl) – 12%
2. navázaný na bílkoviny (karbaminohemoglobin) 11%
3. HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>
  - ✓  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{CO}_3 \rightleftharpoons \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$
  - ✓ tato reakce je v plasmě pomalá
  - ✓ je 10 000krát rychlejší v erythrocytech – 27%
  - ✓ membrána erythrocytů je pro HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> propustná
    - ➡ HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> do plasmy – 50%
  - ✓ za HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> do erythrocytů Cl<sup>-</sup> (= chloridový posun)
    - ➡ erythrocyty „nasávají“ vodu (zvětšují svůj objem)

## Statické plicní objemy:

- dechový objem **DO** (0,5 l)
- inspirační rezervní objem **IRO** (2,5 l)
- expirační rezervní objem **ERO** (1,5 l)
- reziduální objem **RO** (1,5 l)

## Statické plicní kapacity:

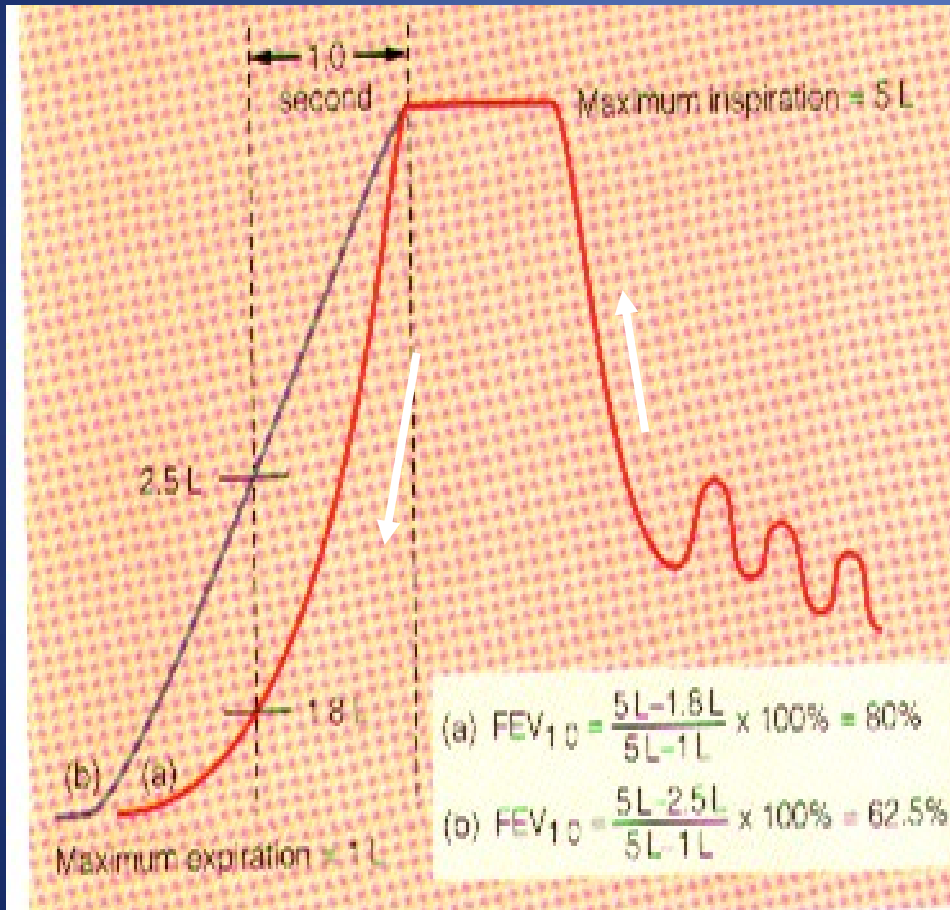
- vitální kapacita plic **VC** (4,5 l) = IRO+DO+ERO
- celková kapacita plic **TC** (6 l) = IRO+DO+ERO+RO
- inspirační kapacita **IC** (3 l) = IRO+DO
- funkční reziduální kapacita **FRC** (3 l) = ERO+RO



# Dynamické plicní parametry

- dechová frekvence :  $f$
- minutová ventilace plic :  $\dot{V}$  ( v klidu 8 l za min)
- maximální minutová ventilace :  $MV\dot{V}$   
= maximální množství vzduchu, které může být v plicích vyměněno (z plic vydýcháno) za minutu – až  $170 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$
- jednosekundová vitální kapacita :  $FEV_1$   
= množství vzduchu vydechnuté za 1 sekundu

# Jednosekundová (jednovteřinová) vitální kapacita plic



= po maximálním nádechu (↑)  
maximální výdech (↓)

FEV 1 = za první sekundu

FEV 2 = za první dvě sekundy

FEV 3 = za první tři sekundy

— u zdravého jedince

— u nemocného s astmatem

**FEV 1 = 80% FVC**

**FEV 2 = 90-95 % FVC**

**FEV 3 = 99 % FVC**

# Řízení dýchání

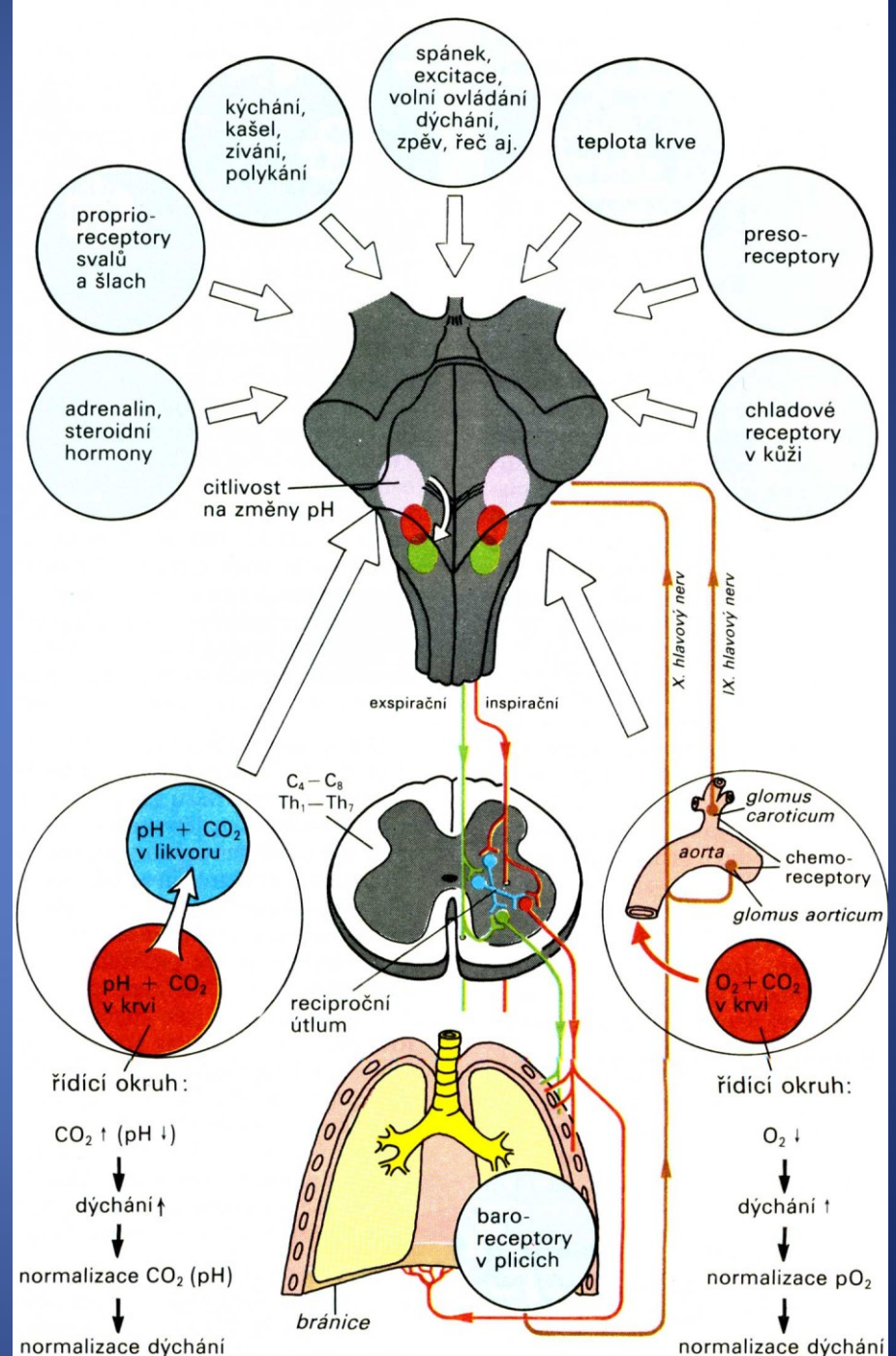
- CNS

- dýchací svaly inervovány vlákny C4-C8 a Th1 –Th7

- dýchací centrum v medulla oblongata

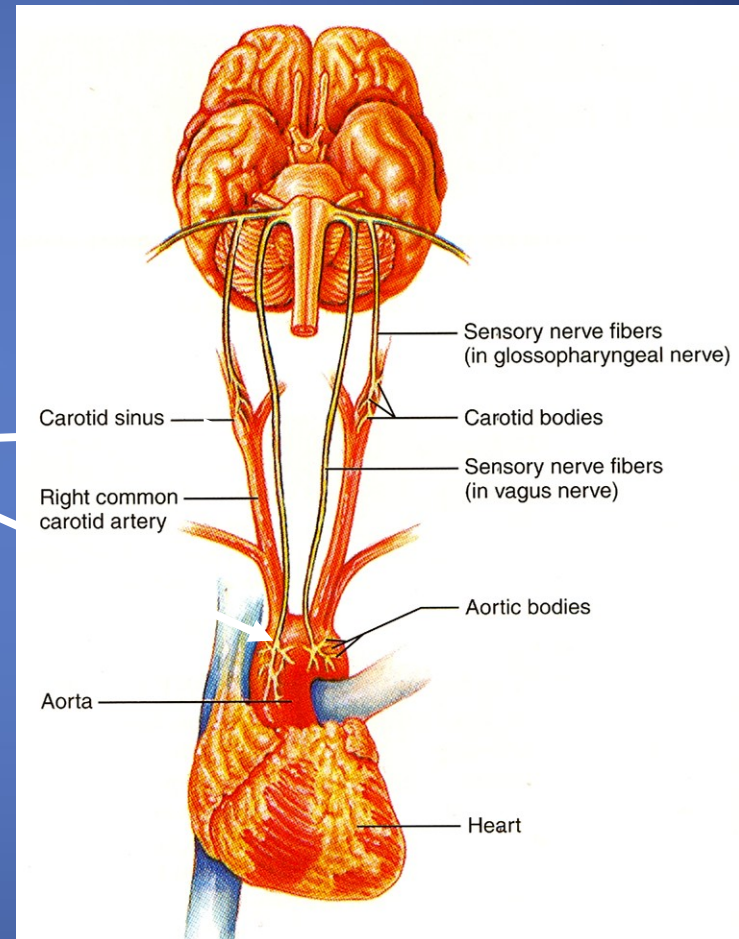
Stimulace dýchání :

Chemoreceptory ( g.aorticum a caroticum)



# Chemické řízení dýchání

- $\uparrow$   $p\text{CO}_2$  nebo  $\uparrow$  pH nebo  $\downarrow$   $p\text{O}_2$  = zvýšená aktivita inspiračních neuronů
- karotická a aortální tělíska (periferní chemoreceptory)
- centrální chemoreceptory (buňky v prodloužené míše – jsou blízko respiračního centra)



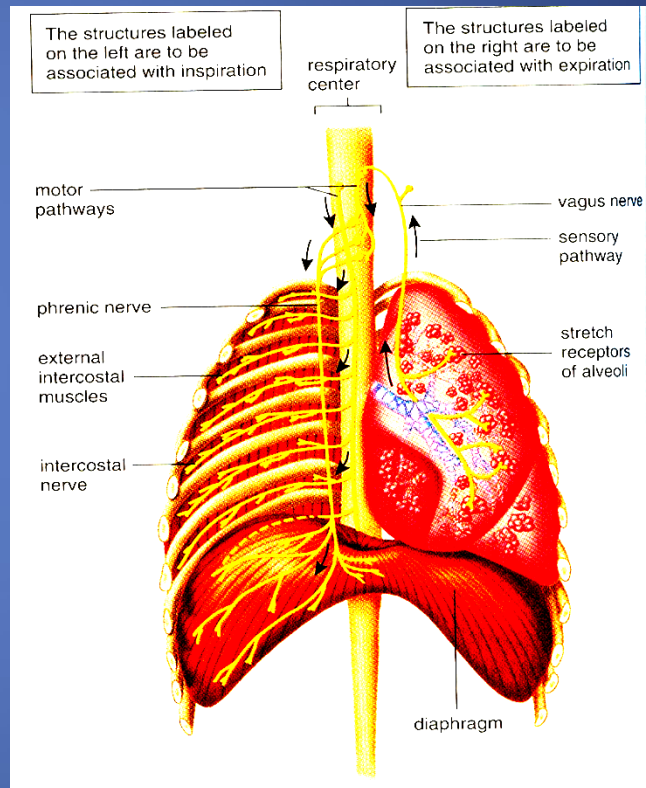


# Regulace dýchání

## Dýchání je automatické

### Regulace dýchání:

- nervové řízení
  1. motorickými nervy řízení dýchacích svalů
  2. autonomní (vegetativní) řízení dýchání
- chemické řízení
- reflexní mechanismy
- suprapontinní mechanismy



- **Reaktivní změny** – bezprostřední reakce organismu
- **Adaptační změny**- výsledek dlouhodobého opakovaného tréninku

# Dechová frekvence (DF)

- zvyšování v průběhu práce je individuální, u žen bývá vyšší
- lehká práce 20-30/min, těžká 30-40/min, velmi těžká 40-60/min
- u zátěže cyklického charakteru může být vázána na pohyb
- $\uparrow$ DF může vést ke  $\downarrow$ DO a tím i minutové ventilace  
 $\rightarrow \downarrow$ alveolární ventilace  $\rightarrow \uparrow$ fyzilogického (funkčního) mrtvého prostoru

# Dechový objem (DO)

- v klidu asi 0.5 l, střední výkon asi 1-2 l (30%VC), těžká práce asi 2-3 l (50%VC, u trénovaných až 60-70%VC)

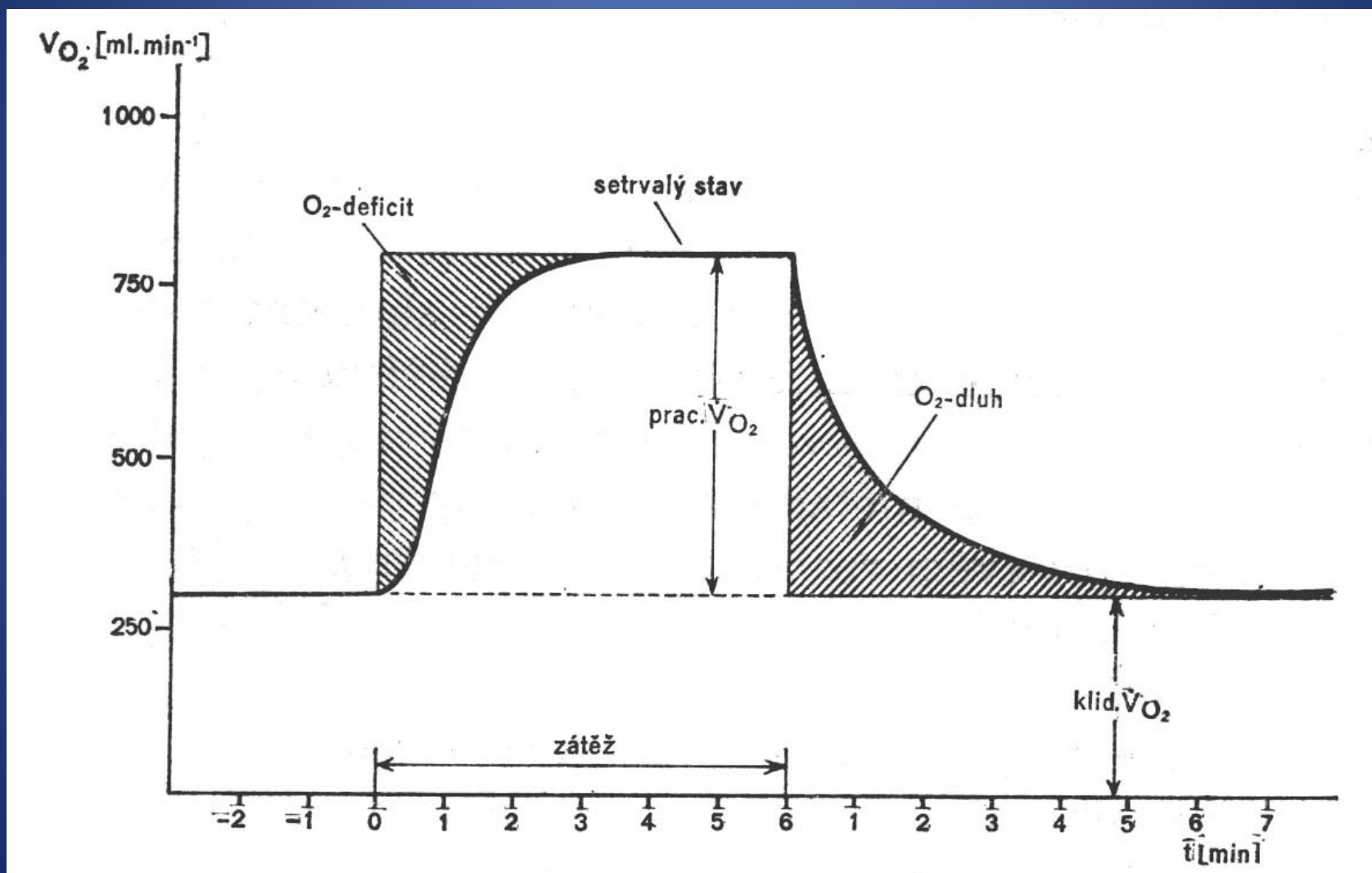
# Vitální kapacita (VC)

- je statický parametr, ovlivnitelný předchozí zátěží: při mírné (rozdýchání) se může ↑, při střední se nemění, při vysoké pro únavu dýchacích svalů může i klesnout na 60% výchozí hodnoty

# Minutová ventilace (MV)

- závisí na  $pO_2$  a  $pCO_2$
- minutová ventilace po skončení práce klesá nejdříve rychle, pak pozvolněji

# Pozátěžový kyslík, kyslíkový dluh



- **Kyslíkový dluh**

- nedostatečné zásobení pracujících svalů kyslíkem (pomalejší  $\uparrow$  SF a DF).
- nepoměr mezi požadavky na  $O_2$  a jeho dodávkou vede k zapojení anaerobních mechanismů - vznik LAKTÁTU (  $\uparrow$   $H^+$  metabolické acidóza – **mrtvý bod**).
- při zajištění dodávky  $O_2$  – **druhý dech**
- po ukončení zátěže přetrvává zvýšený příjem  $O_2$  = splácení **kyslíkového dluhu**



## splácení kyslíkového dluhu

- obnova ATP a CP

- odstraňování laktátu (oxidace na pyruvát – ve svalech, srdci; resyntéza na glykogen – játra)

  - urychlení vyplavení laktátu ze svalů a lepší prokrvení orgánu metabolizujících laktát

mírnou intenzitou zatížení (50 %  $VO_2$ max)

- obnova myoglobinu a hemoglobinu

- velká část do několika minut (do 30 minut), mírný přetrvává až 12-24 hodin

# Maximální minutová ventilace (MMV)

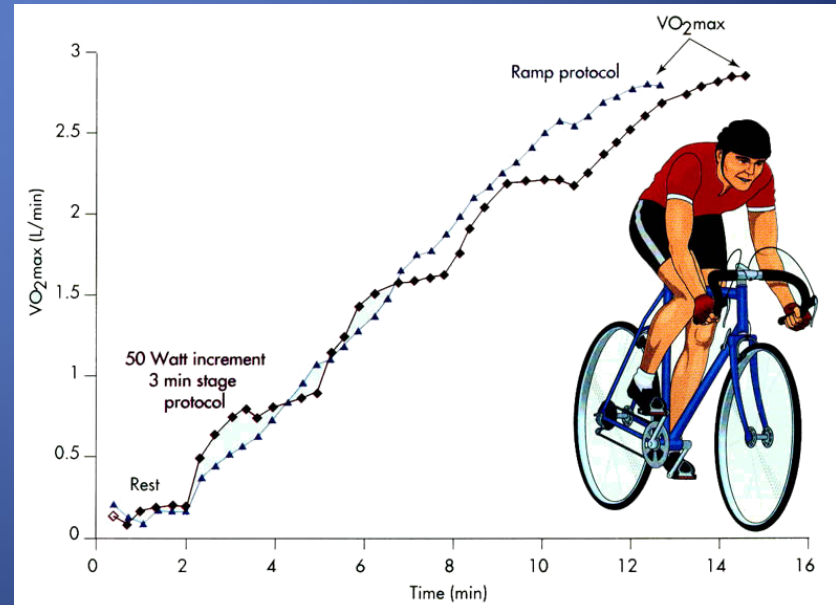
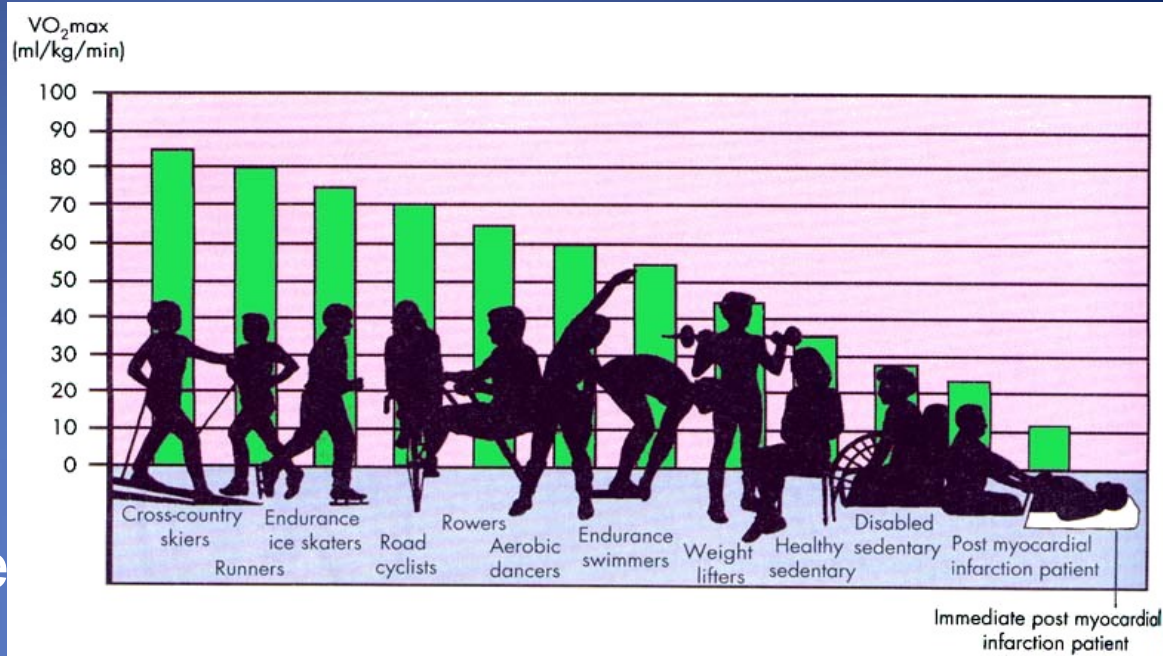
- volní:
  - měřena v klidových podmínkách;
  - muži asi 100-150 l/min,
  - ženy 80-100 l/min
- pracovní:
  - je ↓, asi 80 % volní MMV

# Maximální spotřeba kyslíku

= max. aerobní výkon  
nejvyšší v 18 letech:  
muži 46,5 ml/kg/min  
ženy 37 ml/kg/min

- postupně klesá s věkem

závisí na: ventilaci,  
alveolokapilární difúzi,  
transportu oběhovým  
systémem, tkáňové difúzi,  
buněčné oxidaci



Druh športu	W max (W.kg <sup>-1</sup> )	W 170 (W.kg <sup>-1</sup> )	VO <sub>2</sub> max (ml.min <sup>-1</sup> .kg <sup>-1</sup> )
<b>MUŽI</b>			
Lyžovanie-beh	6,4	4,8	
Orientačný beh	6,1	4,6	
Cyklistika cestná	5,7	4,5	
Cyklistika dráhová	5,4	4,2	
Plávanie	4,8	3,7	
Tenis	4,8	3,8	
Futbal	4,5	3,8	
Basketbal	4,2	3,8	
Veslovanie	4,6	3,2	
Lyžovanie-zjazd	4,8	3,1	
Šerm	4,5	3,4	
Hádzaná	4,3	3,4	
Volejbal	4,4	3,2	
<b>ŽENY</b>			
Lyžovanie-beh	5,1	3,7	
Lyžovanie-zjazd	4,3	2,5	
Tenis	4,3	3,0	
Hádzaná	4,2	3,3	
Basketbal	4,0	3,8	
Veslovanie	3,9	2,5	
Šerm	3,7	2,6	
Gymnastika	3,3	2,1	
Volejbal	3,6	2,6	

(Seliger & Bartůněk, 1978)

## Limitující faktory $\text{VO}_2\text{max}$

- 1) Dýchací systém - není limitujícím faktorem
- 2) Svalový systém - je limitujícím faktorem
- 3) Kardiovaskulární systém - je rozhodujícím faktorem

## AP (aerobní práh)

- maximální intenzita při které přestává „výhradní“ aerobní krytí
- intenzita od které se začíná zapojovat anaerobní krytí a tak vzniká laktát
- hladina laktátu (2 mmol/l krve)

**VO<sub>2</sub>max**  
**[ml/kg/min]**

45

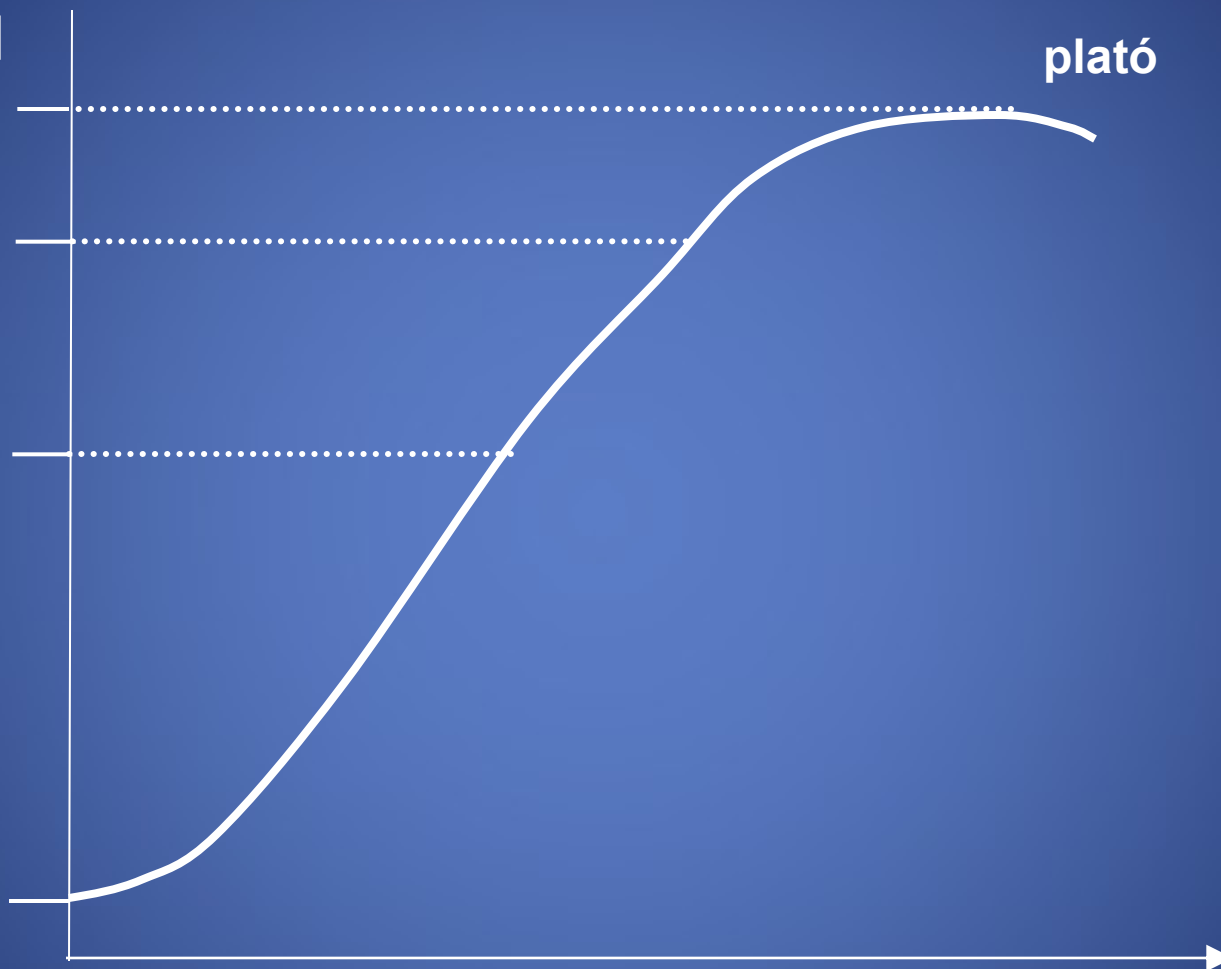
**AnP**  
**70-90 %**  
**VO<sub>2</sub>max**

**AP**  
**50-60 %**  
**VO<sub>2</sub>max**

3,5

plató

**Intenzita zatížení (rychlost běhu,...)**



## AnP (anaerobní práh)

- maximální intenzita při které začíná převládat anaerobní krytí
- intenzita při které dochází k narušení dynamické rovnováhy mezi tvorbou a metabolizací laktátu
- hladina laktátu (4 mmol/l krve) a začíná se zvyšovat. Kolem 8 mmol/l krve nemožnost pokračovat (trénování až 30 mmol).



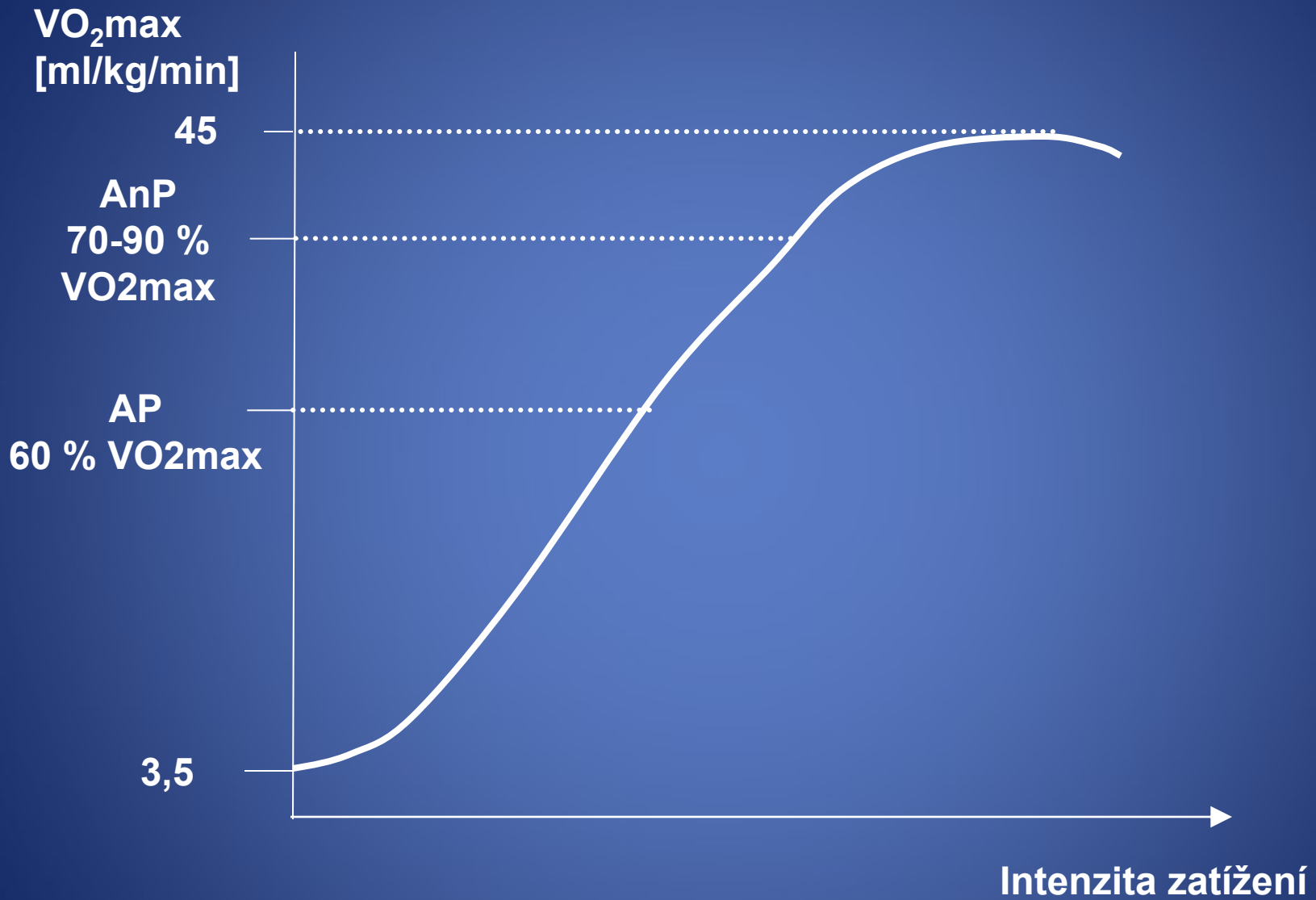
## AnP (anaerobní práh)

- může být odhadnut z  $VO_2\text{max}$ :

$$\text{AnP} = VO_2\text{max}/3,5 + 60$$

$$\text{AnP} = 35/3,5 + 60$$

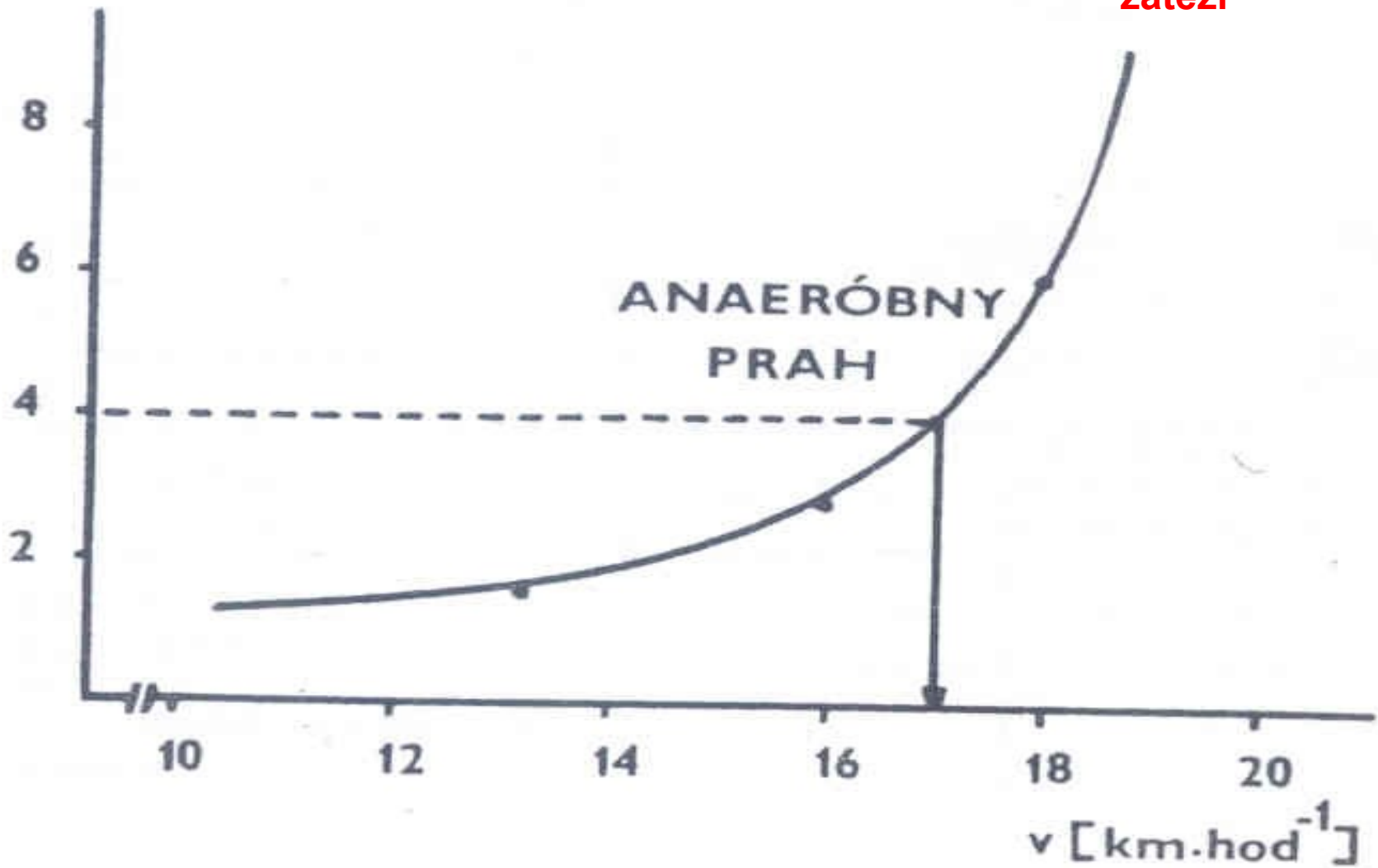
$$\text{AnP} = 70 \%VO_2\text{max}$$





LAKTÁT  
[mmol.l<sup>-1</sup>]

Zakyselení organismu a  
nemožnost pokračovat dále v  
zátěži



# Změny reaktivní

- fáze úvodní = ↑ DF a ventilace před výkonem

mechanismus: emoce (více u osob netrénovaných)  
a podmíněné reflexy (převládají u trénovaných osob)

startovní a předstartovní stavy

# Změny reaktivní

-fáze průvodní= při vlastním výkonu roste DF a ventilace nejdřív rychle (fáze iniciální),  
→ zpomalení, → při déletrvající zátěži (více než 40-60s) se může projevit mrtvý bod

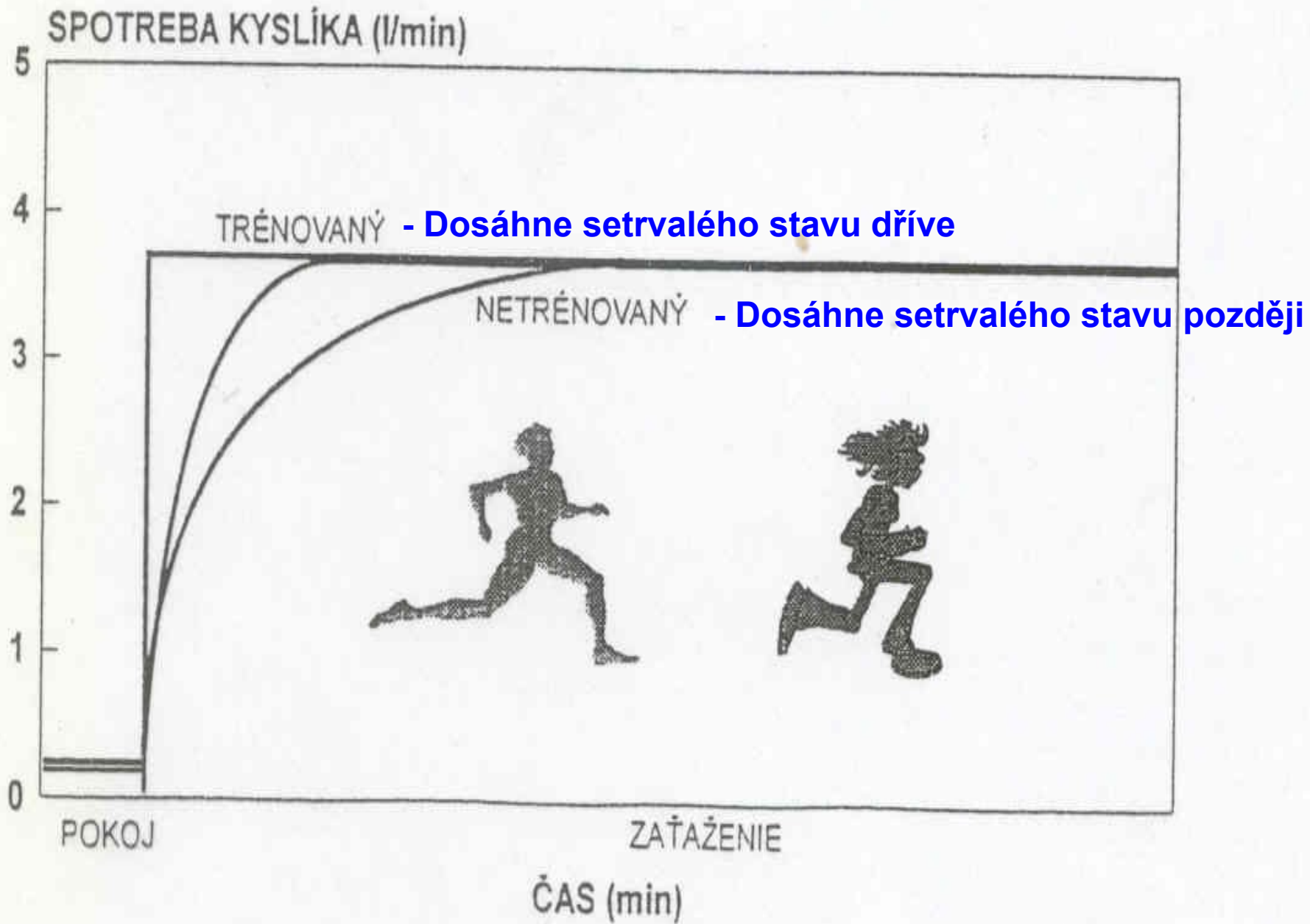
# mrtvý bod

- subjektivní příznaky = nouze o dech, svalová slabost, bolesti ve svalech, tíha a tuhnutí svalů
- objektivní příznaky = pokles výkonu,  
↓ koordinace, narušená ekonomika dýchání,  
tzn. ↓ DO a ventilace, ale ↑ DF,  
↑ TF, ↑ TK;
- příčina = nedostatečná sladěnost systémů při přechodu neoxidativního metabolismu na oxidativní

# druhý dech

- jestliže se pokračuje dále, pak příznaky mrtvého bodu mizí, → druhý dech, tzn. ↑DO, ↓DF, ↓TF, ↓TK
- rovnovážný stav po 2-3 min méně intenzivní a po 5-6 min intenzivnější práce





# Změny reaktivní

-fáze následná = návrat ventilačních parametrů k výchozím hodnotám, zpočátku rychleji, postupně pomalejší

- Pozátěžový kyslík (kyslíkový dluh)

# Změny adaptační

- lepší mechanika dýchání
- lepší plicní difúzi
- ↓ DF
- ↑ max. DO (3-5 l)
- ↑ VC ♂ 5-8 l, ♀ 3.5-4.5 l
- ↓ minutovou ventilaci při standardním zatížení, vyšší max. hodnotu ♂ 150-200 l, ♀ 100-130 l
- rychlejší nástup setrvalého stavu
- minimální až nulové projevy mrtvého bodu

# HYPOXIE

**Hypoxická hypoxie** - nízký arteriálního pO<sub>2</sub>

**Anemická hypoxie** - normální arteriální pO<sub>2</sub>, nízký přenášejícího hemoglobinu

**Stagnační / ischemická hypoxie** - nízký průtoku, není dodáváno dostatečné množství O<sub>2</sub>

**Histotoxická hypoxie** - dodávka O<sub>2</sub> přiměřená, zábrana využití O<sub>2</sub> buňkami

# HYPERKAPNIE - $\uparrow$ CO<sub>2</sub>

Deprese CNS - zmatenost, poruchy smyslové ostrosti, nakonec koma s útlumem dýchání a smrt

# HYPOKAPNIE - $\downarrow$ CO<sub>2</sub>

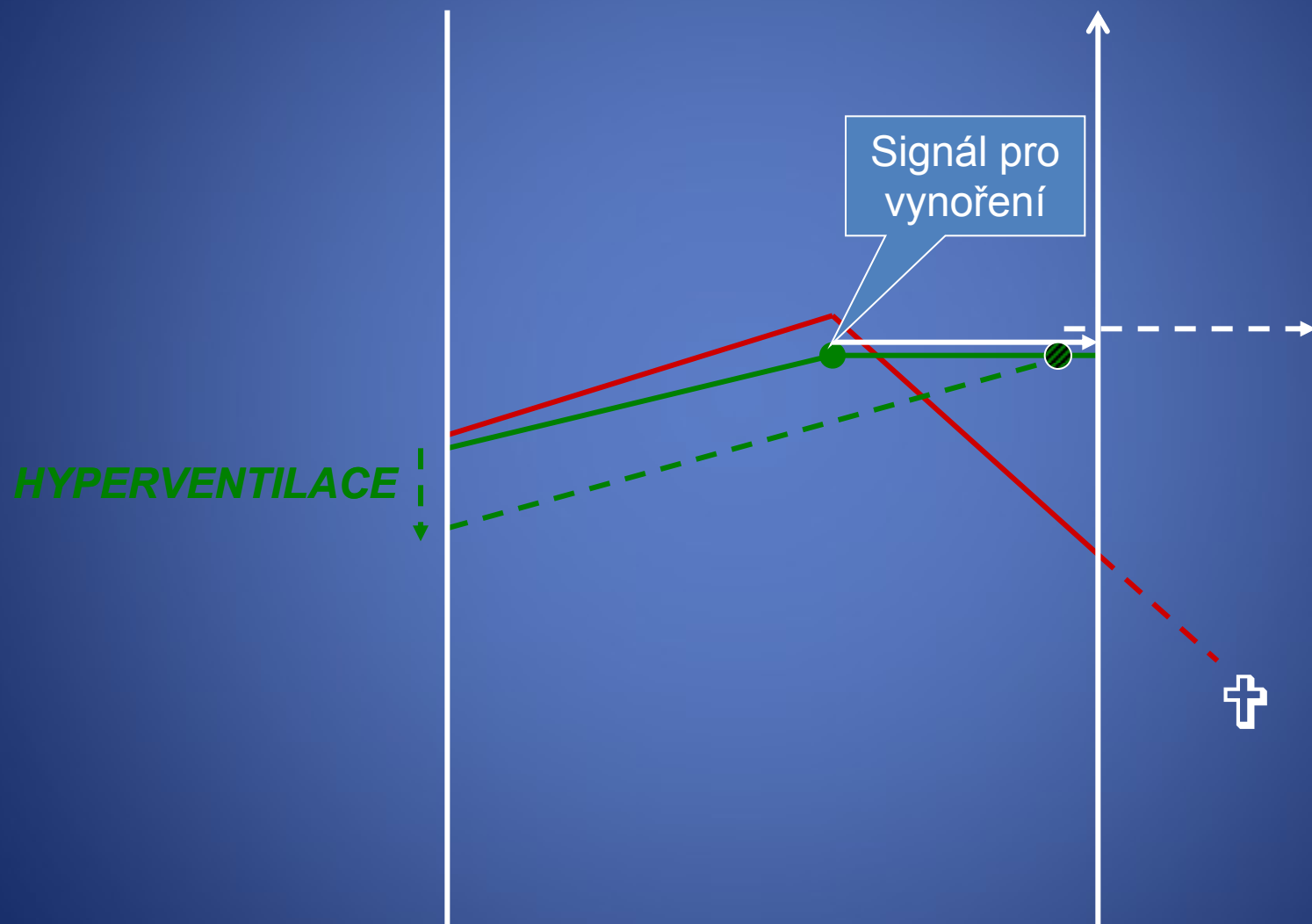
Hypoxie mozku díky vazokonstrikci cév - ztráta orientace, závratě, parestézie

# $\uparrow$ BAROMETRICKÉHO TLAKU

Přetlak 100% kyslíku - dráždění dýchacích cest, svalové záškuby, zvonění v uších, závratě, křeče a koma

Přetlak s N: dusíková narkóza - euforie, snížená výkonnost a intelekt

Přetlak s He: neurotický syndrom - třesy, netečnost, porušení manuální zručnosti, intelekt není porušen



# A. Dýchání ve výšce (bez aklimatizace)

