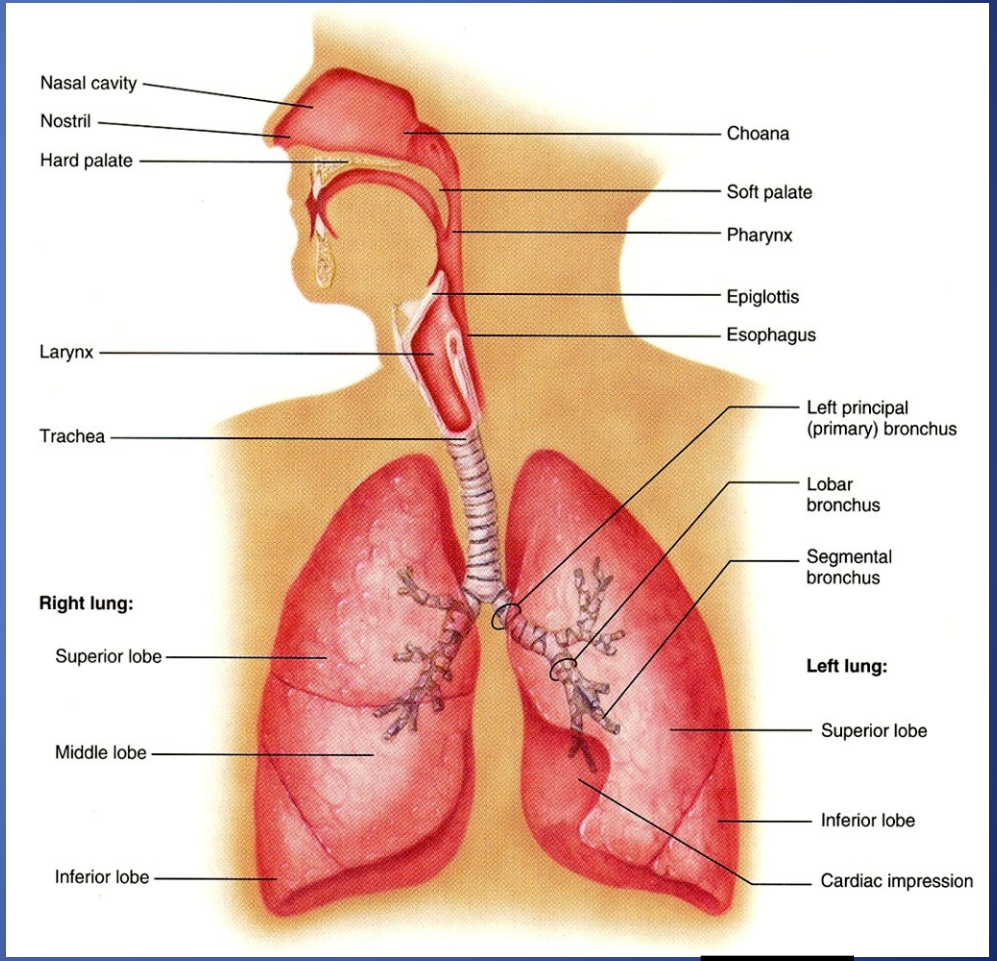
Fyziologie dýchacího systému

MUDr. Kateřina Kapounková

Anatomie dýchacího systému

Dýchací cesty

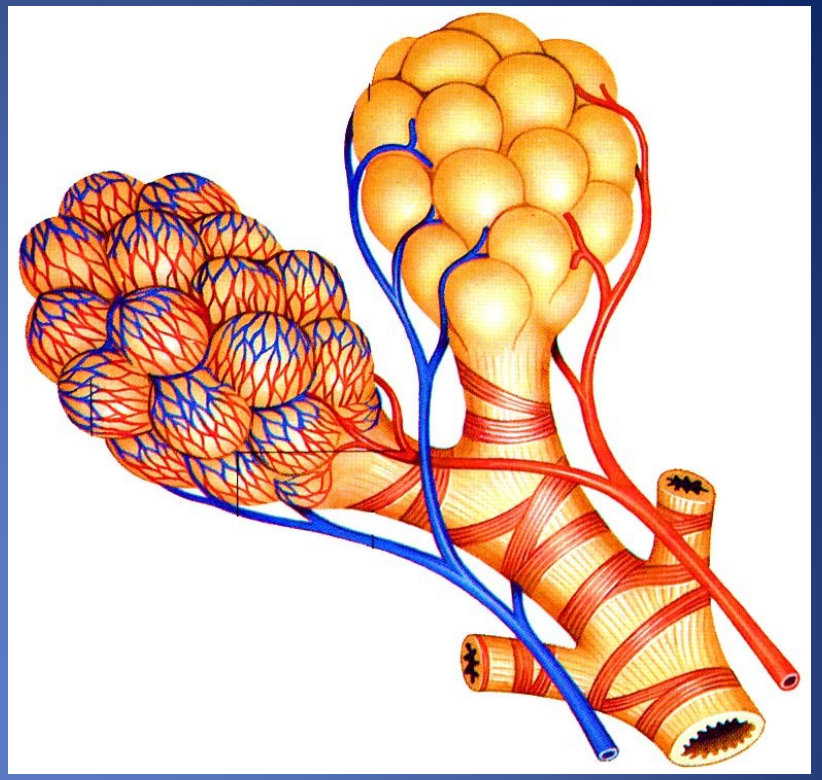
- dutina nosní
- (event.dutina ústní)
- hltan
- hrtan
- trachea
- bronchy
- respirační bronchioly
- alveoly (plicní sklípky)

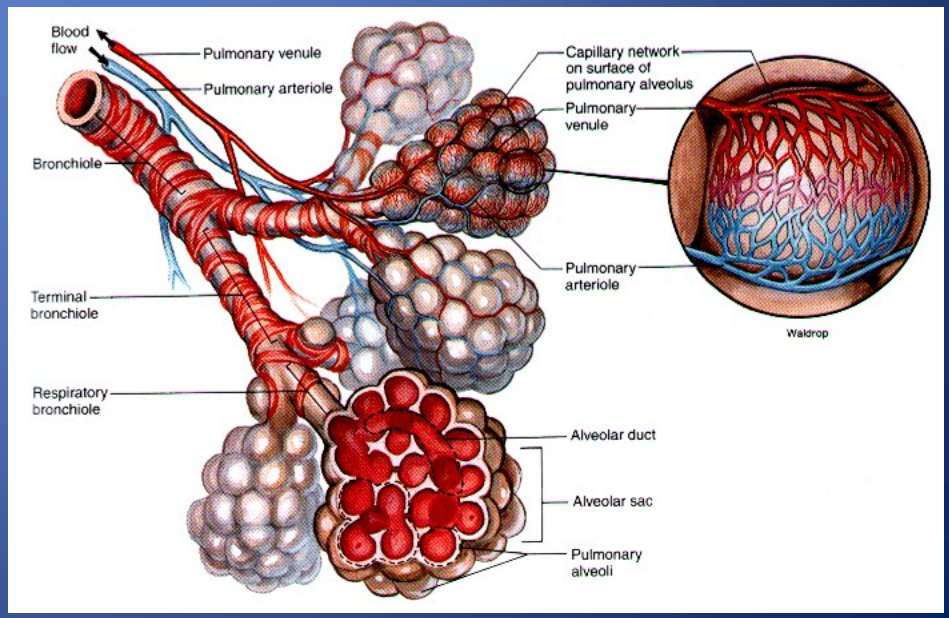


Obr. č.2

Plicní sklípky alveoly

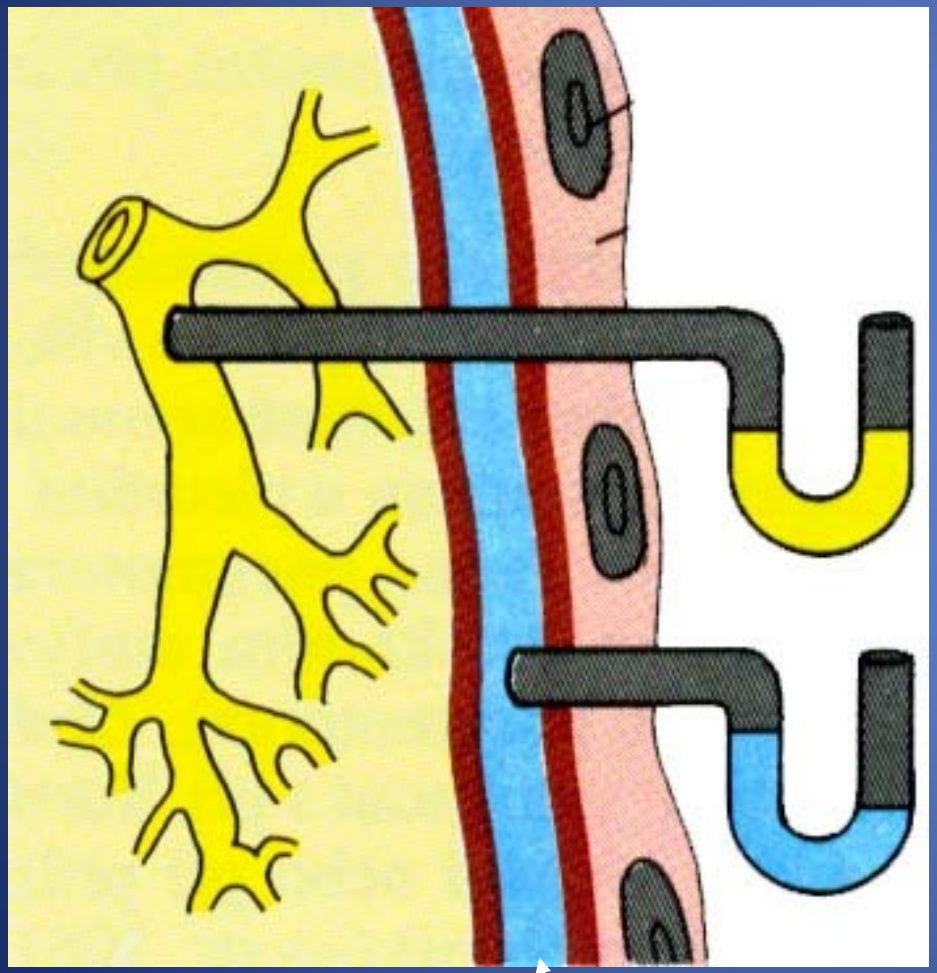
- **člověk má asi 300 milionů alveolů**
- **celková plocha alveolární stěny u dospělého je 70 m^2**
- **alveoly jsou obklopeny plicními kapilárami**
- **difundování O_2 a CO_2 (mezi krví a vzduchem)**



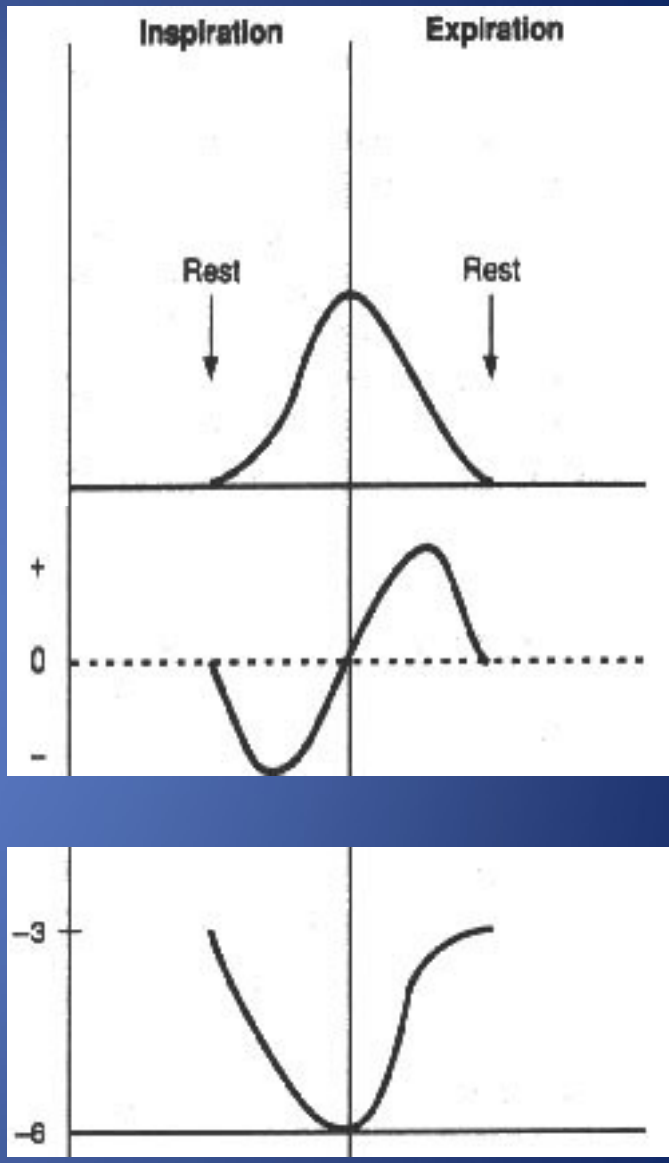


PLEURA

pulmonalis parietalis

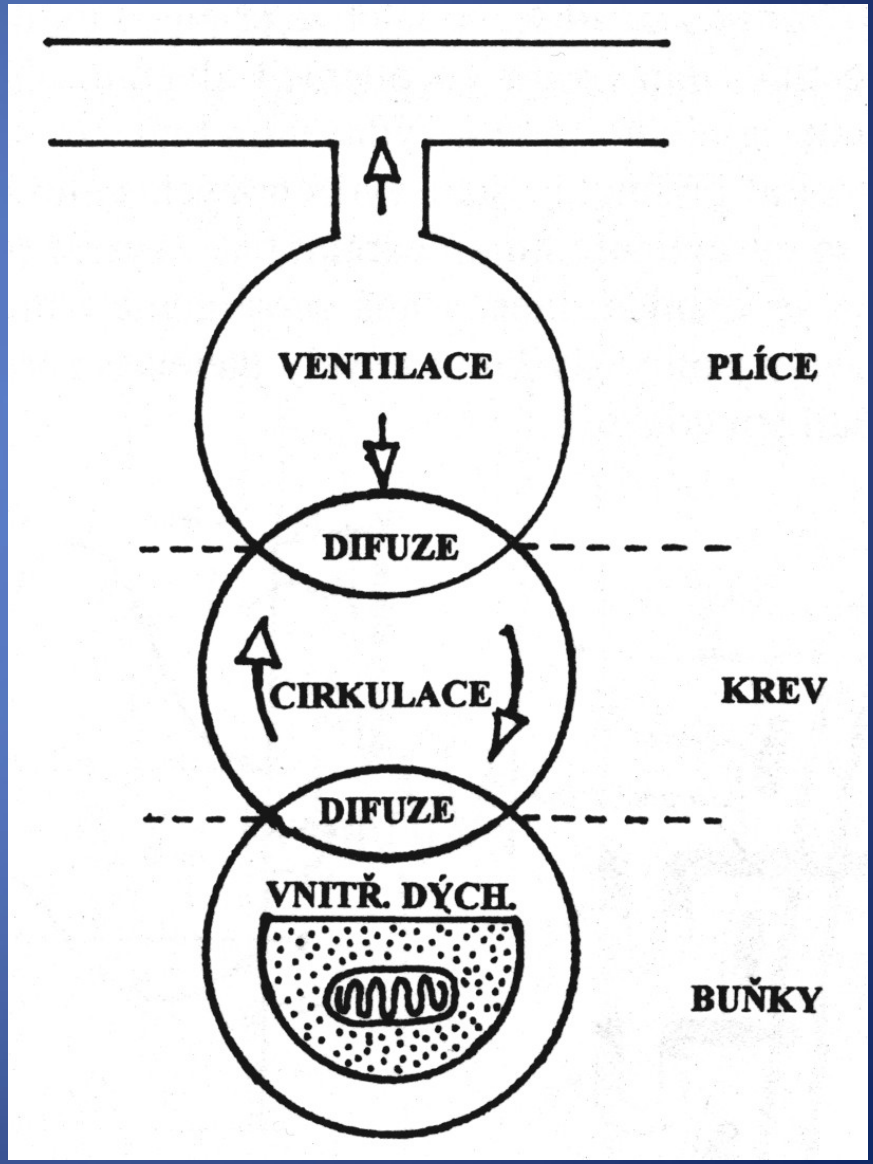


pleurální štěrbina



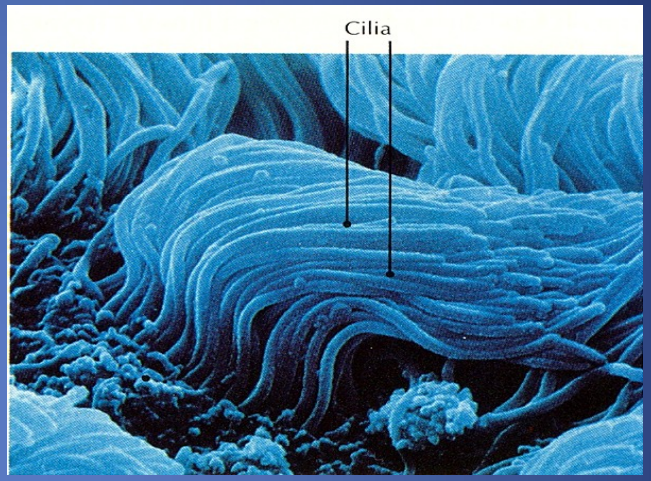
Základní funkce dýchacího systému

- **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 plícemi
- **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)**



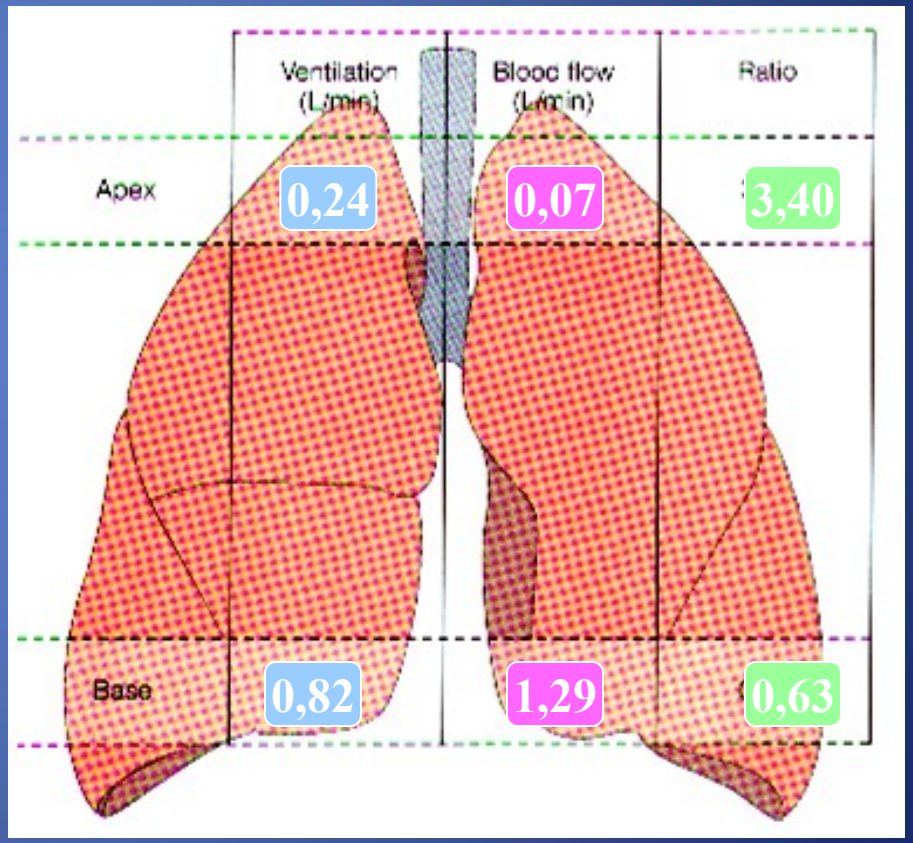
2. **lymfatická tkáň – *bariéra proti infekci***

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 (l.min^{-1})** = výměna vzduchu v plicních sklípcích
- **perfúze (l.min^{-1})** = průtok krve plícemi
- **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 plícní sklípky)



Průtok krve plícemi -perfúze

- **Plicní oběh ≡ nízkotlaká část cirkulace**

  - **pravá srdeční komora - plícnice (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**

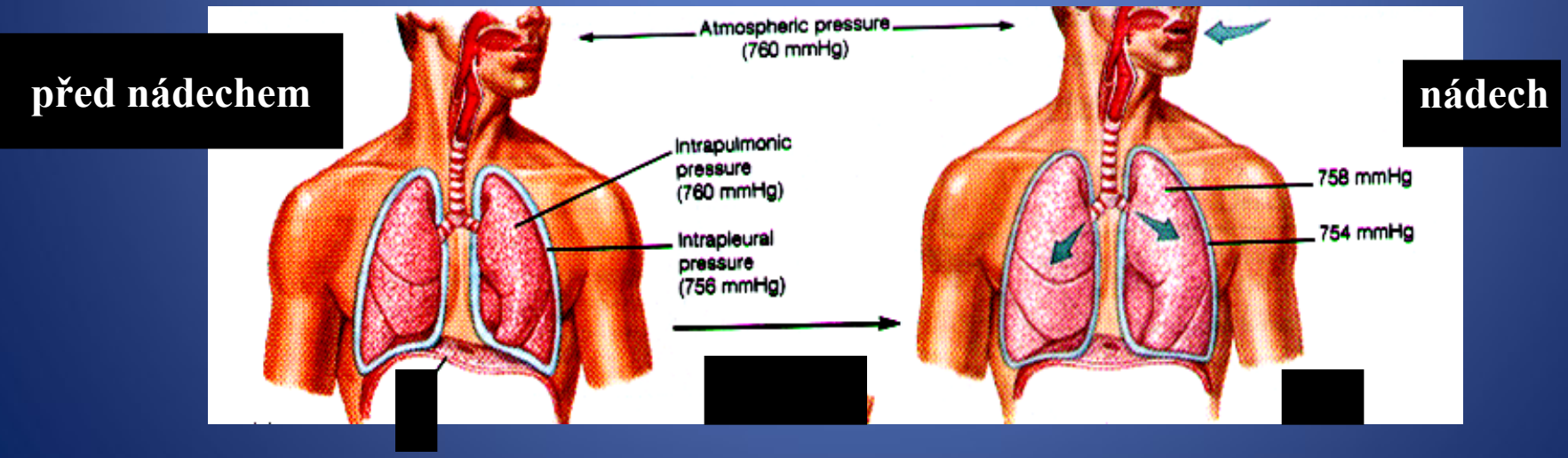
Mrtvý prostor

= 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, neužitečná ventilace**

Vdech - inspirium

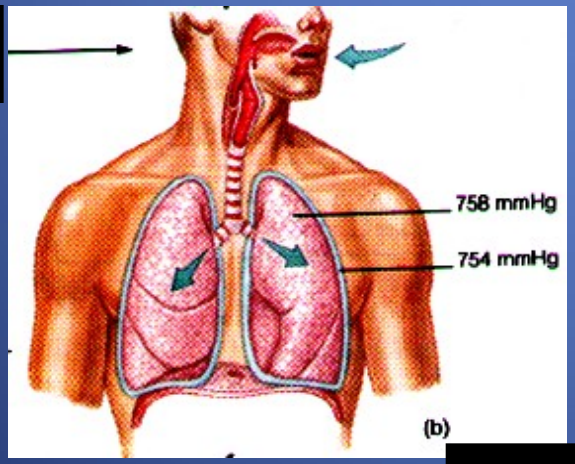
- děj *aktivní* - *kontrakce inspiračních* svalů
- *intrapulmonální tlak klesá*
- *interpleurální tlak klesá* (z –2,5 na –6 torrů)
- *vzduch do plic* (tlak v dýchacích cestách je negativní)



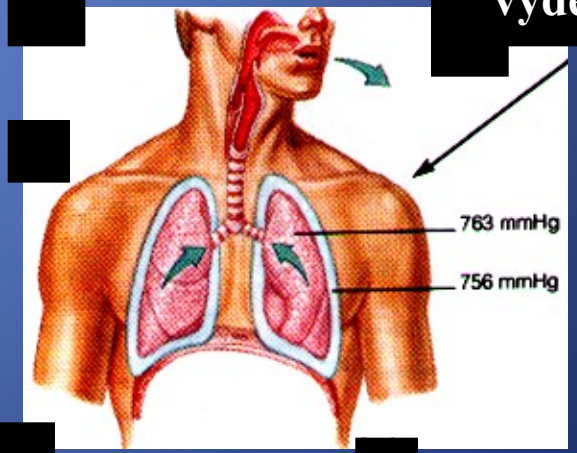
Výdech - exspirium

- 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*

vdech



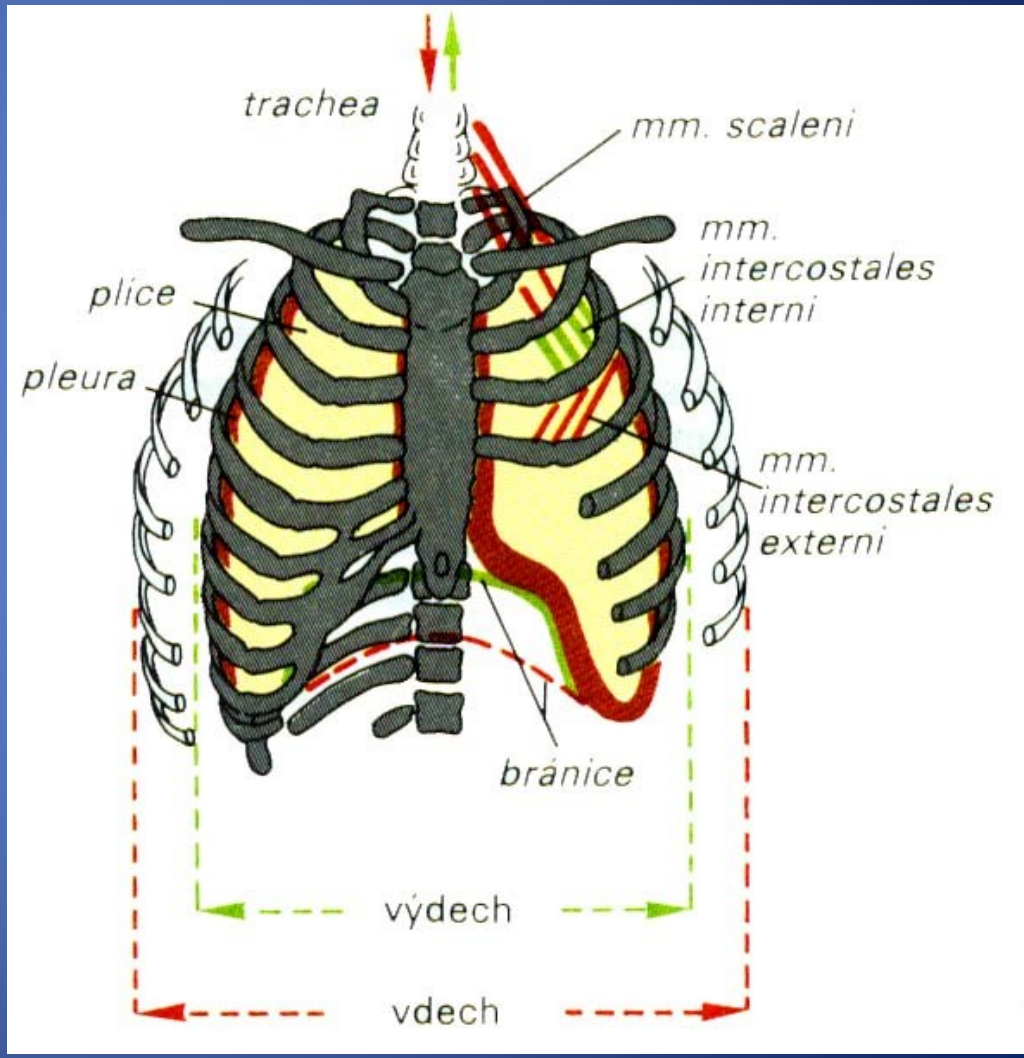
výdech



Inspirační a exspirační svaly

- **Inspirační svaly:**
  - *bránice*
  - *mm.intercostales ext.*
  - *mm.intercostales paraster.*
  - **mm.scaleni**
  - **mm.pectorales**
  - **m.sternocklediomast.**

- **Exspirační 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**

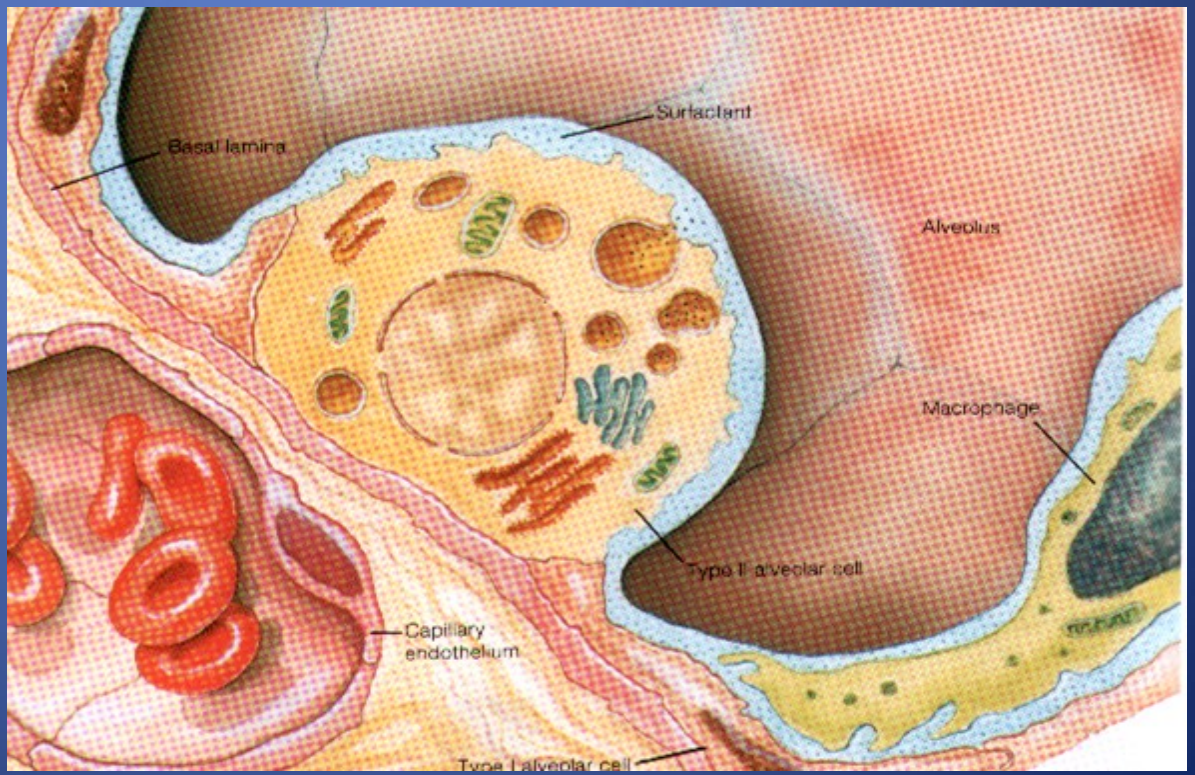
- **elasticita plic určuje hodnotu plicní poddajnosti = *compliance***
- **ta závisí na objemu plic (nejvyšší při FRC)**

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 ↑

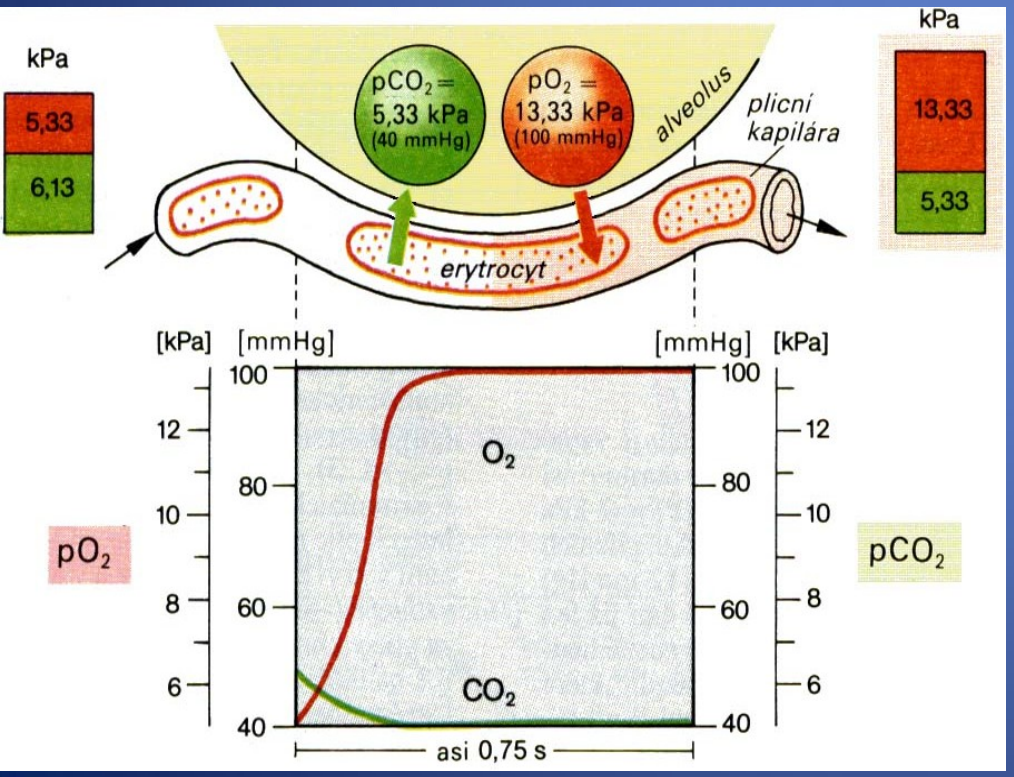
= *vzduch z plic*

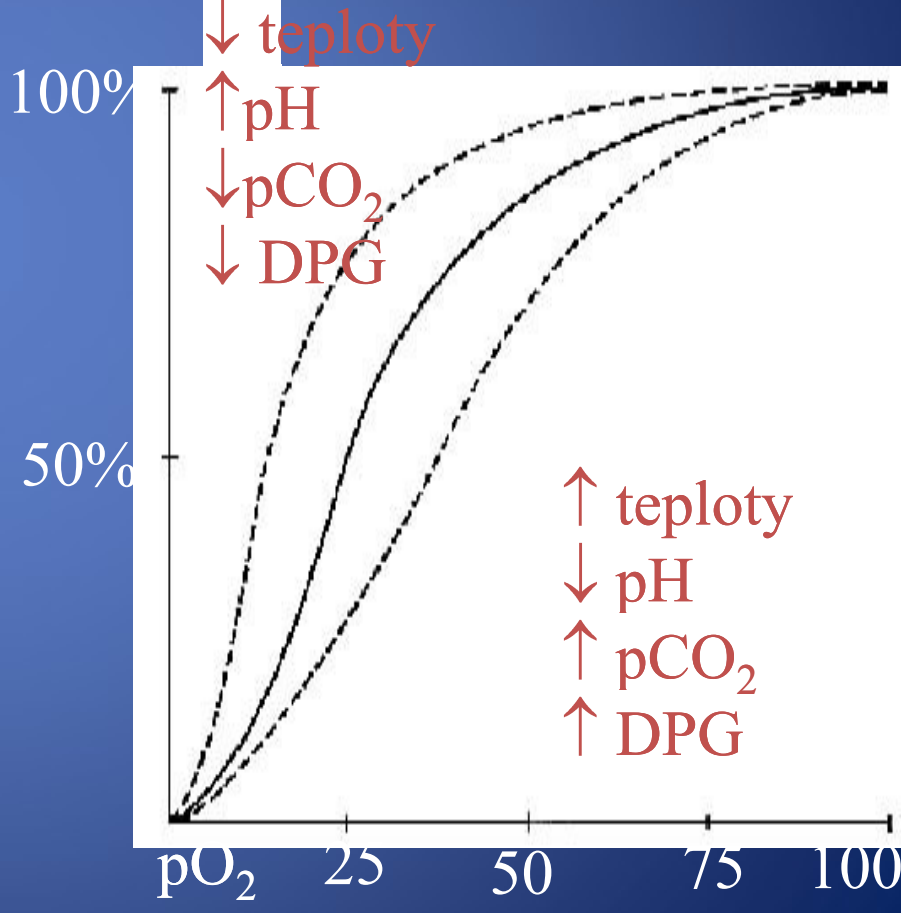
- ✓ retrakční síla plic ↓
- ✓ rovnováha mezi retrakční silou plic a napětím hrudní stěny

= *konec výdechu*

TRANSPORT O_2

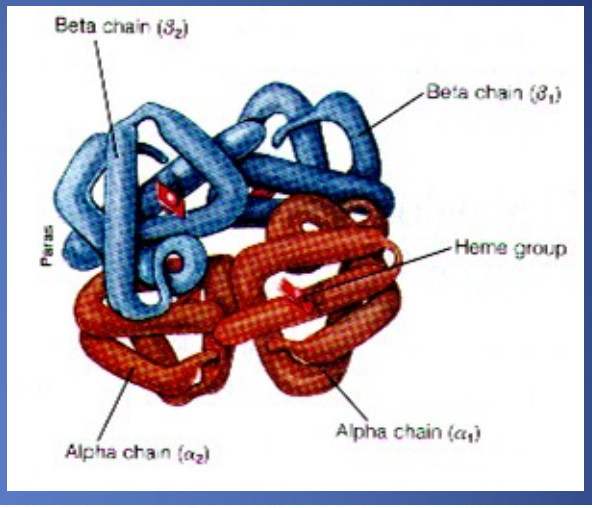
rozpuštěný v plazmě
vazba na hemoglobin (Fe^{2+})
1 molekula hemoglobinu váže 4 molekuly O_2

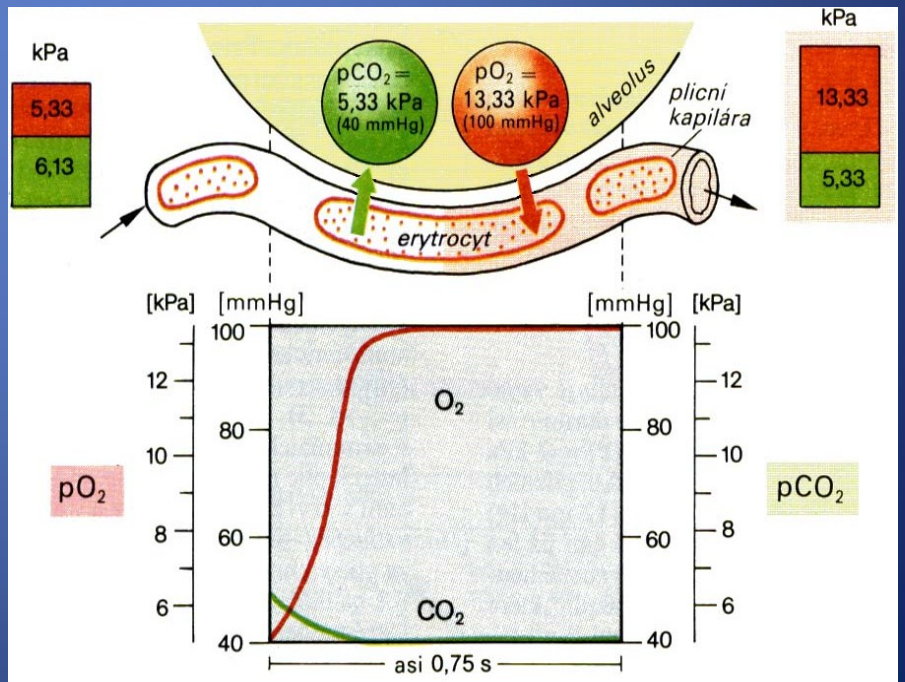




Transport O_2 krví

- *Hemoglobin* (Hb) = červené krevní barvivo
- Fe^{2+} - každé ze 4 atomů železa váže 1 molekulu O_2
  (= *oxygenace* – železo zůstává dvojmocné = Fe^{2+})
- *oxyhemoglobin* (Hb_4O_8) – Hb s navázaným O_2
- *deoxygenace* (redukovaný Hb) – hemoglobin bez kyslíku
- 1 g Hb obsahuje 1,39 ml O_2
- v krvi: *160 g.l^{-1} u mužů (140 g.l^{-1} u žen) Hb*





Transport CO_2 krví

1. **fyzikálně rozpuštěný** (malý podíl) – ***12%***

2. **navázaný na bílkoviny** (karbaminohemoglobin) ***11%***

3. **HCO_3^-**

- ✓ $CO_2 + H_2O \rightleftharpoons H_2CO_3 \rightleftharpoons HCO_3^- + H^+$
- ✓ tato reakce je v plasmě pomalá
- ✓ je 10 000krát rychlejší v erytrocytech – ***27%***
- ✓ membrána erytrocytů je pro HCO_3^- propustná

  → HCO_3^- do plasmy – ***50%***
- ✓ za HCO_3^- do erytrocytů Cl^- (= chloridový posun)

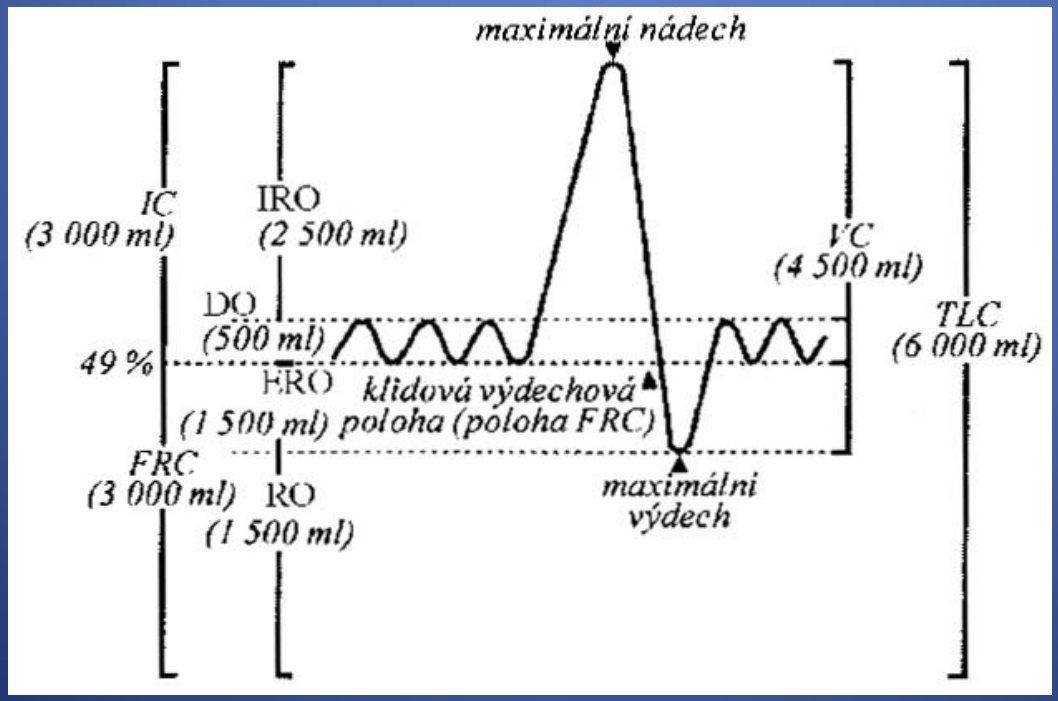
  → erytrocyty „nasávají“ vodu (zvětšují svůj objem)

Statické plicní objemy:

- dechový objem **DO** (0,5 l)
- inspirační rezervní objem **IRO** (2,5 l)
- exspirační 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

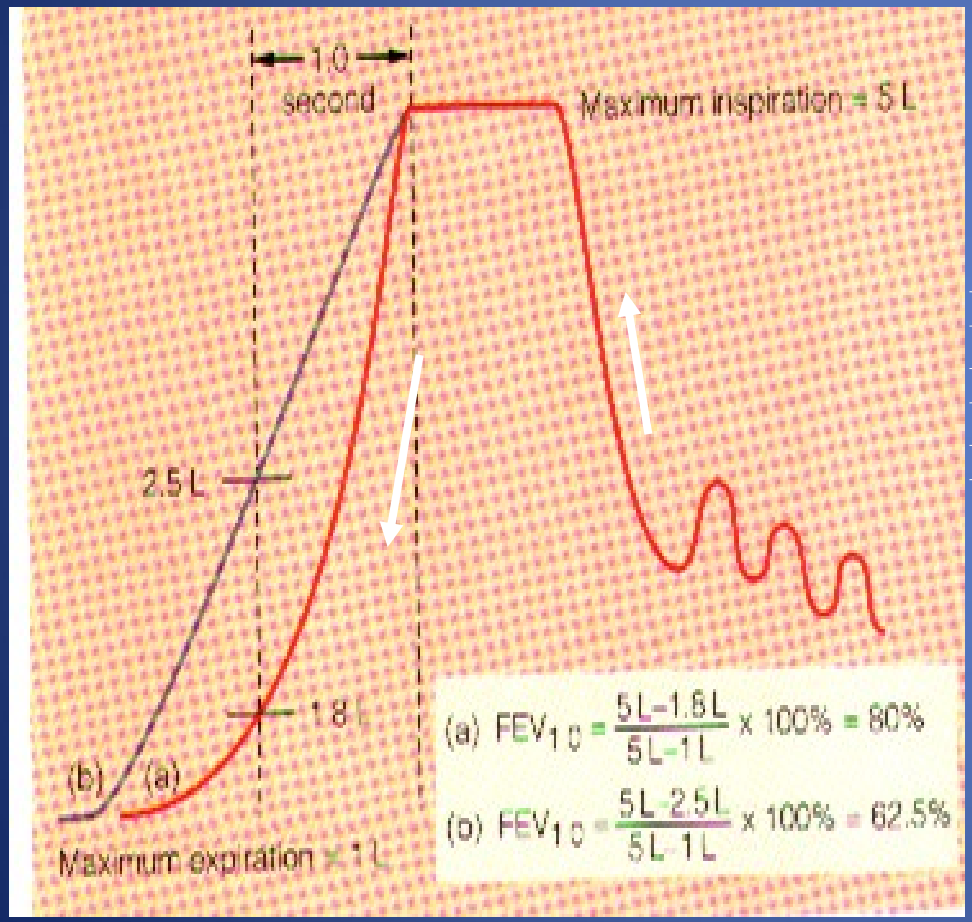
- dechová frekvence : **f**
- minutová ventilace plic : $\dot{V}$ (v klidu 8 l za min)
- maximální minutová ventilace : $\dot{V}_{MAX}$

= maximální množství vzduchu, které může být v plicích vyměněno (z plic vydýcháno) za minutu – až 170 l.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

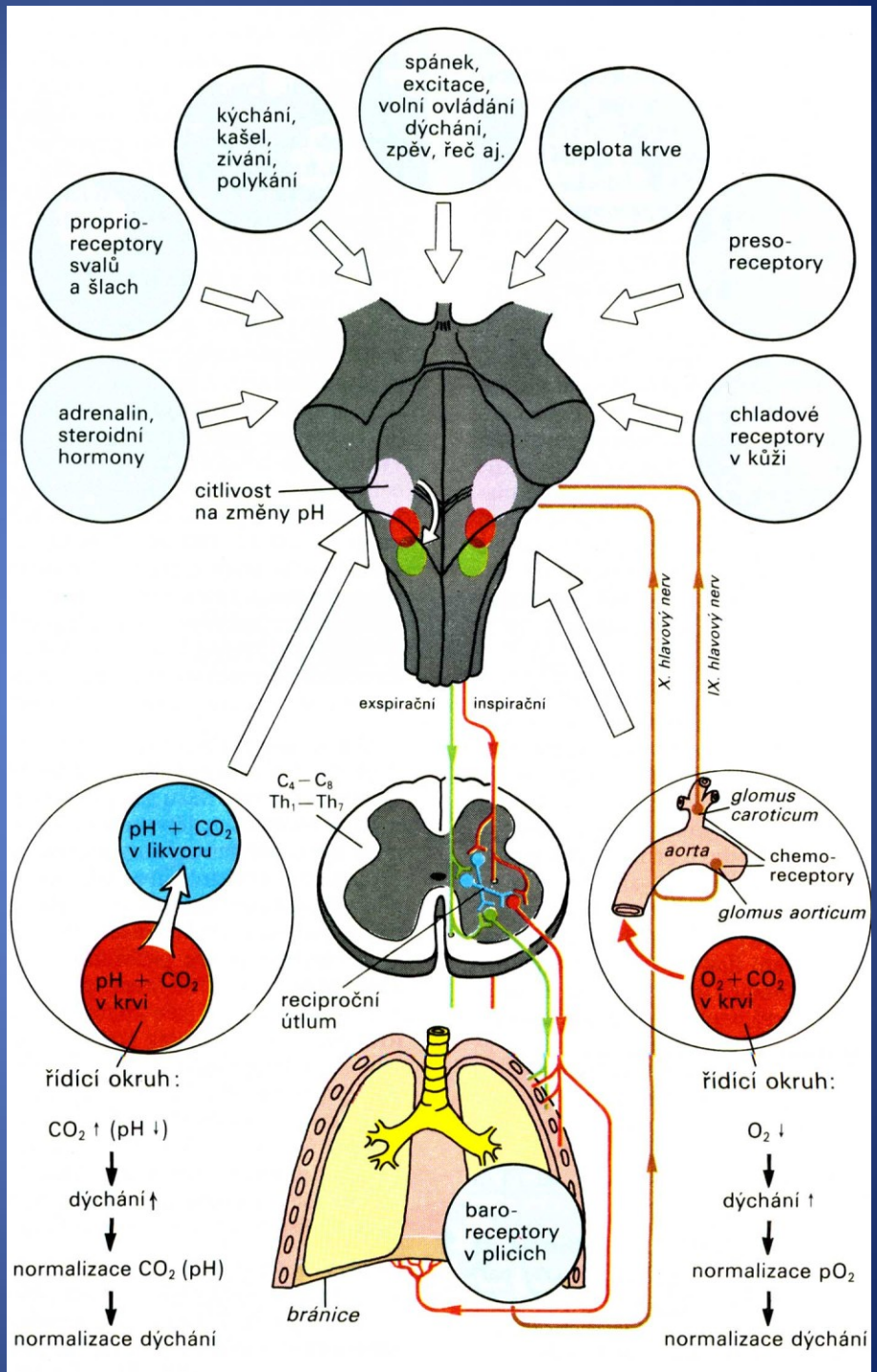
Řízení dýchání

- CNS

- dýchací svaly inervovány vlákny C4-C8 a Th1 –Th7
- dýchací centrum v medulla oblongata

Stimulace dýchání :

Chemoreceptory (g.aorticum a caroticum)



Regulace dýchání

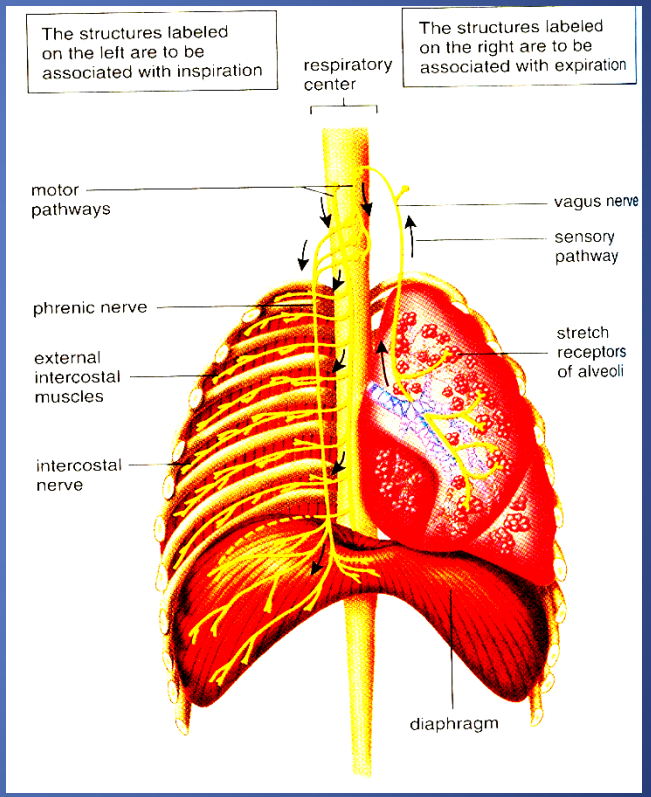
Dýchání je automatické

Regulace dýchání:

- **nervové řízení**

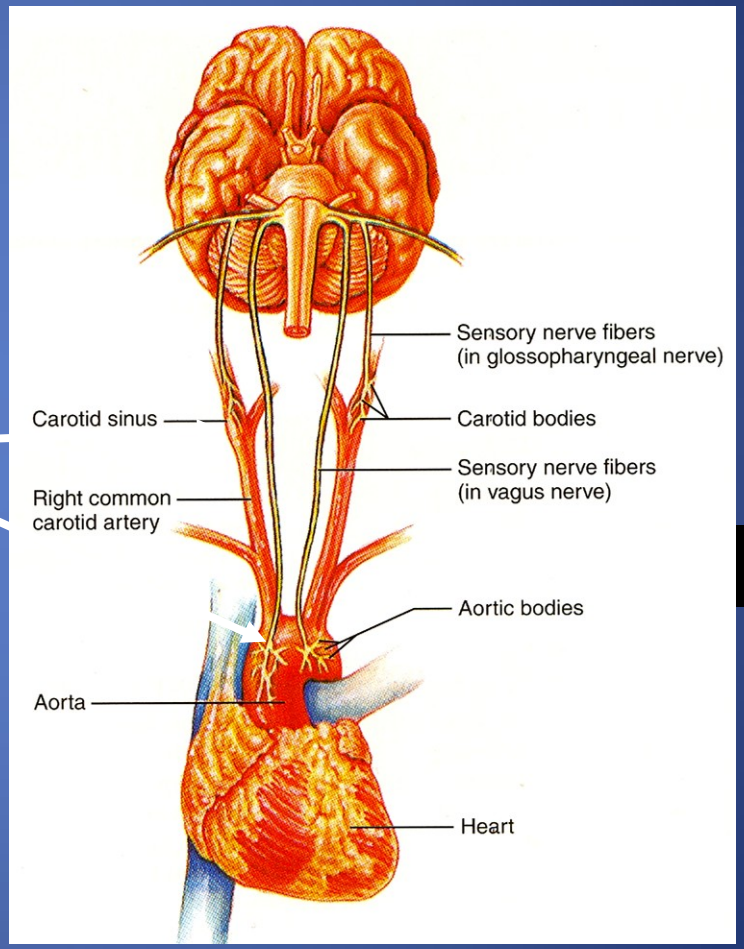
1. **motorickými nervy řízení dýchacích svalů**
2. **autonomní (vegetativní) řízení dýchání**

- **chemické řízení**
- **reflexní mechanismy**
- **suprapontinní mechanismy**



2. Chemické řízení dýchání

- ↑ pCO_2 nebo ↑ pH nebo ↓ pO_2 = zvýšená aktivita inspiračních neuronů
- karotická a aortální tělíska (periferní chemoreceptory)
- centrální chemoreceptory (buňky v prodloužené míše – jsou blízko respiračního centra)



- 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
- ↑DF může vést ke ↓DO a tím i minutové ventilace → ↓alveolární ventilace → ↑fyziologického (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)

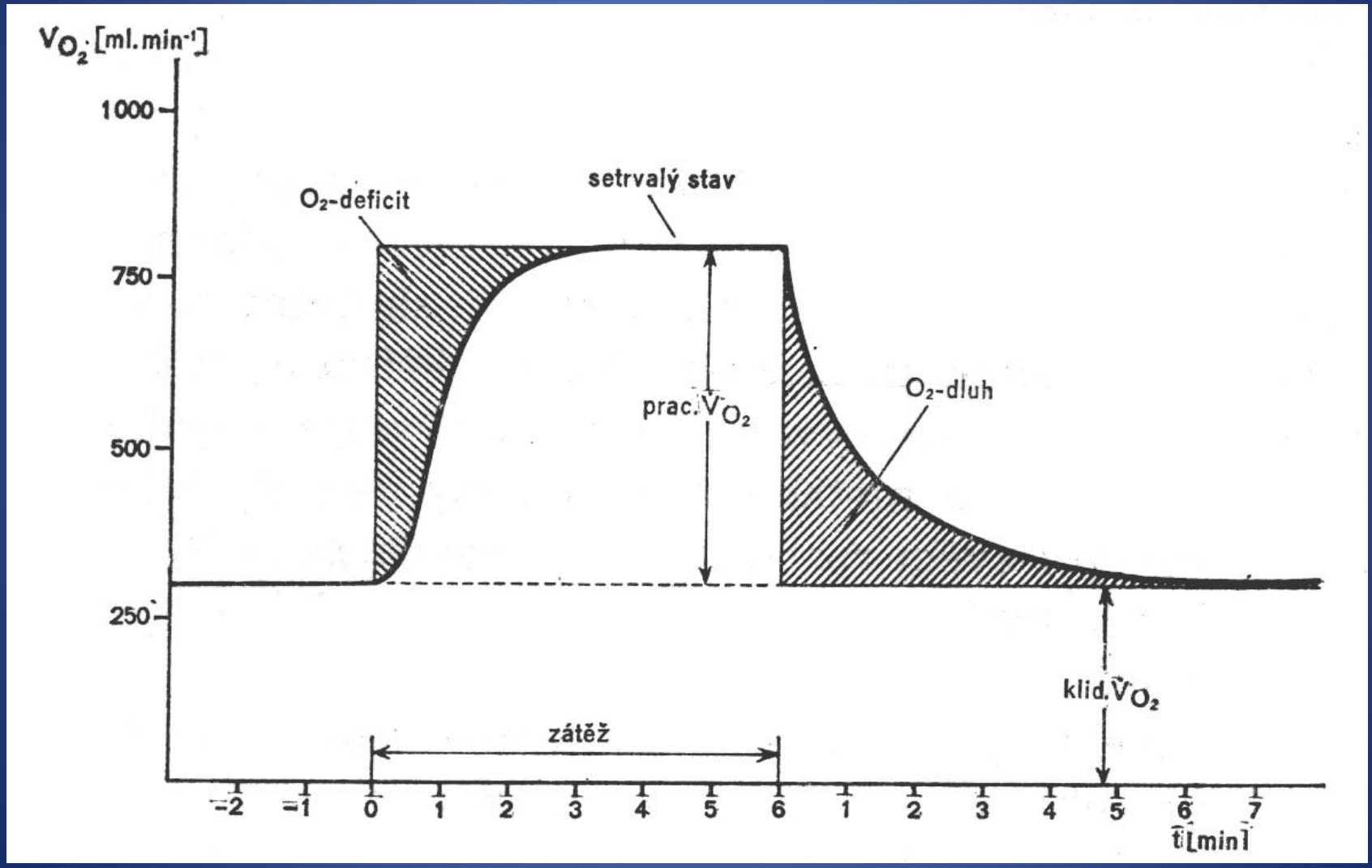
Vitální kapacita (VC)

- 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 ↑ SF a DF).
- nepoměr mezi požadavky na O_2 a jeho dodávkou vede k zapojení anaerobních mechanismů - vznik LAKTÁTU (↑ 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 a lepší prokrvení orgánu metabolizujících laktát mírnou intenzitou zatížení (50 % VO_2max)

-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:**

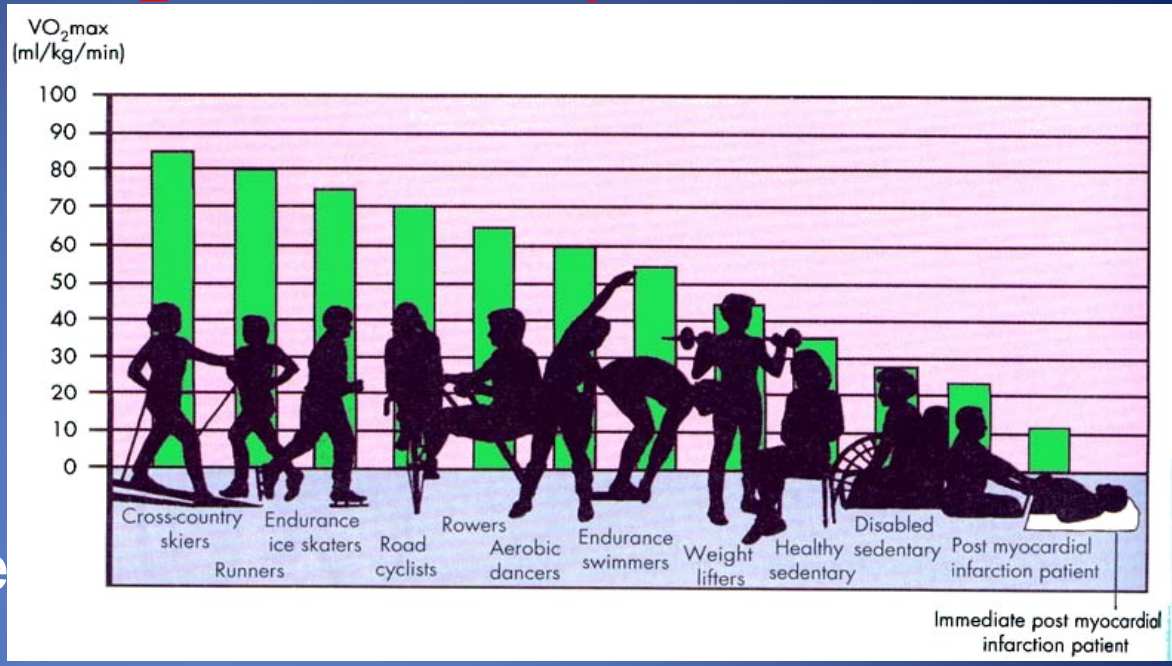
  je ↓, asi 80 % volní MMV

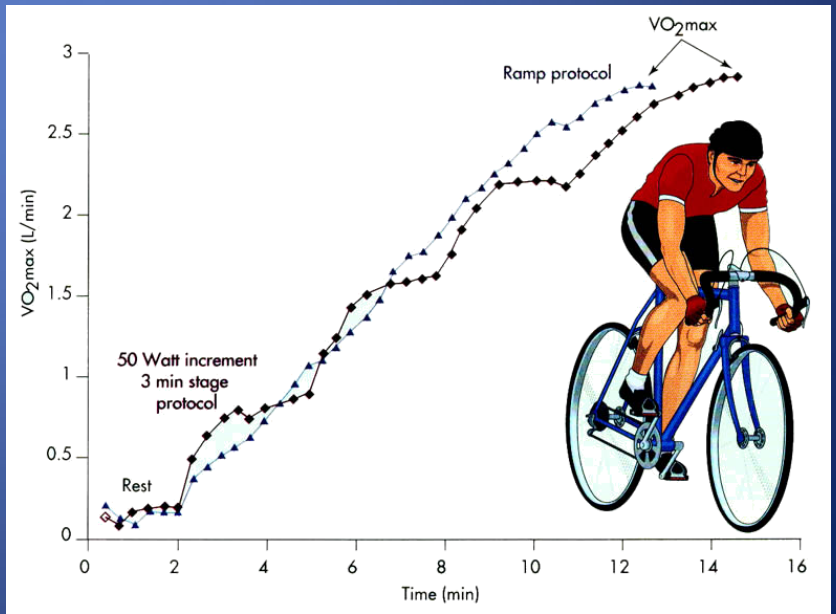
Maximální spotřeba kyslíku

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

- postupně klesá s věke

<u>závisí na</u>: ventilaci,
alveolokapilární difúzi,
transportu oběhovým
systémem, tkáňové difuzi,
buněčné oxidaci





Druh športu	W max ($W.kg^{-1}$)	W 170 ($W.kg^{-1}$)	$\dot{V}O_2max$ ($ml.min^{-1}.kg^{-1}$)
MUŽI			
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	
ŽENY			
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 VO_2max

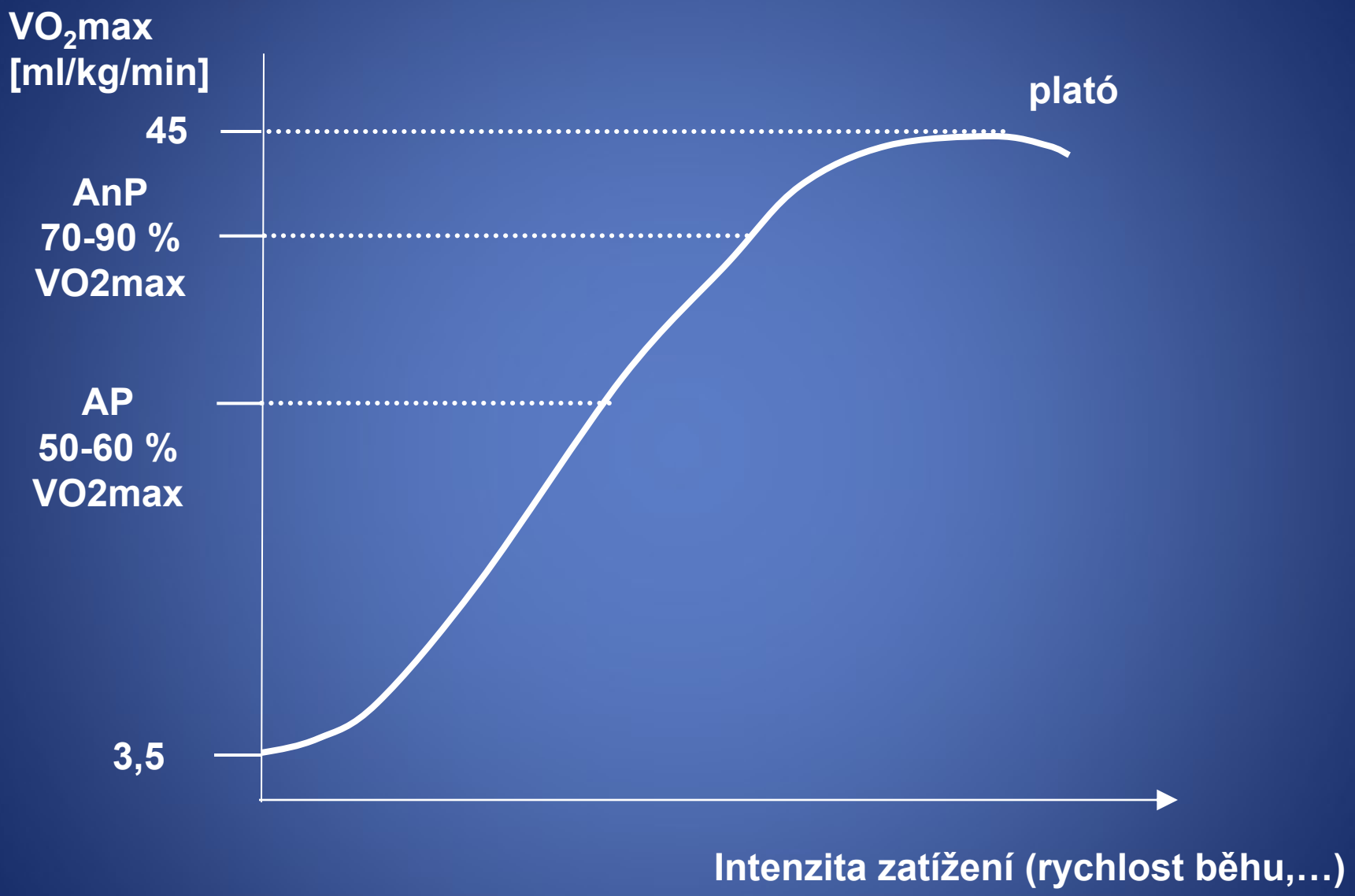
1) Dýchací systém - není limitujícím faktorem

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)


VO2max
[ml/kg/min]
45
AnP
70-90 %
VO2max
AP
50-60 %
VO2max
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 (trénovaní až 30 mmol).

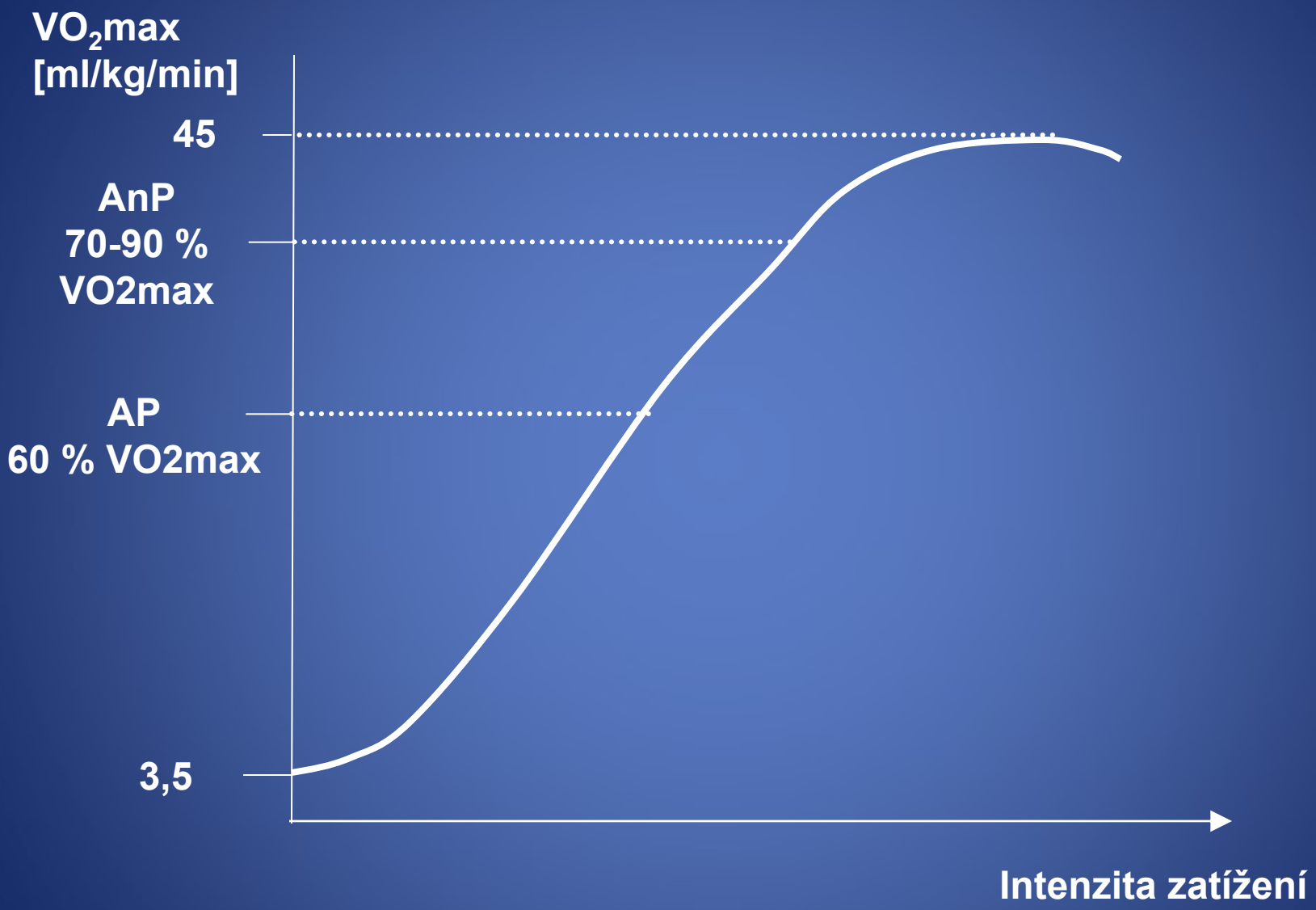
AnP (anaerobní práh)

- může být odhadnut z VO_2max:

$AnP = VO_2max/3,5 + 60$

$AnP = 35/3,5 + 60$

$AnP = 70\ \%VO_2max$


VO2max
[ml/kg/min]
45
AnP
70-90 %
VO2max
AP
60 % VO2max
3,5
Intenzita zatížení

laktát
energetický zdroj
sval. vlákna
VO2max [ml/kg/min]
45
L již nestačí být metabolizován – zvyšuje se ↑pH
AnP 70-90 % VO2max
4 mmol/l
tuky < cukry
I., II. a, II. b
L je metabolizován (srdce,nepracující svaly)
2 mmol/l
tuky = cukry
I., II. a
AP 60 % VO2max
3,5
? 1,1 mmol/l
tuky > cukry
I.
Intenzita zatížení

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

- Dosáhne setrvalého stavu dříve

- Dosáhne setrvalého stavu později

(Hamar & Lipková, 2001)

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 difůzi
- ↓ 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