

Respirační systém I

(mechanika dýchání, vitální kapacita,
transport plynů)

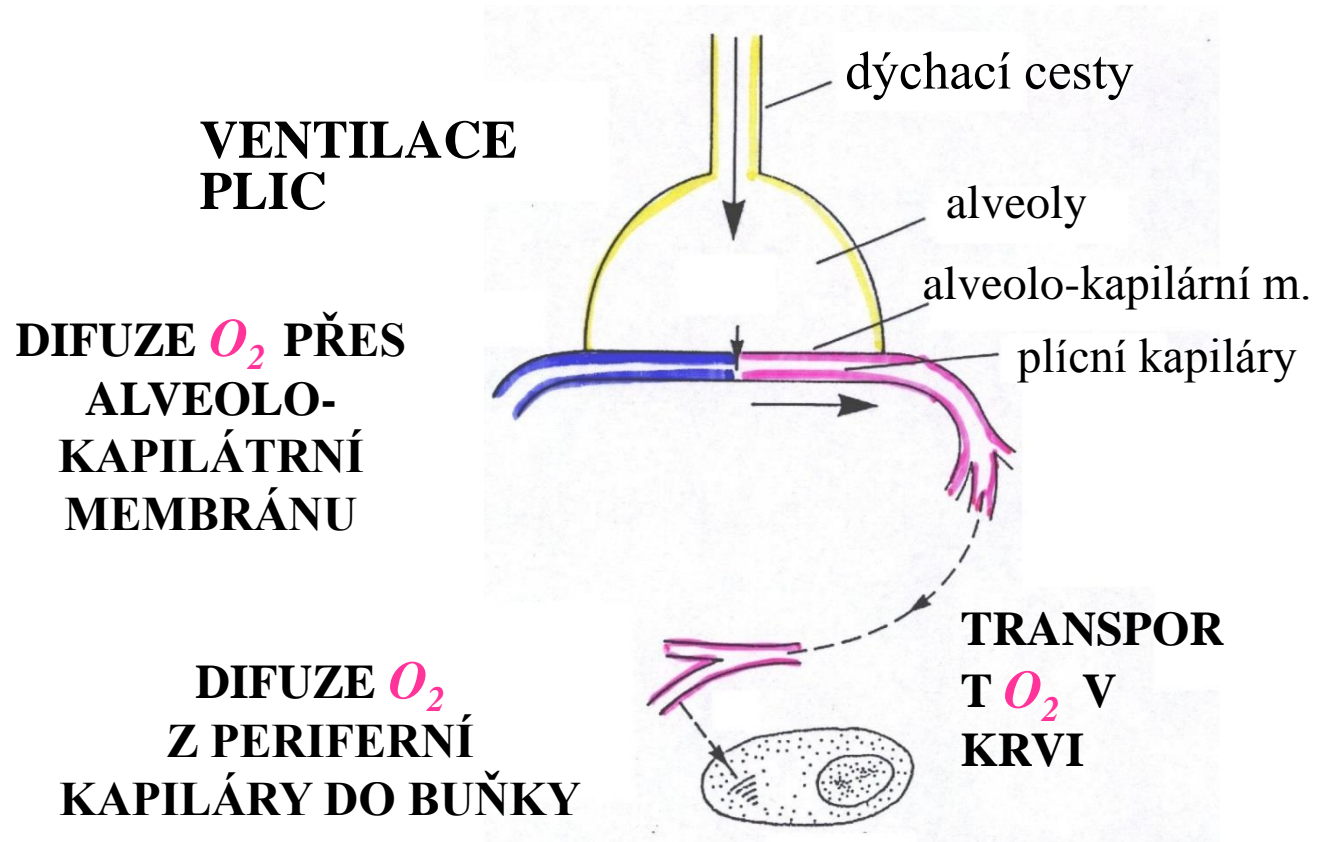
Dýchání

Soubor procesů sloužící k výměně dýchacích a krevních plynů

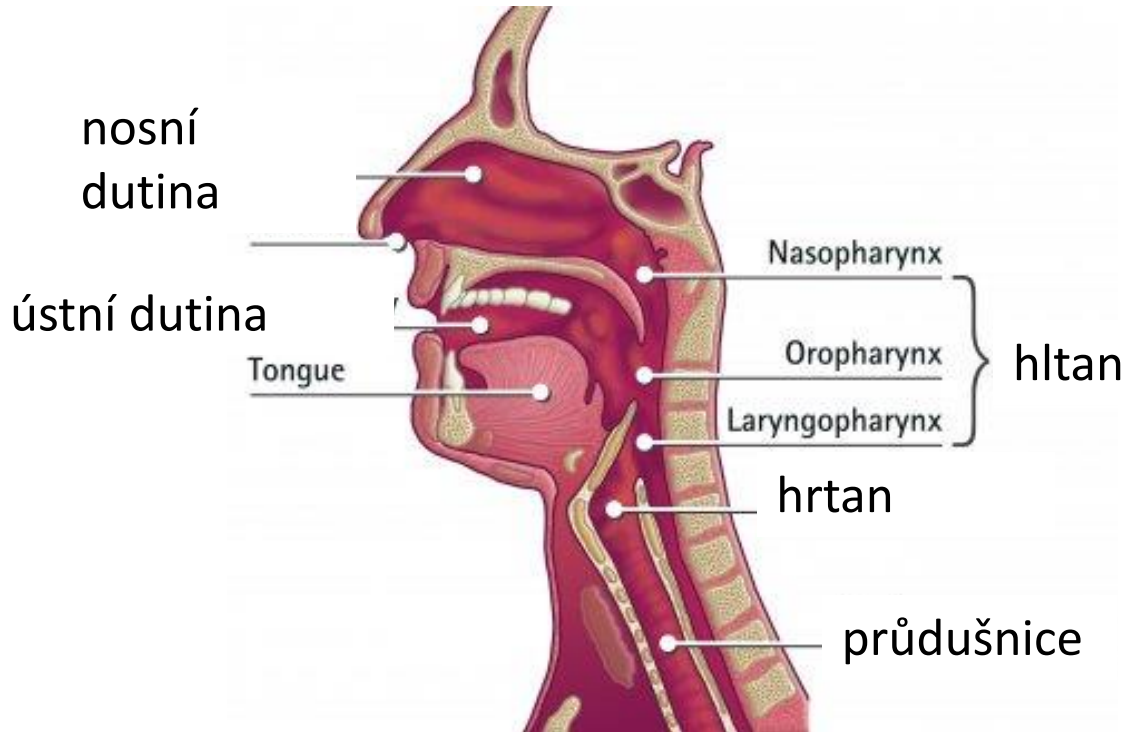
- mezi vnějším prostředním a plicemi – vnější dýchání
- mezi krví a tkání – vnitřní dýchání

Vnější dýchání zahrnuje – ventilaci, distribuci a difuzi plynů

- aby bylo účinné, musí na to navazovat perfúze (prokrvení) plic



Morfologie – horní dýchací cesty



Stavba:

nosní dutina, nosohltan, hrtan, (vedlejší nosní dutiny, ústní dutina)

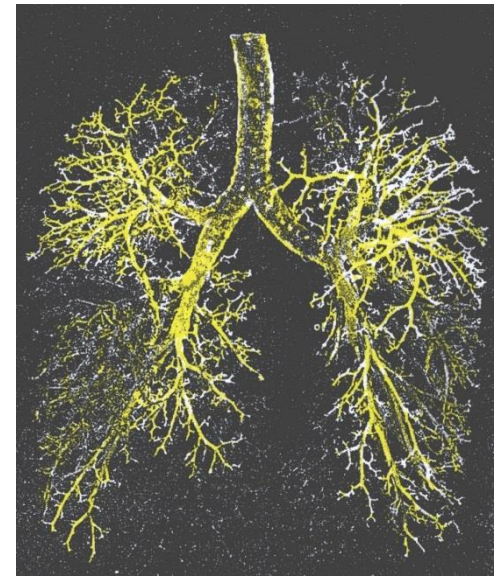
- Bohatě prokrvené a inervované
- **Funkce** senzitivní, ochranná (filtrace, ochranné reflexy), ohřívání a vlhčení vdechovaného vzduchu, hlasová

Morfologie – dýchací cesty

- Průdušnice (trachea) – průřez 2,5 cm²

Dichotonické větvení – jedna průduška se dělí na dvě

- Průdušky (bronchi)
 - 2 hlavní (1. generace dělení)
 - 5 sekundárních (2. generace)
 - 18 terciálních (3. generace)
 - 4. generace průdušek
 -
- Průdušinky (bronchioly)
- Bronchioly terminales (cca 16. generace)
celkový průřez 500 cm²
- Bronchioly respiratory
- alveolární kanálky
- Alveolární kapsy
- Plicní alveoly (22. – 23. generace)



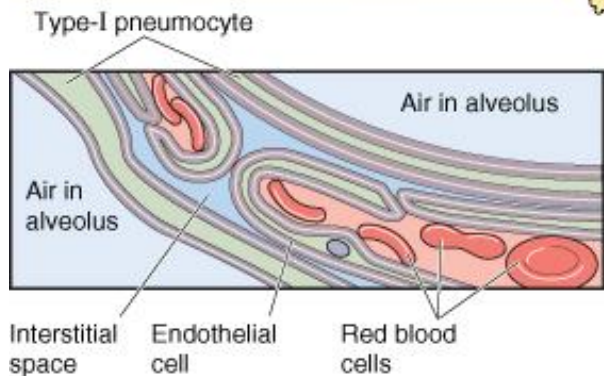
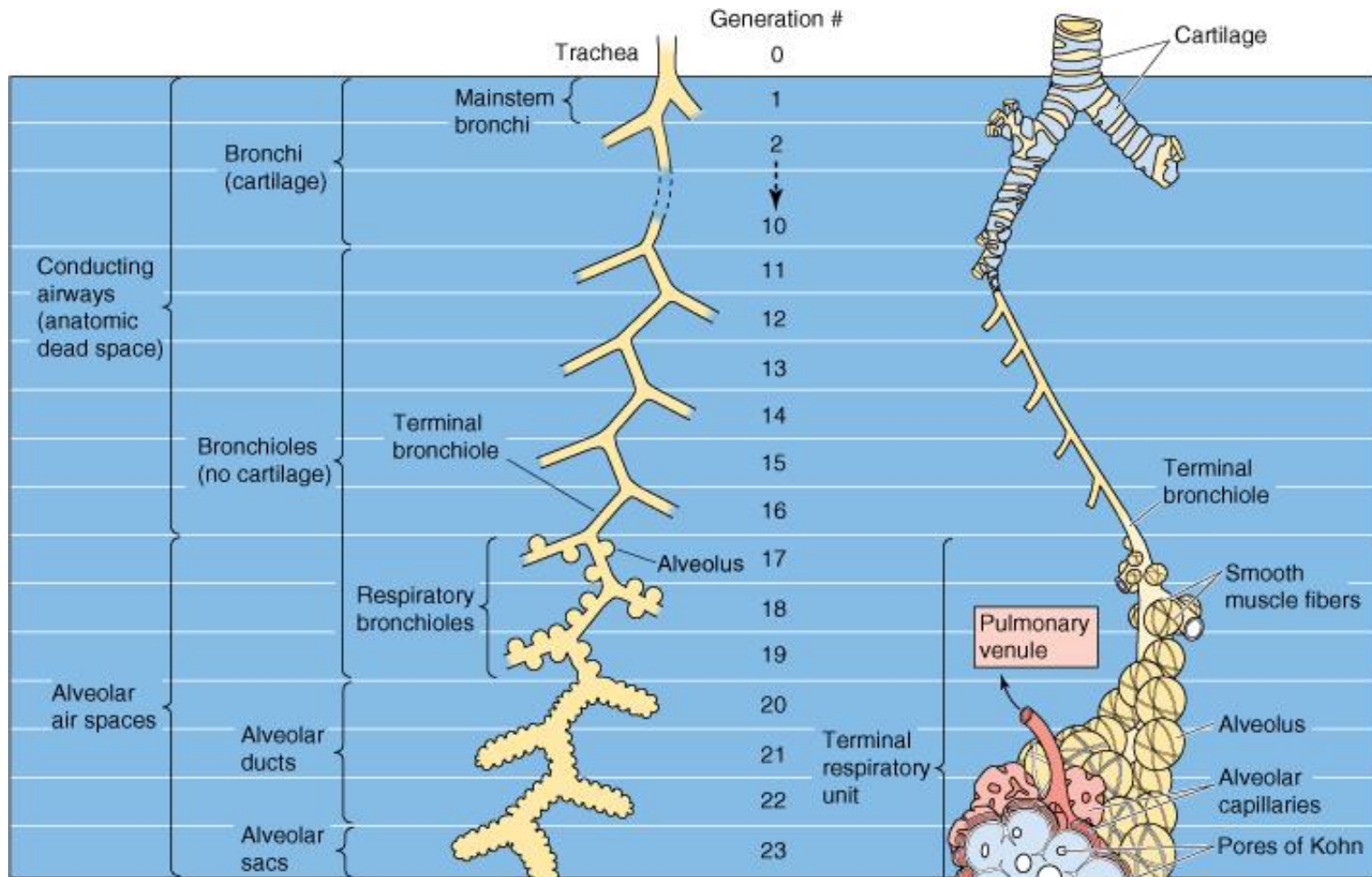
Konduktivní zóna

- transport a úprava vzduchu (ohřátí, zvlhčení, čištění)
- = **anatomický mrtvý prostor**

Acinus, přechodná a respirační zóna

- výměna dýchacích plynů

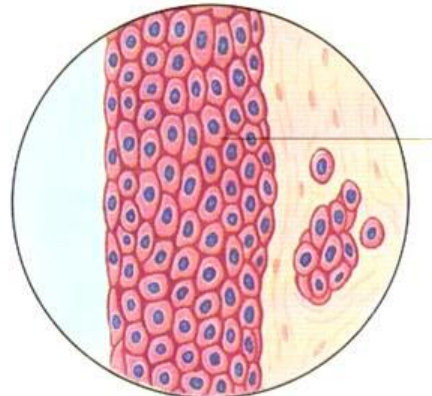
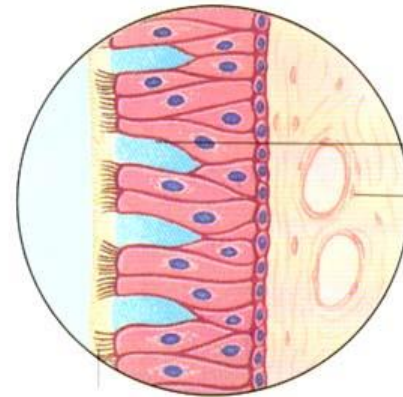
Základní jednotka plicní tkáně: plicní lalůček (acinus)



Dýchací cesty

Dýchací cesty od nosu až k terminálním bronchiolům:

- Mucinózní buňky – tvorba sekretu (vlhčení a mechanická ochrana sliznice, fixace škodlivých látek)
- Řasinkový epitel – posun sekretu směrem k faryngu (při zničeném řasinkovém epitelu se hlen odstraňuje kašlem)



Dýchací cesty

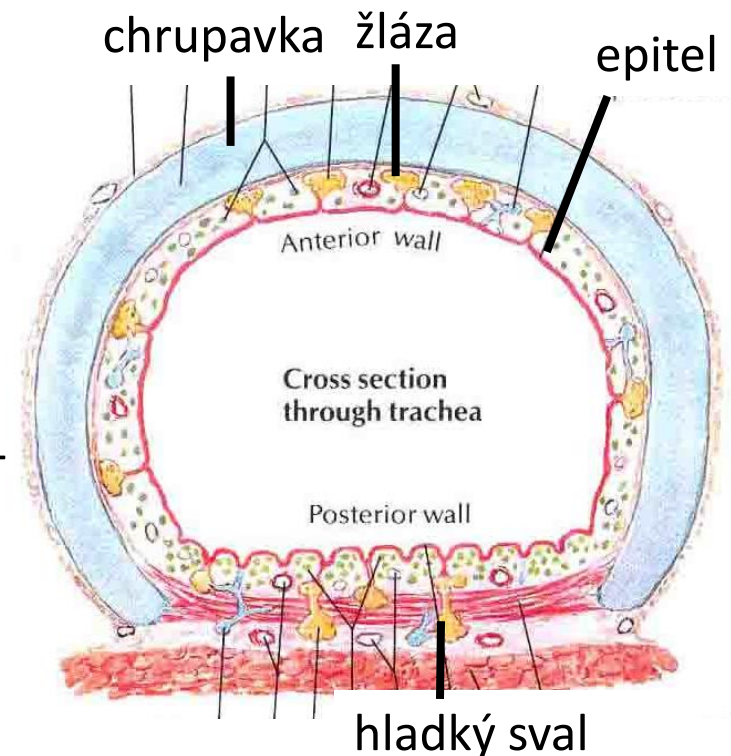
Průdušnice a průdušky

- prstencovitá chrupavka podkovovitého charakteru - výztuha dýchacích cest
- na otevřeném místě chrupavky hladká svalovina - změna průsvitu průdušek

Směrem od průdušnice k malým průduškám klesá podíl chrupavky (průdušinky už jsou bez chrupavky) a roste podíl svaloviny (nejvíce v terminálních průdušinkách)

Mrtvý prostor (průměrně 150 ml)

- Prostor dýchacích cest, kde nedochází k výměně plynů mezi vzduchem a krví
- **Anatomický** – pouze konduktivní zóna
- **Funkční (fyziologický)** – anatomický prostor + neprokrvené nebo nepropustné alveoly
- U zdravého je anatomický=fyziologickému mrtvému prostoru
- V nádechu se mrtvý prostor zvětšuje (roztažení dýchacích cest)



Odpor dýchacích cest

$$R = \frac{8 \cdot \eta \cdot l}{\pi \cdot r^4}$$

l - délka trubice

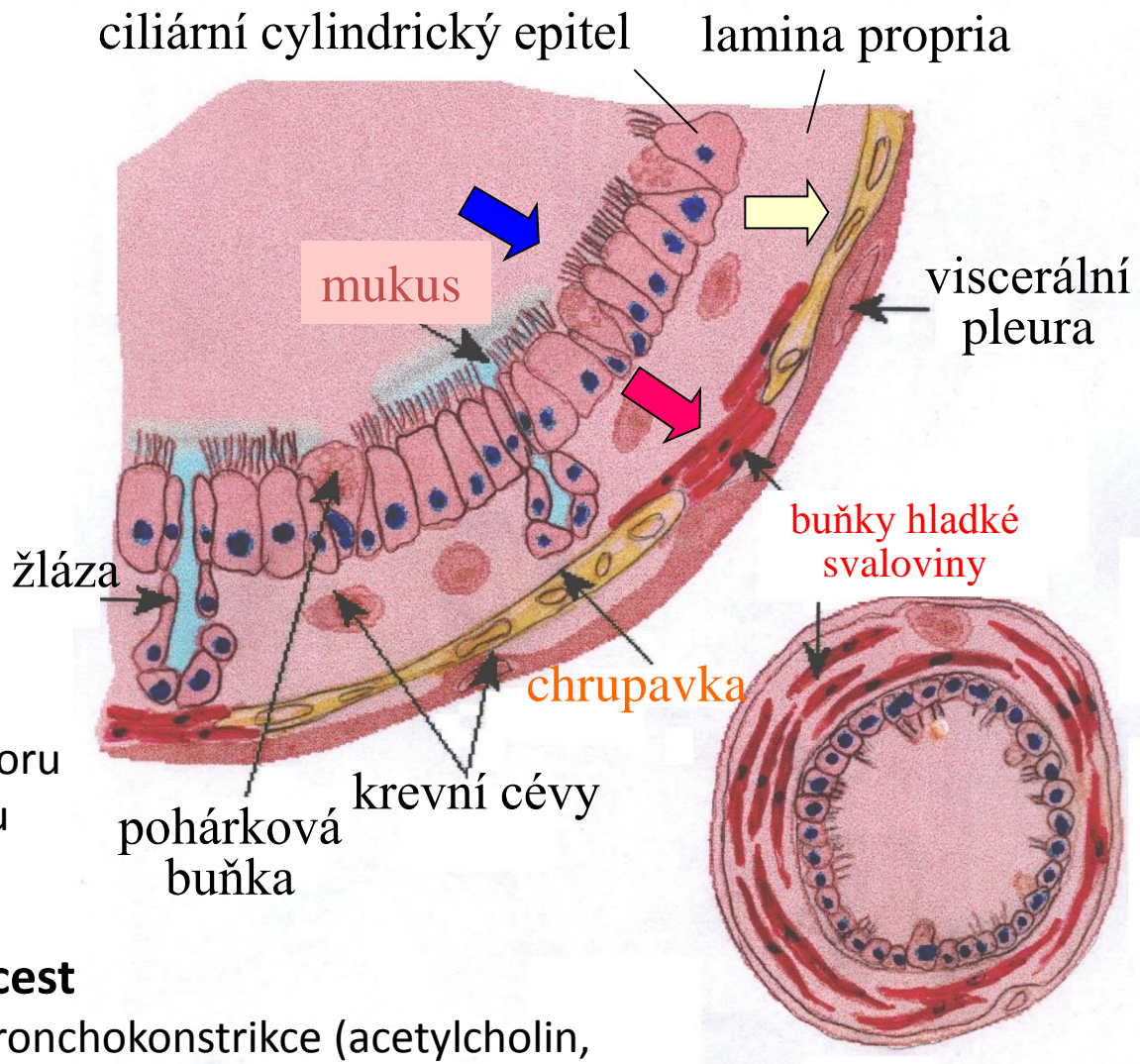
η - viskozita

r - poloměr trubice, má největší vliv na odpor díky 4. mocnině

- bronchokonstrikce – zvýšení odporu
- bronchodilatace – snížení odporu

Hladký sval ve stěně dýchacích cest

- **inervován především vagem** – bronchokonstrikce (acetylcholin, muskarinové receptory)
- Sympatická inervace slabší – adrenalin a noradrenalin – bronchodilatace (beta-receptory)
- Histamin způsobuje bronchokonstrikci (alergická reakce)



Alveolární systém

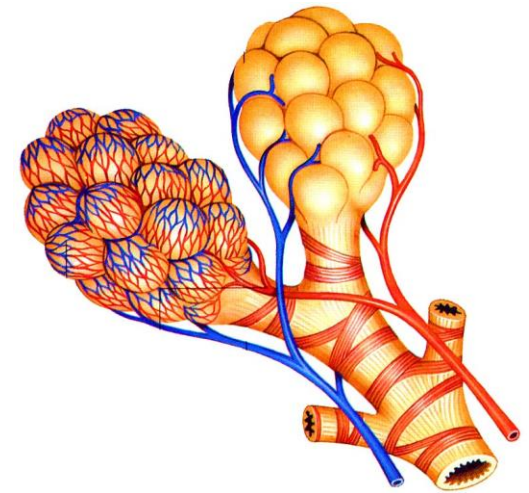
Průměr alveolů: 0,1 – 0,3 mm

Počet alveolů: 300 – 400 milionů

Plocha alveolů: 50 – 100 m²

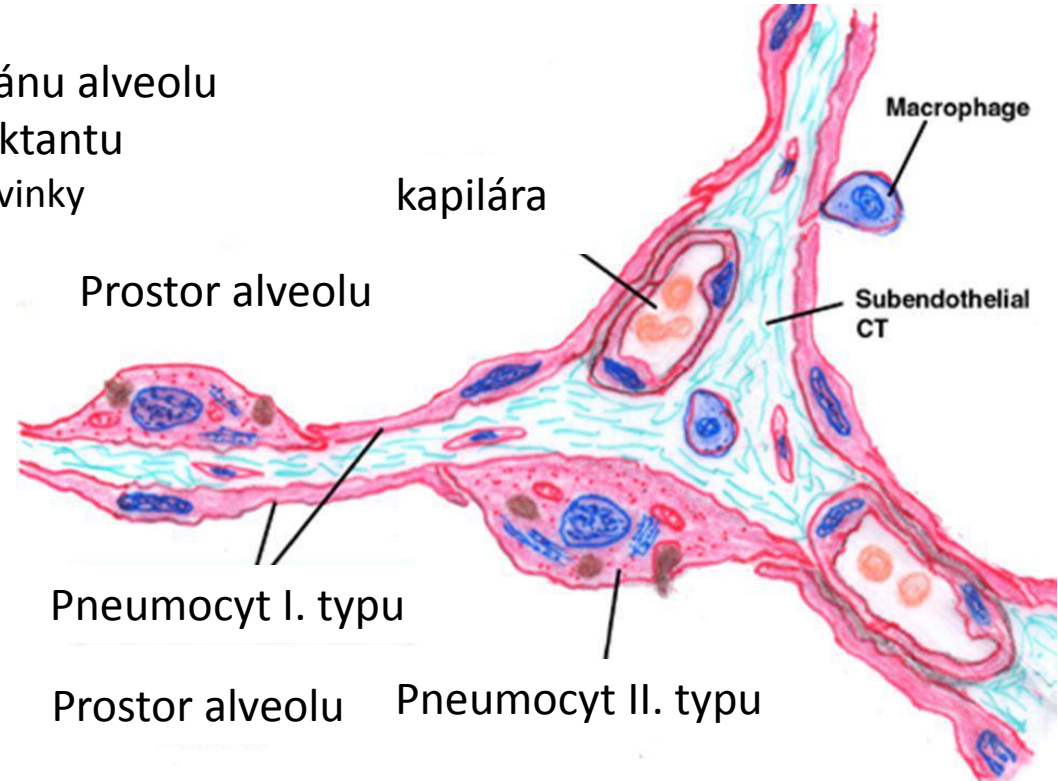
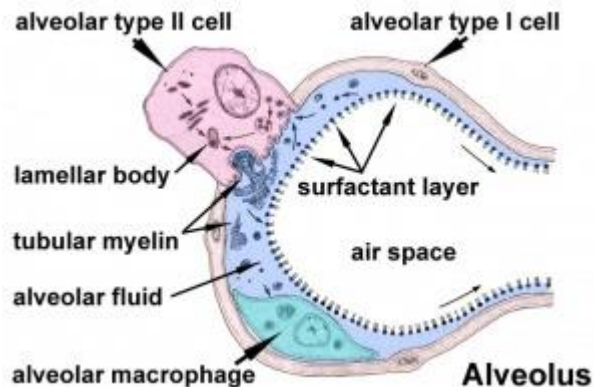
Tloušťka alveolu: desetina μm

→ **Účinná výměna plynů**



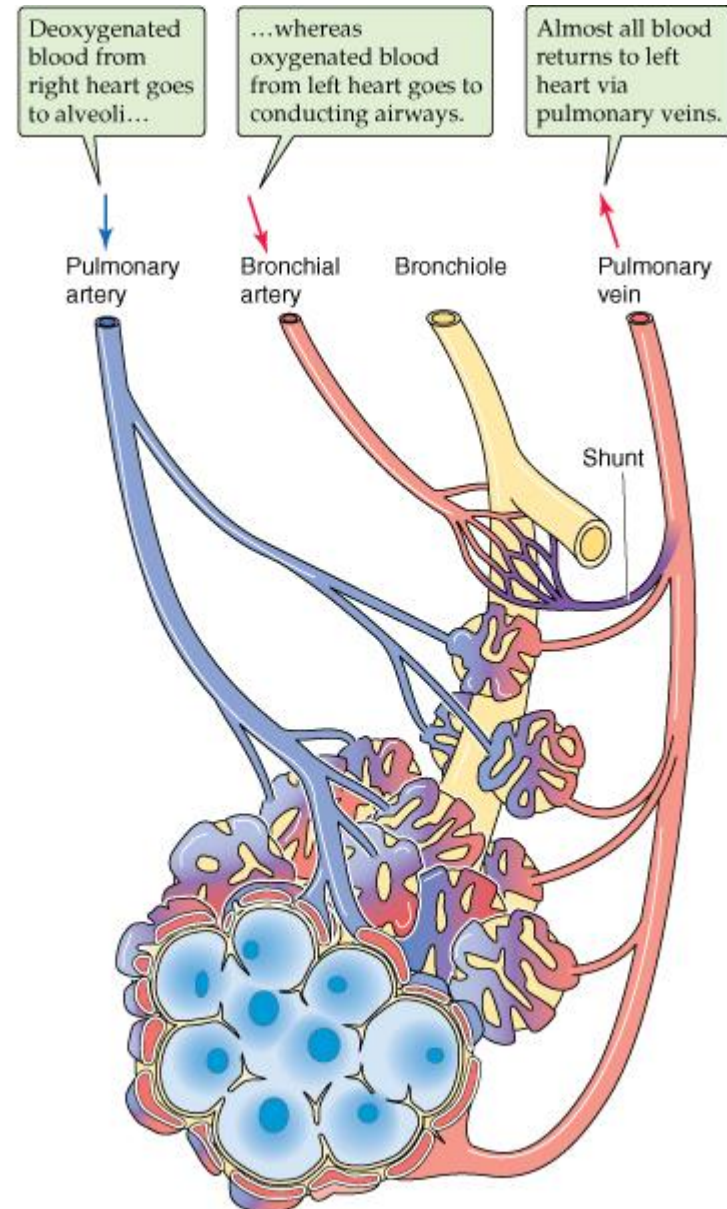
Složení alveolu

- Pneumocyt I. typu - tvoří membránu alveolu
- Pneumocyt II. typu - tvorba surfaktantu
- Kapiláry – často menší než velikost krvinky
- Makrofágy



Plicní oběh

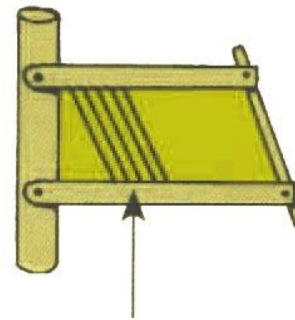
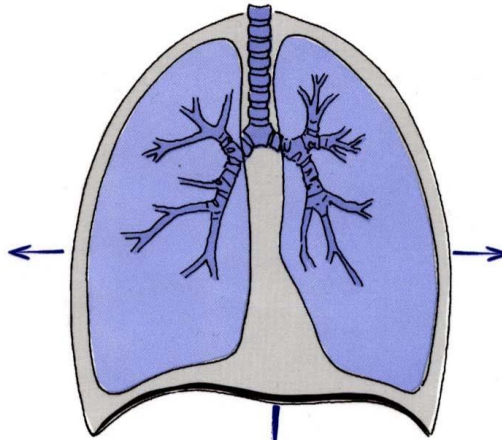
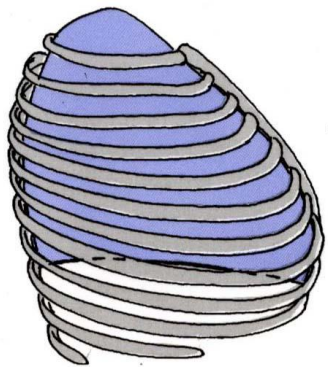
- **oběh**
 - **funkční** (okysličení krve, krev z pravé komory)
 - **nutriční** (výživa plic, 2% oběhu, krev z levé komory)



Mechanika dýchání

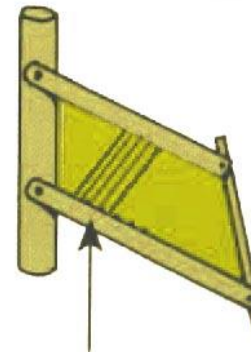
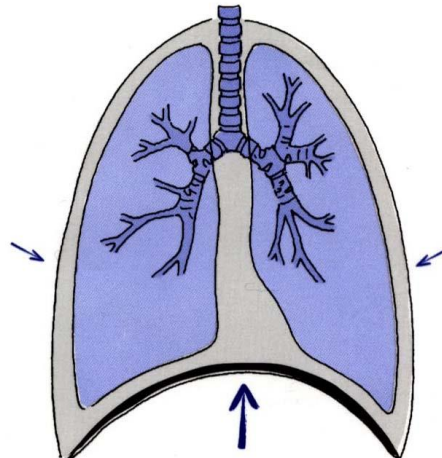
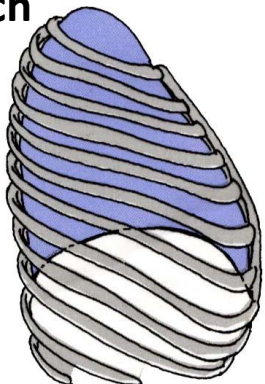
- Hlavní nádechové svaly: bránice (80 % dechové práce, inervuje n. phrenicus), zevní mezižební svaly (mm. intercostales externi)
- Pomocné dýchací svaly: m. sternocleidomastoideus, skupina skalenových svalů
- Výdechové svaly: vnitřní mezižební svaly, svaly přední stěny břišní

nádech



Nádech je aktivní

výdech



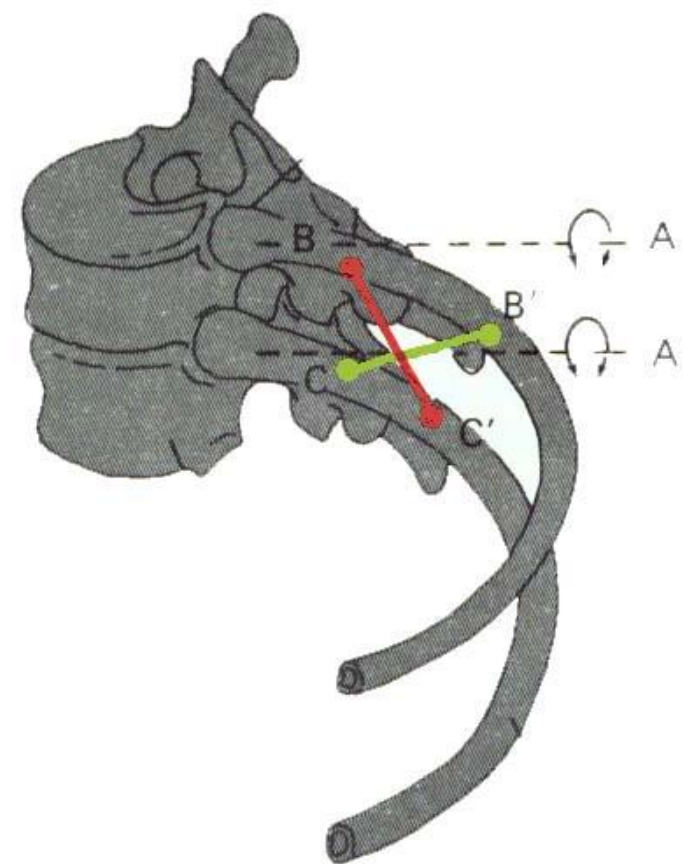
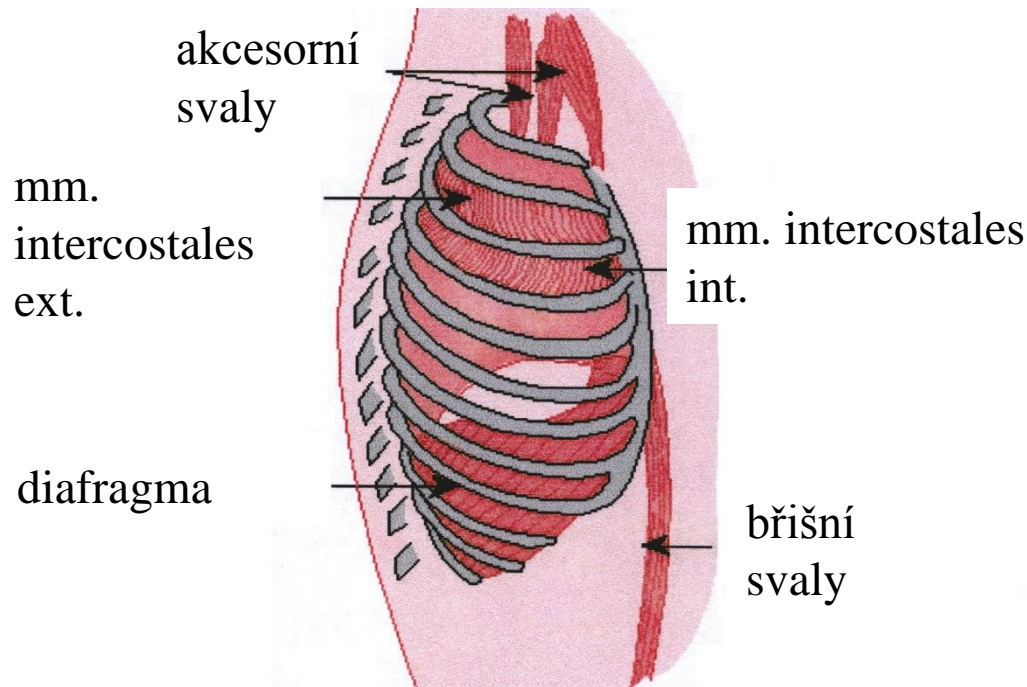
Klidový výdech pasivní
- elastické vlastnosti plic
a hrudního koše

Usilovný výdech je
aktivní

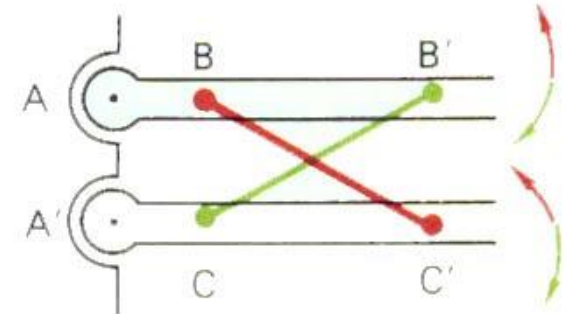
Mechanika dýchání

inspirační svaly

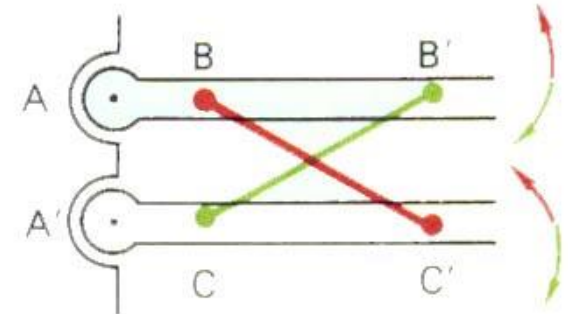
expirační svaly



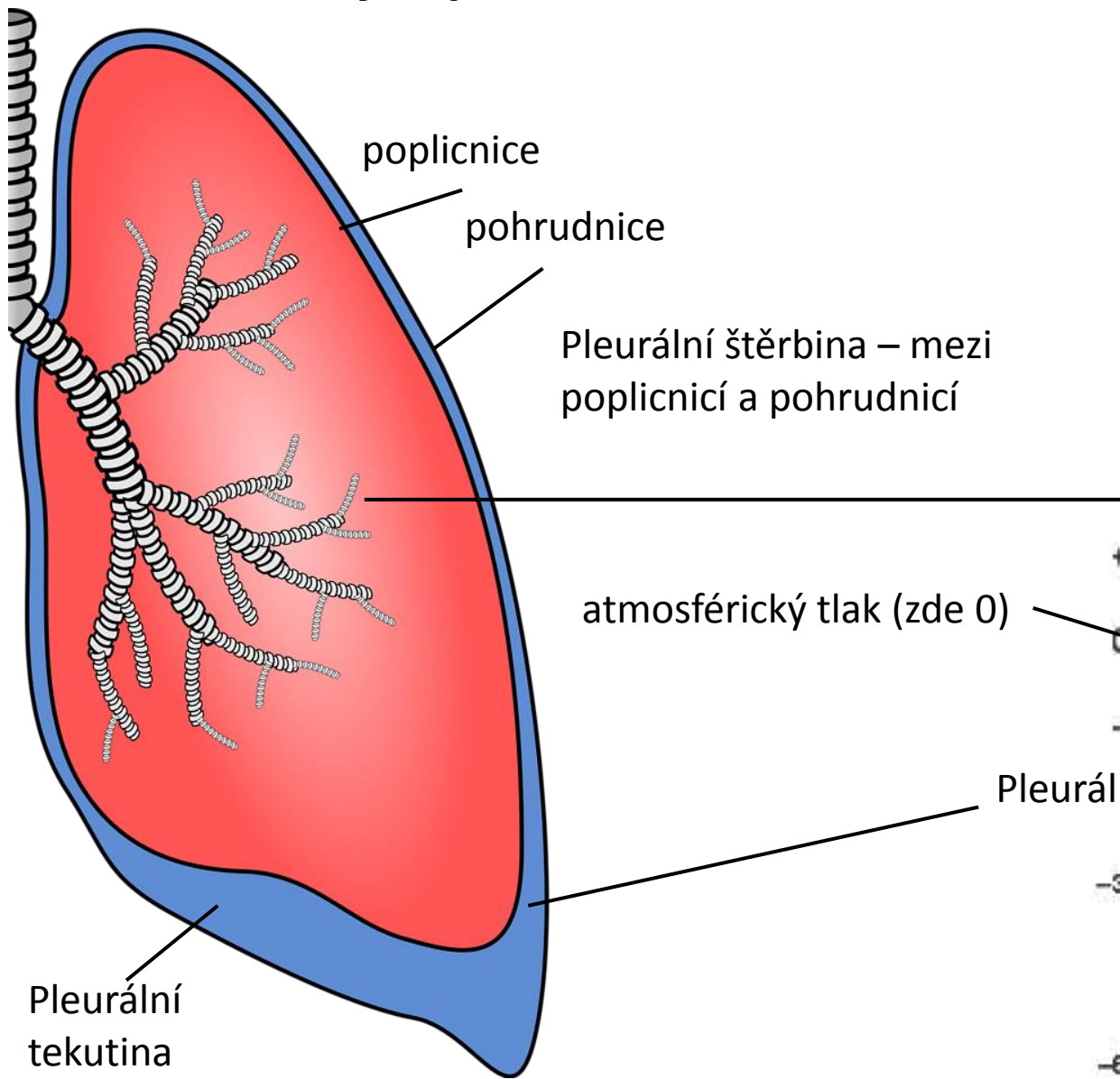
páka $A - B < A' - C' \rightarrow$ zvedání žeber



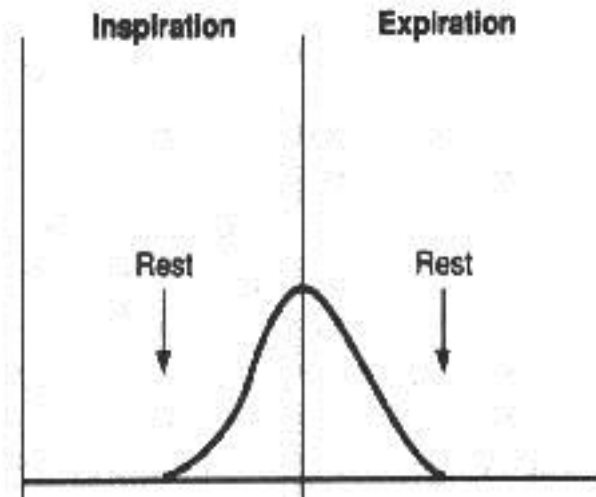
páka $A - B' > A' - C \rightarrow$ klesání žeber



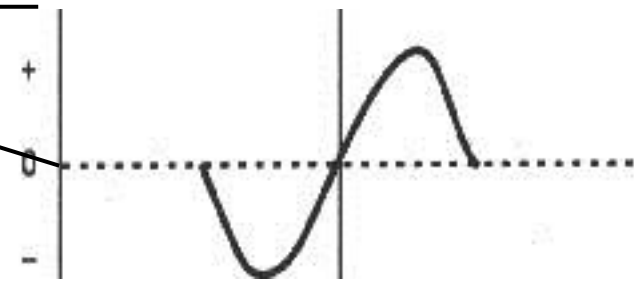
Tlaky v plicích



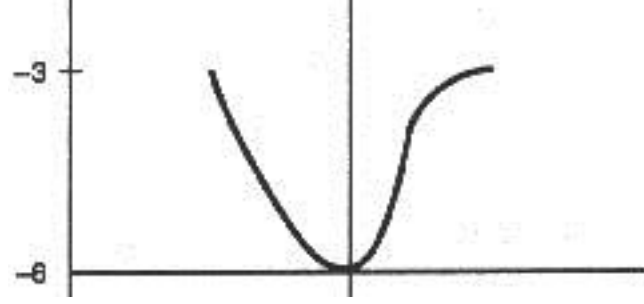
Objem vdechovaného vzduchu



Alveolární (pulmonální) tlak



Pleurální (šterbinový) tlak (vždy záporný)



Elastické vlastnosti plic

Plicní poddajnost (compliance): $C = \frac{\Delta V}{\Delta P}$ **Pozor, elasticita = 1/C**

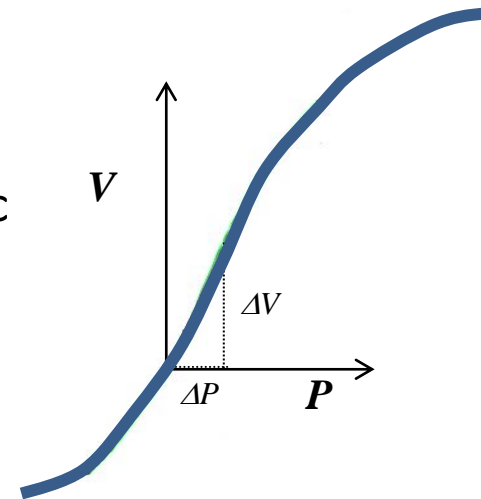
Dostatečná poddajnost usnadňuje nádech. Patologicky zvýšená poddajnost ztěžuje výdech (plicní emfyzém). Nízká poddajnost ztěžuje nádech.

Elasticita plic je dána:

- Vlastní tkáňovou elasticitou (vlákna elastinu a kolagenu)
- Silami povrchového napětí (síly povrchového napětí v alveolech: rozhraní tekutina-vzduch, surfaktantem)

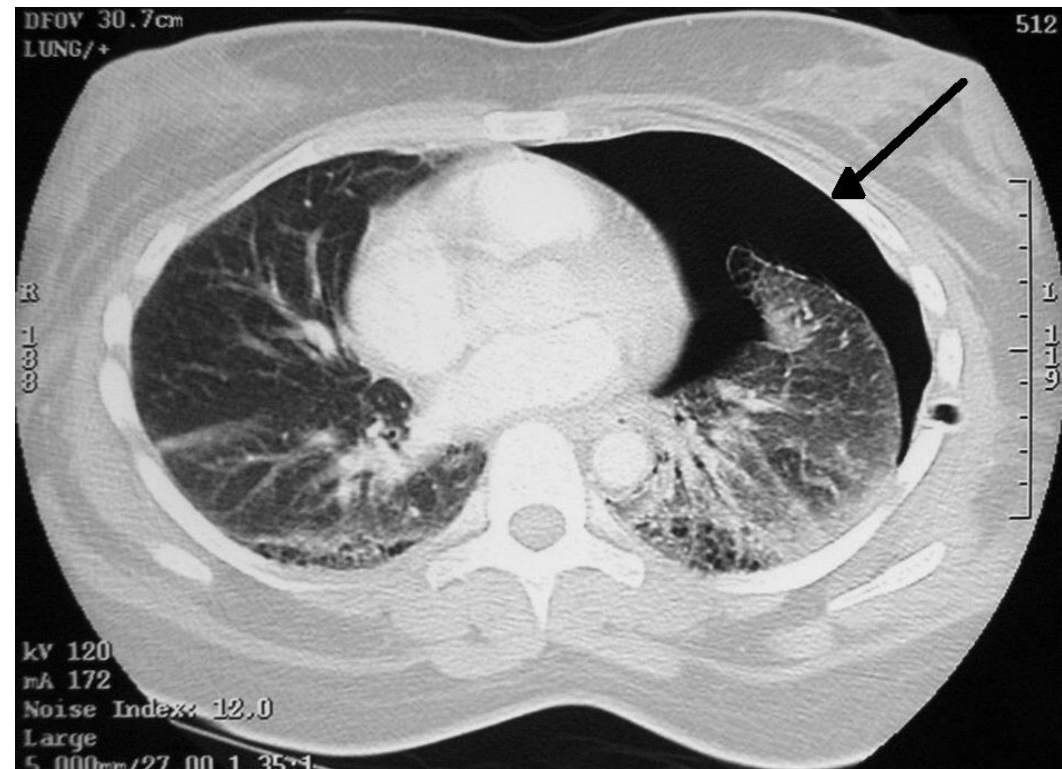
Dechová práce (ΔP , ΔV)

- Elastická (65%) – překonání elastických sil hrudníku a plic
- Dynamická práce (35%)
 - překonání odporu dýchacích cest (28%)
 - Překonání tření při vzájemném pohybu neelastických tkání (7%)

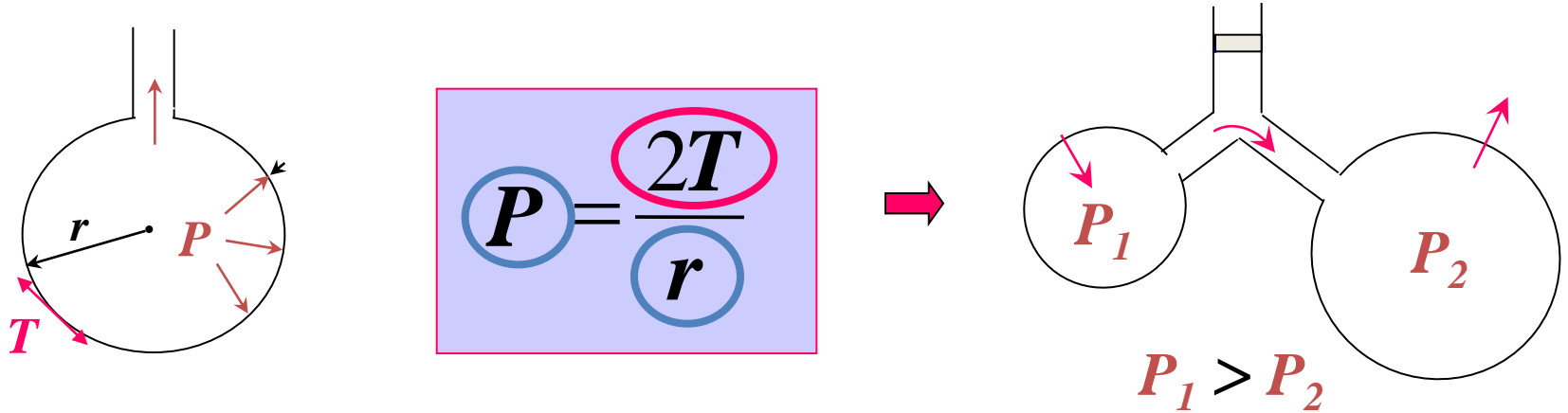


Pneumotorax

- nahromadění vzduchu či jiného plynu v pleurální dutině s částečným nebo úplným kolapsem plíce
- Může být traumatický (poranění hrudníku, zlomenina žeber), spontánní – není znám původ nebo důsledek onemocnění (CHOPN, cystická fibróza), či způsobený chirurgickým zákrokem
- Projevy: dušnost, bolest, vyšší odpor plic, snížení srdečního plnění, pokles krevního tlaku, snížená saturace krve kyslíkem,
- **Tenzní pneumotorax:** vzniká tzv. ventilovým mechanismem, kdy při nádechu proniká do pleurální dutiny vzduch a při výdechu se defekt uzavírá, čímž se vzduch hromadí v dutině. Nejnebezpečnější, protože vzduch hromadící se v dutině hrudní postupně utlačuje všechny orgány mediastina na nepostiženou stranu, čímž se utlačuje i druhá plíce, zhoršuje funkce srdce a hrozí poškození velkých cév.



Laplaceův zákon



P : tlak v alveolu, T : tenze alveolární stěny, r : poloměr alveolu

Tenze stěny alveolu je určována povrchovým napětím na rozhraní tekutina-vzduch

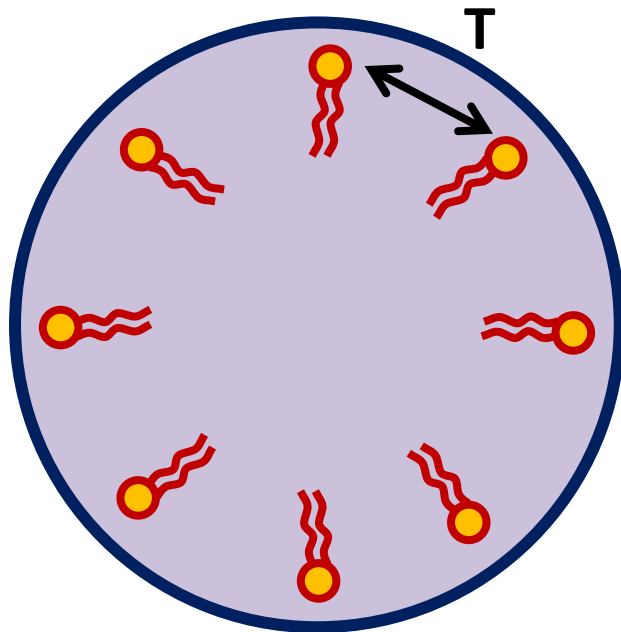
Laplaceův zákon (při konstantní tenzi):

čím větší je poloměr alveolu, tím menší je tlak v alveolu

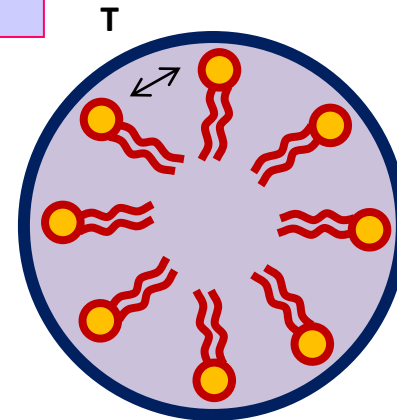
- docházelo by k přesunu vzduchu z menšího alveolu do většího
- kolaps menších alveolů

Plicní surfaktant

- tvořen pneumocytem II. typu
- snižuje povrchové napětí v závislosti na velikosti alveolu - čím menší je alveol, tím nižší je povrchové napětí
- zvyšuje poddajnost plic, snižuje dechovou práci
- fosfolipid (dipalmitoyl fosfatidyl cholin) – hydrofilní a lipofilní část



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



Statické plicní objemy a kapacity

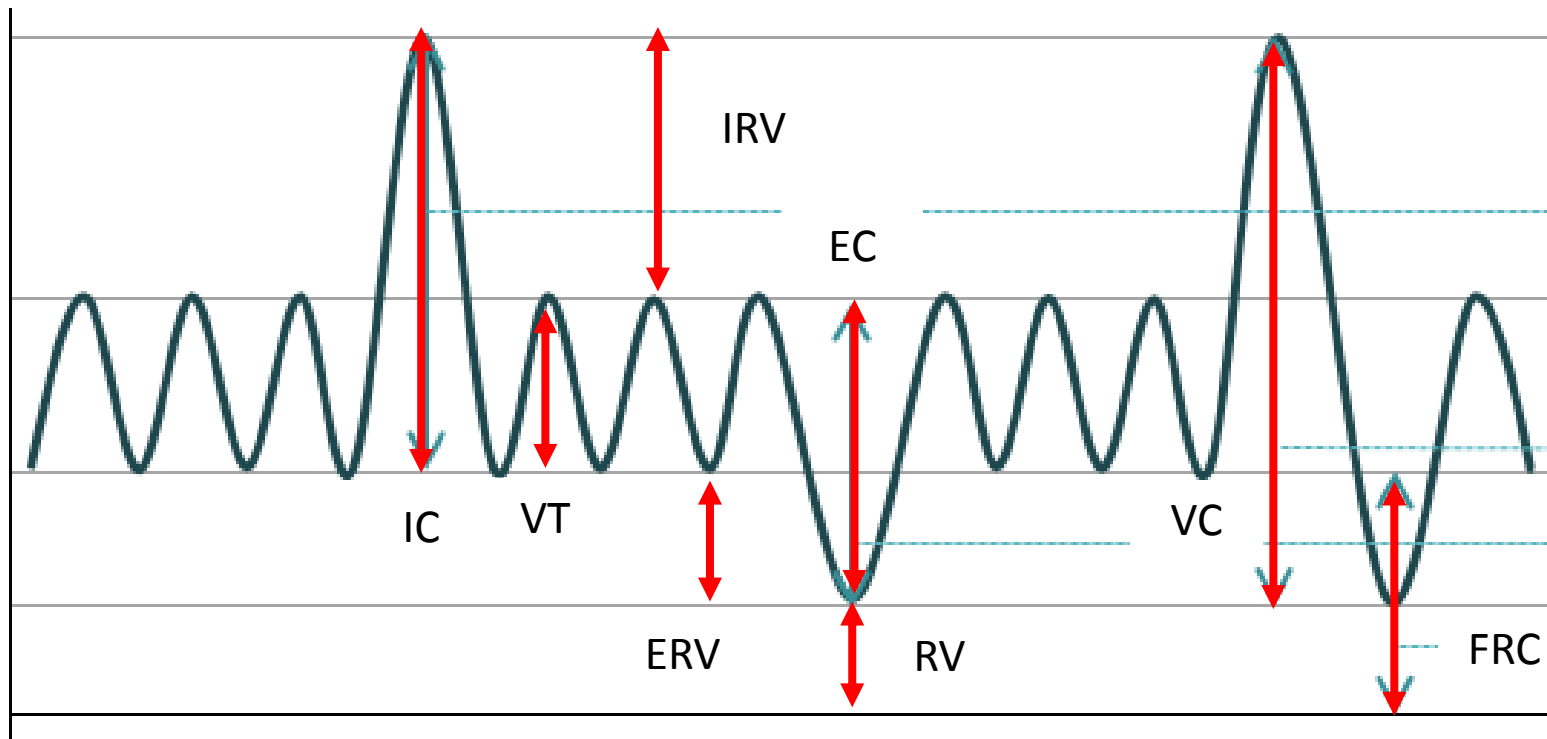
Statické plicní objemy:

- dechový objem VT (0,5 l)
- inspirační rezervní objem IRV (2,5 l)
- expirační rezervní objem ERV (1,5 l)
- reziduální objem RV (1,5 l)

Statické plicní kapacity:

- vitální kapacita plic VC (4,5 l) = IRV+VT+ERV
- celková kapacita plic TC (6 l) = IRV+DV+ERV+RV
- inspirační kapacita IC (3 l) = IRV+DV
- funkční reziduální kapacita FRC (3 l) = ERV+RV

- Závisí na výšce, váze, věku a pohlaví – (RV se zvyšuje, VC se snižuje s věkem)
- Všechny objemy lze měřit spirometricky kromě RV a FRC



Dynamické plicní parametry

- Dechová frekvence f
 - Klidová (12 – 15 dechů za minutu)
 - Maximální
- Minutová ventilace plic
 - Klidová MV (cca 8 l/min)
 - Maximální MMV (až 160 l/min)
 - Dechová rezerva = MMV/MV

Plicní poruchy

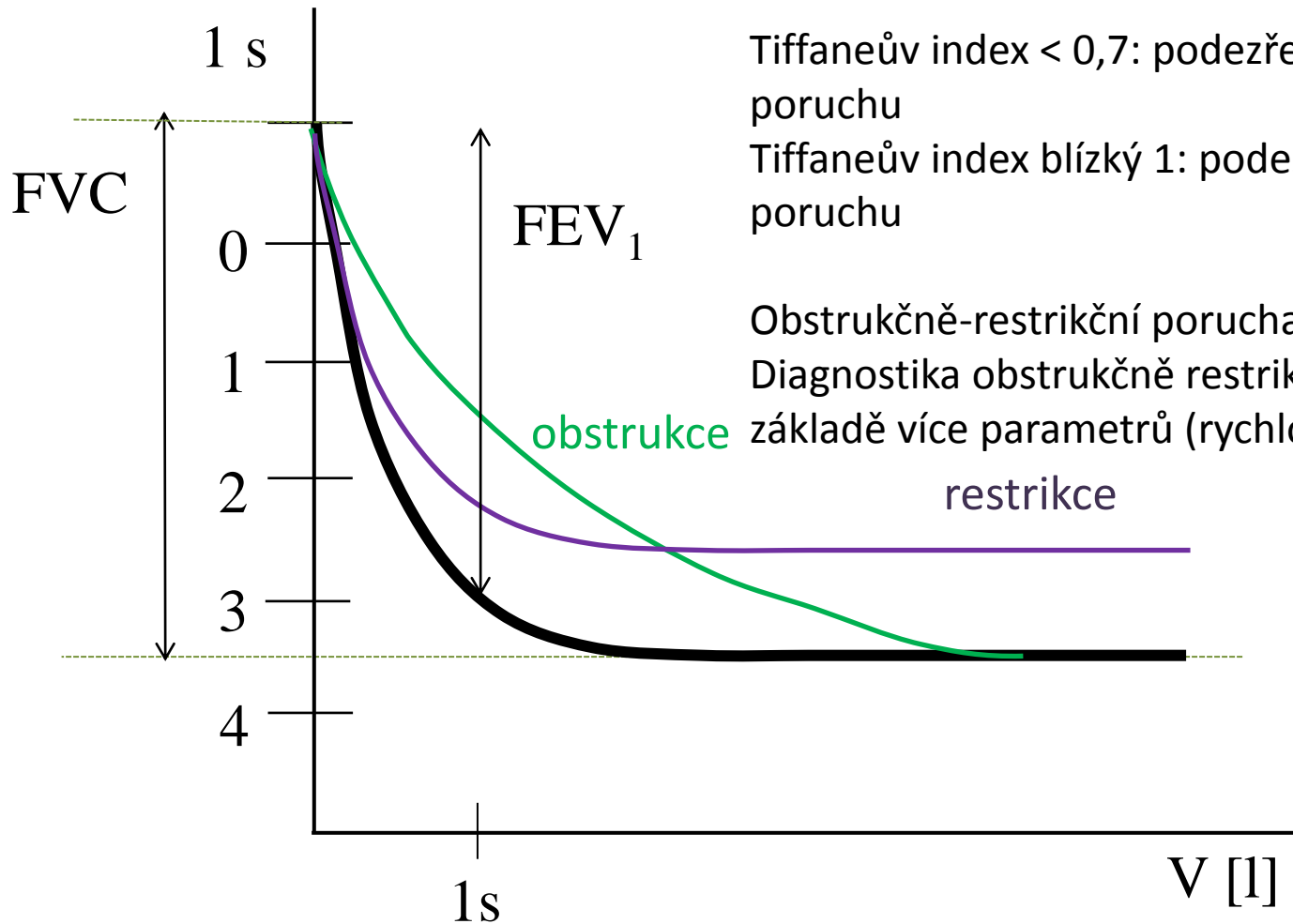
Obstrukce : zvýšený odpor dýchacích cest (astma, bronchitida, otok hlasivek,...)

Restrikce: snížené plicní objemy (nádor, zánět, otoky plic, pneumotorax,...)

Zvýšení dechové frekvence při konstantním dechovém objemu vede k relativnímu nárůstu mrtvého prostoru

Dynamické plicní parametry – usilovný výdech

- Usilovná vitální kapacita FVC
- Absolutní jednosekundová vitální kapacita FEV₁
- Relativní jednosekundová vitální kapacita (**Tiffaneův index**): $\frac{FEV_1}{FVC} \sim 0,7 - 0,8$



Tiffaneův index < 0,7: podezření na obstrukční poruchu

Tiffaneův index blízky 1: podezření na restriční poruchu

Obstrukčně-restriční porucha: index je nezměněn
Diagnostika obstrukčně restričních chorob probíhá na základě více parametrů (rychlost výdech, FEV_{0,5,...})

obstrukce

restrikce

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

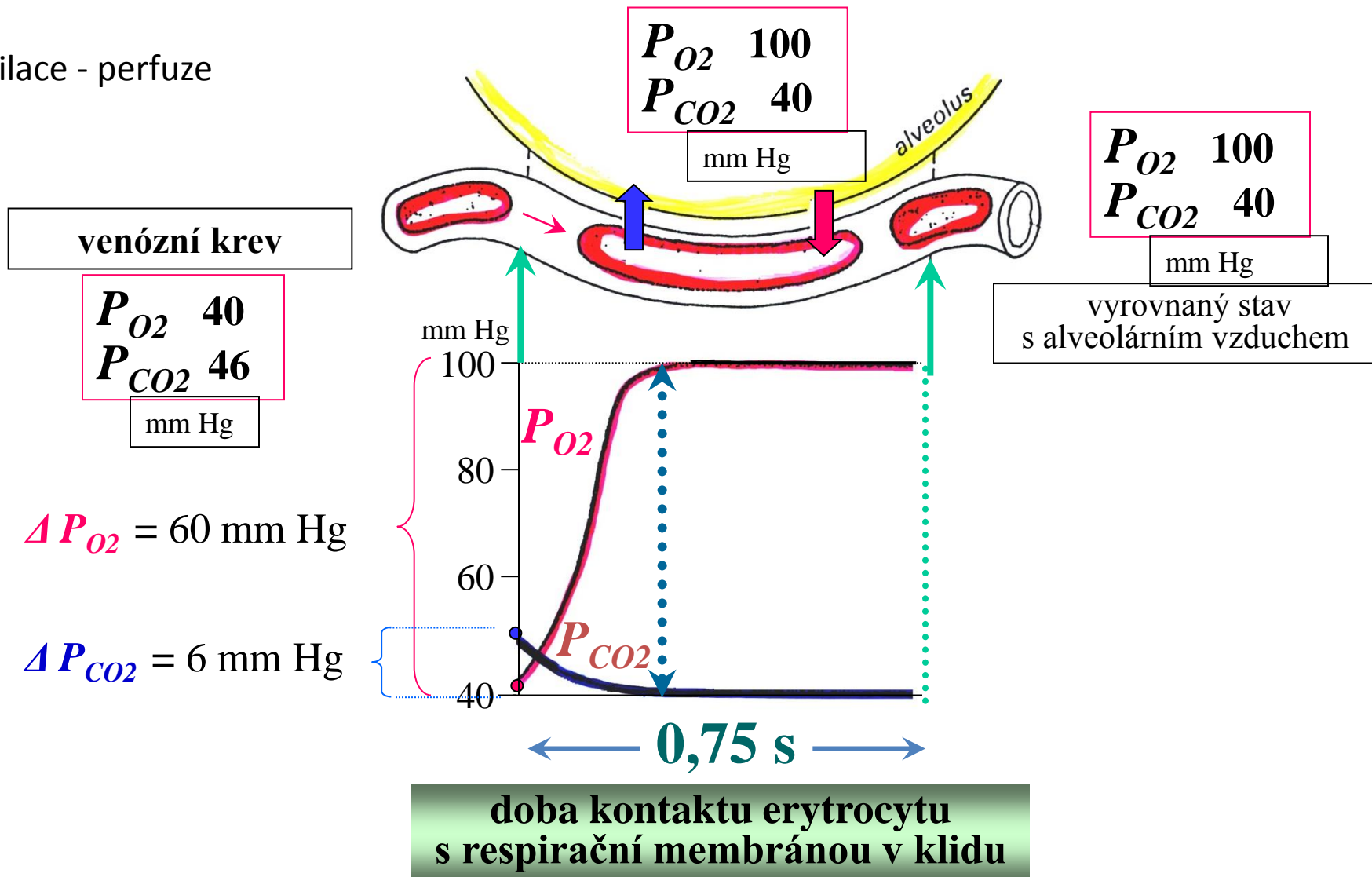
PARCIÁLNÍ TLAKY PLYNŮ SUCHÉHO VZDUCHU NA ÚROVNI MOŘE

$$\begin{aligned} P_{O_2} &= 760 \times 0,21 = \sim 160 \text{ mm Hg} \\ P_{N_2} &= 760 \times 0,78 = \sim 593 \text{ mm Hg} \\ P_{CO_2} &= 760 \times 0,0004 = \sim 0,3 \text{ mm Hg} \end{aligned}$$

1 kPa = 7,5 mm Hg (torr)

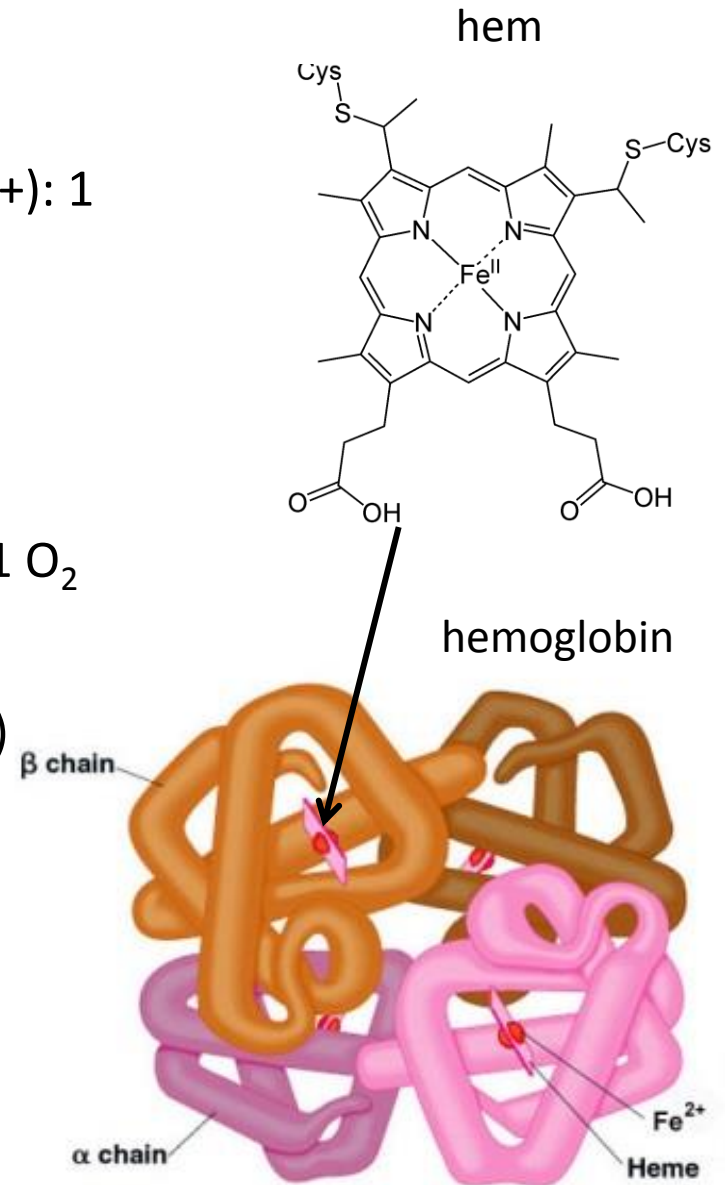
Časový průběh vyrovnávání pO_2 a pCO_2 v kapiláře s alveolárním vzduchem

Ventilace - perfuze



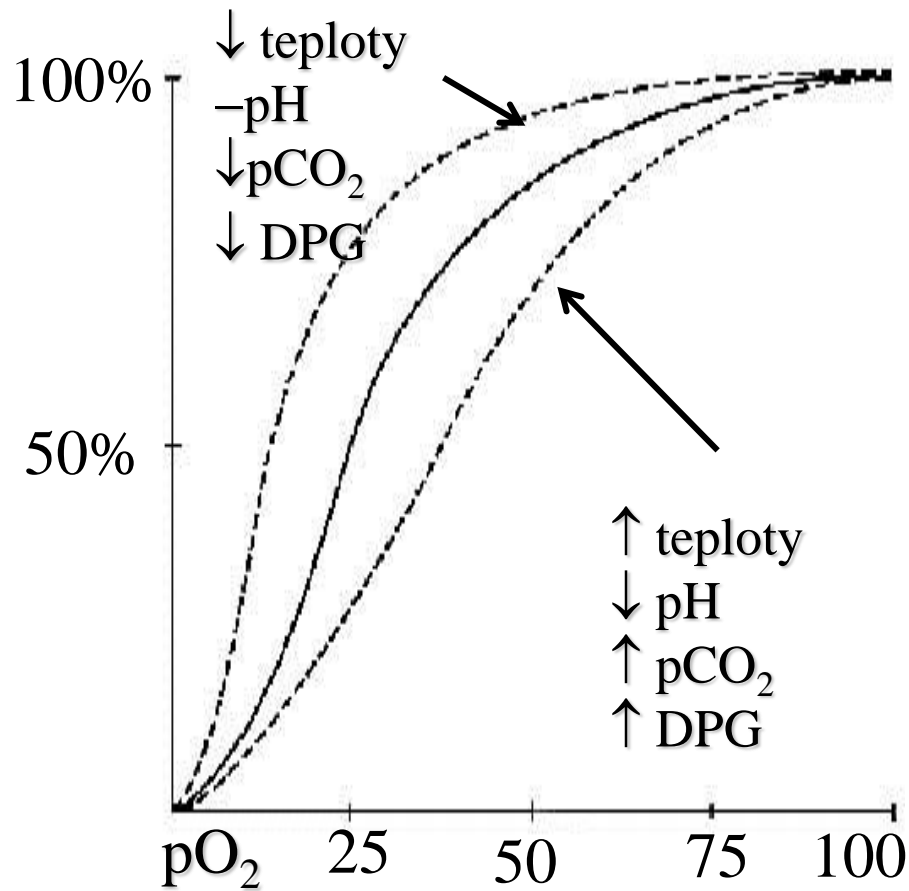
Transport kyslíku

- Většinou chemicky vázaný na hemoglobin (Fe^{2+}): 1 molekula hemoglobinu váže 4 molekuly O_2
- Méně fyzikálně rozpuštěný v plazmě (1,4%)
- Hemoglobin:
 - 2 α , 2 β podjednotky,
 - Každá podjednotka má 1 hem, který váže 1 O_2
→ hemoglobin váže 4 molekuly O_2
- Fetální hemoglobin (2 α , 2 γ , vysoká afinita k O_2)
- Methemoglobin (Fe^{3+})
- Karboxyhemoglobin (otrava CO)
- Karbaminohemoglobin (navázaný CO_2)
- Oxyhemoglobin (navázaný O_2)
- Deoxyhemoglobin (bez navázaného plynu)
- **Myoglobin** – váže O_2 ve svalu - 1 globinová jednotka+1 hem (váže jeden O_2) – vyšší afinita k O_2 , než má hemoglobin



<http://themedicallibrary.com/chemis/ypa/ge.org/images/hemoglobin.jpg>

Saturace hemoglobinu kyslíkem



Spotřeba kyslíku při zátěži

- **Kyslíkový dluh:** objem kyslíku po skončení práce, který převyšuje klidovou spotřebu kyslíku – slouží k doplnění rezerv po pracovní zátěži
- **Kyslíkový deficit:** Kyslíkový deficit vzniká nejčastěji v úvodní fázi svalové práce, zejména, vykonává-li se s větší intenzitou. Protože orgány dýchacího i krevního oběhu pracují s určitou setrvačností, nejsou schopné dodat kyslík okamžitě a úroveň jeho spotřeby se jen postupně přizpůsobuje jeho potřebám v pracujících svalových buňkách. Svalové buňky jsou v takovýchto podmínkách pro své kontrakce nuceny získávat energii anaerobním způsobem. Nepoměr mezi nároky a jeho skutečným přívodem vede k vytváření kyslíkového deficitu. Ten je tím větší, čím výraznější bylo zvýšení intenzity zatížení, které vedlo k jeho vytvoření. Při snížení zátěže se organismus opět navrací k dýchání aerobnímu.

Transport oxidu uhličitého

- fyzikálně rozpuštěný – 5%
- chemicky vázaný – KHCO₃ a NaHCO₃ –75-80%
- vazba na plazmatické bílkoviny – karbaminohemoglobin a karbaminoproteiny – 15-20%
- **v červených krvinkách:** enzym karbondehydrogenáza – urychluje tvorbu a rozklad H₂CO₃



Oxid uhličitý snižuje pH krve, funguje v krvi jako pufr

Hypoxie

nedostatek kyslíku ve tkáních (neplést s ischemií)

(ischemie – nedostatečné prokrvení tkáně – zahrnuje hypoxii, hyperkapnii, nahromadění metabolitů, nedostatek živin,....)

- Hypoxická hypoxie – méně pO₂ v arteriální krvi (menší % kyslíku ve vzduchu, vyšší nadmořská výška, porucha dýchacích svalů, dechového centra, opiáty, porucha ventilace-perfuze, snížená difuze přes alveolární membránu)
- Anemická hypoxie – porucha přenosu kyslíku krví (méně krvinek, méně hemoglobinu, nefunkční hemoglobin, otrava CO)
- Ischemická (cirkulační, stagnační) hypoxie – snížený průtok krve tkání (obstrukce arterie, selhávání srdce)
- Histotoxická hypoxie - porušené využití O₂ buňkami (toxiny, kyanid)

Hyperkapnie a hypokapnie

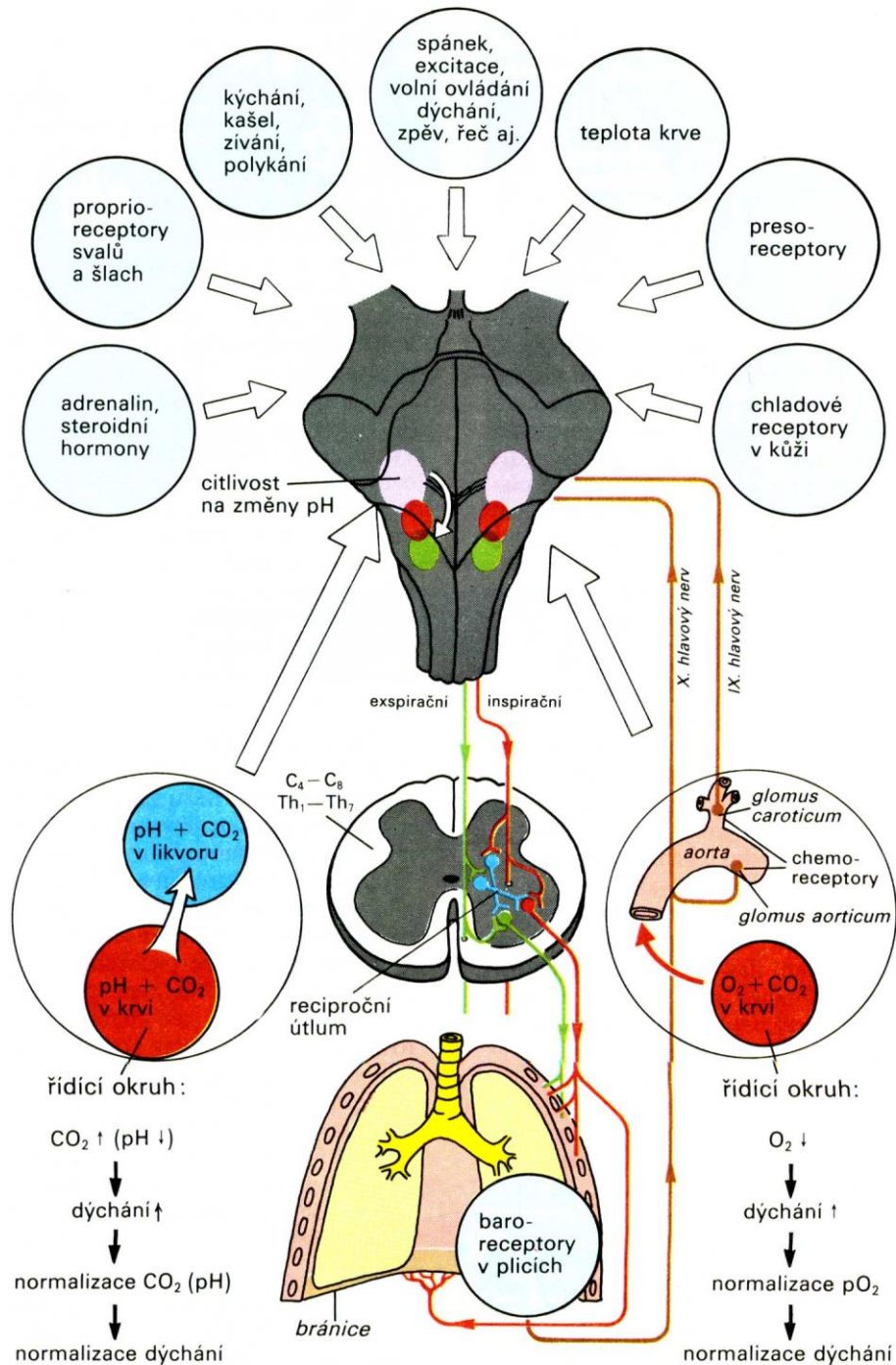
Hyperkapnie:

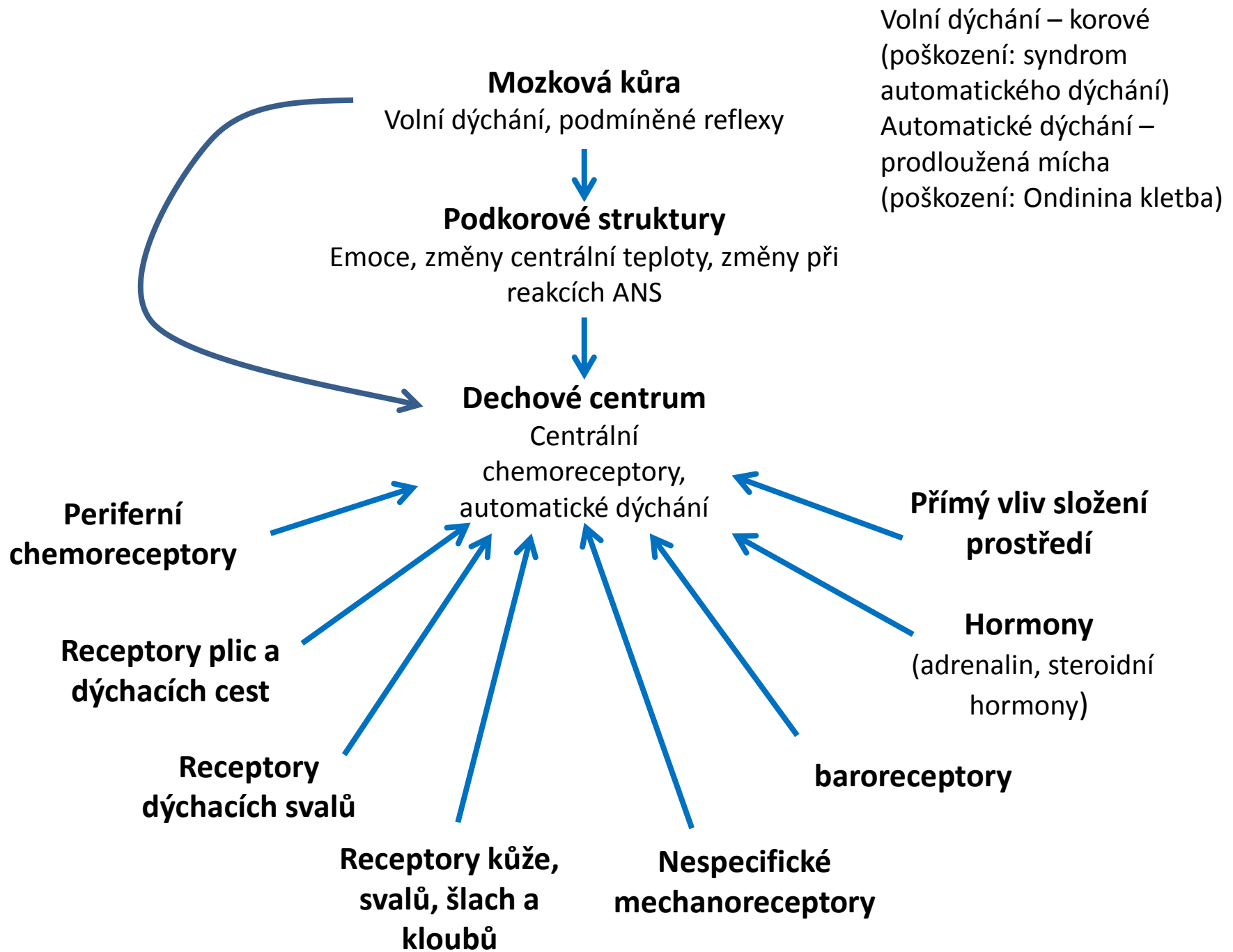
- Vyšší $p\text{CO}_2$
- snížené pH krve
- zmatenost, poruchy smyslové ostrosti, nakonec koma s útlumem dýchání a smrt

Hypokapnie:

- Hypoxie mozku díky vazokonstrikci cév - ztráta orientace, závratě, parestézie
- Zvýšené pH, při hyperventilaci – tetanické křeče, ztráta vědomí

Regulace dýchání





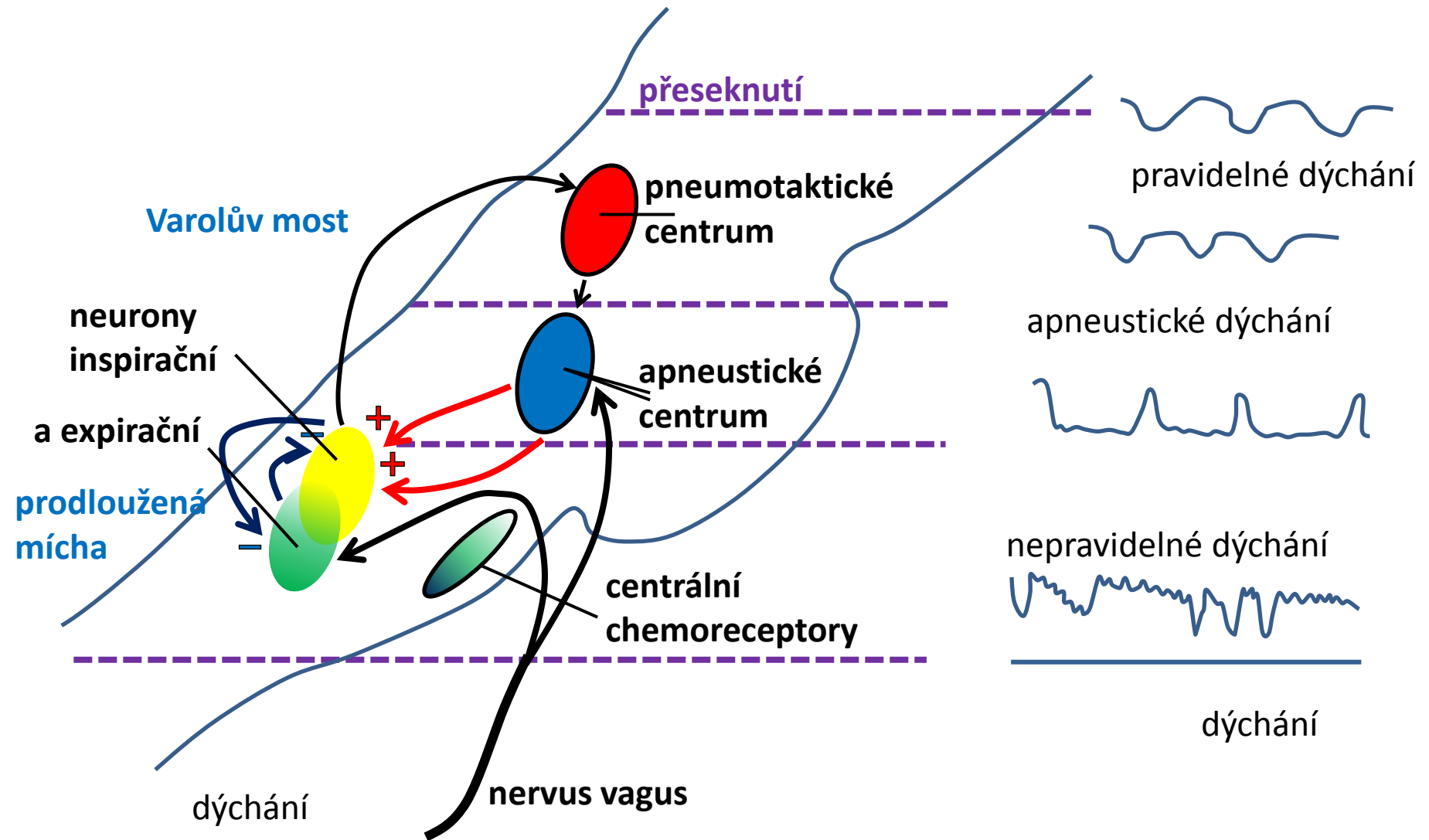
Dechové centrum – nervový regulace

- **Inspirační neurony**
 - aktivní po čas inspira,ia,
 - inervují nádechové svaly
- **Expirační neurony** – aktivní v čase expiria
 - v klidovém expiriu pouze inhibují aktivitu inspiračních neuronů
 - při usilovném výdechu aktivují výdechové svaly
- **Apneustické centrum**
 - Stimulace inspiračních neuronů
- **Pneumotaktické centrum**
 - Střídavě inhibuje a aktivuje apneustické centrum

Hormonální regulace

- Serotonin, acetylcholin, histamin, některé prostaglandiny stimulují dýchání
- Dopamin, noradrenalin a endorfiny tlumí dýchání

Dechové centrum



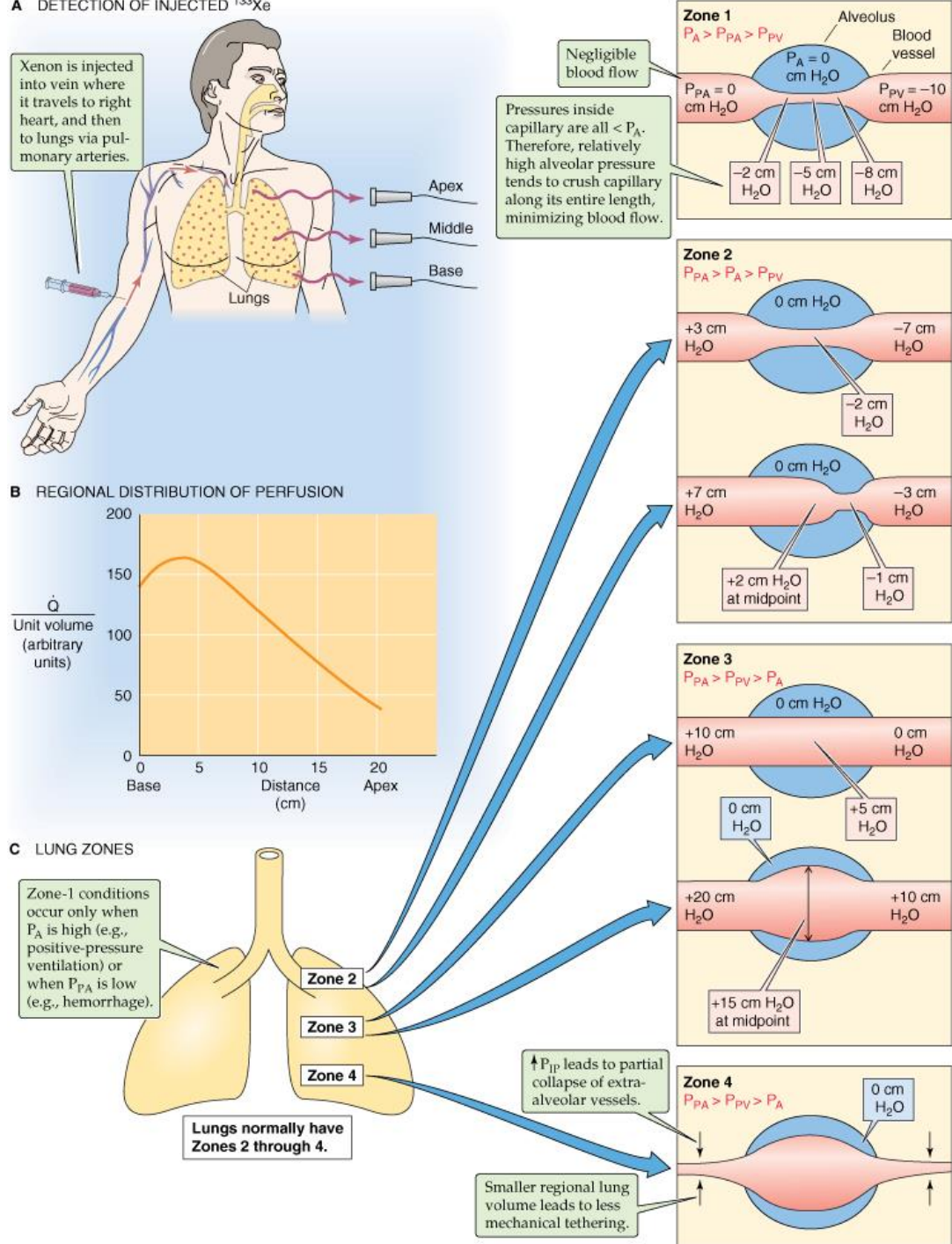
Ochranné a obranné dýchací reflexy

- **Kratschmerův apnoický reflex** – různé škodliviny a chemické látky podrážděním sliznice nosu vyvolají zpomalení až zástavu dýchání, laryngo a bronchokonstrikci – ochrana před průnikem škodliviny do plic
- **Diving reflex** – studený podnět na tváři a sliznici nosu vede k zástavě dýchání
- Laryngální chemoreflex – podráždění laryngeálních chemoreceptorů vyvolá apnoi, laryngo- a bronchokonstrikci, hypertenzi a bradykardii (zástava dechu a šetření kyslíku pro mozek a srdce během apnoe) – ochrana dolních dýchacích cest před vstupem škodlivých látek
- **Kýchání** – aktivované mechano a chemoreceptory v nose – silný nádech, zvýšení tlaku v plicích při zavřené hlasivkové štěrbině (kompresivní fáze), otevření štěrbin a vypuzení cizího tělesa nebo hlenu ven (explozivní fáze)
- **Kašel** - podobně jako kýchání, ale podrážděny jsou receptory laryngu, trachey a bronchů a cílem je posunout cizí těleso nebo hlen jen na laryngus
- **Expirační reflex** – prudká respirace při podráždění hlasivek – ochrana před vstupem tělesa do dolních dýchacích cest
- **Herring-breuerův reflex** - Zefektivňuje dýchání (není obranný). Velké protažení plic a hrudníku stimuluje n.vagus, vyvolá ukončení inspiria a zahájí expirium

Respirační sinusová arytmie

- Zvýšení srdeční frekvence v nádechu a snížení srdeční frekvence ve výdechu
- S hloubkou dýchání se prohlubuje respirační arytmie, při rychlejším dýchání vymizí
- Patrnější u mladších, s věkem vymizí
- Příčiny
 - Centrální generátor – iradiace impulzů z respiračního do kardiomotorického centra v prodloužené míše
 - Reflexy z receptorů rozpětí plic – útlum inspiračního i kardioinhibičního centra
 - Oscilace CO₂, pH, O₂ skrze chemoreceptory
 - Baroreflex
 - Bainbridgeův reflex
 - Změny protažení SA uzlu při nádechu vedou k rychlejšímu vzniku vzruchů

Ventilace - perfuze



KYSLÍKOVÁ KASKÁDA

mmHg

Suchý atmosferický vzduch	159
Zvlhčený zahřátý atmosferický vzduch	149
Ideální alveolární plyn	105
End-exspirovaný vzduch	105
Arteriální krev	77
Cytoplazma – mitochondrie	3-10
Smíšená žilní krev	40
Žilní krev	20

Efekt nadmořské výšky na sycení krve kyslíkem

(čísla v závorce jsou hodnoty po aklimatizaci)

výška	barometrický tlak (mmHg)	pO ₂ (mmHg)	pCO ₂ alveolární (mmHg)	pO ₂ alveolární saturace (%)
0	760	159	40 (40)	104 (104) 97 (97)
3 048	90 (92)	523	110	36 (23) 67 (77)
6 096	73 (85)	349	73	24 (10) 40 (53)
9 134	24 (38)	249	47	24 (7) 18 (30)
12 192		141	29	
15 240		87	18	

Dýchání s čistým kyslíkem

výška (m)	barometrický tlak (mmHg)	pCO ₂ alveolární (mmHg)	pO ₂ alveolární (mmHg)	arteriální saturace (%)
0	760	40	673	100
3 048	523	40	436	100
6 096	349	40	262	100
9 134	349	40	139	99
12 192	141	36	58	84
15 240	87	24	16	15

Adaptace na vyšší nadmořskou výšku:

- Zvýšení koncentrace erythropoetinu, stimulace erythropoézy, zvýšená viskozita krve,
- zvýšení koncentrace 2,3-DPG
- rozšíření kapilárního řečiště
- úprava acidobazické rovnováhy
- zvýšení počtu mitochondrií a myoglobulinu

Pracovní kapacita ve vysoké nadmořské výšce

work capacity

(compare with normal condition)

(%)

Unacclimatized

50

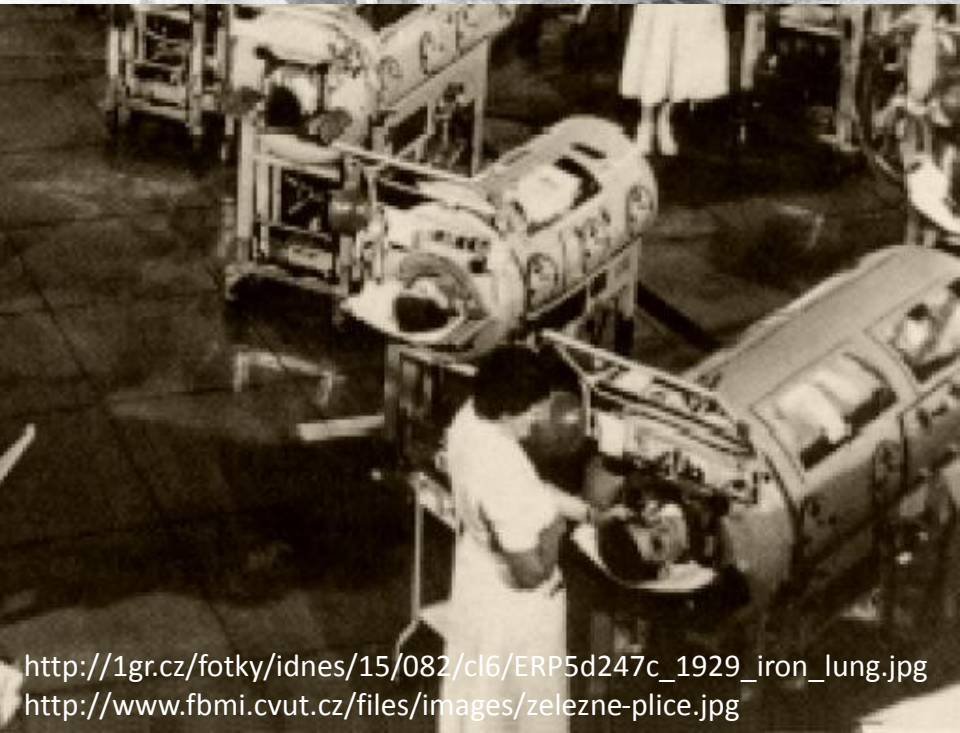
Acclimatized for 2 months

68

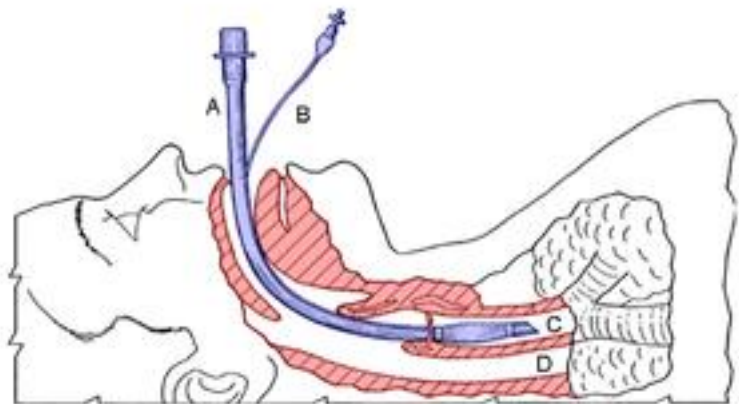
Native living at 4 023 m
but working at 5 182 m above sea level

87

Umělá ventilace plic



Umělá ventilace plic



http://www.osel.cz/_popisky/117_/s_1175071970.jpg

<http://img.mf.cz/335/641/2.jpg>

http://www.wikiskripta.eu/images/thumb/5/5d/Endotracheal_tube_colored.png/300px-Endotracheal_tube_colored.png

Receptory dýchacích cest

Receptory dolních cest dýchacích

- Receptory rozpětí plic
 - Inflační receptory – inflační reflex – při vysokém rozpětí plic utlumují apneustické centrum – zastavení inspiria
 - **Hering-Breureův reflex** – vysoké rozpětí plic stimuluje aferentní n. vagus a zastaví další inspirium, u dospělého reflex spíše zajišťuje efektivitu dýchání, ale není životně důležitý
- receptory vyvolávající kašel
- Dráždivé receptory citlivé na chemické látky – hyperpnoe, bronchokonstrikce, tvorba hlenu

Receptory dýchacích svalů - svalová a šlachová vřeténka bránice a mezižebních svalů (účast na kašli, zvracení)

Nespecifické receptory

- Okulokardiální a okulorespirační reflex – tlak na oční bulby způsobí zpomalení dýchání
- Arteriální baroreceptory – mění dechový vzor
- Kožní receptory – stimulace receptorů bolesti vyvolává hluboký nádech, tepelné receptory vedou ke zrychlenému mělkému dýchání
- Proprioreceptory svalů a kloubů – stimulace dýchání při tělesné námaze

Receptory dýchacích cest

Receptory plic a dýchacích cest

- Inflační receptory – receptory rozpětí dýchacích cest v průdušnici a průduškách
- Receptory reagující na mechanické nebo chemické podráždění dýchacích cest, ve sliznici větvení průdušek
- Receptory v alveolárních septech
- Receptory horních dýchacích cest
 - Receptory sliznice nosu (čichové, tepelné, mechanické podněty)
 - Nazopulmonální a nazotorakální reflexy – udržení tonusu dýchacích svalů
 - Receptory nasofaryngu a orofaryngu – aspirační reflexy
- **Receptory hrtanu**
 - Mechanoreceptory – změny tlaku
 - Chladové receptory – registrace průtoku vzduchu
 - Dráždivé receptory – mechano- a chemoreceptory – citlivé na podráždění mechanicky, chemickou látkou, vodou – chrání před jejím vdechnutím