

Respirační systém I

(mechanika dýchání, vitální kapacita,
transport plynů)

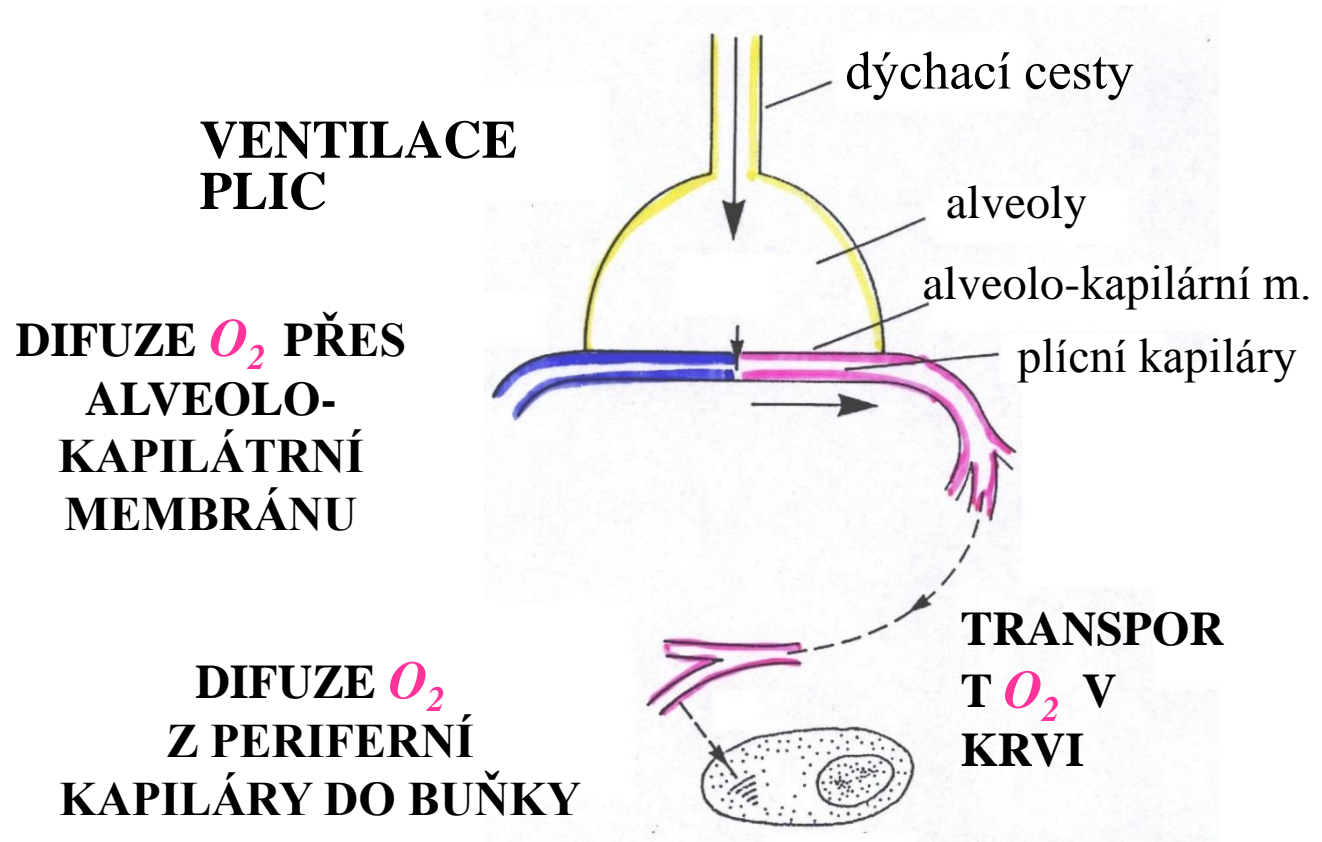
Dýchání

Soubor procesů sloužící k výměně dýchacích a krevních plynů

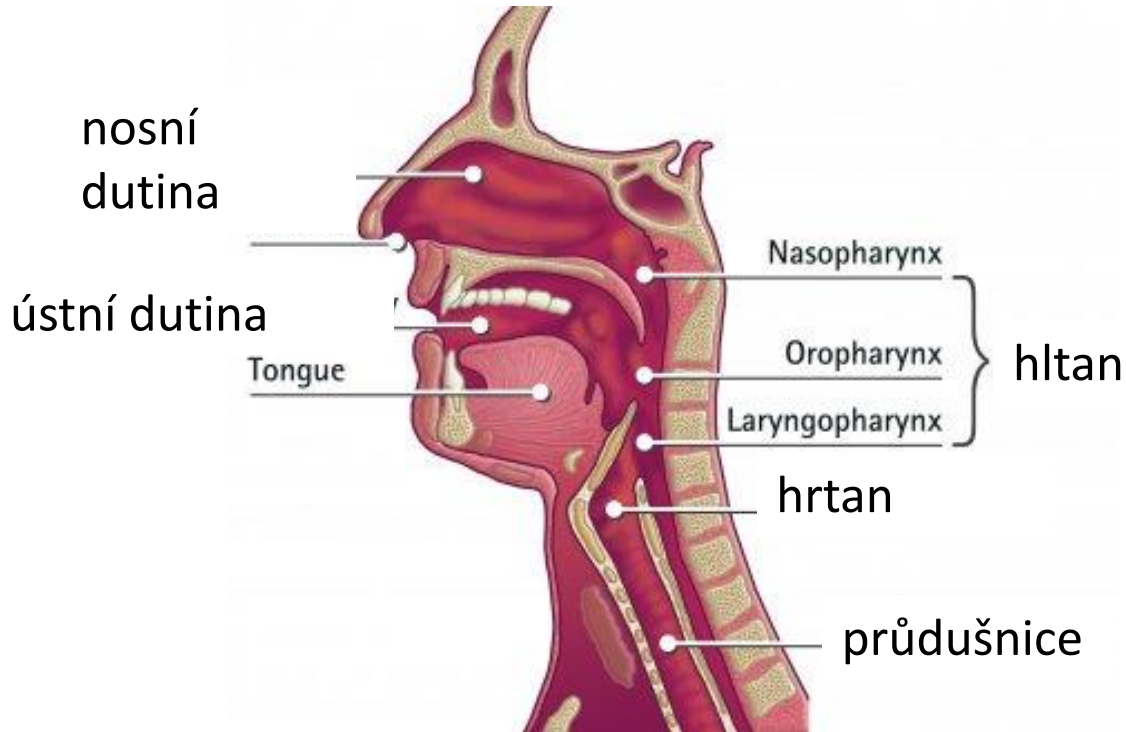
- mezi vnějším prostředním a plícemi – vnější dýchání
- mezi krví a tkání – vnitřní dýchání

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)

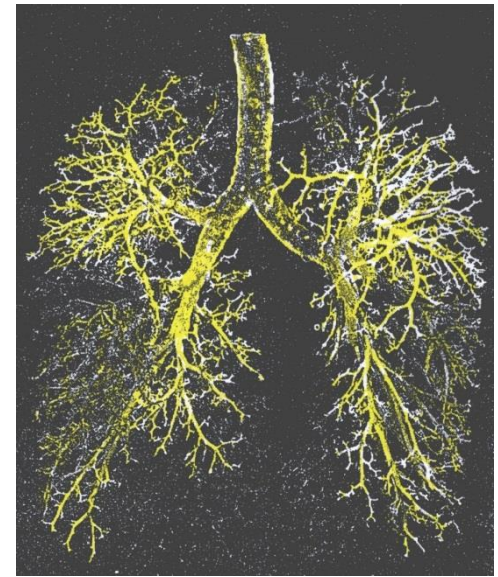
- Bohatě prokrvené a inervované
- **Funkce** senzitivní, ochranná (filtrace, ochranné reflexy), ohřívání a vlhčení vdechovaného vzduchu, hlasová

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)



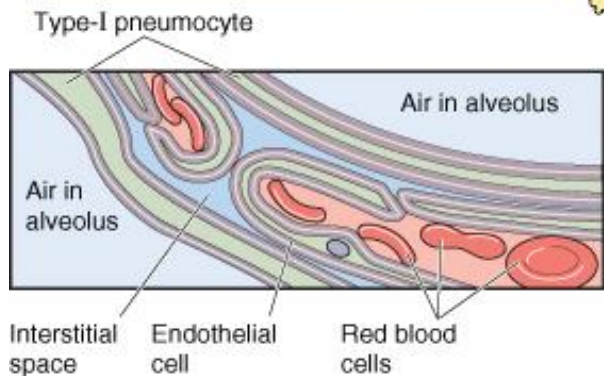
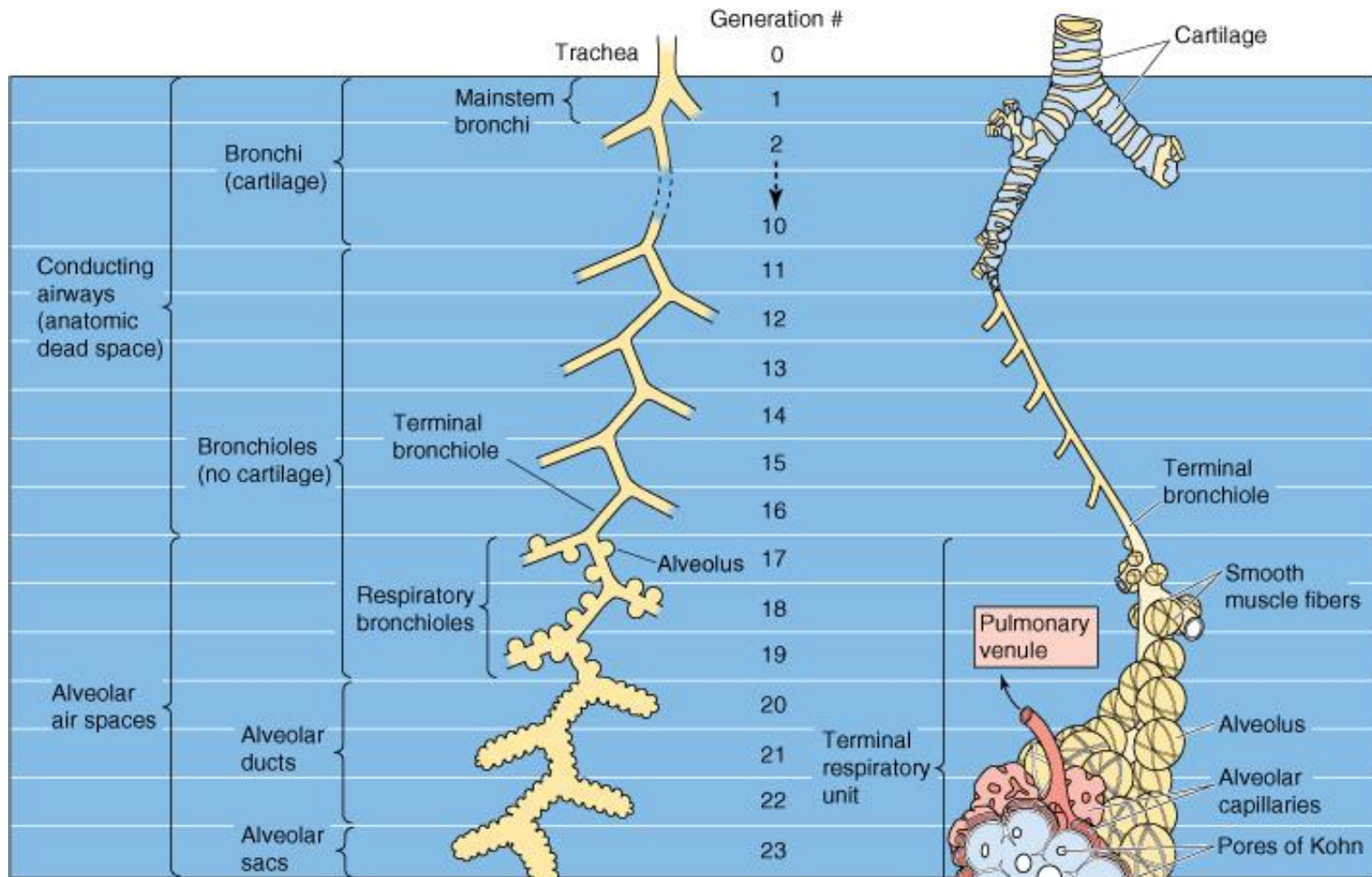
Konduktivní zóna

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

Acinus, přechodná a respirační zóna

- výměna dýchacích plynů

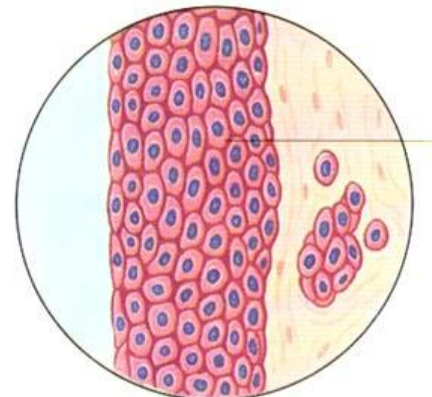
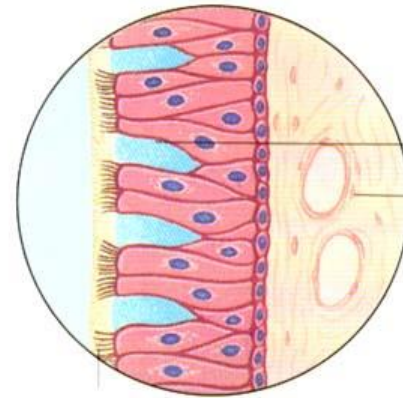
Základní jednotka plicní tkáně: plicní lalůček (acinus)



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

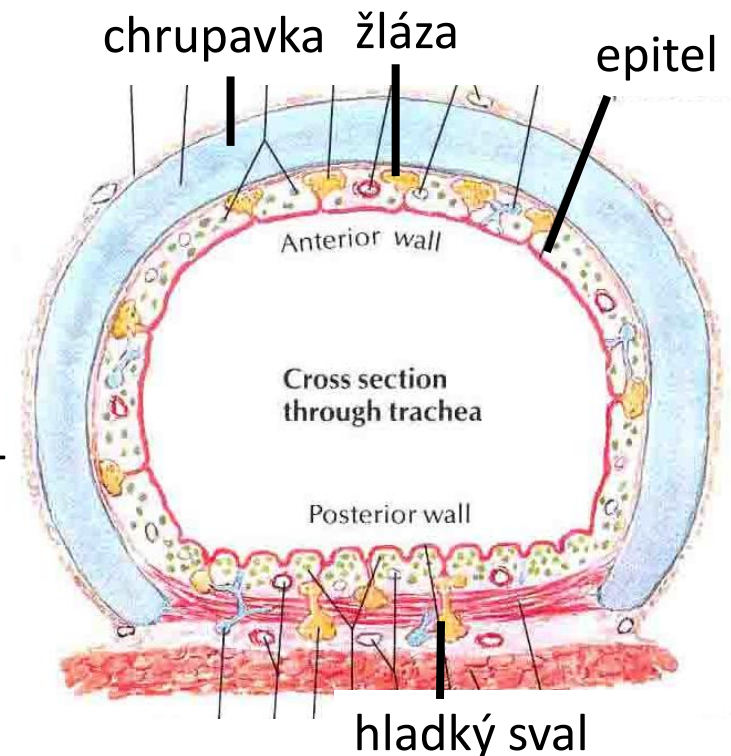
Průdušnice a průdušky

- 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

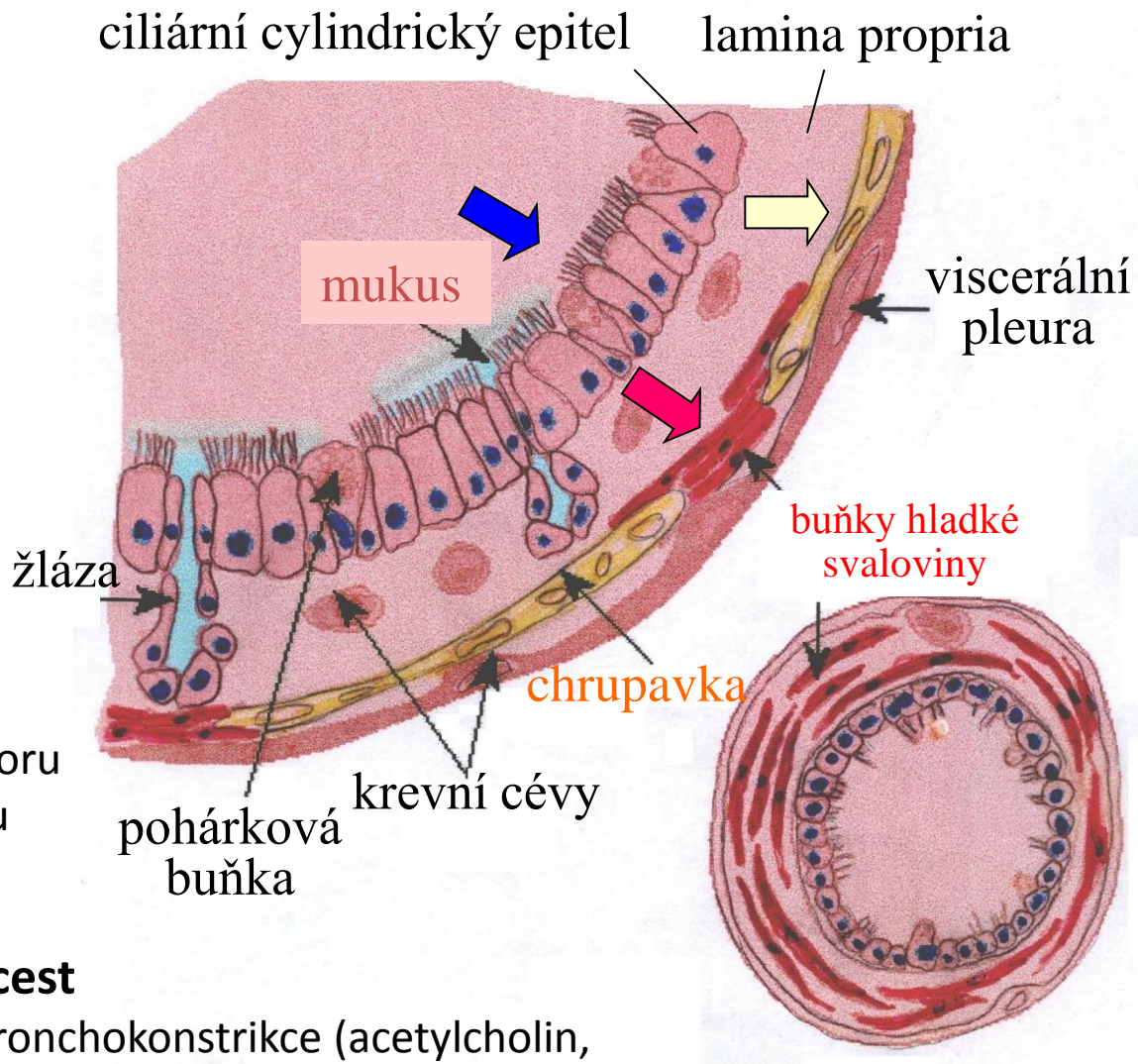
η - viskozita

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

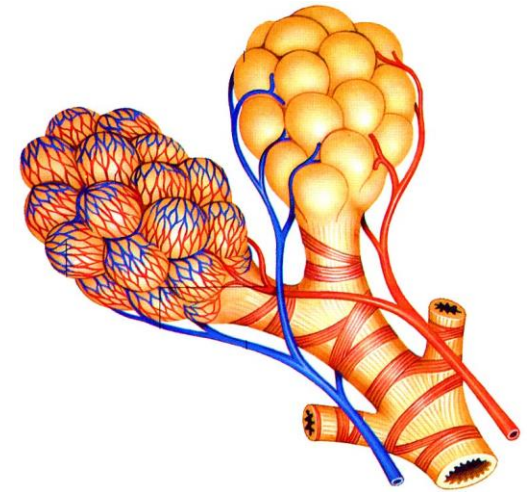
Průměr alveolů: 0,1 – 0,3 mm

Počet alveolů: 300 – 400 milionů

Plocha alveolů: 50 – 100 m²

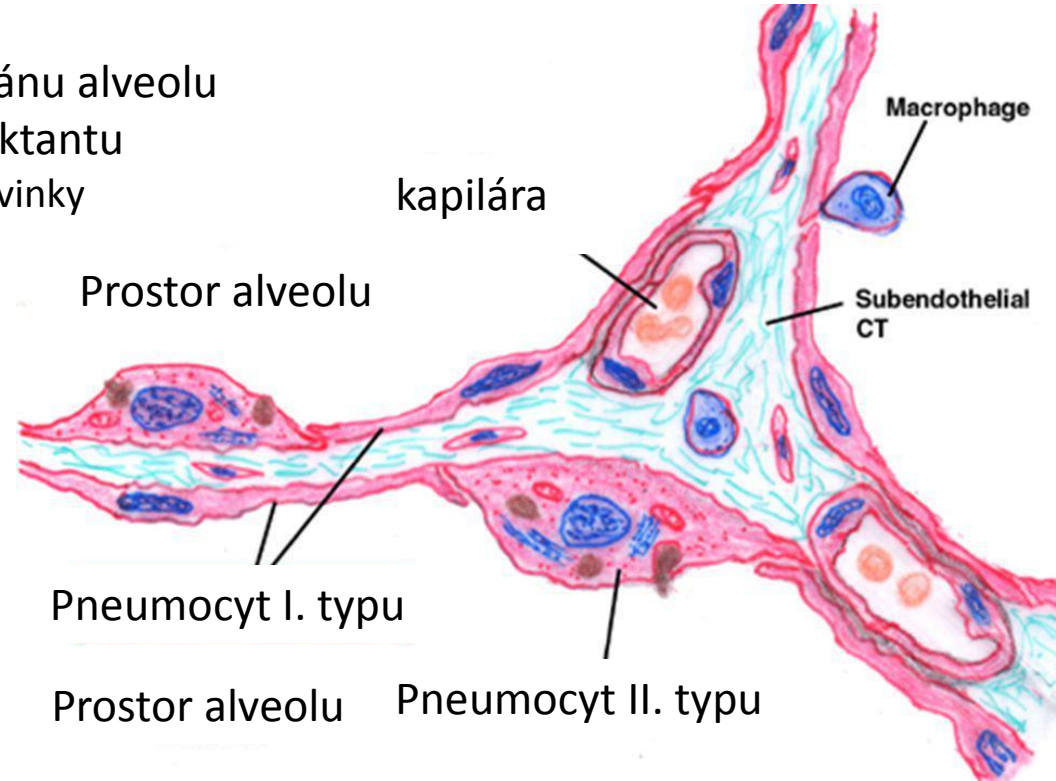
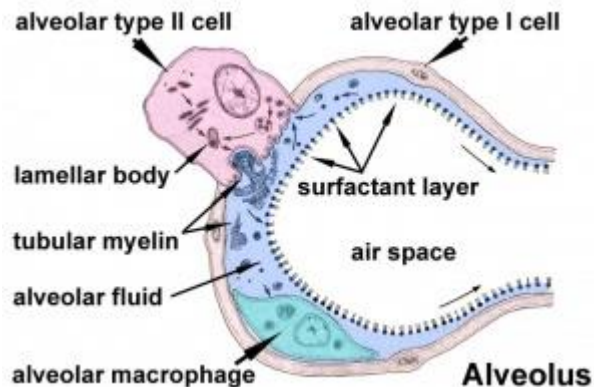
Tloušťka alveolu: desetina μm

→ **Účinná výměna plynů**



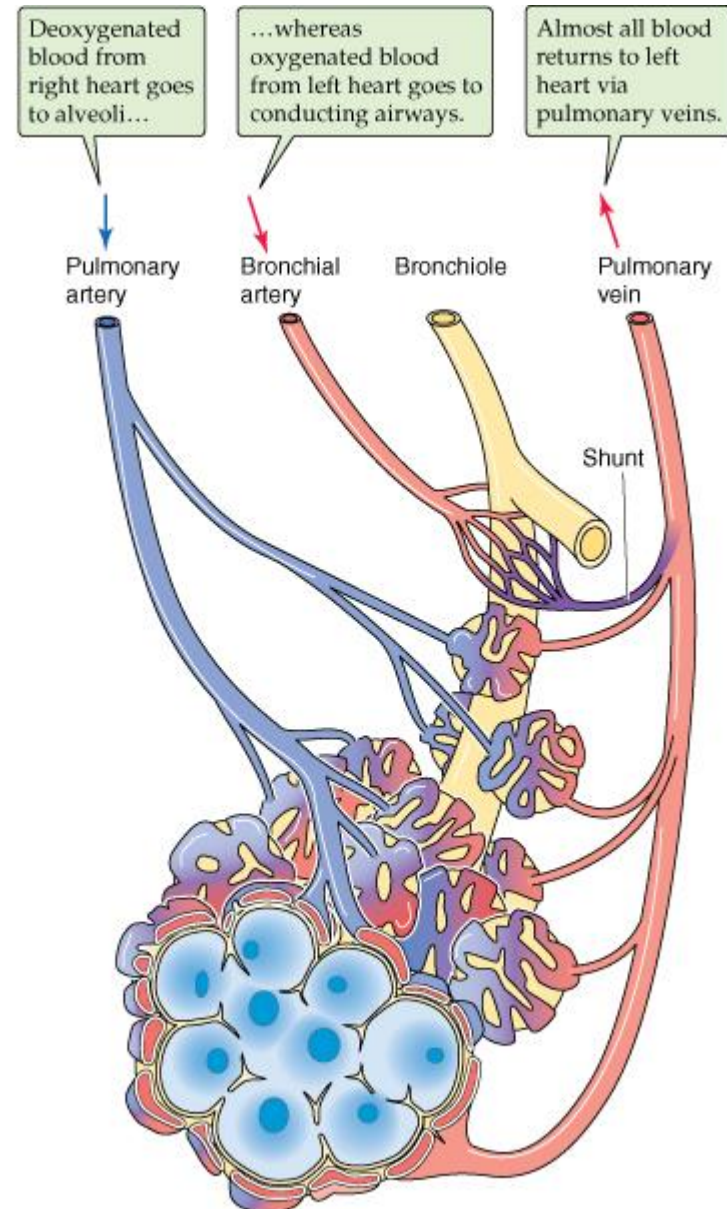
Složení alveolu

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



Plicní oběh

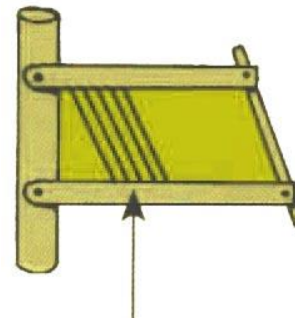
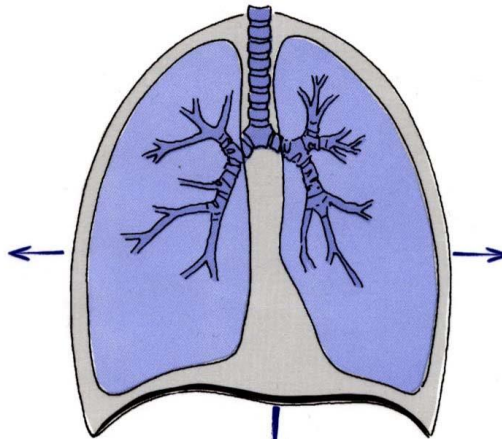
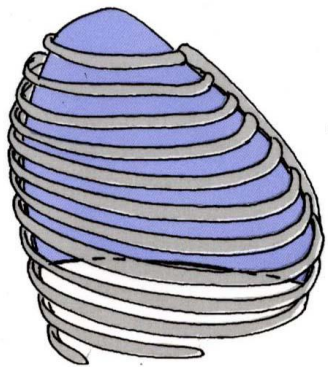
- **oběh**
 - **funkční** (okysličení krve, krev z pravé komory)
 - **nutriční** (výživa plic, 2% oběhu, krev z levé komory)



Mechanika dýchání

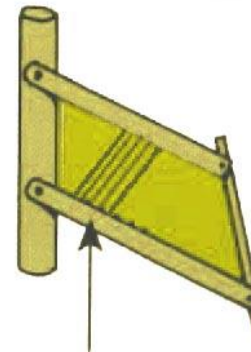
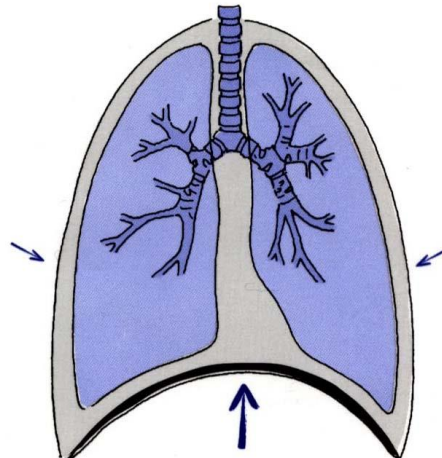
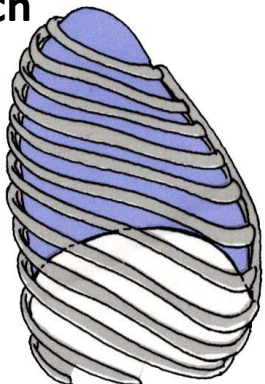
- Hlavní nádechové svaly: bránice (80 % dechové práce, inervuje n. phrenicus), zevní mezižební svaly (mm. intercostales externi)
- Pomocné dýchací svaly: m. sternocleidomastoideus, skupina skalenových svalů
- Výdechové svaly: vnitřní mezižební svaly, svaly přední stěny břišní

nádech



Nádech je aktivní

výdech



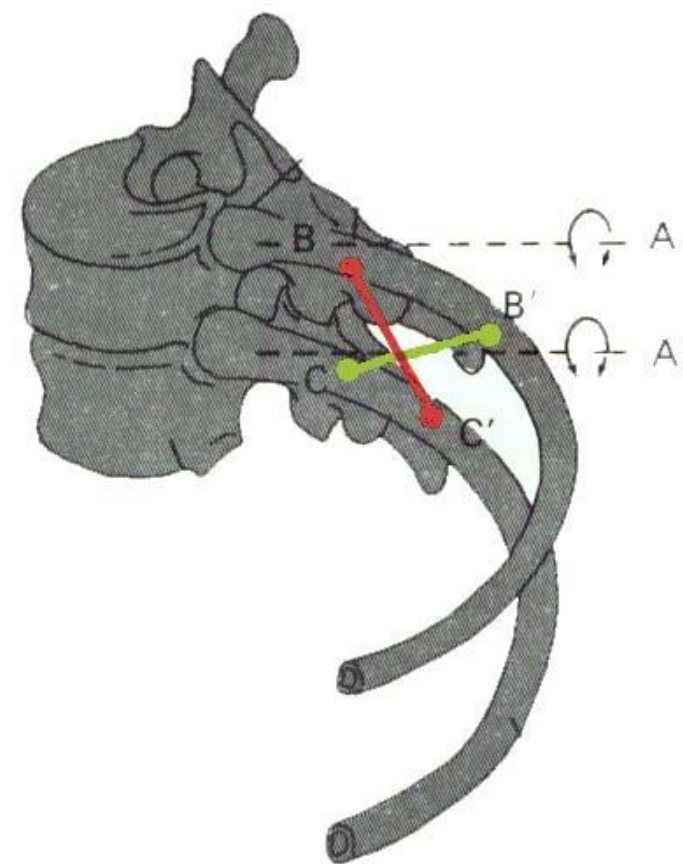
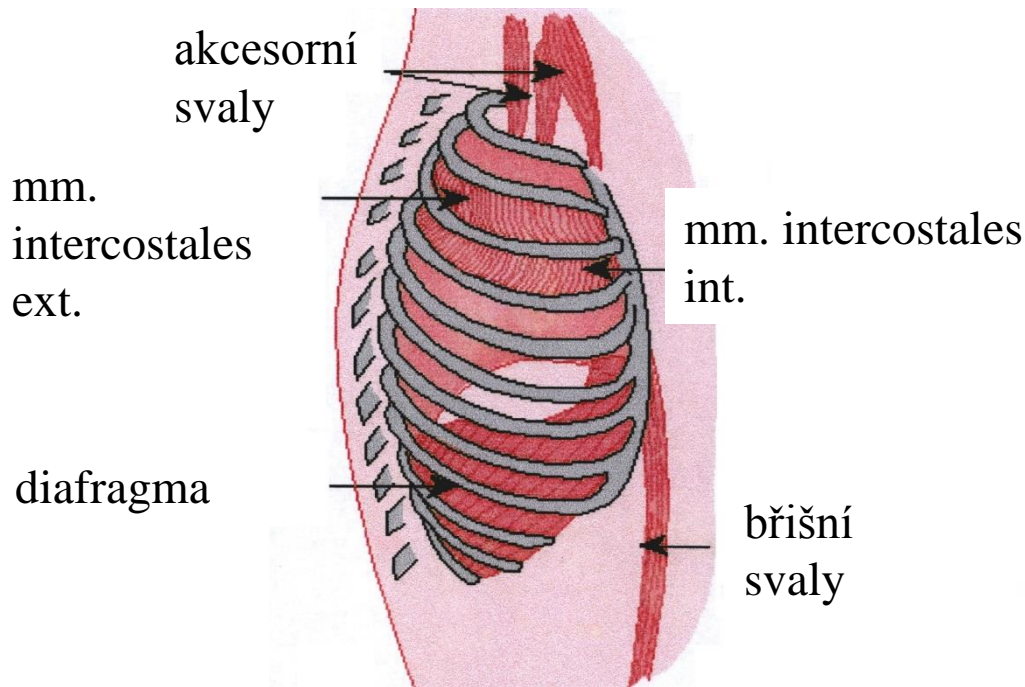
Klidový výdech pasivní
- elastické vlastnosti plic
a hrudního koše

Usilovný výdech je
aktivní

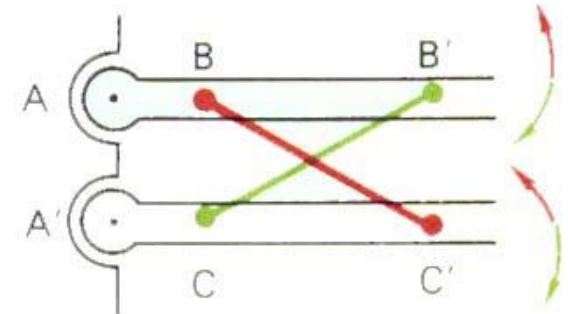
Mechanika dýchání

inspirační svaly

expirační svaly

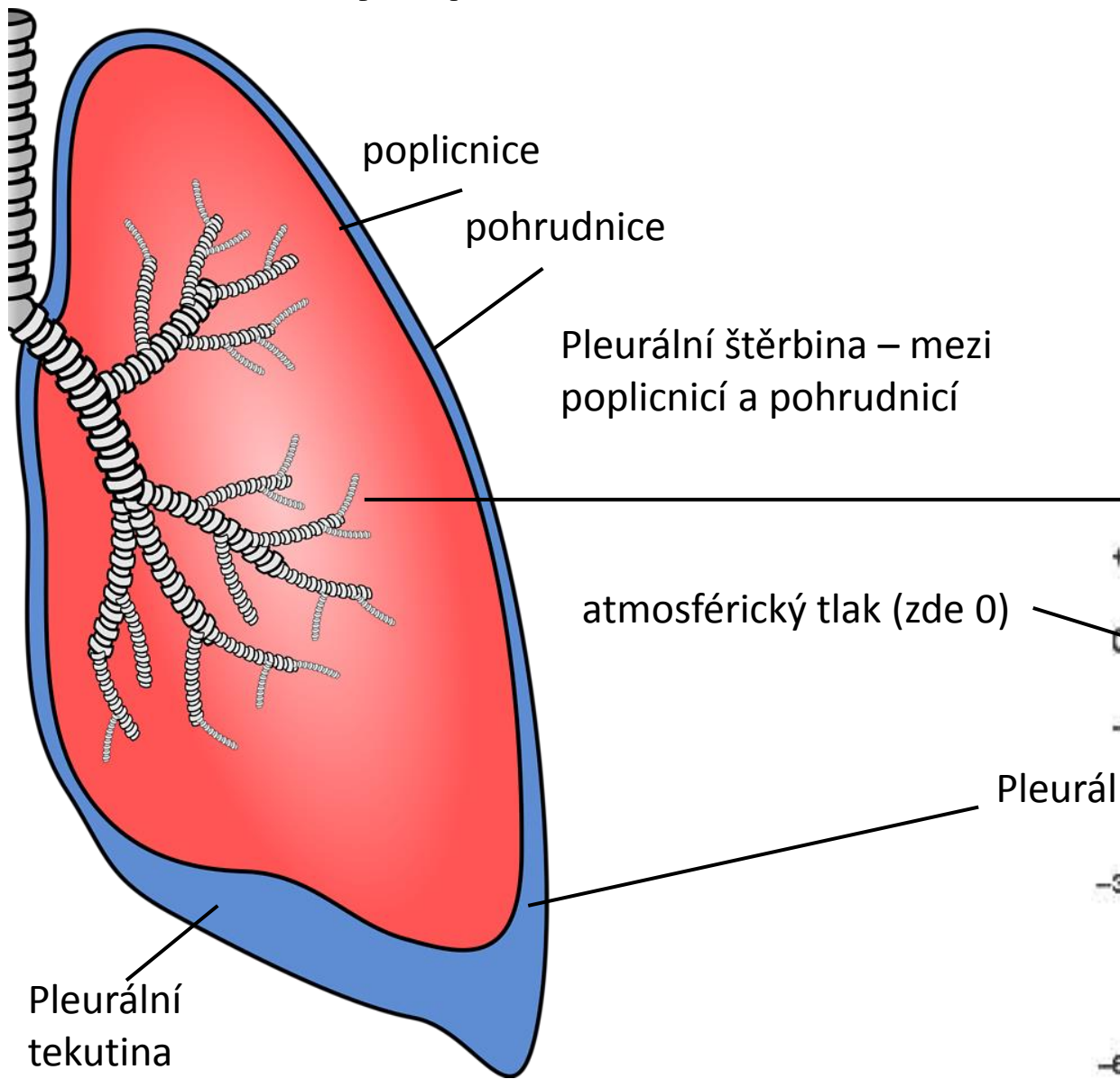


páka $A - B < A' - C' \rightarrow$ zvedání žeber



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

Tlaky v plicích



poplicnice

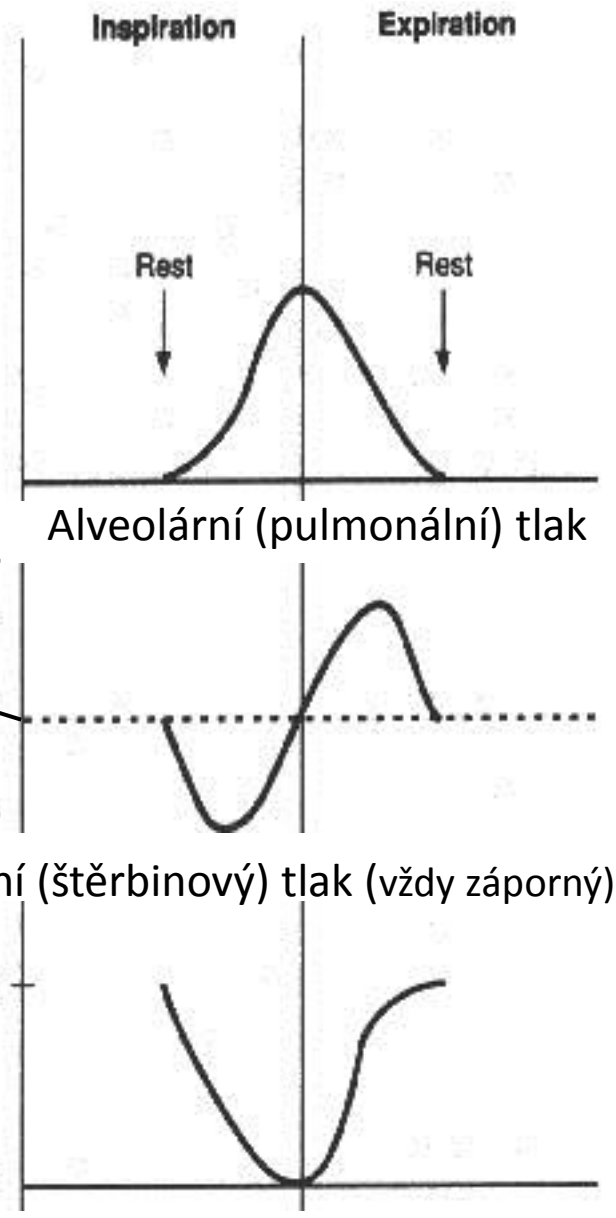
pohrudnice

Pleurální šterbina – mezi poplicnicí a pohrudnicí

atmosférický tlak (zde 0)

Pleurální tekutina

Objem vdechovaného vzduchu



Inspiration

Expiration

Rest

Rest

Alveolární (pulmonální) tlak

+

0

-

Pleurální (šterbinový) tlak (vždy záporný)

0

0

0

Elastické vlastnosti plic

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

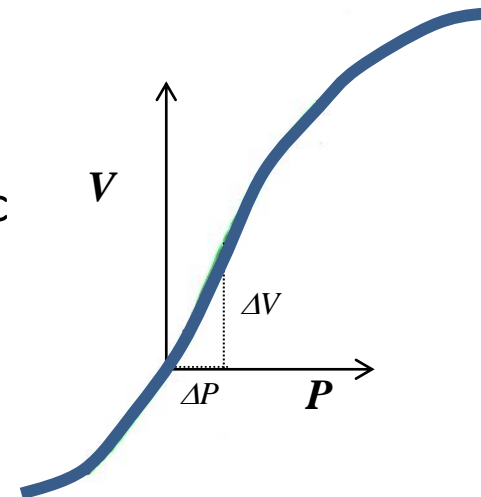
Dostatečná poddajnost usnadňuje nádech. Patologicky zvýšená poddajnost ztěžuje výdech (plicní emfyzém). Nízká poddajnost ztěžuje nádech.

Elasticita plic je dána:

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

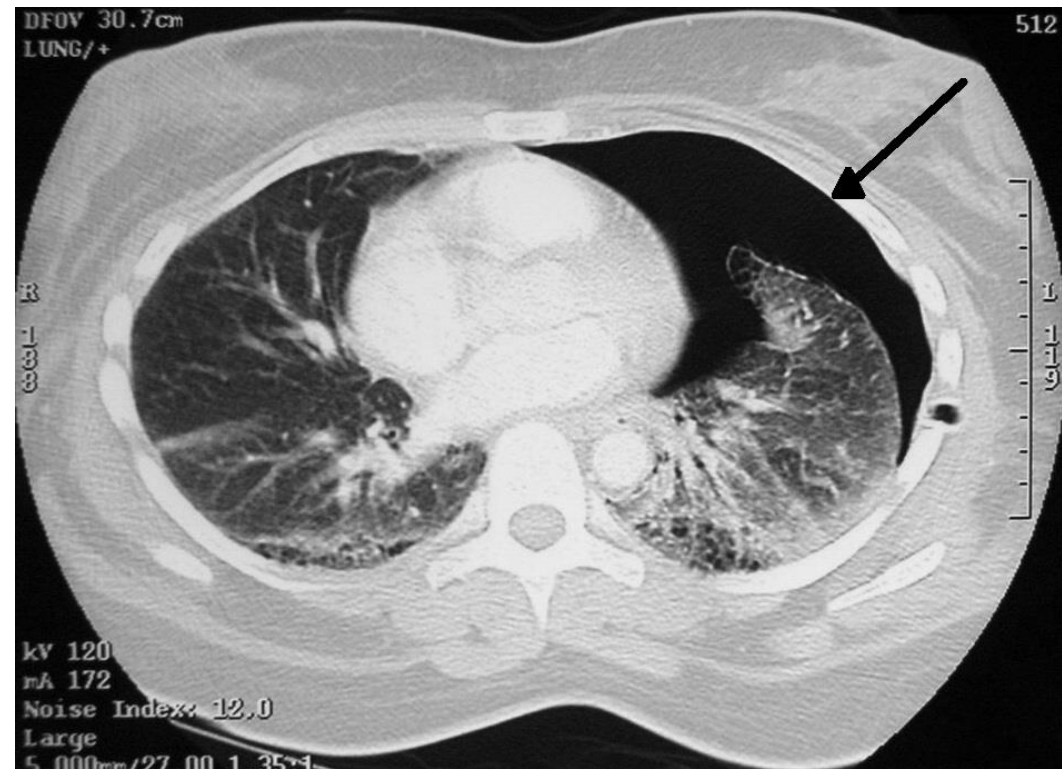
Dechová práce (ΔP , ΔV)

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

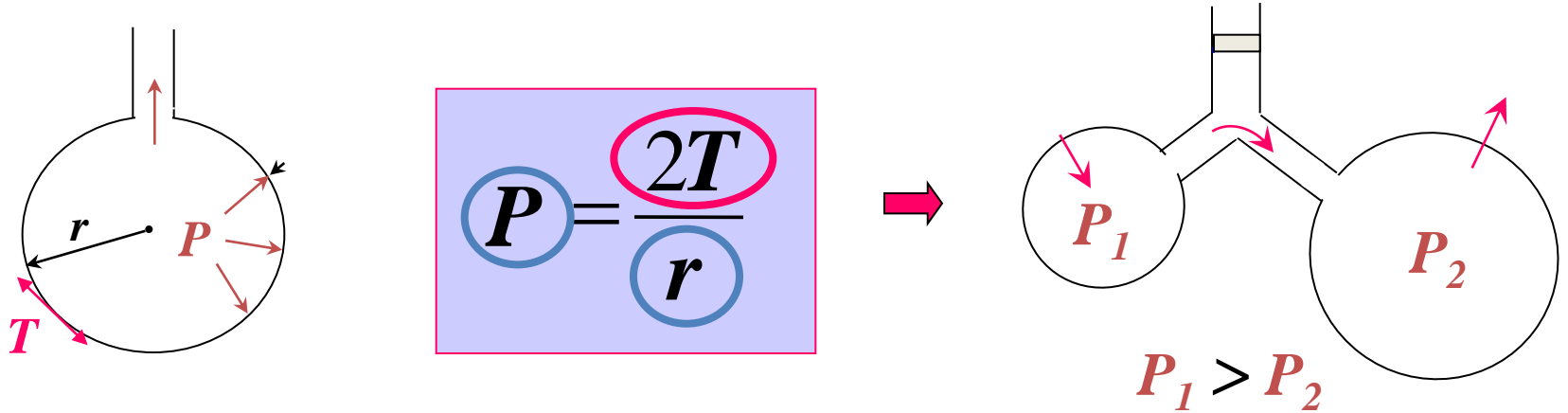


Pneumotorax

- 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

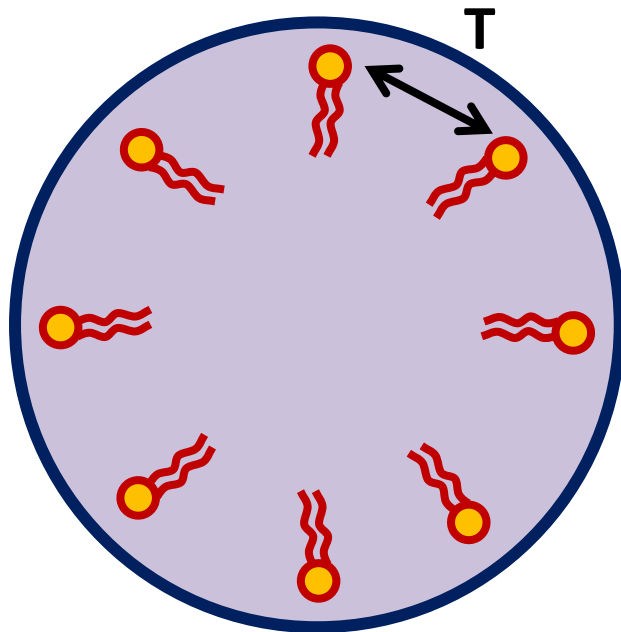
Laplaceův zákon (při konstantní tenzi):

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

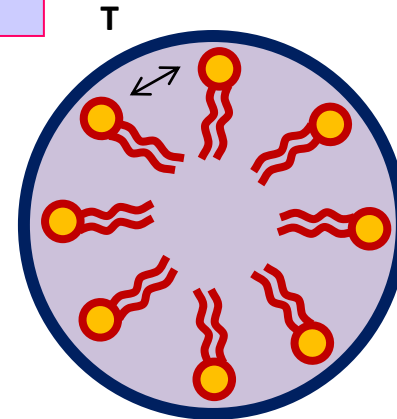
- docházelo by k přesunu vzduchu z menšího alveolu do většího
- kolaps menších alveolů

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

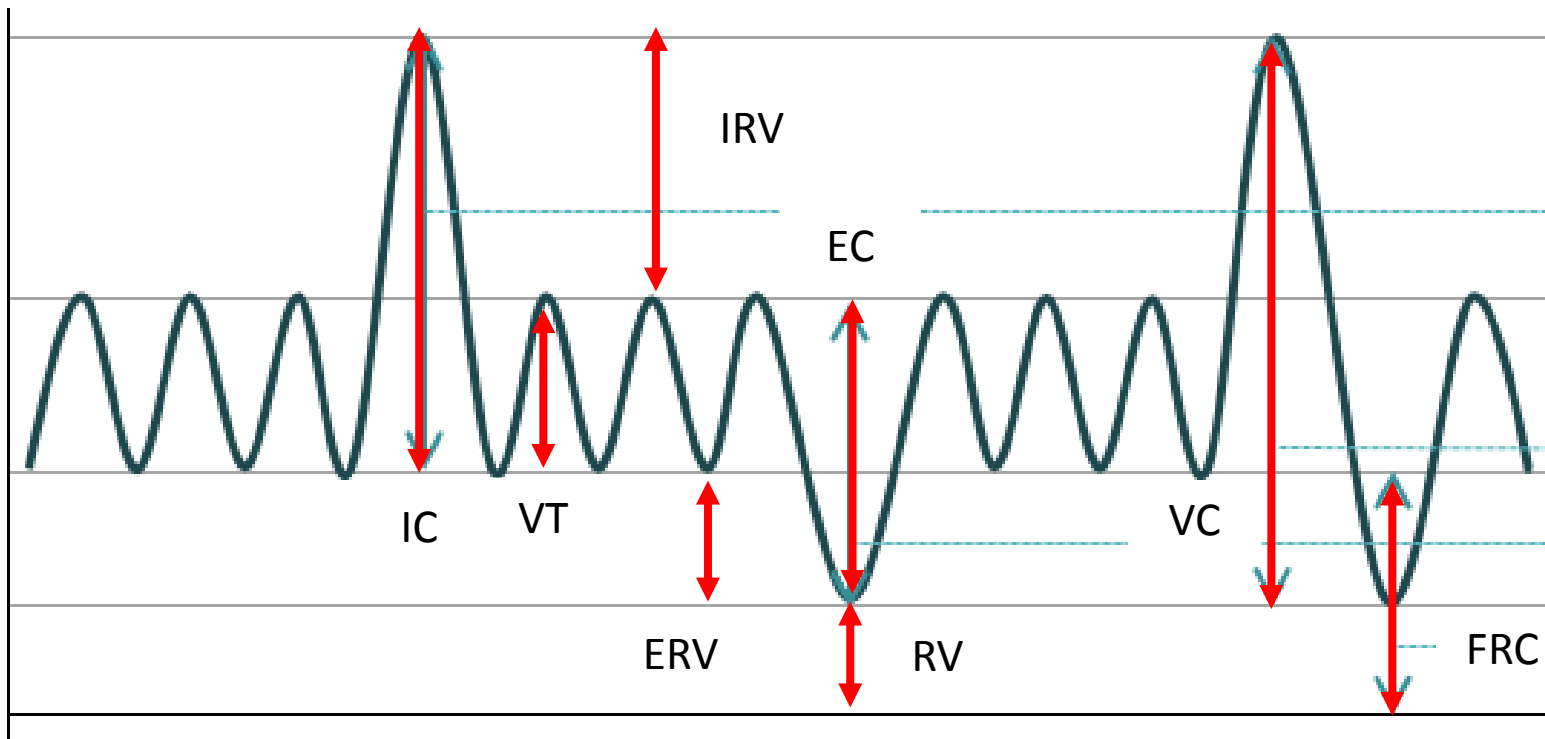
Statické plicní objemy:

- 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

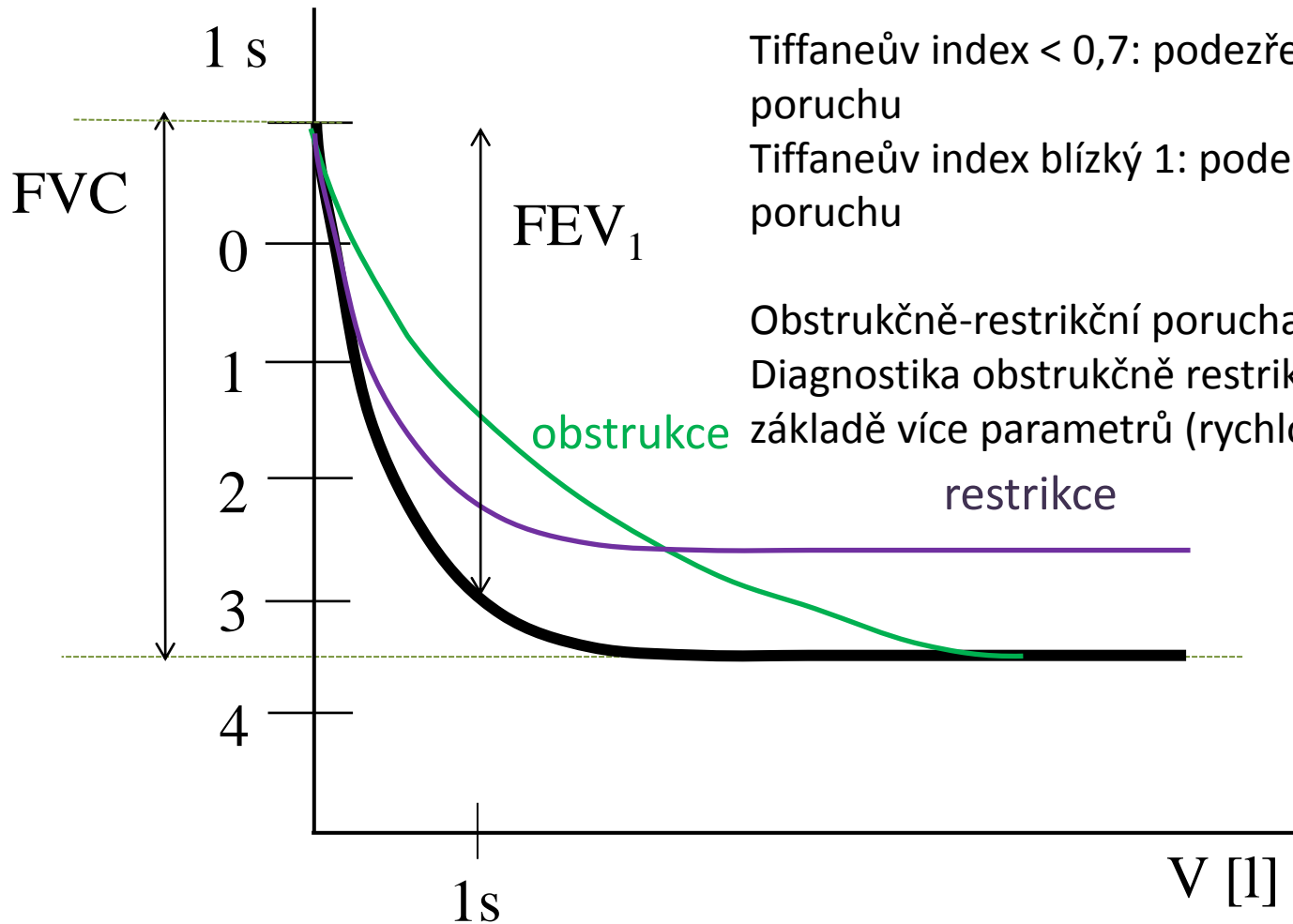
Obstrukce : zvýšený odpor dýchacích cest (astma, bronchitida, otok hlasivek,...)

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

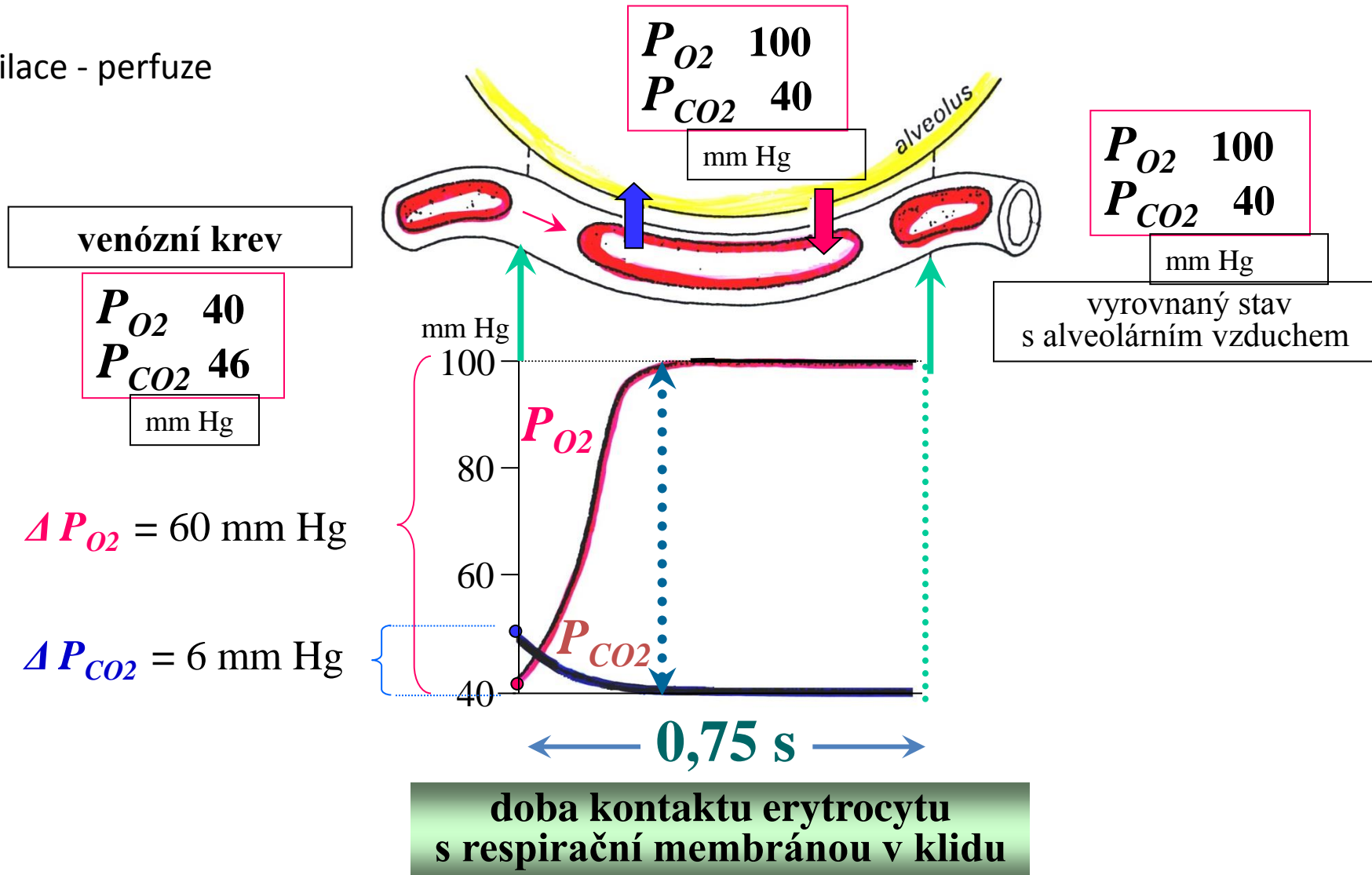
PARCIÁLNÍ TLAKY PLYNŮ SUCHÉHO VZDUCHU NA ÚROVNI MOŘE

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

1 kPa = 7,5 mm Hg (torr)

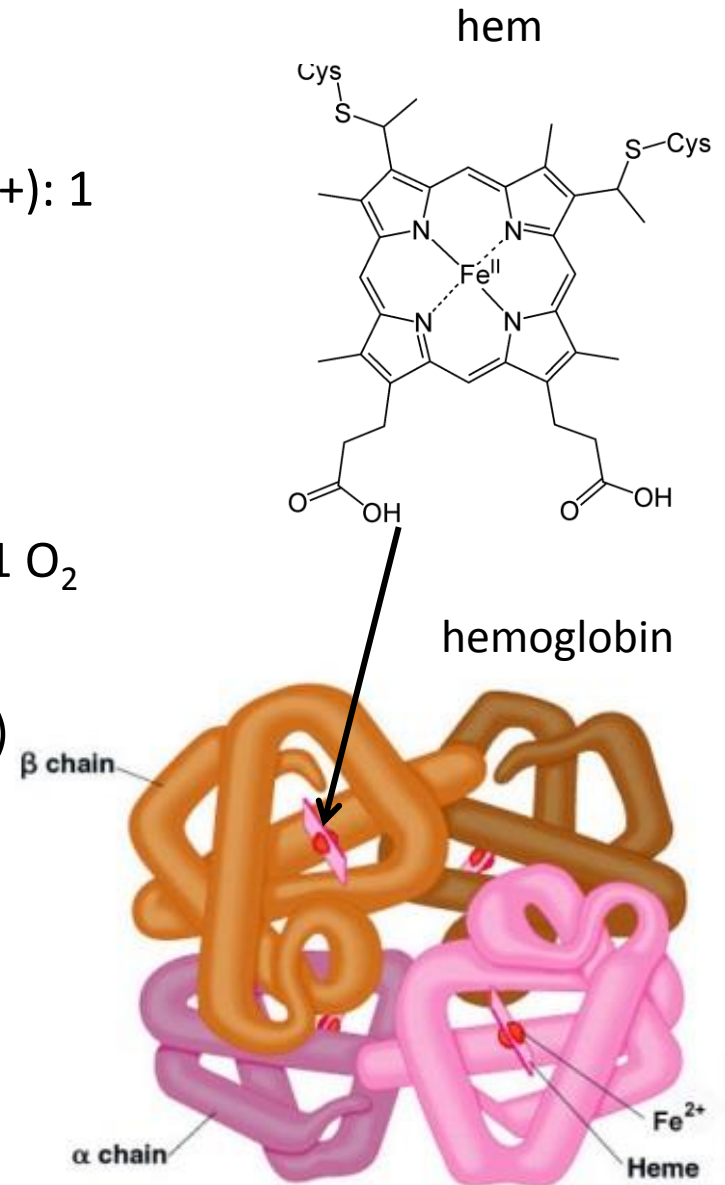
Časový průběh vyrovnávání pO_2 a pCO_2 v kapiláře s alveolárním vzduchem

Ventilace - perfuze



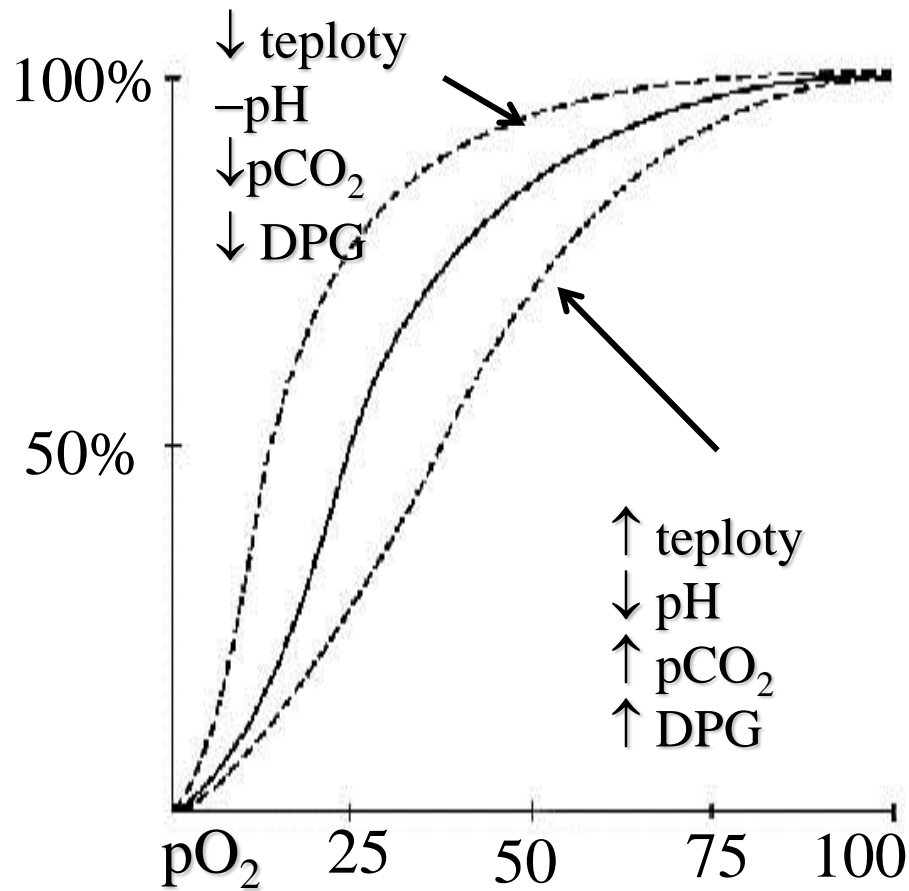
Transport kyslíku

- 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>

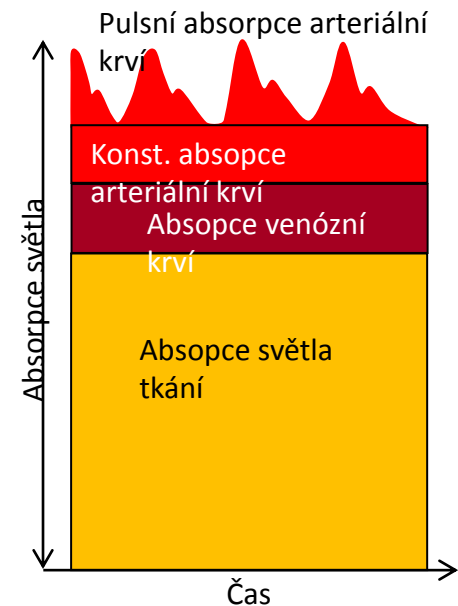
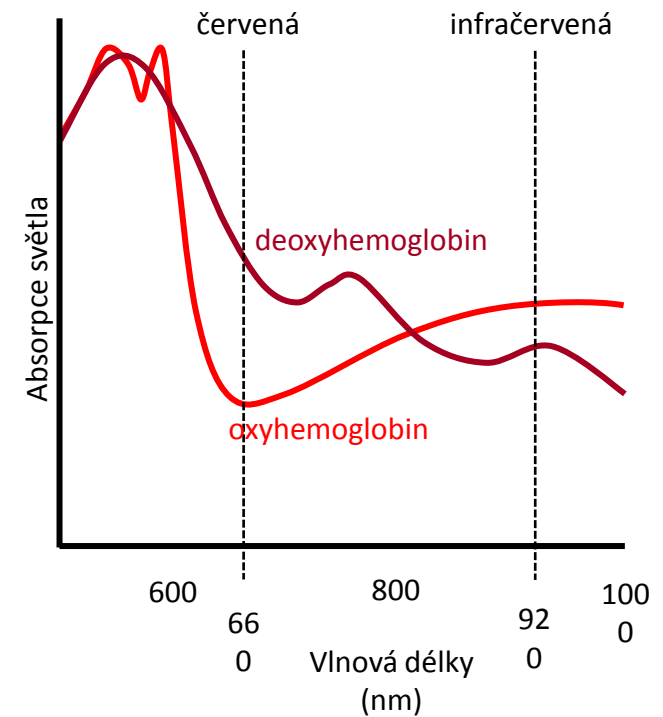
Saturace hemoglobinu kyslíkem



Pulzní oxymetrie



- Je fotometrická metoda neinvazivního měření saturace hemoglobinu kyslíkem v arteriálním řečišti.
- Metoda je založena na hodnocení absorpce vysílaného světla dvou různých vlnových délek po průchodu tkání
- Dosažení saturace **pouze v arteriální** krvi: odečet se hodnoty mezi jednotlivými tepy od hodnoty na vrcholu pulzové vlny. Takto vypočítaná komponenta se pak rovná absorpci proměnlivé složky, kterou je arteriální krev (zastoupení ostatní tkáně je stabilní)



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 – KHCO_3 a NaHCO_3 – 75-80%
- vazba na plazmatické bílkoviny – karbaminohemoglobin a karbaminoproteiny – 15-20%
- **v červených krvinkách:** enzym karbondehydrogenáza – urychluje tvorbu a rozklad H_2CO_3



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,....)

saturace arteriální krvi kolem 95 - 98 %

Hypoxie - saturace: < 85 %

- 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 pCO₂
- snížené pH krve

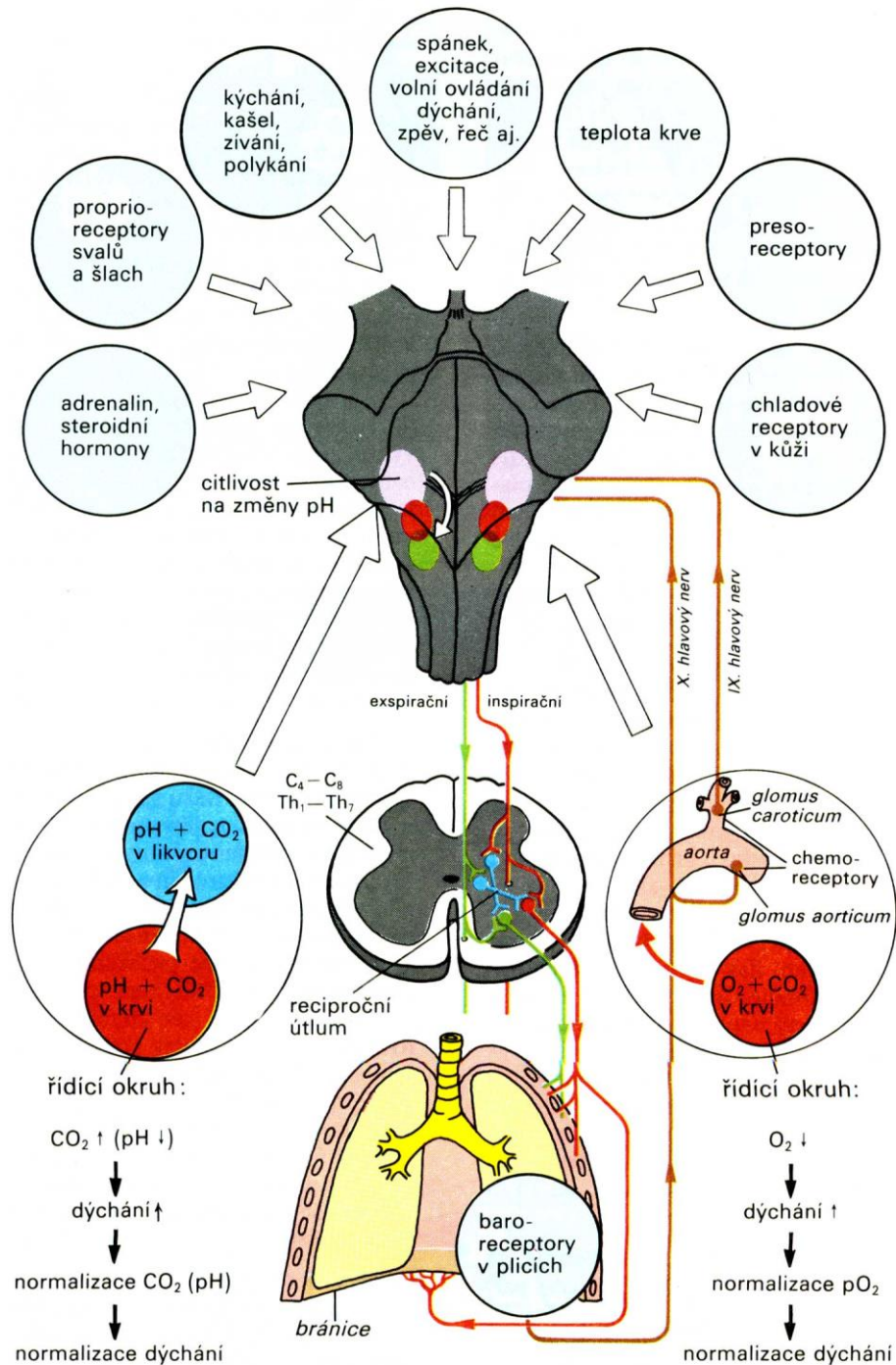
možné příčiny: celková alveolární hypoventilace (snížená ventilace plic nebo prodloužení mrtvého prostoru)

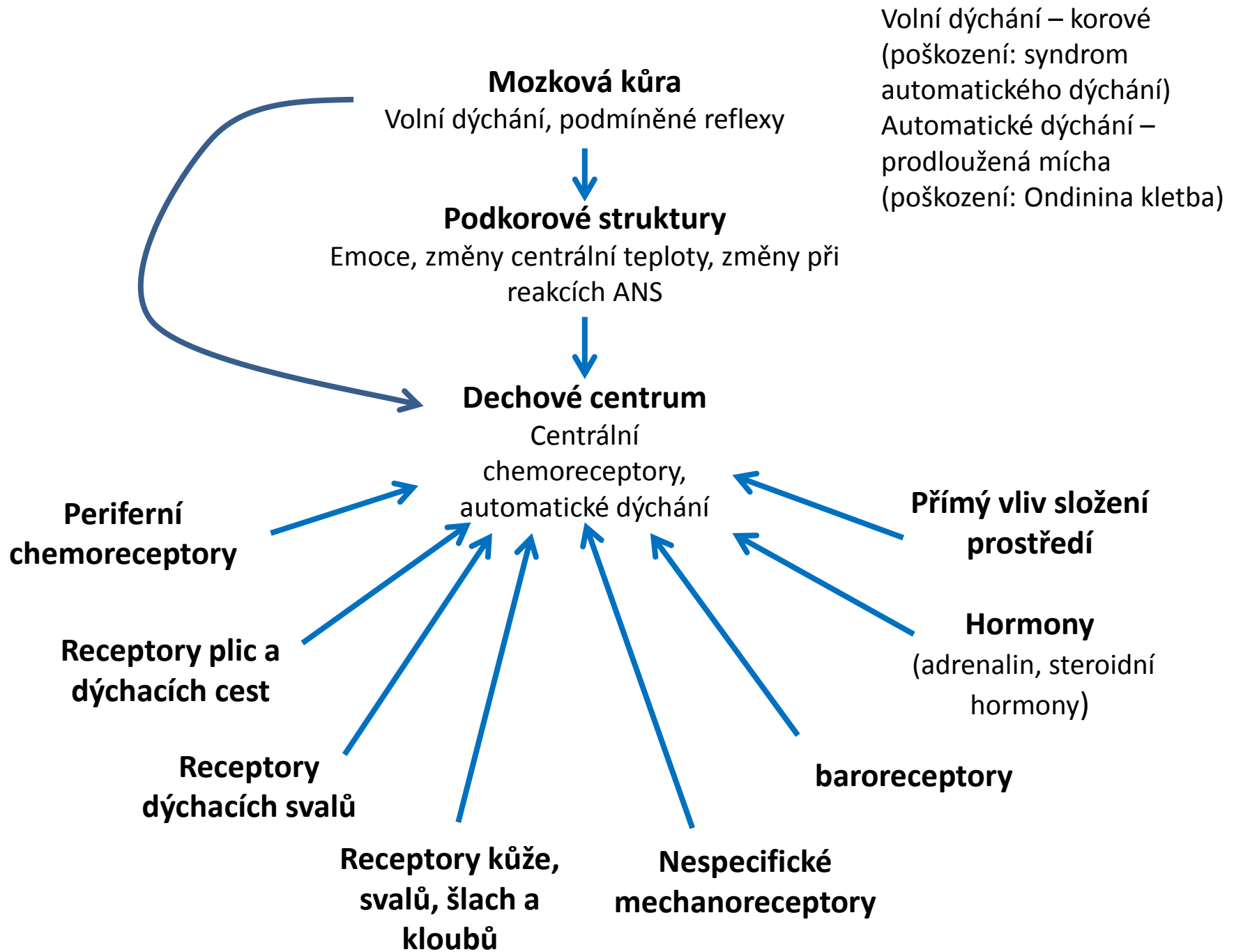
- mírná hyperkapnie (5 -7kPa) vyvolá stimulaci dechového centra (terapeutické využití: pneumoxid = směs kyslík+2 - 5% CO₂)
- hyperkapnie kolem 10 kPa - narkotický účinek CO₂ – útlum dechového centra (předchází bolest hlavy, zmatenost, dezorientace, pocit dušnosti)
- hyperkapnie nad 12 kPa – výrazný útlum dýchání – kóma až smrt

Hypokapnie:

- Hypoxie mozku díky vazokonstrikci cév - ztráta orientace, závratě, parestézie
- Zvýšené pH, při hyperventilaci – mravenčení, tetanické křeče (pokles Ca⁺), porucha vědomí

Regulace dýchání





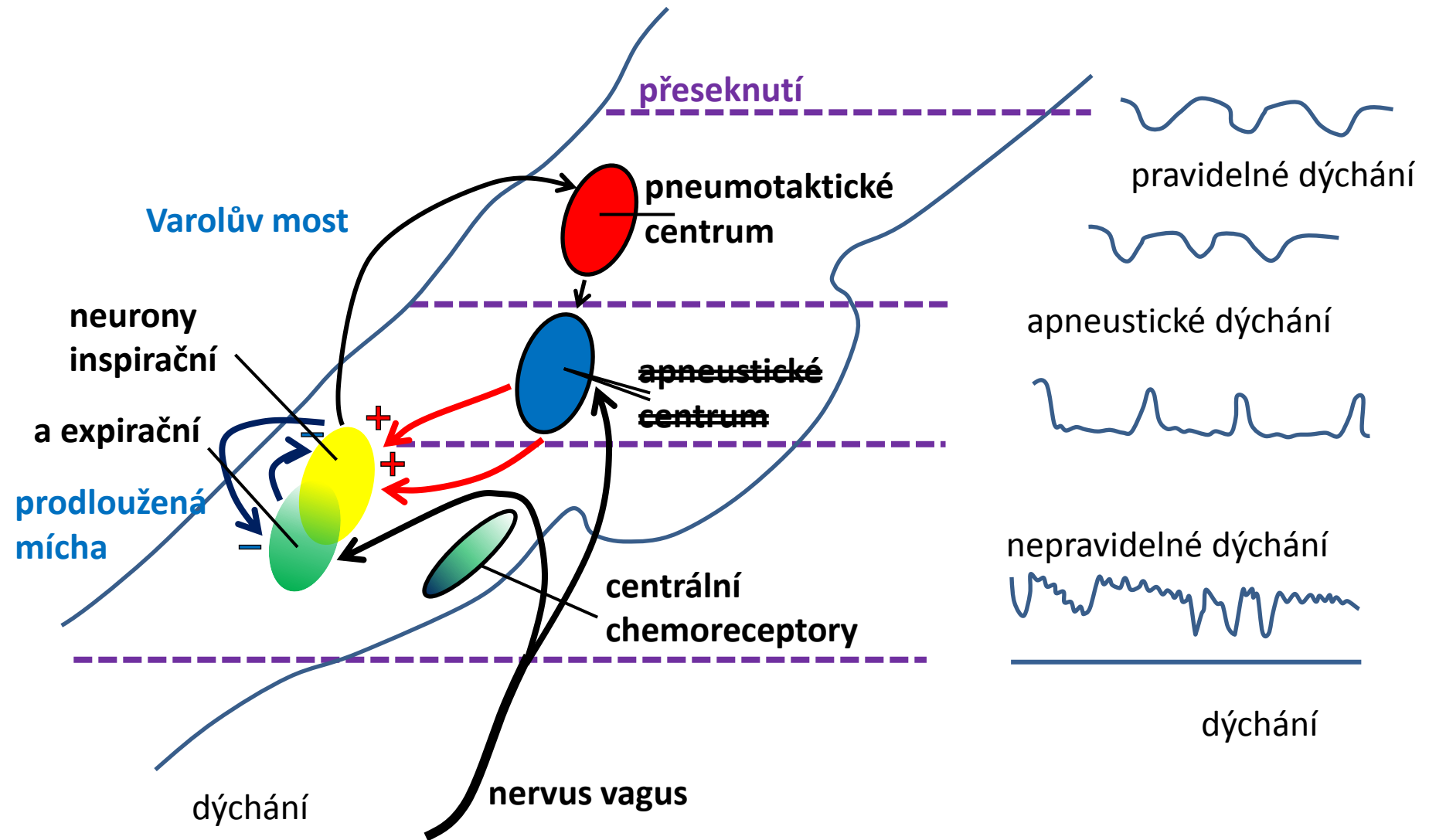
Dechové centrum – nervový regulace

- **Inspirační neurony**
 - aktivní po čas inspira,
 - 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



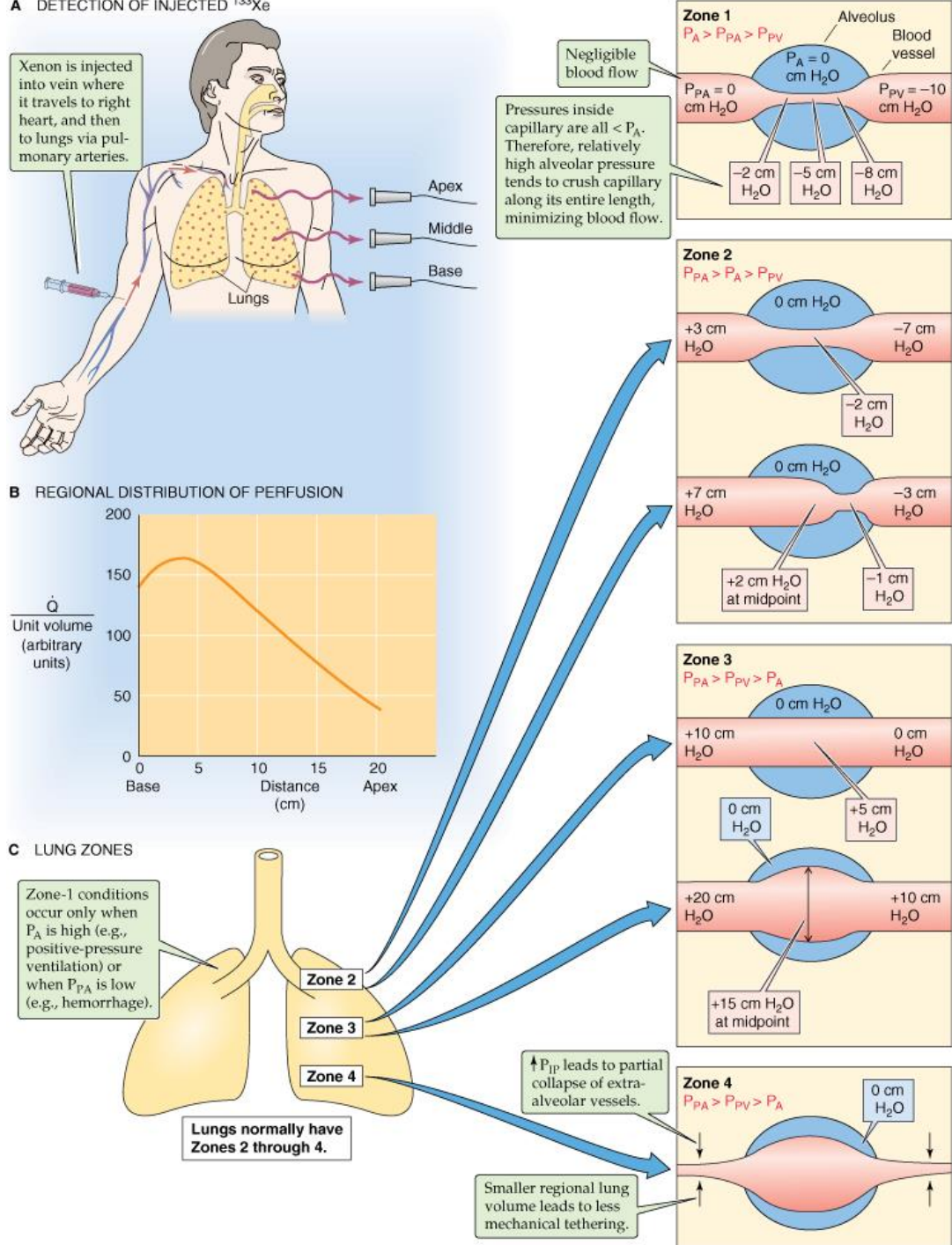
Ochranné a obranné dýchací reflexy

- **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 výdech
- 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

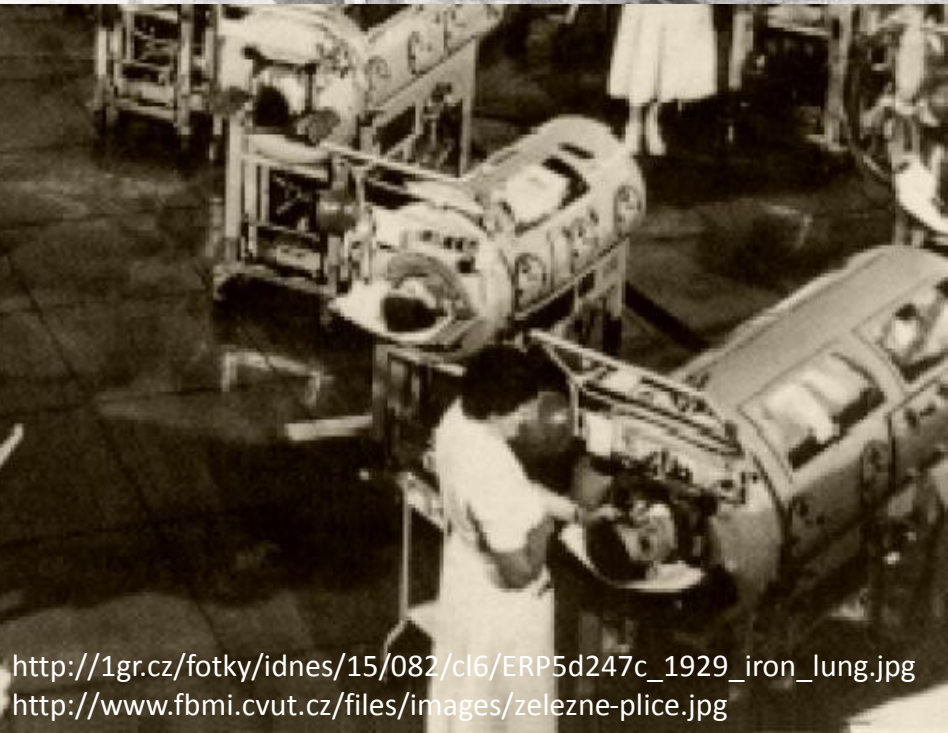
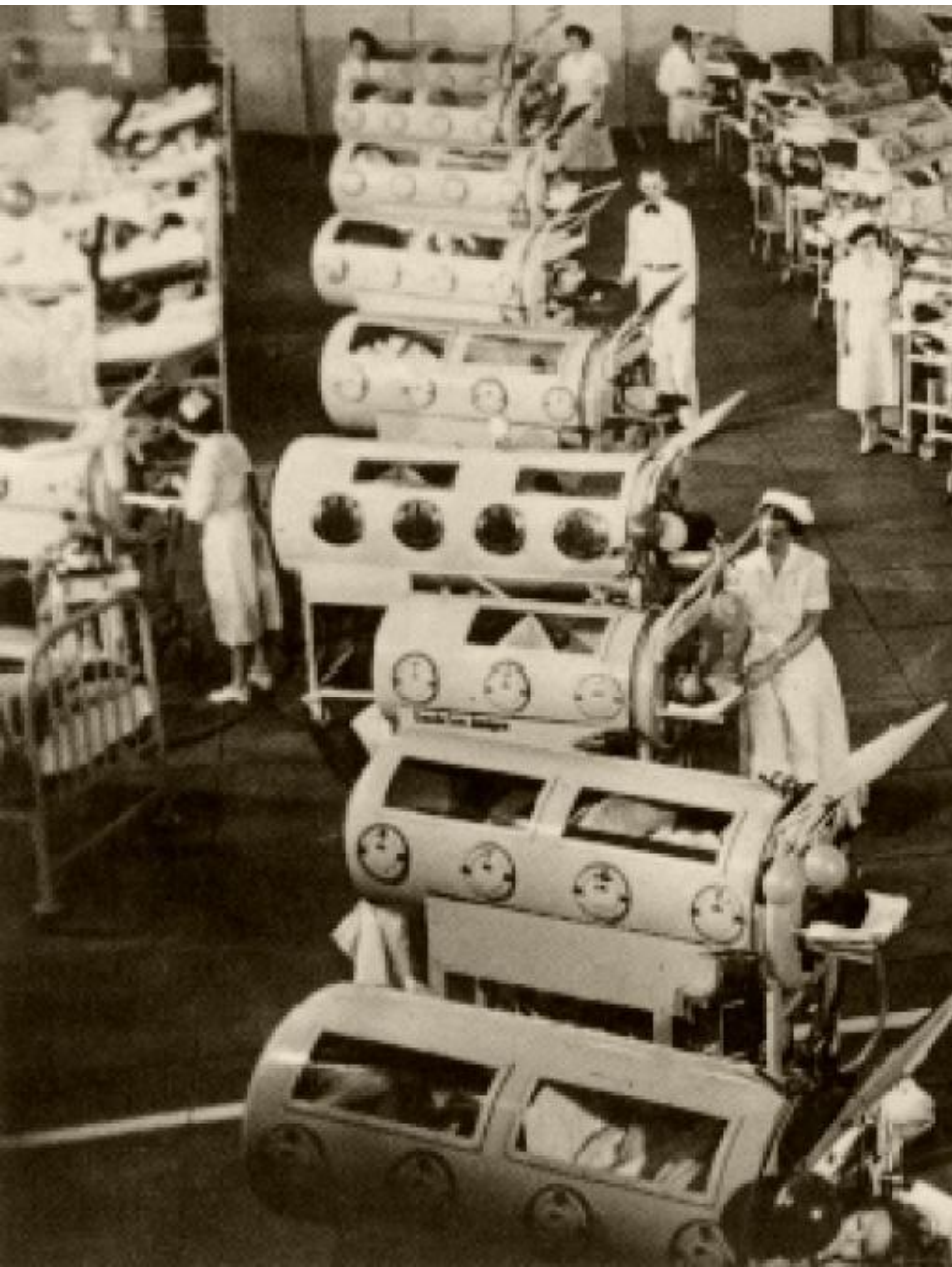
Acclimatized for 2 months

68

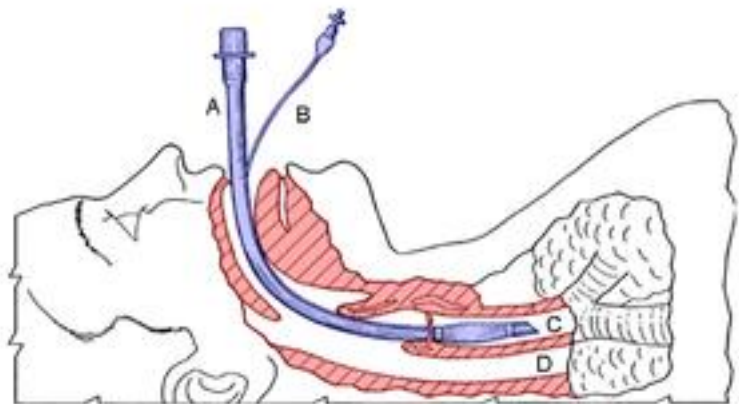
Native living at 4 023 m
but working at 5 182 m above sea level

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