

MUNI
SPORT

Výměna plynů a evoluce dýchání: Mechanismy, regulace a přechod z vody na souš

Julie Dobrovolná

– **Slide 2: Osnova –**

- 1.Úvod do tématu** – význam výměny plynů a základní pojmy
- 2.Mechanismy výměny plynů** – difúze, transport O_2 a CO_2 v krvi
- 3.Hemoglobin a jeho role** – křivka saturace O_2 , vliv pH, teploty a CO_2
- 4.Regulace plicního oběhu** – nervová a hormonální regulace
- 5.Dýchání ve vodě vs. ve vzduchu** – srovnání mechanismů, výhody a nevýhody
- 6.Přechod z vody na souš** – evoluční změny dýchacích orgánů
- 7.Dýchání ve vývoji člověka** – změny během embryonálního vývoje a růstu
- 8.Závěr** – shrnutí klíčových poznatků

Úvod – význam výměny plynů

- Dýchání zajišťuje **přísun kyslíku (O_2)** pro buněčné dýchání a **odvod oxidu uhličitého (CO_2)**, který vzniká jako odpad. Tyto plyny jsou životně důležité: O_2 je potřebný pro tvorbu energie (ATP) v buňkách, zatímco hromadění CO_2 vede ke **kyselé reakci v krvi** (tvorba kyseliny uhličité). **Homeostáza:** Organismus musí udržovat stabilní hladiny O_2 a CO_2 v krvi – to zajišťuje dýchací soustava ve spolupráci s oběhovou soustavou.

Základní pojmy

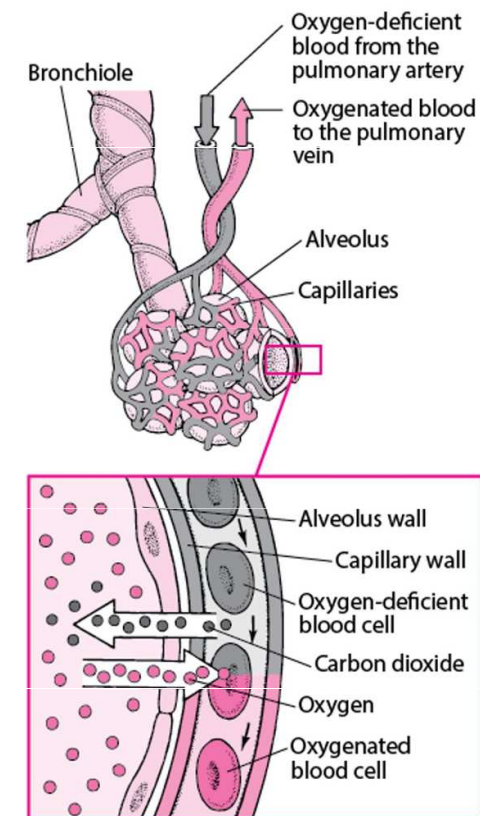
- **Parciální tlak (p):** podíl plynu ve směsi (např. $pO_2 \sim 21$ kPa ve vdechovaném vzduchu). **Difúze:** pohyb molekul z místa s vyšší koncentrací na místo s nižší koncentrací; v plicích plyny difundují podle rozdílu parciálních tlaků. **Alveoly:** drobné plicní sklípky s tenkou stěnou (1 vrstva buněk) obklopené kapilárami; v nich dochází k výměně plynů. **Kapiláry:** nejjemnější cévy, které těsně přiléhají k alveolům, aby O_2 a CO_2 měly minimální difúzní vzdálenost.

Mechanismy výměny plynů

- Množství plynu difundujícího membránou za jednotku času je úměrné ploše membrány a rozdílu koncentrací (parciálních tlaků) a nepřímo úměrné tloušťce membrány. **Plicní přizpůsobení:** Lidské plíce mají ~300 milionů alveol s celkovou plochou ~70–100 m² a extrémně tenkou bariérou mezi vzduchem a krví (~0,5 μm), což umožňuje efektivní difúzi plynů. **Rovnováha difúzí:** Plyny se pohybují pasivně – O₂ z alveol do krve, CO₂ z krve do alveol – dokud se jejich parciální tlaky na obou stranách alveolární membrány nevyrovnají.

Mechanismy výměny plynů

- **Alveolární výměna:** V alveolech (růžové útvary) dochází k difúzi O_2 do krve v plicních kapilárách a současně k difúzi CO_2 z krve do alveolárního vzduchu. **Krevní oběh:** Deoxygenovaná krev přichází do plic plicní tepnou (šedá) – obsahuje málo O_2 a hodně CO_2 . V plicních kapilárách přijímá O_2 (červené krvinky se nasytí kyslíkem) a zbavuje se CO_2 . Okysličená krev pak odtéká plicní žilou (růžová) zpět do srdce a je pumpována do těla. **Rychlost difúze:** Díky velké ploše a malým difúzním vzdálenostem dochází k vyrovnání plynů mezi alveolem a krví velmi rychle (během $\sim 0,25$ s), což je výrazně dříve, než krev kapilárou proteče ($\sim 0,75$ s) – to poskytuje bezpečnostní rezervu pro výměnu plynů při zátěži.



Mechanismy výměny plynů – O_2 a CO_2 – Parciální tlaky v plicích:

- V alveolárním vzduchu $\sim pO_2$ 100 mmHg a pCO_2 40 mmHg, v odkysličené venózní krvi přicházející do plic $\sim pO_2$ 40 mmHg a pCO_2 45 mmHg. Tento gradient zajišťuje vstup O_2 do krve a výstup CO_2 do alveolu. **Perfúzně-ventilační rovnováha:** Pro efektivní výměnu je důležité správné párování ventilace (proudění vzduchu do alveol) a perfuze (průtok krve kapilárami).

Rovnovážný stav: Okysličená krev opouštějící plíce má pO_2 ~ 95 – 100 mmHg (těsně pod alveolární hodnotou) a pCO_2 ~ 40 mmHg, což odpovídá téměř úplnému nasycení hemoglobinu kyslíkem a optimálnímu odstranění CO_2 .

Transport krevních plynů – kyslík – Role hemoglobinu (Hb)

- Většina O_2 v krvi je vázána na hemoglobin v červených krvinkách. Přibližně **97 % O_2** se reversibilně váže na hemoglobin, pouze ~3 % je rozpuštěno volně v plazmě
- Každý hemoglobin má 4 podjednotky a může vázat až 4 molekuly O_2 (oxyhemoglobin). **Saturace hemoglobinu:** Je procento obsazených vazebných míst O_2 ; v arteriální krvi ~97–100%, v žilní ~75%. Vazba O_2 na Hb vykazuje **kooperativitu** – navázání jedné molekuly O_2 usnadňuje vazbu dalších (díky změně konformace Hb).

Transport krevních plynů – CO₂ – Formy transportu CO₂ v krvi

- CO₂ je přepravován třemi způsoby – asi **70 %** ve formě hydrogenuhličitanových iontů HCO₃⁻ (vznikajících reakcí CO₂ s vodou za vzniku H₂CO₃ a H⁺ + HCO₃⁻), **23 %** je vázáno na hemoglobin (na globinový řetězec jako karbaminohemoglobin) a asi **7 %** rozpuštěno jako plyn v plazmě
- **Haldaneův efekt:** Okysličení krve v plicích zvyšuje schopnost uvolnit CO₂ – oxyhemoglobin je slabší vázat CO₂, takže v plicích se CO₂ snáze uvolňuje a je vydechován. Naopak ve tkáních deoxyhemoglobin váže CO₂ ochotněji, což podporuje odsun CO₂ z periferií.

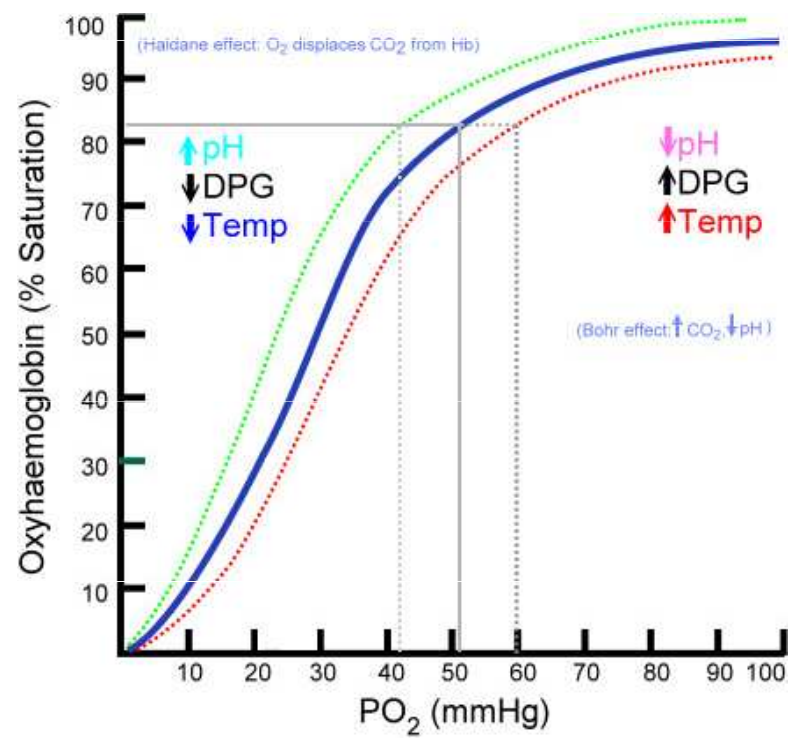
Hemoglobin – křivka saturace O_2 – Dissociační křivka O_2 -Hb

- Graficky zobrazuje závislost saturace hemoglobinu na parciálním tlaku O_2 (pO_2). Má sigmoidní (esovitý) tvar díky kooperativitě – v oblasti nízkého pO_2 (tkáně) se O_2 uvolňuje snadněji, v oblasti vysokého pO_2 (plíce) se Hb rychle saturuje. **Fyziologický význam:** V plicích ($pO_2 \sim 100$ mmHg) je Hb téměř plně saturován. V tkáních s nižším pO_2 ($\sim 20\text{--}40$ mmHg) křivka prudce klesá, takže Hb uvolňuje velké množství O_2 při relativně malém poklesu pO_2 – tím se zajistí dodání O_2 tam, kde je potřeba.

Hemoglobin – posuny křivky (Bohrův efekt)

– Posun doprava

- Při zvýšení $p\text{CO}_2$, snížení pH (acidóze), zvýšení teploty nebo zvýšení 2,3-BPG v erythrocytech se křivka posouvá doprava (červená křivka). Hemoglobin má nižší afinitu k O_2 , což usnadňuje uvolňování O_2 do tkání.
- Tento **Bohrův efekt** je výrazný např. ve svazech při námaze (vysoké CO_2 a teplo) – více O_2 se uvolní tam, kde se tvoří CO_2 .
Posun doleva: Při poklesu $p\text{CO}_2$, zvýšení pH (alkalóze) nebo snížení teploty/2,3-BPG se křivka posouvá doleva (zelená křivka). Hb drží O_2 pevněji (vyšší afinita), což je výhodné např. v plicích (chladnější prostředí, nižší CO_2) pro nabírání O_2 .



Hemoglobin – další faktory – 2,3-BPG (2,3-difosfoglycerát)

- Metabolit v erytrocytech, který snižuje afinitu Hb k O_2 (stabilizuje deoxy formu). Při chronické hypoxii (např. ve vysokých nadmořských výškách) stoupá hladina 2,3-BPG, což posune křivku doprava a usnadní uvolňování O_2 v tkáních. **Fetální hemoglobin (HbF):** Má odlišné řetězce ($\alpha_2\gamma_2$) a vyšší afinitu k O_2 než dospělý HbA ($\alpha_2\beta_2$). Křivka saturace HbF je posunuta doleva vůči HbA, což umožňuje plodu odebírat O_2 z matčiny krve v placentě. Po narození se produkce HbF utlumí a převládne HbA. **Anémie vs. Polycytémie:** Při sníženém množství Hb (anémie) může být saturace normální, ale kapacita přenosu O_2 klesá; naopak zvýšení počtu erytrocytů (polycytémie) zvyšuje celkovou kapacitu přenosu O_2 , ale krev je viskóznější.

Regulace plicního oběhu – charakteristiky – Nízkotlaký oběh:

- Plicní oběh má mnohem nižší tlaky než systémový (přibližně 25/10 mmHg systolický/diastolický vs. 120/80 v systémovém). **Důvod nízkého tlaku:** Plicní cévy mají tenké stěny, malý hladkosvalový tonus a tvoří bohatou síť s velkým průřezem – odpor krevního toku je nízký. **Pružnost:** Plicní kapiláry a arterioly se mohou rozšiřovat a rekrutovat při zvýšení průtoku (např. při fyzické námaze) – plíce pojmu vyšší srdeční výdej, aniž by výrazně stoupl tlak. **Gravitace:** Ve stoje proudí krev více do basálních částí plic (vliv gravitace), zatímco apikální části dostávají méně perfuze – tělo optimalizuje průtok dle polohy.

Regulace plicního oběhu – hypoxická vasokonstrikce – Hypoxická plicní vazokonstrikce (HPV)

- Unikátní jev v plicích – pokles alveolárního pO_2 způsobí konstrikci (stažení) místních plicních arteriol. Tím se krev převádí od špatně ventilovaných alveol k těm lépe okysličeným. **Význam:** Zlepšuje se párování ventilace-perfuze; například při zablokování průdušky se cévy v neventilované oblasti stáhnou a krev se presměruje jinam. **Klinicky:** HPV funguje i při celé plíci (např. pobyt ve vysoké nadmořské výšce s nízkým pO_2) – vede k difuzní vazokonstrikci a zvyšuje tlak v plicnici, což může přispět k výškové plicní hypertenzi či edému.

Regulace plicního oběhu – nervová – Autonomní nervový systém

- Plicní cévy jsou inovovány sympatikem i parasympatikem. **Sympatikus:** Aktivace β_2 -adrenergních receptorů (např. adrenalinem) způsobuje vazodilataci plicních cév (snížení odporu), zatímco stimulace α_1 -receptorů může vyvolat lehkou vazokonstrikci. Celkově však v plicích převládá β_2 efekt – při stresu nebo cvičení se cévy rozšiřují a zlepšuje se průtok krve.
- Parasympatikus (bloudivý nerv):** Může vyvolat mírnou vazokonstrikci a rozšíření průdušinek (působením acetylcholinu na muskarinové receptory), ale jeho vliv na cévy je menší než u systémového oběhu.
- Senzorické reflexy:** Při podráždění receptorů v plicích (např. vdechování dráždivých plynů) se mohou reflexně změnit dechové vzorce i cévní tonus.

Regulace plicního oběhu – humorální – Vazodilatátory

- Oxid dusnatý (NO) uvolňovaný endotelem způsobuje silnou vazodilataci plicních cév – významný pro udržení nízkého odporu. Prostacyklin (PGI_2) také dilatuje cévy a inhibuje agregaci destiček; využívá se terapeuticky u plicní hypertenze. **Vazokonstriktory:** Endothelin-1 je silný vazokonstriktor produkováný endotelem, zvyšuje tlak v plicnici (role v plicní hypertenzi). **Další faktory:** Histamin při alergické reakci může způsobit konstriktci dýchacích cest a zároveň dilataci větších plicních cév, serotonin z trombocytů může přispívat k vazokonstriktci. **Regulace kvůli gravitaci:** Při změnách polohy či tlaku (např. nádech vs. výdech) se mění distribuce krve v plicích – např. hluboký nádech rozšiřuje plicní kapiláry (snížení odporu).

Dýchání ve vodě vs. ve vzduchu – prostředí

– Obsah kyslíku

- Vzduch obsahuje ~21 % O_2 (cca 210 ml O_2 na litr), zatímco voda má mnohem méně rozpuštěného kyslíku – ve sladké vodě ~5–10 ml O_2 na litr (závisí na teplotě a salinitě). To znamená, že vzduch má až **50× vyšší koncentraci O_2** než voda. **Hustota a viskozita:** Vzduch je řidší a méně viskózní než voda – jeho pohyb do plic (ventilace) stojí méně energie. Naopak pohánět vodu přes žábry je energeticky náročnější, protože voda je ~800× hustší než vzduch. **Difúze plynů:** O_2 a CO_2 difundují ve vodě pomaleji (CO_2 je dobře rozpustný, O_2 hůře) – vzdušné dýchání umožňuje rychlejší difúzi plynů. **Teplotní vliv:** V teplé vodě klesá rozpustnost O_2 , takže vodní živočichové mohou trpět nedostatkem kyslíku v teplých podmínkách.

Dýchání ve vodě – žábry – Struktura žaber

- Jsou to vysoce členité orgány s lamelami bohatě prokrvenými kapilárami, umístěné na žaberních obloucích (např. u ryb pod skřelemi). Velká plocha lamel kompenzuje nízký obsah O_2 ve vodě. **Protiproudý mechanismus:** Voda protéká přes lamely v opačném směru, než proudí krev kapilárami žaber – tzv. **counter-current exchange**. Tento mechanismus udržuje po celé délce lamely gradient pro difúzi O_2 do krve (a CO_2 do vody). **Efektivita:** Díky protiproudu mohou ryby extrahovat až ~80–90 % O_2 z vody protékající žábry, zatímco bez protiproudu (paralelní tok) by získaly maximálně ~50 %. **Ventilace žaber:** Ryby aktivně nasávají vodu tlamou a vytlačují ji přes žábry ven – to zajišťuje neustálý kontakt čerstvé okysličené vody s lamelami, nutný kvůli nízké koncentraci O_2 ve vodě.

Dýchání ve vodě – výhody a nevýhody – Výhody vodního dýchání

- Voda udržuje **vlhkost dýchacího povrchu** – nehrozí vyschnutí žaber (naopak jsou mimo vodu křehké). Žábry mohou navíc vylučovat odpadní látky (např. amoniak) přímo do vody.

Nevýhody: Nízký obsah kyslíku znamená, že živočich musí filtrovat velké objemy vody. Energetická náročnost ventilace je vysoká – odhaduje se, že ryby mohou spotřebovat 10–20 % energie jen na dýchání. **Další omezení:** Ve vodě je obtížné udržet stálou tělesnou teplotu (většina vodních dýchajících živočichů jsou ektotermové), metabolismus musí být relativně nižší. Když voda stagnuje nebo poklesne O_2 (např. v noci rostliny spotřebovávají O_2), ryby mohou trpět hypoxií.

Dýchání ve vzduchu – plíce – Plíce suchozemských obratlovců

- Vzdušnicovci (hmyz) mají difúzní systém trachejí, ale u obratlovců se vyvinuly plíce – vnitřní orgány chráněné před vysycháním.

Struktura plic: U savců velmi členitá (bronchy → bronchioly → alveoly) s obrovskou plochou pro difúzi. U plazů a obojživelníků jednodušší vaky s menším členěním (u žab stěny plic sítěmi sept).

Ventilace plic: Probíhá pomocí dýchacích pohybů – u savců stahem bránice a mezižeberních svalů vzniká podtlak (sací pumpa), u žab naopak pumpováním vzduchu pomocí hltanu (tlaková ventilace).

Dýchání ve vzduchu – plíce – Plíce suchozemských obratlovců

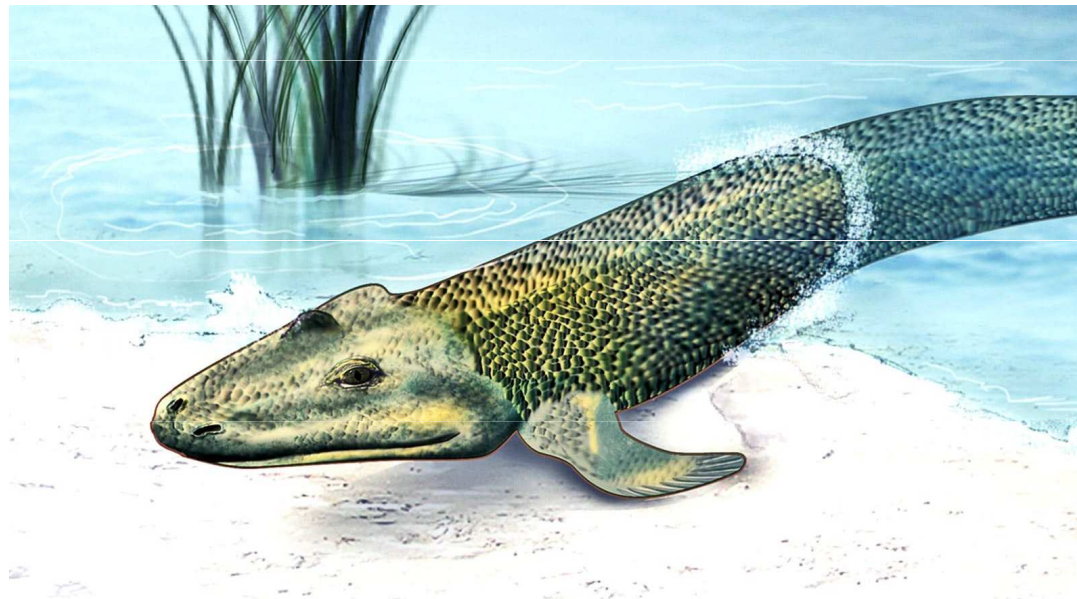
- **Výhody vzdušného dýchání:** Vysoký obsah O_2 umožňuje pokrýt i nároky endotermů (savci, ptáci) s vysokým metabolismem. Ventilace vzduchu je energeticky levnější než ventilace vody.
- Nevýhody:** Vysychání – dýchací povrchy musí být vlhké, což vede ke ztrátám vody odpařováním. Proto mnozí suchozemští živočichové (např. pouštní) dýchají převážně nosem, kde se vzduch zvlhčí a oteplí, a mají adaptace k omezení ztrát vody.

Přechod z vody na souš – evoluční výzvy

- Přechod obratlovců na souš (Devon, před ~370 mil. let) vyžadoval **vývoj plic** pro dýchání vzduchu, neboť žábry na vzduchu kolabují a vysychají. **Raní tetrapodi:** Předci čtyřnožců (např. ryby lalokoploutvé) měli již jednoduché plicní vaky nebo swim bladder (plynový měchýř) sloužící jako pomocný dýchací orgán. **Homologie:** Plynový měchýř ryb je evolučně homologický plicím tetrapodů – u primitivních ryb sloužil k nadechování atmosférického vzduchu v teplých stojatých vodách chudých na O_2 .

Přechod na souš - evoluční výzvy

Tiktaalik (slavný přechodný fosilní rod) a jeho současníci měli pravděpodobně jak žábry, tak jednoduché plíce. Evoluce plic umožnila využít bohatý kyslík vzduchu a otevřela cestu k osídlení souše, ale vyžádala si také změny v oběhové soustavě a regulaci vody v těle.



Přechod z vody na souš – anatomické změny – Oběhová soustava

- U ryb jednoduché srdce (2 oddíly) pumpuje krev skrz žábry do těla. U tetrapodů se objevuje oddělený **plicní oběh** – srdce se rozdělilo na více oddílů (u obojživelníků 3, u savců/ptáků 4) pro účinnější oddělení okysličené a odkysličené krve. **Kůže:** Musela ztratit dýchací funkci (u většiny druhů) a stát se nepropustnou pro vodu, aby organismus na souši nevysychal. To kladlo veškerý nárok na plíce (s výjimkou obojživelníků, kteří využívají zčásti i kůži). **Mechanika dýchání:** Vyvinul se hrudní koš a dýchací svaly pro aktivní nasávání vzduchu (např. žebra u plazů slouží k rozepínání plic). **Regulace dýchání:** Musela se adaptovat na vzdušné prostředí – vznikly reflexy proti přetlaku či podtlaku v plicích, citlivost dechového centra na $p\text{CO}_2$ se stala klíčovou pro řízení ventilace.

Přechod z vody na souš – obojživelníci – Dvoustupňový život

- Obojživelníci (žáby, čolci) ilustrují přechod – larvy (pulci) dýchají ve vodě žábami a kůží, dospělci převážně plícemi. **Metamorfóza:** Pulci mají vnější (u žab krátce i vnitřní) žábry; jak rostou, vyvíjejí se jim jednoduché vakovité plíce a žábry se zmenšují až zaniknou
- Mladá žába pak začíná dýchat vzduch (občas vylezuje nad hladinu už během metamorfózy). **Anatomie plic žab:** Jednoduché vaky s omezeným vnitřním členěním, ventilace pumpováním pomocí hrdla (pozitivní tlak – polykání vzduchu). **Doplňkové dýchání:** Dospělé žáby stále dýchají i kůží (kožní difúzí přijímají část O_2 a hlavně vylučují CO_2), což je možné v vlhkém prostředí. Tento mix dýchání odráží evoluční mezistupeň mezi vodním a suchozemským způsobem.

Přechod z vody na souš – plazi a savci – Plazi

- Jejich plíce jsou členitější než u žab (vnitřní septa zvyšující plochu). Dýchají podtlakově – svaly rozšiřují hrudník, nasávají vzduch. Kůže plazů je suchá a rohovitá, takže dýchání kůží minimální (výjimkou někteří vodní, např. mořští hadi získají část O_2 přes kůži). Plazi mají proměnlivou tělesnou teplotu a nižší metabolismus, proto nepotřebují tak intenzivní ventilaci – často dýchají přerušovaně a mohou zadržet dech na dlouho. **Savci a ptáci:** Vysoce výkonné plíce; savci alveoly, ptáci protiproudý průtok vzduchu v parabronších (nejefektivnější dýchání). 4-dílné srdce umožňuje kompletní oddělení krevních okruhů – maximální okysličení krve. Endotermní metabolismus vyžaduje stálý vysoký přísun O_2 , proto savci a ptáci mají nejrozvinutější dýchací soustavu (např. bránice savců, dvoufázové dýchání ptáků).

Dýchání ve vývoji člověka – prenatální období – Plod v děloze nedýchá plícemi

- Výměnu plynů zajišťuje placenta. **Placenta jako „plíce“**: Matčina krev v placentě předává O_2 a odvádí CO_2 od fetální krve. **Fetální oběh**: Krev obohacená O_2 jde pupeční žilou do plodu, většina míří přes ductus venosus do dolní duté žíly, pak do pravé síně srdce. Odtud se většina přelévá foramen ovalem do levé síně a do levé komory, odkud je vypuzena aortou do těla plodu. **Obtok plic**: Plodové plíce jsou kolabované a plné tekutiny, odpor v nich je vysoký. Většina krve z pravé komory jde přes ductus arteriosus (spojka) z plicnice do aorty, čímž obejde nefunkční plíce. Tímto chytrým oběhem dostane plod okysličenou krev do orgánů, aniž by dýchal.

Dýchání ve vývoji člověka – narození – První nádech

- Po porodu se novorozenec poprvé nadechne a plíce se roztáhnou. Vdechnutí vzduchu **prudce snižuje odpor v plicním řečišti** (roztažení cév) a plicní tepny začnou proudit velké množství krve. **Uzávěr zkratů:** Zvýšený průtok plic a návrat okysličené krve do levé síně zvyšuje tlak vlevo, což uzavírá foramen ovale (septum se přitiskne a později sroste). Ductus arteriosus se do 1-2 dnů uzavírá svalovou kontrakcí stěny (a později vazivově zarůstá) vlivem vyššího pO_2 a změny hormonů. **Adaptace novorozence:** Plíce začínají plně okysličovat krev; dechová frekvence novorozence je vysoká (~40-60/min) a postupně se stabilizuje. Přebytná tekutina z plic je vstřebána nebo vykašlána. Novorozenec má ještě **fetální hemoglobin (HbF)**, který pomáhá získat O_2 z mateřské krve – během několika měsíců je nahrazen dospělým HbA.

Dýchání ve vývoji člověka – postnatální vývoj – Růst plic

- Plíce novorozence mají asi 20–50 milionů alveol (cca 15 % dospělého počtu). Alveoly se množí hlavně do ~2 let věku a pak pomaleji do ~8 let, kdy je jich kolem 300 milionů (dospělá hodnota). S tím roste i plocha pro difúzi a kapilární síť. **Zrání plic:** Počet malých dýchacích cest (bronchiolů) a kapilár se zvyšuje, stěny alveolů ztenšují. Vyvíjí se plně **surfaktant** (látek snižující povrchové napětí, produkován už od 24.–34. týdne gestace) – udržuje alveoly otevřené. **Dětství:** Dýchání je relativně rychlejší, hrudník poddajnější. Postupně se orientuje hrudní kuželovitý tvar novorozence do válcovitého dospělého, zlepšuje se efektivita dýchacích pohybů. **Senioři:** Ve stáří alveoly mírně ztrácí elasticitu, může klesat vitální kapacita; dýchání se může mělkce zrychlovat, aby kompenzovalo nižší výměnu.

Případové studie lidských adaptací na extrémní podmínky

- **Vysokohorská hypoxie:** Obyvatelé Tibetu, And (např. Kečuové, Ajmarové) a Etiopie (Amharové) již po tisíce let žijí ve výškách $>3\,500$ m n. m., kde je nízký tlak O_2
- Tibetská populace se evolučně adaptovala odlišně – trvale žijící Tibeťané mají **překvapivě nízké hodnoty hemoglobinu (Hb)** navzdory extrémní nadmořské výšce
- Naproti tomu **andští horalé** vykazují **polycytémii** (výrazně zvýšené Hb ≈ 19 g/dl u mužů v Andách vs 15–16 g/dl u Tibeťanů), což zlepšuje přenos O_2 , ale zvyšuje viskozitu krve a zdravotní rizika
- **Etiopští** obyvatelé hor představují třetí model – mají relativně **umírněné hodnoty Hb** a naopak **vyšší saturaci O_2** v krvi, což naznačuje odlišný způsob vyrovnání se s hypoxií.

Závěr – Shrnutí I

- Výměna plynů probíhá difúzí přes alveolokapilární membránu na základě rozdílů parciálních tlaků O_2 a CO_2 . Kyslík je v krvi přenášen zejména hemoglobinem (97% vázán), jehož schopnost vázat a uvolňovat O_2 je ovlivněna pH, CO_2 a teplotou (Bohrův efekt). CO_2 je transportován jako bikarbonát, karbaminohemoglobin a rozpuštěný plyn. **Plicní oběh** má nízký tlak a odpor; je regulován lokálně (hypoxickou vasokonstrikcí) i nervově a humorálně k optimalizaci okysličení krve.

Závěr – Shrnutí II

- **Dýchání ve vodě vs. vzduchu:** Žábry s protiproudem umožňují život ve vodě chudé na O_2 , ale za cenu vyšší práce; plíce využívají bohatý kyslík vzduchu a levnější ventilaci, avšak vyžadují ochranu před vysycháním. **Evoluce dýchání:** Přejít na souš vedl k vývoji plic a změnám oběhu; obojživelníci dokládají hybridní strategie dýchání. **Vývoj člověka:** Plod využívá matčiny plíce přes placentu, po narození se adaptuje na vlastní dýchání a během dětství plíce rostou a dozrávají do plné kapacity

